应用型本科规划教材

PRINCIPLES OF AUTOMATIC CONTROL

# 自动控制原理

主　编　刘勤贤

副主编　王培良　郭永洪

沈晓群　罗小平

浙江大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

应用型本科规划教材

# 自 动 控 制 原 理

主　编　刘勤贤
副主编　王培良　郭永洪
　　沈晓群　罗小平

浙江大學出版社

## 内 容 提 要

本书着重介绍经典控制理论的基本概念、基本原理和基本方法，内容主要包括自动控制系统的基本概念、线性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、采样控制系统（含 $Z$ 变换）、非线性控制系统、状态空间分析。为了方便使用，还介绍了拉普拉斯变换以及 MATLAB 软件在系统分析和设计中的具体应用。

本书适合应用型本科电力系统及自动化、自动化、机械工程及自动化、测控技术等相关专业人才培养使用，也可供有关工程技术人员参考。

**图书在版编目（CIP）数据**

自动控制原理 / 刘勤贤主编 . —杭州 : 浙江大学出版社，
2009 .7
应用型本科自动化专业规划教材
ISBN 978-7-308-06621-1

Ⅰ .自 … Ⅱ .刘 … Ⅲ .自动控制原理—高等学校—教材
Ⅳ .TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 024345 号

**自动控制原理**

刘勤贤　主编

| | |
|---|---|
| **丛书策划** | 樊晓燕　王　波 |
| **责任编辑** | 王　波 |
| **文字编辑** | 王元新 |
| **封面设计** | 刘依群 |
| **出版发行** | 浙江大学出版社<br>（杭州市天目山路 148 号　邮政编码 310028）<br>（网址 : http : //www .zjupress .com） |
| **排　　版** | 杭州中大图文设计有限公司 |
| **印　　刷** | 杭州杭新印务有限公司 |
| **开　　本** | 787mm×1092mm　1/16 |
| **印　　张** | 17.5 |
| **字　　数** | 426 千 |
| **版 印 次** | 2009 年 7 月第 1 版　2009 年 7 月第 1 次印刷 |
| **印　　数** | 0001—3000 |
| **书　　号** | ISBN 978-7-308-06621-1 |
| **定　　价** | 29 .00 元 |

**版权所有　翻印必究　　印装差错　负责调换**
浙江大学出版社发行部邮购电话（0571）88925591

应用型本科院校自动化专业规划教材

# 编　委　会


**主　任**　宋执环

**委　员**　（以姓氏笔画为序）

卫　东　马修水　王培良　石松泉

刘勤贤　那文波　任国海　邵世凡

肖　铎　庞文尧　胡即明

# 前　言

本教材是专为本科应用型人才培养而编写的。在编写过程中，我们总结了多年来的教学经验，参考了有关书籍和文献，并结合自己在实际教学工作中的体会，努力在应用能力培养方面下工夫。编写中力求突出以下特点：

1.从系统到理论，再到系统的思路。理论与实践紧密结合，先感性(即系统)，后理性(即抽象)，最后再回到实际(系统)。从物理概念入手，理论以够用为度。

2.以介绍基本理论、基本概念和基本方法为主，努力做到深入浅出、循序渐进，力求用实例把抽象的理论与工程实际结合起来，努力把抽象的概念说清楚、讲透彻。

3.把计算机的工具作用贯穿全书，将MATLAB软件在系统研究、设计中的作用和相应工具箱的使用方法与课程内容恰当结合，使学生学会用Matlab软件来学习控制系统分析和设计方法。

第1章结合工程应用实例，介绍自动控制和自动控制系统、自动控制系统的一般组成、系统性能的评价等自动控制的基本概念；第2章介绍数学工具——拉普拉斯变换；第3章在介绍实际控制系统的基础上提出如何建立数学模型；第4、5、6章介绍自动控制系统的时域、根轨迹、频域分析法，对连续时间控制系统的三大性能指标，即稳定性、准确性、快速性进行分析；第7章介绍应用频域法进行系统设计；第8章简单介绍非线性系统的分析方法；第9章分别以一个恒值控制系统和一个随动系统为例，把前述各章介绍的系统分析及设计方法作了一遍演练，以加深读者对原理的理解；针对微机应用越来越广泛的实际，教材第10章介绍采样控制系统的分析及设计方法；第11章对过程控制系统中涉及的状态空间理论进行了简单介绍。全书将MATLAB在控制系统分析和设计中的具体应用根据内容安排在相应的章节中，教师可根据实际需要对教材内容进行取舍。

参加本书编写的人员有王培良(第5、8章)、郭永洪(第1、11章)、沈晓群(第3章)、罗小平(第7章)、樊慧丽(第4章)、杜鹏英(第10章)、崔家林(第6章)、李楠(第2章)，刘勤贤编写第9章并统稿。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

浙江大学宋执环教授对编写大纲提出了宝贵的建议,王慧教授仔细审阅了教材初稿,这里向为教材的编写和出版给予帮助的同志表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中定有不足和错误之处,恳请广大读者提出宝贵意见。

编 者

2009年6月

# 总　序

近年来我国高等教育事业得到了空前的发展,高等院校的招生规模有了很大的扩展,在全国范围内涌现了一大批以独立学院为代表的应用型本科院校,这对我国高等教育的全方位、持续、健康发展具有重大的意义。

应用型本科院校以着重培养应用型人才为目标,开设的大多是一些针对性较强、应用特色明确的本科专业,但目前所采用的教材大多是直接选用普通高校的那些适用于研究型人才培养的教材。这些教材往往过分强调系统性和完整性,偏重基础理论知识,而对应用知识的传授却不足,难以充分体现应用型本科人才的培养特点,无法直接有效地满足应用型本科院校的实际教学需要。

浙江大学出版社认识到,高校教育层次化与多样化的发展趋势对出版社提出了更高的要求,即无论在选题策划,还是在出版模式上都要进一步细化,以满足不同层次的高校的教学需求。应用型本科院校是介于研究型本科与高职之间的一个新兴办学群体,它有别于普通的本科教育,但又不能偏离本科生教学的基本要求,因此,教材编写必须围绕本科生所要掌握的基本知识与概念展开。但是,培养应用型与技术型人才又是应用型本科院校的教学宗旨,这就要求教材改革必须有利于进一步强化应用能力的培养。

在人类科技进步的历史进程中,自动化科学和技术的产生改变了人们的生产方式和工作方式,控制和反馈思想则一直影响着人们的思维方式。蒸汽机和电机的应用,延伸了人的体力劳动,推动了自动化技术的发展,催生了工业革命,使人类社会通过工业化从农业社会发展到工业社会。而现代信息技术的应用,则延伸了人的脑力劳动,引发了以数字化、自动化为主要特征的新的工业革命,使人类社会通过信息化从工业社会发展到信息社会。信息时代的自动化技术有了更加宽广的应用领域和难得的发展机遇。为了满足当今社会对自动化专业应用型人才的需要,国内百余所应用型本科院校都设置了自动化及相关专业。

针对这一情况,浙江大学出版社组织了十几所应用型本科院校自动化类专业的教师共同开展了“应用型本科自动化专业教材建设”项目的研究,共同研究

目前教材的不适应之处，并探讨如何编写能真正做到“因材施教”、适合应用型本科层次自动化类专业人才培养的系列教材。在此基础上，组建了编委会，确定共同编写“应用型本科院校自动化专业规划教材”系列。

本套规划教材具有以下特色：

在编写的指导思想上，以“应用型本科”学生为主要授课对象，以培养应用型人才为基本目的，以“实用、适用、够用”为基本原则。“实用”是对本课程涉及的基本原理、基本性质、基本方法要讲全、讲透，概念准确清晰。“适用”是适用于授课对象，即应用型本科层次的学生。“够用”就是以就业为导向，以应用型人才为培养目的，讲透关键知识点，达到理论够用，不追求理论深度和内容的广度。突出实用性、基础性、先进性，强调基本知识，结合实际应用，理论与实践相结合。

在教材的编写上重在基本概念、基本方法的表述。编写内容在保证教材结构体系完整的前提下，注重基本概念，追求过程简明、清晰和准确，重在原理，压缩繁琐的理论推导。做到重点突出、叙述简洁、易教易学。还注意掌握教材的体系和篇幅能符合各学院的计划要求。

在作者的遴选上强调作者应具有丰富的应用型本科教学经验，有较高的学术水平并具有教材编写经验。为了既实现“因材施教”的目的，又保证教材的编写质量，我们组织了两支队伍，一支是了解应用型本科层次的教学特点、就业方向的一线教师队伍，由他们通过研讨决定教材的整体框架、内容选取与案例设计，并完成编写；另一支是由本专业的资深教授组成的专家队伍，负责教材的审稿和把关，以确保教材质量。

相信这套精心策划、认真组织、精心编写和出版的系列教材会得到广大院校的认可，对于应用型本科院校自动化专业的教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

**系列教材编委会主任**

**宋执环**

2008 年 11 月 12 日

# 目　录

**第 1 章　绪　论** …… 1

1.1　引言 …… 1
1.2　随动系统与过程控制系统 …… 3
1.2.1　位置随动系统 …… 3
1.2.2　过程控制系统 …… 4
1.3　开环控制与闭环控制 …… 5
1.3.1　开环控制 …… 6
1.3.2　闭环控制 …… 7
1.4　自动控制系统的基本组成与分类 …… 9
1.4.1　自动控制系统的基本组成 …… 9
1.4.2　自动控制系统的分类 …… 10
1.5　对自动控制系统的基本要求 …… 11
1.5.1　稳定性 …… 11
1.5.2　稳态精度 …… 11
1.5.3　响应速度 …… 12
1.6　MATLAB 软件简介 …… 12
1.6.1　MATLAB 的安装与启动 …… 12
1.6.2　MATLAB 指令窗 …… 13
1.6.3　MATLAB 中的数值表示、变量命名、运算符号和表达式 …… 14
1.6.4　应用 MATLAB 进行数值运算 …… 15
1.6.5　应用 MATLAB 绘制二维图线 …… 15
1.6.6　应用 MATLAB 处理传递函数的变换 …… 16
习题 …… 18

**第 2 章　拉普拉斯变换及其应用** …… 20

2.1　拉普拉斯变换的定义 …… 20
2.2　拉普拉斯变换的基本性质 …… 21
2.3　拉普拉斯反变换 …… 24

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2.4 拉普拉斯变换应用实例…… 26
习题 …… 27

**第 3 章 控制系统的数学模型** …… 29

3.1 控制系统的微分方程…… 29
3.1.1 机械系统…… 30
3.1.2 电路系统…… 31
3.1.3 机电系统…… 31
3.2 传递函数…… 33
3.2.1 传递函数的定义…… 33
3.2.2 传递函数的性质…… 34
3.2.3 传递函数的求法…… 35
3.2.4 典型环节的传递函数…… 36
3.2.5 负载效应…… 40
3.3 控制系统的结构图…… 42
3.3.1 结构图的基本概念…… 42
3.3.2 结构图的等效变换和简化…… 43
3.3.3 闭环控制系统的传递函数…… 47
3.4 梅森公式及其应用…… 48
习题 …… 50

**第 4 章 线性控制系统的时域分析** …… 26

4.1 引言…… 54
4.1.1 典型输入信号…… 54
4.1.2 动态性能与稳态性能…… 54
4.2 典型系统的时域分析…… 56
4.2.1 一阶系统时域分析…… 57
4.2.2 二阶系统时域分析…… 57
4.2.3 高阶系统时域分析…… 59
4.3 线性系统稳定性分析…… 66
4.3.1 稳定的基本概念…… 67
4.3.2 劳斯(Routh)稳定判据 …… 67
4.3.3 稳定判据的应用…… 67
4.4 线性系统的稳态误差分析…… 70
4.4.1 误差与稳态误差的基本概念…… 71
4.4.2 系统的类型…… 71
4.4.3 典型输入信号作用下的稳态误差…… 72
4.4.4 扰动作用下的稳态误差…… 72
4.4.5 减小或消除稳态误差的措施…… 74

4.5　MATLAB 在时域分析中的应用 …… 75
4.5.1　MATLAB 中的数学模型表示 …… 76
4.5.2　时域响应分析 …… 76
习题 …… 76

**第 5 章　线性系统的根轨迹分析法** …… 79

5.1　根轨迹的概念 …… 82
5.1.1　系统的根轨迹 …… 82
5.1.2　根轨迹的幅值条件和相角条件 …… 82
5.2　根轨迹分析法 …… 83
5.2.1　绘制根轨迹的基本规则 …… 84
5.2.2　参数根轨迹和多回路系统根轨迹 …… 84
5.2.3　正反馈回路和非最小相位系统根轨迹 …… 89
5.3　基于 MATLAB 的根轨迹分析法 …… 89
5.3.1　利用 MATLAB 绘制根轨迹 …… 90
5.3.2　基于根轨迹的系统性能分析 …… 90
习题 …… 94

**第 6 章　线性系统的频域分析法** …… 95

6.1　频率特性的概念及其物理意义 …… 98
6.1.1　频率响应 …… 98
6.1.2　频率特性 …… 98
6.2　频率特性的图示 …… 99
6.2.1　奈奎斯特图 …… 100
6.2.2　伯德图 …… 101
6.3　典型环节的频率特性 …… 101
6.3.1　比例环节 …… 102
6.3.2　积分环节 …… 102
6.3.3　微分环节 …… 103
6.3.4　惯性环节 …… 104
6.3.5　振荡环节 …… 104
6.3.6　一阶微分环节和二阶微分环节 …… 106
6.3.7　时滞环节 …… 109
6.4　开环系统的频率特性绘制 …… 110
6.4.1　开环系统伯德图的绘制 …… 111
6.4.2　最小相位系统与非最小相位系统 …… 111
6.5　频域稳定性分析 …… 113
6.5.1　奈奎斯特稳定判据 …… 114
6.5.2　控制系统的稳定裕度 …… 114

6.6 开环频域指标与时域指标之间的关系 …… 122
6.6.1 控制系统的主要性能指标 …… 128
6.6.2 开环频域指标和时域指标的关系 …… 128
6.7 MATLAB 在系统频域分析中的应用 …… 129
6.7.1 传递函数模型 *tf* 对象 …… 132
6.7.2 伯德图的绘制 …… 132
6.7.3 奈氏图的绘制 …… 132
习题 …… 134

**第 7 章 线性控制系统的校正方法** …… 136

7.1 引言 …… 143
7.2 串联校正 …… 143
7.2.1 超前校正 …… 145
7.2.2 滞后校正 …… 145
7.2.3 滞后—超前校正 …… 150
7.3 PID 控制器设计 …… 155
7.3.1 PID 控制器工作原理 …… 158
7.3.2 Zieloger-Niclosls 整定公式 …… 158
7.4 利用 MATLAB 进行系统校正 …… 162
习题 …… 166

**第 8 章 非线性控制系统的一般分析方法** …… 171

8.1 非线性系统概述 …… 171
8.1.1 典型非线性特性 …… 171
8.1.2 非线性系统的特点 …… 173
8.2 非线性系统常用分析方法 …… 174
8.2.1 非线性系统的描述函数法 …… 174
8.2.2 非线性系统的相平面法 …… 182
8.3 MATLAB 在非线性系统分析中的应用 …… 189
习题 …… 193

**第 9 章 自动控制理论的应用实例** …… 197

9.1 应用一 某电机调速系统分析与设计 …… 197
9.1.1 应用背景 …… 197
9.1.2 基本组成与工作原理 …… 197
9.1.3 系统的数学模型 …… 198
9.1.4 控制器的设计及分析 …… 199
9.2 应用二 模拟位置随动系统的分析与设计 …… 201
9.2.1 系统组成及工作原理 …… 201

9.2.2　系统数学模型 …… 201
9.2.3　控制器的设计及分析 …… 202

**第 10 章　采样控制系统分析方法与应用** …… 204

10.1　采样控制系统基本概念 …… 204
10.2　信号的采样与信号的复现 …… 205
10.2.1　信号的采样过程及采样定理 …… 205
10.2.2　信号的复现与保持器 …… 207
10.3　$z$ 变换与脉冲传递函数 …… 209
10.3.1　$z$ 变换 …… 209
10.3.2　$z$ 变换的基本定理 …… 212
10.3.3　$z$ 逆变换 …… 213
10.3.4　脉冲传递函数 …… 215
10.4　采样控制系统的稳定性、准确性和快速性分析 …… 219
10.4.1　采样控制系统的稳定性分析 …… 219
10.4.2　采样控制系统的稳态误差 …… 222
10.4.3　采样控制系统的时域分析 …… 225
10.5　MATLAB 在采样控制系统分析中的应用 …… 227
10.5.1　$z$ 变换与 $z$ 反变换 …… 227
10.5.2　脉冲传递函数 …… 228
10.5.3　连续系统离散化 …… 230
10.5.4　时域分析 …… 230
思考与练习 …… 231

**第 11 章　线性系统状态空间理论基础** …… 235

11.1　线性系统状态空间模型 …… 235
11.1.1　状态空间表达式的标准形式 …… 235
11.1.2　$n\times n$ 维系统矩阵 $A$ 的特征值 …… 237
11.1.3　$n\times n$ 维系统矩阵的对角线化 …… 238
11.1.4　特征值的不变性 …… 240
11.1.5　状态变量组的非唯一性 …… 241
11.2　能控性与能观性 …… 241
11.2.1　线性连续系统的能控性 …… 241
11.2.2　线性连续系统的能观测性 …… 246
习题 …… 251

**附录 A** …… 252

**附录 B　习题参考答案** …… 254

**参考文献** …… 266

# 第 1 章　绪　　论

## 1.1　引　言

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，对生产过程、工艺参数等进行自动的调节与控制，使之按照预定的方案达到预定的要求。自动控制系统性能的优劣，将直接影响到产品的产量、质量、成本、劳动条件，以及预期目标的完成。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，能自动保持稳定。以上这些，都是自动控制的结果。

自动控制是一门理论性很强的技术，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，去控制被控对象，这个组合体叫做“控制系统”。分析与综合自动控制系统的理论称为“控制理论”。

自动控制系统的种类较多，被控制的物理量各种各样，如温度、压力、流量、电压、转速、位移和力等。组成控制系统的这些元部件虽然有较大的差异，但是系统的基本结构却相类似，且一般都是通过机械系统、电路系统、电气系统、机电系统、微机控制系统来代替人工控制。为了了解自动控制系统的结构，首先让我们分析一下图 1-1 所示的液面控制系统。人若参与该系统的控制，应起哪些作用？

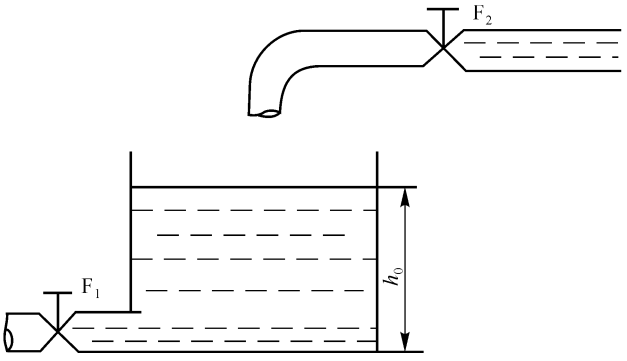



图 1-1　水池液面控制系统

图 1-1 中 $F_1$ 为放水阀，$F_2$ 为进水阀，控制要求液面的希望高度为 $h_0$。当人参与控制

时，就要不断地将实际液面的高度与希望液面的高度作比较，根据比较的结果，决定进水阀 $F_2$ 开度大小，以达到维持液面高度不变的目的。图 1-2 所示为人参与该系统控制的框图。

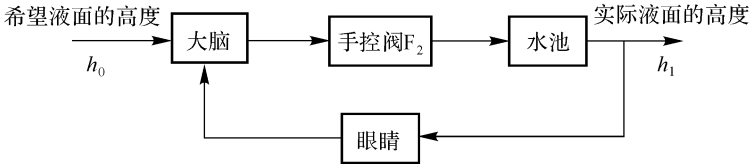



图 1-2　液面人工控制系统框图

由图 1-2 可见，人在参与控制时起了以下三方面的作用：

(1)测量实际液面的高度 $h_1$ ——用眼睛。

(2)将测得实际液面的高度 $h_1$ 与希望液面的高度 $h_0$ 作比较——用脑。

(3)根据比较的结果，即按照偏差的正负去决定控制的动作——用手。

显然，如果用自动控制去代替上述的人工控制，那么在自动控制系统中必须具有上述三种职能机构，即测量机构、比较机构和执行机构。不言而喻，用人工控制既不能保证系统所需的控制精度，也不能减轻人的劳动强度。如果将图 1-1 改为图 1-3 所示的自动控制系统，那么就能实现不论放水阀 $F_1$ 输出的流量如何变化，系统总能自动地维持其液面高度在允许的偏(误)差范围之内。假设水池液面的高度因 $F_1$ 阀开度的增大而稍有降低时，则系统立即产生一个与降落液面高度成比例的误差电压 $U$，该电压经放大器放大后供电给进水阀的拖动电动机，使阀 $F_2$ 的开度也相应地增大，从而使水池的液面恢复到所希望的高度。

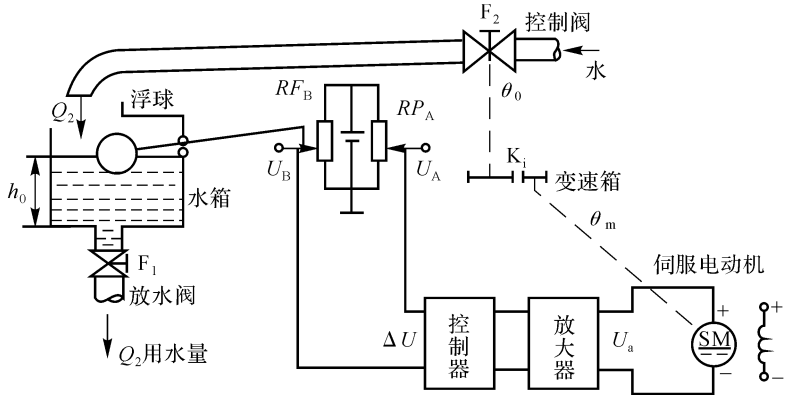



图 1-3　液面自动控制系统

如图 1-3 所示的液面自动控制系统是由以下五个部分组成的，即：

(1)被控对象——水池。

(2)测量元件——浮子。

(3)比较机构——求浮子的希望位置与实际位置之差。

(4)放大机构——当测量元件测得的信号与给定信号比较后得到的误差信号不足以使执行元件动作时，一般都需要放大元件，以提高系统的控制精度。

(5)执行元件——它的职能是直接驱动被控对象，以改变被控制量。

以上五个部分也是一般自动控制系统的基本单元。此外，为了改善控制系统的动、静态

性能，通常还在系统中加上某种形式的校正装置。

## 1.2　随动系统与过程控制系统

### 1.2.1　位置随动系统

图 1-4 所示是一个位置随动系统，它的原理框图如图 1-5 所示。该系统是用一对电位器作为位置的检测元件，它们分别把系统的输入与输出的位置信号转换成与之成比例的电信号，并进行比较。当发送电位器和接收电位器的转角相等时，则 $U_r = U_c$，$U_e = U_d = 0$，电动机处于静止状态。若使发送电位器的动臂按逆时针方向增加一个角度 $\Delta\theta$，此时由于 $U_r$ 大于 $U_c$ 而产生一个相应极性的误差电压 $U_e$，经放大器放大后供电给直流电动机，使之带动负载和接收电位器的动臂一起旋转，一直到 $\theta = \theta$ 为止。

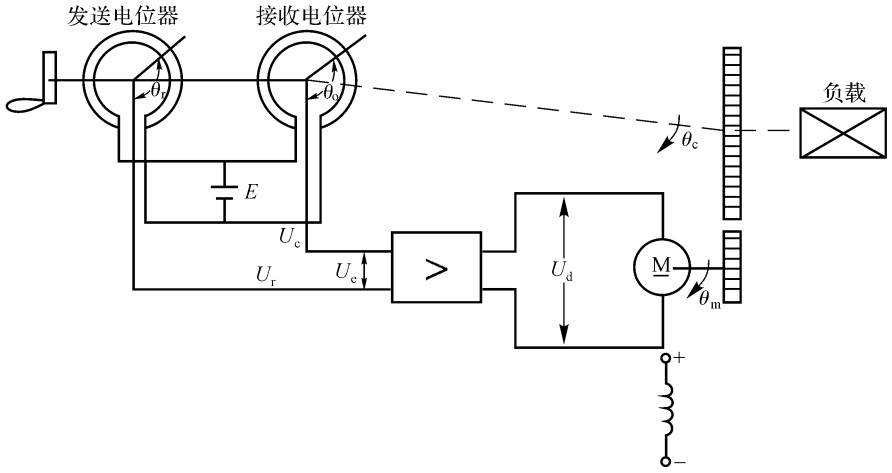



图 1-4　直流随动系统原理图

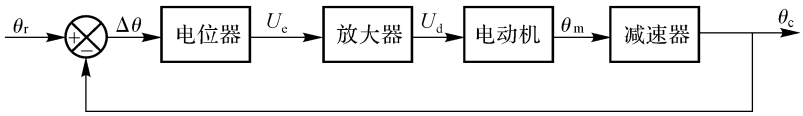



图 1-5　图 1-4 所示系统的框图

图 1-6 所示是某雷达天线位置跟随系统原理框图。

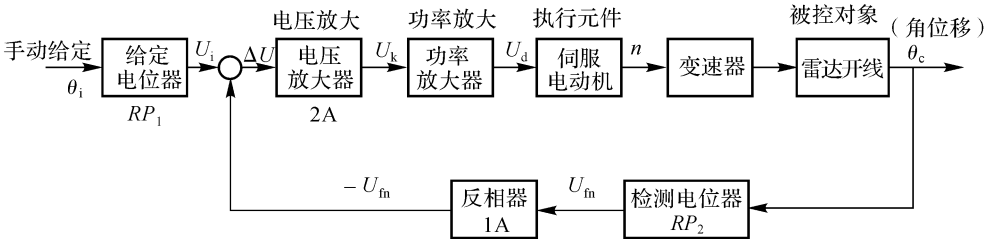



图 1-6　雷达天线位置跟随系统框图

其自动调节过程如图 1-7 所示。

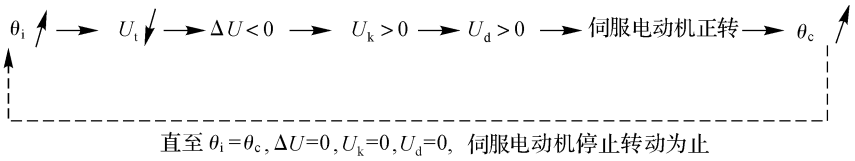



图 1-7 雷达天线位置跟随系统自动调节过程

由上述两系统的框图可见,控制系统中信号的传递都有一个闭合的回路,即被控制量直接或经过反馈环节后反作用到系统的输入端,并和输入信号作减法运算,利用所得的误差信号对系统进行控制。被控制量与给定输入信号间的这种联系被称为负反馈,其相应的系统叫做负反馈控制系统。

### 1.2.2 过程控制系统

生产过程通常是指把原料放在一定的外界条件下,经过物理或化学变化而制成产品的过程。在这些过程中,往往要求自动提供一定的外界条件,如温度、压力、流量、液位、黏度、浓度等参量,并使这些参量能在一定的时间内保持恒值或按一定的规律变化。

在化工、轻工、食品等生产过程中实现对温度、流量、压力、湿度等的控制,这就是过程控制系统。如图 1-8、1-9 和 1-10 所示为过程控制系统的具体实例。

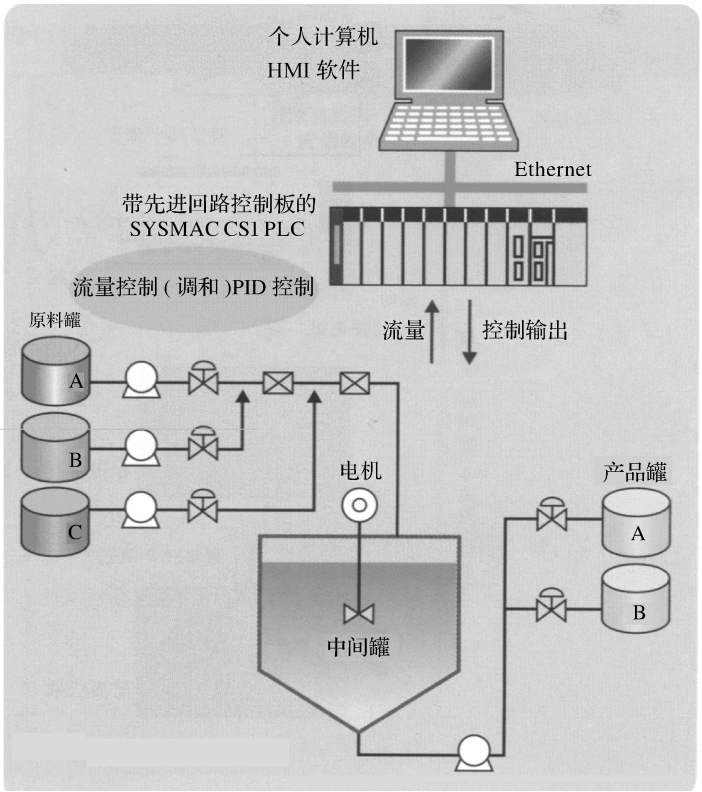



图 1-8 食品加工的流量控制——生产调和油

需要全本请访问 www.ertongbook.com