

自动控制理论发展综述

长沙中南工业大学信息工程学院(410083) 王国军 陈松乔

摘要: 综述了自动控制理论的发展情况,指出自动控制理论所经历的三个发展阶段,即经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论。最后指出,各种控制理论的复合能够取长补短,是控制理论的发展方向。

关键词: 自动控制理论 人工智能 智能控制

自动控制理论是自动控制科学的核心。自动控制理论自创立至今已经过了三代的发展:第一代于 20 世纪初开始形成并于 50 年代趋于成熟的经典反馈控制理论;第二代为 50、60 年代在线性代数的数学基础上发展起来的现代控制理论;第三代为 60 年代中期即已萌芽,在发展过程中综合了人工智能、自动控制、运筹学、信息论等多学科的最新成果并在此基础上形成的智能控制理论。经典控制理论(本质上是频域方法)和现代控制理论(本质上是时域方法)都是建立在控制对象精确模型上的控制理论,而实际上的工业生产系统中的控制对象和过程大多具有非线性、时变性、变结构、不确定性、多层次、多因素等特点,难以建立精确的数学模型。因此,自动控制专家和学者希望能从要解决问题领域的知识出发,利用熟练操作者的丰富经验、思维和判断能力,来实现对上述复杂系统的控制,这就是基于知识的不依赖于精确的数学模型的智能控制。本文将对经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论的发展情况及基本内容进行介绍。

1 自动控制理论发展概述

自动控制是指应用自动化仪器仪表或自动控制装置代替人自动地对仪器设备或工业生产过程进行控制,使之达到预期的状态或性能指标。对传统的工业生产过程采用自动控制技术,可以有效提高产品的质量和企业的经济效益。对一些恶劣环境下的控制操作,自动控制显得尤其重要。

自动控制理论是与人类社会发展密切联系的一门学科,是自动控制科学的核心。自从 19 世纪 Maxwell 对具有调速器的蒸汽发动机系统进行线性常微分方程描述及稳定性分析以来,经过 20 世纪初 Nyquist, Bode, Harris, Evans, Wiener, Nichols 等人的杰出贡献,终于形成了经典反馈控制理论基础,并于 50 年代趋于成熟。经典控制

理论的特点是以传递函数为数学工具,采用频域方法,主要研究“单输入—单输出”线性定常控制系统的分析与设计,但它存在着一定的局限性,即对“多输入—多输出”系统*不宜用经典控制理论解决,特别是对非线性、时变系统更是无能为力。随着 20 世纪 40 年代中期计算机的出现及其应用领域的不断扩展,促进了自动控制理论朝着更为复杂也更为严密的方向发展,特别是在 Kalman 提出的可控性和可观测性概念以及 Понтрягин 提出的极大值理论的基础上,在 20 世纪 50、60 年代开始出现了以状态空间分析(应用线性代数)为基础的现代控制理论。现代控制理论本质上是一种“时域法”,其研究内容非常广泛,主要包括三个基本内容:多变量线性系统理论、最优控制理论以及最优估计与系统辨识理论。现代控制理论从理论上解决了系统的可控性、可观测性、稳定性以及许多复杂系统的控制问题。但是,随着现代科学技术的迅速发展,生产系统的规模越来越大,形成了复杂的大系统,导致了控制对象、控制器以及控制任务和目的的日益复杂化,从而导致现代控制理论的成果很少在实际中得到应用。经典控制理论、现代控制理论在应用中遇到了不少难题,影响了它们的实际应用,其主要原因有三:①这些控制系统的设计和分析都是建立在精确的数学模型的基础上的,而实际系统由于存在不确定性、不完全性、模糊性、时变性、非线性等因素,一般很难获得精确的数学模型;②研究这些系统时,人们必须提出一些比较苛刻的假设,而这些假设在应用中往往与实际不符;③为了提高控制性能,整个控制系统变得极为复杂,这不仅增加了设备投资,也降低了系统的可靠性。于是,自动控制工作者一直在寻求新的出路,他们在考虑:能否不要完全以控制对象为研究主体,而以控制器为研究主体呢?能否用 20 世纪 50 年代中期出现并得到快速发展的人工智能的逻辑推理、启发

* 经典的基于传递函数和频域分析的方法原则上只适宜于解决“单输入—单输出”线性定常系统的问题,但也可以推广到“多输入—多输出”线性定常系统中去。读者可参见有关文献。

式知识、专家系统等来解决难以建立精确数学模型的控制问题呢?第三代控制理论即智能控制理论就是在这样的背景下提出来的,它是人工智能和自动控制交叉的产物,是当今自动控制科学的出路之一。下面分别介绍三代控制理论的发展及其最基本内容。

2 经典控制理论的发展及基本内容

自动控制中一个最基本的概念是反馈,人类对反馈控制的应用可以追溯到很早的时期。但是,直到产业革命时期,英国人 James Watt 发明蒸汽机离心飞锤式调速器,解决了在负载变化条件下保持蒸汽机基本恒速的问题,自动控制才引起人们的重视。从那时起的 100 多年以来,随着社会生产力的发展和需要,自动控制理论和技术也得到了不断的发展和提高。在 20 世纪 30 至 40 年代期间, Nyquist 于 1932 年提出稳定性的频率判据, Bode 于 1940 年在频率法中引入对数坐标系并于 1945 年写了《网络分析和反馈放大器设计》一书, Harris 于 1942 年引入传递函数概念, Evans 于 1948 年提出根轨迹法, Wiener 于 1949 年出版了《控制—关于在动物和机器中控制和通讯的科学》一书。由于他们卓越的工作,从而奠定了经典控制理论的基础。到 20 世纪 50 年代,经典控制理论已趋于成熟。

经典控制理论主要用于解决反馈控制系统中控制器的分析与设计的问题。图 1 为反馈控制系统的简化原理框图。

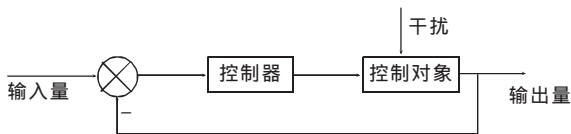


图 1 反馈控制系统的简化原理框图

经典控制理论主要研究线性定常系统。所谓线性控制系统是指系统中各组成环节或元件的状态或特性可以用线性微分方程描述的系统。如果描述该线性系统的微分方程的系数是常数,则称为线性定常系统。描述自动控制系统输入量、输出量和内部量之间关系的数学表达式称为系统的数学模型,它是分析和设计控制系统的基础。经典控制理论中广泛使用的频率法和根轨迹法,是建立在传递函数基础上的。线性定常系统的传递函数是在零初始条件下系统输出量的拉普拉斯变换与输入量的拉普拉斯变换之比,是描述系统的频域模型。传递函数只描述了系统的输入、输出关系,没有内部变量的表示。经典控制理论的特点是以传递函数为数学工具,本质上是频域方法,主要研究“单输入—单输出”线性定常控制系统的分析与设计,对线性定常系统已经形成相当成熟的理论。典型的经典控制理论包括 PID 控制、Smith 控制、解耦控制、Dalin 控制、串级控制等。

经典控制理论尽管原则上只适宜于解决“单输入—

单输出”系统中的分析与设计问题,但是,经典控制理论至今仍活跃在各种工业控制领域中。事实上,经典控制理论现在仍不失其价值和实用意义,仍是进一步研究现代控制理论和智能控制理论的基础。

3 现代控制理论的发展及基本内容

经典控制理论虽然具有很大的实用价值,但也有着明显的局限性。其局限性表现在下面两个方面:第一,经典控制理论建立在传递函数和频率特性的基础上,而传递函数和频率特性均属于系统的外部描述(只描述输入量和输出量之间的关系),不能充分反映系统内部的状态;第二,无论是根轨迹法还是频率法,本质上是频域法(或称复域法),都要通过积分变换(包括拉普拉斯变换、傅立叶变换、Z 变换),因此原则上只适宜于解决“单输入—单输出”线性定常系统的问题,对“多输入—多输出”系统不宜用经典控制理论解决,特别是对非线性、时变系统更是无能为力。

现代控制理论正是为了克服经典控制理论的局限性而在 20 世纪 50、60 年代逐步发展起来的。现代控制理论本质上是一种“时域法”。它引入了“状态”的概念,用“状态变量”(系统内部变量)及“状态方程”描述系统,因而更能反映出系统的内在本质与特性。从数学的观点看,现代控制理论中的状态变量法,简单地说就是将描述系统运动的高阶微分方程,改写成一阶联立微分方程组的形式,或者将系统的运动直接用一阶微分方程组表示。这个一阶微分方程组就叫做状态方程。采用状态方程后,最主要的优点是系统的运动方程采用向量、矩阵形式表示,因此形式简单、概念清晰、运算方便,尤其是对于多变量、时变系统更是明显。特别是在 Kalman 提出的可控性和可观性概念和 Понтрягин 提出的极大值理论的基础上,现代控制理论被引向更为深入的研究。现代控制理论研究的主要内容包括三部分:多变量线性系统理论、最优控制理论以及最优估计与系统辨识理论。由于篇幅所限,有关现代控制理论研究的具体内容请参见有关文献,这里从略。

现代控制理论从理论上解决了系统的可控性、可观性、稳定性以及许多复杂系统的控制问题。但是,随着现代科学技术的迅速发展,生产系统的规模越来越大,形成了复杂的大系统,导致了控制对象、控制器以及控制任务和目的的日益复杂化,从而导致现代控制理论的成果很少在实际中得到应用。

4 智能控制理论的发展及基本内容

“智能控制”这一概念是美国普渡大学(Purdue University)电气工程系的美籍华人傅京孙教授于 20 世纪 70 年代初提出来的。早在 1965 年,他提出把人工智能领域中的启发式规则应用于学习系统,这一时期可以看作是“智能控制”思想的萌芽阶段。“智能控制”是在当时经典

控制理论和现代控制理论在实际应用中面临着严峻挑战的时期自动控制工作者苦于为自动控制理论寻求新出路而提出来的,它是人工智能和自动控制交叉的产物,是当今自动控制科学的出路之一。

智能控制是指驱动智能机器自主地实现其目标的过程,也就是说,智能控制是一类无需人的直接干预就能独立地驱动智能机器实现其目标的自动控制。智能控制的基础是人工智能、控制论、运筹学和信息论等学科的交叉。智能控制理论及系统具有下面几个鲜明的特点:第一,在分析和设计智能控制系统时,重点不要放在传统控制器的分析和设计上,而要放在智能机模型上,也就是说,不要把重点放在对数学公式的描述、计算和处理上(实际上,一些复杂大系统可能根本无法用精确的数学模型进行描述),而要把重点放在对非数学模型的描述、符号和环境的识别、知识库和推理机设计和开发等上面来。第二,智能控制的核心是高层控制,其任务在于对实际环境或过程进行组织,即决策和规划,实现广义问题求解。第三,智能控制是一门边缘交叉学科,傅京孙教授于1971年首先提出了智能控制的二元交集理论(即人工智能和自动控制的交叉),美国的G.N.Saridis于1977年把傅京孙的二元结构扩展为三元结构(即人工智能、自动控制和运筹学的交叉),后来中南工业大学的蔡自兴教授又将三元结构扩展为四元结构(即人工智能、自动控制、运筹学和信息论的交叉),从而进一步完善了智能控制的结构理论。第四,智能控制是一个新兴的研究和应用领域,有着极其诱人的发展前途。

自从“智能控制”概念的提出到现在,自动控制和人工智能专家和学者已经提出了各种智能控制理论,有些已经在实际中发挥了重要作用。下面对一些有影响的智能控制理论和系统进行介绍。

4.1 递阶智能控制

递阶智能控制(Hierarchical Intelligent Control)是在研究早期学习控制系统的基础上,从工程控制论角度总结人工智能与自适应控制、自学习控制和自组织控制的关系之后逐渐形成的,它是智能控制的最早理论之一。该理论最初是由G.N.Saridis提出的。该系统由组织级、协调级、执行级3级组成。递阶智能控制遵循“精度随智能降低而提高”的原理分级分布。在递阶智能控制系统中,智能主要体现在高的层次即组织级上,由人工智能起控制作用;协调级是组织级和执行级之间的接口,承上起下,由人工智能和运筹学共同作用;执行级要求具有较高的精度和较低的智能,仍然采用现有数学解析控制算法,对相关过程执行适当的控制作用。

4.2 专家智能控制

专家系统(Expert System)是人工智能的一个重要分支,它是于1965年由美国斯坦福大学当时的年轻教授E.

A. Feigenbaum 开创的人工智能研究的新领域。专家系统ES与当时人们追求的通用问题求解程序GPS不同,专家系统并不试图发现很强有力的和很通用的问题求解方法,它把研究范围缩小在一个特定的相对狭小的专业领域中。人类专家之所以成为专家,是因为他拥有解决自己专业领域问题的大量专门知识,包括各种有用的诀窍和经验,专家系统实际上就是在计算机上实现的这种领域专家的模仿物。

应用专家系统的概念和技术,模拟人类专家的控制知识与经验而建造的控制系统,就是专家控制系统。虽然专家控制系统是基于专家系统建立起来的,但是它与专家系统之间存在一些重要差别。首先,一般的专家系统中操作人员是系统的组成部分,通过人机对话完成“计算机专家”的功能,而专家控制系统中没有操作人员的参与,要求专家控制系统能够独立和自动地对控制对象做出决策;其次,专家系统通常以离线方式工作,而专家控制系统需要获取在线动态信息,并对系统进行实时控制。

4.3 模糊智能控制

模糊理论是美国加利福尼亚大学的自动控制理论专家L.A.Zadeh教授最先提出的。1965年他在“Information&Control”杂志上发表了“Fuzzy Set”(模糊集)一文,首次提出了模糊集合的概念,并很快被人们接受。1974年,英国的Mamdani首先把模糊理论用于工业控制,取得了良好的效果。从此,模糊逻辑控制理论和模糊逻辑控制系统的应用发展很快,展示了模糊理论在控制领域中有着很好的发展前景。模糊逻辑控制现已成为智能控制的重要组成部分。

专家控制系统和模糊逻辑控制系统至少有一点是共同的,即二者都要建立人类经验和人类决策行为的模型。此外,二者都含有知识库和推理机。因此,模糊逻辑控制器(FLC)通常又称为模糊专家控制器(FEC),有时人们也把模糊专家系统叫做第二代专家系统,因为它能够为专家系统的设计、开发和实现提供2个基本的和统一的优点,即模糊知识表示和模糊推理方法。

4.4 神经网络智能控制

1943年麦卡洛克和皮茨(Pitts)提出一种叫做“似脑机器”(Mindlike Machine)的思想。这种机器可由基于生物神经元特性的互连模型来制造,这就是最初的人工神经网络(ANN)概念。随着人工神经网络应用研究的不断深入,新的神经网络模型不断推出,现有的神经网络模型已达近百种。在智能控制领域中,应用最多的是BP网络、Hopfield网络、自组织神经网络、动态递归网络、联想记忆网络、Adaline网络等。

基于神经网络的智能控制系统作为一个新兴领域,之所以能引起自动控制界的广泛兴趣,其原因是:①神经

网络具有逼近任何非线性函数的能力；②神经网络易于用 VLSI 实现，从而使神经网络具有快速和容错性高的优点；③神经网络自身的结构及其多输入多输出的特点，使其易于多变量系统的控制，且与其它逼近方法相比较更为经济；④神经网络具有自适应和自学习的特性。神经网络的这些特点表明它有着传递函数在线性系统中的作用，但能够自然地扩展到具有非线性、时变性、复杂性、不确定性的系统中。值得提出的是，虽然其特点十分具有吸引力，但其理论研究还不成熟，许多问题还有待进一步研究。

4.5 学习控制系统

人们对学习机器的设想与研究始于 20 世纪 50 年代，它是一种模拟人的记忆与条件反射的自动装置。学习机的概念是与控制论同时出现的。现有的机器学习的方法种类繁多，如归纳学习、类比学习、基于解释的学习和基于人工神经网络的学习等等。学习控制最初用于解决飞行器的控制、模式分类和通信等问题，然后逐渐用于电力系统和生产过程控制。学习控制系统能够处理具有不确定性和非线性的过程，并能保证良好的适应性、满意的稳定性和足够快的收敛。因此，近年来学习控制系统已获得广泛的应用。

4.6 定性控制理论

定性推理(Qualitative Reasoning)是一种基于模型的推理。定性推理的对象是现实世界的物理系统，例如机器装置或电子器件。定性推理的基本思想是：为了搞清楚一个物理系统的行为，往往不需要使用严格的定量方法。传统的专家系统所进行的推理广义上都认为是定性的，但与这里讲的定性推理不同。定性推理不是通过收集系统变量在不同时间点上的取值来模拟系统行为，而是在更高的抽象层次上关心系统行为的定性特征，以便掌握用于行为定性推理的知识种类，开发用于这种知识表示的一般模式，并寻求对物理系统进行行为推理的有效过程。

将定性推理应用到控制领域，便形成了智能控制的又一个新的分支，即定性控制。1986 年，Clocksin 和 Morgan 发表了“Qualitative Control”论文，第一次给出了定性控制的要领，提出了几种控制方案并将其同常规的控制方法做了比较，随后出现了一系列有关定性控制的文章。定性控制器根据系统的不完全的知识，对系统的输出行为做出预测和控制，这是常规控制器所无法完成的。这里还有必要指出定性控制同模糊控制的主要区别：①模糊控制基于“黑箱”系统，不需要建立数学模型，其控制规则需要凭经验或算法调整，而定性控制则基于定性模型，控制规则基于人们对系统的定性分析。②模糊控制是基于状态的精确测量值，而定性控制基于状态的定性测量值。

《微型机与应用》2000 年第 6 期

4.7 遗传算法与控制理论结合

遗传算法(Genetic Algorithm)作为一种解决复杂问题的有效方法，最初是由美国密执安大学的 John Holland 教授于 1975 年提出来的。遗传算法的基本思想是基于 Darwin 的进化论和 Mendel 的遗传学说。遗传算法通过将问题转换成由染色体组成的进化群体和对该群体进行操作的一组遗传算子(最基本的 3 个遗传算子是复制、交叉和突变)，通过“适者生存，不适者淘汰”的进化机制，经过“生成—评价—选择—操作”的进化过程反复进行，直到搜索到最优解为止。当前，遗传算法用于自动控制主要是进行系统参数辨识、控制参数在线优化、神经网络中的学习等。虽然遗传算法与控制理论的结合有其突出的特点，但是，由于它目前还不能满足控制系统实时性的要求，所以影响了它的实际应用。

5 结 论

以上我们介绍了自动控制理论的发展情况，指出了自动控制理论已经历的三代的发展，即第一代的经典控制理论，第二代的现代控制理论和第三代的智能控制理论。之后我们还指出，各种控制理论都有其优点、缺点和适用范围，如果能够取长补短，则必然能够扩大其应用的范围，因而是控制理论的发展方向。事实上，现在已经出现了集经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论于一身的各种复合控制理论，如模糊 PID 复合控制、模糊变结构控制、自适应模糊控制、模糊预测控制、模糊神经网络控制、专家 PID 控制、专家模糊控制等等，有关复合控制的更详细的介绍请参见有关文献。

参考文献

- 1 蔡自兴,徐光祐.人工智能及其应用(第二版).北京:清华大学出版社,1996
- 2 蔡自兴.智能控制—基础与应用.北京:国防工业出版社,1998
- 3 王耀南.智能控制系统—模糊逻辑·专家系统·神经网络控制.长沙:湖南大学出版社,1996
- 4 蔡自兴.神经控制器的典型结构.控制理论与应用,1998;15(1):1
- 5 袁南儿.计算机控制策略的发展、渗透和复合.工业仪表与自动化装置,1998;(6):7
- 6 吴宏鑫,解永春.基于对象特征模型描述的智能控制,自动化学报,1999;25(1):9
- 7 刘林运,万百五.定性控制综述.信息与控制,1998;27(1):46
- 8 曹建福,韩崇昭.非线性控制系统的频谱理论及应用.控制与决策,1998;13(3):193
- 9 Huang S J,Shy C Y.Intelligent control for handling motion nonlinearity in a retrofitted machining table, IEE Proc.Control Theroy Appl.,1998;145(4)

(收稿日期:1999-12-12)