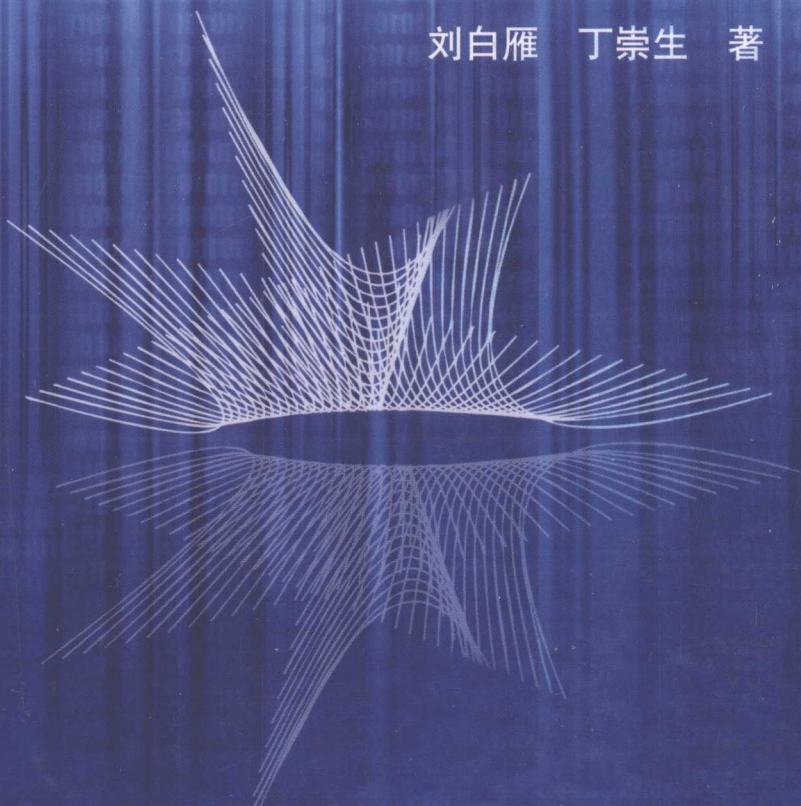


模型跟随自适应控制

新方法及其工程应用

刘白雁 丁崇生 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

模型跟随自适应控制 新方法及其工程应用

江苏工业学院图书馆
藏书章

刘白雁 丁宗生 著

西安交通大学出版社

TP273
L28

内 容 简 介

本书结合机电系统控制工程对古典和现代控制理论作了较详细的论述,并从工程实践的角度对各种控制策略和自适应控制方法进行了详细的分析,阐述了模型跟随自适应控制基本原理和新方法,以及具体的工程应用实例。本书可供自动控制和机械控制有关专业的科技人员,大学高年级学生和研究生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

模型跟随自适应控制新方法及其工程应用 / 刘白雁, 丁崇生著. —西安:西安交通大学出版社, 2004. 12
ISBN 7-5605-1929-6

I. 模... II. ①刘... ②丁... III. 模型跟随-自适应控制-教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 128364 号

书 名	模型跟随自适应控制新方法及其工程应用
著 者	刘白雁 丁崇生
出版发行	西安交通大学出版社
地 址	西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)
电 话	(029)82668357 82667874(发行部) (029)82668315 82669096(总编办)
印 刷	西安交通大学印刷厂
字 数	134 千字
开 本	850mm×1168mm 1/32
印 张	5.5
版 次	2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5605-1929-6/TP·392
定 价	12.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

20 世纪 30 年代形成的古典控制理论,即自动调节原理,在第二次世界大战前后有了很大发展,主要是应用于单输入单输出的线性定常系统,迄今为止仍然是控制工程中的好方法。随着数字计算机的发展以及工业过程特别是空间技术的需求,在 1960 年前后开始形成现代控制理论,可以适用于多输入多输出、时变及非线性系统。这两种控制理论都要求被控对象的结构和参数已知,而实际被控对象有些参数往往是未知的。为解决这个问题,大约在 1958 年开拓了自适应控制理论与方法。1974 年,美国 Goddard 宇航飞行中心在高精度卫星跟踪系统中采用自适应控制获得成功是著名实例。1977 年 Saridis 综合分析了对“自适应”的各种定义,标志着自适应控制走向成熟。在 20 世纪 80 年代,随着微处理器的迅速发展,自适应控制在理论与应用方面都取得了显著成就。

从工程应用的角度看来,现有的自适应控制方法可以分为两大类:一类需要在线辨识,这就要求控制信号有相当丰富的频率成份,以自校正控制方法为典范;另一类不要求在线辨识,但要求对被控对象有相当多的先验知识以建立自适应律,以模型参考自适应控制方法为典范。模型跟随自适应控制是模型参考自适应控制的一个重要分支,其自适应律比较简明,还可能有较好的控制效果,但它要求有相当多的先验知识以满足模型完全可跟随条件。这些方法已成功地应用于许多工程系统。

有些工程系统,尤其是机械工程系统,常常是参数很难测定(甚至结构都难确定),时变(有时并不是漂移式的慢时变),严重非线性(有的非线性因素不能线性化处理),并伴随有扰动(如相当严重的耦合扰动),有些状态很难测量(如瞬态流量,现在还没有便于工程应用的测量方法),有时其工况还不允许在线辨识。现有控制理论和方法

包括自适应控制方法,很难对这类工程系统实施有效控制,需要寻求新的实用的控制对策。

经过多年探索和实践,在 20 世纪 80 年代末我们提出并完成了“模型跟随自适应控制新方法”的理论研究。其基本想法是既保留发挥现有模型跟随自适应控制的长处(自适应律简明,可能有较好控制效果),又克服了它在实用中的限制(要求较多先验知识以满足模型可跟随条件等),使所需可跟随条件能自动满足,以绕开对先验知识的要求,并简练实用地替代解决状态测量问题。这种新方法主要是针对现有控制方法很难实施有效控制,其工况不允许在线辨识的确定性工程系统尤其是机械系统而研究提出的,并在高精度同步电液加载系统和三自由度振动系统上的单输入单输出控制系统两个课题中获得成功应用,实践证明这个新方法在工程应用时简单易行;要求先验知识少(如只需测估被控对象的阶次,或根据被控对象的阶跃响应,以确定采样周期等);在线运算时间短(在 PC386 微机上只要 1 个毫秒左右);对模外动态(Unmodelled Dynamics)和扰动的适应性强;还可把耦合关系未知(或不可测量)的多输入多输出系统当作有未知扰动的多个单输入单输出系统来进行解耦控制。

同行专家给这个新方法以很高评价,肯定它在理论上和学术上的意义,指出它在实际工程应用中有广泛前景,鼓励我们尽快把这个新方法介绍给科技界的同行。本书部分初稿完成于 1991 年,后又经过十几年的工程实践的检验,使我们确认这种方法具有相当广泛的实用性,因此决定将其整理出版。本书将比较全面系统地阐述我们的研究成果,即怎样突破现有自适应控制方法在实际应用时的多种限制,以及为适应各种实际情况而采取的策略,同时也如实说明当前研究中还存在的问题,以便于更多的同行了解全貌,恰当地应用到工程实践中去,并更深入地研究所碰到的问题,使这种新方法更加完善和实用。

为了兼顾自动控制专业和诸如机械控制工程等专业的读者,在撰写本书时努力做到深入浅出、由浅入深,使具备古典和现代控制理

论基础知识就能掌握本书的理论部分;具备工程力学和液压传动的一般常识就能看懂应用实例。

本书共分5章,第1章概述机械系统应用的各种控制策略和自适应控制,第2章阐述模型跟随自适应控制的基本原理和新方法的基本特点,第3章讨论新方法中的几种典型算法,第4章深入讨论新算法的实现和实际应用时的几个问题,第5章是工程应用实例。

本书可供自动控制和机械控制有关专业的科技人员,大学高年级学生和研究生参考阅读。

我国机械控制工程学科的创始人之一,西安交通大学的阳含和先生在生前曾对该项研究给予了极大的关心和支持;原西安交通大学校长、液压控制领域著名学者史维祥教授也对作者的研究工作给予了直接的指导;此外西安交通大学原液压教研室的葛思华、李天石教授,王昌工程师等也都参与过有关的课题研究,对此作者谨向他们表示真诚的感谢。

西北工业大学戴冠中教授和西安交通大学李天石教授审阅了全书,他们热情肯定了本书所开展的研究工作,并提出了许多宝贵的意见;西安交通大学出版社对本书的出版给予了大力支持;本项研究工作还得到国家自然科学基金、国家工业技术发展基金以及湖北省教育厅科学基金、湖北省机械传动与制造重点实验室开放基金的资助,在此一并给予衷心的感谢。

《易经》中〈系辞上传〉第十二章有如下一段:“形而上者谓之道;形而下者谓之器;化而裁之谓之变;推而行之谓之通;举而错之天下之民,谓之事业”。历经二十年,我们就本书的有关方面,在“道”和“器”间来回求索,或“变”或“能”反复实践,写出这本书奉献给同行,也算一点“事业”。

刘白雁 丁崇生

2004. 10. 20

目 录

前言

第1章 绪 论..... (1)

1.1 机电控制系统的特点 (3)

1.2 机电控制系统常用的控制策略 (4)

1.2.1 最优控制 (4)

1.2.2 PID(比例-积分-微分)控制 (5)

1.2.3 智能控制 (5)

1.2.4 迭代学习控制和预测控制 (7)

1.3 关于自适应控制方法的应用 (9)

1.3.1 需在线辨识类 (9)

1.3.2 不需在线辨识类..... (11)

1.3.3 提出问题..... (13)

第2章 模型跟随自适应控制新方法的基本原理 (14)

2.1 现有模型跟随自适应控制方法简介..... (14)

2.1.1 线性模型跟随控制与模型完全可跟随条件..... (14)

2.1.2 从稳定性到超稳定性理论..... (17)

2.1.3 现有模型跟随自适应控制方法的基本结构..... (22)

2.2 模型跟随自适应控制新方法的基本思路..... (25)

2.2.1 模型完全可跟随条件的自动满足..... (25)

2.2.2 状态可测量时的一个算法..... (27)

2.2.3 不能直接获取状态时的对策..... (30)

第3章 模型跟随自适应控制新方法的几种算法	(39)
3.1 一阶系统的模型跟随自适应控制	(39)
3.2 以输出作为状态的直接状态法	(44)
3.2.1 输入序列的线性组合	(44)
3.2.2 直接状态法的结构	(46)
3.2.3 直接状态法与一阶系统算法的异同	(51)
3.3 误差反馈法	(52)
3.4 最小范数状态法和重构状态法	(57)
3.4.1 最小范数状态法	(59)
3.4.2 重构状态法	(62)
3.5 误差速率法与输入速率法	(64)
3.5.1 误差速率法	(67)
3.5.2 输入速率法	(71)
第4章 新方法实现及工程应用中的基本问题	(74)
4.1 新方法实现中的基本问题	(74)
4.1.1 等价反馈系统非线性反馈通道满足波波夫不等式	(74)
4.1.2 前向通道输出 $V(k+1)$ 的近似估计	(81)
4.1.3 关于 $\hat{V}(k+1)$ 的讨论	(85)
4.2 新方法在工程应用中的基本问题	(86)
4.2.1 关于模外动态(Unmodelled Dynamics)	(86)
4.2.2 关于非线性	(87)
4.2.3 关于扰动和耦合	(88)
4.2.4 关于时变系统	(88)
4.2.5 关于非最小相位(NMP)系统	(89)
4.2.6 关于增益参数矩阵 R 的确定	(90)
4.2.7 采样时间的确定	(91)

4.2.8 关于跟随性	(91)
第5章 工程应用	(95)
5.1 钢坯修磨机磨削压力及其控制	(96)
5.1.1 磨削运动受力分析	(97)
5.1.2 磨削压力平稳性措施探讨	(98)
5.1.3 结论	(100)
5.2 电液控制系统的有关问题	(101)
5.2.1 伺服阀前的油液压力脉动	(101)
5.2.2 阀控缸的动刚度	(106)
5.2.3 阀控对称缸位置闭环系统动特性	(109)
5.3 立式双缸同步加载系统	(110)
5.3.1 系统描述	(111)
5.3.2 加载系统的模型跟随自适应控制	(114)
5.4 卧式双缸电液伺服试验机系统	(120)
5.4.1 试验机的同步控制	(121)
5.4.2 负刚度控制	(122)
5.4.3 控制方式平滑切换	(125)
5.5 柱塞缸电液伺服系统	(128)
5.5.1 柱塞缸电液伺服系统动特性	(128)
5.5.2 控制策略与实施	(131)
5.6 板簧电液伺服试验机系统	(133)
5.6.1 板簧的力学特性	(133)
5.6.2 电液伺服试验机的控制特点	(136)
5.6.3 控制策略和试验结果	(137)
5.7 阀缸间管道的影响及其校正	(140)
5.7.1 试验系统和参数	(140)
5.7.2 试验结果与分析	(141)

5.8	二级倒立摆的模型跟随自适应控制	(144)
5.8.1	直线二级倒立摆系统	(145)
5.8.2	直线二级倒立摆的 LQR 控制	(146)
5.8.3	倒立摆的模型跟随控制	(147)
5.8.4	仿真与试验	(151)
附录一	广义逆矩阵与相容方程组的解	(154)
附录二	模型跟随自适应控制新方法部分已发表的论文	(159)
参考文献		(161)

第1章 绪论

大约 200 年前,瓦特采用转速调节器以调节蒸汽机的转速,使蒸汽机进入实用并成为工业革命的动力基础,这可以说是机械自动控制的鼻祖。19 世纪,许多数学家对微分方程的稳定性进行了深入的研究,成为发展自动控制理论的基石。20 世纪初,斯泼利(Sperry)发明利用陀螺仪使飞机稳定飞行的自动驾驶仪原型,也可以归结为对机械动力学系统的自动控制。在第二次世界大战,火力控制等军用系统对高精度反馈控制系统的需求,推动了对更有效的分析设计方法的研究,当时有一个概念上的突破,那就是发现贝尔(Bell)电话实验室为设计反馈放大器而发展的频率响应法也可以应用于伺服机构中的机械部分,即所谓“螺帽螺栓”(Nuts - and - Bolts)问题。频域法可以大大简化伺服机构中复杂的动力学设计问题,它在火力控制等军用系统中得到广泛应用。如 B - 29 轰炸机 1945 年单机去日本扔原子弹并在朝鲜战场狂轰滥炸,由于自身有 5 台可以联动的电动炮塔组成完备的火力网,当时号称空中堡垒;又如在越南战争和海湾战争中用的 B - 52 轰炸机,以液压炮塔组成火力网;早期的导弹也是用这种方法设计的。

在二次世界大战期间,大部分研究工作是保密的,除了在 1943 年哈尔(A. C. Hall)发表外,基本上没有公开。只是在二次大战后才在许多教科书中陈述了新的反馈控制系统理论,这就是现在称为在 20 世纪 30 年代形成的古典控制理论,其主要特征是用频域法分析单输入单输出的线性定常系统,其主要形式是表达输入输出关系的

传递函数,而其实质是以频域法分析研究线性常系数微分方程。由于许多工业过程都可以近似抽象为线性常系数微分方程,因而古典控制理论仍然是控制工程中可以广泛应用的好方法。

以上简要回顾历史^{[2][3][4][5]},可以说明自动控制的实践始自机械动力学系统,自动控制理论源自放大器和“螺帽螺栓”的结合,或者说机械与电的结合。

到 20 世纪 60 年代,在近代数学和电子计算机的基础上,在宇航军事工业的推动下,发展了现代控制理论,它建立在系统内部状态基础上,以状态向量为基本工具,可以处理多输入多输出、时变、非线性系统。它在各种航天器和登月舱的设计中取得了明显的效果。

古典和现代控制理论都要求被控对象的结构和参数已知,而实际工程实践中往往有些参数未知。大约从 1958 年开始,开拓了自适应控制理论与方法。20 世纪 70 年代以后,在模糊数学的基础上发展了模糊控制。20 世纪 80 年代以后,控制理论开始与人工智能相结合,又开始了智能控制。20 世纪 30 年代以后控制理论发展迅速,其应用范围也从军事工业扩展到国民经济各部门。

我国在这方面起步较晚。虽然解放初期军工系统就在实践上已把自动控制和机械系统揉合在一起,但在全国范围内,是 20 世纪 50 年代中著名力学家和控制论专家钱学森创导在有关高等院校建立了自动控制与自动化专业。20 世纪 60 年代初,史维祥教授编著《液压随动系统》^[6],开始了液压与控制的结合。后来阳含和教授把控制理论引入机械工程,明确提出“机械控制工程”^[7],1984 年日本出版《机械系统控制》^[2]。现在,机电一体化已成为众所周知的提法。这样,机械与控制之间走完了从一体、分离到更高层次的一体这样一个过程。

对于现在工程界常谈到的“机电系统”一词,还没有看到明确的定义来规定它的内涵和外延,只是个模糊的概念。但可以说,这个名词的诞生,表明机械(包括流体)系统本身有很大发展,例如伺服阀一

个元件本身就是机械和电子的结合,机电控制系统是机械与电子紧密结合的控制系统,机电系统发展的基础是机械系统基本机理的研究和基础元件的研究开发,也需要控制理论的应用与研究。

1.1 机电控制系统的特点

从古典控制理论引入贝尔电话实验室的频域法开始,大量借用电子学的理论成果,分析机械系统时,从简化抽象得到的微分方程与电子学的相比拟,以相似量如机械阻抗、液感、液容、液阻等建立相似系统,这是反映本质的、合理的。但在工程实践中,机械系统与电子系统相比,又有一些特点,直接影响到对控制理论的应用,这里讨论机电系统的特点,主要是讲其中机械部分的特点,我们体会会有以下几方面:

(1)参数值测不准。例如液压系统中的液压弹簧刚度,由于液压油的弹性模量随工况变化以及容积特性(尤其是连接各种橡胶管道)随工况变化,始终是个捉摸不定的量;又如各种复杂结构件,尤其是各向异性材料构件、有裂纹构件以及进入弹塑性区的构件,其运动特性甚至连动力学方程都难确定。

(2)非线性特性难于辨识或本身复杂难于抽象成较准确的数学模型。例如液压系统非对称缸和柱塞缸,由于控制阀的实际误差和连接容腔的影响,其正反向运动时动特性的实际不对称情况,很难估计和测定;又如分析运动轨迹时,构件通常按刚体分析,实际上构件的弹性变形、连接件因间隙的相对运动和弹塑性变形导致说不清的非线性;至于最常见的摩擦非线性,近年研究有6种以上模型,多为不对称^[8],系数分散性大^[9],实践中又很难逐件做大量试验,也很难说清。

(3)大范围内的时变特性。液压伺服系统中阀的流量系数随开口而变,流量随油温与压力而变,机械尺寸随温度变化而变化等。

(4)测量方法与手段限制。对许多机械系统,要施加阶跃输入、高频区正弦输入或伪随机信号输入,往往是很困难甚至不可能的。又如流体的瞬态流量,至今还没有一种可供工程实用的测量手段。

(5)调试困难。有的因为弄不清机理,有的因为涉及重新设计加工、经费周期限制而希望一次成功,还有难以测量的振动耦合等因素。

机械系统与电子系统相比有以上特点,或者总体来讲是一个难以认识清的特点,在实施控制时也有其相应特点。工程实践中的出路,一是降低性能指标或求得一定条件下的折衷,二是靠人工反复调试,三是大幅度提高成本。希望能有一个消化各种说不清因素的大口袋,作者希望本书能起到抛砖引玉的作用。

1.2 机电控制系统常用的控制策略

机电系统由于它的上述特点,实施控制时应根据不同的设计目的采用特定的控制策略。有许多成功的例子,从我们的实践和看到的报导中,主要有最优控制、PID控制、智能控制和自适应控制。为本书的需要,自适应控制将在下节叙述,其余简述于下。

1.2.1 最优控制

最优控制有成熟的理论与现成的公式,可用于跟踪问题和调节问题,其适用对象是参数已知的线性系统。所谓最优是使事先选定的目标函数为最小。机电系统由于其参数很难准确获得,跟踪问题应用成功的例子不多,对调节问题是要实现状态观测与最优状态反馈,简称“状态反馈”,有不少成功的例子。如直动式比例溢流阀^[10],原设计分析为七阶,不少参数采用理论估计值或一定工况下的实验值,为便于实现状态观测与状态反馈,以集结法将模型降为三阶。这就是说,设计最优状态反馈时所取参数是一定工况下的近似,其性能

改善也是一定条件下的折衷,因而即使目标函数选得十分正确,也只是原理上的最优控制实际上的次优控制。即使这样,阀的频宽还是从 4.2 Hz 提高到 12 Hz。另对二级比例阀其频宽也从 4.7 Hz 提高到 11 Hz,和原有指标相比,有了很大的改善,当然不是在任何工况下都是“最优”。

这就是说,机电系统应用最优控制理论,虽然在实际上获得的是“次优”,在一定条件下仍能大幅提高性能,是有广泛前景的。

1.2.2 PID(比例-积分-微分)控制

经过几十年工业实践证明,PID 控制是适应性很强的有效控制方法,在机电系统中仍广泛应用。如 20 世纪 80 年代中期,我国从美国 MTS 公司进口的多通道疲劳试验机,驱动器为阀控非对称缸,以高成本保证高质量,把非线性因素降到最低限度。在正式试验前,先安装好被试件,反复调整各通道的比例、积分和微分常数,调整时间需一周左右,可以达到稳态精度为 0.5%,动态精度为 3%。可以看出,该公司的设计思想是把被试结构件当作参数未知却是定常的线性多变量系统,用熟练技术人员的经验来选定各通道的控制参数,显然,从本质上讲,这种方法只能适用于被试结构件在线弹性区域内的疲劳性能,一旦超出线弹性区进入弹塑性区,控制精度将明显下降。

其它日、英、德各国材料试验机的原理与方法类同。从文献[11]和文献[12]可以看出,各国正研究探索新的控制策略,以简化操作和提高精度。

1.2.3 智能控制

目前,对于智能、智能控制这些概念并没有严格的定义,依研究者所在领域和看问题角度的不同,所给出的定义可能会有较大的差异。按照参考文献[57],一个处于不确定环境下的系统如果能够采

取适当的行动,使得系统能够成功实现最终目标的概率不断增加,这种系统就是具有智能的观点,模糊控制、专家控制、神经网络控制以及仿人控制^[58]等都可以归纳在智能控制的范畴。

1. 模糊控制

自 1965 年扎德(Zadeh)教授创立模糊数学以来,模糊逻辑在控制领域的理论与应用研究就得到了迅速的发展。这主要是因为模糊系统理论能有效地利用人类知识(基于自然语言),并且将基于知识的系统(模糊系统)采用同数学模型及传感器测量一样的方式,应用到实际工程控制中而具有极大吸引力。但模糊控制需要对人的经验按模糊数学原则进行加工以制定控制律(即模糊规则库、模糊推理机等),控制效果取决于上述控制律的客观性。近年来国内外发表论文不少。

2. 专家控制

瑞典籍学者 Åström 于 1986 年首次正式提出了专家控制的概念^[59]。专家控制是把人工智能专家系统理论和技术同控制理论、方法与技术相结合而形成的一种智能控制方法。这种方法借助于产生式规则(IF... THEN...)来利用人类专家对客观实践的规律性的经验知识,实现对被控对象的正确控制。与仿人智能控制不同的是,专家控制通常包含常规的控制方法,如最优控制、PID 控制、自适应控制等,以便针对不同的情况选择不同的控制算法或控制算法的不同参数。专家控制系统实现的关键在于复杂、多样的控制知识的获取和组织方法,及其实时推理技术。

例如闭环数字阀(发明专利申请号 88108207.4,《发明专利公报》1990 年 6 卷 24 期已公开),由于数学模型是随机的非线性模型,采样周期亦随机,一般控制方法难以奏效,所用的控制器是在误差与误差变化率平面上分区选用不同的 PID 参数。从技术上讲,一是正确的思路和理论分析,二是在大量试验基础上总结经验,适当分区并

选定合适参数^[13]。结合利用启发式逻辑,使这种阀的频宽可超过 20 Hz,显示了专家控制技术的潜力。如果能赋予它“知识获取”能力以自动修改分区或参数,想能有更好性能。可以预计,智能控制将在机电系统中发挥卓越作用。

3. 人工神经网络控制

人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)是利用工程技术手段实现对人脑神经网络的一种简单、抽象的模拟,现多简称为神经网络(NN)。神经网络可广泛应用于模式识别、分类,故障诊断,系统辨识,自动控制等诸多领域,而在工程控制中应用较多的则是如 1.2.4 节中所述轨迹已知且允许在线学习的工况,以便对网络进行学习训练。

在各种类型的人工神经网络中,BP 神经网络是应用最为广泛的一种。BP 网络是一种利用误差反馈算法,即 BP(Back Propagation)算法调整网络权值的一种多层前向网络。已经证明,具有 Sigmoid 函数(即形如 $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ 之类的函数)的三层前向网络可以任意精度逼近任何连续函数^[53],因此利用 BP 网络的这种能力可使神经网络控制器“学习”被控对象可能存在的非线性特性,是一种很有潜力的智能控制方法。但由于这种方法存在的“泛化”、局部极小点、收敛慢以及计算量大等问题尚未很好解决,因而离实用尚有一段差距。

1.2.4 迭代学习控制和预测控制

由被控对象的工作轨迹是否已知,机电控制系统可分为两类:一类为轨迹未知,如火力控制系统,其攻击对象要机智运动,古典控制理论就是为研发这类伺服系统而形成的,因此习惯上讲控制常是指对工作轨迹未知的伺服系统进行控制;另一类为轨迹已知,如异园切削系统,其要加工的产品有图纸,从中可得出刀具运动的轨迹,对于