

面向 21 世纪的过程控制技术

朱学峰

(华南理工大学电子与信息学院 广州 510641)

摘 要 本文针对过程工业的特点,简单回顾了过程控制的发展历程,较详细地讨论了当前国内外过程控制技术的主要发展趋势,存在的主要问题,并特别讨论了计算机集成过程系统的特点与关键技术。

关键词 过程控制,过程建模,控制策略,软测量技术,过程优化,计算机集成过程系统

1 前言

1.2 过程工业的特点

过程工业是指如石化、电力、冶金、造纸、化工、医药、食品等工业,它们的特点是连续性。根据有关统计^[1],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 20 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。随着科学技术的迅猛发展,连续工业逐步向大型化、连续化,自动化以及集成化方向发展。为了提高竞争能力,连续工业正在不断地提高自动化水平,以提高产品质量、节省能源、降低成本及产生明显的经济效益。

从控制工程的观点来看,过程工业有如下一些特点。

1)连续工业生产往往伴随有物化反应、生化反应、相变过程等,因此过程机理十分复杂。被控对象往往是高维、耦合、大时滞、严重不确定性与非线性等,控制起来非常困难。

2)连续工业经常在高温、高压、易燃、易爆等环境下运行,生产的安全性是至关重要的。因此对自动控制系统的可靠性提出了非常苛刻的要求。

1.2 过程控制的发展回顾^[1,4]

许多国内外的专家、学者认为,过程控制大约经历了以下三个发展阶段(见表 1)。

表 1 过程控制发展的三个阶段

阶段	第一阶段(70 年代以前)	第二阶段(70~80 年代)	第三阶段(90 年代)
控制理论	经典控制理论	现代控制理论	多学科交叉
控制工具	常规仪表	DCS	计算机网络
控制要求	安全、平稳	优质、高产、低耗	市场预测、柔性生产、综合管理
控制水平	简单	先进控制系统	CIPS

在 70 年代以前,由于受到控制理论和控制工具的限制,过程工业的自动化水平相对来讲比较低。当时的控制理论主要是经典控制理论,所能用的控制工业主要是常规仪表,如气动或者电动仪表。在控制系统方面,绝大多数是单变量的简单控制系统,对于比较重要的工艺变量则设计串级调节系统或前馈调节系统。

上述的简单控制系统对于大多数简单的对象可基本满足要求。但是,对于复杂的对象,也就是说对于高维、大时滞、严重非线性、耦合及严重不确定性对象,上述的简单控制系统往

往无能为力。从 70 年代到 80 年代,基于现代控制理论的先进过程控制(Advanced Process Control)应运而生。出现先进过程控制的基础有二:一是市场上先进的控制工具如分散式控制系统(DCS)的出现与完善;二是现代控制理论的不断发展和提高。如预测控制、自适应控制、非线性控制、鲁棒控制以及智能控制等控制策略与方法都已成为目前国内外学术界与工程界的热门研究课题。国内外已有许多先进过程控制成功的工业应用报导^[8,9,10,24]。

近些年来,在控制工具方面,出现了一种新的控制系统,称之为现场总线系统(Field Bus System)^[24,27,28]。现场总线技术是计算机技术、通信技术、控制技术的综合与集成。它的特点是全数字化、全分散式、全开放、可互操作和开放式互连网络,它克服了 DCS 的一些缺点,对自动控制系统的体系结构、设计方法、安装调试方法和产品结构方面产生了深远的影响。

尽管先进过程控制能对重要的工艺变量提高控制质量并产生较明显的经济效益(如采用卡边控制),但是它们仍然只是相互孤立的控制系统。许多专家进一步研究发现,将控制、优化、调度、管理等集于一体的新的控制模式并将信号处理技术、数据库技术、通信技术以及计算机网络技术进行有机结合而发展起来的高级自动化具有更重要的意义,因此也就出现了所谓综合自动化系统。这种全新的综合自动化的系统称为计算机集成系统(Computer Integrated Process System,简称 CIPS),可以认为是过程控制发展中的第三阶段^[1,7,9]。

2 当前过程控制技术的发展趋势

2.1 过程建模

先进过程控制、过程优化、调度与管理等的实施均需要有相应的数学模型作基础。因此,建立数学模型往往是实施高级过程控制的第一步。对于过程工业中种类繁多的对象而言,由于其物化反应、生化反应等非常复杂的变化,要想从机理来建立一个准确的数学模型是非常困难的。为了得到工程技术人员能够接受的并易于应用的数学模型,往往都不得不进行一些假设使数学模型得以简化,但这些假设又会影响到数学模型准确性。特别是对于一些高维的复杂对象,若采用严格的机理推导往往会得到由几百个乃至几千个微分方程组成的数学模型,它们的求解将会十分困难。

目前国内外采用的建模方法大致有两类。一类是机理建模,也就是根据过程本身的内在机理,利用能量平衡、物质平衡、反应动力学等规律来建立系统的模型;另一类是系统辨识方法,也就是根据被控过程的输入、输出数据建立数学模型。属于这类方法的有最小二乘法、人工神经网络、模糊模型等。

尽管国内外许多学者在过程建模方面做出了卓有成效的努力,使机理建模和系统辨识方法能够在工业过程中得以有效的应用。但是,就目前过程控制水平而言,工业过程模型化仍然是控制系统设计与开发的瓶颈。在这一方面,今后仍有大量的工作要完成。

2.2 控制策略与方法^[1,2,3]

毫无疑问,在控制系统的设计与开发方面,控制策略(算法)是核心。在这方面,国内外的学者作了长期不懈的努力,取得了许多成果。将这些控制策略应用于关键的控制回路(产品质量控制回路)往往可以取得较高的控制质量并产生一定的经济效益。

目前,在学术界所研究、开发出来的控制策略(算法)多到令人目不暇给,但其中许多算法仍只停留在计算机仿真或实验装置的验证上,真正能有效地应用在工业过程中的仍为数

不多。以下是一些较公认的(特别是能得到工程界的认可)的先进控制策略(算法)。

1)改进或复合PID控制算法

大量的事实证明,传统的PID控制算法对于绝大部分工业过程的被控对象(可高达90%)可取得较好的控制效果。采用改进的PID算法或者将PID算法与其他算法进行有机结合往往可以进一步提高控制质量。

2)预测控制^[10,11,12]

预测控制是直接从工业过程控制中产生的一类基于模型的新型控制算法。它高度结合了工业实际的要求,综合控制质量比较高,因而很快引起工业控制界以及学术界的广泛兴趣与重视。预测控制有三要素,即预测模型、滚动优化和反馈校正。它的机理表明它是一种开放式的控制策略,体现了人们在处理带有不确定性问题时的一种通用的思想方法。

根据预测模型的不同形式,预测控制分别称之为Model Predictive Control (MPC), Generalized Predictive Control (GPC)和Receding Horizon Predictive Control (RHPC)。此外,预测控制还可以采取其他形式的模型,如非线性模型、模糊模型和神经网络模型等。

预测控制具有一系列的优点,如可以以显式的方式处理约束条件,鲁棒性强、对大时滞过程有补偿作用而且比较容易处理多变量系统中的耦合作用等。正因为预测控制有上述一系列优点,所以它已经被国外一些控制公司开发成为商品化软件而成功地应用于过程工业中。在这方面,许多国外著名的控制工程公司,如Setpoint公司、Treiber公司、Profimatics公司、Predictive Control公司、霍尼韦尔公司、横河公司等,都开发了各自的商品化预测控制软件包,并被广泛地应用于大型工业过程控制。特别要提到的是法国Adersa公司在第一代产品IDCOM基础上开发出来的第三代预测控制商品化软件Hiecon,经长期的实际运行证明,它的性能良好,已被浙江大学中控自动化公司作了结合国情的改进并融入其先进控制软件AdvanTrol中。另外,值得可喜的是,在“九五”计划期间,我国组成了以浙江大学为首的高校攻关组,旨在自行开发我国的工业过程控制商品化软件包,其中就包括有多变量预测控制软件包^[13]。这些软件包的成功开发与应用将会大大提高我国工业商品化软件的水平并可节省大量的外汇。

3)自适应控制^[14,15,16,17]

在过程工业中,不少的过程是时变的,如反应器中催化剂活性的变化,换热器中结垢的产生与发展等均会使过程的特性发生变化。如采用参数与结构固定不变的控制器,则控制系统的性能会不断恶化,这时就需要采用自适应控制系统来适应时变的过程。它是辨识与控制的结合。目前,比较成熟的自适应控制分三类。

- 自整定调节器及其他的简单自适应控制器。其中,自整定PID调节器已有成熟产品并在工程中获得了较广泛的应用。

- 模型参考自适应控制,它能自动调整控制规律,使控制系统的输出与参考模型的输出相近,在这些系统中,自适应回路的稳定性至关重要。

- 自校正调节与控制。瑞典的Astrom与英国的Clarke教授在这方面做了许多开拓性的研究工作。国内外许多学者在他们的基础上进行了大量的改进、提高、完善及应用工作,使其更加完善与可靠。

自适应控制已在工程实际中得到了不少的应用^[14,15,16,17]。文^[17]对中国的自适应控制的应用情况进行了全面的总结,指出了它的有效性,说明了自适应控制逐渐得到工程技术人员

的认可。但是,作者们的亲身经验也指出了自适应控制在应用方面至今仍然有许多待进一步解决的问题(特别在参数估计方面),这些问题不解决,自适应控制的广泛应用仍将遇到许多困难。因此,在控制工作者的面前仍有大量工作要做。此外,更高一级的自组织与自学习控制也在不断研究。

4)智能控制^[18,19,20,21]

随着科学技术的发展,对工业过程不仅要求控制的精确性,更加注重控制的鲁棒性、实时性、容错性以及控制参数的自适应和自学习能力。另外,被控工业过程日趋复杂,过程严重的非线性和不确定性,使许多系统无法用数学模型精确描述。这样建立在数学模型基础上的传统控制方法将面临空前的挑战,也给智能控制方法的发展创造了良好的机遇。传统的控制方法在很大的程度上依赖于过程的数学模型,但是,至今获取过程的精确数学模型仍然是一件十分困难的工作。没有精确的数学模型作前提,传统的控制系统的性能将大打折扣。而智能控制器的设计却不依赖过程的数学模型,因而对于复杂的工业过程往往可以取得很好的控制效果。

常见的智能控制方法有以下几种:模糊控制、分级递阶智能控制、专家控制、人工神经网络控制、拟人智能控制等。这些智能控制方法各有千秋,但又存在各自的不足。因此,最近的研究又表明将它们相互交叉结合或与传统的控制方法结合将会产生更佳的效果。智能控制已在家电行业及工业过程中取得了许多成功的应用。特别是模糊控制方法已在日本的家电行业中广泛应用。在国内外,模糊控制与人工神经网络也已在石化、钢铁、冶金、食品等行业取得了成功的应用。今后,需要进一步对智能控制的基础理论进行研究,以此建立统一的智能控制系统的设计方法。

2.3 软测量技术^[22,23,24]

在许多工业过程中,存在着一大类这样的变量:它们由于技术和经济的原因,目前尚难以或暂时无法通过传感器进行检测,但同时又是需要加以严格控制的、与产品质量密切相关的重要过程工艺变量。如精馏塔的产品组分浓度,化学反应器的反应物浓度和产品分布,发酵罐中的生物量参数和制浆工业中的卡伯值等。

解决这些变量检测问题的途径有二:一是开发新的传感器对其进行检测;二是通过一些容易测量的二次工艺变量,再通过一定的方法推断出要检测的工艺变量数值,而这第二种方法就称之为软测量技术,或称之为软仪表。建立软仪表的方法有以下几种。

- 基于工艺机理分析;
- 基于回归分析;
- 基于人工神经网络;
- 基于模式识别;
- 基于模糊模型。

有许多因素影响软仪表性能,如辅助变量及数目的选择,检测点位置的选择,数据的处理与变换,软仪表的在线校正等等。要想真正地、可靠地将软仪表用于工业过程,上述因素均需仔细地加以考虑并采取相应的有效措施,特别是对于工业现场存在许多干扰的情况下更需付出巨大的努力。值得可贺的是我国许多高校(如浙江大学、清华大学、交通大学、华东理工大学等)已在这方面做了许多有益的工作并取得了相当的进展。但是,要指出的是目前软仪表的维护工作量仍是较大的,可靠性仍有待进一步提高。

2.4 过程优化^[1,5,9,25]

采用先进过程控制技术可以使重要的工艺变量控制质量明显提高并产生较为显著的经济效益,但是采用优化操作能使操作点向优化点靠近,取得的经济效益将更加明显。经验证明,在线优化获益比先进控制要高出 5~10 倍。

过程优化包含两层意思:一是稳定优化,二是最优控制。目前稳态优化技术(或称之为离线操作优化或调优)主要有三种方法,即统计调优法(EVOP),模式识别法(PR)与操作模拟分析法(OSA)。这些方法的共同点是利用生产数据以及建模、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。当然,操作条件优化也可以用计算机来在线自动完成。为了获得稳态最优,往往要求最优操作点尽量接近工艺操作与设备的极限值,并只允许在一个很窄的范围内变化。一旦偏离这种工况,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。在这种情况下,就需要动态最优化控制以保证稳态操作点的“最优性”。

2.5 计算机集成过程系统(CIPS)^[1,7,8,9,29]

当前,在机械加工行业,计算机集成制造系统(CIMS)已经是国内外热门的研究课题并且取得了不少的理论和应用成果。在 CIMS 的激励下,过程工业也开始积极地进行研究与考虑实施。考虑到过程工业与机械加工行业的不同特点,在过程工业中 CIMS 则称之为计算机集成过程系统(CIPS)。计算机集成过程系统的出现是与计算机技术、通信技术、网络技术以及控制技术的迅速发展分不开的。

企业内存在许多自动化孤岛,即企业内的计算机系统是相互独立的,不同计算机间不能互通信息,工程师不能用生产过程计算机接受实验室计算机、管理系统计算机传来的信息、硬件软件不能兼容,造成过程控制与管理决策、经营贸易的失衡,限制了公司迅速适应经销,市场和生产变化的能力。CIPS 覆盖操作层、管理层、决策层,涉及企业生产全过程的计算机优化。它的最大特点是多种技术的“综合”与全企业信息的“集成”,它是信息时代企业自动化发展的总方向。

CIPS 已经在国内外的一些炼油与石油化工厂进行了试验。到 1990 年,日本的 24 家大中型炼油厂中有 19 家和 13 家乙烯厂中有 8 家正在开发和应用 CIPS;在北美、欧洲,远东和澳洲也已有几十家大型炼油厂在计划或实施 CIPS。在我国,根据石化总公司发展规划的“适时选点开发 CIPS”和“炼油、石化流程型工业向 CIPS 迈进”的意见,已分别在齐鲁胜利炼油厂与福建炼油厂中进行试点工作。Setpoint 公司将炼油厂的信息系统与先进过程控制相结合而形成了计算机一体化技术。它有五种功能:性能监测、优化、调度、控制与组合。效益分析表明,将信息系统结合进来将有着显著的效益潜力。

据专家分析,CIPS 的关键技术如下^[29]。

- 1) 计算机网络技术;
- 2) 数据库管理系统;
- 3) 各种接口技术;
- 4) 过程操作优化技术;
- 5) 先进控制技术;
- 6) 软测量技术;
- 7) 生产过程的安全保护技术等。

上述的4)~7)是自动化技术的热门研究课题,它们的发展与进步将是实施CIPS的保证。

CIPS利用计算机技术对整个企业的运作和过程进行综合管理和控制,它包括市场营销、生产计划调度、原料选择、产品分配、成本管理,以及工艺过程的控制、优化和管理的全过程。分布式控制系统,先进过程控制以及网络技术,数据库技术是实现CIPS的重要基础。可以预计,通过广大学者与工程技术人员努力,今后我国会在过程工业的计算机集成过程系统中取得更多的进展与成果。

参考文献

- [1] 金以慧等,过程控制的发展与展望,控制理论与应用,1997,14(2)145-151
- [2] 朱学峰等,日本工业过程控制技术的现状,化工自动化及仪表,1994,(2),3-11
- [3] 蒋殿孙,2000年化工自动化展望,化工自动化及仪表,1994,21(1),1-9
- [4] 郑名望,我国化工自动化发展现状和水平,化工自动化及仪表,1997,25(3),1-7
- [5] Astrom, K. J., Process Control—past, present and future, IEEE Control Magazine, 1995, August, 3-10
- [6] McAvoy, T. J., Contemplative stance for chemical process control, Automatica, 1992, 28(2), 441-442
- [7] 蒋殿孙, DCS与化工自动化的新潮流, 化工自动化及仪表, 1994, 21(6), 3-6
- [8] 钱伯章, 当代石油化工自动化的技术发展要点, 化工自动化及仪表, 1996, 23(6), 3-7
- [9] 钱伯章, 当代石油化工自动化的技术发展要点(续), 化工自动化及仪表, 1997, 24(1), 3-9
- [10] 李平等, 预测控制研究的概况, 化工自动化及仪表, 1995, 22(6), 3-9
- [11] 席裕庚, 预测控制, 北京, 国防工业出版社, 1993
- [12] 舒迪前, 预测控制系统及其应用, 北京, 机械工业出版社, 1996
- [13] 钱积新等, 工业自动化发展的必由之路——商品化软件的开发研究, 炼油化工自动化, 1997, 159(5), 1-4
- [14] Astrom, K. J. and Wittenmark, B. Adaptive Control, Addison-Wesley, 1989
- [15] Chalam, V. V., Adaptive Control Systems—Techniques and Applications, Marcel Dekker, INC., 1987
- [16] Seborg, D. E. et al, Adaptive Control Strategies for Process Control: A Survey, AIChE Journal, 1986, 32(6), 881-913
- [17] 吴宏鑫执笔, 自适应控制技术的应用与发展, 控制理论与应用, 1992, 9(2), 105-115
- [18] 蔡自兴, 智能控制—基础与应用, 长沙: 湖南大学出版社, 1998
- [19] 王耀南, 智能控制系统, 长沙: 湖南大学出版社, 1996
- [20] 徐潮元等, 过程控制的发展方向——智能控制, 化工自动化及仪表, 1998, 25(2), 1-5
- [21] 黄敏锐等, 智能控制方法的交叉综合及其应用, 控制理论与应用, 1996, 13(3), 273-280
- [22] 于静江等, 过程控制中的软测量技术, 控制理论与应用, 1996, 13(2), 137-144
- [23] 罗荣富等, 软测量方法及其工业应用, 中国自动化学会第六届过程控制科学报告会, 苏州, 1993
- [24] 李晓东, 石油炼制过程的先进控制策略研究及应用, 博士论文, 浙江大学, 1998
- [25] 张余岳, 化工过程模拟与在线优化, 博士论文, 浙江大学, 1998
- [26] 现场总线技术论文选(97), 北京
- [27] 王锦标, 现场总线和现场总线控制系统, 化工自动化及仪表, 1997, 24(2), 3-8
- [28] 王锦标, 现场总线和现场总线控制系统(续), 化工自动化及仪表, 1997, 24(3), 3-7
- [29] 徐用慈, 流程工业的CIMS, DCS应用研究会论文集, 张家界, 1995