

国家教委科技委员会第二届第二次自动控制学科组

专题报告

前 言

国家教委科技委自动控制学科组继1992年在南京召开了第一次学术讨论会之后,1993年10月在西安召开了第二次学术讨论会.在本次会议上宣讲了20篇综合性的学术报告.和第一次学术讨论会一样,这里将这些报告经整理压缩后在《控制理论与应用》分两期发表,供读者参考和讨论.

经济和社会发展的需要推动着自动化学科高速向前发展.当前,自动化学科酝酿着新的突破和更广泛的发展.为使我国自动化学科更高效地发展,赶上世界潮流,我们认为组织本学科有关重要问题的讨论是有益的.这里刊出的只是部分学者对若干问题的见解,供同行们参考,欢迎大家批评指正,更期望有更多的同行来参与讨论,我们的讨论还将继续举行.若此举能对推动我国自动化学科的发展起到一点微薄的作用,则将是我学科组同仁们的最大快慰.

国家教委科技委自动控制学科组组长 冯纯伯

1993年4月

控制理论的发展与现状

——兼论复杂系统与智能控制

高为炳 霍 伟

(北京航空航天大学第七研究室, 100083)

1 引 言

控制理论经过数十年世界范围的发展,研究成果十分丰富,其中一些研究经过不断发展完善已经成为成熟的独立学科;还有一些研究经过一段时间的繁荣昌盛,大大促进了控制理论的发展,完成了历史的使命,现在看其本身的理论及应用价值却是有限的.当前,控制理论已渗透到几乎所有工程技术领域,新的问题、专题及学科分支大量涌现,五彩缤纷.但也会使人有目不暇接,无所适从之感.当前,高新技术的发展提出了形形色色的新问题,难度大,急待解决.面对这些新问题,现有的控制理论常常显得无能为力,使得一些问题甚至等不及理论上的准备及指点,已在实际中用各种技术手段着手加以解决.

在这样的形势下,本文希冀对控制理论的发展及现状进行纲领性的分析与探讨,了解主线索及脉络,以便在对未来的发展做探索时能有所帮助.

2 控制理论的发展:从经典到现代

经典控制理论的最主要的特点是:线性定常对象,单输入单输出,完成镇定任务.即便对这些极简单的对象、对象描述及控制任务,理论上也尚不完整,从而促使现代控制理论的发展:对经典理论精确化、数学化及理论化.

现代控制理论中首先得到透彻研究的是多输入多输出线性系统,其中特别重要的是对刻画控制系统本质的基本理论的建立,如可控性、可观性、实现理论、典范型、分解理论等,使控制由一类工程设计方法提高成为一门新的科学.同时为满足从理论到应用,在高水平上解决很多实际中所提出控制问题的需要,促使非线性系统,最优控制,自适应控制,辨识与估计理论,卡尔曼滤波,鲁棒控制等发展成为成

果丰富的独立学科分支。

3 现代控制理论的进一步发展

控制理论的发展,与其他学科一样,依赖于工业、科学、技术提出的越来越高的要求。“现代控制理论”这一名称是1960年卡尔曼的著名文章发表后出现的。而在此之前,钱学森教授在五十年代就已发表了《工程控制论》的专著^[1],并为当时几乎所有论文以突出形式加以引用。工程控制论,从广义上看,是控制学科最具远见卓识的科学预见与理论,现代控制理论只是其一个分支。

控制理论的进一步发展,包括以下方面:

1) 其它动态系统的研究

这里可以指出的有(包括早期已有较大发展的部分学科):非线性系统、时变系统、随机系统、分布参数系统、大规模系统、模糊系统、机械系统以及不确定系统等。

非线性系统,其基础是李亚普诺夫理论,从过去以至今后,这一最普遍的原理都起着重要的作用。对鲁里叶系统的长时间研究,对非线性控制理论的发展起到了重要的历史作用。近些年来出现的微分几何及微分代数理论,为非线性控制的深入研究提供了新的工具。但非线性控制理论的研究将是旷日持久的,也是十分艰巨的。

时变系统,由于数学表达的困难,特别是对“时变”有了本质的了解:“随环境而变”,研究已转入“自适应系统”或“不确定系统”。

大规模系统,当考虑了系统的内部信息结构时,称组成系统的各部分为“子系统”,系统就被称为“大系统”。这种考虑是期望用子系统及其关联的性质来对大系统的性质作出某些判断,提供较简化的,但常常保守的分析方法。现在已明确,今天的大系统理论完全不能构成第三代控制理论。

机械系统,其模型可用拉格朗日方程表为一2阶非线性系统,因为机械系统本身具有许多特殊性质,如匹配条件及可全局线性化条件自动满足;具有关于功、能、动量、动量矩等的一些便于利用的力学性质等,故将其表为一般非线性系统 $\dot{x}=A(x)+B(x)u$ 的形式来研究是不明智的,这实际上是将简单问题的研究复杂化了。

不确定系统,一方面是相当多的实际系统的数学描述,更重要的是在理论上为自适应控制、鲁棒控制等多个独立学科间架起了桥梁。

2) 控制任务的多样化

经典及现代控制理论的任务在于寻求(反馈)控制,使得闭环系统稳定。这就是通称的“镇定问题”。到了二十世纪,工程技术不断地提出新的控制任务,它们远远不可能用镇定来概括,必须发展新的概念、理论与方法。这方面的例子是很多的。

车间调度控制,在工程上为FMS及CIMS,理论上出现了DEDS(离散事件动态系统)理论。尽管目前尚处初创阶段,但要求完成的任务已远比镇定复杂多了。化工过程、车间、煤矿采掘面等各种工业过程要求实现的最简单的任务有:监控、预警等,远远超出镇定的范围。拟人机器人,智能机器人及车,要求实现的任务更是多种多样的,如跟踪、代替人作各种操作以及简单的装配任务等。

类似的例子在几乎每一工程技术领域(从土木工程到医学)中都是大量的。这一趋势是明显的,也是必然的。自动控制就是由系统来代替人控制,随着科学技术的发展,人们的控制活动越来越多,因而控制的任务也会越来越复杂和困难。

3) 专业学科化的发展

因受控对象的性质千差万别(从分子级到摩天大楼级),属于不同的学科,各学科又有自己的独特之处,所以在各门学科中相对独立地发展控制理论及方法,是很自然的。事实上在学校中,很多系(从电气、电子、计算机到机械、化工、土木),社会上很多研究所,从理、工到农、医、材料、交通等,自动控制都是其重要组成部分,而且都具有自己的特点,研究的内容及解决的方法更具差异。下面是几个例子,以示一般。

太空飞行器上的空间机器人,具有自己的特点:多体系统、受非完整约束、自主控制、遥控、装配等等。拟人机器人,要求具有计算机视觉、触觉、声觉、自主控制、应付复杂环境(避碰,避雨及雷电)等等。机器人班组控制,要求跟踪、操作、适应复杂环境、自主控制之外,还要求能避免内力对抗、运动及力量的协调等。自主控制,要求具有失误预报、失误诊断、自修理或自重构形等能力。智能材料具有及时预告缺陷及损伤,自加强等功能。血管内的“聪明药”具有发展到可能发生阻塞部位,进行修整的能力。又如对材料进行外部施力控制作用,以达到改变结构力学性能的研究也在进行之中。

这类的例子不胜枚举,而且科学预测、科学家的努力、以及实验室研究均显示其光明前景,特别是改变世界科技状态的巨大可能性^[2~5]。

4 复杂系统与智能控制

从以上所述可以看出,当前迫切需要解决的控制问题是十分复杂而困难的,远不是用现代控制理论中已有方法所能解决的。是不是可以说控制理论发展的新时代——智能控制时代已经来临?我们先分析几个重要概念。

近年来,控制界非常热心于“复杂系统”及“智能控制”的提倡、计划及研究,也发表了一些见解与成果,这是一个很好的现象。从中可以看出大家对复杂系统和智能控制的理解是不相同的。这种情况也发生在国外一些发达国家。似乎经过几年之后,已取得这样的共识:新兴学科的定义及内容没有必要进行争论;只要所研究的问题含义明确,作出的任何成果都是对学科的形成与发展有益的。

复杂系统通常是针对研究的对象而言的。有些文章中将非线性系统、DEDS等均视为复杂系统。对智能控制的理解,差异就更大。

我们的看法是:复杂系统的特征可概括为以下三个方面:

1) 复杂对象(Complex Plant):难于用常规数学工具建模并研究的对象,如多机械组成的系统,大型工业生产过程,自动化工厂等。

2) 复杂任务(Complex Task):镇定问题(这里镇定是广义的,包括调节、跟踪)所不能包括的任务,如在2之2)中所述,当然还有更复杂的任务。

3) 复杂环境(Complex Environment):现有控制理论通常假设对象是孤立的、自由的、但实际却常是开放的,受到外部环境制约。如自动车在种种环境中行驶与避碰,煤矿采掘面的多变工作环境,人对高度开放系统的干预等。这时环境对控制有巨大影响。

我们称具有以上特征的系统为复杂系统,或称为3C系统。复杂系统在对象、环境及任务这三方面中至少有一个是复杂的。解决这类系统的控制问题,必须跳出建立在简化的理想数学模型基础上的现代控制理论的框架,真正面对系统的复杂性,提出新的概念和模型,探索新的方法和手段。这类3C系统的控制问题即构成智能控制。智能控制是一个很大的领域,具体3C系统的控制研究也可冠以其学科或专业对象的名称,不一定非用“智能”二字。

以上所述并非要给出智能控制的一个严格定义,这里只是想指出智能控制作为控制理论的最新发展阶段,它所包括的异于传统控制的新内容。另外,这种观点使我们对智能控制的研究途径有一个初步的认识,即从分解复杂任务、感知复杂环境、控制复杂对象入手,研究和发复杂系统智能控制具有共性的基础理论和方法。

5 智能控制的现状与发展趋势

经过八十年代的孕育发展,特别是近几年来的研究和实践,国际上已认识到采用智能控制是解决复杂系统控制问题的主要途径,并已纷纷付诸行动。

在目前发表的工程类文献中,从现代控制理论向智能化发展的研究越来越多。如带有智能功能的传统控制(自适应控制、鲁棒控制等),基于传感器或行为的智能反馈控制,学习控制和循环控制,故障诊断及容错控制,以生产调度管理控制为背景的离散事件系统研究,机器人班组自组织协调控制^[6],自主控制,以及控制系统的智能化设计等等。另外,用人工智能方法解决控制问题的研究也日益增多,如:决

策论,带有专家系统的监控、预警及调度系统,用神经网络实现控制的系统^[7,8],基于符号表示、模糊逻辑等设计的控制系统,模式识别与特征提取,智能机的应用等.特别是近年来对现场人工智能的研究,更在将人工智能的研究成果用于智能控制的道路上大大前进了一步.

当前在许多专业化学科与工程中,针对特定对象的具体复杂性,综合运用各种智能控制策略,力求实现具体 3C 系统的智能控制.如机器人研究中的智能机器人,航空航天工程中空间机器人的自主控制,以智能材料为基础的智能工程等.另一方面,更为抽象的一般智能控制原理的研究,如“拟人”与“拟社会”原理、分解集结原理、递阶控制(层次递阶与时序递阶)原理,智能控制结构体系等的研究也在积极进行.

可以说当今智能控制研究中存在着两种趋势.一种是分别从“现代控制理论”和“人工智能”这两个基地走向智能控制;另一种是分别从“专业化学科与工程”和“一般原理”这两个基地走向智能控制;且不论从哪种趋势看,从前一个基地出发进行智能控制研究都是非常重要且切实可行的.

从上述研究现状及发展趋势看,研究复杂系统的智能控制,要综合运用控制理论、运筹学、人工智能、信息科学及计算机科学的最新成果,并加以发展,创新.智能控制的发展将需要并促进各相关学科中新的理论及技术手段的发展,如:感知环境的信息采集、数据处理与融合,以及为实时处理和控制在所必须的计算技术及实现手段的研究等等.特别是将引起众多学科的相互交叉、渗透与融合.极大可能的是,智能控制并不像最优控制那样,是一个有相当系统化理论的单一学科,而是包括若干学科的一个领域的统称,正象现代控制理论包括:线性系统、最优控制……一样.因此,对智能控制的研究应当是多侧面的,每个从事有关研究的人员都可以自己当前的研究为基地和出发点,脚踏实地地进行复杂系统智能控制研究,为其发展做出自己的贡献.

智能控制的研究目前尚处初期,它的研究范围及人们对它的认识也在不断发展之中,它的建立将是一个历史时期的任务.随着历史的前进,人类必将把自然及社会上越来越多的事物置于科技的控制之下,发挥出科学技术的更大威力.

6 结 论

控制理论的发展,经历了经典理论、现代理论,到今天的智能控制,是科技进步的必然.智能控制是以研究复杂系统(3C 系统)控制为目标,它不是一个具体课题或一个学科,而是一个研究领域,可以从很多不同的角度出发来研究、发展它,其中从控制理论及工程角度出发进行研究就是十分重要的途径之一.

参 考 文 献

- [1] 钱学森著.戴汝为译.工程控制论.北京:科学出版社,1958(亦可参阅“Tsien H. S.. Engineering Cybernetics, McGraw-Hill Book Company, 1954”和钱学森,宋健.工程控制论.修订版.北京:科学出版社,1980)
- [2] Moore K. L., Dahleh, M. and Bhattacharyya S. P.. Iterative Learning Control: A Survey and New Results, J. of Robotic Systems, 1992, 9(5):563—594
- [3] Fu, K. S.. Learning Control Systems and Intelligent Control System: A Intersection of AI and Automatic Control, IEEE Automat. Contr., 1965, AC-16(1):70—72
- [4] Antsaklis P. J., Passino K. M. and Wang S. J.. An Introduction to Autonomous Control Systems. IEEE Control System Magazine, 11(4):5—13
- [5] Stengel R. F.. Intelligent Failure Tolerant Control. IEEE Control System Magazine, 11(4):14—23
- [6] 高为炳.机器人班组的递阶自组织控制.自动化学报,1994
- [7] Hunt K. J., Sbarbaro D., Zbikowski R. and Gawthrop, P. J.. Neural Networks for Control Systems——A Survey. Automatica, 1992, 28(6):1083—1112
- [8] 高为炳,程勉.智能运动控制.控制理论与应用,1992,9(3):300—303

神经网络控制的现状及问题

冯纯伯 刘延年

(东南大学自动化研究所·南京, 210018)

1 引言

神经网络提出已有几十年了,它首先被用于解决模式识别等一类问题。由于 Minsky 和 Papert 合著的《Perceptron》一书指出了当时存在的问题,一度使这方面的研究走入低谷。随着八十年代神经网络理论取得突破性进展,神经网络控制作为智能控制新的生力军,引起自控界的广泛注意,其原因是两方面的:一方面是现代控制面临新的挑战,例如系统愈来愈复杂,存在多种不确定,存在难以确切描述的非线性特性,而控制的要求愈来愈高,因此人们迫切需要提高控制系统的智能,使之能够对付所面临的问题。专家系统等智能控制方法又缺乏数学理论基础和通用性,与常规控制之间难以建立联系。另一方面,神经网络源于对脑神经的模拟,具有以下对自控界有吸引力的特点:1) 能够逼近任意属于 L_2 的非线性函数。2) 采用并行、分布式存储和处理信息,容错性很强。3) 便于用大规模集成电路实现。4) 适用于多信号的融合,可同时综合定量和定性信号,对多输入多输出系统特别方便。5) 可实现在线或离线学习,使之满足某种控制要求,灵活性很大。这些优点若能充分发挥,则可能获得对非线性系统,特别是很难确切地描述的系统,进行控制的一种新的途径,对于这类系统现有的控制方法存在许多缺陷。由此可见,神经网络控制确实是值得深入研究的课题。但必须指出,神经网络控制存在大量的理论问题有待解决。经过近年来的研究,一些基本问题逐步明确,还有不少问题尚未能充分显现出来。已经明确的理论问题,要能在理论上有着切实的解决,存在很大的难度。原因是多样的,例如:一般非线性动态系统的分析本是一个难题;高维变量的非线性优化问题尚没有令人满意的结果;等等。文献中有关于神经网络控制成功的多种实例的报导,但理论分析明显不足,这说明深入研究神经网络控制中存在的理论问题是很有价值的,也是必须的。

最近, Hunt 等 (1992) 在 Automatica 上发表了一篇较全面的综述文章。为节省篇幅,我们直接引用该文中的插图及参考文献。

2 神经网络的结构和学习算法

所谓神经网络就是由称之为神经元的简单单元按并行结构经过可调的连接权连接而成的网络。神经元一般由三部分组成:加权求和部分、线性动态部分和非线性函数映射部分(见 [1] 中图 2)。网络中神经元的输出信号 y_i 和外界输入信号 u_i 经过加权求和进入线性动态系统,线性动态系统的输出信号 x_i 再经过非线性映射成为该神经网络的输出 v_i , 其中各部分的输入输出关系分别为

$$v_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij} g_j(t) + \sum_{k=1}^M b_{ik} u_k(t) + w_i,$$

$$x_i(t) = \int_{-\infty}^t h(t-\tau) v_i(\tau) d\tau,$$

$$y_i(t) = g(x_i(t)).$$

神经网络的种类很多,这里仅简要介绍一下在控制中用得较多的多层前向 BP 网络 (Rumelhart et al., 1986) 和 RBF 网络 (Ballard, 1988), 以及 Hopfield 网络 (Hopfield, 1984)。

多层前向 BP 网络和 RBF 网络均为由具有 $h(t) = \delta(t)$ 的线性系统的神经元分层连接而成的静态网络,同层神经元、隔层神经元之间均无互连,只有邻层神经元之间相互连接,信号由低层向高层神经元传输。其网络输入 u_i 和输出 $y_i^{(3)}$ 的关系分别为

$$y_i^{(3)} = \sum_j a_{ij}^{(2)} g \left(\sum_j b_{ij}^{(1)} u_j + w_i^{(1)} \right),$$

其中

$$g(\gamma) = 1/(1 + \exp(-\gamma)) \quad \text{或} \quad \tanh(\gamma)$$

和

$$y_i^{(3)} = \sum_j a_{ij}^{(2)} g(\|u - c^{(i)}\|),$$

其中

$$g(r) = r^2 \log r \quad \text{或} \quad \exp(-r^2/2), c^{(i)} \text{ 为中心点.}$$

学习算法前者有 BP 算法 (Rumelhart et al. 1986), 后者可采用最小二乘算法等线性系统的优化算法.

BP 网络和 RBF 网络均具有很强的生物背景和逼近任意非线性函数的能力. 前者的输出与网络的连接权之间呈非线性关系, 这使得其学习算法必须采用非线性优化方法, 因而不可避免地要存在局部极小点的问题. 对于后者, 则具有唯一最佳逼近点的优点, 其网络的连接权与输出呈线性关系的特点使得它能采用可保证全局收敛的线性优化算法, 但其中心点集的选择不易.

Grossberg (1976) 在研究生理现象的基础上, 提出了几种神经网络的非线性动态模型, Hopfield 网络便是其中一种特例, 它由非线性映射关系为 Sigmoid 型函数的神经元相互连接组成, 其状态空间表达式为

$$T_i \dot{x}_i = -x_i + \sum_{j=1}^N a_{ij} g(x_j) + u_i, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

此网络主要用于解优化问题, 网络的稳定性问题虽经 Michel (1989) 和 Li (1988) 的研究有了一些进展, 但至今尚不能认为已得到彻底解决.

3 基于神经网络的系统建模

神经网络具有可逼近任意非线性函数的能力, 故可用它建立非线性系统及逆动态的模型.

对于非线性系统

$$y(t) = f(y(t-1), \dots, y(t-n_y), u(t-1), \dots, u(t-n_u)),$$

相似于线性系统的辨识, 可有两种神经网络的辨识模型, 一种是串并联辨识模型

$$\hat{y}(t) = N(A, y(t-1), \dots, y(t-n_y), u(t-1), \dots, u(t-n_u)),$$

另一种是并联辨识模型

$$\hat{y}(t) = N(A, \hat{y}(t-1), \dots, \hat{y}(t-n_y), u(t-1), \dots, u(t-n_u)),$$

其中 $\hat{y}(t)$ 为神经网络的输出, A 为权空间. 前者可采用 RBF 网络或多层前向 BP 网络, 以对象的经过时延的输出 $y(t-i)$ 和输入 $u(t-i)$ 为网络的输入, 对于 RBF 网络, 辨识算法可采用最小二乘算法, BP 网络则采用 BP 算法及其改进算法. 后者一般采用带输出反馈的多层前向 BP 网, 以经过时延的神经网络的输出 $\hat{y}(t-i)$ 和对象的输入 $u(t-i)$ 作为网络的输入, 辨识算法一般选用 Werbos (1990) 的 Backpropagation through time 算法.

对于系统的逆动态, Psaltis (1988) 提出两种辨识方案 (见 [1] 中图 5). 一种是将逆动态神经网络模型串联在被辨识对象之后, 另一种是串联在被辨识对象之前, 并将已辨识好的对象的前向动态神经网络模型与被辨识对象相并联. 后者虽比前者复杂, 但取消了被辨识对象应为可逆系统的要求, 避免了前者所涉及的输入信号的选取问题.

将神经网络作为系统的辨识模型, 存在的问题很多, 归纳起来, 有以下两个方面:

从神经网络模型方面看, 存在对不同的非线性对象神经网络模型的选取及其结构的确定等问题. 对这方面问题的解决, 一是依赖于对现有的神经网络进行研究, 二是采用神经网络的思想提出新的神经网络.

从非线性辨识方面看, 存在充分激励、过参数辨识、带噪声系统的辨识、辨识算法的快速性和收敛性等等问题, 对这方面问题的解决, 需要将现有的非线性理论和优化方法应用于其中并加以发展.

4 神经网络控制系统

所谓神经网络控制系统, 就是利用神经网络这一工具的控制系统. 神经网络在控制系统中所起的作

用可分为以下几大类:第一类是在基于模型的各种控制结构中充当对象的模型;第二类是充当控制器;第三类是在控制系统中起优化计算的作用;第四类是与其它智能控制方法如专家系统、模糊控制相融合,为其提供非参数化对象模型,推理模型等。这里仅介绍神经网络在几种应用较多的控制结构中的应用情况。

1) 监督控制

基于神经网络的监督控制就是训练神经网络使其逼近从人的感观到人的决策输出的映射,以获得拟人控制器去控制系统, Grant (1989) 的倒立摆控制系统即属于此类控制。此类控制无反馈,因此鲁棒性差。

2) 逆动态控制系统

把被控对象的逆动态神经网络串联在被控对象之前所构成控制系统就是逆动态控制系统。Miller (1990) 编辑的书中有不少在机器人控制方面的应用实例。此控制结构要求对象动态可逆,而对于非线性系统其可逆性的研究相当困难。

3) 内模控制系统

线性系统的内模控制具有鲁棒性强和易于进行稳定性分析的特点, Hunt (1991) 将其推广到非线性系统控制中,提出了非线性系统的神经网络内模控制系统(见文 [1] 中的图 7)。该系统将被控对象的神经网络模型与被控对象相并联,将其逆动态神经网络模型串联在它们的前面,在逆动态模型之前还串联了一线性滤波器,并将被控对象与其前向动态神经网络模型的输出之差作为负反馈信号,反馈到整个控制系统的输入端。仿真效果良好。此控制结构对于线性系统要求被控对象开环稳定,对于非线性系统,要求如何,有待研究。

4) 预测控制系统

神经网络预测控制系统(见文 [1] 中的图 8),就是利用作为对象辨识模型的神经网络产生预测信号,然后采用优化技术求出控制向量,从而实现对非线性系统的预测控制,进一步,得到最优控制轨线后,还可再训练另一个作为控制器的神经网络,使其逼近此控制函数,训练结束后,由此控制器直接对被控对象进行控制。

5) 模型参考自适应控制系统

Narendra (1990) 提出了非线性系统的神经网络模型参考间接自适应控制系统(见文 [1] 中图 6),其控制结构与线性系统的模型参考自适应控制系统完全相同,只是被控对象的辨识模型为神经网络。此控制系统借助于神经网络,将自适应控制推广到非线性系统,思想是很好的,但现仅停留在仿真阶段,理论分析有待进行。

6) 线性系统的控制

Chi (1990) 利用 Hopfield 网络的优化计算能力,对线性被控对象进行实时辨识,成功地对一时变线性系统进行了自适应控制。Guez (1988) 利用 Hopfield 网络联想记忆的能力,实现了根据系统状态的变化调整 PID 参数。这类方案的思路是好的,但有些缺乏理论根基。

神经网络控制系统用于控制非线性对象,由于神经网络的自学习、自适应性使其与线性系统的自适应控制系统有许多相同之处,直观地看,许多概念,理论似乎可以平移,但由于从线性系统到非线性系统是一个质变,要解决与自适应控制初期所面临的同样的问题,如稳定性问题、结构问题、鲁棒性问题等等,难度要大得多,这方面的研究已开始引起人们的注意,但要获得大的突破性进展,必须将现有的非线性理论加以充分利用和发展。

5 有待深入研究的若干主要问题

在前面的介绍中已经提到了一些有待研究解决的问题。这里再根据笔者的理解作一些归纳,以供讨论。

1) 关于神经网络方面

1° 一致认为现有的学习算法收敛速度太低,而且在许多情况下可能存在局部最优问题,因此如何提高学习速度就显得特别迫切.这一问题的解决有待于多变量非线性优化方法和理论的进展.从工程角度看,若能用某种智能搜索的办法,快速求得次优或可行解也是有重大意义的.学习算法和神经网络的结构密切相关,新的算法应和新的网络结构结合在一起进行开发研究.

2° 神经网络的重要优点在于分布式存储和平行处理信息,但是有用的信息是如何存储在网络中的各元之中的,其机理尚不清楚,因此关于网络结构的选择缺乏充分的理论分析,究竟选择几层?每层有多少个神经元为可行?对此目前只能凭经验.神经网络的特色在于多层多元连接.PDP 小组认为连接就是微推理过程,我们能得到的只是输入输出之间的映射,但对于这种输入输出关系中隐含的“规则”、“参数”、“主要特征”是如何存储、存在何区域,以及如何建立在网络之中的并不清楚,这就给应用带来困难.

3° 需要创造更适用于控制的专用神经网络.控制中用的神经网络要面向不确定动态系统的信息处理,这和模式识别中的静态模型处理应有所差别.

2) 关于控制系统方面

1° 目前的研究证明神经网络可以实现对任意属于 L_2 的非线性函数的逼近,但对于要满足什么条件才能实现这种逼近,则讨论很少.这一问题与学习算法密切相关.以建模为例,这也是非线性系统的可辨识性和辨识条件的问题.对于非线性系统重叠原理不能成立,因此这一问题的解决要困难许多.

2° 需要研究建模算法和控制系统的收敛性和稳定性.前文已经指出,由于被控对象和神经网络本身都是非线性的,因此这一问题的解决有很大的难度,看来可能要创造新的分析方法.

3) 需要创造神经网络控制系统的新结构

目前的神经网络还存在一些不足,特别是在线学习难以满足要求.但实践中已有许多成功应用实例.在神经网络已有成果的基础上,如何选择更合适的控制结构,将神经网络控制和其它控制方法有机地结合,取长补短,等等,则有较多的创新余地.

总的来说,有待研究的问题很多,无疑神经网络控制是一个挑战性很强的领域.由于它可能是处理非线性不确定性系统的有力途径,因此对其研究是十分吸引人的.

参 考 文 献

- [1] Hunt K. J., D. Sbarbaro, R. Zbikowski and Gawthrop, P. J., Neural Networks for Control Systems-A Survey. *Automatica*, 1992, 28(6):1083-1112

优化新技术的进展与自动控制

吴沧浦

(北京理工大学自动控制系, 100081)

1 引 言

优化技术在自动控制中几乎是无处不在的.在控制系统的建模与辨识中,各种类型的控制系统的设计(从简单的 PID 控制系统到复杂的离散事件系统的设计)中,在各种不同要求的控制(自适应控制、鲁棒控制、容错控制等等)中,都要求优化技术.

优化技术发展的主要推动力来自自动控制,这一点从众所周知的下一事实表现得特别明显:最优化理论的重要分支,从古典的变分学发展到现代变分学即最优控制中的最大值原理和动态规划与 H-J-B 方程理论,主要是由自动控制和系统工程问题的需要而推动的.反过来,优化技术的发展又推动自动控制的发展.例如,使神经网络技术的研究从低谷重新复苏,起关键作用的是 Hopfield 神经网络的发现,而 Hopfield 神经网络正是作为解决著名的优化难题——旅行商问题(TSP)——而提出的.在神经网络从低

谷重新复苏之后,神经网络主要是作为解决自动控制问题的新工具而蓬勃发展的。

当前,自动控制技术对于优化技术的挑战主要来自下列四个方面:1)非结构问题。例如,核电站的维护,深海探矿,作战指挥自动化,企业管理的决策支持,空间卫星和航天站的装配和修复等问题都提出了许多实质性的非良定提法和非良定环境的优化计算问题,这些问题都是传统的优化技术所无法解决的。2)大维数和超大维数的系统的优化问题。在这里,维数的大小视问题的类型的不同而具有相对性。这种大系统或超大系统除去由实际问题自然形成(例如工业系统或通讯系统)之外,还可能来自问题模型的转换。例如,根据动态规划理论,一个一般提法的随机控制问题,可以转换成一个等价的确定性控制问题;但是经过这样的等价转换之后,其动态规划模型中的状态一般将变成无限维的。3)实时控制和预报对于计算高速性的要求。4)在指标函数明显具有众多的不同的局部最优解,且其相应的优化指标值有明显的差别时,对于求出全局最优解的要求。

在上述挑战下,优化技术在近年来获得许多新的进展,本文将简要介绍这些进展并阐述它们在自动控制中的意义。

2 普适的优化技术

优化技术包括作为其基础的理论与实际问题的工具与算法。本文着重于讨论工具与算法。近年来发展起来的优化新技术,如果从其方法论的根源来区分,可分为三类:其一为智能方法,其基础思想来源于模仿人脑在处理优化问题时的活动。目前已达到实用阶段的技术有传统的人工智能技术和神经网络技术。其二是并行和分布处理方法,其基础思想来源于计算机技术的进展,特别是计算机体系结构的改进。其三是随机搜索方法,这里指的是目前最受注意的三种方法,其基础思想都来源于模仿自然界的优化过程,如生物进化过程,金属晶体的有序重列过程等。

2.1 智能方法

科学技术界对一般的智能方法的研究的最终目的是制造出具有人脑的主要功能如识别、认知、学习、推理、综合、分析、判断、决策等的机器,诸如学习机,智能计算机,智能机器人等。但目前科学界对于人脑的智能活动的机理的了解尚处于非常粗浅的阶段,专家们估计,至少还需要半个世纪才能对它达到比较清楚的了解。目前达到实用的智能方法还是所谓的“传统人工智能”和新近蓬勃发展的神经网络。这两者不论从方法论上还是从功能上区分都很大的区别。从方法论上讲,传统人工智能属于所谓的“符号与逻辑派”,而神经网络则属于所谓的“神经生物派”或“连接主义派”。按照 Rumelhart 的见解,传统人工智能根据自然哲学的理性和还原的传统,认为存在一个基本的形式化的表示系统(万用符号系统)和逻辑系统,它们可以反映所有与人脑智能活动有关的客体、行为和关系,并且可以充分地用来再现一般的人脑智能活动。作为此学说的积极支持者,Newell 和 Simon 还提出一种见解:认为一旦找到上述那样的系统,全部的人类智能活动可以用数学定理和形式逻辑来描述,从而实现其自动化。但是近年来的研究却对上述的学说和见解提出了否定的意见。例如,符号论的方法无法实现联想推理和源自经验的认知。此外,由于传统人工智能完全忽视了在人脑做出有意识的决策前的大量的下意识过程,而这些过程的作用是滤掉大量的无用或无关紧要的情况以保留适当的有用规则,因而它具有严重的局限性,即缺乏对于面临的千变万化的情况的灵敏性,或者说,缺乏随机应变的强适应能力。这一点,也是神经网络技术能够蓬勃发展起来的一个原因。

不论是传统人工智能技术还是神经网络技术,作为优化技术的新手段目前都已处于实用阶段。现在有关学界对下列一重要问题:是否能将传统人工智能方法与神经网络方法结合起来以发展新的智能方法,存在不同的看法,有的持肯定态度,有的持否定态度,这是一个与智能方法的进一步发展有关的重要问题。

无论如何,两种方法都已获得成功的范例。况且,大量实践已证实智能方法无疑是发展优化技术的具有很大潜力的新方向。一个很有说服力的例子是,50年代中科院运筹室在研究线性规划在粮食调运方案规划的应用时发现,业务部门的工作人员在他们长期工作经验的基础上创造出来一种表上作业法,由

此作业法得到的调运方案与在严格的线性规划理论上得到最优方案是一致的,而所有这些工作人员在获得该方法之前并未曾学习过线性规划。此外,许多工厂的现场经验都证明,某些高度熟练工人对机器的操作可以达到很接近于机器的最优运行状态。这说明人脑在依靠经验寻求最优情况方面具有不寻常的巨大能力。这种现象正是许多传统人工智能专家系统的设计基础。但是,基于前面阐述过的理由,专家系统在实现人脑的这种智能能力方面不会是完善的,而神经网络在这方面具有其独特的巨大潜力,迄今为止,神经网络在求解组合优化、线性规划、非线性规划、动态规划等所取得的成就,也是神经网络在智能优化技术中具有令人鼓舞的前景的有力旁证。

关于神经网络与优化技术的关系,应指出它所具有的双重作用。一方面,神经网络提供了解决广泛类型的自动控制中优化问题的新手段,另一方面,神经网络本身又提出一些优化问题,例如反传算法中的优化问题。

神经网络解决优化问题的优点首先在于其快速性,利用硬件构成的电路网络,其解题时间几乎是瞬间完成的。通常电路的元件的精度会影响运算的精度,例如解线性和非线性规划,文献上报告的误差达到 3%。但我们所作的一个解最优控制的神经网络,在经过对元件的细致筛选之后,可使误差降到 1% 以下。

2.2 并行和分布处理方法

严格地说,并行和分布计算机并不是完全相同的概念。通常,并行计算机的计算单元都安装在一台计算机内,或者,至少这些单元互相间没有长距离的通讯,因此,信息传递的费用、时延、误差等在并行计算机中通常是不考虑的,而在分布计算中则须考虑。

并行分布处理与神经网络的发展紧密相关,它们各自有独立的内涵,相互间有相交重叠部分,也有不相重叠的部分。有人也将神经网络称为并行分布处理器(Rumelhart, 1986)。这是因为神经网络的一个基本特征是神经元的大规模并行处理,但是神经网络的神经元之间存在相互作用(即权),这些相互作用的强度可以逐步调整以适应外界的变化或适应所追求的目标。此外,各个神经元的信号处理比较简单和划一。而在并行分布计算系统中,每个单元是一个处理器,甚至是一个微计算机,可以进行不同的复杂运算。通常,在并行或分布计算网络的单元之间,除了信息传输之外,没有其他的相互作用。

目前,几乎所有的传统的优化算法,包括线性规划、非线性规划、动态规划,都已发展了相应的具有各种不同特征的并行算法,但是一般具有针对特殊的优化模型的特征,因之,还有许多空白有待填补,特别是与上述三种基本规划相应的多目标规划的并行算法,研究成果还比较少。此外,一些新发展的优化算法,如下面要讨论的模拟退火算法等,都已发展出各种形式的并行算法。

并行算法的优化技术的主要优点也是提高计算速度,此外,适当设计的并行算法还可以减少对存储容量的要求,这对于大维数优化问题是很重要的。分布式算法对于大系统的分布计算机控制是特别适宜的,这种分散形式的控制对于某些实际系统如通讯系统、灾害监控系统等来说是自然形成的需要。

2.3 随机搜索方法

优化技术中的随机搜索方法在没有引入任何自然机理时就是完全随机的蒙特卡罗方法。目前最受注意的三种方法是模拟退火算法,遗传算法和进化论算法。模拟退火法的自然机理来自金属晶体的有序重列。这一基于统计物理理论的现象说明金属在退火过程中,适当地控制温度,可以使能量函数达到最小。遗传算法和进化论算法的自然机理都来自生物进化现象,即达尔文的物竞天择,优胜劣汰的学说。这些优化算法的主要推动力都是想要克服寻找全局最优解的大难题。在寻找全局最优解的研究中,目前可以分成两大类方法,一类是确定性方法,另一类即上述的随机性方法。由于在一般情况下,求全局最优解是一 NP 完全或 NP 困难问题,因此,可以相信,只有对于很特殊类型的优化问题才能利用确定性方法求到其全局最优解;而在一般情况,全局最优解的寻求只能在概率的意义下达到,而随机搜索方法得到的全局最优解,正是在概率的意义下达到的。

上述三类方面,分别经历了一二十年的发展,目前存在着许多变种,总的说具有普适性,但也有最

有效地解一类问题的特殊性。由于现在尚未建立一具有较大普遍意义的统一理论,因之尚难于比较这些算法的优劣,这一点对于这些算法的进一步发展也是不利因素。不过,总的来说,这些方法对于带有组合特征的控制系统优化问题都是比较有效的。

3 新问题或模型提出的优化技术

以上讨论的是一般的优化技术,是对于任何优化问题和任何模型都适用的。本节讨论近年比较重要的针对特殊问题和模型的优化技术。

3.1 半无限规划

优化问题可以描述为与一般非线性规划类似的模型,其区别只在于,在半无限非线性规划模型中,约束条件中存在一族参量,这些参量在一连续系统的集中取值,例如一单参量在一区间中取值。在控制系统设计中,特别是在对控制系统的关于某些干扰参量的鲁棒性要求的设计中,可以形成这样的模型。在系统工程例如环境保护控制问题中,也可以形成这样的模型。E. Polak 和 P. Q. Mayne 及其学派发展了可以实际应用的算法,以解决此模型的优化问题。值得注意的是,一个很一般提法的随机控制中的最优反馈策略的求解问题可以转换成一确定性的半无限规划问题,这就使上述算法有了更重要的价值。

3.2 多目标最优解和满意解

多目标最优化问题不论是在帕勒托意义下或更一般的支配锥意义下的最优解,其特征是目标函数值一般形成一个集合。从多目标最优解演变出来的满意解(它也可以从单目标的次优解或近似最优解的概念演变出来),也具有同样特点,因之,求解计算中的计算负荷问题,其中包括时间和存储容量,也比单指标问题要严重得多。这是目前有待解决的迫切问题。

鲁棒性研究的进展与系统族

黄琳 王 龙

(北京大学力学系, 100871)

1 引言

在物理学研究中,为了寻求物理量之间的规律,总是对研究对象和它所处的环境进行理想化,然后得到物理定律或其它的一些关系,例如牛顿定律,克希霍夫定律,气体状态方程以及各种实验曲线等。这种研究方法在马克思所著资本论的序言中曾明确给以肯定。这种理想化的做法在处理一类实际问题时也是合理的。在这一思想影响下,人们常将一个实际系统用一个纯化了的模型来代替,上个世纪数学家 Peano, Bendixson 和 Darboux 等在研究中指出微分方程解的充分小变异的要求可以通过其初值和参数变化的充分小来加以保证。这样就使人们更乐于用纯化了的模型来代替或足够近似地代替真实的系统。而对参数变化所造成系统性能上的影响的讨论,自然将只限于灵敏度分析之上,这在情况不甚复杂时,无疑是可行的。

近二十年来情况发生了变化,一方面人们认识到实际系统与纯化了的标定系统之间的差异并不能总视为充分小,这既反映在由于系统与环境的日益复杂而使系统含有较大的不确定性上,也反映在对某些对象说来,它的标准工作状态并不唯一,例如飞机在不同高度以不同速度作巡航飞行时,无论是其空气动力学特性还是发动机的工作状况均不同,此时同一个飞机由于飞行状况的变化就有几个标定系统。另一方面,从七十年代末开始,在处理系统的非微摄动的问题上,有了一些理论与方法,特别由于控制界的推动,形成了起于八十年代至今不衰的鲁棒分析与鲁棒控制的研究热。在这些研究中,一个单一的系统模式已被一个系统集合或系统族所代替,研究方法上也有了明显的变化。

2 鲁棒性研究的进展

系统组成的集合称为系统族,特性 A 对系统族中任一系统均成立,则称 A 对该族具鲁棒性,例如系

系统族具鲁棒稳定性,鲁棒严格正实性等,若系统族 π 中有一子集 $\mathcal{S}$,由性质 A 在 $\mathcal{S}$ 上鲁棒即可推证出 A 在 π 中鲁棒,则称 $\mathcal{S}$ 是 π 的一个 A 核,例如稳定核等.寻求一族关于性质 A 的最小核是鲁棒分析中的重要问题.

在线性时不变系统的范畴内,鲁棒性研究主要有三个大的方向.

H_∞ 控制理论是设计控制器在保证闭环系统各回路稳定的条件下使相对于噪声干扰的输出取极小的一种优化理论方法.由于非结构型摄动的鲁棒控制问题,模型匹配问题和跟踪问题均可化归成 H_∞ 控制问题,而使 H_∞ 在控制界受到很大关注.在八十年代 H_∞ 问题的研究主要是基于Hardy空间及其上算子的理论和方法,各种类型的互质分解,参数化与一些插值方法起到了重要的作用.1988年左右,由于打通了 H_∞ 优化与二次型最优控制之间的联系,使 H_∞ 问题的求解转化为求解两个Riccati方程,而使 H_∞ 又获得了新的推动力并促进了算法与软件方面的研究.这一研究的另一方向是基于有理函数空间上Gap度量与Gap拓扑的建立,在此上也发展了一些算法与软件.这一些连同发展起来的 μ 理论,Q理论等,使由 H_∞ 理论发端的成果变得相当丰富与完善.控制学家统称这些为后现代控制理论,其中最近引进的线性分式变换(LFT)对研究的简化和使形式进一步统一起到了独到的作用,它将相当一类问题归结为线性矩阵不等式(LMI)也很有益.与上述建立在以有理函数及其状态空间实现为基础的理论方法相并行的是利用 H_∞ 在时域上Minimax的意义,运用微分博弈(动态博弈)的理论与方法加以研究,现已取得了一批成果并出版了专著.

代数方法研究鲁棒性是鲁棒分析的另一重要方面,它的产生是受俄国数学家Kharitonov工作的推动.他在1977年指出任何一个系数独立取值于区间的区间多项式族,其全族Hurwitz稳定等价于由这些区间端点按一定规则构成的四个多项式的稳定,即区间多项式族的Hurwitz稳定核是零维的(有限个).在这一领域的另一重要结果是棱边定理,它指出任何一个多项式多面体的全族 D 稳定(D 为复平面上一个区域,其补集为有限个无界集的并,而多项式的根均在 D 内)等价于其一维棱边集的 D 稳定,即多项式多面体的 D 稳定核是一维的,该结果一方面将Hurwitz稳定拓宽至 D 稳定,另一方面又解决了多项式系数间相关变化的情形.由于系数空间稳定性区域的非凸性,一维核将是维数最低的,在上述工作推动下,又相继出现了更为基本的边界定理和应用上方便的盒子定理.对于多项式凸组合的稳定不变性也得到了更为方便的充分条件.在这一系列成果的启示下,对多项式族稳定说来,已形成了一套基于排零原理,值映射(值集分析)和参数化等价族的方法.这种方法实际上是经典理论的发展.基于上述方法,对于用较一阶补偿器略宽的补偿器来实现对区间对象族的镇定,以及讨论对象族的严格正实不变性等问题上均取得了一些进展.

最近的研究利用传递函数的 H_∞ 范数小于1等价于一复多项式族Hurwitz稳定这一事实,开展了将多项式族稳定性的研究方法结合 H_∞ 理论的研究工作并已得到一些进展.

矩阵族的鲁棒分析在将矩阵视为有限维空间的元时可以针对区间矩阵族,矩阵多面体族进行,可惜的是这里不再存在顶点检验和棱边检验,而矩阵族的稳定核的维数常与矩阵阶次有关而高得无法进行检验.这一状况的出现本质在于由矩阵元到对应特征多项式系数间的变换是非线性的.在将矩阵视为有限维线性空间的线性算子时,鲁棒性分析则归结为针对各种矩阵范数而提的稳定摄动界的估计.虽然在复数域上即使一般 D 稳定摄动界的估计也可以通过奇异值分解的办法给出精确的结果,但若局限在实数域上进行讨论,除了 2×2 矩阵和正规矩阵外,摄动界估计问题至今仍是一筹莫展,以致人们不得不求助Lyapunov方法去寻求一些可能保守的充分条件.

运用Lyapunov方法研究鲁棒性问题是成果较多的又一个方面.它又分为对系统稳定摄动界的估计和运用 V 函数进行系统镇定的工作.由于这一方法本质上不依赖于系统的特征值,因而讨论的摄动将不局限于定常摄动.但又由于该方法只是保证渐近稳定的充分条件,因而结果常偏于保守.在现今还不能指出对给定系统何种Lyapunov函数将可能得到更好的鲁棒性估计的情况下,在选取Lyapunov函数不免具一定程度的盲目性.在摄动界估计上,Lyapunov方法常借助对应的矩阵方程和以矩阵的Kronecker积和

各种形式定义的 Kronecker 和来表达。在系统镇定问题上,在当系统具备“匹配条件”时,借助 Riccati 方程和 Lyapunov 方程也可以得到一些充分性条件以保证运用线性反馈镇定系统。

在除上述三大类鲁棒性研究以外,还有鲁棒极点配置和基于使闭环传递函数矩阵近于正规矩阵……的各种方法,这里就不一一细述了。

所有上述研究方法,目前为止依然很难应用于非线性系统与变系数系统,而使非常系数线性系统模式的鲁棒控制和 H_∞ 等停步不前。

3 系统族问题

在鲁棒性研究中,可以看到当系统采用常系数线性模式时,工具多而有效,例如稳定多项式理论,有理函数理论,矩阵与矩阵方程……这样得到的结果不仅便于应用而且十分丰富,而对非常系数线性系统模式,则因工具甚少而无法下手,其结果也就寥若晨星。当前研究非线性系统有微分流形方法和微分代数方法,但如何将这种依赖于系统精确模式的方法转而研究带不确定性的系统以进行鲁棒性分析,仍看不出有什么前景。非线性系统由于缺乏迭加原理这一类线性性质,因此其复杂性就远远超过线性系统研究所遇到的复杂性,非线性系统就不可能有线性系统那些简单的分类,这样象线性系统鲁棒性研究的一般性结论对非线性系统鲁棒分析说来是不存在的。因此非线性系统的鲁棒性研究大概只能是“就事论事”,针对各种非线性系统自身的特点寻求研究方法,然后才有可能研究一些共同特性的问题。研究非线性控制系统族的问题的进展自然取决于对非线性无控制系统族的研究。对这类问题建立起合适的概念与方法(这既包括理论的也包括运用计算机的),再利用这些概念与方法去讨论带控制的问题可能是合适的路子。对非线性无控制系统研究本身的价值也是显而易见的。

通常一个系统中的过程是解,它可以理解为随时间过程状态空间中点到点的映射,而系统族则不然,其中的动态过程应为解集,此时代替点到点的映射的应为集合到集合的映射,即使初值给定,我们一般也只得得到点到集合的映射。在控制与系统理论的发展过程中,显然也有一些理论是专门用来讨论在集合与映射这种抽象层次之上,但由于提法过于一般化,其结果也只能是一些最一般性的通常也是无法应用的结论。系统族虽然比一单一的系统复杂,但系统族仍然可以有一定的方法来刻画它的模式。例如可以采用标定系统与摄动模式的合理配合,而标定系统与摄动模式往往可以提供一定的信息量使我们的研究有所进展,标定系统就是一个单一的系统,而摄动模式则有多种。

3.1 摄动模式的分类

1) 线性系统定常摄动模式。这种不确定性的特征是在一定范围内取值但未知,而一经取值就不能随时间变化,这种摄动常分为结构式摄动(参数摄动)与非结构式摄动。前者常见于代数方法之中,一般这种摄动不破坏系统的已知结构特征和阶次。后者常见于 H_∞ ,在那里摄动模式是用输入输出间频率特性在一定范围内变化刻画的,它又分为加法与乘法两类。这种非结构摄动将可以破坏系统的结构特征以及阶次。

2) 变系数线性摄动模式。目前这种模式基本上归为参数摄动模式,即不确定因素是以时间 t 作自变量的未知向量函数 $q(t)$,它是未确知的,既可以采用辐值模式 $q(t) \in Q(t) \subset \mathbb{R}^n$,也可以采用积分型,即 $\int_{t_0}^{t_0+r} q(t) dt \in \tilde{Q}(t_0) \subset \mathbb{R}^n$,其中 $Q(t)$ 等是依问题而给定的时变集合。无论是哪种模式,不确定向量 $q(t)$ 本身也应加上一些条件,否则在处理理论问题可能有麻烦。

3) 微分包含式模式。该模式常见于非线性系统族,它与单个系统 $\dot{x} = f(t, x)$ 的区别在于系统的描述已改用 $\dot{x} \in F(t, x) \subset \mathbb{R}^n$ 来表达,其中 $F(t, x)$ 是由 t, x 确定的向量集合。有时微分包含也采用参数形式 $\dot{x} = f(t, x, q), q \in Q$ 。在这种比较一般的描述下,通常微分方程的一些理论结论均需作相应的变动。

3.2 系统族动力学的问题

1) 鲁棒稳定性问题。对于一般系统族稳定性的问题, Lyapunov 方法是最基本也是比较有效的方法。考虑一个 Lyapunov 函数集合,将其参数化,再针对问题进行优化以便找到合用的 Lyapunov 函数。这样

可以讨论系统族也可以用来估计摄动界. 另一个方法是寻求比较系统, 然后用比较方法来讨论系统族稳定性. 虽然以上两个方法也只是充分性的方法所得结果偏于保守, 但目前舍此还有什么别的方法.

2) 解集估计. 对系统族说来, 从同一初值出发的解是一喇叭形的解集, 其垂直于时间轴的截面是一时间状态空间中解族所到达的点集. 一般这一点集的几何特征并不清楚且精确进行总体研究相当困难, 可行的是针对问题研究沿一些特殊方向的扩张进行估计, 此时运用线性函数作为 V 函数是合适的. 如果系统具控制, 对这些方向的要求可以通过控制来实现, 此时最优控制理论是有用的, 解集以及特殊向上解集扩张的估计将依赖于算法的选择, 离开计算机的参与是很难奏效的.

3) 极小极大问题. 原则上微分博弈的思路对非线性系统也应合用, 但要想得到类似线性系统那样好结果必将很难. 一个可行的办法是充分利用计算机, 发展有效的算法, 另一个途径则是简化研究对象, 较简单的比较系统来近似研究原系统的问题.

实用稳定性的思路与方法有可能对上述问题的讨论提供帮助.

4) 次优化问题与可行解. 受控系统族在给定指标后一般不可能存在最优解, 因而寻求次优化问题的可行解是有意义的, 即选择控制使全族均满足次优的或可行的要求, 这方面同样需要计算机的介入, 适选择比较系统来进行简化研究是合适的.

结 论

1) 常系数线性系统鲁棒分析与鲁棒控制已取得丰富的结果, 非线性系统鲁棒性研究是必要的但困难因而进展不大, 为此开展无控制的系统族动力学研究成为必要.

2) 系统族的研究应考虑到单个系统研究与摄动模式研究两个方面. 在一般系统族内针对问题寻求的工作虽意义明确但极为困难, 采用比较方法与近似计算是可行的.

3) 系统族的研究比研究非线性系统更为困难, 要避免一般化而应根据具体非线性系统的特征进行, 法上宜于先具体后一般, 并密切理论与计算机研究的关系.

4) 系统族的研究是十分困难的任务, 应有长期打算, 只有长期研究的积累才可能有所前进乃至突破.

控制中并行算法的研究方向及新进展

胡保生 葛新科

(西安交通大学系统工程研究所, 710049)

引 言

众所周知, 控制理论的发展总是与现代工程技术问题的需求及计算机科学的发展密切相关的. 工程技术问题的大型化和复杂化是控制理论发展的源动力, 而计算机科学的发展为利用控制理论解决工程问题提供了手段, 这三者是相辅相承不可分割的. 在现代科学及工程技术高度发达的今天, 控制理论与计算机科学的密切结合与发展将是必然的. 未来计算机的发展方向将是高度并行及分布式的, 并且目前已发出许多商用的向量机、并行机和专用机, 那么控制理论很自然地要响应和适应这一方向而发展.

未来计算机的发展将都是并行或分布的, 或者说在部分时间里如此. 美国 Thinking Machine Corporation 的 W. Daniel Hills 博士认为这一发展是观念上的更新, 应从基础开始在各方向重新考虑计算机的设与研究, 其内容包括理论、计算机语言、操作系统、数据库、结构和实际应用等方面. 我们暂且不论一观点的正确与否, 但足以说明并行及分布式计算机在未来科学发展中的重要性.

为了适应计算机科学的这一发展趋势, 也更是为了解决越来越复杂的工程问题, 控制理论的研究也该有新的方向——并行算法及相应理论的研究. 值得强调指出的是, 人们一般认为并行算法研究的主

要目的是为了提高算法的速度,但实际上并非如此.算法速度的提高是非常重要的一个方面,但更为重要的是它是一种研究和解决问题的方法,是一种思想观念的转变.如果我们能把要解决的问题提高到并行的角度来认识,那么会对问题的解决产生很大的推动作用.下面根据我们的研究经验指出可能有所突破的方向.

1) 对建模的再认识.传统的建模思想是针对一个实际过程建立一个模型,例如经典的传递函数模型、输入输出模型、离散时间模型、状态变量模型等.实际上一个实际过程是复杂的,它有离散的成分,也会有连续的因素;有线性部分,也有非线性部分.在并行研究的思想下,我们应该考虑用多个模型来研究同一实际过程.由于各种模型有其优缺点,这样利用多模型之间的相互补偿作用能更好地刻划实际过程.而并行机为建模过程提供了有力的工具.

2) 对辨识及参数估计的再认识.辨识及参数估计的目的是确定模型中的未知因素.对多模型系统要辨识各个模型中的未知因素;而对同一模型,我们可以只确定不定因素的一个变化范围,对此范围内的某些典型值形成多个模型.这种辨识过程正好适应了紧耦合与松散耦合构成的高性能计算机结构.值得一提的是集员辨识是值得重视的方向.

3) 对控制算法的再认识.传统的做法是对一个过程的某确定模型研究各种算法,而不同模型之间有某种等价性.例如在自适应控制中,在广义预测控制策略思想下就有基于输入输出模型、状态空间模型及 δ 模型的控制算法.算法虽不同,但本质相同,且模型是相互等价的.众所周知,不同模型有其优缺点,如果在同一过程中采用同一控制策略下不同模型的控制算法,并使各种算法并行运行,然后对各种控制律加权平均,可望效果会好些;对于同一模型下的各种不同控制律,例如最小方差律、广义最小方差律、极点配置控制律、经典PID律等进行不同的组合后可望得到更好的控制律.对于同一过程的不等价模型,可以建立多控制器算法,也会得到高水平的控制律.在鲁棒控制研究中,Kharitonov定理告诉我们,满足一定条件的多项式簇的性质由某些特殊多项式完全确定.如果针对这些特殊的多项式形成控制器,并并行运行会得到较好的控制算法.这一思想对鲁棒控制器的研究会有启示.在自适应控制研究中,模型的阶次及时延是很难确定的,时延可能是变化的,但一般情况下可得一个界限.简单的做法是针对各种阶次及时延都形成一个控制器,所有控制器并行运行,这样不论阶次及时延如何变化,总有一个控制器会起到有效作用.其难点是控制器应如何合成.对其它不确定性,也可做类似的处理.

4) 对并行的再认识.在上述思想的指导下,并行可在同一模型的某个算法内进行,其结构可以是紧耦合的,适应于细粒度算法.目前的并行控制算法的研究是在这一层次上进行的;并行也可以在不同模型及同一模型的不同算法层进行,其结构是松散耦合的,适应于粗粒度算法.这两层并行的完整结合会产生更好的控制算法.

5) 专用结构下并行算法的研究.在信号处理中已有许多基于Systolic及Wavefront阵列结构的并行算法结果.众所周知信号处理与控制算法有许多共同之处,例如都基于最小二乘意义下.但是,如上结构更适应于信号处理,因为许多信号处理算法有许多规则性.尽管如此,在经典辨识中的许多算法也具有类似的规则性,而且某些控制算法也是如此,所以有可能得到好的并行算法.其次考虑到信号处理与控制的相似性,类似于Systolic及Wavefront结构而且适应于控制的并行算法的研究也是很有意义的.

6) 上述各种模型控制算法之间相互关系的研究也会有深刻的理论价值.控制中并行算法研究已有部分成果,下面就最新发展做一综述.

2 控制中并行算法研究的新进展

1) 最优控制中的进展. G. L. Gernald等将离散时变多变量最优控制化成一个最优化问题,然后利用经典的梯度算法进行求解,其中的并行运算是以状态方程的系数阵为单位进行的. S. Y. Lin考虑了连续时间最短时间问题,首先将原问题沿时间离散化后转换成离散时间问题,再进行并行求解,这一方法适应于硬件实现. S. C. Chang等作者考虑时间较长的各种最优控制问题,其思想是沿时间轴将原问题分解成一系列子最优控制问题,然后利用参数优化进行协调.与最优控制密切相关的Riccati方程也已

获得部分并行算法. 本文作者利用经典的 Schur 方法, 借助于矩阵相似变换以及相关的可交换性得了一种高效的并行算法, 而且数值稳定. J. P. Charliert 等给出了 Ricatti 方程的一种 Systolic 算法. Gardiner 利用符号函数的思想及修正 Givens 旋转变换来获得广义 Ricatti 方程的符号函数, 从而获得一种广义 Ricatti 方程的并行算法.

2) 参数估计中并行算法的研究进展. 本文作者基于经典的最小二乘辨识的思想, 利用矩阵的 Givens 旋转变换得出了利用开方运算和不利用开方运算的基于三角形 Systolic 阵列的并行算法, 且是数值稳定的. W. E. Moore 利用多个处理器来解决参数估计中参数的跃变问题. 其思想是利用多个处理器同时运行传统的最小二乘参数估计方法, 但在任何一个时刻都有一个处理器重置初值, 这样只要有跃变出现, 那么总有一个处理器估计的参数中会反映出这一跃变, 这就很好地解决了参数跃变这一困难的估计问题了. Z. Kowalczyk 考虑了模型阶次不确定时的参数估计问题: 对于几个可能的阶次都采用最小二乘法同时辨识, 所得参数估计再进行加权组合, 这样模型阶次的变化总会在某个处理器上反映出来. P. Anderson 采用了类似的思想建立了多模型系统, 各模型之间的差别有一特定参数决定, 而最后的加权采用一种概率统计结果进行. 上述几种方法更好地体现了并行思想在解决疑难问题中的作用. 由于参数估计问题可看成一种特殊的状态估计问题, 因而各种快速并行卡尔曼滤波方法可获得应用, 在此不涉及此一领域的进展.

3) 自适应控制中的进展. 由于实时控制系统对计算时间的要求很高, 因而研究适用于实时控制的各种并行算法很有必要. Chisci 利用状态空间模型及动态规划思想, 把自校正控制中的控制律的合成问题化成一个 LQ 问题, 然后利用修正 Givens 旋转在三角形 Systolic 阵列上得到了一种并行算法, 其缺点是中间矩阵在阵列中有移动, 该文还给出一些改进阵列. 在这一思想下, 慕德俊及本文作者分别解决了确定型和随机型多变量问题, 而且本文作者利用这一思想得到了单变量广义预测控制的一种基于 Systolic 阵列的并行算法. Chisci 等利用 Lattice (格网) 及 Transversal (横向) 滤波及嵌入的思想把最小方差自校正调节问题转换成滤波问题, 然后利用分解的方法得到了通道并行的算法, 这一方法将信号处理与控制联系起来. 基于 Transputer 的并行实现方法已有许多成果, 在此就不涉及了. 有关机器人及其它相关的并行研究成果在此就不一一涉及了.

3 结 论

本文首先对并行计算机的发展以及控制中并行算法研究的必要性和重要性做了论述, 然后指出了为适应这一发展可能会有所突破的方向, 最后给出了一些研究新成果. 这一领域的发展是很快的, 我们不可能穷尽所有的成果, 只有以己所能尽一番努力而已.

参 考 文 献

因篇幅有限, 在此略去, 有意者请与作者联系.

制造系统的建模、控制与性能评估

吴 澄 喻 明

(清华大学自动化系·北京, 100084)

1 制造系统的特点

因为其实际的经济价值和理论上的研究价值, 制造系统的有关建模、控制和性能评估等问题日益受到广泛的关注.

制造系统的特点可归纳为以下六个方面 (Gershwin, 1986; Rodammer, 1988):

1) 复杂性

制造系统属于一种大系统,描述制造系统需要大量的数据,因此全面的建模和优化是不可能的。基于递阶分解的次优策略是唯一有希望具有实际意义的方法。

2) 递阶结构

制造系统中存在多种时标,呈现一种递阶结构,可划分为机器级、单元级和工厂级。机器级为最短时标。这一级的决策主要涉及单个工件投入加工的时间、加工及控制装置的设计、检测和实现等。单元级为中间时标,主要考虑一小批机器之间的相互关系,主要决策为路径规划和调度。另外装载问题是选择零件投放系统的时刻,控制问题之一是限制不确定性因素对系统运行的影响。工厂级为最长时标,工厂级必须处理多个单元,尽管路径规划和调度仍然重要,但机器调整问题变得很关键,主要决策涉及:将调度好的生产与需求集成、中期资源、设备投资及经营目标等方面。

3) 操作规范

在递阶结构的每一级,所有行为必须受一定的约束,既给予足够决策的自由度,又不致于破坏系统的运行秩序。

4) 资源容量

需求必须限制在资源容量之内,否则只能适得其反,因此在每一级都必须仔细地定义、测量和尊重资源容量。

5) 不确定性因素

包括随机事件和未知参数两方面,随机事件指机器故障、缺料、需求变化、人员缺岗等;机器的可靠性则常是未知参数。

6) 反馈

在存在不确定性因素的情形下,必须依据系统的现行状态进行决策。特别是在短时标级,反馈控制策略必须计算量小且与系统的长期目的相符,所以只能折衷考虑计算量和最优性。

2 现行实际系统的控制和分析方法

1) 工厂级

传统的方法是基于生产控制的资源分配,将系统的各种功能集成为预测、主调度、物料需求规划(MRP)、资源需求规划、释放订单、车间级控制和库存控制等几个大的模块,分别执行所有这些功能。

近期的方法主要有基于有限资源的MRP和JIT方法。设计一种能集成有限资源容量与生产需求的工厂级模型已成为一种努力方向。JIT方法是对于有限资源的MRP的一种改进,通过内外供货机构在恰好的时间、地点供应恰好的物品而降低库存。对于生产需求已知且固定的情形,以及无需利用缓冲库来平滑因加工时间变化产生的影响的情形,JIT方法对于生产控制较为适用。但对于各种工件加工时间差别很大的情形,JIT方法常导致更为小批量更为频繁的物料搬运工作,这就加重了仍然需要的库存管理任务。

2) 单元级

比较成功的传统方法很少,在这一级,仿真是一种广泛用于确定调度策略,车间布局及其它规划问题的方法。

近期的方法主要是采用集成技术单元或单元化制造或加工中心,以简化产品流和调度,使各工序紧凑和减少库存。FMS可以认为是CIMS的一个单元。FMS的主要目的是满足预先确定的生产主调度,包括负载平衡、增加可用度、减低在线要求、增加加工的冗余性、减低换刀影响及实时分配资源等方面。实际的FMS的控制一般采用分派式调度方法,控制变量为:工件进入FMS的顺序、装卡顺序、操作顺序、机器选择、小车选择以及坐标测量机的操作选择和频率选择。

3) 机器级

这一级的控制实际上并不包括物流、调度或其它后勤方面的考虑。传统的方法是采用NC机床,对

位置、进给速度、及刀具相对于工件的速度进行标准的反馈控制。近期的方法则通过监控刀具磨损情况或毛坯/加工匹配情况,或加装机器视觉以检测主轴刀号等,实现全闭环控制。

3 现行研究方法分析

在此仍采用递阶的时标结构进行讨论,同时将现有的方法或模型划分为生成式和评估式的方法。生成式的方法指给出一组判据和约束条件,从而生成一组决策,即系统的控制策略;评估式方法指给出一组决策,然后评估系统在这组决策下的性能。

研究生产规划和调度的生成式方法,主要有启发式、递阶式、组合优化及规则方法。

应用模拟退火法解决组合优化问题近来比较引人注目。Ogbu 等人(1990)通过使接收概率函数独立于目标函数的变化值,较大地改进了传统的方法,值得进一步探讨。

评估式模型主要是排队论模型和排队网络模型,如 BCMP 模型和基于计算机仿真的 Monte Carlo 法,近来都取得了极大的进展。

1) 长期决策

内容包括工厂、设备的投资或新的制造方法。生成式方法涉及生产规划、递阶方法、战略规划、预测、决策分析和布局分析等,数学规划方法可用于设备选择和生产战略,但约束很复杂,Whitney(1985)提出一种顺序决策的启发式方法,成功地解决了这类优化问题。将制造系统的设备和战略选择表示成一种最优控制问题的动态投资模型,以及生产过程中的人员配置问题都属于长期决策。长期决策的评估式方法主要处理生产战略和财务问题,尽管对于制造系统的建模和分析很重要,但不在本文的讨论范围之内。

2) 中期决策

生成式方法主要有递阶方法、实时分布式策略,基于布朗网络近似的极值控制法以及路径优化的门檻策略。评估式方法主要有近似方法、分解法、概率流方法、等效工作站法、排队网络方法和仿真法等,其中排队网络模型和仿真方法也能用于短期决策。

1° 递阶方法

递阶控制方法(Gershwin, 1987, 1989)对时标进行分解,从而将一个大问题分解成呈递阶结构的子问题,每个子问题的解就作为约束施加于更低一级的子问题。这种方法的优点除节省计算时间外,只需较少的详细数据,且能模拟实际系统的组织结构。

现有的递阶算法都假定在一段时间内,需求和资源容量是已知的和确定性的,然后周期性重解规划问题。近期的研究趋于寻找一种显式的方法表达不确定性因素,包括需求、设备故障及资源容量的随机变化,目前只限于表达问题或求近似解。

Kimemia(1983)将相对长期的策略问题从工件分派的短期问题中分离出来,长期问题用一种连续时间的动态规划问题进行建模,由此可求出待投入系统的下一个工件及投放时刻。Akella 和 Kumar(1986)则针对有机器故障情形,提出了一种关于生产速度的奇异控制策略。Maimon 和 Gershwin(1988)则在动态规划中对于每个子问题用一个二次型目标函数近似,找到了一种比较好的近似解。Sharifnia(1988)提出一种所谓冲突点(hedgin point)策略控制生产速度,Desroches(1991)则提出一种基于这种冲突点策略的统一考虑生产规划和调度的方法,并可近似地估计缓冲库的容量。Ghosh(1989)和 Shin(1991)则专门针对装配线情形,给出了启发式的调度算法。

2° 实时分布式策略

Perkins 和 Kumar(1989)针对一般的 FMS,提出了重要的系统稳定性概念及判据,并提出了一种考虑机器调整时间和工件传输延迟以及机器的 buffer 水平的实时分布式调度策略。这种方法目前未能考虑机器故障和需求变化等因素。另外,关于周期性的系统的镇定问题,也有待于进一步研究。

3° 基于布朗网络近似的极值控制方法

Harrison(1989)建立了一组描述网络中的活动、队长和闲置的状态方程,状态变量为布朗运动向量,

从而将排队网络的调度问题显式地转换为布朗网络的极值控制问题,条件是系统处于近似于满负载的情形。Wein (1991) 则针对两台机器情形,得到一种有效的负载平衡调度策略。作者 (1993) 则针对机器故障和有限缓冲库情形,对于多台机器的布朗网络给出了一种初步的算法。这种方法适用于一般加工时间分布、高生产率的 FMS; 但对于大型的 FMS, 计算量仍有待进一步减少。

4° 路径优化的门槛策略

Kumar (1984) 针对具有不同服务台的并行网络的路径优化问题,利用动态规划方法证明了在队长信息可观的条件下,最优策略具有门槛性质。Rosberg 和 Makowski (1990) 将这个二服务台的结论推广到多服务台的具有公共 buffer 的排队系统。Hajek (1984) 则针对二服务台情形,给出相应的门槛控制算法。但对于多服务台情形的广义模型,还有待于进一步研究。

5° 近似评估法

Miriyala (1989) 基于系统的过程扩展图,给出了一种系统性能特别是可靠性的评估方法,但存在状态组合爆炸问题。Buzacott (1982) 则提出了许多近似模型,在这方面作出了显著贡献。Koster (1988) 提出一种将公用缓冲库转化为专用缓冲库的近似建模和分析方法。Jafari (1989) 在假设搬运时间服从二级 Coxian 分布时,也得到了一种有效的近似性能模型。作者 (1992) 对机器的上下游等待时间作出一种平均值的近似,也得到了一种有效的近似建模和分析方法。

6° 分解法

Gershwin (1984) 基于求解两点边值问题的想法,提出一种将一条多级生产线逐级分解成二级生产线,而进行迭代求解的方法。这种方法能解决中等规模的问题。Daller (1988) 指出在某些情形,这种方法不能收敛,进而提出了一种改进的迭代算法,而且能保证结果收敛。

7° 概率流方法

Fang 等人 (1989) 根据概率流守恒的原理,针对低阶生产系统,将工件的输出流进行分解后得到了工作站和缓冲库的状态方程模型。作者 (1992) 引入一种新的机器负载平衡度的概念及计算方法,并针对多级生产线缓冲库容量有限和机器故障情形,得到了稳态分析解,并应用于生产线的阶数和缓冲库容量的设计。

8° 等效工作站法

疏松桂 (1991) 在假定缓冲库的实际输入输出速度可用上下级工作站的额定速度近似的条件下,由缓冲库状态对工作站进行了等效分离,可求得系统的性能指标及协调运行条件。作者 (1992) 则直接从平均加工时间的近似出发,对于一般的生产网络系统,建立了一组线性方程,可以容易地求出系统的生产率等性能指标,以及协调运行条件。

9° 排队网络方法

最近在排队网络的应用方面,精确算法和近似法取得了很大的进展。Buzen (1985) 的算法使得求解更为容易,还可用于 FMS 的资源容量规划和生产规划问题。平均值分析 (MVA) 方法 (1980) 是一个重要的贡献。Suri (1985) 提出扩展的方法,可以有效地求解成组机器的生产率问题。Oven (1985) 则提出一种优先权 MVA 方法,可以对具有优先权调度等许多运行特点进行建模和分析。Suri (1983) 则给出了将排队网络模型用于实际系统的鲁棒性的基础。作者 (1993) 则应用于具有公用缓冲库和小车的制造系统,建立了一个实际系统的评估模型。

排队网络模型虽然近来的进展可以对有限缓冲库容量进行建模 (Suri, 1985), 但大多数方法还未能解决这个问题,也不适于对某些不频繁但破坏严重的暂态效应进行建模,如机器故障。

排队网络模型本身可用于递阶结构的中间层次,沿着适当的控制方面的研究方向,以及与递阶结构的上下层次相联系,是一个值得努力的研究课题。

10° 仿真法

离散事件仿真方法目前是制造系统的评估工具中用得最广的方法,可用于各个层次的决策。

仿真软件可归纳为仿真语言,如 GPSS/H, SIMSCRIPT, SLAM 以及专门用于制造系统的 SIMAN 和 MAP/1; 专门的软件包,如 GCMS, GFMS 和 SPEED; 以及交互式的动画仿真,如 SIMAN (图形输入) 和 SEEWY (图形输出)。

在仿真的设计和分析方面有几个值得注意的进展,如采用随机近似方法对仿真参数进行优化,对仿真结果进行分析如置信区间估计、偏差分析、暂态分析、仿真时间控制等,都采用了时序分析和频谱法的方法。将仿真法与分析方法相结合,也是最近的一个发展方向,如 Vassilli 等人 (1991) 将系统分段,分别采用仿真法和分析法。另外,结合采用并发逻辑编程的方法对制造系统进行建模 (Dotan, 1991),也是一种有效的尝试。

3) 短期决策

传统的生成式模型,采用精确方法或启发式或规则式方法,包括定批量和调度两个方面。

批量模型基于在机器调整成本与库存成本之间进行折衷。JIT 方法则基于长期目的,认为应保持最低或无库存。如何确定减少库存的速度,才能使增加学习产生的长期收益抵消短期损失?将这个问题纳入最优控制的范畴,值得进一步研究。在多产品环境下的定批量问题,应处理成一种向量优化问题,这在计算上都是无法处理的。但是,将这种系统用排队网络建模,然后求解相应的非线性规划问题,却有望求解这种联合优化问题。

对于调度问题,也可采用上一节的排队网络模型和仿真法。Wittrock (1985) 提出一种先将工件进行组合进而设计关于工件装入时刻的周期序列的方法。另一种方法是组合调度技术,并不确定下一步该投放那种工件,而是给用户提供一个候选方案,以期用这种柔性来应付在调度模型中难以明确表达的随机事件,如机器故障。

在此必须说明的是,摄动分析法, Petri 网,基于极大代数的线性系统理论以及监控理论都是近来进展很快的重要方法,但现有文献已有较多论述,本文就不作讨论了。

4 结 论

制造系统的建模、控制和性能评估是一个日益重要的研究领域,如何针对实际中出现的问题及其特点,使研究方法面向实际,进而解决问题,尚有许多方面值得讨论。本文对一些实际方法和研究结果进行了归纳和分析,并结合作者的经验,说明了进一步努力的方向。

参 考 文 献

因篇幅有限,在此略去,有意者请与作者联系。

大系统智能控制的进展

万百五

(西安交通大学系统工程研究所, 710049)

大系统的智能控制是引用人工智能的概念和方法,来解决大系统的辨识、优化、协调、控制、故障检测等问题,其中特别是总结和模拟人在控制和决策过程中的经验和规律。具体说来就是运用神经网络、学习迭代算法、模糊控制以及由知识库、数据库、学习机、推理机所组成的智能决策单元(专家系统)来解决大系统的上述问题。

大系统的智能控制,最早由涂序彦提出过,他建议将大系统与智能控制这两个独立的研究领域联系起来,虽然还属于方案探讨,但确有远见和卓识。1983年他发表了大系统的模糊控制一文,这是最早的大系统智能控制的论文之一。

十年来大系统的智能控制逐渐引起了注意和采用,它们的进展,可以归结为以下几个方面。

1 大系统的故障检测与诊断

大系统的故障检测与诊断有别于一般的检测与诊断问题,因为大系统建立数学模型很感困难,至今进展甚少.因此利用理论的方法,诸如滤波或状态估计之类方法,就只有一定的优越性,相反利用专家系统或基于知识的方法就更为合适.张杰等研究了一个含两个子系统的冷热水混合器实验装置,基于系统结构和元件功能的知识,论文开发了基于深层知识的在线故障诊断系统.在这里可以看出大系统故障诊断的特点,即在某一个子系统发生了故障,同样会造成另一个子系统的异常,因此在异常发生时追踪到发生事故的那个子系统,这种现象在子系统数目较多时会发生麻烦.

在动态大系统的线性数学模型已经确定的情况下,张汉国等研究了确定性和随机情形下的通过构造一组未知输入滤波器来估计局部状态.这些局部估计器就是传感器故障引起的未知输入的滤波器.这些滤波器的残差可用于系统的故障检测,该方法的特点是能进行故障隔离,即故障能被定位到子系统.

Berkan 等人提出将人工智能、信号处理和非线性控制方法结合起来,以保证快和有效的诊断和可靠的容错控制,形成一个智能容错的自动控制系统,来控制实验用增殖反应堆.反应堆操作员的一些作业,是由计算机的算法来代替,如传感器讯号、控制策略、控制命令的验证.这就需要应用神经网络,过程的经验建模,全局一致性检验,专家系统模型控制和反动力学模型控制等等.采用三个并行不同类型的控制器,一个神经网络,一个反动力学模型控制和一个模糊逻辑控制.在“自动”的情况下一个控制器在工作,两个在专线热备用状态,通过自适应模型来产生控制讯号.

Ulug 和 Becraft 等人在原子能电站的故障诊断中采用人机交互的混合式专家系统,即将 AI 技术和神经网络结合起来.特别设计的多层神经网络用作控制对象曲线的模式识别.曲线是否被识别作为推理的前提之一.三层的神经网络,其输入节点有选择地接至描述节点(第二层)^[1,2].强调专家系统和神经网络技术结合的还有 Medsker 的主张.

Holden 和 Suddarth 认为,由于大系统的建模任务复杂和所需计算时间长,仅利用基于知识或神经网络的控制已经显得不够了.论文强调要应用基于知识的技术、算法和神经网络的最优组合^[3].本文作者认为这是一个非常好的概念.该文强调将动态大系统的控制任务内容(context)和知识分成层次(hierarchy)或树,一般的控制任务处于高层次,而非非常特殊的任务放在低层次.低层次由规则集合和(或)神经网络来实现.论文以飞机自动驾驶仪为例,说明如何列出控制的层次(树).飞机驾驶员的经验用来产生规则数据,而神经网络经过这些数据训练后可以代替人的控制.产生式规则集合也用来表示人的控制知识并也用之于低层.

国内在对新一代飞机进行操纵系统研究和试验的“铁鸟”系统中,蔡小斌、戴冠中采用了实时监控的专家系统,它由故障检测、故障诊断和故障处理三部分组成.它保证了各子系统之间的协调工作和正常安全的运行^[4].

2 大系统的智能控制和智能协调

大系统的分解-协调是大系统的特征,也是关键问题.传统的协调方法是在迭代中决定协调变量之值,这在协调变量维数较高时协调需要较长时间,为此才有在协调中并行算法的诞生.在炼油等工业中由于建模和控制的困难,因而系统的某些特征和有关的控制策略有时用定性知识来表示可能更适合.已经有一些例子显示了这方面成功的应用. Song 等人介绍了所开发的基于规则的分馏决策和控制系统(RDDCS)以递阶控制上海炼油厂大型原油炼制过程. RDDCS 的一个子系统用于保证产品质量和轻质油产量,而另一个子系统用于增加能量回收率.这两个子系统的任务是有矛盾的.有些有经验的专家能很好地协调这两者,使整个大系统处于优化.分馏决策和控制系统就是这样参照专家经验制成基于规则的分馏决策和控制装置,使分馏装置提高了经济效益.

上节所介绍的对新一代飞机进行操纵系统研究的“铁鸟”系统,是由四个互相关联的电液伺服子系统组成.对该系统采用了三级递阶智能协调控制.其中第一级是直接数字控制级,包括数据采集,运行状态检测,控制算法计算和状态设置与控制等.第二级是控制协调和故障诊断级.协调控制策略为调整

数字控制器的参数或进行动态补偿。采用智能协调,则控制协调问题变成在什么条件下需要调整控制策略,选择哪一种动态补偿。关于系统的故障诊断已在上节中加以介绍。第三级是系统的组织管理和监督控制级,它使各个子系统按“铁鸟”试验的要求协调一致地运行。其中记忆学习是获取新知识的一种技术措施。

模糊控制是智能控制的一个重要领域,涂序彦建议在大系统的低层采用“局部模糊控制器”,而在高层采用“全局模糊协调器”,这样形成多级模糊控制。这在1983年是一个颇新的概念,低层的局部模糊控制器致力于模仿操作员控制子系统的经验,而高层的全局模糊协调器致力于模仿大系统决策者或经理的管理经验,它们都分别按照模糊控制规则和模糊协调规则来设计,并不需要子系统的数学模型。如同一般的大系统一样,分布式计算机控制系统用来作为各级控制器和协调器,分解-协调的原理依然被采用。论文并给出了模糊协调器的两个协调原则:资源协调和任务协调。

此外有些传统上是解析方法研究的领域:如大系统的稳定性,也开始引入了智能化,这是一个值得注意的动向。沈建官、刘永清等人作出了尝试。

3 稳态大系统的智能优化

稳态大系统是工业大系统中最简单的一种,但却是以石油、化工、大型水利系统、大型煤气管道和大型输油系统等的优化控制(管理)为背景。在优化过程中基于规则的专家系统有着很重要的用处,李龙洙的博士论文(西安交通大学)提出在优化控制中某些参数的智能选择方法。如在系统中算法的增益,又如系统优化与参数估计相结合(ISOPE)方法最后找到的最优解要加到实际工业过程中时,一般均采用逐步变化原解的方法,以防止对象受到激烈的激励。这样就有了一个选择参数的问题;或者在迭代学习控制中由于对象的模型未知,如何选择控制规律的某些参数,如比例项与积分项的系数,也是一个问题。这些例子的特点是,不同于计算仿真,所选择的参数都面对实际系统,稍有不慎则会使实际系统产生振荡或者失稳。基于规则的智能选择是一个好的方法,它分别根据系统趋向增幅振荡或减幅振荡的现象相应自动变化参数值,使算法收敛性得到了保证。

该文作者就上述基于规则的智能决策单元,取名为智能推理决策结构。他用这种方法创造性地解决了稳态大系统 ISOPE 方法中变量增广智能优化方法。所谓变量增广法,即在优化中采用增广 Lagrange 函数和松弛变量项。这样,增加三个参数要挑选,它们是罚系数 ρ , 迭代增益 a_i 和 a_n 。仿真结果表明参数智能优选方法充分利用人类的经验技巧和启发式知识,改善了算法的收敛性和实用性,效果很好。

博士论文又将上述的智能推理决策机构用来选择系统的协调变量,形成智能化关联预测法。各局部子系统仍旧用原方法来优化。这种办法的优点是,还可以对大规模工业过程的多目标优化控制与决策问题来求解,即智能化目标修正协调法。它的主要目的是根据环境和任务的变化以及系统过程运行的情况,用智能化方法调度新的目标,给各子系统提供环境变化的信息,而各子系统根据新的目标信息自动地修改自身的目标,为的是调整自己的控制与决策策略以适应新的环境或任务的变化。最后作者研究含有模糊参数的大规模稳态工业过程智能控制问题。由于将一个含模糊因素问题转化成为一个非模糊的问题,这带来了寻优变量的增多,智能推理决策机构的引入,使协调级的寻优过程具有更好的灵活性和适应性,并有效地解决了因寻优变量增多所引起的计算上的困难^[4]。周金荣在博士论文(浙江大学)中利用分层专家系统对尿素生产过程实行了优化决策、故障诊断、工况预测,可带来巨大的经济效益。

稳态大系统智能优化的另一个重要的尝试,可以说是利用多层前向神经网络来训练一个非线性映射作为子系统稳态模型。然后基于这个神经网络的稳态模型(非数学模型)实行了系统的优化。谢雯的硕士论文(西安交通大学)采用了 Hooke-Jeeves 的滞点方向细分直接搜索法,但速度较慢,不如惯用的梯度加罚函数法为好。论文提出用关联平衡法作为协调原则,并带有全局反馈,同时用实际系统设定点变动时产生的数据来更新模型。论文以仿真例子表明其效果,比传统上认为最好的双迭代带反馈的关联平衡法为好,控制器设定的变动只有两次^[4]。并且,对用 BP 算法训练前向传输神经网络所需要的数据如何获取问题则由王武义、李玉桥作了研究,强调了在线获取动态数据并取得动态模型再得到稳态模

型。这使得此项研究又前进了一步^[7]。稳态大系统智能优化的另一工作,是用 Hopfield 网络来作优化之用,这样传统的分解-协调迭代让位给了一组微分方程的求解,这在不是很大的系统时有它的优越性。实际的大工业过程基本上符合这个条件^[8]。

基于模糊模型的优化——一种模糊的启发式搜索优化,以催化裂化装置为对象成功地作为实例研究,由吕勇哉等人作了研究。Titli 对模糊逻辑在复杂系统中的直接控制和监督控制中的应用,作了较全面的归纳和分析。

4 结束语

大系统的智能控制由大工业界实践的需要而发展起来的并引起普遍的关注,已经发表了一系列上述初步成果,某些解析法研究的传统领域也被智能化方法所“侵蚀”。在大系统的有些情况中同时采用几种智能控制方法,如智能协调和基于专家系统的故障检测和诊断;或者达到几种目的,如智能优化和故障检测与诊断。值得再次强调的是,要将解析法(包括算法)、模糊逻辑法、人工神经网络和基于规则的专家系统最优地结合起来,以最简明、最可靠地解决面临的问题。

大系统的智能控制代表着工业控制的一个重要方向,但还处于初级阶段,还需要深入和提高并系统化和理论化。目前的应用,主要在大工业过程、原子能电站、飞机和宇宙飞船和高速列车群等复杂系统。

参 考 文 献

- [1] Ulug, M. E. . A Hybrid Expert System Combining AI Techniques with a Neural-Net, Proc. of 2nd International Conference on Industrial & Engineering Application on AI & ES, 1989, 305—309
- [2] Becraft, W. R. et al. . Integration on Neural Networks and Expert Systems for Process Fault Diagnosis. Learning and Knowledge Acquisition, 832—837
- [3] Holden, A. D. C. and Suddarth, S. C. . Combined Neural-Net/Knowledge-Based Adaptive Systems for Large-Scale Dynamical Control. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1991, 5(4):503—522
- [4] 谢雯,万百五. 基于神经网络的大系统稳态递阶优化控制. 第一届全球华人智能控制与智能化大会论文集, 上卷,北京,1993, 550—555
- [5] 蔡小斌,戴冠中. 专家系统与智能控制在“铁鸟”系统中的应用. 信息与控制. 1991(4):1—10
- [6] Li, L. Z., Qin, S. Y. and Wan, B. W. . Intelligent Optimization Method for Large-Scale Steady-State Systems with Fuzzy Parameters. Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, October, Chicago, U. S. A. 1992, 2:1283—1288
- [7] 王武义,万百五. 用神经网络及动态信息的稳态辨识与优化控制方法. 中国控制与决策年会论文集,安徽,黄山, 1993,52—57
- [8] 梁天培,李玉桥,万百五. 基于 Hopfield 神经网络的大系统静态递阶优化方法研究,第一届全球华人智能控制与智能化大会论文集,上卷,北京,1993,556—560

预测控制的研究现状及问题

徐立鸿

(东南大学自动化研究所·南京, 210018)

1 引 言

预测控制是于七十年代后期直接从工业过程的控制中产生的一类新型控制算法,它的主要思想方法由 Richalet, J. 等人在他们于1978年发表的著名论文^[1]中提出,经过十多年的深入研究和发

• 国家和江苏省自然科学基金资助项目。

方法得到了进一步的完善,形成了今天所公认的预测控制的三大方法机理,即基于模型的预测、滚动式优化和反馈校正。预测控制的这些机理适应了复杂工业过程控制的要求,因而比建立于理想条件下的最优控制更加实际与有效。

本文将简要概述预测控制的研究现状,然后将主要讨论预测控制中尚待进一步研究的几个关键性问题,并就这些问题谈谈我们自己的看法,从而探讨预测控制研究中一些可能的发展方向。

2 研究现状

从1978年 Richalet 等人提出模型预测启发式控制算法(MPHC)以来,预测控制得到了蓬勃发展,先后诞生了动态矩阵控制(DMC)^[2]、广义预测控制(GPC)^[3]等几十种不同的预测控制算法。虽然研究重点和研究方法各异,但关于预测控制的研究工作主要集中于理论和应用两个方面:

2.1 理论研究

主要包括对已有预测控制算法进行稳定性和鲁棒性等理论分析,并提出新算法两部分工作。

1) 理论分析

a) 模型与对象匹配时的稳定性分析。其中模型完全已知时的稳定性分析已有较好的结果^[4,5],模型参数未知(即带自校正环节)时的稳定性分析还没有能充分体现预测控制特点的令人满意的结果。

b) 存在建模误差时的鲁棒性分析。这方面有一些工作^[6],但定量描述的实质性结果很少。

c) 分析预测控制中的主要设计参数对稳定性、鲁棒性及其他控制性能的影响,得到参数整定的定量结果。这方面进展很少。

d) 分析预测控制的抗干扰性能和跟踪性能。这方面有一些结果^[7],但还需进一步深入。

2) 算法研究

目前,这部分工作最多,基本上都是在预测控制的机理框架内,以提高适应性、鲁棒性和最优性为目的,研究和提出新型预测控制算法。其中的相当一部分工作和结果对预测控制算法的进一步发展是很有意义的。例如把预测控制和极点配置、 H_∞ 理论、并行处理、大系统理论等等先进的控制理论和方法结合起来,以提高控制性能、增强适应性和鲁棒性^[8~10]。

2.2 应用

预测控制在应用领域内取得的成果远比它在理论分析上的成果要多。目前,它已被广泛应用于化工、轻工、电力、石油等部门并取得了成功^[11,12],现已推出了有效的预测控制软件包。

3 存在问题

就目前的研究现状看,预测控制的研究中主要存在以下问题:

1) 理论分析难以深入。

这里的主要困难是,以大范围输出预报为基础的在线滚动优化策略,使得预测控制的闭环传递函数非常复杂,其主要设计参数都是以蕴含的方式出现在闭环传递函数中的,因而难以进行解析分析,得出定量分析结果。

另外,目前的许多理论分析工作都是针对广义预测控制(GPC)算法进行的,其分析方法与一般的自适应控制的分析方法类似,都把主要精力放在寻找一种参数在线估计方法,然后与预测控制策略相结合,得到的分析结果也与一般的自适应算法结果相似,完全看不出预测控制的特点。因此,严格地说,这还不是对预测控制算法的理论分析。我们认为,按目前这种分析思路走下去,很难得到深入的理论分析结果,因为它有赖于自适应控制鲁棒性分析的深入,而后者至今还没有很好的结果。所以,要得到对预测控制的深入的理论分析结果,首先必须摆脱自适应控制的束缚,针对预测控制本身的机理特点寻找新的分析方法。

2) 算法研究上新意不多。

目前这方面的许多工作新意不多,意义不大。而且大都是在自适应框架下进行,把预测控制视为一种自适应控制算法来研究。这样做的后果是,不仅将自适应控制中的鲁棒性问题、对偶问题等带进预测

控制算法中,而且使研究思路变窄了,没有新意。其实,广义预测控制 GPC 只是预测控制中的一类算法,真正能体现预测控制的核心机理的是模型预测启发式控制 (MPHC)、动态矩阵控制 (DMC) 等算法,而预测控制的这些不同于其它控制方法的机理特点正是它的强大生命力所在。因此,我们认为,算法研究方面应紧扣预测控制的三大机理进行,以进一步完善预测控制算法为目标。目前的预测控制算法普遍存在着模型预测精度不高、反馈校正方法单调、滚动优化策略较少等问题,深入研究并解决这些问题,将为预测控制成为一种适应性、鲁棒性和最优性均好的有效控制算法作出扎扎实实的贡献。

4 研究方向

根据前面提到的问题,我们认为,今后关于预测控制的研究中有以下可能的研究方向:

4.1 给出理论分析的定量结果

主要包括两个方面:

1) 给出(对建模误差、对干扰)鲁棒性分析的定量结果。

2) 给出主要设计参数的定量选取结果。

这是个难度很大的问题,但其意义也很大,对揭示预测控制的本质机理有十分重要的意义。为此,需做极其艰苦的工作,探讨新的分析方法。

4.2 完善预测控制算法

前已提出,这方面的工作应紧扣预测控制的模型预测、滚动优化和反馈校正这三大方法机理进行;其中包括以下几个研究方向:

1) 建立高质量的信息预测方法。

我们认为,建立一个用于预测的高质量的对象模型是提高预测控制性能的前提条件。这里不能因此就认为,预测控制是完全受到传统建模能力制约的,对预测控制来说,核心问题是怎样根据对象的已知信息作出较好的预测,模型只是用来作好这种预测服务的。因此,模型概念在预测控制中已不是指狭义的数学模型,而是指能服务于预测的对象的任何一个信息集合。在这里,模型只有功能上的要求,而没有结构形式上的限制,象 ARMAX 模型,状态方程模型等数学模型可以用,脉冲(或阶跃)响应模型等一些非参数模型也可以用,甚至数据集合等非数学模型都可以用。只要依此信息集合作出的预测精度较高,此信息集合就是一个高质量的预测模型。这样把模型的概念拓广为一般的信息集合的做法,为进一步研究建立高质量的模型预测方法铺设了广阔的道路,这使我们能不受传统的数学建模理论的束缚,大胆引进新思想新方法。我们认为,要在这一方向上取得成果,应该研究两个问题,一是建模,即合理选择一类容易得到的信息集合作为模型,二是研究与此信息集合类相适应的预测方法。尤其是后者极待研究,因为已有的预测方法很少,象常用的最小方差预测方法是针对精确的随机数学模型用的,等等,既然模型概念已拓广成信息集合,那么针对不同类型的信息集合给出不同的预测方法是十分重要的,这是建立高质量的信息预测方法的关键(我们认为,用信息预测替代模型预测作为预测控制的一大机理更为贴切)。可能的新方法有:模式识别和人工智能方法、人工神经网络方法、频域模型预测方法等等。

2) 建立有效的反馈校正方法。

由于对象的验前信息的不充分性,基于此类信息集合得到的预测模型,用于在线预测时,其预测值与实测值之间一定存在一个偏差,我们称其为预测误差,预测误差越大,控制效果越差,前面提出的建立高质量的信息预测方法,目的就是使预测误差尽可能地小,然而对象的复杂性(例如信息不充分、时变、干扰等)使得我们不可能完全把握对象,因而建模误差客观存在,预测误差在所难免,只有根据实测信息不断进行反馈校正,才能保证预测趋于准确。因此,校正减轻了信息预测的压力,它们二者互相补充,是提高预测控制鲁棒性能的重要一环。然而,目前的校正方法还不多,也未能达到理想的结

果。象广义预测控制算法,就是通过辨识模型参数来在线校正模型的*,这种模型校正方法的缺点是,对结构型建模误差无法校正,因而始终被鲁棒性问题所困扰。还有直接对在线预测误差进行加权校正的方法,但这种方法显得太粗糙。没有建立在对引起预测误差的诸原因进行深入分析的基础上,因而加权因子的选取带有较大的偶然性。所以,深入研究并提出新的校正方法,是很有意义的研究方向之一。我们认为,引起预测误差的主要原因有二:模型误差和干扰,倘若能将二者引起的预测误差分离开来,则可对建模误差进行补偿校正,对干扰误差进行反馈校正,达到理想的校正效果。

3) 研究新的滚动优化策略。

滚动优化是预测控制的核心机理,其优化策略可以是多种多样的,目前常见的就有二次型性能指标等许多种。众所周知,不同的优化策略对应于不同的控制器结构。因此,选取怎样的优化策略,是一值得研究的问题。当然,优化策略的选取要受实际控制问题的限制,这里我们指的不是这个问题,而是指应研究选取怎样的优化策略,才能将与之对应的先进的控制器结构(或方法)结合进新的预测控制器结构中,从而得到适应性、鲁棒性和最优性都比已有的算法更好的新的预测控制算法。为此,我们应广泛吸取其它控制领域的新结果、新方法和新思想,为己所用。象智能控制、鲁棒控制、模糊控制、自适应控制等和人工神经网络方法、并行处理方法等等,都为这一研究提供了广阔的天地。

4. 3 研究非线性系统的预测控制

以往预测控制的主要工作都是针对线性系统的,对于非线性系统的研究工作很少,仅有的一些也大都将其化为线性系统来处理,因而其结果对一般非线性系统的可用性受到限制。如何根据非线性系统的特点,用预测控制的机理方法进行研究,继而提出有效的算法,是一很有意义的研究方向。在这里,一个基本而重要的问题是怎样给出非线性系统的模型(或信息)预测方法,因为滚动优化和反馈校正都是建立在它的基础之上的。

4. 4 加强应用研究

目前,预测控制的研究在理论分析方面虽然碰到困难,难以深入,但它的应用前景却是令人乐观的。因此,应加强对预测控制的应用研究,从应用中推动预测控制向前发展。这里应包括下面两项研究内容:

1) 广泛应用,解决实际问题,并在应用中发现问题的,找到能推动理论研究深入进行的启发思路,为最终解决理论分析问题作出贡献。

2) 加强预测控制的应用技术研究。

应用技术问题,是纯理论研究所不包括的,但对预测控制算法有效应用于实际问题却是十分重要的。因为在实际应用中,人是可以通过与计算机的人机对话技术参与整个控制过程的,人能通过掌握一些应用技术,对提高信息预测精度、继而提高预测控制性能,部分克服被控过程的复杂性等,起到不可忽视的作用。

5 结束语

最后,我们将提出以下两个观点,作为本文的结束。

1) 预测控制具有强大的生命力。

预测控制的令人信服的方法机理和其在工业过程中的成功应用,都充分证明了这一点。可以预言,随着预测控制的不断发展和完善,它最终将取代PID在复杂过程控制中的主导地位。

2) 不能夸大预测控制的作用。

与许多传统的控制方法相比,预测控制确有较好的控制性能,但不能因此就认为,预测控制能适应工业过程的一切复杂性、满足一切控制性能要求。我们认为,对复杂工业系统的控制,靠任何单一的控

* 由此可看出,预测控制并不是自适应控制中的一小类,确切地说,以广义预测控制为代表的自校正预测控制算法只是预测控制大家庭中的一类。

制算法(例如预测控制)都不能达到控制目标,必须是由多个各有特长的控制算法有机组成的集成控制系统和综合优化系统(即是一个智能控制系统),才有可能解决这一问题。

参 考 文 献

因篇幅有限,在此略去,有意者请与作者联系。

论可拓控制

王行愚 李 健

(华东理工大学·上海, 200237)

1 引 言

近年来,关于物元分析的理论和方法,曾引起学术界的兴趣和重视。它是由蔡文先生建立和发展的崭新理论^[1]。这一理论试图从事物矛盾转化的形式入手,为人脑的“出点子,想办法”打开一条新的研究途径。它把现实问题概括为相容性和不相容性问题,通过研究物元及其变化规律,来寻求求解不相容问题的理论和方法。物元分析包括两个主要部分:一是研究物元及其变化的理论;另一个是建立在可拓集合基础上的数学工具。八十年代以来,关于物元分析的应用取得了许多成果,这是一个值得进一步深化和发展的理论。

从物元分析的研究中,至少可以得到两点启示:首先,人们在处理不相容问题时,必须具备辩证思维和求异思维的能力,这是人类智能的集中反映。因此,在研究智能控制时,不仅要研究常规逻辑推理的方法,还应探讨促使矛盾转化的辩证方法。对此,物元分析是可供运用的理论和方法;其次,综观控制理论的发展历史,不难看出控制理论的发展与数学中集合论的发展有着密切的关系:作为现代控制理论基础的数学分析,泛函分析等都是建立在经典集合论的基础之上;作为模糊控制理论基础的模糊数学则是建立在模糊集合论的基础之上。可拓集合的理论是对经典集合论和模糊集合论的补充和发展,那么,从方法论的角度看,是否可能从上述集合论与控制理论的关系中,得到启示和借鉴,以期发展一种基于可拓集合论的新的控制理论?

在上述思想的启迪下,抱着尝试的目的,作者进行了探索和研究,提出了“可拓控制”这一新型的智能控制的概念和方法,并取得了初步成果^[2~6],以下对此作一简要的论述。

2 可拓集合

众所周知,经典集合论要求,论域中的一个元素关于集合,要么属于它,要么不属于它,其特征函数取为:

$$\chi_A = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

模糊集合论中,将特征函数的概念加以推广,引出了隶属函数和模糊子集的概念:设 X 是论域,称映射

$$\mu_A: X \rightarrow [0, 1]; \quad x \rightarrow \mu_A(x)$$

确定了 X 的一个模糊子集,记为 $\underline{A}$ 。 μ_A 称为模糊集 $\underline{A}$ 的隶属函数, $\mu_A(x)$ 称为元素 x 隶属于 $\underline{A}$ 的程度,简称隶属度。

在可拓集合论中,进一步推广了隶属函数的概念,给出了关联函数和可拓集合的概念^[1];所谓在某种

限制下对象集 U 上的一个可拓集合 $\tilde{X}$ (或称可拓子集), 是指对于任何 $u \in U$, 规定了一个实数 $K_{\tilde{X}}(u) \in (-\infty, +\infty)$, 用它来表示 u 与 $\tilde{X}$ 的关系. 映射:

$$K_{\tilde{X}}: U \rightarrow (-\infty, +\infty); \quad u \rightarrow K_{\tilde{X}}(u)$$

称为 $\tilde{X}$ 的关联函数. $K_{\tilde{X}}(u)$ 称为 u 与可拓集合的关联度.

关联函数的不同取值范围, 对应于论域中的不同区域, 它将 U 划分为经典域、可拓域、非域、零界和边界五个部分. 关于可拓集合的性质、关系和运算等此处不再论述, 可参阅[1].

可拓控制的基本概念:

从信息的观点来看, 控制过程实质上可以看作是信息的转化过程, 即使被控信息以尽可能好的方式转化到所要求的范围. 可拓集合的建立旨在研究事物的转化关系, 它描述了矛盾着的双方在一定条件下互相转换的规律, 反映了人们在实践中处理问题的辩证思想. 这就启示我们, 可以用可拓集合来描述和控制过程中信息的转化关系, 将控制问题的求解纳入一般问题的求解之中, 为寻求智能控制知识表达模型和信息处理的技术探索一条途径.

定义 1 描述系统状态的典型变量称为特征量, 用 C 表示.

定义 2 由特征量描述的系统状态称为特征状态, 用 S 表示; $S = (c_1, c_2, \dots, c_n)$. 其中, c_i 表示第 i 个特征量.

定义 3 由控制指标决定的系统特征状态的取值范围为经典域 X , 以选定操纵变量下的系统可调节特征状态取值范围为节域 X_e , 建立关于系统特征状态 S 的可拓集合 $\tilde{X}$, 则系统调节过程中的任一状态可拓集合 $\tilde{X}$ 的关系用实数 $K_{\tilde{X}}(s)$ 表示, 称为特征状态关联度, 其值域为 $(-\infty, +\infty)$, 含义为:

$K_{\tilde{X}}(s) > 0$ 表示特征状态 S 符合控制要求的程度;

$K_{\tilde{X}}(s) < 0$ 表示将特征状态 S 转变到合格范围的困难程度. 这又分为两种情况:

$-1 < K_{\tilde{X}}(s) < 0$ 表示在 S 所采用的操纵变量下, 可以通过改变操纵变量的值而使特征状态转变到合格范围;

$K_{\tilde{X}}(s) < -1$ 表示在所采用操纵变量下, 无法通过改变其量值而使特征状态转变到合格范围, 这时就要更换操纵变量, 即进行被控变量和操纵变量的重新配对, 我们把这一任务赋予高一层的控制.

定义 4 特征量表示的系统运动状态的典型模式称为特征模式, 记为:

$$\phi_i = f_i(c_1, c_2, \dots, c_n), \quad i = 1, 2, \dots, r.$$

中 ϕ_i 表示第 i 个特征模式; f_i 表示关于 ϕ_i 的模式划分.

定义 5 根据特征状态关联度划分的模式称为测度模式, 表示为:

$$M_1 = \{s | K_{\tilde{X}}(s) \geq 0\}$$

$$M_2 = \{s | -1 \leq K_{\tilde{X}}(s) < 0\}$$

$$M_{2i} = \{s | \alpha_{i-1} \leq K_{\tilde{X}}(s) < \alpha_i, S \in M_2\},$$

$$i = 1, 2, \dots, m, \text{ 其中 } -1 = \alpha_0 < \dots < \alpha_{i-1} < \alpha_i < \alpha_m = 0,$$

$$M_3 = \{s | K_{\tilde{X}}(s) < -1\}.$$

在可拓控制中, 关联度是一个重要的量, 它既作为系统特征状态合格度的一种度量, 还起到一种“标”的作用, 即 $k=0$ 和 $k=-1$ 分别表示了合格与不合格以及可转变与不可转变的分界. 它既表达了思维中的形式逻辑, 又反映了辩证逻辑. 关联函数的建立, 将采用定量和定性相结合的方法.

可拓控制的框架和原理

可拓控制的基本结构如图1所示.

图1中, 数据库存放来自被控过程的信息: 过程给定参数值, 过程输出值以及经过处理后的中间数据. 此外, 还存放各种经验参数: 特征模式划分的经验参数, 经典域, 可拓域的范围, 测度模式个数及等. 知识库存放专家领域知识和过程的先验知识: 特征模式划分、关联函数形式、测度模式划分及策略选择对控制效果的影响情况.

可拓控制的工作原理主要包括以下五个方面, 它对应于图1主回路中的五个模块:

1) 信息处理和特征识别

系统的运动状态可以通过一定的特征信息表现出来. 特征识别就是从系统所获得的各种信息, 进行处理, 抽取特征并将其归入某一特征模式的过程.

2) 特征状态关联度的计算

特征状态关联度是通过建立关联函数并利用系统当前状态值进行计算而获得的. 要建立关联函数, 首先必须建立它们的可拓集合. 通常采用 n 维关联函数和 n 阶关联函数两种形式. 为了确定关联函数中的某些权系数, 需要用到专家的知识, 并在系统运行过程中通过机器学习在线修正.

3) 测度模式识别

这是一个根据系统当前特征状态关联度, 将状态归入某一模式的过程. 可拓控制的主要任务是对可调状态进行调节, 使之回复到合格范围. 为此, 需对可调状态按合格度 K 进一步地划分, 然后对每类可调状态给以相应的控制策略, 从而实现高性能的控制.

4) 推理机制

这是一个从测度模式到控制模式的映射. 可以采用多种推理机制. 如可以采用产生式规则, 记为:

IF 测度模式; THEN 控制模式.

可开发自学习算法, 对规则进行在线修正.

5) 控制策略

可以采用两种形式:

1° 将控制器输出信号划分成若干区间: $[u_{i-1}, u_i]$ ($i=1, 2, \dots, r$), 每段作为一控制模式, 再根据算法得出控制器输出. 模式的个数根据过程复杂程度而定. 控制器的实际输出 u 可表示为如下函数关系:

$$u = h(K_X(s), u_{i-1}, u_i) \dots$$

2° 采用一组具有开、闭环以及多模态功能的控制策略. 例如:

$$u_1 = \{u(t) = u_{\max}\} \quad u_2 = \{u(t) = u_{\min}\} \quad u_3 = \{u(t) = u(t-1)\} \dots$$

5 可拓专家系统

我们研究了一类基于可拓集合论的知识表达方法. 可拓集合将元素与集合的关系更清楚明确地表示出来, 它不仅表示了经典集合中的元素属于该集合的程度, 而且表达了经典集合外的元素转化到该集合中的可能程度(用关联度量表征), 且在不同的限制条件下, 对应一组不同的可转化元素集(可拓域). 可见, 基于可拓集合的知识表达方法可提高知识表达的深度和广度. 同时, 利用物元理论来表达创造性思维规律, 建立启

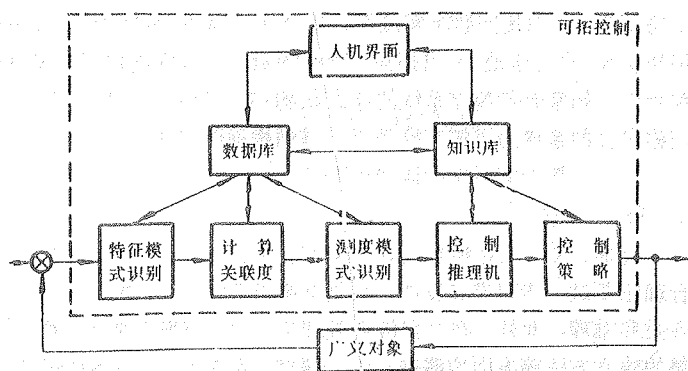


图1 可拓控制结构框图

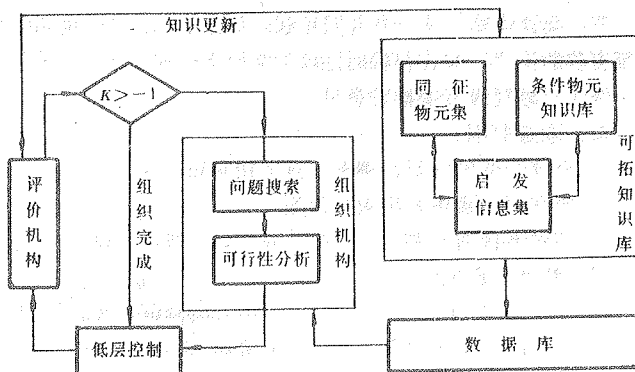


图2 可拓专家系统结构框图

集,从而使问题求解过程的智能水平提高.将用上述知识表达方法建立的专家系统知识库称为知识库.进一步地,在可拓知识库的基础上建立智能控制系统的最高层级——组织级的决策支持系统,可拓集合论建立系统的评价机构,对系统组织效果进行定量评价,从而为下一次组织提供依据.同样的系统为可拓专家系统,其结构框图如图2.

于可拓专家系统的详细讨论见 [4].

展望

前,关于可拓控制的研究刚刚起步,这是一个值得深化和探讨的课题.在理论上,对原有可拓集要进一步研究和发展,并结合逻辑学的研究,建立新的推理方法,以使其更适合智能系统的知识推理.此外,在过程信息处理和识别,信息合格度的算法、模式划分、可拓推理方法、控制模式立方法等方面均需进一步的研究.在应用上,可拓控制是具有广泛应用前景的,它不仅可以在软域如人才评估和分类等,也可以在工业过程控制领域进行应用.这需要进一步作深入的工作.

参考文献

文.物元分析.广州:广东高等教育出版社,1987

Jian and Wang Shienyu. Primary Research on Extension Control, Information and Systems. International Academic blishers, 1991, 1: 392--395

健,王行愚.一类可拓控制器的设计.全国智能控制和自适应控制研讨会论文集,西安,1992,90—97

健,王行愚.一种新型的专家系统——可拓专家系统.华东化工学院学报,1993,19(5):617—623

健,王行愚.人才选拔分类的可拓识别方法.系统工程,1993,11(增刊):759—765

健.基于物元分析的智能控制和决策.华东化工学院硕士论文,1991

一九九四年控制理论及其应用年会

征文通知

九四年全国控制理论及其应用年会定于八月中旬在山西省太原市太原工业大学举行.征文通知

征文范围:控制理论及其应用未发表的论文,内容包括下列领域的理论与应用:

性系统·非线性系统·随机控制系统·计算机集成制造系统·专家系统·分布参数系统·离散事·社会经济系统·大系统· H_∞ 控制·适应控制·工业控制·鲁棒控制·预测控制·智能控制·容错·糊控制·神经网络·机器人·计算机辅助设计·系统辨识·稳定性分析·最优估计·模型降阶

截止日期:投稿请一式两份,收稿截止日期为1994年3月31日.

会议设奖:从一九九四年起,对青年作者论文年会设关肇直奖(见《关肇直奖条例》).凡申请的论文,要在投稿时注明,交论文一式九份,并附工作证(或学生证)和身份证复印件,及至行教授级专家推荐意见.

注意事项:

会议录取的文章,将于六月上旬通知作者.

论文集将由正式出版社出版.

青作者自留底稿,无论是否录取,一律不退稿.

联系人及地址:

系人:张纪峰 电话:(01)2551965;传真:(01)2568364

地址:中国科学院系统科学研究所(北京100080)