高等院校精品课程系列教材 省级
“十二五“江苏省高等学校重点教材
江苏省高等学校精品教材

JINGPIN KECHENG

自动控制原理

第2版

主　编　潘　丰　徐颖秦
副主编　熊伟丽　谢林柏
参　编　陶洪峰　陈　珺　楼旭阳

附赠电子教案
http://www.cmpedu.com

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

江苏省高等学校精品教材
“十二五”江苏省高等学校重点教材（编号：2013-1-133）
高等院校精品课程系列教材

自动控制原理

第 2 版

主　编　潘　丰　徐颖秦
副主编　熊伟丽　谢林柏
参　编　陶洪峰　陈　珺　楼旭阳



机 械 工 业 出 版 社

本书从适应教学研究型大学的要求出发，以经典控制理论为主，较系统地介绍了自动控制理论的基本内容，着重于基本概念、基本理论和基本分析方法及典型应用。本书共8章，包括：引论、控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法、控制系统的校正、非线性系统分析、离散控制系统等。本书重点突出，叙述深入浅出，文字简明流畅，实用性强。书中除有一般性的例题和习题外，另有典型实例贯穿教材始终，每章还附有综合性的例题精解以及MATLAB在控制系统分析和设计方面的应用。每章都设有导读和小结，便于学生学习和总结。

本书主要面向自动化类本科生，同时为适应不同专业和不同层次教学的需要，各章所述的基本分析方法尽可能做到相对独立，以便使用者灵活选择。

本书可作为普通高等工科学校自动化、电气工程及其自动化、机械制造及自动化、测控技术与仪器以及系统工程、电力、冶金等专业的“自动控制原理”课程（48～72学时）的教材，也可作为从事自动化方面工作的工程技术人员自学参考用书。

本书配套授课电子课件，需要的教师可登录www.cmpedu.com免费注册、审核通过后下载，或联系编辑索取（QQ：102613723，电话：010-88379753）。

图书在版编目（CIP）数据

自动控制原理/潘丰，徐颖秦主编. —2版. —北京：机械工业出版社，2015.2

高等院校精品课程系列教材

ISBN 978-7-111-49616-8

Ⅰ.①自… Ⅱ.①潘…②徐… 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（2015）第048500号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：时 静 责任编辑：汤 枫 责任校对：刘秀芝

责任印制：李 洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2015年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm · 20.75印张 · 515千字

0001—3500册

标准书号：ISBN 978-7-111-49616-8

定价：45.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

网络服务

机 工 官 网：www.cmpbook.com

机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金 书 网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

前　言

本书第 *1* 版（*2010* 年 *8* 月，机械工业出版社出版，江苏省精品教材）是江南大学自动控制原理课程组为适应自动化专业不断发展的需求而编写的。第 *2* 版是在第 *1* 版的基础上，通过广泛听取使用本教材任课教师和学生的意见，结合专业和学科发展前沿，以及课程组多年来的教学改革成果，并参考了国内外控制理论的经典教材，经反复讨论修订而成。本次修订的主要目的在于通过结构调整和内容充实，进一步强化理论在工程实际中的应用，在叙述上更重视专业知识的拓展与应用。具体表现在以下几个方面：

（*1*）结构模块清晰。每章由导读和小结模块、理论学习模块、自主学习和讨论探究模块、课外实践模块、复习思考题模块“五大模块”组成，既有利于教师讲解，也有益于学生学习。

（*2*）每章后的习题由三部分组成：以基本概念和基本理论为主的思考题、以分析和解决问题为主的计算和分析题，以及以能力提高为主的 *MATLAB* 实践与知识拓展题。多样化的习题便于学生及时总结和复习，更灵活地掌握每一章的知识点。

（*3*）大部分例题和习题都以实际控制系统为例，使得较为抽象的理论具体化，方便学生学习。

（*4*）以“磁盘驱动读取系统”作为典型应用实例，贯穿教材始终，使读者可以灵活应用控制理论，从不同的角度对同一问题进行分析和求解，提高解决实际问题的能力。

（*5*）增加了部分自学内容，如典型实例分析、*MATLAB* 实践与拓展等，以右上角“*”标注。使学生在课时有限的情况下，通过自学相关知识，扩充知识视野。

（*6*）主要面向教学研究型大学自动化类学生，如适当增加一些内容，可适合于研究型大学学生；适当减少一些内容和数学推导，也可适合于教学型大学学生。

（*7*）内容叙述深入浅出、层次分明。既能让大部分学生基本掌握教学内容，也能够满足一些优秀学生深入学习的需求。

（*8*）名词术语全部采用全国自动化名词审定委员会公布的规范名词，并给出了本书主要专业术语的英文对照，以方便学生阅读相关的英文文献。

（*9*）为方便教师教学和学生自学与复习，本书配套出版《自动控制原理学习辅导和习题解答》（第 *2* 版），并向教师提供电子教案。

本书共 *8* 章，主要内容分 *4* 大部分：第一部分包括引论和线性定常连续系统的分析与综合；第二部分阐述非线性系统的基本理论和分析方法；第三部分为线性离散系统的基本理论和分析方法；第四部分为在 *MATLAB* 与 *Simulink* 支持下对控制系统的计算机辅助分析与设计，作为自学内容，设置于各章的最后一节中。

本书由江南大学潘丰教授（第 *1* 章）、徐颖秦副教授（第 *5*、*6* 章）任主编，熊伟丽副教授（第 *2*、*3* 章）、谢林柏教授（第 *8* 章）任副主编，参加编写的人员有陶洪峰副教授（第 *7* 章）、陈珺副教授（第 *4* 章、附录）和楼旭阳副教授（各章节中磁盘驱动读取系统实例部分）。全书由潘丰教授和徐颖秦副教授统稿。本书在编写的过程中，得到了上海大学邹

斌教授、上海理工大学王亚刚教授、中国矿业大学伍小杰教授的指导和帮助，在此一并表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请使用本教材的教师和读者不吝指正，并提出宝贵意见。联系电子邮箱：*xyqwx@163.com*。

编　者

目　录

前言

第 1 章　引论 …… 1

1.1　自动控制系统概述 …… 1

1.1.1　自动控制系统的一般概念 …… 1

1.1.2　开环控制 …… 2

1.1.3　闭环控制 …… 3

1.1.4　闭环控制系统的基本组成 …… 5

1.1.5　自动控制理论的发展 …… 5

1.2　自动控制系统的类型 …… 6

1.2.1　按信号流向划分 …… 6

1.2.2　按输入信号变化规律划分 …… 6

1.2.3　线性系统和非线性系统 …… 6

1.2.4　定常系统和时变系统 …… 7

1.2.5　连续系统和离散系统 …… 7

1.2.6　单输入单输出系统与多输入多输出系统 …… 8

1.3　控制系统性能的基本要求和本课程的主要任务 …… 8

1.3.1　控制系统性能的基本要求 …… 8

1.3.2　本课程的主要任务 …… 9

1.4　自动控制系统实例* …… 10

1.4.1　磁盘驱动读取系统 …… 10

1.4.2　烘烤炉温度控制系统 …… 10

1.4.3　传动控制系统 …… 11

本章小结 …… 12

思考题 …… 12

习题 …… 12

第 2 章　控制系统的数学模型 …… 14

2.1　线性系统的时间域数学模型——微分方程 …… 14

2.1.1　列写系统微分方程的一般方法 …… 14

2.1.2　线性系统的特点 …… 16

2.1.3　线性定常系统微分方程的求解 …… 16

2.1.4　运动的模态* …… 17

2.2　非线性数学模型的线性化* …… 18

2.3　线性系统的复数域数学模型——传递函数 …… 19

2.3.1　传递函数的定义 …… 19

2.3.2　传递函数的基本性质 …… 20

2.3.3　传递函数的常用表达形式 …… 20

2.3.4　典型环节的传递函数 …… 21

2.4　控制系统的结构图 …… 22

2.4.1　结构图的组成和绘制 …… 23

2.4.2　结构图的等效变换和简化 …… 25

2.5　信号流图和梅森增益公式 …… 31

2.5.1　信号流图的组成及性质 …… 31

2.5.2　根据微分方程绘制信号流图 …… 32

2.5.3　根据系统结构图绘制信号流图 …… 32

2.5.4　梅森增益公式 …… 32

2.6　MATLAB 中数学模型的表示* …… 35

2.6.1　传递函数 …… 35

2.6.2　控制系统的结构图模型 …… 35

2.6.3　控制系统的零极点模型 …… 36

本章小结 …… 36

思考题 …… 36

习题 …… 36

MATLAB 实践与拓展题* …… 39

第 3 章　控制系统的时域分析法 …… 40

3.1　系统的时域响应及其性能指标 …… 40

3.1.1　典型输入信号 …… 40

3.1.2　时域响应过程 …… 43

3.1.3　性能指标 …… 43

3.2　一阶系统的时域响应 …… 44

3.2.1　一阶系统的数学模型和结构图 …… 44

3.2.2　一阶系统的单位阶跃响应 …… 45

3.2.3　一阶系统的单位脉冲响应 …… 46

3.2.4　一阶系统的单位斜坡响应 …… 46

3.3　二阶系统的时域响应 …… 47

3.3.1　二阶系统的数学模型和结构图 …… 47

3.3.2　二阶系统的单位阶跃响应 …… 48

3.3.3　二阶系统阶跃响应的性能指标 …… 52

3.4 高阶系统的时域响应 …… 54
3.4.1 高阶系统的时域响应分析 …… 54
3.4.2 闭环主导极点 …… 55
3.5 线性系统的稳定性分析 …… 56
3.5.1 稳定性的概念及定义 …… 56
3.5.2 线性定常系统稳定的充分必要条件 …… 57
3.5.3 线性系统的代数判据——劳斯稳定判据 …… 58
3.5.4 控制系统的相对稳定性 …… 62
3.6 控制系统的稳态误差 …… 63
3.6.1 关于稳态误差的基本概念 …… 63
3.6.2 给定信号作用下的稳态误差（静态误差系数法） …… 64
3.6.3 扰动信号作用下的稳态误差 …… 68
3.6.4 提高系统控制精度的措施 …… 71
3.7 MATLAB 在时域分析中的应用* …… 71
3.7.1 用 MATLAB 求系统的时域响应 … 71
3.7.2 任意函数作用下系统的响应 …… 73
3.7.3 LTI 观测器 …… 74
3.7.4 Simulink 中的时域响应分析举例 …… 76
本章小结 …… 79
思考题 …… 79
习题 …… 79
MATLAB 实践与拓展题* …… 82
第 4 章 控制系统的根轨迹分析法 …… 83
4.1 根轨迹的基本概念 …… 83
4.1.1 根轨迹的定义 …… 83
4.1.2 根轨迹方程及其幅值和相角条件 …… 84
4.2 根轨迹绘制的基本规则 …… 85
4.2.1 绘制根轨迹的基本规则 …… 86
4.2.2 根轨迹绘制例题 …… 97
4.3 广义根轨迹 …… 100
4.3.1 参量根轨迹 …… 101
4.3.2 零度根轨迹 …… 103
4.4 控制系统的根轨迹分析法 …… 106
4.4.1 根轨迹与稳定性分析 …… 106
4.4.2 根轨迹与动态性能分析 …… 107
4.4.3 增加开环零、极点对控制系统性能的影响 …… 108
4.4.4 设计示例：磁盘驱动读取系统 … 111
4.5 MATLAB 在根轨迹绘制中的应用* …… 112
本章小结 …… 114
思考题 …… 114
习题 …… 114
MATLAB 实践与拓展题* …… 116
第 5 章 控制系统的频域分析 …… 118
5.1 频率特性 …… 118
5.1.1 频率特性的基本概念 …… 118
5.1.2 频率特性的求取 …… 122
5.1.3 频率特性的图示法 …… 123
5.2 典型环节的频率特性 …… 124
5.2.1 比例环节 …… 124
5.2.2 积分环节 …… 125
5.2.3 纯微分环节 …… 125
5.2.4 惯性环节 …… 126
5.2.5 一阶微分环节 …… 128
5.2.6 振荡环节 …… 128
5.2.7 二阶微分环节 …… 131
5.2.8 延迟环节 …… 131
5.3 控制系统的开环频率特性 …… 132
5.3.1 开环奈氏图 …… 132
5.3.2 开环 Bode 图 …… 135
5.3.3 最小相位系统和非最小相位系统 …… 137
5.3.4 延迟系统 …… 138
5.3.5 传递函数的实验法确定 …… 138
5.4 奈奎斯特稳定判据 …… 141
5.4.1 引言 …… 141
5.4.2 幅角原理 …… 142
5.4.3 奈氏判据 …… 144
5.4.4 奈氏判据中 N 的简易判断方法 … 146
5.5 稳定裕量 …… 147
5.5.1 相对稳定性 …… 147
5.5.2 两个重要频率 …… 148
5.5.3 两个稳定裕量指标 …… 149
5.5.4 稳定裕量在 Bode 图中的表示 …… 151
5.5.5 相对稳定性与对数幅频特性曲线中频段的关系 …… 151
5.5.6 稳定裕量指标的求解 …… 152

5.6 频率特性与系统性能的关系 …… 154
5.6.1 开环对数频率特性曲线与系统性能的关系 …… 154
5.6.2 开环频域指标与闭环时域指标的关系 …… 156
5.6.3 开环频域指标与闭环频域指标的关系 …… 157
5.7 例题精解* …… 159
5.8 MATLAB 频域特性分析* …… 163
5.8.1 用 MATLAB 绘制奈氏图 …… 163
5.8.2 用 MATLAB 绘制 Bode 图 …… 164
本章小结 …… 166
思考题 …… 166
习题 …… 167
MATLAB 实践与拓展题* …… 171
第 6 章 控制系统的校正 …… 173
6.1 校正的基本概念和方法 …… 173
6.1.1 校正的基本概念 …… 173
6.1.2 常用的校正方法 …… 174
6.1.3 校正的性能指标 …… 175
6.1.4 校正装置及校正目标 …… 176
6.2 串联超前校正 …… 177
6.2.1 超前校正装置及特点 …… 177
6.2.2 超前校正装置的设计 …… 179
6.3 串联滞后校正 …… 182
6.3.1 滞后校正装置及特点 …… 182
6.3.2 滞后校正装置的设计 …… 183
6.4 串联滞后-超前校正 …… 187
6.4.1 滞后-超前校正装置及特点 …… 187
6.4.2 滞后-超前校正装置的设计 …… 188
6.5 PID 控制器 …… 190
6.5.1 比例-积分（PI）控制器 …… 191
6.5.2 比例-微分（PD）控制器 …… 191
6.5.3 比例-积分-微分（PID）控制器 …… 192
6.5.4 PID 控制器的实现 …… 194
6.6 期望频率特性法校正 …… 194
6.6.1 期望开环对数幅频特性曲线的绘制 …… 195
6.6.2 期望特性法串联校正 …… 196
6.7 反馈校正 …… 198
6.7.1 反馈校正的原理 …… 198
6.7.2 反馈校正的设计 …… 199
6.7.3 反馈校正的其他应用 …… 201
6.8 复合校正 …… 202
6.8.1 复合校正的基本概念 …… 202
6.8.2 按扰动补偿的复合校正 …… 203
6.8.3 按输入补偿的复合校正 …… 204
6.9 例题精解* …… 205
6.10 基于 MATLAB 和 Simulink 的系统校正* …… 208
6.10.1 相位超前校正 …… 209
6.10.2 相位滞后校正 …… 211
6.10.3 利用 Simulink 工具箱实现系统校正 …… 213
本章小结 …… 216
思考题 …… 217
习题 …… 219
MATLAB 实践与拓展题* …… 222
第 7 章 非线性系统分析 …… 224
7.1 引言 …… 224
7.2 典型非线性特性 …… 225
7.2.1 常见的几种典型非线性特性 …… 225
7.2.2 非线性系统的特征 …… 228
7.2.3 非线性特性的应用 …… 230
7.2.4 非线性系统的分析方法 …… 231
7.3 描述函数法 …… 232
7.3.1 描述函数的定义及求法 …… 232
7.3.2 典型非线性特性的描述函数 …… 234
7.3.3 非线性系统的稳定性分析 …… 240
7.3.4 自激振荡的分析与计算 …… 241
7.4 相平面法 …… 244
7.4.1 相平面法的基本概念 …… 244
7.4.2 相轨迹图的绘制 …… 245
7.4.3 奇点和奇线 …… 249
7.4.4 用相平面法分析非线性系统 …… 253
7.5 MATLAB 在非线性系统分析中的应用* …… 257
本章小结 …… 263
思考题 …… 263
习题 …… 264
MATLAB 实践与拓展题* …… 267
第 8 章 离散控制系统 …… 268
8.1 引言 …… 268

8.1.1 离散系统的基本概念 …… 268
8.1.2 离散系统的特点 …… 269
8.2 信号的采样与复现 …… 269
8.2.1 采样过程 …… 269
8.2.2 采样定理 …… 270
8.2.3 零阶保持器 …… 272
8.3 z 变换 …… 274
8.3.1 z 变换的定义 …… 274
8.3.2 z 变换的性质 …… 277
8.3.3 z 反变换 …… 280
8.4 离散系统的数学模型 …… 282
8.4.1 离散系统的数学定义 …… 282
8.4.2 脉冲传递函数 …… 284
8.4.3 开环系统脉冲传递函数 …… 286
8.4.4 闭环系统脉冲传递函数 …… 287
8.5 离散系统的性能分析 …… 291
8.5.1 稳态性分析与判断 …… 291
8.5.2 稳态误差及其计算 …… 293
8.5.3 闭环极点与瞬态响应的关系 …… 295
8.5.4 动态性能分析 …… 297
8.6 MATLAB 在离散系统分析中的应用* …… 301
本章小结 …… 303
思考题 …… 303
习题 …… 303
MATLAB 实践与拓展题* …… 306
附录 A 常用函数的拉氏变换表和 z 变换表 …… 307
附录 B MATLAB 和 Simulink 简介 …… 308
附录 C 控制理论中常用术语的中英文对照表 …… 311
参考文献 …… 322

第 1 章　引　　论

【基本要求】

1. 正确理解自动控制的基本概念、任务和控制方式；
2. 掌握负反馈的概念，能对开环控制和闭环控制过程进行简单分析；
3. 掌握闭环控制系统的基本组成和各环节的作用；
4. 正确理解自动控制系统的基本要求；
5. 掌握控制系统的各种分类方法。

过去的一百年是科学和工程技术发展最迅速的一个世纪，人类的许多希望和梦想，被科学和技术变成现实。在现代科学技术的众多领域中，自动控制技术起着越来越重要的作用。从最初的机械转速、位移的控制到工业过程中温度、压力、流量、物位的控制，从远洋巨轮到深水潜艇的控制，从电动假肢到机器人的控制，自动控制技术的应用几乎无处不在。不仅如此，自动控制技术的应用范围已扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他社会生活领域中，自动控制已成为现代社会活动中不可缺少的重要组成部分。所以，很多工程技术人员和科学工作者都希望具备一定的自动控制知识，以能够设计和使用自动控制系统。

自动控制原理主要讲述自动控制的基本理论和分析、设计控制系统的基本方法。本章描述自动控制的基本概念、任务、控制方式、控制系统的基本组成及对闭环控制过程进行简单分析，以建立对本学科的一个较为明确的认识。

1.1　自动控制系统概述

1.1.1　自动控制系统的一般概念

所谓**自动控制**就是在没有人直接操作的情况下，通过控制器使一个装置或过程（统称为控制对象）自动地按照给定的规律运行，使被控变量能按照给定的规律变化。系统是指按照某些规律结合在一起的物体（元部件）的组合，它们互相作用、互相依存，并能完成一定的任务。能够实现自动控制的系统就称为**自动控制系统**。

例如，人造卫星按指定的轨道运行，并始终保持正确的姿态，使它的太阳能电池一直朝向太阳，无线电天线一直指向地球；电网的电压和频率自动地维持不变；金属切削机床的速度在电网电压或负载发生变化时，能自动保持近似不变。以上这些，都是自动控制的结果。

现代数字计算机的迅速发展，为自动控制技术的应用开辟了广阔的前景，使它不仅大量应用于工业、农业、交通管理、空间技术、环境卫生等领域，而且它的概念和分析问题的方法也向其他领域渗透。例如，政治、经济、教学等领域中的各种体系，人体的各种功能，自然界中的各种生物学系统，都可视为是一种控制系统。自动控制系统的广泛应用使生产设备或过程实现自动化，极大地提高了劳动生产率和产品的质量，改善了劳动条件。

自动控制是一门理论性很强的科学技术，一般泛称为“自动控制技术”。把实现自动控制所需的各个部件按一定的规律组合起来，来控制被控对象，这个组合体叫做“控制系统”。分析与综合控制系统的理论称为“控制理论”。

自动控制系统的种类较多，被控制的物理量有各种各样，如温度、压力、流量、电压、转速、位移和力等。组成这些控制系统的元部件虽然有较大的差异，但是系统的基本结构却相类同，且一般都是通过机械、电气、液压等方法代替人工控制。

自动控制的基本方式有三种：开环控制、闭环控制及将二者结合的复合控制。每种控制方式都有各自的特点及不同的适用场合。本节只讨论开环控制与闭环控制，关于复合控制将在第 6 章详细讨论。

1.1.2 开环控制

在这种控制方式中，信号由输入端到输出端的传递是单向的，没有形成一个闭环，故称为**开环控制**。按这种控制方式组成的系统称为**开环控制系统**，这类系统的特点是系统的输出量不会对输入量产生任何影响。开环控制系统可以按给定值控制方式组成，也可以按扰动控制方式组成。

首先来分析图 1-1 所示的直流电动机转速开环控制系统。本例中的被控对象为直流电动机 M，GT 和 VT 分别为触发器和晶闸管整流装置，而预定的规律为“电动机的转速 n 维持预期值不变”。转速 n 的预期值与电位器 RP_1 上的给定值 U_0 有着对应关系。把电位器上的电压信号称为**输入量**或**给定量**，电动机的转速 n 称为**输出量**或**被控量**。输入量对应期望的输出量（如 10V 对应 1000r/min），自动控制的过程就是力图使实际的输出量与期望的输出量相等。

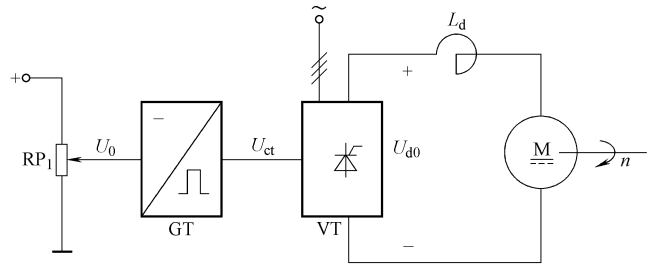


图 1-1　直流电动机转速开环控制系统原理

在实际工作中，总有各种各样的因素会影响到控制过程。在图 1-1 所示的系统中，负载的变化、电网电压的波动等都会引起电动机转速的变化。把这些妨碍控制过程顺利进行的因素称为**扰动**。一个良好的控制系统，应将扰动所引起的输出量的变化限制在尽可能小的范围内。图 1-2 是用框图形式表示的转速开环控制系统。从图中可以看出，输出量与输入量之间是单向的联系。因而，对扰动所引起的输出的变化，系统没有调节或控制作用。

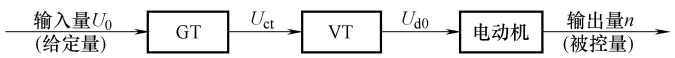


图 1-2　转速开环控制系统框图

图 1-3 为按给定值控制的开环控制系统框图的一般形式。这种控制比较简单，控制作用

直接由系统的输入量产生，系统对于可能的干扰及工作过程中特性参数的变化都没有自动补偿的作用，因而控制的精度完全取决于元件及校准的精度。由于其结构简单、调整方便，在精度要求不高或扰动影响较小的场合还是适用的，如一些自动化的流水线、数控车床、自动售货机等多为这类开环控制系统。



图 1-3　开环控制系统框图的一般形式

1.1.3　闭环控制

考察一下在人的协助下系统是如何克服扰动的影响，实现按预定的规律（维持转速 n 恒定）运行的。为了比较转速的实际值与预期值是否相等，需要对转速进行测量。假设在电动机上有一个转速表，当人眼观察到转速的实际值时，会将其与头脑中的预期值进行比较。若二者不相等，则调节电位器 RP_1 触头的位置，改变整流装置的输出电压 U_{d0}，从而调节电动机的转速 n。若转速 n 比预期值小，则向上调节电位器触头，增大整流装置输出电压 U_{d0}，则 n 也会相应地增大；反之，若 n 比预期值大，则反方向调节。这一过程可以用图 1-4 所示的框图来展示。

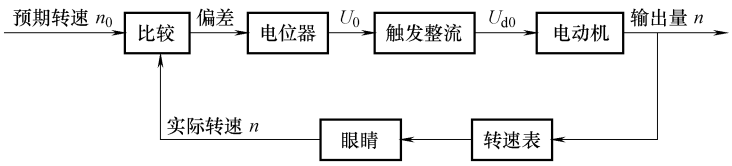


图 1-4　有人参与调节时的转速控制系统框图

比较图 1-2 与图 1-4 可以发现，后者中存在着比较环节。由于这一环节的存在，一旦输出发生变化，会反过来影响到系统的输入端，产生相应的调节（控制）作用。但是，这一控制作用是通过人来实现的，它是一个人工控制系统。

系统对转速 n 的变化之所以具有调节作用，是由于有比较环节的存在。也就是说，输出的变化会反过来影响到系统的输入端，从而在人脑中产生一个偏差信号。在偏差信号的控制作用下，输出会朝着反方向变化，即朝着减小偏差的方向运动。将输出送回到输入端并与输入量相比较的过程称为**反馈**，相应的系统称为**反馈控制系统**。

反馈控制是自动控制系统最基本的控制方式，也是应用最广泛的控制方式。**反馈控制原理**的实质就是利用偏差来控制偏差。从信号的流向来看，反馈控制系统形成了一个闭环，因此，反馈控制也称为**闭环控制**。

在图 1-4 中，将人所完成的工作由机器来代替，就可以使之成为一个真正的自动控制系统。首先，要对输出量进行测量，然后将测量信号与输入量进行比较，这两个量应该具有同一量纲。由于转速之间不容易直接比较大小，因此，将输入与输出（即预期值与实际值）转换成相应的电压信号。测量的过程可以用测速发电机 TG 来完成，比较的过程可以用集成运算放大器来实现。由此，可以得到如图 1-5 所示的转速闭环控制系统。

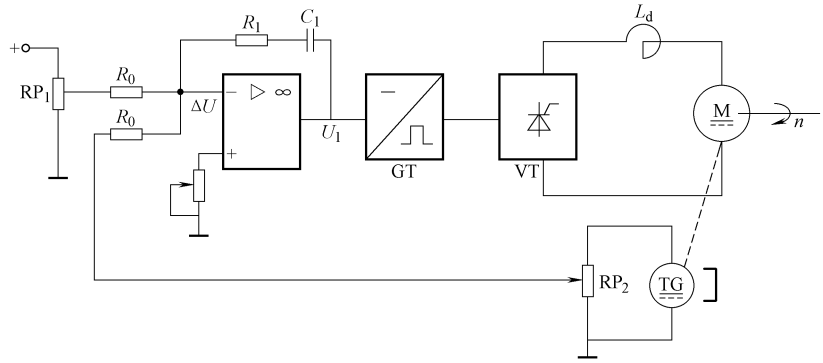


图 1-5　转速闭环控制系统原理

考察图 1-5 所示的反馈控制系统可以发现，引入反馈以后，得到了偏差信号 ΔU，然后由 ΔU 的控制作用使系统朝着减小偏差的方向运动。具体地说，由于 ΔU 的存在，从而改变了 U_1的值。从数学本质上来说，就是根据 ΔU 得到一个合适的作用于执行元件的信号（此处为 U_1），驱动被控对象运动以减小偏差。作为控制器来说，实质上完成的就是一种运算（或称为**控制规律**）。它可以由计算机来实现，也可以由专用的芯片或分立的模拟器件来实现。

转速闭环控制系统框图如图 1-6 所示。图中，用符号“○”表示比较环节。比较单元的正负符号表示输入与反馈的极性，正号可以不写。若反馈信号的极性与输入相反，则称为**负反馈**；若二者极性相同，则称为**正反馈**。只有在负反馈的情况下，系统才对各种扰动及元件参数的变化具有调节作用。一般情况下，提到反馈时都是指负反馈。

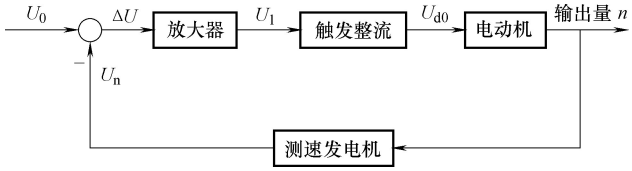


图 1-6　转速闭环控制系统框图

图 1-7 所示为闭环控制系统框图的一般形式。由输入到输出的通道称为**前向通道**，由输出经反馈到输入的通道称为**反馈通道**。

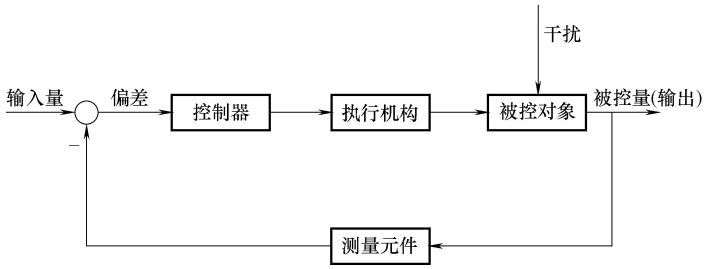


图 1-7　闭环控制系统框图的一般形式

如前所述，反馈控制方式是按偏差进行控制的，其特点是对反馈环内前向通道中的各种扰动都具有抑制作用。但是，对于给定量本身的误差及反馈通道中的扰动，系统不具有调节

作用。从这一角度来说，反馈控制系统的精度取决于给定精度及检测元件的精度。

和开环控制系统比较，闭环控制系统有较高的控制精度，但是结构要复杂得多，系统的分析与设计也相应比较麻烦。可以说，闭环控制系统是以增加系统的复杂程度来换取系统某些方面性能的提高。在设计自动控制系统时，要根据具体的工艺要求，综合考虑技术与经济指标，不能一味追求性能上的高标准。

1.1.4 闭环控制系统的基本组成

一个典型的反馈控制系统的基本组成可以用图 1-8 所示的框图表示。将组成系统的元件按在系统中的职能来划分，主要有以下几种。

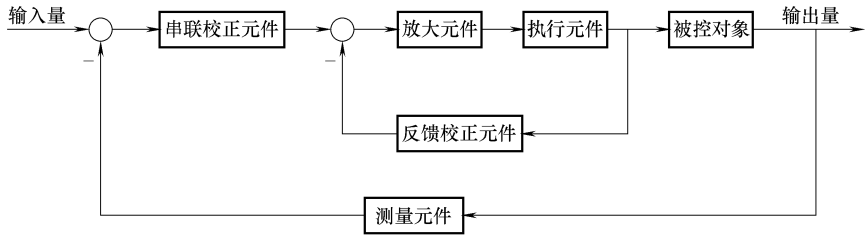


图 1-8 典型反馈控制系统的基本组成

1）给定元件：给出与期望输出对应的输入量。

2）比较元件：求输入量与反馈量的偏差，常采用集成运算放大器（简称集成运放）来实现。

3）放大元件：由于偏差信号一般较小，不足以驱动负载，故需要放大元件，包括电压放大及功率放大。

4）执行元件：直接驱动被控对象，使输出量发生变化。常用的有电动机、调节阀、液压马达等。

5）测量元件：检测被控量并转换为所需要的电信号。在控制系统中常用的有用于速度检测的测速发电机、光电编码盘等；用于位置与角度检测的旋转变压器、自整机等；用于电流检测的互感器及用于温度检测的热电偶等。这些检测装置一般都将被检测的物理量转换为相应的连续或离散的电压或电流信号。

6）校正元件：也叫补偿元件，是结构与参数便于调整的元件，以串联或反馈的方式连接在系统中，完成所需的运算功能，以改善系统的性能。根据在系统中所处的位置不同，可分别称为串联校正元件和反馈校正元件。

1.1.5 自动控制理论的发展

自动控制理论是理论性较强的工程技术科学，它的发展与数学及计算机的发展联系非常紧密。数学的发展为控制理论提供了理论上的可行性，而计算机的发展为控制系统的具体实现提供了强有力的支持。通常将控制理论划分为**经典控制理论**与**现代控制理论**两大部分。

经典控制理论又称为古典控制理论，是在二次世界大战前后，为适应军事及工业控制的需要逐步发展起来的完整的理论体系。经典控制理论主要以传递函数为工具和基础，以频域法和根轨迹法为核心，研究单变量控制系统的分析和设计。经典控制理论在 20 世纪 50 年代

就已经发展成熟，至今在工程实践中仍得到广泛的应用。

20 世纪 60 年代，为适应航空航天技术的发展，自动控制理论迎来了新的发展阶段——现代控制理论。现代控制理论从 1960 年开始得到迅速发展。它以状态空间方法作为标志和基础，研究多变量控制系统和复杂系统的分析和设计，以满足军事、空间技术和复杂的工业领域的控制要求。

目前，控制理论正朝着以控制论、信息论、仿生学为基础的**智能控制理论**方向发展。现代控制理论的发展并不意味着经典控制理论已经过时了，不同的理论有着不同的适用范围。同时，随着数学与计算机的发展，经典控制理论在其本身范畴内的研究也在不断地深入。

本书将只讨论经典控制理论，研究的系统主要是反馈控制系统。

1.2 自动控制系统的类型

自动控制系统的分类方法较多，常见的有以下六种。

1.2.1 按信号流向划分

在前面的讨论中可以看出，不同控制方式的系统，信号的流向是不同的。故按信号的流向，可以将系统分为开环控制系统、闭环控制系统及复合控制系统。

1.2.2 按输入信号变化规律划分

系统输入信号设定了系统预期的运行规律。输入信号的变化规律不同，对相应的控制系统的要求也就不同。按系统输入信号的变化规律可以将系统划分为恒值控制系统与随动控制系统。

1. 恒值控制系统

此类控制系统的输入信号为一个常值，要求输出信号也为一个常值。系统在运行过程中，由于各种扰动因素的影响，总会使实际输出值与预期值之间产生偏差。因此，恒值控制系统分析与设计的重点就在于系统的抗干扰性能，研究各种扰动对输出的影响及抗干扰的措施。前述的电动机调速系统即为典型的恒值控制系统。在工业控制中，如果被控量是温度、流量、压力、液位等生产过程参量时，这种控制系统则称为**过程控制系统**，它们大多数属于恒值控制系统。

2. 随动控制系统

此类系统的输入信号是预先未知的随时间任意变化的函数，要求输出量以一定的精度和速度跟随输入量的变化而变化。因此，随动控制系统的分析与设计重点就在于系统的跟随性能——快速、准确地复现输入信号。此时，扰动的影响是次要的。例如，雷达跟踪系统、电压跟随器等就是典型的随动系统。在随动系统中，如果输出量是机械位移或其导数时，这类系统称为**伺服系统**。

1.2.3 线性系统和非线性系统

同时满足叠加性与均匀性（又称为齐次性）的系统称为**线性系统**。所谓叠加性是指当几个输入信号共同作用于系统时，总的输出等于每个输入单独作用时产生的输出之和；均匀

性是指当输入信号增大若干倍时，输出也相应增大同样的倍数。

若以符号 $T[\cdot]$ 表示系统输入与输出之间的关系，则在输入信号 $r(t)$ 作用下，系统的输出 $c(t)$ 可表示为

$$c(t) = T[r(t)] \tag{1-1}$$

借用这种形式，可以对线性系统加以描述。

设

$$c_1(t) = T[r_1(t)], \quad c_2(t) = T[r_2(t)] \tag{1-2}$$

叠加性可表示为

$$T[r_1(t) + r_2(t)] = T[r_1(t)] + T[r_2(t)] = c_1(t) + c_2(t) \tag{1-3}$$

均匀性可表示为

$$\begin{aligned} T[a_1 r_1(t)] &= a_1 T[r_1(t)] = a_1 c_1(t) \\ T[a_2 r_2(t)] &= a_2 T[r_2(t)] = a_2 c_2(t) \end{aligned} \tag{1-4}$$

式中，a_1 与 a_2 为两个任意的常数。也可以将上述两点统一表示为（叠加原理）

$$T[a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t)] = a_1 T[r_1(t)] + a_2 T[r_2(t)] = a_1 c_1(t) + a_2 c_2(t) \tag{1-5}$$

对于线性连续控制系统，可以用线性的微分方程来表示。

不满足叠加性与均匀性的系统即为**非线性系统**。显然，控制系统中只要有一个元件的特性是非线性的，该系统即为非线性的控制系统。其特性要用非线性的微分或差分方程来描述。这类方程的特点是系数与变量有关，或者方程中含有变量及其导数的高次幂或乘积项。

严格来说，实际中不存在线性系统，因为实际的物理系统总是具有不同程度的非线性，如放大器的饱和特性、齿轮的间隙、伺服电动机的死区及摩擦特性等。非线性控制系统的研究目前还没有统一的方法，但对于非线性程度不太严重的系统，可在一定范围内将其近似为线性系统进行研究。

1.2.4 定常系统和时变系统

如果系统的参数不随时间而变化，则称此类系统为**定常系统**（或称为时不变系统）；反之，若系统的参数随时间改变，则称为**时变系统**。

对于定常系统，由于系统参数不随时间变化，因此，在同样的起始状态下，系统的输出响应与输入信号作用于系统的时刻无关，即

$$T[r(t - t_0)] = c(t - t_0) \tag{1-6}$$

此表达式的含义为：输入信号延迟时间 t_0，则输出也同样延迟时间 t_0，输出波形形状不变。

时变系统由于系统的参数随时间改变，因此，此类系统的输出响应与输入信号作用于系统的时刻有关。

1.2.5 连续系统和离散系统

为讨论系统的**连续性**与**离散性**，先要对信号的连续性与离散性加以定义。将自动控制系统中随时间变化的物理量统称为**信号**。按照时间函数取值的连续性与离散性可将信号划分为连续时间信号与离散时间信号（简称为**连续信号**与**离散信号**）。若在所讨论的时间间隔内，除若干个不连续的点外，对于任意时间值都有确定的函数值，此信号就称为连续信号。而离

散信号在时间上是离散的，只在规定的瞬时给出函数值，在其他时间没有定义，因此，离散信号可以认为是一组序列值的集合。除了时间上的连续与离散外，信号的幅值也可以是连续或离散的（只能取某些规定的值）。对于连续信号，若幅值也是连续的，则称为**模拟信号**。在一般情况下，往往对模拟信号和连续信号不加以区分。对于离散信号，若幅值是连续的，则称为**采样信号**；若幅值是离散的，则称为**数字信号**。在自动控制系统中，采样信号都是在连续信号的基础上经过采样后得到的，对采样信号进行量化处理，就可以得到适于计算机控制的数字信号。

根据系统信号的不同特征，可以对自动控制系统加以分类。如果系统中的各变量都是连续信号，则称该系统为**连续（时间）系统**；如果在系统的一处或几处存在离散信号，则称该系统为**离散（时间）系统**。计算机控制系统和采样控制系统即为典型的离散系统，前面所讨论的电动机调速系统则为连续系统。

连续系统常用微分方程来描述，离散系统则采用差分方程来描述。对于两类系统的分析与综合，在理论与方法上都具有平行的相似性。对于线性定常的连续系统，其数学工具为建立在拉氏变换基础上的传递函数；对于线性定常离散系统，其数学工具为建立在 z 变换基础上的脉冲传递函数。这两种分析方法都是在变换域内进行的。

1.2.6 单输入单输出系统与多输入多输出系统

单输入单输出系统（SISO）也称为**单变量系统**，系统的输入量与输出量各为一个。经典控制理论主要就是研究这一类系统。

多输入多输出系统（MIMO）也称为**多变量系统**，系统的输入量与输出量多于一个。现代控制理论适用于这类系统的分析与综合。其数学工具为建立在线性代数基础上的状态空间法，这种方法是在时间域内进行的，而时域分析法对控制过程来说是最直接的。

1.3 控制系统性能的基本要求和本课程的主要任务

对控制系统性能的基本要求是由控制系统所需完成的任务决定的。从各种具体的要求中可以抽象出对控制系统的一般要求，从而有利于系统的设计与校正。

1.3.1 控制系统性能的基本要求

从自动控制系统所要完成的任务来说，总是希望系统的输出与输入在任何时刻都完全相等。但是，这只是一种理想的情况。在实际系统中，总是有各种惯性（如机械惯性与电磁惯性）的存在，使得系统中各物理量的变化不可能在瞬时完成。在给定或扰动的作用下，输出要跟踪复现输入信号有一个时间过程，称为**过渡过程**（或称暂态过程、动态过程、动态响应）。系统要能正常地工作，过渡过程应趋于一个平衡状态，即系统的输出应收敛于与输入信号相对应的期望值（或期望的曲线上）。当过渡过程结束后，系统输出量复现输入信号的过程，称为**稳态过程**（或称稳态响应）。对控制系统性能的基本要求即体现在这两个过程中，系统的性能指标通常也分为动态性能指标与稳态性能指标。在工程应用中，可以归结为**稳定性**（长期稳定性）、**快速性**（相对稳定性）和**准确性**（精度）三方面来评价控制系统的总体性能。