

普通高等院校

电子信息类系列教材

*Zidong Kongzhi
Yuanli*

自动控制 原理

© 滕青芳 范多旺 董海鹰 路小娟 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等院校电子信息类系列教材

自动控制原理

滕青芳 范多旺 董海鹰 路小娟 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/滕青芳等编著. —北京:人民邮电出版社, 2008.2

(普通高等院校电子信息类系列教材)

ISBN 978-7-115-16914-3

I. 自… II. 滕… 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 150216 号

内 容 提 要

本书全面阐述了自动控制的基本理论与应用。全书共分 8 章,包括自动控制系统的基本概念、控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、自动控制系统的校正和设计、非线性系统的分析、采样控制系统等。本书重点加强对基本理论和基本方法的阐述,适当削减经典控制理论中烦琐的数学推导和不实用的内容,重视工程应用,提供用于控制系统分析与设计的 MATLAB 程序。

本书可作为普通本科院校自动控制、电子信息工程、工业自动化、电气自动化、检测与自动化装置等专业的教科书,也可供从事自动控制的工程技术人员自学参考。

普通高等院校电子信息类系列教材

自动控制原理

◆ 编 著 滕青芳 范多旺 董海鹰 路小娟

责任编辑 蒋 亮

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京艺辉印刷有限公司印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 23

字数: 557 千字

2008 年 2 月第 1 版

印数: 1-3 000 册

2008 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-16914-3/TP

定价: 34.00 元

读者服务热线: (010) 67170985 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

编 者 的 话

随着 20 世纪自动化技术的巨大进步,自动控制理论得到不断完善。“自动控制原理”是专门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,是工科院校众多专业,特别是自动化类专业和电子信息类专业的主干课程之一。

根据当前自动控制系统理论的发展趋势,参考国内外同类教材改革的经验,总结多年来的教学研究、教学实践,面向培养高素质人才的需要,我们编写了本书。

本书全面阐述了自动控制的基本理论。教材内容以经典控制理论为主,同时扼要地介绍了现代控制理论基础部分的内容——状态空间法。全书共分 8 章,包括自动控制系统的基本概念、控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、自动控制系统的校正和设计、非线性系统的分析、采样控制系统等。

本书主要特点如下。

(1) 本书在内容组织上做到突出重点,强调基本概念、基本方法,在叙述上力求深入浅出、通俗易懂;

(2) 本书在注重全书系统性和完整性的前提下,适当削减繁琐的数学推导和定理的论证,力图贯彻“少而精”的原则;

(3) 本书删去一些不实用的内容,重视工程应用,增加有工程应用背景的典型例题分析,缩小了理论与工程应用间的差距;

(4) 本书提供了控制系统计算机辅助分析和设计的 MATLAB 程序。

本书由滕青芳副教授和范多旺教授、博导主编。滕青芳编写第 6 章和第 7 章,范多旺编写第 1 章和第 3 章,董海鹰教授编写第 2 章和第 5 章,路小娟讲师编写第 4 章和第 8 章。全书的统稿和审查由滕青芳和范多旺共同完成。

本书的出版得到了教育部“长江学者和创新团队发展计划”(IRT0629)的资助,在此深表谢意。

本书中的插图由作者的研究生张巍钟、郭小燕、高峰、聂鹏、管晓虎等绘制,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥,恳请广大读者和同行专家提出宝贵意见。

编 者

2007 年 12 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 开环控制系统和闭环控制系统	1
1.1.1 开环控制系统	1
1.1.2 闭环控制系统	2
1.1.3 闭环控制系统示例	4
1.2 闭环控制系统的基本组成	7
1.3 自动控制系统的分类	8
1.3.1 恒值控制系统、随动系统和程序控制系统	8
1.3.2 线性控制系统和非线性控制系统	10
1.3.3 连续控制系统和离散控制系统	11
1.3.4 确定性系统和不确定性系统	11
1.3.5 单输入单输出系统与多输入多输出系统	12
1.3.6 集中参数系统和分布参数系统	12
1.4 自动控制系统的分析和设计	12
1.4.1 控制系统分析	12
1.4.2 控制系统设计	13
1.5 自动控制理论的发展简史	14
1.5.1 经典控制理论阶段	14
1.5.2 现代控制理论阶段	15
小结	16
习题	16
第2章 自动控制系统的数学模型	19
2.1 控制系统的时域数学模型	19
2.1.1 线性系统微分方程的建立	20
2.1.2 微分方程建立举例	20
2.1.3 线性常系数微分方程的求解	24
2.2 控制系统的复域数学模型	25
2.2.1 传递函数的定义	26
2.2.2 传递函数的一般表达式	26
2.2.3 传递函数的性质	26
2.3 典型环节的传递函数	27
2.3.1 比例环节 (Proportional Element)	27
2.3.2 积分环节 (Integrating Element)	28
2.3.3 理想微分环节 (Ideal Derivative Element)	31
2.3.4 惯性环节 (Inertial Element)	31
2.3.5 比例微分环节 (Proportional-Derivative Element)	33

2.3.6 振荡环节 (Oscillating Element)	34
2.3.7 延迟环节 (Pure Time Delay Element, 又称纯滞后环节)	37
2.4 控制系统的结构图	38
2.4.1 功能框 (Block Diagram)	38
2.4.2 系统方框图的画法	39
2.4.3 典型自动控制系统的方框图	41
2.4.4 框图的等效变换	43
2.5 信号流程图	49
2.5.1 信号流图的基本概念	49
2.5.2 信号流图的绘制	51
2.5.3 信号流图的简化	52
2.5.4 梅逊 (Mason) 公式及应用	54
2.6 控制系统的状态空间模型	55
2.6.1 状态、状态变量和状态方程	56
2.6.2 外加作用函数不包含导数项时单变量系统的状态变量描述	57
2.6.3 外加作用函数不包含导数项时多变量系统的状态变量描述	58
2.6.4 传递矩阵	60
小结	61
习题	62
第3章 控制系统的时域分析	67
3.1 典型输入信号	67
3.1.1 阶跃信号	67
3.1.2 斜坡信号	67
3.1.3 等加速度信号	68
3.1.4 脉冲信号	68
3.1.5 正弦信号	69
3.2 线性系统的时域性能指标	69
3.3 一阶系统的时域分析	70
3.3.1 单位阶跃响应	71
3.3.2 单位速度响应	72
3.3.3 单位加速度响应	72
3.3.4 单位脉冲响应	72
3.4 二阶系统的时域分析	73
3.4.1 传递函数的推导	73
3.4.2 二阶系统的单位阶跃响应	75
3.4.3 二阶系统阶跃响应的动态性能指标	78
3.4.4 具有零点的二阶系统分析	82
3.4.5 二阶系统的性能改善	84
3.5 高阶系统的时域响应	87

3.5.1 高阶系统的单位阶跃响应	87
3.5.2 闭环零、极点对系统性能的影响	88
3.5.3 利用主导极点估算系统的动态性能指标	88
3.6 控制系统的稳定性	89
3.6.1 稳定性概念	89
3.6.2 线性系统稳定的充要条件	90
3.6.3 线性系统稳定的必要条件	91
3.6.4 代数稳定性判据	92
3.6.5 劳斯稳定判据的应用	96
3.7 控制系统的稳态误差	98
3.7.1 误差和稳态误差	98
3.7.2 给定作用下的稳态误差	100
3.7.3 给定作用下动态误差系数	103
3.7.4 扰动作用下的稳态误差	105
3.7.5 扰动作用下动态误差系数	108
3.8 用 MATLAB 对线性系统进行时域响应分析	109
小结	115
习题	115
第 4 章 线性系统的根轨迹法	119
4.1 根轨迹的基本概念	119
4.1.1 根轨迹的概念	119
4.1.2 绘制根轨迹的基本条件	121
4.2 常规根轨迹的绘制	122
4.3 广义根轨迹	136
4.3.1 参数根轨迹	136
4.3.2 多回路系统的根轨迹	140
4.3.3 正反馈系统根轨迹	141
4.4 利用根轨迹分析系统的性能	144
4.4.1 稳定性分析	144
4.4.2 暂态性能分析	149
4.4.3 稳态性能分析	150
4.5 用 MATLAB 绘制系统的根轨迹	150
小结	152
习题	153
第 5 章 控制系统的频域分析	156
5.1 频率特性	156
5.1.1 频率特性的基本概念	156
5.1.2 频率特性与传递函数的关系	157
5.1.3 频率特性的数学表示方式	159

5.1.4 频率特性的图形表示方式	160
5.2 典型环节的对数频率特性	162
5.2.1 比例环节	162
5.2.2 积分环节	163
5.2.3 微分环节	164
5.2.4 惯性环节	167
5.2.5 振荡环节	169
5.2.6 延迟环节	171
5.3 系统开环频率特性的绘制	172
5.3.1 采用叠加的方法求串联环节的伯德图	172
5.3.2 系统开环对数幅频特性的简便画法	173
5.3.3 最小相位系统与非最小相位系统	175
5.3.4 由系统(或部件)的对数频率特性求相应的传递函数	177
5.4 奈奎斯特稳定判据和系统的相对稳定性	179
5.4.1 系统开环频率特性与闭环特征式的关系	179
5.4.2 幅角原理	179
5.4.3 奈奎斯特稳定判据	181
5.4.4 虚轴上有开环极点时的奈奎斯特判据	182
5.4.5 基于伯德图的奈奎斯特判据	183
5.4.6 系统的相对稳定性和相对裕度	184
5.5 用频率法分析系统的稳态性能	186
5.5.1 0型系统	186
5.5.2 I型系统	186
5.5.3 II型系统	187
5.6 系统的频率特性及频域性能指标	188
5.6.1 闭环系统的频率特性	188
5.6.2 开环频率特性与闭环系统动态性能之间的关系	189
5.6.3 系统的频域性能指标	191
5.6.4 二阶系统的频域性能指标	191
5.6.5 高阶系统	193
5.7 用MATLAB进行系统的频域分析	193
5.7.1 伯德图绘制	193
5.7.2 奈奎斯特图绘制	199
小结	199
习题	200
第6章 控制系统的校正	204
6.1 控制系统校正的概念	204
6.1.1 校正的概念	204
6.1.2 校正的方式	204

6.1.3 性能指标	206
6.2 串联超前校正	207
6.2.1 超前校正网络	207
6.2.2 基于根轨迹法的超前校正	209
6.2.3 基于频率响应法的超前校正	214
6.3 串联迟后校正	216
6.3.1 迟后校正网络	216
6.3.2 基于根轨迹法的迟后校正	218
6.3.3 基于频率响应法的迟后校正	220
6.4 串联迟后—超前补偿	223
6.4.1 迟后—超前校正网络	223
6.4.2 基于根轨迹法的迟后—超前校正	224
6.4.3 基于频率法的迟后—超前校正	226
6.5 反馈校正	230
6.5.1 使结构不稳定系统改造为稳定系统	230
6.5.2 利用反馈补偿改变系统参数	231
6.5.3 利用反馈补偿取代局部结构	233
6.5.4 降低对参数变化的敏感度	234
6.6 PID 控制器及其参数整定	237
6.6.1 比例 (P) 控制规律	237
6.6.2 比例—微分 (PD) 控制规律	238
6.6.3 积分 (I) 控制规律	239
6.6.4 比例—积分 (PI) 控制规律	239
6.6.5 比例—积分—微分 (PID) 控制规律	241
6.7 复合校正	246
6.7.1 复合校正的概念	246
6.7.2 按输入补偿的复合校正	246
6.7.3 按扰动补偿的复合校正	248
6.8 MATLAB 在线性系统校正中的应用	250
小结	253
习题	254
第 7 章 非线性系统的分析	258
7.1 非线性系统的概述	258
7.1.1 非线性系统的数学描述	258
7.1.2 典型的非线性特性	259
7.1.3 非线性系统的特点与分析方法	262
7.2 相平面法	265
7.2.1 相平面的基本概念	265
7.2.2 相轨迹的几个重要性质	266

7.2.3 相轨迹的绘制	268
7.2.4 由相平面图求时间解	273
7.3 相平面图的分析	275
7.3.1 二阶线性系统的相平面分析	275
7.3.2 非线性控制系统的相平面分析	279
7.4 描述函数法	290
7.4.1 描述函数的基本概念	291
7.4.2 典型非线性特性的描述函数	292
7.5 非线性系统的描述函数分析	299
7.5.1 非线性系统的稳定性分析	299
7.5.2 周期运动的稳定性分析	300
7.6 基于 SIMULINK 环境的非线性系统仿真分析	303
小结	305
习题	305
第 8 章 采样控制系统	311
8.1 采样定理	312
8.1.1 采样过程	312
8.1.2 采样过程的谱分析	313
8.1.3 采样定理	315
8.1.4 采样周期的选取	315
8.2 信号的再现和零阶保持器	315
8.2.1 信号再现	315
8.2.2 零阶保持器	316
8.3 z 变换和 z 反变换	318
8.3.1 序列与差分方程	318
8.3.2 z 变换	319
8.3.3 典型信号的 z 变换	319
8.3.4 z 变换的性质	321
8.3.5 z 反变换	325
8.3.6 用 z 变换解差分方程	326
8.4 脉冲传递函数	328
8.4.1 脉冲传递函数的定义	328
8.4.2 串联环节的脉冲传递函数	330
8.4.3 闭环系统的脉冲传递函数	331
8.5 采样系统的稳定性	335
8.5.1 s 平面和 z 平面的映射关系	335
8.5.2 w 平面的劳斯判据	336
8.6 采样控制系统的性能分析	338
8.6.1 瞬态响应	338

8.6.2 稳态误差	339
8.7 离散时间系统的状态空间描述	341
8.7.1 由差分方程导出状态方程	342
8.7.2 由脉冲传递函数导出状态方程	343
8.7.3 连续时间模型的离散化	344
8.7.4 离散系统状态方程分析	344
8.8 采样控制系统校正与设计	345
8.8.1 典型信号输入作用下的最小拍系统	346
8.8.2 典型信号输入作用下的脉冲传递函数	348
8.8.3 最小拍控制系统的设计	348
8.9 MATLAB在离散系统中的应用	350
小结.....	351
习题.....	352
参考文献.....	355

第 1 章 绪 论

在现代科学技术的许多领域中，自动控制技术起着越来越重要的作用。所谓自动控制，是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置（称为控制装置或控制器），使机器、设备或生产过程（统称被控对象）的某个工作状态或参数（即被控量）自动地按照预定的规律运行。例如，数控车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；雷达和计算机组成的导弹发射和制导系统自动地将导弹引导到敌方目标；无人驾驶飞机按照预定航迹自动升降和飞行；人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收等，这一切都是以高水平的自动控制技术为前提的。

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空间技术、国防、科技、工业、交通管理、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来分析和研究。

自动控制技术的广泛应用不仅能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，而且在人类征服自然、探索新能源、发展空间技术和改善人民生活等方面都将起着极其重要的作用。自动控制已成为现代社会活动中必不可少的一门科学技术。

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”。

1.1 开环控制系统和闭环控制系统

自动控制系统种类繁多，其功能和组成也是多种多样的，就其工作原理来说，可分为开环控制和闭环控制两种最基本形式，相应的控制系统称为开环控制系统和闭环控制系统。

1.1.1 开环控制系统

系统的控制输入不受输出影响的控制系统称为开环控制系统。在开环控制系统中，输入端与输出端之间，只有信号的前向通道而不存在由输出端到输入端的反馈通路。因此，开环控制系统又称为无反馈控制系统，开环控制系统由控制器与控制对象组成。图 1-1 所示的直

流电动机转速控制系统就是开环控制系统的一个例子，图 1-2 所示为该系统的功能方框图。

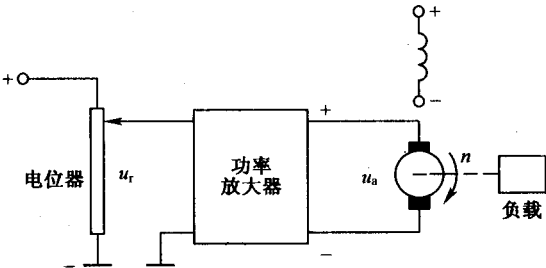


图 1-1 直流电动机转速开环控制系统原理图

图 1-1 所示开环控制系统的输入量是给定电压 u_r ，输出量（被控制量）是转速 n 。电动机激磁电压为常数，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_r 和电枢电压 u_a ，从而控制了电动机的转速 n 。当负载转矩不变时，给定电压 u_r 和电动机转速 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给定值。如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给定电压 u_r ，使电动机转速恢复到原给定值。

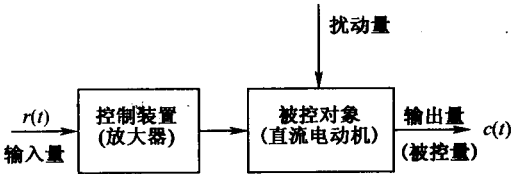


图 1-2 开环控制系统方框图

开环控制有两种形式：按给定值控制的开环控制，图 1-3（a）所示就是这种形式的开环控制；另一种形式是按干扰补偿的开环控制，如图 1-3（b）所示，该系统对干扰进行测量，利用测量得到的干扰值修正控制作用，补偿干扰对被控量的影响。从干扰作用端至输出端，也仅有顺向作用而无反向联系，因此也是开环控制。这种控制方式的前提条件是干扰能够被测量。

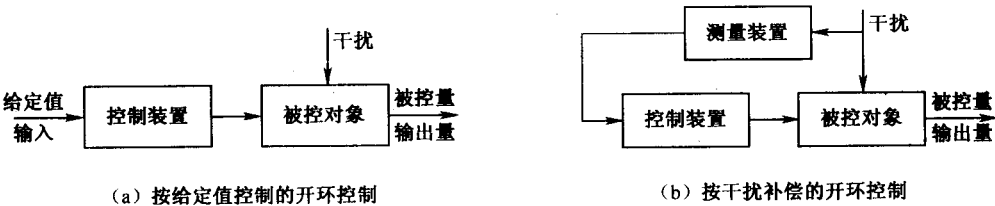


图 1-3 两种开环控制形式方框图

这种控制系统线路简单、成本低、工作稳定。由于开环控制系统不具备自动修正被控量偏差的能力，故系统的精确度低。为提高控制精确度，应采用闭环控制系统，或采用按干扰补偿的开环控制。

1.1.2 闭环控制系统

闭环控制系统又称反馈控制系统。在闭环控制系统中，既存在由输入端到输出端的信号前向通路，也存在从输出端到输入端的信号反馈通道，两者组成一个闭合的回路。控制系统要达到预定的目的或具有规定的性能，必须把输出量的信息反馈到输入端进行控制。通过比

较输入值与输出值,产生偏差信号,该偏差信号以一定的控制规律产生控制作用,逐步减小以致消除这一偏差,从而实现所要求的控制性能。闭环控制是最常用的一种控制方式,它有简单的闭环控制,也有复杂的闭环控制。闭环控制在工程系统和社会经济系统中正得到广泛的应用,在生命有机体的生长和进化过程中也普遍存在着这种反馈控制。生命有机体为适应环境的变化而作出有效的动作反应,主要是依靠这种反馈作用,人类具有学习能力,通过学习积累经验,用过去的经验来调节未来行为的策略。人类具有通过学习来适应环境和改造世界的能力,本质上也是一种反馈控制。

一种可以自动调整电动机转速的闭环控制系统如图 1-4 所示,图 1-5 所示为该系统的功能方框图。这种系统的控制过程如下:由测速发电机将电动机的实际转速 n 检测出来,并转换成与给定电压相同的物理量 u_f ,然后反馈到输入端,与给定电压 u_r 相比较,其偏差值 u_e 经放大器放大后,用来控制电动机的转速,使电动机保持在与给定电压 u_r 相对应转速状态下运转。

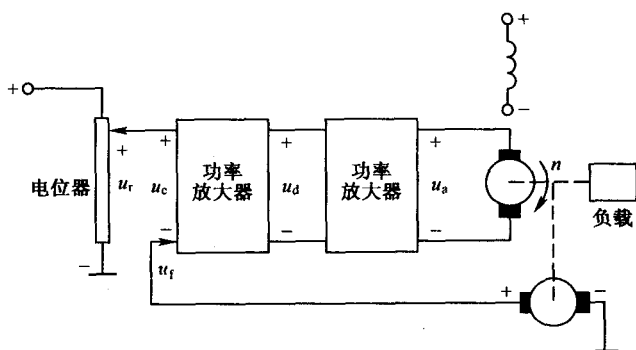


图 1-4 直流电动机转速闭环控制系统

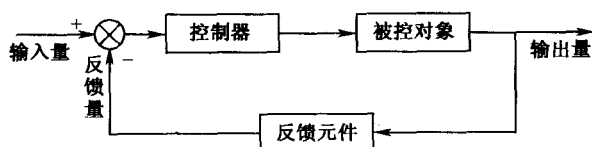


图 1-5 闭环系统功能方框图

如果负载增大,则电动机转速下降,测速发电机输出电压(反馈电压) u_f 减小,与给定电压 u_r 比较后的偏差电压 u_e 增大,电枢电压 u_a 相应增大,从而使电动机的转速得到补偿,使系统基本上恒速运行。

根据上述分析,反馈控制系统的一个突出优点是不管什么原因引起被控量偏离其给定值(预期值)而产生偏差时,就一定有相应的控制作用产生。而这种控制作用将减小或消除偏差,使被控量趋近于或回复到要求值。因此,从原理上讲,反馈控制系统具有抑制内部和外部各种干扰的能力,故其控制精度高。与开环控制相比,闭环控制对参数变化不敏感,并能获得满意的动态特性和控制精度。

但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,系统可能会产生振荡,甚至系统失稳而无法正常工作,这是自动控制理论和系统设计必须解决的重要问题。

必须指出，只有按负反馈原理组成的闭环控制系统才能实现自动控制。正反馈则相反，将使偏差越来越大，不仅不能纠正偏差，反而会使系统无法工作。

1.1.3 闭环控制系统示例

1. 热力系统的闭环反馈控制

热力系统的闭环反馈控制系统如图 1-6 所示，其工作原理为：水箱中流入冷水，热蒸汽经阀门并流经热传导器件，通过热传导作用将冷水加热，加热后的水流出水箱。若由于某种原因，水箱中的水温（即系统的输出量）低于给定值（即系统的输入量）所要求的水温，则温度测量元件将检测到的水温值转换成与给定值相同的电压物理量，并与给定水温的电压信号同时加在放大器输入端，即可比较大小，其差值信号经放大器放大后，驱动执行电机，将阀门的开度增加，使更多的蒸汽流入，从而使水温上升，直至实际水温与给定值相符为止。反之，当水温偏高时，同样亦可进行相应的调节。这样，就实现了没有人直接参与情况下的自动水温控制。如果实际水温与给定值相符，则没有差值信号，控制器就不产生控制信号，当然也就不必改变阀门的开度了。在上述系统中，环境温度的变化，以及输入冷水温度的变化等，都可看作是系统的外扰。

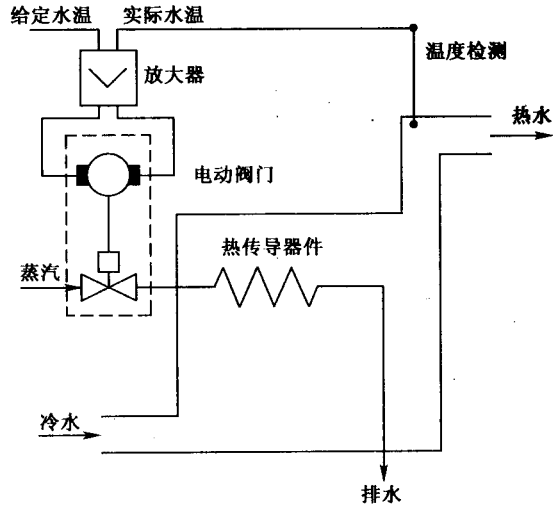


图 1-6 热力系统的闭环反馈控制

2. 蒸汽机转速自动控制系统

采用由瓦特发明的离心调速器的蒸汽机转速自动控制系统如图 1-7 所示。其工作原理是：当蒸汽机带动负载转动的同时，通过圆锥齿轮带动一对飞锤作水平旋转。飞锤通过铰链可带动套筒上下滑动，套筒内装有平衡弹簧，套筒上下滑动时可拨动杠杆，杠杆另一端通过连杆调节供汽阀门的开度。在蒸汽机正常运行时，飞锤旋转所产生的离心力与弹簧的反弹力相平衡，套筒保持某个高度，使阀门处于一个平衡位置。如果由于负载增大使蒸汽机转速 n 下降，则飞锤因离心力减小而使套筒向下滑动，并通过杠杆增大供汽阀门的开度，从而使蒸汽机的转速 n 回升。同理，如果由于负载减小使蒸汽机的转速 n 增加，则飞锤因离心力增加而使套筒上滑，并通过杠杆减小供汽阀门的开度，迫使蒸汽机转速回落。这样，离心调速器就能自动地抵制负载变化对转速的影响，使蒸汽机的转速 n 保持在某个期望值附近。

在本系统中，蒸汽机是控制对象，蒸汽机的转速 n 是被控量。转速 n 经离心调速器测出并转换成套筒的位移量后，再经杠杆传送至供汽阀门，以控制蒸汽机的转速，从而构成一个闭环控制系统。

离心调速器也常见于水力发电站中，作为控制水力透平机的转速之用。

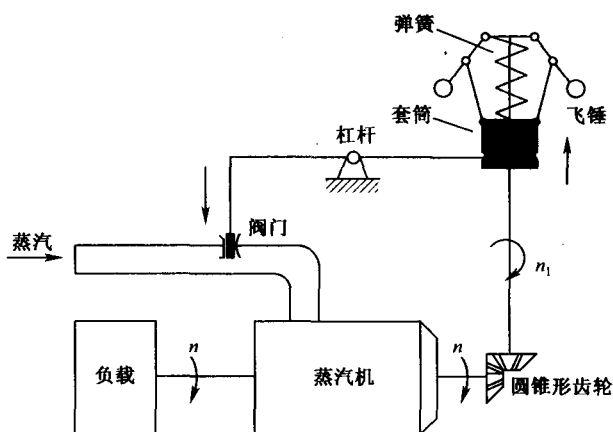


图 1-7 蒸汽机转速自动控制系统

3. 船舶随动舵的控制

船舶的航行方向是由操舵来控制的。对于大型船舶，由于舵叶较大，操舵所受到的阻力就增加。为减轻操舵人员的劳动强度，常采用自动化程度较高的随动舵对舵机进行操纵。

随动舵操纵的特点是：操舵人员只要通过舵轮给定一个舵角信号，舵机就能把笨重的舵叶转到给定的舵角位置，并自动停下来。可见，随动舵起到功率放大的作用，在本质上属于角度跟踪随动系统。

图 1-8 所示为一种船舶随动舵的控制原理图。其中, 驾驶盘 (又称舵轮) 与电位器 P_1 作机械联结, 作为系统的给定装置。直流电动机的转轴经减速箱减速后带动舵叶旋转, 与此同时, 通过机械联结带动电位器 P_2 的滑臂作相应的转动。 P_2 的电压 u_o 反馈到输入端, 与 P_1 的电压 u_i 进行比较后得出偏差信号 $u_e = u_i - u_o$ 。系统是按照 u_e 的性质 (大小和正负极性) 进行控制的, 控制的结果是舵叶的偏转角 θ_o 严格等于驾驶盘所转过的角度 θ_i 。图中的放大器应包含电压放大和功率放大两部分; 比较环节可用差动放大器或运算放大器实现。

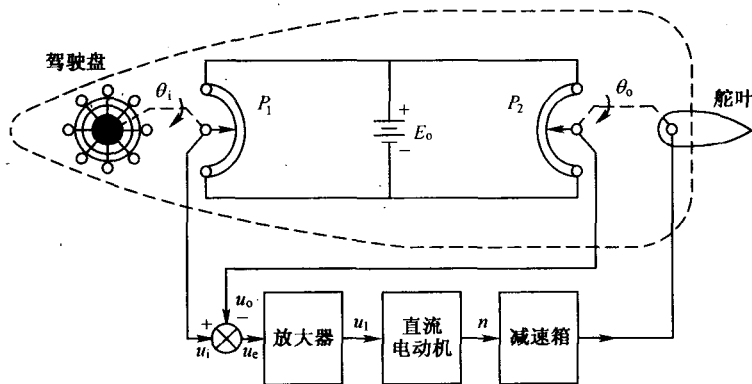


图 1-8 船舶随动舵的控制系统原理图

4. 轧钢机计算机控制系统

图 1-9 所示为轧钢机计算机控制系统的示意图。在该控制系统中,其任务是使轧出钢板

的厚度等于预定的厚度。由厚度传感器测量钢板的厚度，把数据输入到数字计算机，与厚度的给定值相比较，经过计算机按一定的规律计算后，输出的信号经过 D/A 变换后输入到伺服机构中去操纵轧辊。其功能方框图如图 1-10 所示。

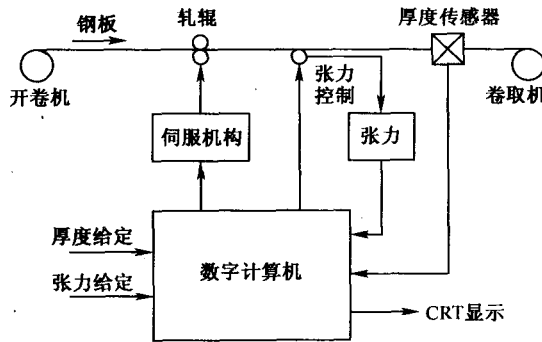


图 1-9 轧钢机计算机控制系统

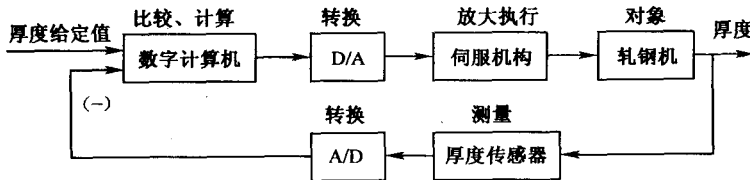


图 1-10 轧钢机控制系统功能方框图

上述控制系统也是负反馈闭环控制系统。因为多个变量可同时输入到计算机进行计算处理，所以可方便地进行多个变量的控制，如厚度、张力、驱动速度等的控制。

5. 火炮、雷达天线的方位控制

图 1-11 所示的随动系统虽然能作角度跟踪，但由于它采用了电位器作为输入装置和反馈装置，因而 θ_i 与 θ_o 的变化范围一般被限制在 360° 以内，这对于要求在超过 360° 做大范围跟踪的火炮、雷达天线等系统而言，显然不能满足要求。为克服上述缺点，通常采用一对自整角机作为角度检测装置，以取代图中的电位器，从而组成自整角机式的随动系统。

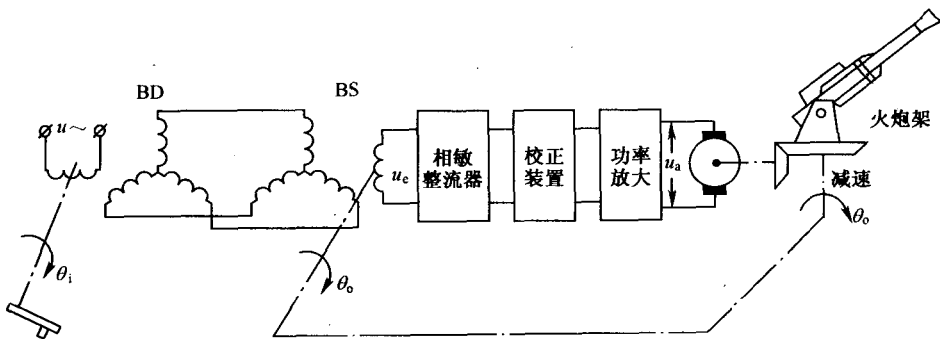


图 1-11 火炮方位角控制系统示意图

图 1-12 所示为采用自整角机作为角度测量的火炮方位角控制的随动系统示意图。图中