



普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材



# 机械工程控制基础 (第二版)

柳洪义 罗忠 宋伟刚 编著  
郝丽娜 王菲



科学出版社

普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材

# 机械工程控制基础

(第二版)

柳洪义 罗 忠 宋伟刚 编著  
郝丽娜 王 菲



科学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书讲述了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数学模型的建立,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。

本书可作为普通高等院校机械工程及自动化、机械电子工程、机械设计制造及其自动化等专业的教材,也可供相关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械工程控制基础/柳洪义等编著.—2 版.—北京:科学出版社,2011  
(普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材)  
ISBN 978-7-03-031449-9

I. ①机… II. ①柳… III. ①机械工程-控制系统-高等学校-教材  
IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 107748 号

责任编辑:毛莹 张丽花/责任校对:陈玉凤  
责任印制:张克忠/封面设计:迷底书装

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 7 月第 二 版 印张:16 1/4

2011 年 7 月第六次印刷 字数:400 000

印数:8 701—12 700

定价:32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 第二版前言

第二版教材是在柳洪义等编著的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《机械程控制基础》(科学出版社 2006 年出版)的基础上修订而成的。在原书 5 年多的使用过程中,在国家“985 工程”的资助下,我们完成了多种重大机械装备关键技术的研究,为生产实际成功地开发了多个自动控制系统。我们通过大量的实验,加深了对自动控制理论的理解,积累了丰富的实践经验。这些都使我们深切感到有必要对原书进行修订再版,把这些年来新获得的经验和体会添加进去,使本书对于机械工程自动控制中的实际问题更具有针对性和实用性。

第二版教材对原书中的实例做了较大的修改,“工作台自动控制系统”这个例子贯穿于第 1~8 章,讲述了学习本课程的目的和意义。在第 1 章绪论中给出了“工作台自动控制系统”的基本结构和应该实现的自动控制目的和目标,突出了学习本课程的必要性;在第 2~8 章中通过各章后面的例子让读者加深对各章内容的理解,明确各章内容对一个自动控制系统的性能分析或系统设计所起的作用。此外对原书中部分内容的详略做了调整。

本书参考了兄弟院校的同类教材和论文,在此对这些教材的编著者和论文作者表示诚挚的感谢。特别感谢闻邦椿院士在本书修订过程中给予的指导和支 持,使本书的编写水平得到大幅度提高。同时,对给予我们大力支持的科学出版社、东北大学教务处、东北大学机械工程与自动化学院和有关专家深表感谢。

本书第 1 章由柳洪义教授负责修订,第 6、9、10、11 章和习题由罗忠博士负责修订,第 2、5 章由宋伟刚教授负责修订,第 3、4 章由郝丽娜教授负责修订,第 7、8 章由王菲博士负责修订,胡明副教授参与了部分修订工作。全书由柳洪义教授统稿。本书配备了相应的多媒体课件,可供授课教师参考。

由于编著者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

柳洪义

2011 年 4 月 18 日于东北大学

# 第一版前言

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、各种自动化生产线、自动导航的大型客机、各种适合不同用处的运载火箭,等等。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,使得大多数机械类学生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,具体作法是: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,也体现了编著者多年的教学经验、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,书中难免有遗漏和不足之处,恳请读者批评指正。

柳洪义

2005年10月22日于东北大学

# 目 录

## 第二版前言

## 第一版前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	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
1.2.1 机械装置产生的自动控制作用 .....	2
1.2.2 工作台位置自动控制系统 .....	3
1.2.3 工作台速度自动控制系统 .....	8
1.3 机械自动控制系统的分类 .....	9
1.4 对自动控制系统的基本要求 .....	10
习题 .....	10
<b>第 2 章 控制系统的数学模型</b> .....	15
2.1 系统微分方程的建立 .....	15
2.2 非线性数学模型的线性化 .....	18
2.3 拉普拉斯变换 .....	20
2.3.1 复数和复变函数 .....	20
2.3.2 拉普拉斯变换 .....	21
2.3.3 典型时间函数的拉普拉斯变换 .....	21
2.3.4 拉普拉斯变换的基本性质 .....	23
2.3.5 拉普拉斯反变换 .....	26
2.4 传递函数 .....	28
2.4.1 传递函数的定义 .....	28
2.4.2 典型环节的传递函数 .....	29
2.5 系统方框图和信号流图 .....	33
2.5.1 系统方框图的组成 .....	33
2.5.2 环节的基本连接方式 .....	33
2.5.3 方框图的变换与简化 .....	35
2.5.4 系统的信号流图及梅森公式 .....	37
2.6 工作台位置自动控制系统的数学模型 .....	41
习题 .....	44
<b>第 3 章 控制系统的时域分析法</b> .....	50
3.1 典型输入信号 .....	50
3.2 一阶系统的时间响应 .....	51

3.2.1	一阶系统的单位脉冲响应	52
3.2.2	一阶系统的单位阶跃响应	52
3.2.3	一阶系统的单位斜坡响应	53
3.3	二阶系统的时间响应	53
3.3.1	二阶系统的单位脉冲响应	54
3.3.2	二阶系统的单位阶跃响应	55
3.3.3	二阶系统的单位斜坡响应	56
3.3.4	二阶系统时间响应的性能指标	56
3.3.5	二阶系统计算举例	59
3.4	高阶系统的时间响应分析	60
3.5	工作台自动控制系统的时域分析	62
	习题	64
<b>第4章</b>	<b>控制系统的频域分析法</b>	<b>67</b>
4.1	频率特性概述	67
4.1.1	频率特性	67
4.1.2	频率特性的求法	68
4.1.3	频率特性的特点和作用	70
4.2	典型环节频率特性的奈奎斯特图	71
4.2.1	奈奎斯特图的概念	71
4.2.2	典型环节的奈奎斯特图	71
4.3	系统奈奎斯特图的画法	76
4.4	典型环节频率特性的伯德图	78
4.4.1	伯德图的概念	78
4.4.2	典型环节的伯德图	79
4.4.3	绘制系统伯德图的步骤	86
4.5	频域性能指标	87
4.6	最小相位系统和非最小相位系统	88
4.7	工作台自动控制系统的频域分析	90
	习题	91
<b>第5章</b>	<b>控制系统的稳定性</b>	<b>94</b>
5.1	系统稳定性的基本概念及稳定条件	94
5.2	代数稳定性判据	95
5.2.1	赫尔维茨判据	95
5.2.2	劳斯判据	97
5.3	几何稳定性判据	102
5.3.1	幅角原理	102
5.3.2	奈奎斯特稳定性判据	103
5.3.3	含有积分环节和延时环节系统的稳定性分析	105
5.3.4	根据伯德图判断系统的稳定性	107
5.4	系统的相对稳定性	110

5.5	工作台位置自动控制系统的稳定性分析	112
	习题	113
<b>第6章</b>	<b>控制系统的根轨迹分析法</b>	116
6.1	根轨迹与系统特性	116
6.2	根轨迹的幅值条件和相角条件	117
6.3	绘制根轨迹的基本规则	118
6.4	应用 MATLAB 绘制根轨迹	124
6.4.1	MATLAB 基础	124
6.4.2	应用 MATLAB 绘制根轨迹	125
6.5	工作台位置自动控制系统的根轨迹分析	130
	习题	132
<b>第7章</b>	<b>控制系统的误差分析和计算</b>	133
7.1	系统稳态误差的基本概念	133
7.1.1	系统复域误差	133
7.1.2	系统时域稳态误差	134
7.2	系统稳态误差的计算	134
7.2.1	系统的类型	134
7.2.2	系统的误差传递函数	135
7.2.3	静态误差系数	135
7.2.4	用伯德图确定误差常数	139
7.2.5	扰动引起的误差	141
7.3	减小稳态误差的途径	143
7.4	动态误差	144
7.5	工作台位置自动控制系统的误差分析	145
	习题	146
<b>第8章</b>	<b>控制系统性能校正</b>	149
8.1	概述	149
8.2	系统的性能指标	150
8.3	系统闭环零点、极点的分布与系统性能的关系	151
8.3.1	系统单位阶跃输入响应	151
8.3.2	闭环零点、极点的分布与系统性能的关系	152
8.3.3	利用主导极点估计系统性能指标	152
8.4	并联校正	154
8.4.1	反馈校正	154
8.4.2	顺馈校正	155
8.5	串联校正	155
8.5.1	伯德定理简介及应用	156
8.5.2	相位超前校正	156
8.5.3	相位滞后校正	160
8.5.4	相位滞后-超前校正	162



8.6	控制器类型	164
8.6.1	比例控制器(P)	165
8.6.2	比例积分控制器(PI)	165
8.6.3	比例微分控制器(PD)	165
8.6.4	比例积分微分控制器(PID)	166
8.6.5	有源相位超前控制器	168
8.6.6	有源相位滞后控制器	168
8.6.7	有源相位滞后超前控制器	169
8.7	按希望特性设计控制器	169
8.7.1	典型Ⅰ系统(二阶希望特性系统)	169
8.7.2	典型Ⅱ型系统(三阶希望特性系统)	172
8.7.3	按希望特性设计控制器的图解法	174
8.7.4	按希望特性设计控制器的直接法	176
8.8	工作台位置自动控制系统的设计	178
	习题	179
<b>第9章</b>	<b>离散控制系统</b>	184
9.1	离散控制系统概述	184
9.1.1	计算机控制系统的硬件结构	184
9.1.2	模/数转换(A/D)	185
9.1.3	数/模转换(D/A)	185
9.2	Z变换和Z反变换	186
9.2.1	Z变换的定义	186
9.2.2	Z变换的性质	188
9.2.3	Z反变换	188
9.3	离散系统的传递函数	189
9.3.1	离散传递函数的求法	190
9.3.2	开环系统的脉冲传递函数	191
9.3.3	闭环系统的脉冲传递函数	192
9.4	离散系统的z域分析	192
9.4.1	离散系统的稳定性分析	192
9.4.2	极点分布与瞬态响应的关系	194
9.4.3	离散系统的稳态误差	195
9.5	离散系统的校正与设计	196
9.5.1	模拟化设计法	196
9.5.2	离散设计法	197
9.5.3	PID数字控制器	198
	习题	200
<b>第10章</b>	<b>现代控制理论基础</b>	202
10.1	系统状态空间表达式的建立	202
10.2	系统的传递矩阵	205

10.3	线性定常系统状态方程的解法	206
10.4	线性系统的可控性与可观测性	209
10.4.1	线性系统的可控性	209
10.4.2	线性系统的可观测性	211
10.5	系统的状态反馈与输出反馈	212
10.6	系统极点的配置	213
10.7	离散系统的状态空间表达式	214
10.7.1	离散系统状态空间表达式的建立	214
10.7.2	离散系统的传递矩阵	217
10.8	离散状态方程的解	217
10.9	离散系统的稳定性分析	219
10.10	离散系统的可控性与可观测性	219
	习题	221
<b>第 11 章</b>	<b>智能控制理论基础</b>	<b>223</b>
11.1	智能控制的结构理论	223
11.2	学习控制系统	224
11.2.1	学习控制的发展	224
11.2.2	学习控制的基本原理	224
11.2.3	学习控制的应用举例	226
11.3	模糊控制系统	228
11.3.1	模糊控制的理论基础	228
11.3.2	模糊控制的基本原理	229
11.3.3	模糊控制的应用举例	232
11.4	专家控制系统	237
11.4.1	专家控制系统的结构	237
11.4.2	专家系统的类型	238
11.4.3	专家控制系统的应用举例	238
11.5	人工神经网络控制系统	240
11.5.1	人工神经元模型	241
11.5.2	人工神经网络的构成	242
11.5.3	人工神经网络的学习算法	243
11.5.4	人工神经网络的应用举例	245
11.6	仿人智能控制	247
11.6.1	仿人智能控制的基本思想	247
11.6.2	仿人智能控制的原型算法	248
11.6.3	仿人智能控制器设计的基本步骤	248
	习题	249
	参考文献	250

# 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。通过对本书的学习,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。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,为机械提供了有效并且使用方便的动力。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理论。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。

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,为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

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。本书主要讲述模拟量控制系统。

## 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是一种自动控制系统,它的控制对象是机械,而不是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,但是由于电子技术的发展促进了传感技术和计算技术的发展,逐渐地用电子器件组成的电气装置代替机械装置来产生自动控制作用。下面首先介绍由机械装置产生控制作用的系统结构及其自动控制原理,然后通过一个典型例子介绍由电气装置产生控制作用的系统结构及其自动控制原理。

### 1.2.1 机械装置产生的自动控制作用

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  $n$  保持为一个恒定数值,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,蒸汽机的转速越高,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。

如果负载增大,转速降低,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。显然,这里的速度检测装置是由机械装置构成的,为保持速度恒定的调节机构也是由机械装置构成的。

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。

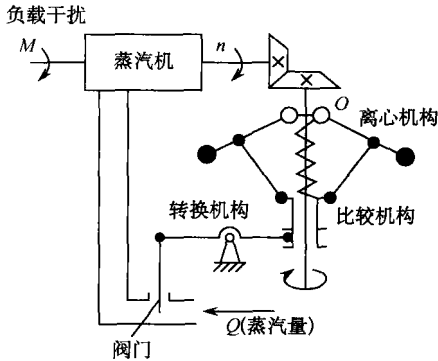


图 1.1 蒸汽机转速控制系统

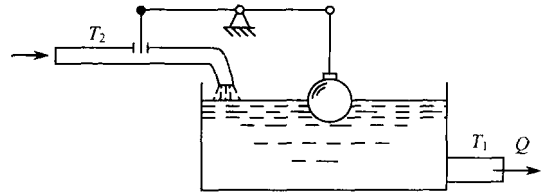


图 1.2 水位控制系统

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有限的。随着科学技术的发展,机械系统变得越来越复杂,以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。原来用机械的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。与机械调节装置相比,由电子元器件构成的控制器以及放大器能完成复杂得多、先进得多的控制功能。在现代机械工程自动控制系统中,总是把机械与电子融合在一起,构成机电一体化系统。因此对机械工程自动控制系统进行性能分析和设计时,必须把机械系统和电子控制系统作为统一的整体来考虑。下面通过一个典型例子说明用电子设备构成控制系统的机械自动控制系统的的基本组成、基本结构、工作原理和一些基本定义。这个例子在以后的7章中都将作为学习该章内容的实际背景。有了这个背景,就会明确学习自动控制理论的具体意义。

### 1.2.2 工作台位置自动控制系统

图 1.3 所示为一个工作台的位置自动控制系统。系统的控制功能是:操作者(人)通过指令电位器设置希望的工作台位置,工作台将自动运动到操作者所指定的位置上去。如果这个系统是一个性能良好的自动控制系统,工作台的运动是稳定、快速和精确的;如果这个系统是一个性能差的自动控制系统,工作台的运动可能是不稳定的,比如工作台在指定位置附近来回振动,或者可能运动速度缓慢,或者不能准确地运动到指定位置。问题是:如何才能获得性能良好的自动控制系统呢?大体上要解决两大方面的问题:高水平的设计和精心的制造。在高水平的设计中,特别强调的是,要根据对系统动态特性的要求对机械系统进行动力学设计,并根据自动控制理论对控制系统进行多次设计至仿真、仿真至设计的过程,力求使整个系统达到最佳状态。这就需要掌握自动控制方面的知识,也就是学习本课程的目的。当然,高水平设计还包括采用各种现代设计方法,特别是闻邦椿院士提出的“三化”(动态优化、智能化和可视化)设计法对提高系统整体设计水平和产品质量具有重要的指导意义。此外,选择先进的、具有足够精度和高可靠性的元器件,较高的性能价格比,友好的人机界面以及赏心悦目的造型等都是要反复考虑的。

如图 1.3 所示,系统的驱动装置是直流伺服电动机,它是将电能转换成机械运动的转换装

置,是连接电和机的纽带。功率放大器提供给直流伺服电动机定子的直流电压为一定值,形成一个恒定的定子磁场,定子也可以由永久磁铁制成。电动机的转子电枢接受功率放大器提供的直流电,此直流电的电压决定电动机的转速,电流的大小与电动机输出的扭矩成正比。

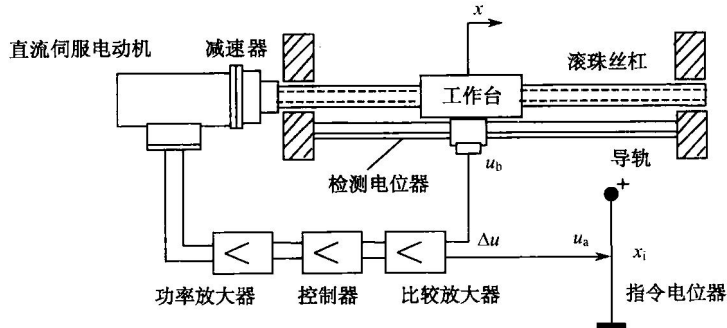


图 1.3 工作台位置自动控制系统

工作台的传动系统由减速器、滚珠丝杠和导轨等组成。减速器起放大电动机输出扭矩的作用。伺服系统中常用的有行星轮减速器和谐波减速器等。行星轮减速器有背隙,改变转动方向时电动机有空回程,小背隙高精度的行星轮减速器价格较高。波导减速器无背隙,但价格高,使用寿命较低。滚珠丝杠和导轨(图 1.4)是将电动机的转动精确地转换成直线运动的装置。丝杠与减速器输出轴相连,滚珠丝杠的螺母与工作台相连。直流伺服电动机经减速器驱动滚珠丝杠转动,工作台在滚珠丝杠的带动下在导轨上滑动。滚珠丝杠较普通丝杠的优点不仅精度高,而且无回程间隙,有专门厂家生产,可以根据需要提供图纸订货。同样,导轨可以根据需要选型订货。

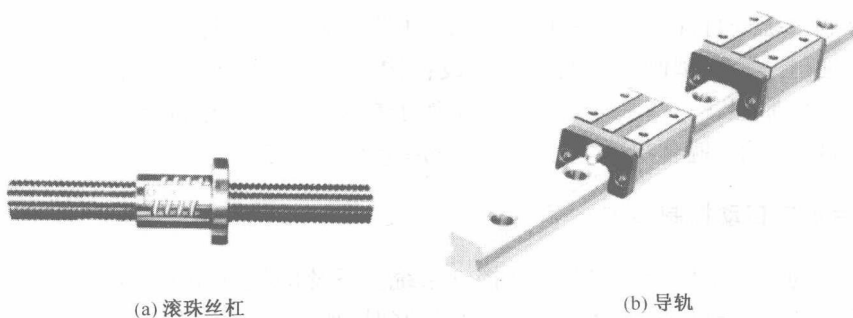


图 1.4 滚珠丝杠和导轨

此工作台位置自动控制系统的控制量显然是工作台的位置。和任何其他机械自动控制系统一样,系统拥有输入控制量和检测系统输出量的环节——指令电位器和检测电位器。电位器按其结构形式可分成转动电位器和直线电位器,本系统中使用的电位器均为直线电位器。

操作者通过指令电位器将指令输入给系统。在本系统中,操作者通过指令电位器指定工作台运动目的位置,指令电位器将操作者指定的位置转化成相应的电压信号输出。检测电位器用来检测工作台的实际位置,将工作台的实际位置转化成电压信号输出。

在指令电位器面板上应有控制量刻度,刻度要与控制量相对应。例如,工作台的位置范围是  $0 \sim 1.5\text{m}$ ,在指令电位器面板的全量程上可以均匀地刻上 15 个小格,每个小格代表  $0.1\text{m}$ ,并在对应的刻度线上标注数字  $0, 0.1, 0.2, 0.3, \dots, 1.5$ ,如图 1.5 所示。电位器的 3 个引脚中,1 个是直流稳压电源输入端,将它与电源高电位相连;1 个公共端,即接地端;1 个电压信号输出端,电路

接法如图 1.5 所示。设电源电压是 15V，为恒压电源，则刻度板上的每个小格对应 1V 电压。指令电位器的指针与电压信号输出端相连，这样，指针指到 0 时，输出端电压为 0；指针指到 1.5 时，输出端电压为 15V。如果操作者把指令电位器的指针指到刻度为 1.0 的位置，就代表让工作台运动到 1.0m 的位置上，这时指令电位器的输出端电压为 10V，如图 1.5 所示。操作者就这样把工作台的位置指令输入给了控制系统，因此在本例中指令电位器为人机界面。指令电位器是把位置指令转换成电压信号的元件，在控制理论中也称为给定环节。用  $x_i$  表示给定的位置，即该环节的输入；用  $u_a$  表示指令电位器对应的输出电压。这种转换关系可用图 1.6 所示的框图表示，也可用下式表示

$$K_p = \frac{u_a}{x_i} \quad (1.1)$$

式中， $K_p$  为指令环节转换系数，或称为给定转换系数。

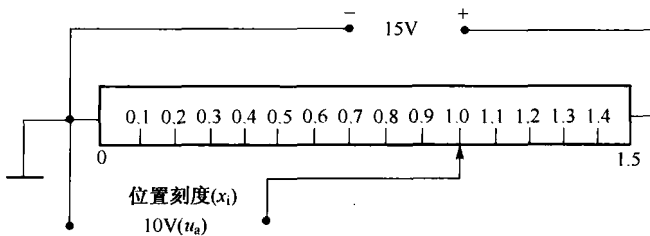


图 1.5 位置指令电位器

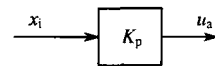


图 1.6 位置指令电位器框图

用于自动控制系统中的电位器应具有很好的线性度。选用具有良好线性度的电位器作为位置指令电位器，使式(1.1)中的  $K_p$  为常数，在本例中  $K_p = 10\text{V/m}$ 。如果工作台的位置范围是  $x$ ，电位器的电源电压为  $u$ ，则可以根据  $K_p = u/x$  来计算  $K_p$  的值，然后就可以根据式(1.1)计算对应  $x_i$  的  $u_a$  了。在实际应用中，也可以在电位器的高电位端串入适当的电阻以调整电位器的输出，从而改变  $K_p$  的大小，使之符合系统设计的要求。

检测电位器测量长度应与工作台的运动范围一致，供电电压一般与给定电位器的一样。检测电位器可以安装在导轨的侧面，电位器指针与工作台相连，把工作台的位置转换成相应的电压信号。例如，工作台运动到 0.4m 处，检测电位器输出电压为 4V，如图 1.7 所示。检测到的位置  $x$  和检测电压  $u_b$  之间的关系如图 1.8 所示。在位置控制系统中，如果系统的输出已经达到控制目标后，系统不再需要能量输入时(如本例的情况)，让给定电位器电源电压与检测电位器的电源电压一样，并使  $K_f = K_p$ ，是较方便的设计方法。

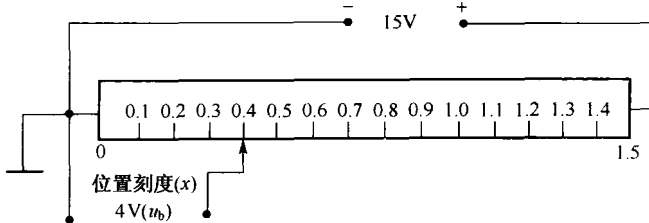


图 1.7 位置检测电位器

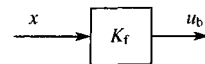


图 1.8 位置检测电位器框图

在许多情况下，如工作台的运行范围太大，可以将一个多圈旋转电位器安装在滚珠丝杠的端部，通过检测滚珠丝杠的角度换算出工作台的位置。这种换算实际上是通过调整串联在电位器高电位端的可调电阻，使给定电位器和反馈电位器对应相同的工作台位置有相同的电压信号输

出。采用多圈电位器作为反馈元件在本例中属于间接测量,但由于滚珠丝杠没有回程间隙,又具有较高的精度,这种间接测量也可以保证较高的反馈精度。如果需要特别高的控制精度时,还是应该采用直接测量的方式。

在了解指令电位器和检测电位器的工作原理以后,就不难理解由图 1.3 表示的工作台位置自动控制系统的控制原理了:工作台的操作者通过指令电位器发出工作台的位置指令  $x_1$ ,指令电位器就对应输出一个电压信号  $u_a$ 。电压信号  $u_a$  与位置  $x_1$  成正比,比例系数即为给定转换系数  $K_p$ 。工作台在导轨上的实际位置  $x$  由装在导轨侧向的位置检测电位器检测(或者由装在滚珠丝杠端部的多圈电位器的角度换算得出),位置检测电位器将实际位置  $x$  转换为电压信号  $u_b$  输出。电压信号  $u_b$  与工作台的实际位置  $x$  也成正比,比例系数为

$$K_f = \frac{u_b}{x} \quad (1.2)$$

式中,  $K_f$  称为反馈转换系数。

电压信号  $u_b$  需要反馈回去与给定电位器的输出信号  $u_a$  进行比较(相减),为了能够比较,必须通过调节反馈电位器电源电压,使得给定电位器和反馈电位器两者对应同样的距离输出相同的电压信号,即使  $K_f = K_p$ 。比较产生的偏差电压信号为  $\Delta u = u_a - u_b$ ,这一工作由比较放大器完成,并同时可将偏差信号加以放大。比较放大器可由高阻抗差动运算电路实现,如图 1.9 所示。

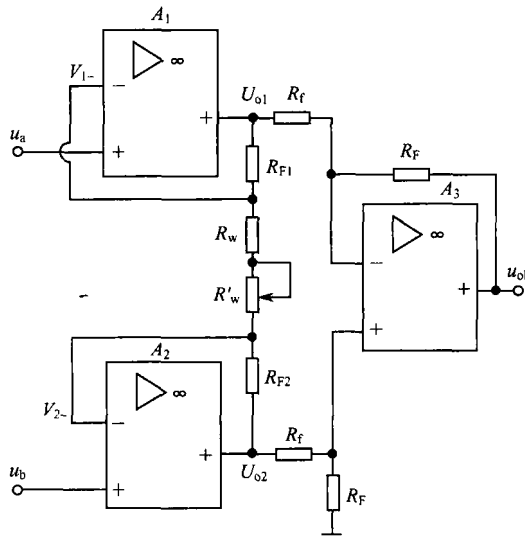


图 1.9 比较放大器电路

由图 1.9 可知,此比较放大器的输入为给定电位器输出  $u_a$  和检测电位器输出  $u_b$ ,其输出为

$$u_{ob} = K_q(u_a - u_b) = K_q \Delta u \quad (1.3)$$

式中,  $K_q$  为比较放大器的增益

$$K_q = -\frac{R_f}{R_f} \left( 1 + \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_w + R'_w} \right) \quad (1.4)$$

这样,当  $x$  和  $x_1$  有偏差时,对应偏差电压为  $\Delta u = u_a - u_b$ ,该偏差电压在比较放大器中被放大成  $K_q \Delta u$ 。经比较放大器放大后的偏差信号进入控制器,控制器中加一个反相器就可以将  $K_q$  中的负号“ $-$ ”去掉。通过控制器处理后的信号经功率放大器放大驱动直流伺服电动机转动。控制器如何处理放大后的偏差信号  $K_q \Delta u$  涉及控制器的工作原理,是通过学习本课程才能解决的问题。



题。电动机的转动通过减速器和滚珠丝杠驱动工作台向给定位置  $x_i$  运动。随着工作台实际位置与给定位置偏差的减小,偏差电压  $\Delta u$  的绝对值也逐渐减小。当工作台实际位置与给定位置重合时,偏差电压  $\Delta u$  为零,没有电压和电流输入电动机,伺服电动机不输出转矩。如果工作台此时的速度刚好为零,工作台将保持静止的状态;如果此时工作台的速度不为零,工作台的位置将超过给定位置,称为“超调”现象。工作台处于超调状态时,偏差电压  $\Delta u$  小于零,伺服电动机输出反向转矩,使工作台受到指向给定位置的力。至于工作台是否能够精确地停止在给定位置上,就要看控制器了。好的控制器将使工作台迅速准确地到达给定位置,不好的控制器会使工作台到达的位置有较大的误差,或者围绕某一位置振荡。在系统机械结构设计合理的情况下,控制器的设计是系统性能好坏的关键。好的控制器设计需要自动控制理论知识和丰富的经验,这就是学习本课程的意义所在。如果系统设计正确合理,当不断改变指令电位器的给定位置时,工作台就不断改变在机座上的位置,以保持  $x = x_i$  的状态。

为了简化系统的描述,进一步分析系统的性质以及进行系统设计,在自动控制理论中,常用方块图表示系统的结构及工作原理。上面介绍的工作台位置控制系统可用图 1.10 表示。图中的比较环节和前置放大器实际上由比较放大器一个元件完成,为了更清楚地描述系统的原理,将分别画出来。图中每一个方框代表系统中的一个元器件,也称为一个环节,也可以代表几个环节按一定的方式连接在一起的部件,也可以用一个方框表示一个系统。在一个方框图中,方框之间用有向线段连接,表示环节之间信息的流通情况。

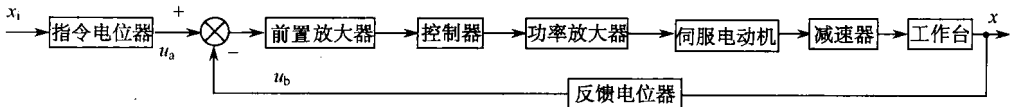


图 1.10 工作台位置控制原理方块图

由图 1.10 可知,系统的输入量为系统的控制量,是工作台的希望位置  $x_i$ ,是通过指令电位器给定的,所以指令电位器为系统的给定环节。给定环节是给定输入信号的环节。此系统的输出量为工作台的实际位置  $x$ 。系统通过检测电位器检测输出量,检测电位器为测量环节。测量环节的输出信号要反馈到输入端,经比较环节与输入信号比较得出偏差信号  $\Delta u$ 。用于比较模拟量(如连续的电压信号)的比较环节常用运算放大器配以外电阻电路构成,在比较两个模拟量的同时,对它们的差进行一定的放大,即图中的前置放大器。但是,要比较的物理量必须是同种物理量。如若测量环节的输出信号与系统输入信号不是同一物理量,则需将其转化成同种物理量,以便比较。由前置放大器输出的信号经控制器、功率放大器后驱动伺服电动机。功率放大器必须线性度好、工作频率范围宽和响应迅速快。现代功率放大器采用 PWM(脉宽调制)技术,保证了自动控制系统对功率放大器的要求。线性度好的放大器在控制系统中作为比例环节。直流伺服电动机为执行环节。执行环节驱动被控对象,使其输出预定的输出量。系统的控制量被检测并反馈到输入端,与输入量比较,构成一个闭环,称这样的系统为闭环控制系统。精确的自动控制系统大多数采用闭环控制。

若系统控制量未被检测,未反馈到输入端参加控制,也没有其他与控制量相关的输出量被检测和参与控制,则称这样的系统为开环控制系统。对于运动控制系统,用步进电动机作驱动的开环系统也能实现较好的系统性能。而对于像温度、压力、流量等,采用开环控制就很难保证系统性能了。