



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制原理

李明富 主编
王远志 郑辉 副主编

- 引入工程实践
- 突出基本概念
- 注重技能训练

免费提供
电子教案
习题解答

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制原理

李明富 主 编

王远志 郑 辉 副主编

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理 / 李明富主编. —北京: 人民邮电出版社,
2008.3

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-115-16389-9

I. 自… II. 李… III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 196748 号

内 容 提 要

本书是根据高职高专院校“自动控制原理”课程教学大纲的基本要求, 在总结近年来教学实践和教学改革经验的基础上, 结合学生反馈的意见并借鉴国内外同类优秀教材编写而成的。

本书主要介绍自动控制原理的基本内容, 包括自动控制系统的基本概念、自动控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频率分析法、自动控制系统的综合与校正、离散控制系统、状态空间分析法以及基于 MATLAB 的控制系统分析。本书内容深入浅出, 并附有大量有针对性的实例、练习及仿真案例分析。

本书可作为普通高校、高职高专院校电子信息、机电一体化、楼宇自动化类专业的教材, 也可以作为其他相关专业学生和从事自动控制方面的工程技术人员的参考书。

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

自动控制原理

◆ 主 编 李明富

副 主 编 王远志 郑 辉

责任编辑 赵慧君

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

人民邮电出版社内蒙古印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 16

字数: 384 千字

2008 年 3 月第 1 版

印数: 1—3 000 册

2008 年 3 月内蒙古第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-16389-9/TP

定价: 25.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

21 世纪高职高专电子技术规划教材

编 委 会

主 任 王俊鹏

副 主 任 张惠敏 向 伟

编 委 (以姓氏笔画为序)

朱乃立 阮友德 许恒玉 苏本庆 余本海

李存永 肖 琰 邱寄帆 张新成 林训超

胡修池 胡起宙 赵慧君 曾令琴 韩 丽

程 勇 潘春燕

丛书出版前言

遵照教育部提出的高职高专教育以就业为导向,从专业本位向职业岗位和就业为本转变的指导思想,人民邮电出版社与一些高职高专院校和相关企业共同开发了 21 世纪高职高专电子技术规划教材。

随着职业教育改革的不断深化,各高职高专院校越来越关注人才培养模式与专业课程设置,越来越关心学生将来的就业岗位,并开始注重培养学生的职业能力。但是我们看到,高职高专院校所培养的人才与市场上需要的技术应用型人才仍存在差距。如何在保证知识体系完整的同时,能在教材中体现正在应用的技术和前沿的技术成了本套教材探讨的重点,为此我们在如下几个方面做了努力和尝试。

1. 针对电子类专业基础课程内容较经典,知识点又相对统一、固定的特点,采取本科老师与高职高专老师合作编写的方式,借助本科老师在理论方面深厚的功底,在写作质量上进行把关,高职高专老师则发挥其熟悉职业教育教学需求的优势把握教材的广度与深度,力图达到专业基础课程理论与应用相结合的目的。

2. 高职高专教育培养的人才面向生产、管理第一线的应用型人才,基础课程的教学应以必需、够用为原则,以掌握概念、强化应用为教学重点,注重岗位能力的培养。本套教材在保证基本知识点讲解的同时,按照“突出基本概念,注重技能训练,强调理论联系实际,加强实践性教学环节”的原则,在内容安排上避免复杂的数学推导和计算。

3. 专业课程引入工程实例,强化培养职业能力。让学生了解在实际工作中利用单片机和 PLC 做项目的流程,并通过一系列小的实例逐步让学生产生学习兴趣,最后通过一个大的完整案例对学生进行综合培训,从而达到对学生职业能力的培养。

以上这些仅是我们对高职高专教材出版工作的初步探索。如何配合学校做好为国家培养人才的工作,出版高质量的教材将是我们不断追求和奋斗的目标。

我们衷心希望,关注高等职业教育的广大读者能对本套教材的不当之处给予批评指正,提出修改意见,同时也热切盼望从事高等职业教育的老师、企业专家和我们联系,共同探讨相关专业的教学方案和教材编写等问题。来信请发至 zhaohuijun@ptpress.com.cn。

21 世纪高职高专电子技术规划教材编委会

2005 年 8 月

编者的话

自动控制原理是自动化学科的重要理论基础,是研究有关自动控制系统的基本概念、基本原理和基本方法的课程,也是高职高专自动化相关专业的核心基础理论课程。本书作者在总结多年教学、实践经验的基础上,把多年教学成果汇总而编成本书,并突出了实例仿真。

本书在阐述基本概念、基本理论的过程中,根据教学特点,在保证教学内容、教学质量的基础上,采用“应用案例”的教学方法,让学生理解自动控制原理的基本概念,并结合工程实际经验,采用系统仿真的形式介绍实例,使读者理解并掌握怎样运用所学理论解决工程实际问题。

本书重点突出、主次分明、结构层次清晰、逻辑严谨、语言通俗易懂、内容深入浅出,可作为电子信息、机电一体化、楼宇自动化类专业高职高专院校的教材,也可作为其他相关专业学生和从事自动控制方面的工程技术人员的参考书。

本书配有免费电子教案和习题答案及相应的学习网站。电子教案和习题答案可在人民邮电出版社网站下载,网址:<http://www.ptpress.com.cn>,配套课程学习网站:<http://www.cdavtc.edu.cn/jpkc/auto/index.asp>。

本书由成都航空职业技术学院李明富担任主编,负责全书统稿。其中李明富编写第1、2、3、9章,四川职业技术学院郑辉编写第4、5章,成都航空职业技术学院羊梅编写第6章,安庆师范学院王远志编写第7、8章。成都航空职业技术学院林训超、曾伟一审阅了全书。同时,参加本书编排的还有谭飞、凌艳、王津、刘峰、饶云波、王洵、王龙、谭力等,在此向他们表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,得到成都航空职业技术学院等有关院校领导和老师的大力支持。在此一并向他们表示感谢。由于时间仓促,书中难免出现不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2007年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 自动控制技术及应用	1
1.1.2 自动控制理论的发展	2
1.2 自动控制技术中的基本控制方式	3
1.2.1 开环控制	3
1.2.2 闭环控制	4
1.2.3 其他控制方式	7
1.3 自动控制系统的组成	8
1.3.1 自动控制系统基本职能元件	8
1.3.2 自动控制的基本术语	10
1.3.3 方框图的建立	11
1.4 自动控制系统的分类	11
1.5 自动控制系统的基本要求	13
1.6 本课程的性质和任务	14
1.7 本章习题	15
第 2 章 控制系统的数学模型	16
2.1 微分方程	16
2.1.1 系统微分方程的建立	16
2.1.2 建立微分方程的步骤	20
2.2 Laplace 变换基础	20
2.2.1 拉氏变换的概念	20
2.2.2 常用函数的拉氏变换	21
2.2.3 拉氏变换的基本定理	21
2.3 传递函数	22
2.3.1 传递函数的定义	22
2.3.2 传递函数的性质	23
2.4 典型环节及传递函数	24
2.4.1 比例环节	24
2.4.2 积分环节	25
2.4.3 惯性环节	25
2.4.4 理想微分环节	26
2.4.5 比例微分环节	27

2.4.6	振荡环节	27
2.4.7	延迟环节	28
2.5	动态结构图	29
2.5.1	结构图的组成	29
2.5.2	动态结构图的建立	30
2.6	动态结构图的等效变换	31
2.6.1	动态结构图的等效变换法则	31
2.6.2	动态结构图的等效变换举例	33
2.7	自动控制系统的传递函数	35
2.7.1	闭环控制系统的开环传递函数	35
2.7.2	闭环传递函数	36
2.8	本章要点	36
2.9	本章习题	37
第3章	时域分析法	40
3.1	典型输入信号	40
3.1.1	阶跃函数	40
3.1.2	斜坡函数	41
3.1.3	抛物线函数	41
3.1.4	脉冲函数	42
3.1.5	正弦函数	42
3.2	阶跃响应的性能指标	42
3.3	一阶系统的时域分析	44
3.3.1	一阶系统的数学模型	44
3.3.2	一阶系统的单位阶跃响应	45
3.3.3	一阶系统的单位斜坡响应	45
3.3.4	一阶系统的单位脉冲响应	46
3.4	二阶系统的时域分析	47
3.4.1	二阶系统的数学模型	47
3.4.2	二阶系统的工作状态	47
3.4.3	欠阻尼二阶系统的单位阶跃响应	48
3.4.4	临界阻尼二阶系统的单位阶跃响应	49
3.4.5	典型二阶系统的性能指标	49
3.5	线性定常系统的稳定性	51
3.5.1	稳定性定义	51
3.5.2	稳定的条件	51
3.5.3	稳定的判断依据	53
3.6	稳态误差计算	57
3.6.1	误差和稳态误差	57
3.6.2	稳态误差的计算	57

3.6.3 系统的类型	59
3.7 本章要点	61
3.8 本章习题	61
第 4 章 根轨迹分析法	64
4.1 根轨迹与根轨迹方程	64
4.1.1 根轨迹的基本概念	64
4.1.2 根轨迹方程	65
4.2 绘制根轨迹的基本条件	65
4.3 绘制根轨迹的规则和方法	67
4.4 控制系统根轨迹的性能分析	81
4.4.1 开环零、极点对根轨迹的影响	81
4.4.2 闭环零、极点与阶跃响应关系	82
4.4.3 利用根轨迹确定系统参数	83
4.4.4 利用根轨迹分析系统的动态性能	86
4.5 应用 MATLAB 绘制根轨迹举例	88
4.6 本章要点	90
4.7 本章习题	91
第 5 章 频域分析法	95
5.1 频率特性基本概念	95
5.1.1 频率特性的概念	95
5.1.2 频率特性的表示方法	98
5.2 典型环节频率特性	101
5.2.1 比例环节	101
5.2.2 积分环节	102
5.2.3 微分环节	103
5.2.4 惯性环节	104
5.2.5 一阶微分环节	106
5.2.6 振荡环节	107
5.2.7 二阶微分环节	109
5.3 系统的开环频率特性绘制	110
5.3.1 开环幅相曲线绘制	110
5.3.2 开环对数频率特性曲线绘制	117
5.3.3 最小相位系统	121
5.4 奈奎斯特稳定判断依据及稳定裕量	122
5.4.1 开环频率特性和闭环特征式的关系	122
5.4.2 奈奎斯特稳定判断依据	122
5.4.3 对数判断依据	126
5.4.4 系统稳定裕量	129
5.5 用开环频率特性分析系统的性能	130

5.5.1	系统开环对数频率特性与闭环稳定性的关系	130
5.5.2	系统开环对数频率特性与闭环稳态误差的关系	131
5.5.3	开环对数频率特性与系统时域性能之间的关系	134
5.6	本章要点	141
5.7	本章习题	141
第 6 章	自动控制系统的综合与校正	146
6.1	控制系统综合与校正概述	146
6.1.1	控制系统校正的概念	146
6.1.2	控制系统的校正方法	146
6.1.3	控制系统的性能指标	147
6.1.4	控制系统的校正方式	147
6.2	串联校正	148
6.2.1	串联超前校正 (PD 校正)	148
6.2.2	串联滞后校正 (PI 校正)	151
6.2.3	串联滞后—超前校正 (PID 校正)	154
6.3	反馈校正	156
6.3.1	常用反馈校正方法	156
6.3.2	负反馈校正设计	158
6.4	MATLAB 在系统校正中的应用	161
6.5	本章要点	163
6.6	本章习题	164
第 7 章	离散控制系统	165
7.1	离散控制系统基本概念	165
7.1.1	采样控制系统	165
7.1.2	数字控制系统	165
7.2	信号的采样与复现	166
7.2.1	香农采样定理	166
7.2.2	零阶保持器的原理	171
7.3	离散控制系统的数学模型	173
7.3.1	差分方程	173
7.3.2	z 变换与反 z 变换	174
7.3.3	脉冲传递函数的定义	179
7.3.4	开环系统的脉冲传递函数	179
7.3.5	闭环系统的脉冲传递函数	182
7.4	离散系统的性能分析	187
7.4.1	离散系统的稳定性分析	187
7.4.2	离散系统稳定性的代数判断依据	190
7.4.3	离散系统的稳态误差	195
7.4.4	离散系统的动态性能	198

7.5	应用 MATLAB 进行离散系统分析	205
7.6	本章要点	208
7.7	本章习题	209
第 8 章	状态空间分析法	212
8.1	状态空间法的基本概念	212
8.1.1	状态与状态变量	212
8.1.2	状态向量与状态空间	213
8.2	状态空间描述	214
8.2.1	状态变量的选取	214
8.2.2	线性系统的状态空间描述	215
8.3	能控性和能观测性	216
8.3.1	线性系统的能控性	217
8.3.2	线性系统的能控性判断依据	217
8.3.3	线性系统的能观测性	218
8.3.4	线性系统的能观测性判断依据	218
8.4	本章习题	219
第 9 章	基于 MATLAB 的控制系统分析	220
9.1	MATLAB 概述	220
9.1.1	MATLAB 家族	220
9.1.2	MATLAB 发展及特点	223
9.1.3	MATLAB7.0 界面环境	224
9.2	MATLAB 基本语法和基本操作	226
9.2.1	变量赋值	226
9.2.2	矩阵运算	227
9.2.3	程序控制语句	229
9.2.4	基本绘图方法	232
9.3	Simulink 简介	234
9.3.1	Simulink 家族	234
9.3.2	Simulink 基本模块库	236
9.3.3	Simulink 建模仿真的一般过程	238
9.4	基于 MATLAB 的控制系统时域分析	239
9.4.1	阶跃响应分析	239
9.4.2	冲激响应分析	241
9.4.3	任意输入的时域响应分析	241
9.5	基于 MATLAB 的控制系统根轨迹分析	242
9.6	本章要点	243
9.7	本章习题	243
	参考文献	244

第1章

绪论

在人类社会走向信息化的今天，计算机、通信、信息处理技术正为越来越多的人所熟悉和掌握，并在社会政治、经济的发展乃至人类生活中占有越来越重要的地位。但与此同时，不能忽视了蕴藏在背后的信息技术，即自动控制技术。信息的获取、传输和处理增加了人们对信息的掌握，但要推动社会进步、经济发展，还必须有效地利用信息，实现信息的物化。因此，自动控制技术必然是社会信息化发展中的重要部分。在以信息化带动工业化，以工业化促进信息化的过程中，要对传统工业从企业结构到生产过程进行优化，实现资源优化配置、管理科学化、生产合理化、高产优质低耗及快速应变等，这些正是自动化技术所提供的包括CIMS、先进控制与制造技术在内的改造传统工业的实体技术。

本章是自动控制技术及应用的基础，主要介绍自动控制的基本方式、自动控制系统的组成、自动控制系统的分类、自动控制系统的性能指标等，并对本门课程的学科性质和任务作了说明。

1.1 引言

1.1.1 自动控制技术及应用

自动控制理论与实践的不断发展，为人们提供了设计最佳系统的方法，促进了科学技术的进步，大大提高了生产率。所谓自动控制，就是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备（称为控制器）操作被控对象（如机器、设备或生产过程）的某个状态或参数（称为被控量），使其按预先设定的规律自动运行。例如，化工生产中合成氨反应塔内的温度和压力能够自动维持恒定不变；雷达跟踪和指挥仪所组成的防空系统能使火炮自动地瞄准目标；无人驾驶飞机能按预定轨道自动飞行；人造地球卫星能够发射到预定轨道并能准确回收等。自动控制理论就是研究自动控制共同规律的科学，它的发展初期是以反馈理论为基础的自动调节原理，随着工业生产和科学技术的发展，现已发展成为一门独立的学科——控制论。控制论包括工程控制论、生物控制论和经济控制论。工程控制论主要研究自动控制系统中的信息变换和传送的一般理论及其在工程设计中的应用。自动控制原理仅仅是工程控制论的一个分支，它只研究控制系统分析和设计的一般理论。

在科学技术飞速发展的今天，自动控制技术所起的作用越来越重要，无论是在宇宙飞船、

导弹制导、雷达定位等尖端技术领域中,还是在机械制造工业、石油、化工、医药工业等的过程控制中,都有自动控制技术的应用,并且它所取得的成功都是巨大的。因此,自动控制技术已成为现代社会生活中不可缺少的重要组成部分。

1.1.2 自动控制理论的发展

随着生产的发展,控制技术也在不断地发展,尤其是计算机的更新换代更加推动了控制理论不断地向前发展。控制理论的发展过程一般可分为以下 3 个阶段。

(1) 第一个阶段。时间为 20 世纪 40~60 年代,称为“经典控制理论”时期。经典控制理论主要是解决单输入单输出问题,主要采用以传递函数、频率特性、根轨迹为基础的频域分析方法。此阶段所研究的系统大多是线性定常系统,对非线性系统,分析时采用的相平面法一般也不超过两个变量。经典控制理论能够较好地解决生产过程中的单输入单输出问题。这一时期的主要代表人物有伯德(H.W.Bode 1905~)和伊文思(W.R.Evans)。伯德于 1945 年提出了简便而实用的伯德图法。1948 年,伊文思提出了直观而又形象的根轨迹法。

(2) 第二个阶段。时间为 20 世纪 60~70 年代,称为“现代控制理论”时期。这个时期,由于计算机的飞速发展,推动了空间技术的发展。经典控制理论中的高阶常微分方程可转化为一阶微分方程组,用以描述系统的动态过程,即所谓状态空间法。这种方法可以解决多输入多输出问题,系统既可以是线性的、定常的,也可以是非线性的、时变的。这一时期的主要代表人物有庞特里亚金、贝尔曼(Bellman)、卡尔曼(R.E.Kalman, 1930~)等人。庞特里亚金于 1961 年发表了极大值原理;贝尔曼在 1957 年提出了动态规范化原则;1959 年,卡尔曼和布西发表了关于线性滤波器和估计器的论文,即所谓著名的卡尔曼滤波。

20 世纪 70 年代初,瑞典的奥斯特隆姆和法国的朗道(L.D.Landau)教授在自适应控制理论和应用方面也作出了贡献。

(3) 第三个阶段。时间为 20 世纪 70 年代末至今。20 世纪 70 年代末,控制理论向着“大系统理论”和“智能控制”方向发展。前者是控制理论在广度上的开拓,后者是控制理论在深度上的挖掘。“大系统理论”是用控制和信息的观点,研究各种大系统的结构方案、总体设计中的分解方法和协调等问题的技术基础理论。而“智能控制”是研究与模拟人类智能活动及其控制与信息传递过程的规律,研究具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统。

目前,人工智能中一个广为重视的问题就是用自然语言进行人机对话的研究,而初步采用的典型智能控制系统就是智能机器人。随着社会和生产的发展,控制理论也在不断发展和完善。随着自动控制技术和计算机技术的迅速发展,人们不仅从繁重的体力劳动中解放出来,而且也不断地从复杂的脑力劳动中“解脱”出来。已经深入到家庭生活中的机器人的出现,就是一个有力的说明。

回顾控制理论的发展历程可以看出,它的发展过程反映了人类社会由机械化时代进入电气化时代,并走向自动化、信息化和智能自动化时代。目前,自动控制理论还在继续发展,并且已经超越了学科界限,朝着以控制论、信息论和仿生学为基础的智能控制方向发展,控制的方式和解决问题的能力变得多样化和复杂化。

1.2 自动控制技术中的基本控制方式

在具体介绍自动控制技术中的基本控制方式之前,先介绍几个相关的基本术语。

(1) 系统。即为达到某一目的,由相互制约的各个部分按一定规律组成的、具有一定功能的整体。

(2) 自动控制系统。指能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统,它一般由控制装置(控制器)和被控对象组成。

(3) 控制装置。指对被控对象起控制作用的设备总体。

(4) 被控对象。指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。例如,汽车、飞机、炼钢、化工生产的锅炉等。

自动控制系统的性能,在很大程度上取决于系统中的控制器为了产生控制作用而必须接收的信息。这个信息有两个可能的来源:

① 来自系统外部,即由系统输入端输入的参考输入信号;

② 来自被控对象的输出端,即反映被控对象的行为或状态的信息。

把从被控对象输出端获得的信息通过中间环节(称为反馈环节)再送回控制器的输入端的过程,称为反馈。传送反馈信息的载体,称为反馈信号。是否采用反馈,对控制系统的各个指标(即稳定性、快速性、准确性)影响很大。因此,系统的基本控制方式也按有无反馈分为3大类:开环控制、闭环控制、复合控制。

1.2.1 开环控制

开环控制是一种最简单的控制方式,其特点是在控制器与被控对象之间只有正向控制作用而没有反馈控制作用,即系统的输出量对控制量没有影响。开环控制系统的示意图如图1-1所示。

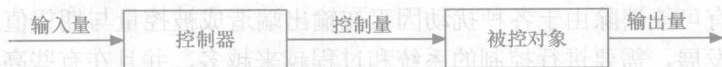


图 1-1 开环控制系统

在开环控制系统中,对于每一个参考输入量,都有一个与之相对应的工作状态和输出量。系统的精度取决于元器件的精度和特性调整的精度。当系统的内部扰动和外部扰动对系统影响不大、控制精度要求不高时,可采用开环控制。

设有一个直流电动机D,用它来带动一个需要以恒定转速转动的负载,它的电枢上加有由可控硅功率放大器供给的整流电压,而可控硅功率放大器输出的整流电压的大小由电位器 R_w 来调节,其原理示意图如图1-2所示。

图1-2中, E —输入量, M_L —负载力矩, n —负载转速, U_a —电动机电枢电压, i_a —电动机电枢电流, i_f —电动机励磁电流, U_V —电位器给定电压, L —电抗器, i —减速器。

电动机D的工作原理是:当电位器 R_w 给出一定电压 U_V 后,可控硅功率放大器的触发电路便产生一串与电压 U_V 相对应的、具有一定相位的触发脉冲去触发可控硅,从而控制可控硅功率放大器的输出电压 U_a 。由于电动机D的励磁绕组中加的是恒定励磁电流 i_f ,因此随

着电枢电压 U_a 的变化,电动机便以不同的速度带动负载运动。如果要求负载以一定的转速恒定运行,则只要给出相应的恒定电压即可。从图 1-2 中可以看出,对于一个确定的输入量来说,总存在一个与之对应的、描述确定工作状态的输出量。因此,系统的控制精度将取决于控制器及被控对象的参数稳定性,也就是说欲使开环控制系统具有要求的控制精度,系统各部分的参数值在工作过程中都必须严格保持在事先校准的量值上。

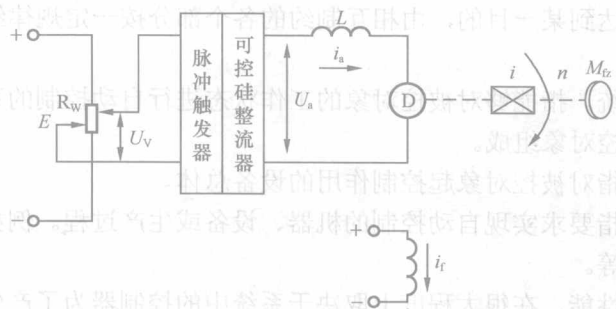


图 1-2 电动机开环控制系统

根据开环控制原理,就上面的实例来说,为了保持带电的电动机 D 以某一恒定速度转动,仅通过具有相应常值的控制电压 U_V 是达不到目的的。这是因为在电动机运行过程中有很多因素能引起转速的变化,比如负载力矩的变化、电源电压的波动、系统中各元器件参数的变化等,都将在被控量 n 和控制量(输入量) U_V 决定的期望值之间产生偏差。我们定义,所有妨碍控制量对被控量按要求进行正常控制的因素叫做扰动量。如上例中,当扰动量存在时,如果要保持转速不变或几乎不变,就必须采取一定的措施来抵消或削弱这些扰动对系统的影响。在开环控制的基础上,上述控制过程可以通过人的参与来完成。譬如在上例中,可以在电动机输出转轴上装一个测量转速的转速表,通过转速表可以监视转速的变化。如果发现转速 n 高于其期望值,则可以通过电位器 R_W 来调整控制电压 U_V 的量值,如降低 U_V 值便可使转速 n 降下来;相反,如果由于扰动因素的存在使转速 n 低于其期望值,则可以通过调整电位器 R_W 使控制电压 U_V 上升,从而控制转速 n 上升,直到转速 n 恢复到期望的转速。这样通过人的参与,便有可能消除由于各种扰动因素在输出端造成被控量与期望值之间的偏差。

随着生产的发展,需要进行控制的系统和过程越来越多,并且在有些高温、高压等危险场合,用户是不能直接参与控制的。因此,如果都要由用户直接参与去完成这些控制任务,那将是无法适应的,这就要求制造各种精密仪器和设备去代替人的工作。而现代技术的发展已经完全适应了这种替代的可能,即采用闭环控制。

1.2.2 闭环控制

闭环控制是指控制装置与被控对象之间既有正向作用,又有反向联系的控制过程,即如果控制器的信息来源中包含来自被控对象输出的反馈信息,则称为闭环控制系统,或称为反馈控制系统,如图 1-3 所示。

在控制系统中,控制装置对被控对象所施加的控制作用,若能取自被控量(输出量)的反馈信息(反馈量),即根据实际输出来修正控制作用,实现对被控对象进行控制的任务,那么这种控制原理称为反馈控制原理。正是由于引入了反馈信息(反馈量),使整个控制过程成为闭合的,因此,按反馈控制原理建立起来的控制系统,叫做闭环控制系统。在闭环控制系

统中,其控制作用的基础是被控量(输出量)与给定值之间的偏差,这个偏差是各种实际扰动所导致的总“后果”,它并不区分其中的个别原因。因此,这种系统往往能够同时抵制多种扰动,而且对系统自身元部件参数的波动也不甚敏感。



图 1-3 闭环控制系统

作为直流电动机转速闭环控制的例子如图 1-4 所示。图 1-4 所示为无人直接参与自动控制转速,并使其保持恒定的控制原理图。在图中,CF 为测速发电机,其输出电压正比于负载的转速 n ,即 $U_{CF}=K_C \cdot n$,测速发电机完成测量转速并把转速转换为电压信号的任务,称为测量转换环元件。

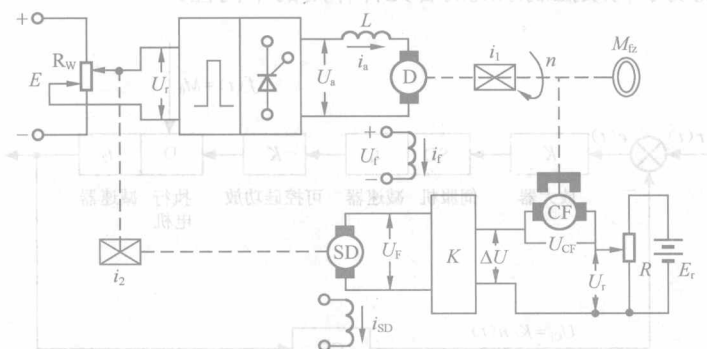


图 1-4 电动机转速自动控制系统原理图

电压 U_r 为给定的基准电压,其初始值与电动机转速的期望值相对应。因此把 U_{CF} 反馈到系统的输入端与 U_r 进行比较即代替了由人去观察负载转速并判断其是否与其期望值发生偏差这一过程。这里电压 U_r 是系统的控制量(或控制信号),电压 U_{CF} 则是与被控制量 n 成比例的反馈量(或反馈信号)。

反馈量 U_{CF} 和控制量 U_r 比较后得到的电压差 $\Delta U = U_r - U_{CF}$ 叫做偏差量(或偏差信号)。如果偏差信号不为零,即 $\Delta U \neq 0$,便意味着电动机转速在扰动作用下偏离了它的期望值。图 1-4 中, K 为放大环节,它的作用是将偏差信号进行放大,从而去控制伺服电机 SD ,这是因为一般偏差 ΔU 很小,所以需要放大,放大后的信号才能驱动 SD 。因 SD 的转动而产生的角位移,通过减速装置 i_2 移动电位器 R_w 的滑臂,从而改变电压 U_p 的量值,进而控制可控硅功率放大器的输出电压 U_a 的大小和极性,使电动机 D 的转速得到控制。重复上述调节过程直到消除偏差 ΔU ,使转速 n 的期望值得到恢复为止。

因此,这种系统对电动机转速的控制引入了被控量,使被控量参与到控制过程中来,构成了一个完整的闭环控制,能很好地实现电动机转速恒定的自动控制。

从上面的分析中可以看出,为了对电动机转速通过反馈形式进行自动控制,对控制系统提出下列要求。

- (1) 必须对被控制量进行测量并将它反馈到系统的输入端与控制量相减（即负反馈），得到偏差信号。
- (2) 必须对偏差信号进行适当的变换和放大，从而产生对被控制对象的控制作用。
- (3) 上述控制作用应使被控制量作消除偏差保持期望值的相应变化。
- (4) 这种利用负反馈得到的偏差产生的控制作用，又去消除偏差的控制原理叫做反馈控制原理。

就整个系统来说，控制量通过控制器去控制被控制量，而被控制量又被反馈到输入端和控制量进行相减运算的比较（即形成负反馈），产生比较的偏差，偏差再经过控制器的适当变换去控制被控制量。这样，整个控制系统便形成了一个闭合的环路，我们把这种输出与输入间存在负反馈的系统叫做闭环控制系统或反馈控制系统。

电动机转速自动控制系统的方框图（方框图的绘制见本章 1.3 节）如图 1-5 所示。在本书中，控制量用 $r(t)$ 来表示，偏差用 $e(t)$ 来表示，被控量用 $c(t)$ 来表示，扰动量用 $f(t)$ 来表示。图 1-5 中的 $\otimes$ 符号表示比较元件；其中的负号表示负反馈；图中箭头指示的方向表示信号流的方向，同时也说明了构成控制系统的各元件作用的单向性。

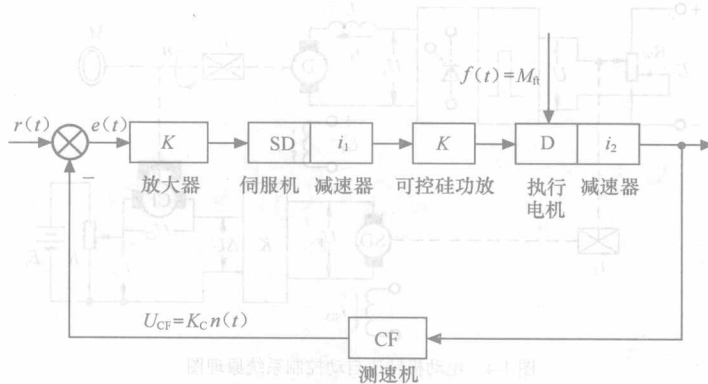


图 1-5 电动机转速自动控制系统方框图

从上述分析可以看出，反馈控制系统的一个突出优点就是不管什么原因引起被控制量偏离其期望值产生偏差，都一定会有相应的控制作用产生，而这个控制作用能够消除偏差，使被控制量重新恢复到期望值上。因此从原理上说，反馈控制系统具有抑制内部和外部各种干扰对系统输出的影响的能力。

通过上面的介绍，建立起了有关开环控制和闭环控制的基本概念之后，可以将开环控制与闭环控制作如下的简要比较。

在闭环控制系统中，由于采用了负反馈，因而被控制量对于外部和内部的干扰都不甚敏感，因此，有可能采用不太精密和成本低廉的元件来构成控制质量较高的系统。而对开环控制系统来说，由于在被控制量和控制量之间没有任何联系，所以对于干扰造成的误差系统不具备修正的能力，于是这种系统的控制精度便完全通过采用高精度元件和采取有效的抗干扰措施来保证。和闭环控制相比较，开环控制系统容易建造，它不必对被控制量进行测量和反馈，因而结构简单；从系统的稳定性来考虑，开环控制系统在这个问题上容易解决，因而不是十分重要的问题。但对闭环控制系统来说，稳定性始终是一个十分重要的问题。

一般来说，当系统控制量的变化规律能预先确定并且对系统中可能出现的干扰可以作出