



中国科学院机械工程系列规划教材

机械工程控制基础

柳洪义 等 编著



科学出版社
www.sciencep.com

中国科学院机械工程系列规划教材

机械程控制基础

柳洪义 宋伟刚
原所先 罗 忠 编著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书是按“机械工程与自动化”专业培养目标编写的,讲述控制理论的基本原理及其在机械工程自动控制系统中的应用。全书共11章,第1~8章为经典控制理论部分,主要介绍了自动控制的基本概念,控制系统在时域和频域中的数学模型建立;分析了单输入单输出、线性、时不变系统的稳定性和稳态误差;阐述了线性控制系统的时域分析法、频域分析法、根轨迹法以及设计校正方法。每章均有工程实例分析。第9章为离散控制系统部分;第10章为现代控制理论基础部分;第11章为智能控制理论基础部分。

本书可作为机械工程及自动化冶金、化工、材料成型与控制等专业的教材,也可以供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程控制基础 / 柳洪义等编著. —北京:科学出版社, 2006

(中国科学院机械工程系列规划教材)

ISBN 7-03-016977-8

I. 机… II. 柳… III. 机械工程-控制系统-教材 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第015754号

责任编辑:段博原 贾瑞娜 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年7月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2006年7月第一次印刷 印张: 22 1/4

印数: 1—4 000 字数: 417 000

定价: 28.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<双青>)

中国科学院机械工程系列规划教材
编写委员会

顾 问：闻邦椿

主 编：谢里阳

执行主编：陈良玉

委 员：(以姓氏笔画为序)

马星国 王玉良 王世杰 王淑仁 巩云鹏

巩亚东 刘 杰 孙志礼 李为民 李树军

李景春 宋锦春 柳洪义 黄秋波

序

装备制造业是我国国民经济中的重要基础工业。机械装备为各类产品的物化提供平台和载体，机械装备的技术水平是衡量社会生产力水平的重要标志，机械科学、机械工程技术和机械工业的发展水平对经济建设和社会发展的作用都至关重要。

目前，世界机械工业产值达到了总工业产值的 1/3 以上。我国制造业增加值在国内生产总值所占的比重高达 40%，我国的财政收入一半也来自制造业。随着我国加入 WTO，经济越来越融入到全球经济体系中，我国的制造业在世界制造业中的地位也越来越重要，并正从制造大国迈向制造强国。至少在 21 世纪的前 20 年，制造业将仍然是我国国民经济增长的主要来源，因此需要大批综合素质高、能力强的机械类专业人才。

另外，我国高等教育从精英型教育阶段进入了大众型教育阶段，实现了高等教育历史性的跨越式发展，技术的进步和社会的发展也对高等院校机械工程教育的人才培养提出了新的要求。

为此，中国科学院教材建设专家委员会和科学出版社组织我国机械工程领域的中国科学院院士、教育部教学指导委员会成员、教学名师以及经验丰富的专家教授组成编委会，共同组织编写了这套《中国科学院机械工程系列规划教材》，以适应我国高等机械工程教育事业的发展，更好地实现机械工程类专业人才的培养目标。在规模上、素质上更好地满足我国机械科学技术和机械工业发展的需要，为建设创新型国家做出贡献。

本套教材主要有以下几方面的特点：

1. 适应多层次的需要。本套教材依据教育部相关教学指导委员会制定的最新专业规范和机械基础课程最新的教学基本要求，同时吸取不同层次学校教师的意见，进行了教材内容的编排与优化，能够满足各类高校学生的培养目标。

2. 结构体系完备。各门课程的知识之间相互衔接，以便学生完整掌握学科基本概念、基本理论，了解学科整体发展趋势。本套教材除主教材外，还配套有辅导书、多媒体课件、习题集及网络课程等。

3. 作者经验丰富。参加本套教材编写的人员有不少来自于相关国家重点学科、国家机械教学基地的院校，有些还是国家级、省部级教学成果奖完成人，是国家级、省级精品课程建设负责人以及相关院校的骨干教师代表。

4. 理论与实际相结合，加强实践教学。在达到掌握基本理论、基本知识、

基本技能的教学要求前提下，注重例题、设计实践和实验教学，着力于学生分析问题能力、创新能力和实际动手能力的培养。

另外，为了保证本套教材的质量，编委会聘请国内知名的同行专家对教材进行了审定。

我们还将根据机械科学与工程学科发展的战略要求，对本套教材不断补充、更新，以保持本套教材的系统性、先进性和适用性。

我们热忱欢迎全国同行以及关注机械科学与工程教育、教学及教材建设的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议，共同为我国机械工程教育的发展而努力。

中国科学院院士



2006年5月

前 言

科学技术起源于人类对原始机械和力学问题的研究。随着人类社会的发展,机械出现在人们日常生活、生产、交通运输、军事和科研等各个领域。人们不断地要求机械最大限度地代替人的劳动,并产生更多、更好的劳动成果,这就要求机械不断地向自动化和智能化方向发展。如今,具有自动化功能的机器越来越多,如各种数控机床、机器人、自动化生产线、自动导航的大型客机、适合不同用途的运载火箭等。自动化机械具有完成各种功能的机械结构的同时,还具有控制机械结构完成所需动作的自动控制系统。这两部分有机地结合在一起,形成一个具有希望功能的机电一体化系统。完成不同工作的自动化系统当然具有不同的结构和不同的具体性能指标。对于机械自动化系统来说,一般都要求系统具有稳定性、快速性和精确性。如何使自动化机械系统具有优良的性能,是一个复杂的系统工程问题。系统的设计者不仅应该拥有全面的现代机械设计理论知识和丰富的实践经验,同时应该拥有设计自动控制系统的理论和经验。然而自动控制理论的描述离不开数学,在自动控制理论书籍中使用了大量的数学理论,使得大多数机械类学生对学习自动控制理论感到抽象和困难,对学习这些理论的目的性缺乏认识,影响了学习兴趣,学习效果欠佳。为了解决这些问题,本书采取了理论与实际紧密结合的方法,具体做法是:首先给出具有代表性的自动控制系统的实例,提出在设计自动控制系统时要解决的关键问题,使系统工作稳定、快速和精确。然后给出解决这些关键问题的途径,即学习相关的自动控制理论。最后应用这些理论分析典型系统,让读者马上看到所学理论的用处,同时也帮助读者更深入地理解所学的理论。另外,为了进一步帮助读者巩固所学的内容,在每一章后面都有习题,在本书的最后按章给出了部分习题的参考答案。本书作为高年级本科生的专业课教材使用时,第1~8章为精讲内容,第9、10、11章为泛读内容。

本书是在柳洪义、原所先编著的《机械工程控制基础》(东北大学出版社出版)基础上编写的,也体现了编者们的多年的教学经验、科研体会和“985”工程研究成果。本书参考了兄弟院校的同类教材和论文,我们对这些教材的编著者和论文作者表示诚挚的感谢。我们还感谢担任本书主审的闻邦椿院士和东北大学刘杰教授对本书进行细致的审阅及提出宝贵的意见。我们还对给予了本书出版大力支持的东北大学教务处、“985”工程项目和东北大学机械工程与自动化学院深表感谢。

本书第1、6、8、9、10章由柳洪义教授编写,第2、5、7章由宋伟刚教授

编写，第 3、4 章由原所先副教授编写，第 11 章和习题及参考答案由罗忠博士编写。全书由柳洪义教授统稿。

由于编著者水平有限，书中难免有遗漏和错误之处，恳请读者批评指正。

柳洪义

2005 年 10 月 22 月于东北大学

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 机械工程的发展与控制理论的应用	1
1.2 机械工程自动控制系统的基本结构及工作原理	2
1.3 机械自动控制系统的分类.....	10
1.4 对自动控制系统的基本要求.....	11
习题	12
第 2 章 自动控制系统的数学模型和传递函数	18
2.1 系统数学模型的建立.....	19
2.2 非线性数学模型的线性化.....	22
2.3 拉普拉斯变换.....	25
2.3.1 复数和复变函数	25
2.3.2 拉普拉斯变换及其逆变换的定义	26
2.3.3 典型时间函数的拉普拉斯变换	27
2.3.4 拉普拉斯变换的基本性质.....	30
2.3.5 拉普拉斯反变换的应用	33
2.4 传递函数.....	35
2.4.1 传递函数的定义	35
2.4.2 典型环节的传递函数	37
2.5 系统方框图和信号流图.....	44
2.5.1 系统方框图的组成	44
2.5.2 环节的基本连接方式	45
2.5.3 方框图的变换与简化	47
2.5.4 系统的信号流图及梅逊公式	50
2.6 工程实例中的数学模型与传递函数.....	54
2.6.1 工作台位置自动控制系统.....	54
2.6.2 液压伺服位置控制	58
习题	60
第 3 章 控制系统的时域分析法	68

3.1	典型输入信号	68
3.2	一阶系统的时间响应	70
3.2.1	一阶系统的单位脉冲响应	70
3.2.2	一阶系统的单位阶跃响应	71
3.2.3	一阶系统的单位斜坡响应	72
3.3	二阶系统的时间响应	72
3.3.1	二阶系统的单位脉冲响应	73
3.3.2	二阶系统的单位阶跃响应	74
3.3.3	二阶系统的单位斜坡响应	75
3.3.4	二阶系统时间响应的性能指标	77
3.3.5	二阶系统计算举例	80
3.4	高阶系统的时间响应分析	82
3.5	工程实例中的时域分析	84
	习题	86
第4章	控制系统的频域分析法	90
4.1	频率特性概述	90
4.1.1	频率特性	90
4.1.2	频率特性的求法	91
4.1.3	频率特性的特点和作用	94
4.2	典型环节频率特性的极坐标图	96
4.2.1	极坐标图的概念	96
4.2.2	典型环节的奈奎斯特图	96
4.3	系统奈奎斯特图的画法	103
4.4	典型环节频率特性的对数坐标图	105
4.4.1	对数坐标图的概念	105
4.4.2	典型环节的 Bode 图	106
4.4.3	绘制系统 Bode 图的步骤	114
4.5	频率特性的性能指标	116
4.6	最小相位系统和非最小相位系统	117
4.7	工程实例中的频域分析	119
	习题	120
第5章	线性控制系统的稳定性	123
5.1	系统稳定性的基本概念及稳定条件	123
5.2	代数稳定性判据	125
5.2.1	赫尔维茨判据	125

5.2.2 劳斯判据	127
5.2.3 谢绪恺判据	133
5.3 几何稳定性判据	134
5.3.1 幅角原理	134
5.3.2 奈奎斯特稳定性判据	136
5.3.3 应用奈奎斯特判据分析含有积分环节和延时环节系统的稳定性	139
5.3.4 根据 Bode 图判断系统的稳定性	141
5.4 系统的相对稳定性	144
5.5 工程实例中的稳定性分析	148
5.5.1 工作台位置自动控制系统	148
5.5.2 液压伺服位置控制	149
习题	151
第 6 章 根轨迹法	155
6.1 根轨迹与系统特性	155
6.2 根轨迹的幅值条件和相角条件	156
6.3 绘制根轨迹的基本规则	157
6.4 Matlab 根轨迹应用举例	162
习题	168
第 7 章 控制系统的误差分析和计算	169
7.1 系统稳态误差的基本概念	169
7.1.1 系统复域误差	169
7.1.2 系统时域稳态误差	170
7.2 系统稳态误差的计算	170
7.2.1 系统的类型	170
7.2.2 系统的误差传递函数	171
7.2.3 静态误差系数	172
7.2.4 用 Bode 图确定误差常数	177
7.2.5 扰动引起的误差	179
7.3 减小稳态误差的途径	181
7.4 动态误差系数	183
7.5 工程实例中的误差分析	185
7.5.1 工作台位置自动控制系统	185
7.5.2 液压伺服位置控制	185
习题	186
第 8 章 控制系统性能校正	191

8.1	概述	191
8.2	系统的性能指标	192
8.3	系统闭环零点、极点的分布与系统性能的关系	194
8.3.1	系统单位阶跃输入响应	194
8.3.2	闭环零点、极点的分布与系统性能的关系	195
8.3.3	利用主导极点估计系统性能指标	195
8.4	并联校正	197
8.4.1	反馈校正	197
8.4.2	顺馈校正	198
8.5	串联校正	199
8.5.1	Bode 定理简介及应用	200
8.5.2	相位超前校正	200
8.5.3	相位滞后校正	205
8.5.4	相位滞后-超前校正	208
8.6	控制器类型	211
8.6.1	比例控制器 (P)	211
8.6.2	比例积分控制器 (PI)	211
8.6.3	比例微分控制器 (PD)	212
8.6.4	比例积分微分控制器 (PID)	212
8.6.5	有源相位超前控制器	213
8.6.6	有源相位滞后控制器	213
8.6.7	有源相位滞后超前控制器	214
8.7	按希望特性设计控制器	215
8.7.1	典型 I 系统 (二阶希望特性系统)	215
8.7.2	典型 II 型系统 (三阶希望特性系统)	218
8.7.3	按希望特性设计控制器的图解法	221
8.7.4	按希望特性设计控制器的直接法	223
8.8	工程实例中的控制系统设计	225
	习题	227
第 9 章	离散控制系统	231
9.1	离散控制系统概述	231
9.1.1	离散信号	232
9.1.2	保持器	233
9.2	Z 变换和 Z 反变换	234
9.2.1	Z 变换的定义	234

9.2.2	Z变换的性质	236
9.2.3	Z反变换	236
9.3	离散系统的传递函数	237
9.3.1	离散传递函数的求法	238
9.3.2	开环系统的脉冲传递函数	240
9.3.3	闭环系统的脉冲传递函数	241
9.4	离散系统的Z域分析	242
9.4.1	离散系统的稳定性分析	242
9.4.2	极点分布与瞬态响应的关系	245
9.4.3	离散系统的稳态误差	246
9.5	离散系统的校正与设计	247
9.5.1	模拟化设计法	247
9.5.2	离散设计法	248
9.5.3	PID数字控制器	250
	习题	252
第10章	现代控制理论基础	254
10.1	系统状态空间表达式的建立	254
10.2	系统的传递矩阵	258
10.3	线性定常系统状态方程的解法	260
10.4	线性系统的可控性与可观测性	263
10.4.1	线性系统的可控性	263
10.4.2	线性系统的可观测性	266
10.5	系统的状态反馈与输出反馈	267
10.6	系统极点的配置	268
10.7	离散系统的状态空间表达式	270
10.7.1	离散系统状态空间表达式的建立	270
10.7.2	离散系统的传递矩阵	273
10.8	离散状态方程的解	274
10.9	离散系统的稳定性分析	276
10.10	离散系统的可控性与可观测性	276
	习题	279
第11章	智能控制理论基础	281
11.1	智能控制的结构理论	281
11.2	学习控制系统	282
11.2.1	学习控制的发展	282

11.2.2	学习控制的基本原理	283
11.2.3	学习控制的应用举例	284
11.3	模糊控制系统	287
11.3.1	模糊控制的理论基础	287
11.3.2	模糊控制的基本原理	289
11.3.3	模糊控制的应用举例	293
11.4	专家控制系统	298
11.4.1	专家控制系统的结构	298
11.4.2	专家系统的类型	300
11.4.3	专家控制系统的應用举例	300
11.5	人工神经网络控制系统	304
11.5.1	人工神经元模型	304
11.5.2	人工神经网络的构成	305
11.5.3	人工神经网络的学习算法	306
11.5.4	人工神经网络应用举例	309
11.6	仿人智能控制	311
11.6.1	仿人智能控制的基本思想	311
11.6.2	仿人智能控制的原型算法	312
11.6.3	仿人智能控制器设计的基本步骤	313
	习题	314
	部分习题参考答案	315
	参考文献	339

第 1 章 绪 论

机械工程自动控制是一门技术科学,它研究自动控制理论的基本原理及其在机械工程中的应用问题。高科技在机械工程中的应用,使机械制造和机械产品本身的自动化和智能化水平不断提高。现代机械工程要求机械工程师们不但要具有机械结构现代设计方法和制造方法的知识,同时也要具有机械工程自动控制的知识。通过学习本书,可以掌握自动控制理论的基本原理及其在现代机械工程中应用的技能。

1.1 机械工程的发展与控制理论的应用

人类的祖先在制作和使用工具以后,就逐渐开始制作和使用机械了,人类最初使用机械的目的是省力,或者增大人的力量。最古老、最简单的机械是杠杆,通过杠杆,人可以移动直接用手不能移动的重物。发明利用自然力(如风车和水车的使用)是人用机械的动力把自己从繁重的体力劳动中解脱出来的开始。蒸汽机和电动机的发明,为机械提供了有效且使用方便的动力。机械的不断发展不仅使人类从繁重的体力劳动中解放出来,而且大大地提高了劳动效率和产品质量。人类认识到机械在生产中的重要作用,不断地改进旧机器和发明新机器来满足各种各样不断增长的需要。在机械工程发展的过程中,人们一直致力于机器的自动化,因为只有自动化的机器才能生产出更多更好的产品,并能进一步地减少人们在生产过程中紧张而繁重的劳动。不断提高机器的自动化水平,一直是人类追求的目标。

虽然在几百年前,人类就开始运用自动控制的初步原理,但自动控制理论的形成是在 20 世纪 40 年代。由于当时军事技术和工业生产中都出现了许多亟待解决的系统控制问题,要求设计的系统工作稳定、响应迅速,并且精度高。这就需要对系统做深入的理论研究,揭示系统内部运动的规律,即系统性能与系统结构以及参数之间的关系。最初所涉及的系统是单变量输入/输出、用微分方程及传递函数描述的系统,形成的理论称为经典控制论。经典控制理论用频率法、根轨迹法等方法分析和设计系统。在经典控制理论基础上发展起来的模拟量自动控制系统,至今在许多工业部门仍然占有重要地位。经典控制理论的重要还在于它是现代控制理论的基础,要掌握现代控制理论首先要学好经典控制理论这个基础。

随着现代科学技术的发展,多输入、多输出的复杂系统越来越多,如各种数控机床和各种用途的机器人等。经典控制理论已不能满足解决这类问题的需要,机

机械工程发展的需要是自动控制理论发展的强大动力。现代控制理论用状态空间描述系统变量,所建立的状态空间表达式不仅表达系统输入、输出间的关系,而且还描述系统内部状态变量随时间的变化规律。现代控制理论在实际工程中的应用需要大量快速的运算,电子技术和计算技术的发展,给现代控制理论的产生和发展提供了在现代化系统中实际应用的技术条件。现代控制理论的基础部分是线性系统理论,它研究如何建立系统的状态方程,如何由状态方程分析系统的响应、稳定性和系统状态的可观测性与可控制性,以及如何利用状态反馈改善系统性能等。现代控制理论的重要部分是最优控制,就是在已知系统的状态方程、初始条件及某些约束条件下,寻求一个最优控制向量,使系统在此最优控制向量作用下的状态或输出满足某种最优准则。电子计算机及计算方法的迅速发展,使最优控制成为应用越来越广泛的方法。自适应控制是近十几年来发展较快的现代控制论分支,它适合被控对象的结构或参数随环境条件的变化而变化的情况。控制器的参数要能随环境条件的变化自动进行调节,才能使系统始终满足某种最优准则。这类系统称为自适应控制系统。

智能控制技术是一个方兴未艾的领域。智能控制特别适应实际工程中存在一些无法建立精确数学模型或者根本无法建立系统数学模型及具有强非线性复杂系统的控制问题。虽然它还处于初级阶段,但它具有无限的发展空间,是以往的任何控制理论和技术都无法比拟的。人类可以把所有的知识以及获取知识的方法注入智能控制系统,也可以把聪明人的思维方法(对所获取信息的分析、特性提取、推理、判断、决策、经验的获取、积累与提高等)“教给”智能控制系统。人类的智能在不断发展,智能控制系统也将不断地发展。智能控制近年来发展较快,并在实际工程中开始得到了广泛应用。

无论是现代控制系统还是正在发展的智能控制系统,它们的控制算法都是通过运行在控制计算机中的程序实现的,因此它们属于数字控制系统。根据经典控制理论建立起来的控制系统属于模拟量控制系统,因为在这样的系统中全部是连续的模拟信号和模拟量。模拟量控制系统的控制作用是通过模拟电路来实现的。

1.2 机械工程自动控制系统的的基本结构及工作原理

机械工程自动控制系统简称机械控制系统,它是一种自动控制系统,它的控制对象是机械。而不是指专门通过机械装置产生控制作用的系统。在机械自动控制系统的初级阶段或简单的机械自动控制系统中,常用机械装置产生自动控制作用,如图 1.1 所示的蒸汽机转速控制系统和如图 1.2 所示的水位控制系统。

图 1.1 所示的蒸汽机转速控制系统中,控制的目的是使蒸汽机的转速 n 保持在一个恒定数值上,这个恒定数值称为控制系统的目标值,转速称为控制系统的被

控量或控制量。如果给蒸汽机通入额定的蒸汽流量 Q ，负载为额定负载不变，又没有其他干扰，则蒸汽机的转速为额定转速 n ，即目标值。但在负载变化的情况下，蒸汽机的转速必然跟着变化。为了控制系统的被控量 n ，保持转速为目标值，采用离心机构检测被控量 n 。离心机构连接小球的连杆张开角度的大小取决于小球离心作用的大小，蒸汽机的转速越大，小球离心作用越大，所产生的张开角度越大，所以离心机构称为控制系统的检测装置。检测被控量的检测装置是自动控制系统必须有的部分。

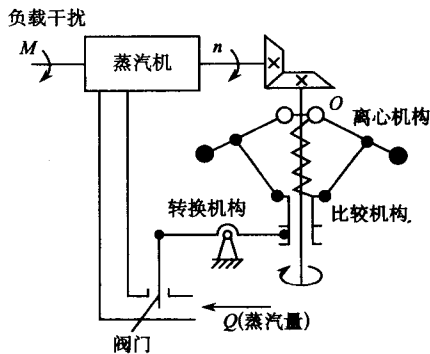


图 1.1 蒸汽机转速控制系统

如果负载增大，转速变小，使离心机构连接小球的连杆的张开角度变小，离心机构下部的滑块位置向下移动，通过由杠杆构成的转换机构增加阀门打开的程度，从而加大蒸汽量，提高蒸汽机的转速；如果负载减小，转速提高，增大了小球连杆的张开角度，使离心机构下部的滑块位置向上移动，通过转换机构减小阀门的开度，从而减小蒸汽量，降低蒸汽机的转速。

图 1.2 所示的水位自动控制系统中，控制的目的是使水位保持在一定的高度上。水位高度是被控量。水位高度是通过浮球装置检测的，所以浮球装置是该系统的检测装置。浮球随水面高度的上升或下降通过杠杆转换成阀门的开闭程度。

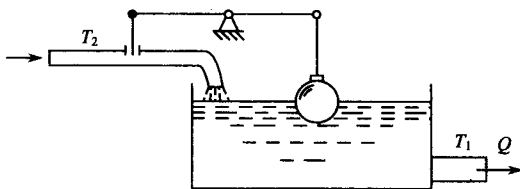


图 1.2 水位控制系统

通过以上两个用机械装置产生自动控制作用的例子可以看出自动控制系统自动调节的基本原理。同时通过分析也可以看到，用机械装置自动调节作用的调节范围、精度和可靠性都是很有限制的。由于科学技术的发展，机械系统变得越来越复杂，用机构作为自动控制系统的调节装置已不能满足对系统越来越高的要求。电子学和电子技术的发展，使自动控制系统的检测手段和控制方法产生了巨大的变革。原来用机械方法构成的检测装置改用各种电子元器件构成的传感器。现代传感器不但体积小、重量轻、精度高，而且大大地增加了使用寿命和可靠性。与机械