



高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材



自动控制原理

主 编 李素玲
副主编 胡 健
主 审 王 敏



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材

自动控制原理

主 编	李素玲	
副主编	胡 健	
参 编	季 画	王红梅
主 审	王 敏	

西安电子科技大学出版社

2007

内 容 简 介

本书比较全面地阐述了自动控制的基本理论与应用。全书共分8章,主要包括自动控制概论,控制系统的数学模型,控制系统的时域分析,根轨迹分析法,控制系统的频率特性法,控制系统的校正,线性离散控制系统,非线性控制系统。书末给出的三个附录可供读者在学习本书的过程中查询之用。全书内容简练,阐述深入浅出。为了便于自学,各章均附有丰富的例题和习题。

本书可作为自动化及电子与电气类专业的本科生教材,也可供相关专业的研究生或从事自动化技术工作的人员参考。

★ 本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/李素玲主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2007.9

高等学校电子与电气工程及自动化专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-1905-7

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 115085 号

策 划 毛红兵

责任编辑 王晓杰 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com> E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2007年9月第1版 2007年9月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 22.875

字 数 537千字

印 数 1~4000册

定 价 30.00元

ISBN 978-7-5606-1905-7/TP·0987

XDUP 2197001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

高等学校

自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化专业

“十一五”规划教材编审专家委员会名单

主任：张永康

副主任：姜周曙 刘喜梅 柴光远

自动化组

组长：刘喜梅（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

韦 力 王建中 巨永锋 孙 强 陈在平 李正明
吴 斌 杨马英 张九根 周玉国 党宏社 高 嵩
秦付军 席爱民 穆向阳

电气工程组

组长：姜周曙（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

闫苏莉 李荣正 余健明
段晨东 郝润科 谭博学

机械设计制造组

组长：柴光远（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

刘战锋 刘晓婷 朱建公 朱若燕 何法江 李鹏飞
麦云飞 汪传生 张功学 张永康 胡小平 赵玉刚
柴国钟 原思聪 黄惟公 赫东锋 谭继文

项目策划：马乐惠

策 划：毛红兵 马武装 马晓娟

前 言

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一门课程,是高等学校电子与电气工程及自动化专业的一门核心基础理论课程。它是基础课与专业课之间的桥梁,是本科生后续课程和研究生课程的基础,如过程控制、运动控制、智能控制、线性系统理论、系统辨识、最优控制、计算机控制等。它研究的核心内容是对各种各样的控制系统建立数学模型,进行分析计算和控制校正,使其满足所要求的性能指标。

随着科学技术的不断发展,自动控制不仅应用于工农业生产和国防建设,而且近年来在经济、生态、社会科学领域也多有应用。本书是为了适应自动化学科的发展,拓宽专业面,优化整体教学体系的教学改革形式,总结了作者多年的教学经验和课程教学改革成果,并按照电子与电气工程及自动化专业“自动控制原理”课程教学大纲,经反复讨论编写而成的。

全书共分 8 章,并附有 3 个附录。主要内容分为四大部分:第一部分是自动控制的基本概念;第二部分包括线性连续系统的数学模型、时域响应分析、根轨迹分析、频率特性分析、系统的校正,这部分内容阐明了自动控制的三个基本问题,即建模、分析和设计;第三部分有意识地加强了作为数字控制理论基础的离散控制系统的讨论,重点介绍了离散系统的数学模型、稳定性分析与系统校正;第四部分阐述了非线性系统的基本理论和分析方法,包括描述函数法和相平面法。另外,在各章的最后一节介绍了基于 MATLAB 的分析与设计方法,以适应现代教学利用计算机对控制系统进行辅助分析与设计的需要。

作者在编写过程中,充分注意到以下几点:

- (1) 全书注重课程体系的优化,强调基本概念、基本理论和基本工程的应用。
- (2) 以学生为本,加强能力培养,遵循认识规律,内容叙述力求深入浅出、层次分明。
- (3) 在理论综述和公式推导中,尽量精选内容,用经典例题代替一般性文字的叙述。
- (4) 内容精简,突出工科特点,充分考虑到教学计划的变更和考研的要求,尽量多地采用图表,以代替论述性内容,增加例题和练习题的数量,加强工程技术方法的分析和训练。
- (5) 详细介绍了基于 MATLAB 的控制系统计算机辅助分析与设计方法,并给出了大量的仿真例题,培养学生利用计算机分析与设计控制系统的能力,以适应 21 世纪教学现代化的发展要求。

本书的参考学时为 80 学时,但可根据专业需要和课时限制,对内容自行取舍、组合。

本书由李素玲教授任主编，胡健任副主编。全书由华中科技大学王敏教授主审。本书的参编人员有：李素玲(第 1、3、5、6、8 章和附录)、胡健(第 4、7 章)、季画(第 2 章)和王红梅(所有 MATLAB 内容)。全书由李素玲统稿。

衷心感谢本书的主审王敏教授和策划编辑毛红兵女士，同时也对在本书编写过程中给予过帮助的各位人员表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2007 年 6 月

目 录

第 1 章 自动控制概论	1
1.1 引言	1
1.1.1 自动控制理论及应用	1
1.1.2 自动控制理论的发展史	1
1.2 自动控制的基本原理	2
1.2.1 自动控制的基本概念	2
1.2.2 自动控制系统的基本组成	3
1.2.3 自动控制的基本方式	4
1.3 自动控制系统的分类	7
1.4 自动控制理论概要	10
1.4.1 对自动控制系统的基本要求	10
1.4.2 典型输入信号	10
1.4.3 本课程的主要任务与控制系统的设计原则	12
本章小结	13
习题	13
第 2 章 控制系统的数学模型	18
2.1 引言	18
2.2 微分方程	18
2.2.1 线性系统微分方程的建立	18
2.2.2 非线性特性的线性化	22
2.2.3 微分方程的求解	24
2.3 传递函数	25
2.3.1 传递函数的定义和性质	25
2.3.2 典型环节及其传递函数	29
2.4 结构图及其等效变换	33
2.4.1 结构图的基本概念	33
2.4.2 结构图的建立	34
2.4.3 结构图的等效变换	36
2.5 信号流图与梅逊公式	42
2.5.1 信号流图的基本概念	43
2.5.2 梅逊公式及其应用	45
2.6 闭环系统的传递函数	47
2.6.1 闭环系统的开环传递函数	47
2.6.2 闭环系统的传递函数	48
2.7 脉冲响应函数	50
2.7.1 基本概念	50

2.7.2 脉冲响应函数的应用	50
2.8 MATLAB 中数学模型的表示	52
2.8.1 传递函数模型(TF 模型)	52
2.8.2 控制系统的零极点模型(ZPK 模型)	53
2.8.3 传递函数的特征根及零极点图	54
2.8.4 控制系统模型的连接	56
本章小结	57
习题	58
第 3 章 控制系统的时域分析	63
3.1 控制系统的时域性能指标	63
3.1.1 暂态性能指标	63
3.1.2 稳态性能指标	64
3.2 一阶系统的时域分析	64
3.2.1 数学模型	64
3.2.2 单位阶跃响应	65
3.2.3 单位脉冲响应	65
3.2.4 单位斜坡响应	66
3.3 二阶系统的时域分析	66
3.3.1 数学模型	67
3.3.2 单位阶跃响应	67
3.3.3 单位脉冲响应	74
3.3.4 具有零点的二阶系统分析	75
3.3.5 二阶系统的性能改善	77
3.4 高阶系统的时域分析	80
3.4.1 典型三阶系统的阶跃响应	80
3.4.2 高阶系统暂态响应分析	81
3.5 线性系统的稳定性分析	85
3.5.1 稳定性的基本概念	85
3.5.2 线性系统稳定的充要条件	85
3.5.3 赫尔维茨稳定判据	86
3.5.4 劳斯判据	87
3.5.5 稳定判据的应用	90
3.6 线性系统的稳态误差	91
3.6.1 误差与稳态误差的定义	91
3.6.2 给定信号作用下的稳态误差与静态误差系数	93
3.6.3 扰动信号作用下的稳态误差与系统结构的关系	96
3.6.4 用动态误差系数法计算系统的稳态误差	97
3.6.5 提高系统稳态精度的措施	99
3.7 用 MATLAB 进行时域响应分析	102
3.7.1 单位阶跃响应	102
3.7.2 单位脉冲响应	103
3.7.3 斜坡函数作用下系统的响应	104
3.7.4 任意函数作用下系统的响应	105

3.7.5 判别系统稳定性	106
本章小结	107
习题	107
第4章 根轨迹分析法	112
4.1 根轨迹的基本概念	112
4.1.1 根轨迹的定义	112
4.1.2 根轨迹方程	113
4.2 绘制根轨迹的基本法则	115
4.3 广义根轨迹	127
4.3.1 零度根轨迹	127
4.3.2 参量根轨迹	129
4.3.3 多回路系统的根轨迹与根轨迹簇	132
4.4 控制系统的根轨迹分析	134
4.4.1 闭环系统零、极点的确定	134
4.4.2 闭环零、极点分布与阶跃响应关系的定性分析	139
4.4.3 增加开环零、极点对根轨迹的影响	140
4.5 用 MATLAB 绘制系统根轨迹图	145
本章小结	149
习题	150
第5章 控制系统的频率特性法	153
5.1 频率特性的基本概念	153
5.1.1 频率特性的定义	153
5.1.2 频率特性和传递函数的关系	155
5.1.3 正弦输入信号下稳态误差的计算	156
5.1.4 频率特性的表示方法	157
5.2 典型环节的频率特性	159
5.3 系统开环频率特性的绘制	171
5.3.1 开环幅相频率特性的绘制(极坐标图)	171
5.3.2 开环对数频率特性的绘制(Bode 图)	173
5.3.3 最小相位系统与非最小相位系统	177
5.4 奈奎斯特稳定判据	178
5.4.1 奈氏判据的数学基础	178
5.4.2 奈奎斯特判据	179
5.4.3 开环传递函数中有积分环节时奈氏判据的应用	180
5.4.4 对数稳定判据	183
5.5 控制系统的相对稳定性	184
5.6 用频率特性分析系统品质	187
5.6.1 闭环频率特性及其特征量	187
5.6.2 频域性能指标与时域性能指标的关系	188
5.6.3 开环对数频率特性与时域响应的关系	191
5.7 系统传递函数的实验确定法	194
5.7.1 用正弦信号相关分析法测试频率特性	194
5.7.2 由 Bode 图确定系统的传递函数	194

5.8 MATLAB在频域分析中的应用	197
5.8.1 Bode图	197
5.8.2 Nyquist图	199
本章小结	201
习题	202
第6章 控制系统的校正	206
6.1 系统校正的基本概念	206
6.1.1 系统的性能指标	206
6.1.2 系统的校正方式	207
6.1.3 基本控制规律	208
6.2 常用校正装置及其特性	211
6.2.1 超前校正装置	211
6.2.2 滞后校正装置	214
6.2.3 滞后-超前校正装置	215
6.3 频率法串联校正	220
6.3.1 串联超前校正	220
6.3.2 串联滞后校正	223
6.3.3 串联滞后-超前校正	226
6.3.4 串联综合法(期望特性法)校正	228
6.4 频率法反馈校正	233
6.4.1 反馈校正对系统特性的影响	233
6.4.2 综合法反馈校正	233
6.5 MATLAB在系统校正中的应用	237
6.5.1 超前校正	237
6.5.2 滞后校正	239
6.5.3 PID校正	241
本章小结	243
习题	244
第7章 线性离散控制系统	249
7.1 离散控制系统概述	249
7.2 信号的采样与保持	251
7.2.1 采样过程的数学描述	251
7.2.2 采样定理	252
7.2.3 零阶保持器	254
7.3 z 变换	256
7.3.1 z 变换的定义	257
7.3.2 z 变换的求法	257
7.3.3 z 变换的基本定理	259
7.3.4 z 反变换	261
7.4 离散系统的数学模型	264
7.4.1 线性常系数差分方程	264
7.4.2 脉冲传递函数	266
7.5 离散系统的稳定性分析	274

7.5.1	离散控制系统稳定的充要条件	274
7.5.2	劳斯稳定判据	274
7.5.3	朱利稳定判据	276
7.6	离散系统的稳态误差分析	278
7.6.1	单位阶跃输入时的稳态误差	279
7.6.2	单位斜坡输入时的稳态误差	280
7.6.3	单位抛物线输入时的稳态误差	280
7.7	离散系统的动态性能分析	282
7.7.1	离散控制系统的时间响应及性能指标	282
7.7.2	闭环极点的分布与动态性能的关系	284
7.8	离散系统的校正	287
7.8.1	校正方式	287
7.8.2	数字控制器的脉冲传递函数	288
7.8.3	最少拍系统与设计	289
7.9	MATLAB在离散系统中的应用	292
7.9.1	连续系统的离散化	293
7.9.2	离散系统的动态响应	294
	本章小结	296
	习题	297
第8章	非线性控制系统	301
8.1	非线性控制系统概述	301
8.1.1	非线性系统的特征	301
8.1.2	非线性系统的分析与设计方法	303
8.2	典型非线性环节及其对系统的影响	303
8.2.1	死区(不灵敏区)特性	303
8.2.2	饱和特性	304
8.2.3	间隙(回环)特性	305
8.2.4	继电特性	305
8.2.5	变放大系数特性	306
8.2.6	带死区的饱和特性	307
8.3	描述函数法	307
8.3.1	描述函数的基本概念	307
8.3.2	典型非线性特性的描述函数	309
8.4	用描述函数法分析非线性系统	314
8.4.1	负倒描述函数	314
8.4.2	奈奎斯特稳定判据在非线性系统中的应用	315
8.4.3	自持振荡分析	316
8.4.4	非线性系统的简化	319
8.5	相平面法	322
8.5.1	相平面的基本概念	322
8.5.2	相轨迹的绘制	323
8.5.3	线性系统的相轨迹	327
8.5.4	奇点与奇线	331

8.5.5 由相轨迹求取时间间隔	334
8.6 非线性系统的相平面法分析	335
8.6.1 非本质性非线性系统	336
8.6.2 本质性非线性系统	337
本章小结	341
习题	341
附录	346
附录 A 常用函数的拉普拉斯变换表	346
附录 B 拉普拉斯变换的一些定理	348
附录 C 常用函数的 z 变换表	350
参考文献	353

第 1 章 自动控制概论

本章主要介绍自动控制的基本概念、自动控制系统的组成与分类、对控制系统的基本要求、自动控制理论的发展简史以及控制系统中常用的典型输入信号。

1.1 引言

1.1.1 自动控制理论及应用

自动控制理论是研究自动控制共同规律的一门学科。目前,已形成工程控制论、生物控制论、经济控制论和社会控制论等多个分支,其中工程控制论是控制论中的一个重要分支。本课程主要研究工程领域的自动控制。

所谓自动控制,就是指在没有人直接参与的情况下,利用控制装置使整个生产过程或设备自动地按预定规律运行,或使其某个参数按要求变化。

当前,自动控制技术已在工农业生产、交通运输、国防建设和航空、航天事业等领域中获得了广泛应用。比如:人造地球卫星的发射成功与安全返回;运载火箭的准确发射,导弹的准确击中目标;数控机床按照预定程序自动地切削工件;化学反应炉的温度或压力自动地维持恒定等等。随着生产和科学技术的发展,自动控制技术已渗透到各种学科领域,成为促进当代生产发展和科学技术进步的重要因素。

1.1.2 自动控制理论的发展史

按自动控制理论发展的不同阶段,通常可将其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 20 世纪 40 年代到 50 年代形成的一门独立学科。它的发展初期,是以反馈理论为基础的自动调节原理,主要用于工业控制。第二次世界大战期间,由于生产和军事的需要,各种控制系统的理论研究和分析方法应运而生。1932 年,奈奎斯特(H. Nyquist)在研究负反馈放大器时创立了著名的稳定性判据,并提出了稳定裕量的概念。在此基础上,1945 年,伯德(H. W. Bode)提出了分析控制系统的一种图解方法,即频率法,从而使研究控制系统的方法由初期的时域分析转到频域分析。1948 年,伊文斯(W. R. Evans)又创立了另一种图解法,即有名的根轨迹法。20 世纪 50 年代中期,经典控制理论又增加了非线性系统理论和离散控制理论。至此,形成了比较完整的经典控制理论体系。

由于空间技术的发展,各种高速、高性能的飞行器相继出现,要求高精度地处理多变量、非线性、时变和自适应等控制问题,20 世纪 60 年代初,又形成了现代控制理论。现代控制理论的基础是:1956 年庞特里亚金提出的极大值原理,1957 年贝尔曼(R. Bellman)提

出的动态规划,1960年卡尔曼(R. E. Kalman)提出的最优滤波理论以及状态空间方法的应用。从20世纪60年代至今的40多年来,现代控制理论又有了巨大的发展,并形成了若干学科分支,如线性控制理论、最优控制理论、动态系统辨识、自适应控制、大系统理论等。

经典控制理论以传递函数为数学工具,研究单输入、单输出自动控制系统的设计问题,主要研究方法有时域分析法、根轨迹法和频率特性法。而现代控制理论则以矩阵理论等近代数学方法作为工具,不仅研究系统的输入、输出特性,而且还研究系统的内部特性。它适于研究多输入、多输出的复杂系统,这些系统可以是线性的、非线性的、定常的或时变的,其主要研究方法为状态空间法。

目前,自动控制理论还在继续发展,正向以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论深入。

1.2 自动控制的基本原理

1.2.1 自动控制的基本概念

在许多工业生产过程或生产设备运行中,为了维持正常的工作条件,往往需要对某些物理量(如温度、流量、压力、液位、位移、电压、转速等)进行控制,使其尽量维持在某个数值附近,或使其按一定规律变化。要满足这种需要,就应该对生产机械或设备进行及时的操作和控制,以抵消外界的扰动和影响。这种操作和控制,既可以用人工操作来完成,又可以用自动控制来完成。

1. 人工控制

如图1-1所示为人工控制水位保持恒定的供水系统。水池中的水源不断地经出水管流出,以供用户使用。随着用水量的增多,水池中的水位必然下降。这时,若要保持水位高度不变,就得开大进水阀门,增加进水量以作补充。因此,进水阀门的开度是根据实际水位的多少进行操作的。上述过程由人工操作实现的正确步骤是:操作人员首先将要求水位牢记在大脑中,然后用眼睛和测量工具测量水池的实际水位,并将实际水位与要求水位在大脑中进行比较、计算,从而得出误差值;再按照误差的大小和正负性质,由大脑指挥手去调节进水阀门的开度,使实际水位尽量与要求水位相等。

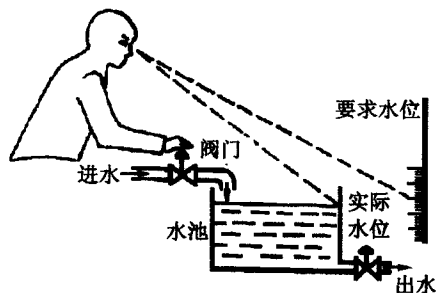


图 1-1 人工控制水位系统

由于图1-1所示系统中有人直接参与控制,故称为人工控制。人工控制的过程是测量、求误差、控制、再测量、再求误差、再控制这样一种不断循环的过程。其控制目的是要尽量减小误差,使实际水位尽可能地保持在要求水位附近。

2. 自动控制

如果能找到某种装置来完全代替图1-1中人所完成的全部职能,那么人就可以不直

接参与控制，从而构成一个自动控制系统。

图 1-2 所示为自动控制水位系统。该系统中，由浮子代替人的眼睛测出实际水位，由连杆代替人的大脑，将实际水位与要求水位进行比较，得出误差，并以位移形式推动电位器的滑臂作上下移动。电位器输出电压的高低和极性充分反映出误差的性质，即误差的大小和方向。电位器输出的微弱电压经放大器放大后用以控制伺服电动机，其转轴经减速器减速后驱动进水阀门，从而控制进水量的大小，使水位保持在要求水位。

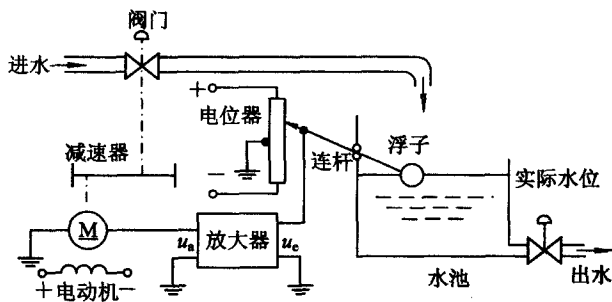


图 1-2 自动控制水位系统

当实际水位等于要求水位时，电位器的滑臂居中， $u_e=0$ 。当出水量增大时，浮子下降，它带动电位器滑臂向上移动，使 $u_e>0$ ，经放大成 u_a 后控制电动机作正向旋转，以增大进水阀门的开度，促使水位回升。只有当实际水位回复到要求水位时，才能使 $u_e=0$ ，控制作用才告终止。

上述的自动控制与人工控制极为相似，只不过把某些装置有机地结合在了一起，以代替人的职能而已。这些装置通常称之为控制器。

3. 控制系统中的常用术语

控制系统的常用术语具体如下：

- (1) 控制装置：外加的控制设备或装置，亦叫控制器。
- (2) 被控对象：被控制的机器、设备或生产过程。
- (3) 被控量(输出量)：表征被控对象工作状态的物理参量。
- (4) 给定量(输入量)：要求被控量所应保持的数值，亦称参考输入。
- (5) 扰动量：系统不希望的外作用，亦称扰动输入。
- (6) 反馈量：由系统输出端取出并反向送回系统输入端的信号。反馈有主反馈和局部反馈之分。
- (7) 偏差量：给定量与主反馈信号之差。
- (8) 自动控制系统：由被控对象和控制器按一定方式连接起来的、完成一定自动控制任务的有机整体。

1.2.2 自动控制系统的基本组成

自动控制系统根据被控对象和具体用途的不同，可以有各种不同的结构形式。但是，从工作原理来看，自动控制系统通常是由一些具有不同职能的基本元件所组成。图 1-3 所示为典型的反馈控制系统的基本组成，图中各元件的职能如下：

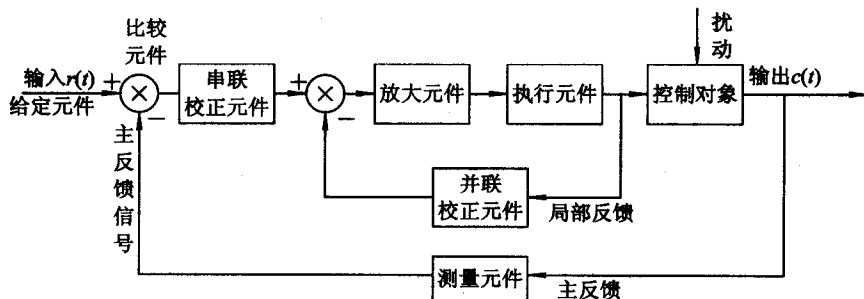


图 1-3 反馈控制系统的基本组成

(1) 给定元件：其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量。给定元件一般为电位器。

(2) 比较元件：其职能是把测量到的被控量实际值与给定元件给出的输入量进行比较，求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。

(3) 测量元件：其职能是检测被控制的物理量。如测速发电机、热电偶、自整角机、电位器、旋转变压器、光电编码器等都可作为测量元件。

(4) 放大元件：其职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大，用来推动执行元件去控制被控对象。如晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大器和功率放大器。

(5) 执行元件：其职能是直接推动被控对象，使其被控量发生变化。用来作为执行元件的有阀门、电动机、液压电动机等。

(6) 校正元件：也叫补偿元件，它是结构或参数便于调整的元部件，用串联或并联（反馈）的方式连接于系统中，以改善系统的性能。最简单的校正元件是电阻、电容组成的无源或有源网络，复杂的则可用计算机构成数字控制器。

1.2.3 自动控制的基本方式

自动控制系统从信号传送的特点或系统的结构形式来看，有两种基本的控制方式，即开环控制和闭环控制。另外，将开环控制和闭环控制结合起来构成复合控制，也是工程中应用较多的一种控制方式。

1. 开环控制

开环控制是指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。开环控制系统的特点是被控量对系统的控制作用不产生影响。图 1-4 所示的直流电动机速度控制系统就是开环控制系统的一例，图 1-5 为该系统的原理方框图。

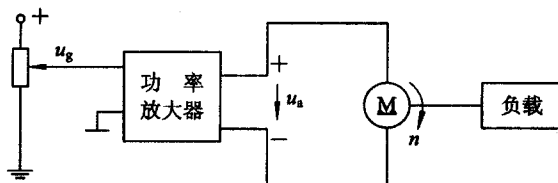


图 1-4 开环直流调速系统

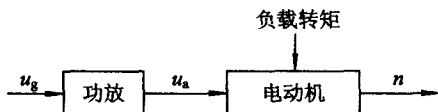


图 1-5 开环直流调速系统方框图

图 1-4 中开环系统的输入量是给定电压 u_g ，输出量是转速 n 。电动机励磁电压为常数，采用电枢控制方式。调整给定电位器滑臂的位置，可得到不同的给定电压 u_g ，放大后得到不同的电枢电压 u_a ，从而控制电机转速 n 。当负载转矩不变时，给定电压 u_g 与电机转速 n 有一一对应关系。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，电动机转速便随之降低而偏离要求值。

开环控制系统虽然线路简单、成本低、工作稳定，但其最大的缺点就是不具备自动修正被控量偏差的能力，因此系统的控制精度较低。

2. 闭环控制

闭环控制是指被控量经反馈后与给定值比较，用其偏差对系统进行控制，亦称反馈控制。闭环控制系统的特点是当被控量偏离期望值而出现偏差时，必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差，使被控量与期望值趋于一致。

对于图 1-4 所示的开环直流调速系统，加入一台测速发电机，并对电路稍作改动，便构成了如图 1-6 所示的闭环直流调速系统。

图 1-6 中，测速发电机由电动机同轴带动，它将电动机的实际转速 n (即系统的输出量) 测量出来，并转换成电压 u_n ，反馈到系统的输入端，与给定电压 u_g 进行比较，从而得出偏差电压 $\Delta u = u_g - u_n$ 。偏差电压 Δu 经电压放大器放大为 u_1 ，再经功率放大器放大成 u_a 后，作为电枢电压用来控制电动机转速 n 。

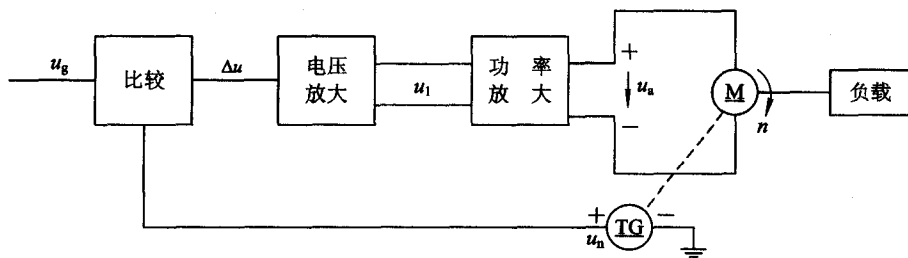


图 1-6 闭环直流调速系统

图 1-7 为闭环直流调速系统的原理方框图。通常，从系统输入量到输出量之间的通道称为前向通道，从输出量到反馈信号之间的通道称为反馈通道。方框图中用符号“⊗”表示比较环节，其输出量等于该环节各个输入量的代数和。因此，各个输入量均需用正负号表明其极性，通常正号可以省略。

图 1-6 所示的直流调速系统，在某个给定电压下电动机稳定运行。一旦受到某些扰动，如负载转矩突然增大，就会引起转速下降，此时系统就会自动地产生如下调整过程：

负载转矩 $T_L \uparrow \rightarrow (\text{电磁转矩 } T_e < T_L) \rightarrow n \downarrow \rightarrow u_n \downarrow \rightarrow \Delta u \uparrow \rightarrow u_1 \uparrow \rightarrow u_a \uparrow \rightarrow n \uparrow$