

自动控制 原理与系统

(第2版)

叶明超 黄海 主编

4D



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

自动控制原理与系统

(第2版)

主 编 叶明超 黄 海

副主编 王佳明 刘阿玲

主 审 包丽琴

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书介绍了经典控制理论的基本概念、基本理论和控制系统的基本分析方法及实际应用。主要内容有：自动控制的基本概念、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析法和频域分析法、控制系统的校正、直流调速系统、直流脉宽调速系统、位置随动系统、交流变频调速系统、控制系统实例介绍等。各章均配有内容提要、小结和大量习题。

本书中给出了大量的应用实例，并针对实例中的问题由浅入深地给出了解决方法。全书力求突出物理概念、定性分析，回避烦琐的数学推导，叙述深入浅出，通俗易懂。

本书可作为普通高校电气技术、自动化技术、机电一体化技术以及电子技术等电类专业学生的教学用书，也可作为从事自动化工作的工程技术人员的参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理与系统 / 叶明超, 黄海主编. —2 版. —北京: 北京理工大学出版社, 2013. 2

ISBN 978 - 7 - 5640 - 7257 - 5

I. ①自… II. ①叶… ②黄… III. ①自动控制理论—高等学校—教材
IV. ①TP13 ②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 005759 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市天利华印刷装订有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 17

字 数 / 393 千字

版 次 / 2013 年 2 月第 2 版 2013 年 2 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 1500 册

定 价 / 48.00 元

责任编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

第1章 自动控制的基本概念	1
1.1 自动控制理论概述	1
1.2 简要历史	2
1.3 自动控制系统的组成	3
1.3.1 人工控制与自动控制	3
1.3.2 自动控制的基本概念与组成	3
1.3.3 系统术语	4
1.3.4 自动控制系统的方块图表示	4
1.4 自动控制系统的分类	5
1.4.1 开环控制系统和闭环控制系统	5
1.4.2 定值、随动和程序控制系统	7
1.4.3 线性和非线性控制系统	7
1.4.4 连续和离散控制系统	8
1.4.5 单变量和多变量控制系统	8
1.5 自动控制系统举例	8
1.5.1 温度控制系统	9
1.5.2 位置随动系统	10
1.5.3 自动调速系统	11
1.6 自动控制系统的的基本要求	12
1.7 本课程的学习任务与学习要求	13
本章小结	14
习题1	14
第2章 拉普拉斯变换及其应用	16
2.1 拉氏变换的概念	16
2.2 拉氏变换的运算定理	20
2.3 拉氏反变换	25
2.4 拉氏变换应用举例	26
本章小结	32

习题2	32
第3章 自动控制系统的数学模型	34
3.1 控制系统的微分方程	34
3.1.1 控制系统微分方程的建立	34
3.1.2 控制系统微分方程的求解	36
3.2 传递函数	37
3.2.1 传递函数的定义	37
3.2.2 传递函数的求取	38
3.2.3 传递函数的性质	40
3.3 控制系统的动态结构图	40
3.3.1 动态结构图的组成与画法	40
3.3.2 动态结构图的等效变换及化简	43
3.3.3 用公式法求传递函数	48
3.4 典型环节的数学模型及阶跃响应	50
3.4.1 典型环节的数学模型	50
3.4.2 典型环节的传递函数及阶跃响应	53
3.5 控制系统的传递函数	57
本章小结	60
习题3	61
第4章 控制系统的时域分析法	63
4.1 典型控制过程及性能指标	63
4.1.1 典型初始状态	63
4.1.2 典型输入信号	63
4.1.3 阶跃响应的性能指标	65
4.2 一阶系统的时域分析	67
4.3 二阶系统的时域分析	68
4.4 系统稳定性分析	74
4.4.1 稳定的基本概念	74
4.4.2 线性系统稳定的充分必要条件	75
4.4.3 劳斯稳定判据	76
4.4.4 两种特殊情况	77
4.4.5 劳斯稳定判据在系统分析中的应用	78
4.5 稳态性能的时域分析	79
4.5.1 稳态误差的基本概念	79
4.5.2 系统类型	80
4.5.3 参考输入信号作用下的稳态误差	80

4.5.4 扰动输入信号作用下的稳态误差	82
本章小结	84
习题4	84
第5章 控制系统的频域分析法	87
5.1 频率特性的概念	87
5.1.1 频率特性的基本概念	87
5.1.2 频率特性与传递函数的关系	88
5.1.3 频率特性的性质	88
5.1.4 频率特性的图形表示方法	89
5.2 典型环节的伯德图	90
5.2.1 比例环节	90
5.2.2 积分环节	90
5.2.3 微分环节	91
5.2.4 惯性环节	92
5.2.5 比例微分环节	93
5.2.6 振荡环节	94
5.2.7 一阶不稳定环节	96
5.2.8 最小相位系统的概念	96
5.3 系统开环对数频率特性曲线的绘制	99
5.3.1 系统开环对数频率特性曲线绘制的一般步骤	99
5.3.2 开环对数频率特性曲线绘制举例	100
5.4 系统稳定性的频域分析	105
5.4.1 对数频率稳定判据	105
5.4.2 稳定裕量	107
5.5 动态性能的频域分析	109
5.5.1 三频段的概念	109
5.5.2 典型系统	111
本章小结	114
习题5	114
第6章 自动控制系统的校正	118
6.1 常用校正装置	118
6.1.1 无源校正装置	118
6.1.2 有源校正装置	119
6.2 串联校正	120
6.2.1 串联比例校正	121
6.2.2 串联比例微分校正	122

6.2.3 串联比例积分校正	123
6.2.4 串联比例积分微分校正	125
6.3 反馈校正	126
6.4 前馈控制的概念	129
本章小结	130
习题6	131
第7章 直流调速系统	132
7.1 直流调速系统概述	132
7.1.1 直流调速系统的基本概念	132
7.1.2 直流调速的三种方式	133
7.1.3 调压调速的三种主要形式	134
7.1.4 直流调速系统的性能指标	137
7.2 单闭环直流调速系统	140
7.2.1 闭环调速系统常用调节器	140
7.2.2 单闭环直流调速系统	145
7.2.3 无静差调速系统概述及积分控制规律	151
7.3 带电流截止负反馈的闭环调速系统	152
7.3.1 电流截止负反馈的引入	152
7.3.2 带电流截止负反馈的闭环调速系统静特性	153
7.3.3 带电流截止负反馈的闭环调速系统启动过程	154
7.4 闭环调速系统设计实例	155
本章小结	160
习题7	160
第8章 PWM 直流脉宽调速系统	162
8.1 直流脉宽调制电路的工作原理	163
8.1.1 不可逆、无制动力 PWM 变换器	163
8.1.2 不可逆、有制动力 PWM 变换器	164
8.1.3 可逆 PWM 变换器	165
8.2 脉宽调速系统的控制电路	169
8.2.1 直流脉宽调制器	169
8.2.2 逻辑延时电路	170
8.2.3 基极驱动电路和保护电路	170
8.3 PWM 直流调速装置的系统分析	171
8.3.1 总体结构	171
8.3.2 PWM 脉宽调制变换器的传递函数	172
8.3.3 系统分析	172

8.4 由 PWM 集成芯片组成的直流脉宽调速系统实例	172
8.4.1 SG1731 芯片简介	172
8.4.2 由 SG1731 组成的直流调速系统	173
本章小结	174
习题 8	175
第 9 章 位置随动系统	176
9.1 位置随动系统组成及其基本特征	176
9.1.1 位置随动系统的组成	176
9.1.2 位置随动伺服系统的分类	178
9.1.3 随动伺服系统的控制方式	179
9.2 位置伺服系统的部件功能及工作原理	180
9.2.1 位置检测元件	180
9.2.2 执行元件	183
9.2.3 相敏整流与滤波电路	185
9.2.4 放大电路	187
9.3 位置随动伺服系统的控制特点与实例分析	187
9.3.1 系统组成原理图	187
9.3.2 系统组成框图	189
9.3.3 系统自动调节过程	189
9.4 位置伺服系统的控制性能分析与校正设计	189
9.4.1 系统的稳态性能分析	190
9.4.2 系统的动态性能分析	191
本章小结	191
习题 9	192
第 10 章 异步交流电动机变频调速系统	193
10.1 交流变频调速的基本概念	193
10.1.1 交流调速系统简介	193
10.1.2 交流变频调速的基本控制方式	195
10.2 标量控制的变频调速系统	199
10.2.1 控制输出电压的方式	199
10.2.2 U/f 比例控制方式	201
10.2.3 转差频率控制方式	203
10.3 矢量控制的调速系统	205
10.3.1 基于转差频率控制的矢量控制方式	206
10.3.2 无速度传感器的矢量控制方式	207
10.4 脉宽调制型交流变频调速系统	208

10.4.1	PWM 型变频器工作原理	208
10.4.2	PWM 型变频调速系统的主电路	211
10.4.3	PWM 型变频调速系统的控制电路	214
本章小结		219
习题 10		219
第 11 章 复杂自控系统建模实例——两轮自平衡小车		221
11.1	两轮自平衡小车简介	221
11.2	两轮自平衡小车的工作原理	222
11.3	倒立摆的分类及研究的意义	223
11.3.1	倒立摆的分类	223
11.3.2	倒立摆研究的意义	224
11.4	倒立摆模型——复杂控制系统的研究方法	225
11.4.1	控制理论的发展历程及系统控制的基本方法	225
11.4.2	非线性系统的线性化方法	225
11.5	自平衡小车的硬件组成及建模分析	226
11.5.1	自平衡小车的系统结构	226
11.5.2	自平衡小车系统的硬件组成及实现	227
11.6	两轮自平衡小车的建模	228
11.6.1	小车车体的运动分析	228
11.6.2	动力学建模	230
11.7	系统非线性模型的线性化	232
11.7.1	基于泰勒级数的近似线性化方法求解过程	232
11.7.2	对具体两轮自平衡小车的近似化线性模型	234
11.8	不同的线性化模型的 Matlab 性能仿真比较	235
11.8.1	两种模型的可控角范围比较	235
11.8.2	在可控范围内的性能比较	235
11.8.3	系统抗干扰能力的比较	236
11.8.4	灵敏度的比较	238
本章小结		238
附录		
附录一 自动控制原理虚拟实验系统的开发与应用		240
附录二 自动控制技术常用术语中、英文对照		249
参考文献		257

第 1 章 ...

自动控制的基本概念

内容提要

本章概括地介绍了自动控制理论的形成和发展、自动控制系统的基本组成、自动控制系统的分类和自动控制系统的性能指标，并简单介绍了自动控制的发展历史和研究方向。

1.1 自动控制理论概述

自动控制理论是研究各种自动控制过程共同规律的技术科学。它发展的初期，是以反馈理论为基础的自动调节理论，随着科学技术的进步，现已发展成为一门独立的学科——控制论，包括工程控制论、生物控制论、经济控制论和社会控制论。其中，工程控制论是控制论中最成熟的分支，主要研究工程领域自动控制系统中的信息分析、变换、传送的一般理论与设计应用；自动控制理论是工程控制论的一个分支，它只研究自动控制系统分析和设计的一般理论。根据自动控制技术发展的不同阶段，自动控制理论相应地分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

经典控制理论是指 20 世纪 50 年代末期所形成的理论体系。它主要是研究单输入 - 单输出线性定常系统的分析和设计问题。其理论基础是描述系统输入 - 输出关系的传递函数，主要采用复频域分析方法。

现代控制理论是在 20 世纪 60 年代初期，为适应宇航技术发展的需要而出现的新的控制理论，适用于研究具有高性能、高精度的多输入 - 多输出、线性或非线性、定常或时变系统的分析和设计问题，如最优控制、最优滤波、自适应控制等。描述系统的方法是基于系统状态这一内部特征量的状态空间法，本质上是一种时域方法。

信息技术特别是大规模信息网络技术的发展对控制理论提出了新的需求，现代应用数学、大系统理论、人工智能理论和计算机技术的进步则为控制理论的发展提供了强有力的支持。因此，现代控制理论正向大系统控制理论和智能控制理论等方向深入发展。

经典控制理论和现代控制理论构成了全部的控制理论。控制理论的发展促进了自动控制技术和相关学科的发展。生产、管理、流通、军事等各个领域自动化的要求，推动现代自动控制在机械、冶金、石油、化工、电力、航空、航海、核反应堆、通信、交通运输、生物学及工业管理等领域得到了越来越普遍的应用。自动控制理论与技术的发展前景十分广阔。

1.2 简要历史

控制理论发展初期,众多杰出的学者做出了重大贡献。1788年英国科学家詹姆斯·瓦特(James Watt)为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器,可以誉为自动控制领域的第一项重大成果。为了克服当时调节器的振荡现象,麦克斯韦(James Clerk Maxwell)在1868年对微分方程系统稳定性进行了分析;后来又出现了劳思(E. J. Routh)和霍尔维茨(A. Hurwitz)分别于1874年和1895年对稳定性的研究成果;1892年,李雅普诺夫对调节理论做出了重要贡献,提出了几个重要的稳定性判据;1922年,迈纳斯基(Minorsky)研制出船舶操纵自动控制器,证明了从描述系统的微分方程确定系统稳定性的方法;1932年,奈奎斯特(Nyquist)提出了一种可以根据稳态正弦输入的开环响应确定闭环系统稳定性的简便方法。1934年,海森(H. L. Hazen)提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念。

为了设计满足性能指标要求的线性闭环控制系统,20世纪40年代发展了系统的频域分析方法,它是在奈奎斯特、伯德(Bode, 1945)等早期的关于通信学科的频域研究工作的基础之上建立起来的。1942年哈里斯(Harris)提出的传递函数的概念,首次将频域分析方法应用到了控制领域,构成了控制系统领域法理论研究的基础。20世纪40年代末到50年代初,伊万思(W. R. Evans)提出并完善了线性反馈系统的根轨迹分析技术,并成为那个时代的另一个里程碑。

频域分析法和根轨迹法是经典控制理论的核心。采用这两种方法可以设计出稳定的并满足一定性能指标要求的系统。但是,通过这两种方法设计出的系统还不是最优系统。因此,从20世纪50年代开始,控制系统设计问题的研究重点转移到最优系统的设计上。苏联学者庞特里亚金(Pontryagin)于1956年提出的极大值原理、贝尔曼(Bellman)于1957年提出的动态规划和卡尔曼(Kalman)于1960年提出的状态空间分析技术,开创了控制理论研究的新篇章,他们的理论当时被统称为“现代控制理论”。从那个时期以后,控制理论研究中出现了线性二次型最优调节器(Kalman, 1959),最优状态观测器(Kalman, 1960)以及线性二次型高斯(Linear Quadric and Gaussian, LQG)问题的研究。

1960—1980年这段时间,人们对确定系统和随机系统的最优控制、复杂系统的自适应控制和学习控制进行了充分的研究。大约从1960年起,电子计算机开始应用于控制系统的设计。

从1980年到现在,现代控制理论的研究主要集中于Robust(鲁棒)控制等相关的课题,其中鲁棒控制是控制系统设计中又一个令人瞩目的研究领域。1981年,美国学者查默斯(Zames)提出了基于哈代(Hardy)空间范数最小化方法的鲁棒最优控制理论。1992年,多依尔(Doyle)等提出了最优控制的状态空间数值解法,为该领域的发展作出了重要的贡献。

目前,自动控制理论正向以控制论、信息论和人工智能为基础的智能控制理论方向发展;同时,由于大规模信息网络管理控制的需要,自动控制理论也在向大系统控制理论方向前进。

1.3 自动控制系统的组成

1.3.1 人工控制与自动控制

在日常生活和生产过程中，人工控制和自动控制的应用非常广泛，现举一些具体的例子以加深对“人工控制”和“自动控制”的理解。

1. 人工控制举例

- (1) 人的体温控制。天冷时加衣服，天热时减衣服。
- (2) 自行车速度控制。根据马路的交通情况，人为地加快骑行速度或减慢骑行速度。
- (3) 汽车驾驶控制。转动方向盘改变方向；加油门，刹车等改变速度。
- (4) 收音机音量控制。调节音量旋钮，改变声音的强、弱程度。
- (5) 普通洗衣机的控制。人们根据衣服的多少及脏的程度来控制加水和加洗衣粉的量、洗的次数、甩干时间等。

2. 自动控制举例

- (1) 电饭煲温度的自动控制。根据人们事先设计好的顺序，自动进行定时加温、保温。
- (2) 空调器的温度控制。根据人们设定的温度自动开关冷气机或调节电动机转速以保持室内为一定的温度。
- (3) 汽轮机的转速控制。汽轮机的转速高于或低于额定转速时，自动关小或开大主汽阀门，自动维持汽轮机的转速为额定值。
- (4) 声控、光控的路灯。根据脚步声开灯、关灯，根据天亮天黑程度关灯、开灯等。
- (5) 导弹飞行控制。飞行姿态控制、自动纠正方向、自动导向目标等。
- (6) 人造卫星、宇宙飞船控制。包括正确进入预定轨道；姿态控制，使太阳能电池板一直朝向太阳，无线电天线一直指向地球，卫星或飞船内部的环境条件适当；使它所携带的各种测试仪器自动地工作等。

1.3.2 自动控制的基本概念与组成

所谓自动控制，就是在没有人直接参与的情况下，利用控制装置操纵被控对象（被控量），使其按照预定的规律运动或变化。

被控对象是控制系统的主体，是在系统中要求对其参数进行控制的设备或过程，如温度控制系统中的加热炉，转速控制系统中的拖动电动机，过程控制系统中的化学反应炉等。

控制装置一般由以下三部分组成。

①自动检测装置。包括测量元件和变送元件，起自动检测被控对象的作用，如转速控制系统中的测速发电机，温度控制系统中的热电偶等。

②自动调节装置。起综合、分析、比较、判断和运算的作用，并能按一定的规律发出控制信号或指令。

③执行装置。起具体执行控制信号或指令的作用，给被测对象施加某种作用，使其改

变输入量。

对控制系统的组成进行详细分类,其还可以由下列各部分组成。

①测量、变送元件:属于反馈元件,其职能是把被控物理量测量出来。

②设定元件:职能是给出被控量应取的数值信号,即是设定给定值的元件。

③比较元件:职能是将测量信号与给定信号进行比较,并得到差值(偏差信号),起信号综合作用。

④放大元件:职能是对差值信号进行放大,使其足以推动下一级工作。

⑤执行元件:职能是直接推动被控对象,改变其被控物理量,使输出量与希望值趋于一致。

⑥校正元件:职能是改变由于结构或参数的原因而引起的性能指标的不适应。

⑦能源元件:职能是为系统提供必要的能源。

1.3.3 系统术语

为了便于研究自动控制系统,通过长期的实践,人们逐渐形成了一整套约定的名词和术语,下面就分别介绍之。

①被控量(被控参数):要求被控对象保持恒定或是按一定规律变化的物理量。通常它是决定被控对象工作状态或产品产量、质量的主要变量,如加热炉的温度,电动机的转速,流体的流量、压力等。被控量一般是输出量,是时间的函数。

②给定信号(参考输入信号):控制系统的输入信号,是时间的函数。

③偏差信号:是比较元件的输出信号,即给定信号与反馈(测量)信号之差。

④误差信号:系统被控量的希望值与实际值之差。在单位反馈系统中偏差信号等于误差信号,在非单位反馈系统中,两者虽然都反映了系统被控量的希望值与实际值之差,但他们的信号类型与量纲是不同的,这一点一定要引起重视。

⑤干扰信号:破坏系统平衡,导致系统的被控量偏离其给定值的因素,称为干扰信号。干扰信号是系统不希望的信号,它可能来自系统的内部或系统的外部,它们进入系统的作用点也可能不同,但都是影响系统控制质量的不利因素。

⑥反馈信号:从系统的输出端引入,经过变换(或直接)回送至输入端与给定信号进行比较的信号,成为反馈信号。此信号是为了达到控制目的而有意识地从输入端回送到输入端的信号。

1.3.4 自动控制系统的方块图表示

在研究自动控制系统的工作原理时,为了清楚地表示系统的结构和组成,说明各元件间信号传递的因果关系,我们分析系统时常采用方块图(框图)的方式表示。方块图的绘制原则如下。

①组成系统的每一环节(或元件)用一方框表示,符号为“□”。

②环节间用带箭头的线段“→”连接起来,此线段称为信号线(或作用线),箭头的方向表示信号的传递方向,即作用方向,信号只能单方向传递。一个环节的输入信号是环节发生运动的原因,而其输出信号是环节发生运动的结果。

③信号的比较点用“⊗”表示,它有对几个信号进行求(代数)和的功能。一般在多个输入信号的信号线旁边标以“+”或“-”,表示各输入信号的极性。

如图 1-1 所示为一控制系统方框图的示例。当被控对象受到扰动时,被控对象的输出量(被控量)就要发生变化,被控量 y 的变化值经过测量、变送元件测量与变换成电量后送入比较元件与给定值 r 进行比较,产生了偏差值 $e = r - y$ 。偏差信号 e 送入控制器,在控制器中进行控制规律的运算后,输出控制信号 u ,控制量 u 再作用到被控对象,使被控对象的被控量 y 恢复到给定值。

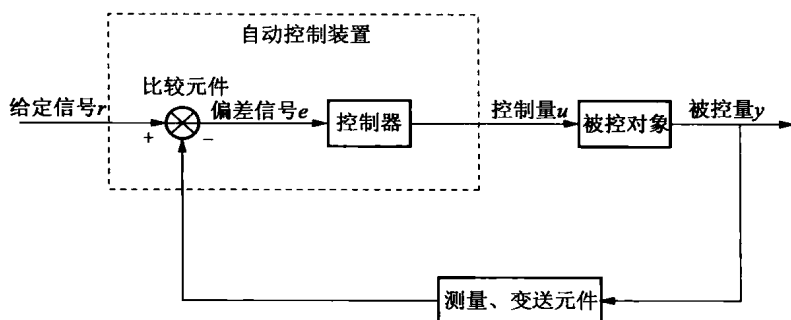


图 1-1 自动控制系统方框图的举例

1.4 自动控制系统的分类

由于自动控制系统应用的广泛性,以及控制理论本身发展的需要,使得自动控制系统具有各种各样的分类形式。为了便于学习和研究,下面重点讨论几种分类方法。

1.4.1 开环控制系统和闭环控制系统

1. 开环控制系统

如果控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程,称这种控制方式为开环控制,相应的系统为开环控制系统。图 1-2 所示的直流电动机转速控制系统就是一个开环控制系统。图中电动机是电枢控制的直流电动机,要求带动负载以一定的转速转动。

输入量是给定电压 u_r ,输出量(被控制量)是电动机转速 ω 。调整给定电位器滑臂的位置,可得到不同的给定电压 u_r 和电枢电压 u_a ,从而控制了电动机的转速 ω 。上述的控制过程可用方框图简单直观地表示成图 1-3 的形式。当负载转矩不变时,给定电压 u_r 和电动机转速 ω 有一一对应的关系。因此,可由给定电压直接控制电动机转速。如果出现扰动如负载转矩增加(减少),电动机转速便随之降低(增高)而偏离给定值。若要维持给定转速不变,操作人员必须经过判断,相应地调整电位器滑臂的位置来提高(降低)给定电压,使电动机转速恢复到原给定值。

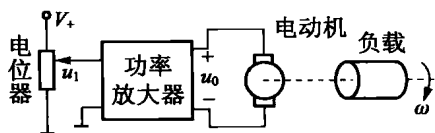


图 1-2 直流电动机转速控制系统

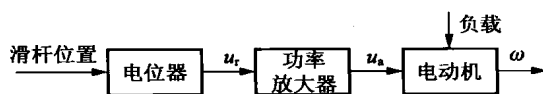


图 1-3 直流电动机转速控制方框图

这种控制方式的特点是控制作用的传递具有单向性，作用路径不是闭合的。由方框图可明显地看出控制信息的传递过程是由输入端沿箭头方向逐级传向输出端。控制作用直接由系统的输入量产生。给定一个输入量，就有一个输出量与之对应。控制精度取决于信息传递过程中所用元件性能的优劣及校准的精度。由于开环控制系统不具备自动修正被控量偏差的能力，故系统的精度低，即抗干扰能力差。但是开环控制结构简单、调整方便、成本低，在国民经济各部门均有采用，如自动售货机、自动洗衣机、产品自动生产线、数控机床及交通指挥红绿灯转换等。

2. 闭环控制系统

闭环控制是指控制装置与被控对象之间既有顺向作用又有反向联系的控制过程。图1-4所示的是一种自动调整转速的闭环控制系统。该系统在原来的基础上，增加了一个由测速发电机构成的反馈回路，用来检测输出转速，并给出与电动机转速成正比的反馈电压。将这个代表实际输出转速的反馈电压与代表希望输出转速的给定电压进行比较，所得出的偏差信号作为产生控制作用的基础，通过功率放大器来控制电机的转速。这也常称为按偏差控制。可以看出，只要偏差存在，控制作用总是存在的。控制的最终目的是减小偏差，提高控制精度。这种通过反馈构成系统闭环，按偏差产生控制作用，以减小或消除偏差的控制系统，称为闭环控制系统，或反馈控制系统。用方框图直观地把上述控制过程描述出来，可方便地进行性能分析，方框图如图1-5所示。

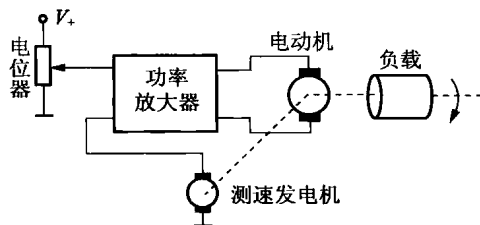


图 1-4 直流电动机转速闭环控制系统

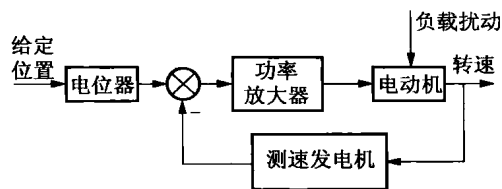


图 1-5 直流电动机转速闭环控制方框图

由方框图分析电动机转速自动调节的过程如下：当系统受到扰动影响时，例如负载增大，则电动机的转速降低，测速发电机的端电压减小。在给定电压不变时，偏差电压则会增加，电动机的电枢电压上升，使得电动机转速增加。如果负载减小，则电动机转速调节的过程与上述过程变化相反。这样，抑制了负载扰动对电动机转速的影响。同样，对其他扰动因素，只要影响到输出转速的变化，上述调节过程会自动进行，从而保证了系统的控制精度，提高了抗干扰能力。

这种控制方式的特点是控制作用不是直接来自给定输入，而是系统的偏差信号，由偏差产生对系统被控量的控制。系统被控量的反馈信息反过来又影响系统的偏差信号，即影响控制作用的大小。这种自成循环的控制作用，使信息的传递路径形成了一个闭合的环路，称为闭环。由于闭环控制能自动修复被控量偏差的能力，故控制精度高，抗干扰能力强。但是闭环控制系统不仅使用元件多、线路复杂，且因信号反馈的作用，如果未选好系统元件或系统参数配合不当时，调节过程可能变得很差，甚至出现发散或等幅振荡等不稳定情况。

1.4.2 定值、随动和程序控制系统

1. 定值控制系统

系统的给定值（参考输入）为恒定的常数，此种控制系统称为定值控制系统。这种系统可通过反馈控制使系统的被控参数（输出）保持恒定的、希望的数值。如在过程控制系统中，一般都要求将过程参数（如温度、压力、流量、液位和成分等）维持在工艺给定的状态，所以，多数过程控制系统都是定值控制系统。

2. 随动控制系统

系统的给定值（参考输入）随时间任意变化的控制系统称为随动控制系统。也就是说，此类系统输入量的变化规律是无法预先确定的时间函数。这种系统的任务是在各种情况下保证系统的输出以一定的精度跟随参考输入的变化而变换，所以这种系统又称为跟踪系统。如运动目标的自动跟踪和瞄准和拦截系统，工业控制中的位置控制系统，过程控制中的串级控制系统的副回路等都属于此类系统。另外，工业自动化仪表中的位置控制系统、显示记录仪表等也是闭环随动控制系统。

3. 程序控制系统

若系统给定值（参考输入）是随时间变化并有一定的规律，且为事先给定了的时间函数，则称这种系统为程序控制系统。如热处理炉的温度调节，要求温度按一定的时间程序的变化规律（自动升温、保温及降温等）；间隙生产的化学反应器温度控制以及机械加工中的程序控制机床等均属于此类系统。也可以说，程序控制系统是随动控制系统的一种特殊情况，其分析研究方法也和随动控制系统相同。

1.4.3 线性和非线性控制系统

1. 线性控制系统

系统中各组成环节或元件的状态或特性可以用线性微分方程（或差分方程）来描述时，这种系统就称为线性控制系统。线性控制系统的特点是可以使用叠加原理，当系统存在几个输入时，系统的总输出等于各个输入分别作用于系统时系统的输出之和，当系统输入增大或减小时，系统的输出也按比例增大或减小。

如果描述系统运动状态的微分（或差分）方程的系数是常数，不随时间变化，则这种线性系统称为线性定常（或时不变）系统。若微分（或差分）方程的系数是时间的函数，则这种线性系统称为线性时变系统。

2. 非线性控制系统

当系统中存在有非线性特性的组成环节或元件时，系统的特性就由非线性方程来描述，这样的系统就称为非线性控制系统。对于非线性控制系统，叠加原理是不适用的。

严格地讲，实际的控制系统都不是线性的，各种系统总是不同程度地具有非线性特性，例如系统中应用的放大器的饱和特性，运动部件的间隙、摩擦和死区，弹性元件的非线性关系等。非线性特性根据其处理方法不同可以分为本质非线性和非本质非线性两种。对于非本质的非线性特性，其输入-输出关系曲线没有间断点和折断点，且呈单值关系，

因此当系统变量变化范围不大时,为便于研究,可简化为线性关系处理,这样可以应用相当成熟的线性控制理论进行分析和讨论。对于本质非线性特性,其输入-输出关系或具有间断点和折断点,或具有非单值关系,这类系统需要用非线性控制理论来分析研究。

1.4.4 连续和离散控制系统

1. 连续控制系统

当系统中各组成环节的输入、输出信号都是时间的连续函数时,称此类系统为连续控制系统,亦称模拟控制系统。连续控制系统的运动状态或特性一般是用微分方程来描述的。模拟式的工业自动化仪表以及用模拟式仪表来实现自动化过程控制的系统都属于连续控制系统。

2. 离散控制系统

当系统中某些组成环节或元件的输入、输出信号在时间上是离散的,即仅在离散的瞬时取值时,称此类系统为离散控制系统。离散系统与连续系统的区别仅在于信号只是特定的离散瞬时上的时间的函数。离散信号可由连续信号通过采样开关获得,具有采样功能的控制系统又称为采样控制系统。

离散控制系统的运动状态或特性一般用差分方程来描述,其分析研究方法也不同于连续控制系统。

1.4.5 单变量和多变量控制系统

1. 单变量控制系统

在一个控制系统中,如果只有一个被控制的参数和一个控制作用来控制对象,则此系统为单变量控制系统,又叫单输入单输出系统。

2. 多变量控制系统

如果一个控制系统中的被控参数多于一个,控制作用也多于一个,且各控制回路互相之间有耦合关系,则称这种系统为多变量控制系统,也叫多输入多输出系统。

自动控制系统的分类方法除上述几种外还有很多,且各种分类方法只是人们站在不同的角度来看问题的一种方法,对于一个自动控制系统,可以用不同的方法来分类,但是这并不影响控制系统本身。本书以研究单变量连续线性定值控制系统为主,对其他控制系统仅在相关章节做简单介绍。

1.5 自动控制系统举例

要了解一个实际的自动控制系统的组成和画出组成系统的框图,必须明确下面的一些问题。

- (1) 哪个是控制对象? 被控量是什么? 影响被控量的主扰动量是什么?
- (2) 哪个是执行元件?
- (3) 测量被控量的元件有哪些? 有哪些反馈环节?
- (4) 输入量是由哪个元件给定的? 反馈量与给定量如何进行比较?
- (5) 此外还有哪些元件(或单元)? 它们在系统中处于什么地位? 起什么作用?