



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 现代控制理论基础

(第二版)

施颂椒 陈学中 杜秀华编著



高等教育出版社  
Higher Education Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 现代控制理论基础

(第二版)

施颂椒 陈学中 杜秀华编著



高等教育出版社  
Higher Education Press



## 内容提要

“现代控制理论基础”是本科自动化专业的一门重要的专业基础课。本书以自动控制系统为研究对象,系统地讲述线性系统理论,适当介绍线性二次型最优控制方法,是进一步学习研究现代控制理论的基础。

本书包含了现代控制理论基础的主要理论和方法,围绕系统建模、系统分析和系统设计,介绍系统的状态空间描述基本概念和求解、稳定性、能控性和能观性、极点配置和状态观测器,以及最优控制理论中最基本的线性二次型最优控制方法,对这些理论均作了精确的阐述和严格的证明,着重阐述各种分析、设计算法及其应用。

每一章均编排有相当数量的习题,由浅入深地分档安排,并将它们分为练习题、深入题、实际题和 MATLAB 题;在内容叙述上深入浅出,注重对物理概念的叙述。

本书内容广泛,可作为自动化、电气工程及其自动化等专业本科及研究生的教材,也可供相关专业的科研、工程技术人员以及高等院校教师参考。

本书系普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

现代控制理论基础/施颂椒,陈学中,杜秀华编著.

—2 版. —北京:高等教育出版社,2009.5

ISBN 978-7-04-026454-8

I. 现… II. ①施…②陈…③杜… III. 现代控制理论—高等学校—教材 IV. O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 050701 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100120	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京泽明印刷有限责任公司		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
		畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787×1092 1/16	版 次	2005 年 11 月第 1 版
印 张	19		2009 年 5 月第 2 版
字 数	460 000	印 次	2009 年 5 月第 1 次印刷
		定 价	24.50 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 26454-00

# 序

---

本书自2005年问世以来,被多所学校选作教材,得到教师和学生的认可。学生反映:虽然该课程理论性较强、内容抽象、要用到较多的数学知识,但该书便于学生掌握基本概念、原理和主要算法;在内容上循序渐进、深入浅出,概念讲解到位,例题有利于加深对内容的理解,习题使学生学会了将理论用于实际问题,对学生帮助很大。2007年本书获上海交通大学优秀教材特等奖以及上海市优秀教材二等奖。经高等教育出版社推荐,本书被选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

现在三位编著者又将该书进行精心改编,推出第二版。新版在内容上有所增减:新增了一些新内容,有些在现有的同类教材中甚为少见,提供给读者选用参考。另外也删除了一些内容。同时改进了编写方法,使基本内容更为强调和突出,更便于理解和记忆;部分内容选用了较简单并在使用中较常用的形式;论述更为严谨,增加了部分算例。各章小结及有些内容的阐述方法也作了改写或改进。

总之,新版《现代控制理论基础》进一步提高了书稿质量,更为突出本书一版序中所强调和肯定的6个特点。

西安交通大学电信学院

万百五

2008年10月

# 前 言

---

本书自 2005 年问世以来,被多所学校选作教材,得到教师和学生的较好评价。许多读者反映:虽然该课程理论性较强、内容抽象、涉及较多数学知识,但该书循序渐进、深入浅出,并有例题加深对内容的理解,因此便于阅读、易于掌握基本概念、原理和主要算法;增加的不少新内容有价值,形成了特色。本书 2007 年获上海交通大学优秀教材特等奖以及上海市优秀教材二等奖。

在新近的教学实践的基础上,对本书第一版进行了改编,推出第二版。新版在保持原有特点的同时,内容上做了一些增减。

新增了一些内容,主要有:

在状态反馈极点配置部分,针对多输入系统状态反馈的非唯一性,分析了基于能控标准型的不同状态反馈方案在动态性能、鲁棒性和反馈阵增益三个指标方面的优劣,给出了综合考虑三个指标的选优方案;并根据三个指标提出了极点分块配置时极点配置于不同块内的原则。这些结论是现有教材中没有的,对多变量系统的状态反馈方案选择及极点分组有指导意义。

随着计算机的广泛使用,离散系统的设计日益重要,新版增加了线性离散系统状态反馈极点配置一节,对二阶系统极点位置与动态特性的关系、 $z$  平面上的等阻尼线和期望极点分布区域等内容作了全面的分析和阐述,这在其他现有教材中十分少见,对离散系统设计工作有较大参考价值。

在观测器设计方面,引入了“能检测性”概念,即不能观系统,其不能观部分是渐近稳定的,则称该系统是“能检测”的,它与镇定性对偶。渐近状态观测器存在的条件由能观测扩展为能检测,扩大了渐近状态观测器的应用范围,在近些年来的文献中都将系统的能检测性作为存在渐近状态观测器的条件,因而它既有理论意义,又有应用价值。新版教材介绍了能检测系统的渐近状态观测器的设计方法。

能控性判据增加了推论。其中一部分推论在其他教材中很少见到,提供给读者选用参考。

此外在第二版中也删除了一些内容,如基底与基底变换。该内容对初学者一般较难,在同类教材中也较少应用。而采用线性代数中线性变换方法,同样可以解决。又如实现中的汉克尔矩阵法,该算法比较繁琐,且要用到行或列搜索算法,而这种算法很少在实际中使用。

第二版还努力改进编写方法,对有的基本内容更为强调和突出,使之更便于理解和记忆,或选用了较简单并在应用中较常用的形式;有的内容则论述更为严谨;有的部分则增加了例题。如等价变换是线性系统理论的基本方法,本次改编中较为强调和突出此内容。状态方程求解及状态转移矩阵的阐述次序有了改变,新版将定常系统移到时变系统的前面,突出定常系统,并将后者列为选读。求解定常系统状态方程采用与求解一阶微分方程对比的方法给出,便于理解和记忆。对偶原理是线性系统理论中极为重要的原理,能应用于系统分析与设计的许多方面,新版改

编时突出了它的地位,在许多场合加以应用或作了应用提示。稳定性概念部分新版增加了图示,更便于自学和理解;李雅普诺夫稳定性判据在不同教材及文献中有不同的阐述形式,新版中选用了较简单且较常用的形式。关于可实现条件,第二版将系统分为正常系统和奇异系统(或广义系统)两大类,将原可实现条件改为正则有理函数可实现为正常系统的条件,论述更为严谨。对最优逼近设计方法,新版增加了例题。各章小结及其他一些阐述方法新版也作了改写或改进。

新版仍由西安交通大学电信学院万百五教授审阅,审者在本书编写及定稿过程中,提出了许多中肯、宝贵的意见和改进建议,编著者谨向万百五教授再次致以衷心的感谢。

限于编著者的学术水平,本教材一定还存在不少缺点甚至错误,敬请读者批评指正。

编著者  
2008年12月

# 第一版序

---

“现代控制理论基础”课程是自动化专业本科生教学计划中的一门专业课,它是建立在一些技术基础课,特别是“自动控制原理”课程之上的重要课程。它应紧密联系“自动控制原理”课程并充分反映“现代的”自动控制理论。为了适应扩宽专业知识面、优化整体自动化的教学体系,目前很需要一本新的教材。

本书主要为高等学校本科自动化专业编写,由上海交通大学电子信息与电气工程学院施颂椒、陈学中和杜秀华三位老师分工执笔,参考全国高等学校自动化专业“现代控制理论”课程的大纲要求编写。三位作者先后都担任这门课程的教学工作许多年,也从事这方面的研究工作。他们总结多年从事现代控制理论基础课程教学和科研的经验,故本书内容的科学性、系统性已趋于完善和成熟。

“现代控制理论基础”课程理论性强,要应用较多的数学知识,内容抽象。为了使学生掌握现代控制理论基础的基本概念、基本原理和主要算法,本书作者做了许多深入细致的教学研究工作。该书有如下特点值得强调和肯定:

(1) 本书包含了现代控制理论基础的主要理论,如稳定性理论、能控性和能观性理论、极点配置理论和状态观测器理论,对这些理论均作了精确的阐述和严格的证明。

(2) 本书力求做到深入浅出,并注重对物理概念的叙述,使学生容易理解。为使理论易于接受与掌握,在叙述上,尽量通过实例来说明其应用。

(3) 精选内容,注重应用,尽可能多选工程实用算法。重点讨论了线性定常系统的分析和设计算法,不仅介绍单变量系统的算法,而且也介绍多变量系统的算法。考虑到计算机的广泛应用,适当介绍线性时间离散系统的内容。在分析与设计的算法中,不仅给出一般的算法,同时也介绍一些实用的算法和手段,以便进行工程近似算法。

(4) 引进了作者们近年来的研究成果:在多变量系统的综合中,提供了适用于系统综合的 Sylvester 矩阵方程的简捷解法,并将其应用于状态反馈、状态观测器及降维观测器设计,不仅使多变量系统的设计显得简单容易了,而且使三者的设计统一于同一的框架下。对常用的能控性矩阵秩判据给出了一个推论,简化了判别能控性的计算,并引入了能控度的新概念。

(5) MATLAB 是一种应用广泛的数学计算软件包,它提供了一整套控制系统计算的工具箱,因此本书在每一章中均介绍了 MATLAB 在本章的相关应用的命令和例子,其目的也是为学生提供另一种解决现代控制理论复杂计算的工具。

(6) 每一章均编排有相当数量的习题,由浅入深地分档安排,并将它们分为练习题、深入题、实际题和 MATLAB 题。练习题是用来消化基本理论和算法的;深入题是用来深入理解课程内容的,某些题有相当难度,能提高学生分析、证明和解题能力;实际题是解决在实际系统中的应用;

MATLAB 题则是应用 MATLAB 求解系统的计算问题。这样可以满足不同要求的教学和不同学生的学习需要。

本书按照高等学校本科讲授一个学期的教学时数编写,并适当地引申某些内容,增加一些实例(打\*号表示),任课教师可根据不同的教学需要,适当取舍选用,同时为优秀学生提供深入学习的资料。因此本书可适用于不同类型高等学校自动化专业本科生或部分研究生的教学需要。

本书是一本精心编写的、以学生为本的“现代控制理论基础”课程的教材,内容精选、难易恰当、深入浅出、循序渐进、联系实际、练习题分成四类、充分应用 MATLAB 软件包,完全适用于高等学校本科自动化专业的学生以及非自动化类专业研究生的教学需要。相信它的出版必将有助于自动化界广大学者和工程技术人员们的学习和在实际中推广应用。

万百五  
西安交通大学电信学院  
2005年7月



# 第一版前言

---

现代控制理论源于 20 世纪 60 年代,以庞特里亚金(Pontryagin)的极大值原理、贝尔曼(Bellman)动态规划和卡尔曼(Kalman)滤波技术为形成标志。经典控制理论以单变量系统为研究对象,以频率法为主要研究方法,而现代控制理论以多变量系统为研究对象,以状态空间方法为研究方法。这种方法是建立在线性空间理论的基础上,主要在时域中研究系统,其最大特点是深刻地揭示了线性系统的许多基本特点和性质,并可以定量地进行系统的分析和设计。由于计算机技术的出现和发展,使其复杂的计算得以实现。现代控制理论经过几十年的发展,已形成许多学科分支,如线性系统理论,最优控制,系统辨识,自适应控制,鲁棒控制等。线性系统理论是现代控制理论的基础部分,它是学习研究控制理论其他学科分支的基础知识,因此对于自动化专业来说,它不仅是一门重要的基础课,也是重要的专业课。本书为自动化专业编写,以自动控制系统为研究对象来讲述线性系统理论,是进一步学习研究现代控制理论的基础,故取名为“现代控制理论基础”。

## 一、现代控制理论基础研究对象和内容

### 1. 研究对象

现代控制理论基础以线性控制系统为对象,主要研究其动态属性。实际系统都是非线性系统,但大部分实际系统,在一定条件下,均可充分精确地以线性系统来近似。因此现代控制理论基础(线性系统理论)不仅具有理论意义,而且具有实际价值。线性系统包括连续系统和离散系统,线性连续系统的理论可扩展应用于离散系统。本书主要讨论线性连续系统理论,对于离散系统也做一些介绍。

### 2. 主要内容

现代控制理论基础主要研究线性系统的动态行为和改变这一行为的可行性和方法。它用状态空间方法,从系统内部状态入手,建立系统结构、参数和系统状态运动行为之间的关系。具体地说,主要内容包括:系统建模、系统分析和系统设计。

#### (1) 系统建模

建立系统的数学模型是进行系统分析和设计的前提。系统的数学模型就是对系统运动特性的数学描述,一个系统由于回答的问题不同,可以有不同的数学模型。系统数学模型可以通过分析系统的物理机理,应用物理学的定律并进行数学推导予以建立。用不同的数学手段能获得不同形式的数学描述,现代控制理论是用状态空间方法研究系统的问题,线性系统的数学模型是系统状态  $\mathbf{x}(t)$ 、输入  $\mathbf{u}(t)$ 、输出  $\mathbf{y}(t)$  和表征系统结构和参数的  $\mathbf{A}(t)$ 、 $\mathbf{B}(t)$ 、 $\mathbf{C}(t)$ 、 $\mathbf{D}(t)$  之间关系的数学描述,即系统的状态空间描述,它一般具有下列形式:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{u}(t)\end{aligned}$$

系统建模的方法是本课的基本任务之一。

最小实现是研究从系统的输入输出描述(主要是传递函数)求取既能控又能观状态空间描述的方法。对一个实际系统,可以通过实验的方法获得其输入输出描述,再求取状态空间描述,因此,用实验方法也是建立系统数学模型的一种途径。尤其对一些比较复杂的系统,很难用理论的方法直接建模时,它是一种有效的途径。

### (2) 系统分析

一旦建立了系统模型,下一步就是进行系统分析,系统分析包括定量分析和定性分析。定量分析是用解析的方法求解系统的运动方程(状态空间描述),求出系统在确定的输入  $\mathbf{u}(t)$  的激励下,其状态  $\mathbf{x}(t)$  及输出  $\mathbf{y}(t)$  的响应。

定量分析固然能求得系统准确的响应,但往往是不方便的,人们更感兴趣的是定性分析——定性确定系统的基本性质以及它们和系统结构参数之间的关系。对于系统的状态空间描述,除了系统的稳定性外,系统的能控性和能观性也是系统的重要性质,它们全面地揭示了系统的行为和本质特性。能控性和能观性这两个现代控制理论最基本的概念是系统定性分析的主要内容,也是系统综合时的结构条件和理论基础。

### (3) 系统设计

系统设计是在系统分析的基础上,寻求改善系统动态性能的方法。系统综合是为系统寻找一个合适的控制律(主要是反馈方式和控制算法),使系统满足人们对控制的各种要求。在本书中主要是在时域上用解析的方法来进行系统的综合。

状态空间描述是系统内部描述,它包含了系统的全部信息,使在更大范围内改善系统的性能成为可能。状态反馈是配置系统极点的主要方法,是改进和控制系统动态品质的最基本方法,而状态观测器提供了系统状态的估计,使状态反馈成为现实。在现代控制理论基础中,状态反馈和状态观测器的理论和方法是系统设计的主要内容。

除了用状态反馈通过极点配置进行系统综合外,在系统镇定,系统解耦和无静差跟踪系统的综合等方面也为系统设计提供了某些特殊控制律。这些问题也将在系统的综合中加以讨论。

在系统的综合中,有些问题,例如输出反馈系统特征值的任意配置问题,是很难用解析的方法解决的,本书还介绍一种应用最优化技术寻求输出反馈控制的方法,这种方法虽然不能得到精确配置极点结果,但能满足工程上的要求,尤其是这种设计思想提供了解决实际问题的一种途径。

## 二、本书的特点和内容安排

### 1. 本书特点

本书主要为大学本科自动化专业编写,为了便于读者理解和掌握现代控制理论基础的主要内容,在编写中力求做到:

(1) 从控制系统实际出发,建立现代控制理论基础的基本概念,阐述基本原理和推导算法。对于现代控制理论基础中的基本概念和理论的阐述,力求做到严格正确,使读者能正确理解和深入掌握。现代控制理论基础理论性强,应用较多的数学知识,所以内容抽象。在叙述上力求做到

深入浅出,理论联系实际,通过实例,尤其是实际系统例子来说明其应用,使理论易于接受与掌握。对涉及的数学知识,除了矩阵理论外,均在需要应用时预先加以介绍,使之学以致用。

(2) 精选内容,注重应用,尽可能多选工程实用算法,适当引入我们的研究成果。重点讨论了线性定常系统的分析和设计的方法。不仅介绍单变量系统的算法,而且也介绍多变量系统的算法。考虑到计算机的广泛应用,适当介绍离散系统的内容。在分析与设计的算法中,不仅推导一般的算法,同时也给出一些实用的算法和手段,也包含有我们历年来的工作。例如在多变量系统的综合中,提供了适用于系统综合的西尔维斯特(Sylvester)矩阵方程的简捷解法,并将其应用于状态反馈、全维或降维观测器设计,不仅使多变量系统的设计显得简单容易了,并且使三者的设计统一于统一的框架下。对常用的能控性矩阵秩判据给出了一个推论,不仅简化了判别能控性的计算,并引入了能控度的新概念。还有应用最优化技术综合系统的方法等,为读者提供更多的实用和有效的算法。

(3) 学习本课的目的在于应用所学理论解决控制系统的实际问题,本书的习题,除了选编一定数量的一般题外,还选了深入题以加深对基本理论的理解和满足不同学校的需要。还选择了一些实际系统的分析设计问题,以提高实际应用能力。目前 MATLAB 软件在控制系统的计算中已得到越来越多的应用,所以在书中适当介绍一些实例和习题。

(4) 本书按照一个学期的教学时数编写,在此基础上,适当地引申某些内容,增加一些实例,根据不同的教学需要,进行适当取舍。

## 2. 内容安排

本书的基本结构如下,全书共分六章:

- 第一章 线性系统的数学描述
- 第二章 线性系统的状态响应和输出响应
- 第三章 系统的稳定性
- 第四章 线性系统的能控性和能观性
- 第五章 最小实现
- 第六章 状态反馈和状态观测器

第一章主要介绍系统的数学描述——输入输出描述(外部描述)和状态空间描述(内部描述),以及求取系统状态空间描述的方法。重点是建立状态及状态空间的概念,掌握系统状态空间描述的基本形式和系统等价动力学方程的物理意义及数学意义和等价变换的基本关系式。

第二章是系统运动的定量分析,即求解系统的状态方程。主要内容包括:线性系统的状态转移矩阵及其性质,线性系统的状态响应——零状态响应和零输入响应,线性系统的输出响应,线性定常系统的响应,线性定常系统状态转移矩阵  $e^{At}$  的计算方法,系统等价变换对响应的影响。

第三章研究系统的稳定性问题,控制系统的稳定性是控制理论中基本问题之一,除了讨论系统的输入输出稳定性,重点讨论了系统平衡状态的稳定性问题。介绍 BIBO 稳定,李雅普诺夫意义上的稳定和渐近稳定的概念,李雅普诺夫稳定性理论和方法是本章的研究重点。

第四章介绍能控性和能观性的概念,它们是现代控制理论中表征系统特性的重要概念。这两个概念的引入,把系统的分析和设计从外部特性的研究引向内部特性的研究,使系统的分析和设计建立在严格的理论基础上,为在时域中进行系统的分析和设计提供了理论基础。本章主要内容有四个:能控性和能观性的概念,能控性和能观性判据,系统的结构分解和状态空间描述

的标准形,离散系统中能控性与能观性的特点和判据。

第五章是讨论系统的最小实现问题,作为求取系统状态空间描述的途径,主要掌握单变量系统的最小实现方法。最小实现是由系统的传递函数阵求最小维数的状态空间描述,由于系统的传递函数阵可以通过实验方法求取,因此,它也是求取系统状态空间描述的一种途径。本章主要内容是单变量系统的三种形式最小实现方法。同时也介绍了向量传递函数的实现方法。

第六章研究系统的综合问题,它也是能控性和能观性概念的实际应用。状态空间方法可以在时域中,用严格的数学分析方法来设计系统,状态反馈和状态观测器就是这种理论和方法。状态反馈提供了任意配置系统极点的理论和方法,状态观测器提供了在系统状态不可测量时的状态估计,使状态反馈得以实现。介绍了一种适用于系统综合的西尔维斯特矩阵方程的简捷解法,它可应用于状态反馈阵的计算,也可应用于状态观测器和降维观测器的设计。此外还讨论了系统镇定、系统解耦和系统无静差跟踪问题(一种鲁棒控制问题)。还介绍了最优化技术在系统综合中的应用。最后研究了最优控制中的一个基本问题——线性二次型最优控制。

本书由博士生导师施颂椒教授主编,负责全书大纲确定,结构设计,内容取舍以及编写指导,由陈学中和杜秀华执笔,第四章和线性二次型最优控制问题由杜秀华编写,其余各章由陈学中编写,最后由施颂椒教授定稿。本书根据我们对本课程多年教学的经验以及学生在学习中的反映,按照自动化专业对本课程的要求,力求让读者掌握现代控制理论基础的基本内容。由于水平及实际经验所限,难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

非常荣幸,能聘请西安交通大学电信学院万百五教授作本书的评审人。万百五教授对本书进行认真、负责的评阅,提出许多中肯、宝贵的意见和改进建议,作者谨此向万百五教授致以衷心感谢。

编者

2005年10月

# 目 录

<b>第一章 线性系统的数学描述</b> .....	1	变换 .....	30
1.1 引言 .....	1	1.4.1 线性系统状态空间描述的等	
1.2 线性系统的输入输出描述 .....	4	价变换 .....	30
1.2.1 系统输入输出描述的一般表		1.4.2 线性系统状态空间描述的等	
达式 .....	4	价变换的性质 .....	31
1.2.2 线性系统的单位脉冲响		1.4.3 对角线标准型和约当标准型状	
应阵 .....	5	态空间描述 .....	32
1.2.3 线性定常系统的单位脉冲响		1.5 线性定常组合系统的状态空间	
应阵 .....	6	描述 .....	37
1.2.4 线性定常系统的传递函		1.5.1 并联连接的组合系统 .....	38
数阵 .....	7	1.5.2 串联连接的组合系统 .....	39
1.3 线性系统的状态空间描述 .....	8	1.5.3 反馈连接的组合系统 .....	40
1.3.1 状态变量、状态向量和状态		1.5.4 MATLAB 在组合系统计算中	
空间 .....	8	的应用 .....	41
1.3.2 线性系统的状态空间描述 ..	10	小结 .....	42
1.3.3 状态空间描述中的线性		习题 .....	43
性质 .....	12	<b>第二章 线性系统的状态响应和输出</b>	
1.3.4 非线性系统的线性化 .....	12	<b>响应</b> .....	49
1.3.5 由状态空间描述求传递函		2.1 线性系统响应的特点 .....	49
数阵 .....	13	2.1.1 问题的提出 .....	49
1.3.6 线性定常系统状态空间描述		2.1.2 线性系统状态响应的特点 ..	49
的模拟计算机仿真及方		2.2 线性定常系统的状态响应 .....	50
块图 .....	14	2.2.1 线性定常系统状态方	
1.3.7 线性系统的状态信号流图		程的解 .....	50
模型 .....	16	2.2.2 线性定常系统的状态转	
1.3.8 根据物理机理推导状态空间		移矩阵 .....	51
描述 .....	20	2.2.3 线性定常系统状态响应举例 ..	58
1.3.9 用 MATLAB 进行系统模型		2.3 线性定常系统的输出响应 .....	60
转换 .....	28	2.4 用 MATLAB 求线性定常系统的	
1.3.10 状态空间描述的小结 .....	29	响应 .....	61
1.4 系统状态空间描述的等价			

* 2.5 线性时变系统的响应 .....	63	3.3.3 李雅普诺夫稳定性判据 .....	89
2.5.1 线性时变系统的状态转移 矩阵 .....	63	3.3.4 线性定常系统的李雅普诺夫 方程稳定性判据 .....	93
2.5.2 线性时变系统状态转移矩阵 $\Phi(t, t_0)$ 的性质 .....	65	3.3.5 线性定常离散系统的李雅普 诺夫方程稳定性判据 .....	97
2.5.3 线性时变系统的状态响应 和输出响应 .....	65	3.3.6 用 MATLAB 求解李雅普诺夫 方程 .....	99
2.5.4 线性时变系统的单位脉冲 响应 .....	66	3.3.7 李雅普诺夫函数的规则化构 造方法 .....	100
2.6 线性离散系统的响应 .....	66	3.3.8 非线性系统稳定性的间接判 定法 .....	105
2.6.1 线性连续时变系统时间离 散化的状态空间描述 .....	66	小结 .....	105
2.6.2 线性连续定常系统时间离 散化的状态空间描述 .....	67	习题 .....	106
2.6.3 线性时变离散系统 的响应 .....	70	<b>第四章 线性系统的能控性和能         观性</b> .....	110
2.6.4 线性定常离散系统的响应 ..	72	4.1 线性定常系统的能控性 .....	110
2.6.5 MATLAB 在线性离散系统中 的应用 .....	72	4.1.1 能控性定义 .....	110
小结 .....	74	4.1.2 线性定常系统的能控性 判据 .....	111
习题 .....	74	4.2 线性定常系统的能观性 .....	124
<b>第三章 系统的稳定性</b> .....	78	4.2.1 能观性定义 .....	124
3.1 线性系统的外部稳定性 .....	78	4.2.2 线性定常系统的能观性 判据 .....	125
3.1.1 单变量线性系统的 BIBO 稳定性 .....	78	* 4.3 线性时变系统的能控性和能 观性 .....	131
3.1.2 多变量线性系统的 BIBO 稳定性 .....	79	4.3.1 线性时变系统的能控性 ..	132
3.2 系统的内部稳定性 .....	80	4.3.2 线性时变系统的能观性 ..	136
3.2.1 系统内部稳定性的基本 概念 .....	82	4.4 离散时间系统的能控性和 能观性 .....	140
3.2.2 线性定常连续系统稳定性特 征值判据 .....	83	4.4.1 离散系统的能控性 .....	140
3.2.3 线性定常离散系统的稳定性 特征值判据 .....	84	4.4.2 离散系统的能观性 .....	141
3.2.4 用 MATLAB 求系统特 征值 .....	86	4.4.3 对原点的能控性和能达性 ..	142
3.3 李雅普诺夫判定稳定性方法 ..	86	4.4.4 离散化系统保持能控性和 能观性的条件 .....	143
3.3.1 李雅普诺夫第二法 .....	87	4.5 线性系统的对偶性 .....	144
3.3.2 预备知识 .....	87	4.5.1 线性定常系统的对偶性 ..	144
		4.5.2 对偶原理 .....	146
		* 4.5.3 时变系统的对偶性 .....	146
		4.6 能控标准型和能观标准型 .....	148



4.6.1 单输入单输出系统的标 准型 .....	148	6.4.3 多输入系统的极点配置 算法 .....	211
4.6.2 多输入多输出系统的标 准型 .....	154	6.4.4 系统的镇定 .....	219
4.7 线性系统的结构分解 .....	163	6.5 状态反馈在系统综合中的 其他应用 .....	221
4.7.1 按能控性的系统结构分解 ..	163	6.5.1 系统解耦问题 .....	221
4.7.2 按能观性的系统结构分解 ..	167	6.5.2 渐近跟踪与干扰抑制问题 ..	231
4.7.3 按能控性和能观性的系统 结构分解 .....	169	6.6 线性离散系统的状态反馈 .....	239
小结 .....	172	6.6.1 线性离散状态反馈系统的 状态空间描述 .....	239
习题 .....	172	6.6.2 线性离散系统状态反馈极点 配置 .....	240
<b>第五章 最小实现</b> .....	177	6.7 状态观测器 .....	243
5.1 引言 .....	177	6.7.1 状态重构(估计) .....	243
5.2 实现和最小实现 .....	178	6.7.2 全维状态观测器 .....	244
5.2.1 $G(s)$ 可实现为正常系统的 条件 .....	178	6.7.3 状态观测器 $A-LC$ 的特征值 可以任意配置的条件 .....	245
5.2.2 最小实现的定义与性质 ..	181	6.7.4 基于求解西尔维斯特方程的 状态观测器设计算法 .....	246
5.3 线性定常系统的最小实现 .....	185	6.7.5 用能观标准型的设计算法 ..	248
5.3.1 单变量系统传递函数的最小 实现 .....	186	6.7.6 降维状态观测器 .....	252
5.3.2 向量传递函数(向量正则右 理函数)的实现 .....	193	6.8 带状态观测器的状态反馈 系统 .....	260
5.3.3 用 MATLAB 求系统的最小 实现 .....	196	6.8.1 带状态观测器状态反馈系统 的状态空间描述 .....	260
小结 .....	198	6.8.2 分离性原理 .....	261
习题 .....	198	6.8.3 状态观测器期望特征值的配 置原则 .....	263
<b>第六章 状态反馈和状态观测器</b> .....	201	6.9 线性系统的能检性及其观测器 设计 .....	263
6.1 引言 .....	201	6.9.1 系统为能检测的条件 .....	264
6.2 反馈系统的状态空间描述 .....	202	6.9.2 能检测系统状态观测器的 设计算法 .....	265
6.2.1 状态反馈系统的状态空间 描述 .....	202	6.10 输出反馈控制及最优逼近法 在系统综合中的应用 .....	265
6.2.2 输出反馈系统的状态空间 描述 .....	203	6.10.1 输出反馈控制系统的能控性 和能观性 .....	266
6.3 状态反馈系统的能控性和能 观性 .....	204	6.10.2 输出反馈的极点配置 问题 .....	266
6.4 状态反馈极点配置 .....	205		
6.4.1 状态反馈极点配置定理 ..	205		
6.4.2 单输入系统的极点配置 算法 .....	206		

6.10.3 输出反馈控制系统特征值 配置的最优逼近法 .....	267	调节器 .....	271
6.10.4 优化设计法在鲁棒控制器 设计中的应用 .....	268	6.11.3 无限时间线性定常系统状态 调节器 .....	274
6.11 线性二次型最优控制问题 ...	269	小结 .....	277
6.11.1 线性二次型最优控制 问题 .....	269	习题 .....	279
6.11.2 有限时间线性连续系统状态		<b>参考文献</b> .....	<b>284</b>

## 1.1 引言

系统的数学模型是描述系统行为特性的数学表达式(如传递函数、脉冲响应函数等)或数学方程(如微分方程、状态方程、代数方程等),建立系统的数学模型是控制系统进行分析和设计的基础。由于研究时所要解决的问题不同,即选择研究的参量不同以及建立数学模型所用的方法不同,描述同一个系统的数学模型也不相同。

以图 1-1 所示的直流电动机为例,在电枢控制时,励磁电压  $u_f$  恒定,气隙磁通等于常数,电机的电磁转矩  $T_e$  与电枢电流  $i_a$  成正比

$$T_e = K_t i_a \quad (1-1)$$

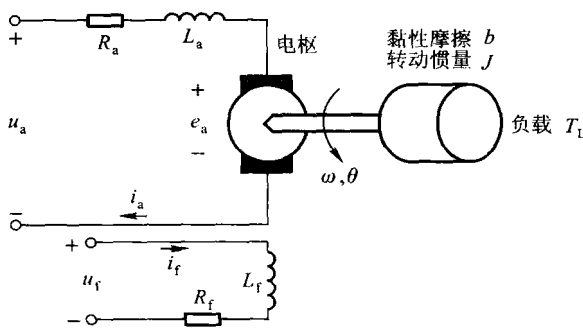


图 1-1 直流电动机控制电路

式中,  $K_t$  为电机的转矩常数。电机的反电动势  $e_a$  与电机的角速度  $\omega$  成正比

$$e_a = K_e \omega \quad (1-2)$$

式中,  $K_e$  为电机的反电动势常数。电枢电路电压平衡方程为

$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1-3)$$

式中,  $R_a$  和  $L_a$  分别是电枢电路的电阻和电感。电机转轴上的转矩平衡方程为

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + b\omega + T_L \quad (1-4)$$

式中,  $J$  为电机转轴上总的等效转动惯量,  $b$  为电机转轴上的等效黏性摩擦系数,  $T_L$  是负载转矩。若以  $u_a$  为输入电压,  $\omega$  为输出转速, 在以上各式中, 消去中间变量  $i_a$ , 并假定  $T_L = 0$ , 可得如下微