

研究生教学用书 湖南省教育厅推荐

现代控制方法及 计算机辅助设计

刘少军 编著



中南大学出版社

73.822
150

研究生教学用书 湖南省教育厅推荐

现代控制方法及 计算机辅助设计

刘少军 编著

中南大学出版社

现代控制方法及计算机辅助设计

刘少军 编著

☐责任编辑 谭 平

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482

电子邮件:csucbs @ public.cs.hn.cn

☐经 销 湖南省新华书店

☐印 装 核工业第 25 公司印刷厂

☐开 本 787×960 1/16 ☐印张 15 ☐字数 272 千字

☐版 次 2003 年 6 月第 1 版 ☐2003 年 6 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7-81061-653-6/TP.022

☐定 价 20.00 元

图书出现印装问题,请与经销调换

前 言

控制理论是一门发展极为迅速的学科。在近一个世纪的发展过程中,其“经典控制理论”与“现代控制理论”的体系已基本完善,近三十年来的“先进控制理论”,如“大系统理论”、各类“智能控制”等,亦取得了蓬勃的发展和可喜的进展。今天的控制理论及其应用技术已不再仅是自动化学科的重要基础,而已成为机电工程、航空航天等现代工程技术中不可缺少的一部分,并在经济学、生物学、医学等领域中获得越来越广泛的应用。

伴随着控制理论向深度和广度发展的是大量控制方法和设计算法的产生,而现代计算机及计算技术的发展则使得这些设计过程可通过 CAD 程序来实现。这样一种发展不仅使设计者解脱了繁琐的甚至是人工无法实现的手工计算困境,而且使一般设计人员(特别使非控制类专业人员)不必精通某些细小定理的复杂数学证明,或对一些实际中不易发生的特殊情况进行详尽的考察而应用各种控制理论进行控制系统的设计,从而极大地增加了控制理论的实用价值和实际应用,同时也促进了控制理论的发展。

本书针对自动控制、机械电子、机械设计、电力电气、通信工程等专业本科生、研究生和技术人员编写,希望能使读者较全面地了解当代主要控制方法的主要思想、基本原理和设计算法,并掌握以 MATLAB 为计算平台的控制系统计算机辅助设计、分析与仿真。本书的编写力求通俗易懂,强调对基本思想的解释,不拘泥严格的数学推导,追求实用性。书中结合作者近年来的研究工作,以一个汽车主动悬架系统的控制设计与分析为主线,讨论系统建模、仿真及反馈控制、最优控

制、预见控制、鲁棒控制、模糊控制等控制方法的设计,使读者通过这些学习掌握具体控制系统设计和分析的实现方法,并对不同控制方法的特点进行了解和比较。

在本书的编写及相关的研究工作中,中国工程院院士钟掘教授和日本名古屋大学末松良一教授给予了作者悉心的指导和有力的支持,借此机会表示由衷的敬意与感激。本书参考了国内外众多控制理论与控制系计算机辅助设计方面的著作与文献,并采用了这些著作与文献的一些例题,作者亦向这些著作者们致以真诚的谢意。此外,作者也非常地感谢郭淑娟、李艳、王刚等同事为本书的编排、校对所提供的帮助。

本书得到湖南省教育厅研究生教育教改项目和中南大学研究生教育教改项目的资助,在此,作者一并表示衷心的感谢。

作 者

2003 年 7 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 控制理论发展历程回顾	(1)
1.2 控制理论中若干术语及概念	(3)
2 MATLAB——一个强有力的科学计算与控制系统 CAD 软件	(5)
2.1 概述	(5)
2.2 MATLAB 基本功能及举例	(6)
2.2.1 矩阵运算	(6)
2.2.2 多项式计算	(7)
2.2.3 函数功能	(9)
2.2.4 图形处理	(9)
2.2.5 拟合与插值	(11)
2.2.6 常微分方程求解	(15)
2.3 MATLAB 的帮助系统	(18)
2.3.1 帮助系统构成	(18)
2.3.2 在线帮助	(18)
3 系统的数学模型	(20)
3.1 概述	(20)
3.1.1 数学模型	(20)
3.1.2 数学模型表示形式	(20)
3.1.3 数学模型的建立方法	(22)
3.2 系统数学模型建立举例	(22)
3.3 MATLAB 中系统数学模型的表示、转换与连接	(25)
3.3.1 系统数学模型的 MATLAB 表示	(25)
3.3.2 系统模型的转换	(27)
3.3.3 系统的典型连接	(28)

3.3.4	系统模型降阶	(31)
4	系统辨识	(33)
4.1	概述	(33)
4.2	数据及处理	(33)
4.2.1	系统辨识信号的选择与产生	(33)
4.2.2	数据滤波	(34)
4.2.3	去除趋势项	(34)
4.3	被辨识系统的模型	(36)
4.3.1	非参数模型	(36)
4.3.2	参数模型	(37)
4.4	系统辨识中的评价准则及方法	(38)
4.4.1	最小二乘法方法	(38)
4.4.2	预测误差估计方法	(40)
4.5	模型辨识及 MATLAB 实现	(42)
4.5.1	非参数模型辨识	(42)
4.5.2	参数模型辨识	(43)
4.6	系统辨识应用举例	(46)
5	控制系统的稳定性、可控性与可观测性	(49)
5.1	控制系统的稳定性	(49)
5.1.1	稳定性概念及意义	(49)
5.1.2	稳定性判别	(50)
5.2	控制系统的可控性与可观测性	(52)
5.2.1	基本概念	(52)
5.2.2	可控性及其判据	(53)
5.2.3	可观测性及其判据	(54)
6	控制系统响应分析与仿真	(56)
6.1	概述	(56)
6.2	信号响应分析中的 MATLAB 应用	(56)
6.2.1	典型试验信号	(56)
6.2.2	用 MATLAB 进行时域响应分析	(56)
6.2.3	用 MATLAB 进行频域响应分析	(65)
6.3	SIMULINK 交互式仿真	(67)

6.3.1	SIMULINK 仿真的操作	(68)
6.3.2	线性系统建模	(70)
6.3.3	非线性系统建模	(74)
6.3.4	模块化“分层”处理	(77)
7	控制系统设计	(81)
7.1	系统的性能指标	(81)
7.1.1	时域系统性能指标	(81)
7.1.2	频域系统性能指标	(83)
7.1.3	系统的稳态误差	(86)
7.2	控制系统的校正设计——Bode 图设计法	(89)
7.2.1	校正设计的基本概念	(89)
7.2.2	Bode 图设计的解析方法	(90)
7.3	控制系统的状态空间设计——极点配置方法	(93)
7.3.1	极点配置设计原理	(93)
7.3.2	极点配置设计方法与 MATLAB 实现	(95)
8	PID 控制	(97)
8.1	PID 控制原理及设计	(97)
8.1.1	PID 控制原理	(97)
8.1.2	PID 控制器的设计	(98)
8.1.3	PID 控制方案的变形	(103)
8.2	数字 PID 控制	(105)
8.2.1	数字 PID 控制算法	(105)
8.2.2	数字 PID 控制器设计	(107)
9	最优控制	(112)
9.1	最优控制问题实例及描述	(112)
9.1.1	搅拌加热器的最优控制	(112)
9.1.2	最优控制问题的一般提法	(113)
9.2	线性二次型最优控制	(114)
9.2.1	连续系统的二次型最优控制	(114)
9.2.2	离散系统的二次型最优控制	(119)
9.3	状态观测器与最优观测器设计	(119)
9.3.1	状态观测器原理	(120)

9.3.2	状态观测器的设计	(121)
9.4	系统设计实例	(125)
9.4.1	系统描述	(125)
9.4.2	系统仿真	(128)
9.4.3	状态观测器设计	(129)
9.4.4	系统频率特性分析	(130)
9.4.5	控制器设计	(131)
10	自适应控制	(134)
10.1	模型参考自适应控制	(134)
10.1.1	模型参考自适应控制原理	(134)
10.1.2	系统设计举例	(135)
10.2	自校正控制	(142)
10.2.1	自校正控制系统的基本结构	(143)
10.2.2	最小方差自校正控制器	(143)
10.2.3	系统设计举例	(145)
11	预测控制与预见控制	(150)
11.1	概述	(150)
11.2	预测控制	(151)
11.2.1	动态矩阵控制	(151)
11.2.2	预测控制的 MATLAB 实现	(153)
11.3	预见控制	(155)
11.3.1	预见控制系统形成	(155)
11.3.2	最优预见控制的扩大误差系统设计法	(157)
11.3.3	最优预见控制系统设计举例	(159)
12	H_∞ 鲁棒控制	(165)
12.1	鲁棒控制的概念	(165)
12.2	H_∞ 鲁棒控制问题的基本知识	(165)
12.2.1	H_∞ 范数	(165)
12.2.2	最小增益定理	(166)
12.2.3	灵敏度函数和补灵敏度函数	(167)
12.2.4	回路整形方法	(168)
12.2.5	H_∞ 鲁棒控制设计	(168)

12.3 系统设计实例	(169)
12.3.1 控制目的	(170)
12.3.2 主动悬架控制系统的 H_{∞} 问题构成	(170)
12.3.3 系统设计的要求	(173)
12.3.4 程序及说明	(173)
13 模糊控制	(184)
13.1 模糊理论基础	(184)
13.1.1 模糊量	(184)
13.1.2 模糊量的描述	(184)
13.1.3 隶属度函数与模糊集	(185)
13.1.4 模糊集的运算	(185)
13.2 模糊控制	(186)
13.2.1 概述	(186)
13.2.2 模糊控制系统	(186)
13.2.3 模糊逻辑推理法和非模糊化	(187)
13.3 MATLAB 环境下模糊逻辑系统的建立和调试	(189)
13.4 模糊逻辑控制设计举例	(190)
13.5 汽车主动悬架系统的模糊控制	(196)
14 神经网络系统及其应用	(202)
14.1 基本概念	(202)
14.1.1 人类两类思维模式	(202)
14.1.2 人工神经网络	(202)
14.2 神经网络模型	(203)
14.2.1 生物神经元模型	(203)
14.2.2 人工神经元模型	(203)
14.2.3 神经网络模型	(204)
14.3 神经网络的学习算法	(207)
14.3.1 学习方法	(207)
14.3.2 Hebb 学习规则	(207)
14.4 神经网络的应用	(208)
14.4.1 应用概况	(208)
14.4.2 应用举例	(208)
参考文献	(229)

1 绪 论

随着科学技术的不断发展,控制系统理论及其应用越来越显得重要。尤其是近几年来电子计算机的高速发展和广泛应用,对控制理论的发展和应用更是起着推波助澜的作用。今天,控制理论及其应用不仅已成为现代工程技术领域中不可缺少的一个重要组成部分,而且也在经济学、生物学、医学等领域中获得越来越广泛的应用。学习现代控制理论的基本原理,掌握现代控制理论的分析 and 设计方法,不仅对自动控制、机电工程专业的学生是必不可缺的,而且对许多其他专业的工程技术人员和科学工作者也是大有裨益的。

1.1 控制理论发展历程回顾

控制成为一门系统的理论也许可以以 20 世纪 40 年代美国 N·维纳《控制论》一书的出版为标志。然而,现代控制中许多重要思想却已远在此之前产生和应用。18 世纪,瓦特(J. Watt)发明的蒸汽机离心调速器便是反馈控制的典型代表。其后,在研究蒸汽机速度在某些条件下自发地剧烈振荡的现象时,一些物理学家提出了对一些较复杂系统稳定性的简单代数判据,等等。20 世纪 50 年代,经典控制理论形成体系。经典控制理论的数学基础是拉普拉斯变换,系统的基本数学模型是传递函数,主要的分析和综合方法有 Bode 图法、根轨迹法、劳斯(Routh)判据、奈魁斯特(Nquist)稳定判据、PID 控制等。经典控制系统理论虽然至今仍广泛应用在许多工程技术领域中,但也存在着明显的局限性,主要表现在:主要用于单输入单输出线性时不变系统而难以有效地处理多输入多输出系统;只采用外部描述方法讨论控制系统的输入输出关系,而难以揭示系统内部的特性;控制系统设计方法基本上是一种试凑法而不能提供最优控制的方法和手段等等。

在 20 世纪 50 年代核反应堆控制研究、尤其是航天控制研究的推动下,控制理论在 1960 年前后开始了从经典阶段到现代阶段的过渡,其中的重要标志是卡尔曼(R. E. Kalman)系统地把状态空间法引入到系统与控制理论中。现代控制理论以状态空间模型为基础,研究系统内部的结构,提出可控性、可观测性概念及分析方法,也提出了一系列设计方法,如 LQR (Linear Quadratic Regulator) 和 LQG (Linear Quadratic Gaussian) 最优控制方法、Kalman 滤波器方法、极点配置

方法、基于状态观测器的反馈控制方法等。现代控制理论克服了经典控制的许多局限性,它能够解决某些非线性 and 时变系统的控制问题,适用于多输入多输出反馈控制系统,可以实现最优控制规律。此外,现代控制理论不仅能够研究确定性的系统,而且可以研究随机的过程,即包含了随机控制系统的分析和设计方法。

然而,当现代控制理论应用于一般工业控制时亦暴露出本身的一些缺陷。如:现代控制理论要求以精确的数学模型为基础,但大多数工业对象并不像宇航问题那样有精确的数学模型,系统的性能指标亦往往不是用明确的数学表达式描述;直接采用最优控制方法设计的控制器往往过于复杂而不便应用等。20 世纪末,在状态空间法继续发展的同时,许多新型的控制理论与方法也有了很大的发展,如由于物理系统的精确模型实际上难以得到,真正优良而实用的控制系统设计又必须允许模型结构和参数在一定范围内变化,即具有鲁棒性,因此,20 世纪 80 年代以来,控制系统的鲁棒性研究引起了高度的重视,鲁棒控制理论得到了很大的发展;尽管许多的复杂过程难以用数学方法描述并实现目标控制,可熟练的操作工、技术人员或专家却能操作自如并获得较满意的控制效果,因此,将人的知识经验直接应用于生产过程控制的智能控制系统,如模糊控制、人工神经网络、专家系统等,在 20 世纪末亦在理论研究和实际应用方面取得成功进展。在国外,有些学者把这些先进的控制方法称之为 Advanced Control Theory 而区别于经典控制(Classics Control Theory)和现代控制理论(Modern Control Theory)。

一个不能忽视的事实是:控制理论在 20 世纪后期的迅速发展得益于现代电子计算机的飞速发展。40 年代,控制工程师们应用各种图表进行控制系统的设计而无须通晓其理论依据,而今天随着计算机技术发展而出现的控制系统设计算法及 CAD 实现,则在远为更高的层次上起着类似的作用。控制系统 CAD 主要包含算法和程序库,后来发展到包含数据库,管理程序和算法程序的软件包,而今天的控制系统 CAD 则更加完善并成为功能全面的进行控制系统分析综合与设计的环境,其功能包括了对象建模、系统结构选择、控制问题和目标的确定、执行设计并进行检验、修改、折衷直到提供数据、图形和完整的文件等诸多内容。正是这样一些智能化程度越来越高的 CAD 软件,不仅使设计者无需再去进行大量烦琐的公式推导和手工计算,而且使一些对控制理论了解不深的工程技术人员也能比较自由地应用现代控制理论和方法进行控制系统的设计,从而反过来促进了现代控制理论及方法在实践中的应用和发展。

1.2 控制理论中若干术语及概念

在研究控制工程时,有必要对一些术语及概念做出定义:

(1) 系统

系统是一个部件的组合,这些部件按照一定的规律组合起来以完成某项特定的任务。在工程控制中,系统通常是某个物理系统,但广义地说,系统的概念可以是抽象的动态系统,如经济中一些现象等。

(2) 输入和输出

输入是指由外部施加到系统上的激励;输出是能从外部测量到的来自系统的信息。

(3) 状态

动态系统的状态可以定义为信息的集合,在已知未来外部输入的情况下,这些信息对于确定系统未来的行为是必要且充分的。

(4) 扰动

扰动是一种对系统的输出产生不利影响的信号。如果扰动产生在系统的内部,称为内扰;当扰动产生在系统的外部时,称为外扰。

(5) 控制

所谓系统的控制,是指驱动此系统,使之有效地达到预定的目的。广义地说,控制的目的有两种,一是保持系统原有状态,使其不发生偏离;二是引导系统直到某种预期的新状态。

(6) 反馈控制

反馈控制是这样一种控制,它能够在存在扰动的情况下,力图减少系统的输出量与某种参考输入量之间的偏差,并且其工作原理是基于这种偏差。

(7) 线性系统

一个系统若其输入作用和输出响应之间能够满足叠加性和齐次性,那么这个系统是线性系统。叠加性是指有多个输入同时作用系统时,该系统产生的输出等于每个输入单独作用于系统时产生的输出之和,见图 1.1;齐次性是指当两个输入量相互成比例时,它们各自的输出量之间也具有相同的比例关系,如图 1.2。

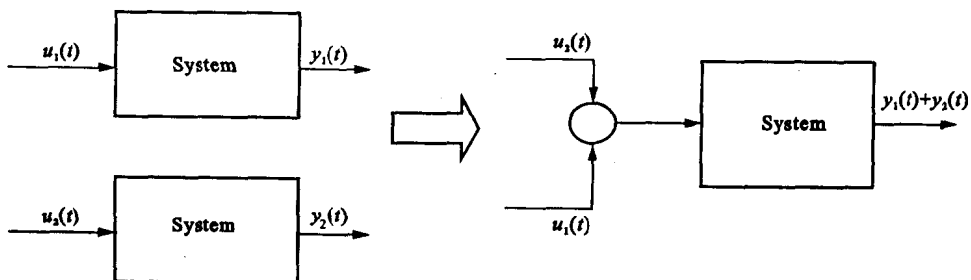


图 1.1 线性系统的叠加性

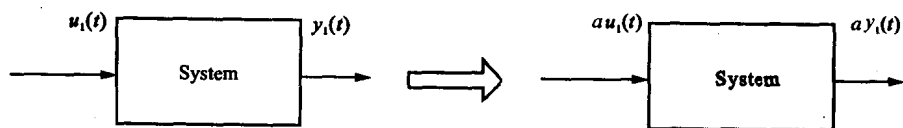


图 1.2 线性系统的齐次性

2 MATLAB——一个强有力的科学计算与控制系统 CAD 软件

2.1 概 述

MATLAB 的名字由 Matrix 和 Laboratory 两词的前三个字母组合而成,始创者是时任美国新墨西哥大学计算机科学系主任的 Cleve Moler 教授。于 1984 年由 MathWorks 公司推出(DOS 版)。1993 年推出 MATLAB 4.0(Windows 版)。1997 年 MATLAB 5.0 版问世。1999 年春已到了 5.3 版。今天 MATLAB 已成为国际上最优秀的科技应用软件之一,其强大的科学计算与可视化功能、简单易用的开放式可推展环境以及多达三十余个面向不同领域而扩展的工具箱(Toolbox)的支持,使得 MATLAB 在许多学科领域成为科学计算、计算机辅助设计与分析的基本工具和首选平台。

在国内外的许多大学中,MATLAB 已成为自动控制,信号分析等课程和教科书的内容,成为许多学科攻读学位的大学生、硕士生、博士生必须掌握的工具。在国际学术界,MATLAB 已被确认作为一个准确、可靠的科学计算软件而得到承认。在许多国际一流的学术刊物上都可以看到 MATLAB 的应用,在研究单位和工业部门,MATLAB 已成为一些分析统计软件的工作平台和主要支撑。许多硬件、仪器都接受 MATLAB 的支持。

面向控制工程应用一直是 MATLAB 的主要功能之一,早期的版本就提供了控制系统设计工具箱(Control Toolbox)。20 世纪 90 年代初的 3.5 版推出 Robust Toolbox,4.0 版推出基于模块图的控制系统仿真软件 Simulink。到目前为止,MATLAB 中包含的控制工程类工具箱已超过十个。MATLAB 所具备的强有力的计算功能和图形表现,以及各种工具箱提供的丰富的专用函数,为设计研究人员避免重复繁琐的计算和编程,更快、更好、更准确地进行控制系统分析和设计提供了极大的帮助。

本书的后续章节中将结合控制系统理论与设计方法介绍几个控制类工具箱的应用。本章中,我们将通过一些简单例子表现 MATLAB 的基本编程和功能。

2.2 MATLAB 基本功能及举例

本节中,我们通过一些简单例题来说明 MATLAB 的基本计算与绘图功能。

2.2.1 矩阵运算

既然以 Matrix Laboratory 的缩写来命名, MATLAB 无疑将在矩阵的表示和运算方面独具特色。

矩阵的 MATLAB 表示:

对于矩阵 $\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}$, 可以简单地表示为 $A = [1 \ 2 \ 3; 4 \ 5 \ 6; 7 \ 8 \ 9]$

此外, $a = [-1.3/7 \ \text{sqrt}(4.5) \ 2+3i]$ 也表示一个矩阵。

在 MATLAB 中, 可以方便地用 $C = [A; a]$ 来构成一个新的矩阵。

也可以用

$x = C(:, 2)$ 等命令来提取一个矩阵的某一部分。

MATLAB 的矩阵运算:

MATLAB 在矩阵运算方面的优势则更是明显。如, 可以直接用 $C = A + B$, $D = A * B$ 等计算式形式的命令来完成矩阵的四则运算。

如有 $AX = B$ 则求解指令为 $X = A \setminus B$

$XA = B$ 则求解指令为 $X = B / A$

矩阵转置: $B = A'$

矩阵求逆: $B = \text{inv}(A)$

行列式: $\det(A)$

此外, 在矩阵求特征值, LU 分解等诸多方面, MATLAB 都提供了大量丰富的专用函数和指令, 使得用户可以用计算公式的形式来解决 Fortran、C 等语言中须通过复杂编程来求解的问题。

读者可以通过运行以下程序各为 chp2 __ 1. m 程序来体会 MATLAB 中矩阵计算的一些基本方法。

```
% == == == == Program chp2 __ 1 == == == ==
% - - - - - Basic Module - - - - -
clc
disp('Matrix expression')
disp('A = [1 2 3; 4 5 6; 7 8 9] :')
```

```

A=[1 2 3;4 5 6;7 8 9]
disp('a=[ -1.3/7 sqrt(4.5) 2+3i] :')
a=[ -1.3/7 sqrt(4.5) 2+3i]
disp('Matrix Turn :')
B=A'
pause
clc
A=[1 2 3;4 5 6;7 8 9]
a=[ -1.3/7 sqrt(4.5) 2+3i]
disp(' C=[ A;a] :')
C=[ A;a]
disp(' x=C(:,2) :')
x=C(:,2)
pause
clc
A=[1 2 3;4 5 6;7 8 9]
disp(' C=A+A :')
C=A+A
disp(' B=A * E(E is an 3x3 Identity matrix) :')
B=A * eye(3)
pause
clc
A=[1 2 3;3 2 1;1 2 5]
B=[ -2 9 -15;6 15 -21;-6 11 -2]
disp(' Ax=B ⇒ x=A\B :')
x=inv(A) * B
disp(' the determinant of the square matrix x is')
det(x)

```

2.2.2 多项式计算

MATLAB 中以向量形式进行多项式的表示和计算。

如多项式 $x^2 + 3x + 2$ 表示为 $x = [1 \ 3 \ 2]$
 $4y^3 + 2y^2 + 6$ 表示为 $y = [4 \ 2 \ 0 \ 6]$

上述两个多项式的乘积,可以