



研究生教材

ZHINENG KONGZHI
LILUN JI YINGYONG

智能控制 理论及应用

韩 璞 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

华北电力大学韩璞教授，具有30多年的教学与科研经历，积累了非常丰富的教学经验和较高的教学水平，同时也有着极其深厚的科研功底和生产实际经验；发表了400余篇论文和12部著作；近些年科研经费达数千万元。取得的主要标志性成果有：

①率先提出了“基于虚拟DCS的激励式仿真机”并设计了仿真机支撑系统，现在该类型仿真机在国内已成为主流产品；

②开发了“分散控制与现场总线控制系统设计与开发平台”，在该平台上已经为近10家厂家开发了DCS、FCS、COP（优化控制站）等产品，为大型工业控制系统的国产化和普及化作出了重要的贡献；

③为“火电厂信息化技术与系统”的核心技术开发了“实时/历史数据库”，在此基础上开发了数个火电厂的信息化系统，为我国的“两化融合”贡献了力量。



研究生教材

ZHINENG KONGZHI
LILUN JI YINGYONG

智能控制 理论及应用

编 著 韩 璞 董 泽 王东风
翟永杰 焦嵩鸣
主 审 刘金琨



 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以发电行业为工程背景,理论紧密联系实际,讲述了人工智能算法在控制工程中应用的各类问题;较系统全面地介绍了自动控制理论的发展过程及智能控制理论的发展及应用现状;为给后续各章程序设计打下基础,论述了自动控制系统的数字仿真方法;论述了经典的和现代的多种优化算法以及智能辨识方法,通过工程实例阐明了智能理论的实际应用方法;介绍了模糊数学基础,并详细地论述了模糊控制器的设计方法和工程应用所面临的实际问题,为模糊控制器的工程应用提供了参考;论述了专家系统在离线优化和在线优化控制中的应用方法;论述了神经网络在系统辨识、故障诊断和优化控制中的应用方法。为方便读者理解书中内容和设计程序,以及方便程序代码的转换,书中的程序采用 MATLAB 的基本语句进行设计,而不使用 MATLAB 的工具箱和复杂函数。另外,本书附有光盘,提供了书中主要内容的程序清单,供读者参考。

书中所给出的实例大多是工程实际问题,所阐述的许多方法都是作者在工程研究项目中所用到的,有些算法由本书作者首创,书中的程序可直接用于工程实际。

本书可作为高等院校自动化专业高年级学生及控制科学与工程专业的硕士、博士研究生的教材,亦可作为工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制理论及应用/韩璞等编著. —北京:中国电力出版社, 2012. 12

研究生教材

ISBN 978-7-5123-3866-1

I. ①智… II. ①韩… III. ①智能控制-研究生-教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 304047 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 3 月第一版 2013 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13 印张 313 千字

定价 30.00 元 (含 ICD)

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

智能控制起源于 20 世纪 70 年代,至今已有近 40 年的发展历史。到了 20 世纪 80 年代后期,智能控制有了快速发展,这很可能是得益于 IPC(工业个人计算机)的应用。在这 40 多年中,发表了很多关于智能控制的论文,但在工程中实际应用得却比较少,许多应用是试验性的,并不具有普适性。有些算法应用在个别领域,有些算法也仅仅是应用在个别系统。究其原因是,到目前为止,人工智能还没有一个完备的、大家都能接受的理论体系,人们所能模拟的也仅仅是“人脑智能”的最初始阶段,也仅仅是利用了计算机的逻辑和快速运算功能,完成了“逻辑推理”智能的模拟。因此,智能控制的发展就变得很缓慢。

控制学科是一个工程学科,控制理论也就必须应用在工程中,否则,控制理论就失去了应有的意义。像其他控制理论那样,对智能控制的研究在于它的工程应用。现在许多学者已经注意到了这一点。因此,当 IPC 出现后,许多学者就通过 IPC 在工程中实现了模糊控制;分散控制系统(DCS)的广泛应用,更使许多学者找到了实现智能控制的平台。

由于计算机的发展,群体智能得到了快速发展,在参数优化方面得到了广泛的应用。近几年,群体智能也应用到了系统辨识中,改变了经典辨识中的最小二乘法,减少了对激励信号的限制,改变了最小二乘算法中单一的离散模型,因而,大大推动了系统辨识的工程应用。

神经网络在系统建模和故障诊断中得到了实际应用。由于神经网络可以模拟任何非线性函数,因此,有许多不能用参数模型描述的非线性系统现改为用神经网络描述。但是,神经网络需要迭代计算,也因此大大限制了神经网络的实时应用。

专家系统发展得较早,但发展得很缓慢。原因是,至今人们还不能对人脑的思维有清楚的认识。特别是人们常说的“第六感”、“潜意识”等还不能被模拟。因此,专家系统的实际应用是有限的。

作者依据多年来对“智能控制理论及应用”的研究以及为研究生开设相应的课程的讲稿撰写了本书。全书共分 7 章:第 1 章概述了自动控制理论的发展过程,特别是智能控制的发展及应用现状;第 2 章论述了自动控制系统的数字仿真方法,其目的是为后续各章程序设计打下基础,也为书中程序的工程应用提供参考;第 3 章论述了经典的和现代的多种优化算法,通过工程实例说明了优化算法的实际应用方法;第 4 章论述了智能辨识方法,通过工程实例说明了智能辨识的工程实现方法;第 5 章介绍了模糊数学基础后,详细地论述了模糊控制器的设计方法和工程应用所面临的实际问题,为模糊控制器的工程应用提供了参考;第 6 章介绍了专家系统的组成原理,论述了专家系统在离线优化和在线优化控制中的应用方法;第 7 章介绍了神经网络结构及其学习方法,论述了神经网络在系统辨识、故障诊断和优化控制中的应用方法。

本书注重理论联系实际,许多材料来自作者多年来的教学和实践经验。其中例题及实验

题目大都选自作者所遇到的实际问题，书中给出的程序都可直接应用于工程实际，也能很容易地把这些程序改为其他计算机程序代码。为方便读者理解书中内容和设计程序，书中的程序采用 MATLAB 的基本语句进行设计，而不使用 MATLAB 的工具箱和复杂函数。

本书的结构体系和内容由韩璞教授策划并统稿。第 1、2、4 章由韩璞教授编写，第 3 章由董泽教授编写，第 5 章由王东风教授编写，第 6 章由翟永杰副教授编写，第 7 章由焦嵩鸣副教授编写，第 5、6 章中的程序和第 3 章中的部分程序由韩璞教授设计。

本书由北京航空航天大学博士生导师刘金琨教授担任主审，刘教授在审稿过程中，花费了大量的精力，逐字逐句地阅读了本书，提出了许多宝贵的修改意见和建议，在此向刘金琨教授致以诚挚的谢意。

书中的许多成果来源于作者的研究生的硕士或博士论文，由于从事该方向的研究生较多，在参考文献中无法对这些研究生的论文一一列出，在此对他们表示衷心的感谢。

书中部分内容引用了国内外专家学者的论文和著作，在书中的参考文献中都已列出，在此谨向他们致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限，加之书中的算法程序都由作者设计并实现，因此其中的公式推导可能欠严谨，论述方面可能有片面性，程序设计并不一定最优，错误之处诚望读者批评指正。

作 者

2013 年 1 月于华北电力大学

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 自动控制理论的形成与发展	1
1.2 智能控制的研究及应用现状	3
第 2 章 控制系统数字仿真	6
2.1 连续系统的离散化	6
2.2 离散系统的差分方程求取	8
2.3 数字仿真程序结构.....	25
2.4 本章小结.....	36
第 3 章 智能优化理论与方法	38
3.1 控制系统的参数优化问题.....	38
3.2 经典优化方法.....	43
3.3 遗传优化算法.....	50
3.4 蚁群优化算法.....	60
3.5 粒子群优化算法.....	69
第 4 章 智能建模理论与方法	74
4.1 建模方法概述.....	74
4.2 智能辨识原理.....	75
4.3 估计模型的选择.....	76
4.4 基于粒子群算法的智能辨识.....	81
第 5 章 模糊控制	100
5.1 模糊控制的数学基础	100
5.2 基本模糊控制器设计	114
5.3 带自调整因子的模糊控制器的设计	134
5.4 模糊与 PID 复合控制	141
第 6 章 专家控制	151
6.1 专家系统概述	151
6.2 知识库	153
6.3 推理机	156
6.4 专家控制	157
第 7 章 神经网络控制	171
7.1 生物神经元与人工神经元	171

7.2	神经网络的结构及学习方法	173
7.3	神经网络辨识	182
7.4	神经网络故障诊断	188
7.5	单节点神经网络控制系统	193
参考文献		198

概 述

1.1 自动控制理论的形成与发展

1948年,控制论的创始人维纳在他的著作《控制论》中指出:“信息是信息,不是物质,也不是能量”,这样就把信息上升到与物质、能量同等重要的地位,成为当今世界组成的三大支柱,即物质、能量、信息^[1]。而信息来源于自动化,自动化又来源于自动控制。自动控制理论是20世纪取得的巨大成就之一。

控制理论与社会生产及科学技术的发展息息相关。计算机科学的发展又推动了控制理论的发展,计算机已经成为控制系统分析和设计的有力计算工具,是实现现代工程自动控制不可缺少的设备。自动控制与计算机已经渗透到当今社会中的每一个角落。

古典控制理论、现代控制理论和当代控制理论是控制理论发展的三个阶段。现代控制理论是古典控制理论的完善与补充。当代控制理论是随科学技术的进步而不断发展的,是自动控制与计算机融合的产物,计算机是当代控制论的支柱。

1.1.1 经典控制理论

在20世纪为了解决单输入—单输出控制系统的分析与设计问题,1932年奈奎斯特提出了负反馈系统的频率域稳定性判据,这种方法只需利用频率响应的实验数据,即可判断系统的稳定性。后来,伯德(H. Bode)进一步研究通信系统频域方法,提出了频域响应的对数坐标图描述方法。1943年,霍尔利用传递函数(复数域模型)和方框图,把通信工程的频域响应方法和机械工程的时域方法统一起来,人们称此方法为复频域方法。复频域分析法主要用于描述反馈放大器的带宽和其他频域指标。

1940年,第二次世界大战结束时,经典控制技术和理论基本建立。1948年伊文斯又进一步提出了属于经典方法的根轨迹设计法,它给出了系统参数变换与时域性能变化之间的关系。至此,复频域的方法得到了进一步完善。

1948年,维纳教授出版了《控制论》一书,标志着控制理论体系已经形成。为了与后来发展起来的控制理论相对比,现在人们把这一时期的控制理论称为经典控制理论。

经典控制理论时期,由于没有计算机,不能求解工程中的微分方程,所以才有了复频域方法,以传递函数作为系统数学模型描述,利用草图和表进行控制系统的分析和设计^[6]。这种方法的优点是可通过试验方法建立数学模型,物理概念清晰;缺点是只适应单变量线性定常系统,对系统内部状态缺少了解,且在复数域方法研究时域特性,得不到精确的结果,解决不了大型工程问题。

1.1.2 现代控制理论

20世纪60~70年代,由于计算机的飞速发展,推动了空间技术的发展,控制系统变得越来越复杂,描述单输入—单输出控制系统的传递函数已不能描述现在的复杂系统,这时出

现了状态空间法。它采用状态空间描述取代了先前的传递函数那种外部输入/输出描述,对系统的分析直接在时间域内进行,集中表现为用系统的内部研究代替了外部研究,从而大大地扩充了所能处理问题的范围。在状态空间法的基础上,提出了能控性、能观性的概念,从而形成了现代控制理论。为现代控制理论的建立作出贡献的有,1954年贝尔曼的动态规划理论,1956年庞特里雅金的极大值原理,以及1960年卡尔曼的多变量最优控制和最优滤波理论。

现代控制理论的主要内容是:线性系统理论、建模和系统辨识、最优滤波原理以及最优控制理论。

在现代控制理论阶段,计算机还没有像现在这样普及,计算机的应用还仅限于航空航天、军事等,现代控制理论的应用也就局限于这些领域。在民用的工程实际中,人们还是应用经典控制理论进行科学研究。因此,现代控制理论的发展速度是很缓慢的。

1.1.3 当代控制理论

在现代工程中,被控对象的复杂性体现为:模型的不确定性,高度非线性,分布式的传感器和执行器,动态突变,多时间标度,复杂的信息模式,庞大的数据量以及严格的特性指标等。而环境的复杂性则表现为变化的不确定性和难以辨识。试图用传统的控制理论和方法去解决复杂的对象、复杂的环境和复杂的任务是不可能的。

1981年个人计算机(PC)的问世,使得一般科技工作者都能使用计算机,从此推动了自动控制理论与技术的发展。在20世纪80年代,从事自动控制的科技工作者们把经典控制理论和现代控制理论中的数学算法都编制成了计算机程序,人们称之为计算机辅助设计。但是,我们不难发现,经典控制理论是在没有计算工具的情况下形成的,它主要依靠手工计算和一些草图对控制系统进行分析和设计。因此,20世纪80年代后,控制系统数字仿真得到了快速的发展。至此,在工程中,对控制系统的分析和设计转向了在时域进行数字仿真和直接优化,经典控制理论中的复频域方法逐渐淡出。

随着计算机的广泛应用,涌现出一批新型的控制策略,这些控制策略结构复杂,不借助于计算机根本无法实现。这些控制策略有些已经成为自动控制理论的重要分支。如现代频域方法,该方法以传递函数矩阵为数学模型,研究线性定常多变量系统;自适应控制理论和方法——以系统辨识和参数估计为基础,处理被控对象不确定和缓时变,在实时辨识基础上在线确定最优控制规律;鲁棒控制方法——在保证系统稳定性和其他性能的基础上,设计不变的鲁棒控制器,以处理数学模型的不确定性;预测控制方法——一种计算机控制算法,在预测模型的基础上采用滚动优化和反馈校正,可以处理多变量系统。当使用这些控制策略对系统进行控制时,所面临的设计和校正的任务就是根据希望的系统性能指标,研究、设计这些控制策略的结构和参数了。为了与现代控制理论区分,把这一时期的控制理论称为当代控制理论。

另一方面,随着控制理论应用范围的扩大,从个别小系统的控制,发展到若干个相互关联的子系统组成的大系统进行整体控制,人们开始了对大系统理论的研究。我们把该理论也归结为当代控制理论的研究范畴。

当代控制理论的特征是:控制算法变成以计算机为基础、时域、直接目标函数。

智能控制属于当代控制理论范畴。它的指导思想是依据人的思维方式和处理问题的技巧,解决那些目前需要人的智能才能解决的复杂的控制问题。它的重要特征是“没有算法

解”，或是“数学解析模型”+“知识系统”，知识系统是必不可少的。智能控制方法包括模糊控制、神经网络控制、专家控制、群体智能等。

1.2 智能控制的研究及应用现状

1.2.1 智能控制的发展历史

在现代工程中，往往存在这样一类系统：设备庞大、系统复杂、物理参数高、响应速度慢、大迟延、非线性、时变等。对这一类系统的控制要求往往会很高。按照传统的思路去设计控制系统，即先求出系统数学模型，再设计一个固定算法的控制器，已经满足不了控制要求。众所周知，从理论上讲，只要人能控制的系统就能进行自动控制。但是，怎样把人的控制经验转换成数学算法，是一个比较困难的问题。

人工智能可以解决这个问题。

所谓人工智能，美国斯坦福大学人工智能研究中心的著名学者尼尔逊（Nilson）教授是这样下的定义：“人工智能是关于知识的学科——怎样表示知识以及怎样获得知识的科学。”美国麻省理工学院的温斯顿（Winston）教授是这样下的定义：“人工智能就是研究如何使计算机去做过去只有人才能做的智能的工作。”^[9]温斯顿的话道出了人工智能的真谛。人工智能研究的是如何通过计算机的软硬件系统模拟人类某些智能行为的基本理论、方法和技术。研究的终极目标是如何用计算机系统来模拟人的思维过程和智能行为。虽然目前的研究离终极目标还很遥远，但是初级阶段的人工智能已经得到了广泛的应用。特别是在控制领域，人工智能已经得到了成功的应用。

20世纪70年代，美国控制理论和人工智能专家傅京孙提出把人工智能的直觉推理方法用于机器人控制和学习控制系统，并将智能控制概括为自动控制和人工智能的结合。傅京孙、格洛里索（R. M. Glorioso）等人从控制理论的角度总结了人工智能技术与自适应、自学习和自组织控制的关系，正式提出了智能控制理论的构想。1967年，勒德斯（C. J. Leontes）和孟德尔（J. M. Mendel）首次正式使用“智能控制”一词^[7]。1985年8月IEEE在美国纽约召开智能控制专题讨论会，标志着智能控制作为一个新的学科分支正式被控制界承认。智能控制不同于经典控制理论和现代控制理论的处理方法，它研究的主要目标不仅仅是被控对象，同时也包含控制器本身。控制器不再是单一的数学模型，而是数学解析和知识系统相结合的广义模型，是多种知识混合的控制系统。

智能控制的实质就是把传统的具有固定数学模式的控制算法改为智能算法。智能算法可以分为四大类。

1. 模糊计算

模糊理论的研究最早始于模糊逻辑数学，模糊数学和模糊控制的概念是由美国加利福尼亚大学著名教授扎德（L. A. Zadeh）在他的《Fuzzy Sets》、《Fuzzy Algorithm》和《A Reasoning for Control》等著名论著中首先提出的^[11]。所谓模糊数学就是用“不确切”的数学量来描述“确切”的事物，它是以逻辑真值 $[0, 1]$ 的模糊逻辑为基础的。模糊逻辑正好反映出人的大脑的思维方式和方法。例如：当我们淋浴时，发现水温“高”，这个“高”不是“确切量”，它仅仅是对水温的一个粗略的、“不确切”的描述，即“模糊”描述。此时，我们会做出“开大”冷水阀的决定。这里的“开大”也是一个“不确切（模糊）”的描述。模糊控制就是基于此理念而产生的。

模糊数学起源于 20 世纪 60 年代,到了 70 年代中期才有了模糊控制,到了 80 年代,模糊控制才进入实用化时期;90 年代后,模糊控制得到了快速的发展。

2. 神经计算

人工智能是用数学算法来模拟人的大脑思维过程,神经计算就是用数学算法来模拟人大脑的生物神经系统。神经生物学和神经解剖学的研究结果表明,人的大脑是由 1000 多亿个神经元交织在一起组成的一个极其复杂的网络系统。它能完成诸如智能、思维、情绪等高级精神活动。人工智能就是对人工神经网络的研究。神经网络控制就是利用人工神经网络的学习能力、泛化能力、推理能力、信息分布存储能力及并行处理能力来完成只有用人的智能才能完成的控制。神经网络的研究起源于 20 世纪 40 年代^[7],但是发展很慢,到了 80 年代后才有了快速发展,这很可能是得益于 PC 的出现。

3. 群体智能计算

所谓群体智能就是在这个物质世界中,只有某一类生物的群体才表现出来的智能。例如,从人类繁衍的角度看,人类进化就是群体智能。我们知道,人类进化的三原因是遗传、变异、选择和淘汰。群体智能计算的任务就是根据这三个原因设计出数学算法,来完成优化的任务。蚁群和粒子群(鸟群)也能表现出群体智能。一群蚂蚁和一群鸟寻找食物时,会找到一条最短的路径。通过数学的方法模拟出它们觅食的过程,就能完成某一问题的优化。

在群体智能算法中,遗传算法(GA)发展得最早。遗传算法源于遗传学,遗传学始于 20 世纪初。但是,借鉴生物进化中自然选择这一法则,用于解决科学研究和工程实际所遇到的各种搜索和优化问题的思想,是由美国密执安大学霍兰德(Holland)教授在 1962 年才提出的,到了 20 世纪 60 年代末期遗传算法才形成了数学框架。在 1992 年 IEEE NNC 召开了首届 IEEE 进化计算国际会议,对进化计算的研究序幕才真正拉开。

蚁群算法(ACO)是新兴的仿生算法,是由意大利学者多里戈(Dorigo M)于 1991 年首次提出。最初用于求解旅行商(TSP)问题、分配问题、job-shop 调度问题。受其影响,该算法逐渐引起了其他学者的注意,用来研究图着色问题、布线问题等。近年来,蚁群算法才应用于连续空间的优化问题。

粒子群算法(PSO)是近年来发展起来的一种新的进化算法,其与遗传算法相似,但比遗传算法规则更为简单,它通过追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优。这种算法以其实现容易、精度高、收敛快等优点引起了学术界的重视,并且在解决实际问题中展现出了其优越性。

4. 专家系统(ES)

专家系统是人工智能的一个非常重要的应用领域,是人工智能从一般思维规律探索走向专门知识利用,从理论走向实际应用的标志。专家系统实质上是一个具有大量专门知识和经验的计算机程序系统,它能够以人类专家的水平完成某一专业领域比较困难的任务^[12]。计算机程序模拟的人类专家必须有人类专家的各种功能。

(1) 专家知识——专家知识存放在专家系统中的知识库中,知识库的核心内容是知识的表示法。

(2) 专家推理、判断——专家系统中的推理机,它根据当前的输入数据或信息,利用知识库中的知识,按着一定的推理策略去处理、解决当前的问题。

(3) 专家知识的获取——人类专家可以通过书本、工程实践、科学研究、跟其他专家学

习等获取知识,专家系统获取知识就必须设计一组程序,使它能删除知识库中原有的知识,并能将从专家那里获取的新知识加入到知识库中,还应能根据实践结果发现原知识库中不适用或有错的知识,从而不断地增加知识库中的知识,使系统能更好地做更复杂的事情。

(4) 专家结论发布——人类专家得到结论后可以通过很多方式发布出去,对于由计算机程序组成的专家系统就必须设计一个专用程序,向用户解释专家系统所做出的推理结果,回答用户的问题。

最早的专家系统是由美国斯坦福大学费根鲍姆(E. A. Feigenbaum)教授在1965年设计的,用来解决化学质谱分析问题。专家系统的快速发展又是在20世纪80年代以后。

1.2.2 智能控制的应用

人工智能在控制领域主要应用在系统建模、优化与控制三个方面。建模与优化也属于控制领域所研究的范畴。因此,把人工智能在这三方面的应用总称为智能控制。

在工程中应用最早的是模糊控制。1974年,英国伦敦大学教授E. H. Mamdani,首先利用模糊控制器控制锅炉和汽轮机的运行,在实验室中获得成功^[11]。随后,模糊控制在工业反应过程的温度控制、热水装置控制、热交换过程控制^[14]、压力容器中的液位和压力控制、大型电站中的磨煤机控制、锅炉燃烧控制^[15,16]、汽车速度自动控制、废水处理过程控制、水泥窑控制等中都得到了成功的应用。这些应用解决了过程控制中非线性、强耦合、时变和大滞后等难题。

模糊控制器的设计和应用都离不开专家经验,它没有PID控制律的那种普适性。虽然,在20世纪80年代后,模糊控制在实际工程中得到了成功的应用,但到目前为止,模糊控制并不像PID控制律那样应用得成功、普及、可靠、稳定、方便。实际上,模糊控制在工程上的应用还限于试验和探索阶段。对于模糊控制的研究,理论研究的文章远远多于实际应用。

神经网络和专家系统的应用促进了模糊控制的发展,也提升了模糊控制的“智能化”。模糊控制与神经网络结合或加入专家知识构成模糊神经控制系统或神经模糊控制系统,亦或专家模糊控制系统,都取得了成功的应用。

由于神经网络的学习速度较慢,不适于变化速度较快系统的实时控制。目前,它的最成功应用还是在模式识别上。

群体智能算法都需要迭代计算,因此,它们不适合在线应用。如果要在线实时使用,那也只能是变化速度较慢的系统。群体智能主要用在离线的控制系统参数优化上,现在也用于系统建模^[17]。

第2章

控制系统数字仿真

当代控制理论离不开控制系统的数字仿真，为了便于读者阅读和进行程序设计，本章讲述控制系统数字仿真技术^[3]。

2.1 连续系统的离散化

控制系统的数字仿真就是控制系统的数学模型在数字计算机上求解的过程。控制系统的动态模型一般是用常微分方程、状态方程和传递函数来描述，它的响应是随时间连续变化的。而连续系统的解析解是无法用数字计算机求出的，只能求出其数值解。也就是说，只能得到连续响应曲线上的有限个点。为此，必须把连续系统离散化，得到差分方程，再用数字计算机求解。这就是把微分运算转化为算术运算的过程。

设一线性定常系统为

$$\dot{X} = AX + BU \quad (2-1)$$

$$Y = CX + DU \quad (2-2)$$

式中： X 为 $n \times 1$ 维状态向量； U 为 $r \times 1$ 维输入向量； A 为 $n \times n$ 维状态矩阵； B 为 $n \times r$ 维输入矩阵； Y 为 $m \times 1$ 维输出向量； C 为 $m \times n$ 维输出矩阵； D 为 $r \times m$ 维传递矩阵。

此系统的方框图如图 2-1 所示。

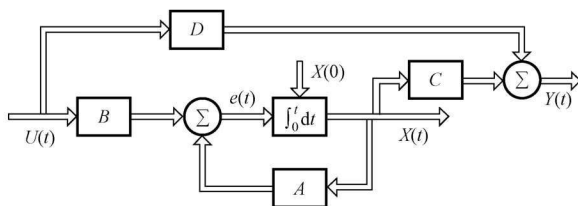


图 2-1 一般线性定常系统的方框图

为了将这个连续系统变成离散系统并与原系统相似，在系统的入口和出口处各加上一个采样周期为 T 的采样开关，在入口处再加入一个保持器 (H) 和补偿器 (c)，如图 2-2 所示。

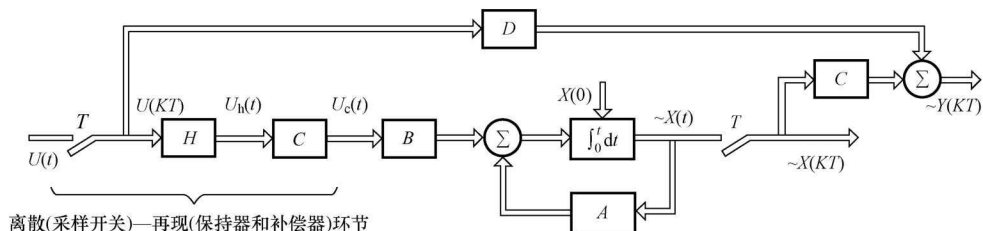


图 2-2 图 2-1 所示系统的离散相似系统框图

系统的输入信号 $U(t)$ 离散后经过了一个再现环节 H , 使得离散后的信号又基本再现了原样。但此时的 $U_h(t)$ 已经是 $U(t)$ 的一种近似, 不论使用什么样的保持器, 也不可能恢复成原来的函数。为了提高再现(恢复)后的精度, 有时在保持器后面(或前面)加入一个补偿器 c 。

图 2-2 所示系统中的 $\sim X(t)$ 与原系统(图 2-1)中的 $X(t)$ 是相似的, 而该系统中的 $\sim Y(KT)$ 序列与原系统的 $Y(t)$ 在 $t=0, T, 2T, \dots$ 各时刻的值是相似的, 它们的相似程度取决于使用的再现环节。如果采样周期 T 选择得足够小, 则在采样点上各时刻的值就能代表系统的解析解值, 把这些点连成曲线就能代表解析解曲线。

由图 2-2 所示的离散结构即可导出连续系统离散后的离散数学模型, 即差分方程。由于这个过程使得离散系统与连续系统相似, 所以称为离散相似法。

严格地讲, 系统输出处的采样开关后面也应加上再现环节, 才能与原系统相似。但是在仿真时, 用计算机也只能得到离散序列的解, 所以输出处的再现环节加与不加对于离散解序列都是一样的。实际上输出处的采样开关加与不加也无所谓, 只要认为离散后的系统与原系统在采样点上的输出值近似相等就行了。

在实际中常用的保持器有零阶、一阶、三角和滞后三角保持器。由于一阶、三角和滞后三角保持器结构较复杂, 物理上很难实现, 精度也不高, 因此实际应用较少。这里介绍常用的零阶保持器和三角保持器。

零阶保持器的定义式为

$$U_h(t) = U(kT), kT \leq t < (k+1)T \quad (2-3)$$

由于这种保持器的结构及使用它得到的离散模型都比较简单, 故其计算速度较快, 因此零阶保持器在实际工程及仿真中都得到了广泛的应用。

但是使用这种保持器时应注意, 任何信号通过它都会使信号的高频分量产生明显的相滞后, 通常由零阶保持器再现的函数 $U_h(t)$ 比 $U(t)$ 平均滞后 $\frac{T}{2}$ 。这意味着, 使用零阶保持器会给仿真结果带来较大的误差。经零阶保持器再现后的函数 $U_h(t)$ 如图 2-3 所示。

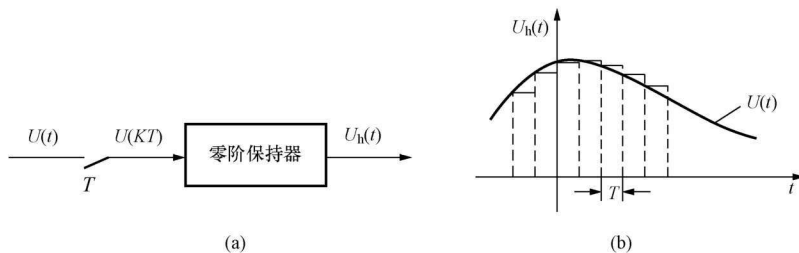


图 2-3 零阶保持器再现后的函数 $f_h(t)$

(a) 原理框图; (b) 函数曲线

从上面的保持器特性可以看出, 要想使保持器引起的失真足够小, 采样频率就要足够高。也就是说, 在仿真计算时, 为了使结果准确, 计算步距就得足够小, 这样势必要增加计算时间。为了使计算速度较快又不使误差过大, 应当加入一个补偿环节。从图 2-3 可以看出, 零阶保持器再现后的信号一般都有相位移, 曲线上升时, 再现后信号的幅值有所衰减; 曲线下降时, 幅值有所增加。所以通常采用超前装置进行补偿, 即采用超前半个周期的补偿

(即取 $c=e^{\frac{T_s}{2}}$) 去抵消零阶再现过程引入的滞后影响, 而幅值不进行补偿。

在仿真中所采用的补偿器的数学表达式形式一般为

$$c = \lambda e^{\gamma T_s} \quad (2-4)$$

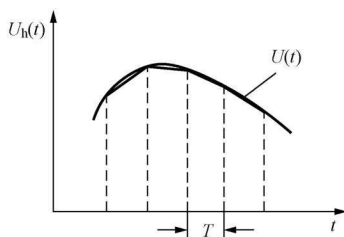
式中: λ 表示幅值补偿, γ 表示相位补偿, 它们均为正数。研究表明^[19], λ 和 γ 通常都取 1 较为合适。

三角保持器是一种理想保持器, 物理上不能实现, 数学上也是不能实现的, 除非它所再现的信号为一已知信号。这一点从下面的定义中可以看出。

三角保持器的定义式为

$$U_h(t) = U(kT) + \frac{U[(k+1)T] - U(kT)}{T}(t - kT) \quad (2-5)$$

$$kT \leq t < (k+1)T$$



由式 (2-5) 可以看出, 计算区间 $[kT, (k+1)T]$ 中的 $U_h(t)$ 时, 需要知道 $U[(k+1)T]$, 这就产生了矛盾, 这就是实际中不能实现的原因。从三角保持器的定义式中不难看出, 所再现的信号已经有超前作用的补偿 $U[(k+1)T]$, 因此, 当使用三角保持器时不需要再使用补偿器。

图 2-4 经三角保持器再现后的函数 经过三角保持器再现后的函数如图 2-4 所示。

2.2 离散系统的差分方程求取

2.2.1 离散再现环节在系统入口处

在上一节中, 已经叙述了怎样由一个连续系统求出它的离散相似系统。有了这个离散相似系统, 就可以求出连续系统的离散化数学模型。离散化数学模型是用差分方程表示的, 它的求解方法如下。

设线性定常系统的状态方程描述为

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) \quad (2-6)$$

式中: $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ 均为常数阵。

对式 (2-6) 所示方程两边进行拉普拉斯 (简称拉氏) 变换, 可得

$$s\mathbf{X}(s) - \mathbf{X}(0) = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}\mathbf{U}(s)$$

移项并引入单位矩阵 $\mathbf{I}$, 得

$$(s\mathbf{I} - \mathbf{A})\mathbf{X}(s) = \mathbf{A}\mathbf{X}(0) + \mathbf{B}\mathbf{U}(s)$$

以 $(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 左乘等式两边, 可得

$$\mathbf{X}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{X}(0) + (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}\mathbf{U}(s) \quad (2-7)$$

对式 (2-7) 两边取拉氏反变换, 求得方程的解为

$$\mathbf{X}(t) = \Phi(t)\mathbf{X}(0) + \int_0^t \Phi(t-\tau)\mathbf{B}\mathbf{U}(\tau)d\tau \quad (2-8)$$

式中: $\Phi(t)$ 为转移矩阵, 且

$$\Phi(t) = L^{-1}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (2-9)$$

也可以用另一种方法得到状态方程的解。

在式 (2-6) 两边左乘 e^{-At} , 经整理得

$$e^{-At}[\dot{\mathbf{X}}(t) - \mathbf{A}\mathbf{X}(t)] = e^{-At}\mathbf{B}\mathbf{U}(t) \quad (2-10)$$

式 (2-10) 可改写成

$$\frac{d}{dt}[e^{-At}\mathbf{X}(t)] = e^{-At}\mathbf{B}\mathbf{U}(t) \quad (2-11)$$

对式 (2-11) 两边积分并整理, 可得到该方程的解

$$\mathbf{X}(t) = e^{At}\mathbf{X}(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)}\mathbf{B}\mathbf{U}(\tau)d\tau \quad (2-12)$$

比较解式 (2-8) 与式 (2-12), 可得到

$$\Phi(t) = e^{At} = L^{-1}[(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}] \quad (2-13)$$

其中矩阵指数定义式为

$$e^{At} = \mathbf{I} + \mathbf{A}t + \frac{\mathbf{A}^2}{2!}t^2 + \dots \quad (2-14)$$

下面来求系统的离散解。

对于式 (2-12), 当 $t=kT$ 时

$$\mathbf{X}(kT) = e^{AkT}\mathbf{X}(0) + \int_0^{kT} e^{A(kT-\tau)}\mathbf{B}\mathbf{U}(\tau)d\tau \quad (2-15)$$

当 $t=(k+1)T$ 时

$$\mathbf{X}[(k+1)T] = e^{A[(k+1)T]}\mathbf{X}(0) + \int_0^{(k+1)T} e^{A[(k+1)T-\tau]}\mathbf{B}\mathbf{U}(\tau)d\tau \quad (2-16)$$

用式 (2-16) 减去 e^{AT} 乘式 (2-15) 并整理可得

$$\mathbf{X}[(k+1)T] = e^{AT}\mathbf{X}(kT) + \int_{kT}^{(k+1)T} e^{A[(k+1)T-\tau]}\mathbf{B}\mathbf{U}(\tau)d\tau \quad (2-17)$$

在推导式 (2-17) 的过程中未作任何近似的假设, 该式是一种精确的离散值计算公式。但是, 当 $\mathbf{U}(\tau)$ 是一个复杂的函数时, 该式右端的积分是难以求得的。由于该积分的积分区间长度仅为 T , 当 T 较小时, 一般来说 $\mathbf{U}(\tau)$ 在这个积分区间的变化是不大的。因此, 可以加入采样及再现环节, 以使 $\mathbf{U}(\tau)$ 在积分区间内为一个简单的特殊函数, 从而使该积分计算容易进行。

当使用零阶保持器时, 取补偿器的系数 $\lambda=1$, $r=0$ (即不进行补偿), 则有

$$\mathbf{U}(t) \approx \mathbf{U}_h(t), \quad kT \leq t < (k+1)T \quad (2-18)$$

将式 (2-18) 及式 (2-3) 代入式 (2-17), 并变换积分区间, 得

$$\mathbf{X}[(k+1)T] = e^{AT}\mathbf{X}(kT) + \left(\int_0^T e^{A(T-t)}\mathbf{B}dt\right)\mathbf{U}(kT) \quad (2-19)$$

令 $\Phi(T) = e^{AT}$, $\Phi_m(T) = \int_0^T e^{A(T-t)}\mathbf{B}dt$

则式 (2-19) 可改写为

$$\mathbf{X}[(k+1)T] = \Phi(T)\mathbf{X}(kT) + \Phi_m(T)\mathbf{U}(kT) \quad (2-20)$$

式 (2-20) 即为采用零阶保持器再现时系统的差分方程解。

如果系统的 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 阵是已知的, 则离散化后的 $\Phi(T)$ 、 $\Phi_m(T)$ 阵也就可以求出。这样, 利用式 (2-20) 在已知各状态变量初始值的情况下, 可以十分容易地求出不同采样时刻的状态变量的数值。

当取补偿器的系数 $\lambda=1$, $r=1$ (即超前一拍补偿) 时, 零阶保持器下的差分方程则为