

过程控制研究的一些进展

袁德成^{1,2}, 于海斌¹, 樊立萍^{1,2}

(1. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 沈阳化工学院 自动化系, 辽宁 沈阳 110142)

摘要: 随着新材料、新工艺的不断涌现, 对反馈控制系统性能的要求更加严格和精确, 在过程控制领域出现了许多新的挑战性问题。首先综述了非线性分布参数过程(例如材料微结构、颗粒分布、流体流动)的控制、生物系统与生物医学过程的分析与控制、城市污水处理集成监控系统等的最新研究进展以及一些未来的研究方向。其次讨论了解决复杂控制问题所需的一些方法和集成工具, 主要包括过程系统工程理论和方法、集成物理装置与通讯网络的控制系统组成等。最后指出了目前控制应用相对薄弱的领域是控制理论与工程界关注的重点。

关键词: 过程控制; 系统工程; 复杂系统; 化学工业; 分布参数系统; 生物医学控制

中图分类号: TP29

文献标识码: A

Review on research progress in process control

YUAN De-cheng^{1,2}, YU Hai-bin¹, FAN Li-ping^{1,2}

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China;

2. Automation Department, Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang Liaoning 110142, China)

Abstract: The performance of feedback control systems is needed to be more strict and more accurate, and there will be new challenges to the continuously emerging new materials and new processes in process control fields. A review is presented to summarize recent research developments on control of nonlinear distributed parameter processes (e.g., material microstructure, particle-sized distributions, and fluid flow), analysis and control of biological systems and biomedicine processes, integrated urban wastewater treatment monitoring systems, and some future research directions. The methodology and integrated tools needed to solve such complicated control problems are discussed, including theory and practice of the process system engineering, the control systems integrated physics devices with communication network. Finally, it is pointed out that attention should be paid to some fields where control applications are weaker at present by control researchers.

Key words: process control; systems engineering; complex systems; chemical industry; distributed-parameter systems; biomedical control

1 引言(Introduction)

过程控制走过 20 多年的辉煌, 现在又到一个新的转折点^[1]. 过程控制界在思考这样一些问题: ① PID 算法、模型预测控制算法(MPC)这两类在过程控制领域最具代表性的成果, 为什么会取得如此广泛而持久的应用? ② 在这两种算法已被成功应用的生产装置上是否还有对新算法研发的潜在需求? ③ 过程控制未来走向何处?

第 1 个问题的答案比较明确, 过程工业期望应用电子技术、计算机技术提高生产效率、减少环境污染、改善产品质量和保证过程安全. 这种市场的驱动力不仅成就了许多新兴的仪表和控制软件公司, 也为学术界提供了众多的研究课题. 另外也注意到: 文

献中发表的许多算法在理论分析上可能比 PID 和 MPC 优越, 但让工业界接受的可能性却很小. 最好的一个实例是自适应控制, 它的设计思想和方法都接近完美, 但纵观过程工业, 它的成功试验或长期稳定地投用却很少. 为什么会这样? 原因可能是许多新算法源自理论上的深入探索, 而并非实际工业生产的迫切需要.

对于第 2 个问题, 在学术界有不同的认识. 但从工业现场调查的结果看, 答案相当明确. 如果新算法在实施、维护、培训等方面需要大的投入, 或投资回报不明显或不明确, 则企业基本上不会考虑接纳. 只有当用目前的工具不能解决工业实际存在的控制问题时, 新算法才会有被采纳的机会. 有了新算法再去

开拓市场的做法,在过程控制界已经被证明效果不明朗。

对于第3个问题,近几年已经有一些新的发展态势显现.这种趋势一方面通过在新一代过程控制专家的成长中表现出来,因为他们对更为复杂或新兴系统的控制问题才有兴趣.另一方面,在高新技术领域出现的新材料和新工艺向过程控制界提出了许多新的、用现有手段不能实现有效控制的被控对象,其复杂动态特性的描述、控制系统设计和系统实时监视等任务都需要建立系统的解决方案。

文中综述了当前过程控制研究的一些最新进展。

2 过程控制面临的挑战问题 (Some challenging research problems in process control field)

2.1 非线性分布参数过程的控制^[2] (Control of nonlinear distributed parameter processes)

半导体制造技术、纳米技术、生物技术、无人航空器技术等不仅发展迅速、需求量大,而且这些高新技术领域也派生出许多复杂的非线性分布参数系统的分析和控制设计任务.状态变量、传感器和执行器在空间的高度分布特征,使得用经典的集总参数线性系统理论不能有效解决这类对象的测控问题.例如:1) 单晶圆速热化工蒸汽沉积过程(RTCVD).要避免工序转换时浓度掺杂不当,需要靠辐射热从室温到1200 K的急速升温并保持这个温度在短时内(小于1 min)进行化学沉积反应.加工工艺在缩短加工时间和降低扩散长度的同时,也可能导致单晶圆温度分布的不均匀,从而影响工业上对膜沉积均匀性的严格要求.显然,单晶圆生产中的温度空间分布控制需要考虑非线性、空间分布差异、批过程等因素,其精确控制必然要借助于过程的非线性分布参数模型.2) 颗粒尺寸分布控制.最典型的一个例子是金属钛气溶胶反应器的控制^[3].要使每个单位质量的金属钛色素获得最大的藏粉能力,控制反应器达到颗粒单一疏散、均匀分布状态是必需的措施.金属钛气溶胶生产是在气相中进行化学反应、晶核形成和生长,以及颗粒生长、冷却、凝结、结合、传递等多道工序,本质上是一个非常复杂的高度非线性过程.当用最新的激光散射技术可以在线测量气溶胶尺寸分布时,构造基于颗粒尺寸分布模型的非线性反馈控制算法成为可能.这不仅仅需要新的控制理论,也需要多学科综合。

非线性分布参数模型需用偏微分方程(PDE)描述,例如对于传递-反应过程用双曲型和抛物线型

PDE方程;流体流动用Navier-Stokes方程;颗粒分布用积分-微分方程等.引入空间分布特征后,这些方程虽然能在时间和空间上准确预估过程的动力学性质,但控制系统的分析和设计演变成了无限维问题.用传统的有限差分 and 有限元方法可以把PDE近似为常微分方程,但化简后过多的方程个数限制了它们作为控制器设计所依赖模型的应用.近10多年来,在PDE中关于主导低维动态行为的发现^[4],使得基于严格数学模型的降阶方法,像Galerkin方法以及非线性Galerki方法等不仅能描述许多非线性无限维动态过程,也可以分析和求解此类问题的运动特征.同时基于微分几何和李雅普诺夫稳定判据的控制器构造策略也为非线性集总参数控制系统提供了完整的设计理论^[4].这两方面研究成果的结合,为非线性分布参数系统的理论与实践开辟了广泛的研究内容,例如:1) 混杂非线性分布过程系统的分析和控制,虽然大多数物理化学现象是时间连续的变量,但相变、逆流反向、电磁阀、数字传感器、经验知识、联锁保护等由工艺本身及测控原因将引入逻辑变量.把连续变量和整数(离散)变量统一在一类状态方程中考虑,形成了所谓混合逻辑的动态(集总参数)系统(MLD)^[5].这种系统在过程工业中有广泛的背景,若再考虑空间分布特征后,使得系统分析和控制设计问题变得更加复杂,目前虽未见研究报道,但可以预见是一个值得关注的发展方向;2) 过程设计和控制系统设计并行.过程设计必须考虑工艺目标的实现是否有可行的控制系统提供支持,一些控制上的难点可能通过简单的工艺修正或设备配置就可解决问题等;3) 基于多尺度模型的材料微结构控制^[6].以化学蒸汽沉积过程为例,除了要控制膜的均匀性以外,若要使膜具有期望的设计性能则需要进一步控制膜的微结构和组成,因为它们决定材料的性质.一般基于连续分布参数模型可以实现沉积过程的空间均匀分布控制要求,膜微结构和组成的控制则必须结合多尺度的分布参数模型^[7],如在1 nm级上的分子动力学模型(计算量子力学)、在10 nm级上的Monte Carlo仿真(计算统计力学)、在100 μm级上的微结构尺度模型、在10 cm的有限元分析模型等.现在的科技水平所能实施的直接调控是作用在宏观模型级上,必须借助精确的模型和仿真工具,才能把这种控制力传递到分子级或功能团级上,进而加工制造出期望的、性质“受控”的材料.由于时空多尺度模型计算复杂以及现有的计算工具缺乏等因素的限制,基于多尺度材料微结构模型的控

制还不能达到实时监控的水平,多尺度模型的简化或降阶正在成为研究热点.在纳米合成和加工过程中也有类似的模型、仿真和控制问题^[8],最新的现代在线粒子尺寸分布测量方法,例如激光吸收散射与探针技术等,为实现基于非线性分布参数模型的预测控制创造了基础^[9,10].

2.2 生物医学过程的分析与控制(Analysis and control of biomedicine processes)

生物医学过程是一个崭新的、自动控制理论应用相对薄弱的研究领域,专家预测有广阔的市场前景^[1].在过去10多年,发明了许多新的生物执行器和传感器,对生物体运动规律的认识也不断加深,在医学治疗过程研究中,传统内置反馈控制系统已经逐渐被外置反馈控制技术所取代.主要研究动态有:

1) 医学治疗过程的自动控制.例如,胰岛素自动给药控制^[1].糖尿病已经严重危害人类的健康,全世界每年投入巨资研发药品和治疗患者.对于胰岛素依赖症者,通常的治疗策略是每天按时注射3~4次胰岛素,然后根据3~8次毛细血管血糖浓度检测值调整给药的剂量和间隔.这样一个过程的自动控制问题,目前的主要技术障碍是找到能够在线自动检测血糖浓度的传感器,以及能进行皮下注射或静脉注射的执行装置.对胰岛素如何降解血糖的机理和动态过程特性,人类已经积累了相当的认识,相关的控制策略研究也已完成计算机模拟和小批量临床实验.另外一个实例是临床麻醉过程的自动控制^[11,12].在外科手术期间,麻醉师是“控制算法”,他要根据病人的肌肉松弛、痛觉和催眠状态,决定施加(静脉注射或外涂挥发麻醉)多少麻醉药物量或通风或肌肉迟缓剂参数等手段,同时要保证病人始终处于生命可恢复的药理状态.在手术过程中,操作不当产生的刺激和失血过多都可能影响病人的麻醉程度,因此实时调整非常必要.如果检测肌肉松弛、痛觉和催眠状态的传感器成熟可用,则可以把外科手术的麻醉过程设置成自动控制状态.适度适时的麻醉程度对减轻麻醉师的劳动强度、降低对患者健康的损伤、减少药品使用和缩短康复期等都有潜在的益处.

2) 基于生物机理模型的疾病分析.例如在动物和人的微循环中,改变血压将影响氧化氮的消耗^[13].在血液循环过程中,氧化氮的扩散和反应可以用一组复杂的非线性分布参数模型描述.利用这个模型以及实验数据,在辨认和量化氧化氮在血液传递中遇到的各种阻力后,分析这种阻力产生或传

递失衡的原因就使相关疾病的诊断成为可能.

3) 生物系统建模技术^[14].以新药研发过程为例,据统计每种新药研发成本约5亿美元,耗时10~15年.在发现可以作为候选药物研发的物质中,只有不到1%的药物能最终进入市场,60%以上在临床试验前期的检验中被剔除,剩下的约80%在临床试验后被淘汰.成本高有许多原因,主要问题是在一个集成的生物体内,如何评价单个生物化学途径(Pathway)调整后的影响,目前还缺乏相关技术支持.现在一方面基因分析^[15]、蛋白质分析、高速扫描摄像,以及组合化学等技术进步,不断产生“海量”数据;另一方面,从这些数据中分析和发现有关疾病的技术则远远落后.把这些数据与生命体的某种生物功能联系在一起,建立生物系统模型可能是最直接又经济的手段.同时这些模型在新药研发过程中的预测和指导能力、构造模型需要的时间和成本以及模型本身的时效性等问题又使科学工作者面临两难选择.

2.3 城市废水处理的集成监控系统(Integrated urban wastewater treatment monitoring systems)

人类对生存环境和健康问题的关注比过去任何年代都更为强烈.这种源自生存危机的驱动力,无疑将激发科技工作者研究相关系统的控制问题,例如,关于集成化城市废水处理监控问题^[16]的研究.污水是人类生产和消费两大行为的副产品,处理它们的工厂就加工量和分布而言是世界上最大的工业.随着各国城市化的步伐加快,生活污水、工业废水和市政污水的处理能力和自动控制水平急需提高.新建了许多污水处理厂,但水生态环境的现状却不容乐观,城市缺水依然是一个世界范围内的公共难题,世界各国不得不对污水排放制定更严格的标准.在系统描述和控制方面^[17~20],污水的生化处理过程涉及物理、化学和生物等多个子过程(反应),机理复杂多样.污水成分依地区、时间、季节、气候、消费习性等不同,表现出激烈的时变特征.在表征微生物代谢进程等方面还缺乏直接有效的在线分析仪表,主要通过测量和分析底料进出过程的成分变化间接反映微生物的变化特征.微生物的生存规律及所依赖的条件还远没有被人类完全认识,多变量耦合、非线性、时变性、不确定性、多尺度、控制能力弱等过程建模和控制中的难点问题均在此集中体现.在欧盟实施 Water Framework Directive^[21] 环保法规后,把污水处理纳入整个城市或地区水资源系统中全面考虑,按地下水、表面水和城区河水体的可接纳能力,借助

城市排污管网的缓存能力以及城市污水处理资源,实施集中监控呈现必然趋势.处理后的污水再生和复用也为这类非利益直接驱动的行业提供了减低成本的机会.这是人类生存和可持续发展的需要,水生态环境系统控制薄弱的现状,为过程控制向这一领域拓展提供了空间.

3 复杂过程控制需要系统的方法和集成的工具(Methodology and integrated tools needed in solving complicated control problems)

3.1 过程系统工程(Process system engineering, PSE)

在全球化激烈竞争的环境里,企业要生存则必须提高生产效率和产品效益.对于日益复杂的流程工业,传统的单元操作之间包含了更多的物料和能量集成.过程控制界面对的问题不仅仅是让一个控制回路、一个单元操作甚至一套装置工作正常,企业的经济目标和环保法规约束,甚至生命周期风险等因素必须在过程设计阶段、运行和操作期间加以仔细规划,而且这样的目标也必须适应动荡的市场变化需求.过程系统工程研究关注的正是这样的问题.它研究关于如何完善化工供应链创造与操作的决策过程,即在许多相互矛盾的目标集中,系统地规划化工产品的发明、设计、制造和销售问题^[22].值得注意的是最新的纳米合成和材料微加工技术,已经把化工供应链从大规模的企业级延伸到分子级,在处理时间和空间分布上都具有多尺度性质.

目前 PSE 主要涉及以下 4 个方面的研究:

1) 过程设计.

过程设计任务可能是设计大型装置和复杂流程,也可能是设计新的分子.要达到生产规模,所设计的分子需要形成化合物或混合物.因此设计者必须基于分子设计(微观),预测和评价对应流体或结构化材料(宏观)的性质.过去 10 多年在能量回收网络、精馏塔系、反应器网络、多产品批处理过程、超级结构优化等方面的研发已经取得成功,但在微观设计方面科技界要面临的挑战问题很多,例如寻找新的超强单元操作、集成多种功能的微系统、低成本、可持续和清洁生产等.可以预期,随着分子设计、单体和生物系统合成、新陈代谢网络设计和分析、片上实验系统(Lab-on-a-Chip)^[23]等研究的兴起,过程设计必将进入一个全新的多学科协同发展阶段.

2) 过程控制.

在 PSE 架构内,过程控制主要研究面向全装置或全过程的控制设计.即控制目标是企业的经济目标,局部控制回路的指标要由企业级的生产经营管

理总目标来统一协调.集成控制回路指标、企业经济目标、环保或风险限制条件等是一个多目标最优设计问题,目前解决此类问题的最好策略可能是基于模型的预测控制.如果能把经济目标通过某种函数或逻辑关系与主要的过程变量关联起来,则在基本的控制回路上增加模型预测控制层,按照企业的经济目标协调局部控制回路的设定值就成为可能,否则就是一个设计-仿真评价-修正的递推求解过程.文献[5]建立的关于混合逻辑动态系统定义、控制和估计问题的解决方案等,把过程控制中的顺序逻辑和连续时间控制两类问题,统一在一个系统模型中,由此构建的基于混合逻辑动态系统的预测控制系统,为经营和生产控制问题的整体解决提供了一条可行的途径.

一些新出现的过程或先进加工方式产生的控制问题也不断向过程控制界提出挑战,例如:①用不稳定、部分氧化的反应器新工艺生产传统的化工产品.按期望的性能指标,设计能正常工作的不稳定控制系统,在现有的控制理论体系内还找不到对应的方法^[24].②在传感器、执行器甚至单元操作装置内集成微电子技术,并通过无线通讯或“蓝牙”技术构成闭环控制系统,已经成为可能^[25],控制理论与工程实践需要建立相关的研究体系.③其它的一些新研究课题可参见文献^[26~30].

3) 过程操作.

与过程设计和控制任务相比,过程操作是 PSE 最新的研究课题.从企业资源规划的层次上看,它上游的任务是支持新产品研发,即产品设计、计划、调度、生产流程设计等;下游提供与后勤与销售相关的保证策略,即实时任务调度、最佳的供应链管理^[31~33]、故障诊断与过程安全评价、库存控制等.

4) 相关的支持工具.

完成上述 3 项任务需要高效的计算工具和供多学科专家使用的友好人机界面.除了高性能的硬件平台外,可用的解题器和建模工具也是必要的.运筹学产生于二次世界大战期间,线性规划、非线性规划、整数规划等都是其经典的研究题目.今天的 PSE 研究又给运筹学增添了许多新的研究内容,例如大规模非线性规划问题的解题器^[34],大规模混合整数变量的线性或非线性的规划问题求解等.另外在规划问题的构成中,约束条件集合也可能包含了微分代数方程(DAE)或由矩阵不等式构成,求解的效率、收敛性、一致性和可行解是否存在都可能是潜在的问题.

3.2 集成物理(装置)与通讯网络的过程控制系统 (Process control systems integrated physics devices with communication network)

当在传感器或执行器上看到现场总线技术和嵌入式 Web 技术时,传统的控制回路(包括受控对象、传感器、调节器、执行器)已经被通讯网络(有线或无线)集成到一个更大的系统中^[35]。这里,控制回路是集成网络中的一个部件,它接受信息网络发来的指令,同时其内部运动亦受物理定律的限制。部件间的复杂关联不仅来自对象本身,也可能源于信息网络。过程控制策略的全面解决方案需要信息技术、网络通讯、分布计算、新工艺技术等协同支持。研究这样一个大系统,需要新的方法和相关的支撑工具:

1) 方法。

按时间和物理尺度把大系统分解为规模相对较小、特征分析又相对明显的子系统集是研究复杂大系统的主要方法之一。这种思想在诸如状态估计与控制器设计分离、软件和硬件研发分离等研究中都取得了成功,但在自适应控制实施中,先从数据估计出模型,然后再调整控制器参数的分离做法却遇到问题:单独未见异常,合在一起时观察到小幅混沌和爆裂现象^[36]。类似问题在鲁棒控制、供应链、全装置的动态特性、通讯链路排队等研究中也已被观察到,究其原因可能是忽略了子系统之间时间尺度不等的问题所致。因此需要建立按时间尺度分解集成网络的系统方法。接下来需要考虑的一个问题是每个子系统(分解后)设计的性能在集成到大系统后表现如何。化工单元操作模型可以根据热力学第一定律和第二定律推导,从含能的角度看可以将其等效为无源网络模型,具有蓄能和耗散两种功能^[37]。一般认为无源模型可以互联,其稳定性和一些性能的分析也不一定要放在整个系统结构内考虑。但把无源性与热力学联系在一起,即用多个单元操作模型装配出一个大的面向全装置的动态模型时,并不一定成功,由此引发了广泛的研究兴趣。文献[37]通过定义“有用功”的概念,把过程视为一个具有偶对结构的 Hamiltonian 系统,形成了能把热力学模型、非线性控制、最优化和大系统理论连接在一起的研究架构。由于化学工程界在单元操作的热力学模型研发方面,积累了大量的研究成果,现在急需这样一种理论体系和方法,把一个个单元操作模型按某种期望的最优生产目标,以“即插即用”、无缝的方式连成一套装置甚至一个工厂。真实的 Internet 资源、真实的分布或并行计算技术与虚拟生产的企业集成,

将大大促进过程工业相关科技的进步。

2) 工具。

解决这类大系统的设计、运行和评价问题,需要并行计算和分布计算技术。问题是并行计算机现在的结构体系和应用软件是专门定制,缺乏个人用户的相关软硬件资源支持。大规模非线性规划问题的求解器也远没有线性规划、整数规划或混合整数规划求解器那样成熟。利用高速 Internet 通讯网络,把个人或团队的分散研究资源共享,实施这样的分布计算也需要相关的软硬件平台支持技术^[38]。另外,在过程决策、设计和最优控制的实施步骤中,虚拟仿真是必不可少的常用手段。分布、开放的仿真软件需要类似 CAPE-OPEN^[39]的协议标准,指导、规范和统一工具软件的研发。

4 结束语(Conclusions)

过程控制是一门综合艺术。随着新材料加工中一些新工艺的出现、丰富和完善,不断推动过程控制向纵深发展。不仅研究对象涉足许多非传统的过程控制领域,研究工具需要能集成建模、仿真、分布或并行计算、网络通讯等技术于一体的平台,研究方法也需要大系统的思想。与人类健康与生存环境相关的问题、纳米材料合成、生物工程技术等自动控制应用相对薄弱的领域代表了过程控制未来的一些发展方向,值得深入探索和建立有效的技术支持体系。

参考文献(References):

- [1] MORARI M, GENTILINI A. Challenges and opportunities in process control: biomedical processes [J]. *AIChE J*, 2001, 47(10): 2140 - 2143.
- [2] CHRISTOFIDES P D. Control of nonlinear distributed process systems: recent developments and challenges [J]. *AIChE J*, 2001, 47(3): 514 - 518.
- [3] KALANI C, CHRISTOFIDES P D. Modeling and control of a titania aerosol reactor [J]. *Aerospace Science & Technology*, 2000, 32(4): 369 - 391.
- [4] CHRISTOFIDES P D. *Nonlinear and Robust Control of PDF Systems: Methods and Applications to Transport-reaction Processes* [M]. Boston: Birkhäuser Publishing Company, 2001.
- [5] BEMPORAD A, MORARI M. Control of systems integrating logic, dynamics and constraints [J]. *Automatica*, 1999, 35(3): 407 - 427.
- [6] RAIMONDEAU S, VLACHOS D G. Low-dimensional approximations of multiscale epitaxial growth models for microstructure control of materials [J]. *J of Computational Physics*, 2000, 160(2): 564 - 574.
- [7] MAROUDAS D. Multiscale modeling of hard materials: challenges and opportunities for chemical engineering [J]. *AIChE J*, 2000, 46(5): 878 - 882.
- [8] SIEGEL R W, HU E, ROCO M C. *Nanostructure Science and Tech-*

- nology [M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [9] PALAZOGLU A, KARAKAS A. Control of nonlinear distributed parameter systems using generalized invariants [J]. *Automatica*, 2000, 36(5): 697 - 703.
- [10] EL-FARRA N H, CHRISTOFIDES P D. Integrating robustness, optimality, and constraints in control of nonlinear processes [J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(5): 1841 - 1868.
- [11] FREI C W. *Fault tolerant control concepts applied to anesthesia* [D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2000.
- [12] GENTILINI A. *Feedback control of hypnosis and analgesia in humans* [D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2001.
- [13] EL-FARRA N H, BAKER J, CHRISTOFIDES P D, et al. Computation of Nitric Oxide consumption in the microcirculation [C] // *AIChE Meeting*. New York: AIChE Customer Service, 2000.
- [14] STOKES C L. Biological systems modeling: powerful discipline for biomedical e-R&D [J]. *AIChE J*, 2000, 46(3): 430 - 433.
- [15] HATZIMANIKATIS V. Bioinformatics and functional genomics: challenged and opportunities [J]. *AIChE J*, 2000, 46(12): 2340 - 2343.
- [16] MEIRLAEN J. *Immision based real-time control of the integration urban wastewater treatment system* [D]. Belgium: Ghent University, 2002.
- [17] NIELSEN M. *Smart Control of Wastewater Systems* [R/OL]. 2001. <http://www.smac.dk/>.
- [18] JEPSSON U, ALEX J, PONS M N. Status and future trends of ICA in wastewater treatment - a European perspective [J]. *Water Science & Technology*, 2002, 45(4): 485 - 494.
- [19] HENZE M, GUJER W, MINO T, et al. *Activated Sludge Model ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3* [R]. London: IWA Publishing, IWA Scientific and Technical Reports, No.9, 2000.
- [20] ALEX J, BETEAU J, COPP J, et al. Benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plant [C] // *Conf of European Union Control Association*. Karlsruhe, Germany: [s. n.], 1999.
- [21] EU Environmental Policy. *Introduction to the new EU Water Framework Directive* [R/OL]. European Union: [s. n.], 2003. <http://europa.eu.int/comm/environment/water/water-framework/overview.html>.
- [22] GROSSMANN I, WESTERBERG A. Research challenges in process systems engineering [J]. *AIChE J*, 2000, 46(9): 1700 - 1703.
- [23] CHOW A W. Lab-on-a-Chip: opportunities for chemical engineering [J]. *AIChE J*, 2002, 48(8): 1590 - 1595.
- [24] SCHMIDT L D, SIDDALL J, BEARDEN M. New ways to make old chemicals [J]. *AIChE J*, 2000, 46(8): 1492 - 1595.
- [25] KUMAR P R, GUPTA P, KAVADIA V, et al. *Wireless networks: analysis, protocols and architecture* [R/OL]. University of Minnesota: [s. n.], 2001 [2005]. <http://www.ima.umn.edu/talks/workshops/>.
- [26] SUNDARESAN S. Modeling the hydrodynamics of multiphase flow reactors: current status and challenges [J]. *AIChE J*, 2000, 46(6): 1102 - 1105.
- [27] OTTINO J, KHAKHAR D. Fundamental research in heaping, mixing and segregation of granular materials: challenges and perspectives [J]. *Powder Technology*, 2001, 121(2-3): 117 - 122.
- [28] WOLFF J, PAPATHANASIOU G, KEVREKIDIS I, et al. Spatiotemporal addressing of surface activity [J]. *Science*, 2001, 294(5): 134 - 137.
- [29] PATIENCE D, RAWLINGS J. Particle shape monitoring and control in crystallization processes [J]. *AIChE J*, 2001, 47(9): 2125 - 2130.
- [30] PHALAKORNKULE C, LEE S, ZHU T, et al. A MILP-based flux alternative generation and NMR experimental design strategy for metabolic engineering [J]. *Metabolic Engineering*, 2001, 3(2): 124 - 137.
- [31] BACKX T, BOSGRA O, MARQUARDT W. Towards intentional dynamics in supply conscious process operations [C] // *Proc of 3rd Int conf On Foundations of Computer Aided Process Operations*, AIChE. New York: AIChE Customer Service, 1998, 5 - 10.
- [32] PEREA-LOPEZ E, GROSSMANN I, YDSTIE B, et al. Dynamic modeling and decentralized control of supply chain [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2001, 40(15): 3369 - 3383.
- [33] PEREA, E, GROSSMANN I, YDSTIE E, et al. Dynamic modeling and classical control theory for supply chain management [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, 24(2-7): 1143 - 1149.
- [34] ALBUQUERQUE J, GOPAL V, STAUS G, et al. Interior point SQP strategies for large scale, structured process optimization problems [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1999, 23(4-5): 543 - 554.
- [35] YDSTIE B. New vistas for process control: integrating physics and communication networks [J]. *AIChE J*, 2002, 48(3): 422 - 426.
- [36] GOLDEN M, YDSTIE B. Drift instabilities and chaos in forecasting and adaptive decision theory [J]. *Physica D*, 1994, 72(4): 309 - 323.
- [37] YDSTIE, B, ALONSO A. Process systems and passivity via the Clausius-Planck inequality [J]. *Systems and Control Letters*, 1997, 30(5): 253 - 264.
- [38] EDGAR T F, DIXON D, REKLAITIS G. *Vision 2020: Computational needs of the chemical industry. Impact of Advances in Computing and Communication Technologies on Chemical and Technology* [R]. National Research Council, Washington: National Academic Press, 1999.
- [39] KERRY I. CAPE-OPEN standards and supporting documents [R/OL]. France: Laboratories Network, 1999 [2005]. <http://www.colan.org/>.

作者简介:

袁德成 (1960—),男,沈阳化工学院教授,1988年毕业于北京理工大学化学工程系,获硕士学位,主要研究方向为计算机辅助过程工程(CAPE)、过程系统工程(PSE)、生化过程建模与最优控制等, E-mail: yuandecheng@163.com;

于海斌 (1964—),男,中国科学院沈阳自动化研究所研究员,博士生导师,1997年毕业于东北大学自动化系,获工学博士学位,主要研究方向为工业通信技术、实时系统理论、分布控制系统技术及网络协同制造、智能生产调度理论与应用,分布自治生产协调优化理论等;

樊立萍 (1965—),女,副教授,研究方向为电力电子与电气传动、城市水资源系统的集成管理。