

控制工程基础

梁其俊 张永相 徐霖 吴秀珍 合编



重庆大学出版社

控制工程基础

梁其俊 张永相 编
徐 霖 吴荣珍

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书主要包括：数学基础拉普拉斯变换，系统、反馈及控制的基本概念，系统的数学模型，稳定性及误差分析，瞬态响应、频率特性及频率响应分析，系统的校正等经典控制理论的原理和方法。本书还对现代控制理论中的状态空间法、能控性、能观测性及稳定性等基本概念作了简明扼要的介绍。

本书特点是对基本概念、基本理论和基本方法以及重点、难点部分有较详细和深入的阐述。

本书可供高等学校机械类及非自控类各专业，包括大学专科及成人高校作为教材使用，也可供有关工程技术人员参考。

控 制 工 程 基 础

梁其俊 张永相 编
徐 霖 吴荣珍
责任编辑 黄开植

*

重庆大学出版社出版发行
新华书店经销
重庆建筑大学印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：13字数：324千

1994年7月第1版

1994年7月第1次印刷

印数：1—6000

ISBN 7-5624-0852-1/TP·46 定价：7.80元

(川)新登字020号

序

近年来我国高等专科教育发展很快,各校招收专科生的人数呈逐年上升趋势,但是专科教材颇为匮乏,专科教材建设工作进展迟缓,在一定程度上制约了专科教育的发展。在重庆大学出版社的倡议下,中国西部地区14所院校(云南工学院、贵州工学院、宁夏工学院、新疆工学院、陕西工学院、广西大学、广西工学院、兰州工业高等专科学校、昆明工学院、攀枝花大学、四川工业学院、四川轻化工学院、渝州大学、重庆大学)联合起来,编号、出版机类和电类专科教材,开创了一条出版系列教材的新路。这是一项有远见的战略决策,得到国家教委的肯定与支持。

质量是这套教材的生命。围绕提高系列教材质量,采取了一系列重要举措:

第一、组织数十名教学专家反复研究机类、电类三年制专科的培养目标和教学计划,根据高等工程专科教育的培养目标——培养技术应用型人才,确定了专科学生应该具备的知识和能力结构,据此制订了教学计划,提出了50门课程的编写书目。

第二、通过主编会议审定了50门课程的编写大纲,不过分强调每门课程自身的系统性和完整性,从系列教材的整体优化原则出发,理顺了各门课程之间的关系,既保证了各门课程的基本内容,又避免了重复和交叉。

第三、规定了编写系列专科教材应该遵循的原则:

1. 教材应与专科学生的知识、能力结构相适应,不要不切实际地拔高;
2. 基础理论课的教学应以“必须、够用”为度,所谓“必须”是指专科人才培养规格之所需,所谓“够用”是指满足后续课程之需要。
3. 根据专科的人才培养规格和人才的主要去向,确定专业课教材的内容,加强针对性和实用性;
4. 减少不必要的教理论证和数学推导;
5. 注意培养学生解决实际问题的能力,强化学生的工程意识;
6. 教材中应配备习题、复习思考题、实验指示书等,以方便组织教学;
7. 教材应做到概念准确,数据正确,方字叙述简明扼要,文、图配合适当。

第四、由出版社聘请学术水平高、教学经验丰富、责任心强的专家担任主审,严格把住每门教材的学术质量关。

出版系列专科教材堪称一项浩大的工程。经过一年多的艰苦努力,系列专

科教材陆续面市了。它汇集了中国西部地区 14 所院校专科教育的办学经验,是西部地区广大教师长期教学经验的结晶。

纵观这套教材,具有如下的特色:它符合我国国情,符合专科教育的教学基本要求 and 教学规律;正确处理了与本科教材、中专教材的分工,具有很强的实用性;与出版单科教材不同,有计划地成套推出,实现了整体优化。

这套教材立足于我国西部地区,面向全国市场,它的出版必将对繁荣我国的专科教育发挥积极的作用。这套教材可以作为大学专科及成人高校的教材,也可作为大学本科非机类或非电类专业的教材,亦可供有关工程技术人员参考。因此我不揣冒昧向广大读者推荐这套系列教材,并希望通过教学实践后逐版修订,使之日臻完善。

吴云鹏

1993年
仲夏

前 言

随着现代科学技术的迅速发展,学习和掌握控制工程的理论和方法以解决机械工程中的有关问题,对于广大的机械专业的大学生和工程技术人员来说,越来越显得十分必要。为了使他们能有一本较为适合的教材或参考书,根据全国机械控制工程研究学会自1979年成立以来所召开的各届学术年会上,各位前辈、专家和学者对有关“机械控制工程基础”课程的教学方面所发表的精辟见解和讨论精神,并结合我们多年从事这方面的教学、科研工作的体会,特地编写了这本书。本书力求在不大的篇幅内,通过精选内容、合理组织,使基本概念、基本理论和基本方法,以及重点、难点部分都能得到较为详细和深透的阐述。

本书以对系统的性能要求为主要线索,内容从时域和频域两个方面展开。其中:第一章着重阐明反馈控制原理这个控制理论的中心思想,并在此基础上介绍有关的基本概念和基本知识。第二章通过大量的例题详细说明建立系统的微分方程、传递函数和方块图的解析方法。第三章在分析了时间响应的组成以后,介绍稳定性的基本概念和代数判据,接着讨论误差的分析和计算。第四章主要论述系统的瞬态响应及其性能指标,特别是对应用甚广的二阶系统进行了较为全面和深入的分析。第五章着重介绍频域法的理论基础,频率特性的概念、计算和作图方法。第六章主要讨论系统在频域内的稳定性判据,频率响应的性能指标及与瞬态响应的关系。第七章介绍改善系统性能的校正方法,其中对串联校正设计还详细列举了试探法和希望特性法的具体例子。第八章对现代控制理论中的状态空间法,能控性和能观测性,以及稳定性等问题作了简明扼要的介绍。数学基础拉普拉斯变换则列入附录,以便教学时灵活掌握。考虑到电子计算机的日益普及和它在控制工程中的重要作用,本书在第四、五两章中,结合有关内容对计算机仿真作了初步的介绍,并附有既可供编程参考又具有实用价值的通用程序。

本书可作为高等学校机械类各专业及其他非自控专业的教材。适合40~60学时使用。

本书第一、四章和附录由贵州工学院梁其俊编写,第二、三章由成都科技大学吴荣珍编写,第五、八章由重庆大学徐霖编写,第六、七章由四川工业学院张永相编写。贵州工学院黄勤编写和调试了第四章中瞬态响应的数字仿真程序,并验算了有关例题。全书由梁其俊负责统稿。

本书承华中理工大学校长杨叔子教授(博士生导师、中国科学院学部委员)和杨克冲教授主审。他们在百忙中对本书进行了认真的审阅,提出了许多宝贵的有指导性的意见。编者在此谨表深切的谢意!

武汉工业大学潘亚东教授对我们编写本书给予了热情的鼓励和帮助;全国机械控制工程研究学会西南分会将本书的编写列为分会的一项重要工作,给予了极大的关心和支持。编者在此一并表示衷心的感谢!

最后,由于我们水平所限,书中难免出现不妥和错误,恳请读者不吝赐教。

主 要 符 号 说 明

j	虚数单位 ($j = \sqrt{-1}$)	$Z(s)$	复阻抗
s	复变量	$I(t)$	单位阶跃函数
t	时间变量	$\delta(t)$	单位脉冲函数
$L[\]$	拉普拉斯变换	$g(t)$	单位脉冲响应函数或权函数
$L^{-1}[\]$	拉普拉斯反变换	T	时间常数、转矩或扭矩
m	质量	ζ	阻尼比
J	转动惯量	ω	频率或角速度
k	刚度系数	ω_n	无阻尼固有频率
B	粘性阻尼系数	ω_d	阻尼固有频率
L	电感	ω_T	转折频率
C	电容	ω_c	幅值穿越频率
R	电阻	ω_g	相位穿越频率
u	电压	ω_b	截止频率
i	电流	ω_r	谐振频率
q	电荷或液体流量	M_r	谐振峰值
p	液体压力	M_p	最大超调量
ρ	液体密度	t_r	上升时间
K	液体体积弹性模量、增益或比例系数	t_p	峰值时间
$x_i(t), X_i(s)$	输入信号	t_s	调整时间
$x_o(t), X_o(s)$	输出信号	γ	相位裕量
$n(t), N(s)$	扰动信号	K_g	幅值裕量
$b(t), B(s)$	反馈信号	$G(j\omega)$	频率特性
$e(t), E(s)$	偏差信号	$G_B(j\omega)$	闭环系统的频率特性
$e_r(t), E_r(s)$	误差信号	$G_K(j\omega)$	闭环系统的开环频率特性
e_{ss}	稳态偏差或稳态误差	$A(\omega)$	幅频特性
$G(s)$	传递函数	$\varphi(\omega)$	相频特性
$H(s)$	反馈通路传递函数	$U(\omega)$	实频特性
$G_B(s)$	闭环系统的传递函数	$V(\omega)$	虚频特性
$G_K(s)$	闭环系统的开环传递函数	$L(\omega)$	对数幅频特性
		$\varphi_L(\omega)$	对数相频特性

目 录

第一章 绪论.....	1
§ 1-1 反馈控制原理.....	1
§ 1-2 自动控制系统的基本类型.....	4
§ 1-3 系统应满足的基本要求.....	8
§ 1-4 本课程的性质和任务.....	8
习 题	10
第二章 系统的数学模型	11
§ 2-1 系统的微分方程	11
§ 2-2 系统的传递函数	17
§ 2-3 系统的传递函数方块图	23
§ 2-4 信号流图及梅逊公式简介	30
§ 2-5 推导系统传递函数的综合举例	32
习 题	40
第三章 系统的稳定性与误差分析	44
§ 3-1 时间响应的组成和典型输入信号	44
§ 3-2 稳定性的基本概念	47
§ 3-3 劳斯稳定判据和赫尔维茨稳定判据	48
§ 3-4 控制系统的稳态误差和稳态偏差	53
§ 3-5 稳态偏差与系统开环结构及输入形式的关系	56
习 题	61
第四章 系统的瞬态响应分析	63
§ 4-1 瞬态响应的性能指标	63
§ 4-2 一阶系统的瞬态响应	64
§ 4-3 二阶系统的瞬态响应	66
§ 4-4 二阶系统的性能分析	74
§ 4-5 高阶系统的瞬态响应	79
§ 4-6 系统对单位脉冲输入及任意输入的瞬态响应	81
§ 4-7 瞬态响应的数字仿真	83
习 题	91
第五章 系统的频率特性	93
§ 5-1 频率响应和频率特性的概念	93
§ 5-2 典型环节频率特性的极坐标图 (Nyquist 图)	97
§ 5-3 系统开环频率特性的极坐标图 (Nyquist 图)	102
§ 5-4 典型环节频率特性的对数坐标图 (Bode 图)	105
§ 5-5 系统开环频率特性的对数坐标图 (Bode 图)	110
§ 5-6 最小相位系统和非最小相位系统	112
§ 5-7 系统的闭环频率特性	113
§ 5-8 系统开环频率特性的实验确定方法	116

§ 5-9 用数字计算机求取系统的频率特性	119
习 题	123
第六章 系统的频率响应分析	125
§ 6-1 频域稳定性判据	125
§ 6-2 稳定性裕量	135
§ 6-3 频率响应的性能指标及与瞬态响应的关系	139
§ 6-4 延时系统的稳定性分析	143
习 题	146
第七章 系统的校正	149
§ 7-1 概述	149
§ 7-2 串联校正类型及校正原理	150
§ 7-3 串联校正装置设计举例	160
§ 7-4 并联校正	164
习 题	168
第八章 现代控制理论中的几个基本概念	170
§ 8-1 状态空间法的基本概念	170
§ 8-2 由传递函数导出状态方程	173
§ 8-3 状态方程的求解	176
§ 8-4 能控性和能观测性	178
§ 8-5 稳定性问题	182
习 题	184
附录 拉普拉斯变换	184
习 题	197
参考文献	199

第一章 绪 论

控制工程是应用控制论(cybernetics)的原理和方法,来研究工程技术领域中有关问题的一门技术科学。控制论的研究对象是系统,研究其各个部分应如何组织,以便实现稳定和有目的的运动。控制论深刻地揭示了系统存在着信息的转换、传递和反馈,并可利用反馈进行控制的客观规律。本章将主要介绍系统、信息、反馈和反馈控制等有关概念,系统应满足的基本要求,以及“控制工程基础”课程的性质和任务。

§ 1-1 反馈控制原理

一、反馈控制原理

下面通过举例来说明反馈控制这个控制论的最根本的思想及有关的基本概念。图 1-1a)

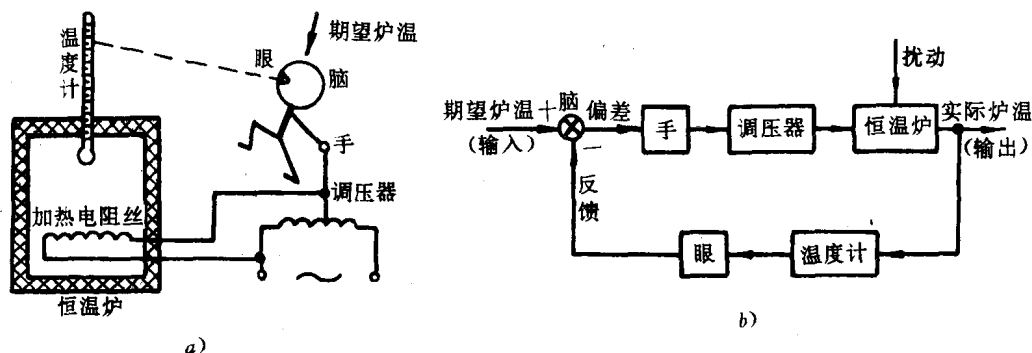


图 1-1

是一个恒温炉人工控制系统的原理图。系统由调压器、恒温炉、温度计和人的眼、脑、手等部分组成,其功能是保持实际炉温等于期望炉温。图 1-1b)是该系统的职能方块图,它可以清楚地表示各个组成部分的作用和相互连接关系、以及信息传递的路线和流向。恒温炉是被控对象。实际炉温是被控量,它是表示恒温炉状态的一种信息,称为系统的输出信号,或简称输出,也即是恒温炉的输出。期望炉温是一种控制信息,称为系统的输入信号,或简称输入,也即是对人脑的输入。实际炉温由温度计测出并由人眼返回传递到系统的输入端(人脑),再输入到系统中去。信息的这种由输出端返回到输入端的传递方式称为信息的反馈。反馈到输入端的信息称为反馈信号,也可简称为反馈。在人脑中,反馈与输入相比较即相减,这种与输入相减的反馈称为负反馈。比较的结果称为偏差信号,或简称偏差,即偏差等于输入(期望炉温)减去反馈(对本例而言就等于实际炉温)。偏差由人脑输出并控制手去调整调压器。如果实际炉温较低,即偏差为正,则适当右移调压器手柄以提高加热电阻丝两端的电压,从而使实际炉温升高。反之,则相反。如果实际炉温等于期望炉温,即偏差为零,则不移动调压器手柄。因此,无论是由于哪一种扰动因素,如环境温度变化、电源电压波动或系统内部参数不稳定等引起的,只要是实际炉温不等于期望炉温,即只要出现偏差,就会产生纠正偏差的控制作用,直至实际炉温等于期望

炉温,即偏差消失为止。这种建立在负反馈基础上的利用偏差去纠正偏差的控制原理称为反馈控制原理。

在上例中,如果用控制器来代替人的作用,就可以得到一个如图 1-2 所示的恒温炉自动控

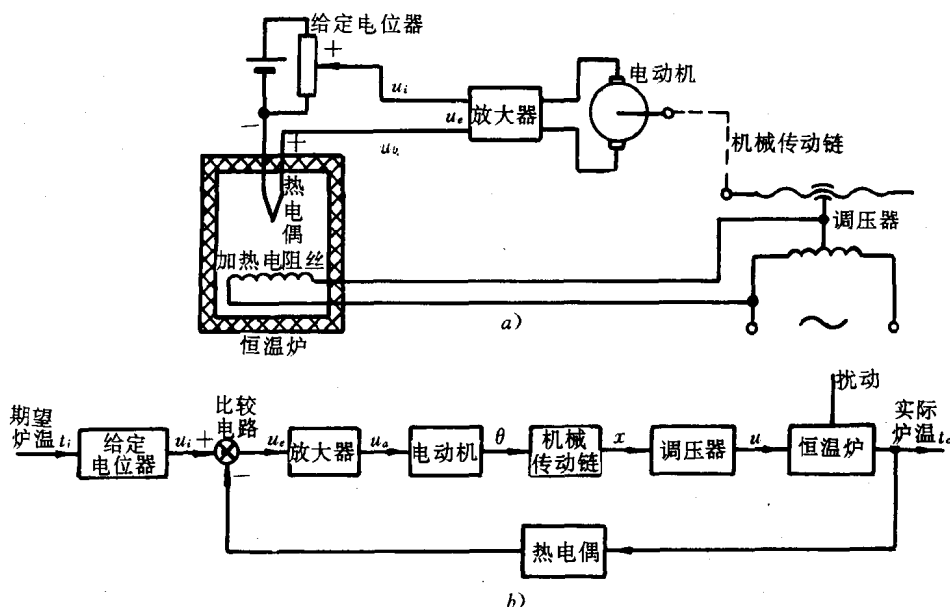


图 1-2

制系统, a) 是系统原理图, b) 是职能方块图。热电偶将实际炉温转换为电压 u_u 并反馈到系统的输入端。给定电位器的电压 u_i 作为系统的输入, 按实际炉温等于期望炉温时的反馈电压进行整定。因为 u_i 和 u_u 的电路反接, 所以它们是相比较(相减)的关系, 比较的结果就得到偏差电压 $u_e = u_i - u_u$ 。当实际炉温不等于期望炉温时, $u_e \neq 0$, 经过放大器放大后使电动机转动, 并通过机械传动链使调压器滑臂移动, 调整加热电阻丝两端的电压, 使实际炉温趋于期望炉温, 偏差电压 $u_e \rightarrow 0$ 。可见, 这个恒温炉自动控制系统也是利用反馈控制的原理。

读者试设想: 如果上例中的反馈不存在, 或者是调配不当的负反馈, 甚至是反馈与输入是相加强的关系, 则实际炉温将会出现什么情况?

除了工程上的许多系统是利用反馈控制的原理以外, 还有许多生物的系统、经济的系统和社会的系统也都存在着反馈控制的情况, 因此, 它们都能用控制论的原理和方法进行研究。

二、名词术语

1. 控制 是指根据某种原理或方法使被控对象的被控量按预期规律变化的操纵过程。
2. 系统 是指由相互制约的各个部分组成的具有一定功能的整体。系统的组成部分可以是具体的结构, 也可以是抽象的概念或关系。这里所指的系统是广义下的系统, 广义系统可能是十分具体的系统, 也可能是比较抽象的过程或现象。系统各组成部分之间的相互制约关系, 或者说它们之间所具有的一定规律的联系, 实质上就是系统各组成部分之间有着某种信息的转换、传递和反馈。正因为如此, 系统在输入作用下才表现出一定的运动状态, 形成系统及其输入、输出三者之间一定的动态关系。

为了实现某种控制目的而构成的系统称为控制系统。人不直接参与操纵过程的控制系统

称为自动控制系统。

3. 信息 是指能表达一定含义的信号、消息、情报、密码和图像。

4. 输入 是指系统接受到的对其状态或被控量有影响或控制作用的信息。对控制系统而言,它又可称为控制输入、参考输入或给定量。控制输入是期望输出的函数(如恒温炉自动控制系统中的整定电压),当函数关系等于 1 时,控制输入就等于期望输出(如恒温炉人工控制系统中向人脑输入的期望炉温)。

5. 输出 是指系统表现出来的受输入影响或控制的状态。输出也是一种信息,又常称为响应。对控制系统而言,输出就是被控量。

输入和输出的概念也可用于系统中的组成部分。如在图 1-2 中,放大器的输入是偏差电压 u_e ,输出是放大后的电压 u_o ;而对放大器和电动机而言,虽然输入仍是 u_o ,但输出则是电动机轴的角位移 θ 。

6. 扰动 是指对系统的输出产生不利影响的信息。由系统内部参数变化引起的扰动称为内扰,由系统外部环境、负载或能源变化产生的扰动称为外扰。外扰也可以认为是一种输入。其实,若系统有几个输入,则根据讨论的需要,除了认定是输入的以外,其余的就都可以当作是扰动。

7. 反馈 是指输出的全部或一部分,直接或经过转换后返回传递到输入端,再向系统输入的信息。反馈是输出的函数,并与输入的量纲相同。

与输入保持相比较或相减关系的反馈称为负反馈,反之称为正反馈。实质上,负反馈是减弱输入的作用,而正反馈则相反。由系统的输出端返回到系统的输入端的反馈称为主反馈,否则称为局部反馈。

8. 固有反馈(内在反馈) 是指由于系统本身固有的内在相互作用而形成的反馈。这种反

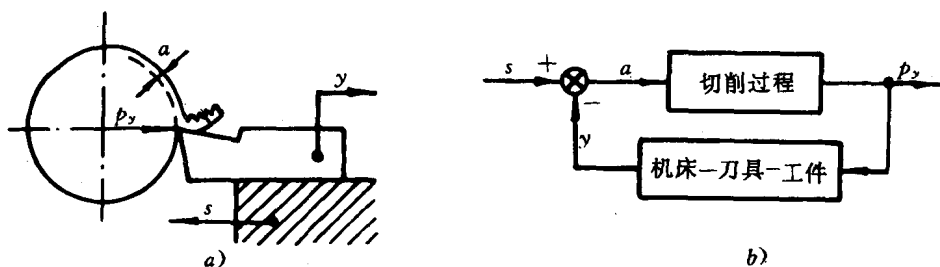


图 1-3

馈不是为了某种控制目的而特意设置的,因此往往不易被察觉。例如图 1-3 所示的车削过程,从其系统原理图 $a)$ 上看,似乎不存在反馈。但是,如果以名义进给量 s 为输入、径向切削力 p_y 为输出,则在深入分析后便知:由 p_y 及其反作用引起的机床-刀具-工件的弹性变形 y 就是一种固有反馈。因为影响 p_y 的实际切削厚度 a 在数值上等于 $s - y$,即影响输出 p_y 的不仅有输入 s ,而且还有由输出 p_y 经过转换后反馈回来的 y 。这一点在画出系统的职能方块图 $b)$ 后便可清楚地显示出来。由于切削过程中存在着这种固有反馈,所以在一定条件下将导致径向切削力持续周期变化,从而引起所谓的切削过程自激振动,使加工表面质量恶化。上例主要只是为了说明固有反馈的概念,因此作了较大程度的简化。对切削过程固有反馈的较完善的分析请参阅有关文献。

最后强调指出,许多机械动力学系统及其它系统,从表面上看没有反馈,而实际上却都存在着固有反馈,而且它们对系统的动态性能往往有很大的影响。因此,在研究这类系统时,只有

注意深入分析其中的固有反馈,才有可能揭示它们运动的本质,从而找到解决问题的有效途径。

§ 1-2 自动控制系统的基本类型

由前述可知,自动控制系统是利用控制器在无人直接参与的情况下,使被控对象的被控量按预期规律变化的控制系统。其分类方法很多,下面介绍几种常见的分法。

一、按反馈的情况分类

1. 闭环控制系统 具有为控制目的而特意设置的主反馈(注意是负反馈)的控制系统称为闭环控制系统或反馈控制系统。其基本组成如图 1-4 所示。其中:

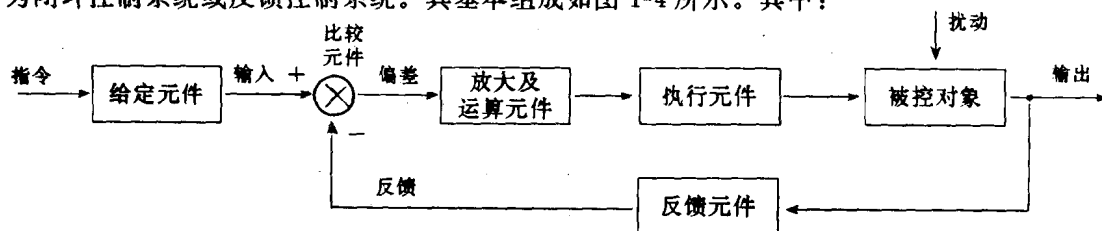


图1- 4

给定元件——接受指令并将其转换为输入的元件。如图 1-2 中的给定电位器。

指令是表示期望输出的一种信息。

反馈元件——检测输出并将其转换为反馈的元件。如图 1-2 中的热电偶。

比较元件——将输入与反馈进行比较并得出偏差的元件。如图 1-2 中输入电压 u_i 和反馈电压 u_f 的反接电路。注意,从广义上讲,这类元件是对信息进行合成的元件,所以在方块图中又常称其为相加点。

放大及运算元件——将比较元件传递来的偏差进行转换和放大的元件。如图 1-2 中的放大器。

执行元件——接受放大及运算元件传递来的信息,直接操纵被控对象的元件。如图 1-2 中的电动机及机械传动链。

被控对象——控制系统中需要被控制的某种设备或某种过程,其输出就是被控量。如在图 1-2 中,恒温炉是被控对象,实际炉温则是被控量。

闭环控制系统除了以上的基本组成元件以外,往往还有在图 1-4 中尚未表示出来的校正元件,其作用是为了改善控制系统的性能,有关介绍详见第七章。

有时将放大及运算元件和执行元件合起来称为控制元件。也可将被控对象以外的所有元件总称为控制器。因此,闭环控制系统的方块图还可简化为如图 1-5 所示。注意,一个元件的功能有时要由几个具体的装置来实现,而一个具体的装置有时又会具有几个元件的功能。

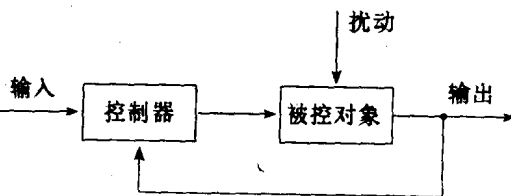


图1- 5

由图 1-4 可以看出,相邻元件之间的信息传

递关系具有单向性。由输入端至输出端的信息通路称为前向通路,由输出端通过反馈元件又返回到输入端的信息通路称为反馈通路。前向通路和反馈通路连起来就形成了信息传递的闭合回路,简称回路。含有主反馈的回路称为主回路,其它回路称为局部回路。

闭环控制系统的特点就是具有可以利用输出来影响控制作用的主反馈是负反馈的主回路,所以是闭式控制方式。因此,当实际输出由于扰动而偏离期望输出时,闭环控制系统本身就可能具有自行纠偏的能力。所以可采用精度不太高、价格比较低的元件来构成精确的控制系统。但是闭环控制系统的组成一般比较复杂,且当参数调配不当时,由于存在信息传递的主回路,就会引起输出持续振荡甚至发散的不稳定现象。

闭环控制系统常用于实际输出不难测得,而扰动较大且不能预知其变化规律或不可测的场合。特别是当期望输出不能预知时,就只能采用闭环控制系统。至于它的稳定性问题,则可应用控制理论进行分析并指出解决的途径。

这里需要强调指出,许多存在固有反馈的机械动力学系统及其它系统,也是一种闭环系统。因此,为了揭示它们运动的本质,就很有必要应用控制论的原理和方法加以分析和研究。

2. 开环控制系统 不具有为控制目的而特意设置的任何反馈的控制系统称为开环控制系统。其方块图可简单表示为如图 1-6 所示。

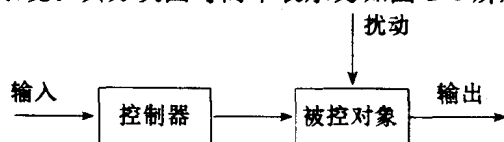


图1- 6

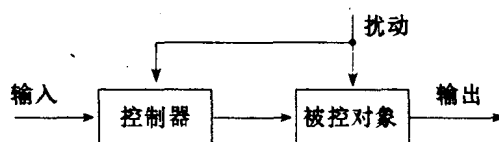


图1- 7

开环控制系统的特点就是不具有利用输出来影响控制作用的信息传递的闭合回路,所以是开式控制方式。因此,当实际输出由于扰动而偏离期望输出时,开环控制系统本身不可能具有自行纠偏的能力。但是它的组成一般比较简单,且不存在像闭环系统那样的由于有了主回路以后所带来的那种较为复杂的稳定性问题。

开环控制系统常用于预知期望输出且扰动很小,或扰动虽大但预知其变化规律从而能够加以补偿的场合。按扰动补偿的原理见图 1-7,将扰动测出并经过适当变换后再输入系统,这样就可以利用扰动产生的控制作用来抑制扰动对输出的不利影响。注意,这种将扰动测出又再输入系统的信息通路不是反馈通路,并没有形成信息传递的闭合回路,所以仍然属于开式控制方式。

开环控制系统的精度,取决于系统的校准精度和各组成元件性能参数及外界条件的稳定程度,还取决于对扰动采取补偿措施的效果。不能不加分析地一概认为开环控制系统的精度就一定不高。

如果开环控制系统和闭环控制系统都能满足控制性能的要求,则应根据经济性或其它方面的考虑来决定究竟选用哪一种系统。

二、按期望输出的情况分类

1. 自动调节系统 如果期望输出是常量,系统在有扰动的情况下能使实际输出相当精确地保持等于期望输出,则这种系统称为自动调节系统或恒值控制系统。例如,对温度、压力、流量、液面、转速、电压、电流等的恒值控制。显然,自动调节系统应该是闭环控制系统。

2. 随动系统 如果期望输出经常发生变化且不能预知其变化规律,系统能使实际输出以一定的精度及时跟随期望输出,则这种系统称为随动系统。随动系统的输出一般都是机械量,如位移、速度和加速度,在这种情况下,又常称其为伺服系统。例如,舰船操舵系统、火炮瞄准系统、雷达跟踪系统等等都属此类。显然,随动系统必须是闭环控制系统。

3. 程序控制系统 如果期望输出经常发生变化但能预知其变化规律,系统能使实际输出准确可靠地复现期望输出,则这种系统称为程序控制系统。例如,数控机床系统、过程控制系统、仿形控制系统等等都属此类。过程控制系统的被控量是温度、压力、流量、液面、浓度等类变量。根据具体情况,程序控制系统可以是闭环控制系统,也可以是开环控制系统。对于输出是机械量,如位移、速度和加速度的闭环程序控制系统,也可称为随动系统或伺服系统。

三、按通过系统的信号是否连续分类

1. 连续控制系统 如果通过系统各处的信号均为时间的连续函数,则这种系统称为连续控制系统。连续控制系统的参数是分布参数时,要用偏微分方程来描述;当其可简化为集中参数时,就可用常微分方程(简称微分方程)来描述。

2. 离散控制系统 如果通过系统的信号只要有一处是脉冲序列或数字信号,则这种系统称为离散控制系统或数字控制系统。它可用差分方程来描述。

四、按系统组成元件的输入输出特性分类

1. 线性系统 系统中各组成元件的输入输出特性都是线性的,因而系统可以用线性方程(即一次方程)来描述时,这种系统称为线性系统。如果线性方程中的系数都是常数,则由该方程所描述的系统称为线性定常系统。如果线性方程的系数中只要有一个是时间(自变量)的函数,则由该方程所描述的系统称为线性时变系统。例如,下面描述某线性系统输入 $x_i(t)$ 和输出 $x_o(t)$ 之间动态关系的线性微分方程

$$a_2 \ddot{x}_o(t) + a_1 \dot{x}_o(t) + a_0 x_o(t) = b_1 \dot{x}_i(t) + b_0 x_i(t) \quad (1-1)$$

如果系数 a_0, a_1, a_2 和 b_0, b_1 全都是常数,则由该方程所描述的系统就是(集中参数的连续的)线性定常系统。如果系数中只要有一个是时间 t 的函数,如 $a_1 = f(t)$,则由该方程所描述的系统就是(集中参数的连续的)线性时变系统。

线性系统的基本特点就是具有线性性质,即

(1) 齐次性 当系统的输入变化多少倍时,系统的输出也相应变化多少倍。

(2) 叠加性 当有几个输入同时但不一定在同一处作用于系统时,系统的总输出等于各个输入单独作用时的输出之和。

通常,将齐次性和叠加性合起来称为叠加原理。因此,又可以说,线性系统的基本特性就是满足叠加原理。

如果某线性系统在输入 $x_{i1}(t)$ 单独作用下的输出为 $x_{o1}(t)$,而在输入 $x_{i2}(t)$ 单独作用下的输出为 $x_{o2}(t)$,设 a, b 为常数,则根据叠加原理,该系统在输入 $ax_{i1}(t)$ 和 $bx_{i2}(t)$ 同时作用下的总输出为 $ax_{o1}(t) + bx_{o2}(t)$ 。

2. 非线性系统 系统中只要有一个组成元件的输入输出特性是非线性的,因而系统需要用非线性方程(即非一次方程)来描述时,这种系统称为非线性系统。例如,用下面两个微分方程

$$\ddot{x}_o(t) + x_o(t)\dot{x}_o(t) + x_o(t) = A \sin \omega t \quad (1-2)$$

和

$$\ddot{x}_0(t) + A \sin[x_0(t)] = x_1(t) \quad (1-3)$$

分别描述的两个系统就都是非线性系统。读者试说明其原因。

实际上,组成系统的机械、液压、气动、电气以及其它元件的输入输出特性,总是不同程度地存在着非线性关系。因此,严格说来,实际系统都是非线性系统。图 1-8 表示了几种典型的非线性特性。

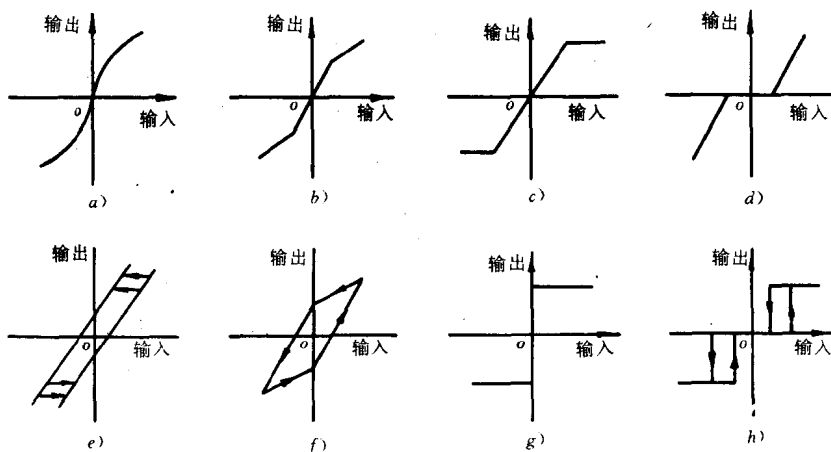


图 1-8

a) 曲线特性 b) 折线特性 c) 饱和特性 d) 死区特性 e) 间隙特性
f) 滞环特性 g) 库仑摩擦或继电特性 h) 具有死区和滞环的继电特性

由于非线性系统的数学处理比较困难,而对线性系统的分析则有较为成熟的理论和方法,所以在有可能的情况下,一般都希望将非线性系统近似简化为线性系统来研究。

一种情况是非线性因素的影响不大。例如,间隙、死区很小或非线性程度很小,这时就可以忽略这些非线性因素。另外一种情况是在系统的工作范围内,非线性特性不存在折线、死区、跃变或多值对应关系,即不存在本质非线性因素。换句话说,也就是在系统的工作范围内,非线性特性是可导的连续函数关系,即是非本质非线性因素。在这种情况下,就可应用小偏差法将非线性系统线性化为线性系统。关于小偏差法线性化的原理将在第二章中加以说明。

在上述情况下,将非线性系统近似当作线性系统来处理,已经能够解决许多实际系统的分析和研究的问题。但是,对某些系统,包括为了改善系统性能而特意引入非线性因素的系统,由于不满足上面的条件,因而就必须采用现在已有的处理非线性系统的方法,例如,描述函数法、相平面法、李雅普诺夫直接法、计算机仿真法等来进行研究。读者在需要时可参阅其它有关文献。

自动控制系统除了按上述几种方法进行分类以外,还可按其它方法分为:确定型系统和随机型系统;单变量(单输入单输出)系统和多变量(多输入多输出)系统;机械系统、液压系统、气动系统、电气系统及其联合控制系统;等等。

本书的讨论对象主要是确定型、单变量、集中参数、连续的线性定常系统,以后就简称为线性定常系统或系统。

§ 1-3 系统应满足的基本要求

这里所指的系统应满足的基本要求,是从系统的输出应该具有什么性能这个角度提出来的。一般可以归纳为下列三个方面。

一、稳定性

这是指作用于系统的使其输出偏离平衡状态的扰动除去以后,系统的输出经过一个随时间而变化的过程,最终能恢复到原平衡状态的性能。

一个稳定的系统在受到输入作用后,其输出经过一个随时间而变化的过程,总会达到一个与输入相对应的平衡工作状态(稳态)。系统的输出随时间变化而趋于稳态的这个过程称为动态过程或过渡过程。一个不稳定的系统,其输出不可能有平衡工作状态,而是表现为持续振荡甚至发散的不受控制的形式。因此,不稳定的系统是根本不能进行正常工作的。

为了避免因系统内部参数或外界条件的微小变化而失稳,或者为了避免因过渡过程振荡剧烈而使系统发生损坏,系统还应具有足够的稳定裕量,即应具有足够的相对稳定性。在时域内,相对稳定性表现为输出在过渡过程中的振荡程度,换句话说就是平稳程度或平稳性。振荡程度越小,即平稳程度或平稳性越好,说明相对稳定性就越好。

二、快速性

这是指系统的输出趋于稳态的快慢程度,包括输出所经历的过渡过程时间的长短和输出在过渡过程初始阶段的反应速度。

三、准确性

这是指系统达到稳态时,其实际输出与期望输出相接近的程度,即稳态精度。

由上述可知,在系统应满足的基本要求中,稳定性是系统正常工作的前提条件;过渡过程的平稳性(相对稳定性)和响应的快速性反映了系统在过渡过程中的性能,可称为系统的动态品质、动态性能或瞬态响应性能;稳态精度(准确性)反映了系统在过渡过程结束时的性能,可称为系统的稳态品质或稳态性能。又因为稳定性、快速性以及准确性都可以说是用来表征系统的过渡过程即动态过程的,所以有时也可认为它们都是系统的动态性能。

不同的系统对稳、快、准这三方面的要求各有侧重。例如,自动调节系统主要是对稳态精度的要求很高;而对于期望输出变化很快的随动系统,则着重要求快速性要好,特别是初始响应速度要快,以免丢失目标。

同一个系统的稳、快、准这三方面的性能是相互制约的。提高了响应的快速性,可能会引起过渡过程产生强烈的振荡;改善了过渡过程的平稳性,又可能会使系统的反应迟钝,甚至稳态精度也变差。分析和解决这些矛盾将是本书所要讨论的重要内容。

§ 1-4 本课程的性质和任务

控制工程是研究控制论在工程领域中的应用的一门技术科学,也可以说就是工程控制论。“控制工程基础”课程则是阐述控制工程的基本原理和基本方法的一门综合性很强的技术基础