

# 中国自动化学会通讯

COMMUNICATIONS OF CAA

第10期

2024年10月

第45卷 总第253期

主办：中国自动化学会

<http://www.caa.org.cn>

E-mail: [caa@ia.ac.cn](mailto:caa@ia.ac.cn)

京内资准字2020-L0052号

我和优博有个约会

无人艇集群协同合围理论与应用研究 / 胡斌斌 P004

问题特性与知识迁移联合辅助的进化特征选择方法及其应用 / 陈科 P010

多智能体网络下的分布式优化算法研究 / 石重霄 P020



扫描二维码  
关注官方微信



扫描二维码  
关注官方微博



# 中国自动化学会通讯

Communications of CAA



主管单位 中国科学技术协会  
主办单位 中国自动化学会  
编辑出版 中国自动化学会办公室



关注官方微信



关注官方微博

主 编 | 郑南宁 CAA 理事长、中国工程院院士、  
西安交通大学教授

副 主 编 | 王飞跃 CAA 监事长、中国科学院自动化  
研究所研究员

杨孟飞 CAA 副理事长、中国科学院院士、  
中国空间技术研究院研究员

陈俊龙 CAA 副理事长、欧洲科学院院士、  
华南理工大学教授

编 委 | (按姓氏笔画排列)

丁进良 王 飞 王占山 王兆魁 王庆林  
王 坛 邓 方 石红芳 付 俊 吕金虎  
乔 非 尹 峰 刘成林 孙长生 孙长银  
孙彦广 孙富春 阳春华 李乐飞 辛景民  
张 楠 张 俊 陈积明 易建强 周 杰  
赵千川 赵延龙 胡昌华 钟麦英 侯增广  
姜 斌 祝 峰 高会军 黄 华 董海荣  
韩建达 谢海江 解永春 戴琼海

刊名题字 | 宋 健

地 址 | 北京市海淀区中关村东路 95 号

邮 编 | 100190

电 话 | (010) 8254 4542

传 真 | (010) 6252 2248

E-mail: caa@ia.ac.cn

http://www.caa.org.cn

印刷日期 | 2024 年 10 月 31 日

发行对象 | 中国自动化学会会员及自动化领域科技工作者

## 本刊声明

◆ 为支持学术争鸣, 本刊会登载学术观点彼此相左的不同文章。来稿是否采用并不反映本刊在学术分歧或争论中的立场。每篇文章只反映作者自身的观点, 与本刊无涉。



## 主编的话



郑南军

在自动化领域，青年学者们以其创新思维和活力，正成为推动科技进步的重要力量。为了更好地激发他们的潜力，搭建一个深入探讨和交流的平台显得尤为重要。“我和优博有个约会”系列活动是中国自动化学会为自动化领域优秀青年学者特别打造的学术交流和成果展示平台，旨在开拓青年学者学术视野，激发学术热情，培养科学思维，加强自动化领域青年科技人才的交流合作，有效促进自动化、信息与智能科学领域的交叉研究，在这个过程中，我们期待每一位参与者都能发挥自己的专长，共同推动自动化学科的进步。

本期专刊聚焦于自动化领域的前沿话题，为大家带来了新加坡南洋理工大学博士后胡斌斌的“无人艇集群协同合围理论与应用研究”，郑州大学副研究员陈科的“问题特性与知识迁移联合辅助的进化特征选择方法及其应用”，东北大学副教授石重霄的“多智能体网络下的分布式优化算法研究”3篇专题文章。这些文章不仅涵盖了自动化学科的多个关键领域，还展示了学科交叉融合的成果，以及科技创新的最新动态。

我们相信，通过这样的交流，可以凝聚科研力量，激发新的研究思路，同时也为青年科技人才提供一个展示学术引领作用的平台。我们诚邀自动化领域的青年学者们加入我们，一起探索自动化领域的无限可能。在此向贡献稿件的各位青年学者表示衷心的感谢！



## 专题 / Column

- 004 无人艇集群协同合围理论与应用研究 / 胡斌斌  
010 问题特性与知识迁移联合辅助的进化特征选择方法及其应用 / 陈科  
020 多智能体网络下的分布式优化算法研究 / 石重霄

## 学者风采 / Scholars

- 028 张钹院士：天才的决心  
042 封锡盛院士：揭开海洋神秘面纱的探索者

## 观点 / Viewpoint

- 044 郑南宁院士：当教育插上人工智能的翅膀

- 047 徐扬生院士：融汇创新 自主培养 为我国高等教育高质量发展创造经验

## 学术前沿 / Academic Frontier

- 053 含有输入时滞的非线性系统的输出反馈采样控制 / 马倩 盛兆明 徐胜元  
066 生成式 AI 的大模型提示工程：方法、现状与展望 / 黄峻 林飞 杨静 王兴霞 倪清桦 王雨桐 田永林 李娟娟 王飞跃

## 学会动态 / Activities

- 081 2024 年第三期 CAA “企·话”沙龙——石化产业新形势下的机遇与挑战在北京成功召开







P081



P085

086 中国自动化学会青年菁英系列活动“智能生态与表型监测”论坛顺利举办

088 数智融合 赋能新质生产力——2024 全国第二十九届自动化应用技术学术交流会圆满召开

### 党建强会 / Party Building

090 开创我国高质量发展新局面



P088

### 形势通报 / Voice

097 网络数据安全条例

104 国家重点研发计划“工程科学与综合交叉”重点专项管理实施细则（暂行）



P089

数智融合 赋能新质生产力 2024全国第二十九届自动化应用技术学术交流会（CAAC2024）  
2024年全国有色金属工业电气及自动化、智能化、信息化学术会议  
第六届冶金人工智能论坛



P088

# 无人艇集群协同合围理论与应用研究

文 / 新加坡南洋理工大学 胡斌斌

导读：2024年3月26日，新加坡南洋理工大学胡斌斌做客“CAA 我和优博有个约会”活动，为大家带来一场题为“无人艇集群协同合围理论与应用研究”的精彩报告。自主无人艇集群以其高效率、广覆盖、低成本等特点，近年来在海洋任务中扮演越来越重要的角色。以无人艇集群攻防博弈场景为起点，深入研究了在约束条件下的分布式协同合围科学问题。主要围绕时变拓扑、复杂目标难合围、方位约束这三个主题展开，设计了相应的分布式合围控制算法，并在室内和湖测实验中验证了无人艇集群的协同合围效果。

## 一、研究背景

在自然界中，生物群体依赖简单个体的局部交互就能涌现出复杂的群体形态和行为。例如，鸟群的迁徙、鱼群的防御以及蚂蚁群协同搬运食物等，皆展现了群体智能的奇妙之处。受此启发，基于群体智能的无人系统集群协同应运而生，已成为各国政府竞相发展的高新技术领域之一。无人艇系统集群协同在海底测绘、沉管检测、协同探测以及协同搜索等多个领域均有应用前景。

沿着无人系统集群的路径，我们将注意力聚焦到更为具体的一个领域——无人艇集群控制。这一技术特点在于其高效率、广覆盖、低成本的特性，因而其应用前景十分广阔。同时，我国拥有

众多海岛资源，这些资源具有重要的战略价值。

针对岛礁防卫，目前通常采用的方法往往是静态编队或被动防御，但这些方式存在决策速度缓慢、反应迟钝的问题。而针对海上冲突，现有方法往往涉及军舰驱逐或船只冲撞，然而这种做法存在风险高、成本大的缺陷。因此，为了解决这一难题，需要从无人艇集群攻防博弈的视角出发，重点考虑主动防御的场景。通过研究无人艇集群的协同围控，针对不同目标的运动特性，可有效维护海洋权益，并有效管控相关水域资源。

当前，针对无人艇集群协同合围存在以下技术瓶颈：首先，目标特性复杂，使得实现目标的合围变得困难；其次，合围构型

多样，导致难以维持稳定的队形；最后，方位传感器的约束导致难以准确测量目标的位置。

随着海洋任务的日益复杂化，面对的合围任务也必须从基础的合围转变为应对更为复杂的情况，从静止目标到变速目标的应对，从完备传感向方位约束的应对转变。然而，现有的无人系统合围算法无法胜任这些任务。因此，需要研究约束条件下的分布式协同合围控制这一问题。

## 二、研究内容

### 1. 基础合围 - 恒速目标

针对基础合围问题，我们着眼于处理横竖恒速目标的情况。主要挑战在于实现任意正多边形编队，并确保个体间与目标的避碰。在该过程中，系统可能会面



临有限时间逃逸的情况。为了克服该挑战,我们引入了比较原理以规避有限时间逃逸。接着,利用相角排斥原则实现了正多边形编队,并通过极坐标分解实现了个体间的协同避碰。通过这些方法,可以成功地实现7个个体对一个运动目标的均匀合围场景。

在控制器设计方面,我们用了一种新的思路,即将避碰和合围相结合。为此,引入了两个关键的半径参数:安全半径和合围半径。该机器人永远不会进入以目标为圆心的圆内。同时,利用不同机器人之间的相角差,确保它们永远不会出现相等于零的情况,从而在一定程度上实现个体间的避碰。尽管这种方法可能会牺牲一定的工作空间,但它有效地将个体间的避碰与个体与目标的避碰结合在一起。基于这一思路,设计了合围控制器,该控制器能够调节相对距离和相对方位角。接着,设计相应的李雅普诺夫函数。在这里,将分子设计为目标值,将分母设计为排斥项。通过李雅普诺夫函数的有界性,间接说明了个体与目标之间的避碰可以有效实现。

接着,利用 Barbalat 引理证明了控制器的收敛性,并最终实现了位置和速度误差的有界收敛。随后,进行了仿真验证,其中的第一张图是轨迹图。我们还绘制了相对距离和相对速度的演化图,

以及相对相角和相对角速度的演化图。观察到相对距离和相对相角都趋于设定值,而相对速度和相对角速度则趋向于零,这表明编队已经达到了固定构型。同时,我们还绘制了相对个体之间距离的演化图,最终观察到个体之间的有效避碰。

## 2. 复杂合围 - 旋转编队

对于静止目标问题,研究重点在于复杂合围中的旋转编队,其挑战在于在间断拓扑干扰下实现横向目标合围和均匀旋转编队。首先,采用分层控制策略,将抗干扰估计和合围任务进行解耦。其次,通过循环追踪策略实现了均匀的旋转编队。最后,利用输入状态稳定方法实现了目标合围。

在合围控制器的设计中,首先引入了一个抗干扰的目标观测器。随后,利用输入状态稳定(ISS)定理设计了相应的合围控制器。ISS定理是非线性系统中常用的方法,用于证明控制器的收敛性。同时,该定理的证明基于李雅普诺夫稳定性。最后,利用实验平台进行了实验验证,包括监控基站和通过2.4G网络进行通信的艇与艇之间的通信。

在该实验中,考虑的主要问题是在间断拓扑干扰下的情况。主要是三种不同的拓扑结构:拓扑A、B、C。这些拓扑结构依次切换,其中拓扑B和C是不连通的。在这样的拓扑条件下,成功

实现了无人艇的协同合围控制。绘制了相对距离和相对相角的演化图,观察到它们都趋向于设定值。同时,还绘制了目标估计的相对误差图,发现位置误差和速度误差最终都趋于零。

## 3. 复杂合围、变速目标

在方位传感约束上,主要是完成更为复杂的变速目标合围任务。首先,目标被视为外部系统,利用输出调节理论设计相应的控制器;其次,采用内模设计方法实现固定构型的编队;最后,利用吸引排斥机制实现未标记的合围构形。因此,本节的研究思路主要包括输出调节理论、内模-势能函数设计以及吸引排斥机制。

在介绍具体控制器之前,首先需要定义一个感知范围内的时变函数。该函数在感知范围内有效,当个体间相对距离大于某阈值 $R$ 时,该函数值趋于零,不再起作用。基于这一时变函数的设计,可以定义相应的时变邻居,它是实现灵活标记构型调控的重要组成部分。然后,可以设计分布式协同输出调节的合围控制器。在控制器设计中,首先采用了常规的输出合围调节控制器,然后在控制器中加入了个体间的排斥项。同时,还需考虑内模控制器的引入,以实现固定构型的调控。在内模控制器中,同样需要引入个体间的排斥项。对于控制器的稳定性证明,依靠劳斯判据;而

对于内模控制器的收敛性证明，则主要基于拉萨尔不变原理。

在稳定性证明的关键环节中，主要关注闭环误差系统。由于存在这一项，整个闭环系统成为了强非线性耦合系统。常规的李雅普诺夫函数设计难以抵消这部分耦合项。因此，在设计李雅普诺夫函数时，在P矩阵的选择上需要花费大量时间。其中包含了一种配方法，确保矩阵中的每一项都有对应的关系。

最后，利用仿真验证了上述提出的控制器。观察结果显示，即使4个个体的初始位置不同，但它们针对同一个目标进行合围时，最终形成的队形都相似。它们可以形成一个相似的正方形队形，然而它们的标记却是灵活的，适应了不同的情况。这种方法可以实现形状相同但标记灵活的构型，这使得它更容易应用于动态环境中。

另外，实验记录了目标个体的距离误差和速度的演化图。同时，也证了算法对个体失效的鲁棒性。假设在实验过程中，机器人4突然失效，无法运动。采用我们设计的控制方法时，剩余的三个机器人将根据时变感知邻居自适应地形成一个新的正三角形，有效地合围目标。然而，如果采用传统方法，例如预先指定每个个体的相对位置，那么它将无法形成合理的合围队形，这意味着

合围任务可能失败。

#### 4. 复杂合围、多时变目标

在实际应用中，可能会出现多个目标需要合围的情况。该问题的难点在于多个时变目标的协同合围，以及未知非线性系统动力学对闭环系统的影响。为解决这一问题，首先需要设计一个多目标的中心估计器。利用大圆包围小圆的思想，可以设计自适应的合围控制器。最终，进行多目标合围队形的简单验证。

控制器设计的第一步是多目标中心估计器的设计。借助该估计器，我们设计了合围控制器。该控制器不仅包含避碰功能，还需要设计相应的势能函数。通过引入势能梯度的方法，我们将个体间的避碰功能整合到控制器中。最终，成功地完成了自适应控制器的设计。

该研究使用了室内多无人艇系统平台进行实验验证，平台包括8个红外摄像头，使用Optic-Track红外摄像头，并且配备了一个水池和一个控制基站，以及六艘无人艇。通过红外摄像头提供的动态支持，可以获取无人艇的相对位置信息。利用这些相对位置信息，结合差分操作，可以获取无人艇的相对速度。这些位置和速度信息传回到水池边上的控制基站，用于设计控制算法，并传回到每艘无人艇上。在实验中，主要考虑了六艘HUSTER0.35无

人艇，其中两艘是目标艇，四艘是跟随艇。

#### 5. 有限传感 - 方向约束

实际环境中，无人艇可能受到风浪等因素影响而晃动，导致难以准确获取相对位置。但如果只需获取无人艇的相对方位信息，如目标相对于无人艇的方位角度，则通常较容易实现。因此，通过有限传感器获取相对方位信息的问题是目前的重点。

这个问题的主要挑战在于仅具有方位信息，而无法获取个体的位置信息的情况下，如何实现目标的协同合围控制。由于只能获取目标的方位信息，首先需要解决基于方位的目标估计问题。为了确保方位信息的持续变化，需要利用持续激励理论。针对拓扑持续存在扰动情况，需要引入扰动稳定性原理来解决这一问题，并利用迪尼导数的求导实现目标合围。

在合围控制器的设计中，首先需要设计一个仅依赖于方位信息的估计器。这实际上是一个线性系统，但其中的矩阵A与方位信息密切相关。因此，由于方位信息的持续变化，矩阵A也随之变化，确保矩阵A保持HUSTER形式是至关重要的，这样估计器才能收敛。为了实现这一点，需要采用持续激励理论。

#### 6. 路径导航 - 自交奇异

除了协同合围任务之外，还



需要进一步考虑无人艇的协同导航任务。其中的难点在于实现沿着任意自交路径的自发顺序队列控制。自交路径指的是一种路径，在这条路径上，无人艇既需要靠近路径，又需要在路径上进行机动。传统的方法往往会引入奇异点，即在这些点上，无人艇将无法移动。为了解决这个问题，引入了升维的向量场，将二维自交路径转换为三维开环曲线。然后，让无人艇沿着这条路径形成不同的顺序队列，并沿着自交路径进行机动。

在考虑高维导引向量场时，我们需要刻画空间中的光滑曲线。通常可以通过引函数来描述这些曲线。例如，圆可以用方程  $x^2 + y^2 - 1 = 0$  来描述。而对于自交曲线，则可以用  $x^2 - 4y^2(1 - y^2) = 0$  来描述。与之前提到的类似，采用传统的导引向量场来设计控制器时，会涉及两个方面的量：个体的机动项和误差的收敛项。个体的机动项表示机器人需要沿着路径进行机动，而误差的收敛项表示我们希望机器人能够收敛到路径上。然而，采用传统的设计方法时，会存在奇异点。例如，圆具有一个圆心作为奇异点，而自交路径可能具有三个奇异点。在这些奇异点上，导引向量场为零，这意味着机器人将无法从那里移动。

为了实现自发顺序的队列控

制，队需要考虑三个指标。首先，机器人都能收敛到期望的轨迹上。其次，机器人能够沿着期望的轨迹进行机动。在引入虚拟坐标后，这些坐标沿着 Z 轴不断增加。因此，虚拟坐标的导数需要保持一致且非零，以确保机器人沿着原路径进行机动。第三，任意相邻的虚拟坐标能够收敛到指定的区间内。为了实现这一点，利用虚拟坐标来描述相邻坐标的范围。

通过导引向量场的控制器成功地嵌入到顶层的期望速度中。这一过程主要通过全局坐标系到无人艇体坐标系的旋转平移来实现。首先，针对原型路径，我们进行了队列控制。三艘无人艇，如果它们的初始位置不同，它们会根据就近原则形成相应的队形，并沿着原型路径进行机动。

由于无人艇的初始位置不同，它们会根据就近原则迅速收敛到所需的队形上。我们进一步验证了该算法对个体失效的鲁棒性。例如，如果在实验中，个体突然停止工作，剩余的 6 个个体会重新形成一个关于 6 个机器人的编队，并沿着三维路径进行机动。

在扰动较小的情况下，可以实现自发顺序的队列控制。然而，当扰动增大时，问题变得更加复杂。如果对机器人的三个维度施加相同的大扰动，机器人将无法跟随路径，导致任务失败。面对这个问题，需要设计额外的抗扰

控制器来解决。

## 7. 曲面导航 - 灵活协同

除了协同路径导航任务，随着任务的复杂化，还需要考虑更复杂的曲面导航任务。例如，一群蚂蚁在苹果上进行协同导航，这引发了如何在曲面环境下实现无人集群系统的协同导航的科学问题。这个任务面临三个主要难点：在曲面上进行协同导航可能会导致局部收敛问题，需要针对起点进行处理。

在曲面上实现协同导航时，无法使用传统的欧式距离，而必须使用测地距离。然而，测地距离的计算非常复杂。为了解决这个问题，可以采用向量场升维的方法。与之前的向量场不同，需要引入两个虚拟坐标。通过这种方法，可以消除传统球面上的奇异点，使其展平成一个平面。

针对复杂的测地距离交互，采用了虚拟坐标交互的方法。首先，利用虚拟坐标来定义邻居关系。然后，可以使用虚拟坐标设计所需的编队队形，并通过向量场将其映射回原始空间，实现简单的交互。最后，利用吸引排斥机制来实现灵活顺序的协同控制。控制器包含两部分：首先是传统导引向量场的设计，其次是虚拟坐标的吸引项和邻区个体之间的排斥项。通过这种方式，可以实现形状相同但顺序不同的编队。

在导引向量场中，需要引入

一个排斥项。其具体形式如下：在小  $R$  到  $+\infty$  的范围内是连续可微的。然而，当虚拟坐标的范数等于  $R$  或等于  $0$  时，由于这个值出现在分母中，会导致  $1$  和  $2$  趋向无穷大，从而使得整个控制器无解。因此，需要解决的第一个问题是确保解的存在性。

接着，我们进行了相应的仿真验证。主要考虑了两种不同情况：五个机器人的初始位置不同，最终形成的队形也不同。同时，还分析了曲面误差，发现它趋向于零。对于虚拟坐标的协同误差，它也收敛到了指定区间内。同时，还进行了大规模的实验，考虑了 22 个机器人在表面上的机动情况。我们观察到，如果机器人的初始位置不同，它们形成的曲面协同也不同。进一步地，随着机器人数量的增加，自发顺序的曲面协同导航会退化为自发顺序的路径导航跟踪控制。

### 8. 跨域降落 – 视觉导引

除了无人艇的协同导航任务，我们还考虑了机艇的跨域协同任务。由于无人机具有灵活的运动性但续航时间短，而无人艇运动缓慢但续航时间长，将它们有效结合可以拓展它们的运动时间和范围。因此，我们需要研究跨域降落问题，即让无人机在无人艇上进行充电，充电完成后继续任务。该问题的难点在于如何让无人机精准地降落在运动中的无人

艇有限平台上。

为了解决这个问题，我们引入了一个两阶段的降落框架。当无人机与无人艇距离较远时，使用 GPS 进行导引。当它们的水平距离较近时，则采用视觉导引方式，最终实现无人机在无人艇上的精准降落。

这样，不仅能够有效地解决了无人艇在表面上的协同导航问题，还成功地应对了机艇的跨域协同任务中的降落挑战。这些研究成果对于拓展无人机艇的运动时间和范围具有重要意义，为无人机艇的应用提供了可行的解决方案。

第一阶段的控制算法采用了线性输出调节理论，主要分为水平跟踪和垂直收敛两个阶段。首先将无人艇视为外系统，设计相应的线性输出调节器。我们提出了收敛条件，并针对垂直收敛采用了反馈和前馈控制。

在第二阶段中，我们采用了视觉导引方法。引入了一个三层嵌套的靶标，使相机能够在不同的高度对准不同的靶标。针对靶标识别，使用卷积神经网络 (CNN) 进行识别。至于无人机与无人艇的位置对准，则采用偏置的方法。

最后利用机艇降落平台，开展了对应的实验验证。进一步的我们还刻画了两阶段降落轨迹的一个演化图。可以观察到阶段一

采用 GPS 导引，它主要控制无人机跟无人艇的一个水平距离。第二部分主要采用视觉导引。除了跨域降落任务之外，还加入了一个跨域导航任务，它的主要难点在于跨域、跨尺度的无人机艇的一个集群协同。而无人机是一个三维尺度的系统，如何去实现跨域跨尺度的无人机艇的一个机行协同导航是难点问题。

### 9. 跨域导航 – 快慢子系统

除了跨域降落任务之外，还考虑了一个跨域导航任务。它的主要难点在于跨域、跨尺度的无人机艇的一个集群协同。而无人机是一个三维尺度的系统，如何去实现跨域跨尺度的无人机艇的一个机行协同导航是难点问题。

## 三、研究经验

在进行科研工作时，科研心态至关重要，可以将其总结为“四个心”：耐心、慧心、细心和行动心。首先，科研需要有耐心，面对困难和挑战时要持之以恒，不断尝试和探索。其次，需要有慧心，理清问题的本质，善于运用智慧找到解决问题的方法。再者，要保持细心，对实验和数据进行仔细观察和分析，发现其中的规律和细微之处。最后，要有行动心，不仅要有良好的想法和计划，更要付诸实践和行动，勇于创新并不断验证自己的理论和假设。这四个心对于科研工作者



来说是至关重要的,希望能够对大家科研道路上有所帮助。

### 1. 耐心

对于耐心,首先要进行广泛的文献阅读。从该领域的经典论文开始,然后逐步阅读最新的研究成果,接着关注名刊上的相关论文,最后再关注最新的研究成果。通过这四个阶段的系统阅读,能够对所研究的领域有一个全面的了解,明确该领域的研究热点和难点所在。

其次是搭建实验平台。无论是在论文撰写还是实验进行方面。搭建实验平台是一个不容忽视的重要工作,它为后续的研究提供了坚实的基础。第三,细读论文。在控制领域的论文中,通常包含大量的证明和推导,细节十分繁复,不容忽视。因此,需要耐心

和细心去阅读,甚至反复阅读。第四,论文写作。我个人的写作速度比较慢。从构思到开始动笔,再到完成初稿并进行实验验证,然后进行多轮自我修改,再请导师进行修改,有时还要邀请合作导师或合作者进行修改,整个周期大约需要半年左右。此外,控制理论期刊的审稿周期通常很长,需要耐心等待。

### 2. 慧心

在科研过程中,需要扬长避短,即明确自己擅长和不擅长的领域。例如,如果擅长动手能力而数学不太好,可以考虑投稿一些应用型期刊;相反,如果数学较好且擅长推导,可以多关注控制理论领域的期刊。

### 3. 细心

第三个方面是细心。细心的

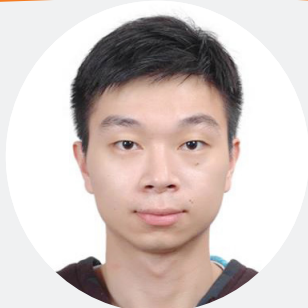
第一个方面是问题的提炼。很多时候,新问题的产生并非偶然,而是需要通过仔细观察实践或阅读论文来发现。由于控制科学属于应用数学的分支,论文中经常涉及证明,因此需要反复推敲和检查。

### 4. 行动心

行动心的第一点是行动力。如果有想法,应该立即行动,写代码,进行实验,写论文,修改论文。迈出第一步非常重要,因为热情会随时间逐渐消退。第二点是请教与合作。请教导师和前辈们,向领域内的专家请教,甚至寻求合作,最后是实践。○

\* 本文根据作者所作报告速记整理而成

## 作者简介



胡斌斌, 南洋理工大学博士后, 2022年6月获得华中科技大学博士学位, 期间在荷兰格罗宁根大学联合培养。自2022年8月起, 在新加坡南洋理工大学从事博士后研究工作。主要研究领域为多机器人协同导航控制与应用, 近年来, 以第一作者在IEEE TRO、TAC、Automatica等国际期刊发表论文11篇;

授权发明专利6项; 获日内瓦发明展金奖, Asian Journal of Control 杰出审稿人, 中国自动化学会优秀博士学位论文奖等。现任 Journal of Automation and Intelligence 编委, unmanned system 客座编委, 多个IEEE汇刊以及CDC, ACC等国际会议的审稿人。

# 问题特性与知识迁移联合辅助的进化特征选择方法及其应用

文 / 郑州大学 陈科

导读：2024年4月29日，郑州大学副研究员陈科做客“CAA 我和优博有个约会”活动，为大家带来一场题为“问题特性与知识迁移联合辅助的进化特征

选择方法及其应用”的精彩报告。随着信息技术的迅猛发展，所收集的数据呈现出离散化、高维度、强稀疏、多目标等复合特性，致使基于传统数据分析技术的信息提取方法已无法很好的满足实际应用需求。特征选择是一种有效的数据预处理技术，可以直接从原始特征空间中筛选出有用特征用于构建学习模型，并获得比原始特征集更优越的泛化性能，现已成为数据挖掘领域的研究热点，被广泛应用于文本挖掘、关键基因检测、图像处理等领域。

## 一、研究背景及意义

随着科学技术的发展，我们能够收集数据的方式日益多样化，数据量也呈现出爆发式的增长。这一趋势推动了经济从农业经济、工业经济向更高级的数字经济转型。这一转型的驱动因素主要有两个方面，如图1所示。首先是

国家政策的大力支持。国家出台了多项政策，旨在加快大数据的部署，建设数据强国。其次是数字经济在经济比重中的持续上升。例如，2023年，数字经济的比重已达到41.50%，远远超过了其他经济体量。

面对如此快速增长的数据，如何有效利用这些数据，挖掘出

有用的数据特征信息，成为亟待解决的关键问题。在数据关键特征获取方法方面，有多种途径，例如特征选择、特征重构以及传统的数据分析方法。然而，我选择特征选择方法的原因是其在实际应用中表现出更高的效率和准确性。特征选择是一种有效的数据处理方法，其核心在于从 $m$ 个特征中选择出小于 $m$ 个特征，使系统的特定指标最优化。

在特征选择过程中，不对特征进行任何修改，仅是从众多特征中筛选出最具代表性的一部分。这与特征重构方法有所不同，后者在对特征进行变换后会生成新的特征，导致其原始特征的可解释性显著降低。而特征选择方法则通过直接挑选原始特征，保持



图1 数字经济驱动因素

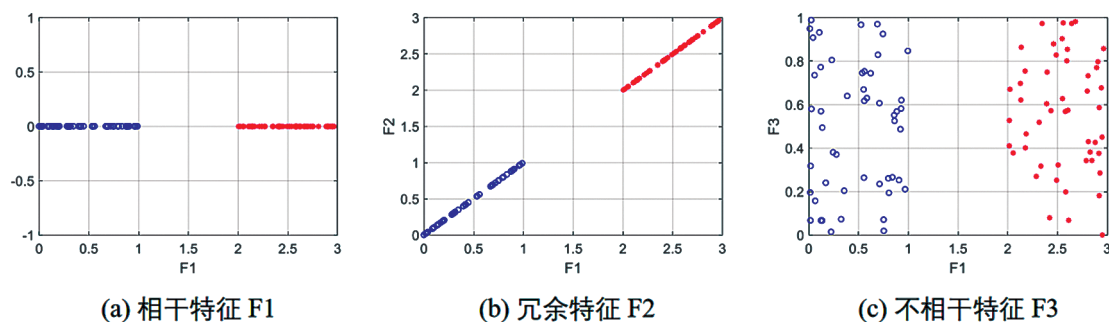


图2 数据集中的不同的特征

了数据的可解释性，更利于分析和理解。因此，在复杂数据处理中，特征选择不仅提高了数据处理的效率，还增强了对结果的理解和解释，这也是为什么选择这一方法的主要原因。

为了说明特征选择的重要性，我们可以以一个语音分类问题为例。该问题的数据集包含 1560 个样本，每个样本有 617 个特征，分类类别数为 26 个。在使用全部 617 个特征进行分类时，模型的准确率为 79.49%，未能突破 80% 的精度。然而，通过特征选择将特征数量减少到 92 个，分类准确率提高至 86.16%，提升了 6.67%。这一结果表明，原始数据集中存在大量冗余或不相关的特征，这些特征不仅降低了模型的分类精度，还影响了存储效率和模型的可解释性。

冗余特征是那些对分类结果没有增量信息的特征，而不相关特征则是那些对分类结果毫无贡献，甚至可能引入噪声的特征。因此，通过特征选择去除这些冗余和不相关特征，可以显著提高

模型的性能和效率。

为了更清晰地说明冗余和不相关特征的概念，我们可以参考以图 2。其中，图 a 显示了一个特征 F1，能够将红色和蓝色类别正确区分，因此 F1 是有用的相干特征。图 b 展示了两个特征 F1 和 F2，它们都能将类别正确划分。在这种情况下，F2 是冗余特征，因为它提供了重复的信息。图 c 则表明，特征 f1 可以正确区分类别，但特征 F3 却无法提供有用的信息，因此 F3 是不相关的特征，可能拖慢训练速度。特征选择的主要任务就是去除类似于 F2 和 F3 的特征，保留有用的相干特征，以提升模型的效率和准确性。

通过上述分析，我们可以将特征选择问题定义为一个组合优化问题。具体而言，给定一个特征集合  $A$  和一个特征子集的评价函数  $F(\cdot)$ ，我们的目标是从  $A$  中选择一个子集  $S$ ，使得系统性能最优化。在这个过程中，决策变量  $X$  是一个  $m$  维的二进制向量，每个特征的选择状态只有两种：1

表示被特征选中，0 表示特征未被选中。适应度函数  $F(\cdot)$  表示为学习算法的表现指标，例如分类的错误率或特征的选中率等。

特征选择问题的解决方法可以分为不同的搜索策略和评价准则。首先，按搜索策略分类，传统方法包括最佳优先、线性前向选择、序列前向浮动选择等。这些方法在早期算法中表现良好，但由于计算成本高、效率低以及易陷入局部最优，限制了其在复杂问题中的应用。为了克服这些局限性，基于进化计算的方法应运而生，包括进化优化、群体智能、协同选择和模因选择等。这些方法具有更强的灵活性和效率，并且能够更好地结合特定问题的特性。

其次，按评价准则分类，特征选择方法主要分为三种类型：过滤型、封装型和嵌入型，如图 3 所示。过滤型方法利用数据集的内在信息（如特征间距离、相关性和重要性）来评价特征子集，操作简便但可能忽略特征与学习算法



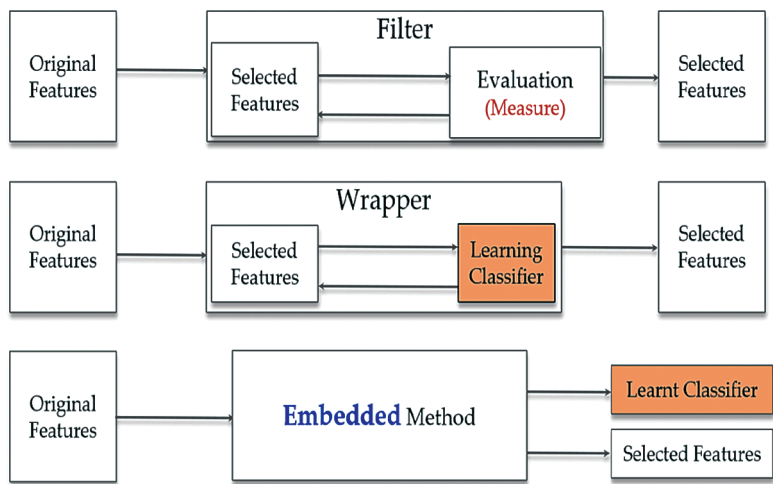


图3 评价准则特征分类

的具体关系。封装型方法通过训练和评估分类器来选择特征子集，考虑了特征选择对分类器性能的影响，但计算开销较大。嵌入型方法则将模型训练与特征选择结合起来，能够同时获得优化的特征子集和训练好的模型，综合了过滤型和封装型方法的优点。

过滤型方法具有显著的优点，包括较快的计算速度、较低的成本和较高的鲁棒性。然而，其缺点也很明显，即模型性能较差。在这三种方法中，过滤型方法的模型性能通常最差，因为它主要依赖特征的统计属性，忽视了与具体模型训练的关系，因此实际应用效果有限。

嵌入型方法结合了过滤型和封装型方法的特点，既包含模型训练，又融入了特征选择的成分。相较于过滤型方法，嵌入型方法在性能、成本和鲁棒性上表现为中等水平。虽然嵌入型方法在特

征选择中提供了一定的灵活性，但其分类性能仍不及封装型方法。

封装型方法的最大优点在于其优越的模型性能。这种方法通过在特定模型上进行训练，可以显著提高分类精度。然而，封装型方法也存在一些问题，如鲁棒性较低和计算成本较高。尽管封装型方法在分类性能方面表现优异，但其通用性较差。因此，当前研究的一个重要方向是提升封装型方法的通用性，以扩展其适用范围。

在特征选择中，还可以根据目标数量对方法进行分类。单目标优化方法仅提供一个全局最优解，通过适应度函数进行评估，如分类错误率和特征选择率。虽然这种方法简单明了，但只能提供一个最优解，可能无法满足所有需求。与之不同的是，多目标优化方法提供一组非支配的 Pareto 解集，决策者可以根据具体需求从中选择最适合的解。多目

标优化包括基于支配、基于分解和基于指标的方法，这些方法的目的是找到最优的 Pareto。

在高维特征选择问题中，进化算法面临以下挑战。首先，搜索空间庞大，例如，对于  $n$  个特征子集，其搜索空间为  $2^n$  个可能解。假设  $n=1000$ ，则搜索空间有  $10^{301}$  组合，这使得寻找最优解极具挑战性。其次，进化算法的计算成本较高。例如，对于一个样本量为 7000、特征数量为 5000 的数据集，使用 KNN 分类模型进行一次评估需时 84 秒，如果进行 1000 次评估，总耗时将达到 23.3 小时。最后，特征间的交互特性也是一个问题。相关特征和其他特征同时选择时可能变成冗余特征，而不相关特征与互补特征结合时可能变得相关，这增加了特征选择的复杂性。

## 二、研究内容

在研究动机方面，我们认为经验是一个极好的老师，无论是自身经验还是他人的经验，都可以有效地用于特征选择的方法开发。在特征选择背景下，需要明确问题自身的知识和问题间的知识。问题自身的知识包括特征与特征、特征与目标变量之间的隐性关系，可以通过皮尔逊相关系数、最大互信息系数等方法来获取。问题间的知识则涉及相关任务之间的知识共享，如不同加热炉之

间的参数共享。简单问题的解决虽然可能没有直接解决复杂问题,但可以为复杂问题的优化提供指导。对于昂贵的优化问题,通过知识迁移可以提升任务优化效率,加快收敛速度,并降低计算成本。

在特征选择研究中,我们主要探索了基于问题特性的特征选择方法。在特征选择过程中,相关性高的特征通常具有较高的选择频率,而相关性低的特征则选择频率较低。因此,我们提出了一种策略,通过原始更新策略生成后代特征,并利用相关性引导个体生成策略来增强对这些中间特征的探索能力。该策略允许动态调整生成特征的数量,以平衡生成数量和特征的多样性。

为了进一步提高特征选择的效率,我们引入了代理模型来进行大致评价和排序。代理模型通过利用上一代真实评价的数据进行训练,并进行动态更新,从而减少了计算成本。虽然生成更多的特征候选可以提升探索能力,但过多的候选特征可能导致冗余,从而增加评估的复杂性。为了解决这一问题,我们设置了适当的生成数量参数,以保持特征的多样性和评价的有效性。

此外,我们还提出了种群再形成机制,以应对仅依赖优质个体可能导致的多样性丧失问题,如图4所示。该机制结合了特征的预测适应度和粒子间的距离信

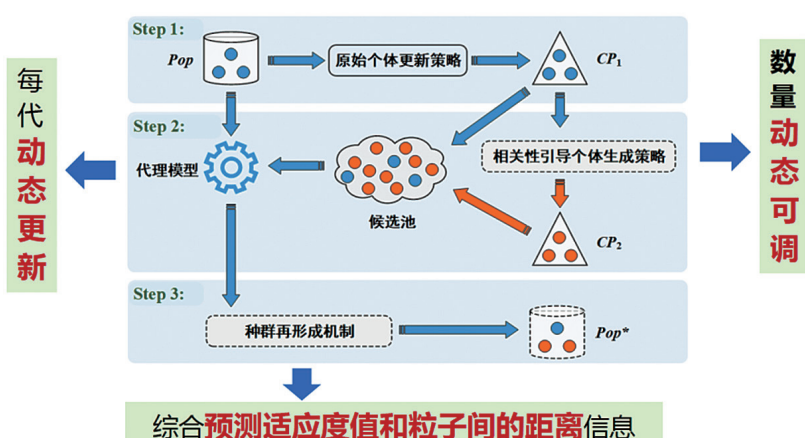


图4 种群再形成机制

息,从而提升了后代种群的质量,确保了种群的多样性和收敛性。这些创新点包括相关性引导的个体生成策略、代理模型的构建方法以及种群再形成机制,均有效提升特征选择的性能和效率,为特征选择问题的研究提供了新的解决思路。

从图5中可以看出,在比较真实评价(红色)和预测值(蓝色)时,虽然预测值的排序与真实值趋势大致一致,证明了模型训练方法在选择性能较好的个体方面是有效的。右侧的分类精度对比进一步验证了这一点,该方法在16个数据集集中有13个数据

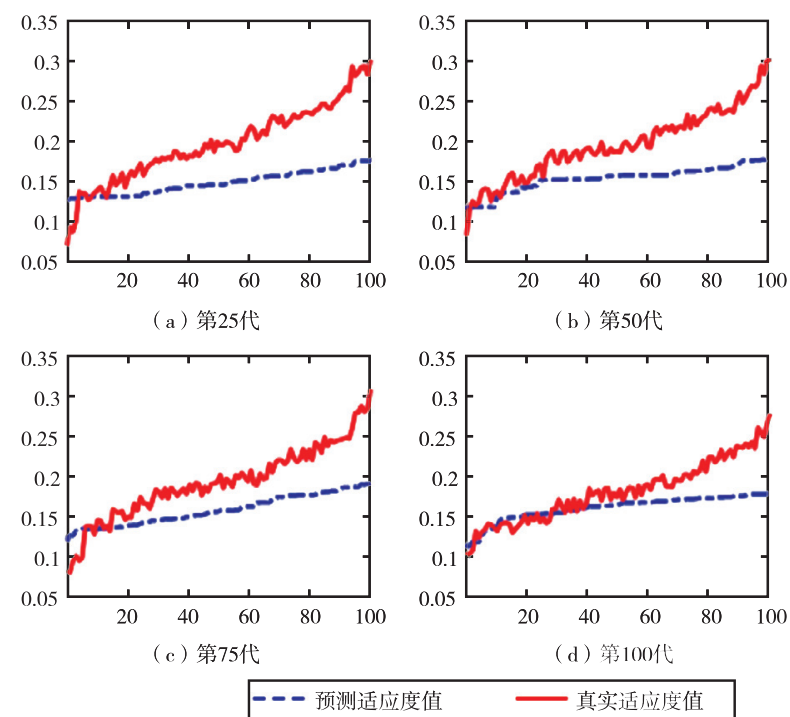


图5 代理模型适应度拟合情况

集的分类精度优于其他方法，表明我们的方法在提升分类精度方面表现突出。总体而言，所提出的方法在种群的动态保持和智能重组方面表现优异，并且有效增强了特征子集的分类精度。

关于问题特性利用方面，我们探讨了在高维特征空间中分组的策略，如图 6 所示。该方法对

基于特征相关性和组间耦合性进行了分组，以解决特征间的交互特性问题。首先，我们提出了一种象限扇形初始化分组方法，结合了 SU 对称不确定性和 Relief 方法来评估特征相关性，从而实现初始分组。此方法允许调整分组的半径，以控制组的数量。初步分组后，实施了纵向和横向的

动态调整，以优化特征分组的合理性。在满足提升条件后，将特征映射回原始空间进行进一步的搜索，这样可以更全面地探索特征空间，提高特征选择的有效性。

主要创新点包括相关性辅助的特征初始分组策略，用于快速定位有价值的特征区域，以及双向动态调整机制，它对特征空间

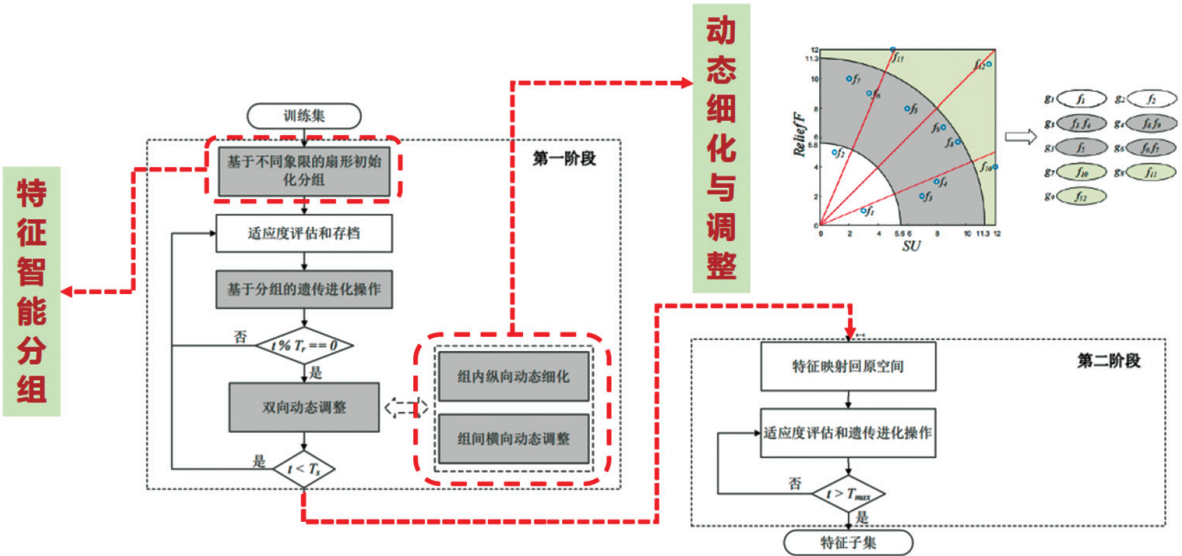


图 6 高维特征空间中分组

| 数据集       | NSGA-II              | MOEA/D               | SM-MOEA              | VGS-MOEA                    | BDGMOEA                  |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------|
| GLIOMA    | 4.49e-01±1.21e-02(+) | 6.77e-01±1.70e-02(+) | 7.61e-01±9.24e-02(+) | 8.09e-01±6.62e-02(+)        | <b>9.14e-01±2.79e-02</b> |
| Leukemia1 | 4.86e-01±2.25e-02(+) | 3.83e-01±1.23e-02(+) | 8.58e-01±4.56e-02(+) | <b>9.80e-01±2.71e-02(-)</b> | 9.13e-01±7.88e-03        |
| 9Tumor    | 3.19e-01±2.13e-02(+) | 2.24e-01±1.56e-02(+) | 3.89e-01±8.80e-02(+) | 4.11e-01±7.40e-02(+)        | <b>6.11e-01±4.30e-02</b> |
| Brain1    | 4.09e-01±8.97e-03(+) | 6.03e-01±7.64e-03(+) | 7.45e-01±3.96e-02(+) | 7.24e-01±3.99e-02(+)        | <b>7.88e-01±1.89e-02</b> |
| tumors_C  | 4.42e-01±2.23e-02(+) | 3.19e-01±1.30e-02(+) | 7.15e-01±9.75e-02(+) | 6.48e-01±5.92e-02(+)        | <b>8.19e-01±3.68e-02</b> |
| Carcinom  | 4.31e-01±9.25e-03(+) | 4.16e-01±6.32e-03(+) | 7.98e-01±3.76e-02(+) | 8.22e-01±4.04e-02(+)        | <b>9.16e-01±1.55e-02</b> |
| nci9      | 2.58e-01±1.40e-02(+) | 2.50e-01±1.30e-02(+) | 4.75e-01±7.59e-02(+) | 5.56e-01±7.70e-02(+)        | <b>6.84e-01±1.81e-02</b> |
| arcene    | 4.89e-01±1.07e-02(+) | 4.68e-01±7.42e-03(+) | 8.53e-01±6.45e-02(+) | 8.58e-01±4.77e-02(+)        | <b>9.36e-01±2.10e-02</b> |
| Brain2    | 4.40e-01±1.96e-02(+) | 1.99e-01±1.03e-02(+) | 6.66e-01±1.03e-01(+) | 7.35e-01±9.24e-02(+)        | <b>8.57e-01±3.44e-02</b> |
| Leukemia2 | 4.13e-01±2.06e-02(+) | 4.82e-01±1.05e-02(+) | 8.11e-01±1.18e-01(+) | 8.25e-01±1.00e-01(+)        | <b>9.94e-01±7.94e-03</b> |
| 11Tumor   | 4.20e-01±1.02e-02(+) | 2.79e-01±6.36e-03(+) | 7.52e-01±2.53e-02(+) | 7.23e-01±3.96e-02(+)        | <b>8.02e-01±1.90e-02</b> |
| GLI_85    | 4.45e-01±1.92e-02(+) | 3.93e-01±5.12e-03(+) | 8.17e-01±6.92e-02(+) | 8.42e-01±3.84e-02(+)        | <b>8.98e-01±2.36e-02</b> |
| +/-       | 12/0/0               | 12/0/0               | 12/0/0               | 11/0/1                      | -                        |
| FR        | 4.25                 | 4.75                 | 2.75                 | 2.1667                      | <b>1.0833</b>            |

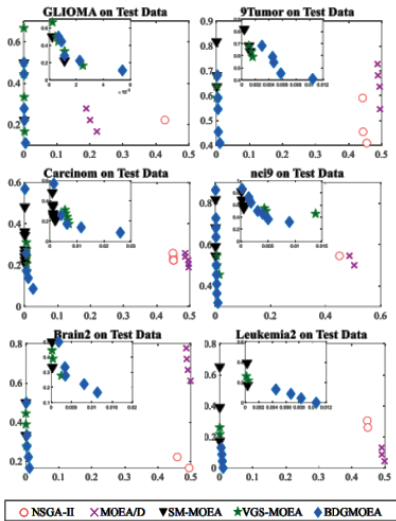


图 7 方法对比



探索的深度和广度进行了提升。图 7 实验结果显示，相较于其他方法，我们的方法在 12 个算法问题中有 11 个问题取得了较好的结果。在 PF 收敛情况上，我们的方法表现出更好的收敛性和均匀的分布，体现了搜索效率的提高以及收敛性和多样性的有效平衡。

在问题间进行特征选择的应用中，我们的研究思路是，既然问题间存在一定的相关性，是否可以通过对原任务进行分割来发掘这种相关性。

在第一阶段，我们产生了两个相关的任务：一个是包含所有特征的原始任务，另一个则是只包含部分特征的任务。这样做的目的是创造一个具有一定重叠特征的相关性任务。任务一是部分特征的子集，而任务二包含了全

部特征，两者的目标一致，都是为了提升分类性能。

在第二阶段，我们应用了知识迁移技术，如图 8 所示，包括拐点选择策略用于生成相关任务，变量空间限定方法来限制特征空间中的可行域，以及子局更新机制来动态调整任务特征组合，以增强跳出局部最优的能力。结果显示，我们的方法在分类精度和方差方面与其他较好算法进行了比较，取得了良好的效果。

进一步地，我们还探索了多任务知识迁移的特征选择方法，如图 9 所示。在这种方法中，我们生成了多个相关任务，并根据特征的重要性对特征进行分组。高重要性的特征被优先分配到一组中，而其余特征则分配到另一组。通过这种方法，我们可以组

合出多种不同的特征组合，并确保这些组合具有一定的相关性和特征重复率。我们还在进化阶段实施了信息隐性迁移，通过分享每个任务中最优个体的信息，来辅助其他任务生成更优的后代个体，从而实现了知识迁移的优化。

主要创新点包括：首先，提出了一种拐点确认方法，用于特征重要性的层级划分。这种方法在初步特征分组的基础上，通过优化任务生成策略，能够生成多个相关性较高的特征选择任务。这种策略有效地缩短了生成时间，并提高了任务之间的相关性。其次，为提高知识迁移的效率，设计了一种结合隐性迁移和显性迁移的机制。显性迁移通过直接迁移解，而隐性迁移则通过生成的后代个体来引导迁移。这种双重

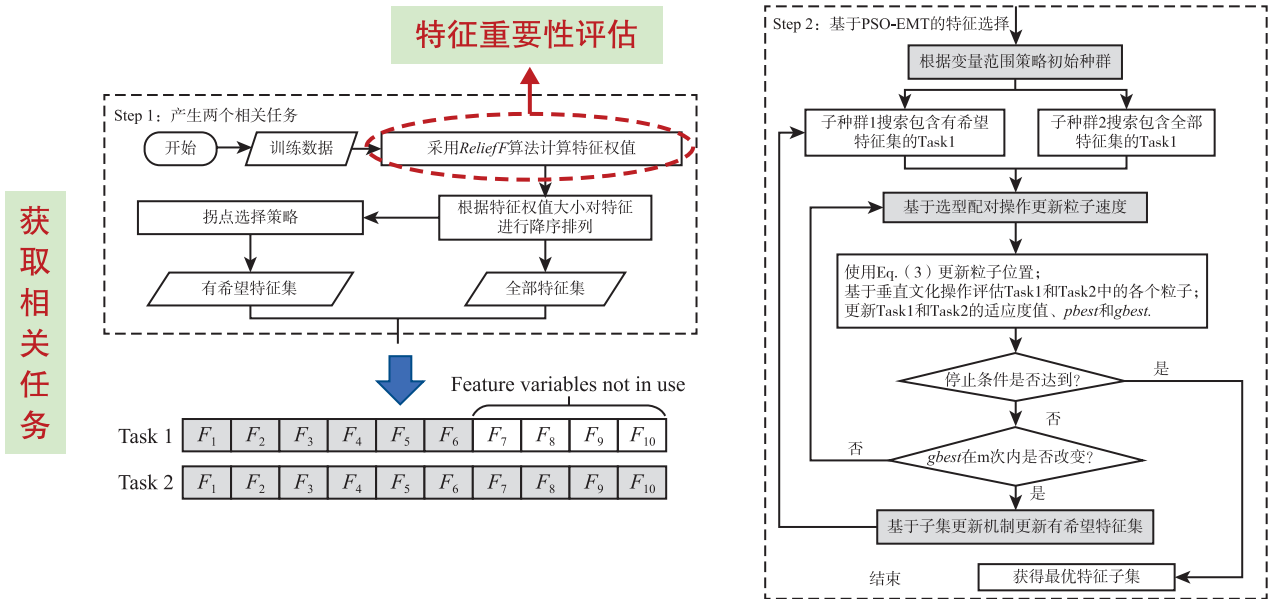
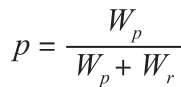


图 8 知识迁移引导



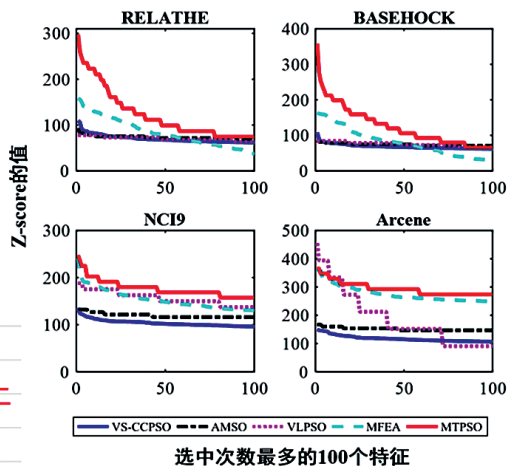
迁移策略显著提升了知识迁移的效率，增强了特征选择的性能。此外，引入了一种基于角度变换的辅助任务生成方法，用于生成具有不同角度的辅助任务，从而进一步提升特征选择的效率。为了应对种群多样性下降的问题，设计了一种种群多样性增强机制，通过修复重复解来提高高维空间中的探索能力。

图 10 实验结果显示，我们的方法在分类精度上平均提升了 2.18%，并且由于将高维特征空间转换为低维空间，搜索时间缩短了 80%，显著降低了高维特征选择的搜索难度。稳定性验证中，关键特征的选择稳定性显著优于其他算法，表明我们的方法在特征选择中的稳定性和可靠性较高。此外，辅助任务生成方法通过角

度变换控制任务数量，进一步提高了搜索效率。最终，我们的知识迁移机制在多目标与单目标任务的同步进行上表现出色，结合显性和隐性迁移策略有效提升了知识迁移的成功率，种群的多样性增强机制也显著提升了探索能力。这些成果展示了该方法在特征选择中的优势，特别是在解决方案的均匀性和质量方面。

## 稳定性验证

平均提升2.18%



### 关键特征选择稳定性显著优于其它算法

016 | COMMUNICATIONS OF CAA Vol.45, No.10, Serial No.253, October, 2024

### 三、科研经验分享

在科研的道路上，有一些必备的品质和素质是成功的关键。基于个人经验和对前人的总结，我将这些品质称为科研的“四君子”。

第一，兴趣是科研的动力源泉，如图 11 所示。对研究主题的浓厚兴趣能够驱动我们在面对挑战时坚持不懈。尽管兴趣可以通过认知过程培养，但初期的兴趣往往需要强大的自律和呵护。随着时间的推移，这种兴趣将转化为持续的动力，促使我们在科研工作中不断进步。科研并非一蹴而就，而是内心深处的原动力驱使下逐步推进的过程。兴趣是科研的起点，但真正的科研成就需

要时间和耐心。科研工作是一个长期积累的过程，我们不能期望一蹴而就的成功。

研究的过程虽然重要，但明确研究的目标同样至关重要。科研不仅仅是完成实验和数据分析，更重要的是理解研究的学术价值和应用价值。为了实现这些目标，我们需要通过设定和实现一个个小目标，逐步积累成就。通过有效的目标分解，我们可以将长远的科研目标拆解为短期的任务，从而提高工作效率和成果质量。此外，榜样的力量是无穷的。设立一个可行的榜样，如实验室的优秀师兄师姐或知名的科研人物，可以激励我们不断进步。学习他们的科研经验和成功路径，有助

于树立明确的目标并且保持前进的动力。

第二，专注是打破科研纸老虎的最强杀招，如图 12 所示。专注能够帮助我们克服科研中的各种困难，做到心无旁骛地投入工作。保持心境的宁静，减少杂念，是有效科研的基础。同时，专注于行动而非空谈，通过实际操作来解决问题，这也是科研中的一个重要策略。

第三，沟通是科研路上少走弯路的关键，如图 13 所示。良好的沟通能形成正向的循环，使科研工作更加顺利。首先，应定期向导师汇报进度，适时调整研究方向，以减少不必要的时间成本。导师通常具备丰富的科研经验，他们的建议能帮助我们更好地开展研究。其次，向师兄师姐请教，即使是小问题，也能获得宝贵的指导。重要的是，在自己无法解决问题时，及时寻求帮助，避免形成惰性。最后，对自己的研究保持敏感与积极，时刻将新获取的信息与自己的研究工作联系起来。这种能力需要不断锻炼，通过与文献、交流等信息的结合，可以激发更多的创新想法和有效的研究工作。

在科研过程中，培养强大的内心和开放的心态是至关重要的。首先，要具备海纳百川的宽广胸怀，即能够接纳正向与反向的意见。面对批评和建议时，应保持



图 11 兴趣



图 12 专注



图 13 沟通



开放的心态，不仅仅接受赞扬，也要认真接纳并反思负面的意见。这种自我反思能力能够帮助科研人员识别自身的不足，并加以改进。如果对负面反馈过于敏感或自我保护意识过强，可能会导致科研进展缓慢甚至停滞。

第四，分享是科研中的另一个关键因素。分享不仅能够打通科研的“任督二脉”，还可以避免闭门造车带来的问题，如图 14 所示。分享你的研究进展和思考，可以获得来自他人的反馈，帮助你发现潜在的问题并改进研究方向。分享过程本身也是对科研工作的梳理和总结，有助于你更深入地理解和推进研究。同时，分享促进了同行业的交流，可能会带来新的发现和灵感。

丰富技能也是提高科研效率的重要方面。掌握编程语言和科研中常用的软件工具，能够显著提升研究进度和效率。科研人员应学会独立解决问题，而不是完全依赖他人，这样才能更好地掌握研究过程中的各种技术细节和工具使用。

另外，在科研工作中，保持谦逊和低调至关重要。低调的态度

可以帮助避免心浮气躁，而保持心境平静对科研工作非常有帮助。科研需要的是专注和耐心，因此避免与那些喜欢高调展示自己的人接触，可以帮助保持专注，减少不必要的干扰。同时，设定一个专注且长远的目标也很重要。例如，博士生可以设定年度发表文章的数量，月度科研进展，以及每日的论文写作任务，这些量化目标可以帮助你明确方向并有效推进科研工作。

营造一个有利于专注的环境也是成功的关键。环境对人的影响不可小觑。人们的环境可以分为三种类型：能够改变环境的人、不受环境影响的人和跟随环境的人。虽然我们大多数人属于第三种，但创造一个有利于专注的环境依然是必要的。例如，选择在安静的图书馆或自习室工作，比在嘈杂的环境中效果更佳。专注的环境有助于提高工作效率，减少分心。科研工作需要内心的强大，能够接纳正向与反向的意见，并进行自我反思。一个玻璃心的人在遇到批评时容易沮丧，而这会阻碍科研的进展。学会有效沟通和自我反思，保持内心坚定，

是科研工作的重要素质。

在科研的实践中，文献积累是不可忽视的。无论是阅读博士论文、综述文章、经典文献，还是前沿热点文章，都能帮助你掌握领域的发展脉络和最新进展。文献管理工具如 EndNote 和 Mendeley 可以帮助组织和管理文献，提升工作效率。学会发现问题和深入思考是科研工作的核心能力。面对问题时，多问自己“为什么”，并尝试不同的思路，能提高问题解决的敏锐性和创造力。

科研工作需要勇于探索，不仅要关注短期的成果，还要坚持长期的研究。短平快的工作虽然能够快速见效，但深入探索往往能带来更大的突破。同时，提升编程能力和熟练掌握科研常用软件，可以显著提高工作效率。解决问题时，多查阅已有的资料，避免重复劳动，从而节省时间和精力。

汇报能力也是科研工作中的一个重要方面。有效的 PPT 汇报能够在短时间内传达你的工作，并引发共鸣。每次汇报都是一次反思和改进的机会，因此需要不断练习和提升汇报技巧。科研论文的撰写包括题目、摘要、引言、相关研究、方法、实验、结果分析、结论和参考文献等部分，理解这些结构并掌握写作要点，可以帮助你撰写出高质量的论文。

在撰写科研论文时，需要系统地处理各个模块。首先，标题



图 14 分享

应全面描述论文内容，文字应简洁明了，最好控制在 20 个单词以内。摘要部分可以分为四段，分别是：研究的背景和动机，所选方法的理由，研究的实现方式，以及主要结论。这种四段式的摘要可以清晰地总结研究的核心内容。

引言部分文本应使用一般现在时，它通常分为六段。第一段介绍研究的背景和应用情况，解释为什么这个问题值得研究。第二段描述研究中遇到的挑战和问题。第三段讲述现有工作如何解决这些问题。第四段说明当前研究中未解决的问题，并阐述研究动机。第五段简要描述研究方法，第六段总结研究的主要贡献。这六段的引言部分应该能够为论文的基础构建奠定坚实的基础。

相关研究工作部分应根据研

究问题进行分节，主要描述与工作相关的领域、问题及其背景，而不是简单重复前人的研究。总结前人研究的存在问题是必要的，这可以在最后一段中进行。

方法部分展示研究方法，使用伪代码或流程图等工具帮助说明。这一部分的重点是将你的方法用最简洁明了的方式讲解清楚。可以分段描述每一部分的框架和实施策略，使读者能够清晰理解研究方法的核心内容。

实验部分一般分为三段：问题描述、对比算法和参数设置。此部分应清晰地描述实验设计，而结果分析不仅要罗列结果，还要进行深入的分析。仅仅列出结果可能不会获得好的反馈，因此需要对结果进行深层次的讨论。结论部分应使用过去时态，明确总结研究发现。

未来工作部分应描述下一步的研究计划。同时，参考文献的引用格式必须符合投稿期刊的要求，确保准确无误。总结与展望部分可以回顾前面的内容，并对未来的研究方向进行展望。这部分可能涉及到科研方法、设计理念以及对未来工作的思考。

#### 四、总结与展望

未来，问题特性与知识迁移科研工作主要关注问题特征驱动的知识迁移机制、多模态多目标特征选择方法及实际问题的探索。相信通过不断改进和深入研究，将会有更多新的成果和研究进展。○

\* 本文根据作者所作报告速记整理而成

#### 作者简介



陈科，郑州大学副研究员，硕士生导师，长期从事复杂数

据信息挖掘、进化特征选择、进化迁移优化、多目标优化、智能故障诊断等方向研究，取得了一系列创新性成果。近年来，在 IEEE TEVC、IEEE TCYB、INS 等高水平学术期刊和会议上发表论文 30 余篇，2 篇入选 ESI 高被引论文；申请发明专利 11 项，其中授权 5 项。担任中国人工智能学会青工委委员、教育部学位论文评审专家、河南省科技项目评审专家等，担任包括 IEEE TEVC、IEEE TCYB、

IEEE TSMC、IEEE TAI 等 20 余个高水平期刊 / 会议特邀审稿人。入选河南省高层次人才、中原青年拔尖人才和河南省科协青年托举人才。主持国家自然科学基金青年基金、中国博士后科学基金特别资助、中原青年博士后创新人才等国家 / 省部级项目 5 项。获得河南省教育厅科技学术论文类一等奖、中国自动化学会优秀博士学位论文提名奖、河南省博士后创新创业大赛最佳创意奖。

# 多智能体网络下的分布式优化算法研究

文 / 东北大学 石重霄

导读：2024 年 6 月 28 日，东北大学副教授石重霄做客“CAA 我和优博有个约会”活动，为大家带来一场题为“多智能体网络下的分布式优化算法研究”的精彩报告。多智能体网络由一组智能体以及智能体之间的交互连接所构成，智能体具有一定的计算、感知、观测及通信的能力，它们利用网络的信息交互，结合自我感知与智能决策，完成单一智能体难以独自完成的复杂协同任务。近年来，多智能体网络下的分布式优化问题成为了研究的焦点，其主要原因在于许多实际的协同任务都可以由分布式优化问题进行描述，如无线传感器网络的协同定位等。

## 一、研究背景

在研究多智能体网络下的分布式优化时，首先需要了解其研究对象——多智能体网络。多智能体网络是从实际网络系统中抽象出来的一类网络模型，可以定义为由一组智能体及其之间的通信连接构成的网络系统。典型的例子包括实际工程中的无线传感器网络、由多个机器人组成的系统，以及智能电网等。只要这些节点之间存在通信连接，就可以被视

为一个网络系统。

多智能是指每个智能体具备一定的计算、感知、观测和通信能力，如图 1 所示。例如，在无线传感器网络中，每个传感器节点具备观测能力，能够获取目标的方位信息、距离信息，或者测量周围环境的温度等。

另一方面，如果在传感器节点上集成计算单元和通信模块，那么这些节点就进一步具备了计算和通信能力。在这种情况下，传感器节点就可以视为一个智能

体。例如，一个机器人可以通过其配备的摄像头或雷达来观测和感知周围环境，然后将图像数据传回自身的 CPU 进行处理，最终形成决策结果，从而使机器人也具备了智能体的特征。

在多智能体网络中，“多”意味着多个智能体协同工作，以完成单个智能体难以完成的任务。多智能体网络的研究重点是探讨如何通过多个智能体的协作，来实现复杂任务。例如，在传感器网络中，测量目标位置通常需要

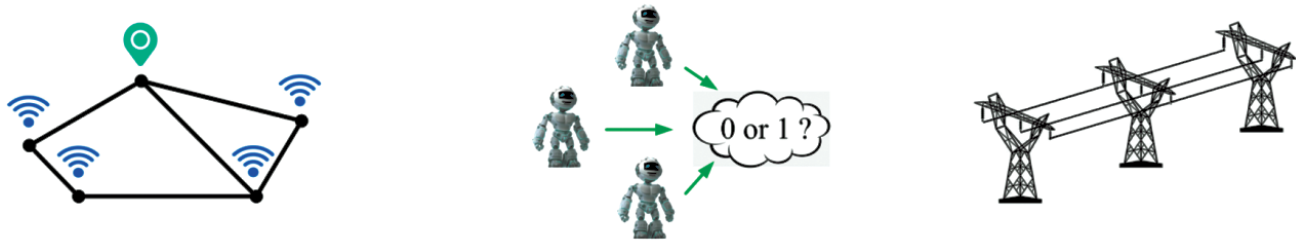


图 1 多智能体网络



多个传感器的协作。GPS 定位技术中，它需要多个卫星对目标进行测距或测方位，通过整合这些数据来计算目标位置。通过这种协同工作，多个智能体能够完成单个智能体无法独立完成的复杂任务，从而体现出多智能体网络的优势和研究价值。

在由多个机器人进行目标追逐时，它们通常会形成包围动作，这是单一智能体无法完成的任务，体现了协同的必要性。同样，许多大型演出中常见的无人机编队表演，也需要多个无人机协作来形成各种图案，这也是单一无人机无法独立完成的任务。

在实际的多智能体网络中执行协同任务时，通常会遇到诸多优化问题。以无线传感器网络对目标定位为例，如图 2 所示，每个传感器节点需要利用自身的观测数据，并通过网络间的数据传递进行数据整合，最终求解一个全局二次优化问题以确定目标位置。在这里，每个节点都有自己的子目标函数。最终，所有节点

需要通过优化这些子目标函数来求解出决策变量的最优点，即目标的真实位置。研究多智能体网络下的分布式优化，不仅有助于理解 and 解决单一智能体无法完成的复杂任务，还能提升协同任务的效率和准确性。

在电力网络的经济调度中，我们最终的目标是寻求成本最低的解决方案，这个最低成本可以通过优化问题来计算。传统的优化方法通常是集中式的，特点是需要一个中心节点来融合所有智能体的信息，计算出一个最优解，然后将其传回给智能体应用。然而，这种集中式计算模式存在一些限制，如必须有一个中心节点、计算效率低、灵活性差等。

为了弥补这些不足，我们提出了分布式优化方法。分布式优化无需中心节点，每个智能体仅需利用自身的智能决策，并通过与邻接节点的通信交流，实现对整体目标的优化，这类方法具有计算效率高、灵活性强等优点。

考虑由  $n$  个智能体组成的网

络，其任务是协同优化如下的全局优化问题。每个节点  $i$  都拥有一个私有的目标函数，该函数信息仅为相应的智能体所知，其他智能体无法获知。分布式优化的任务是，每个智能体需要利用自身子函数的信息，结合某些优化算法的运行，再通过分布式网络通信，最终求取全局优化问题的最优解。

分布式优化的研究可以分为两个主要方向：一是分布式网络环境，二是优化算法。分布式优化研究的爆发始于 2009 年，当时 link 发表了一篇重要文章，提出了最经典的基于梯度下降法的分布式优化算法。在 2015 年，专家学者通过改进分布式梯度下降法，提出了一种精确的一阶算法。这种算法在梯度法基础上添加了积分项，实现了快速且精确的收敛。

另一方面，从网络环境的角度出发，也有针对时变网络、有效网络、随机网络等网络结构进行优化算法的设计与分析。通过这种双重视角的研究，分布式优化在理论和应用上都取得了显著

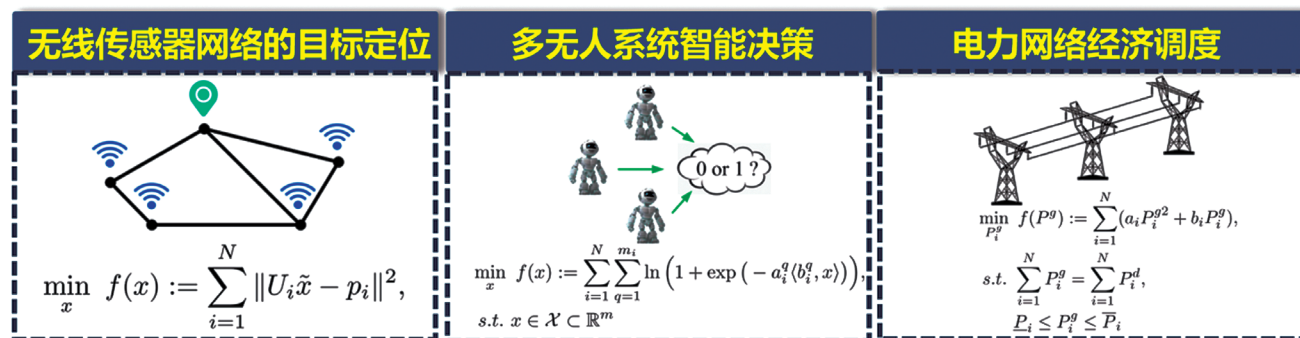


图 2 多智能体网络协同任务

的进展。分布式优化方法不仅要设计高效的优化算法，还需考虑实际网络环境中的各种不确定性和复杂性，从而在多智能体网络中实现有效的全局优化。

尽管在分布式优化研究方面已有许多优秀成果，但仍存在一些关键问题需要解决。首先，从优化算法的角度出发，主要难点在于如何降低算法收敛性分析的复杂性以及如何提高算法的收敛速度。另一方面，从网络环境的角度来看，大部分研究成果是在安全或理想环境下进行的，而我们关注的是如何在非理想或对抗环境下保证算法的可靠性。针对这些问题，我们研究了在简化收敛性分析、提高收敛速度，并设计出在面对网络延迟、数据丢失和恶意攻击等情况下仍能保持高性能和可靠性的鲁棒分布式优化算法。

## 二、主要工作

### （一）如何降低算法收敛性分析的复杂性？

首先，我们研究了如何降低算法收敛性分析的复杂性，研究框架基于增广拉格朗日乘子法的分布式优化问题展开。考虑由  $n$  个智能体组成的无线网络，这些智能体的任务是协同优化一个全局性能指标。每个智能体  $i$  拥有一个私有的目标函数  $f_i$ ，该函数仅由智能体  $i$  所知，其他智能体无法获知，如图 3 所示。假设每个子函数

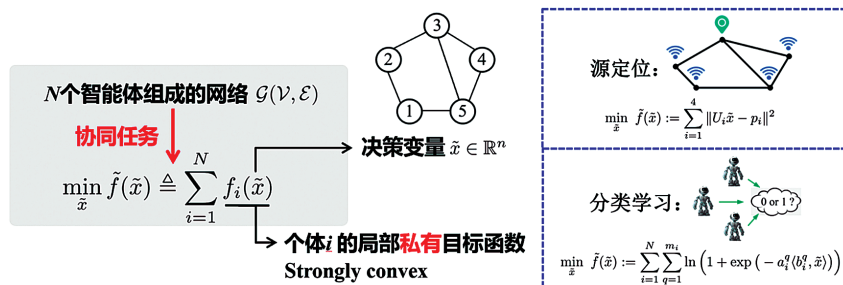


图 3 问题描述

都是强凸的，在这个假设下，设计的算法可以实现线性收敛。每个智能体拥有统一的决策变量  $\tilde{x}$ ，我们最终要求出  $\tilde{x}$  的最优解。针对这一问题，现有许多有效的方法可以进行求解，主要分为三类：利用一阶梯度信息设计分布式优化算法、利用二阶 Hessian 矩阵信息设计分布式优化算法，以及利用零阶目标函数信息设计分布式优化算法。大多数研究利用一阶梯度信息设计算法，而这种设计又分为最经典的梯度下降法和增广拉格朗日乘子法。

基于增广拉格朗日乘子法的分布式优化算法可以分为两大类：首先是 X convex 算法，它在经典梯度法基础上添加乘子更新的积分项，实质上是增广拉格朗日乘子法的一种形式；其次是 DRM 算法，全称为分布式线性化交替方向乘子法，通过信息化处理和分布式更新实现，同样属于增广拉格朗日乘子法的分布式优化算法。作为非数学专业背景的研究者，我发现研究这些算法最具挑战性的部分在于分析其收敛性和

速度，这涉及复杂的数学推导和证明过程，尤其是算法中涉及多类网络相关参数的收敛性分析。

在分布式优化算法的收敛性分析中，复杂的网络参数增加了推导和理解的难度，尤其是在看到一个推导结果后忘记了上文推导过程时，常常会产生对算法收敛性的疑问。我思考能否在不改变收敛性结果的情况下，提供更简单的收敛性分析方法或降低分析复杂性。尽管这项工作不直接改进算法设计，但有助于更直观地理解分布式优化算法的运行模式。

在分布式优化算法的收敛性分析中，设计思路对分析过程产生重大影响。首先，我们考虑原始的优化问题，所有智能体的决策变量都是相同的  $\tilde{x}$ 。为了优化这个问题，我们将每个智能体的局部决策变量  $x_i$  替换到各自的目标函数  $f_i$  中，并确保这些局部变量相等，从而等价化两个优化问题。

接下来，我们需要设计算法来处理带有约束的优化问题。简化约束的一种方法是引入关于拉普拉斯矩阵的分解技术，构建一

### ■ 技术创新：利用拉普拉斯矩阵分解技术降低算法收敛性分析的复杂性

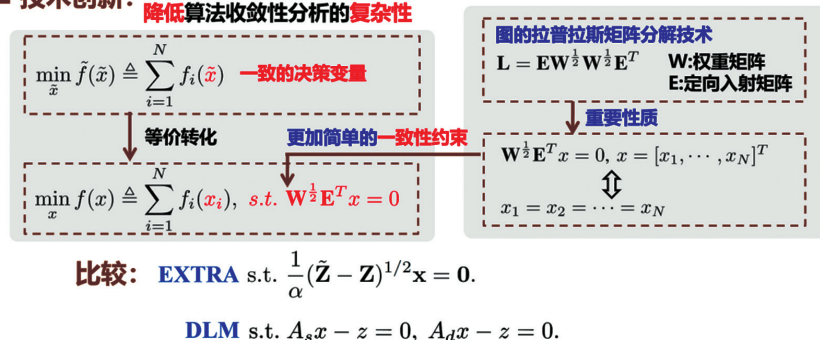


图4 拉普拉斯矩阵分解技术

个简单的一致性约束。图4中W和E是拉普拉斯矩阵的部分，涵盖了与拉普拉斯矩阵相关的信息。与现有算法相比，这种约束的构造较为复杂，因为它包含了更多的矩阵信息，如X中的邻接矩阵及其诱导的相关矩阵，以及DLM中的有项入设矩阵、无项入设矩阵和辅助决策变量。

因此，可以看出，这些约束的构造相对来说较为复杂，我们可能需要在收敛性分析中进行进一步简化处理。接下来的任务是基于增广拉格朗日乘子法设计算法来解决带有约束的优化问题。首先构造一个增广拉格朗日函数，该函数在x方向上是凸的，在λ方向上是线性的，形成了一个马鞍形状的优化形式。

我们的目标是解决带有约束的优化问题，并最终将其转化为寻找拉格朗日函数的鞍点，即鞍点搜索算法。通过求解拉格朗日函数在x方向上的梯度和λ方向上的正梯度，我们得到了最终的算

法结构，如图5所示。其中， $x_k$ 代表对原始优化问题最优解的估计， $\lambda$ 的k代表乘子的更新率，红色部分表示分布式网络通信。

在进一步的收敛性分析中，我们只需证明算法估计变量 $x_k$ 与最优解之间的差距趋于0即可，这涉及算法的迭代关系。乘子的更新影响着x，将乘子的更新反馈到x中，可以得到一个仅关于x的表达式。

将这一项带回λ中，并与 $W^{\frac{1}{2}} E^T$ 相乘，最终可以统一为一个关于拉普拉斯矩阵L的表达式，

### ■ 技术创新：利用拉普拉斯矩阵分解技术降低算法收敛性分析的复杂性

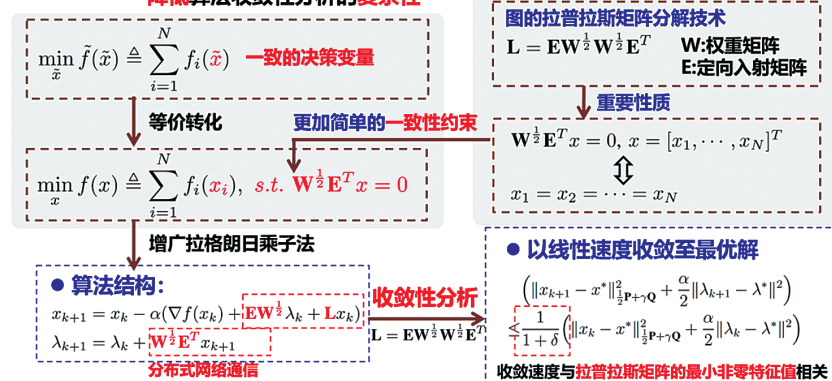


图5 收敛性分析

即L乘以一个积分项。这样，更新率仅包含了拉普拉斯矩阵的一类矩阵。

通过拉普拉斯矩阵的分解，我们整合了多种网络相关参数，使得收敛性分析只需使用拉普拉斯矩阵的一类参数，其中包括最小非零特征值。这里的δ与拉普拉斯矩阵的最小非零特征值相关联。

通过比较我们提出的算法收敛性分析过程与现有结果，我们有效地简化了分析过程，并且得出了与已有结果相符的结论：在固定步长满足一定条件时，算法生成的估计值以线性速度收敛到优化问题的最优解。

当我们将λ的更新反馈到x中时，这形成了关于x的一个积分项。在经典的梯度下降法之后加入这个积分项，实际上就是x convex。进一步地，如果我们将x中关于λ的部分视为整体变量 $P_k$ ，然后对λ的更新率进行 $W^{\frac{1}{2}} E^T$



的左乘，便可得到关于P的更新率，也即DLM中的更新率。

## （二）如何提高算法的收敛速度？

接下来我们将进一步研究如何提升算法的收敛速度，研究框架基于一类分布式假设检验的设定展开。假设检验是统计学中的重要概念和方法，在各个领域都有广泛的应用，例如对模型参数进行估计、方差和均值的推断等。考虑一个通信链路，数据传输可能会遇到中断和丢包，我们需要推断中断的概率，这也涉及到假设检验的任务。

在多智能体网络中，假设检验的具体问题描述如下：考虑由N个智能体组成的时变网络，即节点之间的连接结构随时间变化，不一定始终保持连接，但整体上需要满足联合连通性条件。

进一步，在每个采样时刻k，每个智能体i收集到一个观测数据 $s^i_k$ ，这些数据可以表示为方差或者中断标签，例如，中断可以表示为0，没有中断表示为1，这些观测数据服从一个未知的概率分布 $f^i$ 。

假设检验的目标是推断出或者找出与 $f^i$ 相似的概率分布，即对 $f^i$ 的分布进行估计。对于每个 $f^i$ ，每个智能体拥有一组私有的函数集合 $l^i$ ，每个 $l^i$ 对应一个参数 $\theta$ ，这个 $\theta$ 是似然函数的一个假设。假设每个智能体有m个这样的函

数集合。 $\theta_1$ 到 $\theta_m$ 构成一个假设集，所有智能体共享这个集合。

针对每个 $\theta$ ，智能体使用其私有函数集合 $l^i$ 到 $l^m$ 来估计对应于 $f^i$ 到 $f^m$ 的概率分布。接下来的任务是设计一个分布式算法，使得所有智能体能够找到假设集中最接近真实概率分布的那个假设，这涉及到优化问题的表述。

图6是进行优化问题的等价转化，使用KL散度进行转换。KL散度是衡量两个概率分布之间差异的度量，其值大于等于0，数值越小表示两个分布之间差异越小。

在假设检验问题中，可以描述 $f^i$ 与似然函数之间的差异性，并通过最小化一个核函数的数值来确定属于最优假设集中的假设。所有智能体共同解决这个全局优化问题，本质上是一个分布式优化问题。已有的研究在这方面设计了有效的算法，例如，2017年Link提出的非贝叶斯学习算法就是一个例子，该算法结合了贝叶斯更新规则和分布式网络通信。

在该算法中， $\mu^i_{k+1}(\theta)$ 代表第i个智能体在第k个采样时刻对假设 $\theta$ 的信任程度，可以视为对 $\theta$ 的假设置信度。这样，分布式假设检验任务就完成了。然而，我关注的不仅是任务的完成，还包括算法的收敛速度和学习效率问题。已有研究证明，非最优假设的置信度以指数速度收敛。虽然收敛速度已经很快，但我们是否还有提升的空间，或者是否可以通过微调算法来进一步提高收敛速度，这是我们当前工作的重点。

我们的切入点是从观测数据角度出发的。在传统的非贝叶斯学习算法中，每一步的更新仅使用当前时刻的观测数据。在日常学习中，历史经验对于学习新知识具有指导意义，这也是学习迁移理论的一部分，涉及教育学中的相关问题。直观上来看，历史观测数据也应当对学习过程有所帮助。因此，我们思考在第k+1步时，将前k步的历史数据 $x_1$ 到 $x_k$ 引入算法中，是否能够提高算

### ■ 问题转化：分布式优化

$$\text{寻找最优集 } \Theta^* \triangleq \arg \max_{\theta \in \Theta} \left( - \sum_{i=1}^n D_{KL}(f^i \| l^i(\cdot | \theta)) \right) \rightarrow \text{本质上是一类分布式优化问题}$$

**KL散度**

### ■ 现有成果：A. Nedić et al. *IEEE Trans. Autom. Control*, 62(11), 5538-5553, 2017

#### 非贝叶斯学习算法：

$$\text{假设置的信度 } \mu^i_{k+1}(\theta) = \frac{l^i(s^i_{k+1} | \theta) \prod_{j=1}^n \mu^j_k(\theta)^{[A_k]_{ij}}}{\sum_{p=1}^m \left( l^i(s^i_{k+1} | \theta_p) \prod_{j=1}^n \mu^j_k(\theta_p)^{[A_k]_{ij}} \right)}$$

→ 分布式网络通信

图6 分布式优化

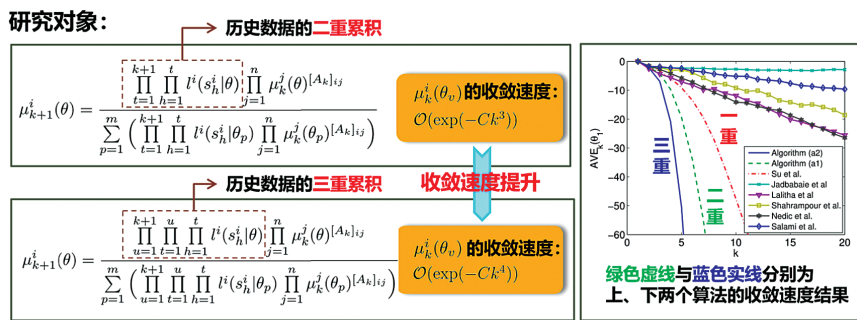


图7 利用数据累积技术提高算法的收敛速度

法的学习效率和收敛速度，这是我们设计的思路。

基于这一思路，我们设计了两类新的分布式优化算法，分别引入了历史数据的二重累积和三重累积，如图7所示。通过收敛性分析得出结论，更多重的历史数据累积会加快优化算法的收敛速度。仿真结果验证了这一结论，绿色虚线和蓝色实线分别表示二重和三重累积所对应的收敛速度，可以看到，累积的历史数据越多，算法的收敛速度越快。在图中，线性收敛表示没有引入历史数据的算法。纵坐标取对数，使得指数收敛的情况下呈现线性趋势，我们实现了超线性收敛。

历史数据累积技术的优点显而易见，但它也存在一些缺点。通过理论分析，我们得出结论，累积的历史数据越多，算法的展开性能越差，内存负担也越重。展开性能指的是在每个  $k$  步时达到目标速度的概率。随着历史数据累积的增加，这一概率会降低，即展开性能变差。另一方面，内存负担的增加很容易理解，因

为引入更多历史数据会增加内存使用量。因此，在利用这项技术提升算法收敛速度时，需要进行权衡。

## (二) 如何保证算法的可靠性?

先前从优化算法的角度探讨了收敛性及其速度相关的问题。现在我们转而从网络环境的角度出发，研究如何在对抗环境中确保算法的可扩展性。

在多智能体网络中，协同定位是一个关键问题，对于执行多种协同任务至关重要，如目标追逐和编队。定位的研究具有重要意义。过去的研究已将协同定位问题转化为一类分布式优化问题来解决。图8中包含  $N$  个静态智

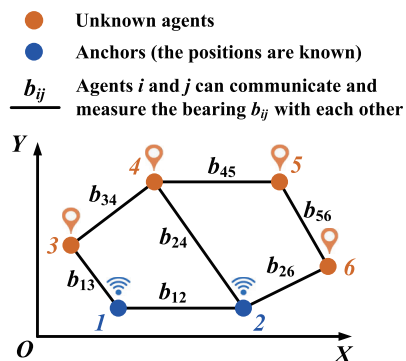


图8 基于方位的协同定位

能体的网络，将其视为节点。每个节点可以分为两类：已知位置的主节点和待测位置的待定节点，用蓝色和橙色表示。

节点  $i$  到节点  $j$  的方位由定位向量  $b_j^i$  描述。若  $i$  与  $j$  之间有边缘连接，则它们可以相互测量到对方的方位信息，并进行通信。方位测量信息由单位向量  $m_j^i$  表示。

基于上述网络模型与测量模型，我们提出了定位网络的概念，由四元组组成：主节点位置向量、待定节点集合、定位向量集合和方位测量信息集合。在通过设计有效的分布式算法，给定主节点位置信息和节点之间的方位信息，使得待定节点能够解算出其真实位置  $p_i$ 。为此，我们将问题转化为求解非线性方程组的形式，并证明了当该方程组存在唯一解时，可以等价地将其转化为优化问题进行求解。

通过求解目标函数的梯度，可以得到一个分布式优化算法，每个节点仅利用其邻居的位置估计进行更新。研究表明，当优化问题的解是唯一且最优值为0时，算法生成的估计变量最终会收敛到节点的真实位置，从而完成定位任务。这里需要强调，解的唯一性和最优值为0的条件称为可定位条件。

针对已有结果，我们注意到在方位测量信息等于真实方位的情况下对算法和问题进行了研究。

我们的目标是考虑当某些方位测量信息不准确时，尤其是在对抗环境中的情况。例如，在战场或存在黑客的环境中，可能会有对方篡改节点的测量数据，使方位测量信息不准确，从而导致定位结果错误。

如图 9 所示，假设节点  $P_3$  和  $P_4$  是待定位节点，它们的方位信息当前是平的。如果这些方位测量信息被篡改成一个不正确的值  $p'_3$ ，那么节点  $P_3$  的位置估计就会出现错误。

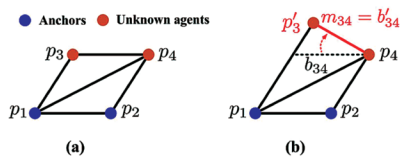


图 9 对抗环境下定位算法的可靠性

我们的任务是在存在恶意或篡改的测量信息的情况下，仍然能够保证上述定位算法的可靠性。因此，我们首先提出了一个对抗模型，即考虑某些方位测量信息可能被篡改或是恶意的情况。这些恶意测量信息对应的边称为恶意边，集合由  $\varepsilon_m$  表示，其数量受到一个上限  $s$  的限制，且  $s$  严格小于总边数。

当面对对抗环境时，确保分布式定位算法的可靠性需要解决两个主要任务。首先，我们需要有效地搜索网络中的恶意测量信息，这些信息可能被恶意篡改以导致定位错误。我们采用逐步排

除边的方法进行搜索，每次移除  $s$  条边并验证它们是否包含恶意信息。搜索的核心条件是确保在移除任意  $s$  条边后，定位网络仍能保持可定位，这是判断恶意信息存在的充分条件。

其次，一旦发现网络中的恶意测量信息，需要隔离这些信息以保护分布式定位算法的准确性和可靠性。为了确保全局一致性和信息同步，节点按照统一的搜索顺序运行分布式定位算法。这个搜索顺序结合了字典排序和网络泛洪算法，每个节点在每次搜索中都执行分布式定位算法，以验证最优化问题的解是否为 0。这种方法不仅能有效搜索并隔离恶意测量信息，还能确保定位算法在对抗环境中的可靠性和稳定性。

在每次搜索中，运行分布式定位算法，其迭代次数受限于预设的最大迭代次数  $V_r(\hat{p}_r(T_r))$ ，这个值与阈值  $\delta$  相关联，共同影响算法的停止条件。在达到预设的迭代次数后，算法返回一个位置估计值，并将其代入目标函数中进行评估，判断其是否小于预设的阈值  $\delta$ 。这里的  $\delta$  被定义为严格大于目标函数最优值的数值。根据目标函数值与阈值之间的差距，如果大于阈值，则表明搜索未成功，即去掉  $s$  条边后仍未包含所有恶意边；如果小于阈值，则表明搜索成功，此时的估计值可以视为目标位置的良好估计。

通过数学证明，我们得出了估计误差的界限，其与预设的阈值  $\delta$  相关。该误差界限还与一个特定的矩阵相关，该矩阵代表在去掉  $s$  条边和所有恶意边后形成的子网络的方位拉普拉斯矩阵。这个矩阵的特性保证了误差界限的可靠性，与恶意测量信息无关。

最终，我们通过仿真验证了算法的有效性。在仿真中，我们设定了边 47 和 59 为恶意边，并且第 577 次搜索成功地包含了这两条边。设定的阈值为 0.05，运行结果表明，在第 577 次搜索中，目标函数值显著低于阈值，证明了搜索的成功性。在此次搜索中，算法展现了良好的收敛性，如图 10 中蓝线所示，目标函数值逐渐趋近于 0，并在 1500 多次迭代后以非常小的误差跳出循环。

### 三、学术成果总结与心得体会

在每次科研工作中，我们需要以解决新问题为初心。写作论文时，要明确所研究的科学问题是否具有重要性和新颖性。这不仅是审稿人关注的重点，也是科研工作的核心。在确立了新问题之后，选择合适的技术和方法去解决是至关重要的。大部分情况下，新问题会催生新技术和新方法的提出，这些技术和方法的有效性需要在理论和实验层面加以论证和验证。在论文的撰写过程中，确保论述新技术和方法的正



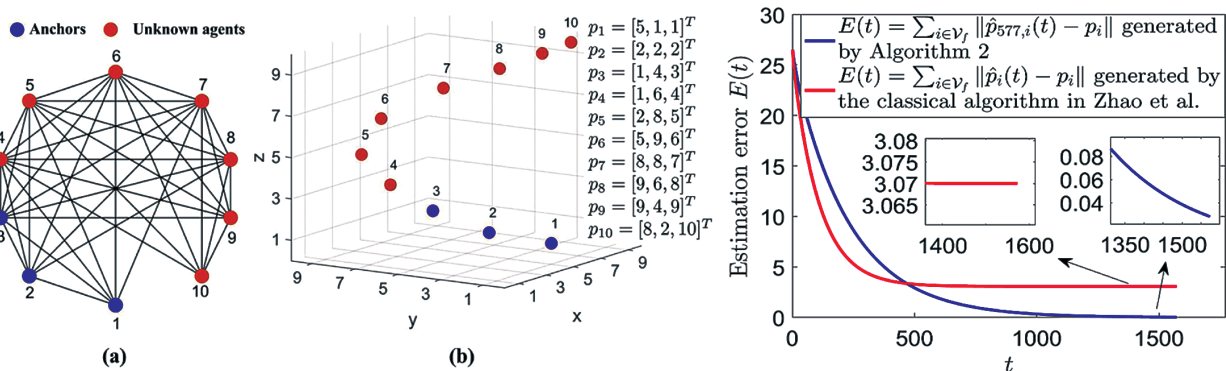


图 10 分布式定位算法的可靠性

确性，并通过实验数据验证其有效性，是至关重要的一步。

一篇优秀的论文不仅需要提出新问题和新方法，还需要对现有结果进行深入比较和理论分析。与现有研究成果的比较可以突显出新方法和技术的重要性和优势。此外，对理论性结果进行细致的分析和解释，能够帮助读者和审稿人更好地理解研究成果的价值和创新之处。在实验数据方面，充足的支持性数据能够进一步强化论文的完整性和说服力。

最近在审稿过程中，我发现一些论文虽然提出了新问题或新技术，但在对结果的比较和理论分析上显得不够完整，这可能会影响读者的理解和接受。因此，为了确保科研成果的有效传播和认可，我们在撰写论文时应该注重这些方面的完整性和深度分析。

写出一篇优秀的科研成果不仅需要提出新问题和采用新技术进行解决，还需要充分的实验数据支持。这些要素是确保论文完

整性和说服力的关键。然而，一篇文章不可能完全包含所有要素，因为不同的研究问题可能会侧重于不同的方面。文章的质量和影响力往往取决于其中包含了多少关键点和独特之处。在科研道路上，理解和实践这些原则并没有捷径可循。

“即使是千里马，也不能一蹴而就。”这句话深刻体现了在科研道路上持续努力和不懈追求的重要性。多年来，这句话一直激励着我，希望它也能为大家带来一些启发和思考。○

\* 本文根据作者所作报告速记整理而成

## 作者简介



石重霄，东北大学副教授，博士生导师。主要研究方向有多人系统协同控制、优化与决策，信息物理系统安全性等，目前在相关领域发表 SCI 论文 21 篇，

其中 18 篇以第一作者身份发表，包括在控制领域顶级期刊 Automatica 与 IEEE Transactions on Automatic Control 发表论文 3 篇（其中一篇以长文形式发表），以及其他 IEEE 会刊发表论文 5 篇；入选 2021 年度中国博士后创新人才支持计划、沈阳市领军人才；主持国家自然科学基金青年项目、辽宁省自然科学基金面上资助计划项目、中国博士后科学基金面上项目等；获 2023 年度中国自动化学会优秀博士学位论文奖、2022 年度辽宁省优秀博士学位论文奖。

## 张钹院士：天才的决心

张钹用自己的职业生涯，培养了整整一代人工智能人才，而留在这些人身上的坚持，构成了我们今天所面对的技术现实。

这是一位老人和他所改变的一代人的故事。张钹讲起他的学生们总是最高兴的，他还给这个学生群体取了一个名字——清华代表队。

### 最好的学生

人工智能是一个很容易把人讲糊涂的领域。这个学科充满未知，又不断自我颠覆，一旦问了稍微深入一点儿的问题，对话就会开始变得缠绕，越来越多术语，越讲越复杂，越讲越听不明白。往往只有天才，才能够将复杂的AI讲得简单，谁都能听得懂。

这种感受在见到张钹的时候最为强烈。他今年89岁，在这个领域工作了46年，跟他聊起人工智能，不管是多么前沿的话题，抑或是晦涩艰深的专业知识，他都能用清晰的几句话给人讲明白，一针见血抓住本质。也正是他的这种天赋，让他教会了一代又一代中国年轻人，究竟什么是人工智能。

张钹是清华大学计算机系的教授，也是我见过的聊起人工智能时最轻松自在的人。他参与了清华大学人工智能方向的筹建，创立了人工智能专业。他的整个职业生涯践行了“活到老学到老”，75岁的时候，学生去拜访他，发现他还在做数学题，他说概率论很重要，怕自己的数学生疏了。他在80岁之前，每年要求自己努力发表独立研究的论文。尽管现在到了89岁，一个早已可以退休的年纪，但他还在学习新知识。

“这次是真的突破，过去人工智能所做的研究跟信息时代差不多，只是对信息形式的处理，进步不大，现在变为处理信息的内容、处理信息中所包含的知识，这是一个重大转变，目前所有的变革都是从这一点引发的，所以我们讲，这次是真正的突破。过去人工智能总容易夸大所取得的成果，导致大家过分乐观。当时搞人工智能不大需要数学，能自圆其说就好了，现在则难以自圆其说，必须深入到数学里头去，才能真正搞懂它的技术问题。”张钹说。

张钹是中国人工智能最重要的见证人。他是中国第一位人工智能领域的中国科学院院士。人工智能历史上的许多“第一”都与他有关——第一个在国际顶级杂志上、第一个在人工智能领域顶级会议上发表人工智能学术论文的中国科学家，引进了中国第一台机械臂，创立了第一个人工智能领域的国家重点实验室，建立了第一个与人工智能领域有关的博士点。清华大学设立“人工智能”这个学科方向，也是他第一个提出来的。

事实上，只要愿意，张钹完全可以讲一大堆术语：他是国际上最早提出用数学模型解决人工智能问题的学者之一，他和弟弟张铃提出的问题分层求解的商空间理论，在国际上被归属为粒度计算领域的三大学派之一，这个理论有力推动了中国粒计算研究的快速发展，他也因此获得1995年的国家自然科学三等奖。不仅如此，他在人工神经网络上系统分析了典型神经网络模型，提出了一种自顶向下的新的人工神经网络构造性学习方法。2020年，他系统阐释了“第三代人工智能”

的概念，引领国内的人工智能发展。

在我们的访谈全程，张钹讲的都是最朴实的道理，这是他的——一种坚持。人工智能热潮之后，很多地方邀请他去做报告，请他讲讲，他每次都是像在清华给学生讲课一样，针对对方的需求重新拟定讲稿。有时对方嫌他的PPT太简单，版面不够华丽，还发给他模版让他改得复杂一点。那些模版都是当下最流行的，满屏密密麻麻的术语、曲线、表格、图片，甚至视频。但张钹坚持用自己的PPT，“用自己的PPT可以按自己的思路来讲，要讲出自己对问题本质的理解”。

他的同事、清华大学计算机系教授朱文武用三件事定义张钹：“第一件事是，40多年前，他能在那个特殊的时代引领中国人工智能发展，创立国家重点实验室，这是厉害的；第二件事是25年前，他能在微软亚洲研究院当顾问委员会委员，在海外一流大学教授、图灵奖得主中间，他的指导意见令人服气，这也是很厉害的；第三件事就是最近这10年，他提出了第三代人工智能的理论。一个人在每个阶段做一件事是可能的，但一个人同时把这三件事做完了，我觉得这是真的了不起。”

张钹的成就大多都有文字记载，他的专著，他提出的理论，他的学术成就，他有200多篇学

术论文和五部专著，但后来我发现，这位清华老教授还有一份更重要、却鲜有文字记录的成就。他留下的不止是教科书、实验室、教学方法，以及不断更迭的人工智能知识。他对国家更大的贡献是他所留在其他人身上的原则，在他所培养的一代又一代学生身上，有一种共同的使命感，以及一系列做事的根本性原则——基于人工智能技术，我们应当做什么？不做什么？坚持的原则是什么？什么才是我们所追求的技术未来？

清华有句口号叫做“为祖国健康工作50年”，张钹在73岁那年实现了这个目标，他的学生们在系里给他办了一场从教50周年的庆祝会，他在会上开玩笑说，中国当老师的最高标准是孔夫子，如果拿他和孔子比，他觉得自己有三个指标有望超过这位万世师表：

第一，他的教龄比孔子长。孔子30岁开始讲学，72岁去世，教龄42年，“我已经从教50年了，并且还将继续”。

第二，他的学生比孔子多。孔子有三千弟子，也就是听过他讲学的人，“听过我的课的学生肯定超过3000人了”。

第三，孔子培养了七十二贤人，张钹把这一点定为了职业目标，“我要培养超过72个博士生”。

我见到张钹的时候，他仍在

继续带学生。他很高兴地告诉我，等明年，自己又有一位博士生毕业，他将会在90岁那一年，完成培养90位博士生的事业。

我仔细翻阅了他所有博士生的履历，这是一个影响力极大的群体，几乎所有人都从事了计算机相关的职业，其中涵盖了人工智能领域最主要的研究和产业方向，很多人是各自领域内全国乃至世界范围内的领军人物，他们共同构成了中国人工智能发展的根基。这位老人用自己的职业生涯，培养了整整一代人工智能人才，而留在这些人身上的坚持，构成了我们今天所面对的技术现实。

这是一位老人和他所改变的一代人的故事。张钹讲起他的学生们总是最高兴的，他还给这个学生群体取了一个名字——清华代表队。

## 坚持

张钹的办公室有一整面墙的书柜，里面装着他的职业生涯。书柜里有好几层空空荡荡的架子，那里曾经放着人工智能的专业书，它们在数次技术变革中落伍了，“全都扔了”。留下来的书柜里，顶端一排放着旧书，是他关于商空间理论所写的《问题求解理论及应用》，以及《人工神经网络理论及应用》，这些书都分为中文版和英文版。但他更在乎的并不是



自己的著作，他指着柜子中央两排整整齐齐的论文集，“这是我真正的作品”。

那是张钹所有博士生的毕业论文。那一栏里的很多名字，现在已经成为了人工智能领域非常有名的专家。摆在最前排的论文里有一本属于马少平，他是张钹在1995年招收的博士生。现在的他，也是清华大学计算机系教授，是今天人工智能领域里非常重要的学者，是在智能信息处理和信息检索领域深耕了超过20年的专家。这在当下的环境里是很少见的，而这份坚持，正是张钹留给他的原则。

马少平是清华大学1977级的学生，也是恢复高考后第一届上大学的学生。当时清华大学正在筹建计算机系，还要设置那时候谁也没听说过的“人工智能与智能控制”教研组。如今许多热门专业，包括自然语言处理、汉字识别、语音识别、机器人，在上世纪70年代末的清华已经出现了。他记得入学的时候新生可以参观不同院系，计算机系的人工智能展示室显得最特别——房间里有一个机器，模仿阿里巴巴和四十大盗的故事，喊芝麻开门，灯泡就亮了；喊芝麻关门，这个灯就关上了。

今天看来已司空见惯的语音控制，在上世纪70年代，让这个年轻人产生了极大的兴趣。他抱

着强烈的好奇心，开始了自己的人工智能生涯，在这里学习了最早的人工智能课程，听张钹讲人工智能导论，学习人工智能编程语言。

马少平上课选的大作业是教机器下五子棋，硕士毕业论文写的是汽车的自动驾驶。当时国内没什么材料，查国外信息又很困难，他就经常去找张钹帮忙。张钹当时是系里少数去过美国访学的老师，也会热心地给他出主意。马少平改造了日本二手车，给马达加控制。由于当时没有GPS，没法自动记录轨迹，他们想出来的对策是在车上放一桶水，用一根管子引出来，让它滴水，通过看路上的水的痕迹，来判断自动驾驶的路径。最后他毕业作品的展示是在清华主楼的两个门洞之间，从右边的门洞开进去，从左边的门洞开出来。这就是1984年清华学生实现的自动驾驶。

坐在办公室里，马少平讲起这些往事的时候一直笑。这是他最初从人工智能研究里得到的乐趣。后来他留校任教，又选择张钹做自己的博士导师，跟他一起参与筹建人工智能国家重点实验室。张钹引进中国第一台机械臂PUMA560的时候，国外还在对中国实行禁运，经历了一番波折后，才运到北京，他跟着张钹一起去西苑机场，接收了中国的第一台机器人装置。

然而，上世纪90年代，人工智能进入了寒冬期，没有太多项目和任务，很多人开始转行，但马少平做了一个当时少有人做的决定，他选择了汉字识别研究方向，继续在这个自己觉得有意思的学科里深耕。

“张老师说过一句话，对我触动比较大，其实我在早期，尤其是人工智能低潮的时候，也是有时做做这个、有时做做那个的，但后来我基本上只在信息检索这个方向在做了。选这个方向当然跟我和张老师当时的讨论有关，但20多年坚持这一个方向做，跟他说过的话有关。他跟我说，不管什么方向，你坚持做20年，再笨也是专家了。”马少平说。

采访张钹的时候，类似的故事出现过很多次。人工智能只在最近10年成为热点，在此前很长时间内，这是一个不容易找工作的专业。张钹帮助过很多像马少平这样对人工智能感兴趣的人，在技术寒冬依然坚持下去。我问他的动力是什么，张钹讲起了他自己的经历，这正是他从事人工智能的源头。

作为一个出生于1935年的人，他活在一个容易荒废天赋的时代里，亲历了战争、动荡、数十年的波折，他的天赋是物理和数学，但在他的年代，个人志趣排在时代命运后面。他的前半生都是国家替他选的路，先是当红

色工程师，过了几年又要他去研究导弹和飞行器自动控制。1978年，他接到一个新任务，清华大学要调整院系，希望他为新调整的计算机系找一个新专业。他是在国外学术期刊里第一次知道，国外的计算机系都有一个方向，叫做“人工智能”。

那一年，他已经43岁，从零开始学习人工智能。事实证明，他的确是一个天才。他1982年到伊利诺伊大学巴纳·香槟分校（University of Illinois at Urbana-Champaign）访学，一年后就发表了第一篇顶刊论文，很快也得到邀请，参加国际顶级会议作报告。在美国访学期间，他与计算机系的同事有过接触，令他印象深刻的是，“当时系里有位著名的华人学者，也是计算机系的重要领军人物，得知我们同样在1953年考大学，他跟我说，我当年考大学不敢报清华大学，只好在香港念了大学，后来到美国读博士。我当时心里想，我们现在名气没你大，主要是因为我们受到了许多条件的限制，如果我们是一起出发的，我们肯定不比他弱。”张钹说。

选择人工智能是他下的一个决心。相比于聊自己，他在访谈中更多谈到的是他人的聪明，他在清华认识的同学、老师，以及一代又一代的新生。他从一个荒废天才的时代走出来，而他在讲

台上面对的是这个国家又一代的年轻人，他决心要帮助他们，不再偏离路径，摆脱那种辜负天赋的命运。“我们还是幸运的，在1978年改革开放时，还算年轻，抓住了一点尾巴，能再次开启学术生涯，要是再晚一点，我们就什么也做不了了。”张钹说，“我自己当时到大学就深刻感觉到，我们招收的是最优秀的学生，能进我们团队做博士生的，是尖子里面挑尖子，所以我常说，我们团队如果不成为最优秀的团队，算怎么回事啊？”

这种坚持从张钹传递到了马少平，而已是博士生导师的马少平，也将这份原则传递给下一代学生。OpenAI最初公开ChatGPT的实验曲线后，马少平和学生讨论，这条曲线里其中一个性能做了很长时间都一直很平缓，突然间有一个跳跃，才确认出现了人工智能的进展。“我当时看着那个线，很多人都是这样，可能在很平缓的时候，觉得这条路走不通了，算了，不做了，这事没希望，又是一件这么烧钱的事，成本很大。为什么他们坚持下去了？是什么原因让他们想到，坚持下去肯定会有这次跳跃？”马少平说。

“我们在讨论实验室发展的时候，也都会提到这一点，就一定做一个长远的事业，第一，对人工智能发展有意义，第二是有

一定难度。这样里面有一个科研选题的问题，你有一个长期选题，但刚开始你可能又需要有一个相对短期的目标，跟这个长期目标契合。”马少平说，“重要的是坚持下去，坚持20年肯定能行，这是张钹老师一直强调的事情。”

最近两年的人工智能热潮中，马少平经常出去开会，有一次坐他旁边的是另一所同样顶级院校的计算机系系主任。两个人聊天，对方羡慕地说，其实我们学校本来也有好多在做人工智能的教授，后来都砍掉了，以至于现在整个系里边，没有一个老师是专门从事人工智能这方面的，基本上是断档了，只能重新找人，把那些转方向的人再找回来，或者再招一些新人，你们清华坚持得好啊，只有你们那边是一直在坚持做。

“实际上从1978年开始，我们一直以来都坚持着人工智能这个方向，我们一直没有断档，这是非常罕见的，也是最珍贵的。在90年代，其实很多国内学校都不做人工智能了，但那时候张钹老师一直觉得这是一个应该发展的方向，那时候他想得更多的是怎么能把它坚持下去。那时候我们的目标是，人工智能这个名称怎么叫咱不说，但是计算机的发展一定是，让计算机帮我们人类做更多的事情。这是必须的。”马少平说。

## 落地

清华计算机系有两大特色，一个是坚持，一个是落地。在培养人工智能人才这件事上，数十年间不断档，这很珍贵，也很艰难，也正是这份坚持，激发他们形成了清华代表队做人工智能的另一种特色——落地。

黄必清是人工智能在产业应用领域的专家。他从1990年开始跟张钹读博，是他招收的前10位博士生中的一个，现在是清华大学自动化系的教授，主要研究方向是人工智能在智能制造、健康医疗、社会治理等领域的落地应用。

“我读书的时候，大家凭自己的眼睛去看老师怎么做事，他的行动影响了我。”在我们的对话中，出现频率最高的词是“落地”，这也是张钹带给他的最大影响。“人工智能发展到现在，一定要落地，一定要在现实场景中应用，这是他的研究历程带给他的思想转变。他以前也是主要搞理论研究，逐渐转变开始重视应用落地。我正好在自动化系，我就跟张老师一起做，共同承担了很多事。这是非常有意义的工作。”

这段思想改变的经历发生在上世纪90年代，人工智能的寒冬期。黄必清上学的时候，人工智能是一个不那么受欢迎的专业，技术迟迟没有突破性进展，国外

开始陆续裁撤人工智能研究，很多大学也砍掉了人工智能专业，当时在国内，尚未开展起来的人工智能专业也面对了巨大质疑。

“（那时候）我们这个专业名声不好——吹得厉害，拿不出好成果。懂的人、不懂的人，都出来说自己懂人工智能。普通人分不出来谁在不懂装懂，谁是专家。学生不敢出去说自己是学人工智能的，别人问起来，他们就含糊地糊弄过去，说自己是计算机系毕业的。”张钹这样形容上世纪90年代的状况。

这是困扰人工智能直到现在的根本问题——这个学科真的有用吗？

从美国访学回国以后，张钹提了一个建议，必须自己去做调查研究，看看国家有什么需求，看看现实是什么状况，到底需要怎样的技术。这后来成为他坚持了一辈子的技术原则，“不结合实际需求的话，技术肯定发展不起来”。

清华计算机系的老师们花了两年时间调研，张钹去了重庆的兵工研究所，也去了东北的兵工厂，在齐齐哈尔、哈尔滨、沈阳实地研究武器制造过程。调查后，他有了一个明确的结论——发展智能机器人。

那段经历让人意识到，有许多工作不应当由人类承担。给他印象最深的一幕发生在东北的兵

工厂，他参观炮弹生产与安装车间，这是一项极其危险的工作。特别是安装引信的过程中稍有偏差，炮弹随时都可能爆炸。工厂的应对方法只能是把车间安排在山坳里，在安装引信的工位两边砌上水泥墙。不仅如此，炸药的毒性具有挥发性，他在制造炸药的车间遇到的工人，没一个人鼻子是灵的，长期在车间工作，严重损害了他们的嗅觉。

“我们当时一看，这些工作肯定要用机器人来代替，这是一个硬性需求，所以回来我就建议，一定要建立一个智能机器人实验室。”张钹说。

1985年，中国第一个智能机器人实验室在清华大学成立，一年后，国务院批准了《高技术研究发展计划（“863”计划）纲要》，智能机器人正式成为“863”计划中自动化领域的两大主题之一，张钹也成为了第一届国家“863”计划智能机器人主题专家组成员之一。正是因为张钹所在的清华团队早早选准了这个方向，他们在智能机器人研究上一直具有优势，很长一段时间里，清华大学计算机系同时是民用和军用机器人主题的组长单位，清华也引领了当时全国智能机器人的研究与开发。

作为张钹的学生，黄必清参与了“863”计划的课题工作，也从导师的身上学到了在人工智能



领域做研究的原则。“我上学的时候他已经 55 岁了，一直像一个年轻小伙一样，爬楼梯都是两级一步，他的心态一直是很饱满的。他是一个洞察力很强的人，非常敏锐，能快速判断一个方向适不适合我们做。当时我们就让机械手去面对工业场景，比如让一条线从孔里穿过去，还有一些更困难的调度问题，你自己琢磨，根本不知道从哪里下手，但他总会想办法，给你一个快速深入的方向。他那时候出去开会也会带新想法回来，拿回来让我们去模仿这个任务做。”黄必清说，“原来博士期间学到的很多人工智能理论，我工作之后用到了企业里头。”

其中一个重要的尝试是汽车玻璃缺陷检测。和张钺一样，黄必清也是在现实需求中发现了技术的必要性。在没有机器辅助前，检查汽车玻璃缺陷的办法全靠人工，一个工人自己搬着一块玻璃用肉眼去看，这样做，一方面人工成本非常高，另一方面工作强度很大，人很容易疲劳，容易漏检缺陷。

恰恰在这样的问题上，人工智能可以提供一种非常有效的解决办法。黄必清跟同事一起到了工厂现场，根据汽车玻璃生产的现实状况，设计了一整套采集过程，如何安置摄像头，如何调节参数，然后设计一个专门的人工智能算法去识别缺陷——在 1.5 米

乘以 2 米的玻璃表面，让机器自己识别，判断是否有缺陷，定位缺陷，还要对缺陷进行分类，是鼓了气泡、有划痕，还是印刷错误等等。

“我也做人工智能算法，关键是要解决企业的问题。这一点我跟张老师同感，甚至感受更深。我们在做技术应用的时候，一定要落地到一个行业里去，你要学习它的产品特色，学习它的生产制造过程，学习现场情况细节，方方面面都要了解的。”

黄必清做研究非常看重现场细节。他说，计算机视觉的算法数据高度依赖工厂环境，这意味着采集数据的摄像头放在哪里都是一门学问，采集的光源设计得不够细致，有反光、有折射，都会直接影响数据质量。纯粹的计算机视觉理论工作用的都是网上开源数据集，很少到企业实地去思考如何设计、如何采集正确数据，这也正是清华代表队做人工智能的不同之处。“不同行业对数据采集要求不一样，特定的生产环境也不一样，纯粹做算法、用现成的数据的人，肯定没有我们在企业、跟实际需求打交道的科研工作者体会得深。”他说。

黄必清已经在自己的领域工作超过 30 年了。读书的时候，他主要研究传统人工智能，比如智能调度，后来，他将智能调度的技术应用到工厂里，一直做企业

的工业自动化、智能化的工作。从 2013 年开始，他也开始做深度学习方面的工作。“一个是传统人工智能，一个是现在基于深度学习为代表的连接主义的方法，我觉得两者同样重要。现在深度学习技术很火，但传统人工智能技术也不是说它完全没用了，它也能解决一些特定问题。我觉得不同的人工智能分别去解决不同的特定问题，所以大家要更冷静地对待深度学习这个方向。”

在我们的访谈中，黄必清分享了很多他所做的人工智能，都是跟现实场景息息相关的落地，除了利用智能视觉帮助汽车玻璃表面缺陷检测，他们还做了基于视觉的物流管理，给笔记本电脑做缺陷检测，跟中石油合作做基于深度学习的油井勘探，还设计了基于大数据的甲肝预测预警系统。他还有一项研究是和重庆疾控中心合作，利用卷积神经网络帮助尘肺病筛查，研究深度学习在尘肺病可解释分期诊断的应用。

这是一项他一直想做的事。纺织厂的工作环境里弥散着大量悬浮物，长期在车间，容易吸入肺内，会引起肺组织弥漫性纤维化，也就是尘肺病。由于尘肺片零期和一期判断难度大，人工阅片对医生水平要求很高，再加上疲劳阅片等因素，尘肺病容易出现误诊、漏诊的情况。但黄必清带领团队设计了一种尘肺病

影像学人工智能算法，帮助医生对肺部影像进行初筛，减少假阳性，提高诊断效率。

黄必清说，这其实是计算机视觉里一个很经典的任务，用深度学习算法去定位和分类，道理和做玻璃缺陷检测是一样的——先在胸片上看到发病位置在哪里，定位可能有病变的位置，然后判断病变级别，判断是一级、二级、三级。而在这个过程中，深度学习的代表算法之一卷积神经网络有很大优势，非常适合这项视觉任务，应用场景广泛。

“我觉得这些工作很有意义，在实际需求的应用里总结提炼一些基础算法问题，反过来再推动我们的研究工作。我是有一点偏重的，要做应用落地。我们现在要做的工作，一定是要面向国民经济主战场，解决工业实际问题。”黄必清说，“现在有很多大模型，大家都在去拼指标，但是拼到最后它的应用场景怎么样？最后应用的市场产业需求到底有多大？能不能带出来一个产业？不要太追风，追风追到最后，大家都卷完了，最后也没有实际的应用意义。我这样说搞理论的不一定赞成，但我还是想能够做出一些有影响的技术和产品，能做出产业贡献的。”

### 选择

当你面对了足够多的人工智

能专家后，一种强烈的感受是，这固然是一门高深的学科，充满了未知，但比起知识本身的变化莫测，更大的变数发生在人身上。同样要做人工智能，不同的人选择的方向不同，下的决心也不同，这也是张钹的学生在人工智能领域的珍贵之处——他们选择什么样的方向？以什么样的决心在坚持自己的原则？归根结底，他们想要追求的是什么样的人工智能？

最具代表性的故事，发生在张钹的博士生朱军身上。朱军申请成为张钹的博士生是在2004年，那是人工智能的低谷期。当时的计算机专业就业很好，但系里学人工智能的学生出去，都不往外说自己的专业，自我介绍只说前半截，“我是清华大学计算机系的”，后半句吞掉了，怕别人觉得自己学了骗子专业。

朱军恰恰是在这个时间点上开始学习人工智能的。给他动力的，是一堂叫做计算机组成原理的课程。这是一门全国大学里只要有计算机系就会有的课程，但只有在清华，它有一个独有的暑假课题，叫做“奋战三星期，造一台计算机”。它要求学生应用自己在课堂上学到的基本原理，一个人从头到尾把所有细节走一遍，自己去设计，从最初的指令集，到寄存器寻址，再到编译，再到流水线，最后把硬件烧出来，让系统运行起来，展示成一个可以

工作的计算机。

这是清华计算机系的传统，也是张钹那一代老教授的共同信念——没有动手能力、不懂落地是不行的。

朱军的暑假，有一个多月都泡在实验室里，不断查资料，把心里的计算机设计出来。虽然这本身不是人工智能，但这个清华传统给了朱军一种信心。“我可以通过自己的努力，把一个完全不会的东西做出来，做完这个课题我就觉得，我应该尝试博士时做一些新东西。”他说。

跟着张钹读博的时候，张钹让他在微软亚洲研究院实习，他如愿找到了一个全新的兴趣方向，用概率机器学习的方法分析网页，抽取有效信息，也就是10年后备受瞩目的深度生成模型的前身。只不过，当时这还只是一个局限于学术研究的小方向。

带着自己造一台计算机的那股劲儿，朱军开始了新尝试。很快，他发表了自己的第一篇相关文章，首发在该领域最顶级国际会议上，这也是中国学者在这一领域的最初亮相。他也成为了最早开始研究机器学习和贝叶斯方法的人。由于他的研究非常超前，当时微软亚洲研究院组织这个主题的讲座，受邀做报告的他还是实习生。

他的天赋为他赢得了很多职业机会。出国参加顶会的时候，

在美国交流的时候，很多人都直接邀请他留下来。他是在计算机专业最强的美国卡耐基梅隆大学（Carnegie Mellon University）读的博士后，以当时的条件，他有机会留下来，事实上，这也是当时很多计算机系专业学生的选择。

但他选择了一条少有人走的路——博士后毕业后，朱军回到了清华，担任老师，继续在国内开展研究。

我问他理由，他讲了好多细节。他喜欢清华计算机系的传统，学校的氛围，国内的机会，但最重要的理由，是张钹。他在提到张钹的时候，同时提到了很多次“自由”。张钹组的实验室给了他一种自在感，他们会促膝长谈，也会讨论职业生涯的真问题。

对话大多发生在张钹的办公室里。朱军直到现在还记得，当时张钹坐在对面告诉他，“国外知名导师的水平比我高，条件也比我这里好，你如果选择出国深造，我会全力帮助你。但是，如果你选择留下来，我会全心全意培养你，绝不辜负你。”

很长时间里，这样的对话是张钹职业生涯里的艰难抉择。他培养过很多人工智能的学生，帮助他们到国外更高水平的环境里深造，但渐渐，越来越多学生不会选择留在国内。他理解学生的想法，但也希望能有更多人才留

下来。他有时候会被问到，为什么我们不能超越美国？中国为什么没有 OpenAI？这个老人也有自己的无奈，“我带出来的是清华代表队，我很清楚，清华代表队是最好的，但是我的对手是世界代表队，不仅有全世界最好的人才，里面还有我们自己人。清华代表队能打得过世界代表队吗？”

他觉得真正把人留下来的办法是，给予学生尊重，确保给他们一个小空间，容得下失败，也容得下自由，让他们能成长。

“我留下是因为张钹老师对待学问、对待科研，有我非常认同的价值观，但更重要的，是他对于学生的尊重。他并不把学生当成一个劳动力，读博并不是帮他打工，他把每个学生当成一个独立的研究人员，给人空间去成长。这一点给我触动很深。”朱军说，“只要你足够牛，足够有能力，他会想尽办法帮你去创造条件，支持你实现梦想。”

上学的时候，朱军做的课题属于当时那个领域最前沿的新方法，叫做概率图模型。这是一个全新的方向，所以最初他找不到人讨论，只能自己在无人区摸索。张钹一开始对它并不熟悉，但是几周之后再见面，朱军发现，张钹已经很快掌握了，后来才知道，张钹自己把当时新出的专业书，还有大量相关论文，全都看完了。张钹本身就有数理背景，而概率

图模型的根源又是数学和物理，他很快就抓到要义，开始帮助朱军一起讨论。

这就是让朱军选择留下来的关键原因。“上千页的英文专著，他比我更早读完了。一个功成名就的资深学者，还能这样深入系统去学习一门新知识，他是真正专业地在做学问。我整个科研生活里遇到他，到现在还能一直跟他一起做研究，讨论问题，一块儿学习，真的非常幸运。”朱军说，“他非常尊重大家的学术兴趣，又有了新东西，他愿意不断去学习，尤其是现在自己也当了老师之后，你会发现真的是非常难得。”

2011年，朱军回到清华任教，也留下来继续和张钹共同研究。现在的朱军，是世界范围内机器学习和贝叶斯方法的顶级学者。他提出的扩散模型高效算法，不仅在国际顶级会议上得到认可，还被 DALL·E2 和 Stable Diffusion 等明星项目采用。

如今，朱军的博士生也活跃在人工智能领域。2018年，朱军和自己的博士生成立了第一个创业公司，一家最早专注于解决人工智能安全问题的公司。这个方向选择就是受到张钹的影响，当时外界都在强调深度学习的强大，张钹带着学生论证，人工智能现阶段哪里发展得好、哪里不好。“当时讨论下了一个重要结论，人



工智能在发展过程中，离不开的问题是安全问题，所以我们定位要做人工智能安全，让这个技术发展走得更扎实吧。”朱军说。

这在当时是一种逆风向的操作。那时候人们还在人工智能热潮里面，朱军他们得花很大功夫，反过来教育市场，此刻除了热潮，更要重视安全问题。

另一个更极端的例子是他和团队所研制的 VIDU 视频大模型，这是国内最早专注做多模态大模型的团队，这也是张钹支持他做的选择。他们在做一件十分超前的事。其实朱军团队提出底层架构的时间比 SORA 早，但因为国内习惯了跟随美国，“当时我们给大家讲，很多人会怀疑，因为那时候很多人不懂技术，大家一说大模型，都是指大语言模型，都是去对标 ChatGPT，跟人讲视频大模型，很多人听不懂。但 SORA 出来以后事情完全变了，看见这个路线国外也在做，大家回头一看，原来你说的是真的，现在也愿意相信我们了”。

现在的朱军，还是有很多难处。但是他在跟我讲起这一切的时候，还是有像他刚开始“造一台计算机”时一样的热忱。

“我从来不怕被颠覆，有时候跟学生也在说，如果在我有生之年看到我做的东西被完全颠覆掉，我会觉得非常幸运，因为这意味着人类的知识进入另一个层次了。

而且我相信自己的学习能力，新东西过去我能做，将来也能做，并不会为它焦虑。亲历一个领域的快速发展，能够不断刷新自己的认知，我觉得这是更宝贵的。相比之下，如果最后我老到退休的时候，看到自己只是发了一堆文章，只是数个数，我会觉得非常没意思。”朱军说。

### 新的决心

为了追赶人工智能前沿，张钹要求自己经常发表论文，这个习惯一直坚持到 80 岁那一年。学生们给张钹庆祝八十大寿，这位导师宣布，八十以后，不再要求自己发表论文了。马少平说，当时听完感觉松了一口气，导师终于能休息了。结果过了没多久张钹说，接下来还有新任务，他要去帮学生创业。

前几年张钹生病，住院动手术。手术做得很成功，住院却让他看到中国医学的落后。躺在床上，感觉病房里“哪儿哪儿都是活儿”，都可以改进。院长在查房的时候专门来探望他，跟他谈论病情，他跟院长谈感想：“中国医学的落后，比我们人工智能落后得多！”

“我住院以后得出了一个结论，中国的医疗太落后了，所有的好药靠进口、好设备靠进口，先进的东西几乎都是外国人发明的，不是中国人想出来的！问题

在于我们没有人去想，更没有人去做，因为它不是快钱，做完以后没有效益，知识产权也得不到保护，谁还愿意去下苦功夫？”张钹说，“生病的时候我下了决心，努力搞智慧医疗，把我国的医疗水平搞成世界一流。”

张钹有一个明确的目标，想要用人工智能提高医疗质量和效率。他介绍自己做医疗的代表学生叫做丁大勇，一个几乎查不到背景信息的人。和他见面前，我只能看得出他曾经在英特尔中国研究中心工作过很多年，细分领域是做计算机视觉。

我是在一栋全是创业公司的办公楼里见到他的，连这栋大厦的前台都不知道他所在的公司是在做什么。丁大勇身上有着和张钹一样的认真和严谨。在我们的谈话中，他提到了许多关于眼底疾病和糖尿病的数据，在我写作期间核实数据的时候，发现他在谈话中引用的每一个数据都是准确的。

现在的丁大勇没有自己的办公室，他和所有团队成员一起坐在大开间里。这家公司有三个主要的人工智能落地产品，一个针对糖尿病视网膜病变（Diabetic Retinopathy, DR），一个是多病种的眼底疾病识别，还有一个是专门针对青光眼的辅助诊断。

丁大勇是张钹在人工智能方向培养的第 50 位博士生，但现

在他的说话时更像一个眼科大夫，他能详细讲解眼底图，熟悉拍眼底照时容易犯的错，还能在看到眼底照片时敏锐地识别到，哪张是容易误诊成 DR 的视网膜静脉阻塞，哪张是容易漏诊青光眼的的眼底结构。他办公室里一整面墙的书柜里，放的几乎全都是眼科学相关的专业书。

跟着张钹读博士的 6 年间，他的主攻方向是图像识别，基于内容的图像检索。那时候他面对的大部分图像识别任务是关于人的日常生活，比如如何找出图里的猫和狗，判断篮球是否进篮。毕业后他的工作也都与计算机视觉相关。他本来可以在这样的工作里安稳地继续下去，直到他决心做另一件事。

改变他的是一个技术进步。他发现，深度学习算法在人脸识别的特定图像分类任务上的能力，超过了人类，他开始考虑图像识别的严肃应用，第一个想到的就是医学影像。

他跑去找北京协和医院的眼科主任陈有信，说自己想要做糖尿病视网膜病变的图像识别，还跟他讲解自己的技术路线——中国有超过 1.4 亿糖尿病人，其中最重要的眼部并发症，就是糖尿病视网膜病变，它已成为工作年龄人群不可逆盲的主要风险因素。大约有一分之一的糖尿病病人患有 DR，按照治疗指南，他们需要每

年至少做一次眼底检查，所以他想用人工智能改变这个行业，用深度学习的方法训练出一个模型，找专家标注眼底照片，利用计算机视觉领域的进步，实现机器辅助眼底疾病诊断。

陈有信听了以后，只说了一句话：“好啊，做这件事需要情怀。”

“当时我还没觉得这句话有啥意思，感觉就是短时间挣不到钱吧，但我们就是觉得，技术上我们肯定没问题，拿出好的产品，怎么怕不挣钱呢？现在回想，他当时可能是想提醒我吧，结果提醒完了发现这个人居然没跑，还自己扑上来，第二个礼拜还带了一个具体方案回来，他可能觉得既然你是这样的人，那我就把人都凑上，大家把这事干成。”丁大勇说。

陈有信动员了中国最优秀的 50 多名眼科医生，包括协和、同仁等医院的顶级专家，共同参与了一个 23000 多张眼底照片的标注任务。平时，临床医生参与科研课题，最好的状态也就是专家找一两个博士生支援，但这次是专家级别的医生亲自下场，他们在临床工作之外挤出时间读片，迅速完成大量标注。基于这些专家标注，丁大勇的公司训练出了一个专门用于识别糖尿病视网膜病变的深度学习模型。

后来丁大勇才明白，为什么

这些眼科医生会这么在乎人工智能。糖尿病有明确的治疗共识，每一个糖尿病患者每年至少要进行一次眼底检查，但是在现实中，这件事情因为眼底科大夫太少而没有办法做到。眼底疾病十分复杂，只有 300 微米厚的视网膜分了 10 层，每一层的病变都反映着各种疾病的状态。然而，全国眼底专业的医生只有 3000 人左右，日常眼底疾病就已经忙不过来了，根本不可能专门去做 DR 筛查。不止如此，医生资源分布也不均衡，偏远地区甚至根本没有眼底医生，这意味着仅靠人的力量是不可能完成 DR 筛查的。这是一件有实际意义的事，也是一件的确需要机器帮助人去做的事。

第一个模型做出来之后，丁大勇选择了一个数据集，请 50 名医生给予诊断结果，让人工智能也在上面跑，最后人工智能排名第五。也就是说，假如这个模型是一位大夫，和协和、同仁以及全国其他专家一起比赛阅片，它的诊断准确度排名第五。

就在他调试技术的时候，张钹给他的学生提了好多建议。丁大勇说：“他告诫过我，人工智能真正落地的时候，会受到医疗行业本身特点的约束，他跟我讲了三个特点，一个是它的专业性，一个是监管性，还有一个是政策性。我们国家医疗器械类的技术和产品都需要国家药监局审批，

上市之前有严格的审批制度监管，政策性又很强，这都是我需要注意的。”

丁大勇是在现实中慢慢理解到导师的提醒意味着什么。他们的技术开发本身花了半年多的时间，但更复杂、更漫长的过程是技术以外的。医疗设备需要注册，连注册团队都听不懂他们的产品计划。这样的人工智能辅助诊断技术，国家药监局不知道怎么审，还没有审评指南，连审评指导要点都没有。丁大勇还为此专门跑去国家药监局，报告他们的研发过程。

也是在这个漫长的等待过程中，他开始明白医生提醒他的“情怀”意味着什么。第一个医疗器械三类证到了2021年才批下来，花了整整4年，那段时间负责注册的同事还跟他感慨，办公室外面的花一年又一年，都开好几轮了，证还没有办下来。因为没有证，投资人也在观望，谈的时候都说有意愿投，但注册证没下来，他就不签最后那个字。中间有段时间，他们只能到处借钱发工资。主创团队大都是清华计算机系的博士生，但他们当时的样子，并不像是清华最顶尖专业的毕业生状态，创业8年里经营困难，丁大勇的收入流水连办签证都办不下来。

这就是技术进步在落地过程中的真实经历。人工智能是一个

充满未知的学科，教会机器本身是一个难题，而让机器能够真正帮助到人，恐怕是一个更大的难题。经历困境的时候，张钊会用自己的方式帮助学生，他找丁大勇谈过很多技术要点，跟他讨论未来可能的突破点，医学影像的先验知识怎么利用，还会讨论小样本问题。更重要的是，他会用自己的影响力帮助技术落地，让学生能够在寒冬中也活下来。北京协和医院成立了眼科重点实验室，他还专门去会上作了报告，跟更多人普及人工智能在医疗领域应用的必要性。

“张老师期待人工智能在医疗领域落地，他指的是能够对医疗带来一些改变，尤其是颠覆性的变革。他不是说一定要有我自己的一两个学生在这方面成功，更何况，怎么度量成功呢？公司上市挣钱了，就叫成功吗？就像我这样，即使现在还有困难，我们现在这样就不叫成功了吗？”丁大勇说，“我觉得成功第一要看我们做的事情是不是有意义，第二是我是不是已经尽力了，别的，还能求什么呢？”

他的努力开始陆续有了成果。这项产品的相关论文发表在了《Nature》子刊和很多顶级学术期刊上。2023年，它也获得了欧盟医疗器械（MDR）CE认证，成为了中国第一个获得此项认证的眼科人工智能产品。就在我们

访谈前几个月，国家药品监督管理局批准了他们所生产的眼底病变眼底图像辅助诊断软件的注册申请，拿到了NMPA三类医疗器械注册证，成为全球第一款获批上市的能够支持10种以上眼底疾病的人工智能辅助诊断产品。它也已经在法国、德国等市场落地，进入国内1800余家各级医疗机构临床应用，累计服务患者超过了100万人。

访谈期间丁大勇最高兴的时刻，是他登陆系统后台查看实时数据，给我看当天这些AI系统的调用量。访谈当天的AI触发量是5945次，前一天是6293次，这意味着，这样数量的眼底照片经过机器辅助阅片，给出了诊断意见，而这样的阅片体量是任何一家三甲医院眼科没办法一天之内完成的。

“为什么我觉得这样做好？就是因为它能大幅度改善医疗不平衡，很多地方是没有配备眼底医生的，他们根本没有办法得到及时诊断，对于很多偏远地区，那些连眼底医生都没有的地方，技术的进步真的能救命。”丁大勇说。

告别的时候已经是晚上10点，丁大勇还留在办公室，他还需要赶一个第二天就要交的报告。其实在这一轮人工智能热潮出现后，拥有20多年计算机视觉经验的他有很多可能的工作机会，也



有很多更容易的路，为什么他坚持选择了最难的医学影像？他想了又想回答我说，因为太难了，其他人不会选。

他说起跟着张钹读博士的时候，有一次课题组开会之前，张钹看着他们感慨了一句：“像你们这么好的学生，其实应该去学医的，这个国家最聪明的年轻人，应该去为人类造福。”后来他听张钹的讲座，PPT里总有一张图，写的是黄必清基于医学影像筛查尘肺病。“他是从技术角度去讲的，但是我注意到那张片子在他的PPT里反复出现，说明他也相信这个的意义吧，所以我做医学影像这件事，我觉得它有一种神圣感，觉得它的意义足以承载我们的付出。”丁大勇说。

丁大勇身上有一种和张钹一样的韧性，也有一种只属于他们的使命感。他说起最早开始做调研的时候，触动他坚持下来的动机是一件很小的事：当时他去协和，跟医生请教眼底疾病，发现医生办公室角落摆着高高一堆病历本，他们做研究的方式是，医生们想到了哪个病人的案例，就从柜子里找登记簿，查到病历号，再去机器里翻眼底照片。这让他很受震动，那已经是2016年，那是全国最好的医院，但现实中的医学影像居然以这么古老的方式管理，让这个计算机系毕业生难以接受，也让他坚定了信念，自

己还有很多事情需要做。

“我和张老师的想法一样，谈到人工智能，我是最谨慎的，它到底学会了啥？它到底能不能在很多情况下很可靠地工作？我一直保持怀疑，很多问题我觉得到现在都没有答案。但我的怀疑是理论角度的，不是应用的角度。人工智能发展到现在的水平，它能带来实际应用价值，这是毫无疑问的。”丁大勇说，人工智能的进步不止是体现在新闻里热议的大模型，很多更切实、更亟需的技术进步都还没有发生，这就是他要做的事。

## 一代又一代

还有几个月，张钹就要过90岁生日了，现在的他，依然经常去办公室上班。总要比约定时间提前到，是他一直坚持到今天的工作原则。走廊里碰到熟人，跟他打招呼常常是一句接近感慨的问句：“张老师，怎么还来上班啊？”在家里，连老伴儿也抱怨他，你年纪这么大了，还经常加班加点。

他准备过五花八门的回答，“人工智能太火了，因此有很多工作要做。”“我上讲台，就像演员上了舞台，兴奋不已。”他最经常说的理由是：“人工智能的魅力在于它还在路上，因此深深地吸引着我。”

只在访谈的中途，张钹说起

了另一个理由——不甘心。

“我现在最主要的任务，是如何帮助企业、帮助政府做出正确的决策。我们有这么好的人才，大家这么努力工作，为什么我们老是做不好？很大的原因就是很多东西束缚我们的手脚，好多束缚都是因为做了不正确的决定造成的，太可惜了，从个人角度来讲，我们失去了好多时间，但我更着急的是，国家失去了好多时间。现在不能再折腾了，所以我必须要尽我所能，帮助大家认清人工智能当前的形势，让人们有一个正确的理解，去做正确的事情。”张钹说，“我能做的事就是这些了。”

为此，他还在身体力行地做很多事。他在很多场合为不同群体讲解人工智能的发展现状，他还带着团队访问过好几次清华长庚医院。2019年，清华大学人工智能研究院和精准医学研究院联合成立了智慧健康中心，张钹出任首席专家。和医生讨论的时候，张钹的发言还是一贯的“落地”原则，“比起关起门来研究技术，还是应该由临床医生首先提出需求，根据他们在工作中遇到的实际困难来开发技术”。

在清华大学人工智能领域博士生杨斌的参与下，人工智能专家和医学临床专家合作，共同提出了新的区域智慧健康医疗服务体系。其中有许多技术应用，尤

其是在疫情期间，他们开发的智能听诊技术应用在 14 家武汉当地医院，后续也推广应用在三甲医院呼吸科室以及儿科听诊场景中。

“我给自己定了一个目标，在我彻底不能干工作之前，我要干三件事。第一件事，我希望我们团队的基础研究能够真正达到世界一流水平，这是我最想做的一件事……第二件事，我做智慧医疗健康，我们跟长庚医院合作，有一个小的团队，院长也很支持我们，这一点做得还可以。第三件事，我尽量去多做一些工作，帮助企业发展人工智能。”张钹说。

接近 50 年间，张钹和他那一代的清华老师一点点改变了现实，第一本人工智能的教材，第一堂“人工智能导论”课程，第一个实验室研究项目，他们在一个对人工智能一无所知的世界里，慢慢塑造了一个培养人才的小环境，形成了许多独一无二的教学传统。

在过去的数十年间，清华大学计算机系成为全国最出名的优势学科，而这里所输送的人工智能领域的毕业生更是最有竞争力的人才。清华大学在全球最权威的计算机科学排名 CS Rankings 中名列前茅，而张钹所在的计算机系人工智能方向，常年排在全球第一。

“最好的学生都到我这里来了，所以我也是非常珍惜他们。

我觉得他们非常不容易，最聪明的学生选择了我们的专业，既然你选择了人工智能，我一定想办法把你培养好。人家这么信任你，到清华这里来，最好的年轻人交在我手里，我要好好待他们。”张钹说。

在这样的坚持下，清华 FIT 楼拥有了自己的气候，不管外界市场是热潮还是寒冬，他们渐渐形成了自己坚守的人工智能阵地。他们所追求的人工智能前景，依然是上一代老清华人留下的目标：一个对国家和历史有意义、真正能帮助到人的技术。

2024 年，清华校庆那一天，清华大学成立了人工智能学院，首任院长由图灵奖获得者、中国科学院院士姚期智担任，张钹作为指导教师代表，也在成立大会上发言，参与了学院成立仪式。他们坚持了这所大学半个世纪以来的治学原则，尽管外界的热潮让很多大学都成立了相关学院，但在这里，人工智能的培养体系，是只在研究生及以上的阶段开展，本科阶段学习的，依然是计算机基础知识。所有既往传统都不变，一个人还要先学习扎实的物理、扎实的数学，面对现实场景应问题，这是清华人面对人工智能的原则。

“我从最开始研究人工智能的时候，就是从最根本、最基础的信息开始，从数学开始，把它的

机理完全理解。大家以为 OpenAI 是 2018 年做出来了 ChatGPT，实际上，人类花了六七十年的努力，才走到了今天。现在用的神经网络是什么时候开始研究的？1943 年。也就是说，人类花了 74 年时间，才得到今天的 Transformer 模型，这不是一天、两天做出来的。你要每一项研究都做得很深很深才有可能走得到今天，大家不要以为说，今天看到了结果，好像很简单，实际上里头是人类经历过反反复复的琢磨、试错，在不成功后又经历了六七十年的努力，才得到了今天的结果，不是一夜之间做出来的。”张钹说，“现在的问题是，这些工作都是外国人首先做的，我们只是在人家做出来以后跟着做。所以我常常说，千万别听那些不负责任的宣传，说我们在人工智能方面跟外国已经差不多。怎么会差不多呢？在人工智能六七十年研究过程中，仅就 ChatGPT 而言，就有十几项的重大创新，所有这些创新几乎都是外国人提出的，这说明我们的创新能力不足，尤其是从 0 到 1 的创新能力很差，不解决这个问题，我们是很难赶超人家的。”

张钹说，这件事有个希望，“做两件事就可以”。“第一件事跟大家没关系，是我们高校的任务，即加强基础研究，提高创新能力，培养有创新精神的人才。第

二件事需要大家一起干，就是坚持走开放的国际化道路，聚天下英才而用之。要把人用起来，不做到这一点，是很难达到世界一流的。”

说起这两点希望的时候，这位将近 90 岁的老人的声音里依然洋溢着年轻人一样的乐观，“趁我现在头脑还很清楚，一定要多做工作，不然人活着还有什么意义呢？”

跟张钹告别之前，我们聊起了时间对于人的意义。他笑着讲，他年轻的时候近视，衰老后视力

又恢复了正常。他开始研究人工智能时已经 43 岁，一个大部分人难以重新开始的年纪，但他依然抓住了时间的尾巴，“算是完成了我的目标吧”。他也是在 69 岁那一年学习开车，“（当时的规定是）之后不让考驾照了嘛，我赶紧学了车，开了 10 年，很开心。”在他的人生经历里，只要抓准本质，不犯方向性错误，重新开始，从来不是一件错事。

这也是我们的访谈中他留给清华同学的叮嘱：“千万别跟着潮流出去乱说。”一定要把实际情况

搞清楚，从现实出发去做事。

从 FIT 楼的办公室出来，张钹一个人沿着小路，往家的方向走去。一墙之隔外，就是清华科技园，在那里，依然每天上演着人工智能领域的起伏，热潮与低谷，成功和失败，周而复始地出现。路上很少人认出这位白发苍苍的老教授，他并不是墙外面人工智能热潮里的明星，但他留下的影响将延续很久，留在他和他的清华代表队身上。○

来源：人物

## 人物简介



张钹，中国科学院院士、中国自动化学会会士、清华大学教

授。计算机应用专家，早期从事自动控制理论与系统研究。1935 年 3 月 26 日生于福建福清。1958 年毕业于清华大学自动控制系。1995 年当选为中国科学院院士。

他参与人工智能、人工神经网络、机器学习等理论研究，以及这些理论应用于模式识别、知识工程与机器人等技术研究。在这些领域，他已发表 200 多篇学术论文和 5 篇（或章节）专著（中英文版）。他的专著获得国家教委高等

学校出版社颁发的优秀学术专著特等奖。他的科研成果分别获得 ICL 欧洲人工智能奖、国家自然科学基金三等奖、国家科技进步三等奖、国家教委科技进步一、二等奖、电子工业部科技进步一等奖以及国防科工委科技进步一等奖等奖励。此外，他参与创建智能技术与系统国家重点实验室，于 1990—1996 年担任该实验室主任。1987—1994 年任国家“863”高技术计划智能机器人主题专家组专家。



## 封锡盛院士：揭开海洋神秘面纱的探索者

海洋是高质量发展的战略要地，开发利用海洋资源，发展海洋经济，要从揭开海洋神秘面纱开始。水下机器人正是人类探索海洋的利器。中国工程院院士、中国科学院沈阳自动化研究所（以下简称沈自所）研究员封锡盛常说：“人类来自海洋，水下机器人正在圆人类的回乡之梦。”攻坚克难、勇于奉献 50 余载，封锡盛等老一辈科学家服务国家重大需求，完成了一项又一项重大突破，推动了我国水下机器人研究从无到有、从弱到强。

### 实现我国水下机器人从无到有的突破

沈自所自上世纪 70 年代末开始水下机器人研究，开启了我国自主研发水下机器人探索海洋奥秘的新时代。封锡盛也是从那时起与水下机器人结缘。

控制系统是水下机器人的“大脑和神经”，是水下机器人能否完成科研任务的核心系统。在没有水下机器人试验条件的情况下，科研团队就在一个菜窖里进行了第一次下水试验。封锡盛提出基于微控器网络构建“海人一

号”本体运动、水面水下数据传输和主从机械手三大核心系统的控制方案，使“海人一号”核心控制系统完成从模拟系统向先进数字系统的转型。

1985 年、1986 年，“海人一号”先后成功完成了两次海试，实现了我国水下机器人从无到有突破。

### 超前规划助力水下机器人从浅水迈向深水

1986 年，封锡盛负责起草水下机器人 10 年发展规划。他没有受限于当时水下机器人发展现状，提出了我国水下机器人要向远程和深度两个方向发展的“二维路线”。尽管在当时来看，规划的阶段目标有些超前，但后来沈自所水下机器人发展就是沿着这个“二维路线”前进的。尤其是潜深 1000 米的“探索者”号和 6000 米的“CR-01”研制、应用成功，更成为我国水下机器人从浅水迈向深水的里程碑。

1990 年，封锡盛担任“探索者”号 1000 米水下机器人总设计师。“探索者”这个名字准确定位了封锡盛在水下机器人研究道路

上的角色。

恶劣海况下顺利回收水下机器人，在当时是一个世界性难题。封锡盛提出了利用视觉跟踪技术实现水下对接回收水下机器人的基本思路，并在各有关分系统的配合下制定实施方案，为水下机器人的回收提供了一个解决方法。

他带领团队突破关键核心技术，在总体集成、载体设计等方面取得一大批自主创新成果。1994 年，“探索者”号进行 5 个航次为期 40 多天的海上试验，成功下潜 1000 米，实现我国水下机器人从有缆向无缆、从浅水向深水的飞跃。

“CR-01”6000 米水下机器人紧随“探索者”号步伐，是一个国家深海资源考察能力的标志，于 1992 年启动。“6000 米无缆自治水下机器人完成太平洋洋底调查任务”被评为 1997 年中国十大科技进展。

### 为水下机器人事业奋斗终身 择一事终一生

封锡盛表示，科技工作者的“献身”精神，是一种心怀“国之大者”的使命，是不惜牺牲小我

成就大我的崇高情怀，是为祖国科技事业最大限度奉献自己的热情和力量。

“加快实现高水平科技自立自强，是国家战略科技力量义不容辞的使命。高水平科技自立自强

在我看来是取得更多从‘0到1’的突破。这个过程往往是漫长的、困难的，需要经过反复的验证、长期的迭代，不会一蹴而就。科技工作者需要对科学执着、对目标坚定，具有更高的格局，去奋

斗、去奉献。我们常说择一事而终一生，把一件事情真正做到极致，是一件很了不起的事。”封锡盛说。○

来源：沈阳日报

## 人物简介



封锡盛，中国工程院院士，中国自动化学会会士，机器人学家，中国科学院沈阳自动化研究所研究员、博士生导师。全国政协第九、十、十一届委员、中国科学院学术委员会海洋专委会委员，中国

自动化学会会士，哈尔滨工业大学荣誉教授，曾任辽宁省人民政府参事、咨询委员会委员，首届辽宁省仪器仪表学会理事长。曾任辽宁省对外文化交流协会副理事长。1999年当选为中国工程院院士。

封锡盛院士长期致力于智能机器在海洋中的应用研究。封锡盛院士作为主要负责人之一，领导了我国第一台潜深200米的有缆遥控水下机器人“海人一号”的研究工作；作为总设计师，主持了国家“863”计划重大项目“无缆水下机器人”——潜深1000米的“探索者”号的研制工作。封锡盛院士是我国第一台6000米自主水

下机器人“CR-01”的副总设计师、“CR-01”工程化项目的总设计师，第二台6000米水下机器人“CR-02”的总设计师。

封锡盛院士获得省部级科技进步二等奖以上奖项8项，其中“无缆水下机器人的研究、开发和应用”项目获1998年度国家科技进步一等奖，2014年度中国科学院杰出科技成就奖。多次获得国家、省、市荣誉称号，2002年被评为辽宁省优秀专家。参与蒋新松主编《机器人学导论》，与王棣棠合著《水下机器人》，主编《海洋机器人科学与技术》丛书。培养了一批博士、硕士研究生。



### 第四届国防大数据高峰论坛会议通知



为探讨交流领域最新研究成果，推动技术创新、产业发展，第四届国防大数据高峰论坛将于2024年11月9日至10日在浙江省嘉兴市南湖实验室召开。国防大数据高峰论坛是我国国防领域开展高端学术交流、凝聚尖端科技人才、实现产学研对接的重要平台，已成功举办三届。详情请查看：<https://mp.weixin.qq.com/s/6rKBRtOppAqauTavZ-BnQ>

## 郑南宁院士：当教育插上人工智能的翅膀

### 人工智能赋能教育，优势在哪里

面向未来的人机协同教育，教育将发生什么变化？这需要我们从不同维度去深刻思考，并采取行动。

就人工智能的发展而言，我们需要思考什么是人类智力所独有的特征，要做到像人类一样拥有智能行为，计算机需要哪些能力？

所有高级形式的人类认知——概念、推理、问题求解、创造力、记忆和知觉，都跟智力相关。在人工智能与人类之间，智力的度量是智能程度，例如，人类可以使用较少的数据，在广泛的问题上表现出智能行为。

这也是当前人工智能研究非常重要的方向——少样本或零样本学习和持续学习等。这些研究方向试图让机器像人类一样去思考和学习，使用较少数据，就可以求解广泛问题。

人类智能的本质和边界是什么？

笔者认为，人类智能的本质可以归纳为五个方面：一、适应性。人类总是与环境在适应的过程中不断交互、学习，具身智能就是从此角度思考。二、学习能力。三、抽象思维。人类智能可以进行

抽象思维，对概念、原则进行归纳、推理和批判。四、创造力。人类智能有创造力，能够涌现出新的想法和概念。五、情感和意识。这点也是当前有所争议之处——有学者认为机器会有情感，而有学者坚持认为机器终究是机器，精神和灵魂始终属于人类。

人类智能的边界在哪？笔者认为，在以下四个方面：一、生物学限制。二、知识和经验的局限。三、认知偏见。四、环境和文化制约。

对比人类智能的本质和边界与人工智能的特点可以发现，人工智能可以赋能教育的知识生产。在数据挖掘与分析、模式识别与预测、知识自动化、智能化协作、知识的可视化与表达、个性化的知识推荐6个方面，人工智能与教育是密切关联的。

由于一些大语言模型可以获得和组织起全世界的所有知识，学习者不再需要浪费时间学习“事实”，而是可以专注高阶思维技能，如创造性思维和批判性思维。然而，人类的“批判性”和“创造性”思维往往是通过有限的信息量，依赖内化知识的潜意识过程发生的。AI赋能教育需要激发这一

过程，让学生更加聪明地学习，产生更好的思维。

### 想象力、创造力，人类比人工智能更聪明

我们用考试来测试人工智能在知识生产及知识学习过程中的能力。以《数字信号处理》这门课程为例，将这门课的考题给某个人工智能模型“考试”，得到了94分，在学生中属于前5%的优秀成绩。由此可以看到，人工智能不仅能够回答日常的问题，在工程数学、自然科学等领域的问题求解中，也表现出超越一般学生水平的能力。

但是，它的答卷，对大部分复杂题目都采用简单粗暴的方式求解，没有使用解题技巧。这是因为大模型依赖“喂”给它的大量数据，只是在统计意义上进行模式匹配。

这说明大模型人工智能程序不具有人类的数学直觉能力，主要原因在于其工作方式与人类大脑的工作方式截然不同。具体表现为：一、人工智能为算法而非直觉驱动。人类有数学直觉，而人工智能没有。二、缺乏感知和体验。人类的数学直觉不仅是计算能力，还包括通过实际的体验和感官的感知



获得对数字、空间和形状的直观理解。三、学习和思考方式的差异。人类学习数学通过错误和成功建立起对概念深层的理解和直觉判断，大模型人工智能程序通过大量例子来学习，缺乏自我反思能力，无法像人类那样从根本上理解或领会概念。四、缺乏创造性和灵活性。人类的数学直觉涉及创造性思维，例如通过不同方法解决问题，或在缺少数据的情况下做出假设，而人工智能主要依赖已有的信息，应对新奇情况的能力有限。

因此，我们认为，大模型人工智能程序可以快速准确地进行复杂的数学计算和数据分析，但无法真正拥有人类的数学直觉，这种直觉建立在深层次理解、多感官体验和创造性思维基础上。

这带来一些启发——就想象力和创造性而言，人类比人工智能更智能。

创造力跟想象相关联，创造力的背后隐含着丰富的想象，而想象又与人的情感、与人对环境的感官体验密切相关。以文学举例，以宋代诗人陈与义《春寒》一诗中“海棠不惜胭脂色，独立蒙蒙细雨中”为题，让大模型人工智能程序在图像库中找出与其语意表达一致的图片。人工智能给的是蒙蒙细雨中盛开着海棠；但人类在思考时，大脑中的想象可能是在一条幽静小道上，亭亭玉立的少女行走在雾雨中——人类可能会将

这位少女看作海棠，这就是想象。

想象是介于感性与理性之间的中介性能力，是先天纯粹的，是创作与创造力的基础。人类拥有内心世界的心理体验，并由此产生情感和想象，这使得人工智能无法替代人类的灵感和独创性。

想象力和独创性对自然科学也非常重要。爱因斯坦说过：“想象力比知识更重要，因为知识仅限于我们现在知道和理解的一切，而想象力涵盖了整个世界，以及未来所知道和了解的一切。”想象力带来充满无限可能的空间，让我们跳出已知，向未知进发。从这个角度而言，人工智能还无法替代人类。

## 有长有短，AI 赋能教育如何扬长避短

AI 赋能教育有所长有所短。那么，从技术的角度，人工智能赋能教育是什么样的架构？

人工智能赋能教育，本质上是一种人在回路上的混合增强智能。从框架层来看，系统输入学生行为数据、学习内容数据、评估数据等，通过机器学习的方法形成结构化的数据或形成知识、经验，与系统的知识库实现交互学习。知识库不仅是教学内容的知识图谱，更重要的是把教育学、心理学融入知识图谱，通过机器学习方法生成预测，然后再进行置信度的判断——如果置信度高，就可以给出教学导向或者教学策

略的调整，以及个性化学习路径的推荐；如果置信度低，就反馈给人类，即教师、学生、家长等，人类反馈的数据又形成人工标注的数据，从而对机器学习算法进行训练，构成 AI 赋能教育的人在回路的混合增强智能系统。人在回路的混合增强，本身就是持续学习的框架，这样的框架针对实际的教育、学习会变得越来越“聪明”。

人工智能赋能教育也存在着风险。例如，数据隐私和安全、教育资源不平等、过度依赖 AI、人际交往能力减弱、缺乏情感支持、内容质量和准确性、人工智能偏见问题等。例如，如果回答是错误的，可能造成“谎言重复一千遍就变成真理”的情况。要避免这种现象，建议人们从多个来源获取信息。为了降低这些风险，需要在技术、政策、教育等多个层面探索解决之道，或进行规避。

将人工智能与教育融合，需要批判性地使用大模型人工智能技术，对其提供的信息进行独立验证，并在处理敏感或重要问题时谨慎行事，还需要在伦理、责任、隐私和安全、风险评估等方面妥善管控和治理，对社会大众进行教育也愈发重要。

特别要注意的是，人工智能缺乏情感支持。年轻人的社会交往如果过度依赖人工智能，将对其人际交往和社交能力带来消极影响。人际交往是人类社会的基

本活动之一，可以使人类社会更加和谐，使团队能够形成非常紧密的、具有凝聚力的氛围。过多依赖人工智能科技，可能会产生社交隔离、产生孤独感，不仅会影响到个人的心理健康，也会带来社会结构的不稳定性。例如，过度使用聊天机器人，可能让使用者的情感变得迟钝、催生社交孤立、加剧社交隔离感——聊天机器人如果成为人类主要的伙伴，“真人”就可能成了“备胎”。

这一点在人工智能赋能教育时要尤为注意——推进人工智能赋能教育，仍然需要努力保持培养师生面对面交流的机会，这就意味着在设计智能教育系统工作环境和社交活动时，需要有意识地融入更多的师生面对面互动。

人类教师与学生培养共情关系是教育工作中不可或缺的丰富内涵，具有强烈共鸣的师生关系对学生的有着十分重要的影响。如果在教育中缺乏同理心，学生会成为被动的信息接收者，很难有动力去克服学习过程中固有的困难。因此，在 AI 赋能教育的时代，不能忽视教育中同理心环境的构建。

教育是一个缓慢、优雅而美妙的过程，它应该是随风潜入夜，润物细无声。教育不是注满一桶水，而是点燃一把火、打开一扇门。教师的师德师风在学生的情感、态度、价值观的塑造方面影

响尤为突出，无论何时何地，教师的言谈举止都会直接或间接地影响学生的成长和品德。即使在未来，师生面对面的交流在教育活动中依然不可替代。人们在求学过程中所遇到的优秀老师，是终身记得不会忘记的，这就是师生面对面交流给予学生心灵情感的成长。因此，人工智能赋能教育无论发展到何等地步，师生之间面对面的启迪、交流，心灵的碰撞永远替代不了。

人工智能赋能教育，还有很多问题亟待从不同维度进行深刻思考：如果智能机器成为史上无所不知的“最强大脑”，那么，人类究竟需要学什么，怎样学习，学习的目标、内容、方法如何变革，才能够适应人机协同的智能教育？当可以无限量地生产、使用各类智能机器人来满足人类的知识生产和各种需求，作为延续物种生命、传承人类自身文明和知识再生产活动的教育，它的价值和意义又如何体现？

控制论的创始人诺伯特·维纳曾说，要避免人工智能对人类造成伤害，唯一解决的方案还是要将人工智能诉诸人类的价值体系。笔者认为，把人类的诉求、生命的意义、文化与信息的需求和人工智能技术发展结合起来，使人类有能力去创造那些智能机器无法替代的工作，培养学生成为能够轻松使用和驾驭人工智能

的创新人才，这是应对智能时代必须有的教育观。○

来源：光明日报

### 人物简介



郑南宁，工学博士，IEEE Fellow，中国工程院院士（1999年当选），西安交通大学教授、人工智能与机器人研究所所长、人机混合增强智能全国重点实验室主任。现任中国自动化学会理事长，国际模式识别协会（IAPR）理事会成员，中国人工智能教育联席会理事长，科技部新一代人工智能战略咨询委员会专家组副组长，曾任国家高技术研究发展计划（即“863计划”）信息领域首席科学家、西安交通大学校长（2003—2014）、国务院学位委员会委员（1998—2018）。郑南宁教授长期从事计算机视觉与模式识别、人工智能系统及其先进计算架构、自动驾驶等研究。

# 徐扬生院士：融汇创新 自主培养 为我国高等教育高质量发展创造经验

当前，高校应把握住高等教育高质量发展的历史责任、战略路径选择，积极探索高等教育综合改革，促成高等教育高质量发展的蓬勃生机。文章以香港中文大学（深圳）融汇创新探索高等教育高质量发展的成功路径及经验为案例，阐述合作办学大学在服务国家和地区战略需求、借鉴国际管理规则与标准、创建国际人才培养网络、建设良好育人环境方面的探索与实践，并对面向未来的高等教育高质量发展的重点任务提出建议。

当前，高校学习领会习近平总书记关于教育强国建设的重要论述，践行高等教育强国建设初心使命，一方面需要深刻认识教育、科技、人才在社会主义现代化建设中的基础性、战略性支撑作用，真正领会统筹推进教育强国战略、人才强国战略、科技强国战略的科学内涵；另一方面，要牢牢把握住高等教育高质量发展的历史责任、战略路径选择，大胆探索高等教育综合改革，切实发挥好高等教育的龙头作用，促成高等教育高质量发展的蓬勃生机。应对当前及长远的挑战，要让高等教育的高质量发展成为助力人才自主培养与科技自立自强、

助力中国式现代化建设发展、助力中华民族伟大复兴的重要路径和发力点。

## 一、高等教育的高质量发展是国家现代化建设的战略支撑

历史地看，高质量的高等教育长期由西方国家主导。自 1088 年博洛尼亚大学的成立，到 19 世纪中期柏林大学成为欧洲最重要的高等教育重镇，再到 20 世纪美国高等教育体系的崛起，欧美始终把握并占据高等教育高质量发展的重要地位，向世界输送优秀人才。

自 1847 年我国第 1 位留学生容闳赴美留学至今，留学大潮在中华大地已绵延近 200 年。改革开放以来，大批年轻学子到西方发达国家学习先进的科学技术，广大留学归国人员为国家现代化建设发挥了重要作用，并积极推动国家教育、科技、经济与国际接轨和交往，为中国参与全球化和创新全球治理贡献了重要力量。

进入新时代以来，党中央着重强调要努力办好人民满意的教育，视教育为民族振兴和社会进步的基石，特别重视把办好高等教育摆在历史性的突出位置，战略性部署推动高等教育高质量发展。习近

平总书记在不同场合、不同地方多次强调发展教育的重大意义，部署了建设教育强国战略，针对高等教育提出一系列新理念新思想新任务。在党的十九大报告中，习近平总书记提出要“加快一流大学和一流学科建设，实现高等教育内涵式发展”。2018 年 5 月 2 日，习近平总书记在北京大学师生座谈会上明确指出：“高等教育是一个国家发展水平和发展潜力的重要标志。今天，党和国家事业发展对高等教育的需要，对科学知识和优秀人才的需要，比以往任何时候都更为迫切。”在党的二十大报告中，习近平总书记第一次将教育、科技、人才一体部署，前所未有地突出了教育、科技、人才在中国式现代化建设进程中的基础性、战略性支撑地位。

在 2024 年全国两会上，习近平总书记站在建设现代化强国的战略高度上提出要发展新质生产力。培育和发展新质生产力，创新是根本，基础和先导靠教育，这对进一步深化科技和教育体制改革，构建高质量人才自主培养体系和深化拔尖创新人才提出了新的要求。

随着中国日益走到世界舞台的中央，国家发展对于科学技术和



人才知识的需求比以往任何时候都更迫切，亟须培养大批适应中国式现代化发展的国际化高层次人才、国际化创新型人才。尤其在面对西方国家的打压和遏制时，我们也前所未有地清醒认识到，国际化高层次人才长期靠别的国家培养是靠不住的，科学的“饭碗”要端在中国人自己手上，只有自己着手自主培养，才能真正了解本国发展的难题，真正帮助国家解决“卡脖子”的技术难题，助力中国式现代化和高质量发展。因此，立足本国国情，采取融汇创新的方式，自主培养国际化创新型人才，是高等教育高质量发展看得到、摸得着的成功路径。香港中文大学（深圳）（以下简称“港中大（深圳）”）的10年探索，为此磨出“一剑”，给出了示范。

## 二、香港中文大学（深圳）融汇创新探索高等教育高质量发展的成功路径及经验

进入21世纪以来，国家为鼓励引进外国（境外）优质教育资源，推动在高等教育领域开展中外合作办学。2003年9月《中华人民共和国中外合作办学条例》（以下简称《中外合作办学条例》）正式实施，自此10余所中外合作办学大学相继诞生，为我国高等教育发展开辟了新类型、新赛道。

2014年3月，港中大（深圳）经国家教育部批准正式设立，于

2014年9月招收第1届本科生。港中大（深圳）自诞生之日起，即传承香港中文大学的国际化办学理念和优良学术传统，沿袭完善的学术体系、评价体系及全人教育理念和书院制模式，以创建一所立足中国的世界一流研究型大学为己任，以“结合传统与现代，融会中国与西方”为使命，致力于培养具有国际视野、中华传统和社会担当的创新型国际化高层次人才。港中大（深圳）坚定履行教育部批准设立时的文件要求，即作为“探索建设国家高水平大学的有益尝试”“为推动我国高等教育综合改革进程提供宝贵经验”，主动肩负起国家高等教育高质量发展和综合改革的光荣使命，矢志建设世界一流研究型大学。

### 2.1 办学理念紧密结合国家和地区战略需求

当前中国已然成为世界第二大经济体，国家发展和民族伟大复兴与高等教育高质量发展相辅相成。站在新的历史起点上，要改变过往国际化人才依赖外国培养的情况，探索立足本国、自主培养国际化高水平人才路径，才能真正成为引领趋势、占据核心优势的“领跑者”，真正解决“卡脖子”的技术难题，把发展先机牢牢握在自己的手里。

10年来，港中大（深圳）始终紧扣国家和地区发展战略，践行初心使命、勇担重任，服务粤

港澳大湾区国际创新科技中心建设和高水平人才高地建设。经过10年探索发展，港中大（深圳）被香港历任特首誉为“大湾区合作发展的最佳样本”“践行‘一国两制’的成功范本”，办学业绩得到了社会各界的广泛赞誉，连续5年获得软科中外合作办学排名第1名。

### 2.2 采用国际管理规则与标准办学

自主培养国际化高层次人才，需要真正采用国际规则，办成开放式的国际化大学。港中大（深圳）依据国家法规，充分发挥香港“一国两制”制度优势，以及深圳建设社会主义先行示范区和粤港澳大湾区引擎城市的区位优势，实行与国际接轨的管理体制机制。港中大（深圳）采用由理事会领导、校长具体负责的管理机制，理事会决策和部署学校发展方向和重大事项，支持校长依法自主办学。理事会下设立校务委员会、学术委员会、财务委员会、审计委员会等重要组织机构，全面规划、决定及监督学校各项工作。港中大（深圳）管理高层始终秉持“一腔热血、百年大学、千载品牌、万世良心”的初心使命，积极借鉴国际一流大学的管理机制，采用与国际接轨的教材课程，面向世界全职引进一批具有在世界一流大学学习、执教或研究经历的专家、学者，建立起国际化的师资和学科体系，全方

位布局建设世界一流研究型大学。

### 2.3 采用灵活制度及薪酬体系 招募全球一流师资

拥有国际一流师资是实现高等教育高质量发展的核心要素。为保证国际化优秀人才引得进、留得住，令大学自主培养国际化人才有坚实的基础保障，港中大（深圳）建立、实施并逐步完善一套完整的学术管理体系和人才评价系统，确保师资水平和学术质量能够站在国际一流大学的前列。

①采用以国际同行学术评价为核心的人事制度，制定学术人员任命及晋升评审的制度、规定和流程，学术人员按终身序列、研究序列、教学序列三大序列划分，通过“过九关”的聘任制（tenure-track system），严格规范人才遴选与职务晋升；

②采用“9+3”薪酬制度，即让教授拥有3个月无薪自由支配的时间，增进与社会、产业的互动，从而加强教授本身科研的方向性和实践性，也强化大学产学研协同创新体系建设，发挥高校的社会服务功能，主动“敞开大门”，鼓励人才交流互动，推动知识技术迅速转化运用，实现大学与社会一起成长。

建校10年，港中大（深圳）以世界顶尖大学为标杆，面向全球延揽人才，已建设了1支650余人的世界顶尖学者队伍，拥有诺贝尔奖得主5名，国内外院士

逾40名，国家级人才逾百人，68名教授入选2023年度全球前2%顶尖科学家。教师队伍中，45岁及以下青年教师432人，全部具有在国际一流高校执教经历或科研经历，不仅带来了世界前沿的学科知识与体系，也带来了开放包容的国际视野与学术文化。

### 2.4 瞄准产业需求 建设新型交叉优势学科

港中大（深圳）细致调研国家和粤港澳大湾区的需求，瞄准高峰、基础、前沿、新兴、交叉领域，布局一批战略性急需的新型交叉学科。在办学筹备阶段及发展初期，采取了“突出重点、交叉融合、协同创新”的发展思路，致力于培养未来20年国家和区域社会所急需的高层次人才。港中大（深圳）现已设立7所学院、1所研究生院，开设28个本科专业、46个研究生项目，重点建设基础科学、数据科学、经济与管理、能源、医学与健康科学、公共政策等六大学科领域。学校7个学科于2023年11月进入基本科学指标数据库（ESI）全球排名前1%；计算机科学学科在2022年全球计算机科学排名（CS Rankings）居于国内高校第10位。

迄今为止，大学规划建设经济金融、计算机数据科学、材料化学、生物医学4个学科群已达到或接近世界一流水平。其中，经济金融学科目前有全职教

授123人，全部从世界顶尖大学引进，学科的学术质量、论文和科研成果完全可以与世界上任何一所大学的相关学科相媲美。计算机数据科学学科在5G通信网络、人工智能、机器人、统计学等领域建立了国家和地方23个重点实验室，数据科学理学硕士在2023年被全球高等教育分析机构Quacquarelli Symonds（QS）评为中国第1位，机器人学科在CS Ranking机器人领域连续10年被评为中国第1位。材料化学学科汇集了7位院士和数10位世界一流科学家，其中唐本忠院士被评为化学领域中国第1位、世界第5位的科学家，他在纳米结构聚集发光材料领域取得重大突破，荣获2021 Nano Today Award和2023 Biomaterial Global Impact Award。生物医学学科上，港中大（深圳）组建了3个以诺贝尔奖得主领衔的重点研究院，包括瓦谢尔计算生物研究院、科比尔卡创新药物研究院和切哈诺沃精准再生医学研究院，建立了首个具有世界级水平的生物信息数据库。

港中大（深圳）推进创新链、人才链、教育链与产业链深度融合。在机器人与人工智能、大数据与信息科学、未来智能网络、生物信息学、新材料和能源科学、国际金融与物流、制药和精准医学等重点研究领域建成国家、省、

市级和校企合作等高水平科研载体 87 个，其中诺贝尔奖、图灵奖科学家实验室 4 个，国家级工程实验室 1 个，省级平台 10 个，建设总资金已超 31 亿元。港中大（深圳）构建起“基础研究+技术攻关+成果产业化+科技金融+人才支撑”全过程创新生态链，形成“1+N”科技成果转化体系，通过“投资+孵化”“基金+基地”模式加强与创投机构的合作，与华为、京东、腾讯等企业开展深度合作，共建校企联合实验室 20 余个，共同携手攻关产业技术难题。

## 2.5 从无到有 创建全方位的国际人才培养网络

要想办成国际一流大学，必须不断提升自身的国际影响力。港中大（深圳）将国际化作为核心发展策略，不断探索扩大国际化办学有效路径，全方位营造国际化培养环境，从零开始构建国际合作网络。早在创校第 1 年，港中大（深圳）就开创性地与英属哥伦比亚大学、哥本哈根商学院以“洲际班”的形式合作开展全球供应链与物流管理项目。目前，港中大（深圳）已与 34 个国家和地区的 150 所世界名校建立各类国际合作项目 256 个。学生可以通过暑课、交换交流或本硕、本博连读项目参与海外学习，超过 60% 的本科在校生中拥有境外学分学习经历，居国内高校前列。通过本校与国际知名大学

合作的“3+2”“4+1”“3.5+1.5”“3+1+X”等本硕连读、本博连读项目，许多学生可以自动进入世界名校攻读研究生课程。80% 的学生获得本科毕业后继续名校深造的机会，其中入读世界排名前 50 位知名院校的学生占 70% 以上。2023 年，港中大（深圳）更与香港中文大学联合推出“双主修 2+2”项目，学生可在深圳、香港两地校园轮换上课、实习。2024 年，港中大（深圳）成为哥伦比亚大学工程学院在亚洲唯一一所本硕连读合作院校，两校联合推出的“3+2”直硕精英班受到学生和社会热烈响应。

与此同时，港中大（深圳）采用国际化教学体系及教学质量评审机制，以英文为主要教学语言，引入境外具有先进性、通用性及价值观正确性的原版教材，制定清晰的授课计划、学生学习效果量化指标和评核标准。严格坚持学院、专业、课程三级制的外部评审制度，坚持教学质量为首、教育科研相结合的平衡学术体系。学校还实施因材施教，面向本科招生省份招收“诺贝尔班”学生，由诺贝尔奖得主、图灵奖得主、菲尔兹奖得主等国际顶尖导师团队为学生定制个性化培养方案。

建校 10 年，港中大（深圳）已培养了 7 届本科、8 届硕士和 4 届博士毕业生。毕业生就业地区主要集中在深圳、广州、北京、

上海、杭州等地，其中粤港澳大湾区是毕业生首选就业区域。

## 2.6 通过学院与书院纵横结合开展全人教育

港中大（深圳）落实立德树人根本任务，实施“以学生为中心”的全人教育，通过学院和书院纵横结合，打破国别、地域、民族、学科、专业、年级等界限，让学生在多元文化背景下共同生活、相互学习，成长为兼具中国文化传统与国际视野、独立思辨精神和创新能力的优秀人才。

香港中文大学的书院制融合中西方教育制度，倡导求学与做人并驾齐驱、中西合璧，是“融合”教育的典范，在亚洲高校中享有盛誉。港中大（深圳）传承香港中文大学 60 年来所坚持的书院制和全人教育理念，建立了一套完整的育人机制和学生管理体制，将书院作为自主培养国际化人才的重要平台，从而更好地实现全人教育、通识教育。目前，港中大（深圳）已建有逸夫、学勤、思廷、祥波、道扬、厚含及第七书院共 7 所书院。各书院体系架构设施完备，拥有完善的组织管理架构，健全的舍导师网络，完备的功能空间设施及丰富的全人教育课堂，不仅为学生提供了有益身心的成长和生活环境，还从归属感、主人翁意识、创新和进取精神、多元化视角及社会责任感 5 个维度全方位锻造，挖掘学生成



长潜力，培养领导力和领袖气质，与学院的专业教学、学术研究、专业课程相辅相成。学院“博文”和书院“约礼”共同托举学生成长，是港中大（深圳）成为“融合”教育典范的鲜明特色。

## 2.7 打造“学思践悟”校园育人文化环境

好的教育要把培养学生放在办学的首位，一切服务于学生的成人成才。港中大（深圳）倡导“学生第一、教师第二、校长第三”，致力提升学生的综合素质，以及对自然、生活和美的创造性认知。港中大（深圳）传承香港中文大学的通识教育理念，采取“学、思、践、悟”的培养方式。港中大（深圳）采用香港中文大学享誉全球的通识课程体系，为学生提供多类型的人文、艺术与自然科学相关课程与活动，学生毕业须修读 18 学分的通识教育课程，坚持 4 年必修，目前港中大（深圳）共开设通识课 124 门，占所有课程比例为 15.25%。学校通过各式各样的通识课程，引导学生阅读东西方经典人文与科学著作，结合丰富的学科讲座与社会实践，使学生对中华传统、世界文明、中国国情与世界形势能够有更加全面和深刻的认识。充分发挥艺术育人作用，结合驻校艺术家项目、春山雅聚 / 大师讲堂系列讲座项目、校级音乐会（每年 1 届）等，落实人文教育、艺

术熏陶，强调想象力、创造力的培养。港中大（深圳）通过“学、思、践、悟”培养学生的独立思辨能力、想象力和创造精神、与人交往的能力，努力培养学生成为“学贯中西、会通古今、融合文理”的综合型人才。

## 2.8 坚持家校联手培养

港中大（深圳）独树一帜打造家长和学校通力合作的平台，家长和学校站在学生培养的同一战线上，注重家庭教育对学生视野、情商、独立思辨能力的重大影响。学生家长也成了港中大（深圳）的一分子，通过家长第一课、家校委员会、家长大讲堂、家长公众号等一系列家校合作平台参与学生培养。学校定期举办杰出贡献家长评选予以表彰。2023—2024 年 10 周年校庆系列活动开始以来，“龙步天下·香港中文大学（深圳）建校 10 周年家校同行活动”受到众多家长的热烈响应，在全国 23 个省份、56 个城市举办活动，参与人数近 5000 人，他们在全国乃至世界各地地标留下精彩瞬间，展现出“世界一流家长团队”的独特风采。

## 三、面向未来的高等教育高质量发展的重点任务

人工智能时代，当前主要国家都将自主培养国际化创新型高层次人才的能力水平作为战略任务，作为高等教育高质量发展战

略选择。港中大（深圳）将坚持改革创新、持续为中国高等教育高质量发展探索和积累经验。

### （1）面向未来，继续当好自主培养国际化人才的先行者

自主培养国际化高层次人才，是中国融入世界发展、跻身国际舞台中心的战略选择，也是中国高等教育高质量发展的必然进程。港中大（深圳）坚定瞄准创建世界一流研究型大学的目标，坚持服务国家重大战略和服务经济建设的导向，充分发扬中国高等教育的改革优势，充分发挥中外合作办学和深港合作的体制机制优势，充分利用深圳建设中国特色社会主义先行示范区和建设粤港澳大湾区国际科技创新中心的区域优势，锐意进取、追求卓越，为粤港澳大湾区及中国高等教育改革作出引领示范性探索，实现整体办学水平和综合实力的跨越式大发展。

### （2）面向未来，始终勇当建设新兴交叉学科的开拓者

坚持服务国家和地方发展战略需求，聚焦粤港澳大湾区新兴产业发展趋势和人才需求，抓住机遇、与时俱进、科学布局、突出重点，发展新型交叉学科，落实深圳市人民政府、香港中文大学和港中大（深圳）三方签署的《关于进一步深化合作的补充协议》精神，瞄准国家重大任务重大需求和国际学术前沿，科学规

划布局学科科研载体，新建公共政策学院、人工智能学院，聚焦关键核心技术和“卡脖子”问题，深化科教融合、产教融合，打造科技创新平台，建设高端智库。融合学科、人才与平台建设，进一步提升原始创新能力，推动孕育在国际科技前沿有影响力的重大关键性成果，为国家相关领域的引领性技术创新和技术基础积累贡献力量。

### （3）面向未来，坚定当好高等教育国际交流的促进者

继续发挥中外合作办学优势，发挥香港特别行政区、国际化大学及民间机构在国际交流合作中的桥梁纽带作用，巩固和发展深层次、宽领域、立体化的国际合作与交流。一方面，继续拓展国际知名高校合作数量层次，深化和增加国际交流合作项目，开创国际交流与合作新局面。另一方面，积极探索新型国际教育合作模式。例如，通过建立“世界大学校长联谊会”“国际教育交流基金会”“海外学者双聘方式来华交流”等形式，吸引世界各地人才来华学习及工作交流，特别是扩大在国际学术合作及青年学者、留学生等交流，打造国际高等教育交流的重要驿站，为加快粤港澳大湾区高水平人才高地建设和国际科技创新中心建设贡献力量。

### （4）面向未来，继续当好领袖型人才培养教育的践行者

人文艺术教育不仅是专业教

育的补充，也是新时代领袖型人才培养的重要导向。在人工智能时代，尤其是 ChatGPT 诞生以后，人文情操、美学素养、创造力与社交力将是优秀人才区别于人工智能的竞争力所在。针对当下国家战略发展需要和世界行业发展趋势，我们要继续完善弘扬中国优秀文化传统、独具自身特色的全人教育和书院制，加强非形式教育，强调培养学生的情商、情感和勇气，强调想象力与创造，强调沟通与领导能力及视野与胸襟，促进学生全面发展，塑造德智体群美兼顾，具备家国情怀、中华传统和社会担当的国际化创新型人才。

### （5）面向未来，坚定当好区域经济社会发展的驱动者

高等教育的高质量发展必须服务国家和区域建设的重大战略需求。《粤港澳大湾区发展规划纲要》中指出：“建设粤港澳大湾区，既是新时代推动形成全面开放新格局的新尝试，也是推动‘一国两制’事业发展的新实践。”大湾区高校之间的有机合作成为内地高校走向世界、接轨国际的重要途径。在未来，港中大（深圳）将充分运用 10 年来国际化办学取得的良好声誉和有利条件，参与驱动国家层面高等教育战略任务，从科研体系构建、人才引进评定政策、重大成果布局培育、科研环境优化等方面创新体制机制，推进产业链、创新链、人才链、教育链深

度融合。重视产学研合作和成果转化，及时将前沿学术成果应用于实际，提升大学的驱动服务功能。

曾经十载奋斗创南国高等学府，志成百年大学育一流创新人才。港中大（深圳）将开启新的十年征程，将一如既往铭记初心、肩负重任，主动服务粤港澳大湾区和深圳先行示范区建设，以更加坚定的步伐迈向建设世界一流研究型大学，成功探索自主培养国际化高层次人才的中国方案。○

来源：中国科学院院刊

## 人物简介



徐扬生，中国工程院院士，中国自动化学会会士，美国国家工程院外籍院士，欧洲科学院院士。香港中文大学（深圳）校长。主要研究领域：机器人和人工智能，专注于机器人的设计与控制、穿戴式人机界面、智慧汽车、动态稳定系统和机器学习。

# 含有输入时滞的非线性系统的输出反馈采样控制

文 / 马 倩 盛兆明 徐胜元

**摘要：**针对含有输入时滞和低阶非线性项的非线性系统，提出一种基于采样机制的无记忆输出反馈控制方法。该方法移除了传统预测控制方法预测映射难以确定的限制，同时避免了时滞依赖方法对过去时刻状态信息的依赖性，在实际中更易实现。首先，根据系统输出在采样时刻的信息，利用加幂积分技术和齐次占优思想设计了无记忆输出反馈采样控制器。然后，利用齐次系统理论提出了闭环系统的稳定性条件。最后，仿真结果验证了所提方法的有效性和优越性。

近年来，非线性系统的控制问题引起了国内外学者的广泛关注，涌现出大量优秀的研究成果。在对系统设计控制器时，系统的非线性项需要满足一定的限制条件以避免产生有限时间逃逸现象。例如，在线性增长条件下，文献利用反馈占优方法，实现了非线性系统的全局镇定。为了放松上述线性增长条件，文献利用加幂积分技术解决了高阶非线性系统的控制问题。然而，在一些实际应用中，低阶非线性项广泛存在于控制系统中，使得上述方法不再适用。因此，如何解决含有低阶非线性项的非线性系统的控制问题具有重要意义。

众所周知，输入时滞广泛存在于实际系统中，常常造成系统性能下降，甚至导致系统不稳定。因此，如何消除输入时滞带来的

负面影响成为了控制领域的研究热点。针对含有输入时滞的非线性系统，文献提出基于预测的控制策略，通过预测系统的状态信息来补偿输入时滞的影响。然而，预测控制依赖于系统的具体形式，当系统含有不确定性时，难以找到准确的预测映射。文献提出时滞依赖的控制方法，但是得到的控制器与系统过去时刻的状态信息有关。文献提出无记忆反馈控制方法，该方法仅利用系统当前时刻的状态信息设计控制器，更易于实现。然而，文献只考虑了满足线性增长条件的非线性系统。对于含有输入时滞和低阶非线性项的非线性系统，如何提出有效的无记忆反馈控制方案仍然是亟待解决的问题。

另一方面，上述方法设计的控制器需要进行连续的信息更新，

从而导致大量的资源消耗。因此，如何提出有效的采样控制策略是解决这一问题的关键。目前，采样控制的研究方法主要分为以下两种：一种方法是通过离散化得到连续系统的离散化模型，然后基于此模型设计采样控制器。对于线性系统而言，其精确的离散化模型很容易得到。但对于非线性系统，离散化误差无法避免，导致难以得到全局稳定的结果。另一种方法是直接针对连续系统设计连续时间控制器，然后将控制器离散化得到采样控制器，该方法通过选择合适的采样周期可保证闭环系统是全局稳定的。利用后一种方法，文献针对一类满足线性增长条件的非线性系统，研究了输出反馈采样控制问题。然而，文献中的结果并未考虑输入时滞的影响。



根据以上讨论, 本文将基于无记忆反馈控制的思想, 针对含有输入时滞和低阶非线性项的非线性系统, 提出一种基于采样机制的输出反馈控制方案。本文的主要贡献如下: 1) 控制方案充分考虑了低阶不确定非线性项的影响, 移除了预测映射难以确定的限制; 2) 利用齐次系统理论并结合 Gronwall-Bellman 不等式, 解决了最大允许采样周期和最大允许输入时滞难以确定的难题; 3) 控制方案只与系统输出在采样时刻的信息有关, 节约了通信资源。

本文用到如下符号: 定义  $[x]^p = \text{sign}(x)|x|^p$ , 其中,  $\text{sign}(\cdot)$  为符号函数。

## 1 预备知识及系统描述

考虑如下含有输入时滞的非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = x_{i+1}(t) + \psi_i(t, x(t)), i=1, 2, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n(t) = u(t-\theta) + \psi_n(t, x(t)) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T \in \mathbf{R}^n, u(t) \in \mathbf{R}, y(t) \in \mathbf{R}$  分别表示系统的状态, 系统的输入和系统的输出  $\psi_i(t, x(t)), i=1, 2, \dots, n$  为未知连续非线性函数且满足  $\psi_i(t, 0) = 0, \theta \geq 0$  为输入时滞。系统初始状态满足  $x(\kappa) = \phi(\kappa), \forall \kappa \in [-\theta, 0]$ 。

**定义 1.** 给定坐标  $(x_1, \dots, x_n)$  和实数  $t_i > 0, i=1, \dots, n$ , 引入以下定义:

1) 对于任意的  $\varepsilon > 0$ , 定义扩张  $\Delta_\varepsilon(x) = (\varepsilon^{l_1} x_1, \dots, \varepsilon^{l_n} x_n)$ , 其中,  $l_i$  为  $x_i$  的权重。本文用  $\Delta = (l_1, \dots, l_n)$  表示扩张。

2) 对于函数  $V: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$  和实数  $\omega \in \mathbf{R}$ , 如果存在  $\varepsilon > 0$  使得  $V(\Delta_\varepsilon(x)) = \varepsilon^\omega V(x_1, \dots, x_n), \forall x \in \mathbf{R}^n \setminus \{0\}$ , 则称函数  $V$  的齐次度为  $\omega$ 。

3) 对于向量  $f: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$  和实数  $\omega \in \mathbf{R}$ , 如果存在  $\varepsilon > 0$ , 使得  $f_i(\Delta_\varepsilon(x)) = \varepsilon^{\omega+l_i} f_i(x_1, \dots, x_n), \forall x \in \mathbf{R}^n \setminus \{0\}$ , 则称向量  $f$  的齐次度为  $\omega$ 。

4) 对于常数  $p \geq 1$ , 定义齐次  $p$ -范数为  $\|x\|_{\Delta, p} =$

$\left(\sum_{i=1}^n |x_i|^{\frac{p}{l_i}}\right)^{\frac{1}{p}}$ 。本文用  $\|x\|_\Delta$  表示  $\|x\|_{\Delta, 2}$ 。

**假设 1.** 对于  $i=1, \dots, n$ , 存在已知常数  $c \geq 0$ , 满足

$$|\psi_i(\cdot)| \leq c \sum_{j=1}^i |x_j(t)|^{\frac{r_{i+1}}{r_j}} \quad (2)$$

其中,  $r_1 = 1, r_i = r_{i-1} + \omega, i=2, \dots, n+1$  且  $\omega \in (-1/n, 0)$ 。

**注 1.** 文献和文献中的方法只适用于满足线性增长条件的非线性系统, 当  $\omega < 0$  时, 系统中含有低阶非线性项, 上述文献中的方法不再适用。

**引理 1.** 对于任意的  $\aleph_1 \in \mathbf{R}, \aleph_2 \in \mathbf{R}$  以及实数  $m > 0, n > 0$ , 存在  $\gamma > 0$ , 使得

$$|\aleph_1|^m |\aleph_2|^n \leq \frac{m}{m+n} \gamma |\aleph_1|^{m+n} + \frac{n}{m+n} \gamma^{-\frac{m}{n}} |\aleph_2|^{m+n} \quad (3)$$

**引理 2.** 对于任意的  $\aleph_1 \in \mathbf{R}, \aleph_2 \in \mathbf{R}$  以及  $p \geq 1$ , 存在  $\lambda > 0$ , 使得

$$\begin{cases} \left| [\aleph_1]^p - [\aleph_2]^p \right| \leq \lambda |\aleph_1 - \aleph_2| \left( |\aleph_1|^{p-1} + |\aleph_2|^{p-1} \right) \\ \left| [\aleph_1]^{\frac{1}{p}} - [\aleph_2]^{\frac{1}{p}} \right| \leq 2^{\frac{1}{p}} |\aleph_1 - \aleph_2|^{\frac{1}{p}} \end{cases} \quad (4)$$

**引理 3.** 对于任意给定的  $\mathcal{C}^2$  函数  $h(\epsilon) = [\epsilon]^\alpha, \epsilon \in \mathbf{R}, \alpha > 2$ 。满足  $h'(\epsilon) = \alpha |\epsilon|^{\alpha-1}$  以及  $h''(\epsilon) = \alpha \times (\alpha-1) [\epsilon]^{\alpha-2}$ 。

**引理 4.** 对于任意的  $\sigma_i \in \mathbf{R}, i=1, \dots, n$  以及  $\bar{p} \geq 0$ , 如下不等式成立

$$\left( |\sigma_1| + \dots + |\sigma_n| \right)^{\bar{p}} \leq \max \{ n^{\bar{p}-1}, 1 \} \left( |\sigma_1|^{\bar{p}} + \dots + |\sigma_n|^{\bar{p}} \right) \quad (5)$$

**引理 5.** 对于任意的  $\nu \in (0, 1), \ell \in (0, 1)$  以及  $\pi \in \mathbf{R}$ , 如下不等式成立

$$[\pi]^\nu + [1-\pi]^\nu + \ell^2 [\pi]^{1+\nu} \geq (2^\nu - 1) \ell^{1-\nu} \quad (6)$$

**引理 6.** 给定扩张  $\Delta = (l_1, \dots, l_n)$ , 假设函数  $V: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$  关于扩张  $\Delta$  的齐次度为  $\omega$ , 则

- 1)  $\frac{\partial V}{\partial x_i}$  的齐次度为  $\omega - l_i$ , 其中,  $l_i$  为  $x_i$  的权重;
- 2) 若  $V(x)$  正定, 则存在正常数  $\bar{\kappa}$  和  $\underline{\kappa}$ , 使得  $\underline{\kappa} \|x\|_\Delta^\omega \leq V(x) \leq \bar{\kappa} \|x\|_\Delta^\omega$ 。

**引理 7.** 假设  $\zeta(\cdot)$  和  $h(\cdot)$  是定义在区间  $[a, b]$  上的连续函数。如果存在实数  $\tilde{p}$  和  $\tilde{q}$  满足  $\tilde{p} > 1$  以及  $1/\tilde{p} + 1/\tilde{q} = 1$ , 则有

$$\left| \int_a^b \zeta(x) h(x) dx \right| \leq \left( \int_a^b |\zeta(x)|^{\tilde{p}} dx \right)^{\frac{1}{\tilde{p}}} \left( \int_a^b |h(x)|^{\tilde{q}} dx \right)^{\frac{1}{\tilde{q}}} \quad (7)$$

## 2 主要结果

本节分为四个部分: 首先, 通过坐标变换引入可调增益  $L$ 。然后, 针对标称系统设计输出反馈控制器, 并利用齐次占优思想确定可调增益的取值最后, 对闭环系统进行分析, 得到最大允许采样周期和最大允许输入时滞。

### 2.1 坐标变换

定义如下坐标变换

$$z_i = \frac{x_i}{L^{i-1}}, \bar{\psi}_i(\cdot) = \frac{\psi_i(\cdot)}{L^{i-1}}, i=1, \dots, n, v = \frac{u}{L^n} \quad (8)$$

其中,  $L \geq 1$  为可调增益。根据式 (1) 和式 (8), 可得

$$\begin{cases} \dot{z}_i(t) = Lz_{i+1}(t) + \bar{\psi}_i(t, z(t)), i=1, \dots, n-1 \\ \dot{z}_n(t) = Lv(t) + \bar{\psi}_n(t, z(t)) + L(v(t-\theta) - v(t)) \\ y(t) = z_1(t) \end{cases} \quad (9)$$

进一步, 由假设 1 计算得到

$$|\bar{\psi}_i(\cdot)| \leq cL^{\frac{1}{r_i}} \sum_{j=1}^i |z_j(t)|^{\frac{r_{i+1}}{r_j}}, i=1, \dots, n \quad (10)$$

### 2.2 标称系统控制器设计

考虑如下标称系统

$$\begin{cases} \dot{z}_1(t) = Lz_2(t), \dots, \dot{z}_{n-1}(t) = Lz_n(t) \\ \dot{z}_n(t) = Lv(t) \end{cases} \quad (11)$$

下面对标称系统 (11) 设计状态反馈控制器。

**步骤 1.** 考虑 Lyapunov 函数  $V_1 = \frac{1}{2} z_1^2$ , 对其求导可得

$$\dot{V}_1 = Lz_1 z_2^* + Lz_1(z_2 - z_2^*) \quad (12)$$

定义  $\xi_1 = z_1$  并选择  $z_2^* = -\alpha_1 \lceil \xi_1 \rceil^{\frac{1}{r_2}}, \alpha_1 \geq n + \frac{1}{4}$ , 计算可得

$$\dot{V}_1 \leq -\left(n + \frac{1}{4}\right) L |\xi_1|^{2+\omega} + Lz_1(z_2 - z_2^*) \quad (13)$$

**步骤 2.** 考虑如下 Lyapunov 函数

$$V_2 = V_1 + \int_{z_2^*}^{z_2} \left[ \lceil s \rceil^{\frac{1}{r_2}} - \lceil z_2^* \rceil^{\frac{1}{r_2}} \right]^{2-r_2} ds \quad (14)$$

定义  $\xi_2 = \lceil z_2 \rceil^{\frac{1}{r_2}} - \lceil z_2^* \rceil^{\frac{1}{r_2}}$ , 根据引理 3 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -\left(n + \frac{1}{4}\right) L |\xi_1|^{2+\omega} + L \xi_1 (z_2 - z_2^*) + \\ & L \lceil \xi_2 \rceil^{2-r_2} z_3 + (2-r_2) \frac{d \left( -\lceil z_2^* \rceil^{\frac{1}{r_2}} \right)}{dt} \times \\ & \int_{z_2^*}^{z_2} \left[ \lceil s \rceil^{\frac{1}{r_2}} - \lceil z_2^* \rceil^{\frac{1}{r_2}} \right]^{1-r_2} ds \end{aligned} \quad (15)$$

进一步, 由引理 2 和引理 4 可知,  $|z_2| \leq |\xi_2|^{\frac{1}{r_2}} + \alpha_1 |\xi_1|^{\frac{1}{r_2}}$ ,  $|z_2 - z_2^*| \leq 2^{1-r_2} |\xi_2|^{\frac{1}{r_2}}$ 。因此, 存在正常数  $c_{1,1}$  使得

$$\begin{aligned} \int_{z_2^*}^{z_2} (2-r_2) \left[ \lceil s \rceil^{\frac{1}{r_2}} - \lceil z_2^* \rceil^{\frac{1}{r_2}} \right]^{1-r_2} \frac{d \left( -\lceil z_2^* \rceil^{\frac{1}{r_2}} \right)}{dt} ds \leq \\ \frac{L}{2} |\xi_1|^{2+\omega} + c_{1,1} L |\xi_2|^{2+\omega} \end{aligned} \quad (16)$$

此外, 根据引理 1 和引理 2, 如下不等式成立

$$L \xi_1 (z_2 - z_2^*) \leq \frac{L}{2} |\xi_1|^{2+\omega} + c_{1,2} L |\xi_2|^{2+\omega} \quad (17)$$

其中,  $c_{1,2}$  为正常数。

将式 (16) 和式 (17) 代入式 (15) 并设计虚拟控制器  $z_3^* = -\alpha_2 \lceil \xi_2 \rceil^{\frac{1}{r_3}}, \alpha_2 \geq \left(n - \frac{3}{4}\right) + c_{1,1} + c_{1,2}$ , 可得

$$\dot{V}_2 \leq -\left(n - \frac{3}{4}\right) L \sum_{i=1}^2 |\xi_i|^{2+\omega} + L \lceil \xi_2 \rceil^{2-r_2} (z_3 - z_3^*) \quad (18)$$

类似于步骤 1 和步骤 2, 存在如下虚拟控制器  $z_i^*$ ,

$i=1, \dots, n$ , 即

$$\begin{aligned} z_1^* &= 0, & \xi_1 &= \lceil z_1 \rceil^{\frac{1}{r_1}} - \lceil z_1^* \rceil^{\frac{1}{r_1}} \\ z_i^* &= -\alpha_{i-1} \lceil \xi_{i-1} \rceil^{\frac{1}{r_i}}, & \xi_i &= \lceil z_i \rceil^{\frac{1}{r_i}} - \lceil z_i^* \rceil^{\frac{1}{r_i}} \\ & & i &= 2, \dots, n \end{aligned} \quad (19)$$

和 Lyapunov 函数

$$V_n = \frac{1}{2} z_1^2 + \sum_{i=2}^n \int_{z_i^*}^{z_i} \left[ \lceil s \rceil^{\frac{1}{r_i}} - \lceil z_i^* \rceil^{\frac{1}{r_i}} \right]^{2-r_i} ds$$

使得

$$\dot{V}_n \leq -\frac{5}{4}L \sum_{i=1}^n |\xi_i|^{2+\omega} + L[\xi_n]^{2-r_n} (v - z_{n+1}^*) \quad (20)$$

其中,  $z_{n+1}^* = -\alpha_n [\xi_n]^{r_n}$ ,  $\alpha_i, i=1, \dots, n$  为正常数。

**注 2.** 齐次占优思想分为两个步骤: 首先, 在不考虑系统非线性函数的条件下, 针对标称系统设计含有可调增益的控制器; 然后, 根据非线性函数的增长率, 调整增益值来抵消非线性项对系统的影响。

### 2.3 无记忆输出反馈采样控制器的设计

为了估计不可量测状态, 设计如下齐次降维观测器

$$\begin{cases} \dot{\hat{\eta}}_2(t) = -Ll_2 [\hat{\eta}_2(t) + l_2 z_1(t_k)]^{\frac{r_2}{r_1}} \\ \hat{z}_2(t_k) = [\hat{\eta}_2(t_k) + l_2 z_1(t_k)]^{\frac{r_2}{r_1}} \\ \dot{\hat{\eta}}_i(t) = -Ll_i [\hat{\eta}_i(t) + l_i \hat{z}_{i-1}(t_k)]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} \\ \hat{z}_i(t_k) = [\hat{\eta}_i(t_k) + l_i \hat{z}_{i-1}(t_k)]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}}, i=3, \dots, n \end{cases} \quad (21)$$

其中,  $t \in [t_k, t_{k+1})$ ,  $t_k = kT, k=0, 1, \dots, T$  为采样周期,  $l_i > 0$ ,  $i=2, \dots, n$  为设计参数。

基于观测器 (21), 设计如下采样控制器

$$v(t) = v(t_k) = -\alpha_n [\hat{\xi}_n(t_k)]^{r_n+\omega}, \forall t \in [t_k, t_{k+1}) \quad (22)$$

其中,  $\hat{\xi}_n(t_k) = [\hat{z}_n(t_k)]^{\frac{1}{r_n}} + \alpha_{n-1} ([\hat{z}_{n-1}(t_k)]^{\frac{1}{r_{n-1}}} + \dots + \alpha_2^{\frac{1}{r_2}} ([\hat{z}_2(t_k)]^{\frac{1}{r_2}} + \alpha_1^{\frac{1}{r_1}} z_1(t_k)))$ 。

**注 3.** 根据式 (21), 齐次降维观测器只用到了系统输出在采样时刻的信息。此外, 与文献中的观测器相比, 本文设计的观测器充分考虑了低阶非线性项的影响, 解决了不可量测状态带来的困难。另一方面, 降维观测器 (21) 由  $n-1$  个子观测器”构成。对于第 1 个子观测器”, 通过  $z_1(t_k)$  的信息得到  $\hat{\eta}_2(t_k)$  和  $\hat{z}_2(t_k)$ 。进一步, 根据  $\hat{z}_2(t_k)$ , 由第 2 个子观测器”得到  $\hat{\eta}_3(t_k)$  和  $\hat{z}_3(t_k)$ 。类似地, 前一个观测器的输出作为后一个观测器的输入, 可以得到估计状态  $\hat{z}_2(t_k), \dots, \hat{z}_n(t_k)$ 。

下面确定  $l_i, i=2, \dots, n$  的取值。首先, 对于  $i=$

$2, \dots, n$ , 定义  $\eta_i = [z_i]^{\frac{r_{i-1}}{r_i}} - l_i z_{i-1}$  和观测误差  $\varepsilon_i = \eta_i - \hat{\eta}_i$ , 计算可得

$$\varepsilon_i = [z_i]^{\frac{r_{i-1}}{r_i}} - l_i z_{i-1} - \hat{\eta}_i \quad (23)$$

根据式 (21) 和式 (23) 可知

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_i &= \frac{r_{i-1}}{r_i} L [z_i]^{\frac{\omega}{r_i}} z_{i+1} + l_i L \left( [\hat{\eta}_i + l_i \hat{z}_{i-1}(t_k)]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} - \right. \\ &\quad \left. [\hat{\eta}_i + l_i \hat{z}_{i-1}]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} \right) - l_i L (z_i - \hat{z}_i) \end{aligned} \quad (24)$$

其中,  $\hat{z}_1 = z_1, z_{n+1} = v$ 。

选择 Lyapunov 函数  $U = V_n + \sum_{i=2}^n \frac{r_{i-1}}{2} |\varepsilon_i|^{\frac{2}{r_{i-1}}}$ 。根据式 (20) 和式 (24),  $U$  的导数满足

$$\begin{aligned} \dot{U} &\leq -\frac{5}{4}L \sum_{i=1}^n |\xi_i|^{2+\omega} - \sum_{i=2}^n l_i L [\varepsilon_i]^{\frac{2}{r_{i-1}-1}} (z_i - \hat{z}_i) + \\ &\quad \sum_{i=2}^n l_i L [\varepsilon_i]^{\frac{2}{r_{i-1}-1}} \left( [\hat{\eta}_i + l_i \hat{z}_{i-1}(t_k)]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} - \right. \\ &\quad \left. [\hat{\eta}_i + l_i \hat{z}_{i-1}]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} \right) + L [\xi_n]^{2-r_n} (v - z_{n+1}^*) + \\ &\quad \sum_{i=2}^n \frac{r_{i-1}}{r_i} L [\varepsilon_i]^{\frac{2}{r_{i-1}-1}} |z_i|^{\frac{\omega}{r_i}} z_{i+1} \end{aligned} \quad (25)$$

下面对式 (25) 中的各项进行估计。首先, 根据式 (19)、引理 1 和引理 4, 可得

$$\begin{aligned} \sum_{i=2}^{n-1} \frac{r_{i-1}}{r_i} L [\varepsilon_i]^{\frac{2}{r_{i-1}-1}} |z_i|^{\frac{\omega}{r_i}} z_{i+1} &\leq \\ \frac{L}{16} \sum_{i=1}^n |\xi_i|^{2+\omega} + L \sum_{i=2}^n c_{2,i} |\varepsilon_i|^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \end{aligned} \quad (26)$$

其中,  $c_{2,i}, i=2, \dots, n-1$  为正常数。

对于  $i=2, \dots, n$ , 根据式 (21) 和数学归纳法、系统状态  $z_i$  与其估计值  $\hat{z}_i$  之间的误差为

$$|z_i - \hat{z}_i| \leq \bar{c}_{2,i} |\varepsilon_i|^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} + \sum_{j=2}^{i-1} g_{1,j}(l_{j+1}, \dots, l_i) |\varepsilon_j|^{\frac{r_i}{r_{j-1}}} \quad (27)$$

其中  $\bar{c}_{2,i}$  为正常数,  $g_{1,j}(l_{j+1}, \dots, l_i), j=2, \dots, i-1$  是与  $l_{j+1}, \dots, l_i$  有关的函数。

另一方面, 由式 (27)、引理 1 和引理 4 可得

$$\begin{aligned} |\hat{z}_i|^{\frac{1}{r_i}} &= |\eta_i + l_i z_{i-1} + \hat{\eta}_i - \eta_i + l_i (\hat{z}_{i-1} - z_{i-1})|^{\frac{1}{r_{i-1}}} \leq \\ &\quad \tilde{c}_{2,i} \left( |\xi_i| + |\xi_{i-1}| + |\varepsilon_i|^{\frac{1}{r_{i-1}}} \right) + \\ &\quad \sum_{j=2}^{i-1} \bar{g}_{1,j}(l_{j+1}, \dots, l_i) |\varepsilon_j|^{\frac{1}{r_{j-1}}} \end{aligned} \quad (28)$$



其中,  $\tilde{c}_{2,i}$  为正常数,  $\bar{g}_{1,i}(l_{j+1}, \dots, l_i), j=2, \dots, i-1$  是与  $l_{j+1}, \dots, l_i$  有关的函数。

结合式 (19), (22), (27), (28) 以及引理 1 和引理 4, 如下不等式成立

$$\begin{aligned} & \frac{r_{n-1}}{r_n} L \left[ \varepsilon_n \right]^{\frac{2}{r_{n-1}}-1} \left| z_n \right|^{\frac{\omega}{r_n}} v \leq \\ & \frac{L}{16} \sum_{i=1}^n |\xi_i|^{2+\omega} + \hat{c}_2 L \left( \sum_{i=2}^n \left| \hat{z}_i - \hat{z}_i(t_k) \right|^{\frac{2+\omega}{r_i}} + \right. \\ & \left. |z_1 - z_1(t_k)|^{2+\omega} \right) + L \hat{c}_{2,n} |\varepsilon_n|^{\frac{2+\omega}{r_{n-1}}} + \\ & L \sum_{i=2}^{n-1} (\hat{c}_{2,i} + \hat{g}_{1,i}(l_{i+1}, \dots, l_n)) |\varepsilon_i|^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \end{aligned} \quad (29)$$

其中,  $\hat{c}_2$  为正常数,  $\hat{g}_{1,i}(l_{i+1}, \dots, l_n), i=2, \dots, n-1$  是与  $l_{i+1}, \dots, l_n$  有关的函数。

因此, 由式 (26) 和式 (29), 可得

$$\begin{aligned} & \sum_{i=2}^n \frac{r_{i-1}}{r_i} L \left[ \varepsilon_i \right]^{\frac{2}{r_{i-1}}-1} \left| z_i \right|^{\frac{\omega}{r_i}} z_{i+1} \leq \\ & \frac{L}{8} \sum_{i=1}^n |\xi_i|^{2+\omega} + \hat{c}_2 L \left( \sum_{i=2}^n \left| \hat{z}_i - \hat{z}_i(t_k) \right|^{\frac{2+\omega}{r_i}} + \right. \\ & \left. |z_1 - z_1(t_k)|^{2+\omega} \right) + L \hat{c}_{2,n} |\varepsilon_n|^{\frac{2+\omega}{r_{n-1}}} + \\ & L \sum_{i=2}^{n-1} (\tilde{c}_{2,i} + \hat{g}_{1,i}(l_{i+1}, \dots, l_n)) |\varepsilon_i|^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \end{aligned} \quad (30)$$

其中,  $\tilde{c}_{2,i} = c_{2,i} + \hat{c}_{2,i}, i=2, \dots, n-1$ 。

当  $\varepsilon_i \neq 0, i=2, \dots, n$  时, 利用式 (19) 和式 (21)

得到

$$\begin{aligned} & -\sum_{i=2}^n l_i L \left[ \varepsilon_i \right]^{\frac{2}{r_{i-1}}-1} (z_i - \hat{z}_i) = \\ & L \sum_{i=2}^n l_i \left[ \varepsilon_i \right]^{\frac{2}{r_{i-1}}-1} \left( z_i - \left[ \hat{\eta}_i + l_i z_{i-1} \right]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} \right) + \\ & L \sum_{i=3}^n l_i \left[ \varepsilon_i \right]^{\frac{2}{r_{i-1}}-1} \left( \left[ \hat{\eta}_i + l_i \hat{z}_{i-1} \right]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} - \right. \\ & \left. \left[ \hat{\eta}_i + l_i z_{i-1} \right]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} \right) \leq \\ & -L \sum_{i=2}^n l_i |\varepsilon_i|^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \left( \left[ 1 - \frac{\left[ z_i \right]^{\frac{r_{i-1}}{r_i}}}{\varepsilon_i} \right]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} + \right. \\ & \left. \left[ \frac{\left[ z_i \right]^{\frac{r_{i-1}}{r_i}}}{\varepsilon_i} \right]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} + l_i^{\frac{2r_{i-1}}{r_i+r_{i-1}}} \left[ \frac{\left[ z_i \right]^{\frac{r_{i-1}}{r_i}}}{\varepsilon_i} \right]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} \right) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & L \sum_{i=2}^n l_i^{\frac{\omega}{r_i+r_{i-1}}} |\varepsilon_i|^{\frac{2}{r_{i-1}}-2} \left[ z_i \right]^{\frac{r_{i-1}+r_i}{r_i}} + \\ & L \sum_{i=3}^n 2^{1-\frac{r_i}{r_{i-1}}} l_i |\varepsilon_i|^{\frac{2}{r_{i-1}}-1} |l_i (z_{i-1} - \hat{z}_{i-1})|^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} \end{aligned} \quad (31)$$

下面对式 (31) 中的各项进行估计。首先, 根据引理 5, 可得

$$\begin{aligned} & -L \sum_{i=2}^n l_i |\varepsilon_i|^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \left( \frac{\left[ z_i \right]^{\frac{r_{i-1}}{r_i}}}{\varepsilon_i} \right)^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} + \\ & \left[ 1 - \frac{\left[ z_i \right]^{\frac{r_{i-1}}{r_i}}}{\varepsilon_i} \right]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} + \left[ \frac{\left[ z_i \right]^{\frac{r_{i-1}}{r_i}}}{\varepsilon_i} \right]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} \leq \\ & -L \sum_{i=2}^n h_i(l_i) |\varepsilon_i|^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \end{aligned} \quad (32)$$

其中,  $h_i(l_i) = (2^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} - 1) l_i^{\frac{2r_i}{r_{i-1}+r_i}}$ 。

进一步, 利用式 (19)、引理 1 和引理 4, 如下不等式成立

$$\begin{aligned} & L \sum_{i=2}^n l_i^{\frac{\omega}{r_i+r_{i-1}}} |\varepsilon_i|^{\frac{2}{r_{i-1}}-2} \left[ z_i \right]^{\frac{r_{i-1}+r_i}{r_i}} \leq \\ & \frac{L}{16} \sum_{i=1}^n |\xi_i|^{2+\omega} + L \sum_{i=2}^n g_{2,i}(l_i) |\varepsilon_i|^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \end{aligned} \quad (33)$$

其中,  $g_{2,i}(l_i), i=2, \dots, n$  是与  $l_i$  有关的函数。

对于式 (31) 中的最后一项, 根据式 (27) 和引理 1, 可得

$$\begin{aligned} & L \sum_{i=3}^n 2^{1-\frac{r_i}{r_{i-1}}} l_i |\varepsilon_i|^{\frac{2}{r_{i-1}}-1} |l_i (z_{i-1} - \hat{z}_{i-1})|^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} \leq \\ & L c_3 |\varepsilon_n|^{\frac{2+\omega}{r_{n-1}}} + L \sum_{i=2}^{n-1} \bar{g}_{2,i}(l_{i+1}, \dots, l_n) |\varepsilon_i|^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \end{aligned} \quad (34)$$

其中,  $c_3$  为正常数  $\bar{g}_{2,i}(l_{i+1}, \dots, l_n), i=2, \dots, n-1$  是与  $l_{i+1}, \dots, l_n$  有关的函数。

将式 (32) (34) 代入式 (31), 得到

$$\begin{aligned} & -\sum_{i=2}^n l_i L \left[ \varepsilon_i \right]^{\frac{2}{r_{i-1}}-1} (z_i - \hat{z}_i) \leq \\ & \frac{L}{16} \sum_{i=1}^n |\xi_i|^{2+\omega} - L (h_n(l_n) - c_3 - \\ & g_{2,n}(l_n)) |\varepsilon_n|^{\frac{2+\omega}{r_{n-1}}} - L \sum_{i=2}^{n-1} (h_i(l_i) - g_{2,i}(l_i) - \\ & \bar{g}_{2,i}(l_{i+1}, \dots, l_n)) |\varepsilon_i|^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \end{aligned} \quad (35)$$

此外, 当  $\varepsilon_i = 0, i=2, \dots, n$  时, 式 (35) 显然成立。

进一步, 利用引理 1 和引理 2, 可得

$$\begin{aligned} & \sum_{i=2}^n l_i L \left[ \varepsilon_i \right]^{\frac{2}{r_{i-1}-1}} \left( \left[ \hat{\eta}_i + l_i \hat{z}_{i-1}(t_k) \right]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} - \right. \\ & \left. \left[ \hat{\eta}_i + l_i \hat{z}_{i-1} \right]^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} \right) \leq \frac{L}{8} \sum_{i=2}^n \left[ \varepsilon_i \right]^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} + \\ & L g_{3,2}(l_2) |z_1 - z_1(t_k)|^{2+\omega} + \\ & L \sum_{i=3}^n g_{3,i}(l_i) \left| \hat{z}_{i-1} - \hat{z}_{i-1}(t_k) \right|^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \end{aligned} \quad (36)$$

其中,  $g_{3,i}(l_i), i=2, \dots, n$  是与  $l_i$  有关的函数。

结合式 (20) 和式 (22), 以及引理 1 和引理 4, 计算得到

$$\begin{aligned} & L |\xi_n|^{2-r_n} (v - z_{n+1}^*) \leq \frac{L}{32} |\xi_n|^{2+\omega} + \\ & c_4 L \left( \left| \xi_n - \hat{\xi}_n \right|^{2+\omega} + \left| \hat{\xi}_n - \hat{\xi}_n(t_k) \right|^{2+\omega} \right) \end{aligned} \quad (37)$$

其中,  $c_4$  为正常数。

因此, 根据式 (19), (22), (27) 以及引理 1 和引理 2, 如下不等式成立

$$\begin{aligned} & c_4 L \left| \xi_n - \hat{\xi}_n \right|^{2+\omega} \leq L c_{4,1} \left( \sum_{i=2}^n \left| z_i \right|^{\frac{1}{r_i}} - \left| \hat{z}_i \right|^{\frac{1}{r_i}} \right)^{2+\omega} \leq \\ & \frac{L}{32} \sum_{i=1}^n |\xi_i|^{2+\omega} + L c_{4,2} \sum_{i=2}^n \left| z_i - \hat{z}_i \right|^{\frac{2+\omega}{r_i}} \leq \\ & \frac{L}{32} \sum_{i=1}^n |\xi_i|^{2+\omega} + \bar{c}_{4,n} L \left[ \varepsilon_n \right]^{\frac{2+\omega}{r_{n-1}}} + \\ & L \sum_{i=2}^{n-1} \left( \bar{g}_{3,i}(l_{i+1}, \dots, l_n) + \bar{c}_{4,i} \right) \left[ \varepsilon_i \right]^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \end{aligned} \quad (38)$$

其中,  $c_{4,1}, c_{4,2}, \bar{c}_{4,i}, i=2, \dots, n$  为正常数,  $\bar{g}_{3,i}(l_{i+1}, \dots, l_n), i=2, \dots, n-1$  是与  $l_{i+1}, \dots, l_n$  有关的函数。

将式 (30) 和式 (35) (38) 代入式 (25), 可得

$$\begin{aligned} \dot{U} & \leq -L \sum_{i=1}^n |\xi_i|^{2+\omega} - L (g_{4,n}(l_n) - \tilde{c}_{4,n}) \left[ \varepsilon_n \right]^{\frac{2+\omega}{r_{n-1}}} - \\ & L \sum_{i=2}^{n-1} (g_{4,i}(l_i) - \bar{g}_{4,i}(l_{i+1}, \dots, l_n) - \tilde{c}_{4,i}) \left[ \varepsilon_i \right]^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} + \\ & c_4 L \left| \hat{\xi}_n - \hat{\xi}_n(t_k) \right|^{2+\omega} + L \hat{c}_2 \left| \hat{z}_n - \hat{z}_n(t_k) \right|^{\frac{2+\omega}{r_n}} + \\ & L \sum_{i=2}^{n-1} (\hat{c}_2 + g_{3,i+1}(l_{i+1})) \left| \hat{z}_i - \hat{z}_i(t_k) \right|^{\frac{2+\omega}{r_i}} + \\ & L (\tilde{c}_2 + g_{3,2}(l_2)) |z_1 - z_1(t_k)|^{2+\omega} \end{aligned} \quad (39)$$

其中,  $g_{4,i}(l_i) = h_i(l_i) - g_{2,i}(l_i), i=2, \dots, n; \bar{g}_{4,i}(\cdot) = \hat{g}_{1,i}(\cdot) +$

$\bar{g}_{2,i}(\cdot) + \bar{g}_{3,i}(\cdot), i=2, \dots, n-1; \tilde{c}_{4,n} = \hat{c}_{2,n} - c_3 - \bar{c}_{4,n} - 1/8;$   
 $\tilde{c}_{4,i} = \tilde{c}_{2,i} - \bar{c}_{4,i} - 1/8, i=2, \dots, n-1。$

根据以上分析, 存在  $l_2, \dots, l_n$  和  $\bar{c}_4 > 0$ , 使得

$$\begin{aligned} \dot{U} & \leq -L \left( \sum_{i=1}^n |\xi_i|^{2+\omega} + \sum_{i=2}^n \left[ \varepsilon_i \right]^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \right) + \bar{c}_4 L \times \\ & \left( \sum_{i=2}^n \left| \hat{z}_i - \hat{z}_i(t_k) \right|^{\frac{2+\omega}{r_i}} + |z_1 - z_1(t_k)|^{2+\omega} \right) + \\ & c_4 L \left| \hat{\xi}_n - \hat{\xi}_n(t_k) \right|^{2+\omega} \end{aligned} \quad (40)$$

下面对式 (40) 中的各项进行处理。首先, 定义向量  $[z_1, \dots, z_n, \hat{\eta}_2, \dots, \hat{\eta}_n]^T$  及其扩张  $\tilde{\Delta} = [r_1, \dots, r_n, r_1, \dots, r_{n-1}]^T$ , 由定义 1 得  $U$  的齐次度为 2。因此, 根据引理 6, 如下不等式成立

$$\tilde{\rho} U^{\frac{2+\omega}{2}} \leq \sum_{i=1}^n |\xi_i|^{2+\omega} + \sum_{i=2}^n \left[ \varepsilon_i \right]^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \leq \bar{\rho} U^{\frac{2+\omega}{2}} \quad (41)$$

其中,  $\tilde{\rho}$  和  $\bar{\rho}$  均为正常数。

进一步, 利用式 (19), (22), (28), (41), 以及引理 1 和引理 2, 可以得到

$$\begin{aligned} & c_4 L \left| \hat{\xi}_n - \hat{\xi}_n(t_k) \right|^{2+\omega} \leq L \tilde{c}_{4,1} (|z_1 - z_1(t_k)| + \\ & \sum_{i=2}^n \left| \hat{z}_i \right|^{\frac{1}{r_i}} - \left| \hat{z}_i(t_k) \right|^{\frac{1}{r_i}})^{2+\omega} \leq \\ & \frac{1}{16} \tilde{\rho} L U^{\frac{2+\omega}{2}} + \tilde{c}_4 L \left( \sum_{i=2}^n \left| \hat{z}_i - \hat{z}_i(t_k) \right|^{\frac{2+\omega}{r_i}} + \right. \\ & \left. |z_1 - z_1(t_k)|^{2+\omega} \right) \end{aligned} \quad (42)$$

其中,  $\tilde{c}_{4,1}$  和  $\tilde{c}_4$  均为正常数。

将式 (42) 代入式 (40), 可得如下  $U$  关于系统 (9) 的导数

$$\begin{aligned} \dot{U}|_{(9)} & \leq -\frac{15}{16} \tilde{\rho} L U^{\frac{2+\omega}{2}} + \hat{c}_4 L \left( \sum_{i=2}^n \left| \hat{z}_i - \hat{z}_i(t_k) \right|^{\frac{2+\omega}{r_i}} + \right. \\ & \left. |z_1 - z_1(t_k)|^{2+\omega} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial U}{\partial z_i} \bar{\psi}_i(\cdot) + \\ & L \frac{\partial U}{\partial z_n} (v(t-\theta) - v(t)) \end{aligned} \quad (43)$$

其中  $\hat{c}_4 = \bar{c}_4 + \tilde{c}_4$ 。

**注 4.** 如何根据式 (43) 确定最大允许采样周期和最大允许输入时滞是本文的主要难点之一。对于满足如下线性增长条件的非线性系统

$$|\psi_i(\cdot)| \leq c(x_1(t) + \cdots + x_i(t)), i=1, \cdots, n \quad (44)$$

文献提供了最大允许输入时滞的确定方法, 文献提供了最大允许采样周期的确定方法然而, 对于满足假设 1 的非线性系统, 系统中的低阶非线性项导致上述文献中的方法不再适用。为此, 本文将利用齐次系统理论和 Gronwall-Bellman 不等式, 给出最大允许采样周期和最大允许输入时滞的确定方法。

由于  $\frac{\partial U}{\partial z_i}$  和  $\bar{\psi}_i(\cdot)$  的齐次度分别为  $2-r_i$  和  $r_{i+1}$ , 根据式 (10) 和引理 6, 得

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial U}{\partial z_i} \bar{\psi}_i(\cdot) \leq \sum_{i=1}^n c_{5,i} L^{\frac{1-\frac{1}{2}\omega}{r_i}} \quad (45)$$

其中,  $c_{5,i}, i=1, \cdots, n$  为正常数。

选择  $L$  满足  $\sum_{i=1}^n c_{5,i} L^{\frac{1}{r_i}} \leq \frac{1}{8} \bar{\rho}$ , 由式 (45) 可得

$\sum_{i=1}^n \frac{\partial U}{\partial z_i} \bar{\psi}_i(\cdot) \leq \frac{L}{8} \bar{\rho} U^{\frac{2+\omega}{2}}$ 。由于  $|\hat{\eta}_i - \hat{\eta}_i(t_k)| \leq \int_{t_k}^t |\dot{\hat{\eta}}_i(s)| ds$ ,  $i=2, \cdots, n$ , 利用定义 1、引理 4、引理 6 和式 (21), 可以得到

$$\begin{aligned} |\hat{\eta}_i - \hat{\eta}_i(t_k)| &\leq c_{6,i} \int_{t_k}^t \left( \sum_{j=2}^n |\hat{\eta}_j(s)|^{\frac{2}{r_{j-1}}} + \right. \\ &\quad \left. \sum_{j=2}^n |\hat{\eta}_j(t_k)|^{\frac{2}{r_{j-1}}} + |z_1(t_k)|^{\frac{2}{r_1}} \right)^{\frac{r_i}{2}} ds \leq \\ &\quad \int_{t_k}^t \left( \bar{c}_{6,i} \sum_{j=2}^n |\hat{\eta}_j(s) - \hat{\eta}_j(t_k)|^{\frac{r_i}{r_{j-1}}} + \pi_i \right) ds \end{aligned} \quad (46)$$

其中,  $c_{6,i}$  为正常数,  $\bar{c}_{6,i} = 2^{\frac{r_i}{r_{n-1} - \frac{r_i}{2}}} c_{6,i}$ ,  $\pi_i =$

$$c_{6,i} \sum_{j=2}^n \left( 2^{\frac{2-r_{j-1}}{r_{j-1}}} + 1 \right)^{\frac{r_i}{2}} |\hat{\eta}_j(t_k)|^{\frac{r_i}{r_{j-1}}} + |z_1(t_k)|^{\frac{r_i}{r_1}}。$$

结合式 (46) 和引理 7, 如下不等式成立

$$\begin{aligned} |\hat{\eta}_i - \hat{\eta}_i(t_k)| &\leq T^{\frac{2-r_i}{2}} \left( n^{\frac{2-r_i}{r_i}} \times \right. \\ &\quad \left. \int_{t_k}^t \left( \bar{c}_{6,i} \sum_{j=2}^n |\hat{\eta}_j(s) - \hat{\eta}_j(t_k)|^{\frac{2}{r_{j-1}}} + \pi_i^{\frac{2}{r_i}} \right) ds \right)^{\frac{r_i}{2}} \end{aligned} \quad (47)$$

由于  $\frac{r_i}{r_{i-1}} \in (0, 1)$ , 根据式 (47), 可得

$$\begin{aligned} \sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i - \hat{\eta}_i(t_k)|^{\frac{2}{r_{i-1}}} &\leq \sigma(T) \times \\ &\quad \int_{t_k}^t \left( \sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i(s) - \hat{\eta}_i(t_k)|^{\frac{2}{r_{i-1}}} \right) ds + \Pi \end{aligned} \quad (48)$$

$$\text{其中, } \Pi = \sum_{i=2}^n T^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} n^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} \left( T \pi_i^{\frac{r_i}{r_{i-1}}} + 1 \right), \sigma(T) = \sum_{i=2}^n T^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} n^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} \bar{c}_{6,i}^{\frac{r_i}{r_{i-1}}}。$$

根据式 (48), 由 Gronwall-Bellman 不等式计算可得

$$\sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i - \hat{\eta}_i(t_k)|^{\frac{2}{r_{i-1}}} \leq \Pi e^{T\sigma(T)} \quad (49)$$

进一步, 由  $\pi_i$  的定义可知

$$\begin{aligned} \pi_i^{\frac{2}{r_i}} &\leq c_{6,i}^{\frac{2}{r_i}} n^{\frac{2-r_i}{r_i}} \left( |z_1(t_k)|^{\frac{2}{r_1}} + \sum_{j=2}^n \left( 2^{\frac{2-r_{j-1}}{r_{j-1}}} + 1 \right) \times \right. \\ &\quad \left. |\hat{\eta}_j(t_k)|^{\frac{2}{r_{j-1}}} \right) \leq \tilde{c}_{6,i} U(t_k) \end{aligned} \quad (50)$$

其中,  $\tilde{c}_{6,i}$  为正常数。

因此, 结合式 (48) 和式 (50), 可以得到

$$\Pi \leq \sigma_1(T) U(t_k) + \Pi_1(T) \quad (51)$$

其中,

$$\begin{aligned} \sigma_1(T) &= \sum_{i=2}^n T^{\frac{2-\omega}{r_{i-1}}} n^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} \tilde{c}_{6,i} \\ \Pi_1(T) &= \sum_{i=2}^n T^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} n^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} \end{aligned}$$

将式 (51) 代入式 (49), 可得

$$\begin{aligned} \sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i - \hat{\eta}_i(t_k)|^{\frac{2}{r_{i-1}}} &\leq \\ \sigma_1(T) e^{T\sigma(T)} U(t_k) &+ \Pi_1(T) e^{T\sigma(T)} \end{aligned} \quad (52)$$

根据以上分析, 如下不等式成立

$$\sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i - \hat{\eta}_i(t_k)|^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \leq \sigma_2(T) U^{\frac{2+\omega}{2}}(t_k) + \Pi_2(T) \quad (53)$$

其中

$$\begin{aligned} \sigma_2(T) &= n^{-\frac{\omega}{2}} \sigma_1^{\frac{2+\omega}{2}}(T) e^{\frac{(2+\omega)T\sigma(T)}{2}} \\ \Pi_2(T) &= n^{-\frac{\omega}{2}} \Pi_1^{\frac{2+\omega}{2}}(T) e^{\frac{(2+\omega)T\sigma(T)}{2}} \end{aligned}$$

定义  $U_{\max}(t) = \max_{\tau \in [k_i, t]} U(\tau)$ , 根据式 (9), 存在正

常数  $c_6$ , 使得

$$\left| z_1 - z_1(t_k) \right|^{2+\omega} = \left| \int_{t_k}^t \dot{z}_1(s) ds \right|^{2+\omega} \leq c_6 T^{2+\omega} U_{\max}^{\frac{(1+\omega)(2+\omega)}{2}}(t) \quad (54)$$

由引理 2 和式 (21), (53), (54), 存在正常数  $\bar{c}_6$ , 使得

$$\sum_{i=2}^n \left| \hat{z}_i - \hat{z}_i(t_k) \right|^{\frac{2+\omega}{r_i}} + \left| z_1 - z_1(t_k) \right|^{2+\omega} \leq \bar{c}_6 \left( \sum_{i=2}^n \left| \hat{\eta}_i - \hat{\eta}_i(t_k) \right|^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} + \left| z_1 - z_1(t_k) \right|^{2+\omega} \right) \leq \bar{\sigma}_2(T) U^{\frac{2+\omega}{2}}(t_k) + \bar{\Pi}_2(T) + \tilde{c}_6 T^{2+\omega} U_{\max}^{\frac{1+(2+\omega)}{2}}(t) \quad (55)$$

其中,  $\tilde{c}_6 = c_6 \bar{c}_6$ ,  $\bar{\sigma}_2(T) = \bar{c}_6 \sigma_2(T)$ ,  $\bar{\Pi}_2(T) = \bar{c}_6 \Pi_2(T)$ 。因此, 式 (43) 可以写为

$$\begin{aligned} \dot{U}|_{(9)} \leq & -\frac{13}{16} \tilde{\rho} L U^{\frac{2+\omega}{2}} + L \tilde{\sigma}_2(T) U^{\frac{2+\omega}{2}}(t_k) + \\ & L \hat{c}_6 T^{2+\omega} U_{\max}^{\frac{(1+\omega)(2+\omega)}{2}}(t) + L \tilde{\Pi}_2(T) + \\ & L \frac{\partial U}{\partial z_n} (v(t-\theta) - v(t)) \end{aligned} \quad (56)$$

其中,  $\hat{c}_6 = \hat{c}_4 \tilde{c}_6$ ,  $\tilde{\sigma}_2(T) = \hat{c}_4 \bar{\sigma}_2(T)$ ,  $\tilde{\Pi}_2(T) = \hat{c}_4 \bar{\Pi}_2(T)$ 。下面估计式 (56) 中的最后一项。首先, 根据引理 1、引理 2、引理 6, 以及式 (21), (22), (42), 可得

$$\begin{aligned} L \frac{\partial U}{\partial z_n} (v(t-\theta) - v(t)) \leq & \frac{1}{16} \tilde{\rho} L (U^{\frac{2+\omega}{2}} + \\ & U^{\frac{2+\omega}{2}}(t_k)) + \bar{c}_7 L \left( \left| z_1(t_k) - z_1(t_k - \theta) \right|^{2+\omega} + \right. \\ & \left. \sum_{i=2}^n \left| \hat{\eta}_i(t_k) - \hat{\eta}_i(t_k - \theta) \right|^{\frac{2+\omega}{r_{i-1}}} \right) \end{aligned} \quad (57)$$

其中,  $\bar{c}_7$  为正常数。此外, 对于  $i=2, \dots, n$  以及  $t_1 \in [t_k - \theta, t_k)$ , 如下不等式成立

$$\begin{aligned} \left| \hat{\eta}_i(t_1) - \hat{\eta}_i(t_k - \theta) \right| \leq & c_{7,i} \int_{t_k - \theta}^{t_1} \left( \sum_{j=2}^n \left| \hat{\eta}_j(s) \right|^{\frac{2}{r_{j-1}}} + \right. \\ & \left. \sum_{j=2}^n \left| \hat{\eta}_j(t_k) \right|^{\frac{2}{r_{j-1}}} + \left| z_1(t_k) \right|^{\frac{2}{r_1}} \right)^{\frac{r_i}{2}} ds \leq \\ & \int_{t_k}^{t_1} \left( \bar{c}_{7,i} \sum_{j=2}^n \left| \hat{\eta}_j(s) - \hat{\eta}_j(t_k - \theta) \right|^{\frac{r_i}{r_{j-1}}} + \bar{\pi}_i \right) ds \end{aligned} \quad (58)$$

其中,  $c_{7,i}$ , 为正常数且

$$\begin{aligned} \bar{c}_{7,i} = & 2^{\frac{r_i}{n-1} - \frac{r_i}{2}} c_{7,i} \\ \bar{\pi}_i = & c_{7,i} \left( \sum_{j=2}^n 2^{\frac{r_i(2-r_{j-1})}{2r_{j-1}}} \left| \hat{\eta}_j(t_k - \theta) \right|^{\frac{r_i}{r_{j-1}}} + \right. \\ & \left. \left| z_1(t_k) \right|^{\frac{r_i}{r_1}} + \sum_{j=2}^n \left| \hat{\eta}_j(t_k) \right|^{\frac{r_i}{r_{j-1}}} \right) \end{aligned}$$

类似于式 (47) 中的分析方法, 可以得到

$$\begin{aligned} \left| \hat{\eta}_i(t_1) - \hat{\eta}_i(t_k - \theta) \right| \leq & \theta^{\frac{2-r_i}{2}} \left( n^{\frac{2-r_i}{r_i}} \int_{t_k - \theta}^{t_1} \left( \bar{\pi}_i^{\frac{2}{r_i}} + \right. \right. \\ & \left. \left. \bar{c}_{7,i}^{\frac{2}{r_i}} \sum_{j=2}^n \left| \hat{\eta}_j(s) - \hat{\eta}_j(t_k - \theta) \right|^{\frac{2}{r_{j-1}}} \right) ds \right)^{\frac{r_i}{2}} \end{aligned} \quad (59)$$

进一步, 利用式 (59), 计算可得

$$\begin{aligned} \sum_{j=2}^n \left| \hat{\eta}_j(t_1) - \hat{\eta}_j(t_k - \theta) \right|^{\frac{2}{r_{j-1}}} \leq & \bar{\sigma}(\theta) \times \\ & \int_{t_k - \theta}^{t_1} \left( \sum_{i=2}^n \left| \hat{\eta}_i(s) - \hat{\eta}_i(t_k - \theta) \right|^{\frac{2}{r_{i-1}}} \right) ds + \bar{\Pi} \end{aligned} \quad (60)$$

其中,

$$\begin{aligned} \bar{\Pi} = & \sum_{i=2}^n \theta^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} n^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} \left( \theta \bar{\pi}_i^{\frac{r_i}{r_i}} + 1 \right) \\ \bar{\sigma}(\theta) = & \sum_{i=2}^n \theta^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} n^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} \frac{2}{\bar{c}_{7,i}^{\frac{r_i}{r_i}}} \end{aligned}$$

根据式 (60) 和 Gronwall-Bellman 不等式, 可得

$$\sum_{i=2}^n \left| \hat{\eta}_i(t_1) - \hat{\eta}_i(t_k - \theta) \right|^{\frac{2}{r_{i-1}}} \leq \bar{\Pi} e^{\theta \bar{\sigma}(\theta)} \quad (61)$$

由引理 2, 存在正常数  $\tilde{c}_{7,i}$ , 使得

$$\begin{aligned} \bar{\pi}_i^{\frac{2}{r_i}} \leq & \tilde{c}_{7,i} \left( \sum_{j=2}^n \left| \hat{\eta}_j(t_1) \right|^{\frac{2}{r_{j-1}}} + \sum_{j=2}^n \left| \hat{\eta}_j(t_k) \right|^{\frac{2}{r_{j-1}}} + \right. \\ & \left. \sum_{j=2}^n \left| \hat{\eta}_j(t_1) - \hat{\eta}_j(t_k - \theta) \right|^{\frac{2}{r_{j-1}}} + \left| z_1(t_k) \right|^{\frac{2}{r_1}} \right) \end{aligned} \quad (62)$$

因此, 结合式 (61) 和式 (62), 可得

$$\begin{aligned} \sum_{i=2}^n \left| \hat{\eta}_i(t_1) - \hat{\eta}_i(t_k - \theta) \right|^{\frac{2}{r_{i-1}}} \leq \\ e^{\theta \bar{\sigma}(\theta)} \left( \sum_{i=2}^n \theta^{\frac{2-\omega}{r_{i-1}}} n^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} \bar{\pi}_i^{\frac{r_i}{r_i}} + \sum_{i=2}^n \theta^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} n^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} \right) \leq \end{aligned}$$



$$\sigma_3(\theta) \left( \sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i(t_1) - \hat{\eta}_i(t_k - \theta)|^{\frac{2}{r_{i-1}}} + |z_1(t_k)|^{\frac{2}{r_1}} + \sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i(t_k)|^{\frac{2}{r_{i-1}}} + \sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i(t_1)|^{\frac{2}{r_{i-1}}} \right) + \Pi_3(\theta) \quad (63)$$

其中

$$\Pi_3(\theta) = e^{\theta \bar{\sigma}(\theta)} \sum_{i=2}^n \theta^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} n^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} \tilde{c}_{7,i}$$

$$\sigma_3(\theta) = e^{\theta \bar{\sigma}(\theta)} \sum_{i=2}^n \theta^{\frac{2-\omega}{r_{i-1}}} n^{\frac{2-r_i}{r_{i-1}}} \tilde{c}_{7,i}$$

根据式(63), 当输入时滞满足  $1 - \sigma_3(\theta) > 0$  时, 如下不等式成立

$$\sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i(t_1) - \hat{\eta}_i(t_k - \theta)|^{\frac{2}{r_{i-1}}} \leq \frac{\sigma_3(\theta)}{1 - \sigma_3(\theta)} \left( |z_1(t_k)|^{\frac{2}{r_1}} + \sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i(t_1)|^{\frac{2}{r_{i-1}}} + \sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i(t_k)|^{\frac{2}{r_{i-1}}} \right) + \frac{\Pi_3(\theta)}{1 - \sigma_3(\theta)} \quad (64)$$

进一步, 由引理 6 可得

$$\sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i(t_k)|^{\frac{2}{r_{i-1}}} + |z_1(t_k)|^{\frac{2}{r_1}} \leq \tilde{c}_7 U(t_k) \quad (65)$$

其中,  $\tilde{c}_7$  为正常数。

注意到  $\hat{\eta}_i(t_k)$  的连续性, 由式(64)可知

$$\sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i(t_k) - \hat{\eta}_i(t_k - \theta)|^{\frac{2}{r_{i-1}}} \leq \bar{\sigma}_3(\theta) U(t_k) + \bar{\Pi}_3(\theta) \quad (66)$$

$$\text{其中, } \bar{\sigma}_3(\theta) = \frac{2\tilde{c}_2\sigma_3(\theta)}{1 - \sigma_3(\theta)}, \bar{\Pi}_3(\theta) = \frac{\Pi_3(\theta)}{1 - \sigma_3(\theta)}.$$

根据以上分析, 可以得到

$$\bar{c}_7 L \sum_{i=2}^n |\hat{\eta}_i(t_k) - \hat{\eta}_i(t_k - \theta)|^{\frac{2}{r_{i-1}}} \leq L \tilde{\sigma}_3(\theta) U^{\frac{2+\omega}{2}}(t_k) + L \tilde{\Pi}_3(\theta) \quad (67)$$

$$\text{其中, } \tilde{\sigma}_3(\theta) = \bar{c}_7 \eta^{\frac{\omega}{2}} \bar{\sigma}_3^{\frac{2+\omega}{2}}(\theta), \tilde{\Pi}_3(\theta) = \bar{c}_7 n^{\frac{\omega}{2}} \bar{\Pi}_3^{\frac{2+\omega}{2}}(\theta).$$

进一步, 利用引理 2, 可得

$$|z_1(t_k) - z_1(t_k - \theta)|^{2+\omega} \leq 2^{1+\omega} \left( |z_1 - z_1(t_k)|^{2+\omega} + |z_1 - z_1(t_k - \theta)|^{2+\omega} \right) \quad (68)$$

根据引理 7, 存在正常数  $\bar{c}_7$ , 使得

$$|z_1 - z_1(t_k - \theta)|^{2+\omega} \leq \bar{c}_7 (T + \theta)^{1+\omega} \times \int_{t-T-\theta}^t \left( |z_2(s)| + |z_1(s)|^{r_2} \right)^{2+\omega} ds \quad (69)$$

因此, 结合式(54), (68), (69), 可得

$$\bar{c}_7 L |z_1(t_k) - z_1(t_k - \theta)|^{2+\omega} \leq \hat{c}_7 L (T^{2+\omega} U_{\max}^{\frac{(1+\omega)(2+\omega)}{2}}(t) + (T + \theta)^{1+\omega} \times \int_{t-T-\theta}^t \left( |z_2(s)| + |z_1(s)|^{r_2} \right)^{2+\omega} ds) \quad (70)$$

其中,  $\hat{c}_7 = \max \{ 2^{1+\omega} \bar{c}_6 \bar{c}_7, 2^{1+\omega} \bar{c}_7 \bar{c}_7 \}$ 。

根据式(57), (67), (70), 可以将式(56)写为

$$\dot{U}|_{(9)} \leq -\frac{3}{4} \tilde{\rho} L U^{\frac{2+\omega}{2}} + L \Lambda_1(T, \theta) U^{\frac{2+\alpha}{2}}(t_k) + \tilde{c}_7 L T^{2+\omega} U_{\max}^{(1+\omega)(2+\omega)} 2(t) + L \Lambda_2(T, \theta) + \tilde{c}_7 L (T + \theta)^{1+\omega} \times \int_{t-T-\theta}^t \left( |z_2(s)| + |z_1(s)|^{r_2} \right)^{2+\omega} ds \quad (71)$$

其中,  $\tilde{c}_7 = \hat{c}_6 + \hat{c}_7, \Lambda_1(T, \theta) = \bar{\sigma}_2(T) + \bar{\sigma}_3(\theta) + \frac{1}{16} \tilde{\rho}$ ,

$$\Lambda_2(T, \theta) = \tilde{\Pi}_2(T) + \tilde{\Pi}_3(\theta).$$

选择  $V = U + U_1$ , 其中,  $U_1 = 2\hat{c}_\tau L (T + \theta)^{1+\omega} \times \int_{t-T-\theta}^t \int_s^t \left( |z_2(\tau)| + |z_1(\tau)|^{r_2} \right)^{2+\omega} d\tau ds$ 。根据式(71), 如下不等式成立

$$\dot{V}|_{(9)} \leq -\frac{3}{4} \tilde{\rho} L U^{\frac{2+\omega}{2}} + L \Lambda_1(T, \theta) V^{\frac{2+\omega}{2}}(t_k) + L \Lambda_3(T, \theta) V_{\max}^{\frac{(1+\omega)(2+\omega)}{2}}(t) + L \Lambda_2(T, \theta) - \hat{c}_7 L (T + \theta)^{1+\omega} \times \int_{t-T-\theta}^t \left( |z_2(s)| + |z_1(s)|^{r_2} \right)^{2+\omega} ds \quad (72)$$

其中,  $\Lambda_3(T, \theta) = \tilde{c}_7 T^{2+\omega} + c_8 (T + \theta)^{2+\omega}$ ,  $c_8$  为正常数。

**注 5.** 对于满足线性增长条件的非线性系统, 文献给出了闭环系统稳定性的分析方法。然而, 根据式(72)可知,  $U^{\frac{2+\omega}{2}}, V^{\frac{2+\omega}{2}}(t_k), V_{\max}^{\frac{(1+\omega)(2+\omega)}{2}}(t)$  和积分项的存在使得上述文献中的方法不再适用为此, 第 2.4 节将基于式(72), 完成闭环系统的稳定性分析。

## 2.4 稳定性分析

**定理 1.** 对于满足假设 1 的非线性系统(1), 存在最大允许采样周期  $T_m$  和最大允许输入时滞  $\theta_m$ ,

当  $T \in (0, T_m]$  和  $\theta \in [0, \theta_m]$  时, 控制器 (22) 能够保证闭环系统的所有信号一致最终有界。最大允许采样周期  $T_m$  和最大允许输入时滞  $\theta_m$  满足  $1 - \sigma_3(\theta_m) > 0$ ,  $\Lambda_1(T_m, \theta_m) \leq \frac{3}{16} \tilde{\rho}$ 。闭环系统状态  $x(t)$  的终端界为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t)\| \leq \max \{ \bar{\gamma}_2 \bar{\Lambda}_2(T, \theta), \bar{\gamma}_3 \bar{\Lambda}_3(T, \theta) \} \quad (73)$$

其中,  $\bar{\gamma}_2$  和  $\bar{\gamma}_3$  为正常数且

$$\begin{aligned} \bar{\Lambda}_2(\cdot) &= \gamma_2 \Lambda_2^{\frac{2}{2+\omega}}(\cdot) + \gamma_1 (T + \theta)^{-\frac{2}{\omega}} \\ \bar{\Lambda}_3(\cdot) &= \gamma_3 \Lambda_3^{\frac{2}{\omega(2+\omega)}}(\cdot) + \gamma_1 (T + \theta)^{-\frac{2}{\omega}} \end{aligned}$$

**证明.** 首先, 根据  $U_1$  的定义可得

$$\begin{aligned} -\hat{c}_7 L(T + \theta)^{1+\omega} \int_{t-T-\theta}^t |z_2(s)| + \\ |z_1(s)|^{r_2} \Big)^{2+\omega} ds \leq -\frac{1}{2(T+\theta)} U_1 \end{aligned} \quad (74)$$

假设存在集合  $\Omega_1$ , 对于集合  $\Omega_1$  外的状态, 如下不等式成立

$$\begin{aligned} -\hat{c}_7 L(T + \theta)^{1+\omega} \int_{t-T-\theta}^t |z_2(s)| + \\ |z_1(s)|^{r_2} \Big)^{2+\omega} ds \leq -\frac{3}{4} \tilde{\rho} L U_1^{\frac{2+\omega}{2}} \end{aligned} \quad (75)$$

根据式 (74) 和式 (75), 当如下条件满足时, 式 (75) 成立

$$-\frac{1}{2(T+\theta)} U_1 \leq -\frac{3}{4} \tilde{\rho} L U_1^{\frac{2+\omega}{2}} \quad (76)$$

因此, 由式 (76) 计算可得

$$U_1 \geq \left( \frac{3}{2} \tilde{\rho} L (T + \theta) \right)^{\frac{2}{\omega}} = \gamma_1 (T + \theta)^{-\frac{2}{\omega}} \quad (77)$$

其中,  $\gamma_1 = \left( \frac{3}{2} \tilde{\rho} L \right)^{\frac{2}{\omega}}$ 。

根据以上分析, 集合  $\Omega_1$  可定义为

$$\Omega_1 = \left\{ x \mid U_1 \leq \gamma_1 (T + \theta)^{-\frac{2}{\omega}} \right\} \quad (78)$$

此外, 由于  $V^{\frac{2+\omega}{2}} = (U + U_1)^{\frac{2+\omega}{2}} \leq U^{\frac{2+\omega}{2}} + U_1^{\frac{2+\omega}{2}}$ , 如下不等式成立

$$\dot{V}|_{(9)} \leq -\frac{3}{4} \tilde{\rho} L V^{\frac{2+\omega}{2}} + L \Lambda_3(T, \theta) V_{\max}^{\frac{(1+\omega)(2+\omega)}{2}}(t) +$$

$$L \Lambda_1(T, \theta) V^{\frac{2+\omega}{2}}(t_k) + L \Lambda_2(T, \theta) \quad (79)$$

进一步, 定义集合  $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ , 其中

$$\begin{aligned} \Omega_2 = \left\{ x \mid V \leq \max \left\{ \gamma_2 \Lambda_2^{\frac{2}{2+\omega}}(\cdot), \gamma_3 \Lambda_3^{\frac{2}{\omega(2+\omega)}}(\cdot) \right\} \right\} \\ \gamma_2 = \left( \frac{8}{\tilde{\rho}} \right)^{\frac{2}{2+\omega}}, \gamma_3 = \left( \frac{8}{\tilde{\rho}} \right)^{\frac{2}{\omega(2+\omega)}} \end{aligned} \quad (80)$$

根据式 (80), 可知

$$\Lambda_2(T, \theta) \leq \frac{1}{8} \tilde{\rho} V^{\frac{2+\omega}{2}} \quad (81)$$

以及

$$\Lambda_3(T, \theta) V_{\max}^{\frac{(1+\omega)(2+\omega)}{2}}(t) \leq \frac{1}{8} \tilde{\rho} V_{\max}^{\frac{2+\omega}{2}}(t) \quad (82)$$

结合式 (79), (81), (82) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}|_{(9)} \leq -\frac{5}{8} \tilde{\rho} L V^{\frac{2+\omega}{2}} + \frac{1}{8} \tilde{\rho} L V_{\max}^{\frac{2+\omega}{2}}(t) + \\ L \Lambda_1(T, \theta) V^{\frac{2+\omega}{2}}(t_k) \end{aligned} \quad (83)$$

下面证明, 当系统状态在集合  $\Omega$  外且满足  $\Lambda_1(T, \theta) \leq \frac{3}{16} \tilde{\rho}$  时,  $V_{\max}(t) = V(t_k), \forall t \in [t_k, t_k + T)$ 。首先, 假设存在  $t' \in [t_k, t_k + T)$  使得  $V(t') > V(t_k)$ , 根据式 (83) 可知  $\dot{V}(t_k) < 0, \forall x(t_k) = 0$ 。因此, 存在  $t'' \in [t_k, t')$ , 使得

$$\begin{cases} \dot{V}(t'') > 0, V(t'') = V(t_k) \\ V(t) \leq V(t_k), \forall t \in [t_k, t''] \end{cases} \quad (84)$$

然而, 由式 (83) 可得  $\dot{V}(t'') < 0, \forall x(t) \neq 0$ , 这与  $\dot{V}(t'') > 0$  矛盾, 从而证得  $V_{\max}(t) = V(t_k), \forall t \in [t_k, t_k + T)$ 。

根据以上分析, 式 (83) 可以写为

$$\dot{V}|_{(9)} \leq -2\hat{\rho} L V^{\frac{2+\omega}{2}} + \hat{\rho} L V^{\frac{2+\omega}{2}}(t_k) \quad (85)$$

其中,  $\hat{\rho} = \frac{5}{16} \tilde{\rho}$ 。对于任意的  $t \in [t_k, t_k + T)$ , 考虑以下两种情形:

$$V > \left( \frac{3}{4} \right)^{\frac{2}{2+\omega}} V(t_k) \quad (86a)$$

$$V \leq \left( \frac{3}{4} \right)^{\frac{2}{2+\omega}} V(t_k) \quad (86b)$$

由于  $\dot{V}(t_k) < 0$ , 当式 (86a) 的条件满足时, 如下不

等式成立

$$\dot{V}|_{(9)} \leq -\frac{2}{3} \bar{\rho} L V^{\frac{2+\omega}{2}} \quad (87)$$

由式(87)可得, 存在  $\bar{\rho} \in (0, 1)$  使得  $V(t_{k+1}) \leq \bar{\rho} V(t_k)$ 。因此, 当  $k \rightarrow +\infty$  时, 闭环系统的所有状态都收敛到集合  $\Omega$  内。此外, 根据  $U$  的定义, 闭环系统状态  $x(t)$  的终端界可以表示为式(73)中的形式。最后, 根据  $\sigma_3(\theta)$  和  $\Lambda_1(T, \theta)$  的定义, 存在  $T_m$  和  $\theta_m$ , 当  $T \in (0, T_m]$  和  $\theta \in [0, \theta_m]$  时, 上述结果成立。□

**注 6.** 根据定理 1, 闭环系统状态的终端界与采样周期和输入时滞有关, 当采样周期相同时, 输入时滞越大, 闭环系统状态的终端界也越大。

**注 7.** 本文方法能够推广到同时含有输入时滞和状态时滞的非线性系统。假设系统(1)的非线性函数为  $\psi_i(t, x(t), x(t-d))$ ,  $i=1, \dots, n$  且满足如下条件

$$|\psi_i(\cdot)| \leq c \sum_{j=1}^i \left( |x_j(t)|^{\frac{r_{i+1}}{r_j}} + |x_j(t-d_j)|^{\frac{r_{i+1}}{r_j}} \right) \quad (88)$$

其中,  $x(t-d) = [x_1(t-d_1), \dots, x_n(t-d_n)]^T$ ,  $d_i > 0$ ,  $i=1, \dots, n$  表示状态时滞, 利用式(8)中的坐标变换引入可调增益  $L$ , 并考虑如下 Lyapunov-Krasovskii 泛函

$$W = V + c_9 \sum_{i=1}^n \int_{t-d_i}^t |z_i(s)|^{\frac{2+\omega}{r_i}} ds \quad (89)$$

其中,  $c_9$  为正常数。通过调整  $L$  的值, 控制器(22)能够保证闭环系统的所有信号一致最终有界。

### 3 仿真

#### 3.1 数值仿真

考虑如下具有输入时滞的非线性系统

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) + 0.5 \cos(x_1(t)) [x_1(t)]^{\frac{1}{13}} \\ \dot{x}_2(t) &= u(t-\theta) + 0.2 [x_1(t)]^{\frac{9}{13}} + 0.3 [x_2(t)]^{\frac{9}{11}} \\ y(t) &= x_1(t) \end{aligned} \quad (90)$$

根据定理 1 设计无记忆输出反馈控制器并选择仿真参数  $L=2$ ,  $T=0.02$ ,  $\alpha_1=2.5$ ,  $\alpha_2=6$ ,  $l_2=10$ , 仿真结

果如图 1~5 所示。图 1~3 为开环系统的状态响应和闭环系统在不同输入时滞下的状态响应。其中, 在输入时滞  $\theta=0.02$  时,  $\sup|x_1|=0.0117$ ,  $\sup|x_2|=0.2764$ , 在输入时滞  $\theta=0.04$  时,  $\sup|x_1|=0.3007$ ,  $\sup|x_2|=4.1575$ 。根据仿真可以看出, 所设计的控制器能够保证闭环系统的所有状态一致最终有界。此外, 在采样周期相同的条件下。输入时滞越大, 闭环系统状态的终端界也越大。另一方面, 针对含有输入时滞的非线性系统, 文献设计了无记忆线性反馈控制器, 当系统中含有低

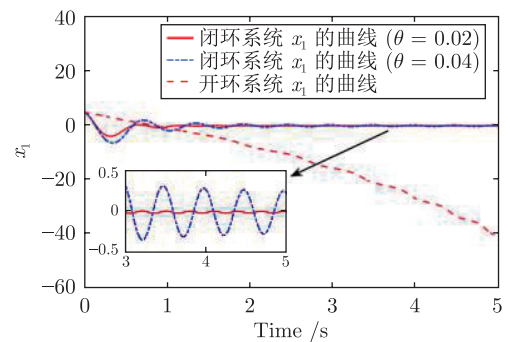


图 1 系统(90)中状态  $x_1$  的曲线

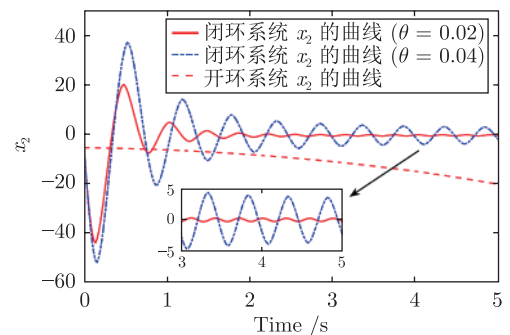


图 2 系统(90)中状态的曲线

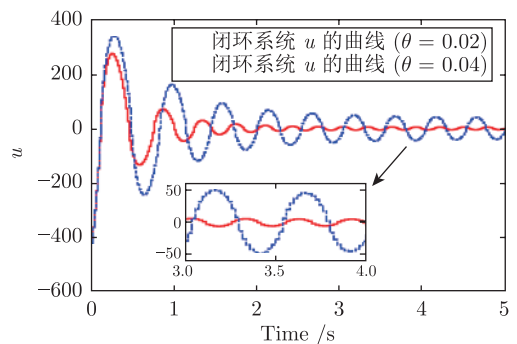


图 3 系统(90)中控制输入  $u$  的曲线

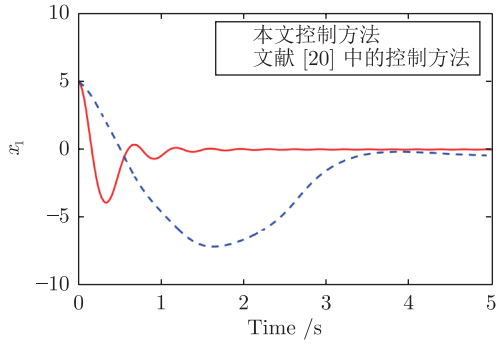


图4 系统 (90) 中状态  $x_1$  在不同控制方法下的曲线

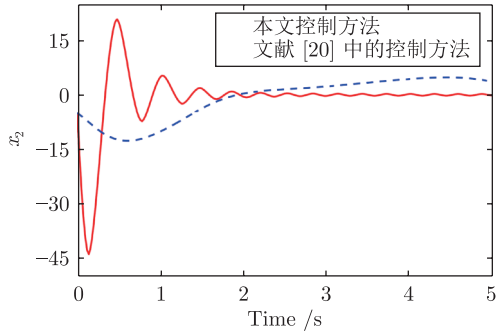


图5 系统 (90) 中状态  $x_2$  在不同控制方法下的曲线

阶非线性项时, 控制器的控制性能会变差。为进一步突出本文结果与现有文献的区别, 用本文方法与文献中的方法分别设计控制器, 在输入时滞  $\theta = 0.02$  的条件下进行仿真对比, 仿真结果如图4和图5所示。图4为两种控制方法所得到的闭环系统状态  $x_1$  的响应曲线, 图5为两种控制方法所得到的闭环系统状态  $x_2$  的响应曲线。从图4和图5可以看出, 对于输入时滞相同的控制系统, 本文设计的控制器能够获得更好的控制性能。

### 3.2 实例仿真

考虑如下质量一弹簧机械系统

$$m\ddot{y} + F_f + F_{sd} = F_\theta \quad (91)$$

其中,  $F_f$  为摩擦阻力,  $F_{sd}$  为弹簧的恢复力  $m$  为质量,  $F_\theta$  为外部施加的力。选择状态变量  $x_1 = y, x_2 = \dot{y}$ ,  $u(t-\theta) = F_\theta, F_{sd} = [x_1(t-d)]^{\frac{5}{7}}, F_f = [x_2]^{\frac{5}{6}}, d$  为状态时滞,  $\theta$  为输入时滞。当选择  $m=1$  时, 系统 (91) 可以写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = u(t-\theta) - [x_2]^{\frac{5}{6}} - [x_1(t-d)]^{\frac{5}{7}} \end{cases} \quad (92)$$

通过构造 Lyapunov-Krasovskii 泛函抵消状态时滞的影响, 然后选择仿真参数  $L=2.5, T=0.02$ ,  $\alpha_1=2.2, \alpha_2=6, l_2=13$ , 仿真结果如图6~10所示。图6~8为开环系统的状态响应和闭环系统在不同输入时滞下的状态响应。其中, 在输入时滞  $\theta=0.02$  时,  $\sup|x_1|=0.0131, \sup|x_2|=0.3861$ , 在输入时滞  $\theta=0.04$  时,  $\sup|x_1|=0.2641, \sup|x_2|=4.7915$ 。根据仿真可以看出,

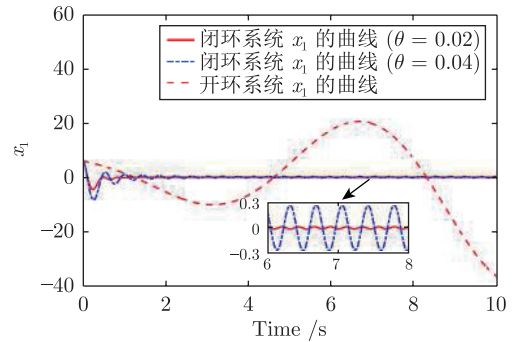


图6 系统 (92) 中状态  $x_1$  的曲线

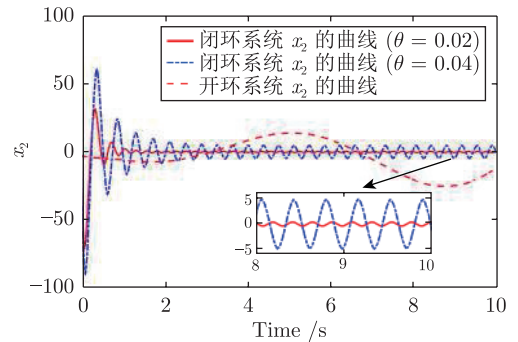


图7 系统 (92) 中状态  $x_2$  的曲线

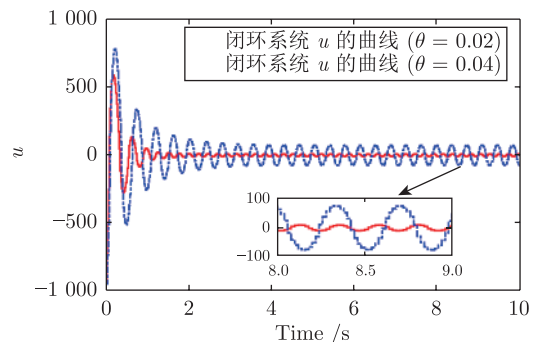


图8 系统 (92) 中控制输入  $u$  的曲线



所设计的控制器能够保证闭环系统的所有状态一致最终有界。此外,在采样周期相同的条件下,输入时滞

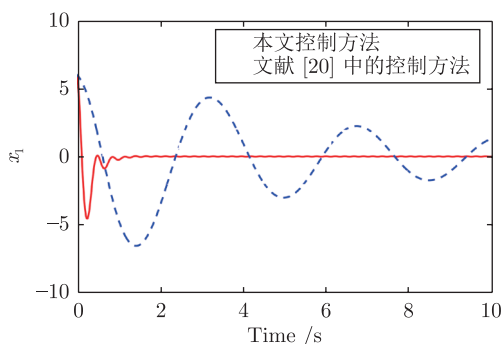


图9 系统(92)中状态 $x_1$ 在不同控制方法下的曲线

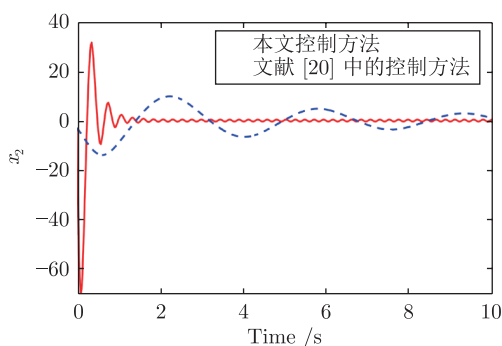


图10 系统(92)中状态 $x_2$ 在不同控制方法下的曲线

越大,闭环系统状态的终端界也越大。用本文方法与文献中的方法分别设计控制器,在输入时滞 $\theta=0.02$ 的条件下进行仿真对比。仿真结果如图9和图10所示。图9为两种控制方法所得到的闭环系统状态 $x_1$ 的响应曲线,图10为两种控制方法所得到的闭环系统状态 $x_2$ 的响应曲线。从图9和图10可以看出。对于输入时滞相同的控制系统,本文设计的控制器能够获得更好的控制性能。

## 4 结束语

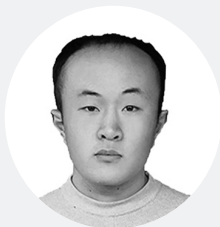
针对一类含有输入时滞和低阶非线性项的非线性系统,研究了系统在齐次增长条件下无记忆输出反馈采样控制器的设计方法。为了解决不可量测状态带来的困难,利用系统输出在采样时刻的信息构造了降维观测器。根据齐次系统理论和 Gronwall-Bellman 不等式,给出了闭环系统稳定的条件,保证了闭环系统的所有状态一致最终有界。最后,仿真结果验证了本文所提控制方法的有效性。

## 作者简介



**马倩** 南京理工大学自动化学院教授,主要研究方向为时滞系统、多智能体系统和非线性系统的分析与控制。本文通信作者。

E-mail: qianmashine@gmail.com



**盛兆明** 南京理工大学自动化学院博士研究生,主要研究方向为非线性系统的分析与控制。

E-mail: kzzxtmcszm@163.com



**徐胜元** 南京理工大学自动化学院教授,主要研究方向为广义系统、时滞系统和非线性系统的分析与控制。

E-mail: syxu@njust.edu.cn

# 生成式 AI 的大模型提示工程：方法、现状与展望

文 / 黄峻 林飞 杨静 王兴霞 倪清桦 王雨桐 田永林 李娟娟 王飞跃

**摘要：**大语言模型和视觉语言模型在各领域的应用中展示出巨大潜力，成为研究热点。然而，幻觉、知识迁移、与人类意图对齐等问题仍然影响着大模型的性能。首先，探讨了提示工程与对齐技术基本原理，提出基于提示优化、专家反馈机制及实时调整机制的引导概念，提升了大语言模型在跨领域应用中的性能；其次，深入分析提示工程的核心技术，如多步推理处理复杂任务的原理；然后，针对各领域的实际应用，讨论提示工程的发展现状；最后，总结提示工程面临的挑战并展望其未来发展方向。提示工程在理论与应用方面的发展，为提升大模型在实际应用中的性能提供了全面的解决方案。

## 0 引言

从 20 世纪 50 年代发展至今，自然语言处理（nature language processing, NLP）已从解决文本翻译任务扩展至解决多模态复杂任务。大语言模型（large language models, LLMs）经历了从早期用于计算词语出现概率和统计关系的统计语言模型（statistical language models, SLMs），到捕捉词语语义关系的神经语言模型（neural language models, NLMs）的发展，其机器翻译和文本处理等 NLP 能力显著提高。随着 Transformer 架构的引入，预训练语言模型（pre-trained language models, PLMs），如 OpenAI 的 GPT 和 Google 的 BERT，通过在大规

模文本数据上进行预训练，彻底改变了 NLP 的研究和应用。2020 年开始，LLMs（如 GPT-3 和 LLAMA）通过更大规模的预训练数据和模型参数，使 PLMs 突现更强的生成和理解能力，进一步推动了从 PLMs 到 LLMs 的发展。

视觉 - 语言模型（vision-language models, VLMs）结合图像和文本数据，提升生成式 AI（generative AI, GenAI）对复杂场景的理解和生成能力。早期的 VLMs 大多采用单独训练的图像模型（如卷积神经网络）和文本模型（如递归神经网络），在特征层进行融合，这种方法虽然能够处理简单图像标注及文本生成任务，但在复杂场景下能力有限。随着 Transformer 架构的引入，VLMs 被扩展至复杂多模

态融合任务。Flamingo 结合视觉和语言输入生成高质量的文本描述；CLIP（contrastive language-image pre-training）对比学习大量图像和文本对，通过自然语言描述高效地检索和分类图像，在多模态理解中表现出强大能力；DALL-E 不仅能够根据文本描述生成高质量的图像，还能够理解和创造复杂的多模态内容。随着 GenAI 技术的发展，这些大模型在创意内容生成、自动化编写和复杂任务处理方面展现出前所未有的能力。

然而，幻觉问题和知识迁移问题严重影响了大模型在下游任务中的性能。现有研究通过微调技术来解决以上问题，该过程通常包括数据选择、超参数调整、训练和优化（如 Dropout、正

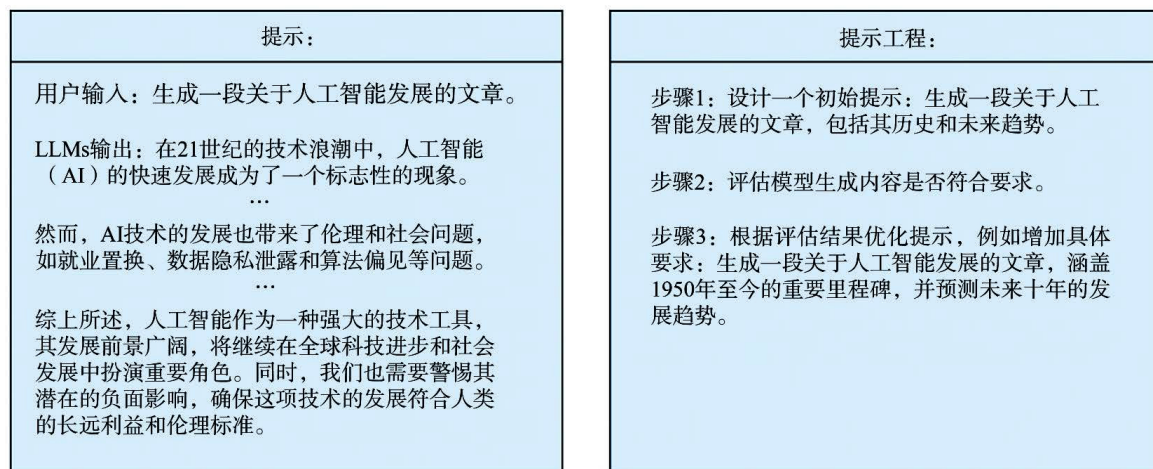


图1 提示与提示工程示例

则化、交叉验证等), 能够提高 LLMs 生成内容的准确性。但是庞大的模型的微调需要消耗大量的计算资源和时间, 此外, 过拟合也可能导致模型在通用任务上表现较差。如何解决大量数据的标记耗费大量资源、调整模型参数复杂度高的问题, 已成为提升传统机器学习模型和预训练模型扩展性的关键。为解决以上问题并提升大模型性能, 提示工程成为了一个研究热点。图1展示了提示和提示工程的一个示例。

提示工程和大模型同时出现, 能够在不通过任何梯度更新或调整模型核心参数的情况下, 通过精心设计的少量示例或零示例来适应新任务, 如手动创建的自然语言指令、自动生成的自然语言指令或向量表示, 通过提供与任务相关的上下文指令来提高模型的任务适应性和通用性。最初 OpenAI 使用自然语言作为提

示来测试 GPT-2 的翻译功能, 随着大模型技术与提示工程的发展, 提示逐渐扩展为图片、音频等数据。提示作为人类与大模型交互时的输入, 能够指导大模型生成符合任务要求的输出结果。LLMs 和 VLMs 的3类主要应用如图2所示, 其中, 多模态-文本生成模型(如 LLAMA, Flamingo), 通常以自然语言及图片作为输入, 生成文本描述; 图像-文本匹配模型(如 CLIP), 通常用于匹配文本与相应图片; 文本-图像生成模型(如 DALL-E), 通常以自然语言作为输入, 生成相应图片。在自然语言处理中, 提示可以是一段描述性文字, 用来引导 LLMs 回答问题、生成文本或执行其他任务; 在图像生成任务中, VLMs 可以根据用户文本描述生成对应的图像。这种方法减少了大规模数据的标注需求, 仅通过提供与任务相关的上下文和指令

来引导模型输出, 提升了 LLMs 和 VLMs 在多种任务中的适应性, 并有效解决了 GenAI 的幻觉问题。

此外, 对齐作为 LLMs 调优的另一关键技术, 与提示工程密切相关且相辅相成, 两者共同作用, 能够显著提升模型的可靠性和安全性。对齐技术使模型的输出符合人类的期望、价值观和社会规范, 避免生成有害或有偏见的信息。为有效结合提示工程与对齐技术, 本文提出引导(pre-scriptive)概念, 旨在提升大模型在跨领域应用中的性能, 首先通过优化提示寻找有效提示方案, 然后通过专家反馈机制帮助识别和修正模型在任务执行中的不足之处, 确保输出的准确性和一致性, 最后在模型运行过程中, 根据实际情况实时调整提示。

提示工程现有的综述性文章涉及多个领域, White 等介绍提示工程在自动化软件开发任务

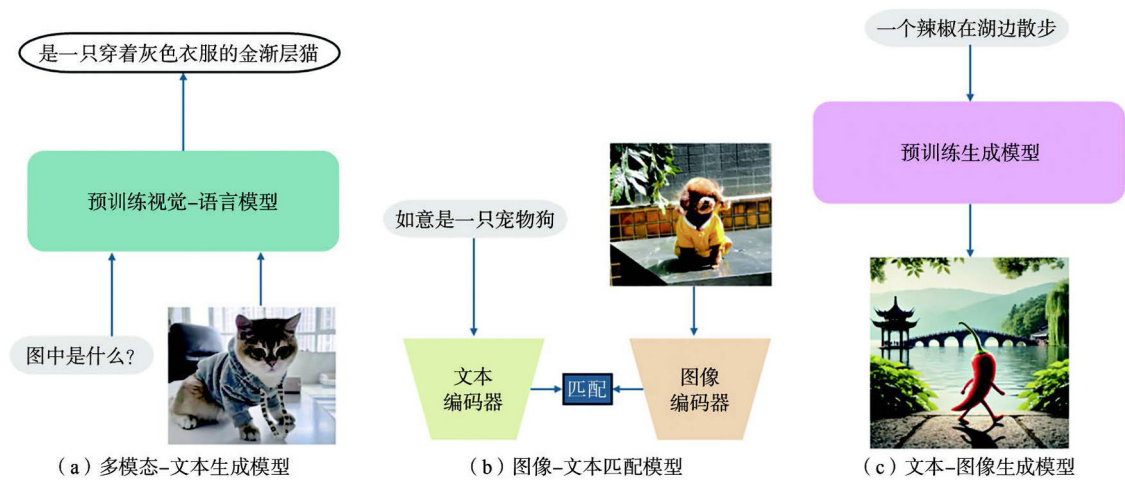


图2 LLMs 和 VLMs 的 3 类应用

中的应用，并构建自动化提示模式框架，介绍 16 种应用于改进 LLMs 对话-回复方法的模式，并展示如何将不同模式应用于不同领域。Zhou 等分析了自动和手动提示生成与选择的方法，提出了自动提示工程师（automatic prompt engineer, APE）算法，用于自动生成和选择最优的提示。APE 算法将提示生成视为程序合成问题，利用预训练的大型语言模型生成候选提示，并通过迭代蒙特卡洛搜索方法优化提示选择，显著提高了模型在任务中的性能。Liu 等讨论了提示工程的演变、分类以及其在不同领域的应用。Gu 等专注研究 VLMs 中的提示工程，探讨了提示工程在多模态-文本生成模型、图像-文本匹配模型和文本-图像生成模型中的应用。Schulhoff 等建立了 58 种文本提示技术分类法，介绍了包含图像、音频、视频在内的多模态提

示技术，还涵盖了提示工程技术（如自动提示（AutoPrompt）生成、提示优化等）的实际应用案例。尽管以上综述对提示工程或对齐技术的概念和方法进行了深入探讨，但缺少对两种技术在大模型中的作用机制的综合性分析。本文旨在分析提示工程与对齐技术的核心概念，并提出引导框架，为科研人员提供构建、评估和执行提示工程的有效方法，从而提升大模型在多种任务中的性能。

本文结构如下：第 1 节介绍提示工程基本概念与优化方法、外部/内部对齐技术方法及引导概念；第 2 节梳理零样本/少样本提示、逐步思考与推理、提示自动生成与优化以及检索增强提示等提示工程核心技术；第 3 节探讨提示工程在自然语言处理、视觉与多模态任务、推理与决策等多模态任务中的实际应用；第 4 节总结提示工程面临的挑战并展望

未来，以推动研究者对这一领域的进一步探索。

## 1 提示工程基础

### 1.1 基本概念与优化方法

提示工程是一类通过设计和优化输入提示语，来引导和约束大模型输出的方法，无须调整模型参数。其核心在于通过精心设计的提示，一方面使模型更准确地理解用户需求，另一方面使得模型更加适配任务，从而生成符合预期的内容。提示工程可以分为硬提示和软提示：硬提示通常是自然语言预定义文本或模板，适用于静态任务；软提示是在提示微调过程中生成的嵌入向量，适用于动态任务。根据交互方式，提示可以分为在线提示和离线提示，前者用于实时交互，后者用于批量处理。此外，提示工程还根据应用领域分为信息检索、文本生成、翻译、情感分析、编程



与代码生成、对话、特定任务和自定义应用等,优化和定制提示可以提升大模型在各类任务中的效果和适应性。

在手动提示构建过程中,提示优化的技巧包括:明确问题、提供上下文、示例导向、逐步引导和限定范围等。明确问题是通过清晰、具体的问题描述,使模型准确理解任务,例如将“解释一下人工智能”改为“用简明的语言解释一下什么是人工智能,尽量控制在两到三句话以内”,这样便于模型生成简洁明了的回答。提供上下文是为模型提供必要的背景信息,模型可根据更丰富的上下文理解和生成内容,例如将“写一封给客户的道歉信”改为“客户因产品配送延误而不满。请写一封道歉信,内容应包括对延误的解释、诚恳的道歉以及补救措施”,这样生成的道歉信会更加贴近实际需求。示例导向是通过提供示例或模板指导模型生成类似风格或结构的输出,例如将“编一个笑话”改为“编一个关于程序员的笑话。例如:‘为什么程序员喜欢早起?因为他们需要打代码!’”,通过具体的示例引导模型生成类似风格的笑话。逐步引导是将复杂任务分解为一系列简单的步骤,每一步都有明确的提示和预期输出,例如思维链(chain-of-thought, CoT)技术有助于模型逐步生成复杂的解

决方案,例如将“解释如何做一个蛋糕”改为“请按以下步骤解释如何做一个巧克力蛋糕:(1)准备材料;(2)混合干湿材料;(3)烘烤;(4)装饰”,使得模型的解释更加清晰、易懂。限定范围是通过明确限制模型生成内容的范围和风格控制模型的输出,例如将“写一篇关于环境保护的文章”改为“写一篇关于减少塑料使用的环境保护文章,字数控制在300字以内”,这样生成的内容会更加具体。这些方法被广泛应用于问答系统、内容生成、对话系统等自然语言处理任务中,是大语言模型应用的一种重要技巧。提示工程通过这些方法显著提升了大语言模型在各类任务中的表现。

自动化提示优化的主要技术包括:元提示(meta-prompting),通过设计提示来优化或生成其他提示,从而提升提示工程的整体效果;自动提示,使用包含触发词的提示模板进行反向传播更新;自动提示工程师,生成并迭代优化零样本指令提示;无梯度指令提示搜索(instructional prompt search, GriPS),通过删除、添加、交换和改写创建提示变体;文本梯度提示优化(prompt optimization with textual gradients, ProTeGi),通过批评和贪婪算法多步骤改进提示;基于对话的策略梯度离散提示优化(dialogue-

comprised policy-gradient-based discrete prompt optimization, DP2O),结合强化学习和对话构建提示。这些方法通过生成和改进提示模板显著提高了提示的质量和模型的任务完成能力。

## 1.2 大模型中提示工程、对齐、引导的作用机制

大模型存在以下问题:首先,不良内容的问题尚未得到充分解决,尽管训练数据量显著增加,但其中的偏见、有害内容和隐私问题仍然存在,未对齐的大模型可能生成带有性别、社会、文化和种族偏见的内容,甚至会涉及隐私泄露;其次,大模型还倾向于生成不真实甚至虚构的内容,包括错误、幻觉和不一致性,这些问题不仅影响了大模型在一般领域的可信度,也限制了它们在医学和法律等专业领域的应用;此外,大模型还可能被用于虚假信息传播、网络攻击,甚至生成致命武器等非法用途,可能对社会产生负面影响。

针对以上问题,提示工程在大模型中通过提供与任务相关的上下文信息、控制输出格式、约束生成内容、提升任务适应性、错误识别与修正以及改进交互方式,提升大模型的任务适配性。用户按需设计提示时,可以向模型提供明确的任务指令和格式要求,确保生成内容的准确性和一

致性。同时，提示工程可以通过设置约束条件来限制模型生成的内容范围，减少错误信息的产生。此外，通过少样本学习或零样本，提示工程提高了模型在多任务环境中的适应性，使其能够快速应对新任务。提示工程还可以通过特定提示引导模型进行自我检查和验证，减少错误生成。最终，通过优化人与模型的交互方式，提示工程提升了用户体验和模型响应效率，为用户提供了一种灵活有效的方法，使模型能够在不调整核心参数的情况下处理多样化的任务需求。

指令微调作为提升大模型性能的另一技术，在实际应用中与提示工程存在一定的差别。指令微调通过调整模型的权重，使其能够更好地满足特定的数据集和任务需求，从而确保数据治理效果和减少 LLM 响应错误。指令微调能够更深入地优化模型以满足特定需求和上下文，在实际应用中能够达到较高的准确性和可靠性。使用这两种技术，可以在特定应用场景中更有效地利用 LLMs，确保模型输出既符合预期，又具备高可靠性和安全性。

对齐使得大模型的行为和输出符合人类用户的期望、价值观和安全规范，其目标是减少或消除模型生成有害、不准确或误导性信息的风险，提升其在实际应用中的可靠性和安全性。AI 对齐可以追溯到 AI 革命的初期，当时的目标是创建能够像人类一样思考和行动的机器，并确保这些机器的行为与人类的最佳利益保持一致。Wiener 强调了机器目标与人类意图一致性的重要性，即“在拥有足够的数据之前需要确保机器的目的符合我们的期望，否则在机器启动后便难以干涉”。2014 年，Russell 提出了“价值对齐问题”，强调了构建与人类价值观一致的智能系统的必要性，旨在构建“以人为本”的智能而非纯粹的智能。

尽管 AI 对齐的概念早已存在，但近几十年里鲜有对其的研究。随着大语言模型的崛起以及 AI 能力的大幅提升，对齐问题的重要性和紧迫性也随之增加。对齐技术分为外部对齐和内部对齐，用于解决 LLMs 在不同层面上的对齐问题，如图 3 所示。其中，外部

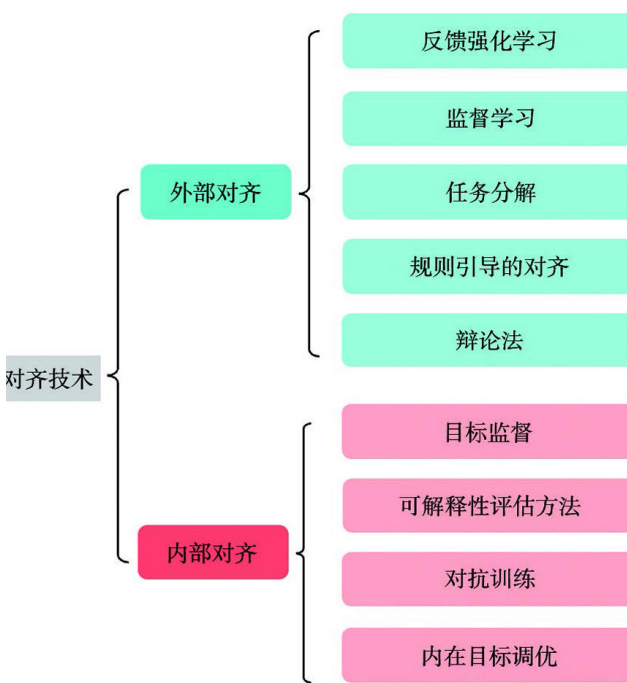


图 3 外部对齐与内部对齐技术

对齐关注的是模型的训练目标与人类的价值观的一致性，主要涉及如何将复杂和多样的人类价值观转化为模型的优化目标。而内部对齐关注的是在模型的实际优化过程中，模型内部推导或优化的目标与设计者的初始目标的一致性，防止模型在处理未见过的情况时表现出不可预测或不符合预期的行为。总之，外部对齐确保模型目标的设定符合人类价值，内部对齐确保模型在实现这些目标时的推理过程和决策操作与设计者的初始目标一致，两者共同保障模型的可靠性和安全性。

外部对齐常用的方法包括人类反馈强化学习（reinforcement learning from human feedback, RLHF）、监督学习、任务分解、规则引导的对齐、辩论法。其中，RLHF 根据人类反馈调整模型的行为，通过奖励和惩罚机制使模型的输出更加符合人类的期望和价值观。监督学习通过使用大量标注数据训练模型，使模型在特定任务上表现出色，减少生成不良内容的可能性。任务分解将复杂任务分解为更小的子任务，并对每个子任务进行单独优化，确保整体目标的

实现。规则引导的对齐通过明确模型在生成内容时需要遵守的准则和限制，从而引导模型行为。辩论法通过多个模型的辩论确定最符合人类价值观的输出。外部对齐通过这些方法确保模型行为的伦理性和社会责任感。

内部对齐常用的方法包括目标监督、可解释性方法、对抗训练和内在目标调优。目标监督通过在训练过程中加入额外的目标函数来约束模型的内部行为，使其更符合预期的目标。可解释性方法用于评估 LLMs，特别是在部署之前检查模型的对齐效果，识别不对齐或错误的输出，并说明产生这些输出的原因。此外，可解释性评估指标可作为优化 AI 对齐的奖励函数，激励 AI 系统保持目标透明，避免欺骗性对齐。除了检查模型架构的透明度外，可解释性方法还可以在训练过程中提高模型的透明度，使研究人员能够理解和监控 AI 系统在训练

过程中的动态变化。对抗训练利用对抗样本训练模型，使模型在面对潜在的对抗攻击时仍能对齐目标，提高了模型的鲁棒性。内在目标调优通过调整模型的内在目标提升模型的内部一致性和可靠性。

在提示工程和对齐技术的基础上，本文提出了引导大模型生成的概念，首先，基于数据、模型、技术、结构的优化方法优化提示，目的是提高模型对任务需求的理解和响应能力，确保其输出的质量和一致性。其次，在对齐阶段，提示工程基于专家反馈机制，通过持续的专业评估和反馈进一步优化模型的输出。这一阶段，专家通过数据集评估确保训练数据的全面性和代表性，通过训练方法评估优化模型的学习策略，通过模型评估监测和提升模型的整体性能，通过领域知识整合确保模型在特定领域的专业性和适用性。最后，通过动态优

化和在线学习的方法辅助大模型提升其在下游任务中的性能。动态优化根据实时反馈调整模型，提高了模型对不同任务的适应能力；在线学习使模型能够不断吸收新的数据和知识，持续优化其性能。综上所述，引导不仅可以优化模型的输出，还能通过不断的自我检查和验证减少错误信息的生成，为模型提供了一种灵活且高效的方法，提升了模型在多种应用领域中的准确性和可靠性，提示工程 - 对齐 - 引导框架如图 4 所示。

## 2 提示工程的前沿技术

本节讨论提示工程的前沿技术，包括零样本与少样本提示、逐步思考与推理、自动提示工程以及检索增强提示，如图 5 所示。

### 2.1 无训练提示

提示工程通过优化提示内容来提升 LLMs、VLMs 的性能，零样本提示和少样本提示作为无

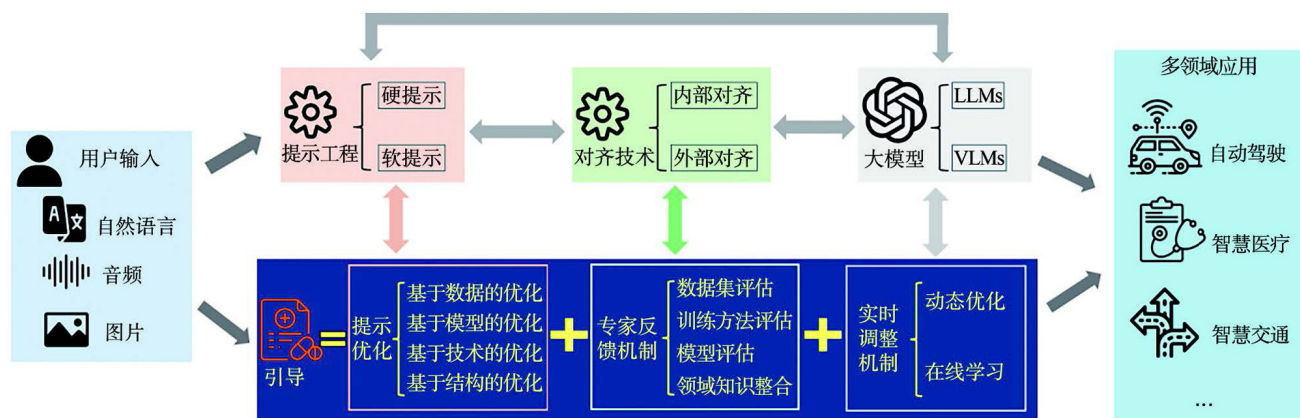


图4 提示工程 - 对齐 - 引导框架



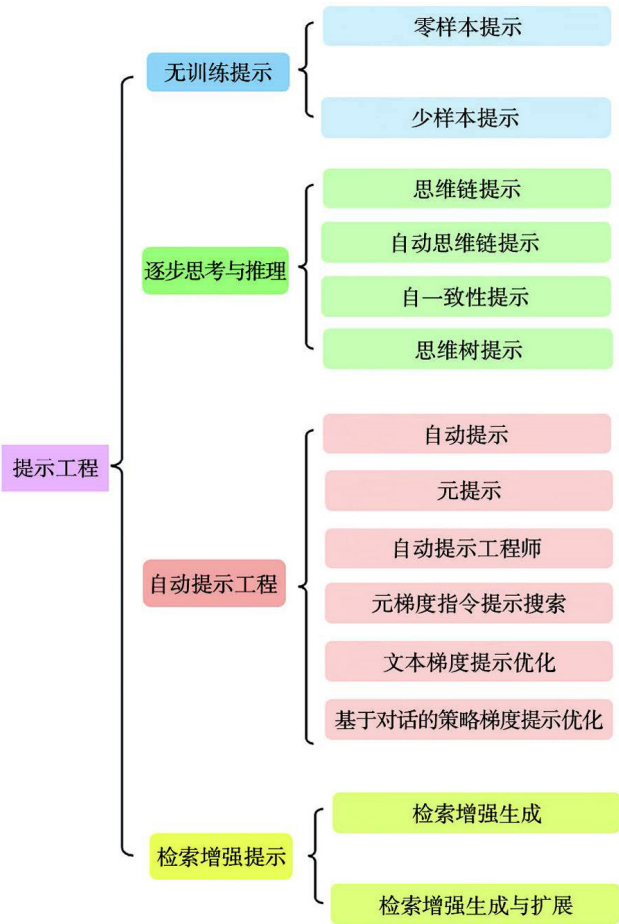


图5 提示工程的前沿技术

训练提示中的两种关键技术，使模型能够在没有示例或仅有少量示例的情况下，准确地理解和执行任务。零样本提示依赖于模型的预训练知识，通过提供明确的任务指令使模型能够直接生成相应的输出。而少样本提示则通过提供少量相关示例，引导模型更好地掌握任务的细节和要求。

(1) 零样本提示

零样本提示不提供任何示例，直接向预训练的LLMs提供任务指令或问题，使其利用在预训练过程中学到的广泛知识生成答案或执行任务。这种方法依赖于模型在预训练过程中积累的语言知识和语义理解能力。零样本提示的有效性取决于模型训练数据的范围和质量，以及模型对语言和概念的理解程度。例如，要求模型进行情感分类，只需提示“将文本分类为积

极、中立或消极”，模型就会给出相应的分类。

在处理用户个性化需求任务方面，角色提示为GenAI分配一个特定的角色，使其在开放任务中生成更贴切情景以及更符合预期的输出，比如提示其扮演“历史学家”或“乔布斯”等；风格提示通过指定所需的风格、语气或体裁，使GenAI的输出更专注于内容的表现形式，并保证生成的内容满足用户个性化的风格要求；情感提示通过加入具有心理暗示的短语引导模型生成人性化的回应，同时给予用户适当的心理暗示，例如为大模型提出“这件事对于我的职业规划很重要”。

在优化生成结果一致性与准确性方面，Wilf等提出SimToM方法，用于在回答多元问题时消除不相干信息的影响，确保答案基于准确的事实，保证GenAI在处理多实体问题时的一致性和准确性；Weston等提出的S2A方法、Deng等提出的RaR方法以及Xu等提出的RE2方法为GenAI提供重写提示，从而去除与问题无关的信息，并将精简后的新提示传递给模型以获取最终响应，使模型更专注于核心问题，适用于复杂问题的处理；此外，Press等提出的自问自答方法通过提示大模型决定是否为给定提示生成后续问题，LLMs自己提出并回答问题，从而解决最初的问题，这一过程使模型能够全面地理解复杂问题。

这些零样本提示方法通过不同的策略优化提示内容，显著提升了LLMs在各种任务中的性能和准确性。这些技术不仅拓宽了模型的应用范围，还为应对复杂任务提供了有效的解决方案。

(2) 少样本提示

少样本提示在零样本提示的基础上，通过提供少量的任务示例进一步优化模型的性能。Kaplan等提出当模型足够大时，它能够从少量示例或文本指令中学习并执行新的任务，这种特性被称为少样本学习。少样本提示利用上下文学习（in-context learning, ICL）帮助模型更好地理解任务要求和模式，从而生成更准确的答案或执行更有效的任务。目前，上下文



学习已经在自然语言理解、数据生成和推理等各种下游任务中取得良好效果。值得注意的是,少样本学习是一种更广泛的机器学习范式,通过少量示例调整参数,而少样本提示特定于 GenAI 设置中的提示,并不涉及更新模型参数。对于少样本提示,模型性能很大程度上受到给定示例的影响,且其输入长度受限,因此,示例的选择及其排列顺序显得尤为重要,必须考虑示例的数量、顺序、标签分布、标签质量、模板格式和相似性等6个因素。对于示例的数量,一些研究表明增加提示中的样本数量能够提高模型的性能,特别是在较大的模型中,但是在某些情况下,当样本数量超过20个时,模型性能的提升可能会减少。对于示例的顺序,Lu等观察到在某些任务中示例顺序可能引起准确率从低于50%到高于90%的剧烈变化。另外,示例标签分布不均可能导致模型倾向于样本数量更多的标签类别。而对于标签质量对模型性能的影响,目前还没有一个统一的结论,要根据不同的情景具体分析。Min等认为标签的准确性对于模型输出内容的质量是无关紧要的,但Yoo等认为在某些设置下,错误的标签会对性能产生显著的负面影响。模型性能对于模板格式的选择也是敏感的。Jiang等表明使用训练数据中常见的格式能够使模型

达到更好的性能。最后,基于示例的相似度计算也能影响模型性能,权衡样本的多样性和相似性也是非常重要的。基于这些因素,K近邻、基于图的无监督选择性注释方法(Vote-K)、自生成ICL、提示挖掘、先过滤后搜索(filter-then-search, LENS)方法、统一演示检索器(unified demonstration retriever, UDR)、强化学习等技术被应用于为模型生成最佳示例。特别是,自生成ICL利用GenAI自动生成示例,其在训练数据不可获得的情况下的表现优于零样本场景,但在有监督场景中,生成的示例不如实际的示例有效。

## 2.2 逐步思考与推理

有大量提示工程研究集中在利用LLMs将复杂问题分解为更简单的子问题进行推理求解,这对于人类和GenAI都是一种有效的解决策略,因为明确地分解问题已被证实可以进一步提高LLMs的问题解决能力。本节针对算术、常识和符号等多步推理任务,对目前主流的逐步思考与推理提示技术进行了探讨。

### (1) 思维链提示

在面对复杂的逻辑推理任务时,LLMs常常表现不佳。为了突破这一限制,文献提出了思维链提示技术,旨在引导LLMs进行连贯、逐步的推理过程。文献的实验结果表明,相较于传统提

示方法,思维链提示更能激发LLMs产生结构化和深入思考的回答,在算术、常识和符号推理基准测试中取得了显著的性能提升,只需用8个CoT示例提示PaLM 540B模型即可在GSM8K数学推理基准测试集上达到最先进的准确率,超过了微调的GPT-3。

### (2) 自动思维链(Auto-CoT)提示

人工手动创建高质量的CoT示例既耗时又易出错。Zhang等引入了Auto-CoT,通过提示LLMs“逐步思考”来生成推理链。Auto-CoT对任务聚类,从每一簇中采样代表性问题,使用启发式规则的零样本CoT生成推理链,形成最终的示例集。多样性问题有效缓解了零样本CoT可能产生的错误,在10个公共基准推理数据集上的实验结果表明,使用GPT-3时Auto-CoT的性能始终与需要手动设计演示的CoT持平或优于CoT。

### (3) 自一致性提示

CoT提示的本质是采用一种贪心解码方法,在每个时间步选择概率最高的词作为输出。为了进一步提升推理性能,文献提出了自一致性解码策略。复杂问题通常被允许采用多种不同的思考方式来得到唯一正确的答案。基于这一思想,自一致性利用语言模型的解码器生成一组多样化的推理路径,每条推理路径可能导

致不同的最终答案，然后采用多数投票方法识别最终答案集中最一致的答案。在各种基准测试中，自一致性和思维链提示的结合显著提高了推理的准确性，相比于基线思维链提示，其在 GSM8K 测试准确率提高了 17.9%，在 SVAMP 上提高了 11.0%，在 AQuA 上提高了 12.2%，在 StrategyQA 上提高了 6.4%。

#### （4）思维树（tree-of-thoughts, ToT）提示

文献提出了思维树框架，以增强链式思维在需要探索和前瞻性推理的复杂任务中的提示能力。ToT 通过管理中间推理步骤（称为“思维”）的树结构扩展 CoT 提示，每种思维代表一个向最终解决方案推进的连贯语言序列，这种结构允许 LLMs 通过判断当前思维步骤向最终解决方案前进了多少以及它继续向前推进以达到目标的可能性进行推理。ToT 将模型生成和评估思维的能力与搜索算法（如广度优先搜索或深度优先搜索）结合，从而实现推理链的系统性探索，发现更有效的解决方案，并在解决方案错误时回溯。在 24 点游戏任务中，ToT 的成功率达到了 74%，而 CoT 仅为 4%。

### 2.3 自动提示工程

虽然人工构造的提示显著提升了大模型在通用任务上的性能，但在特定领域或处理复杂任务时，这种方法不仅易受到人类经验局限性和主观性的制约，还高度依赖耗时费力的试错过程。因此，如何通过自动化的方法实现提示的高效生成与优化，推动大模型在不同场景下的快速应用，具有一定的研究价值。

#### （1）自动提示（AutoPrompt）

基于梯度搜索方法，自动提示是一种使用包含触发词的提示模板对提示进行反向传播的更新算法。此算法自动生成的提示  $x_{\text{prompt}}$  的模板为：

$$x_{\text{prompt}} = \lambda(x_{\text{in}}, x_{\text{trig}}) = \{\text{输入}\} \\ [T][T][T][T][T][P] \quad (1)$$

其中， $x_{\text{inp}}$  为输入， $[T] \in x_{\text{trig}}$  为触发词， $[P]$  代表  $x_{\text{prompt}}$  的掩码， $\lambda$  是将  $x_{\text{inp}}$  映射到  $x_{\text{prompt}}$  的模版。因此，

对于给定的任务输入  $x_{\text{inp}}$ ，AutoPrompt 可以利用  $\lambda$  和梯度搜索方法得到优化后的提示  $x_{\text{prompt}}$ 。

#### （2）元提示

为了自动生成提示，Reynolds 等于 2021 年提出了元提示的概念，希望通过提示自动生成的方式提高大模型在特定任务上的工作效率和精度。其中，元提示可以是类似“这个问题要求（This problem asks us to）”或“把这个问题分成几个步骤来解决（Let’s solve this problem by splitting it into some steps）”的短语，通过对问题意图的陈述逐步解决问题。此外，元提示也可能采用填空模板的形式，这种形式限制了回答的方向，但允许大模型填充与特定问题相关的具体细节。为了解决元提示在复杂推理任务中存在的不足，Ye 等为元提示引入了 3 个额外的概念，分别是详细的任务描述、上下文规范和逐步推理。实验结果表明，相较于 CoT 中“逐步思考”的提示，改进后的元提示提高了复杂推理任务的精度。

#### （3）自动提示工程师

受到经典程序合成技术和人类提示工程方法的启发，Zhou 等提出了自动提示工程师方法，用于提示的自动生成与筛选。首先，将提示视为需要优化的“程序”，在大模型生成的指令候选集中寻找最大化特定评分函数的指令。然后，为了评估筛选得到的提示的有效性，在另一个大模型接收到该提示后，测试其在零样本情况下的表现。自动提示工程师最优提示筛选过程的数学模型为：

$$\rho^* = \arg \max_{\rho} f(\rho) = \arg \max_{\rho} E_{(Q,A)}[f(\rho, Q, A)] \quad (2)$$

其中， $\rho$  为提示， $\rho^*$  为筛选得到的最优提示， $D_{\text{train}} = \{(Q, A)\}$  为特定任务的输入 / 输出数据集， $f(\rho)$  和  $f(\rho, Q, A)$  分别为以  $\rho$  和  $(\rho, Q, A)$  为输入的打分函数， $E_{(Q,A)}$  为期望。

#### （4）无梯度指令提示搜索

现有基于梯度搜索优化提示的方法大幅增加了大模型的计算需求，带来了高昂的计算成本。此外，由

于无法直接访问模型的参数信息,一些仅可通过接口调用的大模型不能利用梯度搜索算法对提示进行优化。因此,Prasad 提出了一种无梯度的指令提示搜索算法 GrIPS,通过删除、添加、改写等操作来构建和优化提示。首先,对于某个初始提示,在每轮迭代中随机选取一种编辑操作,生成  $m$  个新的候选提示。这一过程表明每轮迭代一共产生了  $m \times 1$  个采样操作。然后,基于模型在测试集上的表现,对这些新生成的候选提示进行评分。若最优候选提示的评分超过当前基础提示的得分,则将其指定为下一轮迭代的基础提示,否则,继续使用当前的基础提示进行后续的搜索。在整个过程中,评分函数 Score 为:

$$\text{Score} = \text{BalancedAccuracy} + \alpha H,$$

$$H = \sum_{y \in Y} -p_y \log(p_y), p_y = \frac{1}{|S|} \sum_{i=1}^{|S|} 1(\hat{y}_i = y)$$

其中,  $S$  为评分集合,  $Y$  为任务的标签空间,  $y$  为某一任务的标签,  $\hat{y}_i$  是标签的预测结果,  $H$  表示熵,  $\alpha$  为缩放因子(通常取 10), BalancedAccuracy 的取值范围一般为。

#### (5) 文本梯度提示优化

借鉴基于文本的苏格拉底式对话中的梯度下降思想, Pryzant 等提出了 ProTeGi, 用大模型的反馈代替微分, 用大模型的编辑功能代替反向传播过程。首先, 采用训练数据的小批量子集生成自然语言描述的“梯度”, 即用小批量数据集指出当前提示存在的问题。然后, 在与梯度相反的语义方向上编辑当前提示。这些操作使得束搜索 (beam search) 可以在更大的提示空间中进行, 将候选节点的选择问题转化为最佳臂识别问题, 显著提升了算法的整体效率。实验结果表明, 相较于 APE 和 GRIPS, 基于 ProTeGi 的提示生成和优化的性能得到了提升。

#### (6) 基于对话的策略梯度离散提示优化

为了解决目前离散提示优化存在的高成本、低效率和强主观性等问题, Li 等提出了一种基于对话的离散提示优化方法 DP2O。该算法主要包含提示集构建

和提示匹配两个阶段。在提示集构建阶段, 该算法基于 GPT4 提出了一种基于多轮对话对齐策略的提示集生成方法, 并引入了一种新的提示质量评估方法——监督和无监督熵度量 (super-vised and unsuper-vised entropy metric, SUE)。因此, SUE 能够筛选具有线性复杂度的高质量提示。在提示匹配阶段, 该算法采用了一个强化学习框架, 然后利用策略网络选择合适的输入提示, 最后综合上述决策完成特定的下游任务。

### 2.4 检索增强提示

提示工程的核心任务是为大模型提供与任务相关的信息和引导, 以增强大模型针对特定任务的响应能力。但在对信息的专业性、隐私性及实时性要求较高的领域中, 依赖手动或自动设计的提示难以提供有效的上下文信息, 进而无法支撑大模型进行精准理解和决策。此外, 传统提示工程主要依赖预定义的提示模板和有限的上下文信息, 在处理复杂和多变的任务时, 其表现往往不尽如人意。

检索增强生成方法 (retrieval-augmented generation, RAG) 及其拓展方法 SAGE (search-augmented generation and extension) 为动态构建包含与查询相关的丰富上下文信息的提示提供了思路。SAGE 的核心原理如下: 首先, 通过查询分析构建主动的内容搜索机制, 实现对相关信息的挖掘和提取; 其次, 通过内 / 缓存系统的分层管理, 实现外部数据源和 LLMs 有限上下文窗口信息之间的高效交换; 然后, 针对多样的任务形式, 构建不同的提示模板, 包括但不限于检索增强思维、检索增强推理和检索增强行动等, 并将上下文信息融入提示中。

通过这种方法, SAGE 在提示工程中表现出显著的优势。首先, 基于搜索的主动信息挖掘机制能够为提示构建引入更丰富和相关的上下文信息, 显著提升了 LLMs 的上下文学习能力。其次, 借助内容的多级分层管理, SAGE 能够动态调整和优化提示, 在处理繁琐任务时, 依旧能保持提示构建过程的高效性。

此外, SAGE 的检索增强机制拓宽了提示工程的应用范围, 能够支持更广泛的类型任务, 提高了 LLMs 的通用性和灵活性。SAGE 的检索增强机制不仅提升了 LLMs 在不同应用场景下的性能, 也为智能体 (尤其是具身智能体的知识系统) 提供了强有力的支撑。

当前, 检索增强型提示已经在自然语言处理、图像视频分析以及多模态任务等通用任务中得到了广泛应用, 并在法律、医疗和自动驾驶等垂直类应用中崭露头角。

### 3 提示工程应用

基于第 2 节提示工程的前沿技术, 本节将系统介绍提示工程在自然语言处理、视频与多模态任务、推理与决策等领域的应用。

#### 3.1 自然语言处理

##### 3.1.1 文本生成与理解

近年来, 提示工程在文本生成与理解领域取得了显著进展, 特别是在结合预训练语言模型方面。精心设计复杂且多样化的提示, 可以显著提升生成文本的质量和连贯性。Reynolds 等提出的提示优化技术, 通过探索和优化不同提示的结构和内容, 使得生成的文本在语义一致性和逻辑连贯性上表现更加优异。通过动态提示调整, GPT-3 能够生成风格多样且内容丰富的新闻报道和创意故事。在文本理解领域, Peng

等开发了一种基于提示的机器阅读理解架构, 用于临床概念和关系的提取。该方法通过引入与语境相关的提示, 有效提升了问答系统的准确性和鲁棒性。这些研究表明, 提示工程在文本生成与理解中的应用, 提升了预训练语言模型的性能, 为新闻撰写、内容创作以及阅读理解等领域提供了新的思路。

##### 3.1.2 机器翻译与对话系统

提示工程通过引入上下文提示, 显著提高了翻译质量和对话生成的自然性与连贯性。Vaswani 等提出的 Transformer 模型利用注意力机制处理长句和复杂结构, 在多种语言序列之间实现高质量翻译。提示在专业术语和多义词的翻译中发挥着关键作用, 帮助模型准确理解原文语境, 从而生成精确的译文。在对话系统方面, 提示工程通过指导模型关注对话上下文, 提升了对话生成的连贯性和逻辑性。Zhang 等开发的 DialoGPT 模型基于大规模对话数据进行预训练, 并结合提示引导, 使生成的对话回复更加自然和流畅。这些研究成果表明, 提示工程在提升机器翻译准确性和对话系统连贯性方面, 具有较大的应用潜力和实际价值。

##### 3.1.3 情感分析与观点挖掘

在情感分析与观点挖掘领域, 提示工程通过精细设计的提示显著提高了模型对复杂文本的理解

和情感预测能力。使用 ChatGPT 和其他大型语言模型进行情感分析时, 可以通过设计针对性的提示来增强模型的情感识别准确性和适应性。例如, 研究人员利用 ChatGPT 对金融新闻头条进行情感分类, 通过提示工程优化模型性能, 这种方法在零样本学习环境中卓有成效。Zhang 等提出了利用 seq2seq-attention 结构获取输入序列语义信息的自适应提示架构, 提高了提示质量。Gu 等引入了自动生成的 CoT 技术, 显著提高了模型在情感分析中的透明度和可解释性。

#### 3.2 视觉与多模态任务

##### 3.2.1 图像描述与生成

针对图像描述与生成 (text-to-image, T2I) 任务, 提示工程已被证实是提高模型处理图像任务能力的关键技术, 被广泛应用于图像的生成、分类、编辑以及标题生成等任务。通过对提示语的巧妙设计, 例如在图像生成中利用提示词以及前后变换的图像对照示例, 模型能够进行图像的复杂转换。此外, 结合文本和图像的多模态提示, 不仅能够优化模型对连续问答过程的上下文理解, 还能增强其描述能力。多模态思维链等技术通过逐步指导提高了模型在处理图像问题的精确性和效率, 显著提升了模型的可操作性能。Li 等提出基于 LLMs 的场景生成模型 SeGPT, 用于生



成复杂且具有挑战性的自动驾驶场景。

### 3.2.2 视频 - 音频理解与生成

提示技术已成功扩展至视频领域,支持文本到视频(text-to-video, T2V)、文本到3D(text-to-3D, T2-3D)和文本到音频(text-to-audio, T2A)的生成。在文本到视频生成方面, Brooks 等和 Liang 等表明,多样化的文本提示可以驱动视频内容生成。在视频编辑任务中, Wu 等和 Cheng 等提出如何利用提示来有效地调整和优化视频内容。同时, Yousaf 等和 Mi 等的研究表明,视频到文本的转换可以借助精确的提示来提取视频关键信息并生成文本描述。此外, Kim 等提出的 IG-VLM 模型通过将采样帧组合并接到图像网格中来创建视频表示,再将图像网格与各种引导性提示一同输入 VLMs,从而提高模型对长视频的理解能力。Zhang 等提出的 LLoVi 模型采用一种语言引导视频理解的方法,首先使用字幕模型提取短期视频描述,然后通过 LLMs 总结这些描述并响应给定的提示。Wang 等提出的 VideoAgent 模型采用了一种基于 LLMs 的多帧搜索策略,该策略使得模型能够根据输入提示及先前的帧标题进行自我反省,并预测可能的答案,从而有效地探索下一帧内容。在戏

剧产业中,倪清桦等提出平行戏剧框架,通过构建戏剧大模型、搭建计算实验平台来模拟和优化戏剧制作流程,对剧本创作、舞美设计、演出安排及市场营销等环节实施智能化控制与自动化执行,能够在减少人为误差的同时增强艺术作品的表现力和观众互动性,实现人机协同创作与智能管理,从而提升戏剧创作与演出的效率和质量。Agostinelli 等提出的 MusicLM 模型,根据自然语言描述生成音乐片段,并基于文本和旋律进行条件优化。

## 3.3 推理与决策

### 3.3.1 逻辑推理与数学问题

在逻辑推理与数学问题上,应用提示工程能够显著提升模型解决复杂问题的能力。通过精心设计的逻辑推理路径和数学公式提示,大语言模型(如 GPT-4 和 PaLM)在多步推理任务中展现出高效性。Wang 等提出了一种逻辑支架推理规则生成框架,构建了推理规则库 ULogic,从而增强模型的逻辑推理能力。Wan 等提出了 LogicAsker 框架,其通过自动化方法全面评估和提高大型语言模型的逻辑推理能力。Deng 等提出了集成大型语言模型与符号求解器的方法,以完成各种推理任务。Li 等使用大型语言模型和知识图谱,实现了更可靠的基于知识的推理,有助于推理结果的追踪。Imani 等提出了 Math-

Prompter 框架,利用 CoT 技术生成多个代数表达式或 Python 函数,以多种方式解决同一数学问题,从而提高结果的置信度。Wu 等提出了一种名为渐进式纠正提示的方法,用于生成推理路径,从而解决数学应用题。Srivastava 等提出了 MathDivide 提示技术,通过将数学问题分解为更简单的子问题来提高求解效率。Wu 等探讨了如何定义提示格式并在格式中融入数学知识,以提高 LLMs 在翻译数学应用题时的效率和质量,还总结了翻译数学论文时涉及的数学知识并将其融入提示中,从而显著提升了模型翻译数学论文的效果。

### 3.3.2 决策规划支持系统

提示工程在增强模型在复杂任务规划与执行方面的能力上发挥着关键作用,主要表现为提升模型的规划能力、执行效率以及可持续性,提升智能体控制的安全性。

在医疗决策领域,通过整合实时患者数据和多模态数据分析,临床决策支持系统能够为医疗专业人员提供及时、具有指导性的见解,从而提高治疗决策的质量并提高患者的就诊体验。这些系统不仅提高了医疗安全和临床管理的效率,还能通过预测患者的状况和治疗结果来改进临床路径和决策。Nazary 等从可解释的机器学习模型中获取领域知识,并

将其无缝融入提示设计中，从而提取与特征重要性有关的关键见解，以辅助医务人员进行决策。

在自动驾驶领域，Wang 等设计了基于 LLMs 的副驾驶 Co-pilot 框架，驾驶员通过自然语言描述任务，Co-pilot 结合记忆模块与专家微调技术，综合考量生成轨迹的安全性、任务完成度、驾驶行为正确性，并完成相应的轨迹规划与控制任务。Wang 等提出基于 LLMs 的人-车交互框架，通过结合车内驾驶员情绪、驾驶状态与当前驾驶环境、任务描述，完成分布式自动驾驶车轨迹规划与控制。

具体来说，向大模型提供关于任务目标和执行步骤的明确提示，可以显著提高其规划和执行特定操作的能力。这种方法在自动化生产、智能机器人等多个领域表现出强大的应用潜力。Singh 等提出了一种程序化的 LLMs 提示结构，在考虑情境环境、机器人功能以及具体任务需求时，该结构有助于生成有效的提示。Chen 等开发的 NLMap，旨在解决将 LLMs 应用于现实世界的机器人任务所面临的环境限制。NLMap 作为一个框架，能够收集和集成上下文信息至 LLMs 规划器中，在生成条件计划前能够查看和查询场景中的可用对象。此外，Kannan 等开发了一个专门为多机器人任务规划设计的

SMART-LLM，该框架融合了任务分解、联盟形成、任务分配等多个规划阶段，全程依赖于程序化的 LLMs 提示。这些提示基于少量样本学习范式，最优化任务规划的效率和准确性。Lin 等面向无人机系统提出了基于提示微调的复杂任务分解策略，提高了无人机在复杂城市环境中的任务执行效率和准确度。Tian 等将提示微调策略应用于物流系统，在无人机、无人船和无人车场景的 3D 终端交付中具有显著成效。

#### 4 提示工程挑战与展望

生成式 AI 是一项新兴技术，研究者对大模型的突现能力和局限性的理解仍然有限。在自然语言理解方面，由于自然语言是一种灵活、开放的输入信息，大模型处理自然语言时面临许多语言交流挑战，例如有歧义、上下文的依赖性和需要实时修正等问题，同时大模型对自然语言的理解可能与人类理解无实质关系且存在交流障碍。在多模态数据理解方面，视觉、文本、音频等多种类型的提示的数据格式、尺度和结构各不相同，如何在同一个模型中有效整合和处理这些跨物理、信息和社会空间的异质数据，保持各模态信息之间的一致性和互操作性，是一个巨大的挑战。

提示工程通过提供特定的提示来引导模型，但在多模态输入

文本生成中的应用仍然存在一定的局限性。例如，硬提示和软提示在多模态生成式模型中的潜力尚未被完全挖掘，特别是如何有效地设计和优化软提示，以便在图文匹配和其他多模态任务中提升模型性能，仍需进行深入研究。上下文学习和指令调优在多模态模型中已表现出高效性，但其内部工作机制仍缺乏可解释性。这些模型如何从不同的示例中学习，以及不同示例对模型性能的具体贡献，尚未得到充分研究。这些学习主要包括几个方面。首先是任务理解，即模型如何通过提示了解和解析任务需求。其次是知识获取，即模型如何从提示中获取必要的知识，通过上下文提示激活模型中预先存储的相关知识。第三是模式识别，即模型如何从提示中识别出有用的模式和结构，从而在新的示例中应用这些模式。此外，还包括示例贡献，即不同示例在提示中对模型性能的具体贡献，理解哪些示例最有助于提升模型的任务表现。最后是指令执行，即模型如何执行提示中的指令，根据指令生成相应的输出，例如在图文匹配任务中生成合适的文本描述或在图像生成任务中生成符合描述的图像。深入理解这些机制有助于更好地设计和优化提示，从而提升模型在各种下游任务中的性能。

视觉提示可以在处理密集

对象、幻觉等困难场景时发挥重要作用，尽管预训练的编码器通过匹配损失进行提示已被广泛用于下游任务，但对视觉提示的研究仍相对较少。此外，T2V、T2-3D 生成模型依赖于 T2I 模型的性能，然而，T2I 模型的输入不一致问题可能导致生成的视频和 3D 内容出现错误，从而影响模型的整体性能和可靠性。如何解决 T2I 模型的输入不一致性问题，以提高 T2V 和 T2-3D 模型的稳定性和准确性，也是亟待解决的挑战。此外，T2A 模型生成的音乐仍存在杂音及不和谐音调问题，特别是输入图像会导致此类模型出现不一致性问题。

大模型通常在网络规模数据集上进行预训练，这些数据集可能保留了偏见知识或敏感隐私信息。如何在提示工程的部署过程中控制这些潜在风险，确保生成内容的公平性和透明性，是一个重要的研究方向。对抗鲁棒性在各种模型架构中被广泛研究，但在 VLMs 中，图像 - 文本匹配与理解仍有待进一步研究，特别是 VLMs 在对抗攻击下的鲁棒性以及提示大小对模型鲁棒性的影响，还有待进一步研究。

对齐技术虽然是解决以上问题的一种主要技术，但是内部对齐和外部对齐在保持大模型与人类价值观的一致性上仍面临挑战。外部对齐的主要挑战在于如何准

确定义和量化复杂、多样且具有文化、社会差异的人类价值观，并将这些定性的价值观转化为模型的优化目标，同时避免大模型找到不符合设计者意图的内容。而内部对齐则面临模型行为不可预测和目标泛化问题，确保模型在实际优化过程不背离设计者设定的目标，即使面对未见过的情况也能表现出符合预期的行为。这些问题的解决需要综合考虑内部对齐和外部对齐的策略，从而确保模型的可靠性和安全性。

未来研究可以探索结合音频、热成像等更多模态提示的方法，创建能够处理多种模态输入的统一模型，并结合有效的优化策略进一步提升多模态模型的能力，如微软亚洲研究院的 Kosmos 和 Meta AI 的 IMAGEBIND。此外，未来可以探索在多模态生成模型中应用软提示，例如 CoOp (context optimization) 等上下文优化模型，以及进一步研究上下文学习和指令调优的内部机制。

探索提示工程在大模型预训练编码器中的应用也将是一个重要的研究方向，尤其是在处理密集对象、减少幻觉问题以及提升现代生成式 AI 的适应性等方面的应用。在 T2I 任务中，结合视觉提示和视觉注释可以提供更多的视觉线索，从而生成个性化和更准确的图像。同样，研究如何在多模态输入 - 输出的大模型中使

用统一的提示方法，进而提升其视觉信息（如图像和视频）和文本信息处理能力，能够实现视觉定位（在图像中找到特定位置或物体）和视觉 - 文本共引用对话（结合视觉和文本进行互动和交流）。这一研究有望在 T2V、T2-3D、T2A 任务中展现出更大的潜力。此外，加强提示工程中的 AI 生成内容的伦理性研究，确保模型生成的内容不包含偏见，保护用户隐私，避免不道德的内容生成，也是未来的重要课题。未来还可以继续研究如何提高大模型在对抗攻击下的鲁棒性，以确保模型在各种复杂应用中的稳定性和可靠性，如自动驾驶、艺术、区块链、医疗等领域。

## 5 结论

尽管 LLMs 和 VLMs 的突现能力使其在生成和理解任务方面表现出色，但是它们在处理特定任务时仍面临一定挑战，仍需要在大量标注数据上进行微调，且模型的表现可能会受到数据质量和任务特异性的限制，导致直接修改模型参数的成本高昂且收效甚微。此外，幻觉、知识迁移、一致性缺失、有害信息等问题，导致大模型在处理实际问题时表现不佳。提示工程不需要调整模型参数，直接通过多模态提示引导大模型执行任务，成为了解决这些问题的一种有效手段。结合

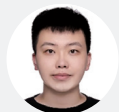
提示工程与对齐技术可以进一步确保模型输出符合人类的价值观和预期。本文深入讨论提示工程与对齐技术，提出基于提示优化、专家反馈机制以及实时调整机制的引导概念，首先通过提示优化帮助大模型更好地理解任务需求，专家反馈机制通过持续的专业评估和反馈进一步验证和改进提示与对齐过程，以确保输出的准确性和一致性，实时调整机制根据输出动态优化模型行为。引导概念为研究者构建、评估、执行提示工程与对齐提供指导，进而提升了大模型在多种任务上的性能。○

来源：智能科学与技术学报

作者简介



黄峻（1998—），男，澳门科技大学博士生，主要研究方向为平行智能、自动驾驶 轨迹预测规划、提示工程、大语言模型等。



林飞（1994—），男，澳门科技大学博士生，主要研究方向为平行系统、人工智能药物研发、大语言模型、多模态感知、生成式人工智能。



杨静（1998—），女，中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室 博士生，主要研究方向为众包、平行制造、社会制造、人工智能和社会物理信息系统。



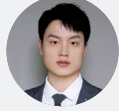
王兴霞（1996—），女，中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室博士生，主要研究方向为平行智能、平行油田、故障诊断等。



倪清桦（1999—），女，澳门科技大学博士生，主要研究方向为平行智能、区块链、数字孪生、智能系统等。



王雨桐（1994—），女，中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室助理研究员，主要研究方向为计算机视觉、图像异常检测。



田永林（1994—），男，中国科学院自动化研究所博士后，主要研究方向为平行系统、自动驾驶、场景工程。



李娟娟（1986—），女，博士，中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室副研究员，主要研究方向为区块链智能、Web3.0 与平行管理。



王飞跃（1961—），男，博士，中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任，澳门科技大学特聘教授，主要研究方向为平行系统的方法与应用、社会计算、平行智能、知识自动化。



## 2024 年第三期 CAA “企·话”沙龙 ——石化产业新形势下的机遇与挑战在北京成功召开

2024 年 10 月 17 日,由中国自动化学会主办的 2024 年第三期 CAA “企·话”沙龙——石化产业新形势下的机遇与挑战在北京举办。来自不同行业和领域的专家学者和企业家齐聚一堂,聚焦石化产业领域,共同探讨产业下一步的发展方向、技术需求、面临的困境以及对策建议。本次沙龙旨在推动自动化与石化产业产学研深度融合,进一步加强会企合作,建设现代化石化产业体系,加速石化产业在新形势下的发展与转型。

本次沙龙邀请到中国自动化学会副理事长王成红、中国自动化学会副理事长侯增广、中国自

动化学会秘书长张楠、中国自动化学会副秘书长王坛、国家管网集团高级信息专家颜辉、中石油天然气集团公司赵峻松、中国化工信息中心副主任李中、中国石油大学自动化系主任左信、中国化学产学研主任焦斌、中国工业环保促进会化工委员会副秘书长李小平、中国石油流通协会秘书长暴广军、中石化工程建设公司技术总监范宗海、中国昆仑工程有限公司高级工程师李娟、中国机电一体化协会工程技术中心主任张锦华、北京培英化工科技有限公司总工程师冯双虎、北京瑞普全智能控制设备有限公司总经理杨顺富、北京煤化信息科技公

司董事长陈强等共计 30 余人参会,沙龙由中国自动化学会石油化工应用委员会副秘书长陈彦峰主持。

会上,王成红副理事长发表致辞,对嘉宾的到来表示热烈欢迎,希望与会嘉宾在会上畅所欲言,在技术和相关政策方面提出需求和建议,为学会进一步推动行业发展,指明工作方向,共同为石化产业发展作出贡献。

侯增广副理事长从学术会议、期刊建设、人才培养、公共服务、国际视野等五个方面介绍了学会的工作内容和发展方向,他表示中国自动化学会历史悠久、特色鲜明,逐步成为连接政府、产业、学术、科研、会员的重要纽带,



图1 现场合影



图2 王成红副理事长致辞



图3 侯增广副理事长发言



图4 中国自动化学会公共服务部主管李冀宁作汇报

并致力于成为自动化信息与智能科技领域最具影响力的科技社团。

基于自动化在石油化工产业广阔的发展前景，陈彦峰副秘书长发布《石油化工行业产业万里行活动倡议书》，学会将通过走进企业、倾听企业、推进互动、加强交流的方式，为石油化工行业下一代科学技术进步提供切实的服务，希望业内各界能关注石油化工行业未来产业的发展问题，推动行业标准的完善和发展，积极为石油化工下一步发展提出建设性的意见。

中国自动化学会公共服务部主管李冀宁就学会公共服务工作进行专题汇报，重点介绍了学会在公共服务方面“1+3”工作模式，即一个系列的专业化会展赛事活动、一套科技评价体系、一套人才培养服务举荐体系、一套团体标准化工作体系，总结了学会作为科技社团，在承接政府职能转移、推动科技创新等方面发挥的重要作用。

与会嘉宾围绕石化产业技术突破与创新应用、未来产业发展存在的问题及未来发展建议等

议题进行了深度交流和探讨，同时根据各自企业的实际情况在新模式、新技术上分享经验、交换意见。

李中主任在讲话中介绍了石化产业所处的国内外背景，围绕着未来产业的发展，从高端化、绿色化、智能化三方面阐述发展高附加值产品体系、推动新能源产业模式、认知智能化等内容，强调了信息技术对传统产业的重塑作用。他表示，要树立全球视野，跟踪国际动向以适应发展的需求。



图5 李中主任发言



图6 左信主任发言





图7 范宗海总监发言



图8 赵峻松老师发言

左信主任指出，当前国外大学自动化专业少且分散，我国自动化专业热门但被人工智能等热门专业挤占空间。石化行业中自动化应用有限，而我国在制度机制、人才培养等方面具有比较优势。建议高度重视大系统全局自动化，培养跨学科人才，在新质生产力中发挥作用，共同推动国产自主可靠控可替代。

范宗海总监表示，目前石化行业面临炼油、乙烯过剩的挑战，企业需要探索向新能源等方向的转型，拓展服务附加值业务并积极

极走出去，面向国际市场。行业内部要重视国产化、数字化、智能化，要逐步完善质量检验理念、评级体系及采购模式，提高对操作工的支持与关注，进一步探索传统自动化与人工智能结合的空间。

赵峻松老师指出，我们面临标准混乱、缺乏自主创新、内卷严重等一系列问题，需要通过加强标准制定、推进国产化、发挥科技社团作用等措施，逐步建立起具有中国特色的自动化产业体系，为国家经济发展和社会进步

作出更大的贡献。同时，企业也应积极参与到行业发展中来，共同推动自动化产业的繁荣发展。

颜辉老师表示，谈论石化行业自动化绕不开国产化和工控安全的问题，保障国产化专业系统的适配性和工控安全，也是未来发展的一个重要方向。同时，在未来发展的道路上，企业应提出需求，协会、研究机构和厂商联合攻关，避免人工智能等新技术的应用成为昙花一现。

暴广军秘书长在发言中介绍了中国石油流通协会的基本情况



图9 颜辉老师发言



图10 暴广军秘书长发言



图 11 焦斌主任发言



图 12 甄进平会长发言



图 13 李小平秘书长发言

和主要工作内容，在建立团体标准、行业标准等方面发挥着重要作用，同时提出了正在探索建立评星评级机制等一系列机制举措，避免行业内“劣币驱逐良币”的现象发生。

焦斌主任指出，企业智能化目标与实际差距还比较大，行业内存在理论研究与企业实际需求脱节等现象，未来应建立跨界融合管理体系，从而推动科技和企业发展。

甄进平会长指出，低价竞争、缺乏组织力、凝聚力是当前社会

的痛点问题，解决这些问题要依托大数据、标准化、评价标准、监管体系、诚信体系的建立，评价体系及招投标机制的改进。

李小平秘书长针对石化产业新形势下的机遇与挑战，从产业层面提出高端化、终端化、精细化发展方向，从企业层面提出基地化、园区化、一体化和智慧化发展方向。

冯双虎总工表示，化工行业中精益化工等小型企业事故率较高，虽国内提出流程自动化提升计划，但实际情况仍未改变。主

要问题包括自动化成本高、人员素质跟不上、专家检查标准不适用、信息化平台多而杂且数据孤岛、仪表数据统计缺乏本土数据等，需多方努力解决这些行业问题，提升化工行业整体安全水平。

李娟老师指出，现如今随着项目增多、周期缩短，石化行业对高效高质量设计软件需求较为迫切，但国内软件还未获得国际社会的普遍认可。希望能有像华为、大疆那样有优势的国产技术公司，提升行业生产力，实现数字化交付，走向国际。



图 14 冯双虎总工发言



图 15 李娟老师发言



图 16 陈强董事长发言





图 17 杨顺富总经理发言



图 18 张楠秘书长发言



图 19 王成红理事长作总结发言

陈强董事长表示，煤化工行业历经起伏，面临产能过剩等诸多挑战，而创新至关重要，国产化是关键。产学研用结合创新，才能推动产业绿色高质量发展。新能源、生物制药等行业带来新的机遇与挑战，创新在路上，是企业立足之本。

杨顺富总经理表示，公司专注高温高压领域，解决北方特殊用户难题，未来将探讨天然气测量及热量换算等，期待与国家、研究院合作完善自诊断大数据模型。

张楠秘书长表示，学会自1961年成立以来，在学术领域深耕发展，近年来学会积极响应国家号召，聚焦产业领域，搭建平台，了解企业需求，将学术成果更好地转化为服务企业和产业的科技成果，解决传统行业问题。

王成红理事长在总结发言中表示，此次沙龙活动的举办意义重大，与会代表就石油化工行业

的发展进行了深入探讨，聚焦高端化、绿色化、智能化的相关问题，提出了诸多想法，为行业的融合发展提供了方向。会议取得了良好效果，期待各方在未来更好地合作，共同推动石油化工行业高质量发展。

此次沙龙活动，不仅深入探讨了目前产业面临的挑战、未来的发展布局、技术突破等问题，企业家开启了利用人工智能技术深化企业转型升级的新思路，提

供了多方资源深度合作的新方向。在为推动未来产业发展出谋划策的同时，学会也聆听到行业内专家学者和企业的心声，未来学会将细分企业类型，有针对性地在科技成果转化合作、资源对接等方面提供更多更优质的发展机会和创新空间，帮助企业解决创新发展过程中遇到的实际问题。我们诚邀更多的行业企业积极参与到CAA“企·话”沙龙活动中来！

学会秘书处 供稿



图 20 合影

## 中国自动化学会青年菁英系列活动 “智能生态与表型监测”论坛顺利举办

为了促进智慧生态领域的学术交流与发展，由中国自动化学会主办，中国自动化学会智慧生态专委会（筹）、中国农业大学和中国科学院自动化研究所联合承办的主题为“智能生态与表型监测”的中国自动化学会青年菁英系列活动（CAA Youth e-Summit，简称 CAA YeS）论坛于 2024 年 10 月 12 日线上召开，并取得圆满成功。

中国农业大学马韞韬教授和中国科学院自动化研究所康孟珍副研究员共同担任了本次论坛的

主席。本次论坛有幸邀请到了 6 位来自国内不同地区知名高校和企业的优秀科技工作者作会议主题报告，围绕智能生态与表型监测领域的最新研究成果、实际应用案例以及未来的发展方向等议题进行了深入的分享与交流。腾讯会议超过 200 人参与了此次论坛，并进行了线上互动。

论坛主席康孟珍副研究员致开幕词，介绍了本次论坛主题，对各位与会的专家学者、老师和同学表示热烈欢迎，同时希望本次论坛能够促进作物模型与表型

领域的学术交流与合作。

本次论坛分为“作物模型”与“表型监测”两大主题环节。“作物模型”环节由中国科学院自动化研究所副研究员王秀娟主持，北大荒信息有限公司冯利平教授和中国农业大学杨晓光教授分别就农业模型的前沿研究和应用、气候变化对农业的影响与适应方面进行了精彩的报告。随后，“表型智能监测与获取”环节由中国农业大学马韞韬教授主持，南京农业大学姚霞教授、华中农业大学杨万能教授、浙江大学黄梓宸助理研究员，以及商汤科技开发有限公司农业线市场负责人颜宪斌，分别就表型监测技术的最新进展和实际应用进行了深入的探讨和分享。

北大荒信息有限公司高级顾问、中国农业大学冯利平教授在论坛上发表了题为“农业模型的发展与未来展望”的报告。冯教授在报告中详尽阐述了农业模型的发展历程、研究成果以及国内外的最新动态，分享了其团队开发的 AgroStudio 平台和 CropSM 系列模型的最新进展及其在农业



领域的应用成果。他认为作物模型的重要性堪比智慧农业的大脑，而国内完全自主知识产权的作物模型还比较缺乏。此外，他还对未来农业模型的发展趋势进行了前瞻性的展望。

中国农业大学杨晓光教授在论坛上分享了全球气候变化对农业种植的影响，包括对种植面积、复种指数和单产等，探讨了如何通过调整作物种类和管理措施来适应这些变化。杨教授介绍了其团队在采用作物模型研究气候变化下作物布局与分布、作物适宜区域以及作物产量变化等方面的工作。这些研究成果不仅加深了我们对农业如何适应气候变化的理解，还为农业实践提供了具体的策略和建议，对指导实际的农业生产具有重要的参考价值。

南京农业大学姚霞教授在论坛上围绕作物表型性状的快速、高通量和准确获取，对现代作物育种和栽培管理的影响进行了深入分享。她依托不同年份、品种、氮素水平和种植密度组合的稻麦田间试验，结合计算机、物联网、遥感等先进技术，详细介绍了作物外在形态、生理特性、生产力

表型等方面的最新研究进展。姚教授的研究成果为精确育种和智慧农业的快速发展提供了数字化、智能化的基础，对于推动农业科技创新和提升农业生产效率具有重要意义。

华中农业大学教授杨万能针对根系结构与功能对植物生长和适应能力的重要影响，以及根系表型获取难的问题，设计并开发了多种高通量根系表型平台，包括高通量水培根系平台、3D 水培根系扫描平台、微观根系表型平台，以及机器人和大田固定表型平台等，能够实现根系表型的高通量自动化采集，为根系表型改良和作物育种提供了一种新技术和新方法。这些研究成果不仅提高了作物表型检测的效率，而且促进了作物功能基因组和育种研究的发展。

浙江大学助理研究员黄梓宸就食品供应链中蔬菜的可追溯性问题进行了深入探讨。他指出，传统的追溯方法主要依赖于基于标签的系统，在跟踪从分级设施到温室采收的单个蔬菜时面临挑战。为了解决这一问题，黄梓宸及其团队分析了青椒荧光表型的产生机制，并提出了一种基

于荧光特征点的匹配算法，该算法能够在青椒收获前后进行有效的匹配识别。这项研究不仅为作物荧光表型的研究提供了基础方法和数据，而且对于提高食品供应链的透明度和安全性具有重要意义。

商汤科技农业线市场负责人颜宪斌向我们展示了商汤在人工智能大模型技术方面的最新进展，以及如何将这些技术应用于农业领域以促进生产力的革新。他详细介绍了商汤的“AI2.0+ 农业”解决方案，展示商汤在智能农业遥感、农业种植大模型能力以及服务宏观管理、大田种植、金融保险、农技咨询培训的应用产品，助力农业向智能化转型。

最后，康孟珍副研究员对本次论坛进行了总结。她表达了希望通过中国自动化学会青年菁英系列活动“智能生态与表型监测”论坛，进一步促进学术界与产业界的交流合作，并期望相关研究成果能够被有效应用于生态保护和农业生产的管理和决策过程中，从而推动相关领域的实际进步和发展。○

学会秘书处 供稿



## 数智融合 赋能新质生产力——2024 全国第二十九届自动化应用技术学术交流会圆满召开

数智融合 赋能新质生产力 2024全国第二十九届自动化应用技术学术交流会（CAAC2024）  
2024年全国有色金属工业电气及自动化、智能化、信息化学术会议  
第六届冶金人工智能论坛



图1

近日，由中国自动化学会应用专业委员会、中国金属学会冶金自动化分会联合中国有色金属学会自动化学术委员会、中国金属学会冶金人工智能技术分会、冶金自动化研究设计院有限公司和冶金智能制造系统全国重点实验室主办，中控技术股份有限公司、浙江大学、中南大学、上海大学等单位承办的“2024 全国第二十九届自动化应用技术学术交流会”“2024年全国有色金属工业电气及自动化、智能化、信息化学术会议”“第六届冶金人工智能论坛”在浙江省杭州市成功举办。

会议就数字化、智能化转型过程中所取得的最新研究成果和技术进展进行了深入交流研讨。

来自全国高校、企业、科研院所的300余名专家、学者和科技人员参加了交流。

中国自动化学会副理事长、青岛科技大学副校长、上海交通大学教授李少远，中国钢研科技集团有限公司党委常委、副总经理郝晓东，中控技术股份有限公司董事长、总裁崔山致开幕辞。

中国工程院院士、中国自动化学会特聘顾问、浙江大学教授孙优贤，中国工程院院士、东北大学教授王国栋，中控集团创始人、蓝卓数科创始人褚健，中国金属学会专家委员会名誉委员李文秀，中国金属学会专家委员会名誉委员王天义出席会议。大会开幕式由中国自动化学会副秘书长、中



图2 图为会议现场



国自动化学会应用专业委员会主任委员、中国金属学会冶金自动化分会秘书长、冶金自动化研究设计院副院长孙彦广主持。

中国钢研党委常委、副总经理郝晓东在开幕式致辞中表示，中国钢研将以数智融合为主攻方向，夯实算力、算法、数据等技术基础，推动数字化、智能化赋能新型工业化，因地制宜发展新质生产力。他指出，中国钢研将智能技术与钢铁制造流程深度融合，以数字化、智能化为钢铁企业生产效率提升、流程优化、节能降耗、产品质量提升等提供特色解决方案，全力打造智能赋能钢铁流程优化与智能化运行产品，推动钢铁行业智能制造转型升级，为钢铁行业高质量发展贡献智慧和力量。

在主旨报告环节，中国工程院院士、原冶金部副部长殷瑞钰，中国工程院院士、中国自动化学会特聘顾问、浙江大学教授孙优贤，中国工程院院士、东北大学教授王国栋分别作“关于钢厂智能化的构思与实践”“大型高炉炼铁全局智能协同优化关键技术”“实体经济与数字经济深度融合，打造钢铁新质生产力”的特邀报告。

会上，中控科技集团创始人、蓝卓数科创始人褚健，江苏金恒信息科技股份有限公司党委书记、总经理李福存，北京科技大学工程技术研究院院长张勇军，宝信软件工业互联网研究院大数据中



图3 图为孙彦广



图4 图为郝晓东



图5 图为殷瑞钰



图6 图为孙优贤

心副院长陈晓武等 10 位行业知名专家作了主题报告。大会还设立了钢铁行业 and 有色行业分论坛，18 位来自行业龙头企业和高校的专家学者就数字化、智能化的创新成果、发展趋势和先进经验进行了分享和交流。

会议期间，与会嘉宾受邀莅临中控科技园，参观中控技术股份有限公司在智能制造领域的最



图7 图为王国栋

新研究成果和进展。○

CAA 应用专委会 供稿



图8 图为参观中控科技园

## 开创我国高质量发展新局面

—

我国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段，正处在转变发展方式、优化经济结构、转换增长动力的攻关期，建设现代化经济体系是跨越关口的迫切要求和我国发展的战略目标。必须坚持质量第一、效益优先，以供给侧结构性改革为主线，推动经济发展质量变革、效率变革、动力变革，提高全要素生产率，着

力加快建设实体经济、科技创新、现代金融、人力资源协同发展的产业体系，着力构建市场机制有效、微观主体有活力、宏观调控有度的经济体制，不断增强我国经济创新力和竞争力。

（2017年10月18日在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告）

—

中国特色社会主义进入了新

时代，我国经济发展也进入了新时代。新时代我国经济发展的特征，就是我在党的十九大报告中强调的，我国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段。这是一个重大判断，我们必须深刻认识其重大现实意义和深远历史意义。

第一，这是保持经济持续健康发展的必然要求。我国正处于转变发展方式的关键阶段，劳动力成本上升、资源环境约束增大、粗放的发展方式难以为继，经济循环不畅问题十分突出。同时，世界新一轮科技革命和产业变革方兴未艾、多点突破。我们必须推动高质量发展，以适应科技新变化、人民新需要，形成优质高效多样化的供给体系，提供更多优质产品和服务。这样，供求才能在新的水平上实现均衡，我国经济才能持续健康发展。

第二，这是适应我国社会主要矛盾变化和全面建成小康社会、全面建设社会主义现代化国家的必然要求。我国社会主要矛盾发生了重大变化，我国经济发展阶段也在发生历史性变化，不平衡不充分的发展就是发展质量不高的表现。解决我国社会的主要矛盾，必须推动高



图1 2017年12月18日至20日，中央经济工作会议在北京举行。中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平发表重要讲话。新华社记者 谢环驰 / 摄





图2 2023年10月10日至13日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在江西考察。这是11日上午，习近平在景德镇市昌河飞机工业（集团）有限公司考察。

新华社记者 燕雁 / 摄

质量发展。我们要重视量的发展，但更要重视解决质的问题，在质的大幅提升中实现量的有效增长。

第三，这是遵循经济规律发展的必然要求。上世纪60年代以来，全球100多个中等收入经济体中只有十几个成功进入高收入经济体。那些取得成功的国家，就是在经历高速增长阶段后实现了经济发展从量的扩张转向质的提高。那些徘徊不前甚至倒退的国家，就是没有实现这种根本性转变。经济发展是一个螺旋式上升的过程，上升不是线性的，量积累到一定阶段，必须转向质的提升，我国经济发展也要遵循这一规律。

（2017年12月18日在中央经济工作会议上的讲话）

### 三

高质量发展，就是能够很好满足人民日益增长的美好生活需

要的发展，是体现新发展理念的发展，是创新成为第一动力、协调成为内生特点、绿色成为普遍形态、开放成为必由之路、共享成为根本目的的发展。从供给看，高质量发展应该实现产业体系比较完整，生产组织方式网络化智能化，创新力、需求捕捉力、品牌影响力、核心竞争力强，产品和服务质量高。从需求看，高质量发展应该不断满足人民群众个性化、多样化、不断升级的需求，这种需求又引领供给体系和结构的变化，供给变革又不断催生新的需求。从投入产出看，高质量发展应该不断提高劳动效率、资本效率、土地效率、资源效率、环境效率，不断提升科技进步贡献率，不断提高全要素生产率。从分配看，高质量发展应该实现投资有回报、企业有利润、员工有收入、政府有税收，并且充分

反映各自按市场评价的贡献。从宏观经济循环看，高质量发展应该实现生产、流通、分配、消费循环通畅，国民经济重大比例关系和空间布局比较合理，经济发展比较平稳，不出现大的起落。更明确地说，高质量发展，就是从“有没有”转向“好不好”。

（2017年12月18日在中央经济工作会议上的讲话）

### 四

推动高质量发展是我们当前和今后一个时期确定发展思路、制定经济政策、实施宏观调控的根本要求，必须加快形成推动高质量发展的指标体系、政策体系、标准体系、统计体系、绩效评价、政绩考核，创建和完善制度环境，推动我国经济在实现高质量发展上不断取得新进展。

（2017年12月18日在中央经济工作会议上的讲话）

### 五

实践证明，过去40年中国经济发展是在开放条件下取得的，未来中国经济实现高质量发展也必须在更加开放条件下进行。这是中国基于发展需要作出的战略抉择，同时也是在以实际行动推动经济全球化造福世界各国人民。

（2018年4月10日在博鳌亚洲论坛2018年年会开幕式上的主旨演讲）

## 六

我国已进入高质量发展阶段，社会主要矛盾已经转化为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾，人均国内生产总值达到1万美元，城镇化率超过60%，中等收入群体超过4亿人，人民对美好生活的要求不断提高。我国制度优势显著，治理效能提升，经济长期向好，物质基础雄厚，人力资源丰富，市场空间广阔，发展韧性强大，社会大局稳定，继续发展具有多方面优势和条件。同时，我国发展不平衡不充分问题仍然突出，创新能力不适应高质量发展要求，农业基础还不稳固，城乡区域发展和收入分配差距较大，生态环保任重道远，民生保障存在短板，社会治理还有弱项。

总之，进入新发展阶段，国内外环境的深刻变化既带来一系列新机遇，也带来一系列新挑战，是危机并存、危中有机、危可转机。我们要辩证认识和把握国内外大势，统筹中华民族伟大复兴战略全局和世界百年未有之大变局，深刻认识我国社会主要矛盾发展变化带来的新特征新要求，深刻认识错综复杂的国际环境带来的新矛盾新挑战，增强机遇意识和风险意识，准确识变、科学应变、主动求变，勇于开顶风船，善于转危为机，努力实现更高质

量、更有效率、更加公平、更可持续、更为安全的发展。

（2020年8月24日在经济社会领域专家座谈会上的讲话）

## 七

我国发展已经站在新的历史起点上，要根据新发展阶段的新要求，坚持问题导向，更加精准地贯彻新发展理念，切实解决好发展不平衡不充分的问题，推动高质量发展。比如，科技自立自强成为决定我国生存和发展的基础能力，存在诸多“卡脖子”问题。比如，我国城乡区域发展差距较大，而究竟怎样解决这个问题，有很多新的问题需要深入研究，尤其是区域板块分化重组、人口跨区域转移加快、农民落户城市意愿下降等问题要抓紧研究、明确思路。比如，加快推动经济

社会发展全面绿色转型已经形成高度共识，而我国能源体系高度依赖煤炭等化石能源，生产和生活体系向绿色低碳转型的压力都很大，实现2030年前碳排放达峰、2060年前碳中和的目标任务极其艰巨。比如，随着经济全球化出现逆流，外部环境越来越复杂多变，大家认识到必须处理好自立自强和开放合作的关系，处理好积极参与国际分工和保障国家安全的关

系，处理好利用外资和安全审查的关系，在确保安全前提下扩大开放。总之，进入新发展阶段，对新发展理念的理解要不断深化，举措要更加精准务实，真正实现高质量发展。

（2021年1月11日在省部级主要领导干部学习贯彻党的十九届五中全会精神专题研讨班上的讲话）



图3 2023年11月28日至12月2日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在上海考察。这是11月28日下午，习近平在浦东新区张江科学城参观上海科技创新成果展。

新华社记者 谢环驰 / 摄



## 八

高质量发展是“十四五”乃至更长时期我国经济社会发展的主题，关系我国社会主义现代化建设全局。高质量发展不只是一个经济要求，而是对经济社会发展方方面面的总要求；不是只对经济发达地区的要求，而是所有地区发展都必须贯彻的要求；不是一时一事的要求，而是必须长期坚持的要求。各地区要结合实际，因地制宜、扬长补短，走出适合本地区实际的高质量发展之路。要始终把最广大人民根本利益放在心上，坚定不移增进民生福祉，把高质量发展同满足人民美好生活需要紧密结合起来，推动坚持生态优先、推动高质量发展、创造高品质生活有机结合、相得益彰。

（2021年3月7日在参加十三届全国人大四次会议青海代表团审议时的讲话）

## 九

高质量发展是全面建设社会主义现代化国家的首要任务。发展是党执政兴国的第一要务。没有坚实的物质技术基础，就不可能全面建成社会主义现代化强国。必须完整、准确、全面贯彻新发展理念，坚持社会主义市场经济改革方向，坚持高水平对外开放，加快构建以国内大循环为主体、

国内国际双循环相互促进的新发展格局。

我们要坚持以推动高质量发展为主题，把实施扩大内需战略同深化供给侧结构性改革有机结合起来，增强国内大循环内生动力和可靠性，提升国际循环质量和水平，加快建设现代化经济体系，着力提高全要素生产率，着力提升产业链供应链韧性和安全水平，着力推进城乡融合和区域协调发展，推动经济实现质的有效提升和量的合理增长。

（2022年10月16日在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告）

## +

实现高质量发展，也离不开农业发展。只有农业强了，农产品供给有保障，物价稳定、人心

安定，经济大局才能稳住。拓展现代化发展空间，农业农村是大有可为的广阔天地。几亿农民整体迈入现代化，会释放巨大的创造动能和消费潜能，为经济社会发展注入强大动力。畅通工农城乡循环，是畅通国内经济大循环、增强我国经济韧性和战略纵深的重要方面。扩内需、稳增长、促发展，农业强国建设是重要的发力点和突破口。

（2022年12月23日在中央农村工作会议上的讲话）

## 十一

要在推动高质量发展、做好做大“蛋糕”的同时，进一步分好“蛋糕”，着力解决好就业、分配、教育、医疗、住房、养老、托幼等民生问题，构建三次分配协调配套的制度体系，规范收入



图4 2023年12月14日至15日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在广西考察。这是14日上午，习近平在南宁市考察中国—东盟信息港股份有限公司，结合平陆运河沙盘听取西部陆海新通道骨干工程建设汇报。新华社记者 谢环驰 / 摄

分配秩序，规范财富积累机制，依法引导和规范资本健康发展，逐步扩大中等收入群体、缩小收入分配差距，让现代化建设成果更多更公平惠及全体人民，坚决防止两极分化。

（2023年2月7日在新进中央委员会的委员、候补委员和省部级主要领导干部学习贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想党的二十大精神研讨班上的讲话）

## 十二

高质量发展是全面建设社会主义现代化国家的首要任务。必须完整、准确、全面贯彻新发展理念，始终以创新、协调、绿色、开放、共享的内在统一来把握发展、衡量发展、推动发展；必须更好统筹质的有效提升和量的合理增长，始终坚持质量第一、效益优先，大力增强质量意识，视质量为生命，以高质量为追求；必须坚定不移深化改革开放、深入转变发展方式，以效率变革、动力变革促进质量变革，加快形成可持续的高质量发展体制机制；必须以满足人民日益增长的美好生活需要为出发点和落脚点，把发展成果不断转化为生活品质，不断增强人民群众的获得感、幸福感、安全感。

（2023年3月5日在参加十四届全国人大一次会议江苏代表团审议时的讲话）

## 十三

加快实现高水平科技自立自强，是推动高质量发展的必由之路。在激烈的国际竞争中，我们要开辟发展新领域新赛道、塑造发展新动能新优势，从根本上说，还是要依靠科技创新。我们能不能如期全面建成社会主义现代化强国，关键看科技自立自强。

（2023年3月5日在参加十四届全国人大一次会议江苏代表团审议时的讲话）

## 十四

加快构建新发展格局，是推动高质量发展的战略基点。要把实施扩大内需战略同深化供给侧结构性改革有机结合起来，加快建设现代化产业体系。要坚持把发展经济的着力点放在实体经济

上，深入推进新型工业化，强化产业基础再造和重大技术装备攻关，推动制造业高端化、智能化、绿色化发展，加快建设制造强省，大力发展战略性新兴产业，加快发展数字经济。要按照构建高水平社会主义市场经济体制、推进高水平对外开放的要求，深入推进重点领域改革，统筹推进现代化基础设施体系和高标准市场体系建设，稳步扩大制度型开放。

（2023年3月5日在参加十四届全国人大一次会议江苏代表团审议时的讲话）

## 十五

在强国建设、民族复兴的新征程，我们要坚定不移推动高质量发展。要完整、准确、全面贯彻新发展理念，加快构建新发展格局，深入实施科教兴国战略、人才强国



图5 2024年3月18日至21日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在湖南考察。这是18日下午，习近平在中德合资企业巴斯夫杉杉电池材料有限公司考察。

新华社记者 谢环驰 / 摄

战略、创新驱动发展战略，着力提升科技自立自强能力，推动产业转型升级，推动城乡区域协调发展，推动经济社会发展绿色化、低碳化，推动经济实现质的有效提升和量的合理增长，不断壮大我国经济实力、科技实力、综合国力。

（2023年3月13日在第十四届全国人民代表大会第一次会议上的讲话）

## 十六

全面学习贯彻党的二十大精神，要牢牢把握新时代新征程党的中心任务，牢牢把握中国式现代化的科学内涵和本质要求，牢牢把握高质量发展这个首要任务，把贯彻新发展理念、构建新发展格局、促进共同富裕贯穿经济社会发展各方面全过程，深入推进发展方式、发展动力、发展领域、发展质量变革，开创我国高质量发展新局面。

（2023年7月25日至27日在四川考察时的讲话）

## 十七

要完整、准确、全面贯彻新发展理念，统筹发展和安全，深刻把握新时代新征程推进新型工业化的基本规律，积极主动适应和引领新一轮科技革命和产业变革，把高质量发展的要求贯穿新型工业化全过程，把建设制造强国同发展数字经济、产业信息化等有机结合，为中国式现代化构

筑强大物质技术基础。

（2023年9月对推进新型工业化的指示）

## 十八

领导干部要树牢造福人民的政绩观。我们共产党人干事业、创政绩，为的是造福人民，不是为了个人升迁得失。中央政治局的同志要带头坚持以人民为中心的发展思想，坚持高质量发展，反对贪大求洋、盲目蛮干；坚持出实招求实效，反对华而不实、数据造假；坚持打基础利长远，反对竭泽而渔、劳民伤财。高质量发展是全面建设社会主义现代化国家的首要任务，坚持高质量发展要成为领导干部政绩观的重要内容。要完善推动高质量发展的政绩考核评价办法，发挥好指挥棒作用，推动各级领导班子认

真践行正确政绩观，切实形成正确工作导向。

（2023年12月21日、22日在中央政治局学习贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想主题教育专题民主生活会上的讲话）

## 十九

我们必须牢记高质量发展是新时代的硬道理，完整、准确、全面贯彻新发展理念，把加快建设现代化经济体系、推进高水平科技自立自强、加快构建新发展格局、统筹推进深层次改革和高水平开放、统筹高质量发展和高水平安全等战略任务落实到位，完善推动高质量发展的考核评价体系，为推动高质量发展打牢基础。

（2024年1月31日在二十届中央政治局第十一次集体学习时的讲话）



图6 2024年5月22日至24日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在山东考察。这是22日下午，习近平在日照港亲切慰问港口科技工作者、运营人员、航运人员。

新华社记者 谢环驰 / 摄



## 二十

发展新质生产力是推动高质量发展的内在要求和重要着力点。这里，我重点就此谈一些认识。

去年7月以来，我在四川、黑龙江、浙江、广西等地考察调研时，提出要整合科技创新资源，引领发展战略性新兴产业和未来产业，加快形成新质生产力。12月中旬，在中央经济工作会议上，我又提出要以科技创新推动产业创新，特别是以颠覆性技术和前沿技术催生新产业、新模式、新动能，发展新质生产力。我提出新质生产力这个概念和发展新质生产力这个重大任务，主要考虑是：生产力是人类社会发展的根本动力，也是一切社会变迁和政治变革的终极原因。高质量发展需要新的生产力理论来指导，而新质生产力已经在实践中形成并展示出对高质量发展的强劲推动力、支撑力，需要我们从理论上进行总结、概括，用以指导新的发展实践。

什么是新质生产力、如何发展新质生产力？我一直在思考，也注意到学术界的一些研究成果。概括地说，新质生产力是创新起主导作用，摆脱传统经济增长方式、生产力发展路径，具有高科技、高效能、高质量特征，符合新发展理念的先进生产力质态。它由技术革命性突破、生产要素

创新性配置、产业深度转型升级而催生，以劳动者、劳动资料、劳动对象及其优化组合的跃升为基本内涵，以全要素生产率大幅提升为核心标志，特点是创新，关键在质优，本质是先进生产力。

新质生产力的显著特点是创新，既包括技术和业态模式层面的创新，也包括管理和制度层面的创新。必须继续做好创新这篇大文章，推动新质生产力加快发展。

（2024年1月31日在二十届中央政治局第十一次集体学习时的讲话）

## 二十一

牢牢把握高质量发展这个首要任务，因地制宜加快发展新质生产力。面对新一轮科技革命和产业变革，我们必须抢抓机遇，加大创新力度，培育壮大新兴产业，超前布局建设未来产业，加快建设现代化产业体系。当然，发展新质生产力不是要忽视、放弃传统产业，要防止一哄而上、泡沫化，也不要搞一种模式。各地要坚持从实际出发，先立后破、因地制宜、分类指导。要根据本地的资源禀赋、产业基础、科研条件等，有选择地推动新产业、新模式、新动能发展，用新技术改造提升传统产业，积极促进产业高端化、智能化、绿色化。

（2024年3月5日在参加

十四届全国人大二次会议江苏代表团审议时的讲话）

## 二十二

全面深化改革开放，持续增强发展的内生动力和活力。要谋划进一步全面深化改革重大举措，为推动高质量发展、推进中国式现代化持续注入强劲动力。要围绕构建高水平社会主义市场经济体制，深化要素市场化改革，建设高标准市场体系，加快完善产权保护、市场准入、公平竞争、社会信用等市场经济基础制度。要不断完善落实“两个毫不动摇”的体制机制，有效破除制约民营企业公平参与市场竞争的障碍，支持民营经济和民营企业发展壮大，激发各类经营主体的内生动力和创新活力。要深化科技体制、教育体制、人才体制等改革，着力打通束缚新质生产力发展的堵点卡点。要加大制度型开放力度，持续建设市场化、法治化、国际化一流营商环境，塑造更高水平开放型经济新优势。

（2024年3月5日在参加十四届全国人大二次会议江苏代表团审议时的讲话）

※ 这是习近平总书记2017年10月至2024年3月期间有关开创我国高质量发展新局面重要论述的节录。○

来源：求是

# 网络数据安全管理条例

## 第一章 总 则

**第一条** 为了规范网络数据处理活动，保障网络数据安全，促进网络数据依法合理有效利用，保护个人、组织的合法权益，维护国家安全和公共利益，根据《中华人民共和国网络安全法》、《中华人民共和国数据安全法》、《中华人民共和国个人信息保护法》等法律，制定本条例。

**第二条** 在中华人民共和国境内开展网络数据处理活动及其安全监督管理，适用本条例。

在中华人民共和国境外处理中华人民共和国境内自然人个人信息的活动，符合《中华人民共和国个人信息保护法》第三条第二款规定情形的，也适用本条例。

在中华人民共和国境外开展网络数据处理活动，损害中华人民共和国国家安全、公共利益或者公民、组织合法权益的，依法追究法律责任。

**第三条** 网络数据安全管理工作坚持中国共产党的领导，贯彻总体国家安全观，统筹促进网络数据开发利用与保障网络数据安全。

**第四条** 国家鼓励网络数据在各行业、各领域的创新应用，加强网络数据安全防护能力建设，支持网络数据相关技术、产品、服务创新，开展网络数据安全宣传教育和人才培养，促进网络数据开发利用和产业发展。

**第五条** 国家根据网络数据在经济社会发展中的重要程度，以及一旦遭到篡改、破坏、泄露或者非法获取、非法利用，对国家安全、公共利益或者个人、组织合法权益造成的危害程度，对网络数据实行分类分级保护。

**第六条** 国家积极参与网络数据安全相关国际规则和标准的制定，促进国际交流与合作。

**第七条** 国家支持相关行业组织按照章程，制定网络数据安全行为规范，加强行业自律，指导会员加强网络数据安全保护，提高网络数据安全保护水平，促进行业健康发展。

## 第二章 一般规定

**第八条** 任何个人、组织不得利用网络数据从事非法活动，不得从事窃取或者以其他非法方式获取网络数据、非法出售或者

非法向他人提供网络数据等非法网络数据处理活动。

任何个人、组织不得提供专门用于从事前款非法活动的程序、工具；明知他人从事前款非法活动的，不得为其提供互联网接入、服务器托管、网络存储、通讯传输等技术支持，或者提供广告推广、支付结算等帮助。

**第九条** 网络数据处理者应当依照法律、行政法规的规定和国家标准的强制性要求，在网络安全等级保护的基础上，加强网络数据安全防护，建立健全网络数据安全管理制度，采取加密、备份、访问控制、安全认证等技术措施和其他必要措施，保护网络数据免遭篡改、破坏、泄露或者非法获取、非法利用，处置网络数据安全事件，防范针对和利用网络数据实施的违法犯罪活动，并对所处理网络数据的安全承担主体责任。

**第十条** 网络数据处理者提供的网络产品、服务应当符合相关国家标准的强制性要求；发现网络产品、服务存在安全缺陷、漏洞等风险时，应当立即采取补救措施，按照规定及时告知用户

并向有关主管部门报告；涉及危害国家安全、公共利益的，网络数据处理者还应当在 24 小时内向有关主管部门报告。

**第十一条** 网络数据处理者应当建立健全网络数据安全事件应急预案，发生网络数据安全事件时，应当立即启动预案，采取措施防止危害扩大，消除安全隐患，并按照规定向有关主管部门报告。

网络数据安全事件对个人、组织合法权益造成危害的，网络数据处理者应当及时将安全事件和风险情况、危害后果、已经采取的补救措施等，以电话、短信、即时通信工具、电子邮件或者公告等方式通知利害关系人；法律、行政法规规定可以不通知的，从其规定。网络数据处理者在处置网络数据安全事件过程中发现涉嫌违法犯罪线索的，应当按照规定向公安机关、国家安全机关报案，并配合开展侦查、调查和处置工作。

**第十二条** 网络数据处理者向其他网络数据处理者提供、委托处理个人信息和重要数据的，应当通过合同等与网络数据接收方约定处理目的、方式、范围以及安全保护义务等，并对网络数据接收方履行义务的情况进行监督。向其他网络数据处理者提供、委托处理个人信息和重要数据的处理情况记录，应当至少保存 3 年。

网络数据接收方应当履行网络数据安全保护义务，并按照约定的目的、方式、范围等处理个人信息和重要数据。

两个以上的网络数据处理者共同决定个人信息和重要数据的处理目的和处理方式的，应当约定各自的权利和义务。

**第十三条** 网络数据处理者开展网络数据处理活动，影响或者可能影响国家安全的，应当按照国家有关规定进行国家安全审查。

**第十四条** 网络数据处理者因合并、分立、解散、破产等原因需要转移网络数据的，网络数据接收方应当继续履行网络数据安全保护义务。

**第十五条** 国家机关委托他人建设、运行、维护电子政务系统，存储、加工政务数据，应当按照国家有关规定经过严格的批准程序，明确受托方的网络数据处理权限、保护责任等，监督受托方履行网络数据安全保护义务。

**第十六条** 网络数据处理者为国家机关、关键信息基础设施运营者提供服务，或者参与其他公共基础设施、公共服务系统建设、运行、维护的，应当依照法律、法规的规定和合同约定履行网络数据安全保护义务，提供安全、稳定、持续的服务。

前款规定的网络数据处理者未经委托方同意，不得访问、获

取、留存、使用、泄露或者向他人提供网络数据，不得对网络数据进行关联分析。

**第十七条** 为国家机关提供服务的信息系统应当参照电子政务系统的管理要求加强网络数据安全 管理，保障网络数据安全。

**第十八条** 网络数据处理者使用自动化工具访问、收集网络数据，应当评估对网络服务带来的影响，不得非法侵入他人网络，不得干扰网络服务正常运行。

**第十九条** 提供生成式人工智能服务的网络数据处理者应当加强对训练数据和训练数据处理活动的安全管理，采取有效措施防范和处置网络数据安全风险。

**第二十条** 面向社会提供产品、服务的网络数据处理者应当接受社会监督，建立便捷的网络安全投诉、举报渠道，公布投诉、举报方式等信息，及时受理并处理网络安全投诉、举报。

### 第三章 个人信息保护

**第二十一条** 网络数据处理者在处理个人信息前，通过制定个人信息处理规则的方式依法向个人告知的，个人信息处理规则应当集中公开展示、易于访问并置于醒目位置，内容明确具体、清晰易懂，包括但不限于下列内容：

（一）网络数据处理者的名称



或者姓名和联系方式；

（二）处理个人信息的目的、方式、种类，处理敏感个人信息的必要性以及对个人权益的影响；

（三）个人信息保存期限和到期后的处理方式，保存期限难以确定的，应当明确保存期限的确定方法；

（四）个人查阅、复制、转移、更正、补充、删除、限制处理个人信息以及注销账号、撤回同意的方法和途径等。

网络数据处理者按照前款规定向个人告知收集和向其他网络数据处理者提供个人信息的目的、方式、种类以及网络数据接收方信息的，应当以清单等形式予以列明。网络数据处理者处理不满十四周岁未成年人个人信息的，还应当制定专门的个人信息处理规则。

**第二十二条** 网络数据处理者基于个人同意处理个人信息的，应当遵守下列规定：

（一）收集个人信息为提供产品或者服务所必需，不得超范围收集个人信息，不得通过误导、欺诈、胁迫等方式取得个人同意；

（二）处理生物识别、宗教信仰、特定身份、医疗健康、金融账户、行踪轨迹等敏感个人信息的，应当取得个人的单独同意；

（三）处理不满十四周岁未成年人个人信息的，应当取得未成年人的父母或者其他监护人的

同意；

（四）不得超出个人同意的个人信息处理目的、方式、种类、保存期限处理个人信息；

（五）不得在个人明确表示不同意处理其个人信息后，频繁征求同意；

（六）个人信息的处理目的、方式、种类发生变更的，应当重新取得个人同意。

法律、行政法规规定处理敏感个人信息应当取得书面同意的，从其规定。

**第二十三条** 个人请求查阅、复制、更正、补充、删除、限制处理其个人信息，或者个人注销账号、撤回同意的，网络数据处理者应当及时受理，并提供便捷的支持个人行使权利的方法和途径，不得设置不合理条件限制个人的合理请求。

**第二十四条** 因使用自动化采集技术等无法避免采集到非必要个人信息或者未依法取得个人同意的个人信息，以及个人注销账号的，网络数据处理者应当删除个人信息或者进行匿名化处理。法律、行政法规规定的保存期限未届满，或者删除、匿名化处理个人信息从技术上难以实现的，网络数据处理者应当停止除存储和采取必要的安全保护措施之外的处理。

**第二十五条** 对符合下列条件的个人信息转移请求，网络数

据处理者应当为个人指定的其他网络数据处理者访问、获取有关个人信息提供途径：

（一）能够验证请求人的真实身份；

（二）请求转移的是本人同意提供的或者基于合同收集的个人信息；

（三）转移个人信息具备技术可行性；

（四）转移个人信息不损害他人合法权益。

请求转移个人信息次数等明显超出合理范围的，网络数据处理者可以根据转移个人信息的成本收取必要费用。

**第二十六条** 中华人民共和国境外网络数据处理者处理境内自然人个人信息，依照《中华人民共和国个人信息保护法》第五十三条规定在境内设立专门机构或者指定代表的，应当将有关机构的名称或者代表的姓名、联系方式等报送所在地设区的市级网信部门；网信部门应当及时通报同级有关主管部门。

**第二十七条** 网络数据处理者应当定期自行或者委托专业机构对其处理个人信息遵守法律、行政法规的情况进行合规审计。

**第二十八条** 网络数据处理者处理 1000 万人以上个人信息的，还应当遵守本条例第三十条、第三十二条对处理重要数据的网络数据处理者（以下简称重要数

据的处理者)作出的规定。

## 第四章 重要数据安全

**第二十九条** 国家数据安全工作协调机制统筹协调有关部门制定重要数据目录,加强对重要数据的保护。各地区、各部门应当按照数据分类分级保护制度,确定本地区、本部门以及相关行业、领域的重要数据具体目录,对列入目录的网络数据进行重点保护。

网络数据处理者应当按照国家有关规定识别、申报重要数据。对确认为重要数据的,相关地区、部门应当及时向网络数据处理者告知或者公开发布。网络数据处理者应当履行网络数据安全保护责任。

国家鼓励网络数据处理者使用数据标签标识技术和产品,提高重要数据安全水平。

**第三十条** 重要数据的处理者应当明确网络数据安全负责人和网络数据安全管理机构。网络数据安全管理机构应当履行下列网络数据安全保护责任:

(一)制定实施网络数据安全管理制度、操作规程和网络数据安全事件应急预案;

(二)定期组织开展网络数据安全风险监测、风险评估、应急演练、宣传教育培训等活动,及时处置网络数据安全风险和事件;

(三)受理并处理网络数据安

全投诉、举报。

网络数据安全负责人应当具备网络数据安全专业知识和相关管理工作经历,由网络数据处理者管理层成员担任,有权直接向有关主管部门报告网络数据安全情况。

掌握有关主管部门规定的特定种类、规模的重要数据的网络数据处理者,应当对网络数据安全负责人和关键岗位的人员进行安全背景审查,加强相关人员培训。审查时,可以申请公安机关、国家安全机关协助。

**第三十一条** 重要数据的处理者提供、委托处理、共同处理重要数据前,应当进行风险评估,但是属于履行法定职责或者法定义务的除外。

风险评估应当重点评估下列内容:

(一)提供、委托处理、共同处理网络数据,以及网络数据接收方处理网络数据的目的、方式、范围等是否合法、正当、必要;

(二)提供、委托处理、共同处理的网络数据遭到篡改、破坏、泄露或者非法获取、非法利用的风险,以及对国家安全、公共利益或者个人、组织合法权益带来的风险;

(三)网络数据接收方的诚信、守法等情况;

(四)与网络数据接收方订立或者拟订立的相关合同中关于网

络数据安全的要求能否有效约束网络数据接收方履行网络数据安全保护义务;

(五)采取或者拟采取的技术和管理措施等能否有效防范网络数据遭到篡改、破坏、泄露或者非法获取、非法利用等风险;

(六)有关主管部门规定的其他评估内容。

**第三十二条** 重要数据的处理者因合并、分立、解散、破产等可能影响重要数据安全的,应当采取措施保障网络数据安全,并向省级以上有关主管部门报告重要数据处置方案、接收方的名称或者姓名和联系方式等;主管部门不明确的,应当向省级以上数据安全工作协调机制报告。

**第三十三条** 重要数据的处理者应当每年度对其网络数据处理活动开展风险评估,并向省级以上有关主管部门报送风险评估报告,有关主管部门应当及时通报同级网信部门、公安机关。

风险评估报告应当包括下列内容:

(一)网络数据处理者基本信息、网络数据安全管理机构信息、网络数据安全负责人姓名和联系方式等;

(二)处理重要数据的目的、种类、数量、方式、范围、存储期限、存储地点等,开展网络数据处理活动的情况,不包括网络数据内容本身;

(三) 网络数据安全管理制度及实施情况, 加密、备份、标签标识、访问控制、安全认证等技术措施和其他必要措施及其有效性;

(四) 发现的网络数据安全风险, 发生的网络数据安全事件及处置情况;

(五) 提供、委托处理、共同处理重要数据的风险评估情况;

(六) 网络数据出境情况;

(七) 有关主管部门规定的其他报告内容。

处理重要数据的大型网络平台服务提供者报送的风险评估报告, 除包括前款规定的内容外, 还应当充分说明关键业务和供应链网络数据安全等情况。

重要数据的处理者存在可能危害国家安全的重要数据处理活动的, 省级以上有关主管部门应当责令其采取整改或者停止处理重要数据等措施。重要数据的处理者应当按照有关要求立即采取措施。

## 第五章 网络数据跨境安全管理

**第三十四条** 国家网信部门统筹协调有关部门建立国家数据出境安全管理专项工作机制, 研究制定国家网络数据出境安全管理相关政策, 协调处理网络数据出境安全重大事项。

**第三十五条** 符合下列条件之一的, 网络数据处理者可以向

境外提供个人信息:

(一) 通过国家网信部门组织的数据出境安全评估;

(二) 按照国家网信部门的规定经专业机构进行个人信息保护认证;

(三) 符合国家网信部门制定的关于个人信息出境标准合同的规定;

(四) 为订立、履行个人作为一方当事人的合同, 确需向境外提供个人信息;

(五) 按照依法制定的劳动规章制度和依法签订的集体合同实施跨境人力资源管理, 确需向境外提供员工个人信息;

(六) 为履行法定职责或者法定义务, 确需向境外提供个人信息;

(七) 紧急情况下为保护自然人的生命健康和财产安全, 确需向境外提供个人信息;

(八) 法律、行政法规或者国家网信部门规定的其他条件。

**第三十六条** 中华人民共和国缔结或者参加的国际条约、协定对向中华人民共和国境外提供个人信息的条件等有规定的, 可以按照其规定执行。

**第三十七条** 网络数据处理者在中华人民共和国境内运营中收集和产生的重要数据确需向境外提供的, 应当通过国家网信部门组织的数据出境安全评估。网络数据处理者按照国家有关规定

识别、申报重要数据, 但未被相关地区、部门告知或者公开发布为重要数据的, 不需要将其作为重要数据申报数据出境安全评估。

**第三十八条** 通过数据出境安全评估后, 网络数据处理者向境外提供个人信息和重要数据的, 不得超出评估时明确的数据出境目的、方式、范围和种类、规模等。

**第三十九条** 国家采取措施, 防范、处置网络数据跨境安全风险和威胁。任何个人、组织不得提供专门用于破坏、避开技术措施的程序、工具等; 明知他人从事破坏、避开技术措施等活动的, 不得为其提供技术支持或者帮助。

## 第六章 网络平台服务提供者义务

**第四十条** 网络平台服务提供者应当通过平台规则或者合同等明确接入其平台的第三方产品和服务提供者的网络数据安全保护义务, 督促第三方产品和服务提供者加强网络数据安全管理工作。

预装应用程序的智能终端等设备生产者, 适用前款规定。

第三方产品和服务提供者违反法律、行政法规的规定或者平台规则、合同约定开展网络数据处理活动, 对用户造成损害的, 网络平台服务提供者、第三方产品和服务提供者、预装应用程序的智能终端等设备生产者应当依



法承担相应责任。

国家鼓励保险公司开发网络数据损害赔偿责任险种，鼓励网络平台服务提供者、预装应用程序的智能终端等设备生产者投保。

**第四十一条** 提供应用程序分发服务的网络平台服务提供者，应当建立应用程序核验规则并开展网络数据安全相关核验。发现待分发或者已分发的应用程序不符合法律、行政法规的规定或者国家标准的强制性要求的，应当采取警示、不予分发、暂停分发或者终止分发等措施。

**第四十二条** 网络平台服务提供者通过自动化决策方式向个人进行信息推送的，应当设置易于理解、便于访问和操作的个性化推荐关闭选项，为用户提供拒绝接收推送信息、删除针对其个人特征的用户标签等功能。

**第四十三条** 国家推进网络身份认证公共服务建设，按照政府引导、用户自愿原则进行推广应用。

鼓励网络平台服务提供者支持用户使用国家网络身份认证公共服务登记、核验真实身份信息。

**第四十四条** 大型网络平台服务提供者应当每年度发布个人信息保护社会责任报告，报告内容包括但不限于个人信息保护措施和成效、个人行使权利的申请受理情况、主要由外部成员组成的个人信息保护监督机构履行职

责情况等。

**第四十五条** 大型网络平台服务提供者跨境提供网络数据，应当遵守国家数据跨境安全管理要求，健全相关技术和管理措施，防范网络数据跨境安全风险。

**第四十六条** 大型网络平台服务提供者不得利用网络数据、算法以及平台规则等从事下列活动：

（一）通过误导、欺诈、胁迫等方式处理用户在平台上产生的网络数据；

（二）无正当理由限制用户访问、使用其在平台上产生的网络数据；

（三）对用户实施不合理的差别待遇，损害用户合法权益；

（四）法律、行政法规禁止的其他活动。

## 第七章 监督管理

**第四十七条** 国家网信部门负责统筹协调网络数据安全和相关监督管理工作。

公安机关、国家安全机关依照有关法律、行政法规和本条例的规定，在各自职责范围内承担网络数据安全监督管理职责，依法防范和打击危害网络数据安全的违法犯罪活动。

国家数据管理部门在具体承担数据管理工作中履行相应的网络数据安全职责。

各地区、各部门对本地区、

本部门工作中收集和产生的网络数据及网络数据安全负责。

**第四十八条** 各有关主管部门承担本行业、本领域网络数据安全监督管理职责，应当明确本行业、本领域网络数据安全保护工作机构，统筹制定并组织实施本行业、本领域网络数据安全事件应急预案，定期组织开展本行业、本领域网络数据安全风险评估，对网络数据处理者履行网络数据安全保护义务情况进行监督检查，指导督促网络数据处理者及时对存在的风险隐患进行整改。

**第四十九条** 国家网信部门统筹协调有关主管部门及时汇总、研判、共享、发布网络数据安全风险相关信息，加强网络数据安全信息共享、网络数据安全风险和威胁监测预警以及网络数据安全事件应急处置工作。

**第五十条** 有关主管部门可以采取下列措施对网络数据安全进行监督检查：

（一）要求网络数据处理者及其相关人员就监督检查事项作出说明；

（二）查阅、复制与网络数据安全有关的文件、记录；

（三）检查网络数据安全措施运行情况；

（四）检查与网络数据处理活动有关的设备、物品；

（五）法律、行政法规规定的其他必要措施。

网络数据处理者应当对有关主管部门依法开展的网络安全监督检查予以配合。

**第五十一条** 有关主管部门开展网络安全监督检查，应当客观公正，不得向被检查单位收取费用。

有关主管部门在网络安全监督检查中不得访问、收集与网络安全无关的业务信息，获取的信息只能用于维护网络安全的需要，不得用于其他用途。

有关主管部门发现网络数据处理者的网络数据处理活动存在较大安全风险的，可以按照规定的权限和程序要求网络数据处理者暂停相关服务、修改平台规则、完善技术措施等，消除网络安全隐患。

**第五十二条** 有关主管部门在开展网络安全监督检查时，应当加强协同配合、信息沟通，合理确定检查频次和检查方式，避免不必要的检查和交叉重复检查。

个人信息保护合规审计、重要数据风险评估、重要数据出境安全评估等应当加强衔接，避免重复评估、审计。重要数据风险评估和网络安全等级测评的内容重合的，相关结果可以互相采信。

**第五十三条** 有关主管部门及其工作人员对在履行职责中知悉的个人隐私、个人信息、商业秘密、保密商务信息等网络数据应当依法予以保密，不得泄露或

者非法向他人提供。

**第五十四条** 境外的组织、个人从事危害中华人民共和国国家安全、公共利益，或者侵害中华人民共和国公民的个人信息权益的网络数据处理活动的，国家网信部门会同有关主管部门可以依法采取相应的必要措施。

## 第八章 法律责任

**第五十五条** 违反本条例第十二条、第十六条至第二十条、第二十二条、第四十条第一款和第二款、第四十一条、第四十二条规定的，由网信、电信、公安等主管部门依据各自职责责令改正，给予警告，没收违法所得；拒不改正或者情节严重的，处100万元以下罚款，并可以责令暂停相关业务、停业整顿、吊销相关业务许可证或者吊销营业执照，对直接负责的主管人员和其他直接责任人员可以处1万元以上10万元以下罚款。

**第五十六条** 违反本条例第十三条规定的，由网信、电信、公安、国家安全等主管部门依据各自职责责令改正，给予警告，可以并处10万元以上100万元以下罚款，对直接负责的主管人员和其他直接责任人员可以处1万元以上10万元以下罚款；拒不改正或者情节严重的，处100万元以上1000万元以下罚款，并可以责令暂停相关业务、停业整顿、

吊销相关业务许可证或者吊销营业执照，对直接负责的主管人员和其他直接责任人员处10万元以上100万元以下罚款。

**第五十七条** 违反本条例第二十九条第二款、第三十条第二款和第三款、第三十一条、第三十二条规定的，由网信、电信、公安等主管部门依据各自职责责令改正，给予警告，可以并处5万元以上50万元以下罚款，对直接负责的主管人员和其他直接责任人员可以处1万元以上10万元以下罚款；拒不改正或者造成大量数据泄露等严重后果的，处50万元以上200万元以下罚款，并可以责令暂停相关业务、停业整顿、吊销相关业务许可证或者吊销营业执照，对直接负责的主管人员和其他直接责任人员处5万元以上20万元以下罚款。

**第五十八条** 违反本条例其他有关规定的，由有关主管部门依照《中华人民共和国网络安全法》、《中华人民共和国数据安全法》、《中华人民共和国个人信息保护法》等法律的有关规定追究法律责任。

**第五十九条** 网络数据处理者存在主动消除或者减轻违法行为危害后果、违法行为轻微并及时改正且没有造成危害后果或者初次违法且危害后果轻微并及时改正等情形的，依照《中华人民共和国行政处罚法》的规定从轻、

减轻或者不予行政处罚。

**第六十条** 国家机关不履行本条例规定的网络数据安全保护义务的，由其上级机关或者有关主管部门责令改正；对直接负责的主管人员和其他直接责任人员依法给予处分。

**第六十一条** 违反本条例规定，给他人造成损害的，依法承担民事责任；构成违反治安管理行为的，依法给予治安管理处罚；构成犯罪的，依法追究刑事责任。

## 第九章 附 则

**第六十二条** 本条例下列用语的含义：

（一）网络数据，是指通过网络处理和产生的各种电子数据。

（二）网络数据处理活动，是指网络数据的收集、存储、使用、加工、传输、提供、公开、删除

等活动。

（三）网络数据处理者，是指在网络数据处理活动中自主决定处理目的和处理方式的个人、组织。

（四）重要数据，是指特定领域、特定群体、特定区域或者达到一定精度和规模，一旦遭到篡改、破坏、泄露或者非法获取、非法利用，可能直接危害国家安全、经济运行、社会稳定、公共健康和安全的数据。

（五）委托处理，是指网络数据处理者委托个人、组织按照约定的目的和方式开展的网络数据处理活动。

（六）共同处理，是指两个以上的网络数据处理者共同决定网络数据的处理目的和处理方式的网络数据处理活动。

（七）单独同意，是指个人针

对其个人信息进行特定处理而专门作出具体、明确的同意。

（八）大型网络平台，是指注册用户 5000 万以上或者月活跃用户 1000 万以上，业务类型复杂，网络数据处理活动对国家安全、经济运行、国计民生等具有重要影响的网络平台。

**第六十三条** 开展核心数据的网络数据处理活动，按照国家有关规定执行。

自然人因个人或者家庭事务处理个人信息的，不适用本条例。

开展涉及国家秘密、工作秘密的网络数据处理活动，适用《中华人民共和国保守国家秘密法》等法律、行政法规的规定。

**第六十四条** 本条例自 2025 年 1 月 1 日起施行。○

来源：国务院

# 国家重点研发计划“工程科学与综合交叉”重点专项管理实施细则（暂行）

## 第一章 总则

**第一条** 为深入贯彻落实中央科技委决策部署，加强和规范国家重点研发计划重点专项的

管理，明确工作职责和程序，根据《国家重点研发计划管理暂行办法》（国科发资〔2024〕28号）制定本细则。

**第二条** 本细则适用于由中

国工程院作为主责单位的国家重点研发计划“工程科学与综合交叉”重点专项（以下简称“重点专项”）的管理工作。

**第三条** 中国工程院充分发



挥国家战略科技力量作用，引领工程科技创新，加快突破关键核心技术，坚持面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求、面向人民生命健康，坚持为国选题、为国立项、为国攻关，服务国家重大战略需求，聚焦重大工程建设中需要解决的和能够引领未来工程建设发展的关键核心科学问题，坚持需求导向、目标导向、问题导向。

**第四条** 中国工程院负责重点专项组织实施，对重点专项实施绩效负总责。专业机构受中国工程院委托，具体承担项目管理工作。项目牵头单位负责项目的具体组织实施工作。重点专项管理全流程纳入统一的国家科技管理信息系统。

## 第二章 组织管理与职责

**第五条** 中国工程院是重点专项的主责单位，教育部、中国科学院、国家自然科学基金委员会是重点专项的工作组成员单位。

**第六条** 中国工程院作为主责单位，会同相关部门开展以下工作：

（一）强化国家高端智库职能，坚持为国选题、为国立项、为国攻关，服务国家重大战略需求，聚焦重大工程建设中需要解决的和能够引领未来工程建设发展的关键核心科学问题，编制并发布项目申报指南；

（二）负责项目立项批复、审核重大调整事项及批复、向项目牵头单位下达综合绩效评价结论；

（三）对重点专项实施过程和进展进行监督评估，对受委托专业机构管理工作进行监督；

（四）指导专业机构按年度编制重点专项执行情况报告，加强制度建设，规范保密等工作责任体系；

（五）建立覆盖资金管理使用全过程的资金监督机制；

（六）建立重点专项组织实施的跨部门协调保障机制，做好关键节点考核、监督评估、项目综合绩效评价工作及成果转化应用情况跟踪评价，推动重点专项科技成果转化和产业化应用。

**第七条** 工作组成员单位通过跨部门协调机制，共同推动重点专项组织实施，主要职责是：

（一）配合开展重点专项组织管理工作，凝练提出“工程科学与综合交叉”领域重大研发需求；

（二）参与重点专项年度项目申报指南编制；

（三）参与重点专项年度与中期管理、监督检查和绩效评估等；

（四）为专项组织实施提供协调保障支撑，加强对所推荐单位承担任务、资金使用等情况的管理与监督；

（五）做好相关政策、规划、标准及重大工程等与重点专项组织实施工作的衔接，协调推动项

目成果的转移转化与应用示范。

**第八条** 项目管理专业机构根据国家重点研发计划相关管理规定和任务委托协议，开展具体项目管理工作，对实现任务目标负责。主要职责是：

（一）加强相关领域科技发展跟踪研判，持续加强专业化能力建设；

（二）根据管理制度和中国工程院要求，制定符合重点专项特点的管理工作方案；

（三）支撑编制重点专项年度项目申报指南；

（四）组织开展项目申报受理、形式审查，制定评审工作方案、组织开展项目评审，提出年度项目立项安排建议，与项目牵头单位签订项目任务书等立项工作；

（五）组织开展项目资金拨付、中期检查、年度执行情况报告等过程管理工作；

（六）按程序对项目调整事项进行审核论证，并对除重大调整外的项目调整进行批复；

（七）按要求报告重点专项及其项目实施情况和重大事项，接受监督；

（八）在主责单位指导下，做好关键节点考核、监督评估、项目综合绩效评价工作及成果转化应用情况跟踪评价，促进重大成果产出和应用推广；

（九）加强对参与项目管理活

动各类专家的指导与监督，按照公开、公平、公正和利益回避的原则，充分发挥专家作用，支撑具体项目管理工作。

**第九条** 项目牵头单位负责项目的具体组织实施工作，强化法人责任，对项目任务目标实现、资金合规使用与管理等负直接责任。主要职责是：

（一）按照签订的项目任务书组织实施项目，履行任务书各条款，落实配套条件，按进度高质量完成项目研发任务和目标；

（二）严格执行国家重点研发计划各项管理规定，建立健全科研、财务、诚信、安全等内部管理制度，落实国家激励科研人员的政策措施；

（三）按要求及时编报项目执行情况报告、信息报表、科技报告等；

（四）及时报告项目和课题执行中出现的重大事项，按程序报批需要调整的事项；

（五）接受指导、检查并配合做好监督、评估和综合绩效评价等工作；

（六）严格执行国家有关财经法规和财务制度，依据项目任务书（含预算）正确使用、调剂、管理项目资金；

（七）履行保密、知识产权保护等责任和义务，推动项目成果转化应用；

（八）加强项目课题间的组织

协调。积极推动落实课题研发任务，督促和协助项目负责人定期组织课题间的协调，做好课题检查、评估和验收等工作。

**第十条** 项目下设课题的，课题承担单位应强化法人责任，按照项目实施的总体要求完成课题任务目标；课题任务须接受项目牵头单位的指导、协调和监督，对项目牵头单位负责。

### **第三章 机构设置**

**第十一条** 设立重点专项工作领导小组（以下简称“领导小组”），由中国工程院主要负责同志担任领导小组组长，中国工程院负责同志担任副组长。统筹重点专项整体规划、战略布局和管理实施。

**第十二条** 领导小组下设中国工程院重点专项工作专班，具体职责包括制度起草、协调对接、项目监管、支撑保障等日常管理工作，对领导小组负责。

**第十三条** 中国工程院组建具有广泛覆盖性、领域代表性、年龄结构合理、体现综合交叉的重点专项指南编制专家组，包括总体专家组和领域专家组。在领导小组领导下，开展重点专项指南编制工作。专家组组成应充分体现学科领域的交叉性，覆盖重点专项任务研究领域，并包括实施方案编制组专家和中青年专家等。重点专项严格实行专家回避制度，参与本重点专项实施方案

编制和本年度项目指南编制工作的专家组成员不得申请本重点专项项目。中国工程院各学部要认真研究重点专项工作，为指南编制提供技术和人员支持，并将专项工作纳入学部年度重点工作。

**第十四条** 总体专家组负责研究提出指南编制具体要求、工作安排和进度计划，对领域专家组的工作进行指导、协调，对各领域指南进行统筹把关。领域专家组依据相关要求，启动编制工作，结合征集的指南建议，完成各领域年度指南编制任务。

**第十五条** 总体专家组组长对指南编制工作负总责，各领域专家组组长对本领域的指南编制工作负总责，主持协调本领域组的日常工作；专家组各成员应遵守国家法律、法规和规章制度，履行保密义务，秉持认真负责、客观公正、廉洁自律等原则，依照组长的协调安排开展工作。

**第十六条** 专家组通过召开全体会议、专题会议或书面审议等方式研究决定重要事项，由组长召集并主持，三分之二以上（含）成员出席为有效，形成会议纪要。依据指南编制要求变化以及专家履职尽责情况，原则上每年对三分之一专家组成员予以动态调整。

### **第四章 项目指南编制与发布**

**第十七条** 指南编制工作应

体现面向国家战略需求的重大工程的基础科学问题、关键共性技术研究，强化前瞻性、引领性布局，体现工程学科与综合交叉。指南应充分遵循实施方案提出的总体目标和任务设置，避免交叉重复，明确形式审查条件和项目遴选方式。项目应相对独立完整，体量适度，设立可考核可评估的具体指标。具体原则是：

（一）常态化开展重点专项相关的战略咨询研究。指南编制工作与科技战略咨询研究工作深度融合，结合重大咨询项目，开展选题征集与凝练；

（二）充分征求有关部门、企业在重大工程中存在的迫切需求，在关系国家未来竞争力和长远发展的基础前沿领域，开展综合交叉的科学问题研究；

（三）项目申报指南与第三方科技评估结果结合，聚焦关键核心技术领域开展基础性战略性研究；

（四）项目申报指南应明确项目遴选方式，主要通过公开竞争择优确定项目牵头单位。对于组织强度要求较高、行业内优势单位较为集中或典型应用示范区域特征明显的指南方向，也可采取定向择优等方式遴选项目牵头单位，但须对申报单位的资质、与项目相关的研究基础以及配套资金等提出明确要求。

**第十八条** 发布指南时应明

确本批指南国拨经费限额，每项任务的拟支持项目数、单位申报资质、配套资金要求、形式审查条件等。自指南发布日到项目申报受理截止日，原则上不少于50天（其中网上填报受理期不少于30天）。

**第十九条** 中国工程院会同相关部门（单位）以实施方案为依据，聚焦工程科技领域重大战略任务，组织编制重点专项年度项目申报指南。主要工作流程是：

（一）领导小组提出项目指南编制总体要求；

（二）工作专班根据需要，在一定范围内发布选题建议征集通知；

（三）根据国家战略需求及重点专项实施方案任务部署，由各领域专家组结合征集的选题建议研究编制指南初稿；

（四）指南初稿提交至工作专班和总体专家组进行形式审查及内容审查；

（五）各领域专家组依据反馈意见修改后形成指南讨论稿，提交总体专家组会议审议，报院党组审核通过后，向有关部门书面征求意见；

（六）工作专班组织专家组根据意见修改完善形成指南查重稿，依托国家科技管理信息系统对指南进行查重；

（七）工作专班组织相关领域专家组对查重结果开展研判，将

反馈意见提交总体专家组会议决议，并形成指南建议稿；

（八）指南建议稿在国家科技管理信息系统向社会公开征求意见；

（九）指南发布稿（报批稿）报院党组审核批准后正式在国家科技管理信息系统向社会公开发布。

## 第五章 项目申报、评审及立项

**第二十条** 重点专项综合运用公开竞争、定向择优、定向委托等多种项目遴选方式，在全国范围内优选确定项目承担单位，可采取“揭榜挂帅”、“赛马制”、“链主制”、青年科学家项目等新型组织模式，通过第三方测试、真实应用场景考核等方式，推动产学研用深度融合，提升项目实施绩效。

**第二十一条** 项目牵头单位应按照项目申报指南的要求，通过国家科技管理信息系统提交项目申报书。

**第二十二条** 多个单位组成申报团队联合申报的，应签订联合申报协议，并明确一家单位作为项目牵头单位。项目下设课题的，也应同时明确课题承担单位。

**第二十三条** 境外科研机构、高等学校、企业等在中国大陆境内注册满1年的独立法人机构，可根据指南要求牵头或参与项目申报；受聘于在中国大陆境内注



册的独立法人机构的外籍科学家及港、澳、台地区科研人员，符合指南要求的可作为项目（课题）负责人申报。

**第二十四条** 申报项目应明确项目（课题）负责人。项目（课题）负责人应具有领导和组织开展创新性研究的能力，科研信用记录良好，原则上不超过60周岁，工作时间等符合指南要求。项目（课题）负责人及研发骨干人员按相关规定实行限项管理。

**第二十五条** 专业机构根据指南要求开展项目申报受理。专业机构按照申报指南和形式审查要求对申报书进行形式审查工作，将审查结果报中国工程院备案，并通过国家科技管理信息系统向申报者反馈。对于不符合要求的项目申请，按形式审查不通过处理。

**第二十六条** 专业机构应制定年度项目评审工作方案，并报中国工程院审核。依照评审工作方案，组织专家采用网络评审、通讯评审、会议评审、现场考察评估等方式开展评审。

**第二十七条** 项目评审专家应在工程科技领域具有丰富经验、客观公正的高水平专家，原则上通过国家科技专家库随机抽取专家，并实行回避制度。项目立项评审专家通过事前诚信审查、事中提醒监督、事后抽查评价等方式，从严管理和使用评审专家。

**第二十八条** 为确保合理的竞争度，对于非定向申报的单个指南方向，若申报团队数量不多于拟支持的项目数量，该指南方向将由指南编制专家组和中国工程院审核研判。针对研判后继续启动项目评审立项程序的指南方向，提高评审立项标准；针对研判后不适宜开展评审立项的指南方向，择期重新研究，进一步修改完善后再次发布。

**第二十九条** 专业机构根据指南要求和评审结果，按照择优支持原则提出年度项目立项安排建议，报中国工程院进行合规性审核。

**第三十条** 中国工程院对项目立项程序的规范性、拟立项项目与指南的相符性等进行审核，严格审核把关，重点加强对申报团队能力的评价，确保立项情况与指南任务目标相符，报院党组审定。专业机构根据中国工程院审核意见，确定拟立项项目清单，并按要求对社会公示。

**第三十一条** 中国工程院对拟立项项目下达立项批复，并组织专业机构与项目牵头单位签订项目任务书。项目下设课题的，项目牵头单位也应与课题承担单位签订课题任务书。项目（课题）任务书应以项目申报书、专家评审意见和立项批复为依据，突出绩效管理，明确考核目标、考核指标、考核方式方法，并履行普

及科学技术知识的要求及义务。

**第三十二条** 专业机构按任务书约定、项目实施进展和任务完成情况及时向项目牵头单位拨款。

## 第六章 项目过程管理

**第三十三条** 项目牵头单位执行项目年度报告制度，按照要求于每年11月底前，通过信息系统向专业机构报送项目年度执行情况报告。项目执行不足3个月的，可在下一年度一并上报。

**第三十四条** 项目实施中须作出调整的，按照以下调整流程执行。

（一）变更项目牵头单位、项目负责人、项目实施周期、项目主要研究目标和考核指标、项目预算总额调剂等重大调整事项，由项目牵头单位提出书面申请，专业机构提出调整建议，报中国工程院审核批复。专业机构也可根据项目年度、中期检查等情况直接提出调整意见，报中国工程院审核批复；

（二）变更课题承担单位、课题参与单位、课题负责人、课题实施周期、课题主要研究目标和考核指标、课题间预算调剂等重要调整事项，由项目牵头单位提出书面申请，专业机构审核批复，并报中国工程院备案；

（三）其他一般性调整事项，由项目牵头单位负责审核批复，

并报专业机构备案，专业机构做好指导和管理。

**第三十五条** 项目实行中期检查制度。执行周期在3年及以上的项目，在项目实施中期，专业机构应对项目执行情况进行中期检查，对项目能否完成预定任务目标做出判断。各项目应形成中期执行情况报告，配合开展中期检查。专业机构在开展中期检查的基础上，形成本年度中期检查情况报告并报中国工程院备案。具有明确应用示范目标的项目，专业机构可邀请中国工程院有关部门和地方共同开展中期检查工作。

**第三十六条** 项目牵头单位应在项目执行期满2个月内完成综合绩效评价材料准备，项目下设课题的，应组织完成课题绩效评价，并通过信息系统提交相关材料。

**第三十七条** 项目执行期满6个月内，中国工程院指导专业机构依据项目任务书和有关要求分类开展综合绩效评价。

专业机构制定年度项目综合绩效评价工作方案报中国工程院审核，并根据评价结果形成本年度综合绩效评价情况报告报中国工程院备案，由中国工程院向项目牵头单位下达综合绩效评价结论。项目综合绩效评价应突出目标导向、成果导向，注重核心目标和代表性成果，严把项目验

收关。

**第三十八条** 项目综合绩效评价结论分为通过、未通过两类。

（一）按期保质完成项目任务书确定的目标和任务，为通过综合绩效评价；

（二）未完成项目任务书确定的主要目标和任务，按不通过综合绩效评价处理；

（三）提供的综合绩效评价文件、资料、数据存在弄虚作假，或未按相关要求报批重大调整事项，或不配合综合绩效评价工作的，按不通过综合绩效评价处理。

**第三十九条** 对未通过综合绩效评价的项目，按原渠道上缴项目结余中央财政资金，项目负责人和项目牵头单位暂停3年本重点专项申报资格。

**第四十条** 项目因故不能按期完成须申请延期的，项目牵头单位应于项目执行期结束6个月前提出延期申请，由专业机构研究提出意见，报中国工程院审核批复。项目延期原则上只能申请1次，延期时间原则上不超过1年。

**第四十一条** 项目实施中遇到下列情况之一的，项目任务书签署方均可提出撤销或终止项目的建议。专业机构应对撤销或终止建议研究提出意见，报中国工程院批复后执行。

（一）经实践证明，项目技术路线不合理、不可行，或项目无法实现任务书规定的进度且无改

进办法；

（二）项目执行中出现严重的知识产权纠纷；

（三）完成项目任务所需的资金、原材料、人员、支撑条件等未落实或发生改变导致研究无法正常进行；

（四）组织管理不力或者发生重大问题导致项目无法进行；

（五）项目实施过程中出现严重违规违纪行为，严重科研不端行为，不按规定进行整改或拒绝整改；

（六）项目实施过程中出现国家政策法规变化等不可抗因素导致项目无法继续实施的情况；

（七）项目任务书规定其他可以撤销或终止的情况。

撤销或终止项目的，项目牵头单位应对已开展工作、经费使用、已购置设备仪器、阶段性成果、知识产权等情况做出书面报告，经专业机构核查报中国工程院批准后，依规完成后续相关工作。

## 第七章 重点专项管理和总结验收

**第四十二条** 工作专班组织专业机构梳理汇总项目执行情况，形成重点专项年度执行情况报告，经中国工程院审核后，于每年12月底前报送科技部。

执行期5年及以上的重点专项，工作专班组织专业机构编制

重点专项实施中期执行情况报告，报院领导审定后，报送科技部。

**第四十三条** 重点专项执行期间，由于形势变化或实施需要，需对重点专项主要任务（含概算）进行重大调整或终止重点专项执行的，经院党组审批后，报送科技部、财政部审核，按程序报批。

**第四十四条** 重点专项执行期结束后，专业机构应对重点专项实施情况进行总结，报中国工程院。工作专班在此基础上组织对重点专项的目标实现程度、任务布局合理性、组织管理水平、效果与影响等做出全面总结。重点专项实施情况总结报告于专项执行期结束6个月内报送科技部。

**第四十五条** 加强重点专项的保密制度建设，完善保密工作责任体系，对涉及科技敏感信息和国家秘密的重点专项项目及其成果，按有关规定执行并严格管理，分级分类做好信息安全管理，确保国家秘密安全。

**第四十六条** 重点专项形成的知识产权归属、使用和转移，按照国家有关法律、法规和政策执行。为了国家安全、国家利益和重大社会公共利益的需要，国家可许可他人有偿实施或者无偿实施项目形成的知识产权。项目形成的研究成果，应标注“国家重点研发计划资助”字样及项目编号，英文标注：“National Key R&D Program of China”。专

利申请按规定声明重点专项项目信息。

## **第八章 多元化投入与资金管理**

**第四十七条** 坚持多元化原则筹措资金，在中央财政资金支持的基础上，鼓励地方、企业、金融资本及其他社会资金共同投入。

**第四十八条** 通过前补助、后补助、“里程碑”拨款等方式对具体项目分类支持。中央财政资金的安排使用，要严格执行国家预算管理及财政国库管理的有关规定，全面实施预算绩效管理，实行专账管理，专款专用，建立覆盖资金管理使用全过程的资金监督机制，提高资金使用效益。项目经费使用中涉及政府采购的，应当按政府采购法律制度规定执行。

## **第九章 监督与评估**

**第四十九条** 建立全流程、多层次的监督评估体系，夯实各监督主体责任，建立监督制约机制，并将其嵌入重点专项管理全过程。

**第五十条** 监督评估工作应以国家重点研发计划的相关制度规定、重点专项实施方案、项目申报指南、立项批复、任务书、协议等为依据，按照责权一致的原则和放管服要求组织开展。接受监督评估的单位应当建立健全

内控制度和常态化的自查自纠机制，加强风险防控，强化管理人员、科研人员的责任意识、绩效意识、自律意识和科研诚信，积极配合监督评估工作。

**第五十一条** 中国工程院会同工作组成员单位对重点专项实施过程和进展进行监督评估，对受委托专业机构管理工作进行监督，配合科技部、财政部开展监督评估。包括对年度立项、组织实施和资金使用等开展日常监督评估；对重点专项的目标实现、成果产出、转化应用等进行检查核验和评估评价；对专业机构管理工作的科学性、规范性，及其在项目管理过程中的履职尽责和绩效情况进行监督指导。还包括对项目立项的规范性、公正性等进行监督；对重大项目执行、绩效目标实现情况等进行监督检查；对监督检查发现的问题，及时处理、督促整改，对存在的违规行为进行调查处理；按要求组织相关责任主体报送项目管理和实施进展情况；加强对相关数据的汇总、审核、把关等。明确当年监督评估的范围、重点、时间、方式等，避免交叉重复。

**第五十二条** 专业机构对项目执行情况和项目承担单位开展日常监督，对项目实施进度、计划调整和资金使用、实施绩效等情况行评估监督；对项目承担单位法人责任落实情况进行监督评

估；对参与项目立项、过程管理和验收等评审专家履职尽责情况监督评估；配合做好专项的监督评估。专业机构通过年度报告、中期检查等方式，对具体项目承担单位法人责任落实、项目执行、计划调整、资金使用、实施绩效等进行监督；对涉及所管理具体项目评审、立项、项目实施、验收考核等过程管理相关的投诉举报及时进行调查处理，并配合做好相关处理意见的跟踪落实，督促整改；对项目管理过程中发生的重大突发事件信息及时报告中国工程院。

**第五十三条** 项目承担单位是科研作风学风和科研诚信建设的第一责任主体，对所承担项目任务落实、资金使用和参与单位情况开展日常监督管理。在单位内部以适当方式公开相关信息，加强内部监督。

**第五十四条** 专家应遵守国家法律法规、规章制度以及国家重点研发计划相关规定，认真履行保密义务，廉洁自律，不得擅自对外提供重点专项相关信息，自觉接受中国工程院的监督。

**第五十五条** 建立公众参与监督的工作机制，主动接受公众和舆论监督，听取意见，推动和改进相关工作。收到投诉举报的，应当按有关规定登记、分类处理和反馈；投诉举报事项不在权限范围内的，应按有关规定移交相

关部门和地方处理。

加强与审计监督、第三方监督等外部监督协同，重点专项即将达到或已经达到执行期限时，应责成专业机构对重点专项实施情况进行总结评估，在此基础上委托第三方机构开展总体绩效评估，对重点专项的目标实现程度、任务布局合理性、组织管理水平、效果与影响等做出全面评价。

**第五十六条** 建立责任追究机制，对在专项组织实施过程中存在执行不力的情况，实行动态调整，倒查各责任主体，逐级问责。对有违规行为的咨询评审专家，予以警告、责令限期改正、通报批评、阶段性或永久性取消咨询评审和申报参与项目资格等处理；对有违规行为的项目牵头单位和科研人员，予以约谈、通报批评、暂停项目拨款、追回已拨项目资金、终止项目执行、阶段性或永久性取消申报参与项目资格等处理；对科研失信和违规行为纳入科研诚信纪录；对有违规行为的专业机构，予以约谈、通报批评、解除委托协议、阶段性或永久性取消项目管理资格等处理。涉嫌违纪违法的，移送有关部门处理。

**第五十七条** 建立监督工作应急响应机制。发现重大项目执行风险、接到重大违规违纪线索、出现项目管理重大争议事件时，应立即启动应急响应机制，进行

调查核实，或责成专业机构调查核实，提出意见和建议。

监督工作应当形成监督结论和意见，及时向相关部门或专业机构反馈。对于需进一步改进完善项目管理或组织实施工作的，应提出明确建议或要求，责成相关专业机构及时核查具体情况，采取相应措施进行整改。

**第五十八条** 对可能在生命健康、生态环境、公共秩序、可持续发展等方面带来伦理风险挑战的科技活动，以及依据法律、行政法规和国家有关规定需进行科技伦理审查的其他科技活动，按照科技伦理审查办法执行。

**第五十九条** 依托国家科技管理信息平台统一的监督评估系统，实现监督评估全过程痕迹化管理。各类监督检查数据及时汇入，全程留痕，共享利用，可查询、可申诉、可追溯，为重点专项及其项目管理和监督评估提供支撑。

## 第十章 附则

**第六十条** 涉及资金管理使用等事项，按照财政部印发的国家重点研发计划资金管理办法及相关规定执行。

**第六十一条** 本办法自印发之日起施行，由中国工程院负责解释。○

来源：中国工程院





# 中国自动化学会

中国自动化学会(Chinese Association of Automation, 缩写CAA)于1961年成立,是我国最早成立的国家一级学术团体之一,是中国科学技术协会的组成部分,是发展我国自动化科技事业的重要社会力量。学会现有个人会员8万余人,团体会员单位300余个,专业委员会64个,工作委员会11个,30个省、自治区、直辖市设有地方学会组织,覆盖了我国自动化科学技术领域的各个层面。

中国自动化学会在改革中求发展,不断加强群众组织力、学术引领力、社会公信力和国际影响力。近年来,中国自动化学会重点从学术交流与应用推广、组织建设与会员服务、科技评估与人才评价、课题研究与决策支撑、科学普及与继续教育等方面开拓创新,推动中国自动化科学和事业的发展 and 壮大,成为连接政府、产业、学术、科研、会员的重要纽带,致力于成为国内外有影响力的现代社会团体组织。

## 学会品牌学术活动

- 中国自动化大会 ·中国认知计算与混合智能学术大会 ·中国自动化与人工智能教育大会
- 国家智能车发展大会 ·国家机器人发展大会 ·国家智能制造大会 ·国家工业软件大会
- 青年菁英系列活动 ·智能自动化学科前沿讲习班 ·钱学森国际杰出科学奖系列讲座
- 中国控制会议 ·中国过程控制会议 ·青年学术年会

## 学会奖励奖项

- CAA科技进步奖 ·CAA自然科学奖 ·CAA技术发明奖 ·CAA青年科技奖
- CAA科技成就奖 ·CAA论文卓越行动工程 ·CAA青年托举工程
- CAA教育教学成果评价 ·CAA科学普及成果

## 学会主办期刊

- 中国自动化学会通讯 ·自动化学报 ·自动化学报(英文版)
- 信息与控制 ·机器人 ·模式识别与人工智能 ·电气传动
- 自动化博览 ·国际智能控制与系统学报(英文)



官方微信



官方微博

地址:北京市海淀区中关村东路95号自动化大厦

网址:<http://www.caa.org.cn/>

电话:010-62522472

传真:010-62522248

邮箱:[caa@ia.ac.cn](mailto:caa@ia.ac.cn)

邮编:100190