自动控制理论

ZIDONG KONGZHI LILUN

辛海燕 ◎ 主编

东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

自动控制理论

主　编　辛海燕
副主编　李永梅　刘丽丽　左　梅

东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS
·南京·

内容提要

本书共安排了七章内容：第一章讲述自动控制系统的基本概念；第二章讲述自动控制系统的数学模型；第三章讲述自动控制系统的时域分析法；第四章讲述根轨迹法；第五章讲述自动控制系统的频域法；第六章讲述控制系统的校正；第七章讲述 MATLAB 在自动控制系统分析中的应用。

本书适用于自动控制类、电子信息科学类、机械类、电气类等相关专业作为教材，也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论 / 辛海燕主编. —南京：东南大学出版社，2018.1

ISBN 978-7-5641-7649-5

Ⅰ. ①自… Ⅱ. ①辛… 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(2018)第 034823 号

自动控制理论

出版发行	东南大学出版社
出 版 人	江建中
社　　址	南京市四牌楼 2 号
邮　　编	210096
网　　址	http://www.seupress.com
经　　销	全国各地新华书店
印　　刷	兴化印刷有限责任公司
开　　本	787 mm×1092 mm　1/16
印　　张	12.75
字　　数	320 千字
版　　次	2018 年 1 月第 1 版
印　　次	2018 年 1 月第 1 次印刷
书　　号	ISBN 978-7-5641-7649-5
定　　价	38.00 元

* 本社图书若有印装质量问题，请直接与营销部联系，电话：025-83791830

前 言

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。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。二战期间为了设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统以及其他基于反馈原理的军用设备，进一步促进并完善了自动控制理论的发展。到战后，已形成完整的自动控制理论体系，以传递函数为基础的经典控制理论，它主要研究单输入单输出的线性定常数系统的分析和设计问题。目前，自动控制理论的概念、方法和体系已经渗透到许多学科领域，诸如宇宙航行、导弹制导、导弹防御体系等一些高精度控制问题，在科学技术现代化的发展与创新过程中，正在发挥着越来越重要的作用。

为了适应应用型本科教学的需要，根据相应的教学大纲和学时安排，以实际应用为背景，选取了经典控制理论基础部分作为内容，编写本教材。本教材适用于自动控制类、电子信息科学类、机械类、电气类等相关专业作为教材，也可供有关科技人员参考。

本教材在编写中遵循以下两方面：在结构上，充分考虑经典控制理论体系的发展形成特点及认识规律，遵循传统模式，即“建模－分析－校正”，又注重将计算机辅助设计融为一体；在内容上，既注重基本概念、基本理论方法的阐述，力求概念清楚，思路清晰，循序渐进，同时又注重理论与实际相融合，深入浅出，精选典型例题与习题，便于教学和自学。

本教材共安排了七章内容。第一章讲述自动控制系统的基本概念；第二章讲述自动控制系统的数学模型；第三章讲述自动控制系统的时域分析法；第四章讲述根轨迹法；第五章讲述自动控制系统的频域法；第六章讲述控制系统的校正；第七章讲述 MATLAB 在自动控制系统分析中的应用。

本教材由东南大学成贤学院自动控制理论课题组编写，辛海燕担任主编，对全书进行了统稿，李永梅、刘丽丽、左梅担任副主编。辛海燕、李永梅、刘丽丽编写第一～六章，左梅编写第七章，许立峰从专业角度给出了建议和支持并完成了部分章节的校阅工作。在本书编写与出版期间，得到了东南大学成贤学院和东南大学出版社的大力支持和帮助，在此深表感谢！

由于时间仓促，加之我们水平有限，错误和不妥在所难免，恳请广大读者谅解，并不吝指正，我们将不胜感激！

辛海燕

2017 年 9 月于南京

目 录

第一章 自动控制系统的基本概念 …… 1

1.1 绪论 …… 1

1.1.1 自动控制技术 …… 1

1.1.2 自动控制技术的发展概况 …… 1

1.1.3 自动控制理论 …… 2

1.2 自动控制的任务 …… 2

1.3 自动控制的基本方式 …… 3

1.3.1 按输入量操纵的开环控制 …… 4

1.3.2 按扰动补偿的开环控制 …… 5

1.3.3 按偏差调节的闭环控制 …… 6

1.3.4 复合控制 …… 7

1.4 闭环控制系统的组成和基本环节 …… 8

1.4.1 闭环控制系统结构框图 …… 8

1.4.2 闭环控制系统的基本环节 …… 8

1.4.3 控制系统中的专用术语 …… 9

1.5 自动控制系统的分类 …… 10

1.5.1 线性系统和非线性系统 …… 10

1.5.2 定常系统和时变系统 …… 11

1.5.3 连续系统与离散系统 …… 11

1.5.4 恒值系统、随动系统和程序控制系统 …… 11

1.6 自动控制系统的性能要求 …… 12

1.6.1 稳 …… 12

1.6.2 快 …… 12

1.6.3 准 …… 12

习 题 …… 13

第二章 自动控制系统的数学模型 …… 14

2.1 控制系统微分方程的建立 …… 14

2.1.1 机械系统 …… 15
2.1.2 电路系统 …… 17
2.1.3 非线性微分方程小偏差线性化 …… 18
2.2 传递函数 …… 20
2.2.1 传递函数的概念 …… 20
2.2.2 传递函数的定义 …… 21
2.2.3 关于传递函数的几点说明 …… 22
2.2.4 典型环节的传递函数 …… 23
2.3 系统动态结构图 …… 28
2.3.1 动态结构图的组成 …… 28
2.3.2 系统动态结构图的建立 …… 29
2.3.3 传递函数和结构图的等效变换 …… 30
2.4 信号流图与梅森公式 …… 40
2.4.1 信号流图中的术语 …… 40
2.4.2 信号流图的绘制 …… 40
2.4.3 梅森公式(S. J. Mason) …… 40
习 题 …… 44
第三章 自动控制系统时域分析 …… 47
3.1 典型输入信号及性能指标 …… 47
3.1.1 典型输入信号 …… 47
3.1.2 典型初始状态 …… 51
3.1.3 典型时间响应 …… 51
3.1.4 阶跃响应性能指标 …… 52
3.2 一阶系统分析与计算 …… 54
3.2.1 一阶系统的数学模型 …… 54
3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应 …… 54
3.2.3 一阶系统的单位阶跃响应的性能指标 …… 55
3.3 二阶系统分析与计算 …… 56
3.3.1 二阶系统的数学模型 …… 57
3.3.2 二阶系统的特征根及性质 …… 57
3.3.3 二阶系统的单位阶跃响应 …… 58
3.4 高阶系统的时域分析 …… 68
3.5 系统稳定性分析 …… 69
3.5.1 稳定的基本概念 …… 69
3.5.2 稳定的数学条件 …… 70
3.5.3 代数稳定判据 …… 72

3.6 系统稳态误差分析 …… 79
3.6.1 误差与稳态误差 …… 79
3.6.2 稳态误差计算 …… 80
3.6.3 系统型别 …… 81
3.6.4 输入信号 $x_r(t)$ 作用下的稳态误差与静态误差系数 …… 82
3.6.5 扰动信号 $x_d(t)$ 作用下的稳态误差 …… 86
习 题 …… 87
第四章 根轨迹法 …… 91
4.1 根轨迹法的基本概念 …… 91
4.1.1 根轨迹概念 …… 91
4.1.2 根轨迹与系统性能 …… 92
4.1.3 闭环零、极点与开环零、极点之间的关系 …… 93
4.1.4 根轨迹方程 …… 94
4.2 根轨迹绘制的基本法则 …… 96
4.3 广义根轨迹 …… 114
4.3.1 参数根轨迹 …… 115
4.3.2 零度根轨迹 …… 116
4.4 控制系统的根轨迹分析 …… 120
4.4.1 用闭环零、极点表示的阶跃响应解析式 …… 120
4.4.2 闭环零、极点分布与阶跃响应的定性关系 …… 121
4.4.3 主导极点与偶极子的概念 …… 122
4.4.4 利用主导极点估算系统性能 …… 122
习 题 …… 125
第五章 自动控制系统频域分析 …… 128
5.1 频率特性 …… 128
5.1.1 频率响应 …… 128
5.1.2 频率特性的定义 …… 130
5.2 频率特性的图解法 …… 133
5.2.1 极坐标频率特性图 …… 133
5.2.2 对数坐标频率特性图 …… 135
5.3 典型环节的频率特性 …… 137
5.4 系统开环频率特性的绘制 …… 145
5.4.1 开环幅相特性曲线的绘制 …… 145
5.4.2 开环对数频率特性的绘制 …… 149
5.4.3 最小相位系统和非最小相位系统 …… 152
5.5 频率域稳定判据 …… 153

5.5.1 奈奎斯特稳定性判据 …… 153
5.5.2 对数频率稳定判据 …… 159
5.5.3 频域法分析系统的相对稳定性 …… 161
5.6 开环频率特性分析系统性能 …… 162
5.6.1 $L(\omega)$低频渐近线与系统稳态误差的关系 …… 163
5.6.2 $L(\omega)$中频段特性与系统动态性能的关系 …… 163
5.6.3 $L(\omega)$高频段对系统性能的影响 …… 167
5.7 闭环频率特性分析系统性能 …… 167
5.7.1 闭环频率特性 …… 167
5.7.2 闭环频域指标与时域指标的关系 …… 168
习 题 …… 170
第六章 自动控制系统的校正 …… 173
6.1 控制系统校正的基本概念 …… 173
6.1.1 系统的性能指标 …… 173
6.1.2 系统的校正方式 …… 174
6.1.3 校正装置的设计方法 …… 175
6.2 串联校正 …… 176
6.2.1 相位超前校正 …… 176
6.2.2 相位滞后校正 …… 180
6.2.3 相位滞后-超前校正 …… 181
习 题 …… 182
第七章 MATLAB 在控制系统中的应用 …… 184
7.1 控制系统数学模型的 MATLAB 描述 …… 184
7.1.1 传递函数模型 …… 184
7.1.2 零极点模型 …… 185
7.1.3 MATLAB 在系统方框图化简中的应用 …… 186
7.2 用 MATLAB 进行时域分析 …… 187
7.2.1 典型外作用的时域响应 …… 187
7.2.2 系统稳定性分析 …… 189
7.3 用 MATLAB 绘制系统的根轨迹图 …… 190
7.4 MATLAB 在频域分析中的应用 …… 191
参考文献 …… 194

第一章　自动控制系统的基本概念

1.1　绪论

1.1.1　自动控制技术

随着电子计算机技术和其他高新技术的发展，自动控制技术的水平越来越高，应用越来越广泛，作用越来越重要。尤其是在生产过程的自动化、工厂自动化、机器人技术、综合管理工程、航天工程、军事技术等领域，自动控制技术起到了关键作用。学习并掌握好自动控制技术，对于加快我国现代化的建设有着十分重要的意义。

自动控制的某些思想及应用或许可以追溯到久远的古代（如中国古代就有关于指南针和木牛流马的记载），但1787年瓦特（Watt）发明了离心式调速器，实现蒸汽机转速的自动调节，使蒸汽机作为转速稳定、安全可控的动力机，并得到了广泛应用，从而引发了第一次工业革命。现代生产过程自动控制技术的出现被认为是第二次工业革命的重要标志。现代生产过程自动控制技术主要具有以下一些重要特点：一是自动控制系统的应用范围不断扩大，控制精度不断提高，智能化程度日益增加；二是自动控制技术不仅仅能代替人无法完成的体力劳动，而且还能大量地代替人的脑力劳动。对于后者，其发展空间将会更为广阔。

1.1.2　自动控制技术的发展概况

回顾自动控制技术的发展历史可以看到，它与生产过程本身的大发展有着密切的联系。生产过程的发展可以概括为以下三句话：从一个简单形式到复杂形式；从局部自动控制到全局自动控制；从低级智能到高级智能的发展过程。

而自动控制技术的发展，大致经历了三个阶段。

第一个阶段：20世纪50年代以前可以归结为自动控制技术发展的第一阶段。在这一时期，自动控制的理论基础是使用传递函数对控制过程进行数学描述，其控制理论以1945年伯德（Bode）提出的频率法和伊万思（Evans）提出的根轨迹法为基本方法，因而带有明显的依靠人工和经验进行分析和综合的色彩。

第二个阶段：20世纪50—60年代，是自动控制技术发展的第二个阶段，为适应空间探索的需要而发展起来的现代控制理论已经产生，并已在某些尖端技术领域取得了惊人的成就。现代控制理论在综合和分析系统时，已从局部控制进入到在一定意义下的全局最优控制，而且在结构上已从单环控制扩展到多环控制，其功能也从单一因素控制向多

因素控制的方向发展，可以说现代控制理论是人们对控制技术在认识上的一次质的飞跃，为实现高水平的自动控制奠定了理论基础。

第三个阶段：进入20世纪70年代，工业自动化的发展表现出明显的特点，这正是工业过程控制进入第三个阶段的标志。

1.1.3 自动控制理论

自动控制系统一般由控制器和控制对象组成，为了实现自动控制的目的，控制器要遵循一定的控制规律，这就是自动控制理论所研究和阐述的内容。自动控制理论从三个方面对自动控制系统进行研究和阐述：

1. 系统模型

系统是一个广义的概念，它无处不在、无时不有，大到宇宙、小到一个原子都可以看做系统。系统物理形态的多样性要求在研究具体系统时能抛开它的物理属性，而用一种抽象化的表示。通常可以把一个物理系统所处的状态分为运动和静止两种。运动状态是指系统中变化的量尚处于变化过程的状态，而静止状态是指系统中的变量已经达到某一定值并不再变化的状态。系统的动态和静态都会满足一定的规律，若这些规律用数学表达式表示，就得到了系统的数学模型。从形式来看，系统的数学模型只描述了系统中各变量之间的相互关系，不关心它们的物理特征。例如，一个电学系统和一个机械系统可以用同一个数学方程式描述。自动控制系统中较受关注的是系统的动态，所以描述系统动态的方程是控制理论研究的主要对象。

2. 系统分析

已知一个自动控制系统的结构组成，即给出表示系统运动规律的数学模型，研究此系统具有什么样的特征，是自动控制理论所研究的第二方面的问题，即系统分析。经典控制理论主要采用时域、根轨迹以及频域三大分析方法。

3. 系统校正

系统分析是运用一些经典方法研究给定系统的稳、动态性能。而已知对控制系统性能指标的要求，确定控制系统应具有怎样的结构组成才可以满足要求，是系统分析的一个相反过程，是一个逆命题。在自动控制系统中，被控对象、测量变送环节等都是确定的，唯独可变的只有控制环节，故控制系统的结构形式只能在控制环节中实现。也就是说，控制器采用什么样的控制律去满足系统性能指标的要求，这一实现过程称为系统校正。

1.2 自动控制的任务

当今，满足社会发展的各个领域都离不开自动控制，那么，什么是自动控制呢？自动控制的任务是什么？

任何先进的机器设备和生产过程都必须按照预定的规律运行。例如，要使发电机能够正常供电，就必须保持其输出电压恒定，尽量避免负荷变化和原动机转速波动的影响；要使工业热压烧结炉生产出合格的产品，就必须严格控制炉温；要使矿井提升机正常工作，就必须控制其运行速度等。其中发电机、烧结炉、提升机是工作的机器设备；电压、炉温、速度是表征这些设备工作状态的物理量；而额定电压、设定的炉温和速度是对物理量

在运行过程中的要求。

在自动控制技术中，通常把这些工作的机器设备称作被控对象；把表征这些设备工作状态的物理量称作被控量；而对物理量在运行过程中的要求值称作给定值或输入量（或参考输入）。

自动控制的任务就是在没有人直接干预下，利用物理装置对生产设备和工艺过程进行合理的控制，使被控制的物理量等于给定值，或者按照一定的规律变化。

如果控制系统的输入量或给定值用 $x_r(t)$ 表示，输出量或被控量用 $x_c(t)$ 表示，则应使被控对象满足：

$$x_r(t) \approx x_c(t) \tag{1-1}$$

式(1-1)是自动控制任务的数学表达式。

自动控制系统是为实现某一控制目标所需要的所有物理部件的有机组合体，一般由控制装置和被控对象组成。

控制装置如何操纵被控对象，来完成自动控制的任务呢？它与被控对象之间的关系有何特点呢？有关这些问题将在下一节讲述。

1.3　自动控制的基本方式

自动控制是在没有人直接干预下，利用物理装置对生产设备和工艺过程进行合理的控制，使被控制的物理量等于给定值，或者按照一定的规律变化，即用控制装置来代替人的一部分工作。下面先分析一下人在完成某项任务中所要经历的主要过程和需要具备的基本职能，便于找出控制装置必须具备的智能部件。

人在接受某项任务后，首先要了解实际工作状况，观察实际结果，了解影响正常工作的各种扰动因素，而后将观察的结果与预期的目标相比较、分析，根据分析结果作出决策，并将决策下达执行部门。执行的结果怎么样，是否满足要求，需要再观察、比较、分析，就这样往复地进行，直到实际工作的结果与预期的结果相同，才算完成任务，这一完成任务的工作过程如图 1-1 所示。

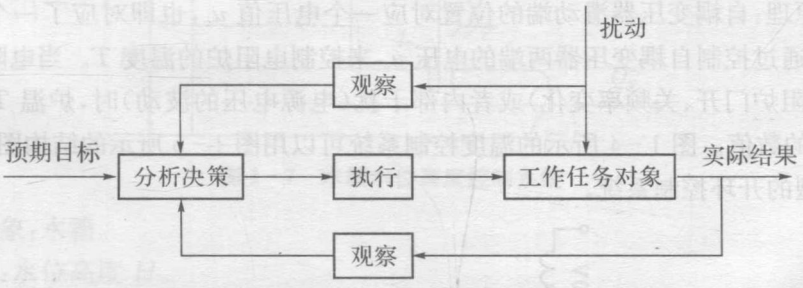


图 1-1　人工智能框图

自动控制即用控制装置来代替人的一部分工作，即用控制装置代替图 1-1 中的各环节。用工程语言描述它们之间的智能作用，则工作任务对象称作被控对象；工作任务的实际结果称作被控量，预期的目标称作给定值或输入量（或参考输入）。由各种测量变送器或传感器实现观察的任务；由计算机或控制器完成分析决策的任务；由各类执行机构

完成执行动作，按照此规则可以得出自动控制系统的结构图，如图 1-2 所示。

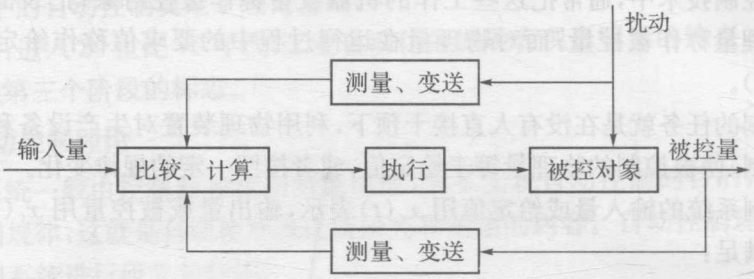


图 1-2　自动控制系统结构图

由图 1-2 可以看出，输入量、扰动量和被控量三种信号共同参与系统控制，下面根据不同信号源分析自动控制系统的几种基本控制方式。

1.3.1　按输入量操纵的开环控制

开环控制只有输入量对输出量产生控制作用，输出量不参与对系统的控制。按输入量操纵的开环控制系统结构如图 1-3 所示。开环控制具有以下特点：系统输入量与输出量一一对应；只有输入量参与对系统的控制作用，输出量不参与对系统的控制作用；当系统受到外界扰动时，若没有人工干预，输入量和输出量之间的一一对应关系将被改变，即系统的输出量（实际输出）将会偏离输入量（理想输出），也就说明开环系统不具有抗干扰能力。

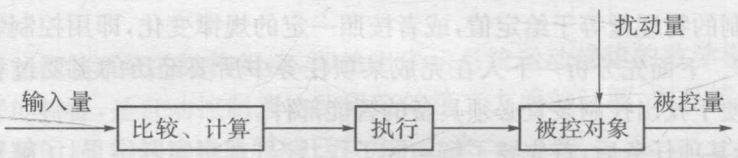


图 1-3　按输入量操纵的开环控制系统结构图

例如：图 1-4 所示的温度控制系统，控制的任务是保持炉温恒定。

被控对象：电阻炉。

被控量：炉温 T。

工作原理：自耦变压器滑动端的位置对应一个电压值 u_c，也即对应了一个电阻炉的温度值 T，通过控制自耦变压器两端的电压 u_c 来控制电阻炉的温度 T。当电阻炉受到外部干扰（电阻炉门开、关频率变化）或者内部干扰（电源电压的波动）时，炉温 T 将偏离电压 u_c 对应的数值。图 1-4 所示的温度控制系统可以用图 1-5 所示的结构图来表示，这是一种典型的开环控制系统。

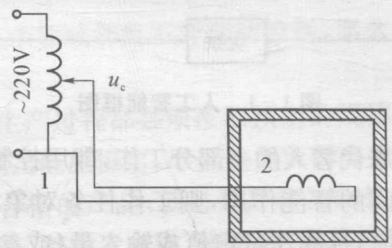


图 1-4　温度控制系统

1—控制器（自耦变压器）；2—被控对象（电阻炉）

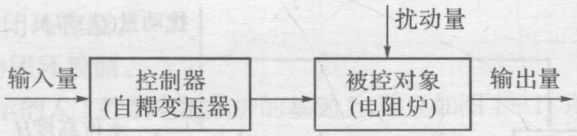


图 1-5　开环控制系统结构图

图 1-4 所示的温度控制系统无法实现温度恒定的控制目标，所以这类开环控制系统只能用于对控制精度要求不高的场合，如自动化流水线、自动洗衣机等都属于开环控制。

1.3.2　按扰动补偿的开环控制

按扰动补偿的开环控制系统结构如图 1-6 所示，这种控制结构的特点是：控制的是被控量，测量的是破坏系统正常工作的扰动量。系统利用扰动产生的控制作用，来补偿扰动对被控量的影响，而扰动量经测量、计算、执行到被控对象，信号也是单向传递的，故称这类结构系统为按扰动补偿的开环控制。该类系统对可测扰动进行补偿，而对不可测扰动及系统内部参数的变化对被控量造成的影响无法控制，故控制精度仍然受到原理的限制。

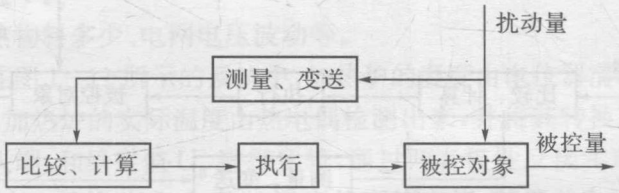


图 1-6　按扰动补偿的开环控制系统结构图

例如：水箱水位高度控制系统，如图 1-7 所示。控制的任务是保持水箱水位高度 H 不变。

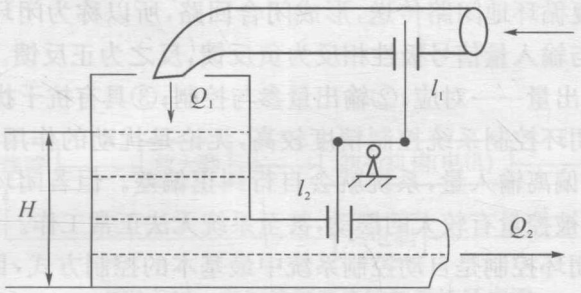


图 1-7　水箱水位高度控制系统

被控对象：水箱。

被控量：水位高度 H。

工作原理：当用水量 Q_2 增大或减小；出水阀门 l_2 开度开大或开小，都会影响水箱水位高度 H 的变化，故用水量 Q_2 或出水阀门 l_2 对于水箱系统来讲，是扰动量。当用水量 Q_2 增大，出水阀门 l_2 开大，此时扰动量通过杠杆测量后，去控制进水阀门 l_1 开大，使得用水量 Q_2 和进水量 Q_1 平衡，从而使水箱水位高度保持不变。

水箱水位高度控制系统的结构图如图 1-8 所示。

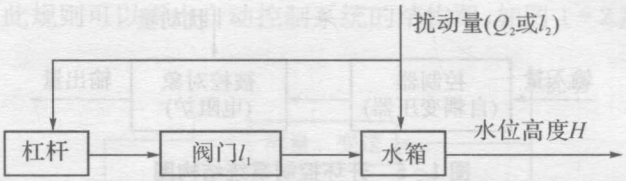


图 1-8　水箱水位高度控制系统结构图

当系统中其他扰动影响水位高度 H 时，如进水管水压的变化，系统对这一扰动是无补偿能力的。

1.3.3　按偏差调节的闭环控制

为满足那些控制精度要求高的应用需求，将在开环控制的基础上引入闭环控制，其结构图如图 1-9 所示。这种控制结构的特点是：需要控制的是被控量，而测量的是被控量与输入量之间的偏差。系统根据偏差进行控制，只要被控量偏离输入量，系统就自动纠正偏差，故称这种控制方式为按偏差调节。

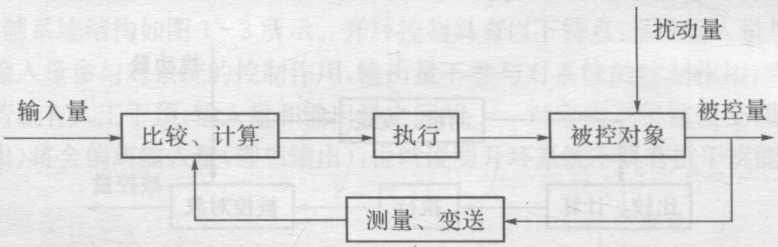


图 1-9　按偏差调节的闭环控制系统结构图

这种系统把被控量的一部分检测出来，反馈到输入端，与输入量进行比较，产生偏差，此偏差经过控制器产生控制作用，使输出量按照要求的规律变化，控制信号沿着前向通道与反馈通道往复循环地闭路传送，形成闭合回路，所以称为闭环控制系统或反馈控制系统。反馈信号与输入量信号极性相反为负反馈，反之为正反馈。闭环控制的典型特点是：①输入量与输出量一一对应；②输出量参与控制；③具有抗干扰能力。

按偏差调节的闭环控制系统控制精度较高，无论是扰动的作用，还是系统结构参数的变化，只要被控量偏离输入量，系统就会自行纠正偏差。但若闭环控制系统的参数匹配得不好，则会造成被控量有较大的摆动，甚至系统无法正常工作。

按偏差调节的闭环控制是自动控制系统中最基本的控制方式，目前在工程中获得了广泛的应用。

例 1-1　人工闭环控制。

人工控制的电加热炉示意图如图 1-10 所示。其中的控制过程主要有三个步骤：①测量炉温，人眼观察温度计示数，将温度读数送至人脑；②大脑将读数与给定温度（比如 600 ℃）比较，根据比较结果指挥手臂的动作；③调整加热电阻丝两端的电压（增大或减小），使炉温尽可能接近给定值。图 1-10 所示的人工控制电加热炉在人工干预下，可以实现自动控制的任务 $x_r(t)\approx x_c(t)$，而自动控制的作用是要在没有人直接干预下，实现同样的控制目的，为此建

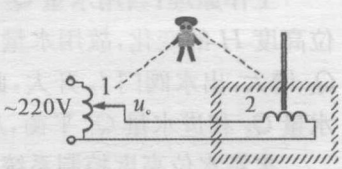


图 1-10　人工控制电加热炉

立以下所述的自动闭环控制。

例 1-2　自动闭环控制。

在图 1-10 所示的人工控制电加热炉的基础上，建立如图 1-11 所示的自动控制系统。

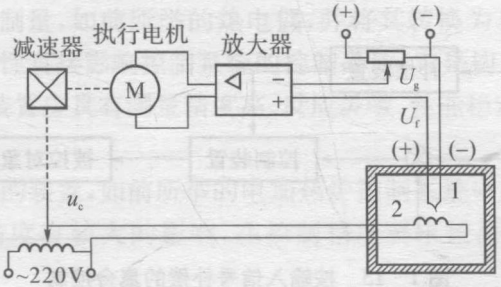


图 1-11　闭环控制系统图

1—热电偶；2—加热器

被控对象：电加热炉。

被控量：炉温 T。

扰动量：加热物料多少、电网电压波动等。

工作原理：在图 1-11 所示的系统中，加热炉的温度由电位器滑动端位置所对应的电压值 U_g 给出，电加热炉的实际温度由热电偶检测出来，并将其转换成对应的电压 U_f，再将 U_f 反馈到输入端，和给定值 U_g 进行比较，通过两者极性反接实现。当受到电源电压波动或加热物料多少等扰动时，加热炉温度偏离给定值，其偏差电压经过放大器进行放大，来控制执行电机 M，再经过减速器，带动自耦变压器的滑动端，来改变电压 u_c，使炉温 T 恒保持给定温度值。图 1-11 的闭环控制系统的结构可以用图 1-12 所示的闭环控制结构图来描述。

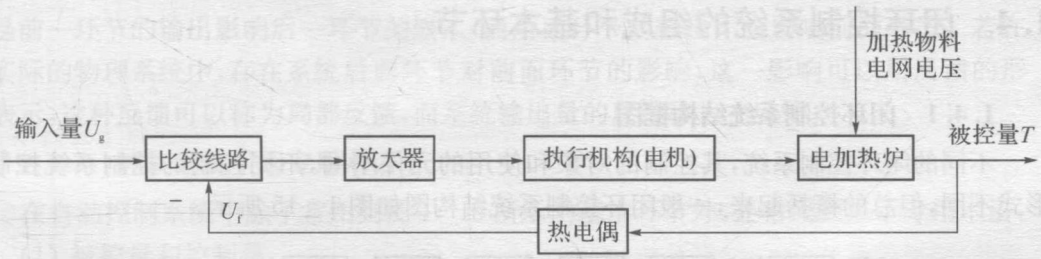


图 1-12　电加热炉温度控制系统原理图

由上图 1-11 和图 1-12 可以看出，系统通过热电偶测量出被控量，并将测量信号反馈到输入端，形成闭合回路，反馈信号通过比较线路与输入量进行减法运算，获得偏差信号，控制系统根据偏差信号的大小和方向进行调节，故电加热炉温度控制系统是一个按偏差调节的闭环控制系统。

1.3.4　复合控制

将开环控制和闭环控制相结合，即构成复合控制。复合控制实质上是在闭环控制回路中增加了一个输入信号或扰动信号的顺馈通道，用来提高系统的控制精度。通常按照顺馈通道补偿的信号类型分类，将复合控制分为按输入信号补偿的复合控制和按扰动信

号补偿的复合控制两大类。

按输入信号补偿的复合控制结构，如图 1－13 所示。补偿装置提供一个输入信号的微分作用，并作为顺馈控制信号与原输入信号一起对被控对象进行控制，用以提高系统的控制精度。

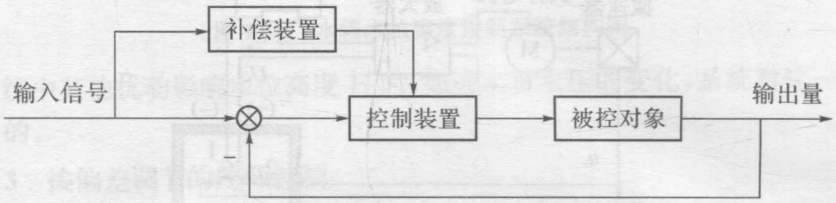


图 1－13　按输入信号补偿的复合控制

按扰动信号补偿的复合控制结构，如图 1－14 所示。补偿装置能够在可测量的扰动对系统产生不利影响之前，提供一个控制作用来抑制扰动对系统输出的影响。

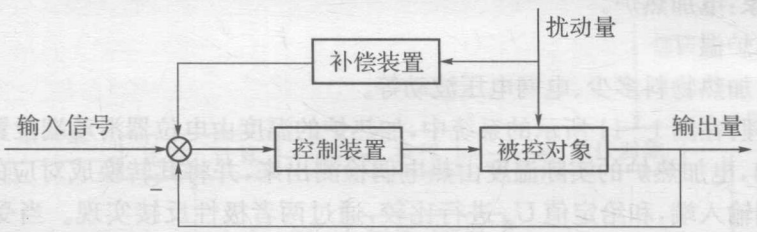


图 1－14　按扰动信号补偿的复合控制

复合控制中的顺馈通路等效于开环控制，故对补偿装置的参数稳定性要求较高，以免补偿装置参数漂移而减弱补偿效果。

1.4　闭环控制系统的组成和基本环节

1.4.1　闭环控制系统结构框图

不同的闭环控制系统，其控制的对象和使用的元件不同，不同控制的控制系统控制形式不同，但总的概括起来，一般闭环控制系统结构图如图 1－15 所示。

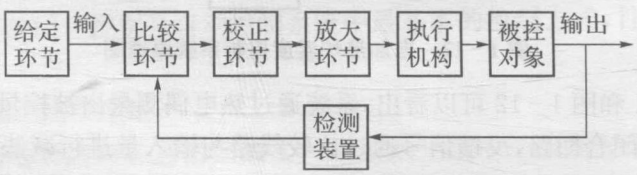


图 1－15　闭环控制系统结构图

1.4.2　闭环控制系统的基本环节

图 1－15 所示的闭环控制系统结构图中，主要具有以下基本环节：

(1) 控制对象或调节对象

要进行控制的设备或过程，如前面所举例中的水箱、电加热炉等。

(2) 执行机构

一般由传动装置和调节机构组成。执行机构直接作用于控制对象，使被控制量达到所要求的数值。

(3) 检测装置或传感器

该装置用来检测被控制量，如前所举的热电偶，并将其转换为与给定量相同的物理量。检测装置的精度和特性直接影响控制系统的控制品质，它是构成自动控制系统的关键性部件，通常要求检测装置应具有测量精度高、反应灵敏、性能稳定等优点。

(4) 给定环节

设定被控量的给定值的装置，如前所举的电加热炉控制系统中的电位器。给定环节的精度对被控量的控制精度有较大的影响，在控制精度要求较高时，常采用数字给定装置。

(5) 比较环节

将所检测的被控量与给定量进行比较，确定两者之间的偏差量。此偏差量因功率较小或因物理性质不同，一般不能直接作用于执行机构，在执行机构和比较环节之间还需要有中间环节。

(6) 中间环节

一般包括放大环节和校正环节。中间环节可以是一个放大环节，将偏差信号变换成适于控制执行机构工作的信号，一个简单的放大环节，如放大器；或者是将偏差信号变换为适于执行机构工作的物理量，如功率放大器。此外，中间环节还能够按照某种规律对偏差信号进行运算，用运算的结果控制执行机构，改善被控量的稳态和动态性能，即校正环节。

在一个一般的控制系统中，通常把比较环节、放大环节、校正环节统称为控制器。

图 1-15 所示的闭环控制系统结构中，比较清晰地表明了系统各个环节之间的关系和信号的传递方向。需要注意的是，各个环节的信号传递是有方向性的，在前向通道里，总是前一环节的输出影响后一环节的输入，而后面环节的输出不会影响前面环节。若在一实际的物理系统中，存在系统后面环节对前面环节的影响，这一影响可以用反馈的形式表示，这种反馈可以称为局部反馈，而系统输出量的反馈称为主反馈。

1.4.3　控制系统中的专用术语

在自动控制系统中除了常用到图 1-15 所示的基本环节外，还常用到以下专用术语：

(1) 被控量和控制量

被控量也称输出量，是被测量或被控制的量或状态，如电加热炉的温度、水箱的水位高度等。闭环控制系统的任务就是控制系统输出量的变化规律，满足生产工艺的要求。

控制量是一种由控制器改变的量或状态，它将影响被控量的值，如前所举例中加热电阻丝两端的电压。

被控量通常是系统的输出量，而控制量是系统的输入量。

(2) 对象

一般是一个设备，通常由一些机器零件有机地组合在一起。通常被控物体称为对象，如电加热炉。