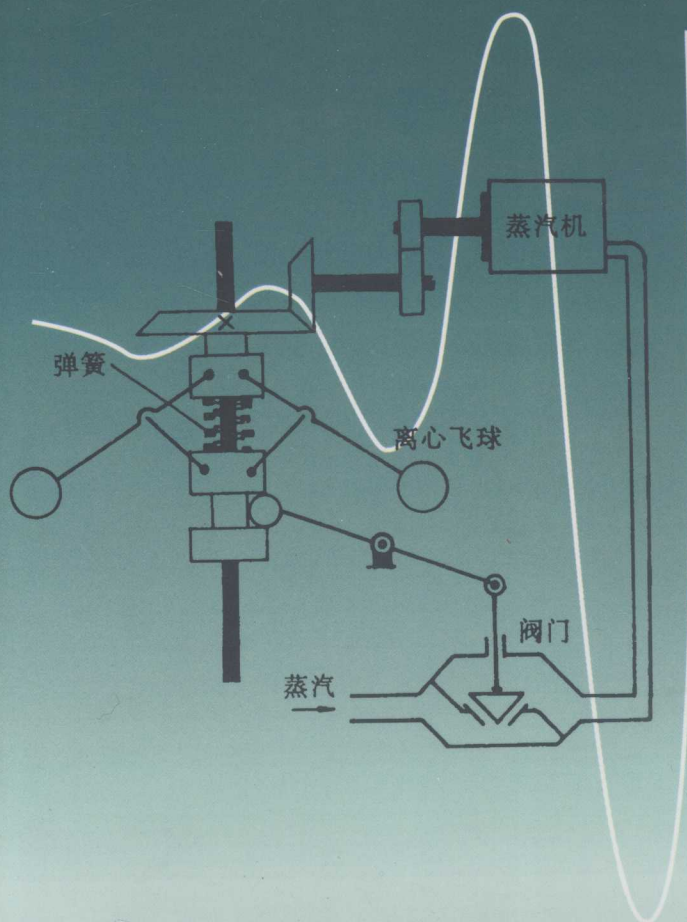


控制工程基础

赵丽娟 解中宁 编著



NEUPRESS
东北大学出版社

面向 21 世纪高等学校系列教材

控制工程基础

赵丽娟 解中宁 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

东北大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础/赵丽娟,解中宁编著. —沈阳:东北大学出版社,2002.8
ISBN 7-81054-788-7

I. 控… II. ①赵… ②解… III. 控制系统-系统工程 IV. 0231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 051983 号

出 版 者: 东北大学出版社

(邮编: 110004 地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号)

出 版 人: 李毓兴

印 刷 者: 东北大学印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

经 销 者: 东北大学出版社

开 本: 787mm×1092mm 1/16

字 数: 282 千字

印 张: 11

出版时间: 2002 年 8 月第 1 版

印刷时间: 2002 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑: 高 原

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

定价: 17.50 元

垂询电话: 024—83680267 (社务办)

83687331 (市场部)

024—83680265 (传 真)

83687332 (出版部)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www.neupress.com

前 言

本书是根据原煤炭部《面向 21 世纪煤炭高等工程教育教学内容和课程体系改革计划》中的“机械类专业人才培养方案及教学内容和课程体系改革的研究与实践”项目的要求，结合辽宁工程技术大学多年的教改实践而编写的实用教材。

本教材由辽宁工程技术大学赵丽娟、解中宁编著。全书共分为 10 章，主要内容包括绪论、系统动态数学模型的建立、传递函数及典型环节的传递函数、由系统的微分方程绘制其传递函数方块图、系统传递函数方块图的简化与信号流图、时域瞬态响应分析、控制系统的频率特性、控制系统的稳定性分析、控制系统的误差分析和计算、控制系统的性能校正。书后附有拉普拉斯变换及拉普拉斯变换表。参考教学学时数为 40 学时。

本教材在保持课程内容的系统性和连贯性的基础上，内容精炼，重点突出，易于自学。为了突出基础理论知识，本书删去了一些传统的教学内容，以基本章节为主编写而成，并注意采用启发式教学原则，既考虑新知识的不断增加，又考虑课程教学时数的进一步压缩，篇幅精简，具有独特风格，既反映了本学科的前沿，又具有较好的教学适用性。各章均有较丰富的例题和习题，通俗易懂，层次分明，条理清晰。

使用本教材前，读者应具有高等数学、电路分析、电子技术、电机等方面的基础知识。使用本教材，最好能安排 6 个学时左右的实验课时，以便读者更好地掌握本教材所论述的基本概念、基本理论和分析方法。此外，为便于读者自学，我们即将出版与本教材配套的《控制工程基础》多媒体教学软件。

本书既可作为高等学校机械类各专业及相关专业的教材，也可供有关专业师生及工程技术人员参考。

由于编者水平所限，书中难免存在一些缺点和错误，恳请众位专家、学者及广大读者批评指正，提出宝贵意见。

编者

2002 年 6 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 导 言	1
1.2 自动控制系统的基本概念	3
1.3 自动控制系统的基本构成及方块图	5
1.4 自动控制系统的分类及性能要求	6
练习题 1	8
2 系统动态数学模型的建立	10
2.1 数学模型的基本概念	10
2.2 建立系统数学模型的一般步骤和方法	11
2.3 典型元件及系统的时域数学模型的建立	14
2.4 数学模型的线性化	19
练习题 2	21
3 传递函数及典型环节的传递函数	23
3.1 传递函数的基本概念	23
3.2 典型环节及其传递函数	24
练习题 3	29
4 由系统的微分方程绘制其传递函数方块图	31
4.1 绘制实际物理系统的传递函数方块图	31
4.2 应用举例	33
练习题 4	38
5 系统传递函数方块图的简化及信号流图	40
5.1 传递函数方块图的等效变换和简化	40
5.2 信号流图和梅逊公式及其应用	42
练习题 5	47
6 时域瞬态响应分析	50
6.1 时域响应及典型时域信号	50

6.2	一阶惯性系统对典型输入信号的响应	50
6.3	二阶系统的瞬态响应分析	53
6.4	高阶系统的响应分析	63
	练习题 6	65
7	控制系统的频率特性	67
7.1	控制系统频率特性的基本概念	67
7.2	频率响应的极坐标图 (乃奎斯特图)	71
7.3	频率响应的对数坐标图 (伯德图)	76
7.4	由系统传递函数绘制伯德图	81
7.5	由伯德图写出系统的传递函数	83
7.6	最小相位系统	86
	练习题 7	87
8	控制系统的稳定性分析	90
8.1	控制系统稳定性的基本概念	90
8.2	代数稳定判据 (劳斯判据)	92
8.3	乃奎斯特稳定判据 (乃氏判据)	95
8.4	伯德稳定判据	102
	练习题 8	108
9	控制系统的误差分析和计算	111
9.1	稳态误差的基本概念	111
9.2	控制系统稳态误差的计算	112
9.3	改善系统稳态精度的方法	119
9.4	动态误差系数	120
	练习题 9	122
10	控制系统的性能校正	125
10.1	控制系统性能校正的基本概念	125
10.2	常用校正装置及其性能分析	129
10.3	系统性能校正装置的设计方法	138
10.4	串联校正装置的期望对数频率特性设计法	144
	练习题 10	151
附录一	拉普拉斯变换	153
附录二	拉普拉斯变换表	165
	参考文献	169

1 绪 论

1.1 导 言

1.1.1 控制理论的发展简史

当前,机械工业的发展已经愈来愈广泛而密切地与控制理论结合到了一起。可以说,没有这两者的结合,也就不会有机电工业蓬勃发展的今天。控制理论不仅是一门极为重要的学科,也是一种重要的学科方法论。比如,学科研究中高度抽象的方法、反馈原理等都是指导我们工作和学习的重要科学方法。

控制理论是自动控制技术、电子技术、计算机技术等多种学科互相渗透的产物。它在 20 世纪 40 年代逐渐形成,而到 50 年代以后才迅速发展起来。控制理论的奠基人是英国数学家 N·维纳,他在 1919 年就已经萌发了控制论的思想。1943 年维纳等发表了《行为、目的和目的论》,并于 1948 年发表有关控制理论的专著《控制论》,标志着这门学科的正式诞生。

20 世纪 50 年代以后,随着科学技术的飞速发展,控制理论也逐渐成熟。1954 年,我国科学家钱学森运用控制论的思想和方法,首创了“工程控制理论”,把控制理论推广到工程技术领域。接着又相继出现了“生物控制论”、“经济控制论”和“社会控制论”等分支学科,从而把控制论进一步推广到了其他各个领域。

根据自动控制技术发展的不同阶段,控制理论可分为“古典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

“古典控制理论”的内容是以传递函数为基础,主要研究单输入和单输出这类控制系统的分析和设计问题。本书所探讨的主要内容就是古典控制理论。

“现代控制理论”是在“古典控制理论”的基础上,于 20 世纪 60 年代以后发展起来的。它主要是以状态空间方程为基础,研究多输入、多输出、变参数、非线性等控制系统的分析和设计问题。最优控制、系统识别、自适应控制理论等都是这一领域研究的主要问题。近年来,由于计算机技术及现代应用数学的迅速发展,又使现代控制理论在大系统理论和人工智能控制等方面有了相当的发展。

1.1.2 “控制工程基础”课程研究的主要内容

如前所述,在本书中主要研究的是古典控制理论。具体地说,是研究工程技术领域中广义系统的动力学问题,或者说就是研究系统的动态特性。

下面,首先对一些重要的名词定义作必要的介绍。

系统 按一定规律运动变化或为实现人们一定目的而运动变化的一种物质的有机组合体(前者指自然系统,后者指人工系统)。这种组合体可以是物理性质的、生物性质的或是社会性

质的等等。总之,根据人们研究的需要,这种组合体可以是一个分子,或者是一个细胞,也可以是发射卫星这样一项大的工程。从这个意义上讲,这种系统即所谓的广义系统。

动态特性 系统在自身以足够高的速率运动、变化的过程中,或在足够高的速率的外界条件作用下,所表现出来的系统本身固有的性能或属性。

既然如此,那么应该怎样研究系统的动态特性呢?

大家知道,人们研究任何系统(或称事物),实际上总是通过系统对外界所表现出来的种种现象进行分析、综合来进行的。从控制工程或信息论的角度考虑,这种种的现象可称之为“信号”,即系统的输出信号(粗略地说,是对研究有用的信号,又可称为“信息”)。但在研究系统时,并不总能自然得到系统传送给外界的信号,从而常常需要对系统施加特定的作用,以促使系统产生必要的输出信号。

通常把引起系统某种信号输出的作用称做系统的输入(信号)。

除了研究必需的输入信号外,几乎不可避免的是还会有对研究系统性能不利的各种输入信号作用于系统,这种对研究系统有害的输入信号我们专门称之为“干扰信号”或“扰动”。

综上所述,在研究系统的动态特性时,系统的输入信号、系统本身的特性及系统的输出信号是必不可少的3个基本要素。为了研究方便,常用图1-1所示的方块图的形式来表示:

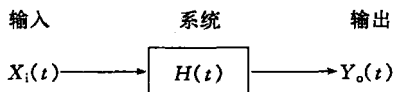


图 1-1 方块图

为了进一步说明怎样研究系统动态特性,现在举两个实际的例子如下。

【例 1.1】 假设要研究某物体的表面颜色,可以利用阳光照射到物体表面,那么“阳光”可看做是系统的输入,而物体反射(或漫反射)的光泽就是系统的输出。由于该物体表面只反射纯红色光而吸收其他所有光线,因此可以得出结论:该物体表面的颜色属性是纯红色。

【例 1.2】 仍然是同一个物体,现在感兴趣的是构成物体的材料。这时可以用锤头敲击物体,向它输入一个脉冲信号(注意:不是输入锤头),于是得到一个声波的输出。利用积累的经验,人们可以通过对声波的分析来进行判断,物体是由木材还是由金属制作的。在日常生活中,经常可以看到工人用锤子敲击火车车轴来检查车轴是否正常,以及人们用手拍击西瓜来判断瓜的生熟,等等,这些都是上述研究系统特性(不一定是动态特性)方法的具体应用。

因此,可以说,控制工程所研究的和所要解决的最基本的问题就是如何处理输入、输出和系统三者之间的关系问题。归纳起来,主要有如下5个方面的研究内容:

(1) 已知系统的动态特性 $H(t)$ 及系统输入 $X_i(t)$, 求解系统输出 $Y_o(t)$, 这就是常说的“系统分析”问题;

(2) 已知 $H(t)$, 而由期望的最佳输出 $Y_o(t)$ 来确定理想的输入 $X_i(t)$, 这就是所谓“最优控制”问题;

(3) 已知输入 $X_i(t)$, 由期望的最佳输出 $Y_o(t)$ 确定系统的动态特性 $H(t)$, 此即“最优设计”问题;

(4) 如果已知系统的输入 $X_i(t)$ 及输出 $Y_o(t)$ 来确定未知系统的动态特性 $H(t)$ 则为“系统识别”问题;

(5) 由已知的系统输出 $Y_o(t)$ 中提取需要的信号(信息)或根据已知的 $Y_o(t)$ 来估计

$Y_o(t)$ 现在和将来的变化——前者称为“滤波”,后者则称为“预测”。

1.2 自动控制系统的基本概念

1.2.1 自动控制系统的概念

系统可以有多种分类方法。从系统有无控制功能可分为:

控制系统	{	人工控制系统(非自动控制系统):生产系统、管理系统等
		自动控制系统
非控制系统	{	生物系统
		生态系统

因此,自动控制系统只是控制系统中的一种。为了更好地理解什么是自动控制系统,先要弄清下面几个概念。

控制 使被控制对象的某一个或某一些输出参量能按照人们预期(或给定)的目标值(期望值、给定值)得以实现的一种作用过程。

控制系统 包括能够产生作用过程的控制装置和被控制对象两个子系统的系统。

子系统 某一个系统如果是另一个系统的组成部分,则该系统称为另一系统的子系统。

自动控制系统 控制是由控制装置自动完成的控制系统。

非自动控制系统 控制是由人工来完成的控制系统。

在介绍上述概念的基础上,下面通过一个手动控制加热炉温度恒定的例子,先来理解什么是控制,如图 1-2 所示。

图 1-2 是一个人工炉温控制系统。首先假定,在热平衡状态下,炉温保持一定(设为 600°C),此时测温热电偶输出的电压设为 600mV (可以通过数字电压表读出)。现在的任务是在保证外界条件发生变化,从而引起炉温也发生变化时,将炉温仍控制在 $600 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (即电压表读数在 $600 \pm 2\text{mV}$)的范围内。

这个系统中,惟一可以调整的部件即调压器。你可以通过转动手轮减小或增加其输出电压,以此来控制电热丝发生热量的多少。

现在设想一下,如由你来操作,你的操作过程是否如下所述?你始终用你从电压表上读到的炉内实际温度 T_c (被控对象的也即系统的输出信号)与记忆在头脑中的期望的温度值 T_r (系统的输入信号)进行比较(当然这个比较过程是由人脑来完成的)。如果 $T_c = T_r$,则不需进行调整。如果 $T_c < T_r$,则有 $\Delta T = T_r - T_c$ 为正差值。这时则用手调节调压器(即所谓控制系统中的执行元件),以增大调压器输给电热丝的电压,增大电热丝发出的热量,从而实现提高炉内温度使之接近或达到期望温度值的目的。反之亦然。当然,这个过程可能会有几次反复,但最后总会将温度控制在一个接近期望值附近的一个温度范围内。这就是一个典型的控制。

上面的炉温控制系统,其控制显然是由人工来完成的,因此是一个典型的人工控制系统。

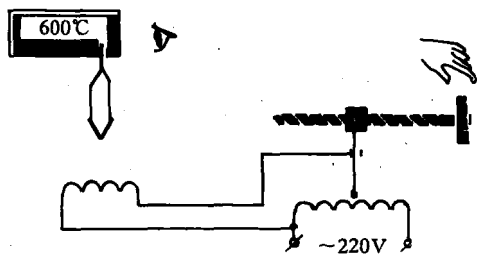


图 1-2 人工温度控制系统图

如果炉温的控制是由控制装置自动完成的,那么该系统就是所谓的自动控制系统。现在仍然以炉温的控制为例,来看一看自动控制系统是怎样完成对炉温的自动控制的。

图 1-3 是这个自动控制系统的工作原理图。当移动控制元件(即电位计)的滑柄时,可以调定被控制对象——电炉的温度期望值(亦为系统输入信号 T_r)。这可以通过数字电压表 B_2 读出。仍然假定 600mV 电压相当于炉内 600℃ 的温度。电热丝被通电后,炉内温度(系统输出 T_c)上升到热平衡时为止(热电耦测得的炉温可以由数字电压表 B_1 读出)。这时如果合上 K_3 开关,因为温度 T_r 及 T_c 均已分别由电位计及热电耦变换为相应的电压信号,所以比较 T_r 与 T_c 差值的任务改由控制装置中专门的差分放大器(在控制系统中称比较元件)一类的元元件来完成。差分放大器将比较 T_r 及 T_c 的大小并对其差值进行放大。如果差值(ΔU)为零,则放大器后的驱动电机(执行元件)没有动作,而如果差值为正或为负,则驱动电机作正转或反转,通过齿轮等传动机构,带动调压器的电刷运动。于是,自动控制装置将自动控制炉内温度与温度期望值保持一致。

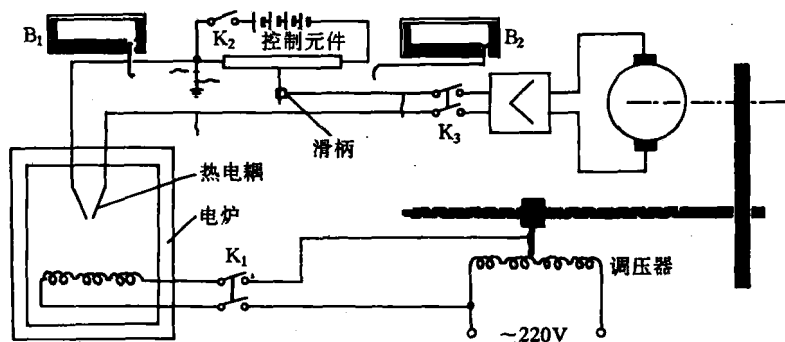


图 1-3 炉温自动控制系统工作原理图

除了人为调整控制系统的期望值外,系统因外界因素的影响,比如电源电压波动,也会引起炉温的变化。这时自动控制系统同样能对其实现自动控制。

1.2.2 反 馈

从前面讲的人工控制及自动控制两个例子都可以看到,控制系统中常常存在着一种重要的信号流动方向,即输出信号经过一定的路线,也可能经过某种变换,然后送到输入端与输入信号进行比较,如果比较的结果出现偏差值,则用经放大后的偏差值去控制执行机构(元件),以改变输出信号使其与输入信号一致,从而实现控制的目的。

从上面的综合分析中,可以引出两个十分重要的概念:以偏差值实现控制以及系统反馈。以偏差值实现控制的原则,通过前述的例子已经很清楚了。现在重点讲一下“反馈”。

反馈是指系统中输出量返回输入端与输入量进行比较的一种“作用过程”。返回输入端的输出量通常称为“反馈信号”。而反馈信号经过的路径叫做“反馈通道”。与之相对应,输入信号由输入端到输出端所经过的路径则称“前向通道”。

反馈分负反馈与正反馈两种。所谓负反馈,是指反馈信号与输入量(输入信号)的量值符号相反的反馈。其作用是使输出信号与期望的输入信号的偏差值愈来愈小,直至系统趋于稳定,这是控制系统希望的一种反馈形式。正反馈的作用与负反馈相反,它是使偏差值愈来愈

大,输出信号也愈来愈大地偏离期望值,从而使系统失去稳定性而无法正常工作。因此,除振荡器等有特定目的的系统外,一般的系统都要避免正反馈的发生。

如果输出量经过反馈通道时信号能量没有任何衰减,这样的反馈称为全反馈或单位反馈。

1.3 自动控制系统的基本构成及方块图

控制系统的构成是千差万别的。在研究前面的两个控制系统时,都利用了系统的工作原理图。但这种图绘制复杂,用来研究问题也不方便,特别是在研究系统的更本质内在特性时尤其如此。因此,在控制理论的研究中人们更常用的手段是“方块图”。常用的方块图有结构方块图、功能方块图及传递函数方块图等。图 1-4 就是炉温自动控制系统的结构方块图。这个图除清楚地表现了系统的组成结构外,更为重要的是同时也清楚地表现出系统的前向通道、反馈通道及信号在系统内的流动方向。既然控制系统的组成结构千差万别,因此,为了使得方块图有更广泛的适应性,更常用的是功能方块图。

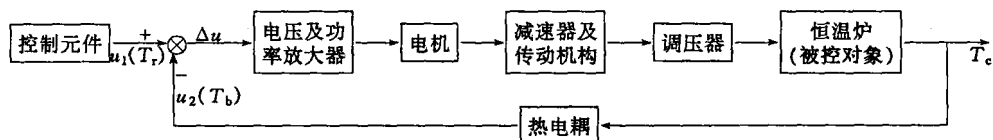


图 1-4 炉温自动控制系统的结构方块图

在功能方块图中(见图 1-5 所示),方块中不再写上系统组成中各物理结构的名称,而是改写成各物理结构在控制系统中所起的具体的作用。显然,这样表示的方块图更具典型性,也更能表现出控制系统物理构成的本质。只要比较一下图 1-4 和图 1-5 两个方块图,就能体会出它们各自的优缺点。

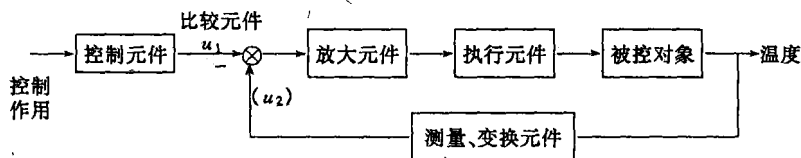


图 1-5 炉温自动控制系统的功能方块图

如前所述,尽管控制系统的物理结构种类繁多,但就其在控制系统中的功能而言,可以归纳出如下的基本元件(现仍以炉温自动控制系统为例)。

(1) 控制元件。产生系统输入信号的元件,即图 1-3 中标着“控制元件”的电位器。

(2) 比较元件。比较(或称运算)输入信号与反馈信号,并产生两者之差(即偏差)的元件。

(3) 放大元件。用于将比较元件输出的偏差信号进行放大或在放大的同时进行能量形式变换的元件。

(2),(3)两种元件都放在开关 K_3 右侧的放大器中,放大器中包括由运算放大器构成的差分放大器,差分放大器既起到比较元件的作用,也起到电压放大的作用。此外,放大器中通常还包括功率放大器,它输出足够功率的控制信号驱动后面的执行机构。

(4) 执行元件。根据放大后的偏差信号的量值和方向对被控制对象进行操作的元件。图 1-4 中的电动机及常用的油缸、液压电机等均可作执行元件。

(5)检测元件(反馈元件)。测量被控制对象的输出信号量值(包括方向)的元件,通常也是反馈元件。如图 1-4 中的热电偶。

(6)变换元件。将一种物理量变换成另一种物理量的元件。前述元件大多属于此类元件。图 1-4 中的齿轮副、丝杠副及调压器亦属变换元件。应特别注意调压器是给系统提供电能的,不能看做是控制元件。电源电压更不能看做是输入信号。

(7)校正元件。专用于有目的地改变系统动态特性的元(组)件,但不是每个系统都有。

在分析系统的功能元件时,应该注意到元件功能的多样性,比如测量元件既是反馈元件也是变换元件。此外,系统中一些对系统特性没有重要影响的元件或机构,没有必要都放到方块图中去。

1.4 自动控制系统的分类及性能要求

1.4.1 自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法很多,下面重点讨论几种常用的分类方法。

1.4.1.1 按系统输入(或输出)信号的变化规律分

(1)恒值(定值)控制系统。输入量为常值的控制系统称恒值控制系统,如电极恒速系统及我们在前面讲过的炉温控制系统等。这类系统的任务是保证在任何扰动作用下,使被控参数(输出量)保持恒定的、期望的数值。

(2)程序控制系统。若输入量随时间的变化而做有一定规律的变化,即为事先给定了的时间函数,则称这种系统为程序控制系统。如金属材料热处理炉的炉温按一定规律升降,机械加工中的程序控制机床(包括数控机床)等均属于此类系统。

(3)随动控制系统。输入量随时间的变化而做任意变化的控制系统。这种系统的任务是在各种情况下保证系统的输出都要以很高的精度跟随输入信号的变化而变化。这种系统又称为跟踪系统。运动目标(如飞机、导弹等)的自动跟踪瞄准和拦截系统,机械制造中的液压或电气仿型加工系统, X—Y 记录仪等都属此类控制系统。前面讲过的炉温控制系统本属恒值控制系统,但当随意移动控制元件的滑柄时,就会发现,调压器的滑柄也将随之来回移动,这实际上就构成了一个随动控制系统。因此,前两种控制系统也可以看做是随动控制系统的一种特殊情况。

1.4.1.2 按系统有无反馈系统分

(1)开环控制系统。开环控制系统的特点就是系统中没有反馈回路。正因如此,该系统抗干扰的能力弱,但这必然将降低系统的控制精度。为了提高系统的控制精度,则要求提高组成系统元器件的精度。这种系统的优点是系统无不稳定问题。

(2)闭环控制系统。闭环控制系统的特点是系统中至少有一个反馈回路,因而它能随时对系统输入量及输出量进行比较并得到其偏差值去及时控制系统的输出,所以该种系统抗干扰能力强,可以得到很高的控制精度。但此类系统有不稳定问题,控制精度与稳定性之间存在矛盾。因而,常需要设计人员在系统稳定性与控制精度之间进行合理的选择。

图 1-6 是一个控制轮船尾舵的控制系统。在轮船操纵室旋转方向盘,可通过传动链带动

电位计 1 的滑柄 a 转动, 同样舵(被控对象)的摆动, 也将通过传动链带动电位计 2 的滑柄 b 转动。图中 L, R 分别表示的是电动机电枢线圈的电感和内阻, 点划线代表了相应的传动机构。

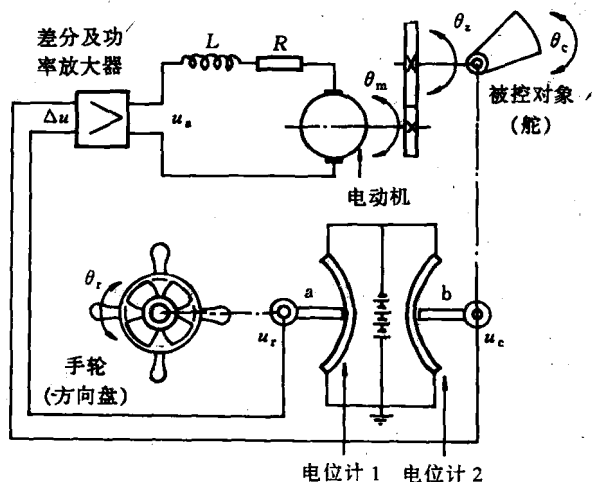


图 1-6 轮船尾舵控制系统

通过分析图 1-6 可知: 该控制系统属于闭环、随动控制系统; 差分及功率放大器分别属于功能方块图中的比较元件和放大元件; 电动机属于执行元件; 手轮(方向盘)在控制系统中起着使控制元件产生输入的作用; 电位计 1 及电位计 2 均属于测量元件; 图中 u_r 是系统的输入信号, u_c 是反馈信号, 舵的转角 θ_c 是系统的输出信号; 电位计 1、电位计 2 及电池组构成的电桥电路, 在控制系统中起比较作用; 图中所示的 Δu 通常称做差值(偏差), 在控制系统中起控制作用, 其函数表达式为

$$\Delta u = u_r - u_c$$

1.4.1.3 按系统的动态特性分

(1) 线性控制系统。当系统中各组成环节或元件的状态或特性可以用线性微分方程(或差分方程)来描述时, 称这种系统为线性控制系统。线性控制系统的特点是可以运用叠加原理, 即在系统存在几个输入时, 系统的输出等于各个输入分别作用于系统时系统的输出之和, 当系统输入增大或缩小时, 系统的输出也按比例增大或缩小。

如果描述系统动态特性的微分(或差分)方程的系数是常数而不随时间变化, 则这种线性系统称为线性定常(或时不变)系统。若微分(或差分)方程的系数是时间的函数, 则这种线性系统称为线性时变系统。

(2) 非线性控制系统。当系统中存在非线性特性的组成环节或元件时, 系统的特性就需由非线性方程来描述, 这样的系统称为非线性系统。对于非线性系统, 叠加原理是不适用的。本书不介绍这类系统。

严格地讲, 实际的控制系统都不是线性系统, 因为各种系统总是不同程度地具有非线性。只有当系统特性是非本质非线性时(即该系统输入与输出的关系曲线没有间断点和折断点, 且呈单值关系), 可以在系统变量变动范围很小的条件下, 作线性化处理。这个问题在本书的后面章节中还要专门进行介绍。

1.4.2 对自动控制系统性能的基本要求

一个自动控制系统要能正常满意地工作,必须满足一系列性能指标的要求。对于不同的控制系统要求的性能指标并不一样,但以下3点要求却是共同的、基本的。

(1) 稳定性。稳定性是指系统输入量(包括控制信号和扰动信号)发生变化但趋于某一稳态值后,系统的被控制量(输出信号)也跟着变化,且最终也能趋于某一稳态值,而不出现持续或发散型振荡现象的一种性质。不稳定的系统是无法正常工作的。

(2) 快速性。这是在系统是稳定的前提下提出来的。所谓快速性,就是指当系统的输出量与给定的输入量之间产生偏差时,系统消除这种偏差过程的快速程度。

(3) 准确性。是指系统在输入信号或干扰信号产生作用后,重新进入稳定状态时输出量与给定的输入量之间的偏差(也常称为静态精度)。

任何系统的稳定性、快速性、准确性是互相制约的。快速性好,可能稳定性会差;改善稳定性,快速性又可能不好,准确性也可能变坏。因此,分析和解决这些矛盾,也是本学科研究的重要内容。

练习题 1

- (1) 什么叫控制及自动控制系统?
- (2) 什么叫闭环控制系统? 它有何优缺点?
- (3) 什么叫反馈及反馈通道?
- (4) 试解释反馈控制原理。
- (5) 什么是功能方块图? 在研究系统时有何积极意义?
- (6) 控制系统常用的分类方法有哪几种?
- (7) 什么叫程序控制系统及随动控制系统?
- (8) 对自动控制系统性能有哪些基本要求?
- (9) 试叙述液位控制系统(如图 1-7 所示)的工作原理、系统分类并绘出其结构方块图。

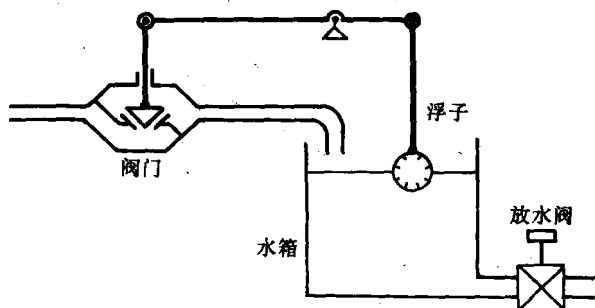


图 1-7 练习题(9)图

- (10) 试叙述蒸汽机飞球离心调速系统(如图 1-8 所示)的工作原理,并绘出其功能方块图。

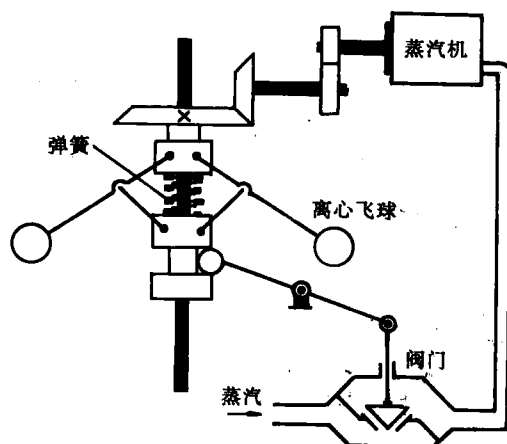


图 1-8 练习题(10)图

2 系统动态数学模型的建立

2.1 数学模型的基本概念

2.1.1 系统的静态特性、动态特性和过渡过程的概念

静态特性 在恒定的或缓变的输入量的作用下,系统所表现出来的性能或属性,一般均可用代数方程来描述。但应该强调的是:静态不是静止。例如,机械在恒力或在相对较低的交变力作用下所表现出的性能都是系统的静态特性。

动态特性 在变化剧烈的输入量的作用下,系统表现出来的性能或属性,一般均可用微分方程来描述。

上面的两个概念中均强调了输入信号变化的快慢,那么这个快慢应该怎样来进行判断呢?简单说,变化的快慢主要是相对于系统的时间常数(或相对于系统的一阶固有频率)而言。

过渡过程 系统由一个平衡状态进入到另一个新的平衡状态之间的时间历程。不过这里讲的并不是严格的定义,严格的定义以后还将详细介绍。图 2-1 即形象地描绘了过渡过程的具体概念。

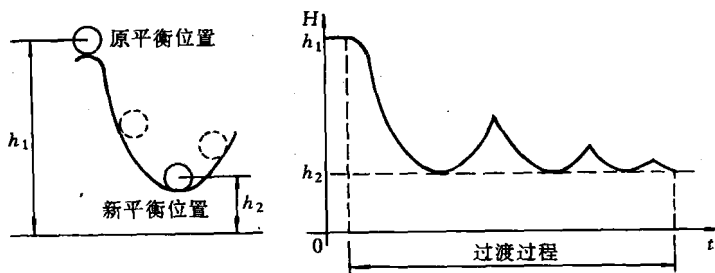


图 2-1 过渡过程图

2.1.2 数学模型的概念

数学模型属于仿真模型的一种。仿真模型通常包括实体模型和数学模型两大类。

实体模型 几何相似模型、速度相似模型及动态特性相似模型等均属此类模型。顾名思义,此类模型有一个实体系统,但模型或是在几何形体上或是在各点的运动速度上或是在系统的动态特性上与被研究物体有一致的比例关系。关于动态特性相似,在后面的章节中还要详细讨论。

数学模型 这类模型没有具体的实体。它通常利用代数方程、微分方程、空间状态方程或传递函数等数学手段来描述系统的静、动态特性。

在本书中主要利用微分方程来建立系统的数学模型,但研究系统时则主要利用传递函数这一更方便有效的数学手段。

如绪论中所述,在建立系统数学模型时,其基点是建立在线性时不变系统的基础上的。但实际上,真正的线性时不变系统并不存在。这样一来,就只能在允许的误差范围内建立近似正确的数学模型。因而,实际建模时,常常忽略一些次要因素,用简化的数学模型来表达实际系统,比如将分部参数集中化,时变参数定常化,非线性参数线性化等等。这样,由同一个系统建立的数学模型就有较完整的、复杂的、准确性较强的数学模型和简单的但准确性较差的数学模型。因此,建模时要注意以下两点。

(1) 系统愈简化,模型愈容易建立,但误差也就可能愈大。所以应根据具体情况在两者之间做恰当的选择。

(2) 用数学手段直接建立的数学模型,通常都需要通过实验来加以验证。还有许多复杂的系统,目前也只能通过实验的方法来建立它们的数学模型。实验法建模虽然是个十分重要的建模方法,但由于篇幅所限,本书中只介绍前一种方法。

2.2 建立系统数学模型的一般步骤和方法

2.2.1 几个重要概念

环节 系统中可以列写出独立微分方程(或运动方程)的那一部分。它可以由一个元件构成,也可以由多个元件构成。总之,其微分方程的系数只由自身的特性决定,而与其他环节无关。

负载效应 前后连接的元件或环节之间,后一个元件或环节对前一个元件或环节运动状态(动态特性)产生的影响,称之为负载效应。

如果一个元件或环节的运动状态与后面的元件或环节无关时,则该元件或环节称为单向元件。反之则称为非单向元件。

如果在元件或环节间加隔离元件可以消除后一元件对前一元件的影响,则称前一元件为可单向化。对电气系统来说,通常隔离元件都是高输入阻抗低输出阻抗的元器件。

不仅元件间有负载效应问题,系统本身也有负载效应问题。只有在系统的负载输入阻抗很高或系统输出开路的情况下(相当于负载输入阻抗为无穷大),才能得到较高精度的数学模型。下文中分析系统时,没有特殊说明,均视系统为开路。

2.2.2 建立元件及系统数学模型的一般步骤

(1) 确定系统的输入及输出信号。在此基础上将系统划分成若干个环节,并确定每个环节的输入及输出信号,且注意使前一个环节的输出是后一个环节的输入。

(2) 写出各个环节的微分方程。为了联系系统中各环节的相关变量,常常需要引入“中间变量”。

(3) 消除中间变量,使建立的微分方程式最后仅仅包含系统的(而非环节的)输入与输出信号。这样就得到了所要建立的元件或系统的数学模型。