

能源与动力工程 控制基础

田 飞 徐伟幸 编 著



本书由江苏高校品牌专业建设工程项目（PPZY2015A029）、
基于固液两相流的潜水搅拌机机理研究（BK20160521）、江苏政府留学奖学金资助出版

能源与动力工程 控制基础

田 飞 徐伟幸 编 著

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

图书在版编目(CIP)数据

能源与动力工程控制基础 / 田飞, 徐伟幸编著. —
镇江: 江苏大学出版社, 2018.5
ISBN 978-7-5684-0819-6

I. ①能… II. ①田… ②徐… III. ①能源—控制系统
②动力工程—控制系统 IV. ①TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 093883 号

能源与动力工程控制基础

Nengyuan Yu Dongli Gongcheng Kongzhi Jichu

编 著/田 飞 徐伟幸

责任编辑/郑晨晖

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press.ujs.edu.cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/虎彩印艺股份有限公司

开 本/787 mm×1 092 mm 1/16

印 张/13

字 数/322 千字

版 次/2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0819-6

定 价/39.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

自动控制技术已广泛应用于制造业、农业、交通、航空及航天等众多产业部门，极大地提高了社会劳动生产率，改善了人们的劳动条件，提高了人们的生活水平。为了满足能源与动力工程专业的需求，我们根据自动控制原理编写了本书。

本书结合分析软件 MATLAB，较为系统地讲解了能源与动力工程控制基础的理论知识，并配以大量例题讲解，深入浅出，易于读者学习。全书共分为 7 章，其中：第 1 章介绍自动控制理论的发展与基本概念；第 2 章讨论线性连续系统数学模型的求解方法；第 3 章讲解控制系统的时域指标与分析方法；第 4 章讲解控制系统的根轨迹绘制及分析，介绍了利用软件 MATLAB 绘制根轨迹并分析系统稳定性的方法；第 5 章讲解控制系统的频率特性及频域分析法；第 6 章介绍控制系统的频率法校正，简单讲述了 MATLAB 分析校正系统的方法；第 7 章介绍能源与动力控制系统在工业上的应用。

本书第 1, 3, 5 章由徐伟幸副教授编写，第 2, 4, 6, 7 章由田飞副教授编写。在编写的过程中，参考和吸收了兄弟院校教材的部分内容，得到了江苏大学教务处、能源与动力工程学院、流体机械及工程系等单位的鼓励和支持，衷心感谢王谦教授、陈汇龙教授、康灿教授、何秀华教授等给予的支持和帮助。本书获得江苏高校品牌专业建设工程项目 (PPZY2015A029)、基于固液两相流的潜水搅拌机机理研究 (BK20160521)、江苏政府留学奖学金等资助，在此表示感谢。

由于编者的水平有限，特别是编写时间仓促，书中可能存在不妥之处，恳请广大读者、专家和学者给予批评指正。

编 者

2018 年 5 月

目 录

第 1 章 控制系统导论 / 001

- 1.1 引言 / 001
- 1.2 自动控制理论发展概述 / 001
- 1.3 自动控制的基本原理 / 003
 - 1.3.1 人工控制与自动控制 / 003
 - 1.3.2 自动控制系统基本控制方式 / 005
- 1.4 自动控制系统的结构 / 009
 - 1.4.1 基本组成 / 009
 - 1.4.2 常用术语 / 010
- 1.5 自动控制系统的分类 / 011
 - 1.5.1 恒值系统、随动系统和程序控制系统 / 011
 - 1.5.2 定常系统和时变系统 / 011
 - 1.5.3 线性系统和非线性系统 / 012
 - 1.5.4 连续系统和离散系统 / 013
 - 1.5.5 单变量系统和多变量系统 / 013
- 1.6 控制系统示例 / 013
 - 1.6.1 电压调节系统 / 013
 - 1.6.2 温度控制系统 / 014
 - 1.6.3 火炮方位角控制系统 / 015
 - 1.6.4 飞机自动驾驶仪系统 / 016
- 1.7 控制系统性能的基本要求 / 017
 - 1.7.1 稳定性 / 017
 - 1.7.2 快速性 / 017
 - 1.7.3 准确性 / 018
- 习题 / 018

第 2 章 线性连续系统的数学模型 / 022

- 2.1 动态微分方程的建立 / 022
 - 2.1.1 动态微分方程 / 022
 - 2.1.2 例题 / 023



- 2.1.3 线性微分方程的特性 / 026
- 2.1.4 标准微分方程的求解 / 026
- 2.2 非线性数学模型的线性化 / 028
 - 2.2.1 单变量的非线性系统 $y=f(x)$ / 028
 - 2.2.2 多变量的非线性函数 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ / 029
 - 2.2.3 非线性数学模型的线性化步骤 / 029
 - 2.2.4 例题 / 029
- 2.3 传递函数 / 031
 - 2.3.1 传递函数的定义 / 031
 - 2.3.2 传递函数的描述形式 / 032
 - 2.3.3 传递函数的性质 / 034
- 2.4 系统动态结构图 / 035
 - 2.4.1 系统结构图的组成 / 036
 - 2.4.2 系统动态结构图的绘制步骤 / 036
 - 2.4.3 自动控制系统中的典型环节 / 036
 - 2.4.4 结构图的绘制示例 / 040
 - 2.4.5 结构图的等效变换和简化 / 042
 - 2.4.6 结构图简化示例 / 046
 - 2.4.7 多个输入信号的闭环传递函数 / 049
- 2.5 信号流程图 / 050
 - 2.5.1 基本概念 / 050
 - 2.5.2 常用术语 / 050
 - 2.5.3 信号流程图的基本性质 / 051
 - 2.5.4 信号流程图的简化 / 051
 - 2.5.5 信号流程图的绘制 / 052
 - 2.5.6 梅逊公式及其应用 / 054
- 习题 / 057

第3章 控制系统的时域分析 / 060

- 3.1 概述 / 060
 - 3.1.1 常用的典型输入信号 / 060
 - 3.1.2 时域性能指标 / 062
- 3.2 一阶系统的时域分析 / 064
 - 3.2.1 一阶系统的数学模型 / 064
 - 3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应 / 065
 - 3.2.3 一阶系统的单位斜坡响应 / 066
 - 3.2.4 一阶系统的单位脉冲响应 / 067
 - 3.2.5 一阶系统的单位抛物线响应 / 067

- 3.3 二阶系统的时域分析 / 070
 - 3.3.1 二阶系统的数学模型 / 070
 - 3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应 / 071
 - 3.3.3 二阶系统的单位阶跃响应性能指标 / 075
- 3.4 高阶系统的时域分析 / 078
 - 3.4.1 高阶系统的单位阶跃响应 / 078
 - 3.4.2 闭环零点、极点对系统性能的影响 / 078
 - 3.4.3 闭环主导极点和非主导零点对系统性能的影响 / 079
- 3.5 线性系统的稳定性分析 / 080
 - 3.5.1 稳定性的概念 / 080
 - 3.5.2 系统稳定的充要条件 / 080
 - 3.5.3 稳定性判据 / 081
- 3.6 线性系统的稳态误差 / 085
 - 3.6.1 误差与稳态误差 / 085
 - 3.6.2 稳态误差的计算 / 086
 - 3.6.3 减小稳态误差的方法 / 091
- 3.7 MATLAB 时域分析应用 / 093
 - 3.7.1 稳定性分析 / 093
 - 3.7.2 动态性能分析 / 093
 - 3.7.3 综合应用 / 094
- 习题 / 095

第 4 章 控制系统的根轨迹绘制及分析 / 098

- 4.1 根轨迹的基本概念 / 098
 - 4.1.1 根轨迹概念 / 098
 - 4.1.2 根轨迹与系统性能 / 100
- 4.2 根轨迹增益及根轨迹方程 / 100
 - 4.2.1 根轨迹增益 / 100
 - 4.2.2 根轨迹方程 / 102
- 4.3 绘制根轨迹基本条件及基本原则 / 103
 - 4.3.1 绘制根轨迹的基本条件 / 103
 - 4.3.2 绘制根轨迹的基本原则 / 105
 - 4.3.3 系统参量根轨迹绘制步骤及分析 / 108
 - 4.3.4 绘制根轨迹及根轨迹例题 / 109
- 4.4 根轨迹与系统性能的关系 / 114
- 4.5 使用 MATLAB 绘制根轨迹 / 117
 - 4.5.1 MATLAB 中的根轨迹绘制函数 / 117



4.5.2 例题 / 118

习题 / 121

第5章 控制系统的频率特性及频域分析 / 122

5.1 频率特性的基本概念 / 122

5.1.1 频率特性的定义 / 122

5.1.2 频率特性的表示方法 / 125

5.2 典型环节的频率特性 / 128

5.2.1 比例环节 / 128

5.2.2 微分环节 / 129

5.2.3 积分环节 / 130

5.2.4 惯性环节 / 131

5.2.5 一阶微分环节 / 133

5.2.6 二阶振荡环节 / 134

5.2.7 二阶微分环节 / 136

5.2.8 延迟环节 / 137

5.3 控制系统的开环频率特性 / 138

5.3.1 系统开环幅相频率特性的绘制 / 138

5.3.2 系统开环对数频率特性的绘制 / 140

5.3.3 最小相位系统和非最小相位系统 / 144

5.4 频域稳定性判据 / 144

5.4.1 奈奎斯特稳定判据 / 145

5.4.2 对数稳定判据 / 148

5.5 频域稳定裕度 / 150

5.5.1 稳定裕度的定义 / 150

5.5.2 稳定裕度的计算 / 151

5.6 利用开环对数幅频特性分析系统的性能 / 152

5.6.1 $L(\omega)$ 低频段特性与系统稳态误差的关系 / 153

5.6.2 $L(\omega)$ 中频段特性与系统动态性能的关系 / 153

5.6.3 $L(\omega)$ 高频段特性与系统抗高频干扰能力的关系 / 156

5.7 利用闭环频率特性分析系统的性能 / 157

5.7.1 闭环频率特性的几个特征量 / 157

5.7.2 闭环频域指标与时域指标的关系 / 157

5.8 MATLAB 频域分析应用 / 159

5.8.1 伯德图和奈奎斯特图 / 159

5.8.2 综合应用 / 159

习题 / 160

第 6 章	控制系统的频率法校正 / 164
6.1	频率法校正的基本概念 / 164
6.1.1	性能指标 / 164
6.1.2	校正的方式 / 165
6.2	无源校正装置 / 166
6.2.1	系统的无源网络的串联超前校正 / 166
6.2.2	无源网络串联滞后校正 / 168
6.2.3	无源网络相位滞后-超前校正 / 169
6.2.4	例题 / 171
6.3	有源校正系统 / 176
6.4	PID 控制器 / 178
6.4.1	PID 控制器的结构 / 179
6.4.2	PID 控制器的使用 / 179
6.4.3	工业控制中常用的 PID 组合 / 179
	习题 / 180
第 7 章	能源与动力控制系统的工业应用 / 182
7.1	水处理系统 / 182
7.2	水轮机调节系统 / 183
7.2.1	调节系统工作原理 / 185
7.2.2	双重调节的水轮机调节系统原理简图 / 188
7.3	空调控制系统 / 188
附录 1	拉普拉斯变换 / 191
附录 2	MATLAB 辅助分析与设计法 / 194
参考文献	/ 198

第 1 章 控制系统导论

1.1 引言

在现代科学技术飞速发展的今天，自动控制技术和理论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，如温度、压力、pH 值等)自动地按照预定的规律运行或变化。由自动控制装置与被控对象以一定结构组成的、能完成某种控制任务的有机整体称为自动控制系统。例如，矿井提升机速度控制系统、水泥回转窑湿度控制系统、造纸厂纸浆浓度控制系统、轧钢厂加热炉温度控制系统等。

自动控制技术及理论已经广泛地应用于机械、冶金、石油、化工、造纸、电子、电力、航空、航海、航天、核工业等各个学科领域。近年来，控制学科的应用范围还扩展到交通管理、生物医学、生态环境、经济管理、社会科学和其他许多社会生活领域，并对各学科之间的相互渗透起到了促进作用。自动控制技术的应用不仅使生产过程实现自动化，从而提高了劳动生产率和产品质量，降低了生产成本，提高了经济效益，改善了劳动条件，使人们从繁重的体力劳动和单调重复的脑力劳动中解放出来；而且在人类征服大自然、探索新能源、发展空间技术和创造人类社会文明等方面都具有十分重要的意义。

自动控制理论是研究关于自动控制系统组成、分析和综合的一般性理论，是研究自动控制共同规律的技术科学。学习和研究自动控制理论是为了探索自动控制系统中变量的变化规律和改变这种变化规律的可能性和途径，为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论根据。作为现代的工程技术人员和科学工作者，都必须具备一定的自动控制理论基础知识。

1.2 自动控制理论发展概述

自动控制理论是在人类征服自然的生产实践活动中孕育、产生，并随着社会生产和科学技术的进步而不断发展、完善起来的。早在古代，劳动人民就凭借生产实践中积累的丰富经验和对反馈概念的直观认识，发明了许多闪烁控制理论智慧火花的杰作。例如，公元前 14 世纪至公元前 11 世纪，中国和巴比伦出现了自动计时装置——刻漏，为人类研制和使用自动装置之始。公元 1 世纪，古埃及和希腊的发明家创造了教堂庙门自动开启装置、铜祭司自动洒圣水等自动装置。公元 120 年，中国东汉天文学家张衡创造了世界上最



早的以水为动力的观测天象的机械计时器——漏水转运浑天仪，实现天体运行的自动仿真。132年，张衡创造了候风地动仪，实现了地震的自动监测。220年，由马钧以及南齐的祖冲之创造了指南车。1088年，北宋苏颂和韩公廉等利用天衡装置制成水运仪象台，实现计报时等自动监测。1642年，法国物理学家帕斯卡采用与钟表类似的齿轮传动装置，发明了第一台机械式十进制加法器。1681年，法国人丹尼斯帕潘发明了用作安全调节装置的锅炉压力调节器。1745年，英国机械师E. 李发明了带风向控制的风磨。1765年，俄国机械师普尔佐诺夫发明了蒸汽锅炉水位保持恒定用的浮子式阀门水位控制器。

1788年，英国人瓦特在他发明的蒸汽机上使用了离心调速器，解决了蒸汽机的速度控制问题，引起了人们对控制技术的重视。之后，人们曾经试图改善调速器的准确性，却常常导致系统产生振荡。1868年，法国工程师法尔科发明了反馈调节器操纵蒸汽船的舵。实践中出现的问题，促使科学家们从理论上进行探索研究。1898年，英国物理学家麦克斯韦用微分方程描述并证明了蒸汽机转速发生振荡的原因，总结了调节器理论。1877年英国数学家劳斯、1895年德国数学家赫尔维茨各自独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则，提出代数稳定判据。1892年，俄国数学家李雅普诺夫提出了稳定性理论。这些方法奠定了经典控制理论中时域分析法的基础。

1927年，美国电气工程师布莱克在解决电子管放大器失真问题时引入了反馈概念，此后，在拉普拉斯变换的基础上，引入了传递函数的概念。1932年，美国电气工程师奈奎斯特运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性判据，奠定了频率响应法的基础，并提出了著名的频率稳定判据。1938年，原苏联电气工程师米哈伊格夫提出了根据闭环系统频率特性判定稳定性的判据。随后，伯德和尼柯尔斯在20世纪30年代末和40年代初进一步将频率响应法加以发展，形成了经典控制理论的频域分析法，为工程技术人员提供了一个设计反馈控制系统的有效工具。

第二次世界大战期间，为了解决防空火力控制系统和飞机自动导航系统等军事技术问题，各国科学家设计出了各种精密的自动调节装置。1945年，美国数学家维纳把反馈概念推广到生物等一切控制系统。1948年，美国数学家伊文斯提出了根轨迹法，为分析系统性能随系统参数变化的规律性提供了有力工具，被广泛应用于反馈控制系统的分析、设计。1954年，中国科学家钱学森出版了《工程控制论》。

以传递函数作为描述系统的数学模型，以时域分析法、根轨迹法和频域分析法为主要分析设计工具，构成了经典控制理论的基本框架。经典控制理论研究的对象基本上是以线性定常系统为主的单输入-单输出系统，还不能解决如时变参数问题，多变量、强耦合等复杂的控制问题。

第二次世界大战后工业迅速发展，随着高速飞行器、核反应堆、大电力网和大化工厂等的出现提出了新的控制问题，如非线性系统、时滞系统、脉冲及采样控制系统、时变系统、分布参数系统及有随机信号输入的系统控制等问题，通过对这些问题的深入研究，经典控制理论在20世纪50年代有了新的发展。1956年，苏联科学家庞特里亚金提出极大值原理。同年，美国数学家贝尔曼创立了动态规划。极大值原理和动态规划为解决最优控制问题提供了理论工具。1959年，美国数学家卡尔曼提出了著名的卡尔曼滤波算法，1960年，卡尔曼又提出系统的能控性和能观性问题，并引入了状态空间法。到

20世纪60年代初,一套以状态方程作为描述系统的数学模型,以最优控制和卡尔曼滤波为核心的控制系统分析设计的新原理和方法基本确定,现代控制理论应运而生。

现代控制理论主要利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段,适用于多变量、非线性、时变系统。为了解决现代控制理论在工业生产过程应用中所遇到的被控对象精确状态空间模型不易建立、合适的最优性能指标难以构造、所得最优控制器往往过于复杂等问题,科学家们不懈努力,近几十年不断提出一些新的控制方法和理论,例如,自适应控制、预测控制、容诺控制、鲁棒控制、非线性控制和大系统、复杂系统控制等,极大地扩展了控制理论的研究范围。

控制理论目前还在不断向更深、更广的领域发展。以控制论、信息论和仿生学为基础的智能控制理论,开拓了更广泛的研究领域,在信息与控制学科研究中注入了蓬勃的生命力。无论在数学工具、理论基础,还是在研究方法上,控制理论都产生了实质性的飞跃,启发并扩展了人的思维方式,引导人们去探讨自然界更为深刻的运动机理。

1.3 自动控制的基本原理

1.3.1 人工控制与自动控制

在许多工业生产过程或生产设备运行中,为了保证正常的工作条件,往往需要对某些物理量(温度、压力、流量、液位、电压、位移、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,以抵消外界干扰的影响。这种操作通常称为控制,由人工操作完成称为人工控制,由自动装置完成称为自动控制。

以图1-1a所示人工控制液位恒定供水系统为例,说明人工控制的基本原理。操作人员的任务是:一方面要维持水经过出水管道源源不断地供给用户,另一方面要保持一定的水压确保供水质量。这一任务决定了控制目标就是要保持水池(被控对象)的液位(被控量)在指定的位置尽可能恒定不变,即在保持不间断供水的同时也确保供水的质量(水压恒定)。人工控制的操作过程如下:

- ① 操作人员将期望的液位值(即水位高度)记在大脑中;
- ② 操作人员读取水池内的实际液位值;
- ③ 操作人员将液位期望值与实际值进行比较得出偏差值;
- ④ 操作人员根据偏差的大小和性质(正负性),决定如何通过用手打开或关闭阀门的方式来调节经过阀门的水量大小,以达到维持液位恒定的控制目标。

只要水位偏离了期望值,上述液位控制过程就不断重复,每一步均由操作人员完成,故为人工控制。

若采用自动控制装置代替上述人工操作,就实现了人工不直接参与的情况下的自动控制。图1-1b所示为一个简单的水池液位自动控制系统。对照人工控制系统,其工作原理如下:

- ① 用连杆的长度代替人的大脑记下期望的液位值;
- ② 用浮子作为传感器代替人的眼睛测量实际液位值;

③ 用浮子和连杆组合代替人的大脑计算出液位期望值与实际值之间的偏差值；

④ 用杠杆机构的一端代替人的大脑对偏差的大小和性质进行判断，并据此决定由其另一端带动的进水阀如何动作(打开或关闭阀门)去调节水量的大小。

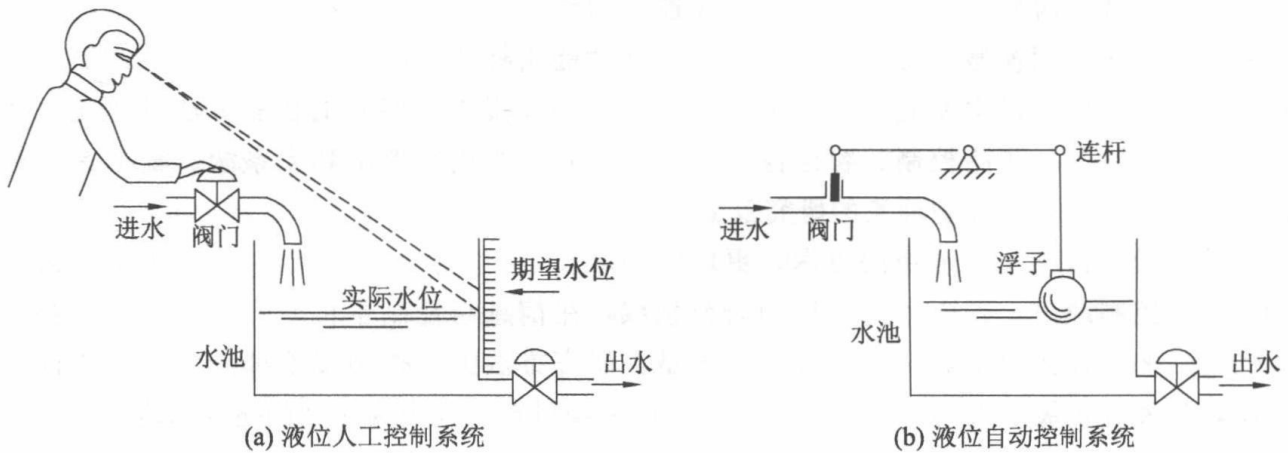


图 1-1 液位控制系统

由此可知，自动控制与人工控制的工作原理十分相似，自动控制把与人的器官对应的、能完成相应功能的元件有机地组合起来，以代替人的职能，模仿人工控制。在上述简单的液位自动控制系统中，这些元件有：① 能根据液位期望值来调节连杆长度的环节(称为给定元件)代替人的大脑记下液位期望值；② 浮子作为传感器(称为测量元件)代替人的眼睛测取实际液位值；③ 浮子和连杆组合代替人的大脑计算出液位偏差值(称为比较元件)；④ 杠杆机构代替人的大脑对偏差的大小和性质做出判断(作为决策机构做出如何校正的决定，称为校正元件)，从而带动进水阀(称为执行元件)代替人手打开或关闭阀门调节经过阀门的水量大小。可见，组成自动控制装置的元件一般应包括：给定元件、测量元件、比较元件、校正元件和执行元件，而上述液位自动控制系统就是由这些元件和被控对象(水池)组成的有机整体。

进一步分析可以发现，图 1-1b 所示的系统由于结构简陋而存在缺陷，还不能完全代替人工控制，主要表现在被控制的液位高度将随着出水量的变化而变化。出水量越多，水位就越低，偏离期望值就越远，误差越大。控制结果总存在着一定范围的误差值。当用户用水量增加时，导致水池液位下降。为了保持液位在原来的期望值，操作人员会开大阀门使进水量大于出水量以便水位升回到期望值；当液位回到期望值时，操作人员再关小阀门使进水量与新的出水量相等，从而维持水位在期望值不变。因此，图 1-1b 所示的简单液位自动控制系统尽管能够代替人工实现自动控制，但却无法代替人工实现尽可能缩小液位误差的控制。究其原因，简单液位自动控制系统中的给定元件、测量元件、比较元件和执行元件都较好地替代了操作人员的工作，然而维持新的进水量需要液位低于期望值，即作为校正元件的杠杆机构无法替代操作人员的不断重复操作。这揭示了简单液位自动控制系统还不能完全替代人的大脑决策过程，需要从作为决策机构的校正元件入手来进一步改进系统。

图 1-2 所示为液位自动控制系统(机电)，其工作原理如下：

① 用电位器和杠杆机构代替人的大脑记下液位期望值对应的电位器给定值(电位器的

滑块居中, $u_e=0$);

② 浮子作为传感器代替人的眼睛测量实际液位值;

③ 电位器和杠杆机构代替人的大脑计算出电位器上对应于期望值的给定值与对应的实际测量值之间的差值(此时为电压值);

④ 功率放大器与电动机组成的校正环节代替人的大脑对偏差的大小和性质进行判断, 并由此决定电动机如何转动带动阀门(打开或关闭阀门)去调节水量的大小;

⑤ 只要电位器和杠杆机构比较所得的差值不为0, 则功率放大器与电动机组成的校正环节连续不断地产生控制作用, 即进一步打开或关闭阀门, 甚至使阀门达到全开或全闭状态, 使液位上升或下降, 直到液位恢复到期望值为止(如出水量增大时, 浮子下降, 带动电位器滑块向上移动, 输出电压 $u_e > 0$, 经放大后成为 u_a , 控制电动机正向旋转, 以增大进水阀门开度, 促使水位回升。当实际水位回复到期望值时, $u_e=0$, 系统达到新的平衡状态)。

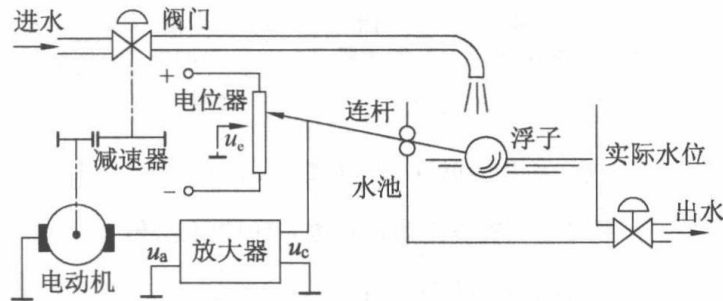


图 1-2 液位自动控制系统(机电)

1.3.2 自动控制系统基本控制方式

自动控制系统的性能, 在很大程度上取决于系统的控制器为了产生控制作用而必须接收的信息。这个信息有2个可能的来源: 一个来自系统外部, 即由输入端输入的输入信号, 另一个来源于被控对象的输出端, 即反映被控对象的行为或状态的信息。把从被控对象输出端获得的信息, 通过中间环节(称为反馈环节)再送回到控制器的输入端, 称为反馈。因此, 系统的基本控制方式也就按有无反馈分为两大类: 开环控制和闭环控制。对应的系统分别称为开环控制系统和闭环控制系统。

1.3.2.1 开环控制系统

开环控制系统是指控制器与控制对象之间只有正向作用, 而没有反向联系的系统, 如图 1-3 所示。它的工作原理是直接根据扰动进行控制,

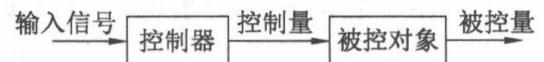
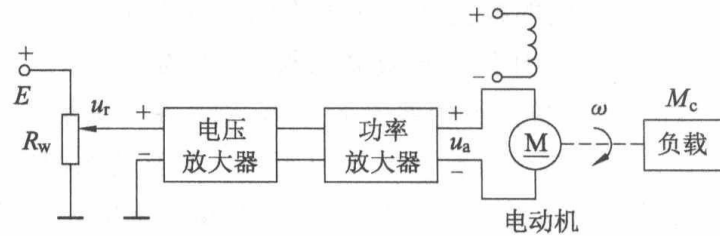


图 1-3 开环控制系统的组成

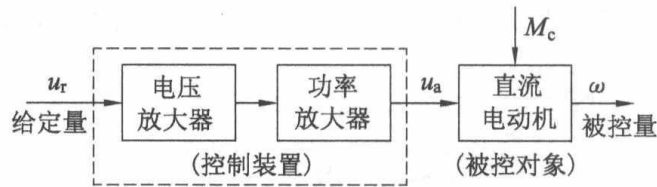
也称为前馈控制。这种控制系统结构简单, 成本较低, 但抗干扰能力差, 对系统参数变化比较敏感, 系统的精度主要取决于元器件的精度和调整的精度。当系统内部干扰和外部干扰影响不大、精度要求不高时, 可采用开环控制方式。但是当系统在干扰作用下, 输出一旦偏离了原来的预定值, 由于系统没有输出反馈, 对控制量没有任何作用, 因此系统没有消除或减少偏差的功能, 这是开环控制的重大缺点, 从而限制了它的应用范围。

图 1-4a 所示为一个他激直流电动机转速开环控制系统的原理图, 它的任务是控制直流电动机以恒定的转速带动负载工作。其工作原理是:

- ① 通过调节电位器 R_w 的滑块给定输入电压 u_r ，即给定对应的期望电动机转速；
- ② 输入电压 u_r 经电压放大和功率放大后得电枢电压 u_a 控制电动机的转速；
- ③ 电动机带动负载工作。在负载恒定的条件下，他激直流电动机的转速 ω 与电枢电压 u_a 成正比，输入电压 u_r 与电动机转速 ω 形成一一对应的函数关系。



(a) 直流电动机转速开环控制系统



(b) 直流电动机转速开环控制系统方框图

图 1-4 直流电动机转速开环控制系统

在该系统中，直流电动机是被控对象，电动机的转速 ω 是被控量，也称为系统的输出量或输出信号，输入电压 u_r 通常称为系统的给定量或输入量。只有输入量 u_r 对输出量 ω 的单向控制作用，而输出量 ω 对输入量 u_r 却没有任何影响和联系，称这种系统为开环控制系统。

图 1-4b 为直流电动机转速开环控制系统的方框图。图中用方框代表系统中具有相应职能的元件(或功能环节)；用带有箭头的有向线段表示各元件之间及输入、输出信号的传递方向。系统的输入信号就是给定的输入电压 u_r ，功率放大器与电动机之间传递的信号就是电枢电压 u_a ，系统的输出信号就是电动机的转速 ω 。工作中，因外部因素产生负载转矩 M_c 时，都会使输出量 ω 偏离期望值，这种作用称之为干扰或扰动。

1.3.2.2 闭环控制系统

闭环控制系统是指控制器与控制对象之间既有正向作用，又有反向联系的系统，如图 1-5 所示。它的特点是系统的输出量对控制量有直接影响，结构相对复杂，成本有所增加。由于误差信号是输入信号与反馈信号之差，偏差信号作用于控制器上，系统的输出量趋向于给定的数值，因此称为负反馈。闭环控制的实质，就是利用反馈的作用来减小系统的误差，因此闭环控制又称为反馈控制。若反馈信号与输入信号相加，送入控制器输入端，则称为正反馈。必须指出，在系统主反馈通道中，只有采用负反馈才能达到控制的目的。若采用正反馈，将使偏差越来越大，导致系统发散而无法工作。

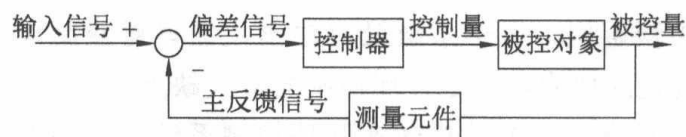


图 1-5 闭环控制系统

开环控制系统精度和抗干扰能力较差的主要原因是系统缺少从输出端到输入端的反馈回路。图 1-6a 所示为增加了反馈的直流电动机转速闭环控制系统。为了测量作为系统输出量的电动机转速 ω ，增加了一个测速发电机。测速发电机由电动机同轴带动，它将电动机的实际转速 ω 测量并量纲转换成电压 u_f ，再反馈到系统的输入端与输入电压 u_r 进行比较，从而得出电压 $u_e = u_r - u_f$ 。由于该电压能间接地反映出误差的性质（即大小和正负方向），通常称之为偏差信号，简称偏差。偏差电压 u_e 经放大器放大后成为 u_a ，用以控制电动机转速 ω 。其工作原理如下：

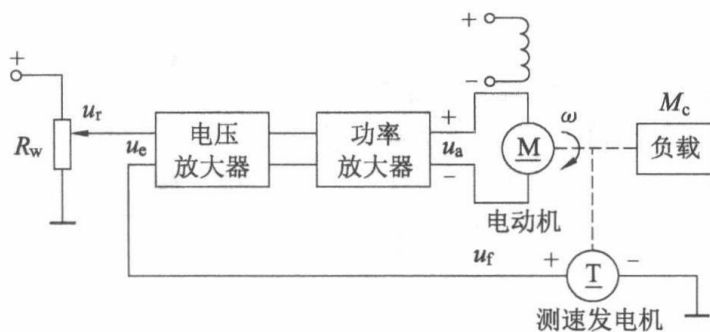
① 通过调节电位器 R_w 的滑块给定输入电压 u_r ，即给定对应的期望电动机转速；

② 输入电压 u_r 与测量电压 u_f 在电压放大器输入端产生偏差电压 u_e ，经过电压和功率放大器后得电枢电压 u_a 控制电动机转速；

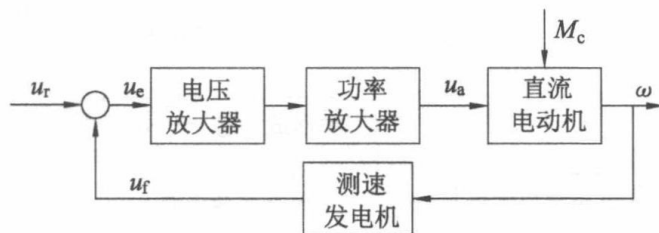
③ 当出现转矩扰动 M_c 时，测速发电机将电动机转速的变化量转换为反馈电压 u_f 的变化量，然后回送到系统输入端与输入电压 u_r 进行比较产生转矩扰动 M_c 引起的偏差电压 u_e ，从而形成闭环控制；

④ 电动机以尽可能接近期望值的转速带动负载工作。

图 1-6b 为直流电动机转速闭环控制系统。通常，把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，其输出量等于各个输入量的代数和。因此，各个输入量均须用正负号表明其极性。图 1-6 表明：采用反馈回路，致使信号的传输路径形成闭合回路，使输出量反过来直接影响控制作用。这种通过反馈回路使系统构成闭环，并按偏差产生控制作用，用以减小或消除偏差的控制系统，称为闭环控制系统，或称反馈控制系统。因此，闭环控制具有较强的抗干扰能力。



(a) 直流电动机转速开环控制系统原理图



(b) 直流电动机转速开环控制系统方框图

图 1-6 直流电动机转速闭环控制系统

闭环系统工作的本质机理是：将系统的输出信号引回到输入端，与输入信号相比较，

利用所得的偏差信号对系统进行调节，达到减小偏差或消除偏差的目的。这就是负反馈控制原理，它是构成闭环控制系统的核心。

1.3.2.3 复合控制系统

反馈控制只有在外作用(输入信号或干扰)对控制对象产生影响之后才能做出相应的控制。尤其当控制对象具有较大延迟时间时，反馈控制不能及时调节输出的变化，会影响系统输出的平稳性。前馈控制能使系统及时感受输入信号，使系统在偏差即将产生之前就注意纠正偏差。在反馈控制系统的基础上加入对主要扰动实施前馈控制的补偿装置，就构成了复合控制系统，也称为前馈—反馈控制系统，它可以有效提高系统的控制精度，如图 1-7 所示。

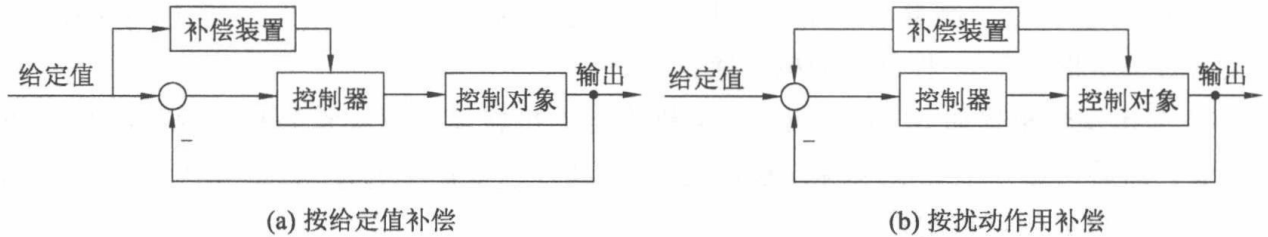
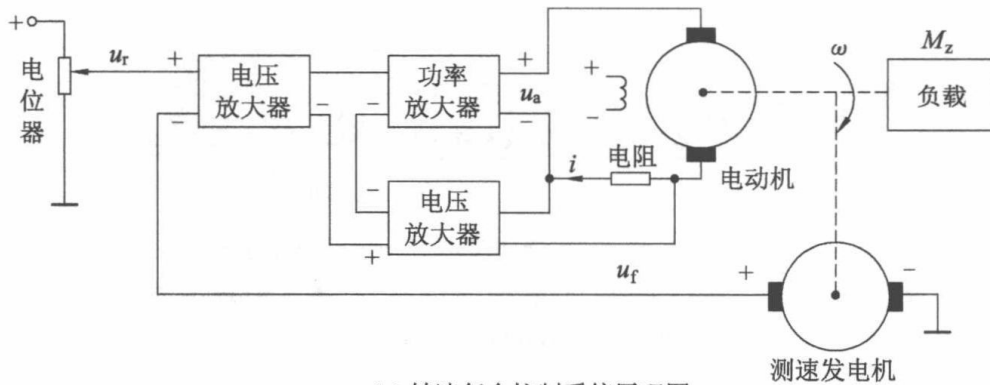
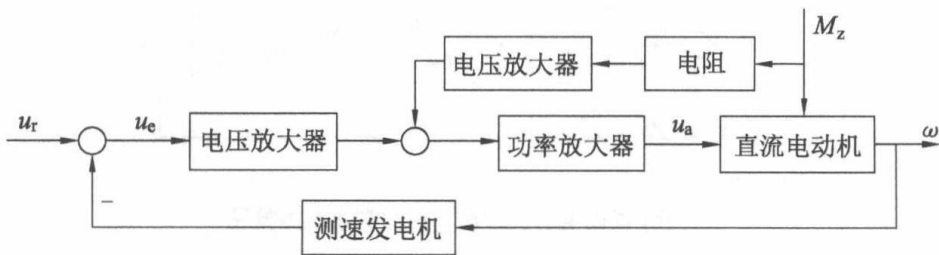


图 1-7 复合控制系统的组成

复合控制与反馈控制相比，有更高的控制速度和更好的控制质量，因此得到了比较广泛的应用。图 1-7a 所示为按给定值进行前馈补偿的系统，当输入指令发生变化时，系统的输出比纯反馈控制系统更能及时地做出响应；图 1-7b 所示为按主要扰动进行前馈补偿的系统，当主要扰动发生时，补偿装置将扰动信号输入控制器，控制器输出一个力求抵消扰动影响的控制信号作用到控制对象，以减小扰动对象对输出的影响。在热工自动控制系统中，这 2 种复合控制都得到了广泛的应用。直流电动机转速复合控制系统的原理图和方框图如图 1-8 所示。



(a) 转速复合控制系统原理图



(b) 转速复合控制系统方框图

图 1-8 直流电动机转速复合控制系统