

现代控制理论与工程控制的啣接技术

王永初

(精密机械工程系)

摘 要

根据过程自动化的最近动向和作者的研究工作, 本文讨论现代控制理论必将应用于过程控制的原因, 和现代控制理论应用遇到的困难, 以及克服这些困难的途径. 最后, 根据过程自动化的客观现实与现代控制理论当前解决实际问题的能力, 提出开发中国式自动化装置的意见.

一、现代控制理论应用的现状

现代控制理论是从数学学科发展起来, 几乎涉及现代数学的绝大部分分支, 如泛函分析, 拓朴学与图论, 线性代数, 运筹学, 数理统计及随机过程, 符号数学, 离散数学, 群论等, 在现代控制理论发展的早期, Pontriagin, Bellman, Kallman, Wiener, Pearson, Mesarovic等人都有过重大的贡献. 现代控制理论不仅直接影响工程控制系统的发展, 而且已成为许多学科的共同基础.

现代控制理论到六十年代已趋于成熟, 其成果有: 模型辨识与简化方法^[1], 自适应控制方法^[2], 最优化控制方法^[3], 随机过程的平滑^[4]、滤波与预估方法^[5], 大系统的分解与协调方法^[5-6]以及现代频率法. 这些理论和方法, 从数学方面来说是系统的和完善的. 但在工业生产过程控制中应用却微乎其微, 正如Shinna^[7]指出: “这些理论在过程控制中是很糟糕的”. 理论上的完善与实用上的困难是一对矛盾. 学术界早有议论: 控制理论的研究应该冲破学院式的研究, 当务之急是研究理论与应用之间的界面技术, 即实用化方法.

作者认为, 现代控制理论是研究以安全、高产、优质和节能为综合目标的控制方法, 完全符合现代生产过程对控制的要求^[8]. 因此, 现代控制理论必然要用到生产过程, 去解决实践要求解决的问题. 再从调节控制仪表的发展趋势看, 许多仪表厂纷纷引进国外的微机集散系统装置^[9-11], 摆出一副三级管理与控制的架势, 但真正解决问题的并不多. 现在以微型机为核心组成的各种自动化工具, 其平均无故障工作时间从几千小时提高到几十万小时, 甚至

本文1987年4月15日收到.

*本文为中国仪器仪表学会第三次全国会员代表大会的特约专题报告论文.

更高。系统设计未能凑效的原因,再不能归咎于机器,而必须从系统的设计方面找原因。究其原因还是理论本身,现代控制理论考虑完备性有余,而工程性不足。一个单输入与单输出的控制系统,经典控制仅需一个被控制变量,而现代控制理论则要求有多个状态的信息;一个简单的时变对象,经典控制用简单的补偿方法可以解决,而现代控制理论则需要用模型辨识、自适应器、控制器三种综合技术才能解决。现代控制理论是为解决多变量、随机性对象,以期获得最优化的目标而发展起来的,其方法是寻找满足某种目标函数的极大值或极小值。目标函数不仅包含了对产品质量与数量的要求、还包含了对能耗、原材料消耗的要求,而且对生产的安全性、操作过程的平稳性也时常加以限制。限制条件越多,求解过程愈加不容易,分配影响目标函数参数的权值也是一种难题。对生产过程实行优化控制首先是建立模型,而模型的可用性必须通过闭环控制才能检验。建立生产过程的模型会遇到耦合、非线性、大滞后、分布参数的问题。这么复杂的问题要用一个数学式来描述谈何容易,如果模型不建立,系统设计就无法进行,即不能通过可观性分析确定现场安装的检测仪表,及通过可控性分析确定现场安装的执行机构,也无法制定解耦网络和控制对策。作者认为当务之急是开展现代控制理论与工程控制啮接技术的研究,模型与闭环控制在动态运行的条件下统一考虑,才能改变理论研究存在的困难。

二、国内自动化工具的现状

经过三十八年的努力,我国已建立了四川、上海、西安、大连、天津、广东等地的自动化仪表基地,能够成套生产供应DDZ—II、III型及QDZ—I、II、III型的调节仪表,其它测量与执行器/调节阀类的仪表配套率亦达80%以上。加上这些年的引进,单回路数字调节器及集散系统已开始得到应用,但仪表工业就微型集散类型的装置来说,仍然显示不出国产化的特点,而万国化的特点倒很突出:有山武-霍尼韦尔TDC-2000、3000系统,日本富士电机的NEW MICREX系统,美国FOXBORO公司的SPECTRUM系统^[12], DIGITRONIK/UNI-BOX系统^[13],美国德州仪器公司的ICC6000系统,日本横河的YS-80和CENTUM系统,日立的UNITROL系统,还有IBM公司、BALAY公司的产品,究竟哪一种适合中国的国情,哪一种更适用于工业过程,目前分析得很不够,盲目引进,缺乏统筹安排,这种现象实在令人忧虑。就单回路数字调节器,全国就有四家仪表厂分别引进。目前调节仪表的局面用一句话概括是杂而乱。

所谓“集散”系统,“集”意味着集中管理,“散”意味着分散控制。人们很少考虑集中管理什么,系统能否分散得了。集散系统两极化的趋势在增强,从最高一级的大型机至最低一级的单回路调节器。就分散的趋势看,由槽路64个、32个、16个、8个到单回路调节器。如山武-霍尼韦尔的DIGITRONIK/UNI-BOX系统,以400、300、200与100机型为核心,由大至小、由上向下递阶,形成三个或四个控制层次的结构。就功能而论,分管理控制、优化控制、局部综合、个体控制的串行塔形排列,基本上属于“线”排列;而FUJI的NEW MICREX系统,从管理级开始,伸出许多线,形成“面”上的排列,其复盖的控制面更加广泛。

工业过程的集散系统,差不多来自日本与欧美各国,我国又不能及时开发并形成生产能力,若不及时采取对策,从整机至零部件对外国的依赖性是很大的,应充分估计到这个严重的局面。

三、现代控制理论应用存在的困难

现代控制理论的工程化与实用化,是基础理论研究的再创造性工作。大型生产过程的综合自动化,需要应用到现代控制理论的绝大部分分支。但是目前工程应用仍然主要是一些经典的控制方式(PID、前馈、串级、配比、分程),局部采用优化,如炼油厂裂解过程的卡边控制或静态解耦控制,有些工厂花了很大力量建立对象模型,多数也是以局部过程静态优化控制为目标的。卡边控制实际上是有限制条件的准优化控制。现代控制理论所以仅在局部设备范围取得成效,而在整体或大系统至今不见成效,原因是一个大系统为了经济的效益总要求优化,而静态优化比动态优化容易实现,Lasdon^[14]与Variaya^[15]采用稀疏矩阵的描述方法和多级静态优化的构思,可以解决变量多、计算时间长、存贮容量有限的困难,然而实际情况要复杂得多。除了上述诸因素外,还会遇到环境条件改变、设备老化、原材料及能源供应数量与质量的变化,这一些均要求按动态的概念来考虑优化问题。一个具有20个状态变量的线性二次型动态优化系统,按Bellman的动态规划或按Pontryagin的极大(或极小)值原理,至少要求128k的存贮容量^[16]。状态的概念许多人并不陌生,它是描述一个系统行为必须具备的最小一组参数。如简单对象 $1/(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)$ 就有三个状态变量,状态变量越多,求解二次型优化问题所需的乘法运算次数差不多按立方的规则增加,例如一个12阶的系统,在求优化过程中,仅用于计算Reccati方程就需进行 100×10^3 次的乘法运算。至于非线性时变问题,运算次数至少会增加一个数量级。这就是为什么现代控制理论尚没有在整体生产过程自动化系统中发挥应有作用的原因之一。Bellman称维数的增加是一种灾难。

工业生产具有时变、非线性、大滞后、互相耦合以及随机变化的特点,从理论上说,时变采用自适应方法,非线性采用补偿方法,大滞后采用预估方法,耦合采用解耦方法。一个高维对象实行二次型的最优调节尚感困难。为数众多的高维对象结合,而且包含有不少难于控制的特性存在,需要同时运用多种控制理论,其难度是可以想像的。作者认为综合整体优化控制在现阶段实现恐怕为期尚早,当务之急是开展现代控制理论与工程控制之间啣接技术的研究。

四、现代控制理论的界面技术

1. 系统各组成部分的同步简化技术

模型简化技术研究已有很久的历史,至今每年尚有数百篇有关模型的建立与简化方面的文章发表。模型简化是为了模型的应用。以金山石化总厂裂解炉控制 4×4 系统为例,如果不是将各通道的特性简化成一个常数,其求逆解耦方法就无法顺利地应用。模型简化追求时域与频域的拟合精度,在学术上有较大的意义,然而实际上阶次却降低得很有限,Bellman所称的维数灾难并没有得到根本的解决。我们曾做过一个试验,在系统的操作频率附近某个区域内拟合模型,模型可以得到极大地简化,若将这种模型应用于解耦系统,几乎可以达到理论上所述的完全解耦。在操作频率段上简化模型具有特别重要的意义,因为每一个系统都有一个固有的操作频率,此频率随着对象特性的变化而变化,因此需要一个拟合段。这比全频

带的模型拟合要简单得多,只要简化前后,两种模型提供系统的振幅与相角相同,我们就可以认为两种模型是等价的^[17]。在频率段上拟合模型不是理论上的倒退而是发展,因为应用频率段拟合模型的方法,要求对整体系统有比较透彻的了解,是在闭环动态的情况下作出的,可用性相当强,而且模型的简化同系统的设计是密切联系的,这就决定了模型简化必须同系统其它组成部分同步进行,我们称此方法为模型的动态同步简化技术。

2. 实用工程解耦技术

工业控制系统的一个特点是耦合,不少系统未能成功的原因,其中之一就是存在耦合引起系统之间的干涉振荡,轻者降低控制系统的调节品质,重者引起系统的失控。解耦控制是当前控制理论研究中的一个热门,如求逆解耦,状态反馈解耦,对角优势解耦。这几种解耦理论均已比较完善,但实用实例不多,其困难除了动态解耦复杂、计算次数多外,还有一个重要原因是这些解耦方法均无法解决奇异对象的解耦问题(即对象矩阵的逆不存在),而奇异对象耦合是最严重的,不解耦就无法控制,这个问题是现代控制理论中的一个难题。

解耦问题是多变量(或者说较大型的系统)能否实现自动控制的根本问题。尽管状态空间方法在航天方面取得成功,然而在工业过程应用中却感到困难,原因是应用此法要知道系统的各个状态,当然可观察的对象,也可以通过状态观测器间接知道系统的各个状态,这同经典控制只需要知道一个输出变量相比,显得复杂。更重要的是工业对象状态的划分十分模糊,这也给现代一些解耦方法的应用造成困难。Rosenbrock的一个贡献,我认为就是采用了传递函数矩阵的方法,用此法描述对象特性简明扼要,将拉普拉斯变换(或z变换)与线性代数联系起来,可以充分利用经典与现代控制理论的各自优点,这种方法被称为现代频率法。Rosenbrock在研究多变量解耦问题时指出,一个对角优势的矩阵,可以按单独的系统进行设计,系统间的耦合不会太大影响各个系统的调节过程^[18]。但是作出一个对角优势的矩阵也不是一件简单的工作,首先要求出对象传递函数矩阵的逆NYQUIST阵列和 GERSGORIN带,然后再进行伪对角化计算,计算后又得计算NYQUIST阵列和GERSGORIN带,不断更换约束条件直到获得一个对角优势矩阵为止,其计算的复杂与繁锁是可想而知的^[19]。即使如此,现代频率法同以往的方法相比算是前进了一大步。目前许多单位已开发了对角优势矩阵的计算机辅助设计软件包。这种解耦方法的应用仅见低维的对象。

我们在研究中发现,一种特殊结构的网络尽管简单,但可以对准奇异对象进行解耦,只要进一步研究其开环状态下的稳定问题,无论纵向与横向的系统间耦合,都可望得到解决^[20]。奇异对象可以采用塔形串级调节的方法来解决。因此,借助于传递函数矩阵的概念並同网络的方法相结合,可以发展一种大小系统兼容的工程化的解耦方法。

3. 非线性补偿式的自适应技术

线性系统已有一套成功的理论和设计方法。非线性系统虽然可以应用描述函数和相平面分析方法,但由于非线性系统容易产生自持振荡和极限环,人们总是设法利用互补的方法将本质是非线性的系统转化成线性系统。近年来,非线性分程比线性分程调节更能节约能源,加上非线性补偿方法实现自适应更加简化系统,人们开始认识到非线性方法的重要性,如Smith自适应预估,巧妙地运用了乘/除部件来达到系统的自适应。

自适应控制应用补偿的方法始于仪表,一台仪表也是一个小型的系统,电阻式温度变送器采用锰铜丝线绕电阻补偿温度的变化、调节阀门对数阀门特性的应用差不多超过线性阀门

的一倍,现代控制理论的发展,自适应理论更加成熟,如李雅普诺夫的稳定性第一法与第二法、参考模型法、梯度搜寻法,以及Popov的超稳定性理论,这些理论为自适应系统的设计提供了完备的理论依据。这些方法的应用遵循如下步骤:(1)测出对象特性参数的变化;(2)按照某个自适应准则制定自适应控制器;(3)实现特性参数的自动修改。单输入-单输出系统应用上述方法,一般困难不会很大,甚至可以仪表化,然而众多的系统耦合,实现自适应会显得异常复杂。不自适应,优化控制是没有意义的。

非线性补偿技术的研究,有可能找到工业过程控制一种简便的自适应方法。我们曾在 $K_0 e^{-\tau s} / Ts + 1$ 对象上,利用乘/除等非线性部件,改变 K_0 , τ 与 T 等参数,仿真结果表明,自适应效果是很理想的。这种技术的关键是实现“容易”与“困难”两部分对象特性的分离。分离的概念在Popov理论中已经提出,一个自适应系统,一部分满足Popov超稳定性积分不等式,另一部分满足正实条件。因此,在超稳定性方法的基础上,引入非线性补偿的方法,可使系统的设计大大简化^[11]。

我们希望通过现代控制理论与工程控制界面技术的研究,能使现代控制理论的应用变得更加现实。

五、系统对控制装置的要求

我们讲走中国式的仪表装置发展道路,从1958年开始已讲了将近三十年,是否集散系统就是我国控制仪表的方向,其目标是瞄准横河的CENTUM、福克斯波罗的SPECTRUM,还是山武-霍尼韦尔的TDC-2000。我觉得我国自动化与仪器仪表科研工作者应该独立思考,闯出一条适合于国情又比较符合控制理论需要的仪表装置。

1. 加强中间级的控制能力

从大中小机型分配的三级管理控制系统来看,上位机也仅局限于管理,而主要的控制任务可能落在中间这一级上。上位机如果执行控制也仅局限于静态,其条件不可能经常变化,而中间这一级,却往往是动态的,条件变化比较频繁,时常需要及时控制,动态优化与静态优化相对比,其计算工作量的增加是以数量级计算的。正如我们现代控制理论应用的困难所论述的,现代控制理论在整体优化系统中的应用为期尚早。因此上位机充其量是提供一系列的报表,即使干预控制也是慢速。由于中间级承担整体控制的主要任务,其信息数据就应该保存在这一级,没有必要将过程的全部信息保存在上位机,上位机制表通过通讯或对中间级下达指令,仅调入阶段结果的信息数据。从系统的角度看中间级的处理能力应该最强。

2. “面”形结构安全性好

集散系统“面”形结构会比“线”形结构更为可靠。“线”形结构中的某一点出现故障,系统工作就陷于停顿状态。“面”形结构,线与线之间可以互相挂勾,其中一条线的微机出现故障,其它线中的某一条可自动将故障的微机脱勾由自身代替,起码可以实现监督控制作用。这样“线”上的所有控制设备成为互相冗余,不仅大大提高可靠度,也给人以很强的安全感。

3. 需要有系列化的产品

微机集散系统的结构,是将微型机及有关设备挂接在一个通讯网络和数据公路上,因此

设计一个处理能力强、通讯流量大的通讯体制是最重要的,至于微机规模,可能差别很大,大型与小型,复杂的动态优化系统与简单的动态优化系统,都会有很大的差别,为了做到产品定型,就需要开发系列化产品。

我本人主张以通讯为主干线考虑集散系统的体系生成,以控制系统为主考虑设备的造型,结构中突出中间一级的功能,并形成一个“面”上的布局,插入线与线之间互相沟通的硬件化设备,使集散系统更加适合于系统的动态优化的需要。

参 考 文 献

- [1] Fasol, K. H. and Jorgl, H. P. Principle of Model Building and Identification, Automatica, 16, 5 (1980).
- [2] Landau, Y., Adaptive Control, Marcel Dekker, (1979).
- [3] 王永初编著,最佳控制系统设计基础,科学出版社,(1980)。
- [4] 奥斯特隆姆著,潘裕焕译,随机控制理论导论,科学出版社,(1983)。
- [5] Bellman, R., Dynamic Programming, Princeton University Press, (1957)。
- [6] 李维铮等,运筹学,清华大学出版社,(1983)。
- [7] Shinna, R., The Interface Between Industry and the Academic World, AICHE Symposium Series, 72, 159 (1972)。
- [8] 马少梅、王永初,评控制理论的实用化与工程化,自动化与仪器仪表, 1 (1983)。
- [9] 顾永明,日本横河的软件生产,工业仪表与自动化装置, 6 (1983)。
- [10] 周乃恒、王悦,过程控制与管理系统的结合,炼油化工自动化, 1 (1987)。
- [11] 甘和贵,美日集散系统的新动向,自动化仪表, 4 (1985)。
- [12] 上海FOXBORO公司服务中心, SPECTROM综合分散型过程控制系统简介,(1984)。
- [13] Digitronik Line/Uni-Box System Operator's Manual, Yamatake-Honeywell, June (1982)。
- [14] Lasdon, L. S., Optimisation Theory for Large Systems, MacMillan, (1970)。
- [15] Varaiya, P., Decomposition of Large Systems in Systems Theory, McGraw-Hill (1969)。
- [16] Pearson, J. D., Dynamic Decomposition Technique, McGraw-Hill, (1971)。
- [17] 王永初,数学模型的简化、降阶与整化的一种新方法,炼油化工自动化, 2 (1985)。
- [18] Rosenbrock, H. H., Process in the Design of Multivariable Control Systems, Trans Inst. Meas. Control, 4 (1971)。
- [19] Mac Farlane, A.G.J., Frequency-Response Method in Control Systems, IEEE, Press, (1979)。
- [20] 王永初,奇异问题的工程解耦,仪器仪表学报, 2 (1986)。
- [21] Patel, R. V., Multivariable System Theory and Design, pergamon Press, (1982)。

Linking up Modern Control Theory with Process Control

Wang Yongchu

Abstract

Based on the new trends and the author's work of process automation, this paper discusses the reason of why modern control theory will certainly find application in process control; it discusses also some difficulties in application and their overcoming; and finally, it expresses an opinion on developing automatic device in the light of the reality of process automation in our country as well as the capability of modern control theory for settling practical problems.