



# 中国自动化学会通讯

**COMMUNICATIONS OF CAA**

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)

## 复杂工业过程的优化

ISSN 2151-335X



6 915920 700067

2013年12月

**第4期**

第34卷 总第173期

# Contents



第34卷 第4期 总第173期 2013年12月

www.caa.org.cn

主办单位：中国自动化学会



## 主编的话

石油、化工、冶金等流程工业是我国国民经济的重要支柱产业，实现其节能减排对于缓解能源短缺危机、降低环境污染具有非常重要的意义。而随着工业生产规模的不断扩大、生产工艺的日益复杂、工艺过程的高度集成，要想实现系统整体行为的运行优化将面临着越来越大的挑战。为使传统工业过程向着绿色环保、低碳高效的方向转型，需要综合应用信息技术、能效技术、智能技术、优化与控制技术等，实现复杂工业过程系统的集成优化。

《中国自动化学会通讯》2013年的第四期专刊关注的主题是复杂工业过程的优化。本期专刊总共包含了7篇优秀的文章，在此向为本专刊贡献稿件的各位专家学者表示衷心的感谢。

上海交通大学的李少远教授对近年来分布式系统预测控制取得的最新进展进行了综述，并对预测控制进一步的发展需求进行了分析。清华大学的黄德先教授等介绍了石油化工过程控制与优化的发展过程、最新进展和未来发展趋势。中国科学院自动化研究所的赵冬斌研究员等以典型的煤气化生产过程为例，基于机理、知识和数据，构建了模拟系统整体行为的人工系统，并在人工系统的基础上开展了计算实验。东北大学的王宏教授等介绍了大脑认知行为在复杂工业过程建模与优化控制中的作用。加拿大阿尔伯塔大学的黄彪教授等综述了控制回路性能评估与诊断技术，重点介绍了贝叶斯诊断方法。北京工业大学的乔俊飞教授等阐述了污水处理过程优化控制方法的研究现状，重点介绍了智能优化控制方法在城市污水处理过程中取得的成果。北京大学的侍乐媛教授等分析了我国离散制造业信息化的现状，探讨了离散制造业信息化建设的发展趋势。

希望这期专刊能够起到抛砖引玉的作用，推动我国在复杂工业过程优化领域的创新和发展。

  
刘德荣

## 专题

- 4 分布式工程系统的优化控制
- 7 石油化工过程的优化与控制
- 15 煤气化生产过程的人工系统和计算实验
- 24 大脑认知行为在复杂工业过程建模与优化控制中的作用
- 28 控制回路性能评估与诊断综述
- 36 城市污水处理过程优化控制研究综述
- 49 基于ISA-95标准的离散制造业控制系统集成

## 译文

- 58 复杂工程优化问题的进化方法：机遇与挑战

## 新闻

- 62 中国自动化学会第十次全国会员代表大会在京隆重召开
- 63 2013中国自动化大会暨自动化领域协同创新大会开幕式在湖南长沙隆重召开
- 64 节能应用主题论文摘得ABB杯全国自动化系统工程师论文大赛一等奖
- 65 第三届杨嘉墀科技奖评审会议在京召开

## 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。



# 录

Chinese Association of Automation

- 65 中国自动化学会2012-2013年度控制科学与工程学科发展研究项目学术研讨会在京召开
- 66 霍尼韦尔Tariq Samad博士访问学会并做客“钱学森国际杰出科学家系列讲座”

## 会员园地

- 67 四川省自动化与仪器仪表学会举行2013年学术交流会暨七届八次理事会
- 68 “2013山东省自动化学会企业信息自动化应用专业委员会会议”暨“智能微电网产业发展协同创新研讨会”成功举行

## 党建强会

- 69 十八届三中全会闭幕 审议通过《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》



刊名题字：宋 健

编辑：中国自动化学会办公室

地址：北京市海淀区中关村东路95号 邮编：100190

电话：(010)8254 4542 E-mail:caa@ia.ac.cn

传真：(010)6252 2248 http://www.caa.org.cn

# 中国自动化学会通讯

Communications of CAA

## 编辑委员会

### 荣誉主编

- 戴汝为 CAA理事长、中国科学院院士、中国科学院自动化研究所研究员
- 孙优贤 CAA理事长、中国工程院院士、浙江大学教授

### 主 编

- 刘德荣 CAA常务理事、中国科学院自动化研究所研究员、复杂系统管理与控制国家重点实验室副主任

### 副主编

- 陈俊龙 CAA常务理事、澳门大学教授
- 张化光 控制理论专业委员会委员、东北大学教授

### 专题栏目

#### 主 编

- 周东华 CAA常务理事、副秘书长、清华大学教授

#### 编 委

- 蒋昌俊 CAA常务理事、同济大学教授
- 戴国忠 CAA理事、计算机图形学与人机交互专业委员会主任委员、中国科学院软件研究所研究员
- 张丽清 CAA理事、生物控制论与生物医学工程专业委员会主任委员、上海交通大学教授

### 观点栏目

#### 主 编

- 孙彦广 CAA理事、副秘书长、冶金自动化研究设计院教授级高工

#### 编 委

- 范 铠 CAA理事、仪表与装置专业委员会主任委员、上海工业自动化仪表研究院教授级高工
- 陈宗海 CAA理事、系统仿真专业委员会主任委员、中国科技大学教授
- 张文生 计算机图形学与人机交互专业委员会秘书长、中国科学院自动化研究所研究员

### 新闻栏目

#### 主 编

- 陈 杰 CAA常务理事、副秘书长、北京理工大学教授

#### 编 委

- 熊范纶 CAA理事、农业知识工程专业委员会主任委员、中国科学院合肥物质科学研究院研究员
- 李艳华 CAA理事、遥测遥感遥控专业委员会主任委员、中国航天科技集团公司第704研究所研究员
- 郝 宏 系统复杂性专业委员会秘书长、中国科学院自动化研究所高级工程师

### 译文栏目

#### 主 编

- 刘 民 CAA理事、名词委员会主任委员、清华大学教授

#### 编 委

- 王庆林 CAA理事、北京理工大学教授

### 会员栏目

#### 主 编

- 张 楠 CAA专职副秘书长、办公室主任

#### 编 委

- 孙长银 CAA理事、青年工作委员会主任委员、北京科技大学教授
- 王兆魁 平行控制与管理专业委员会秘书长、清华大学副教授

# 分布式工程系统的优化控制

李少远

上海交通大学自动化系，上海，200240

**摘要：**随着技术实现手段的不断发展，控制系统正在由集中式控制向着分布式模式转变，本文将根据工业过程控制的特点和进一步的需求，对近年来在分布式系统预测控制取得的新进展进行综述，并对预测控制进一步的发展需求进行分析，介绍了欧盟正在进行的第七框架对于大系统分布式预测控制的研究内容。

**关键字：**工业过程系统，预测控制，网络化控制系统

## 1 控制模式已由集中式向分布式转变

控制系统理论由最初的处理单输入单输出(SISO)系统，发展到能够处理较为复杂的多输入多输出(MIMO)系统，在这一过程中，控制器的设计方法也由基本的PID控制，不断提出并发展了针对系统特征的控制方法，如多变量解耦控制、自适应控制、模型预测控制、鲁棒控制和智能控制等。在处理系统结构与信息的基本策略方面，与实际系统的控制技术不无关系，从最初的DDZ单元式仪表，到工业控制计算机在工业系统中的应用，基本采用的是信息集中到控制器设计集中的策略。自1970's在大系统理论研究中提出了分层递阶结构，在底层回路采用实时控制，上层则由稳态模型优化计算下层的设定值，由此在实际工业系统中出现的DCS控制技术，并在实际系统中得到广泛应用，其中在优化层采用模型预测控制算法的为主。

回归实际被控系统的本质，任何实际系统都是由多个环节按照工艺流程相互连接而构成的，由于信息采集和控制器设计技术的限制，控制系统的结构与算法设计的基本策略也受到了很大的局限，基本上都是采用信息集中采集和利用的策略。由于现有的技术已经实现了信号传感、执行机构以及控制计算可以很好地对于局部子系统进行控制，控制模式正在从原有的集中式向着分布式模式转变，随着系统结构的复杂性的提高，以及工业生产过程的上述新特点，对现有的控制理论和方法提出了新的挑战。

## 2 分布式系统预测控制算法

随着现代工业生产的发展，DCS、现场总线等技术的广泛应用和信息网络的建立，控制系统的结构越来越复杂，在炼钢、轧钢、炼油、发电、造纸、化工等生产过程中，系统由许多局部子系统组成，在子系统之间，不但有物质、能量的流通，而且有大量的信息流通，子系统之间存在着

复杂的关联。系统的外部环境和内部干扰是多变的、不确定的。同时对生产过程的优化目标提出了越来越高的要求,除了对单个生产装置或局部子系统实现优化控制外,追求整个系统的全局优化已是提高产品质量和降低成本的关键。传统的控制理论和方法一般将这类控制系统看作是一个多输入多输出的系统,用多变量系统的控制来概括,但是随着系统维数的不断增加,子系统之间关联复杂性的不断加强,采用传统的控制理论和方法已经不能满足现代工业生产实时性发展的需要。

## 2.1 分散控制结构

与集中控制相对的是分散控制,可以看出这是一种单级多目标的控制。其特点是:每个控制器仅获得大系统的一部分测量信息(子系统的信息),也只施加一部分的控制(对该子系统控制)。这种信息结构称为非经典的,每个控制器的地位是平等的,相互独立地进行工作。值得指出的是,在工业过程对压力、温度等每个参数单独实施的闭环反馈控制,就属于这种控制方法,即把每个控制回路看成是完全独立的,而把外界的影响、关联等看作扰动而设法加以抑制。实际上各个子系统是互相关联着的,因此在关联紧密的大工业过程的控制中,有时会出现几个参数甚至整个过程的动态特性不好的现象。学者们认为分散控制的大系统缺乏稳定性,由于非经典信息结构的缺陷,一般只能得到次优控制(suboptimal control)。

## 2.2 递阶控制结构

递阶控制主要包含多级和多层两种结构形式。递阶控制是多级结构形式(multilevel structure)。这里每级都有控制器,递阶排列呈金字塔形。习惯上将高级的控制器称作决策单元,

同一级的决策单元是平等的,它们相互独立并平行地工作,并且只接收各自上一级决策单元的指令;而上一级决策单元也不逾越下一级决策单元,直接干预更下一级的工作。对于最高层决策单元(称作协调器),它间接拥有大系统的全部信息,因此这种信息结构称为经典的。

在大工业过程中,计算机在线稳态优化控制常用的就是递阶控制结构。这样的递阶结构可分为三层:下层是实际过程(层),中间是直接控制层,上层是优化层。而优化层本身又是一个两级结构,由局部决策单元级(下级)和协调器(上级)组成。下层只受相应的上层直接控制,而同层或同级横向之间没有信息交换。

对于稳态工业大系统而言,稳态的工况决定着它的生产效益。例如,在大工业过程的设计时总是将它的稳态工况处于效益最优的工况点,这称为最优稳态工况。稳态大工业过程的特点是:工况的短暂波动、偶发的外界扰动在子过程控制器的作用下很快回到原来的工况点或其附近。控制器设定点的变动和外界扰动引起的暂态进程与整个生产周期相比是很短的,稳态工况是影响生产效益的决定因素。工业过程稳态优化控制的目的是为了克服环境变化、各种原材料和触媒剂成分变化等因素形成的慢扰动,使工业过程运行于最优工况之下,以达到增加产量、减少消耗、提高产品质量的目的。稳态优化控制就是要在各种慢扰动作用下,在大工业过程的工况偏离最优点时,寻找甚至搜索这个最优工况点,并通过改变子过程控制器的设定点将大工业过程重新置于最优工况点。

## 2.3 分布式控制结构

递阶控制系统对各系统的控制作用是按照一定优先和从属关系安排的决策单元来实现的,其立足点是离线优化设计,主要解决的是大系统高

维性带来的计算上的困难。在现代工业生产环境中,由于DCS、现场总线的广泛应用和信息网络的建立,控制作为一种信息处理手段,已不限于集中式的控制,而更多地为分布式控制所取代。因此,大系统的分布式控制应运而生,其立足点是在线反馈控制,实现的方式是信息分散化、控制分散化。在分布式控制系统中,子系统之间可以进行有限的信息交换,这样不但可以减少信息处理量,快速地实现反馈控制,而且使得控制的可靠性、灵活性都有所改善。

### 3 工程优化控制的展望

实际上,随着科技、经济和社会的发展,各应用领域对约束优化控制的需求日益增长,根据对近年来在Automatica、IEEE Trans. on Control Systems technology、Control Engineering Practice、Journal of Process Control等刊物上大量预测控制文献的查阅,可以清楚地看到,一方面,人们对预测控制解决在线约束优化控制寄予很高的期望,试图用它解决各自领域中更多更复杂的问题,另一方面,工业预测控制算法的不足和现有约束预测控制理论的局限,又使人们在解决这些问题时不能简单地应用已有的理论或算法,必须研究克服其不足的新思路和新方法。这种需求和现状的矛盾,构成了近年来预测控制理论和算法发展的强大动力,从近阶段开展的研究和技术需求来看,可以大致归结为以下几个方面:

- (1) 数据驱动的预测控制器设计与系统性能评估;
  - (2) 网络信息模式下分布式系统的预测控制;
  - (3) 预测控制的快速算法与快过程的应用。
- 欧盟也于2008年9月启动了针对工业系统预测控

制的第七框架“Hierarchical and Distributed Model Predictive Control of Large-Scale Systems”(http://www.ict-hd-mpc.eu),结合工业系统特点的预测控制理论研究和技术开发一定能在经济和社会进步中发挥更大的作用。

#### 参 考 文 献

- [1] 万百五,黄正良.大工业过程计算机在线稳态优化控制,北京:科学出版社,1998
- [2] 李少远.全局工况系统预测控制及其应用.北京:科学出版社,2007
- [3] Eduardo Camponogara, Dong Jia, Bruce H. Krogh, and Sarosh Talukdar. Distributed Model Predictive Control. IEEE Control Systems Magazine, 22(1): 44-52, 2002
- [4] MR. Katebi, MA Johnson. Predictive Control Design for Large-Scale Systems. Automatica, 33(3): 421-425.
- [5] Shaoyuan Li, Yan Zhang, Quanmin Zhu. Nash-optimization Enhanced Distributed Model Predictive Control Applied to the Shell Benchmark Problem. Information Sciences, 170(2-4): 329-349, 2005
- [6] Yi Zheng, Shaoyuan Li, Ning Li. Distributed Model Predictive Control Over Network Information Exchange for Large-Scale Systems. Control Engineering Practice, 19: 757-769, 2011
- [7] Riccardo Scattolini. Architectures for distributed and hierarchical Model Predictive Control - A Review. Journal of Process Control, 19: 723-731, 2009
- [8] PD. Christofides, R. Scattolini, DM Pe?a, JF Liu. Distributed Model Predictive Control: A Tutorial Review and Future Research Directions. Computers & Chemical Engineering, 51(5):21-41, 2013
- [9] Hierarchical and Distributed Model Predictive Control of Large-Scale Systems, http://www.ict-hd-mpc.eu

#### 作者简介

**李少远**

上海交通大学自动化系主任、教授、博士生导师。主要研究方向为预测控制、自适应控制和模糊智能控制的理论和应用。



# 石油化工过程的优化与控制

黄德先, 金以慧

清华大学自动化系, 北京 100084

**摘要:** 本文首先阐述了先进控制和过程优化技术是促进石油化工行业的增效创收、节能减排的一个投入少见本文首先阐述了先进控制和过程优化技术是促进石油化工行业的增效创收、节能减排的一个投入少见见效快的有效途径, 然后介绍在石油化工过程中从底层控制到先进控制, 从离线优化到在线优化实施控制优化的发展历程, 以及适应现代化工业发展需要而出现的许多新的进展, 最后探讨了根据当前全球化市场剧烈竞争和能源匮乏形势下石化过程控制与优化的发展趋势。

**关键字:** 石油化工, 先进控制, 在线优化, 调度优化, 综合自动化系统

## 1 问题的提出

自连续生产工业形成大规模生产以来, 自动控制就成为连续工业中保证产品质量, 提高产率的不可或缺的一部份, 生产装置优化运行也进入追求的目标。石油化工过程是一种复杂的连续工业过程, 它具有许多复杂过程共有的属性, 例如, 规模大、层次多、前后上下联系密切, 且往往还具有非线性、大滞后、随机性、分散性、强耦合等等特性, 因而给生产过程的控制和优化带来很大的困难, 是国内外学术界和工程界极为关注的课题。

石油化工过程的控制与优化技术已成为世界石化工业消除“瓶颈”制约、增效创收的主要手段之一, 也经历了一段艰难的发展过程。生产过程的先进控制和过程优化技术, 是在现有的工艺条件下, 通过建立过程的数学模型并进行优化计算后, 给出新的操作条件, 使装置达到最优运行

状态, 因而可以在不增加投资或投资很小的情况下取得最大化的经济效益。Chemshare公司给出的经济效益与投资比例的统计分析认为: 用DCS改造常规仪表投资大约占总投资的70%, 取得的经济效益约占总效益的15%; 利用DCS实现常规的复杂控制, 得到的效益和投资大约各占总的10%; 在DCS基础上实现先进控制, 增加约10%的成本, 可取得约35%的效益。在先进控制的基础上, 实现装置的实时优化功能, 成本增加约10%, 又可获得约40%的效益, 经过过多年的实践证明了上述统计分析。因此控制和优化技术对石油化工过程增效创收、节能减排是一种投入少而见效快的重要举措。

## 2 石油化工过程控制优化的发展过程

自20世纪50年代末发展起来的以状态空间方

法为基础的现代控制理论,为过程控制带来了基于模型的状态反馈、输出反馈、解耦控制、最优控制等一系列多变量控制系统设计方法;对于状态不能直接测量的情形,也出现了观测器和估计器等技术和工具。然而,这些方法大多建立在准确的数学模型基础之上,但工业过程的复杂性使得建立其准确的数学模型往往又十分困难,急需开辟新的研究途径。

在6、70年代,一种基于生产过程严格机理模型的过程操作优化和PID控制器相结合的SPC(Setpointcontrol)控制系统成为当时的一个研究热点。SPC综合应用过程建模技术、优化技术,在满足约束条件下,给出生产过程主要操作变量的优化值,并通过改变基层PID设定值来改变装置的运行状态,使之达到装置优化的目标。这通常是一种离线的稳态优化,目前已经有不少在稳态模型上离线寻优的成熟技术,并取得明显效益。但是在生产过程中,由于运行条件经常变化,离线优化很难满足这种多变的需求。

70年代以来,加强了建模理论、辨识技术及最优控制等工程应用的研究。在此基础上,从工业过程的特点出发,一些对数学模型要求不很高,在线计算方便并有较强鲁棒性的实用控制策略和方法应运而生:如推理控制、内模控制、鲁棒控制、多变量频域控制、自适应控制等<sup>[1,2]</sup>。同样因为需要较为准确的数学模型,这些控制方法仍然难以在工业实际中得以推广应用。直到70年代末提出了一种模型预测控制,才使最优控制的思想在过程工业中得到广泛而成功的应用。模型预测控制以其模型预测、反馈校正和滚动优化三个重要特征实现了最优控制与反馈控制的有效结合,具有建模方便、鲁棒性强、适应范围广以及便于实施等优点,逐渐得到工业界的认可并得到广泛应用<sup>[3]</sup>,与其相应的理论基础和设计方法也得到了深入的研究,为先进控制等实际应用打下了

坚实的基础<sup>[4]</sup>。这种控制技术率先在石化企业的Shell Oil公司得到早期的开发和应用,并迅速得到发展和推广应用<sup>[5]</sup>。国内在80年代中期开展了对模型预测控制的应用研究。中国石油大学袁璞教授于1988年在石化生产过程中的重要生产装置催化裂化装置得到的现场成功应用,为以模型预测控制为核心的先进控制技术在国内外石化工业的应用首度打开局面<sup>[6]</sup>。上世纪90年代初年国外的先进控制软件开始进入中国,以采用基于实验建模的通用预测控制软件抢占了国内大部分市场,并很快形成了高价垄断的局面。

90年中期国内面对国际竞争日益激烈的形势,我国工业界开始意识到先进控制在生产过程中的重要作用。在国家发改委、科技部和其他部委的大力支持下,批准和支持了我国流程工业先进控制的攻关项目和863高科技等一批项目,开展了大量的研发和应用工作。我国的一些高等院校和研究院,如清华大学、浙江大学、上海交通大学、华东理工大学、中国石油大学等,深入开展了这方面的研究,取得了一批拥有自主知识产权的成果,并进行了许多现场应用,获得了一批成功的示范应用,为打破国外技术垄断、降低进口软件价格、推动先进控制的推广应用做出了贡献,为我国工业过程自动化高技术产业化打下了深厚基础。由于工业实际的迫切需求,国外许多著名的软件公司和国内的清华大学等一批高校陆续推出了基于非参数模型预测控制为基础的通用多变量约束协调控制软件包。表1是Joe QIN教授统计的2000年国外著名软件应用情况,其中石油化工领域占据了大半数,现在西方发达国家主要石化生产装置基本普及了先进控制的应用。

自1996年以来,在我国石化工业中先后有近200多套装置采用国内外先进控制技术,其中包括催化裂化、常减压、重整、焦化、加氢、气分、芳烃、聚丙烯、聚乙烯、乙烯裂解、PX、PTA等

表1 知名先进控制软件应用情况总览<sup>[5]</sup>

应用领域	Aspen Technology	Honeywell	Adersa	PCL	MDC	合计
石油炼制	1200	480	280	25	—	1985
石化	450	80	—	20	—	550
化工	100	20	3	21	—	144
纸浆造纸	18	50	—	—	—	68
天然气	—	10	—	—	—	10
公用工程	—	10	—	4	—	14
聚酯	17	—	—	—	—	17
采矿/冶金	8	6	7	16	—	37
食品工业	—	—	41	10	—	51
加热炉	—	—	42	3	—	45
航空/国防	—	—	13	—	—	13
汽车制造	—	—	7	—	—	7
其它	40	40	1045	26	450	1601
总计	1833	696	1438	125	450	4542

装置，涵盖了石化生产过程的主要装置种类，不仅增强了生产过程操作的平稳性，提高了产品质量合格率，而且实现了装置的优化运行，提高了生产装置的处理能力和操作平稳性。国内应用的先进控制主流技术主要有两类，一类是以采用国外和国内高校开发的基于实验模型的通用多变量约束控制软件，另一类是以中国石油大学袁璞教授为主的基于机理模型的多变量约束协调控制软件。前者以国外著名的软件公司的软件产品占据主流，国内的通用多变量约束控制软件也开始受到企业界的重视，如石化盈科公司正在和清华大学自动化系合作，以清华大学的SMART先进控制软件为基础，充分发挥双方在技术研究、软件开发、市场开拓等方面的技术优势，打造新一代具有自主知识产权的先进控制软件，并将进行规模化推广应用。

现在国内外获得普及应用的主要还是线性模型预测控制技术，非线性预测控制技术国外只

有几个软件公司开发了通用软件并得到了一些应用<sup>[7]</sup>，但由于其建模和在线优化的困难在实际工业过程成功应用的比较少，未能达到期望目标。可喜的是我国自己的非线性预测控制软件已经在聚丙烯装置上获得了成功应用<sup>[8]</sup>；清华大学针对先进控制应用中基于机理分析模型的先进控制软件推广应用困难和基于实验建模的通用先进控制软件难于满足我国国情的难题，致力于研发融合两种建模技术的优点，形成具有自主知识产权的适应一大类装置的通用先进控制技术和软件，可以应用于线性和非线性系统，对生产过程变化有较强的鲁棒性，已在多个工业装置应用，实践应用表明其能够适应生产操作条件和生产装置扩容等条件的变化，达到长期连续稳定应用的目标，取得满意的实用效果和显著的经济效益<sup>[9,10]</sup>。

随着全球技术的剧烈竞争，对于产品的质量、能耗、废气废物的排放等等要求更高，更迫切，而多变的市场，原料性质的不稳定，外界频

繁的干扰等等因素又不断地影响着生产的进程，使得仅采用先进控制也不能满足工业企业的高需求，于是，在线闭环优化的方法提到日程上成为解决上述困境的唯一途径。“在线”是指将优化系统和控制系统视为一个整体，根据实时数据的反馈，随时进行有效的控制与优化计算；“闭环”则指优化系统的计算结果无需经过人工干预，直接自动地传送到控制系统去执行，形成一个控制与优化相结合闭环。一般称“在线闭环优化”为“实时优化”<sup>[11]</sup>。尽管这些离线优化和在线优化都获得了一些应用，但相对预测控制等先进控制的应用规模来说要小很多，这主要是由于要获得优化所需要的模型精度（特别是生产过程具有时变情况）是非常困难的事情，这种在线优化正是需要进一步探索和研究的策略，目前已经取得一定的进展<sup>[12,13]</sup>。

### 3 石化过程控制优化的新进展

先进控制和在线优化尽管在石化生产过程中发挥了重要作用，但生产过程的时变性、非线性等因素的存在使先进控制和在线优化的性能变差是当前制约因素。特别是我们国家还存在的一些特殊困难，如原料性质变化大，工厂的基础自动化程度低、可靠性差等，导致先进控制和在线优化难以获得期望的效果。近年来模型维护技术和控制器性能评估技术的研究对解决上述问题有一定效果，在理论方法研究和应用实施技术的开发成为当前研究热点问题，也取得了一些进展<sup>[14-18]</sup>。

众所周知，基于实验模型的通用先进控制和优化软件具有通用性、易于进行产业化的大规模推广应用，并且在生产实际中得到大量的应用，但还很难满足全部石油化工生产过程各种需求和难以得到更高的性能和收益。上世纪80年代，基于工艺机理的先进控制和优化技术得到深入研

究，并取得不少成功的应用案例，基于工艺机理的催化裂化装置反再过程的反应深度控制和在线优化就是一例。对于催化裂化提升管式反应器，该方法用单位进料在反应时所需的热量（称反应热）来衡量反应深度，用基于动态模型的观测器实现反应热的在线实时计算，应用具有状态反馈的单值预估控制技术，实现反应热的动态优化闭环控制，使反应深度控制在通过动态产率观测和在线实时寻优而得到的设定值上，从而实现催化裂化装置达到人们所设定的优化目标<sup>[19,20]</sup>。又例如乙烯裂解炉裂解深度的智能控制和在线优化，其应用神经网络研制开发的针对不同油品的裂解深度软测量，利用机理模型和实际生产数据作为训练样本，结合裂解原料聚类结果，建立裂解炉收率神经网络多模型，在裂解深度和汽烃比约束下，确定最优裂解深度值及汽烃比，并在裂解炉的当前裂解深度值附近不断滚动优化，实现经济效益最大的目标<sup>[21,22]</sup>。

但是应该指出，在实施过程中，为建立机理模型要付出很大代价，不利于大面积推广。因而，基于工艺机理的先进控制和优化技术和基于实验模型的通用先进控制和优化技术两者不可偏废，要视其应用场合，发挥各自优势加以应用。

从21世纪初，一种集人工智能、工艺机理、专家操作知识、多变量预测控制等先进控制和在线优化技术于一体的“智能化”优化控制实现思路受到重视，并取得一定成效，其研究结果已在精馏过程、延迟焦化生产过程和加热过程等装置上得到成功应用，解决了国内外目前尚未有效解决的若干难题，取得了多项国家发明专利<sup>[23-28]</sup>。例如，针对精馏过程大滞后、强非线性、难控制的特点，通过工艺机理分析揭示轻重产品比和分离度是产品质量的主要决定因素，提出了一种直接控制轻重产品比和分离度，间接控制产品质量的质量稳定控制方法，继而基于产品质量稳定控制



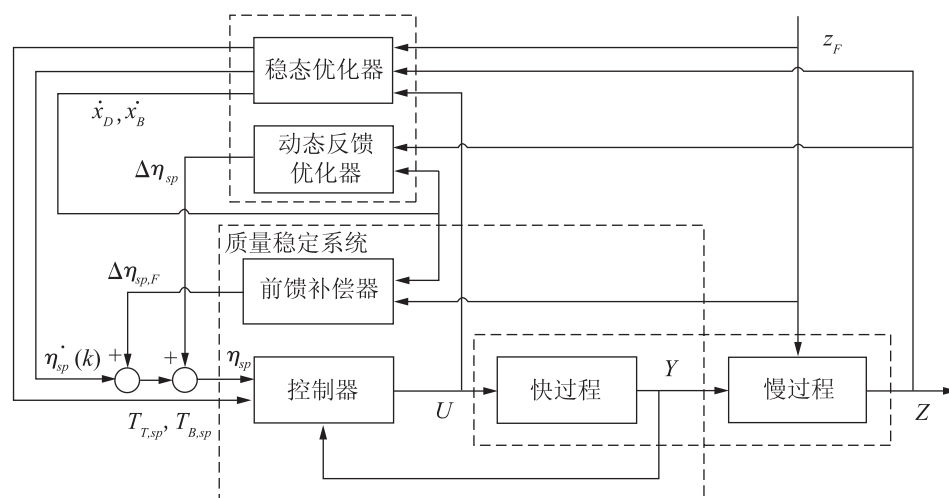


图1 精馏过程集成优化控制框架

和分片线性的在线优化代理模型，实现一种如图1所示的产品质量动态控制、经济目标稳态优化的总体框架，实现了高价值产品产率提高、能耗减小的综合优化目标，在实际生产过程得到长期有效的应用效果<sup>[29]</sup>。

另外，一类针对测量仪表和调节装置存在的严重滞环和死区等非线性特性所导致的控制稳定性难题，提出了一种稳态反馈-动态前馈复合控制新思路，并从理论上给出了只需要模型的增益误差在正负100%范围内的收敛条件，从而避开了PID反馈控制对于难控回路的稳定性难题。这种稳态反馈-动态前馈复合控制已经应用于多个不同装置，解决诸如加热炉烟风控制系统、非线性液位控制等长期难以有效解决的难题。在实际加热炉氧含量和负压的整体控制中应用表明，这种方案避免了频繁调节所带来的安全隐患，克服了动态反馈控制存在的稳定性难题，控制平稳，减少了不充分燃烧带来的环境污染，为进一步的热效率优化提供了可能。该思想也为其它同类问题的基础控制回路提供了一种新思路，为先进控制和在线优化改善了应用条件<sup>[27,30]</sup>。

在实际需求的推动下，各种具有特色的先进控制与操作优化的策略将不断涌现，这正是控制

与优化技术发展的大好时机。

## 4 石油化工过程控制优化的发展趋势

在当前全球化市场剧烈竞争和能源匮乏的情况下，企业的生存与发展不仅取决于企业的发展策略，而且取决于采用什么技术可最快、最好地实现这种策略。应该说，生产企业能以最低成本、最小的能源和原材料消耗，最快满足市场的需求才是能立足于不败之地。从目前工业生产情况来看，采用高新技术改造传统企业是当务之急。从过程控制领域来说，我们应该尽控制之能力做出应有的贡献。从国内外先进的石化企业来看，一种由过程控制系统（PCS），制造执行系统（MES）和经营计划系统（BPS）组成的综合自动化系统基本形成，先进控制和操作优化是在简单控制之上的一种多变量控制和优化子系统，是连接过程控制层和制造执行层之间的桥梁，它的任务是保证各装置能稳定地运行在最优状况，以保证整个生产持续稳定地进行。但装置应该如何去进行生产？生产什么产品？生产量多大？质量指标应控制在什么数值？目前装置的最优工况是什

么？这些问题要由企业全局层面来决策。从总体来看，先进控制和操作优化还是其中一个环节，是综合自动化系统的执行机构，必须与计划，调度，资源优化等系统相集成，从而构成了一个综合自动化的运行模式<sup>[31]</sup>。这是一项必需进行而又十分艰巨的任务，是当前发展的必然趋势。到目前为止，国内外已经开展了先进控制和生产调度的集成的研究与开发工作，并取得初步的成果<sup>[32-34]</sup>。

清华大学自动化系在十一五863课题和国家自然科学基金课题的支持下开始研究炼油企业集成控制和优化问题，针对大型炼油企业这样的具有多装置、多过程、多工序的并行、串行、返流等特性的大型复杂生产过程的调度和装置先进控制与优化难题，首先揭示了制约炼油企业的调度优化和装置优化控制的两个问题：一方面由于炼油生产过程的特殊性，现有的调度建模方法不能描述原油性质变化和加工过程操作模式变化，使调度优化难以成功应用。另一方面，由于市场成

品油需求、原油供应、生产装置和公用工程约束等变化频繁，而人工调度的随意性，导致生产操作的不稳定特别是装置进料成份的频繁变化，使装置的先进控制和在线优化的长期应用也非常困难，这又制约了生产调度模型的合理描述。针对这些问题提出了如图2所示的集成优化控制与调度优化新思路：以装置级先进控制和在线优化保障生产装置运行在优化状态，进而能够用对应有有限个优化操作模式下的多模型用于调度，提出基于模式切换代价最小化的智能决策调度优化方法，为各生产装置设定优化操作模式和生产负荷。装置优化控制为调度优化提供可实现的模型描述基础，调度优化为装置优化运行提供平稳条件，这样就形成生产装置优化控制和调度优化的相互保障和相互促进，形成良性循环，以整体闭环的方案解决难题，也使MES系统实现真正的闭环<sup>[35,36]</sup>。由于该解决方案提高了炼油生产调度、原油供应、生产装置操作和油品调合的可预测性和可操

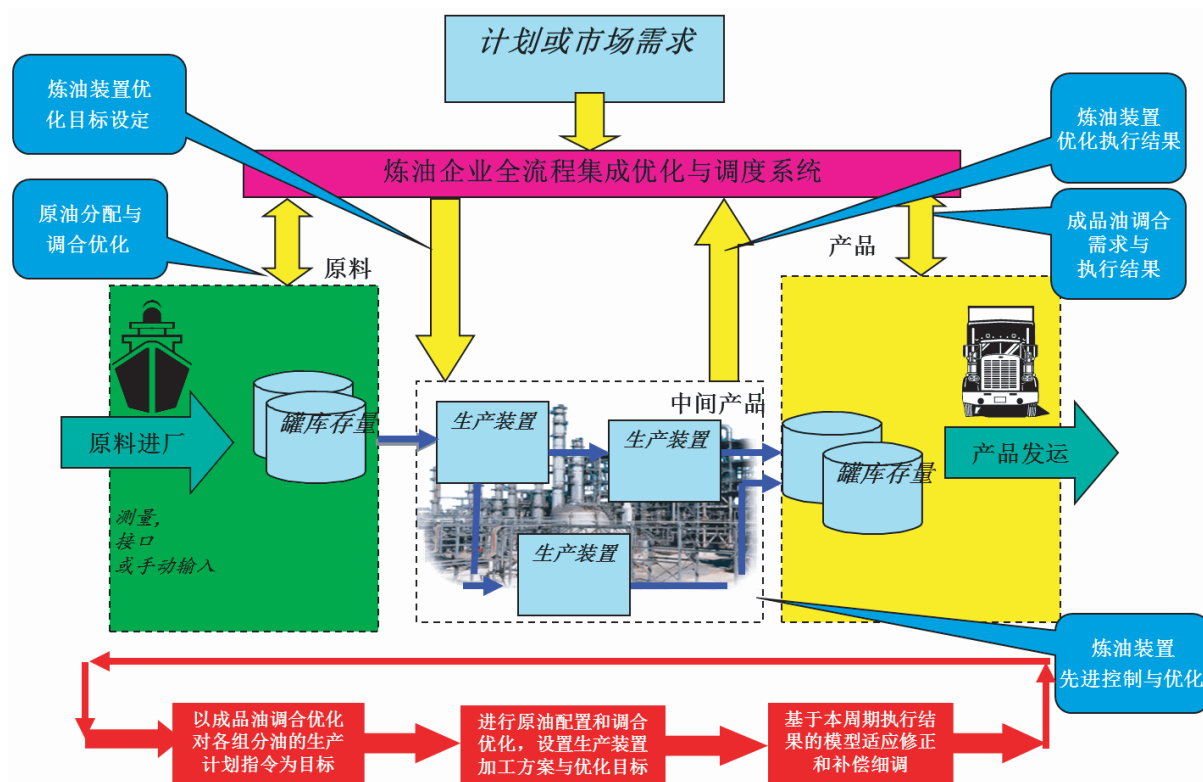


图2 炼油企业集成优化控制与调度优化原理图

作性,为整个炼油企业的物流、能流的进一步优化利用提供基础,也为炼油企业所提出的“智能工厂”的实现提供了核心技术。应该指出,该方案的进一步完善并应用于实际生产还需要大量的研究与开发工作,如针对原料变化和不同优化操作方案的基于装置控制和在线优化的精细化装置建模;面向原油变化、基于模式切换代价最小化准则实现全流程集成优化控制与调度智能决策系统;基于学习机制的生产过程大数据下的精细化模型在线修正理论方法等等,涉及到自动化领域的许多方面,需要继续探索和研究。

## 5 结束语

为满足工业现代化的对节省能源、提高产品质量、降低成本、减少排放等等高要求,基于现代控制理论,借助不断更新发展的高新技术,以优化的主线,以模型为基础,从保障基层稳定控制入手,实施先进控制系统,为实现优化创造条件;然后逐步从系统的稳态优化、动态优化,到优化生产调度,以致实现结合资源、市场变化等等因素的生产过程全程优化,这是一条以市场需求为推动力,以现有资源为约束,以发掘生产潜力为边界的实现现代化生产目标的更为全面有效的途径。

通过生产实践,我们深深体会到:要实现控制优化,必须深入掌握生产过程的有关的机理和特性,掌握越深,用之越灵。可以说,过程控制优化技术与工艺过程技术紧密结合是满足现代化企业自动化要求的必要条件,越是进入深层次的控制与优化,强调控制与工艺过程的结合越是必要,往往很多创新灵感是来自对过程的深刻认识和掌握,这种控制优化与过程工艺机理的相互渗透、相互结合是产生新策略的源泉。无疑,这是一种理论与实际紧密结合的产物,是一种高超的技术,更是一种美妙的艺术。

## 参考文献

- [1] 孙优贤等, 工业过程控制技术, 北京: 化学工业出版社, 2006
- [2] 金以慧等, 过程控制, 北京: 清华大学出版社, 1992年
- [3] Richalet, J., Rault, A., et al., Model Predictive Heuristic Control: Applications to Industrial Processes, Automatica, Vol.14, pp413-428, 1979
- [4] 席裕庚, 预测控制, 北京: 国防工业出版社, 1993
- [5] S. Joe Qin, Thomas A. Badgwell, A survey of industrial model predictive control technology, Control Engineering Practice 11 (2003) 733-764
- [6] 袁璞, 生产过程动态数学模式及其在线应用, 北京: 中国石化出版社, 1994
- [7] Badgwell, T.A., Qin, S.J., Review of nonlinear model predictive control applications, Nonlinear Model Predictive Control (Progress in Systems & Control Theory Vol.26), p 369-92, 2000
- [8] 袁璞, 张贵礼, 金学兰, 变结构非线性模型预估控制器, 国家发明专利: ZL200710118864.3
- [9] ZHANG Weiyong, HUANG Dexian, WANG Yudong and WANG Jingchun, Adaptive State Feedback Predictive Control and Expert Control for a Delayed Coking Furnace, Chinese Journal of Chemical Engineering, 16(4) 590-598, 2008
- [10] LÜ Wenxiang, ZHU Ying, HUANG Dexian, JIANG Yongheng, and JIN Yihui, A New Strategy of Integrated Control and On-line Optimization on High-purity Distillation Process, Chinese Journal of Chemical Engineering, 18(1) 66-79, 2010
- [11] Edgar T.F, Himmelblau D M and Lasdon L S, Optimization of chemical process, London: Thomas E. Casson, 2001
- [12] Kameswaran, Shivakumar I; Biegler, Lorenz T., Simultaneous dynamic optimization strategies: Recent advances and challenges, Computers and Chemical Engineering, v 30, n 10-12, p 1560-1575, September 12, 2006
- [13] Xing, Jianliang; Jiang, Pengfei; Zhong, Weimin; Zhao, Jun; Shao, Zhijiang; Qian, Feng, Real-time optimization of the 4CBA content in a p-xylene oxidation process, Journal of Tsinghua University, v 52, n 3, p 320-324, March 2012
- [14] Jiang, H., Shah, S.L., Biao Huang, Wilson, B., Patwardhan, R., Szeto, F., Model analysis and performance analysis of two industrial MPCs, Control Engineering Practice, v 20, n 3, p 219-35, March 2012;
- [15] Zhao, Chao, Zhao, Yu, Su, Hongye, Huang, Biao, Economic

- performance assessment of advanced process control with LQG benchmarking, Journal of Process Control, v 19, n 4, p 557-569, April 2009.
- [16] Xu, Fangwei, Huang, Biao, Akande, Seyi, Performance assessment of model predictive control for variability and constraint tuning, Industrial and Engineering Chemistry Research, v 46, n 4, p 1208-1219, February 14, 2007.
- [17] Joe Qin, S., Yu, Jie, Recent developments in multivariable controller performance monitoring, Journal of Process Control, v17, n3, p 221-227, March 2007
- [18] Sun, Zhijie, Zhao, Yu; Qin, S. Joe, Improving industrial MPC performance with data-driven disturbance modeling, Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, p 1922-1927, 2011, 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, CDC-ECC 2011
- [19] 袁璞, 郑远扬, 黄德先, 吴峰, 从松波, 江青茵. 催化裂化反应深度的观测与控制方法, 国家发明专利: 90108193.0
- [20] 袁璞, 孙德祥, 左信, 黄文伟, 林洪泉. 催化裂化装置裂化反应深度的实时优化控制方法, 国家发明专利: ZL97100141.3
- [21] 钱 锋, 刘漫丹, 胡 春, 王振雷, 杜文莉. 乙烯装置中裂解炉裂解深度的智能控制方法, 国家发明专利: ZL200510025043.6
- [22] 钱 锋, 王宏刚, 王振雷, 梅 华, 杜文莉, 王大海. 工业乙烯裂解炉裂解深度在线优化方法, 国家发明专利: ZL200910056294.9
- [23] 黄德先, 吕文祥, 王宇红, 金以慧. 精馏塔的一种自动控制和优化方法, 国家发明专利: ZL200510086612.8
- [24] 黄德先, 吕文祥, 朱鹰, 高小永, 江永亨, 王书宁. 精馏塔优化控制方法, 国家发明专利: ZL201010232551.2
- [25] 黄德先, 张伟勇, 吕文祥, 金以慧. 一种延迟焦化炉的控制方法, 国家发明专利: ZL200810103624.0
- [26] 黄德先, 张伟勇, 吕文祥, 金以慧. 加热炉出口温度的一种综合控制方法, 国家发明专利: ZL200810102875.7
- [27] 黄德先, 张伟勇, 吕文祥, 李映. 加热炉热效率多区域智能在线优化控制方法, 国家发明专利: ZL201010217097.3
- [28] 黄德先, 于晓栋, 张伟勇, 吕文祥, 施大鹏, 魏宇杰. 延迟焦化装置智能控制方法及系统, 国家发明专利: ZL201110030352.8
- [29] 黄德先, 王京春, 金以慧. 过程控制系统, 北京: 清华大学出版社, 2011
- [30] 张伟勇, 李映, 黄德先, 伊佳, 张志印, 杨向党. 基于稳态模型的加热炉烟风系统控制, 浙江大学学报(工学版), 45(12):2093-2098, 2011
- [31] 柴天佑, 金以慧, 任德祥, 邵惠鹤, 钱积新, 李平, 桂卫华. 郑秉霖, 基于三层结构的流程工业现代集成制造系统, 控制工程, 9(3), 2002
- [32] Sebastian Engella, Iiro Harjunkoski, Optimal operation: Scheduling, advanced control and their integration, Chemical Engineering and Processing 46 (2007) 1043-1053
- [33] Yunfei Chu, Fengqi You, Integration of scheduling and control with online closed-loop implementation: Fast computational strategy and large-scale global optimization algorithm, Computers and Chemical Engineering 47 (2012) 248-268
- [34] 王如强, 何小荣, 陈丙珍. 常减压蒸馏装置生产计划与过程操作的优化集成, 清华大学学报(自然科学版), 48(3): 401-404, 2008
- [35] 黄德先, 江永亨, 高小永, 余冰, 摆亮, 施磊, 吕文祥. 基于集成控制优化的炼油生产过程调度优化建模方法, 国家发明专利: 201210228138.8
- [36] 黄德先, 江永亨, 高小永, 余冰, 摆亮, 施磊, 吕文祥. 基于智能决策的炼油生产过程调度优化方法, 国家发明专利: 201210228649.X

## 作者简介

**黄德先** 清华大学自动化系教授、博士生导师, 主要研究方向为流程工业的建模、控制和优化等。

**金以慧** 清华大学自动化系教授、博士生导师, 主要研究方向为复杂工业过程的建模、控制和优化、计划调度、供应链等。



# 煤气化生产过程的人工系统和计算实验

赵冬斌, 魏庆来, 刘德荣

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, 北京 100190

**摘要:** 随着科学技术的进步和社会的快速发展, 过程工业系统越来越趋于复杂化。过程工业中, 传统理论只侧重于设备、工艺等工程性因素的分析与控制, 虽可一定程度提高生产效率, 但不能解决实际中的大量复杂问题。考虑过程工业的工程复杂性和管理复杂性, 本文以典型的煤气化生产过程为例, 基于机理、知识和数据, 构建了模拟系统整体行为的人工系统。通过人工系统能验证生产系统的动态模拟, 实时分析生产的工况数据和参数, 并给出预测, 提高了对煤气化生产过程系统优化的可靠性与可行性。在人工系统的基础上开展计算实验, 提出了自适应动态规划方法, 实现了控制器的优化设计。

**关键词:** 人工系统, 计算实验, 煤气化, 复杂过程

## 引言

随着科学技术的进步和社会的快速发展, 过程工业系统越来越趋于复杂化。大型过程工业一般同时涉及工程复杂性和管理复杂性, 呈现动态性、开放性、交互性等特征, 是典型的复杂系统。过程工业中, 煤炭既是主要燃料, 也是许多重要化工产品的原料, 其消耗量占到总能源消费结构的68%左右, 但煤基过程工业普遍存在着效率低、能耗高、污染大的生产现状<sup>[1]</sup>。

针对复杂过程工业普遍存在的效率低、能耗高、污染大的问题, 世界各国开展了相应的高

效、节能、减排技术研究, 并已初见成效<sup>[2~5]</sup>。

目前, 大多数技术成果只专注于某个单独设备或工艺等工程因素的建模、分析与控制, 整体系统各个工艺环节之间彼此隔绝, 各工艺环节中的封闭管理模式进一步加深了不同环节之间的割裂程度, 导致整体系统建模困难、或整体系统模型不精确, 很难用于整体系统的集成优化。而且, 传统的用科学实验或工程试验来认识规律的手段, 在复杂过程工业系统中因为不容许、不可能、或成本极高而失去意义。现有的控制理论和技术, 无法清晰认识到复杂系统各种因素间的主要因果关系, 不能应付各种变化和

非正常状态，往往达不到预期的控制目标。中国科学院自动化研究所提出了解决复杂系统控制与管理的平行控制（ACP）理论框架，即人工系统（Artificial Systems）、计算实验（Computational Experiments）和平行执行（Parallel Execution）。该方法通过人工系统这一步骤，将机械、电气、人、财、物，以及管理制度等建立虚拟模型，通过计算实验来分析各种因素对系统的影响，进一步通过平行执行达到实际系统和人工系统的互动，实现对实际系统的控制<sup>[6-9]</sup>。

考虑过程工业的工程复杂性和管理复杂性，本文以典型的煤气化生产过程为例，基于机理、知识和数据，构建了模拟系统整体行为的人工系统。该人工系统可以用于计算实验，通过采集现场运行数据来分析复杂系统的行为和反应，并对不同的控制方案进行效果评估，为实际系统优化控制决策提供有效依据；该人工系统可以作为现场操作人员的学习与培训中心，能够使有关人员迅速掌握实际系统的运行状况并采取相应的控制方案。实际运行表明，该人工系统具有很高的稳态精度和动态精度，能准确反映实际生产系统的特性。

## 1 复杂过程工业的人工系统

现代控制理论的典型方法是通过对系统进行建模，通过模型来分析系统的行为，进而达到对系统的控制。但是，复杂系统多重性与开放性的特征使得传统的建模方法难以奏效。

人工系统的概念是传统控制领域里面建模思想的进一步发展，为复杂系统的建模提供了新的手段。人工系统既考虑了工程模态的复杂性，还包括管理甚至相关的社会模态的复杂性。人工系统的构建可以是基于实际现场采集的自然或人工数据，然后通过数据分析使用机器学习的方法，甚至是人工辅助的方法来实现的<sup>[6-9]</sup>。

人工系统包括基础构建层和数据层，对具体应用领域中的过程、参与者、环境、规则和机制建模形成各自的模型库。

人工系统构建过程中同时考虑了系统的工程复杂性与管理复杂性的问题，因此，可以从功能和行为层面准确反映实际系统的特性。构建复杂过程工业的人工系统大致分为以下几个步骤：

（1）基于设计工况数据和机理假设构建出稳态工况模型。通过详细分析过程机理，建立基于质量、能量、化学反应平衡的机理模型，其中不确定的物流和物性数据一方面可以通过开发嵌入式微型传感器进行采集，另一方面也可以通过神经网络、模糊推理等智能辨识的方法确定。

（2）稳态人工系统是基于设计工况数据和机理假设而构建的，设计工况数据只是理想参考值，与复杂过程工业系统的实际运行数据差别很大，需要利用实际生产数据，采用数据挖掘、智能辨识等方法，对稳态工况模型进行修正，以准确反映实际系统的运行特性，使稳态人工系统升级为过程工业的全工况动态人工系统，作为系统工艺优化的基础。

（3）在反映工程特性的模型之上，需要建立运行控制和管理系统的模型，涉及人、财、物等管理因素，才能更准确地描述复杂过程工业系统的动态行为，作为进一步决策、计划、调度与控制优化的基础。

## 2 煤气化生产过程的人工系统构建

典型的煤气化生产过程设备繁多，流程复杂，控制及运行参数耦合性强，导致整体系统建模非常困难。人工系统的建模方法充分考虑工程复杂性和管理复杂性，将生产流程用机理模型进行描述，构建关键设备的模型库。在某些过程机理不清楚或不稳定的情况下，采用神经网络、模糊推理等智能辨识方法，结合长期生产积累的经

验,作为先验知识整合入模型中,从而首先建立起基于设计工况数据的人工系统。显然,这对于实际系统的非设计工况的模拟会存在偏差,需要利用实际系统产生的大量的生产过程数据,对人工系统的数据进行校正,以满足实际系统全工况模拟的要求,进一步实现人工系统的学习与演化。

下面具体讲述煤气化生产过程的人工系统构建方法。

## 2.1 过程机理建模与智能辨识相结合

根据煤气化生产过程的数据,例如物料的温度、压力、流量、组成和有关的工艺操作条件、工艺规定、产品规格以及设备参数,将由多个单元过程组成的生产流程用机理模型描述,并在计算机上通过改变各种条件得到所需要的结果,建立了整体流程人工系统结构框架,如图1所示。

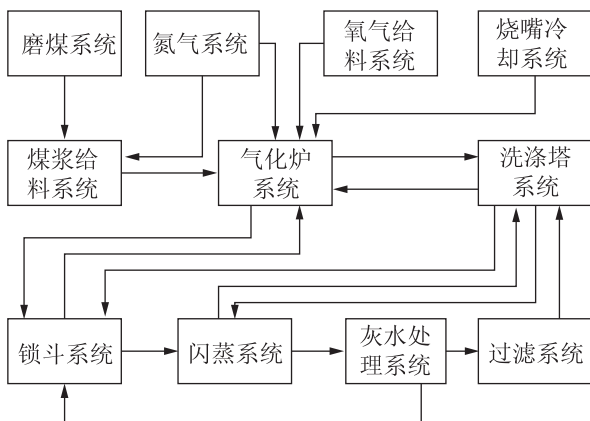


图1 煤气化生产过程的人工系统框图

利用该人工系统,对现场操作人员进行培训,可以帮助操作工在给定的限制范围内优化工艺条件,改进现有的生产工艺。然而,各个单元的建模工作是在机理模型基础上进行的,某些过程机理不清楚或不稳定,物流物性数据不完整,很难通过单一机理建模的方法构建出过程模型。例如煤气化生产过程的核心设备气化炉,由于设备庞大复杂,炉内化学反应剧烈,炉内温度高等特点,很难实时精确测量气化炉出口气体组分含量和炉内温度。

因此,在建立气化炉系统的人工系统模型时,充分考虑动力学和热力学特性(如表1所示<sup>[10]</sup>),按照质量平衡、能量平衡和化学反应平衡,用一组数学方程来描述煤气化炉的状态<sup>[11]</sup>。对于煤气化反应中的关键数据,如碳的转化率、变换反应的平衡常数、水蒸气的比热等,采用智能辨识的方法辨识相关参数,即采用数据回归的方法进行推断,或者根据特定参数经验值加以估算,也可以采用人工神经网络的方法进行逼近,动态辨识相应的参数,并加入长期生产积累的有效经验作为先验知识,最终建立了气化炉这个关键设备的机理模型。

对于图1中的其他子系统模块,在建模时同样考虑其相应的机理特性,通过质量、能量衡算,分别建立各个子系统的模型,最终整合成完整的气化系统的人工系统模型。所建立的人工系统如图2所示。

表1 煤气化基本化学反应<sup>[10]</sup>

(1) 非均相水煤气反应	$C + H_2O = H_2 + CO$	$\Delta H = +118.5 \text{ KJ/mol}$
(2) 变换反应	$CO + H_2O = CO_2 + H_2$	$\Delta H = -42.3 \text{ KJ/mol}$
(3) 甲烷化反应	$CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O$	$\Delta H = -206.0 \text{ KJ/mol}$
(4) 加氢气化	$C + H_2 = CH_4$	$\Delta H = -87.5 \text{ KJ/mol}$
(5) 部分氧化	$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$	$\Delta H = -123.1 \text{ KJ/mol}$
(6) 氧化	$C + O_2 = CO_2$	$\Delta H = -406.0 \text{ KJ/mol}$
(7) 波杜反应	$C + CO_2 = 2CO$	$\Delta H = +159.9 \text{ KJ/mol}$

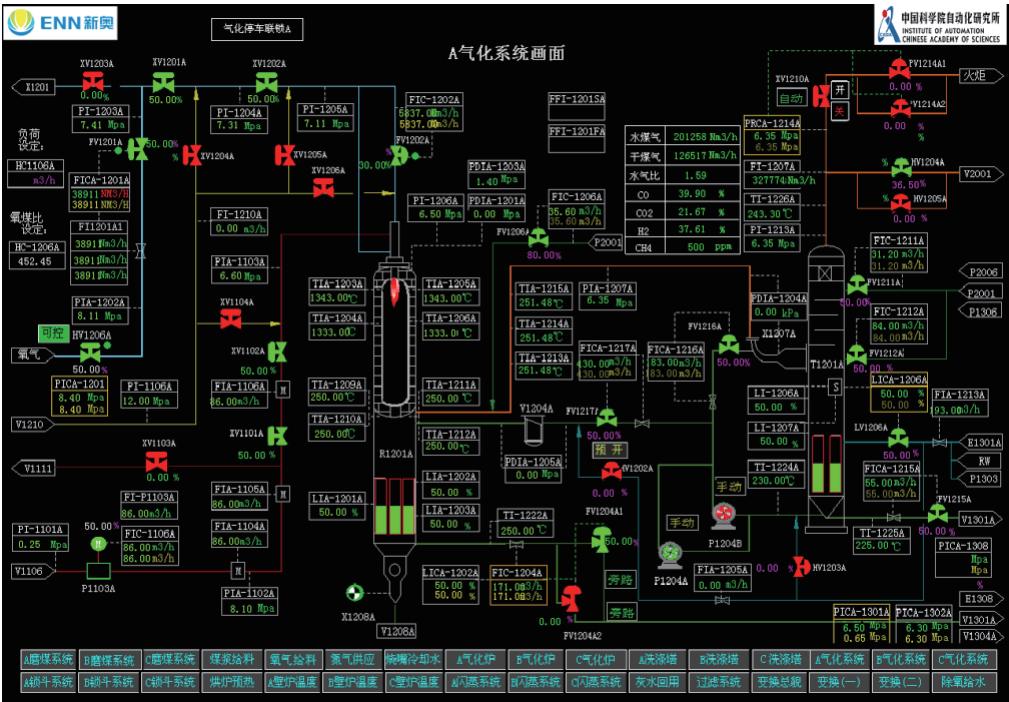


图2 煤气化生产过程的人工系统画面

在所建立的人工系统进行初步的实验进行验证，计算得到的数据与实际系统吻合得很好，其中煤浆给料的数据如图3所示，验证了煤气化生产过程的人工系统的高精度。

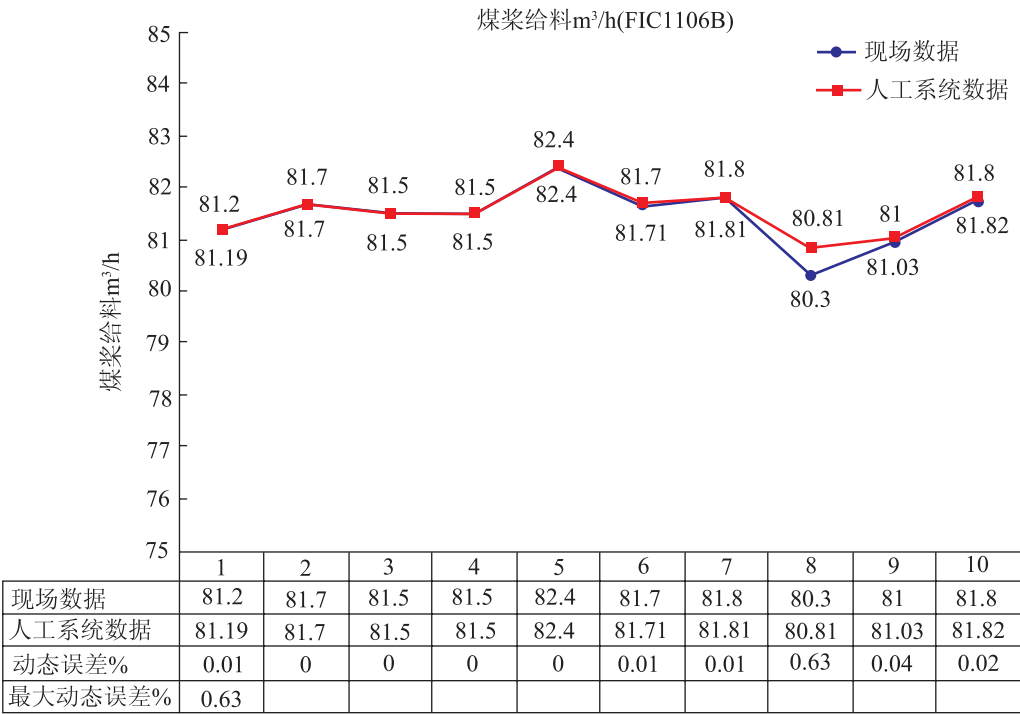


图3 人工系统和实际系统的煤浆给料的结果比较



## 2.2 考虑社会因素和管理复杂性的人工系统

实际生产过程中,各种人员和设备与环境之间相互作用,相互影响,工作人员的精神状态,生产设备的运行状况,以及生产过程中相关的管理规定,都将对生产过程的效率、产品的质量等产生重要影响。因此,在人工系统的建模过程中,考虑各种社会因素和管理复杂性,可以采用机器学习和自然语言处理技术半自动的构建领域知识库,实现平台内部领域知识的存储、表达与推理,最终实现管理部分的建模,并与工程部分集成形成整体人工系统。

## 2.3 人工系统的学习与演化

人工系统是根据设计工况数据建立的,而设计工况数据只是理想参考值,实际生产过程由于外界条件以及系统本身的变化很难处于设计工况下运行。因此,人工系统与实际系统肯定存在偏差,这就需要对人工系统的模型参数等数据进行校正,以实现人工系统对实际系统的动态模拟,进一步实现系统优化。

煤气化生产过程中实时产生大量的生产数据,隐含了控制系统和设备运行的重要信息,可以利用数据挖掘、统计学习等方法从数据中提取这些关键信息,一方面可以作为知识融入到人工系统中指导生产,另一方面,这些信息可以作为人工系统自身修正的依据。利用这些数据信息,可以通过强化学习、演化计算等方法,使人工系统对自身进行学习和校正,与实际系统保持动态一致。人工系统对实际系统的准确模拟,不但可以指导系统优化,而且能够对系统行为做出预测,以便应对实际系统可能出现的情况。

## 3 基于煤气化生产过程人工系统构建的计算实验

基于煤气化生产过程的人工系统,我们可以进行计算实验优化煤气化生产过程。本文以自适应动态规划为基础,采用神经网络自学习优化煤气化控制系统<sup>[12]</sup>。自适应动态规划(Adaptive Dynamic Programming, ADP)由美国学者P.J. Werbos首次提出<sup>[13]</sup>,自适应动态规划以最优性原理为基础,融合人工智能的先进方法,是解决大规模复杂非线性系统智能优化控制问题的强有力的工具。

采用神经网络重构气化炉系统如下,

$$x_{k+1} = \bar{F}(x_k, u_k, w_k) = W_m^T \sigma(Y_m^T Z_k) + w_k \quad (1)$$

其中  $x_k$  为系统状态(温度),  $u_k$  为系统控制(水、煤、氧气的流量),  $w_k$  为系统噪声。设性能指标函数为

$$J(x_0, u_0, w_0) = \sum_{k=0}^{\infty} U(x_k, u_k, w_k) \quad (2)$$

其中效用函数  $U(x_k, u_k, w_k)$  对  $x_k, u_k$  正定,对  $w_k$  负定。根据控制目标,最优性能指标函数可以定义为

$$J^*(x_k) = \inf_{u_k} \sup_{w_k} J(x_k, u_k, w_k) \quad (3)$$

根据最优性原理,我们可以建立新型迭代自适应动态规划方法获得系统最优控制策略。下面我们将以迭代  $\theta$ -自适应动态规划为基础进行阐述。

令  $\Psi(x_k) \in \bar{\Psi}_{x_k}$  为正定函数。对于  $\forall x_k \in R^n$ , 我们令初始迭代性能指标函数

$$V_0(x_k) = \theta \Psi(x_k) \quad (4)$$

其中  $\theta$  为足够大的常数。

根据迭代自适应动态规划理论,对于  $\forall i=0,1,\dots$ , 我们可以获得迭代控制对  $(\hat{v}_i(x_k), \hat{w}_i(x_k))$  表示为

$$\begin{cases} \hat{w}_i(x_k) = \arg \max_{w_k} \{U(x_k, u_k, w_k) + \hat{V}_i(x_{k+1})\} + \xi_i(x_k), \\ \hat{v}_i(x_k) = \arg \min_{u_k} \{U(x_k, u_k, \hat{w}_i(x_k)) + \hat{V}_i(F(x_k, u_k, \hat{w}_i(x_k)))\} + \rho_i(x_k), \end{cases} \quad (5)$$

迭代性能指标函数表示为

$$\begin{aligned}\hat{V}_{i+1}(x_k) &= \min_{u_k} \max_{w_k} \{ U(x_k, u_k, w_k) + \hat{V}_i(x_{k+1}) \} + \pi_i(x_k) \\ &= U(x_k, \hat{v}_i(x_k), \hat{w}_i(x_k)) + \hat{V}_i(F(x_k, \hat{v}_i(x_k), \hat{w}_i(x_k))) + \pi_i(x_k)\end{aligned}\quad (6)$$

其中,  $\xi_i(x_k), \rho_i(x_k), \pi_i(x_k)$  为迭代误差。如果效用函数定义为广义二次型函数为

$$U(x_k, u_k, w_k) = x_k^T A x_k + u_k^T B u_k + w_k^T C w_k + 2u_k^T D w_k + 2x_k^T E u_k + 2x_k^T F w_k \quad (7)$$

其中,  $A, B > 0, C < 0, D, E, F$  为具有合适维数的常数矩阵, 那么我们可以获得迭代控制对表示为

$$\begin{cases} \hat{w}_i(x_k) = -\frac{1}{2}C^{-1} \left( 2D^T \hat{v}_i(x_k) + 2F^T x_k + (W_m^T \sigma(Y_m^T Z_k))^T \frac{\partial \hat{V}_i(x_{k+1})}{\partial x_{k+1}} \right) + \xi_i(x_k), \\ \hat{v}_i(x_k) = -\frac{1}{2}(B - DC^{-1}D^T)^{-1} \left( 2(E^T - DC^{-1}F^T)x_k + \left( \left( W_m^T \frac{\partial(\sigma(Y_m^T X))}{\partial(Y_m^T X)} Y_m^T \frac{\partial Z_k}{\partial \hat{v}_i(x_k)} \right)^T \right. \right. \\ \left. \left. - DC^{-1}(W_m^T \sigma(Y_m^T Z_k))^T \frac{\partial \hat{V}_i(x_{k+1})}{\partial x_{k+1}} + \rho_i(x_k) \right) \right) \end{cases} \quad (8)$$

从(8)式中可以看到, 根据系统输入输出数据, 我们就建立带有迭代误差与系统误差的数据驱动自适应动态规划最优控制方法获得最优控制对, 因此方法切实可行。

由于非线性系统的最优控制策略与最优性能指标函数均是高非线性函数, 因此我们采用神经网络设计系统控制器与逼近性能指标函数。本文采用BP神经网络为实现数据驱动迭代自适应动态规划最优控制方法。图4显示了非线性系统数据驱动自适应动态规划最优控制的实现过程。

设神经网络隐含层神经元个数为  $l$ , 输入层与隐含层之间权值矩阵为  $Y$ , 隐含层和输出层之间权值矩阵为  $W$ , 那么BP神经网络输出为

$$\hat{F}(X, Y, W) = W^T \varphi(Y^T X) \quad (9)$$

其中,  $\varphi$  表示sigmoid函数。

### 3.1 模型神经网络

模型神经网络输入输出映射函数可以表示为

$$\hat{x}_{k+1} = W_m^T \varphi(Y_m^T Z_k) \quad (10)$$

其中  $Z_k = [x_k^T, u_k^T]^T$ ,  $\hat{x}_{k+1}$  是  $x_{k+1}$  的估计值。

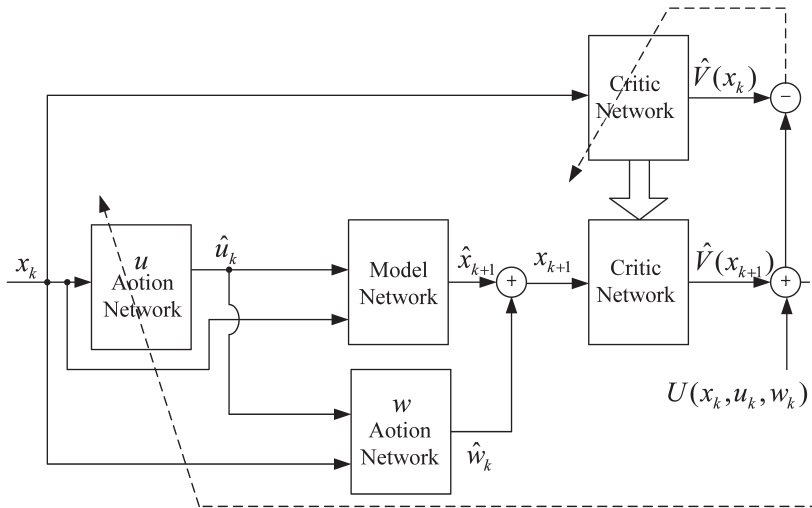


图4 数据驱动自适应动态规划非线性系统最优控制实现框图

定义模型网络误差函数为  $\varepsilon_{mk} = \hat{x}_{k+1} - x_{k+1}$ 。那么模型网络权值更新函数表示为

$$\begin{aligned} w_m(k+1) &= w_m(k) + \Delta w_m(k), \\ \Delta w_m(k) &= \alpha_m \left[ -\frac{\partial E_m(k)}{\partial w_m(k)} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $E_m(k) = \frac{1}{2} \varepsilon_{mk}^2$  为误差指标函数,  $\alpha_m$  是模型网络学习率。

### 3.2 评判神经网络

评判神经网络输入输出映射函数可以表示为

$$\hat{V}_i(x_k) = W_c^T \sigma(Y_c^T x_k) \quad (12)$$

如果令评判神经网络目标函数可以表示为

$$V_{i+1}(x_k) = \min_{u_k} \max_{w_k} \{ U(x_k, u_k, w_k) + \hat{V}_i(x_{k+1}) \} \quad (13)$$

那么可以定义评判网络误差函数为

$$e_{ci}(k) = \hat{V}_i(x_k) - V_i(x_k) \quad (14)$$

那么评判网络权值更新函数表示为

$$\begin{aligned} w_c(k+1) &= w_c(k) + \Delta w_c(k), \\ \Delta w_c(k) &= \alpha_c \left[ -\frac{\partial E_c(k)}{\partial w_c(k)} \right], \\ \frac{\partial E_c(k)}{\partial w_c(k)} &= \frac{\partial E_c(k)}{\partial \hat{V}_i(x_k)} \frac{\partial \hat{V}_i(x_k)}{\partial w_c(k)}, \end{aligned} \quad (15)$$

其中  $E_{ci}(k) = \frac{1}{2} e_{ci}^2(k)$  是评判网络误差指标函数,  $\alpha_c$  是评判网络学习率。

### 3.3 执行网络

执行神经网络输入输出映射函数可以表示为

$$\hat{v}_i(x_k) = W_u^T \sigma(Y_u^T x_k) \quad (16)$$

定义  $u$  执行神经网络的误差函数为  $\rho_i(x_k) = \hat{v}_i(x_k) - v_i(x_k)$ , 其中  $v_i(x_k)$  为目标函数, 定义为

$$\begin{aligned} v_i(x_k) &= -\frac{1}{2} (B - DC^{-1}D^T)^{-1} \\ &\quad \left( 2(E^T - DC^{-1}F^T)x_k + \right. \\ &\quad \left. \left( \left( W_m^T \frac{\partial(\sigma(Y_m^T X))}{\partial(Y_m^T X)} Y_m^T \frac{\partial Z_k}{\partial v_i(x_k)} \right)^T \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - DC^{-1}(W_m^T \sigma(Y_m^T Z_k)) \right)^T \frac{\partial \hat{V}_i(x_{k+1})}{\partial x_{k+1}} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

当评判网络与模型网络训练好之后, (18) 式可以获得数值解因此  $v_i(x_k)$  数值可求。定义  $u$  执行网络性能误差函数  $E_u(k) = \frac{1}{2} (\rho_i(x_k))^2$ 。因此我们就可以更新执行网络权值为

$$\begin{aligned} w_u(k+1) &= w_u(k) + \Delta w_u(k), \\ \Delta w_u(k) &= \beta_u \left[ -\frac{\partial E_u(k)}{\partial w_u(k)} \right], \\ \frac{\partial E_u(k)}{\partial w_u(k)} &= \frac{\partial E_u(k)}{\partial e_u(k)} \frac{\partial e_u(k)}{\partial \hat{v}_i(x_k)} \frac{\partial \hat{v}_i(x_k)}{\partial w_u(k)} \end{aligned} \quad (18)$$

其中  $\beta_u > 0$  是执行网络学习率。

### 3.4 $w$ 执行网络 ( $w$ Action Neural Network)

$w$  执行神经网络输入输出映射函数可以表示为

$$\hat{v}_i(x_k) = W_u^T \sigma(Y_u^T X_k) \quad (19)$$

其中  $X_k = [x_k^T, u_k^T]^T$ 。定义  $w$  执行神经网络的误差函数为  $\xi_i(x_k) = \hat{w}_i(x_k) - w_i(x_k)$ 。  $w_i(x_k)$  为目标函数, 定义为

$$\begin{aligned} w_i(x_k) &= -\frac{1}{2} C^{-1} \left( 2D^T \hat{v}_i(x_k) + \right. \\ &\quad \left. 2F^T x_k + (W_m^T \sigma(Y_m^T Z_k))^T \frac{\partial \hat{V}_i(x_{k+1})}{\partial x_{k+1}} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

由于  $u$  执行网络已训练完成, 因此  $\hat{v}_i(x_k)$  已知, 表示为  $\hat{v}_i(x_k) = W_u^T \sigma(Y_u^T x_k)$ 。定义  $w$  执行网络误差指标函数  $E_a(k) = \frac{1}{2} (\xi_i(x_k))^2$ 。因此我们就可以更新执行网络权值为

$$\begin{aligned} w_a(k+1) &= w_a(k) + \Delta w_a(k), \\ \Delta w_a(k) &= -\beta_a \left[ \frac{\partial E_a(k)}{\partial e_a(k)} \frac{\partial e_a(k)}{\partial \hat{w}_i(x_k)} \frac{\partial \hat{w}_i(x_k)}{\partial w_a(k)} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

其中  $\beta_a > 0$  是执行网络学习率。因此, 我们可以获得如下计算实验结果。图5显示了系统的状态轨迹, 即气化炉炉温控制轨迹。图6与图7为系统控制输入与系统输出轨迹, 其中系统控制包括煤 (coal)、水 ( $H_2O$ )、氧气 ( $O_2$ ), 具体轨迹可见图6a-6c。系统输出包括一氧化碳 ( $CO$ )、二氧化碳 ( $CO_2$ )、氢气 ( $H_2$ )、水 ( $H_2O$ ) 与残渣 (Char), 具体轨迹可见图6d, 图7a-7d。

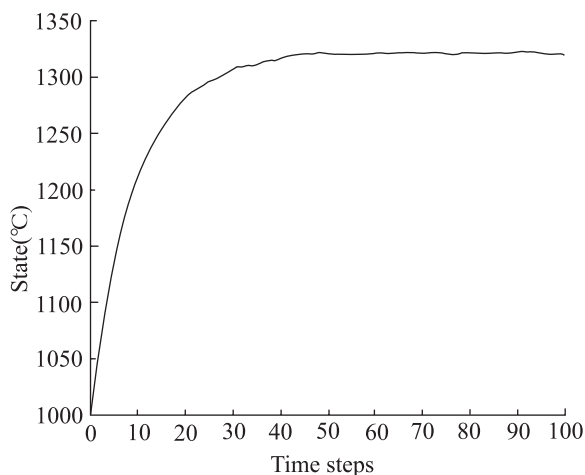


图5 系统状态

从以上结果中可以看出，在基于煤气化生产过程人工系统的基础上，我们通过DCS采集的大量数据，建立了基于自适应动态规划的计算实验方法有效地获得了煤气化系统的最优控制控制方案，同时在人工系统基础上对所提出的控制方案

进行稳定性与最优性等性能分析，确保方法的有效性。因此可以看到对于复杂生产系统，通过建立人工系统，然后在人工系统的基础上建立计算实验的方法是解决复杂系统优化控制与管理的有效方案。

## 4 结论

针对复杂过程工业系统的建模问题，阐述了复杂过程工业的人工系统建模方法和步骤，并以典型煤气化生产过程为例，将机理建模与智能辨识方法相结合，建立了煤气化生产过程的人工系统，讨论了考虑管理复杂性的人工系统完善方法，对人工系统的自学习与演化方法提出了设想。同时给出了基于人工系统进行计算实验的数值实例，验证方法的有效性。

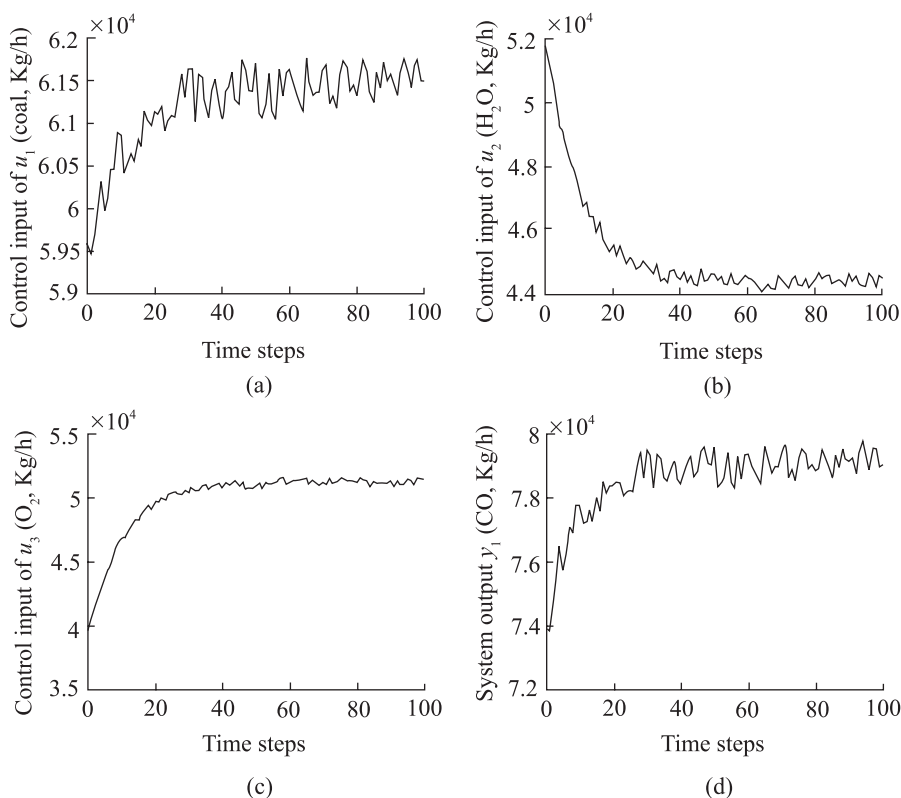


图6 系统控制输入

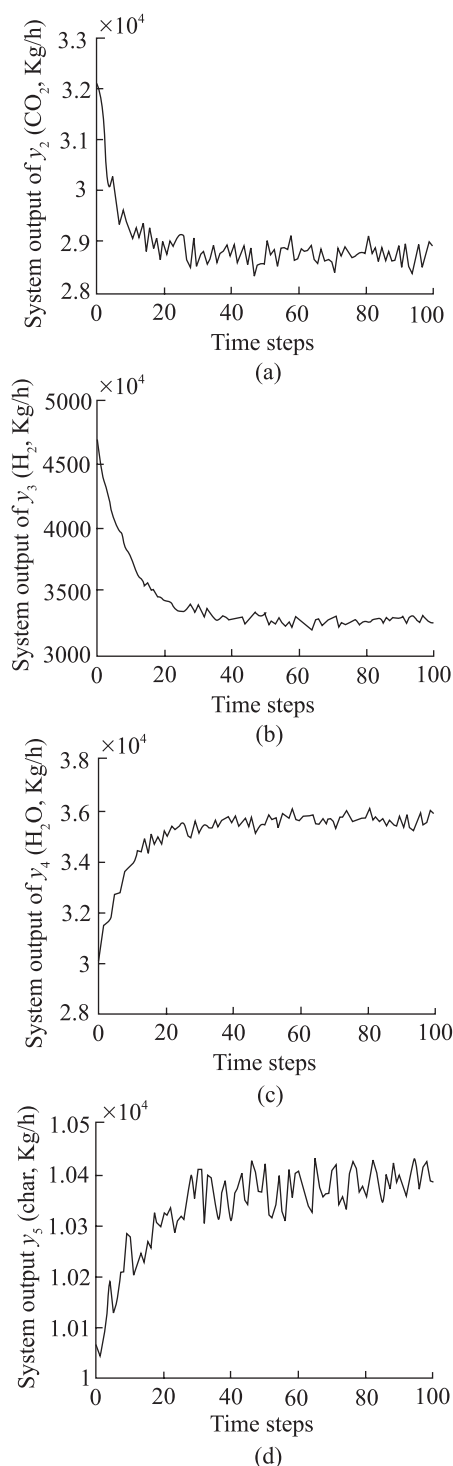


图7 系统输出

## 参考文献

- [1] 徐振刚, 陈亚飞. 我国煤化工的技术现状与发展对策[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(8): 6-12.
- [2] J. H. Holland, Studying complex adaptive systems[J]. Journal of

Systems Science and Complexity, 2006, 19 (1): 1-8.

- [3] J. Kennedy, R. C. Eberhart, Y. Shi. Swarm Intelligence [M]. Morgan Kaufmann, 2001.
- [4] W. Weidlich. Sociodynamics applied to the evolution of urban and regional structures [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 1997, 1: 85-98.
- [5] L. Freeman. The Development of Social Network Analysis[M]. Empirical Press, 2006.
- [6] 王飞跃. 关于复杂系统研究的计算理论与方法[J]. 中国基础科学, 2004, 6(5): 2-10.
- [7] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- [8] 王飞跃. 关于复杂系统的建模、分析、控制和管理[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006, 3(2): 26-34.
- [9] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统--关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25-35.
- [10] P. Ruprecht, W. Schüfer, P. Wallace, 官知义. 德士古开发的气流床带煤气化计算机模型[J]. 化肥工业, 1991, 6(3): 15-19.
- [11] 赵冬斌, 杨晟刚, 易建强, 张彦. 煤气化炉的仿真系统开发[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1258-1260.
- [12] Qinglai Wei and Derong Liu. Adaptive dynamic programming for optimal tracking control of unknown nonlinear systems with application to coal gasification[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Article in Press. DOI: 10.1109/TASE.2013.2280974.
- [13] P. J. Werbos, Advanced forecasting methods for global crisis warning and models of intelligence, General Systems Yearbook, 22, pp. 25-38, 1977.

## 作者简介

**赵冬斌** 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研究员、博导。研究方向为智能控制、过程控制。

**魏庆来** 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。主要研究兴趣为基于数据的控制、自适应动态规划、最优控制, 非线性控制和神经网络控制理论。

**刘德荣** 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副主任、研究员、博导。研究方向为智能控制理论及应用、计算智能、复杂系统理论与方法、过程控制、电力系统运行与控制。



# 大脑认知行为在复杂工业过程建模与优化控制中的作用

王 宏<sup>1</sup>, 王 宏<sup>2</sup>

1. 东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳 110004

2. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110004

## 1 引言

复杂工业过程包括选矿生产过程、化工生产过程、金属冶炼过程、电力系统和制造系统等,是国民经济的重要支柱,在提高我国综合国力、促进经济发展、拉动内需等方面起着关键性的作用<sup>[1]</sup>。为应对全球市场竞争的挑战,满足国家产业转型过程中节能减排等工业生态化发展的重大需求,复杂工业过程日益趋向大型化、高投资、技术密集和知识密集,如何能够保证这类生产过程的安全、稳定、长周期和满负荷优质运行是学术界和产业界共同关注的重大课题,需要突破传统的局部优化决策的方法从系统工程的角度寻求新理论和新方法<sup>[2]</sup>。

工业过程的复杂性体现在由复杂生产工艺导致的工程复杂性和由人与组织行为因素导致的社会复杂性。长期以来,人们倾向于从工程复杂性因素着手来研究工业过程的优化决策问题<sup>[3-6]</sup>。此外,复杂工业过程在运行时,大都具有二维运行模式,即由各生产单元以串联为主题的横向模式和由计算机分布式控制系统、计划调度和企业经营决策管理组成的纵向模式。提高产品质量和节能降耗的关键是实现纵向和横向模式的协调优化运行。而操作人员在纵向模式和横向模式中间起

着承上启下的协调与优化作用,操作人员的行为对整个系统的优化运行至关重要<sup>[7,8]</sup>。

研究操作人员的行为,总结好的操作人员的经验并把这些好的经验用于控制与优化,一直是人工智能系统研究领域的重要组成部分,是智能控制的核心目标。

## 2 需要解决的问题

可见,人、自动化控制系统和工业系统之间的最大和谐才是保证复杂工业过程优化运行的关键,将人员的行为纳入到优化决策的范畴,实现“人在回路”的闭环控制理念,是复杂工业过程优化运行研究的前沿。要实现“人在回路”的闭环优化控制,至少需要考虑如下几方面因素:

(1) 使人对系统了如指掌,通过人机交互界面让操作人员了解自动化控制系统在做什么以及为什么要这样做;

(2) 使人得到充分的训练,人能够通过自身理性的推理和判断,根据工作任务收索自动化系统的功能;当自动化系统失灵时,需要人为干预;

(3) 使操作人员始终处于控制环路中,这是以人为中心的自动控制系统最具挑战的目标,这

里,自动控制系统擅长在极短的时间内处理复杂的操作,但是缺少逻辑判断的能力,而人擅长逻辑判断,两者有机结合来优化整个过程;

(4)通过人的参与,使自动控制系统更加灵活,即根据任务需要,操作人员灵活地调节自动化控制水平<sup>[9]</sup>。

操作人员的主观认知行为是由大脑控制的。长期以来,人们通常用语言和文字来描述人脑的思维状况,描述操作人员的经验和解决问题的思路。针对人机交互的自动控制系统,曾提出了各具特色的认知行为理论模型,如MHP模型(Model Human Processor)<sup>[10,11]</sup>、SOAR模型(State Operator And Result)<sup>[12,13]</sup>和ACT-R模型(Adaptive Control of Thought-Rational)<sup>[14,15]</sup>等。在复杂工业过程优化决策研究方面,也采用了模糊逻辑,基于案例推理和规则推理的各类专家系统来协助计算机控制系统的运行<sup>[16-20]</sup>。但这些系统都没有与真实的人脑思维信息建立直接的联系。可能会出现这样的情况,即对于使用不同母语描述的知识,需要将母语描述翻译成目标语言。如果母语描述短就不易翻译准确,影响目标语言的正确性;如果描述母语长,翻译的工作量就大。对于特殊领域,如果语言翻译者对其专业不精通,翻译后的目标语言的准确性会下降,甚至语义完全不同。1989年野中郁次郎也提出了知识螺旋的概念,解释了内隐知识和外显知识的互动模式<sup>[21-22]</sup>。所谓内隐知识是来源于人体的“说不出来”的知识和可能存在的潜意识。此类知识难以用文字、程序或图形的形式向外传递。实际上,人的行为是由脑来控制的,针对这种无法表达且传递较为困难的內隐知识,采用分析相关人员脑电等生理信号的方式进行知识提取,将是一种可行的方法。

### 3 脑电信号与控制系统的结合

脑电波是大脑思维活动的一种外在形式,人

的某些思维活动在脑电波中能体现出某种节律和空间分布的特征,所以分析脑电波可以在一定程度上判断出大脑的思维状态。那么与人的思维相对应的脑的内在因素是什么呢?学习与记忆是脑思维的重要机能。记忆主要分为短时记忆和长时记忆。人类专家的经验主要存储为长时记忆,新的学习过程建立的记忆主要是短时记忆。根据Hebb规则,在学习记忆过程中,突触连接强度发生变化,大脑神经细胞会自组织形成集合,伴随着神经电冲动在神经集合中的循环传递,使短时记忆转变为长时记忆。神经电冲动在其周围形成的电场可传导到大脑皮表对应的功能区。导致在时间上,各模式脑皮层区电活跃顺序不一样;在空间上,不同行为模式对应不同的脑功能区<sup>[23]</sup>。

根据上述原理,控制系统的操作人员每完成一次任务,脑内就会形成一种神经网络结构,并且连接相关神经元的突触强度得到增强,若经常反复练习这个任务使这个网络结构不断加强和完善,形成长时记忆;若完成不同的操作任务,其脑内的神经网络结构也会不同;或者只操作一次任务,脑内新建的神经网络结构就会随着时间而解体。这就导致了经验丰富和不丰富的操作人员在系统控制操作过程中对应脑功能区的神经电活动不同。

## 4 创新思路的形成与进一步的研究

2012年7月,东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室《千人计划》教授王宏在与东北大学机械工程与自动化学院王宏教授和英国来访者的吴勉洪教授在讨论可能的合作研究时,针对机械学院王宏教授在脑电信号方面的研究积累,结合复杂工业过程操作人员的重要作用,提出了将脑电信号和复杂工业过程自动控制系统直接融合的初步设想。当时的想法是有经验的操作人员的

脑电信号中的随机因素会比没经验的操作人员的脑电信号中的随机因素少。这表明可以用概率密度函数的形状来描述脑电信号中的随机度。这至少会对自动选择好的操作经验有帮助。

之后,根据王宏教授提出的输出概率密度函数形状控制建模理论<sup>[24]</sup>,2013年张驰等首次报道了将操作人员大脑思维产生的脑电 $\alpha$ 波信号特征与输出概率密度函数形状控制建模理论相结合的模型,建立了融合人脑思维信息的专家系统的推理机制,实现了利用脑电信号的输出概率密度函数有效地预测操作人员操作信息的模型<sup>[25]</sup>。在上述基础上,东北大学王宏教授团队采用B样条的小波熵方法,对选矿生产集中控制操作平台上具有丰富经验的操作人员在工作中的脑电波信息进行了特征提取,发现操作人员的脑电信号的 $\alpha$  (8-13Hz)和 $\beta$  (14-30Hz)可作为描述工作过程的特征量。面向整个生产控制过程,基于逻辑思维的脑电信号特征,可对操作人员的行为进行量化,从而建立操作人员控制行为-脑电特征-控制效果之间的映射关系。

进一步研究的目的是将上述研究成果逐步融合在复杂工业过程建模与优化控制中,将操作人员的好的思维与判断以脑电信号特征量化的形式与复杂工业过程的计算机控制系统(DCS)进行有机的结合,超越语言文字作为逻辑思维的载体,形成复杂工业过程建模与优化运行的新的智能控制理论与方法。

### 参 考 文 献

- [1] 柴天佑,金以慧,任德祥,邵惠鹤,钱积新,李平,桂卫华,郑秉霖. 基于三层结构的金矿企业现代集成制造系统. 控制工程, 2003, 10(1):18-22.
- [2] 曹湘洪. 解放思想 依靠科学 强化管理: 努力延长乙烯装置运转周期. 化工管理, 2004, (3):12-13.
- [3] Wang H. Bounded dynamic stochastic systems: modeling and control. London: Springer-Verlag, 2000.

- [4] 柴天佑. 生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战. 自动化学报, 2009, 35(6):641-648.
- [5] Rubio L, Sen MD, Longstaff AP, Fletcher S. Model-based expert system to automatically adapt milling forces in Pareto optimal multi-objective working points. Expert Systems with Applications, 2013, 40:2312-2322.
- [6] Sahin S, Tolun MR, Hassanpour R. Hybrid expert systems: A survey of current approaches and applications. Expert Systems with Applications, 2012, 39: 4609-4617.
- [7] Wang FY. The emergence of intelligent enterprises: From CPS to CPSS. IEEE Intelligent Systems, 2010, 25(4): 85-88.
- [8] 刘作仪, 查勇. 行为运作管理: 一个正在显现的研究领域. 管理科学学报, 2009, 12(4):64-74.
- [9] 威肯斯(美国)编著, 张侃等翻译, 人因工程学导论. 华东师范大学出版社, 2007
- [10] Card S, Moran T, Newell A. The model human processor: An engineering model of human performance. Handbook of perception and human performance, 1986, 2: 1-35.
- [11] Lin HT, Chen YT, Chou TY, Liao YC. Crew rostering with multiple goals: An empirical study. Computers & Industrial Engineering, 2012, 63:483-493.
- [12] Laird JE, Newell A, Rosenbloom PS. SOAR: An architecture for general intelligence. Artificial Intelligence, 1987, 33(1):1-64.
- [13] Derbinsky N, Laird JE. Effective and efficient forgetting of learned knowledge in Soar's working and procedural memories. Cognitive Systems Research, 2013, in press.
- [14] Anderson JR, Bothell D, Byrne MD, Douglass Lebiere SC, Qin YL. An integrated theory of the mind. Psychological Review, 2004, 111(4):1036-1060.
- [15] Oyewole SA, Farde AM, Haight JM, Okareh OT. Evaluation of complex and dynamic safety tasks in human learning using the ACT-R and SOAR skill acquisition theories. Computers in Human Behavior, 2011, 27(5):1984-1995.
- [16] Smyth B, Keane MT, Cunningham P. Hierarchical case-based reasoning integrating case-based and compositional problem-solving techniques for plant-control software design. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering, 2001, 13(5): 793-812.
- [17] Acevedo PR, Martínez JFF, González MD, Valencia RG. Case-Based reasoning and system identification for control engineering learning.

- IEEE Trans on Education, 2008, 51(2):271-281.
- [18] 卢荣德,陈宗海,王雷. 思维模拟在复杂工业过程建模中应用的综述.信息与控制, 2002, 31(4):346-352.
- [19] Les T, Kruk M, Osowski S. Automatic recognition of industrial tools using artificial intelligence approach. Expert Systems with Applications, 2013, in press.
- [20] 黄肖玲, 柴天佑. 复杂生产过程计划调度级联模型在选矿MES中的应用研究. 自动化学报, 2011, 37(9): 1130-1139.
- [21] 野中郁次郎, 竹内弘高. 创造知识的企业---日美企业持续创新的动力. 李盟, 高飞译. 北京: 知识产权出版社, 2006.
- [22] Nonaka I, Takeuchi H. The knowledge-creating company. New York: Oxford University Press, 1995:124-167.
- [23] 王宏, 李春胜, 刘冲, 生物机械电子工程, 高等教育出版社, 2014
- [24] Wang H. Minimum entropy control of non-Gaussian dynamic stochastic systems. IEEE Trans on Automatic, 2002, 47(2): 298-403.
- [25] Chi Zhang, Hong Wang, Hong Wang, and Mian-Hong Wu. EEG-based expert system using complexity measures and probability density function control in alpha sub-band. Integrated Computer-Aided Engineering, 2013, 20(4): 391-405.

## 作者简介

**王 宏** 女, 1982年1月于东北大学获得学士学位, 1986年4月于东北大学获得硕士学位, 1998年1月于德国马格德堡大学获得博士学位, 现任东北大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为生物电信号的检测和利用等。

**王 宏** 男, 东北大学教授, IET Fellow 和 InstMC Fellow。2009年中组部《千人计划》入选者。2002-2006为中科院《百人计划》, 2006-2009为《长江学者讲座》教授。曾任英国曼彻斯特大学控制工程终身教授, 大学常务董事。王宏的研究工作主要是 (1) 随机分布控制, (2) 动态系统故障诊断, (3) 复杂工业过程建模、控制和多目标优化。研究工作既包括了基础理论方面的创新, 也包括了在工业过程中的直接应用。王宏于1996年发起了随机分布控制方面的研究, 并发表学术专著5部和多篇国际期刊、会议论文。获国际奖两项和2002年基金委海外杰青资助。王宏现任七个国际学术期刊IEEE Transactions on Control Systems Technology等的编委, 国际控制联合会 (IFAC) 三个专业委员会委员, 英国自动化学会常务理事。

# 控制回路性能评估与诊断综述

张抗抗<sup>1,3</sup>, 李 晨<sup>2,3</sup>, 黄 彪<sup>3</sup>

1. 厦门大学自动化系, 福建, 厦门 361005

2. 华东理工大学化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室, 上海 200237

3. Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alberta,

Edmonton, AB, T6G 2G6, Canada

**摘要:** 控制回路性能评估与诊断技术是工业过程控制领域自上世纪80年代末兴起的一项重要技术, 近几十年来一直是该领域的研究热点。该技术旨在利用控制回路中的运行数据对当前控制性能作出评估, 并诊断系统性能下降的底层原因。目前控制回路性能评估与诊断已成为保障工业自动化系统平稳高效运行的主要技术。本文围绕该方向综述了近几十年来的研究成果, 并重点介绍了贝叶斯诊断方法, 同时对该研究领域进行了展望。

## 1 引言

现代工业过程中存在大量的控制回路, 这些控制回路在运行初期一般具有良好的性能, 但如果缺乏定期维护, 控制回路的性能通常会随着时间推移而逐渐下降。控制性能下降将导致生产效率降低、产品产量降低、不合格率增加和操作成本增加等问题。因此, 只有对控制回路进行定期的评估、诊断和维护才能保证工业生产的可靠和高效。本文主要介绍控制回路性能评估和诊断方面的工作。控制回路性能评估指的是: 在不影响系统正常运行的前提下, 利用回路中的运行数据建立控制回路性能指标, 对当前控制性能作出评价。控制回路诊断是指: 对控制系统进行监测和诊断, 找出引起控制系统性能下降的底层原因。该领域发展迅速, 目前已经发表了大量的论文, 一些教科书和综述论文可见<sup>[20,22,24,28,46]</sup>。本文将综述

该领域近20年来的主要研究成果, 但由于篇幅所限, 在此不能完全列举所有成果。

## 2 控制回路性能评估

控制回路性能评估旨在监测当前控制回路的总体控制效果, 其思想是通过当前控制回路的特性找出最优的性能基准, 并比较当前的控制性能, 得出评价指标。主要的性能评价指标有: 最小方差基准、用户自定义基准、先进基准和针对比例积分微分 (PID) 控制器和模型预测控制器 (MPC) 的性能基准, 以及非线性控制系统性能评估。

### 2.1 最小方差基准

控制系统性能评估的奠基性工作是由Harris在1989年做出的<sup>[12]</sup>, 他提出可以从控制系统的闭环



输出数据中分离出最小方差(MV)项,而且该计算不需要知道具体的过程模型和噪声模型,只需要过程的时滞信息,并以此定义了控制系统的性能指标。最小方差基准是针对线性的单输入单输出系统提出的<sup>[6,20]</sup>,之后该基准被扩展到前馈反馈系统<sup>[7,21]</sup>,不稳定和非最小相位系统<sup>[54]</sup>,多输入多输出系统<sup>[15,58]</sup>和具有变工作点<sup>[30,57]</sup>和时变特性的系统<sup>[17,36]</sup>。近年来的研究热点主要集中在MPC和非线性控制系统性能评估基准的设计和应用<sup>[56,60]</sup>。需要指出的是最小方差基准虽然提供了一个系统输出方差的理论下限,但在实际过程中可能无法得到最小方差。

## 2.2 用户自定义基准

将用户的性能要求如上升时间和整定时间等加入到最小方差基准之后就构成了用户自定义基准<sup>[33]</sup>。另一种常用的基准是基于历史数据的性能评估基准<sup>[37,44]</sup>,该基准利用当前的输出方差和参考阶段的输出方差的比值做为评估基准,其中参考阶段是控制系统的性能被认为是良好的一段时间段。这两类性能评估基准虽然在实际应用中非常简单实用,但是得出的性能指标主观性较强,因此在实际应用中还应参考其他性能指标作出评判。

## 2.3 输入输出方差基准

如果考虑对系统控制作用的惩罚,则可以使用广义最小方差基准<sup>[11]</sup>和线性二次高斯(LQG)基准<sup>[5,20]</sup>。这类基准允许用户考察在控制输入方差一定的前提下系统输出方差可能的变化范围。控制输入方差代表了控制作用的大小,因为在实际应用中系统的控制输入总是被限制在一定的范围之内,因此相比于其他基准这类基准更加合理。然而,这类方法的局限性在于需要更多的过程信息,例如过程或噪声模型。

## 2.4 针对比例积分微分(PID)控制器和模型预测控制器(MPC)的性能基准

针对在实际中应用最广泛的两类控制器—PID控制器和预测控制器,许多学者提出了相应的性能评估基准。PID性能基准<sup>[9,31]</sup>是在给定固定的控制器结构和待定的控制器参数下,对控制系统的输出方差求取一个能达到的最小值,同时,该优化问题的结果不仅能得到限定结构下的最小方差,还能够获得达到这一最小方差需要的控制器参数。预测控制器的性能评估相比于其他简单控制器的性能评估更加具有挑战性,因为预测控制器一般都具有较多的变量和约束,同时性能的改善策略通常需要重新的辨识模型而不是简单的调整控制器参数。现有的预测控制器的性能评估研究主要有设计或期望的性能与实际得到的性能的比值做为基准<sup>[29,53]</sup>,预测控制器的经济性能评估<sup>[32,55]</sup>等。该领域最新的研究是<sup>[59]</sup>文提出的,概率密度分布的思想被引入到预测控制器的性能评估中,并能够给出相关变量的概率密度,基于此推导出了新的统计量来对预测控制系统进行评估和监控。然而,非线性预测控制系统的性能评估和监控仍然是一个具有挑战性的问题。

# 3 控制回路监测与诊断

控制回路的监测与诊断是近年来的研究热点,其目的是找出控制回路性能下降的底层原因。本文将简要介绍回路振荡监测、阀门粘滞监测、回路非线性监测和模型失配监测,并重点介绍控制回路的全面诊断(贝叶斯诊断)。

## 3.1 回路振荡监测

输出振荡是控制回路中的一类常见问题,引起该问题的原因通常有:控制器结构或参数不正确,执行机构问题(如控制阀粘滞,死区),

和其它外部的振荡干扰。在多输入多输出的系统中,一个回路的振荡有可能引起其他回路的振荡。对振荡信号的检测主要有四类方法:①检测信号功率谱密度的峰值(传统方法),该方法先估计信号的功率谱密度,后找出功率谱密度的峰值<sup>[25,24]</sup>。②基于偏差的绝对误差积分(IAE)的检测方法,该方法通过控制器的特性计算出IAE的下界,若信号中存在振荡,则实际信号的IAE将大于下界,相关改进算法可见<sup>[50,8]</sup>。③基于自相关分析的检测方法,该方法主要分析信号自相关函数(ACF)的“过零点”,其优势在于对原始信号求自相关函数后可以减少噪声的影响<sup>[51]</sup>。④小波分析,该方法主要用于检测信号中不持续的振荡<sup>[35]</sup>。

### 3.2 阀门粘滞监测

阀门粘滞问题是引起回路震荡的最主要因素。该领域的主要研究方向包括阀门粘滞的建模,检测以及补偿。阀门粘滞的建模主要包含两种方法:①根据阀门的物理特性对其建立机理模型;②分析控制信号输出和阀门动作位置对其建立数据驱动模型。由于阀门粘滞自身复杂的非线性特性,例如粘滞,磁滞,死区等,使得对其进行机理建模非常困难。目前广泛应用的是Choudhury提出的二元参数的数据驱动模型<sup>[48]</sup>。阀门粘滞检测的方法主要有基于信号形状的方法<sup>[34]</sup>;基于控制输出和阀门位置互相关函数的方法<sup>[14]</sup>;基于曲线拟合的方法<sup>[13]</sup>;基于信号形状相似度分析的方法<sup>[43]</sup>;基于Hammerstein模型辨识的方法<sup>[23]</sup>和基于信号形状的面积计算方法<sup>[49]</sup>等。各种方法都有其局限性和优缺点,所以需要用户根据实际情况的需要选择最合适的方法对阀门粘滞进行分析和检测。关于阀门粘滞引起的回路震荡的补偿,目前研究主要针对单回路控制系统通过控制器参数调整进行震荡的补偿<sup>[1]</sup>。

### 3.3 回路非线性监测

在控制系统的实际运行中,一些问题是由非线性因素导致,例如控制对象的时滞,阀门粘滞,死区等等。由于目前许多控制回路性能评价方法基于了线性系统(或局部线性)的假设,当系统存在非线性问题时,这些方法不能正常工作。因此有必要对控制回路进行非线性检测来判断系统的“非线性程度”。目前用于控制回路的非线性检测技术主要分为两类:第一类是计算信号的高阶统计量<sup>[47,4]</sup>。此类方法的思想是判断信号是否仅能用高斯白噪声的时间序列模型近似或需要用其它高阶统计量表示其非线性特征。第二类方法:将时域信号转入频域,并随机去掉一部分相位信息,通过相位信息的可恢复程度来判断原始信号的非线性度<sup>[52]</sup>。

### 3.4 模型失配监测

一些现代控制策略使用了过程的数学模型,如模型预测控制(MPC),内模控制(IMC)等。过程模型的准确性是控制效果的关键,若存在严重的模型误差,则需要启动模型修正或重新建模。在模型误差检测的研究中<sup>[16]</sup>,通过频域分析研究了闭环条件下模型参数突变的算法<sup>[27]</sup>,应用该算法研究了闭环条件下的模型误差检测<sup>[2]</sup>。提出计算模型残差与输入的偏相关度,并以此为准判断模型误差,偏相关度越高则模型误差越大<sup>[3]</sup>。进一步应用和推广该方法,研究了模型误差对控制效果的影响<sup>[45]</sup>。提出了在频域下估计过程模型比率(PMR),通过该比率可以进一步诊断过程与模型的增益误差,时延误差,时间常数误差等<sup>[26]</sup>。提出了外加正弦测试信号的检测方法,该方法分别估计在某几个特定频率点的模型误差,之后加权计算总体误差,同时用误差上界保证了估计的准确性。

### 3.5 控制系统的全面诊断（贝叶斯诊断）

#### 3.5.1 控制系统的全面诊断问题

一个典型控制回路一般由以下几个部分构成：控制器、执行机构、传感器、控制对象、以及扰动，这些部分都有可能出现性能下降（如图1）。对于不同的部分的问题，如上文所述，都有相对应的监测算法。但是，上述监测器算法一般仅针对某一类特定的性能下降进行分析监测，忽略了其它潜影响，例如在模型误差监测中，大多数方法仅考虑了过程模型无误差和有误差两种情况，但阀门粘滞的问题可能也会严重影响模型误差的监测结果。在大型的控制系统中，通常有许多监测器算法同时工作，各种算法给出的不同结果可能会误导工程师。面对这样的问题，需要研究控制系统全面诊断的方法，即将控制回路中所有的监测器算法的结果有机结合起来，达到准确定位系统性能下降来源的目的。

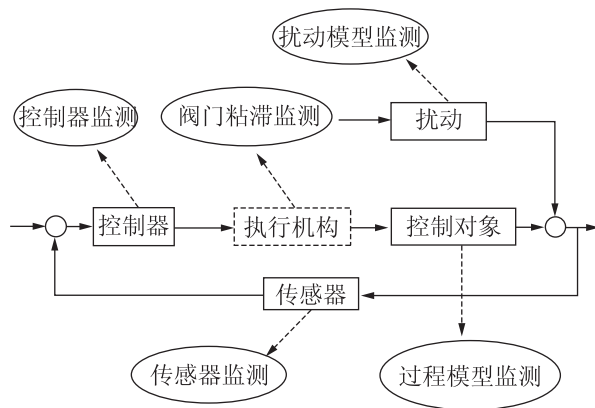


图1 典型控制回路框图<sup>[42]</sup>

目前这方面的研究成果较少，但正在逐渐成为新的研究热点<sup>[18]</sup>。提出了在贝叶斯方法的框架下进行控制系统全面诊断的思路，该文章中指出，要实现对各个监测器算法的统一，主要存在以下四方面的问题：①当某个特定的问题导致控制效果下降时，对该控制回路实施多种监测手段可能得到多种结果，例如：控制回路的底层问题是不可

测干扰模型的变化，但该问题有可能得到模型的误差过大的诊断结果。在众多的控制回路性能监测方法中，针对某类性能下降所设计的监测器可能只对该方面的特定问题有效，当其它问题发生时，可能给出错误的结果。②需要分析控制回路中所有底层问题对各种监测算法的影响，各种监测算法之间可能存在比较强的相关性，例如对过程模型的监测和对扰动模型的监测结果常常是相关的。③控制回路的底层问题可能多种多样，并且在不同的问题下其表现出的现象也不尽相同，需要建立问题种类和其对对应现象的联合概率分布矩阵。当问题种类或其对应现象的数量增加时，该矩阵的计算量将以指数形式增长。④目前大部分的控制回路性能监测算法基于了数据驱动，当回路中可能存在多种性能下降时，引入诊断的先验知识是有帮助的。例如通过对控制流图的分析容易知道哪些环节相关，该方面信息可以以先验概率的形式考虑到计算中。但在涉及到对基于算法的数据与先验概率的积分计算通常不容易求出。

在贝叶斯框架下的控制系统诊断研究方面<sup>[38]</sup>，介绍了基于数据驱动，先验概率采用狄利克雷分布建立贝叶斯模型的诊断<sup>[39]</sup>；研究了贝叶斯诊断在实际控制系统应用中的问题<sup>[42]</sup>；提出了应用求边缘分布的方法解决在贝叶斯诊断中部分监测器结果数据的缺失问题<sup>[10]</sup>；解决了贝叶斯模型训练数据集中可能出现的系统模式不确定问题<sup>[41,40]</sup>；在贝叶斯诊断中考虑了监测器数据或系统模式存在相关性的问题。

#### 3.5.2 贝叶斯诊断介绍

贝叶斯诊断的思路是将控制回路中所有监测器算法的结果作为输入数据，结合系统诊断的先验概率构造贝叶斯模型，从而得到系统中所有可能发生问题的后验概率，并依据后验概率的大小预测系统的底层性能下降。例如一个简单的控制系统可能运行在以下模式：正常、模型失配，阀

门粘滞。该控制回路中有三个性能监测器：控制器性能监测、模型误差监测和阀门粘滞监测。控制器性能监测可以采用本文第二部分中提到的方法如最小方差指标，LQG指标<sup>[20]</sup>等；模型失配监测可采用基于预测误差方法（PEM）的参数突变检测<sup>[19]</sup>；阀门粘滞监测可采用基于自相关函数的分析方法<sup>[51]</sup>。这三个监测器具有很强的相关性，例如系统真实问题是阀门粘滞，可能得到监测结果是：很差的最小方差指标，过程模型失配和存在阀门粘滞。同时，控制回路的运行环境可能存在较大的不可测噪声，这使得各个监测器有可能给出错误的结果。对该系统实施贝叶斯诊断，可以在概率意义下给出系统底层性能下降的预测，见表1，具体方法和分析可见文献<sup>[38,39]</sup>。通过对后验概率的排序，选取最大后验概率对应的系统模式作为预测结果。这样对于不同监测器的组合结果，我们都能在概率意义下做出清晰的预测。值得注意的是，采用贝叶斯诊断方法需要提供先验概率信息，先验概率的确定主要根据经验，但若不能确定某个问题的先验概率或对其一无所知，可以用服从均匀分布的概率代替。

4 总结与展望

控制回路性能评估与诊断技术能实时监控控

制系统性能的变化，诊断性能下降的原因，从而保持较优的控制水平。这一技术对增加企业经济效益、减少资源消耗、节能减排具有非常重要的意义。目前该方向已取得了丰富的研究成果，许多方法已经形成商业软件并应用于实际工业现场。纵观该领域，简要的展望如下：

（1）先进控制系统的性能维护：随着以MPC为代表的先进控制策略的广泛应用，其控制性能维护也逐渐凸显其重要性。由于MPC本身的特点：基于模型、多变量约束、多步预测、滚动优化、控制器参数整定复杂等，使得一些传统的性能评估与诊断策略不再适用，因此在该方面还有很大研究空间。

（2）非线性控制系统的性能维护：线性模型由于其简单性在实际工业过程中得到了广泛应用，然而对某些复杂对象而言，线性模型不能够很好的反应其动态特性。线性变参数（LPV）模型是在简单线性模型和复杂非线性模型之间的一个很好的折中。控制系统性能维护在基于LPV模型的控制器中的应用也将是一个新的研究方向。

（3）贝叶斯诊断：在贝叶斯诊断方法的应用中，一些开放性问题方向仍有待研究，例如：  
a.如何利用连续的监测器数据计算后验概率，以提升贝叶斯诊断结果的准确性；  
b.如何处理更具有一

表 1 贝叶斯诊断示例

控制器性能 监测	模型失配 监测	阀门粘滞 监测	先验概率			后验概率		
			正常	模型失配	阀门粘滞	正常	模型失配	阀门粘滞
好	无	无	0.70	0.15	0.15	0.91	0.05	0.04
好	无	有	0.33	0.33	0.33	0.21	0.17	0.62
好	有	无	0.33	0.33	0.33	0.70	0.22	0.08
好	有	有	0.33	0.33	0.33	0.32	0.39	0.29
差	无	无	0.33	0.33	0.33	0.50	0.31	0.19
差	无	有	0.15	0.15	0.70	0.09	0.10	0.81
差	有	无	0.15	0.70	0.15	0.14	0.78	0.08
差	有	有	0.10	0.45	0.45	0.02	0.36	0.62



般性的监测器数据缺失问题；c.如何利用贝叶斯模型的预测结果结合维护的费用制定最优的维护序列，实现在维护过程中的经济优化。

### 参考文献

- [1] M Ale Mohammad and B Huang. Compensation of control valve stiction through controller tuning. *Journal of Process Control*, 2012.
- [2] Abhijit S Badwe, Ravindra D Gudi, Rohit S Patwardhan, Sirish L Shah, and Sachin C Patwardhan. Detection of model-plant mismatch in mpc applications. *Journal of Process Control*, 19(8):1305-1313, 2009.
- [3] Abhijit S Badwe, Rohit S Patwardhan, Sirish L Shah, Sachin C Patwardhan, and Ravindra D Gudi. Quantifying the impact of model-plant mismatch on controller performance. *Journal of Process Control*, 20(4):408-425, 2010.
- [4] MAA Shoukat Choudhury, David S Shook, and Sirish L Shah. Linear or nonlinear? a bicoherence based metric of nonlinearity measure. In *Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, volume 6, pages 617-622, 2006.
- [5] N Danesh Pour, B Huang, and SL Shah. Performance assessment of advanced supervisory-regulatory control systems with subspace lqg benchmark. *Automatica*, 46(8):1363-1368, 2010.
- [6] Lane Desborough and Thomas Harris. Performance assessment measures for univariate feedback control. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 70(6):1186-1197, 1992.
- [7] Lane Desborough and Thomas Harris. Performance assessment measures for univariate feedforward/feedback control. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 71(4):605-616, 1993.
- [8] Krister Forsman and Andreas Stattin. A new criterion for detecting oscillations in control loops. In *European control conference*, Karlsruhe, Germany, 1999.
- [9] Ruowei Fu, Lei Xie, Zhihuan Song, and Yong Cheng. Pid control performance assessment using iterative convex programming. *Journal of Process Control*, 2012.
- [10] Ruben Gonzalez and Biao Huang. Control loop diagnosis with ambiguous historical operating modes: Part 1. a proportional parametrization approach. *Journal of Process Control*, 23(4):585-597, 2013.
- [11] Michael J Grimble. Controller performance benchmarking and tuning using generalised minimum variance control. *Automatica*, 38(12):2111-2119, 2002.
- [12] Thomas J Harris. Assessment of control loop performance. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 67(5):856-861, 1989.
- [13] Q Peter He, Jin Wang, Martin Pottmann, and S Joe Qin. A curve fitting method for detecting valve stiction in oscillating control loops. *Industrial & engineering chemistry research*, 46(13):4549-4560, 2007.
- [14] Alexander Horch. Condition monitoring of control loops. PhD thesis, KTH, 2000.
- [15] B Huang, SL Shah, and EK Kwok. Good, bad or optimal? performance assessment of multivariable processes. *Automatica*, 33(6):1175-1183, 1997.
- [16] Biao Huang. On-line closed-loop model validation and detection of abrupt parameter changes. *Journal of Process Control*, 11(6):699-715, 2001.
- [17] Biao Huang. Minimum variance control and performance assessment of time-variant processes. *Journal of Process Control*, 12(6):707-719, 2002.
- [18] Biao Huang. Bayesian methods for control loop monitoring and diagnosis. *Journal of process control*, 18(9):829-838, 2008.
- [19] Biao Huang, Ashish Malhotra, and Edgar C Tamayo. Model predictive control relevant identification and validation. *Chemical engineering science*, 58(11):2389-2401, 2003.
- [20] Biao Huang and Sirish L Shah. Performance assessment of control loops: theory and applications. Springer, 1999.
- [21] Biao Huang, SL Shah, and R Miller. Feedforward plus feedback controller performance assessment of mimo systems. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 8(3):580-587, 2000.
- [22] Mohieddine Jelali. An overview of control performance assessment technology and industrial applications. *Control Engineering Practice*, 14(5):441-466, 2006.
- [23] Mohieddine Jelali. Estimation of valve stiction in control loops using separable least-squares and global search algorithms. *Journal of Process Control*, 18(7):632-642, 2008.
- [24] Mohieddine Jelali. *Control Performance Management in Industrial Automation*. Springer, 2013.
- [25] Mohieddine Jelali and Biao Huang. Detection and diagnosis of stiction in control loops: state of the art and advanced methods. Springer, 2010.
- [26] Guoli Ji, Kangkang Zhang, and Yucai Zhu. A method of mpc model error detection. *Journal of Process Control*, 22(3):635-642, 2012.
- [27] Hailei Jiang, Biao Huang, and Sirish L Shah. Closed-loop model validation based on the two-model divergence method. *Journal of*



- Process Control,19(4):644-655, 2009.
- [28] S Joe Qin. Control performance monitoring - a review and assessment. Computers and Chemical Engineering, 23(2):173-186, 1998.
- [29] Rhonda H Julien, Michael W Foley, and William R Cluett. Performance assessment using a model predictive control benchmark. Journal of Process Control, 14(4):441-456, 2004.
- [30] Byung-Su Ko and Thomas F Edgar. Performance assessment of cascade control loops. AIChE Journal, 46(2):281-291, 2000.
- [31] Byung-Su Ko and Thomas F Edgar. Pid control performance assessment: The single-loop case. AIChE Journal, 50(6):1211-1218, 2004.
- [32] Kwan Ho Lee, Edgar C Tamayo, and Biao Huang. Industrial implementation of controller performance analysis technology. Control Engineering Practice, 18(2):147-158, 2010.
- [33] Chunyu Liu, Biao Huang, and Qinglin Wang. Control performance assessment subject to multi-objective user-specified performance characteristics. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 19(3):682-691, 2011.
- [34] Hiroshi Maruta, Manabu Kano, Hidekazu Kugemoto, and Keiko Shimizu. Modeling and detection of stiction in pneumatic control valve. TRANSACTIONS-SOCIETY OF INSTRUMENT AND CONTROL ENGINEERS, 40:825-833, 2004.
- [35] Toru Matsuo, Isao Tadakuma, and N Thornhill. Diagnosis of a unit-wide disturbance caused by saturation in a manipulated variable. 2004.
- [36] Folake Olaleye, Biao Huang, and Edgar Tamayo. Performance assessment of control loops with time-variant disturbance dynamics. Journal of Process Control, 14(8):867-877, 2004.
- [37] Rohit S Patwardhan and Sirish L Shah. Issues in performance diagnostics of model-based controllers. Journal of Process Control, 12(3):413-427, 2002.
- [38] Anna Pernest?al. A bayesian approach to fault isolation with application to diesel engine diagnosis. PhD thesis, KTH, 2007.
- [39] Fei Qi. Bayesian Approach for Control Loop Diagnosis. PhD thesis, University of Alberta, 2011.
- [40] Fei Qi and Biao Huang. Dynamic bayesian approach for control loop diagnosis with underlying mode dependency. Industrial & Engineering Chemistry Research, 49(18):8613-8623, 2010.
- [41] Fei Qi and Biao Huang. Bayesian methods for control loop diagnosis in the presence of temporal dependent evidences. Automatica, 47(7):1349-1356,2011.
- [42] Fei Qi, Biao Huang, and Edgar C Tamayo. A bayesian approach for control loop diagnosis with missing data. AIChE Journal, 56(1):179-195, 2010.
- [43] Claudio Scali and Claudio Ghelardoni. An improved qualitative shape analysis technique for automatic detection of valve stiction in flow control loops. Control Engineering Practice, 16(12):1501-1508, 2008.
- [44] Jochen Schöfer and Ali Cinar. Multivariable mpc system performance assessment, monitoring, and diagnosis. Journal of Process Control, 14(2):113-129, 2004.
- [45] S Selvanathan and AK Tangirala. Diagnosis of poor control loop performance due to model-plant mismatch. Industrial & Engineering Chemistry Research, 49(9):4210-4229, 2010.
- [46] Y Shardt, Y Zhao, F Qi, K Lee, X Yu, B Huang, and S Shah. Determining the state of a process control system: Current trends and future challenges. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 90(2):217-245, 2012.
- [47] MAA Shoukat Choudhury, Sirish L Shah, and Nina F Thornhill. Diagnosis of poor control-loop performance using higher-order statistics. Automatica,40(10):1719-1728, 2004.
- [48] MAA Shoukat Choudhury, Nina F Thornhill, and Sirish L Shah. Modelling valve stiction. Control Engineering Practice, 13(5):641-658, 2005.
- [49] Ashish Singhal and Timothy I Salsbury. A simple method for detecting valve stiction in oscillating control loops. Journal of Process Control,15(4):371-382, 2005.
- [50] NF Thornhill and T Hågglund. Detection and diagnosis of oscillation in control loops. Control Engineering Practice, 5(10):1343-1354, 1997.
- [51] NF Thornhill, B Huang, and H Zhang. Detection of multiple oscillations in control loops. Journal of Process Control, 13(1):91-100, 2003.
- [52] Nina F Thornhill. Finding the source of nonlinearity in a process with plant-wide oscillation. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 13(3):434-443, 2005.
- [53] Kostas Tsakalis and Sachi Dash. Multivariable controller performance monitoring using robust stability conditions. Journal of Process Control,17(9):702-714, 2007.
- [54] M. Tyler and M. Morari. Performance Assessment for Unstable and Nonminimum-Phase Systems. Technical report, 1996.

- [55] Fangwei Xu, Biao Huang, and Seyi Akande. Performance assessment of model predictive control for variability and constraint tuning. *Industrial & engineering chemistry research*, 46(4):1208-1219, 2007.
- [56] Wei Yu, David I Wilson, and Brent R Young. Control performance assessment for nonlinear systems. *Journal of Process Control*, 20(10):1235-1242, 2010.
- [57] Zhenpeng Yu, Jiandong Wang, Biao Huang, and Zhenfu Bi. Performance assessment of pid control loops subject to setpoint changes. *Journal of Process Control*, 21(8):1164-1171, 2011.
- [58] Qiaolin Yuan and Barry Lennox. Control performance assessment for multivariable systems based on a modified relative variance technique. *Journal of Process Control*, 19(3):489-497, 2009.
- [59] Megan Zagrobelny, Luo Ji, and James B Rawlings. Quis custodiet ipsos custodes? *Annual Reviews in Control*, 37(2):260-270, 2013.
- [60] Zhi Zhang, Li-Sheng Hu, and Xue-Lian Zhang. Performance assessment for a class of nonlinear systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(18):10557-10566, 2011.

## 作者简介

**张抗抗** 厦门大学控制理论与控制工程专业，中国加拿大联合培养在读博士。

**李晨** 华东理工大学控制理论与控制工程专业，中国加拿大联合培养在读博士。

**Biao Huang** obtained his PhD degree in Process Control from the University of Alberta, Canada, in 1997. He also had MSc degree (1986) and BSc degree (1983) in Automatic Control from the Beijing University of Aeronautics and Astronautics. Biao Huang joined the University of Alberta in 1997 as an Assistant Professor in the Department of Chemical and Materials Engineering, and is currently a Professor, NSERC Industrial Research Chair in Control of Oil Sands Processes, and AITF Industry Chair in Process Control. He is a Fellow of the Canadian Academy of Engineering and Fellow of Chemical Institute of Canada. He is recipient of Germany's Alexander von Humboldt Research Fellowship, Canadian Chemical Engineer Society's Syncrude Canada Innovation and D.G. Fisher awards, APEGA's Summit Research Excellence award, University of Alberta's McCalla and Killam Professorship awards, Petro-Canada Young Innovator Award, and a best paper award from *Journal of Process Control*. Biao Huang's research interests include: process control, system identification, control performance assessment, Bayesian methods and state estimation. Biao Huang has applied his expertise extensively in industrial practice particularly in oil sands industry.

# 城市污水处理过程优化控制研究综述

乔俊飞<sup>1</sup>, 韩红桂<sup>1</sup>, 薄迎春<sup>2</sup>

1. 北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100124;

2. 中国石油大学信息与控制工程学院, 青岛 266580

**摘要:** 城市污水处理受进水成份、进水流量、污染物负荷、水温、天气变化、微生物的生理功能等诸多因素影响, 存在较强的非线性和严重的干扰, 同时生化反应过程伴随有较大的不确定性, 系统总是运行在非平稳状态, 实现优化控制是一项具有挑战性的工作。论文从控制的角度出发, 阐述了污水处理过程优化控制方法的研究现状, 尤其是智能优化控制方法在城市污水处理过程中取得的成果。最后对这一研究领域仍需解决的问题和未来的发展方向作了进一步的展望。

**关键词:** 污水处理过程, 优化控制, 智能优化控制, 模型预测控制, 模型

## 1 引言

水资源问题已成为世界各国政府首要关注的议题, 2013年世界经济论坛发布的《2013年全球风险报告》中指出: 水资源供应危机是未来10年社会风险中最核心的风险, 一旦发生将会对全球系统造成根本性破坏<sup>[1]</sup>。我国属于严重缺水的国家, 水资源人均占有量约为世界人均占有量的四分之一。改革开放以来, 随着城市化、工业化进程的提速, 社会对淡水资源的需求量日益增大, 同时对水环境的破坏也愈加严重。因此, 污水再生回用, 最大限度地保护水环境, 实现淡水资源可持续利用和良性循环, 已经成为我国政府水资源综合利用的战略举措<sup>[2]</sup>。

城市污水再生利用能够减小社会对淡水的需求量, 减少污水对水环境的污染, 是维持健康水

循环不可缺少的措施。城市污水处理过程的实质是利用活性污泥中的微生物群体来吸附、分解、氧化污水中可生物降解的有机物, 通过复杂的生物化学反应, 将这些有机物从污水中分离出来, 使污水得到净化<sup>[3-4]</sup>。典型的活性污泥法城市污水处理过程如图1所示, 污水经过粗格栅间去除呈悬浮状态的较大体积的固体污染物质, 通过预处理和一级处理后, 经初沉池出水进入生化池, 生化池一般包括曝气池和二沉池, 经过生化反应后上部澄清水排入接纳水体, 下层除回流的活性污泥

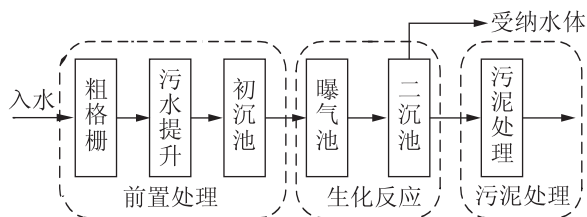


图1 活性污泥法污水处理过程

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61203099, 61034008, 61225016), 北京市自然科学基金项目(4122006), 教育部博士点新教师基金项目(20121103120020), 北京市科技新星计划(Z131104000413007), 北京市教委项目(KZ201410005002, km201410005001)。

外, 剩余污泥进行消化、脱水等污泥处理过程<sup>[5]</sup>。

整体看来, 污水处理过程具有以下特点<sup>[6-8]</sup>:

- ①每日需要处理的污水量非常大;
- ②每日进水水质水量波动很大;
- ③污水进入后必须处理, 不得存放, 也不得返回;
- ④污水中的污染物的数量多、含量各异, 对检测是一大挑战;

⑤污水处理过程取决于微生物的生理功能;

⑥影响污水处理效果的很多因素不可控制;

⑦生物固体与出水分离困难;

城市污水处理过程特点②、④、⑤和⑥决定了常规的控制方法无法直接应用。从实施优化控制的角度来看, 污水处理过程控制的难点在于:

(1) 过程控制模型难以建立<sup>[9-10]</sup>; 20世纪80年代以来, 生化反应模型和计算机技术在污水处理过程中的应用日趋广泛, 寻求能够反应污水处理过程复杂特性的模型一直是研究热点。

(2) 控制目标不能用控制量直接描述<sup>[11-12]</sup>; 城市污水处理的控制目标就是使出水达到国家排放标准, 主要涉及的参数有生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、化学需氧量(COD)、悬浮物(SS)、氨氮(以N计)和总磷(以P计)等。其中作为控制目标的BOD<sub>5</sub>和COD是指在规定时间内分解单位有机物所需要的氧量, 不能在线测量, 直接导致污水处理过程难以实现闭环控制。另外, 由污水处理过程控制的实际情况可知, 该过程控制量主要有溶解氧浓度、污泥回流比、污泥龄、化学药剂等, 而污水处理过程的控制目标又无法用这些参量直接表示, 因而根据控制目标难以获得最优控制量。

(3) 随动优化与不同时间尺度优化<sup>[13-14]</sup>; 城市污水处理过程负荷扰动非常大, 系统经常工作在非平稳状态, 且影响控制目标的因素众多, 包括污水进水成份、进水流量、污染物负荷、水温、pH值、停留时间、溶解氧浓度等, 其中污水进水成份、进水流量、污染物负荷、水温、pH

值等因素在污水处理过程是被动接受, 不进行控制(若实施控制将明显提高污水处理成本)。但在实施优化控制时又必须考虑这些因素的影响, 因此需要通过主动调整控制参量来随动优化控制系统。另外, 在污水处理过程中的可控变量中, 采用不同的控制手段对污水处理成本影响也不同, 比如溶解氧浓度控制效果最好, 但其耗能也最大。城市污水处理过程优化控制的目标就是在众多控制方案中寻找出能够满足排放标准且处理成本最低的控制方案。污水处理过程优化控制的另一个难点是不同控制量之间的时间尺度差异很大, 如溶解氧浓度优化时间与污泥龄优化时间。因此, 这是一个在不同时间尺度下的复杂过程优化问题。

城市污水处理过程特点①、③和⑦要求必须尽可能地降低污水处理运行成本。对污水处理过程实施优化控制, 是保证出水水质达标的重要手段, 也是降低污水处理过程中能量消耗、化学药品消耗和人工费用的有效途径。以我国城市污水处理状况为例, 根据国家环保部公布的《2012年环境状况公报》, 2012年全国排放废水总量为684.6亿吨, 若对排放的污水全部处理, 按照目前污水处理厂吨水耗电量约0.25千瓦时计算(GB18918二级排放标准), 则耗电量约为171.25亿千瓦时<sup>[15]</sup>。如果考虑到工业废水的污染物浓度要远高于生活污水, 污水处理厂的排放标准由二级提高到一级, 则污水处理的耗电量占全社会总用电量的比例可能超过1%<sup>[16]</sup>。可见, 污水处理行业已经成为耗电大户。因此, 研究城市污水处理优化控制方法是节能降耗的必然选择, 也是城市污水处理企业实现低成本运行重要途径。

围绕制约城市污水处理过程智能优化控制的关键问题, 文中首先描述了污水处理过程优化控制涉及的机理建模以及智能特征建模的相关理论和方法; 其次从城市污水处理过程低成本稳定运行的需求出发, 综述了近年来城市污水处理优化

控制理论及技术的研究进展,包括自适应PID控制、模型预测控制及智能优化控制,尤其是智能优化控制的发展现状;最后,指出了污水处理优化控制进一步研究所面临的新挑战。

## 2 污水处理过程系统模型

无论是污水处理过程优化控制,还是污水处理的工艺设计都离不开过程模型,当前污水处理系统模型的研究主要分为两类:机理模型和智能特征模型。

### 2.1 机理模型

国外学者从20世纪40年代就开始研究污水处理过程机理模型,具有代表性的有Eckenfelder<sup>[17]</sup>、Mckinney<sup>[18]</sup>以及Lawrence-McCarty<sup>[19]</sup>等开发的活性污泥法简化模型。简化模型只涉及含碳有机物的去除,计算过程和参数求解相对简单,在稳态情况下基本能够满足污水处理的需要。但是伴随水体富营养化现象的加剧,活性污泥法增加了出水脱氮除磷工艺,其应用范围受到了限制。70年代中后期,Marais提出除碳、氮、磷的动态活性污泥数学模型,但由于结构异常复杂而使其应用受到限制<sup>[20]</sup>。1987年,国际水质协会(IAWQ)在Marais等人研究的基础上推出了ASM1(Activated Sludge Model NO.1),ASM1是活性污泥模型发展的里程碑,它包括了碳化、硝化和反硝化过程<sup>[21]</sup>。模型包含了溶解氧、硝态氧、氨氮及异氧生物和自养生物等13种组分;生化反应过程包括了异氧菌、好氧菌的好氧生长及衰减等8个过程;包含异氧菌、自氧菌生长和衰减过程及污泥中化学需氧量(COD)水解过程的14个动力学参数

和5个化学计量参数。ASM1模型最主要的特征是采用矩阵的形式来描述活性污泥系统中各组分的变化规律和相互关系,并在矩阵反应速率中使用“开关函数”的概念,以反映环境因素改变而产生的抑制作用,避免那些具有开关型不连续特征的反应过程表达式在模拟过程中出现数值不稳定性现象。ASM1推出后,在欧美得到广泛使用,成为模拟活性污泥系统的强有力的工具。ASM1主要缺陷是未包含污水中磷的去除。随后,IAWQ又推出了ASM2,它在ASM1的基础上引入生物除磷和化学除磷过程,还增加了厌氧水解、醇解及与聚磷菌有关的4个反应过程。ASM2包含19个反应过程和22个化学计量系数及42个动力学参数<sup>[22]</sup>,由于ASM2的复杂性和除磷的不确定性,致使ASM2没有ASM1应用广泛。为了改进ASM2,IAWQ又推出了ASM3。ASM3的侧重点由水解转为有机物在微生物体内的储藏,以强调细胞内部的活动过程<sup>[23]</sup>。ASM1、ASM2和ASM3虽然有一定的局限性,如进水水质的分析和测定,模型中随环境变化的参数校正十分繁琐,但它们仍是活性污泥法数学模型的重大突破,并且成为活性污泥法数学模型的研究平台。此后,国内外许多学者在研究和应用ASM的基础上推出一些修正模型和简化模型,已经在污水处理工艺设计和过程监控中取得成功应用。从污水处理过程控制的角度来看,ASM系列模型中未知参数太多,难以实时辨识,不利于在线控制<sup>[24]</sup>。

2000年以来,欧盟科学技术与合作组织(COST)的682号和624号计划项目的研究人员与IWA合作的“基于呼吸运动计量法来控制活性污泥过程”的课题组联合开发了“1号基准仿真模型”(BSM1)<sup>[25]</sup>:

$$E.Q = \frac{1}{T \cdot 1000} \int_{t=7}^{t=14} \left( B_{SS} \cdot SS_e(t) + B_{COD} \cdot COD + B_{NKj} \cdot S_{NKje}(t) + B_{No} \cdot S_{Noe}(t) + B_{BOD5} \cdot BOD_{5e}(t) + \right) Q_e(t) dt \quad (1)$$



$$AE = \frac{24}{T} \int_{t=7}^{t=14} \sum_{i=3}^{i=5} (0.4032 \cdot (k_L a)_i^2 + 7.8408 \cdot (k_L a)_i) \cdot dt \quad (2)$$

$$PE = \frac{0.04}{T} \int_{t=7}^{t=14} (Q_a(t) + Q_r(t) + Q_w(t)) \cdot dt \quad (3)$$

其中,  $AE$ 为通风耗能;  $B_i$ 为出水质量指标参数;  $E.Q.$ 为出水质量指标;  $k_L a$ 为氧气转换系数;  $N_{tot}$ 为总氮浓度;  $PE$ 为泵耗能;  $Q_o$ 为进水流速;  $Q_a$ 为内部循环流速;  $Q_e$ 为排水流速;  $Q_r$ 为外部循环流速;  $Q_w$ 为污泥流速;  $Q_u$ 为再处理水流速;  $S_{NH}$ 为氨水浓度;  $S_{NKj}$ 为凯式法氨水浓度;  $S_{NO}$ 为氮浓度;  $SS$ 为悬浮物浓度;  $T$ 为温度;  $Z$ 为状态变量。

BSM1已经成为一种污水处理过程模型与控制方法的评价标准, 可以与多种控制方案组合进行仿真模拟, 并按照指定的评价标准来考察控制方案的优劣。由于BSM1只能用于模拟短期的污水处理运行状况, 在BSM1基础上COST提出BSM2模型<sup>[26]</sup>, BSM2能够实现在全厂范围内对控制性能进行长期评估。BSM2可模拟整个污水处理厂运行, 包含污水处理过程中所有的设备及运行, 如初沉池、活性污泥处理单元、二沉池、厌氧消化反应单元、浓缩机和脱水系统等。BSM系列模型是当前检验污水处理过程控制方案的最佳机理模型, 但是BSM系列模型仍是对实际的污水处理过程进行了大量的简化, 只能模拟理想状况下的污水处理过程, 这使得模型与实际的污水处理过程存在一定差距<sup>[27]</sup>。例如, 污水处理过程在不同季节、不同时段入水流量及其污染物浓度波动较大, 污水处理的生化反应过程具有较大的不确定性, BSM系列模型并没有考虑这些污水处理过程干扰因素<sup>[28]</sup>。同时, 污水处理生化反应过程具有较强的非线性和较大的滞后性, BSM系列模型也没有进行研究, 这些都增加了污水处理过程优化控制的复杂性。

## 2.2 智能特征模型

由于缺乏有效的优化模型, 优化控制实施所需的能耗分析、水质预测等环节仍缺乏可靠的理论基础。智能特征模型为优化控制的实施提供了理论保证, 所谓智能特征模型, 就是根据对象的动力学特征、环境特征和控制性能要求, 利用智能的方法建立的模型, 而不仅仅是以对象精确的动力学方程来建模<sup>[29]</sup>。近年来, 以智能特征建模方法为代表的污水处理过程建模方法已经成为污水处理模型研究的热点<sup>[30]</sup>。

由于城市污水处理的复杂性, 建立能够准确描述控制变量与出水指标之间的蕴含关系, 且简单易用的污水处理过程特征模型很重要。智能特征建模主要根据污水处理过程动力学特性和系统控制性能要求, 分析系统中影响控制和优化效果的主要因素, 并依据控制目标在系统可操作变量中挖掘出能够包含系统特征信息的一系列特征变量(如图2)<sup>[31]</sup>。

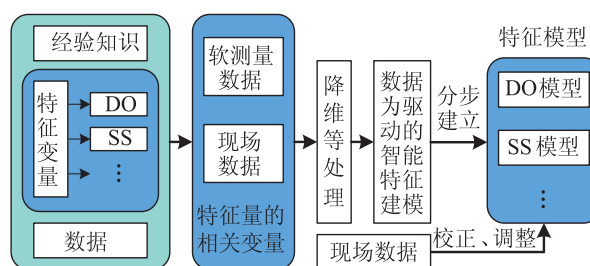


图2 污水处理过程特征模型建模

Du等采用模糊神经网络模拟活性污泥法污水处理过程并可较准确估计污泥龄<sup>[32]</sup>。Zhu等首先采用多层感知器模型减少数据维度, 然后采用时间延迟神经网络来在线预测出水BOD<sup>[33]</sup>。Tay等采用以神经网络为基础的自适应模糊推理系统为工具模拟厌氧处理系统, 研究表明, 该模型对厌氧处理系统的不同运行条件表现良好的适应性<sup>[34]</sup>。Chang等首先通过PCA主元分析减少数据维度, 然后采用模糊C聚类从数据中抽取系统固有特征, 最后采用TSK型模糊推理系统预测出水COD<sup>[35]</sup>。

Chen等采用递归神经网络去预测硝化反应的程度<sup>[36]</sup>。Mjalli等采用前馈神经网络和预测模型对系统的BOD进行预测,效果良好<sup>[37]</sup>。此外,采用BP神经网络建立污水处理系统模型的研究结果也很多<sup>[38-39]</sup>。在国内,柴天佑等提出一种基于递阶神经网络活性污泥过程机理模型<sup>[40]</sup>,将神经网络与过程机理模型以串级方式连接,以神经网络辨识活性污泥过程模型中的非线性组分反应速率,对出水水质COD进行预测。郭劲松等建立了间歇曝气活性污泥系统BP神经网络水质模型<sup>[41]</sup>。唐光临等建立了基于三层递归神经网络的污水处理出水水质模型,并对焦化废水水质进行了准确预测<sup>[42]</sup>。刘载文等建立了基于RBF网络的污水出水BOD软测量模型,为污水过程实时控制创造了条件<sup>[43]</sup>。在污水处理过程智能建模与控制方面,我们课题组也研究了一些污水处理过程关键水质参数智能特征模型<sup>[44-47]</sup>。

国内外学者在污水处理过程智能特征模型方面已经取得了一定的成果,实现了污水处理过程关键水质参数和过程数据的预测,污水处理过程智能特征模型能够反映控制变量与控制目标之间的蕴含关系,降低了污水处理过程优化控制方法对数学模型的要求<sup>[48-49]</sup>。

### 3 污水处理过程优化控制现状

在污水处理过程中采用合适的优化控制方法不仅可以优化微生物生长环境和新陈代谢,提高系统运行的可靠性和稳定性,而且还可以降低污水处理运行和维护成本、保证出水水质符合排放标准<sup>[50]</sup>。

城市污水处理过程控制方法主要有以下几种:①常规控制,Snesoun等基于溶解氧仪器的响应时间和传感器的模型,利用开关控制通过调节氧气转换系数实现了对溶解氧的有效控制<sup>[51]</sup>。Wahab等采用多变量PID控制器对不同好氧区域溶

解氧浓度进行控制,并对PID控制器的参数进行优化,取得良好的控制性能<sup>[52]</sup>。Vrecko等人将传统的PI控制器加入前馈控制策略应用于污水处理的基准模型,实现了溶解氧和硝酸氮浓度中的有效控制<sup>[53]</sup>。Åmand等采用一种串级PID控制技术提高污水处理过程的除氮效果,采用氨氮浓度信息对溶解氧浓度的设定值进行自适应优化<sup>[54]</sup>。在污水处理控制中PID控制是污水处理过程应用最广泛也是最基本的控制;同时,自适应PID控制方案能够根据回路的运行情况自动调整PID控制器参数,从而有效提高底层回路级控制的稳定性及控制精度<sup>[55-56]</sup>。然而以PID为基础的优化控制更关注底层控制指标的平稳性,难以实现以节能降耗为目标的污水处理运行过程的全局性能优化<sup>[57]</sup>。②模型预测控制,通过预测模型、滚动优化和反馈校正解得最优控制序列,对污水处理过程进行了控制。③智能优化控制,通过选择控制变量、状态变量和约束条件,建立状态方程和性能指标,对污水处理系统进行了整体优化,利用智能手段,根据优化设定值,实现在线反馈控制,从而提高污水处理的运行效率,保证出水水质的前提下尽可能节省运行费用,同时实现过程工艺的优化控制。

从污水处理过程控制的整体控制水平来看,模型预测控制和智能优化控制更适合城市污水处理过程,并已成为当前复杂工业过程研究的主流方向<sup>[58-59]</sup>。

#### 3.1 模型预测控制

模型预测控制是污水处理领域研究广泛应用的优化控制方式之一。目前模型预测控制在污水处理过程的应用主要有两种模式,一种是基于机理模型的预测控制方式,另一种是基于智能模型的预测控制方式。

基于机理模型的模型预测控制主要以污水处理机理模型为基础,利用模型预测的方法实现污

水处理过程的控制, 通过优化控制变量最小化目标函数<sup>[60]</sup>:

$$J = \sum_{i=1}^{H_p} [r(t+i) - y(t+i)]^T W_i^y [r(t+i) - y(t+i)] + \sum_{j=1}^{H_u} \Delta u(t+j-1)^T W_j^u \Delta u(t+j-1) \quad (4)$$

限制条件:

$$\begin{aligned} \Delta u(t) &= u(t) - u(t-1) \\ u_{\min} &\leq u(t) \leq u_{\max} \\ y_{\min} &\leq y(t) \leq y_{\max} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 控制变量为 $u$ , 控制变量的变化为 $\Delta u$ ,  $y$ 为系统模型输出,  $W^y$ 和 $W^u$ 是权值参数,  $H_p$ 为预测时域,  $H_u$ 为控制变量的变化时域。

Holenda等在ASM模型的基础上, 采用模型预测控制实现了溶解氧的控制<sup>[61]</sup>, 较传统PID控制相比, 模型预测控制的控制精度提高约为40.5%。为抑制入水干扰, Shen等在模型预测控制的基础上引入了入水氨氮前馈补偿措施<sup>[62]</sup>, 大幅提高了系统运行的平稳性。上述模型预测控制主要以平稳控制为目标, 为实现污水处理过程的优化控制, 即在满足出水水质要求的前提下尽可能降低污水处理过程的成本, Chachuat等对小型污水处理厂的曝气能耗进行优化<sup>[63]</sup>, 其原理是在保证反应过程顺利进行的情况下, 实现曝气开关开通时间的最小化。由于污水处理过程各控制量的时间尺度不同, pH值、硝态氮浓度等被控指标变化较快, 但溶解氧浓度、污泥龄等指标变化较慢, 为实现不同时间尺度及存在耦合的被控指标间的协调, Brdys等“模型预测控制方法”<sup>[64-65]</sup>。该方法由两层模型预测控制控制器实现, 上层模型预测控制器负责优化溶解氧、硝态氮、污泥龄等关键被控量的设定值, 下层模型预测控制器负责对优化的设定值进行实时跟踪。

由于污水处理过程的复杂性和不确定性, 机理模型存在大量的时变参数, 而在线辨识这些参数较为困难。为此, 基于机理模型的模型预测控

制方法受到很大的限制, 为了避免模型造成的影响, 基于智能模型的污水处理模型预测控制方法成为近年来研究的热点<sup>[66]</sup>。基于智能模型的模型预测控制方法与基于机理模型的模型预测控制方法的最大区别是控制过程不需要确定的机理模型。Durrenmatt采用遗传算法、神经网络、自组织映射等方式设计了污水处理过程的模型预测控制方法<sup>[67]</sup>, 通过对输入输出数据的学习实现模型参数的调整, 获得模型预测控制所需的系统输出值, 完成污水处理过程的控制。对于基于智能模型的模型预测控制方法本课题组也进行了长期的研究, 为了解决污水处理过程强非线性、大滞后的问题, 采用基于自组织神经网络的污水处理过程预测模型, 该预测模型能够在线优化结构以及参数, 提高了模型的精度, 同时, 基于该预测模型对污水处理过程溶解氧浓度进行了控制, 获得了较好的效果<sup>[68]</sup>。

理论上而言, 任何模型都可以作为模型预测控制的预测模型, 但模型的准确性对模型预测控制方法的影响较大, 由于污水处理生化反应过程的不确定性, 模型失配现象较容易发生<sup>[69]</sup>。此外, 一般的模型预测控制主要停留在单变量控制, 而污水处理过程的主要优化控制指标有污泥龄、溶解氧浓度、硝态氮浓度、pH值、外加碳源量等。因此, 污水处理过程优化是一个多目标的约束优化问题, 其控制也是一个复杂的多变量控制问题<sup>[70-71]</sup>。

### 3.2 智能优化控制

在污水处理过程中, 既要满足出水水质达标的要求, 又要满足运行成本最低的要求, 为了实现该控制目标, 需要对污水处理过程进行优化控制。智能优化控制是污水处理过程控制中难度较大的控制方式, 主要根据污水处理过程的输入变量, 约束条件和性能指标等, 通过计算, 提供一

组最优控制变量设定值,并对设定值进行跟踪控制<sup>[72]</sup>。在污水处理过程优化控制过程中,将最大限度地使能耗、出水性能指标等最优,为满足上述要求,可能会使得控制变量的调节变得相互矛盾;另外,在污水处理过程中的可控变量中,采用不同的控制手段对污水处理成本的影响也不同。因此,如何选择控制变量、状态变量和约束条件,建立性能指标函数是最优控制研究的基础<sup>[73]</sup>。

Butler等从最优控制的角度,建立了污水处理过程分段能耗模型,并对污水处理系统进行了优化控制,取得了较好的控制效果<sup>[74]</sup>。Habermeyer等在考虑曝气时间和溶解氧浓度的确值的情况下,利用最优控制对间歇曝气污水处理系统进行优化控制<sup>[75]</sup>。Nejjari等采用软测量技术在线估计了一些不易测量的变量,将反馈非线性自适应控制策略应用于污水处理,结果显示能够有效地降低能耗<sup>[76]</sup>。Punal等提出了一种针对厌氧消化器的诊断和管理的模糊专家系统,该专家系统通过三种主要组件在线运行来判断工艺过程的状态和趋势以及设在水厂终端的控制指标是否处于最佳点,并通过调整控制策略实现了运行过程的优化<sup>[77]</sup>。Marsili-libelli等应用自适应控制策略,为实现最小方差自校正控制,最小二乘算法直接辨识控制器的控制参数,实现污水处理过程的优化控制<sup>[78]</sup>。Shen等以BSM1活性污泥处理过程为对象,对最优控制和预测控制做了比较,结果表明通过预测控制优化曝气时间在保证出水达标的状态下减少曝气能量消耗<sup>[79]</sup>。Stare等对活性污泥法氮的去除过程进行分析,并同时利用反馈控制、前馈-反馈控制、优化控制等方法进行控制,结果显示优化控制效果较优<sup>[80]</sup>。Piotrowskia等针对溶解氧浓度建立了分层控制策略,上层采用非线性模型预测控制算法生成好氧区所期望的曝气量,下层控制器采用了分段线性化的模型预测控制策略跟踪设定值的轨迹<sup>[81]</sup>。在国内,于海斌等针对序批式反应器污水处理工艺,提出一种以排水质量为约束条

件,以能量消耗最小为目标的最优控制方案<sup>[82]</sup>。

近年来,为实现污水处理过程节能减排一些新的混合智能控制方法被提出。Fu等采用非主导排序遗传算法解决了污水处理过程中的优化问题,并通过跟踪优化设定值实现优化控制<sup>[83]</sup>。Ekman采用模型预测技术估计污水处理中的悬浮物浓度、溶解氧浓度等,采用混合智能控制方法对污水处理过程中的溶解氧浓度进行实时控制,取得较好的优化控制效果<sup>[84]</sup>。Syafie等基于强化学习方法对污水处理过程进行优化控制,该方法主要由评价和行动两个模块组成,评价模块对当前控制策略进行评价,并输出评价信号,行动模块根据评价结果对当前的策略进行调整,实现了污水处理过程氧化还原电位的优化控制<sup>[85]</sup>。Beraud等以BSM1为基础,采用多目标遗传算法对污水处理过程进行优化,使曝气能耗和泵送能耗达到最小,完成了BSM1平台下的优化控制<sup>[86]</sup>。国内的张平等针对活性污泥前置反硝化污水生化处理工艺,提出一种以排水质量指标为约束条件、以能量消耗最小为目标的优化控制方案。通过优化曝气能耗和泵送能耗得到固体悬浮物和溶解氧浓度的优化设定值,并利用底层控制器跟踪最优值达到降耗的目的<sup>[87]</sup>。

虽然以上智能优化控制方法能够实现在保证处理质量的前提下减小能耗。但是主要还是以处理质量作为优化指标,进行单目标优化控制,而污水处理过程工艺复杂,优化目标和约束指标众多,为了完成污水处理过程优化控制的总体目标,必须进行多目标智能优化控制方法研究<sup>[88-89]</sup>。

结合污水处理过程的特点,本课题组提出了一种污水处理过程全流程智能优化控制方法,其优化结构如图3所示<sup>[90]</sup>。

污水处理过程全流程智能优化控制针对城市污水处理过程特点建立优化控制的三层优化模型结构,分别为全局优化层、局部优化层和直接控制层。全局优化层以整个城市污水处理过程在



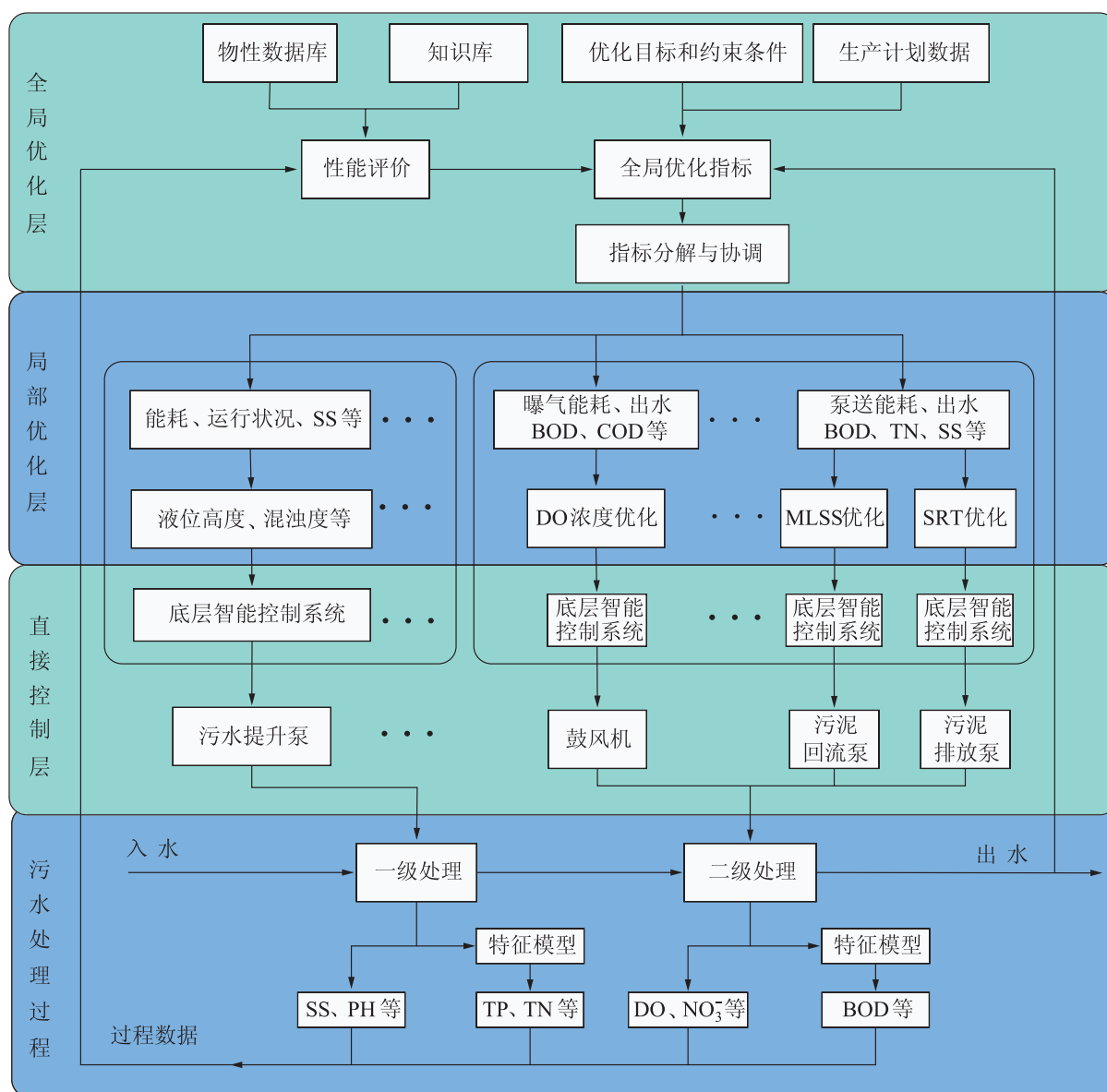


图3 污水处理过程全流程优化控制

环保指标约束下的运行能耗最低为目标。对于能耗大的局部单元（如污水提升、曝气池等），在保证安全生产、处理质量的前提下，尽量减小能耗。而对能量消耗较小的处理单元（如二沉池），则主要以处理质量作为其局部优化指标。在确定局部指标的基础上，将全局指标分解为各个单元的局部优化指标，实现全局到局部的优化分解，同时通过全局协调模块协调局部指标间的冲突。将局部优化指标和出水水质作为约束，对

各局部的控制指标进行优化。通过局部优化协调模块协调各控制指标之间的矛盾和冲突。直接控制层根据控制指标要求采用先进的控制方案实现具体回路的控制，保持控制的平稳性和一定的控制精度，取得了较好的优化控制效果<sup>[91-94]</sup>。

## 4 总结与展望

研究污水处理过程节能优化控制理论与方



法,既可以降低污水处理运行费用,同时也可以提高污水处理厂的控 制水平。目前污水处理过程优化控制主要有自适应PID控制、模型预测控制及智能优化控制等。

虽然智能优化控制方法被认为是目前污水处理过程最有效的控制方法,但是从研究现状看,智能优化控制方法多被应用于污水处理过程的回路控制,如溶解氧控制、污泥回流控制、污泥排放控制以及进水流量控制等。同时,污水处理过程的运行指标与全流程生产指标之间的特性难以采用机理分析的方法建立数学模型、运行指标的优化决策涉及到多目标智能优化方法、难以采用已有的控制系统稳定性分析工具等仍是污水处理过程智能优化控制方法尚未解决的问题。从发展的角度看,要实现污水处理行业又好又快发展,要控制能源消费总量,城市污水处理优化控制的主要方向是:

#### 4.1 污水处理过程动态数据实时同化

污水处理过程每天都会产生大量的数据,数据能够反映系统真实的运动行为。污水处理过程数据包括在线量测数据、理化分析数据、定性数据及图像数据等。由于数据形式多样,如何将数据进行融合、如何动态实现多尺度复杂数据同化利用等,是挖掘污水处理特性的前提。

#### 4.2 污水处理过程故障诊断

针对污水处理过程不确定性和复杂性(主要包括非线性、时变、变量耦合、时间相关性、多模态、多时段、大规模、间歇等特性),为了保证运行过程高安全性、高可靠性、高稳定性、高环境适应性的实际需求,污水处理过程故障诊断理论和方法的研究显得越来越重要。

#### 4.3 基于数据与知识的污水处理过程集成建模

由于污水处理过程中进水流量、进水成份、

污染物浓度、天气变化等参量都是被动接受,微生物生命活动受溶解氧浓度、微生物种群、污水的pH值等多种因素影响,生化反应过程具有明显滞后特性,用微分方程来表述该过程特性十分困难。城市污水处理过程的特性需要通过机理、特征、知识推理等相结合的方法来刻画。

#### 4.4 污水处理过程不同时间尺度优化方法

城市污水处理优化控制的目标就是在众多组合方案中寻找出能够满足排放标准且处理成本最低的控制方案,但其难点在于不同控制手段的优化的时间尺度差异很大,如添加药剂的优化时间可以到秒级,曝气的优化时间为分钟级,泥龄的优化时间则在小时级,决定了常规优化方法不能直接使用,因此,不同时间尺度优化方法是城市污水处理控制理论与方法研究又一研究内容;

#### 4.5 污水处理过程多目标优化方法

污水处理过程优化控制本身是一个多目标、多约束问题,在满足BOD<sub>5</sub>、COD、SS、TN、TP等达标的同时,降低运行成本,使能耗最小。在实际控制过程中,多个目标间的优化量有可能是相互抵触的,需要研究多目标优化方法,协调优化目标间的矛盾和冲突。

#### 4.6 基于动态数据驱动的污水处理过程优化控制

将数据驱动的理念引入污水处理过程中,实现污水处理过程数据驱动优化控制是未来污水处理行业发展的一种趋势。深度挖掘数据隐含信息,提取系统特征,确定适合污水处理的数据驱动优化控制方法,设计相应的数据驱动控制系统。

#### 4.7 基于认知智能的污水处理运行控制方法

基于认知智能的污水处理运行控制也是未来

污水处理行业全流程自动化发展的一种趋势,对污水处理运行信息进行挖掘与处理,实现自动计划、决策与执行,通过重构实现对环境的动态适应,并建立自主诊断体系,不断对工作状态记录和分析,配合上层决策系统,预防可能出现的故障和事故,并能根据事态程度做出运行控制方案,不断修复和调整工业运行过程。

### 参 考 文 献

- [1] The United Nations World water development report: managing water under uncertainty and risk (WWDR4). The United Nations Educational, Scientific and Cultural, 2012.12.
- [2] National environmental protection "Twelfth Five Year Plan". The State Council of the people's Republic of China (No. [2011]42), 2011.12.15.
- [3] Wu F C, Tseng R L, Huang S C, et al. Characteristics of pseudo-second-order kinetic model for liquid-phase adsorption: A mini-review, Chemical Engineering Journal, 2009, 151 (1): 1-9.
- [4] Gujer W. Nitrification and me - A subjective review. Water Research, 2010, 44 (4): 1-19.
- [5] Olsson G, Newell B. Wastewater Treatment Systems: Modelling, Diagnosis and Control. IWA Publishing. 1999.
- [6] Lin C K, Katayama Y, Hosomi M, et al. The characteristics of the bacterial community structure and population dynamics for phosphorus removal in SBR activated sludge processes. Water Research, 2003, 37 (12): 2944-2952.
- [7] Jurado E, Camacho F, Luzón G, et al. Kinetics of the enzymatic hydrolysis of triglycerides in o/w emulsions: Study of the initial rates and the reaction time course. Biochemical Engineering Journal, 2008, 40 (3): 473-484.
- [8] Srinivasan B, Palanki S, Bonvin D. Dynamic optimization of batch processes I. Characterization of the nominal solution. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27 (1): 1-26.
- [9] Kim D J, Kim S H. Effect of nitrite concentration on the distribution and competition of nitrite-oxidizing bacteria in nitrification reactor systems and their kinetic characteristics. Water Research, 2006, 40 (5): 887-894.
- [10] Costa J C, Moita I, Abreu A A, et al. Advanced monitoring of high-rate anaerobic reactors through quantitative image analysis of granular sludge and multivariate statistical analysis. Biotechnology and Bioengineering, 2009, 102 (2): 445-456.
- [11] Fernando M S, Poul L, Jeppe L N, et al. Characterization of the loosely attached fraction of activated sludge bacteria. Water Research, 2008, 42 (4-5): 843-854.
- [12] Zhang D J, Li Z L, Lu P, et al. A method for characterizing the complete settling process of activated sludge. Water Research, 2006, 40 (14): 2637-2644.
- [13] Hori K, Matsumoto S. Bacterial adhesion: From mechanism to control. Biochemical Engineering Journal, 2010, 48 (3): 424-434.
- [14] Seyssiecq I, Ferrasse J H, Roch N e. State-of-the-art: rheological characterisation of wastewater treatment sludge. Biochemical Engineering Journal, 2003, 16 (1): 41-56.
- [15] 2012 Bulletin China environment. The ministry of environmental protection of people's Republic of China, 2013.5.28.
- [16] Circular of the national urban sewage treatment facilities construction and operation of the third quarter of 2013. the ministry of construction of the people's Republic of china (No. [2013]158), 2013.11.11.
- [17] Eckenfelder W W, Connor D. Biological Waste Treatment. New York: Pergamon Press, 1961.
- [18] McKinney R E, San J. Mathematics of complete mixing activated sludge. Engineering Division, ASCE, 1962, 88 (3): 87-113.
- [19] Lawrence A W, McCarty P L. A unified basis for biological treatment design and operation. Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE, 1970, 96 (3): 733-757.
- [20] Marais G R, Ekama G A. The activated sludge process: part II - dynamic behavior. Water Science Abstracts, 1977, 1 (1): 18-50.
- [21] Henze M, Grady C P, Gujer W, et al. Activated sludge model No.1. London, England: International Association on Water Pollution Research and Control Scientific and Technical Reports, 1986.
- [22] Henze M, Gujer W, Mino T, et al. Activated Sludge Model No.2. London, England: International Association on Water Pollution Research and Control Scientific and Technical Reports, 1995.
- [23] Gujer W, Henze M, Mino T, et al. Activated sludge model No.3. Water Science & Technology, 1999, 39 (1): 183-193.
- [24] Du S X. Modeling and control of biological wastewater treatment processes. Control Theory & Applications, 2002, 19 (5): 660-666.
- [25] Jeppsson U, Pons M N, Nopens I, J. Alex, et al. Benchmark simulation model no 2: general protocol and exploratory case studies. Water Science & Technology, 2007, 56 (8): 67-78.

- [26] Jeppsson U, Rosen C, Alex J, et al. Towards benchmark simulation model for plant-wide control strategy performance evaluation of WWTPs. *Water Science & Technology*, 2006, 53 (1) : 287-295.
- [27] Rosen C, Vrecko D, Gernaey K V, et al. Implementing ADM1 for plant-wide benchmark simulations in Matlab/Simulink. *Water Science & Technology*, 2006, 54 (4) : 11-19.
- [28] Schütze M, Campisano A, Colas H, et al. Real time control of urban wastewater systems-where do we stand today? *Journal of Hydrology*, 2004, 299 (3-4) : 335-348.
- [29] Wu H X. Intelligent characteristic model and intelligent control. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28 (S1) : 30-37.
- [30] Haimi H, Mulas M, Corona F, et al. Data-derived soft-sensors for biological wastewater treatment plants: An overview. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 47 (5) : 88-107.
- [31] Han H G, Qiao J F. Hierarchical-neural-network modeling approach to predict sludge volume index of wastewater treatment process. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21 (6) : 2423-2431.
- [32] Du Y G, Tyagi R D, Bhamidimarri R. Use of fuzzy neural-net model for rule generation of activated sludge process. *Process Biochemistry*, 1999, 33 (1) : 77-83.
- [33] Zhu J B, Zurcher J, Rao M, et al. An on-line wastewater quality predication system based on a time-delay neural network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1998, 11 (6) : 747-758.
- [34] Tay J H, Zhang X Y. A fast predicting neural fuzzy model for high-rate anaerobic wastewater treatment systems. *Water Research*, 2000, 34 (11) : 2849-2860.
- [35] Chang K Y, Peter A V, Lee I B. Nonlinear modeling and adaptive monitoring with fuzzy and multivariate statistical methods in biological wastewater treatment plants. *Journal of Biotechnology*, 2003, 105 (1-2) : 135-163.
- [36] Chen J C, Chang N B, Shieh W K. Assessing wastewater reclamation potential by neural network model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2003, 16 (2) : 149-157.
- [37] Mjalli F S, Al-Asheh S, Alfadala H E. Use of artificial neural network black-box modeling for the prediction of wastewater treatment plants performance. *Journal of Environmental Management*, 2007, 83 (3) : 329-338.
- [38] Rdduly B, Gernaey K V, Capodaglio A G, et al. Artificial neural networks for rapid WWTP performance evaluation: methodology and case study. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22 (8) : 1208-1216.
- [39] Hanbay D, Turkoglu I, Demir Y. Prediction of wastewater treatment plant performance based on wavelet packet decomposition and neural networks. *Expert Systems with Applications*, 2008, 34 (2) : 1038-1043.
- [40] Cong C M, Chai T Y, Yu W. Modeling wastewater treatment plant via hierarchical neural networks. *Control Theory & Applications*, 2009, 26 (1) : 8-14.
- [41] Guo J S, Long T R, Gao X, et al. Modeling study of activated sludge process with intermittent aeration based on BP artificial neural network. *China Water & Wastewater*, 2000, 16 (11) : 15-18.
- [42] Tang G L, Xu C H, Dong L Y. Coking waste water quality forecast based on recurrent neural network. *Journal of system simulation*, 2003, 15 (1) : 81-83.
- [43] Liu Z W, Cui L F, Qi G Q, et al. Soft sensing method based on RBF neural network for effluent BOD from SBR. *China Water & Wastewater*, 2004, 20 (5) : 17-20.
- [44] Han H G, Qiao J F. Prediction of activated sludge bulking based on a self-organizing RBF neural network. *Journal of Process Control*, 2012, 22 (6) : 1103-1112.
- [45] Qiao J F, Han H G. Identification and modeling of nonlinear dynamical systems using a novel self-organizing RBF-based approach. *Automatica*, 2012, 48 (8) : 1729-1734.
- [46] Han H G, Chen Q L, Qiao J F. An efficient self-organizing RBF neural network for water quality predicting. *Neural Networks*, 2011, 24 (7) : 717-725.
- [47] Qiao J F, Han H G. A repair algorithm for radial basis function neural network and its application to chemical oxygen demand modeling. *International Journal of Neural Systems*, 2010, 20 (1) : 63-74.
- [48] Huang X Q, Han H G, Qiao J F. Energy consumption model for wastewater treatment process control. *Water Science & Technology*, 2013, 67 (3) : 667-674.
- [49] Han H G, Qiao J F. Nonlinear model-predictive control for industrial processes: an application to wastewater treatment process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61 (4) : 1970-1982.
- [50] Gustaf O. ICA and me - A subjective review. *Water Research*, 2012, 46 (6) : 1585-1624.
- [51] Snesoun J, Irizar I, Ostoloz X, et al. Dissolved oxygen control and simultaneous estimation of oxygen uptake rate in activated sludge-

- plants. *Water Environment Research*, 1998, 70 (3) : 316-322.
- [52] Wahab N A, Katebi R, Balderud J. Multivariable PID control design for activated sludge process with nitrification and identification. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, 45 (3) : 239-248.
- [53] Vrecko D, Hvala N, Kocijan J. Wastewater treatment benchmark: what can be achieved with simple control? *Water Science & Technology*, 2002, 45 (4-5) : 127-134.
- [54] Åmand L, Carlsson B. Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process. *Water Research*, 2012, 46 (7) : 210-2110.
- [55] Shi X W, Chen Q L, Zhang Y Q, et al. Dissolved oxygen control system in wastewater treatment based on neuron self-adaptive PID. *Computer Measurement & Control*, 2010, 18 (11) : 20-24.
- [56] Han H G, Qiao J F. Adaptive dissolved oxygen control based on dynamic structure neural network. *Applied Soft Computing*, 2011, 11 (4) : 3812-3820.
- [57] Michael A H. Biochemical reactor modeling and control. *IEEE Transactions on Control Systems Magazine*, 2006, 26 (4) : 54-62.
- [58] Nagy Kiss A M, Marx B, Mourot G, et al. Observers design for uncertain Takagi-Sugeno systems with unmeasurable premise variables and unknown inputs. Application to a wastewater treatment plant. *Journal of Process Control*, 2011, 21 (7) : 1105-1114.
- [59] Chai T Y. Operational optimization and feedback control for complex industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39 (11) : 1744-1757.
- [60] Han H G, Wu X L, Qiao J F. Real-Time model predictive control using a self-organizing neural network. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2013, 24 (9) : 1425-1436.
- [61] Holenda B, Domokos E, Rédey ?. Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using model predictive control. *Computers & Chemical Engineering*, 2008, 32 (6) : 1270-1278.
- [62] Shen W H, Chen X Q, Pons M N, et al. Model predictive control for wastewater treatment process with feedforward compensation. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 155 (1-2) : 161-174.
- [63] Chachuat B, Rocheb N, Latifi M A. Long-term optimal aeration strategies for small-size alternating activated sludge treatment plants. *Chemical Engineering and Processing*, 2005, 44 (1) : 593-606.
- [64] Brdys M A, Grochowski M, Gminski T, et al. Hierarchical predictive control of integrated wastewater treatment systems. *Control Engineering Practice*, 2008, 16 (6) : 751-767.
- [65] Duzinkiewicz K, Piotrowski R, Brdys M A, et al. Genetic hybrid predictive controller for optimized dissolved oxygen tracking at lower control level. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17 (5) : 1183-1192.
- [66] Cadet C, Beteau J F, Hernandez S C. Multicriteria control strategy for cost/quality compromise in wastewater treatment plants. *Control Engineering Practice* 12 (4) (2004) : 335-347.
- [67] Dürrenmatt D J, Gujer W. Data-driven modeling approaches to support wastewater treatment plant operation. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 30 (1) : 47-56.
- [68] Han H G, Qiao J F, Chen Q L. Model predictive control of dissolved oxygen concentration based on a self-organizing RBF neural network. *Control Engineering Practice*, 2012, 20 (4) : 465-476.
- [69] Diehl S, Faras S. Control of an ideal activated sludge process in wastewater treatment via an ODE-PDE model. *Journal of Process Control*, 2013, 23 (3) : 359-381.
- [70] Lafont F, Busvelle E, Gauthier J P. An adaptive high-gain observer for wastewater treatment systems. *Journal of Process Control*, 2011, 21 (6) : 893-900.
- [71] Hess J, Bernard O. Design and study of a risk management criterion for an unstable anaerobic wastewater treatment process. *Journal of Process Control*, 2008, 18 (1) : 71-79.
- [72] Engell S, Harjunkski L. Optimal operation: scheduling, advanced control and their integration. *Computers & Chemical Engineering*, 2012, 47 (1) : 121-133.
- [73] Gui W H, Yang C H, Chen X F, et al. Modeling and optimization problems and challenges arising in nonferrous metallurgical processes. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39 (3) : 197-207.
- [74] Butler D, Schutze M. Integrating simulation models with a view to optimal control of urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software*, 2005, 20 (4) : 415-26.
- [75] Habermeyer P, Sánchez A. Optimization of the intermittent aeration in a full-scale wastewater treatment plant biological reactor for nitrogen removal. *Water Environment Research*, 2005, 77 (3) : 229-233.
- [76] Nejari F, Dahhou B, Benhammou A, et al. Non-linear multivariable adaptive control of an activated sludge wastewater treatment process. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 1999, 13 (5) : 347-365.
- [77] Punal A, Rodriguez J, Franco A, et al. Advanced monitoring and control of anaerobic wastewater treatment plants: diagnosis and

- supervision by a fuzzy-based expert system. Water Science & Technology, 2001, 43 (7) : 1191-1198.
- [78] S. Marsili-libelli. Adaptive estimation of bioactivities in the activated sludge process. IEE Proceedings D Control Theory and Applications, 1990, 137 (6) : 349-356.
- [79] Shen W H, Chen X Q, Corriou J P. Application of model predictive control to the BSM1 benchmark of wastewater treatment process. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32 (12) : 2849-2856.
- [80] Stare A, Hvala D N. Comparison of control strategies for nitrogen removal in an activated sludge process in terms of operating costs: A simulation study. Water Research, 2007, 41 (9) : 2004-2014.
- [81] Duzinkiewicz K, Piotrowski R, Brdys M A, et al. Hierarchical dissolved oxygen control for activated sludge processes. Control Engineering Practice, 2008, 16 (1) : 114-131.
- [82] Fan L P, Yu H B, Yuan D C, et al. Improved optimal control of SBR biological wastewater treatment systems. Control and Decision, 2005, 20 (2) : 237-240
- [83] Fu G T, Butler D, Khu S T. Multiple objective optimal control of integrated urban wastewater systems. Environmental Modelling & Software, 2008, 23 (2) : 225-234.
- [84] Ekman M. Bilinear black-box identification and MPC of the activated sludge process. Journal of Process Control, 2008, 18 (7-8) : 643-653.
- [85] Syafie S, Tadeo F, Martinez E, et al. Model-free control based on reinforcement learning for a wastewater treatment problem. Applied Soft Computing, 2011, 11 (1) : 73-82.
- [86] Beraud B, Steyer J P. Towards a global multi objective optimization of wastewater treatment plant based on modeling and genetic algorithms. Water Science & Technology, 2007, 56 (9) : 109-116.
- [87] Zhang P, Yuan M Z, Wang H. Optimization control for pre-denitrification type of biological treatment process for wastewater. Information and Control, 2008, 37 (1) : 113-118,128.
- [88] Zhang K J, Achari G, Sadiq R, et a. An integrated performance assessment framework for water treatment plants. Water Research, 2012, 46 (6) : 1673-1683.
- [89] Sergio L, Tiago F, Sebastian E. Multi-stage nonlinear model predictive control applied to a semi-batch polymerization reactor under uncertainty. Journal of Process Control. 2013, 23 (9) : 1306-1319.
- [90] Han H G, Qian H H, Qiao J F. Nonlinear multiobjective model-predictive control for wastewater treatment process. Journal of Process Control, 2014. 24 (3) : 47-59.
- [91] Qiao J F, Bo Y C, Han G. Application of ESN-based multi indices dual heuristic dynamic programming on wastewater treatment process. Acta Automatica Sinica, 2013, 39 (7) : 1146-1151.
- [92] Qiao J F, Bo Y C, Chai W, et al. Adaptive optimal control for wastewater treatment plant based on data-driven method. Water Science & Technology, 2013, 67 (10) : 2314-2320.
- [93] Shi X W, Qiao J F, Yuan M Z. Optimal control for wastewater treatment process based on improved particle swarm optimization algorithm. Information and Control, 2011, 40 (5) : 698-703.
- [94] Qiao J F, Han G, Han H G. Neural network on-line modeling and controlling method for multi-variable control of wastewater treatment processes. Asian Journal of Control, 2014, 16 (3) : 622-627.

## 作者简介

**乔俊飞** 北京工业大学教授, 主要研究方向为污水处理过程建模、控制与优化。Email: junfeiq@bjut.edu.cn.

**韩红桂** 北京工业大学副教授, 主要研究方向为复杂过程建模与控制, 神经网络分析与设计。E-mail: rechardhan@bjut.edu.cn

**薄迎春** 中国石油大学讲师, 主要研究方向为智能控制, 神经计算。E-mail: boyingchun@sina.com.cn



# 基于ISA-95标准的离散制造业 控制系统集成

张先超, 马国钧, 侍乐媛

北京大学工学院工业工程与管理系, 北京 100871

**摘要:** 我国离散制造信息化和自动化的总体水平偏低, 全面推进离散制造信息化建设, 加强信息化与工业化深度融合, 对于提高离散制造业的自动化程度, 提升效益, 推动工业转型升级, 把我国由传统制造业大国建设成为先进制造业强国具有重要的作用。本文在分析我国离散制造业信息化现状的基础上, 指出了存在的问题, 探讨了离散制造业信息化建设的出路。从集成模型、运营管理和事务处理三个方面重点介绍了国际自动化协会的ISA-95标准。研究了在ISA-95标准体系下提高我国离散制造信息化水平的措施, 需要提高流程标准化程度, 推进业务和控制等系统的无缝衔接和综合集成, 实现各系统之间数据的同步性, 此外, 系统还需要具备应对不确定因素的鲁棒性。讨论了在ISA-95标准下进行业务-控制系统的集成对于完善离散制造标准化体系的作用。最后, 展望了未来的离散制造业信息化建设。

**关键词:** 离散制造, ISA-95标准, 信息化, 综合集成, 标准化

制造业与一个国家的发展程度和综合国力紧密相连, 制造业的先进程度也在一定程度上标志着一个国家的发展水平, 加强制造业信息化建设, 推进信息化和工业化深度融合, 提高制造业的水平对于提高国家综合国力和人民生活水平具有重要的意义。

相比流程工业, 我国离散制造信息化建设更趋落后, 主要表现为实施成本过高, 实施成功率低, 企业各系统缺乏有效集成, 系统缺乏应对不确定因素的鲁棒性等状况。ISA-95标准对于离散制造信息化建设具有重要的指导意义。本文分析流程标准化对于信息化建设的前提作用, 重点介绍国际自动化协会的ISA-95标准, 研究ISA-95标准体系下的离散制造信息化建设问题。

## 1 我国离散制造信息化的现状

制造业是较早推行信息化, 也是信息化运用比较广泛的领域。制造业信息化包括三个方面, 一是信息化的基础设施, 也就是企业的硬件和网络等; 二是信息化基础设施基础上的工具性软件和系统, 如办公自动化系统OA、计算机辅助设计CAD等; 三是信息化基础设施基础上流程层面的信息化系统, 如企业资源规划系统ERP、制造执行系统MES、供应链管理系统SCM、客户关系管理系统CRM等。通常所说的制造业信息化就是指流程层面的信息化。从过去和当前的状况来看, 制造业流程层面信息化系统实施的成功率比较低, 自1990年美国Gartner Group公司提出ERP概念<sup>[1]</sup>,

经过20多年的发展,中国大多数制造企业都已实施了ERP,但是,据不完全统计,ERP在中国能按计划成功实施的比例只有10%~20%<sup>[2]</sup>,而且成功实施的大多是外资企业。MES的概念是美国AMR公司于1990年11月最先提出的<sup>[3]</sup>,到目前为止的实施状况与ERP大抵相似。相比流程工业,离散制造业实施的成功率更低。因此,离散制造业信息化存在着这样的悖论,市场上信息化产品很多,制造企业一般都具备若干套信息化系统,而信息化的水平却很低,信息化对提高企业效益的作用也非常有限。

当前离散制造信息化很多问题无法解决,甚至信息化实施带来了一些新的问题,主要体现在以下方面:

(1) 各系统相互割裂,各系统和系统模块有效集成。业务系统和执行系统、执行系统和控制系统是彼此独立的,系统各模块也缺乏关联性,难以进行数据传递和信息共享。

(2) 系统的通用性和可移植性较差。现有的系统大多都是针对个别企业和特定需求实施的,离散制造业流程复杂,业务变更频繁,这样系统很难适应企业的变化,同时,离散制造企业相互之间通常存在很大的差异,现有的信息化系统几乎不可能在企业之间相互移植,使得系统实施的成本过高,也阻碍了信息化技术的发展。

(3) 无法及时反馈关键信息。缺乏准确、有效、及时的数据采集与信息反馈机制,无法实时掌控企业状况。

(4) 执行层面的自动化水平非常低。车间计划和班组计划的制定基本都是依赖手工完成,企业的信息化在执行层面几乎断裂。

(5) 应对不确定性能力差,系统缺乏鲁棒性。离散制造业涉及的因素很多,同时面临大量的不确定因素,例如,订单取消或变更、机器故障、原材料没有及时到位等,导致系统无法有效运行。

## 2 我国离散制造信息化的出路

离散制造信息化应从三方面寻求突破:一是大力提升执行层的信息化水平,消除信息化的断裂状态,使得企业的信息化全方位贯通起来;二是整合各系统,实现各系统的衔接和集成,加强数据传递和信息共享,消除信息冗余;三是推进离散制造流程标准化,提高系统的通用性和可移植性水平。

执行层信息化程度偏低,过多地依赖手工方式,造成了信息化的断裂,阻碍了离散制造信息化水平的提升。企业各层次和各部门信息化水平不平衡,信息化瓶颈的存在影响了信息化对提升整体效益的作用。例如,业务层利用信息化手段生成的生产计划,执行层的手工方式无法快速给出满意的排程方案,进而产品无法按期交付,使得业务层信息化的效益也无法发挥出来。执行层对手工方式的依赖在于其面对的环境和问题的复杂性和不确定性,信息化表达和处理异常困难,而这又与执行层流程和操作的标准化程度过低有着极大的关系。

离散制造企业现有各系统的相互割裂导致“信息孤岛”的出现,各系统数据不共享功能不关联。“信息孤岛”的出现既有主观认识的原因,也要信息化建设和管理体制上的客观的原因。主观方面,企业在发展信息化上往往重视看得见的硬件和网络,而轻视直接实现功能的软件和数据,同时,没有认识到各系统集成的必要性,导致“信息孤岛”一直难以消除。客观上,信息化建设通常是逐步展开的,离散制造业更是如此,信息系统的开发和引进往往是根据需要围绕着某一项或几项业务展开的,与之前的系统没有衔接和关联,也没有考虑自身的扩展性。业务流程自身缺乏标准使得各系统缺乏标准借口,各系统的集成几乎不可能实现。

标准化在很大程度上能够降低系统成本,提

高效益<sup>[4]</sup>。离散制造流程缺乏标准,各企业的系统几乎都是为自己量身打造的,系统缺乏通用性,不可能将在一个企业成功实施的系统完全移植到另外的企业。系统缺乏通用性导致实施成本很高,需要大量的财力人力和时间投入,阻碍了信息系统的升级,也限制了新系统的推广和普及,影响了离散制造信息化水平的提升。正如汽车,其设计与技术的进步和大规模普及得益于标准化,即便是定制生产,也只是极少数细节的差异,总体来说还是标准的,假如汽车完全按照个人的要求进行设计和生产,现在汽车发展的状况是无法想象的。软件系统也遵循着同样的逻辑,假如计算机操作系统不是标准化的,从界面到功能按照每个用户的要求设计和配置,就不可能发展到现在的程度。离散制造流程标准化程度过低成为了其信息化的桎梏,信息化水平提升的前提是要加强流程的标准化。

加强离散制造流程的标准化又以信息化水平最低的执行层的流程标准化最为紧迫和重要。

### 3 ISA-95标准介绍

ISA-95是国际自动化协会(The International Society of Automation, ISA)发布的关于制造业业务与控制系统集成(Enterprise-Control System Integration)的国际标准,美国国家标准学会(American National Standards Institute, ANSI)监督并保证其过程的正确性,通常也被成为SP95。迄今为止,ISA-95已经正式发布了5个部分,分别是:

(1) Part 1: Models and Terminology (模型和术语)<sup>[5]</sup>。该部分在CIM普渡参考模型(Purdue Reference Model for CIM)<sup>[6]</sup>基础上,规定了制造业控制功能与其他功能的集成接口,描述了业务和控制关联的活动和一般情况下交换的信息流对象。

(2) Part 2: Object Model Attributes (对象模型属性)<sup>[7]</sup>。该部分定义了Part 1的信息对象模型属性。

(3) Part 3: Activity Models of Manufacturing Operations Management (制造运营管理活动模型)<sup>[8]</sup>。该部分规定了业务和控制集成层的活动,即制造运营管理活动。

(4) Part 4: Object Models and Attributes for Manufacturing Operations Management (制造运营管理用对象模型与属性)<sup>[9]</sup>。该部分规定了Part 3中制造运营管理活动相互之间数据交换的信息流对象模型与属性。

(5) Part 5: Business-to-Manufacturing Transactions (商业系统和制造系统事务处理)<sup>[10]</sup>。该部分规定了制造业的商业活动和制造活动的事务处理。

(6) Part 6: Manufacturing Operations Transactions (制造运营事务处理)尚未发布,主要是关于制造运营活动的事务处理。

ISA-95统一了制造业的业务与控制集成模型、制造运营管理活动和事务处理等。

#### 3.1 制造集成模型

ISA-95规定了制造运营与控制系统和其他业务系统的层次模型、功能数据流模型、运营管理模型和信息流对象模型等,其中,层次模型包括功能层次模型和对应的面向任务的设备层次模型、实物资产设备层次模型和决策层次模型等,其他层次模型依附于功能层次模型。

功能层次模型分为5个层次,如图1所示。

在图1中,Level 0规定制造的实际物理过程,Level 1规定检测和操纵生产过程的功能,Level 2规定监测、监控和自动控制生产过程的功能,Level 3规定生产最终产品的工作流和生产过程的记录和协调的功能,Level 4规定管理制造组织需要的商业功能。一般来讲,下层功能受上层功能

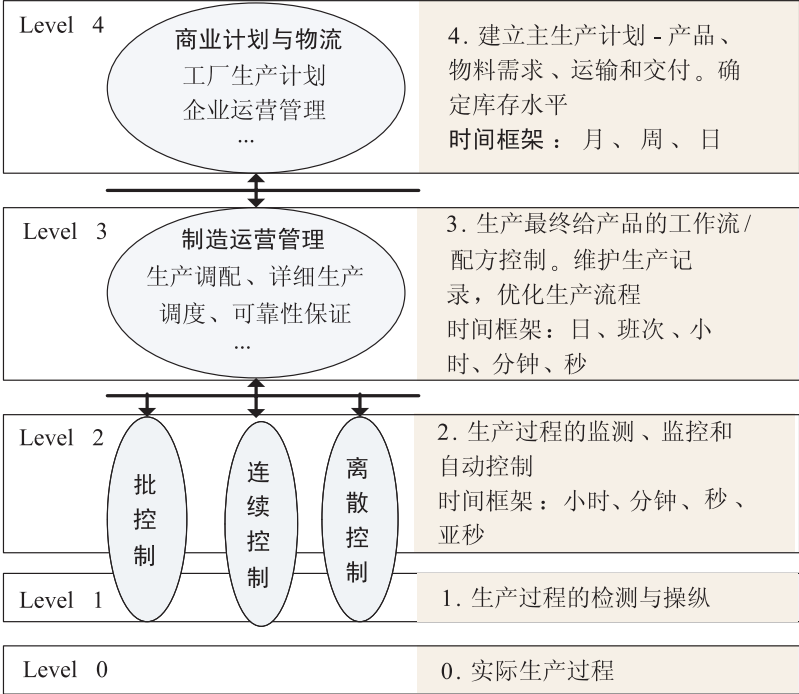


图1 制造功能层次

的控制，但是，上层功能的实现也会受制于下层功能的约束。各层次的具体活动可参考文献[4]。各层次功能的时间框架不同，不是完全同步的。

面向任务的设备层次模型、实物资产设备层次模型和决策层次模型是与功能层次模型对应的，分别服务于各层次功能的实现。

图1 只是给出了制造企业的功能层次关系，而图2的制造功能结构模型则表示了制造企业各功能的活动关系与信息流对象。

在图2中，蓝色阴影区域是制造运营与控制部分，椭圆框表示功能，矩形框完全是业务功能，对应于图1的Level4，“生产控制”完全是控制功能，对应于图1的Level 1和Level 2，蓝色阴影边界上的“生产调度”等5个功能连接制造业务和控制，起着集成业务和控制的作用，是制造运营管理功能，对应于图1的Level 3。实线表示业务系统和控制系统集成必需的信息流，虚线表示的信息流不是业务控制系统集成所必需，但也是制造业必需的信息流。

业务-控制集成模型的信息流对象采用统一

建模语言（United Modeling Language，UML）建模，包括（过程段）人员、（过程段）设备、（过程段）材料能力和说明，人员和设备要求等。各对象模型的组成部分和元素都有唯一标识等属性。

3.2 制造运营管理

制造运营管理指制造业中协调人员、设备、物料和能源等的活动，如图2中的蓝色阴影区域所示。制造运营管理主要包括生产运营管理、库存运营管理、维修运营管理和质量运营管理4类，生产运营管理有图2的“生产调度”和“生产控制”功能，库存运营管理有图2中的“产品库存控制”和“物料和能源控制”功能，维修运营管理对应图2中的“维修管理”功能，质量运营管理对应图2的“质量保证”功能。这4类运营管理活动相互之间也存在着一定的信息交换。制造运营管理为制造业务和控制功能的集成提供了接口，对应于图1的功能层次的Level 3。

制造的四类运营管理与业务层和控制层有着



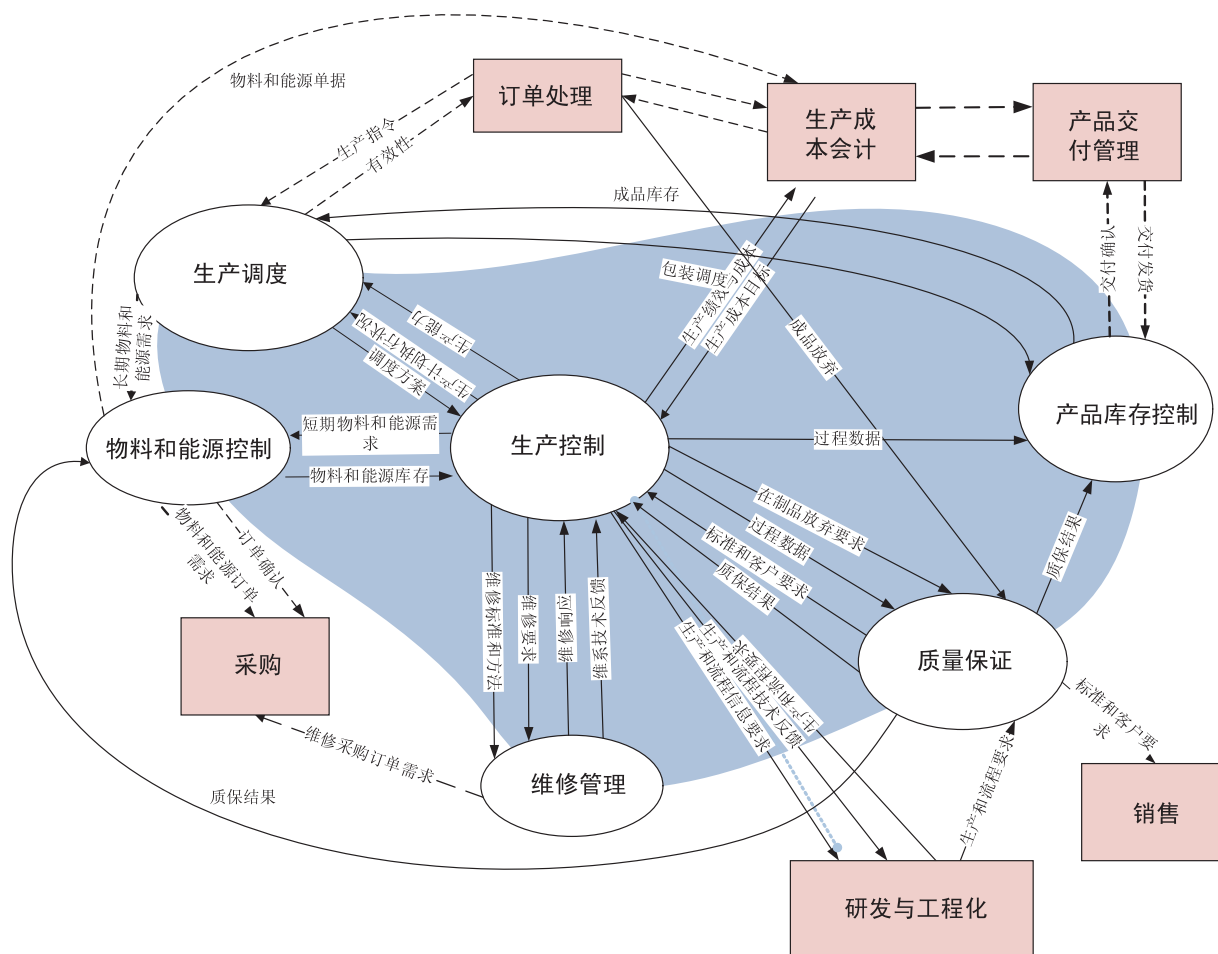


图2 制造功能结构模型

相同的输入和输出, 并且有着共性的活动及活动关系, 如图3所示。

在图3中，业务系统向运营系统输入指令，例如，生产计划、维修要求等，驱动运营活动的运行，运营系统向业务系统反馈相关的信息。但是，驱动运营管理活动的运营要求和运营活动反馈的运营响应等，不完全来自也不完全反馈到业务系统，例如，生产运营管理的返工就是来自生产运营内部的驱动，生产运营的SPC和SQC等运营响应信息反馈给质量运营管理的相关活动。运营管理向控制系统发送设备和流程要求，以及运行指令等，控制系统则向运营管理的相关活动反馈对运营管理的响应状况和设备与过程数据等。

当然，除了这4类主要的运营管理，还有其他

的支撑制造业实现其目标的运营活动，如制造运营管理中的安全管理、信息管理、配置管理和文档管理等。

制造运营管理的信息流对象与集成模型是不同的，主要是在运营管理活动之间传递和交换，包括运营管理的工作阶段划分，规定生产、维修、库存或质量运营的调度方案、工作绩效和工作能力，控制工作规定等。与集成模型类似，可以采用UML建模，各对象模型的组成部分和元素有着各自的唯一标识等属性。

### 3.3 制造事务处理

在ISA-95中, 图1的Level 3和Level 4的活动之间以及Level 3内部活动之间的信息交换的事



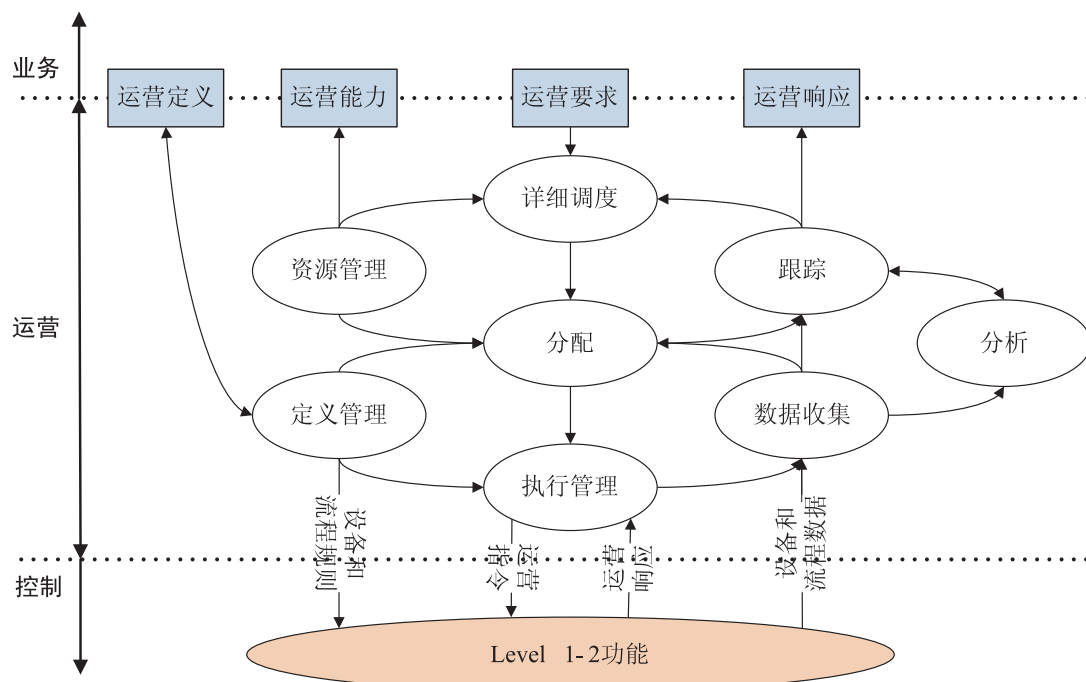


图3 制造运营活动

务处理（Transactions），由图4所示结构的消息（Message）序列组成的。

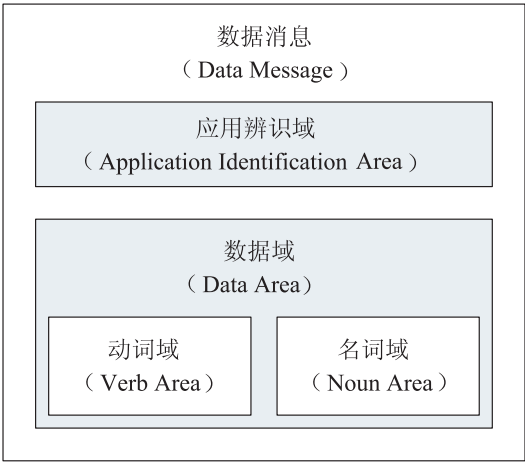


图4 事务处理消息结构

在图4中，消息结构主要包括“应用辨识域”和“数据域”两部分。应用辨识域用于应用层，用以辨识消息来源和消息类型，包含消息发送方地址、要求确认和消息创建的时间和地点等。数据域由“动词域”和“名词域”组成，动词域包含表示接受方执行指令和发送方要求响应的“动

词”和“相关要素”。名词域包含表示一个或若干个信息对象的“名词”和“相关要素”。

动词域的“动词”主要有GET（接收方信息请求）、SHOW（发送方信息请求响应）、PROCESS（接收方处理新信息请求）、ACKNOWLEDGE（PROCESS请求确认）、CHANGE（接收方改变信息请求）、CANCEL（接收方移除信息请求）、CONFIRM（接受和处理确认）、RESPOND（CHANGE请求响应）、SYNC（信息同步）、SYNC ADD（同步增加新信息请求）、SYNC CHANGE（同步改变信息请求）和SYNC DELETE（同步删除信息请求）等。

名词域的“名词”主要是指人员、设备、材料、过程段、生产能力、生产调度和生产绩效等的对象模型属性。

在ISA-95中，事务处理模型有PUBLISH、PUSH和PULL三类。PUBLISH模型用于数据提供者向用户发送消息，使得信息同步。PUSH模型用于发送方向接收方发送新信息或改变的信息。

PULL模型用于用户向信息提供方请求信息。

## 4 ISA-95体系下的离散制造信息化

ISA-95标准为离散制造信息化提供了业务系统与控制系统的集成模型和信息流对象、运营管理活动模型和信息流对象、集成接口和事务处理的标准,为制造企业各层次各部分信息化系统的综合集成提供了框架,在ISA-95体系下离散制造业的信息化应改变传统的模式,开发更加标准化的系统,推进业务系统、运营系统和控制系统等的无缝衔接和综合集成,此外,由于离散制造业面临很多的不确定因素,信息化系统必须具有一定的鲁棒性,在不确定因素作用下能够有效运行。

### 4.1 提高标准化程度

离散制造信息化直接服务于制造企业的活动,那么,信息化系统必然依附于企业的业务流程。提高离散制造信息化的标准分两个方面,一是要推进业务流程的标准化,使得系统在无需大幅改变的情况下能够移植到另外的企业,一是要加强信息系统的标准化,尤其是系统接口的标准化,不同厂商和不同功能的系统能够集成运行,各系统的数据能够相互交换,信息能够共享。这也是离散制造信息化和自动化水平提升的前提,经过多年发展的信息化如果仍然无法解决标准化问题,则将掣肘难前。

### 4.2 突出执行层信息化

离散制造生产过程中产品和零部件BOM的多次拆分合并和制造生产流程的复杂性,导致在生产现场工件的订单属性已不存在了。由于生产现场的实时信息存在着滞后和误差,生产计划难以及时调整。因此,需要特别重视离散制造执行层的信息化,开发一套可执行、可预期和可调整的

量化的管理系统,保持信息流的完整畅通,做到根据现场采集的大量实时信息能够重构订单和进行生产计划的有效调整。

### 4.3 推进信息化综合集成

事务复杂部门众多的离散制造业自身是一个完整的系统,过去的信息化建设把一个完整的整体人为地分割成相互独立的部分,分别实施信息化系统,当然,这有着技术、管理和认识等多方面的原因。这种彼此独立的信息化系统在一定程度上能够解决部分问题,但对于提高制造企业整体的效益是有限的。必须推进离散制造信息化的综合集成,做到各系统无缝衔接,在不违背企业规章制度的情况下使信息在整个企业各层次各部门间自由流动,及时共享,更好地事实掌控企业状况,提高企业的实时决策能力和决策水平。

### 4.4 加强信息系统同步性

离散制造业信息系统具有多样性和异构性,数据来源广泛,加强信息化的标准化和进行综合化集成建设必须要运用相关的方法和技术,解决信息系统之间数据同步性问题,例如,建立数据中心,利用面向服务的体系结构(Service-Oriented Architecture, SOA)技术实现数据中心与各信息系统的同步。当然,各信息的数据同步频率是不同的,各系统没有必要使用也无法实现相同的数据同步频率,正如图1所说明的各层次的时间框架是不一样的,控制系统最长也要以“小时”为时间框架,而业务系统最短在“日”的时间框架下运行即可,系统同步就是要让各层次各部门在各自的时间框架下同步更新数据,让系统有效运行起来。

### 4.5 提高信息系统鲁棒性

在ISA-95体系下,各环节各活动彼此关联相互影响,然而,离散制造业的环境是不确定的,面

临大量的不确定因素，例如图1中Level 4业务功能层次的订单变更、取消，Level 3运营管理的加工时间波动、机器故障，Level 2中检测设备的误差等，任何不确定因素都有可能导致信息系统做出的决策是无效的，无法执行，甚至由于错误的决策在信息系统上扩散而导致严重的后果。信息系统必须具备鲁棒性，在不确定环境下可以做出能够有效应对不确定因素的决策，在不确定因素发生时仍然可以执行，或者经过微小的调整即可执行，且具有比较满意的效果。

## 5 信息化促进完善离散制造业标准体系

企业标准按其性质通常分为技术标准、工作标准和管理标准<sup>[11]</sup>，标准化的管理体系就是企业从事各种管理活动中，在一定范围内做出统一规定，企业的各种活动都依据这一规定，以此建立的质量管理体系。中国离散制造业的标准化程度总体来说是比较低，标准化体系不很完善，ISA-95体系下的离散制造信息化有利于提高其技术标准、生产组织标准和经济管理标准，完善离散制造业标准体系。

### 5.1 完善离散制造业技术标准

技术标准是指重复性的技术事项在一定范围内的统一规定。在图2的功能结构模型中，有不少和技术标准有关的信息流，例如“质量保证”活动向“生产控制”传递的质量保证标准，“生产控制”传递给“维修要求”的维修标准等，信息系统的要求需要企业明确规定有关的技术事项，以标准的形式确定下来，这些促使企业加强技术标准工作。

### 5.2 完善离散制造业工作标准

工作标准是指对需要协调统一的事项所制定

的标准。在ISA-95标准中，大量的活动和信息流需要有工作标准的支持，例如，生产调度方案需要明确各工序的处理时间，物料和能源需求等，在ISA-95体系下的离散制造信息化过程中，需要制定相关的工作标准，使得构建的信息系统能够正常运行，这反过来促进了工作标准的完善。

### 5.3 完善离散制造业管理标准

管理标准是对需要协调统一的管理事项所制定的标准，离散制造的管理标准包括生产计划方法、人员条件与资格、设备管理、业务流程等，这些在ISA-95体系下需要以标准的形式明确规定。管理标准也是与信息化建设有着最直接联系的标准，没有这些管理标准，是无从推进信息化的，然而，离散制造由于事务复杂，管理标准相对落后，因此，离散制造信息化建设将大幅提高企业的管理标准。

ISA-95标准是业务-控制集成的标准，很大程度上和制造业的标准化管理体系是密切相关的，因此，在ISA-95体系下推进离散制造信息化建设必然能够完善其标准体系。信息化与标准化需要共同推进，也必然是共同推进的，信息化离开标准化就无法开展，而离开信息化的标准化的效用也大为降低。

## 6 总结与展望

本文在分析我国离散制造信息化建设的基础上，探讨了我国离散制造信息化的出路。重点从制造集成模型、制造运营管理和制造事务处理三个方面介绍了ISA-95标准。在此基础上，研究了ISA-95标准体系下的离散制造信息化，此外，还简单分析了在ISA-95标准下进行信息化建设对完善离散制造业标准化体系的作用。

在未来的离散制造信息化过程中，需以ISA-95标准为指导，提高信息化系统的标准化，将业务

和控制等系统集成起来,实现财务、库存、运营管理和控制等功能的无缝衔接。提高信息化系统的通用性和可移植性,降低实施成本,提升信息化系统带来的效益。增强系统的鲁棒性,提高应对不确定因素的能力。系统规划,稳步推进,从根本上推进离散制造的信息化,提高离散制造自动化程度,实现信息化和工业化的深度融合。

### 参考文献

- [1] Wiley L. ERP: A Vision of the Next-Generation MRP II[R]. Scenario, S-300-309, Gartner Group, April 12, 1990
- [2] 王揖, 汤伟, 王孟效.ERP现状及未来发展趋势[J].化工自动化及仪表, 2009,36(3):1-6
- [3] Swanton B. MES five years later: prelude to phase III[R].USA:AMR Report 13725 ,1995.
- [4] Hassan A E, Holt R C. The chaos of software development[C]. Proceedings of the 6th International Workshop on Principles of Software Evolution, Washington D. C. , USA: IEEE Computer Society, 2003: 84-94.
- [5] ANSI. ANSI/ISA-95.00.01-2000.Enterprise-control system integration part 1: models and terminology[S]. Washington, D. C., USA: ANSI, 2000
- [6] Williams T J. The purdue enterprise reference architecture[J]. Computers in Industry, 1994, 24(2-3):141-158
- [7] ANSI. ANSI/ISA-95.00.02-2001.Enterprise-control system integration part 2: object model attributes[S]. Washington, D. C., USA: ANSI, 2001
- [8] ANSI. ANSI/ISA-95.00.03-2005.Enterprise-control system integration part 3: Activity Models of Manufacturing Operations Management [S]. Washington, D. C., USA: ANSI, 2005
- [9] ANSI. ANSI/ISA-95.00.04-2012.Enterprise-control system integration part 4: Object Models and Attributes for Manufacturing Operations Management [S]. Washington, D. C., USA: ANSI, 2012
- [10] ANSI. ANSI/ISA-95.00.05-2007.Enterprise-control system integration part 5: Business-to- Manufacturing Transactions[S]. Washington, D. C., USA: ANSI, 2007
- [11] 黄序鑫, 聂瑞华, 罗辉琼等.基于SOA的数据同步技术研究与实现[J].计算机工程与设计, 2009,30 (14) : 3338-3340, 3435
- [12] 李春田. 标准化概论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1987
- [13] 刘宏娇. 试论构建企业标准化体系[J]. 价值工程, 2013,15:151-152

### 作者简介

**张先超** 男, 1984年3月生, 现为北京大学工学院工业工程与管理系博士后。主要从事制造系统优化调度, 制造运营管理和制造业信息化集成等研究。

**马国钧** 男, 1951年6月生, 现为北京大学工学院工业工程与管理系研究员。主要从事制造业生产运营管理系统的研究、开发与实施。

**侍乐媛** 女, 1957年11月生, 现为北京大学工学院工业工程与管理系主任。她是国家“千人计划”专家, 2010年当选IEEE Fellow。曾担任很多国内国际会议的主席和委员职位, 如IEEE—CASE国际大会委员, INFORMS年会委员, IEEE—SOLI国际大会会议主席等, 以及多个顶级专业杂志的编委, 包括INFORMS Journal on Computing, Journal of Manufacturing and Service Operations Management, Journal of Methodology and Computing in Applied Probability等。2006年获得Vilas Associate Award。目前是IEEE Automation Science and Engineering杂志的副主编, Journal of Discrete Event Dynamic Systems杂志的编委。她一直担任多个美国及国际基金评审委员, 包括美国自然科学基金, 美国海军研究基金, 美国空军研究基金, 香港研究基金会 (Research Grants Council, Hong Kong), 韩国科学工程基金会 (Korea Science & Engineering Foundation) 等。她还是台湾教育部杰出人才奖的海外评委, 中国国家自然科学基金海外评委。

原文取自：IEEE Computational Intelligence magazine, August 2013, pp.12-15.

# 复杂工程优化问题的进化方法： 机遇与挑战

商秀芹 译

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，北京 100190

进化算法与其他元启发式算法，如粒子群优化算法和差分进化算法等，在广泛的问题中展现出了强大的全局优化能力已经展示出对广泛问题的全局优化能力。近年来，大量研究工作致力于解决复杂工程优化（CEO）问题。除了其他约束之外，CEO问题经常被大量不确定性因素所约束，例如不同的环境状态，系统性能退化，变化的客户需求；这些时变的约束具有很强的约束性；计算量大、需要满足涉及多个学科的多个条件；系统通常有相互关联的子系统组成，子系统中包含大量相关联的决策变量。此外，复杂工程优化在大多数情况下被嵌入到一个更大的设计过程中，该过程涉及多个团队和工具，这些团队和工具依次并行工作，同时通过不同时序和空间分解为多个子系统。因而，大量新的研究领域已经出现，主要包括：动态不确定性环境下的进化优化<sup>[1,2]</sup>，代理进化优化，多目标优化<sup>[4,5]</sup>，大规模优化<sup>[6]</sup>，集成控制与优化<sup>[7,8]</sup>，等等现仅列举这些。

尽管上述课题都源于实际问题，但是上述领域的很多研究成果尚未应用于解决实际问题，复杂工程优化领域的很多研究问题与挑战尚未解决。因此，对实际问题的研究受到越来越多的关注。首先，解决这些领域的挑战是否有现实意

义，仍有待证实。譬如，在进化动态优化中，大多数算法的设计目标为尽可能接近变化的最优轨迹。最理想的状态是设计的算法能够在任何时刻跟踪动态变化的最优值。然而，最佳的设计需要频繁变动，这种变动实现起来不仅将受到时间限制，并且需要较高的成本，在现实中是不切实际的。最近流行一个观点认为最优的解决方案是具有一切变的鲁棒性，时变最小的优化方案被认为是设计变动成本最小的方案<sup>[9]</sup>，该方案综合权衡了寻优与鲁棒性。

其次，为了检测不同元启发式算法的性能，大量的测试问题被设计出来。这些测试问题反映现实问题的特征，被广泛应用于动态优化，多目标优化，约束优化以及大规模的优化。为了发表论文，这些测试问题在技术上已经成为所提新算法的先进行证据。然而，很少论文考虑到是否这些测试问题具有现实意义，即这些测试问题与实际优化案例究竟有多少相关性。

第三，研发的算法之间的性能比较不再是简单的单一性能指标的比较。而是一个多目标优化问题，所求的解集质量评估必须采用多个性能指标，包括精度与多样性。另外，解还可以具有主观性，取决于决策者的偏好。在多目标优化中最差的情况是优化目标的数目非常多。显然，



在一个巨大空间对极端小的解集进行比较是没有意义的, 在没有明确偏好的情况下该比较会成为误导。在多目标优化过程中, 由于高维的目标空间, 甚至优化结果的简单直观可视化也变得难以实现。

在上述问题中, 第一个问题可以归结为: 什么使得CEO问题在实际中难以解决? 这一问题很难给出一个简单的答案, 因为答案因问题本身固有性质而定。随后, 我们试图讨论几个问题点, 我们希望这些问题点可以阐述这一问题。

如果一个人具有解决实际CEO问题的经验, 他会清醒的意识到在实际优化进行之前需要解决若干问题。第一个问题是公式化优化问题, “包括”给出目标、约束和表示法的定义, 给给出决策变量的定义。实际问题是CEO问题包括多个子系统和子过程, 这些子系统和子过程是相互关联的, 各个子系统的局部优化不能求得全局优化解。同时, 高维问题阻碍了整个问题的统一性描述。气动外形优化问题就是一个很好的例子, 该问题中以塞车的气动外形优化问题为例其整体表达式包涵几千个决策变量。因此, 必须被定义的表达式本质上是不完整的, 仅包含设计空间的一部分。针对这一缺陷, 我们需要提出应对的方法, 例如通过选择一个最佳的时空分解方法来分解问题, 或者通过自适应的改变表达式使得搜索集中在高度敏感区域。

此外, CEO问题可能不容易通过明确的数据模型进行描述, 并受到大量的不确定性限制。理解并正确描述优化问题的公式是其解决问题过程中的一个重要部分, 这部分工作需要优化专家、应用工程师之间反复修正, 甚至需要特定领域的仿真模拟专家的参与。很多模拟的方法是迭代方法(如, CFD计算流体动力学或FEM有限元法), 利用残差和一个与问题相关的设置(如, 网格类型和大小)通过优化算法实现交互优化。另一个CEO问题的典型应用是工厂范围的产品流

程优化<sup>[7]</sup>, 例如, 选矿的全局运作优化问题, 它是由多个耦合的过程组成, 如矿石破碎、研磨与重磨、筛选。没有准确的模型可用来描述这一过程及几个优化目标, 其优化目标主要包括: 产品质量、能源效率和生产能力。在这些过程优化中有一个特别有趣的问题是优化与控制都参与其中。集成控制与优化策略或许不能导致全局优化, 但也可能提供了一种处理方法用以处理动态优化与鲁棒性最佳平衡的不确定性问题。

另一个例子是飞机设计。在飞机设计中, 一架飞机的各个部分(如, 机身, 机翼, 尾翼)的设计是一个集合的整体, 以保证每个部分的设计服从整体优化设计, 是多目标优化问题, 优化目标主要包括: 节能、减排和安全操作。对于处理这样的CEO优化问题, 文献[7],[10]中建议采用系统工程的角度, 即整体性视角。

类似的问题可以在乘车优化问题中发现。在该问题中, 不仅是必须集成几个工程学科的优化准则, 如, 结构安全(碰撞), 空气动力学和热力学, 同时还需考虑美学设计、制造成本收益和产品回收处理等因素。优化框架基本上包含和关联了产品生命周期管理的所有环节, 是复杂工程问题中支柱。从某种意义上说, 优化框架本身是由多个子优化问题分层组织在一起的, 这些子问题能够在不同时间尺度(从分钟到月份)下运行, 并且需要在完整开发、采购、生产制造与服务流程中实现各分部之间以及各自的决策者之间的互动。在现实挑战中, 嵌入到如此复杂的框架中的调整算法往往比那些在有限的测试中通过技术方法提供略好的优化结果更有意义。当然, 不能贬低这种已经采取或正在采取的数值与组合优化方法所做的工作, 但应强调的是往往在实际中CEO问题的需求是不同的。同时, 进化算法(EAs)包括其他元启发式算法因其本质的鲁棒性、灵活性和适应性, 非常适合这种复杂设计框架, 是前景的选择和方法。

解决CEO问题的优化算法必须在决策变量与优化目标数量上具有可扩展性；并且能够处理不确定性能力，具体方法通过跟踪最优解或找到具有鲁棒性的优化解，或者当无法实现解的频繁变化时辨识出具有时间鲁棒性的最优解或可行解。算法不仅可以解决大规模优化和多目标优化，同时对可辨识出2到3个少量关键目标的优化问题也同样适用。为此，如果优化目标的数目减少，则基于偏好的交互式搜索可能比无信息指导的搜索更能找到Pareto解。在这一实例中，工程数据挖掘、知识获取<sup>[13]</sup>和可视化技术对指导交互式搜索起着越来越重要的作用，能够用公式表达最初的问题或找出最合适的问题描述，从而直接减少了决策变量的数量。

至此，我们自然而然得出另一重要可能出现在CEO中问题：如何确保优化算法在优化中能够获得问题的具体知识，以使搜索更高效，并适应和很好的应对变化。对这一问题，超启发式算法<sup>[11]</sup>，把优化和学习方法进行系统集成，是一个有应用前景的解决方法。

在多目标优化中，结合学习技术获得问题的具体知识，不仅有利于获取问题结构选择正确的搜索策略，学习用户偏好；而且便于确定最相关的搜索空间，对未知或部分已知的系统实现建模进而优化与控制<sup>[12]</sup>。另一种在生物学中应对不确定的环境的策略是为变化做好准备。为此，优化算法应该具有可进化性，即，能够搞找到适应新环境的优化解。在变化的环境中搜索时间鲁棒性优化解的方法因具体案例而定<sup>[8]</sup>。

图1总结了在应对CEO问题的主要挑战和要求。

本期专刊的目的是促进EA和其他元启发式算法在解决现实世界的复杂工程优化问题中的应用。为响应征稿，9篇论文已提交。经过同行专家评审，四片论文已经入选专刊。这四个论文代表了进化优化在广泛的现实问题中的最新进展，包

括面向自适应3D编队重构的多UAV（无人机）系统优化，墙壁跟踪移动机器人多目标优化，自组织物联网，非环状小分子的低能量过渡态的发现。这些结果说明，解决复杂优化问题在不同程度面临挑战。

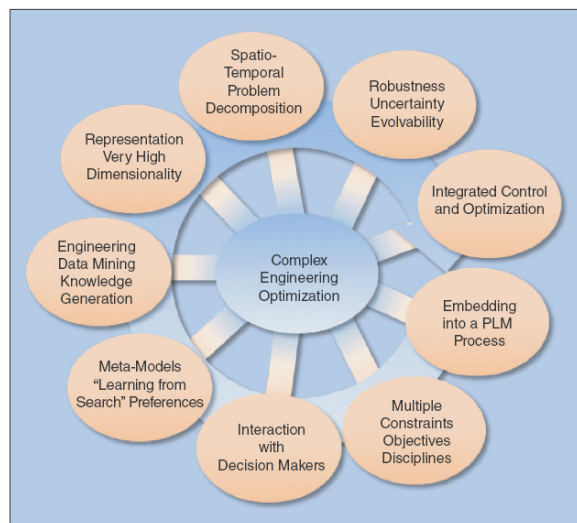


图1 CEO问题的主要挑战与需求

在Duan等撰写的论文“多UAV的3D空间编队重构的粒子群优化和遗传算法混合算法”中，提出了遗传算法（GA）和粒子群优化（PSO）的混合优化策略，以便找到一个最优控制策略实现3D空间中的多UAV编队重构问题。该问题被定义为一个优化问题，该问题是在状态相对约束下的成本函数最小化问题。所提出的算法证实兼有GA的全局搜索能力和PSO收敛速度快的优点，能够解决单个和多个编队重构时间最优控制问题。

在Hsu和Juang撰写的论文“多目标编码规则先进连续蚁群优化模糊控制器在机器人墙跟踪控制中的应用”中，采用蚁群优化算法（ACO）优化模糊控制器的结构和参数。该文涉及离散和连续两类决策参数的优化，需要搜索算法能够处理这两类决策变量的搜索问题。同时，需要考虑多个优化目标，包括墙壁跟踪精度最大、完成了墙壁跟踪任务的时间最短、转向角变化的平滑度最

大、模糊规则的数目最小。无模糊规则需要预先定义,生成规则的所有数据在线搜集获得。

在过去的十年中,物联网(IOT)是一个在通信和网络技术上有代表性的新成果,其特征是大规模异构网络单元和所处动态外部环境的信息感知的非常不确定性。在Ding等人撰写的论文“一个基于内分泌调节原理的自组织方案在复杂物联网中的应用”中,讲述了一种源于人类荷尔蒙系统的人工内分泌系统,可以为可扩展性,异质性和复杂性等现实问题提供解决方案。通过引入激素机制到信息传输介质和物联网节点间的数据共享,从而节点可以互相协作实现合作工作方式。

文化基因算法是一种类型的“超启发式”算法,能够在优化中获得问题的具体知识,从而提升搜索效率。在Ellabaan等人撰写的论文“利用进化分子模因计算的非环状小分子的低能量过渡态的发现”中,提出了一种新型的分子进化计算模因(MMC)方法,该方法只需要很少的领域知识。除了模因算法的核心——机遇种群的全局搜索方法和基于个体的生命周期学习过程,MMC的本质在于非环状分子的树型表示和共价键驱动的进化操作。该工作证明在解决复杂优化问题时,优化问题的有效表示方法以及问题知识的自动获取与复用是至关重要的。

本期专刊中这四篇论文或许只是解决了现实的CEO的问题中了一小部分问题。然而,我们相信,所有的论文都是有趣的有内容的,它们可以帮助我们更好地理解在复杂工程问题中进化优化所面对的前景与挑战。我们坚信在不久的将来,在CEO的进化优化领域中将有更多的研究成果被发表出来。我们要感谢主编Dr. Kay Chen Tan,他给我们机会成为本期待刊的客座编辑。还要感谢所有的作者提交他们的成果到本期专刊,感谢评审专家在百忙之中为我们提供建设性和有见地的评论意见。

## 参考文献

- [1] Y. Jin and J. Branke, "Evolutionary optimization in uncertain environments-A survey," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 9, no. 3, pp. 303-317, 2005.
- [2] H.-G. Beyer and B. Sendhoff, "Robust optimization-A comprehensive survey," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 196, no. 33, pp. 3190-3218, 2007.
- [3] Y. Jin, "Surrogate-assisted evolutionary computation: Recent advances and future challenges," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 1, no. 2, pp. 61-70, 2011.
- [4] D. Deb, *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. New York: Wiley, 2009.
- [5] H. Ishibuchi, N. Tsukamoto, and Y. Nojima, "Evolutionary many-objective optimization: A short review," in *Proc. Congr. Evolutionary Computation*, 2008, pp. 2424-2431.
- [6] Z. Yang, K. Tang, and X. Yao, "Large scale evolutionary optimization using cooperative coevolution," *Inform. Sci.*, vol. 178, no. 15, pp. 2985-2999, 2008.
- [7] T.-Y. Chai, "Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms of control and optimization theories," *Acta Autom. Sin.*, vol. 35, no. 6, pp. 641-649, 2009.
- [8] S. Engell and I. Harjunkski, "Optimal operation: Scheduling, advanced control and their integration," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 47, pp. 121-133, Dec. 2012.
- [9] Y. Jin, K. Tang, X. Yu, B. Sendhoff, and X. Yao, "A framework for finding robust optimal solutions overtime," *Memetic Comput.*, vol. 5, no. 1, pp. 3-18, 2013.
- [10] Y. Jin and B. Sendhoff, "A systems approach to evolutionary multiobjective structural optimization and beyond," *IEEE Comput. Intell. Mag.*, vol. 4, no. 3, pp. 62-76, 2009.
- [11] E. Burke, E. Hart, G. Kendall, J. Newall, P. Ross, and S. Schulenburg, "Hyper-heuristics: An emerging direction in modern search technology," in *Hand-book of Metaheuristics*. Norwell, MA: Kluwer, 2003, pp. 457-474.
- [12] J. Ding, T.-Y. Chai, H. Wang, and X. Chen, "Knowledge-based global operation of mineral processing under uncertainty," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 8, no. 4, pp. 849-859, 2012.
- [13] L. Graening, S. Menzel, M. Hasenberger, T. Bihrer, M. Olhofer, and B. Sendhoff, "Knowledge extraction from aerodynamic design data and its application to 3D turbine blade geometries," *J. Math. Model. Algorithms*, vol. 7, no. 4, pp. 329-350, 2008.



# 中国自动化学会第十次全国会员代表大会在京隆重召开

2013年12月28日，中国自动化学会第十次全国会员代表大会在北京会议中心隆重召开。中国科协学会学术部宋军部长、中国科学院自动化研究所王东琳所长、中国科学院自



动化所房自正副所长、中国电工技术学会韩毅秘书长，中国自动化学会特别顾问吴启迪教授，理事长戴汝为院士、孙优贤院士，副理事长郑南宁院士、吴宏鑫院士、王天然院士、席裕庚教授、周康教授、王飞跃研究员，省级学会分支机构代表、高等院校代表、科研院所、企事业单位代表等三百余人出席会议。大会在雄伟庄严的国歌声中开始。

上午的会议由中国自动化学会副理事长兼秘书长王飞跃主持。

戴汝为理事长致开幕词。他首先代表中国自动化学会第九届理事会和本次大会主席团向全体参会代表表示热烈欢迎！同时表示本次大会是在我国全面建设小康社会，全党和全国各族人民深入学习贯彻党的十八大精神的形势下召开的，希望借此契机，努力创办具有中国特色的自动化科技创新型的社团，构建社会主义和谐社会，并预祝大会圆满成功。

中国科协学会学术部宋军部长、中国科学院自动化研究所王东琳所长、中国电工技术学会韩毅秘书长也分别为大会致辞。

大会听取并审议通过了孙优贤理事长关于第

九届理事会的工作报告。他表示第九届理事会始终把握科学发展方向，面向学科前沿和国家重大需要；大力开展学术交流，推动自动化学科稳步发展；紧抓学术期刊建设，不断提高期刊

质量；加强国际交流与合作，不断扩大中国自动化地国际影响；搞好自动化普及和教育work，培养举荐优秀自动化人才；产学研结合，推进科技成果转化，助力民族企业振兴；加强学会自身建设，加强党建工作，发挥党员先锋模范作用和党支部的战斗堡垒作用，做好会员服务，增强学会凝聚力；总结问题，展望未来，开创学会工作的新局面。

随后大会还通过了王天然副理事长做的《中国自动化学会章程修改报告》、席裕庚副理事长做的《中国自动化学会会员条例修改说明》、周康副理事长做的《第九届理事会财务工作报告》。

与会代表选举产生了中国自动化学会第十届理事会理事，共计199名；聘请戴汝为院士、孙优贤院士等16人为第十届理事会特聘顾问。

下午的第十届理事会第一次会议中，中国工程院院士郑南宁当选第十届理事会理事长，中科院自动化研究所研究员王飞跃等10人当选副理事长，王飞跃兼任秘书长，同时通过了《中国自动化学会理事工作条例》，并选举产生常务理事66人。

会议期间还颁发了杨嘉墀科技奖、中国自动化学会科学技术奖、优秀学会工作者和优秀集体

奖等奖项，并为获奖人员颁发证书。

新一届理事长郑南宁院士发表了重要讲话。首先感谢各位代表对自己的信任和支持，感谢中国科协、中科院自动化研究所对本次大会的支持。同时，他深感自己使命光荣，责任重大，坚信通过和大家一起努力，有信心将学会建设好、发展好、继往开来、再创辉煌！最后，会议通过授予吴宏鑫、王天然等30人为第十届理事会荣誉理事的提案，由新一届正、副理事长为其颁发荣誉证书！

接下来召开了第十届常务理事会第一次会议。会议由新任理事长郑南宁院士主持。

秘书长王飞跃研究员对副理事长各自所分管的事务工作分别进行了详细介绍，并对现任10位

副理事长工作进行了具体分工。会议一致通过理事会副秘书长人选提名和理事会分支机构负责人人选提名。

会议通过自由发言的形式，就学会工作的方方面面展开了激烈的讨论，各位常务理事发言踊跃，气氛热烈。以发展较好的兄弟学会为楷模，找差距，寻出路，对于存在的问题，大家毫不讳言、各抒己见。对于未来发展，积极谏言、献计献策。郑南宁理事长和王飞跃秘书长就各位常务理事提出的意见和建议给予逐一交流和回应，学会领导坚信在党的十八大三中全会的指导下，新一届理事会一定不负众望，在大家的共同努力下将学会越办越好，使学会更上一个新的台阶，为中国自动化事业的发展做出更大的贡献！

## 2013中国自动化大会暨自动化领域协同创新大会开幕式在湖南长沙隆重召开

2013中国自动化大会暨自动化领域协同创新大会于11月7-8日在湖南长沙圣爵菲斯大酒店隆重召开。

本届大会由中国自动化学会主办，国防科学技术大学、中南大学、湖南大学和湖南省自动化学会共同承办。大会的主题为：“贯彻落实十八大精神，以科学发展观为指导，发挥协同创新优势，提升中国的自动化、信息化与智能化科技水平，迎接新的工业革命的挑战。”开幕式由国防科学技术大学沈林成院长主持，国防科技大学副校长庄钊文教授、中南大学校长张尧学院士、湖南大学副校长曹一家教授和中国自动化学会副理事长、程序委员会主席郑南宁院士分别致开幕词。最后，中国自动化学会理



事长、大会主席孙优贤院士宣布大会开幕。

大会为7号和8号两天，安排了9个精彩的大会报告，以及9个专题报告会和2个论坛。参加本次大会的有两院院士8人、IEEE、IFAC Fellow 12人、千人计划

学者12人、973首席科学家13人、长江学者特聘教授29人、国家杰出青年基金获得者51人、国家优秀青年基金获得者6人，以及自动化领域的专家、学者、研究生近1400余人。会议大会报告、主题报告内容丰富，涉及领域宽广，充分展示我国在自动化领域自主创新方面取得的辉煌成就，总结交流近年来自动化领域的最新研究进展，围绕自动化领域创新目标，探讨科技协同创新模式，是一次盛大的自动化领域“产学研”互动交流会。



## 节能应用主题论文摘得ABB杯全国 自动化系统工程师论文大赛一等奖

关注自动化领域人才培养，以创新推动产业升级

北京，2013年11月26日--全球领先的电力和自动化技术集团ABB宣布，由ABB独家冠名赞助、中国自动化学会主办的第六届全国自动化系统工程师论文大赛近日在湖南长沙举办的中国自动化大会上揭晓榜单，最终有21组选手的作品从549篇论文中脱颖而出，分别斩获一二三等奖。由安徽省电力公司的王正风以及南京师范大学李天然、朱刚刚等人合作撰写的《节能优化调度系统设计与应用》荣获一等奖。

ABB离散自动化与运动控制业务部北亚及中国区负责人顾纯元在颁奖典礼上表示：“当前，自动化技术和解决方案已成为提高能源和生产效率、助力国家产业升级的重要推动力之一。而优秀的本地人才，将推动自动化技术进步以便把更多创新成果转化为现实生产力。作为全球自动化领域的领导企业，ABB将一如既往地支持国内自动化技术创新和人才培养，以领先的自动化技术与产品助力各行业客户实现‘智能技术智慧跨越’。”

“自动化系统工程师论文大赛”由中国自动化学会于2005年创办，征文对象主要包括企事业单位从事自动化系统及相关专业工作的科技、设计、管理、施工、运行、维护及培训人员；高等院校或科研院所从事自动化、信息化专业教学或科研工作的教师或工程技术人员等。

八年来，大赛吸引了越来越多自动化领域的技术精英积极参与，论文质量也在逐年提高。迄今为止，ABB已经连续六年独家赞助论文大赛，



六届大赛共有参赛者5,436人，收到有效论文2,579篇，评选出获奖论文181篇，公开出版发行6本论文集，收进高质量优秀论文近500篇。

ABB杯论文大赛作为自动化领域内一个重要的交流展示平台，不仅提升了公众对自动化的关注，发掘和培养了大批优秀的本地人才，同时对国内行业前沿技术交流与经验成果分享产生重要推动作用，带动了创新意识的发展。

中国自动化大会是目前中国自动化领域规模最大并且参与人数最多的年度盛会，是自动化领域内各高校、企业、研究所及用户开展学术交流的重要平台。本届大会以“自动化创新与产业升级”为主题，共吸引了超过1,000名专家教授、工程技术人员、知名高校和业界的学术爱好者出席。

ABB是位居全球500强之列的电力和自动化技术领域的领导企业。ABB致力于帮助电力、公共事业和工业客户提高业绩，同时降低对环境的影响。ABB集团业务遍布全球100多个国家，拥有15万名员工。ABB在中国拥有包括研发、制造、销售和工程服务等全方位的业务活动，拥有约1.9万名员工、36家本地企业和遍布全国90个城市的销售与服务网络。

## 第三届杨嘉墀科技奖评审会议在京召开

2013年10月24日上午,由中国自动化学会和中国宇航学会共同主办的第三届杨嘉墀科技奖评审会议在京召开,出席本次会议的评委是来自自动化领域和航空航天领域的院士、资深教授等共计11人。

评奖进行中,各位评审秉承公平公正原则,

优中选优,宁缺毋滥,确保整个评选工作的政治性、组织性、严肃性和权威性。经过全体评委的认真选评、审核,无记名投票产生一等奖两人,二等奖两人。根据《杨嘉墀科技奖评奖办法》,评审结果于10月24日-11月12日在中国自动化学会网站公示。

## 中国自动化学会2012-2013年度 控制科学与工程学科发展研究项目 学术研讨会在京召开

2013年10月24日上午,中国自动化学会2012-2013年度控制科学与工程学科发展研究项目学术研讨会在自动化大厦十三层召开。中国科协学会学术部、学科发展研究项目负责人黄珏莅临指导,学会理

事长戴汝为院士、副理事长吴宏鑫院士、常务理事黄琳院士以及各二级学科报告负责专家和撰写人员二十余人出席了本次会议。会议由学会副理事长兼秘书长、项目首席科学家王飞跃研究员主持。

首先,王飞跃研究员汇报了控制科学与工程学科发展研究项目整体进展情况。本次研究项目首次融合定性和定量分析法,采用SciTS (Science of Team Science) 方法,在前期各位二级学科报告负责人反馈的分学科需求表、期刊列表、研究热点、关键词等信息基础上,共明确了数据源并进行有效采集的期刊有92个,学术会议25个。同时,在学科文献中通过对热点、机构、人物等分



析,形成了各二级学科定量分析报告初稿。在此基础上,与各二级学科负责人反复沟通和调整,确定并完成了22个专题报告初稿以及综合报告初稿。随后,各二级

学科报告负责人就各自撰写的报告内容做了简要的介绍和说明。吴宏鑫院士和黄琳院士对本次学科发展报告的撰写提出了宝贵的意见和建议。

最后,中国科协学科发展研究项目负责人黄珏对本研究项目进行总结。她首先对学科发展报告项目现阶段的实施情况以及首次采用的定量和定性分析相结合的方法给予了充分的肯定,同时对学科发展报告撰写等工作提出了具体的要求,最后对所有参与此项目的各位专家的辛勤工作表示由衷的感谢。

本次学科发展研究报告历时两年,将于2014年2月由中国科学技术出版社出版。

# 霍尼韦尔Tariq Samad博士访问 学会并做客“钱学森国际杰出科学 家系列讲座”



10月15日下午，霍尼韦尔公司（Honeywell）自动化控制系统集团首席科学家Tariq Samad博士访问了中国自动化学会并做客第十期“钱学森国际杰出科学家系列讲座”，学会副理事长兼秘书长王飞跃研究员携学会办公室全体工作人员接待了此次来访。

第十期“钱学森国际杰出科学家系列讲座”在中科院自动化所举行，由中国自动化学会主办，复杂系统管理与控制国家重点实验室承办。Tariq Samad博士作了题为“Smart Buildings and Smart Grids: Today's Applications and Tomorrow's Prospects”的报告，复杂系统管理与控制国家重点实验室主任王飞跃研究员主持了报告会。

Tariq Samad博士是霍尼韦尔公司的Corporate Fellow，其广泛的研究兴趣涉及自动化，智能化，及复杂工程系统的自主控制。在其27年的研究生涯中，Samad博士致力于将自动控制技术应用于电力系统、过程控制、楼宇管理、汽车动力、无人机及清洁能源之中。本次讲座主要对智能楼宇与智能电网的当前发展与未来应用前景进行了介



绍。首先，Samad博士对智能电网和传统电力系统之间的区别进行了概括，用户作用的不断扩大，使得房屋、楼宇和工业设施正逐步成为智能电网系统的重要组成部分。接着，介绍了用户如何与智能电网进行整合和交互，并对智能楼宇和智能电网当前的研究热点问题探讨，重点介绍了自动需求响应，微电网的优化和能源分析；最后，Samad博士对智能楼宇和智能电网相关技术的应用前景进行了前瞻性和长远性的把握。

在互动环节，在场的老师和同学对该领域研究表现出浓厚的兴趣，踊跃发言提问，Samad博士结合个人的研究经历，对所提出的问题进行了细致解答，并对智能楼宇和智能电网的发展方向发表了独到的见解。

Tariq Samad博士是IEEE Fellow、美国自动控制协会候任主席。曾任IEEE控制系统学会主席（2009）、IEEE控制系统杂志的主编（1998-2003），曾获2008年IEEE CSS控制系统技术奖、IEEE CSS杰出会员奖和IEEE第三千禧奖章。





## 四川省自动化与仪器仪表学会举行 2013年学术交流会暨七届八次理事会

2013年12月6日,四川省自动化与仪器仪表学会在中国工程物理研究院举行了2013年学术交流会暨七届八次理事会,学会理事共计60余人参会。会议共分三个时段进行,分别由学会理事长汪道辉、副理事长李红、黄建主持。

2013年学术交流会是本会一次内部学术交流研讨会。会议由中国工程物理研究院电子工程研究所总师、学会副理事长李红主持。会议分为学术报告、研讨交流和学习参观三个阶段进行。分别由中国空气动力研究与发展中心高级工程师、学会副理事长黄健作《风洞试验与仪器仪表》报告、西南科技大学张华教授代其校副校长、庾先国教授作《特殊环境机器人技术及其应用研究》报告。两场报告学术水平高、内容充实,图文并茂的展示了自动化与仪器仪表在风洞、机器人技术中的应用。报告结束后,与会理事和报告专家围绕报告内容展开了热烈的讨论,并参观了中国工程物理研究院科技馆、亚洲第一风洞群。

七届八次理事会是在紧接2013年学术交流会

之后举行的学会年度理事会。会议由四川大学教授、学会理事长汪道辉主持。会议首先由谢正德高级顾问带领与会理事共同学习领会十八届三中全会精神;会议还听取了尚小林副理事长作的本会2013年工作总结报告;讨论审议了由杨靖副理事长提出的2014年工作计划要点;唐仕正秘书长提请的新申请入会的会员、理事、理事变更名单及财务报告;着重审议通过了由汪道辉理事长组织讨论的关于本会专家咨询工作委员会、机器人专委会、学生工作委员会组成人选、挂靠单位等事宜;黄健副理事长宣读并通过了学会秘书处推荐的先进集体及先进个人名单,并由汪道辉理事长及与会副理事长向获奖者颁发了荣誉证书及奖品。汪道辉理事长做最后总结发言。

会议认为,2014年是十八届三中全会精神贯彻落实的开局之年,学会将紧紧团结自动化、仪器仪表行业科技工作者,为四川的科技创新发展做出富有自身特色的贡献。

(四川省自动化与仪器仪表学会 供稿)

## “2013山东省自动化学会企业信息 自动化应用专业委员会会议”暨 “智能微电网产业发展协同创新研 讨会”成功举行

“山东省自动化学会企业信息自动化应用专业委员会工作会议”暨“智能微电网发展协同创新研讨会”于2013年11月9日在济南高新区大陆机电股份有限公司成功举行。



会协同创新研讨活动的举行，强调企业信息自动化应用专业委员会要在科技创新的过程中，充分发挥和体现企业创新主体的作用，要紧密围绕经济建设和企业信息自动化技术和产业发展的热点，不断组织和开展高水平的协同创

本次活动由山东省自动化学会和济南高新区管委会、智能微电网管控一体化技术创新联盟以及智能电网输配电产业集群、学会企业信息自动化应用技术专业委员会联合主办；济南大陆机电股份有限公司和济南创新型产业集群办公室承办，其宗旨是为了充分发挥学会平台作用，推动国家“智能微电网产业集群”和智能微电网产业战略发展，沟通我省智能微电网创新型产业集群与国内外高校、科研院所和集群企业之间的信息交流与合作，实现协同创新，形成合力，搭建产、学、研、政府相互支持的服务平台，促进智能微电网关键技术的突破，促进产业的健康发展。

学会秘书长王起功研究员主持了研讨活动，大陆机电荆书典董事长向活动致词；济南高新区管委会崔志强副主任出席会议并讲话；学会副理事长、企业信息自动化应用专业委员会主任郭维河部长代表贾磊理事长讲话，祝贺企业专业委员

新活动。

本次研讨活动邀请了中科院、华北电力大学、山东大学、哈工大、济南大学的专家学者分别做了“智能微电网产业国际研发及应用现状”；“国内研发应用现状及智能微电网产业的发展趋势”；“促进智能微电网关键技术和产业发展协同创新”等报告；我省微电网产业联盟的骨干企业大陆机电、东方电子和集成电子等高新技术企业分别介绍了企业开展微电网关键技术研发和产业发展的状况和发展趋势。与会专家和企业科技工作者展开了热烈深入的交流和研讨，进一步认清和明确了加强产学研合作，对于突破和解决微电网关键技术，推动微电网产业健康发展的重大意义，对进一步合作，协同攻关达成了共识，高新区领导表达了对协同攻关合作将给予充分的支持，研讨活动取得了圆满成功。

（山东省自动化学会 供稿）



## 十八届三中全会闭幕 审议通过《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》

中国共产党第十八届中央委员会第三次全体会议，于2013年11月9日至12日在北京举行。

出席这次全会的有，中央委员204人，候补中央委员169人。

中央纪律检查委员会常务委员会委员和有关方面负责同志列席了会议。党的十八大代表中部分基层同志和专家学者也列席了会议。

全会由中央政治局主持。中央委员会总书记习近平作了重要讲话。

全会听取和讨论了习近平受中央政治局委托作的工作报告，审议通过了《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》。习近平就《决定（讨论稿）》向全会作了说明。

全会充分肯定党的十八大以来中央政治局的工作。一致认为，面对十分复杂的国际形势和艰巨繁重的国内改革发展稳定任务，中央政治局全面贯彻党的十八大和十八届一中、二中全会精神，高举中国特色社会主义伟大旗帜，以邓小平理论、“三个代表”重要思想、科学发展观为指导，团结带领全党全军全国各族人民，坚持稳中求进的工作总基调，着力稳增长、调结构、促改革，沉着应对各种风险挑战，全面推进社会主义经济建设、政治建设、文化建设、社会建设、生态文明建设，全面推进党的建设新的伟大工程，扎实推进党的群众路线教育实践活动，各项工作



取得新进展，推动发展成果更多更公平惠及全体人民，实现了贯彻落实党的十八大精神第一年的良好开局。

全会高度评价党的十一届三中全会召开35年来改革开放的成功实践和伟大成就，研究了全面深化改革若干重大问题，认为改革开放是党在新的时代条件下带领全国各族人民进行的新的伟大革命，是当代中国最鲜明的特色，是决定当代中国命运的关键抉择，是党和人民事业大踏步赶上时代的重要法宝。面对新形势新任务，全面建成小康社会，进而建成富强民主文明和谐的社会主义现代化国家、实现中华民族伟大复兴的中国梦，必须在新的历史起点上全面深化改革。

全会强调，全面深化改革，必须高举中国特色社会主义伟大旗帜，以马克思列宁主义、毛泽东思想、邓小平理论、“三个代表”重要思想、科学发展观为指导，坚定信心，凝聚共识，统筹谋划，协同推进，坚持社会主义市场经济改革方向，以促进社会公平正义、增进人民福祉为出发点和落脚点，进一步解放思想、解放和发展社会生产力、解放和增强社会活力，坚决破除各方面体制机制弊端，努力开拓中国特色社会主义事业更加广阔的前景。

全会指出，全面深化改革的总目标是完善和发展中国特色社会主义制度，推进国家治理体系

和治理能力现代化。必须更加注重改革的系统性、整体性、协同性，加快发展社会主义市场经济、民主政治、先进文化、和谐社会、生态文明，让一切劳动、知识、技术、管理、资本的活力竞相迸发，让一切创造社会财富的源泉充分涌流，让发展成果更多更公平惠及全体人民。

全会指出，要紧紧围绕使市场在资源配置中起决定性作用深化经济体制改革，坚持和完善基本经济制度，加快完善现代市场体系、宏观调控体系、开放型经济体系，加快转变经济发展方式，加快建设创新型国家，推动经济更有效率、更加公平、更可持续发展；紧紧围绕坚持党的领导、人民当家作主、依法治国有机统一深化政治体制改革，加快推进社会主义民主政治制度化、规范化、程序化，建设社会主义法治国家，发展更加广泛、更加充分、更加健全的人民民主；紧紧围绕建设社会主义核心价值体系、社会主义文化强国深化文化体制改革，加快完善文化管理体制和文化生产经营机制，建立健全现代公共文化服务体系、现代文化市场体系，推动社会主义文化大发展大繁荣；紧紧围绕更好保障和改善民生、促进社会公平正义深化社会体制改革，改革收入分配制度，促进共同富裕，推进社会领域制度创新，推进基本公共服务均等化，加快形成科学有效的社会治理体制，确保社会既充满活力又和谐有序；紧紧围绕建设美丽中国深化生态文明体制改革，加快建立生态文明制度，健全国土空间开发、资源节约利用、生态环境保护的体制机制，推动形成人与自然和谐发展现代化建设新格局；紧紧围绕提高科学执政、民主执政、依法执政水平深化党的建设制度改革，加强民主集中制建设，完善党的领导体制和执政方式，保持党的先进性和纯洁性，为改革开放和社会主义现代化建设提供坚强政治保证。

全会指出，全面深化改革，必须立足于我国

长期处于社会主义初级阶段这个最大实际，坚持发展仍是解决我国所有问题的关键这个重大战略判断，以经济建设为中心，发挥经济体制改革牵引作用，推动生产关系同生产力、上层建筑同经济基础相适应，推动经济社会持续健康发展。

全会指出，经济体制改革是全面深化改革的重点，核心问题是处理好政府和市场的关系，使市场在资源配置中起决定性作用和更好发挥政府作用。

全会强调，改革开放的成功实践为全面深化改革提供了重要经验，必须长期坚持。最重要的是，坚持党的领导，贯彻党的基本路线，不走封闭僵化的老路，不走改旗易帜的邪路，坚定走中国特色社会主义道路，始终确保改革正确方向；坚持解放思想、实事求是、与时俱进、求真务实，一切从实际出发，总结国内成功做法，借鉴国外有益经验，勇于推进理论和实践创新；坚持以人为本，尊重人民主体地位，发挥群众首创精神，紧紧依靠人民推动改革，促进人的全面发展；坚持正确处理改革发展稳定关系，胆子要大、步子要稳，加强顶层设计和摸着石头过河相结合，整体推进和重点突破相促进，提高改革决策科学性，广泛凝聚共识，形成改革合力。

全会要求，到2020年，在重要领域和关键环节改革上取得决定性成果，形成系统完备、科学规范、运行有效的制度体系，使各方面制度更加成熟更加定型。

全会对全面深化改革作出系统部署，强调坚持和完善基本经济制度，加快完善现代市场体系，加快转变政府职能，深化财税体制改革，健全城乡发展一体化体制机制，构建开放型经济新体制，加强社会主义民主政治制度建设，推进法治中国建设，强化权力运行制约和监督体系，推进文化体制机制创新，推进社会事业改革创新，创新社会治理体制，加快生态文明制度建设，深

化国防和军队改革,加强和改善党对全面深化改革的领导。

全会提出,公有制为主体、多种所有制经济共同发展的基本经济制度,是中国特色社会主义制度的重要支柱,也是社会主义市场经济体制的根基。公有制经济和非公有制经济都是社会主义市场经济的重要组成部分,都是我国经济社会发展的重要基础。必须毫不动摇巩固和发展公有制经济,坚持公有制主体地位,发挥国有经济主导作用,不断增强国有经济活力、控制力、影响力。必须毫不动摇鼓励、支持、引导非公有制经济发展,激发非公有制经济活力和创造力。要完善产权保护制度,积极发展混合所有制经济,推动国有企业完善现代企业制度,支持非公有制经济健康发展。

全会提出,建设统一开放、竞争有序的市场体系,是使市场在资源配置中起决定性作用的基础。必须加快形成企业自主经营、公平竞争,消费者自由选择、自主消费,商品和要素自由流动、平等交换的现代市场体系,着力清除市场壁垒,提高资源配置效率和公平性。要建立公平开放透明的市场规则,完善主要由市场决定价格的机制,建立城乡统一的建设用地市场,完善金融市场体系,深化科技体制改革。

全会提出,科学的宏观调控,有效的政府治理,是发挥社会主义市场经济体制优势的内在要求。必须切实转变政府职能,深化行政体制改革,创新行政管理方式,增强政府公信力和执行力,建设法治政府和服务型政府。要健全宏观调控体系,全面正确履行政府职能,优化政府组织结构,提高科学管理水平。

全会提出,财政是国家治理的基础和重要支柱,科学的财税体制是优化资源配置、维护市场统一、促进社会公平、实现国家长治久安的制度保障。必须完善立法、明确事权、改革税制、稳

定税负、透明预算、提高效率,建立现代财政制度,发挥中央和地方两个积极性。要改进预算管理制度,完善税收制度,建立事权和支出责任相适应的制度。

全会提出,城乡二元结构是制约城乡发展一体化的主要障碍。必须健全体制机制,形成以工促农、以城带乡、工农互惠、城乡一体的新型工农城乡关系,让广大农民平等参与现代化进程、共同分享现代化成果。要加快构建新型农业经营体系,赋予农民更多财产权利,推进城乡要素平等交换和公共资源均衡配置,完善城镇化健康发展体制机制。

全会提出,适应经济全球化新形势,必须推动对内对外开放相互促进、引进来和走出去更好结合,促进国际国内要素有序自由流动、资源高效配置、市场深度融合,加快培育参与和引领国际经济合作竞争新优势,以开放促改革。要放宽投资准入,加快自由贸易区建设,扩大内陆沿边开放。

全会提出,发展社会主义民主政治,必须以保证人民当家作主为根本,坚持和完善人民代表大会制度、中国共产党领导的多党合作和政治协商制度、民族区域自治制度以及基层群众自治制度,更加注重健全民主制度、丰富民主形式,充分发挥我国社会主义政治制度优越性。要推动人民代表大会制度与时俱进,推进协商民主广泛多层制度化发展,发展基层民主。

全会提出,建设法治中国,必须深化司法体制改革,加快建设公正高效权威的社会主义司法制度,维护人民权益。要维护宪法法律权威,深化行政执法体制改革,确保依法独立公正行使审判权检察权,健全司法权力运行机制,完善人权司法保障制度。

全会提出,坚持用制度管权管事管人,让人民监督权力,让权力在阳光下运行,是把权力关



进制度笼子的根本之策。必须构建决策科学、执行坚决、监督有力的权力运行体系，健全惩治和预防腐败体系，建设廉洁政治，努力实现干部清正、政府清廉、政治清明。要形成科学有效的权力制约和协调机制，加强反腐败体制机制创新和制度保障，健全改进作风常态化制度。

全会提出，建设社会主义文化强国，增强国家文化软实力，必须坚持社会主义先进文化前进方向，坚持中国特色社会主义文化发展道路，坚持以人民为中心的工作导向，进一步深化文化体制改革。要完善文化管理体制，建立健全现代文化市场体系，构建现代公共文化服务体系，提高文化开放水平。

全会提出，实现发展成果更多更公平惠及全体人民，必须加快社会事业改革，解决好人民最关心最直接最现实的利益问题，更好满足人民需求。要深化教育领域综合改革，健全促进就业创业体制机制，形成合理有序的收入分配格局，建立更加公平可持续的社会保障制度，深化医药卫生体制改革。

全会提出，创新社会治理，必须着眼于维护最广大人民根本利益，最大限度增加和谐因素，增强社会发展活力，提高社会治理水平，维护国家安全，确保人民安居乐业、社会安定有序。要改进社会治理方式，激发社会组织活力，创新有效预防和化解社会矛盾体制，健全公共安全体系。设立国家安全委员会，完善国家安全体制和国家安全战略，确保国家安全。

全会提出，建设生态文明，必须建立系统完整的生态文明制度体系，用制度保护生态环境。要健全自然资源资产产权制度和用途管制制度，划定生态保护红线，实行资源有偿使用制度和生态补偿制度，改革生态环境保护管理体制。

全会提出，紧紧围绕建设一支听党指挥、能

打胜仗、作风优良的人民军队这一党在新形势下的强军目标，着力解决制约国防和军队建设发展的突出矛盾和问题，创新发展军事理论，加强军事战略指导，完善新时期军事战略方针，构建中国特色现代军事力量体系。要深化军队体制编制调整改革，推进军队政策制度调整改革，推动军民融合深度发展。

全会强调，全面深化改革必须加强和改善党的领导，充分发挥党总揽全局、协调各方的领导核心作用，提高党的领导水平和执政能力，确保改革取得成功。中央成立全面深化改革领导小组，负责改革总体设计、统筹协调、整体推进、督促落实。各级党委要切实履行对改革的领导责任。要深化干部人事制度改革，建立集聚人才体制机制，充分发挥人民群众积极性、主动性、创造性，鼓励地方、基层和群众大胆探索，及时总结经验。

全会分析了当前形势和任务，强调全党同志要把思想和行动统一到中央关于全面深化改革重大决策部署上来，增强进取意识、机遇意识、责任意识，牢牢把握方向，大胆实践探索，注重统筹协调，凝聚改革共识，落实领导责任，坚定不移实现中央改革决策部署。要按照中央决策部署，坚持稳中求进、稳中有为，切实做好各项工作，保持经济社会发展势头，关心群众特别是困难群众生活，促进社会和谐稳定，继续扎实推进党的群众路线教育实践活动，努力实现经济社会发展预期目标。

全会号召，全党同志要紧密团结在以习近平同志为总书记的党中央周围，锐意进取，攻坚克难，谱写改革开放伟大事业历史新篇章，为全面建成小康社会、不断夺取中国特色社会主义新胜利、实现中华民族伟大复兴的中国梦而奋斗！

（新华网）

# 中国自动化学会会员申请表

填表时间 \_\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日

姓 名		性别		出生年月		(照片)
专 业		职称		职务		
工作单位				联系电话		
身份证号				电子邮件		
通信地址				邮编		
工作简历 及主要业绩						
选择参加 专委会名称						
选择赠阅的 刊物	刊物名称: <input type="checkbox"/> 《自动化学报》 <input type="checkbox"/> 《电气传动》 <input type="checkbox"/> 《自动化博览》					
推荐意见	介绍人签名 (或推荐单位盖章): _____ 年   月   日					
学会审查 意见	(盖章) _____ 年   月   日					

注: (1) 请附本人《专业技术职务资格证书》复印件。

(2) 邮寄地址: 北京市海淀区中关村东路 95 号中国自动化学会办公室 (100190)

Tel: 010-62544415

Fax: 010-62522248

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

## 入会条件:

- (1) **会士:** 在自动化科学领域中成绩卓著, 学术上有较深造诣, 在自动化科研、生产、教育和管理方面有重大贡献的科技人员。
- (2) **高级会员:** 具有两年以上会龄; 获得相当于副教授以上的专业职称, 或具有自动化领域博士学位; 或在与自动化及相关领域从业 5 年以上, 并有显著成就的科技人员。
- (3) **普通会员:** 已获得工程师、自动化系统工程师 (ASE)、讲师、助理研究员以上职称, 或具有相当于上述水平的自动化领域的科技人员, 以及从事本学科范围内工作并热心倡导本学会工作的有关管理者。
- (4) **预备会员:** 大学本科毕业后在科研、教学、生产单位从事自动化领域工作的助理工程师、助教等相当于上述水平的科技人员, 以及在读研究生、大学本科三年级以上成绩优良的学生; (预备会员只缴纳一次性注册费, 不缴纳会费; 预备会员无选举权和被选举权; 预备会员达到普通会员学术水平者, 经本人申请并经批准后可成为普通会员。)
- (5) 请登录中国自动化学会网站[www.caa.org.cn](http://www.caa.org.cn)了解详细情况。





## The 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems

The IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems is the annual flagship conference of the IEEE Intelligent Transportation Systems Society. IEEE ITSC 2014 welcomes articles in the field of Intelligent Transportation Systems, conveying new developments in theory, analytical and numerical simulation and modeling, experimentation, advanced deployment and case studies, results of laboratory or field operational tests. IEEE ITSC 2014 is organized by the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences (CASIA). It will be held in Qingdao, a beautiful coastal city, home to Tsingtao beer, Mount Lao - one of the "cradles of Taoism", and numerous scenery & cultural attractions.

### General Chairs

Nanning Zheng  
Fei-Yue Wang

### Program Chairs

Daniel Zeng  
Christoph Stiller  
Azim Eskandarian

### Program Co-Chairs

Brendan Morris (North America)  
Javier Sanchez-Medina (Europe)  
Kyongsu Yi (Asia)  
Yibing Wang (Asia)

### Local Chair

Xinzhu Zhang

### Topics

The technical areas include but are not limited to the following:

- Artificial Transportation Systems
- Advanced Public Transportation Management
- Ports, Waterways, Inland navigation, and Vessel Traffic Management
- Modeling, Simulation, and Control of Pedestrians and Cyclists
- Air, Road, and Rail Traffic Management
- ITS User Services
- Emergency Management
- Transportation Networks
- Emissions, Noise, Environment
- Management of Exceptional Events: Incidents, Evacuation, Emergency Management
- Security Systems
- Safety Systems
- Commercial Vehicle Operations
- Intelligent logistics
- Sensing and Intervening, Detectors and Actuators
- Data Management Systems
- Communication in ITS
- Cooperative Techniques and Systems
- Intelligent Vehicles
- Vision, and Environment Perception
- Electric Vehicle Transportation Systems
- Electronic Payment Systems
- Intelligent Techniques in ITS
- Traffic Theory for ITS
- Modeling, Control and Simulation
- Human Factors, Travel Behavior
- ITS Field Tests and Implementation
- Driver and Traveler Support Systems



### Paper Submission

Complete manuscripts in the PDF format must be electronically submitted for peer-review, following the standard IEEE conference proceedings format. Detailed submission instructions can be found on the conference website. **DUE DATE: June 8, 2014.**

### Special Sessions, Tutorials, and Workshops

Proposals for special sessions, tutorials, and workshops should be submitted via the conference submission website. **DUE DATE: May 12, 2014.**

### Best Paper Award and Best Student Paper Award

A "Best Paper Award" and a "Best Student Paper Award" will be conferred to the author(s) of a full paper presented at the conference, selected by the Awards Committee.

### Journal and Magazine Publication of Selected Papers

Selected papers of exceptional quality will be invited for submission to a special issue of the IEEE Transactions on ITS or the IEEE ITS Magazine. Authors will be asked to revise their papers according to the standards of the Transactions or the Magazine. These papers will be subject to the Transactions' and Magazine's own peer-review process.

### Important Dates

Please visit the conference website at <http://www.itsc2014.org/> for details.

IEEE ITSC 2014 will be held in conjunction with the 2014 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI).



## APCOSEC 2014

### The Asia-Pacific Council on Systems Engineering Conference 2014

October 7-9, 2014, Qingdao, China

The organizing committee of APCOSEC 2014 is pleased to announce that the Asia-Pacific Council on Systems Engineering Conference (APCOSEC 2014) will be held in October 7-9, 2014 in Qingdao, Shandong Province in China. This is one of the events sponsored by the Sector III of The International Council on Systems Engineering (INCOSE, [www.incose.org](http://www.incose.org)) and the INCOSE Beijing Chapter. The researchers/engineers are encouraged to participate and take advantage of this opportunity to exchange ideas, information and opinions, share their R&D findings and experiences in relative areas. APCOSEC 2014 is organized by the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems (SKL-MCCS) at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences (CASIA).

#### General Chairs:

Fei-Yue Wang, China

Tat Soon Yeo, Singapore

#### Important Dates:

##### Submission of Full Papers:

..... Jun. 08, 2014

##### Notification of Comments:

..... Jul. 25, 2014

##### Submission of Final Papers:

..... Aug. 11, 2014

#### Topics

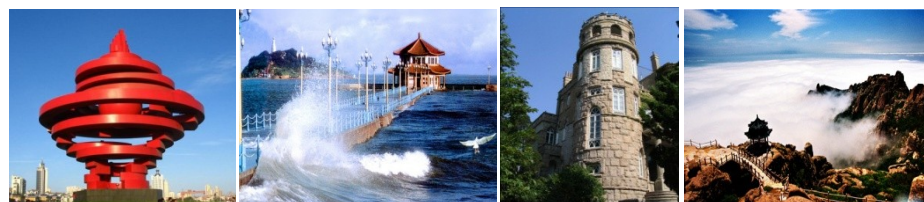
The technical areas include but are not limited to the following:

- Safety and Risk Management
- Acquisition and Lifecycle Management
- Systems Engineering Education/Research
- Human Factors/Systems Interfacing Issues
- Systems Engineering Management
- New Product Design and Development
- Model Based Systems Engineering
- Architecting and Integrating
- Applications of Systems Engineering
- Design for Environment and End-of-Use Deposition
- Innovative Use of ICT Technology
- System of Systems
- Defense Systems
- Railroad Systems
- Aerospace Systems
- Nuclear Power Systems
- Shipbuilding Systems
- Green Industry Systems
- Medical and Health Systems
- Intelligent Systems
- Transportation and Traffic Systems



#### Paper Submission

Papers can be written in Chinese, English, Korean, Japanese or Indian but must be presented in English, the official language of the 2014 conference. Authors are recommended to submit the abstract of 300 words in English. Complete manuscripts in PDF format must be electronically submitted for peer-review. Detailed submission instructions can be found through conference website. For most updated information, please visit the conference website at <http://www.apcosec2014.org>.



APCOSEC 2014 will be held together with the 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (IEEE ITSC 2014).





# 欢迎加入

# 中国自动化学会

## Chinese Association of Automation

这里可以 **获取技术信息** **结识业内专家**  
**获得同行认可** **施展个人才华**

### 作为个人会员，你可以

- 优惠或免费获得学会提供的技术咨询和资料（以电子邮件方式为主）
- 优惠或免费参加学会或其所属专业委员会举办的学术活动
- 优惠或免费订阅学会通讯及与学会签约的学术期刊
- 优惠参加学会提供的继续工程教育培训
- 通过学会申请各类奖项和荣誉资格
- 其它可能由学会提供的服务

### 作为团体会员，你可以

- 派出代表参加全国会员代表大会
- 优惠参加学会组织的有关学术论坛、科技展览等活动
- 优惠或免费获得学会提供的有关资料、学术期刊和服务
- 优惠取得学会的技术咨询、新产品鉴定、工程项目验收等服务
- 优惠获得学会为单位员工进修而举办的新产品、新技术培训活动
- 其它可能由学会提供的服务

### 中国自动化学会办公室

地址：北京市海淀区中关村东路 95 号自动化大厦 509 室

邮编：100190

传真：010-62522248

电话：010-82544542

<http://www.caa.org.cn> E-mail: [caa@ia.ac.cn](mailto:caa@ia.ac.cn)