

过程控制的发展与展望*

金以慧 王诗宓 王桂增

(清华大学自动化系·北京, 100084)

摘要: 本文介绍过程工业的特点, 回顾过程控制的发展过程, 指出过程控制发展的趋势, 强调过程综合自动化这一发展方向, 并讨论过程控制面临的理论和实际问题。

关键词: 过程控制; 综合自动化; 先进控制; 过程优化; 现场总线

1 前言

1.1 什么是过程工业

工业过程大致可分为连续过程工业、离散过程工业和间隙过程工业三大类^[1]。连续过程工业涉及的工业部门十分广泛, 例如石化、电力、冶金、造纸、化工、医药等。1991年以来我国公布的产品销售额排名的前十名中, 约有80%~90%属于连续工业; 按利润排名的前二十名中, 连续工业约占70%。可见连续工业的发展对我国国民经济有着十分重要的意义。随着我国国民经济的迅速发展, 连续工业也以空前的速度增长。但在生产规模、经济效益、品种、质量以及环境保护等方面与发达国家相比差距仍很大^[2], 在国际竞争中面临严峻的形势。因此, 必须采用高新技术改造传统工业, 以提高我国工业的国际竞争能力。

过程控制的任务是解决连续过程工业的控制问题。提高连续工业市场竞争能力的迫切要求, 促使过程控制把目标放到提高产品质量、节省能源、降低成本、提高生产过程的柔性以适应多变市场的需要这个高度上来。计划经济向市场经济转变的战略目标对过程控制提出了新要求。在过程控制领域中, 有许多理论问题、关键技术需要去研究和突破。

1.2 过程工业的特点

连续工业有明显不同于离散工业和间隙工业的特点^[3], 主要表现在:

1) 连续工业生产过程伴随着物理化学反应、生化反应、相变过程及物质和能量的转换和传递, 因而是一个十分复杂的工业大系统。系统本身存在的复杂性、不确定性和非线性等因素决定了对它进行控制的困难程度。

2) 连续生产过程常常伴随十分苛刻的生产条件和环境, 如高温、高压、低温、真空, 有时甚至是易燃、易爆或存在有毒物质。因而生产的安全性十分重要, 对一些关键设备或关键生产过程必须有故障预报和诊断, 有时还需要非正常工况下的连锁保护和自启停以保证人身和设备的安全。

3) 连续生产过程强调生产过程的实时性、整体性。因而应从全局出发协调和处理装置间复杂的耦合、制约关系, 求得全局最优。所以, 采用集成和智能的理论和来处理这类问题几乎是唯一的出路。

连续生产过程的特点决定了过程控制的艰难进程, 但它在国民经济中的重要地位和可望获得的巨大效益使得过程控制在近十年来有了飞速的发展。本领域中许多公司、企业纷纷要求

* 国家自然科学基金资助项目。

本文于1996年1月15日收到, 1996年9月20日收到修改稿。

采用高新技术改造原有企业. 在应用的驱动下, 过程控制将会走上一个新台阶.

2 过程控制发展的回顾

过程控制的发展是与控制理论、仪表、计算机以及有关学科的发展紧密相关的. 过程控制的发展大体上可以分为如表 1 所示的三个发展阶段^[4]. 70 年代以前可以看作是第一阶段.

表 1 过程控制发展的三个阶段

阶段	一 (70 年代以前)	二 (70~80 年代)	三 (90 年代)
控制理论	经典控制理论	现代控制理论	控制论、信息论、系统论、人工智能等学科交叉
控制工具	常规仪表 (气动、液动、电动)	分布式控制计算机 (DCS)	计算机网络
控制要求	安全、平稳	优质、高产、低消耗	市场预测、快速响应、柔性生产、创新管理
控制水平	简单控制系统	先进控制系统	综合自动化 (CIPS)

这一时期应属于自动化孤岛模式的阶段, 其控制目标只能是保证生产平稳和少出事故. 70~80 年代是发展的第二阶段, 分布式工业控制计算机系统 (DCS) 的出现为实现先进控制创造了条件, 多变量预测控制等先进控制方法的应用, 使控制达到了新的水平, 在实现优质、高产、低消耗的控制目标方面前进了一大步. 值得指出的是在 70 年代中期, 出现了现代控制理论是否适用于过程控制的困惑, 这迫使人们去研究生产过程的特点与难点, 以缩小理论与应用之间的鸿沟. 80 年代后期, 工业控制中出现了多学科间的相互渗透与交叉, 人工智能和智能控制受到人们的普遍关注, 信号处理技术、数据库、通讯技术以及计算机网络的发展为实现高水平的自动控制提供了强有力的技术工具. 过程控制开始突破自动化孤岛的传统模式, 采用 CIM 的思想和方法来组织、管理和指挥整个生产过程, 出现了集控制、优化、调度、管理于一体的新模式. 在连续工业中, 也将这种模式称为综合自动化或 CIPS (computer integrated processing systems)^[5]. 可以看到, 过程控制在这阶段的目标已从保持平稳和少出事故转向提高产品质量、降耗节能、降低成本、减少污染, 并最终效益为驱动力来重新组织整个生产系统, 最大限度地满足动态多变市场的需求, 提高产品的市场竞争力.

3 过程控制的发展趋势

当前过程控制正处于第三个发展阶段, 并以前所未有的速度和规模飞速前进. 纵观这一时期, 可以归纳为如下三个主要特点.

3.1 简单控制向先进控制发展

早期的控制受经典控制理论和常规仪表的限制, 难以处理工业过程中存在的复杂性、耦合性、非线性等, 只能按某种原则将复杂系统分解成若干相对独立的单变量系统. 这种简单控制是一种分散自治控制. 随着企业提出的高效益、高柔性的要求, 上述控制方式已不能适应, 先进控制便应运而生. 先进过程控制 (advanced process control) 是指一类在动态环境中, 基于数学模型, 借助充分的计算能力, 为工厂获得最大利润而实施的运行和技术策略^[6]. 这种新的控制策略实施后, 系统运行在最佳工况, 达到所谓的“卡边控制”^[7]. 据资料报导, 一个乙烯装置投资 163 万美元实施先进控制, 完成后预期可获得效益 600 万美元/年. 目前, 国内许多大企业均纷纷投资, 在装置自动化系统中实施先进控制.

3.2 封闭的分布式计算机控制系统转向具有国际统一标准的开放式系统

1975 年 Honeywell 公司推出第一台分布式计算机控制系统 (DCS), 实现了控制分散、监

视集中的功能,提高了系统的可靠性和灵活性,为连续工业自动化建立了丰功伟绩.但 DCS 的一个致命弱点就是封闭性.随着综合自动化的潮流和计算机科学与技术的发展, Fisher-Rosemount, Honeywell 等欧美十余家公司经过激烈的竞争,最后终于联手,将共同推出一种国际标准的现场总线 (fieldbus) 控制系统.它被公认为具有时代特点的新一代分布式计算机控制系统.它的出现标志着控制工具的又一次重大变革.它的主要特点为^[8,9]:

1) 开放性.现场总线采用同一种国际标准的通信协议,不仅系统内不同型号的装置间互联容易,而且可以方便地与通用的局域网相连,为实现综合自动化创造了极有利的条件.

2) 智能化现场仪表.系统中的现场仪表配有自身的 CPU 与模/数转换器,除了完成基本的检测、转换、操作等功能外,还具有自诊断、参数补偿、现场组态及现场校验等功能.这既提高了现场仪表的精度,也将单一功能仪表变成了多功能现场仪表,使系统的可靠性、灵活性有很大提高.

3) 数字信号传输. DCS 一般是将模拟信号送到集中控制室,经接口电路转换为数字信号进入计算机.采用现场总线后,现场仪表输出均为数字信号,在现场直接通过现场总线进行数字传输,不仅提高了可靠性,而且还可节省 30%~40% 的导线费用.

4) 彻底分散性.原来的 DCS 中,传感器、执行器等在现场,控制显示设备在集中控制室.现场总线控制系统,则使控制系统进一步分散,简单控制回路基本分散在现场实现,仅将关键参数的数字信号送到中央控制室.这样,在中央控制室主要完成信息管理、先进控制和在线优化等功能,既充分发挥了计算机的作用,又提高了系统的可靠性.因此,具有现场总线分布式控制系统将对控制系统的发展产生巨大而深刻的影响.

3.3 单一控制系统向综合自动化系统发展

从本质上讲,工业企业自动化在 90 年代以前仍是自动化孤岛模式.进入 90 年代,国内外企业界在国际市场剧烈竞争的刺激下,已把注意力转移到节能降耗、少投入多产出的高效生产模式上.企业开始把提高综合自动化水平作为快速挖潜增效、提高竞争能力的重要途径.集常规控制、先进控制、在线优化、生产调度、企业管理、经营决策等功能于一体的综合自动化成了当前自动化发展的趋势.

文献[10]中提出了一种炼油厂的综合自动化模式.在整个系统中,信息是由低层不断经过加工处理向上层传递,而各种指令也由最高层逐级分解,以指令形式向下层传递.每个层次的运行周期不等,从低层向上,以秒、分、时、日、旬,乃至月、季来计算.这种递阶系统,把全厂各层控制功能与企业管理相结合,实现从原料进厂到产品出厂的全部控制与经营销售相结合的全新的生产模式.可以说综合自动化就是在计算机通信网络和分布式数据库的支持下,实现信息与功能的集成,进而实现充分调动人的因素的经营系统、技术系统及组织系统 (humanware) 的集成,最终形成一个能适应生产环境不确定性和市场需求多变性的全局最优的高质量、高柔性、高效益的智能生产系统.这就是 CIM 思想在连续工业中的体现.

据报导,国外目前约有 100 个炼油厂和化工企业正在建立一体化信息系统,在欧洲有 13 家炼油厂、北美至少有 15 家炼油厂、远东和澳洲有 14 家炼油厂正在实施 CIM 计划.它们的基本思想都是集控制、优化、生产调度、计划排产和优化决策于一体,以达到节能降耗、提高产量和质量、增加产品市场竞争能力的最终目标.有关统计资料也已经表明了综合自动化的重要作用^[11].我国在连续工业方面,自 1990 年开始,已进行一些综合自动化试点.近年来,连续工业 CIM 已列入国家科委 863CIMS 典型应用工程和国家计委“八五”、“九五”攻关任务.可以预料,综合自动化的实施和发展将给国民经济建设带来巨大的经济效益和社会效益,是一个十分

诱人的发展方向。

4 过程控制面临的问题

在过程控制中确实存在一些没有很好解决的问题,当前过程控制的发展又提出了许多新问题^[12~22]。

4.1 过程建模

工业生产的发展和市场竞争的需要对过程控制提出了越来越高的要求,例如先进控制、参数的软测量、过程优化、调度与管理等,它们都以模型为基础。控制理论、信号处理技术和计算机技术的发展为模型的建立提供了强有力的工具。

1) 过程建模的难点。多数过程内在机理复杂,还难以完全从机理上揭示其内在规律。PH 参数的变化过程及聚合反应等化学反应过程中,存在着严重的非线性。炉膛内的燃烧、钢坯的加热等等均为分布参数系统,很难用一个集中参数模型去描述。再者,很多过程参数随着时间而变化,如催化剂活性的时变性使化学反应的速率成为时变参数,管壁内部的结垢和外部的结焦使换热器的热传导系数随时间而变化。这些特点,给建模带来了困难。

2) 建模方法。过程控制中常用的建模方法大致有两类。一类是机理方法,根据过程本身的内在机理,运用能量平衡、物质平衡、反应动力学原理等建立系统的模型,称为机理建模。另一类是系统辨识方法,根据被控过程的输入、输出数据建立数学模型,主要方法有最小二乘法、极大似然法等。近年来,其它一些新的建模方法相继出现,如人工神经网络建模、模糊建模、小波建模等。

4.2 软测量技术

在过程控制中,一些需要控制的过程变量,如聚合物平均分子量、精馏塔的塔顶和塔底产品的某些组分、发酵过程的转化率及许多涉及产品质量的变量,在现在的技术条件下难于直接测量或不易快速在线测量,只能通过控制其它可测变量,间接地保证质量要求。当今,为实现直接质量控制要求,出现了一种采用离线或在线试验数据建立模型,揭示这些变量与操作参数之间的关系的软测量方法。软测量的实质是建立被测量参数与影响该参数的其它操作参数之间的数学模型。这种技术对保证产品的质量具有重要意义。

4.3 控制方法

在过程控制中,90% 以上的控制回路目前都是 PID 类型,包括较高级的解耦 PID 控制、自整定 PID 控制等。其它控制回路虽然不多,却往往是质量控制等关键回路,控制十分困难,因而受到人们的关注。

1) PID 控制器。PID 控制器简单、易调整,而且工作得很好。对 PID 的少许改进往往会获得较明显的效果,因而基于 PID 或与 PID 相结合的控制方法会不断出现和完善。

2) 预测控制。过程控制界认为这是一种很有前途的控制方法,尤其是已获成功应用的多变量预测控制。DCS 厂家及软件公司均有专用软件问世。但对任意的一般系统,稳定性、鲁棒性分析较难进行,参数调整的总体规律虽然比较明确,但对不同类型的系统的具体调整方法仍有待进一步研究总结。

3) 容错控制和鲁棒控制。过程控制系统回路多,回路失效对生产安全的影响较大,尤其是传感器和执行器失效的情况。另外模型的不确定性和运行模型随工况而变化的特性也要求控制器能够适应一个较大的变化范围。为了能用简单的控制器去有效地解决过程控制问题,需要综合利用故障检测、结构重组及硬件冗余等方法。随着过程优化的实现、自动化程度的提高及控制系统的复杂化,容错控制和鲁棒控制将受到进一步关注。

4) 基于人工智能技术的控制. 由于模型复杂、运行工况变动较大, 目前控制参数的调整在很大程度上依赖于人的经验; 而且因人而异, 效果各别. 所以基于人工智能的控制方法一定会得到广泛应用. 已经采用的主要是专家系统和模糊控制, 应用虽不够多, 但效果是令人满意的. 神经网络系统的学习功能、联想记忆功能和分布式并行信息处理功能可以有效地克服现有专家系统的缺陷, 虽然现在还没有进入实用阶段, 但对它的应用研究正在进行.

5) 统计过程控制. 统计过程控制的基本思想可以追溯到 20 年代, 此后在离散制造工业的产品质量控制方面取得了引人瞩目的成效. 近年来, 统计过程控制的基本思想在连续过程控制中的应用也已成为热门的课题之一. 统计过程控制的基本方法主要有: 1° 控制图方法. 即运用中心极限定理和正态分布中的 3σ 原理(对多变量控制图运用 F 分布检验方法)判断系统中的质量变量是否处于统计受控状态. 2° 多变量投影方法. 其基本思想是将高维空间的数据投影到低维特征空间, 这种方法较好地解决了数据相关问题, 主要方法有主元分析法 (PCA)、部分最小二乘法 (PLS) 等. 统计过程控制主要用于过程监视和异常工况的检测、质量的统计建模、与传统工业相结合的在线控制等方面.

4.4 过程的优化

在过程控制中, 优化已经受到人们的普遍重视. 借助优化可以获得很大的经济效益和社会效益.

1) 稳态优化. 当前, 过程的优化主要是寻找最佳的工艺参数设定值以获得最大的经济效益, 这称之为稳态优化. 稳态优化采用静态模型, 可以离线进行, 也可以在线进行. 离线优化是指利用各种建模、优化方法在约束条件下求解最优的工艺生产参数, 提供操作指导. 这是目前用得最多的一类优化. 在线优化则是利用计算机自动周期地完成模型计算、模型修正和参数寻优, 并将最优参数值直接送到控制器作为设定值. 显然, 在线优化能以一种动态的方式处理稳态优化问题, 使优化参数得到及时修正, 取得更好的效益.

2) 最优控制. 为获得稳态最优, 往往要求系统工作在一种特定的、保守程度较小的工况之下. 譬如工艺参数接近设备的极限值, 或者只允许在一个很窄的范围内变化. 一旦偏离了这种工况, 各项指标会明显变差, 操作难度也会大大增加, 甚至会导致生产的不安全. 过程控制中大多数过程相对比较慢. 在这类过程中, 工况和原料的变化可以通过及时的稳态优化加以补救. 但随着稳态优化的深入研究和普遍实施, 直接影响过程动态品质的最优控制方法也会日益显示出它的重要性.

3) 工艺设计与控制的整体考虑. 工艺设计时, 应该考虑到最佳的尺寸及工艺要求. 但是由于工艺设计人员并不完全了解控制的方法和手段, 所以实际系统往往达不到设计的最优点, 或者要花费很大的代价才能达到这一最优工作点. 相反, 若在工艺设计的同时考虑到控制的实施方案及效果, 就可以在工艺设计阶段消除那些可能会导致控制困难的因素, 保证获得平稳的被控过程. 这种工艺与控制整体考虑的方法正在受到人们的关注.

4.5 生产管理与调度

生产管理与调度是综合自动化系统的核心. 它涉及产品质量、设备状况、环境监测、控制性能评估等问题, 要根据动态市场需求、考虑生产过程设备与生产环境的情况, 综合制定生产计划和短期调度计划. 其中一个至关重要的问题是如何将人的因素集成到整个系统之中. 据资料报导, 实现 CIM 的主要困难是人的因素不能充分体现. 可以从两个方面进行研究.

1) 在管理调度的总体设计中充分考虑人的因素. 随着生产环境的变化, 人的认识深化和经验积累必须在一定范围内修改补充原系统的设计, 所以从设计开始就应考虑人的行为因素、

人的知识积累过程,而且在实施运行中允许人的作用有效介入.文献[15]提出一种包含状态因素和行为因素的复合信息空间,这里不仅需要研究行为因素如何映射到状态空间,而且需要研究复合信息空间的可控性、鲁棒性等.

2) 在管理调度系统中,涉及的范围较广,需要将过程运行数据与质量控制、性能测试、维护管理、市场及其它商业数据(如原材料组成的变化、市场价格的浮动和产品的需求程度)集成到一起.在一个实现综合自动化的工厂中,包含有多个反馈通道,因而进行优化调度和管理是一个复杂的过程,需要研究基于计算机协同工作(CSCW: computer supported collaboration work)的原理来实现.

4.6 动态系统故障诊断

随着生产过程的大型化和复杂化,安全生产和环境保护日益受到人们的重视.生产过程的任何故障不仅直接影响产品的产量和质量,而且还可能发展成严重的设备、人身事故和环境污染.因而故障诊断也成为过程控制的重要课题.故障诊断主要是指故障检测和故障分离.

1) 对故障诊断系统的要求.故障诊断系统应当具有较高的灵敏度,以实现早期故障诊断;诊断系统对模型的误差和噪声应当具有较强的鲁棒性;诊断系统的误报警率和漏报警率应尽量小.这几个要求之间是有矛盾的,如提高诊断系统的灵敏度,往往会导致误报警,因而必须综合考虑.

2) 故障诊断方法.基于建模的方法中以观测器方法研究得最多,最为深入.基于输出数据的方法包括采用时序分析方法建立时序模型、辨识模型参数,并采用某种信息准则(如 Kullback 散度函数),进行故障检测.近来,小波变换、人工神经网络和基于专家系统的方法在故障诊断中也得到了应用.

3) 故障诊断方面的新课题.与过程控制本身的特点相对应,故障诊断方面有许多新课题.如多变量系统的故障诊断、非线性系统的故障诊断、大系统故障诊断、多故障诊断,对噪声和模型的不确定性具有强鲁棒性的故障诊断和智能故障诊断等等.

4.7 实用软件的开发

已经提出了许多过程控制与优化算法,更完善或解决新问题的算法也仍需要继续开发.一件很艰苦的工作是如何用这些算法解决实际工业过程的控制,否则企业的效益将难以提高.另外,工业界需要一大批商品化的软件,对它们进行不太复杂的组态和设置就能完成特定过程或设备的建模、控制、优化和管理.目前大型企业的应用软件多数是向国外购买.中小型企业的应用软件尚不能构成商业化系统产品.在这方面有大量的工作需要完成.

5 结束语

市场竞争的需要和科学技术的发展决定了连续过程自动化的发展趋势——连续过程的 CIM,或称连续过程的综合自动化.综合自动化是计算机科学、自动控制、信号处理和系统工程等多学科的交叉渗透,综合自动化需要多学科专家的共同努力.对从事过程控制的人员来说,要实现一个企业的综合自动化,还有许多理论和实际问题需要解决.理论与实际相结合,引进和消化创新相结合,为加速连续工业的综合自动化是我们义不容辞的责任.

参 考 文 献

- 1 Bernard, J. M.. CIM in process industries. Instrument Society of America, 1989
- 2 刘振庚. CIMS-未来石油化工企业内涵发展的技术支柱. 工业综合自动化研讨会论文集, 北京, 1994
- 3 金以慧, 王诗宓, 王桂增. 过程计算机控制的发展与展望. 第三届全国计算机应用学术交流大会论文集, 北京: 电子工业出版社, 1995, 25—33

- 4 金以慧等. 过程控制. 北京: 清华大学出版社, 1993
- 5 Yoshimura, J. S.. Computer integrated manufacturing/processing in the HPI. *Hydrocarbon Processing*, 1993,72(5): 65—68
- 6 Van Wijk, R. A. and Pope, M. R.. Advanced process control and on-line optimisation in Shell refineries. *European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, 1993
- 7 于静江等. 基于 DCS 的蒸馏过程集成优化控制. 第三届全国计算机应用学术交流大会论文集, 北京: 电子工业出版社, 1994,611—614
- 8 钟霖田. DCS 的现状与发展趋势. *自动化与仪器仪表*, 1994,(3):1—6
- 9 靳小桂, 王永强. 现场总线最新进展. *化工自动化及仪表*, 1994,21(4):3—8
- 10 Wadi, I.. Take an integrated approach to refinery automation. *Hydrocarbon Processing*, 1993,72(9):155—158
- 11 Mather, T. W. and Garners, H. E.. Implementing CIM in an existing facility. *Hydrocarbon Processing*, 1989,68(1): 43—49
- 12 Åström, K. J.. Process control—past, present and future. *IEEE Control Magazine*, 1985, August,3—10
- 13 McAvoy, T. J.. Contemplative stance for chemical process control. *Automatica*, 1992,28(2):441—442
- 14 蒋慰孙. 2000 年化工自动化展望. *化工自动化及仪表*, 1994,21(1):1—9
- 15 郭仲伟等. CIMS 技术的进展与复合信息模型. *信息与控制*, 1994,23(3):160—172
- 16 Rao, M. et al.. Computer integrated process systems in continuous manufacturing industries. *Preprints of the 12th I-FAC Conference*, 1993,1:249—252
- 17 Iserman, R.. Process fault detection based on modelling and estimation methods—a survey. *Automatica*, 1984,20: 387—404
- 18 Patton, R., Frank, P. and Clark, P.. *Fault diagnostics in dynamic systems—theory and applications*. Printice Hall International(UK)Ltd., 1989
- 19 方崇智, 萧德云. 过程辨识. 北京: 清华大学出版社, 1993
- 20 MacGregor, J. F. et al.. Process monitoring and diagnosis by multiblock PLS methods. *AIChE Journal*, 1994,40(5): 826—838
- 21 Mamzic, C.. Guidelines for the application of statistical process control in the continuous process industries. *Measurement and Control*, 1995,28(3):69—73
- 22 Efthimiadu, I. et al.. Integrating statistical and engineering control techniques. *Measurement and Control*, 1995,28(3):78—82

Developments and Prospects of Process Control

JIN Yihui, WANG Shifu and WANG Guizeng

(Department of Automation, Tsinghua University • Beijing, 100084, PRC)

Abstract: In this paper, the features of process industries are briefed at the beginning. After a review and a discussion on the trend of developments in process control, the integrated automation is emphasised. In the last half of the paper, the theoretical and practical problems faced by process control are suggested for further consideration.

key words: process control; integrated automation; advanced control; process optimization; filedbus

本文作者简介

金以慧 1936 年生. 1959 年毕业于清华大学, 1963 年清华大学研究生毕业, 现为清华大学自动化系教授, 控制理论及应用专业博士生导师. 主要研究方向为高等过程控制、系统的建模与优化、计算机集成过程系统.

王诗宓 1944 年生. 1967 年毕业于清华大学动力机械系, 1981 年和 1983 年在英国曼彻斯特大学理工学院获理学硕士和哲学博士学位. 曾于工业部门工作, 现为清华大学自动化系教授. 目前研究领域为多变量控制、预测控制、容错控制等.

王桂增 1941 年生. 1965 年毕业于清华大学, 现为清华大学自动化系教授. 长期从事过程控制方面的教学和科研. 主要研究方向为过程控制系统和动态系统故障诊断等.