

高等学校试用教材

自动控制原理

天津大学 李光泉 主编

机械工业出版社

13.822
271

高等学校试用教材

自动控制原理

天津大学 李光泉 主编

21587/18



机械工业出版社

(京)新登字 054 号

本书是根据原高等工业学校工业自动化仪表及装置专业《自动控制原理》教学大纲编写的。本书系统地介绍了自动控制原理的基本概念、系统数学模型的建立、系统的时域分析法、根轨迹法、频率法、处理非线性系统的描述函数和相平面法。同时还介绍了在 z 域内分析和设计采样控制系统的方法以及现代控制理论的基本内容。本书在系统地介绍控制理论主要内容的同时,力求结合专业特点,并兼顾相近专业的要求。

本书可作为高等院校工业自动化仪表专业及其它自动化专业的教材或教学参考书,亦可供从事工业自动化仪表及过程控制等专业领域内工作的工程技术人员参考。

自动控制原理

天津大学 李光泉 主编

责任编辑:邱绵来 李卫东 王小东 责任校对:申春香

责任印制:路琳 版式设计:霍永明

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

四川省金堂新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 $1/16$ ·印张 27 $1/4$ ·字数 674 千字

1989年6月北京第1版·1994年5月成都第4次印刷

印数 9 201—11 800·定价:13.20 元

ISBN 7-111-01465-0/TP·88(课)

前 言

本书系根据1983年12月原高等工业学校工业自动化仪表及装置专业教材编审小组制订的教学大纲编写的。根据大纲要求，本书在系统地介绍经典控制理论主要内容的同时，力图结合专业特点，并兼顾相近专业的要求。全书共分九章。前六章主要阐述线性控制理论及分析设计线性控制系统的根轨迹法和频率特性法；第七章介绍处理具有非线性特性环节的控制系统的描述函数和相平面方法；第八章讨论在 z 域内分析和设计采样控制系统的方法；第九章属现代控制理论内容，简要地概述控制系统状态空间分析方法和最优控制的基本内容。为了便于读者深入理解本书所述的重要概念，每章都列举了一定数量的例题和习题。

本书由天津大学李光泉教授主编。参加编写的有高紫光副教授（第二、三、四章）、汪德馨副教授（第九章）和和金生讲师（第六、七、八章）。清华大学方崇智教授仔细地审阅了全部书稿。参加审稿的还有王诗宓博士。编者对他们认真负责的精神和对书稿提出的宝贵意见表示感谢。

本书可作为高等院校工业自动化仪表专业及其它自动化专业的教材或教学参考书，亦可供从事自动化仪表及过程控制等专业领域内工作的工程技术人员参考。

由于编者水平有限，错误或不当之处在所难免，期望广大读者批评指正。

编 者

1987. 12于天津

目 录

第一章 绪论	1	三、控制系统用电机	50
§ 1-1 自动控制和自动控制系统	1	四、齿轮系	53
§ 1-2 自动控制系统的传递方块图	2	五、差动变压器式压力传感器	54
§ 1-3 自动控制系统的分类	3	§ 2-7 信号流图	55
一、开环控制系统与闭环控制系统	3	一、信号流图及其性质	55
二、定值、随动和程序控制系统	4	二、系统方块图与信号流图的关系	57
三、线性与非线性控制系统	5	三、信号流图的简化规则	58
四、连续与离散控制系统	5	四、梅逊增益公式	58
五、单变量与多变量控制系统	6	习题	62
§ 1-4 自动控制系统的性能指标	7	第三章 时域分析法	76
习题	8	§ 3-1 控制系统的稳定性	70
第二章 系统的数学模型	10	一、稳定性的基本概念	70
§ 2-1 系统的微分方程	10	二、线性系统的稳定性	71
一、系统微分方程式的建立	10	三、判别系统稳定性的代数判据	73
二、非线性特性的线性化	12	四、代数判据的应用	78
三、无量纲化运动方程式	13	§ 3-2 控制系统的稳态误差	82
四、典型系统微分方程的列写	14	一、稳态误差和误差传递函数	82
§ 2-2 瞬态响应函数	19	二、参考输入下的稳态误差	84
一、脉冲响应函数	19	三、扰动输入引起的稳态误差	87
二、阶跃响应函数	21	四、系统本身特性变化引起的稳态输出变化	89
§ 2-3 拉氏变换和传递函数	22	五、降低稳态误差的方法	89
一、拉氏变换	22	§ 3-3 控制系统的瞬态响应分析	90
二、传递函数	26	一、自动控制系统瞬态响应性能指标	90
§ 2-4 典型环节及其传递函数	28	二、二阶系统瞬态响应性能指标	92
一、比例环节	28	三、二阶系统的脉冲响应	97
二、惯性环节	28	四、三阶系统的单位阶跃响应	98
三、积分环节	29	五、高阶系统的瞬态响应分析	99
四、微分环节	30	§ 3-4 自动控制系统的计算机辅助设计	100
五、振荡环节	31	一、模拟计算机在控制系统研究中的应用	101
六、延迟环节	35	二、数字计算机在控制系统研究中的应用	104
§ 2-5 系统的方块图和传递函数	37	习题	114
一、环节的三种基本连接	37	第四章 根轨迹法	120
二、方块图的等效变换和简化	39		
§ 2-6 电网络及仪表部件的传递函数	45		
一、无源电网络	45		
二、运算放大器电路	48		

§ 4-1 根轨迹的基本概念及绘制条件	120	一、奈魁斯特稳定判据	190
§ 4-2 绘制根轨迹的基本规则	122	二、奈氏判据的数学证明	193
一、根轨迹的分支数和对称性	123	三、奈氏判据的应用	197
二、根轨迹的起点和终点	123	四、利用对数频率特性分析系统的稳定性	201
三、实轴上的根轨迹	124	五、多回路系统的稳定性分析	203
四、根轨迹的渐近线	125	六、稳定裕量	203
五、根轨迹与实轴的交点	127	§ 5-6 控制系统性能指标的估算	204
六、根轨迹的出射角和入射角	131	一、二阶系统频率特性与其时间响应过程的关系	205
七、根轨迹与虚轴的交点	132	二、闭环系统的频率特性和尼柯尔斯(Nichols)图	206
八、根轨迹的收敛性	133	三、高阶系统性能指标的估算	209
九、放大系数的求取	133	四、开环频率特性与闭环系统性能指标的关系	210
§ 4-3 控制系统的根轨迹分析	138	§ 5-7 用计算机求取控制系统的频率特性和稳定裕量	213
一、控制系统的根轨迹分析法	138	一、开环系统频率特性的计算	213
二、开环零点对系统根轨迹的影响	140	二、控制系统增益裕量和相角裕量的计算	217
三、开环极点对系统根轨迹的影响	142	习题	219
四、偶极子对系统性能的影响	142	第六章 自动控制系统的综合与校正	223
§ 4-4 具有纯延迟系统的根轨迹分析	145	正	223
一、延迟系统的根轨迹方程	145	§ 6-1 综合校正的基本概念	225
二、延迟系统的根轨迹绘制和分析	146	§ 6-2 串接超前校正	226
§ 4-5 广义根轨迹	151	一、超前网络	226
一、开环零点变化时的根轨迹	151	二、基于根轨迹法的超前校正综合	228
二、开环极点变化时的根轨迹	152	三、基于频率特性法的超前校正综合	232
三、零度根轨迹	153	§ 6-3 串接滞后校正	235
§ 4-6 绘制根轨迹的计算机方法	156	一、滞后网络	235
一、分支跟随法的算法要点	156	二、基于根轨迹法的滞后校正综合	236
二、分支跟随法绘制根轨迹程序框图	160	三、基于频率特性法的滞后校正综合	238
习题	162	§ 6-4 串接滞后-超前校正	241
第五章 频率特性法	167	一、滞后-超前校正网络	241
§ 5-1 频率特性及其与传递函数的关系	167	二、基于根轨迹法的滞后-超前校正综合	242
一、频率特性的基本概念	167	三、基于频率特性法的滞后-超前校正综合	245
二、频率特性与传递函数的关系	169	§ 6-5 零极点相消校正	248
§ 5-2 幅相频率特性	170	一、零极点相消校正的原理	248
一、典型环节的幅相频率特性	170	二、实现复数零极点的T桥网络	250
二、开环系统的幅相频率特性	176		
§ 5-3 对数频率特性	180		
一、对数频率特性	180		
二、典型环节的对数频率特性	182		
三、开环系统的对数频率特性	187		
§ 5-4 最小相位系统和非最小相位系统	189		
§ 5-5 控制系统稳定性的频率判据	190		

三、零极点相消校正实例	251	三、仿真算法的程序实现	324
§ 6-6 希望对数幅频特性法串接校正	253	习题	326
§ 6-7 局部反馈校正	256	第八章 采样系统与 z 变换法	330
一、局部反馈校正的综合方法	257	§ 8-1 信号的采样和保持	330
二、速度或测速发电机反馈校正	259	一、采样系统实例	330
§ 6-8 控制系统校正的计算机辅助设计	261	二、信号的采样和保持	332
一、校正装置零极点的确定	261	§ 8-2 z 变换	337
二、校正装置结构形式的确定	263	一、 z 变换的定义	337
三、系统设计的计算机程序	263	二、 z 变换的基本定理	340
四、应用举例	266	三、改进 z 变换	346
习题	267	四、 z 反变换	348
第七章 非线性控制系统的分析方		§ 8-3 采样系统的数学模型	350
法	274	一、差分方程	350
§ 7-1 控制系统中的非线性	274	二、差分方程的求解	353
一、非线性系统的特殊现象	274	三、脉冲传递函数	355
二、研究非线性控制系统的一般方法	277	§ 8-4 采样系统的分析	362
§ 7-2 典型非线性特性及其对控制系统的影响	278	一、采样系统的过渡过程	362
一、饱和特性	278	二、采样系统的稳定性	365
二、死区(不灵敏区)特性	280	§ 8-5 采样系统的设计校正	371
三、滞环特性	281	一、根轨迹法和频率特性法提要	371
四、库仑摩擦和静摩擦特性	282	二、采样系统的校正	371
五、继电器特性	283	§ 8-6 采样控制系统的计算机仿真	377
§ 7-3 非线性特性的描述函数	283	一、系统采样时刻值的仿真	377
一、描述函数的基本概念	283	二、采样时刻之间值的仿真	378
二、典型非线性特性的描述函数	285	三、改进 z 变换仿真方法的程序实现	380
§ 7-4 非线性系统的描述函数分析	293	习题	382
一、非线性系统的稳定性分析	293	第九章 状态空间分析法	386
二、非线性系统极限环的消除	298	§ 9-1 状态变量和状态空间表达式	386
§ 7-5 相平面法及相平面图	300	一、状态空间表达式的建立	386
一、相平面法的基本概念	300	二、多变量系统和传递函数阵	386
二、相平面图的绘制方法	301	三、状态空间表达式与传递函数阵	390
三、相平面图的特性	305	§ 9-2 状态空间表达式的建立	391
§ 7-6 非线性系统的相平面分析	312	一、由系统运动规律建立状态空间表达式	391
一、线性系统瞬态响应分析	312	二、由系统的结构方块图建立状态空间表达式	392
二、非线性系统的相平面分析	313	三、由系统的高阶微分方程建立状态空间表达式	393
三、双位控制系统的相平面分析	318	§ 9-3 线性系统状态方程的解	398
§ 7-7 分段线性化数字计算机仿真	321	一、线性定常系统齐次状态方程的解	398
一、分段线性化仿真的基本原理	321	二、线性定常系统的状态转移阵	399
二、继电控制系统的仿真算法	322	三、线性系统非齐次方程的解	400
		§ 9-4 离散时间系统的状态空间表达	

式	401	二、能观性	415
一、离散时间系统的状态空间表达式 的建立	401	§ 9-7 线性系统状态空间的综合方 法	418
二、离散时间系统状态方程的解	402	一、子系统联接方式	418
三、连续时间系统的离散化	404	二、解耦控制	421
§ 9-5 李雅普诺夫稳定性分析	405	三、极点配置	423
一、李雅普诺夫意义下的稳定性	405	§ 9-8 最优控制	425
二、李雅普诺夫函数及其性质	407	一、最优控制的概念	425
三、李雅普诺夫稳定性理论	408	二、系统参数最优化问题	426
四、线性系统的李雅普诺夫稳定性分 析	409	三、最优状态反馈控制	428
§ 9-6 线性系统的能控性和能观性	410	习题	430
一、能控性	410	参考文献	432

第一章 绪 论

§1-1 自动控制和自动控制系统

自动控制在工业、农业、国防和科学技术的现代化中起着重要的作用，并在国民经济和国防建设的各个领域得到了广泛的应用。所谓自动控制，就是应用自动化仪表或控制装置代替人工自动地对设备或过程进行控制，使之达到预期的状态或性能要求。自动控制技术的应用可使生产过程实现自动化，提高劳动生产率，稳定产品质量，减轻操作人员的劳动强度，降低能源和原材料的消耗，保证安全生产，减少对环境的污染，从而提高经济效益和社会效益。对于某些要求准确性高、动作极迅速的操作，单靠人工控制而不用自动控制是难以满足要求的。此外，在某些人们不能直接参与工作的场合，如原子能的生产等就更离不开自动控制技术了。因此自动控制已成为实现工业现代化、农业现代化、科学技术现代化和国防现代化所必不可少的一门技术。

自动控制是由人工控制演变过来的。

图1-1所示为液（水）位控制的原理图。图中 Q_1 、 Q_2 分别为进水流量和出水流量，控制的目的是使水槽中的液位以一定精度稳定于某一高度。

在人工控制中，操作人员取液位作为操作指标，用眼、脑、手这三个器官来进行控制。首先用眼睛观察液位的高低，然后通过神经网络传给大脑，大脑分析比较实际液位相对于工艺要求规定的高度是高了还是低了，高多少？低多少？再根据操作经验，经过运算（思考）发出控制命令，最后由手执行命令，调节出水阀门开度，从而把液位保持在所需的高度上。

在自动控制中，用自动检测仪表——液位变送器来代替人的眼睛、自动地检测液位的高低，并把液位高低的变化变换成与之成比例的统一信号（电的或气的），此信号称为“测量信

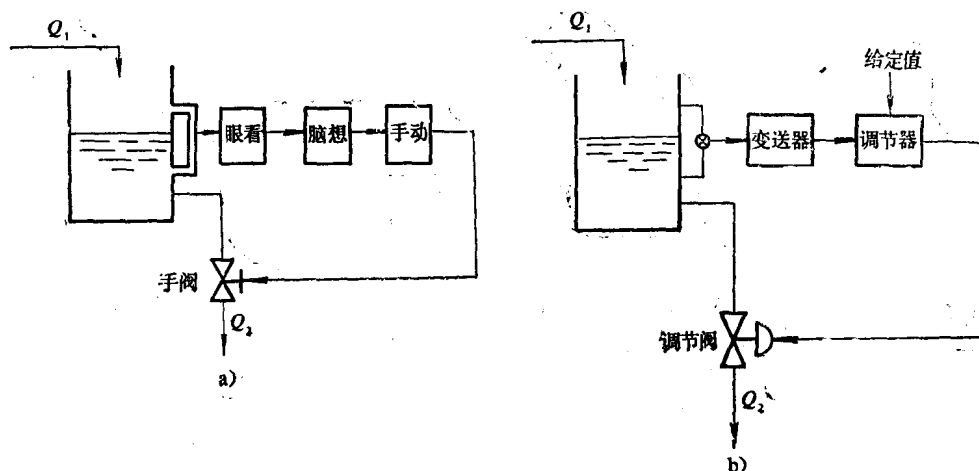


图1-1 液位控制原理图

a) 人工控制 b) 自动控制

号”。调节器则代替人的大脑，把接收到的测量信号与希望保持液位高度的“给定信号”进行比较而得出两者之偏差，然后根据偏差信号大小，按某种运算规律算出结果，并将此结果作为“控制信号”送到执行器中。执行器代替人的手去开大或关小阀门，使液位保持在所希望的数值上，从而实现了自动控制。

把所要控制液位的水槽，和用以进行控制的自动检测仪表、自动调节器和执行器等组合在一起所构成的系统就称为自动控制系统。可以看出，一个自动控制系统由两部分组成：一部分是被控制的设备或过程，今后统称为“控制对象”或“调节对象”（简称对象）。表征设备或过程的运行情况或状态且需要加以控制的参数称为“被控参数”或“被调参数”。希望被控参数所具有的数值称为“给定值”或“参考输入”。引起被控参数变化的外部因素，称为“扰动”（如图 1-1 中的进水流量的变化）。组成自动控制系统的另一个部分则是起控制作用的整套自动化仪表或装置。在工业过程控制中，它主要包括自动检测仪表（测量元件和变送器）、自动调节器或计算机装置、执行机构等，分别完成检测、运算和执行等职能。

§1-2 自动控制系统的传递方块图

在研究自动控制系统时，为了便于分析并能清楚地表示系统各组成环节间的相互影响和信号传递关系，一般习惯用传递方块图来表示，如图 1-2 所示。

在传递方块图中，系统的每一个组成部分用一个方块来代表，称为一个“环节”。环节间用带箭头的的作用线连接起来，表示环节之间的信号传递关系，其中箭头方向代表作用方向。一个环节所接受的作用称为该环节的“输入量”，而输入量在这个环节中引起的变化称为该环节的“输出量”。环节的输入量是使该环节发生运动的原因，而输出量则是该环节发生运动的表现和结果。方块图中每一个环节都应该具有单向性，即环节的输入引起输出的变化，而输出不会反过来引起输入的变化。

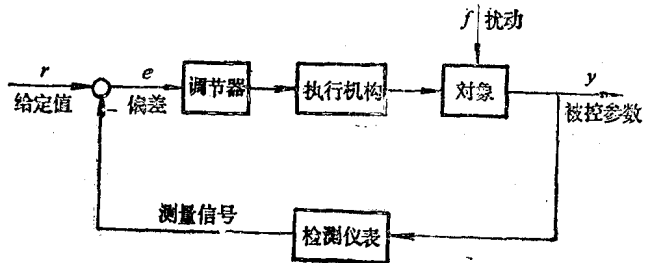


图1-2 自动控制系统的传递方块图

对于整个控制系统来说，其输出量即为被控参数，而输入量则有两个：一是给定值（有时也称参考输入）的变化；另一个则是扰动输入。不同的扰动其作用点不相同，不同的输入引起的系统输出变化也不相同，这就形成了不同的传递通路。

值得注意的是，方块图中的作用线只表示信号的传递，而不表示实际物料的流动，作用线的箭头只表示信号的传递方向，而不表示物料的流动方向。例如图 1-1 中水槽作为一个对象环节，其输出信号是液位高度，而引起液位变化的进水流量 Q_1 的变化当然是其输入信号之一；出水流量 Q_2 由于某种原因而引起的变化也是其输入信号之一，而从实际系统的物料流动方向来看却是从水槽流出去的。

传递方块图可简可繁，具体应用时应以能清楚表达所需研究的信号传递关系和突出所研究的环节的性能为原则。例如图 1-2 所示的过程控制系统，工程上实际测试出的对象特性往

往包含了检测仪表和执行机构的特性，这称为广义对象的特性。这样，图1-2所示的系统，可视为由对象和调节器（又称控制器）两个环节所组成，如图1-3所示。

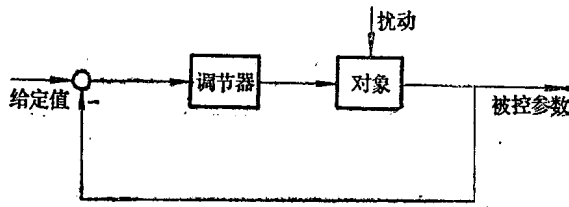


图1-3 自动控制系统的简化方块图

§1-3 自动控制系统的分类

由于自动控制技术广泛应用于各个部门和领域，以及控制理论本身的发展，使得自动控制系统具有各种各样的形式，其分类方法亦有多种。为便于研究各种控制系统的基本性质，确定正确的研究方法和所使用的数学工具，下面重点讨论几种分类方法。

一、开环控制系统与闭环控制系统

（一）开环控制系统

开环控制系统的特点是系统的输出量对系统的控制作用没有影响，在这种控制系统中，对于系统的输出量，不形成任何闭合回路，如图1-4所示。

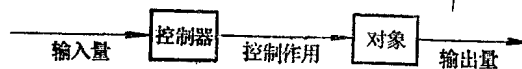


图1-4 开环控制系统

这种控制系统结构简单，系统的输出量不被用来与参考输入进行比较，因此对应于每一个参考输入量，便有一个相应的固定工作状态，其控制精度取决于系统各环节的精度。当系统存在扰动时，开环控制系统很难完成既定的控制任务，它只适用于输入与输出的关系已知，并且系统不存在扰动的情况。

在系统存在扰动的情况下，如果扰动能被测量，可以根据扰动的大小对控制作用进行相应的修正或补偿，这样可以提高系统的控制精度，如图1-5所示。这种按开环补偿原则建立起来的系统称为开环补偿系统，这种控制方式，又称为“前馈控制”。单纯的前馈控制一般也难以满足控制要求，这是因为系统往往存在很多扰动，不能一一补偿，而且有的扰动，限于技术条件而无法检测，也就无法实现扰动补偿。

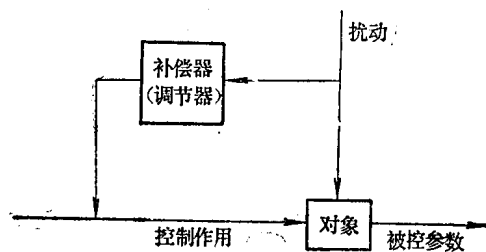


图1-5 开环扰动补偿系统

（二）闭环控制系统

闭环控制系统的特点是系统的输出量（被控参数）对控制作用有直接影响。图1-2所示的系统就是一个闭环控制系统。从图中可以看出，系统的输出经自动检测仪表又返回到系统的输入端与给定值进行比较而形成“反馈”，而调节器则根据其比较后得到的偏差信号的符

号和大小，产生相应的控制作用去消除偏差，使被控制的参数（系统输出）等于给定值。可以看出，这种控制系统由于存在输出对输入的反馈，因此对系统的输出形成了一个闭合的回路，故称为闭环控制系统，又称“反馈控制系统”。系统输出返回到输入端的信号称为反馈信号。如果反馈信号与系统输入信号相反，则称为负反馈；反之，如极性相同，则称为正反馈。而闭环的控制系统都是负反馈的系统，这是一种按偏差而进行控制的系统。

闭环控制系统的突出优点就是不管什么扰动引起被控参数偏离给定值（参考输入），都会产生控制作用去消除被控参数的偏差，因此可以说，闭环控制系统可以克服任何扰动对被控参数的影响。此外，由于闭环控制系统采用了负反馈，这就使系统的响应对内部参数变化不敏感，从而降低了除反馈线路上的环节或元件外的其它组成环节或元件的要求。当然，也正是由于系统是一个闭合的回路，如果系统内部各组成环节的特性配合不当，有可能使系统的输出产生剧烈地振荡，甚至使系统失控而处于不稳定的状态。

二、定值、随动和程序控制系统

（一）定值控制系统

给定值为常值的控制系统称为定值控制系统。这种系统的任务是保证在任何扰动下，使被控参数（输出）保持恒定的、希望的数值。在过程控制系统中，一般都要求将过程参数（如温度、压力、流量、液位和成分等）维持在工艺给定的状态。如图1-1所示的液位控制系统，就是力图将水槽中的液位保持在工艺所需的高度，所以，多数过程控制系统都是定值系统。

（二）随动控制系统

给定值（参考输入）随时间任意变化的控制系统称为随动控制系统。这种系统的任务是在各种情况下保证系统的输出以一定精度跟随参考输入的变化而变化，所以这种系统又称为跟踪系统。运动目标的自动跟踪瞄准和拦截系统、工业控制中的位置控制系统、过程控制中串级控制系统的副回路等都属于此类系统。另外，工业自动化仪表中的各种变送器、显示记录仪表等也是闭环随动系统。图1-6所示的自动平衡电子电位差计就是一个典型的例子。它可以与各种变送器或测温元件等相配合来指示、记录温度等各种过程参数值。

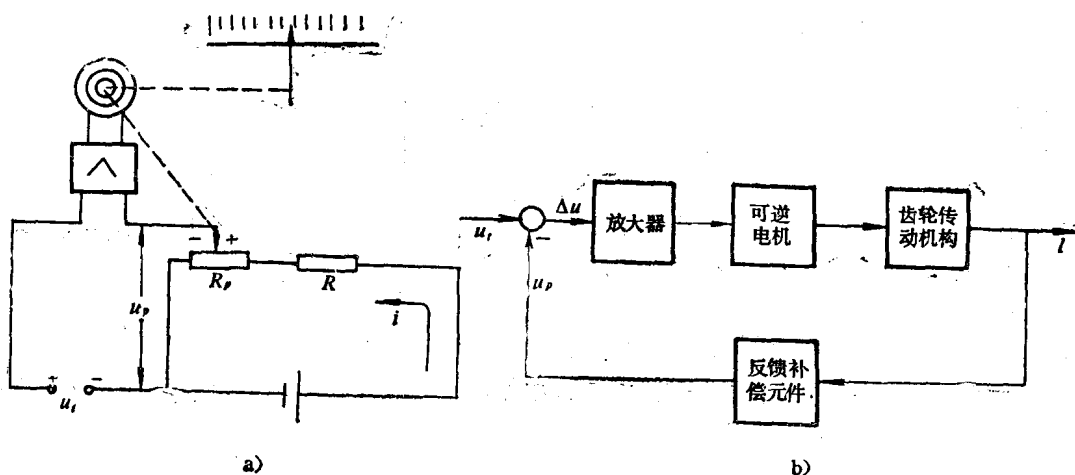


图1-6 自动平衡电位差计

a) 原理图 b) 方块图

从图1-6中可以看出，待测电压 u_i 与实现反馈补偿作用的电压 u_p 进行比较，其偏差电压 Δu 经放大后驱动可逆电机电作，再经传动机构带动仪表的指针（或记录笔）和测量桥路中的滑线电阻的滑点移动，改变补偿电压 u_p 的数值，直到 u_p 等于 u_i ，电机停止转动，仪表的指针（或记录笔）也停在某一位置。从整个系统来看，实际上是一个电压-位移转换系统，作为系统输出的位移指示值随着作为系统参考输入的待测电压的变化而变化，且一一相应。

（三）程序控制系统

若给定值随时间变化有一定的规律，且为事先给定了的时间函数，则称这种系统为程序控制系统。如耐火材料生产中的炉温程序升温、间隙生产的化学反应器温度控制以及机械加工中的程序控制机床等均属于此类系统。实际上，程序控制系统是随动系统的一种特殊情况，其分析研究方法也和随动系统相同。

三、线性与非线性控制系统

（一）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，在系统存在有几个输入时，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。

如果描述系统运动状态的微分（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。

（二）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，系统的特性就由非线性方程来描述，这样的系统就称为非线性控制系统。对于非线性控制系统，叠加原理是不适用的。

严格地讲，实际的控制系统都不是线性的，各种系统总是不同程度地具有非线性特性，例如系统中应用的放大器的饱和特性，运动部件的间隙、摩擦和死区，弹性元件的非线性关系等等。非线性特性根据其处理方法不同可以分为本质非线性和非本质非线性两种。对于非本质的非线性特性，其输入、输出关系曲线没有间断点和折断点，且呈单值关系。因此当系统变量变化范围不大时，为便于研究，可简化为线性关系处理，这样可以应用相当成熟的线性控制理论进行分析和讨论。对于本质非线性特性，其输入、输出关系或具有间断点和折断点，或具有非单值关系。这类系统需要用非线性控制理论来分析研究。

四、连续与离散控制系统

（一）连续控制系统

当系统中各组成环节的输入、输出信号都是时间的连续函数时，称此类系统为连续控制系统。连续系统的运动状态或特性一般是用微分方程来描述。模拟式的工业自动化仪表以及用模拟式仪表来实现自动化的过程控制系统都属于连续系统。

（二）离散控制系统

当系统中某些组成环节或元件的输入信号和（或）输出信号在时间上是离散的，即仅在离散的瞬时取值时，这种系统就称为离散系统或离散时间系统。离散系统与连续系统的区别也仅在于信号只在特定的离散瞬上是时间的函数。离散时间信号可由连续信号通过采样开关获得，具有采样的控制系统又称为采样控制系统。用数字计算机实现对生产过程的直接数

字控制系统 (DDC), 就是典型的采样控制系统。在 DDC 系统中, 用一台计算机控制几十个乃至上百个参数, 它按周期依次巡回检测、控制每一个回路, 如图 1-7 所示。

离散系统的运动状态或特性一般用差分方程来描述, 其分析研究方法也不同于连续系统。

五、单变量与多变量控制系统

(一) 单变量控制系统

在一个控制系统中, 如果只有一个被控制的参数和一个控制作用来控制对象, 则称为单变量控制系统, 又叫单输入单输出系统。图 1-1 (或图 1-2) 中所示的液位控制系统就是一个典型的单变量系统。它的被控参数只有一个 (即液位), 控制作用也只有一个 (即改变流出量 Q_2)。单变量系统可以是单回路的

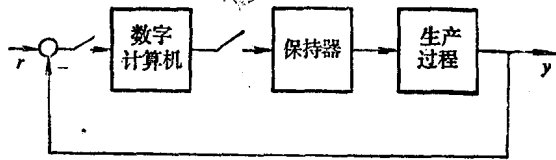


图1-7 数字计算机采样控制系统

(如图 1-2), 也可以是多回路的。例如过程控制中, 为了提高控制质量而广泛采用的串级控制系统就是一个单变量的多回路系统。图 1-8 所示为一加热炉温度串级控制系统。根据工艺要求需要控制加热炉出口热油温度为某一个固定数值, 这靠改变燃料的多少来达到。由于从炉膛到管道内热量传递过程缓慢, 在控制过程中, 炉出口热油温度会有较大幅度的波动。为了保证热油温度 t_1 的控制质量, 引入中间变量炉膛温度 t_2 形成局部反馈, 以迅速克服燃料侧的干扰 (如燃料压力或其热值的变化)。系统中采用了两个调节器, 调节器 1 的输出作为调节器 2 的给定值, 两个调节器呈串接形式, 所以称为串级控制系统。其传递方块图如图 1-9 所示。

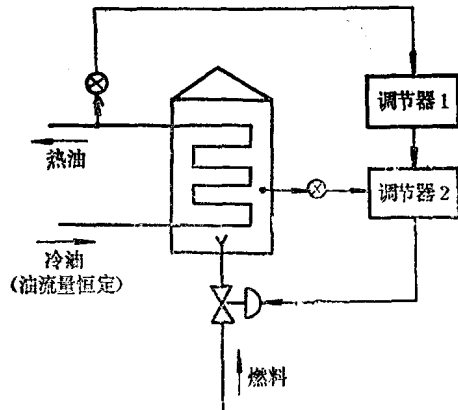


图1-8 加热炉温度串级控制系统

(二) 多变量控制系统

如果一个控制系统中的被控参数多于一个, 控制作用也多于一个, 且各控制回路相互之间有耦合关系, 则称这种系统为多变量控制系统, 也叫多输入多输出控制系统, 如图 1-10 所示。

分析研究单变量控制系统的经典控制理论直接推广应用于多变量控制系统会有很大的困难, 通常采用现代控制理论的方法来分析和研究这类系统。应当指出, 在过程控制中, 很多工艺设备或单元操作的被

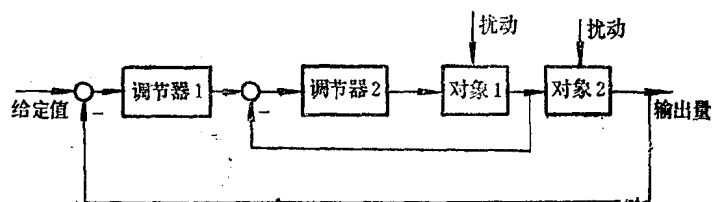


图1-9 串级控制系统方块图

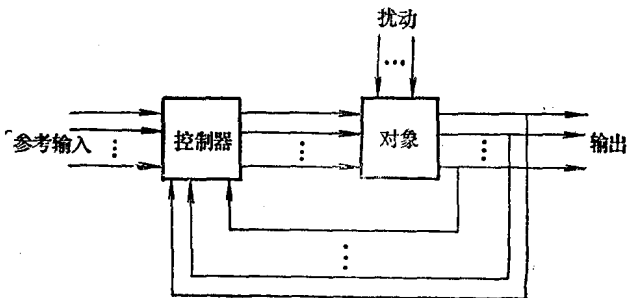


图1-10 多变量控制系统

控参数间都相互关联，所组成的控制回路之间亦有耦合关系，只是有时这种关联成耦合关系十分微弱，因而可近似视为无耦合关系，从而看成为互不关联的一些单变量系统，应用经典控制理论的方法来分析和研究。

自动控制系统的分类方法除了上述几种外还有很多，此处不再一一赘述。由于开环控制系统的分析研究方法十分简单，本书不涉及其内容，只讨论闭环控制系统的分析研究方法(包括定值系统和随动系统)，且重点放在单变量的线性连续系统上面。对于离散系统、非线性系统和多变量系统，也用了一定的篇幅进行适当的分析和讨论。

§1-4 自动控制系统的性能指标

为了完成预定的控制任务，自动控制系统必须满足一定的性能要求。对于实际的控制系统，由于控制对象不同，工作方式不同，完成的任务不同等等，因此对系统的性能指标的要求也往往不一样。尽管如此，仍可将各种控制系统的性能要求概括为三个方面，即稳定性、准确性和快速性。具体地说，对于定值系统，即要求系统能迅速地克服扰动的影响，使被控参数准确地恢复至给定值；而对于随动系统，即要求系统能迅速、准确地跟随参考输入的变化而变化，且不受扰动的影响。

系统稳定性的要求，是系统能正常工作的首要条件。由于系统存在惯性，当系统中的组成环节或元件参数配合不当时，将会引起系统的剧烈振荡甚至失去工作的能力，因此任何一个控制系统，要想能令人满意的工作，首先应当是稳定的。

对于稳定的系统，当系统的输入(参考输入或扰动输入)信号改变时，被控参数被迫离开原先的稳定的数值而开始变化，系统原先的平衡状态(即稳定状态)被破坏。由于系统是稳定的，经过一段时间系统又处于一个新的平衡状态。这种系统在输入作用下，从一个稳态(即平衡状态)变化到另一个稳态的过程称为系统的过渡过程或瞬态响应过程。瞬态响应过程的情况和到达新稳态时的状况具体地体现了控制系统在快速性和准确性方面性能的好坏，同时也可以反映系统稳定的程度(即相对稳定性)。因此，分析和设计一个控制系统，一般以系统的瞬态响应过程为依据。并用一些能反映瞬态响应过程特征的数值来作为衡量系统质量好坏的性能指标。

控制系统的瞬态响应与具体的输入信号有关，输入信号不同，系统的响应也不同。在分析和设计中，通常以阶跃函数作为典型的输入信号形式，这是因为它可用简单的数学关系表示，便于系统分析和设计；同时，这种输入信号对系统最不利，考虑到最坏的情况来分析和设计系统，可使工作留有余地。对于随动控制系统，其输出除为位置参数外，有时也有速度和加速度参数，所以在分析其稳态性能时，除用阶跃函数作为典型输入信号外，有时也用斜坡函数(速度函数)和抛物线函数(加速度函数)作为典型信号。

稳定的随动系统和定值系统在分别为单位阶跃参考输入和单位阶跃扰动输入作用下，其瞬态响应过程的一般形式分别如图1-11和1-12所示。用响应过程衡量系统性能时，习惯上常用以下几个指标：

(1) 衰减率 ψ 系统输出的相邻两个峰值(相对于过程波动曲线中心线)衰减的百分数，即

$$\psi = \frac{y_n - y_{n+2}}{y_n} \times 100\%$$

它表示系统响应过程振荡衰减的程度。有时也用衰减比（即相邻两个峰值之比 $y_n : y_{n+2}$ ）来表示。一般情况下，希望系统衰减率在（75~90）%范围内，即衰减比为4~10。

（2）稳态误差 $e(\infty)$

系统响应过程終了时的残余偏差，即系统输出稳态值 $y(\infty)$ 与给定参考输入值之差。

（3）最大偏差 在响应过程中，系统输出偏离参考输入的最大数值。对于衰减振荡过程，其最大偏差即是系统输出的第一个波峰值与给定值之差。在很多情况下，也用超调量 σ_p 来表示这种偏离程度，即

$$\sigma_p = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%$$

（4）调节时间 t_s 系统输出达到新的稳态时所需的过渡过程时间。从严格的意义讲，需要无限长的时间，系统的输出才能完全到达新的稳态。通常规定调节时间 t_s 为 $y(t) - y(\infty) \leq \Delta$ 时所需的时间，一般 Δ 取系统输出稳态值 $y(\infty)$ 的 $\pm(2\sim5)\%$ 。

除此以外，有时还用上升时间（系统输出第一次到达稳态值所需的时间）、峰值时间（系统输出到达第一个峰值所需的时间），振荡周期或频率等来作为衡量系统性能的辅助指标。

应当指出，在一个既定的系统中，其性能指标之间是相互联系相互制约的。例如要求稳态误差越小，其它一些性能指标就会下降，甚至会导致系统不稳定。因此应针对系统的具体任务分清主次，区别轻重，合理地确定性能指标的要求。

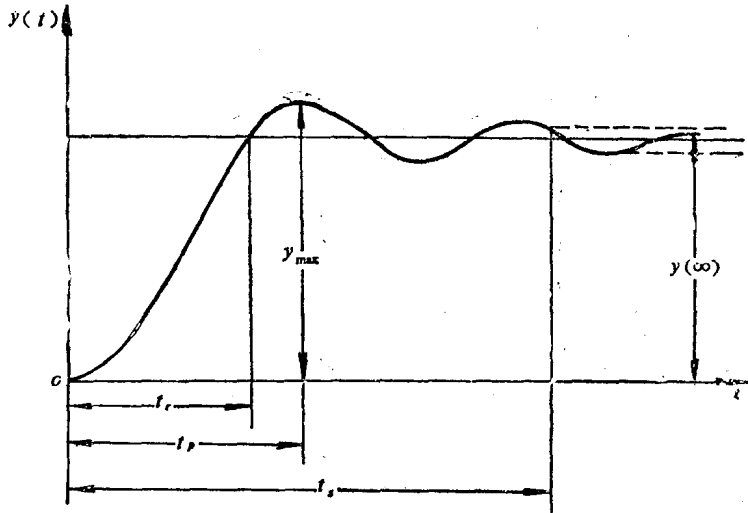


图1-11 随动系统在单位阶跃参考输入作用下的响应过程

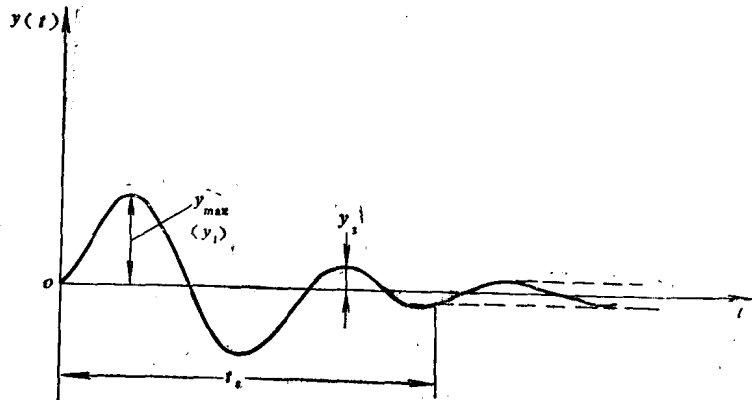


图1-12 定值系统在单位阶跃扰动输入作用下的响应过程

习 题

- 1-1 试比较开环控制系统和闭环控制系统的优缺点。
- 1-2 试各举一个开环和闭环控制系统的具体例子，说明它们的工作原理，画出它们的方块图
- 1-3 图1-3所示为一个热交换器温度控制系统原理图，被控参数为热交换器出口热流体的温度，试

(1) 简述该控制系统的工作原理，并分析系统可能产生的扰动量。

(2) 分别画出下述两种情况下的传递方块图：(a) 调节器给定值发生变化，且不考虑扰动的影响。

(b) 调节器给定值不变，只考虑调节阀前蒸汽压力波动的扰动因素。

1-4 试举出一个日常生活工作中的例子，说明反馈的概念。并说明为什么自动控制系统（闭环控制系统）一般都是负反馈系统。

1-5 图1-14 a 为一液位控制系统原理图，试简要说明其工作原理。如果进水调节阀改变为图1-14 b 中的情况，系统能否工作？说明理由。并画出此两种情况下系统的方块图，加以比较，说明差异。

1-6 试判别下列方程所描述的系统的类型（线性、非线性；定常、时变）

(1) $3t \frac{dy(t)}{dt} + 5y(t) = u(t)$

(2) $\frac{d^2y(t)}{dt^2} + 4 \frac{dy(t)}{dt} + 2y(t) = 3 \frac{du(t)}{dt} + 5u(t)$

(3) $\frac{dy(t)}{dt} + y(t) = u(t) \cos \omega t$

(4) $y(t) = u(t) + 2 \frac{du(t)}{dt} + 3 \int u(t) dt$

(5) $\frac{d^2y(t)}{dt^2} + y(t) \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = u(t)$

(6) $\frac{d^3y(t)}{dt^3} + \frac{d^2y(t)}{dt^2} + 4y(t) = 2 \frac{d^2u(t)}{dt^2} + u(t)$

(7) $\frac{dy(t)}{dt} + y^2(t) = u(t)$

1-7 图1-15所示为一温湿度控制系统的原理图，试简要说明其工作原理，并画出系统的方块图。

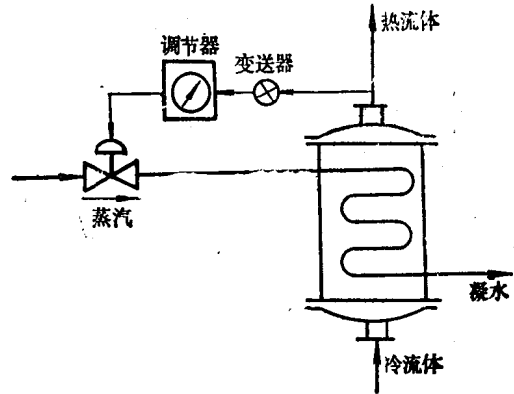


图1-13 热交换器温度控制系统

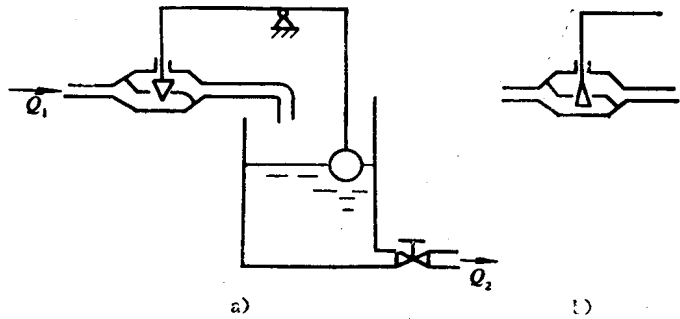


图1-14 液位控制系统

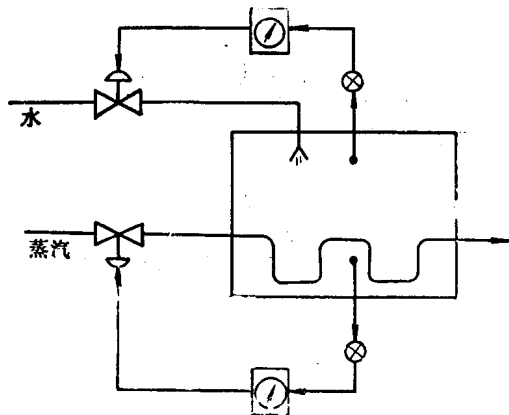


图1-15 温湿度控制系统