



普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

自动控制原理 (第2版)

李红星 张益农 主 编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

自动控制原理

(第2版)

李红星 张益农 主编
李平 李媛 钱琳琳 参编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了经典控制理论的基本概念、基本原理和基本方法，从控制理论的基础知识入手，结合生产和生活中的实例，较深入地介绍了建立自动控制系统在时域和频域中的数学模型、方块图、信号流程图及简化方法；围绕自动控制系统的稳定性、稳态特性和动态特性，详细介绍了用于分析和设计系统的时域法、根轨迹法和频域法，离散系统的稳定性、稳态特性和动态特性的分析方法和数字控制器的设计方法；并对非线性控制系统的描述函数法和相平面法做了介绍。书中引入了MATLAB的应用，详细介绍了采用MATLAB进行控制系统的分析与设计的仿真方法，通过大量的仿真实例，可以帮助读者更好地理解系统分析与设计的基本思路和方法。

本书基本概念清晰，理论联系实际，注重内容的实用性和物理背景，增加工程应用背景的典型例题分析，可读性强，便于自主学习，可作为高等学校自动化专业的必修课教材、电子信息类和电气工程类专业的平台课程教材，也可供相关领域专业技术人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

自动控制原理/李红星，张益农主编. —2版. —北京：电子工业出版社，2014.7

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-23763-8

I. ①自… II. ①李… ②张… III. ①自动控制理论—高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 149248 号

策划编辑：王志宇

责任编辑：王志宇

印 刷：三河市鑫金马印装有限公司

装 订：三河市鑫金马印装有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：20.25 字数：517 千字

版 次：2011 年 7 月第 1 版

2014 年 7 月第 2 版

印 次：2014 年 7 月第 1 次印刷

印 数：3 000 册 定价：39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

序

自动控制原理是 20 世纪 40 年代发展起来的一门学科理论，在国民经济和国防领域中有广泛的应用。特别是近些年来，随着计算机技术和网络技术的发展，给这门经典的学科理论注入了新的活力，使其应用进程又有了长足的发展。

自动控制原理是自动化科学与技术的理论基础，是自动化专业一门必修的基础理论课程，也是一门重要的先导课程。李红星教授在 20 多年教学实践的基础上，针对应用型工科院校的特点，以学以致用为目的，编写了这本教材。旨在为应用型自动化专业及其他相近专业的学生提供学习自动控制原理的教材，促进应用型自动化技术人才的培养。作者在编写这本教材的过程中，特别强调理论与实际的结合，尽量淡化繁冗的理论推导，将枯燥的理论与生动的实例结合起来，注重基本概念和基本方法的论述，力求深入浅出。在保证知识结构系统性和完整性的前提下，突出实用性、基础性，强调核心知识，注意培养学生的知识运用能力。

利用反馈原理，以偏差消除误差是自动控制原理的核心思想。作者以这个思想为纲，构建了本教材的大框架，将核心知识分成若干知识单元，包括控制系统的基本概念、控制系统的数学描述、线性控制系统的时域分析、线性控制系统的频域分析、线性控制系统的根轨迹分析、线性控制系统的校正设计、线性离散系统分析和非线性系统分析等。全书涵盖的知识点有：控制系统的定义，反馈原理，控制系统组成，控制系统的分类，开环与闭环控制方式，控制系统的主要性能指标（稳定性、稳态性、动态性），控制系统典型的输入信号；典型控制系统的微分方程模型及建模与求解，系统线性化方法，传递函数的概念与性质，典型环节的传递函数，开环与闭环传递函数，传递函数的极点和零点，控制系统方块图模型表示与信号流图；控制系统的响应与时域性能指标，一阶和二阶及高阶控制系统的性能分析，控制系统稳定性分析及稳定性判据，稳态误差概念与求取，减小或消除稳态误差的方法，频率特性概念与几何描述，典型环节的奈奎斯特图及其绘制，典型环节的伯德图及其绘制，基于奈奎斯特图和伯德图的稳定性分析与判据，稳定性裕量的概念与计算，控制系统的闭环频率特性及性能分析，频域性能指标与时域指标的关系，根轨迹概念及其绘制，幅值条件和幅角条件，基于根轨迹的系统性能分析，控制系统的校正概念与方式，超前校正、滞后校正、滞后-超前校正、反馈校正及其对控制系统性能的影响，PID 控制概念及作用机理；离散控制系统概念及典型结构，采样器、保持器与采样定理， z 变换及性质，脉冲传递函数，离散控制系统的稳定性分析与判据，离散控制系统的动态与稳态性能分析，非线性系统概念及特点，典型非线性环节，描述函数与相平面法，非线性系统校正等。相关知识点还辅以 MATLAB 例题解释，以加深对知识点的理解。

在教材的编写方法上，作者潜心做到将“抽象问题具体化，数学问题工程化”，以减少数学对应用型专业学生可能造成的困扰。因此，在引出控制系统的基本概念、论述控制系统的基本知识和基本方法时，多以生产或生活的实例为基点，结合物理概念和应用背景，使深奥的控制理论知识显得不那么难。比如，第 1 章就以常见的水箱系统、冰箱制冷过程和饮水机温度控制等为例，论述自动控制系统的组成和工作原理，非常有利于对控制概念的吸收，而且形象易懂。有意思的是，在本书的其他章节，你还会发现生活中的许多常见例子被作者

用来解释控制的基本原理、控制系统的结构和控制方法等，使读者能更好地掌握控制理论的内涵，更容易理解控制理论与工程应用之间的关系，更有利于培养学生的思考能力与解决问题的能力。

本教材内容的组织由浅入深、循序渐进、重点突出、强调工程应用，通过大量的实例将各章节的内容有机地联系在一起。教材可读性强，便于自主学习；各章节又相对独立，利于教学的取舍。本教材定位明确，在已出版的众多自动控制原理教材中拥有自己应有的价值，对应用型自动化专业的控制理论教学具有积极的作用。希望应用型自动化专业的学生能静下心来走进这本教材，从中挖掘自己想要的控制理论知识；也希望作者在教学实践中进一步完善教材的知识体系，更加丰富工程应用实例，以适应应用型自动化专业的教学需要。

萧德云
清华大学自动化系教授

第 2 版前言

随着我国经济建设和高新技术的快速发展,市场对自动化技术应用型人才的需求量很大,为自动化学科的高速、可持续发展提供了广阔的空间,同时对高校的人才培养提出了更高的要求。

自动控制原理是高等工科院校自动化类专业和电子信息类专业的一门重要技术基础课程,它将抽象的数学、力学、电学等理论知识用于实际系统,如工业生产自动化、军事装备自动化、楼宇控制自动化等各个领域。这些自动控制的应用,对人员而言,可以改善劳动者的劳动条件;对企业而言,可以提高企业的经济效益;对国家而言,可以提高国家的综合国力。在许多人们无法接近的场合,自动控制将是唯一的技术手段。

本书的第 1 版是为了培养自动化专业高素质应用型人才,满足社会的大量需求,按照“理论联系实际,学以致用”的原则,总结了作者多年培养应用型本科生教学经验和教学改革成果、关注国内外自动控制理论的发展、参考了控制理论的工程实践应用,经教学团队反复研讨编写而成的。经过几轮的教学使用,根据读者的反馈意见,结合教学中的实际问题,为了更好地服务于高素质应用型人才培养,对本书进行了全面修订。

本书全面地介绍了经典控制理论,主要内容包括控制系统的基本概念;控制系统的传递函数、方块图、信号流图;线性定常系统的时域分析法、根轨迹法、频域法;线性定常系统的校正方法;离散系统的稳定性、动态和稳态性能分析,数字控制器设计方法;非线性控制系统的相平面法和描述函数法;考虑到工程实际应用,介绍了工程中常用的 PID 控制器,通过实例阐述了 PID 控制器的设计方法,利用 MATLAB 进行控制系统的分析与设计的仿真方法。

这次修订中,保留了原书的特色,在加强基本概念、基本理论和基本方法的基础上,注重控制系统的分析和设计方法的工程实用性,强调控制对象的物理背景及物理概念,使读者充分理解系统参数与性能指标之间的内在联系,理论计算与工程求解之间的内在联系,更好地将理论知识应用于工程系统,由浅入深地引导读者理解和掌握经典控制理论的精髓。新编写和增补的内容有:控制系统分类中的定常系统和时变系统;二阶系统动态性能改善方法的部分内容;利用模型降价(主导极点、偶极子)方法分析高级系统的时域响应;减小稳态误差的措施和方法,并增加了实例分析;延时系统的根轨迹,并增加了根轨迹的实例分析;开环频率特性和系统性能的关系; M 圆、 N 圆及求取闭环频率特性;尼柯尔斯图;利用 MATLAB 进行控制系统设计,增加了有工程应用背景的典型例题分析;离散系统的数字控制器设计,增加了非线性系统的实例分析,部分结构优化调整;精选了各章习题,并分为基本部分(前半部分)和提高部分(后半部分)。

本书力求由浅入深、循序渐进、突出重点、增强可读性、便于自主学习,各部分内容具有相对独立性,可根据教学需求进行组合。适合作为高等学校自动化专业的必修课教材、电子信息类和电气工程类专业的平台课程教材,也可供相关领域专业技术人员参考。读者可登录华信教育资源网([ht://www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn))免费注册下载本书配套教学资源。

本书由李红星和张益农主编。全书共分 8 章,第 1、5、6 章由李红星编写,第 3 章和第

7 章的部分内容由张益农编写，第 4、8 章由李平编写，第 2 章由李媛编写，第 7 章的其他部分内容由钱琳琳编写。全书由李红星统稿审定。

在编写过程中，牛瑞燕、李秀丽和任俊杰做了许多工作，同时参考了一些专家、学者的著作，在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处和错误，恳请读者批评指正。

编者
2014 年 6 月

目 录

第 1 章 自动控制的基本概念	1
1.1 引言	1
1.2 开环控制系统与闭环控制系统	2
1.2.1 开环控制系统	2
1.2.2 闭环控制系统	3
1.2.3 闭环控制系统的组成	4
1.3 自动控制系统的分类	5
1.3.1 按输入信号形式分类	5
1.3.2 按系统中信号传递的性质分类	5
1.3.3 按系统的输入/输出特性分类	6
1.3.4 按系统中参数的时间特性分类	6
1.4 控制系统举例	7
1.4.1 蒸汽机转速控制系统	7
1.4.2 温度控制系统	8
1.4.3 位置随动系统	8
1.4.4 电冰箱制冷系统	9
1.5 对自动控制系统的基本要求	9
小结	10
习题	11
第 2 章 控制系统的数学模型	14
2.1 引言	14
2.1.1 系统数学模型的定义及特点	14
2.1.2 系统数学模型的类型和建模方法	14
2.2 建立系统的时域数学模型	15
2.2.1 电路系统举例	15
2.2.2 机械力学系统举例	16
2.2.3 机电系统举例	17
2.2.4 流体系统的建模	19
2.2.5 复杂系统举例	19
2.2.6 微分方程建立步骤	21
2.3 非线性系统的线性化	21
2.3.1 小偏差线性化概念	22
2.3.2 线性化方法	22
2.4 微分方程求解	24

2.5 建立系统的复域数学模型	25
2.5.1 传递函数的定义	25
2.5.2 传递函数的性质	27
2.5.3 零点、极点和传递系数	27
2.6 系统的典型环节及传递函数	28
2.6.1 比例环节	28
2.6.2 惯性环节	29
2.6.3 积分环节	30
2.6.4 微分环节	31
2.6.5 振荡环节	31
2.6.6 延时环节	31
2.7 系统方块图	32
2.7.1 方块图的定义	32
2.7.2 方块图的组成和绘制	33
2.7.3 方块图等效变换和简化	36
2.7.4 方块图化简举例	39
2.8 系统信号流图	41
2.8.1 信号流图的基本概念	42
2.8.2 信号流图的画法及简化规则	43
2.8.3 梅逊增益公式	45
2.9 利用 MATLAB 求解系统的传递函数	46
2.9.1 num 和 den 函数	47
2.9.2 典型化简函数	47
小结	49
习题	49

第3章 线性系统的时域分析法

3.1 引言	54
3.1.1 典型输入信号	54
3.1.2 典型时间响应	56
3.1.3 控制系统的性能指标	56
3.2 一阶系统的时域分析	58
3.2.1 一阶系统的数学模型	58
3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应	58
3.2.3 一阶系统的单位斜坡响应	59
3.2.4 一阶系统的单位脉冲响应	60
3.2.5 一阶系统的单位加速度响应	61
3.2.6 线性定常系统的重要特性	61
3.3 二阶系统的时域分析	63
3.3.1 二阶系统的数学模型	63

3.3.2	二阶系统的单位阶跃响应	64
3.3.3	欠阻尼二阶系统的动态性能指标	67
3.3.4	二阶系统动态性能的改善	71
3.4	高阶系统的时域分析	74
3.4.1	高阶系统的单位阶跃响应	74
3.4.2	高阶系统的降阶	76
3.5	线性系统的稳定性分析	77
3.5.1	线性系统稳定性的概念和稳定的充分必要条件	77
3.5.2	代数稳定判据	78
3.6	线性系统的稳态误差分析	82
3.6.1	误差与稳态误差的定义	82
3.6.2	稳态误差的分析与计算	83
3.6.3	减小稳态误差的方法	88
3.7	用 MATLAB 进行系统时域分析	89
3.7.1	用 MATLAB 求系统的输出响应	89
3.7.2	用 MATLAB 求系统的动态性能指标	91
3.7.3	用 MATLAB 研究系统的稳定性	92
3.7.4	用 MATLAB 求静态误差系数及系统的稳态误差	93
	小结	93
	习题	94
第 4 章	根轨迹法	99
4.1	根轨迹的基本概念	99
4.2	根轨迹的幅值条件和幅角条件	102
4.3	绘制根轨迹的基本法则	103
4.4	零度根轨迹	108
4.5	根轨迹绘制举例	109
4.6	参数根轨迹	112
4.7	延时系统的根轨迹	113
4.8	控制系统的根轨迹法分析	116
4.8.1	开环零、极点对根轨迹的影响	116
4.8.2	由根轨迹分析控制系统	118
4.9	利用 MATLAB 绘制根轨迹及分析系统	119
	小结	125
	习题	125
第 5 章	线性系统的频域分析法	130
5.1	引言	130
5.2	频率特性	130
5.2.1	频率特性的基本概念	130

5.2.2	频率特性的图形表示法	132
5.3	对数频率特性图 (伯德图)	132
5.3.1	对数频率特性图及其特点	132
5.3.2	典型环节的对数频率特性图	133
5.3.3	系统开环对数频率特性的绘制	139
5.3.4	最小相位系统和非最小相位系统	142
5.3.5	确定传递函数的频域实验方法	143
5.3.6	开环频率特性和系统性能的关系	149
5.4	极坐标图 (奈奎斯特图)	150
5.4.1	典型环节的极坐标图	150
5.4.2	系统开环极坐标图的绘制	153
5.5	奈奎斯特稳定判据	156
5.5.1	幅角原理	156
5.5.2	奈奎斯特稳定判据	158
5.6	控制系统的相对稳定性	166
5.7	闭环系统频域性能指标	169
5.7.1	系统闭环频率特性	169
5.7.2	利用等 M 圆图和等 N 圆图求闭环频域特性	170
5.7.3	频域性能指标与时域指标的关系	172
5.8	用 MATLAB 进行系统频域分析	175
5.8.1	用 MATLAB 绘制伯德图	175
5.8.2	用 MATLAB 绘制极坐标图	177
5.8.3	用 MATLAB 求系统的稳定裕度	179
5.8.4	用 MATLAB 绘制尼柯尔斯图	180
小结		181
习题		182

第 6 章 线性系统的设计方法 187

6.1	引言	187
6.1.1	性能指标	187
6.1.2	校正方式	188
6.2	校正装置	189
6.2.1	超前校正网络及其特性	189
6.2.2	滞后校正网络及其特性	191
6.2.3	滞后-超前校正网络及其特性	192
6.3	串联校正	193
6.3.1	基于频率响应法的串联校正	194
6.3.2	基于根轨迹法的串联校正	200
6.4	反馈校正	207
6.4.1	比例负反馈	207

6.4.2	微分负反馈	208
6.4.3	负反馈	208
6.5	复合校正	211
6.5.1	按扰动补偿的复合控制系统	211
6.5.2	按输入补偿的复合控制系统	212
6.6	PID 控制器	214
6.6.1	比例微分 (PD) 控制	214
6.6.2	比例积分 (PI) 控制	215
6.6.3	比例积分微分 (PID) 控制	215
6.7	用 MATLAB 进行系统校正	218
	小结	223
	习题	223

第 7 章 线性离散控制系统 229

7.1	离散系统基本概念及其应用	229
7.1.1	由连续控制系统到离散控制系统	229
7.1.2	离散控制系统的典型结构	230
7.2	采样器和保持器	231
7.2.1	采样器	231
7.2.2	采样定理	232
7.2.3	保持器	233
7.3	z 变换	234
7.3.1	z 变换定义	235
7.3.2	求 z 变换的方法	235
7.3.3	z 变换的基本性质	237
7.3.4	z 反变换	239
7.4	脉冲传递函数	240
7.4.1	脉冲传递函数的定义及求法	240
7.4.2	开环离散系统的脉冲传递函数	241
7.4.3	闭环离散系统的脉冲传递函数	244
7.5	离散系统的稳定性分析	248
7.5.1	时域中的离散系统稳定的充分必要条件	248
7.5.2	s 平面与 z 平面的映射关系	249
7.5.3	z 域中离散系统稳定的充分必要条件	250
7.5.4	离散系统的劳斯稳定判据	251
7.5.5	采样周期与开环增益对离散系统稳定性的影响	253
7.6	离散系统的稳态误差	254
7.7	离散系统的动态性能分析	257
7.8	离散控制系统设计——最少拍控制系统	260
7.8.1	稳定、不含纯滞后环节的广义对象的最少拍控制器设计	260

7.8.2	任意广义对象的最少拍控制器设计	264
7.8.3	最少拍无纹波控制器设计	266
7.9	MATLAB 在离散控制系统中的应用	268
7.9.1	MATLAB 用于连续系统的离散化	268
7.9.2	MATLAB 用于求离散系统的响应	269
7.9.3	MATLAB 用于离散系统的稳定性分析	270
小结		270
习题		271
第 8 章	非线性系统分析	275
8.1	非线性系统的一般概念	275
8.1.1	非线性系统的特点	275
8.1.2	典型非线性及对系统性能的影响	278
8.2	描述函数法	281
8.2.1	非线性特性的描述函数	281
8.2.2	非线性控制系统的描述函数分析	285
8.2.3	用 MATLAB 的 Simulink 仿真分析非线性控制系统	288
8.3	相平面法	289
8.3.1	相轨迹特征及性质	289
8.3.2	相轨迹的绘制	296
8.3.3	利用 MATLAB 绘制相轨迹图	297
8.4	非线性系统的相平面分析	299
8.4.1	用相平面法分析非线性系统	299
8.4.2	用非线性特性改善系统性能	304
小结		306
习题		306
参考文献		310

第 1 章 自动控制的基本概念

1.1 引言

在工程和科学技术发展过程中，自动控制技术起着越来越重要的作用。目前自动控制技术已广泛地应用于工业、农业、军事、航天技术及人们的日常生活等各方面，不仅使人们摆脱了繁重的体力劳动和大量复杂的工作，极大地提高了劳动生产率和产品质量，而且能够完成超出人们力所能及的任务。因此，自动控制技术已成为国家现代化建设中不可缺少的重要组成部分。

所谓自动控制，就是在没有人的直接参与下，利用外加的装置（控制装置）使机器、生产设备或生产过程（被控对象）的某个或某些工作状态或物理量（被控量）自动地按照预定的规律变化。例如，在日常生活中，对电热水器的温度、水箱的水位、楼宇的电梯、交通灯、洗衣机、清洁机器人的控制等；工业生产过程中，对电网电压、锅炉的温度和压力、供水塔的液位和流量、电机转速、机器人的控制等；军事工业中，导弹的发射、火炮-雷达、军用机器人的控制等；航空航天工业中，飞船的发射、飞行器的姿态、飞船与宇宙工作站的对接的控制等。需要解决以上这些控制问题，自动控制理论是基础。

自动控制系统是指能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统。图 1-1 描述的是水箱水位自动控制系统。水位自动控制的目的是维持水箱内的水位恒定。当水的流入量与流出量平衡时，水箱水位维持在期望的高度上，期望高度由自动控制器刻盘上的指针标定。当用水量（流出量）增大时，平衡被破坏，水箱水位必然下降，使得水箱的实际水位与期望水位出现误差。由于浮子也随之降低，将实际的水位检测出来送给控制器，控制器将实际水位与期望水位进行比较得到误差值，然后根据误差调节气动阀门的开度，增大水的流入量，使水位回到期望值的附近，从而保持水位不变。反之，当用水量减小时，水位和浮子上升，通过反向误差则使气动阀门开度减小，减少水的流入量，使水位自动下降到期望值的附近，从而达到自动控制水箱水位恒定的目的。

图 1-2 描述的是水箱水位自动控制系统的方块图。期望水位是由控制器刻盘指针标定的，作为系统的输入量；水的流出量和流入量变化影响水箱的水位保持在一定位置，称为扰动输入量；而水箱实际水位称为系统的输出量。

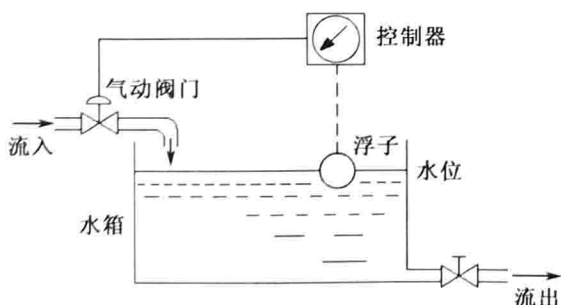


图 1-1 水位自动控制系统

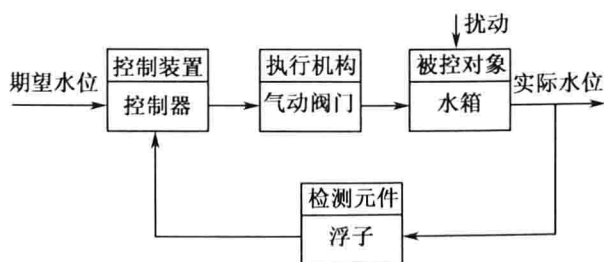


图 1-2 水位自动控制系统方块图

以雷达实时控制为例。敌机在飞行时，雷达天线必须时刻旋转，随时自动保持指向敌机。雷达天线的方位和仰角数据经过处理计入提前量后，又用来控制高射炮的转动，使高射炮时刻保持瞄准敌机，准备随时开火。瞄准的角度误差只有几分。如果不用自动控制，这当然是达不到的。尤其在现代战争条件下，飞机的速度很快，炮台又很沉重，如果用人力直接转动炮台，这样的精度就更不可想象了。

再以宇宙飞船登月为例。飞船在落到月球上时，需要软着陆，否则，飞船就会被摔坏，这就需要一套自动装置，在飞船着陆前产生一个相反的力，保证飞船在着陆的一瞬间合力接近零。这样，飞船就可以安全着陆。

1.2 开环控制系统与闭环控制系统

自动控制系统有各种各样的具体形式，但是按控制基本方式可分为开环控制系统和闭环控制系统。

1.2.1 开环控制系统

开环控制系统是指系统的输出量对控制作用不产生影响的系统。例如，洗衣机就是开环控制系统，因为洗衣过程是按时间顺序进行的，时间的长短，完全是由操作人员的判断和估计来决定的，而并不通过检测衣物清洁度来影响洗衣过程。

为了说明开环控制系统的结构特点和工作原理，举一个简单的例子。图 1-3 是一台直流电动机的转速开环控制系统。电动机通过变速器以一定转速带动其他设备。该系统的控制目标是，通过调节电位器滑动端的位置，来改变电动机的转速，使其保持在期望的转速恒定不变。转速控制系统的被控对象是电动机，被控量是转速，也称为系统的输出量，系统的输入量是电位器的输出电压。电动机的转速由电位器滑动端的位置（按生产工艺要求设置）来改变，改变电位器滑动端的位置，电压 U_g 就改变，经过功率放大器后，加在电动机两端的电枢电压就改变，从而电动机转速就改变。不同的电位器位置，会有相应的电动机转速。

如图 1-4 所示的方块图表示了该系统输入量和输出量的作用关系。这种结构就是典型的开环控制结构。从图 1-4 可见，作用信号是单方向传递的，也就是说，只有输入量对输出量产生控制作用，而输出量不反馈到输入端来影响控制；当系统有外界扰动时，如功率放大器供电电源电压变化，电动机负载转矩变化，如果没有人工干预，转速也将跟着变化，偏离期望值。由此可见，如图 1-3 所示系统实现不了保持转速恒定的控制目标，这是由于开环控制的结构特点决定了它不具备抗干扰的能力。

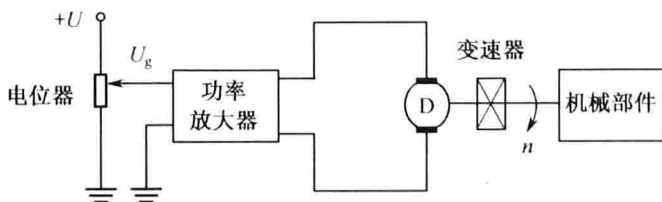


图 1-3 直流电动机转速开环控制系统

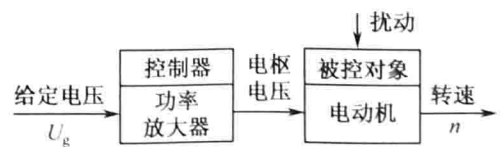


图 1-4 开环控制系统的方块图

开环控制系统的结构很简单，给定一个输入，便有相应的一个输出，但是输出量的精度不高。为了提高开环控制的精度，就必须采用较精密的元件。但是元件越精密，投资也就越大。因此，开环控制系统只能用于控制精度要求不高的场合。

1.2.2 闭环控制系统

上一节已经讲过，开环控制系统的精度不高，如何提高控制系统的精度呢？仍然以图 1-3 直流电动机转速开环控制为例，我们在电动机上安一个转速表，派一个人监视转速表，当看到电动机的转速高于期望值时，马上操纵电位器使电枢电压减小，降低转速；当看到电动机转速低于期望值时，则使电枢电压增大，提高电动机转速。这样就形成了人工闭环控制系统，如图 1-5 所示。

在这种控制方式中，根据人的眼睛检测到电动机的实际转速与期望的转速进行比较，利用产生的偏差进行控制，从而使电动机转速的精度提高。系统的输出信号通过人反过来影响控制信号，构成了反馈，也称为人工反馈控制系统。该系统的方块图如图 1-6 所示。

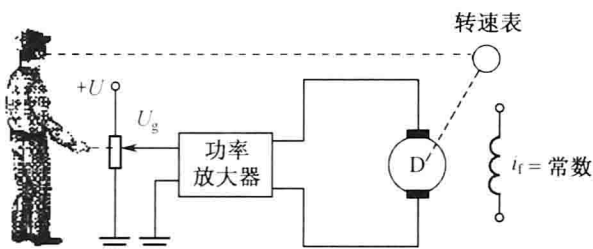


图 1-5 直流电动机转速人工闭环控制

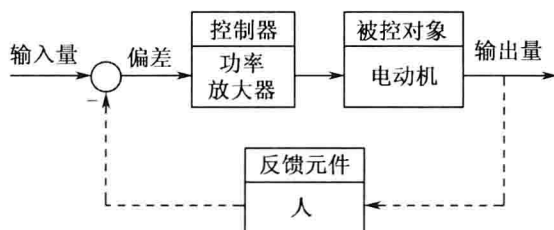


图 1-6 人工闭环控制方块图

人工控制在复杂、快速、精确的系统中是不能满足要求的。因为控制作用是由人来完成的，所以控制效果的好坏与操作人员的经验和技巧有很大关系，它不是一个自动控制系统。若采用一个自动控制器来代替人工操作，在图 1-5 中，用测速发电机代替转速表作为检测元件，再将测速发电机的输出电压送至输入端与电位器电压进行比较，利用其偏差值控制电动机转速，就形成了电动机转速自动闭环控制系统，如图 1-7 所示。

在转速闭环控制系统中，根据生产工艺要求设定电位器的位置，电动机就输出相应转速。如果电源变化、负载变化等扰动引起的转速偏离设定值，闭环控制就会产生控制作用来减小这一偏差，自动保证转速不受或少受扰动的影响，提高控制精度。如负载加大，转速会立刻下降，由测速发电机检测出转速的变化，反馈到输入端的电压也降低，偏差就会增大，将使功率放大器输出电压升高，从而使电动机转速上升，减小或消除偏差，这就是闭环控制的特征，其方块图如图 1-8 所示。

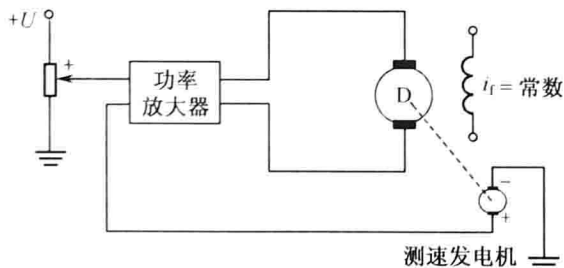


图 1-7 直流电动机转速自动闭环控制系统

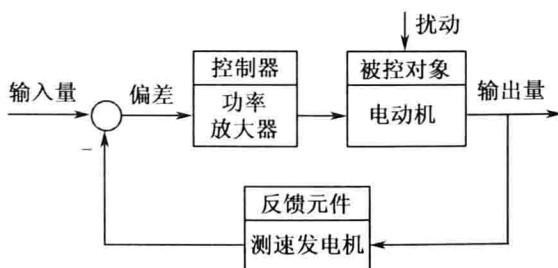


图 1-8 直流电动机转速闭环控制系统方块图

反馈是自动控制系统中一个很重要的概念，控制系统中常采用负反馈。负反馈除了能降低系统误差外，还能够使系统对内部参数的变化不灵敏，这样系统元件参数变化或者非线性的影响将大大降低，对于一定的控制要求，就有可能采用不是很精密的、成本较低的元件来构成控制系统，这在开环系统中是不能做到的。

但是，实际系统一般都具有质量、惯性或延滞，因此系统的输出往往是振荡的，采用反

馈，就有可能使系统振荡加剧，甚至不能工作。反馈改变了控制系统的动态性能，增加了问题的复杂性。

1.2.3 闭环控制系统的组成

闭环控制系统由不同的元件组成，系统可以表现出不同的功用，但具有类似的结构。一个典型闭环控制系统由各种基本环节组成，如图 1-9 所示。

1. 给定装置

给出与期望的被控量相对应的系统输入量（即给定值），如调速系统的电位器。

2. 比较元件

将测量元件检测到的被控量实际值与给定装置给出的给定值进行比较，求出它们之间的偏差，起信号的综合作用。

3. 放大元件

对微弱的偏差信号进行放大和变换，输出足够功率或执行机构要求的物理量驱动被控对象。

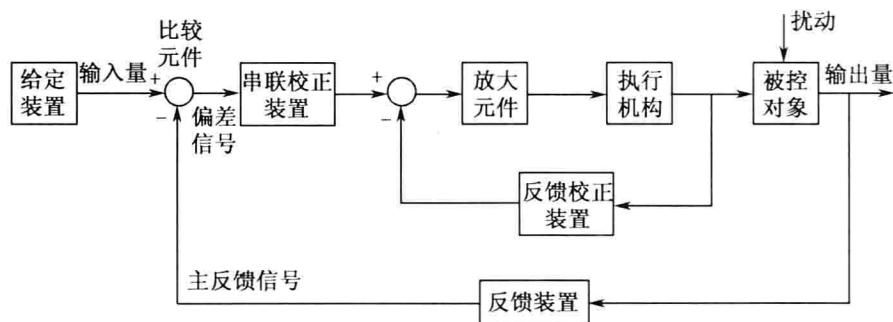


图 1-9 闭环控制系统典型方块图

4. 执行机构

根据放大器的输出信号，直接驱动被控对象，执行控制任务，使被控制量与期望值趋于一致。

5. 反馈装置

对被控量进行测量，并将测量值反馈到系统的输入端。如果被控量属于非电量，那么要把它转换成为电量，以便于处理。

6. 被控对象

需要进行控制的机器、设备或生产过程，如前面提到的水箱、洗衣机、电动机等。

7. 校正装置

参数或结构便于调整的元件，用串联或反馈的方式连接在系统中，以改善系统性能。校正装置的作用就是实现某种控制规律。

下面给出图 1-9 中各信号定义。

输入量：用于控制系统被控量变化规律的指令信号，又称给定值或输入信号。

输出量：反映被控对象变化的物理量，又称被控量或输出信号。

反馈量：将系统或元件的输出量反送到系统或元件的输入端信号称为反馈量，又称反馈信号。反馈有主反馈和局部反馈、负反馈和正反馈之分，自动控制系统通常采用负反馈。