

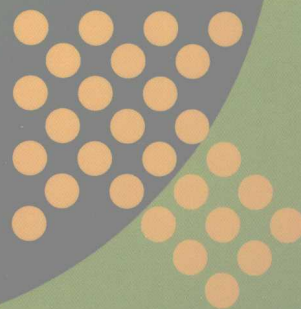
21世纪高等学校规划教材



ZIDONG KONGZHI YUANLI

自动控制原理

杜庆楠 主 编
乔美英 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

21世纪高等学校规划教材

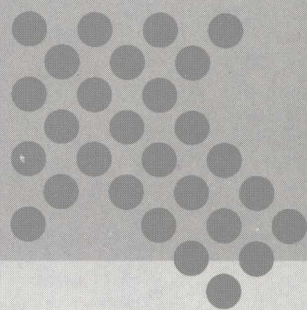


ZIDONG KONGZHI YUANLI

自动控制原理

主 编 杜庆楠
副主编 乔美英
参 编 王红旗
主 审 白 焰

冯高明 王新环 张蛟龙



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书从高等工程教育对人才的培养目标出发,讨论了经典控制理论中线性定常系统及非线性系统的基本理论与基本分析方法,着重培养学生利用计算机辅助分析工具分析与解决工程实际问题的能力。全书共7章,内容包括:控制系统的一般概念、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析、根轨迹法及线性系统频域响应分析、线性控制系统的频率特性校正与非线性控制系统基础。

本书可作为普通本科院校自动化专业、电气工程及自动化专业、电子信息工程专业、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。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 杜庆楠主编. —北京: 中国电力出版社, 2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-9169-4

I. 自… II. 杜… 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 (2009) 第 124552 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 418 千字
定价 28.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

随着自动控制技术的不断发展,自动控制理论也在不断完善。“自动控制原理”是专门研究自动控制系统的基本理论和基本分析方法的一门课程。本书主要讲述的是经典控制理论的线性定常系统和非线性系统的基本理论与基本分析方法。根据讲述内容的不同,参考学时可为 40~64 学时。本书在内容组织上力求突出重点,强调基本概念、基本分析方法,在叙述上力求通俗易懂、大量采用了课堂教学语言。书中大多系统分析与设计图形均采用 MATLAB6.5 中的编程进行实现,且大多在图形附近给出了该图的源程序。

本书的编写者均是由河南理工大学的长期从事自动控制原理教学一线教师编写,主编由河南理工大学教授杜庆楠担任。其中杜庆楠编写了第 1 章,乔美英编写了第 5 章及第 6 章的 6.1~6.3 节,王红旗编写了第 7 章,冯高明编写了第 2 章与第 4 章,王新环编写了第 3 章,张蛟龙编写了第 6 章的 6.4~6.6 节,全书统稿由杜庆楠与乔美英共同完成。华北电力大学自动化系白焰教授对本书进行详细深入地审稿,并提出了许多宝贵的修改意见,在此谨致诚挚的感谢!另外在编写过程中参考了胡寿松主编的自动控制原理习题解析中的一些自编 MATLAB 函数命令,在此向编者谨致衷心的感谢!

本书在编写过程中,参考了大量的专著、资料和文献,编者在此向有关作者致以诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误与不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2009 年 7 月

目 录

前 言

第 1 章 控制系统的一般概念	1
1.1 自动控制的基本原理与方式	1
1.2 控制系统的基本控制方式	4
1.3 闭环控制系统的基本组成及分类	6
1.4 自动控制系统的基本要求	11
1.5 小结	12
习题	12
第 2 章 控制系统的数学模型	13
2.1 引言	13
2.2 控制系统的时域数学模型	13
2.3 控制系统的复数域数学模型	26
2.4 控制系统的结构图及其等效变换	34
2.5 信号流图和梅森公式	41
小结	49
习题	49
第 3 章 控制系统的时域分析	54
3.1 引言	54
3.2 时域分析基础	54
3.3 一阶系统的时域分析	58
3.4 二阶系统的时域响应	62
3.5 高阶系统的时域响应	78
3.6 线性定常系统的稳定性	84
3.7 控制系统的稳态误差	93
小结	109
习题	110
第 4 章 根轨迹法	115
4.1 引言	115
4.2 根轨迹的基本概念	115
4.3 绘制根轨迹的基本规则	117
4.4 用 MATLAB 绘制根轨迹图	126
4.5 广义根轨迹	128
4.6 增加开环零极点对根轨迹的影响	132
4.7 控制系统的根轨迹分析	140

小结	144
习题	144
第 5 章 线性系统频域响应分析	147
5.1 引言	147
5.2 频率特性的基本概念	147
5.3 典型环节的频率特性	154
5.4 系统开环频率特性的绘制	166
5.5 奈奎斯特稳定判据	176
5.6 稳定裕度	185
5.7 系统闭环频率特性及其分析	188
5.8 利用开环频率特性分析系统的性能	192
小结	195
习题	195
第 6 章 线性控制系统的频率特性校正	200
6.1 线性控制系统校正的一般概念	200
6.2 常用校正装置	202
6.3 串联校正	212
6.4 期望频率特性法校正	224
6.5 反馈校正	229
6.6 复合校正	232
小结	234
习题	234
第 7 章 非线性控制系统基础	237
7.1 非线性系统基本概念	237
7.2 相平面法	240
7.3 相平面分析法	245
7.4 描述函数法	253
7.5 非线性系统的描述函数分析	261
小结	265
习题	266
参考文献	267

第 1 章 控制系统的一般概念

1.1 自动控制的基本原理与方式

1.1.1 自动控制的意义与作用

20 世纪中叶以来,随着科技的发展,自动控制技术的作用越来越重要。目前,自动控制广泛地应用于现代的工业、农业、国防和科学技术领域中。不可否认,现代社会正在向工业化、信息化及知识化的方向发展,而自动化水平正是一个国家工业化最重要的标志。可以说,一个国家在自动控制方面的水平,是衡量它的生产技术和科学技术水平先进与否的重要指标。自动控制作为一种重要的技术手段,能解决什么科学问题以及哪些性质的工程问题呢?能承担什么样的技术任务呢?自动控制涉及的范围那么广,如何才能有效地开展学习和研究呢?下面就带着这些问题展开本书的学习。

所谓的自动控制,是指没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(统称为控制器),使机器、设备或是生产过程(被控对象)的某个物理量或状态(称为被控量),自动按照预定的规律进行运行。

自动控制涉及的范围很广,如军事领域中:导弹命中目标、飞机驾驶系统;航天技术方面:登月计划,航天飞机,宇宙飞船准确在月球上着陆并能重返地球,人造卫星按预定轨迹运行并返回地面;工业生产过程中:对压力、温度、湿度、流量、频率及原料、燃料成分比例等方面的控制,全自动生产线;现代农业生产中:室温自动控制系统,自动灌溉系统;经济与社会生活的其他领域:导航控制系统使汽车自动保持在设定车速,刹车防抱死系统自动防止汽车在湿滑的路面上打滑,在大型办公楼或旅馆,电梯调度系统自动发送车辆搭载乘客。考虑人体的体温保持在 37°C 的自动温控系统、心跳控制系统、眼球聚焦系统。从肾脏、肺和肝脏的功能来看,它们均可以称为自动控制系统。

尽管接下来将要涉及的全部是自动控制在工程应用方面的例子,但它的概念已经扩大到其他领域,如经济、政治等领域。生产的自动化,管理的科学化,极大地改善了劳动条件,增加了产量,提高了产品质量。近十几年来,计算机的广泛应用,使自动控制理论更加迅速地向前发展,也使得自动控制技术所能完成的任务更加复杂,水平极大地提高了。电子技术及计算机技术的迅猛发展,犹如为自动控制技术插上了两只翅膀,自动控制技术将在愈来愈多的领域发挥愈来愈重要的作用。因此,各个领域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知识。

1.1.2 控制理论的发展

自动控制理论是在人类征服自然的生产实践活动中孕育、产生的,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。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制理论通常分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

- 18 世纪(1788 年), James Watt 为控制蒸汽机速度而设计的离心式飞锤调节器。
- 1868 年,英国的物理学家 Maxwell (1831~1879 年)在《论调速器》中建立了飞球

控制器的微分数学模型，并指出稳定性可由微分方程的根决定。

- 1877 年和 1895 年，英国的 Routh 与德国的 Hurwitz 先后独立提出稳定性判据。
- 1892 年，俄国数学家 Lyapunov 创立了李雅普诺夫稳定性理论。
- 1932 年，美籍瑞典人 Nyquist 提出了一种相当简便的方法，根据对稳态正弦输入的开环响应，确定闭环的稳定性的 Nyquist 稳定判据，奠定了频域分析法的基础。随后，伯德 (H.W.Bode) 和尼柯尔斯 (N.B.Nichols) 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。
- 1934 年，Hezen 提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念，讨论了可以精确跟踪变化的输入信号的继电式伺服机构。
- 1948 年，美国 W.Evans 提出根轨迹法 (Root Locus Method)。
- 1942 年，美国 J.G.Ziegler 和 N.B.Nichols 提出 PID 参数的最佳调整规则。
- 美国 MIT 的 N.Wiener 研究随机过程的预测 (1942)，提出 Wiener 滤波理论 (1942)，发表《控制论 (Cybernetics)》一书 (1948)，标志着控制论学科的诞生。

第二次世界大战中火炮、雷达、飞机以及通信系统的控制研究直接推动了经典控制的发展。20 世纪 50 年代后兴起的现代控制源于冷战时期的军备竞赛，如导弹 (发射、操纵、指导及跟踪)、卫星、航天器和星球大战，以及计算机技术的出现。

- 1956 年，前苏联的 L.S.Pontryagin 发表“最优过程数学理论”，提出了极大值原理 (Maximum Principle)。
- 1957 年，美国数学家 R.贝尔曼 (R.Bellman) 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。
- 1957 年，美国 R.Bellman 发表著名的 Dynamic Programming，建立最优控制的基础。
- 1959 年，美国数学家卡尔曼 (R.Kalman) 提出了著名的卡尔曼滤波器，1960 年卡尔曼又提出系统的可控性和可观测性问题。

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。经典控制理论与现代控制理论对比如表 1-1 所示。

表 1-1 经典控制理论与现代控制理论对比

分类	研究对象	数学工具	分析方法	局限性
经典控制理论	单输入-单输出线性定常系统	微分方程、传递函数	时域分析法、频域分析法、根轨迹分析法	对复杂多变量系统、时变和非线性系统无能为力
现代控制理论	多输入-多输出时变系数，非线性等系统	线性代数、矩阵理论	状态空间法	比较烦琐 (但由于计算机技术的迅速发展，这一局限性已克服)

1.1.3 人工控制

在人直接参与的情况下，利用控制装置使被控制对象和过程按预定规律变化的过程，称为人工控制。有人参与的控制系统称为人工控制系统。下面以控制某烘炉中温度保持恒值为例来进行说明。

在图 1-1 所示的系统中烘炉是被控制对象，炉内的温度是被控量，其控制目标是保持烘

炉中的温度为恒值，这一恒值就是此系统的期望输出值。由于烘炉会受到各种因素的干扰，如外界温度的变化、烘炉的炉门开启次数等，炉内的温度不能保持在期望值上，所以在一些简单的应用场合，采用人工控制来使其保持温度为恒值。下面简述其基本工作过程。

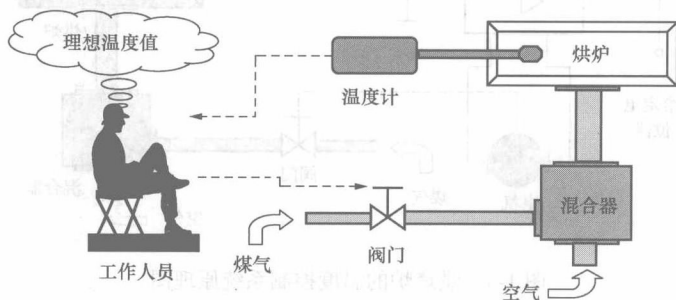


图 1-1 人工控制的烘炉温度控制系统

首先，工作人员将测得的温度与希望的温度值进行比较，看它们是否相等，若不等，是偏高，还是偏低，偏差是多少。所谓比较，就是人在脑子里进行一个简单的减法运算，即把脑子里记忆的期望值与通过温度计测得的实际温度相减得出。然后，根据偏差的大小来决定阀门是开大还是减小，从而改变送入烘炉中的煤气含量，使实际输出的温度值接近或等于理想温度值。由此可见，人在控制过程中主要完成了观测、比较和执行这三种作用。人工控制的职能如图 1-2 所示。

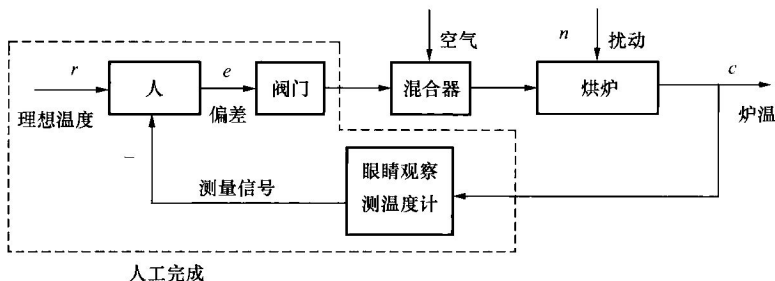


图 1-2 人工控制的烘炉温度控制的职能框图

显然，在温度波动较小、现场环境不太恶劣的场合下，采用人工控制是可以完成的，但是人工控制系统有许多缺点，甚至有时也是不可能实现的。首先，人工控制系统的控制精度不高，或者说控制精度完全取决于操作者的经验；其次，由于有些控制过程动作极快，人的反应不能适应；最后，有些场合如高温、放射性等对人体有危害的领域，人无法直接参与控制。因此，为了进一步改善控制系统的性能，必须应用机械、电气、液压等自动化装置来代替人对一些物理量自动地进行控制，这样人工控制系统就发展成为了自动控制系统。

1.1.4 自动控制

所谓自动控制系统是由控制装置和被控制对象所组成的，它们以某种相互依赖的方式结合成为一个有机整体，并对被控制对象进行自动控制。下面仍以上例来说明如何用一些设备代替人的作用来完成自动控制的任務。如图 1-3 所示为自动控制的温度控制系统。

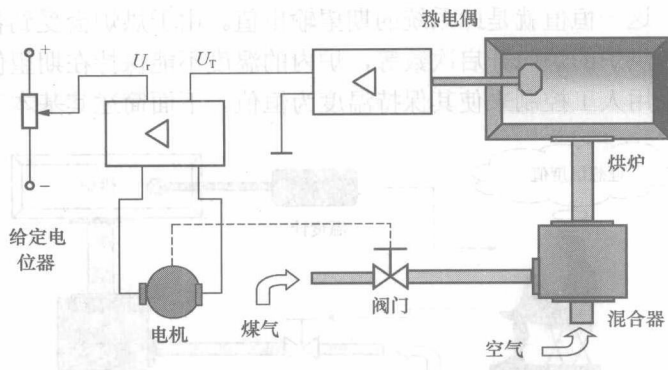


图 1-3 烘烤炉的温度控制系统原理图

热电偶将从烘炉中检测到的温度值变换为电压信号，再送入与参考输入电压进行比较放大，将放大后的偏差驱动电机旋转，来带动阀门的开大与关小。如果实际的温度值大于理想值，则执行电机将向使阀门关小的方向运行，反之，向开大的方向运行。在这里分别用热电偶、比较放大器与执行电机代替人完成了测量、比较和执行这三种任务。其职能框图如图 1-4 所示。

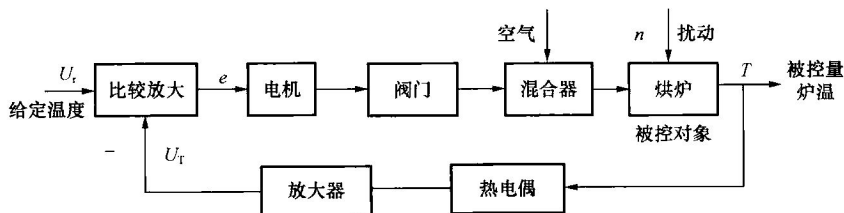


图 1-4 自动控制的烘炉温度控制系统的职能框图

在这里需要强调指出的是，仅仅使某些物理量发生变化并不困难，困难在于要求其变化符合指定的规律，而实际物理系统的惯性和一些非线性因素，以及外界对系统的扰动总是妨碍着实现这些要求。如烘炉的炉温要保持一个恒定值，为其“指定规律”，而烘炉本身的热惯性及烘的过程中元件的取出与送入的不确定性，均会影响炉温保持恒定这一目标的实现。总之，系统本身客观存在的惯性及一些非线性因素，还有一些不确定的扰动，与物理量的变化要符合指定规律这一要求，构成了矛盾的双方。而自动控制正是研究在这些客观事实存在的情况下，如何控制某些物理量按照指定的规律变化的。

1.2 控制系统的基本控制方式

1.2.1 开环控制方式

开环控制方式指控制装置与被控制对象之间只有正向作用而没有反向联系的控制过程。按这种方式组成的系统称为开环控制系统，其特点是系统的输出不会对系统的控制作用产生影响，开环控制系统可按给定量控制方式组成，也可以按扰动量控制方式组成。

按给定量控制的开环控制系统，其控制作用直接由系统的输入量产生，给定一个输入量，

就有一个输出量与对应, 控制的精度完全取决于所用的元件及校准的精度, 在开环系统中, 不需要对输出量进行测量, 如图 1-5 所示就是一个开环控制电机调速系统的例子, 如果想保持电机输出转速恒定, 则可通过计算得出需要加入的电压大小, 一个电压值 u_i 对应一个速度值 n_c , 当系统中出现外部扰动 (负载突然增加或减小) 或内部扰动 (如电源电压波动) 时, n_c 将偏离 u_i 所对应的数值, 所以这种控制方式没有自动修正偏差的能力, 抗干扰能力较差。其原理如图 1-6 所示。但由于其结构简单、调整方便、成本低, 在精度要求不高或扰动影响较小的情况下, 这种控制方式, 还有一定的实用价值, 如指挥交通的红绿灯转换、产品自动生产线、自动售货机、自动洗衣机等。

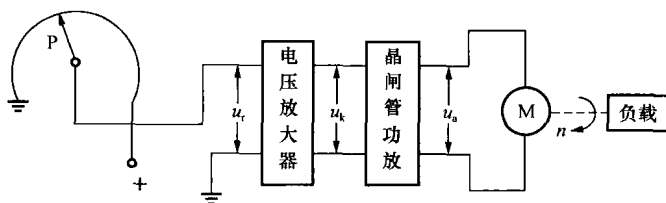


图 1-5 直流电机转速开环控制系统原理图

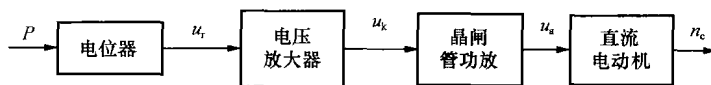


图 1-6 原理方框图

按扰动量控制的开环控制系统, 是利用可测量的扰动量, 产生一种补偿作用, 以减小或抵消扰动对输出量的影响, 这种控制方式也称为顺馈控制。例如, 在一般的直流速度控制系统中, 转速常常随负载的增加而下降, 且其转速的下降是由于电枢回路的电压降引起的。如果设法将负载引起的电流变化测量出来, 并按其大小产生一个附加的控制作用, 用以补偿由它引起的转速下降, 这样就可以构成按扰动量控制的开环控制系统。由于这种控制方式的信号来自扰动, 而作用于被控制量, 所以不构成闭环, 而是属于开环控制方式。这种控制要求只有扰动是可测量的情况下才能使用。如果系统可能受到多种扰动作用时, 就不得不对每一种扰动配备一个补偿装置, 既使系统变得复杂又降低了系统的可靠性。这时就可对系统采用闭环控制方式。

1.2.2 闭环控制方式

闭环控制方式又称为反馈控制方式, 是自动控制系统最基本的控制方式, 也是应用最广泛的一种控制方式。它是指输出量与输入量之间既有正方向的作用, 又有反方向的联系, 其控制过程可这样描述, 把系统输出量全部或一部分回送到输入端, 以增强或减弱输入信号的效应, 以此来调整被控量向期望值变化。如图 1-7 所示为一直流电机转速闭环控制系统, 图 1-8 为其原理方框图。

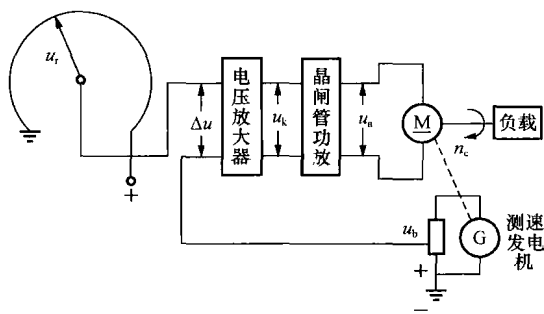


图 1-7 直流电机转速闭环控制系统的原理图

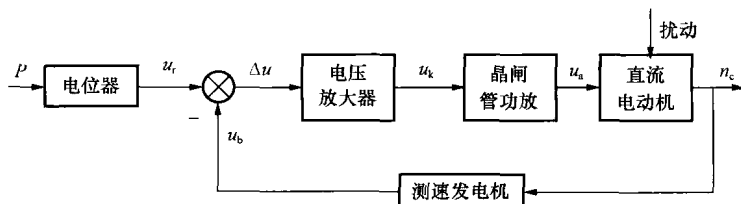


图 1-8 闭环控制系统原理方框图

下面分析图 1-7 所示闭环系统的工作过程。给定一个输入 u_r 对应一个确定的输出转速 n_c ，若负载发生波动，则期望转速 n_c 将发生变化，如负载减小，则此时电机的实际输出转速将高于期望转速 n_c ，可用于测量的测速发电机的反馈电压 u_b 也将增大，所以偏差电压 $\Delta u = u_r - u_b$ 将减小，电压放大器的输出 u_k 与可控硅放大器的输出 u_a 均将减小，则 n_c 将减小。所以，由于负载的减小引起转速的上升可通过负反馈进行抑制。若负载加大，则其分析过程是一样的。

显然，闭环系统为反馈系统，根据反馈极性的不同，反馈可分为通过反馈使偏差增大的正反馈和通过反馈使偏差减小的负反馈。一般无特殊说明时，下面所讲的反馈系统均为负反馈系统。

闭环控制系统的特点：

- (1) 输出影响输入，所以能削弱或抑制干扰。
- (2) 可能发生超调、振荡，所以对于闭环控制稳定性很重要。

(3) 闭环控制系统是利用偏差量作为控制信号来纠正偏差的，因此系统中必须具有执行纠正偏差这个任务的执行机构。闭环系统正是靠放大的偏差信号来推动执行机构，进一步对控制对象进行控制的。只要输出量与给定量之间存在偏差，就有控制作用存在，力图纠正这一偏差。由于反馈控制系统是利用偏差信号作为控制信号，自动纠正输出量与其期望值之间的误差，因此可以构成精确的控制系统。

(4) 为了检测偏差，必须直接或间接地检测出输出量，并将其变换为与输入相同的物理量，以便与给定量相比较，得出偏差信号。所以，闭环系统必须有检测环节、给定环节和比较环节。

反馈控制系统广泛地应用于各工业部门，例如，轧钢厂主传动和辅助传动的速度控制、位置控制等。

在有些系统中，将开环和闭环控制系统结合在一起，构成复合控制系统以获得满意的控制效果。闭环控制系统是本书研究的重点。

1.3 闭环控制系统的基本组成及分类

1.3.1 基本组成

闭环控制系统是由各种结构不同的系统部件组成的。从完成“自动控制”这一职能来看，一个控制系统必然包含被控对象和控制装置两个部分。控制装置由具有一定职能的各种基本元件组成。在不同系统中，结构完全不同的元部件都可以具有相同的职能。组成系统的元部件按职能分类主要有以下几种：

- (1) 被控对象：任何控制系统必定有其控制对象，即系统所要操纵的对象。

(2) 被控量：被控制对象的输出就是系统的被控制量。

(3) 给定元件：系统工作时都要加上一定的激励信号，用来产生并可调节系统控制量的元件为给定元件。其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量（即参变量）。

(4) 测量元件：其职能是测量被控制的物理量，如果这个物理量是非电量，则一般需转换为电量。

(5) 比较元件：把测量元件检测的被控量的实际值与给定元件给出的参考值进行比较，求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置和电桥等。

(6) 放大元件：将比较元件给出的偏差进行放大，用来推动执行元件去控制被控对象。如电压偏差信号，可用电子管、晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大器和功率放大器加以放大。

(7) 执行元件：直接推动被控对象，使其被控量发生变化。用来作为执行元件的有阀、电动机、液压马达等。

(8) 校正元件：又称为补偿元件。实践证明，由上述基本元件简单组合起来的控制系统往往是不能完成任务的。为了改善系统的控制性能还需要在系统中加入校正元件。校正元件可以加在偏差信号至被控信号间的前向通道中，也可以加在反馈通道中。前者称为串联校正，后者称为反馈校正，它往往是结构或参数便于调整的元件，最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络，复杂的则用电子计算机。

一般来说，尽管自动控制系统的控制任务各不相同，以及所使用的元件结构和能量形式均有所不同，但就其信号的传递、变换职能来说，都可抽象成如图 1-9 所示的职能方框图。

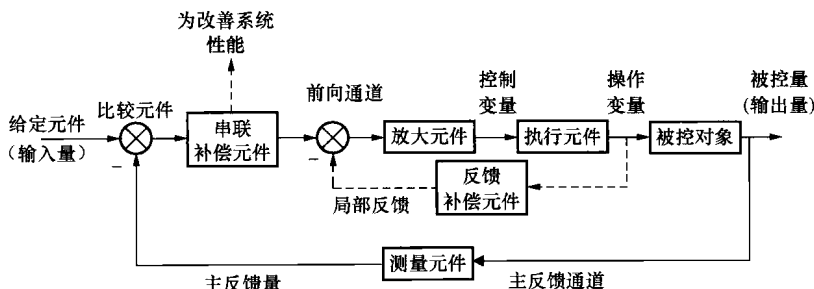


图 1-9 反馈控制系统基本组成

图 1-9 中用“ $\otimes$ ”号代表比较元件，它将测量元件检测到的被控量与参考量进行比较。“-”号代表两者符号相反，即负反馈；用“+”号代表两者符号相同，即正反馈。信号沿箭头方向从输入端到达输出端的传输通路称前向通路；系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外，还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。包含一个主反馈通路的系统称单回路系统；有两个或两个以上反馈通路的系统称多回路系统。

1.3.2 自动控制系统分类

自动控制系统的种类很多，应用的范围也很广，它们的结构和完成的任务也不一样。因此，自动控制系统的分类方法也很多，其中有以下几种主要分类方法。

1. 按照输入量的变化规律分类

(1) 恒值控制系统。恒值控制系统的特点是：系统的给定输入量为恒定的常量，而要求系统的被控制量也保持在相对应的常量上。确切地说，给定输入量可根据要求预选一个常量。

恒值控制系统是最常见的一类自动控制系统，如自动调速系统、恒温控制系统、恒张力控制系统、恒压力控制系统等。对恒值控制系统，着重研究各种扰动对被控制量的影响以及如何克服扰动影响使实际输出量保持在预期值上。

(2) 随动控制系统。随动控制系统的特点是：系统的控制量是变化着的（常常还是随机的），要求被控制量能够准确、迅速复现控制量的变化。

随动控制系统在工业和国防中有着极为广泛的应用，如火炮控制系统、雷达自动跟踪系统、刀架跟踪系统、各种电信号表及记录仪等。对随动控制系统，常常着重于跟随的准确性和跟随的快速性。在随动控制系统中，如果被控制量是机械位置（角位置）或其导数时，这类系统称之为伺服系统。

2. 按照系统传递信号与时间的关系分类

可分为如下两种。

(1) 连续控制系统。当系统各元件的输入信号是时间的连续函数，各元件相应的输出信号也是时间的连续函数时，这种系统称为连续控制系统。连续控制系统的性能一般是用微分方程来描述的。信号的时间函数允许有间断点，或者在某一时间范围内为连续函数。

(2) 离散控制系统。离散控制系统又称为采样数据系统。它的特点是系统中有的信号是断续量，即信号在特定的采样时刻才取值，而在相邻采样时刻的间隔中信号是不确定的。通常，采用数字计算机控制的系统都是离散控制系统。

3. 按照系统输出量与输入量的关系分类

(1) 线性控制系统。线性控制系统是由线性元件（即控制元件的静特性呈线性关系）构成的系统。系统的性能可以用如下的线性微分方程来描述。

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n}{dt^n} c(t) + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} c(t) + \cdots + a_{n-1} \frac{d}{dt} c(t) + a_n c(t) \\ = b_0 \frac{d^m}{dt^m} r(t) + b_1 \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} r(t) + \cdots + b_{m-1} \frac{d}{dt} r(t) + b_m r(t) \end{aligned}$$

式中 $r(t)$ ——表示系统输入量；

$c(t)$ ——表示系统输出量。

其中 $n \geq m$ ，若上面微分方程的系数是常数，即 $a_0, a_1, \dots, a_n$ 与 $b_0, b_1, \dots, b_m$ 均不随时间发生变化的话，则系统称为线性定常系统（又称为时不变）。反之，如果微分方程的系数随时间变化，则称为时变系统。关于线性定常系统已有较为成熟的研究成果和分析设计方法。

线性控制系统的一个重要性质就是可以应用叠加原理（叠加性与齐次性），即几个扰动或控制量同时作用于系统时，其总的输出等于各自单独作用时的输出之和。即当输入量为 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 时，其输出量分别对应于 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$ ；则当输入量变为 $r_3(t) = ar_1(t) + br_2(t)$ 时，则对应的输出量为 $c_3(t) = ac_1(t) + bc_2(t)$ ；叠加原理是鉴别系统是否为线性系统的依据。

(2) 非线性控制系统。非线性控制系统是由具有非线性性质（例如饱和、死区、摩擦、间隙等）的元件所构成的系统。事实上，只要系统中有一个非线性性质的元件，系统就是非线性控制系统。系统的性能往往要采用非线性方程来描述。叠加原理对非线性控制系统无效。

当然,除了以上的分类方法外,还有其他一些方法,例如,按系统主要组成元件的物理性质来分,又可分为电气控制系统、机械控制系统、液压控制系统、电气-液压控制系统。又如按输入、输出信号的数量来分,又可分为单输入-单输出控制系统、多输入-多输出控制系统。本书只讨论连续控制的线性控制系统。

1.3.3 自动控制系统示例

1. 硅钢热处理炉炉温自动控制系统

硅钢热处理炉炉温自动控制系统如图 1-10 所示。

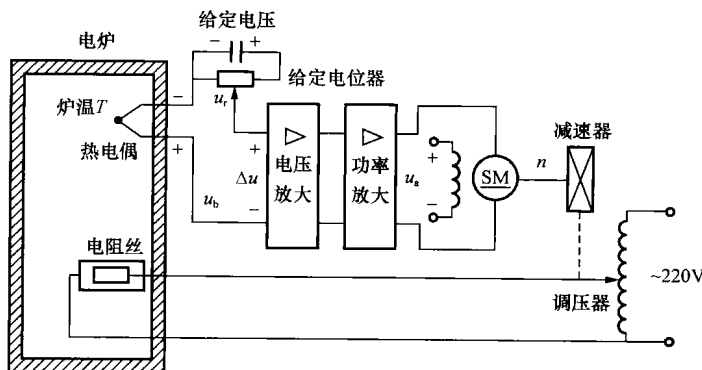


图 1-10 硅钢热处理炉炉温自动控制系统原理图

被控对象：电炉；

被控量：炉温 T ；

干扰：工件的多少，环境温度等；

测量元件：热电偶用来测量炉子实际温度，并转变为电压量 u_b ；

给定元件：给定电位器，其输出电压相当于要求的炉温 T ；

比较元件：通过比较电路完成给定电压 u_r 与反馈电压 u_b 的减法运算，偏差电压 Δu 相当于炉温的偏差量。

执行元件：电机及传动装置。

工作原理：假定实际炉温恰好等于给定炉温，这时 $\Delta u = u_r - u_b = 0$ ，故电机连同减速器静止不动，调压器输出电压一定，电炉处于规定的恒温状态。

如果增加工件，电炉的负荷加大，而电阻丝给定电压一时没变，则炉温就要下降。经热电偶测量后给出电压 u_b 减小，使 $\Delta u = u_r - u_b > 0$ ， Δu 经放大后的电压加到电机的电枢两端，电机将朝着增大电阻丝供电电压方向转动，从而使炉温回升，直到重新等于给定值 $u_b = u_r$ 为止。

如果负荷减小或煤气压力突然加大，则炉温升高。 u_b 随之加大，使 $\Delta u = u_r - u_b < 0$ ，此时电机朝着减小电阻丝供电电压方向转动，使炉温下降，直到重新等于给定值为止。

由此看出，系统是通过热电偶测量被控量，并反馈到系统的输入端，从而形成了闭合回路，此反馈信号通过比较线路与给定值进行减法运算，获得偏差信号，系统再根据偏差信号的大小和方向进行调节。所以，电炉温度控制系统是一个按偏差调节的闭环系统。系统中，除烘烤炉和供气设备外，其余部件组成了温度控制装置。

炉温控制系统的原理方框图如图 1-11 所示。

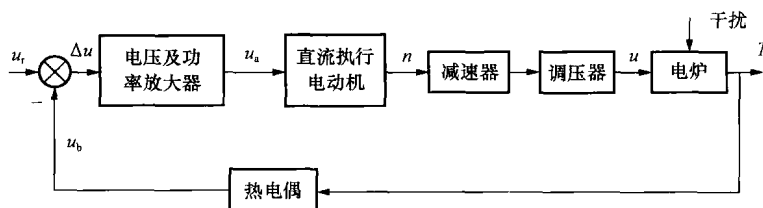


图 1-11 炉温控制系统的原理方框图

需要指出的是，由于元件存在不灵敏区，只有偏差电压大到一定数值后电机才转动，进行控制，所以，控制精度较低。

2. 飞机自动驾驶仪系统

飞机自动驾驶仪是一种能保持或改变飞机飞行状态的自动装置。它可以稳定飞行姿态、高度和航迹；可以操纵飞机爬高、下滑和转弯。飞机与自动驾驶仪组成的自动控制系统，称为飞机自动驾驶仪系统。

如同飞行员操纵飞机一样，自动驾驶仪控制飞机是通过控制飞机的三个操纵面（升降舵、方向舵、副翼）的偏转，改变舵面的空气动力特性，以形成围绕飞机重心的旋转力矩，从而改变飞机的飞行姿态和轨迹。

下面以比例式自动驾驶仪稳定飞机俯仰角为例进行分析，其原理图如图 1-12 所示。其具体的控制任务、被控对象、被控量及原理如下：

控制任务：系统在任何扰动作用下，保持电机俯仰角不变。

被控对象：飞机。

被控量：飞机的俯仰角 θ 。

工作原理：飞机的俯仰角用垂直陀螺仪测量。当飞机按给定俯仰角作水平飞行时，陀螺仪电位器没有电压输出。如果飞机受到扰动，使俯仰角向下偏离给定值，则陀螺仪电位器输出与俯仰角偏差成正比的信号，经放大器放大后驱动舵机。一方面推动升降舵面向上偏转，产生使飞机抬头的力矩，减小俯仰角偏差；与此同时，带动反馈电位器电刷，产生与舵面偏转角成正比的信号并反馈到输入端。随着俯仰角偏差的减小，陀螺仪电位器输出信号越来越小，舵面的偏转角也随之逐渐减小，直到俯仰角恢复到给定值为止。这时，舵面也回到原来状态。

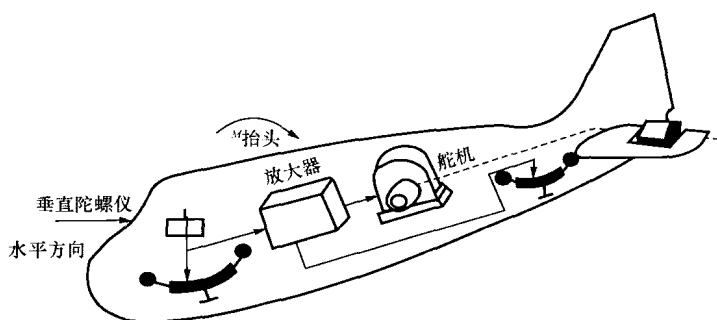


图 1-12 飞机自动驾驶仪系统原理图

飞机自动驾驶仪稳定俯仰角控制系统的原理方框图如图 1-13 所示。

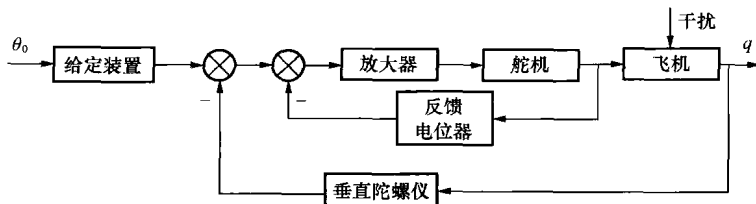


图 1-13 俯仰角控制系统方框图

1.4 自动控制系统的基本要求

设计一个自动控制系统，其性能好坏如何评价？或者说，一个自动控制系统达到了哪些性能指标才算是较好的系统？这是这一门课程首先应该回答的问题。

自动控制理论是研究自动控制共同规律的一门学科。尽管自动控制系统有不同的类型，对不同系统也都有不同的特殊要求，但对于各类系统来说，在已知系统的结构和参数时，往往感兴趣的都是系统在某种典型输入信号下，其被控量变化的整个过程。例如，对恒值控制系统关心的是扰动作用引起被控量变化的整个响应过程；而随动系统则关心被控量如何克服扰动影响并跟随参考输入量变化的整个过程。但是，不论哪类系统，均对整个被控量的变化过程提出了共同的要求，即稳、快、准。

1. 稳

稳是指系统的稳定性与平稳性。

稳定性是保证控制系统正常工作的首要条件。对于一个稳定的线性控制系统，其被控量偏离期望值的初始偏差应随时间的增长逐渐减小最终趋于零。具体地讲，对于稳定的恒值控制系统，被控量在扰动下偏离期望值后，经过一段时间，被控量又恢复到原来的期望值状态；对稳定的随动系统，被控量应能始终跟踪参考量的变化。而不稳定的线性控制系统，其被控量随时间增长而发散，越来越偏离期望值，因此，不稳定的控制系统无法实现预定的控制任务。

平稳性是指被控量动态过程振荡的振幅与频率，即被控量围绕给定值摆动的幅度与摆动的次数。平稳性较好的系统动态过程摆动的幅度小且次数少。

2. 快

为了很好地完成控制任务，控制系统仅仅满足稳定性要求是不够的，还必须对其过渡过程的形式和快慢提出要求，一般称为快速性，强调的是其动态性能。例如，对于稳定的高射炮射角随动系统，虽然炮身最终能跟踪目标，但如果目标变动迅速，而炮身跟踪目标所需过渡过程时间过长，就不可能击中目标。一般来说，快速性就是指动态过程持续的时间长短。时间越短，说明系统的快速性越好；时间持续越长，说明系统的响应越迟钝，越难以实现快速跟踪指令输入信号。

3. 准

准是指系统在动态过程结束后，其被控量（或反馈量）对给定值的偏差。这一偏差称为稳态误差。它是衡量系统稳态精度的指标，反映了动态过程尾部的性能。稳态误差是衡量控制系统控制精度的重要标志，在技术指标中一般都有具体要求。