

高等专科学校试用教材

自动控制原理与系统

孔凡才 编

机械工业出版社

GAOZHUANJIAOCAI

高等专科学校试用教材

自动控制原理与系统

孔凡才 编



机械工业出版社

本书以经典线性控制理论中常用的时域分析法和频域分析法为主线，结合直流调速系统和随动系统，分析自动控制系统的工作原理、自动调节过程；叙述自动控制系统数学模型的建立，系统的稳定性、稳态性能和动态性能的分析；系统的校正和工程设计；以及系统的实例分析与调试。

本书的特点是自控原理与系统相结合，理论联系实际，注重方法论的叙述。每章均有小结、思考题和习题，并有较多的典型实际线路的读图练习。

本书为高等专科学校“工业电气自动化”和“电气技术”等电类专业试用教材，也可供职工大学、业余大学工科电类专业使用，并可供工程技术人员参考。

自动控制原理与系统

孔凡才 编

*

责任编辑：贡克勤

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张14·字数 339 千字

1987年11月北京第一版·1987年11月北京第一次印刷

印数 0,001—7,300·定价：2.35 元

*

统一书号：15033·7108

前 言

本书是高等专科学校“工业电气自动化”专业和“电气技术”专业的试用教材。本书内容符合机械工业部高等专科学校《自动控制原理与系统》80学时的教学大纲的要求。本书也适用于职工大学、业余大学工科电类专业使用，也可供工程技术人员参考。

本书以经典线性控制理论为主线，结合直流调速系统和随动系统，着重叙述自动控制系统的工作原理、自动调节过程、数学模型和分析方法。

本书在编写时，考虑到高等专科教育的特点，力求做到理论联系实际，注重方法论的叙述，以期学生对自动控制理论的应用和对实际控制系统的分析、调试有一个完整的概念。本书每章都有指导复习的小结、思考题和习题，并附有较多的实例读图分析练习，以期读者能把理论知识应用于生产实际。

本课程内容涉及到高等数学、电工原理、晶体管电路、电机学和半导体交流技术等多门课程的基础知识，因此在学习时，要注意基础知识的复习和综合运用。

本书由上海机械专科学校孔凡才副教授编写，合肥工业大学李仁教授主审。参加审稿的有合肥工业大学、湘潭机电专科学校、哈尔滨机电专科学校、南京机械专科学校、郑州机械专科学校等校的老师。他们对书稿提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

限于编者的水平，书中难免存在错误和不妥之处，殷切期望广大读者给予指正。

编者

1986年8月于上海

目 录

第一章 自动控制系统概述	1	第三章 随动系统的工作原理	40
§ 1-1 引言	1	§ 3-1 随动系统的组成	40
§ 1-2 开环控制和闭环控制	1	一、检测元件	40
一、开环控制系统	1	二、伺服电机	43
二、闭环控制系统	2	三、相敏整流与滤波电路	43
§ 1-3 自动控制系统的组成	3	四、放大电路	45
§ 1-4 自动控制系统的分类	4	§ 3-2 随动系统的控制特点与实例分析	47
一、按输入量变化的规律分类	4	一、系统的组成	47
二、按系统传输信号对时间的关系分类	7	二、系统的方块图	49
三、按系统的输出量和输入量间的关系 分类	7	三、随动系统的自动调节过程	49
§ 1-5 自动控制系统的性能指标	7	小结、思考题与读图练习	50
一、系统的稳定性	7	第四章 自动控制系统的数学模型	53
二、系统的动态性能指标	7	§ 4-1 系统的微分方程	53
三、系统的稳态性能指标	8	一、系统微分方程式的建立	53
§ 1-6 研究自动控制系统的方	9	二、微分方程建立举例	53
小结与习题	10	§ 4-2 传递函数和动态结构图	56
第二章 直流调速系统的工作原	12	一、传递函数的概念	56
§ 2-1 有静差晶闸管直流调速	12	二、动态结构图	58
一、系统的组成	12	§ 4-3 典型环节的传递函数和	58
二、系统的方块图	17	一、比例环节	58
三、系统的自动调节过程及其	17	二、积分环节	59
四、其他反馈量的引入	19	三、理想微分环节	59
§ 2-2 小功率有静差直流调速	20	四、惯性环节	60
实例分析	20	五、比例微分环节	60
一、系统结构特点和技术数据	20	六、振荡环节	61
二、定性分析	20	七、延迟环节	63
三、系统的自动调节过程	24	八、运算放大器	64
§ 2-3 无静差直流调速系统	24	§ 4-4 自动控制系统的结构图	66
一、比例-积分 (PI) 调节器	24	一、系统结构图的画法	66
二、系统无静差的实现	28	二、自动控制系统结构图举	67
§ 2-4 速度和电流双闭环调速	30	§ 4-5 结构图的化简和系统	71
一、双闭环调速系统的组成	30	传递函数的求取	71
二、ST和LT两个调节器的作用	31	一、结构图的等效变换规则	71
三、双闭环调速系统的机械特性	33	二、反馈系统结构图的化简	74
四、双闭环调速系统的起	33	三、梅逊公式	75
小结、思考题与读图练习	35	四、系统闭环传递函数的求	77
		小结、思考题与习题	78

第五章 频率特性	82	二、随动系统稳态性能分析举例	127
§ 5-1 频率特性的基本概念	82	§ 7-7 反馈补偿对系统稳态性能的改善	128
一、频率特性的概念	82	一、按扰动进行反馈补偿	128
二、频率特性的定义	83	二、按输入量进行反馈补偿	128
三、频率特性的物理意义	83	小结、思考题与习题	129
§ 5-2 频率特性与传递函数的关系	83	第八章 自动控制系统的动态性能分析	131
§ 5-3 频率特性表示方式	85	§ 8-1 系统跟随动态指标的求取及分析	131
§ 5-4 典型环节的频率特性	88	一、跟随阶跃响应曲线	131
一、比例环节	88	二、跟随动态指标	132
二、积分环节	88	三、跟随动态性能分析	135
三、理想微分环节	89	§ 8-2 系统抗扰动态指标的求取及分析	136
四、惯性环节	89	一、扰动响应曲线	136
五、比例微分环节	91	二、抗扰动态指标	137
六、振荡环节	92	三、抗扰动态性能分析	138
七、延迟环节	93	§ 8-3 系统动态性能与开环频率特性间的关系	140
§ 5-5 系统的开环频率特性	94	一、二阶(典 I)系统的开环频率特性及频域指标	140
§ 5-6 系统的闭环频率特性	97	二、时域指标与频域指标间的关系	141
小结与习题	99	三、以开环频率特性分析系统动态性能的条件	142
第六章 自动控制系统的稳定性分析	104	§ 8-4 系统动态性能与闭环频率特性间的关系	142
§ 6-1 系统稳定性概念	104	一、二阶系统的闭环频率特性及频域指标	142
§ 6-2 系统稳定性与数学模型间的关系	104	二、时域指标与频域指标间的关系	143
§ 6-3 代数稳定判据	106	§ 8-5 高阶系统动态性能的估算	144
§ 6-4 奈氏稳定判据	108	一、近似应用二阶系统的关系式进行估算	144
§ 6-5 稳定裕量与系统相对稳定性	110	二、根据经验公式进行估算	144
§ 6-6 对数频率稳定判据	111	小结、思考题与习题	145
§ 6-7 系统稳定性分析举例	113	第九章 自动控制系统的校正	147
小结与习题	116	§ 9-1 校正装置	147
第七章 自动控制系统的稳态性能分析	119	一、无源校正装置	147
§ 7-1 稳态误差的概念	119	二、有源校正装置	147
一、系统误差	119	§ 9-2 串联校正	151
二、稳态误差	120	一、用比例-微分(PD)校正装置进行串联校正(相位超前校正)	151
§ 7-2 稳态误差与系统类型、系统开环增益间的关系	121	二、用比例-积分(PI)校正装置进行串联校正(相位滞后校正)	152
§ 7-3 系统稳态误差与输入信号时的关系	122	三、用比例-积分-微分(PID)校正装置进行串联校正(相位滞后-超前校正)	152
§ 7-4 由开环频率特性分析系统的稳态性能	124		
§ 7-5 自动调速系统的稳态性能分析	125		
一、自动调速系统稳态性能的特点	125		
二、自动调速系统的静差率	125		
三、自动调速系统稳态性能分析举例	125		
§ 7-6 随动系统的稳态性能分析	127		
一、随动系统稳态性能的特点	127		

正)	153	第十一章 自动控制系统的分析与调试	185
§ 9-3 反馈校正	154	§ 11-1 自动控制系统的分析步骤	185
小结、思考题与习题	159	一、了解工作对象对系统的要求	185
第十章 自动控制系统的的设计方法	161	二、搞清系统各单元的工作原理	186
§ 10-1 系统固有部分频率特性的确定	161	三、搞清整个系统的工作原理	187
§ 10-2 系统预期对数频率特性的建立	163	四、建立系统的数学模型(结构图)	187
一、建立预期对数频率特性的一般原则	163	五、系统性能的定量分析(或估算)	197
二、工程上确定预期对数频率特性的一些		§ 11-2 自动控制系统的调试方法	191
方法	164	一、系统调试前的准备工作	191
§ 10-3 双闭环直流调速系统的设计举例与		二、制订调试大纲的原则	192
分析	167	三、系统调试过程	192
一、系统数学模型的建立	167	§ 11-3 系统的维护使用和故障检查	194
二、系统的简化和调节器参数的计算	170	一、系统的维护使用	194
三、几点说明	176	二、系统的故障检查	195
§ 10-4 小功率随动系统的设计举例		小结、思考题、习题与读图练习	196
与分析	177	第十二章 附录——拉普拉斯变换	203
一、系统数学模型的建立	177	一、拉氏变换的概念	203
二、系统固有特性的确定	178	二、拉氏变换的主要运算定理	206
三、系统预期开环对数频率特性的确定	178	三、拉氏反变换	209
四、校正装置的选择和参数的计算	180	四、拉氏变换应用举例	210
五、几点说明	181	本书符号说明	214
小结、思考题与习题	181	参考书目	216

第一章 自动控制系统概述

内 容 提 要

本章将概括地叙述反馈控制的基本原理和特点, 自动控制系统的性能指标和研究自动控制系统的方法。

§ 1-1 引 言

在工业、农业、交通运输和国防上, 自动控制技术显示着越来越重要的作用。例如在发电厂, 通过自动控制使发电电压保持恒定, 尽量不受负荷变化和原动机转速波动的影响; 又如在轧钢厂, 通过自动控制, 使轧机保持转速恒定, 尽量不受钢板厚薄不均及电源电压波动等因素的影响; 再如在机械加工中, 通过自动控制, 保持工作台或刀具准确地跟随指令进给, 尽量不受加工量及电源电压波动等因素的影响, 从而获得高精度的加工质量。其他诸如温度、湿度、流量、压力、转速及位置等方面的控制, 都广泛地应用着自动控制技术。

由于自动控制技术在各个领域中的广泛应用, 自动控制系统的性能的优劣, 直接影响着产品的质量、产量、成本和劳动条件。因此掌握自动控制的基本原理, 改善自动控制系统的性能, 便成为工程技术人员面临的一个重要的课题。

§ 1-2 开环控制和闭环控制

按照控制系统有无反馈环节, 控制系统可分为开环控制和闭环控制。不设反馈环节的, 则为开环控制系统 (Open-loop Control System); 设有反馈环节的, 则为闭环控制系统 (Closed-loop Control System)。

一、开环控制系统

若系统的输出量不被引回来对系统的控制部分产生影响, 这样的系统称为开环控制系统。

图 1-1 所示的数控加工机床就是一个未设反馈环节的开环控制系统。它由预先设定的指

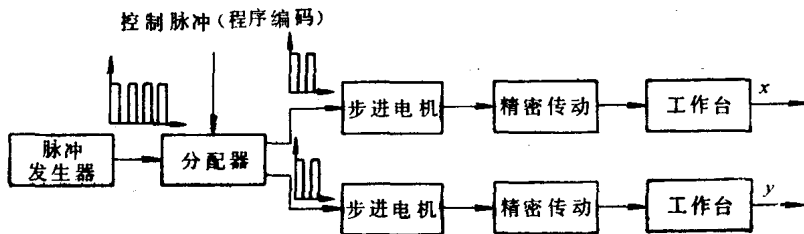


图 1-1 数控加工机床方块图

令（通常为由程序编码产生的控制脉冲）产生相应的脉冲，由它（通常还要经过功率放大）驱动步进电动机，通过精密传动机构，再带动工作台（或刀具）进行加工。如果能保证不丢失脉冲，并能有效地抑制干扰的影响，再采用精密传动机构（如滚珠丝杆），这样，整个系统虽然为开环系统，但仍能达到相当高的加工精度。

图 1-2 为开环控制系统方块图。系统的输入量 (Input) 为程序控制编码，输出量 (Output) 为机床的位移，系统的控制对象为工作台，执行机构为步进电动机和传动机构。由图可见，系统无反馈环节，输出量并不返回来影响控制部分。

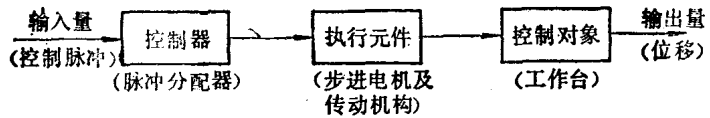


图 1-2 数控加工机床开环控制方块图

由于无反馈环节，开环系统一般结构简单，系统稳定性好，成本低。因此，在输入量和输出量之间的关系固定，且内部参数或外部负载等扰动因素不大，或这些扰动因素可以预计确定并能进行补偿，则应尽量采用开环控制系统。

开环控制的缺点是当控制过程受到各种扰动因素影响时，将会直接影响输出量，而系统不能自动进行补偿。特别是当无法预计的扰动因素使输出量产生的偏差超过允许的限度时，开环控制系统便无法满足技术要求，这时就应考虑采用闭环控制系统。

如图 1-3 所示的是一个利用晶闸管 (Thyristor) 可控整流装置供电的直流调速系统。

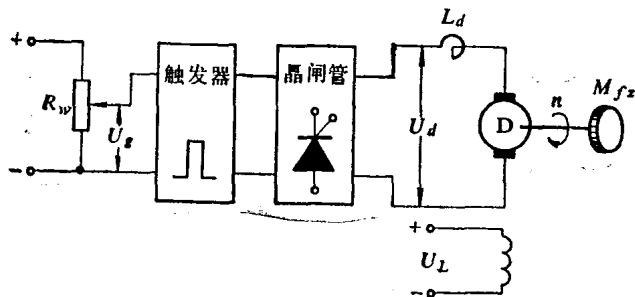


图 1-3 直流调速系统的开环控制

由于晶闸管整流装置的等效内阻较大（特别是当电流断续时），因

此当负载转矩增加而引起电流增加时，便会产生较大的转速降落[⊖]。由于此系统为开环控制，未设反馈环节，系统不能自动进行补偿，所以其调速特性很软，往往不能满足技术上的要求。在这种情况下，通常都采用闭环控制。

二、闭环控制系统

若系统输出量通过反馈环节返回来作用于控制部分，形成闭合环路，这样的系统称为闭环控制系统，又称为反馈控制系统 (Feedback Control System)。

图 1-4 所示的是具有转速负反馈的闭环控制系统。与图 1-3 相比，此系统增设了转速负反馈环节。闭环控制系统的方块图如图 1-5 所示。

增设了转速负反馈环节后，作用于放大器的电压不再是给定电压，而是给定电压 U_g 与测速反馈电压 U_{fn} 的偏差电压 $\Delta U = (U_g - U_{fn})$ 。当电动机的转速因某些因素（如负载转矩增加）而降低时，则测速发电机 (Tachogenerator) 电压 U_{fn} 将降低 (U_{fn} 与转速 n 成正比)，偏差电压 ΔU 将升高，经放大后使晶闸管装置输出电压 U_d 增加，从而使转速回升。其自动调节过程可用顺序图表示如下：

⊖ 晶闸管又称可控硅 (SCR) (Silicon-Controlled-Rectifier)。

⊙ 可参阅《晶闸管交流技术》。

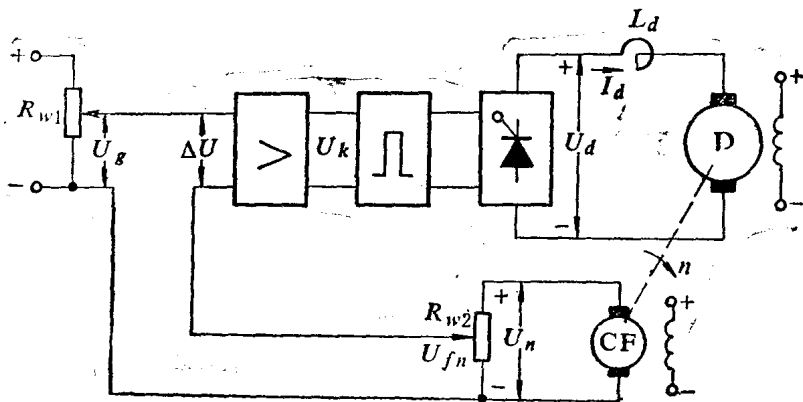


图1-4 具有转速反馈的自动调速系统

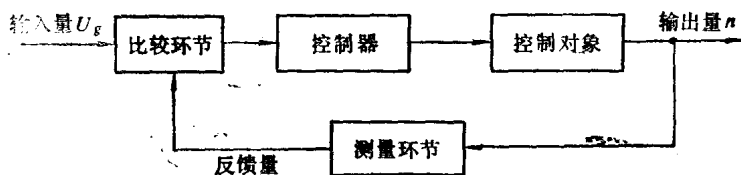
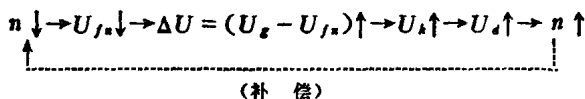


图1-5 闭环控制方块图



由以上的自动补偿的调节过程可见，转速的变化将会大大减少。这是闭环控制的一个突出的优点。

§ 1-3 自动控制系统的组成

现以如图 1-4 所示的自动调速系统为例来说明自动控制系统的组成。

为了表明自动控制系统的组成以及信号的传递情况，通常把系统各个环节用方块图表示，并用箭头标明各作用量的传递情况，如图 1-6 便是图 1-4 所示系统的方块图。方块图可以把系统的组成简单地表达出来，而不必画出具体线路。

由图 1-6 可以看出，一般自动控制系统包括：

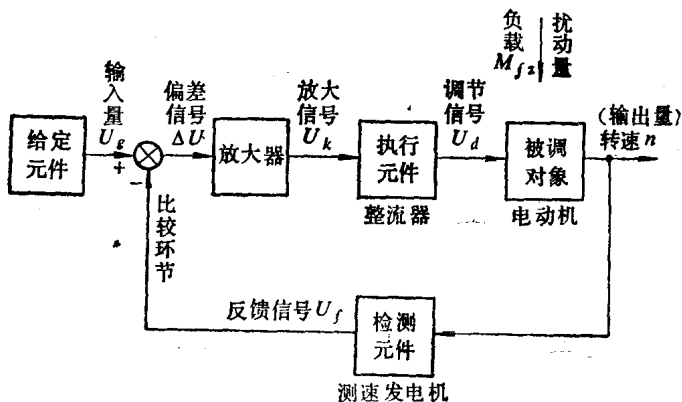


图1-6 自动控制系统的方块图

(1) 给定元件——由它调节给定信号 (U_g)，以调节输出量的大小。此处为给定电位器。

(2) 检测元件——由它检测输出量 (如转速 n) 的大小，并反馈到输入端。此处为测速发电机。

(3) 比较环节——在此处反馈信号与给定信号进行迭加，信号的极性以“+”或“-”表示。若为负反馈，则两信号极性相反。

(4) 放大元件——由于偏差信号一般很小，所以要经过电压放大及功率放大，以驱动执行元件。此处为晶体管放大器或集成运算放大器。

(5) 执行元件——是驱动被控制对象的环节。此处为晶闸管整流装置。

(6) 被调对象——亦称被控制对象。在调速系统中即为电动机。

(7) 反馈环节——由它将输出量引出，再回送到控制部分。一般的闭环系统中，反馈环节包括检测、分压、滤波等单元。反馈信号与输入信号极性相同则为正反馈，相反则为负反馈。

由图 1-6 可见，系统的各种作用量有：

输入量——又称控制量或调节量，它通常由给定信号电压构成，或通过检测元件将非电输入量转换成信号电压。如图 1-6 中的给定电压 U_g 。

输出量——又称被控制量或被调量，它是被控制对象的输出，是自动控制的目标。如图 1-6 中的转速 n 。

反馈量——通过检测元件将输出量转变成与给定信号数量级相同的信号电压。如图 1-6 中的反馈信号 U_f 。

扰动量 (Disturbance)——又称干扰或“噪音”，它通常指引起输出量发生变化的各种因素。来自系统外部的称为外扰动，例如电动机负载转矩的变化，电网电压的波动，环境温度度的变化等。图 1-6 中的负载转矩 M_f ，就可以看成是一种来自系统外部的扰动量。来自系统内部的扰动称为内扰动。如系统元件参数的变化，运算放大器的零点飘移等。

中间变量——它是系统各环节之间的作用量。它是前一环节的输出量，也是后一环节的输入量。如图 1-6 中的 ΔU 、 U_k 、 U_c 等就是中间变量。

由图 1-6 可以看到，方块图可以直观地将系统的组成、各环节间的相互关系以及各种作用量简单明了地概括出来。

§ 1-4 自动控制系统的分类

自动控制系统可以从不同的角度来进行分类。

一、按输入量变化的规律分类，可分为

(一) 恒值控制系统

恒值控制系统的特点是：系统的输入量是恒量，并且要求系统的输出量相应地保持恒定。

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，恒张力控制系统等。此外许多恒压 (液压)、稳压 (电压)、稳流 (电流)、恒频 (电频率) 的自动控制系统也都是恒值控制系统。

如图 1-4 所示的为一自动调速系统。如前所述，它能保持恒速运行。

如图 1-7 所示的为一恒温控制系统。

在图 1-7 所示的恒温控制系统中，热电偶用来测量炉温，并将炉温转换成电压信号（毫伏级），然后和给定电压信号进行比较，两者之差 Δu 代表着实际炉温和要求炉温间的偏差，此偏差电压经电压放大和功率放大后驱动直流电动机，电动机经减速后再带动调压器滑杆以调节电炉的供电电压来达到调节炉温的目的。

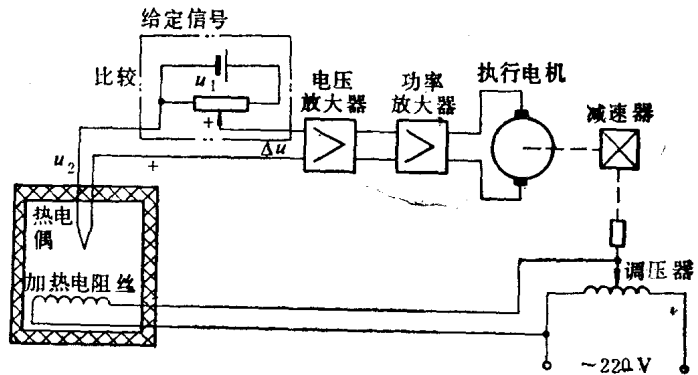


图 1-7 恒温箱自动控制系统

当炉温偏低时，此时偏差电压的极性将使电动机的转向适应调压器滑杆右移的要求，

从而使供电电压升高，电流加大，炉温升高。反之，当炉温偏高时，则使供电电压降低，以保持炉温稳定在要求数值。

图 1-8 所示的为一恒张力控制系统。

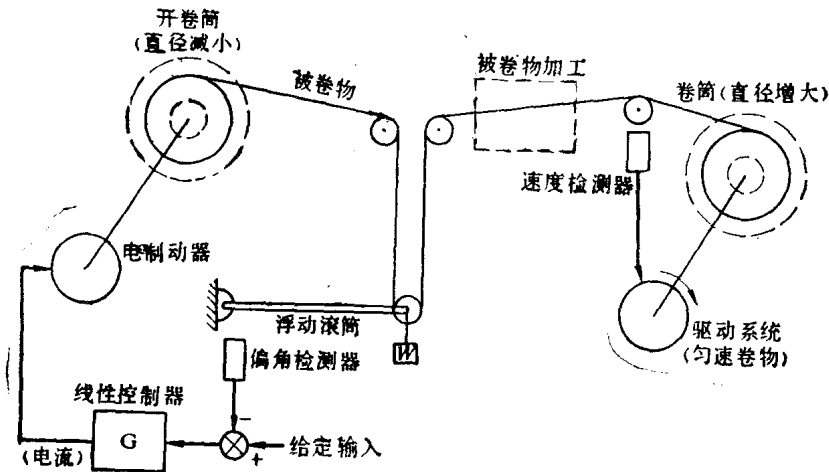


图 1-8 卷绕加工的恒张力控制系统

在卷绕加工的系统中，为了避免发生象撕裂、拉伸变形或褶皱等这类不良的现象，通常使被卷物的张力保持在某个规定的数值上，这就是恒张力控制系统。在图 1-8 所示的恒张力控制系统中，右边是卷绕驱动系统，由它以恒定的线速度卷绕被卷物（如纸张等）。右边的速度检测器提供反馈信号以使驱动系统保持恒定的线速度（驱动系统的控制部分此处省略）。左边的开卷筒与电制动器相联，以保持一定的张力。为了保持恒定的张力，被卷物将绕过一个浮动的滚筒，滚筒具有一定的重量，滚筒摇臂的正常位置是水位位置，这时被卷物的张力等于浮动滚筒总重量 W 的一半。

在实际运行中，因为外部扰动、被卷物料的不均匀及开卷筒有效直径的减少而使张力发

生变化时，滚筒摇臂便保持不了水平位置，这时通过偏角检测器测出偏角位移量，并将它转换成电压信号，与给定输入量比较，两者的偏差电压经放大后去控制电制动器。若张力过大，则使电制动器的制动力矩降低，以减少张力。反之，张力过小，则制动力矩增大以增加张力，从而保持恒定的张力。

(二) 随动系统 (又称伺服系统)

随动系统的特点是：输入量是变化着的 (有时是随机的)，并且要求系统的输出量能跟随输入量的变化而作出相应的变化。

图 1-9 所示的为一随动系统。

在图 1-9 所示的随动系统中， R_{w1} 为给定电位器，由它发出给定指令 θ_1 ； D 为工作直流电动机， i 为减速器 (齿轮箱)， J_L 为工作机械 (驱动对象)， R_{w2} 为与驱动对象相联的检测电位器。随动系统的方块图如图 1-10 所示。

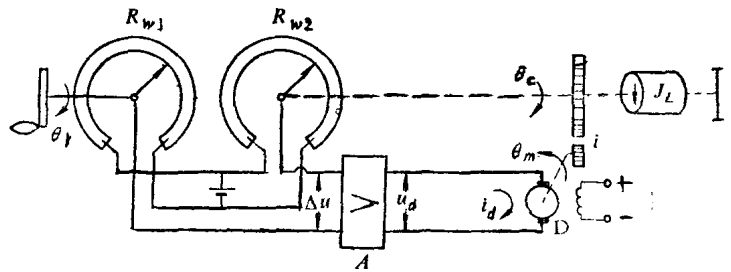


图 1-9 随动系统

随动系统的工作原理如下：若检测电位器的转角 θ_c 与给定电位器的转角 θ_1 相等时，则对应于 θ_1 的电位值 U_1 与对应于 θ_c 的电位值 U_c 相等。这时偏差电压 $\Delta U = U_1 - U_c = 0$ ，于是放大器 A 的输出电压为零，电动机静止，系统处于平衡工作状态。

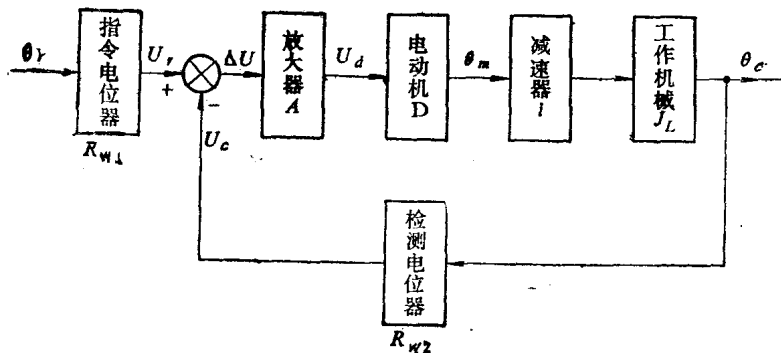


图 1-10 随动系统方块图

若指令转角 θ_1 发生变化，而驱动对象仍处于原处，则 $\theta_c \neq \theta_1$ ，于是 $U_c \neq U_1$ 、 $\Delta U \neq 0$ ，此偏差电压经放大后输出电压驱动电动机并带动工作机械转动，直到 $\theta_c = \theta_1$ 时为止。这时 $U_c = U_1$ 、 $\Delta U = 0$ ，系统又重新处于平衡状态。

由以上分析可见，系统的输出量将跟随着输入量的变化而变化。因此称它为随动系统，又称伺服系统。

这种控制系统的另一个特点是可以功率很小的输入信号操纵功率很大的工作机械 (这只要选用大功率的功放装置和电动机即可)，此外还可以进行远距离控制。

随动系统在工业和国防上有着极为广泛的应用，例如船闸牵曳系统，刀架跟随系统，火

炮控制系统，雷达导引系统和机器人控制系统等等。

(三) 过程控制系统

生产过程通常是指把原料放在一定的外界条件下，经过物理或化学变化而制成产品的过程。例如化工、石油、造纸中的原料生产；冶炼、发电中的热力过程等。在这些过程中，往往要求自动提供一定的外界条件，例如温度、压力、流量、液位、粘度、浓度等参量保持恒值或按一定的程序变化。对其中的每一个局部，它们可能是一种随动控制系统，也可能是按程序指令变化的恒值控制系统。

二、按系统传输信号对时间的关系分类，可分为：

(一) 连续控制系统

连续控制系统的特点是控制作用的信号是连续量或模拟量。如上节所述的调速系统和随动系统都是连续控制系统，因为作用于系统的信号都是模拟量。

(二) 离散控制系统

离散系统又称采样数据系统，它的特点是作用于系统的控制信号是断续量或数字量或采样数据量。通常，采用数字计算机控制的系统都是离散系统。

三、按系统的输出量和输入量间的关系分类，可分为：

(一) 线性控制系统

线性控制系统的特点是系统的输出量和输入量间的关系是线性的。它的各个环节或系统都可以用线性微分方程来描述，它可以应用叠加原理和应用拉氏 (Laplace) 变换。

(二) 非线性控制系统

非线性控制系统的特点是其中一些环节具有非线性性质（例如出现饱和、死区、摩擦等等）。它们往往要采用非线性的微分方程来描述。此外，叠加原理对非线性系统是不适用的。

当然，除了以上的分类方法外，还可以根据其他的条件去进行分类。本书根据教学大纲的要求，只讨论连续控制的线性系统。

§ 1-5 自动控制系统的性能指标

(Performance Specification)

自动控制系统的性能通常是指系统的稳定性、稳态特性和动态特性。现分别介绍如下：

一、系统的稳定性

当扰动或给定值发生变化时，输出量将会偏离原来的稳定值，这时，由于反馈环节的作用，通过系统内部的自动调节，系统可能回到（或接近）原来的稳定值或跟随给定值稳定下来，如图 1-11 a 所示。但也可能由于内部的相互作用，使系统出现发散而处于不稳定状态，如图 1-11 b 所示。显然，不稳定的系统是无法进行工作的。因此，对任何自动控制系统，首要的条件便是系统能稳定正常运行。对系统的稳定性将在第六章中进行分析。

二、系统的动态性能指标

由于系统的对象和元件通常都具有一定的惯性（如机械惯性、电磁惯性、热惯性等），并且也由于能源功率的限制，系统中各种量值（如速度、位移、电流、温度等）的变化不可能是突变的。因此，系统从一个稳态过渡到新的稳态都需要经历一段时间，亦即需要经一个

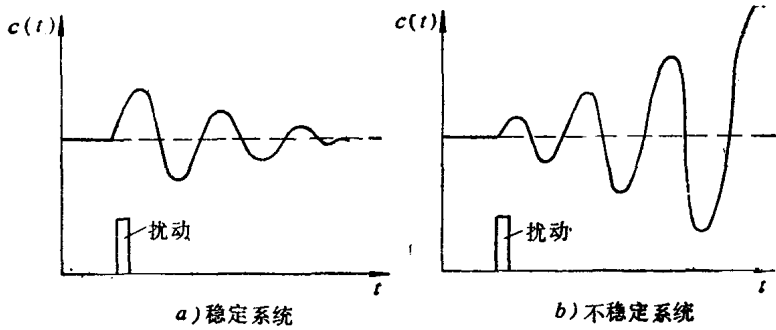


图1-11 稳定系统和不稳定系统

过渡过程。表征这个过渡过程性能的指标叫做动态指标。现在以系统对突加给定信号的动态响应来介绍动态指标。

图 1-12 为系统对突加给定信号的动态响应曲线。

动态指标通常用最大超调量 (σ)、调整时间 (t_s) 和振荡次数 (N) 来衡量。现分别介绍如下:

1. 最大超调量 (σ) (Maximum Overshoot)

最大超调量是输出量 $c(t)$ 与稳态值 $c(\infty)$ 的最大偏差 Δc_{max} 与稳态值 $c(\infty)$ 之比。即

$$\sigma = \frac{\Delta c_{max}}{c(\infty)} \times 100\%$$

最大超调量反映了系统的动态精度,超调量越小,则说明系统过渡过程进行得越平稳。不同的控制系统,对最大超调量的要求也不同,例如,对一般调速系统, σ 可允许 10~35%; 轧钢机的初轧机要求 σ 小于 10%; 对连轧机则要求 σ 小于 2~5%; 而在张力控制的卷取机则不允许有超调量。

2. 调整时间 (t_s) (Settling Time)

调整时间 (t_s) 是从给定量作用于系统开始到输出量进入离稳态值 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 区域的一段时间 (见图 1-12), 它反映了系统的快速性。调整时间 t_s 越小, 系统快速性越好。例如连轧机 t_s 为 0.2~0.5 s; 造纸机为 0.3 s。

3. 振荡次数 (N) (Order Number)

振荡次数是指在调整时间内, 输出量在稳态值上下摆动的次数。如图 1-12 所示, 振荡次数为二次。振荡次数 N 越少, 表明系统稳定性越好。例如普通机床一般可允许振荡 2~3 次; 龙门刨床与轧钢机允许振荡一次; 而造纸机传动则不允许有振荡。

三、系统的稳态性能指标

当系统从一个稳态过渡到新的稳态, 或系统受扰动作用又重新平衡后, 系统会出现偏差, 这种偏差称为稳态误差 (e_s) (Steady-State Error)。系统稳态误差的大小反映了系统的稳

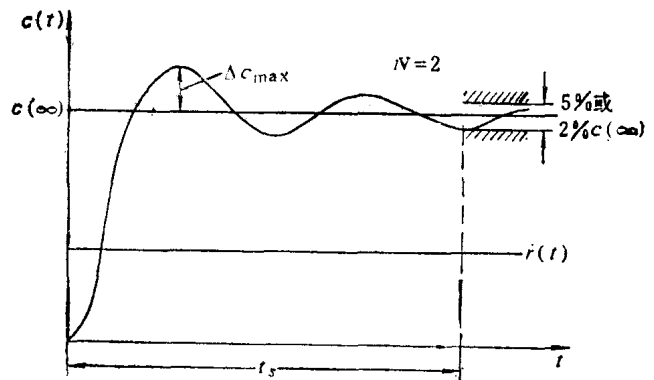


图1-12 系统对突加给定信号的动态响应曲线

态精度（或静态精度），它表明了系统的准确程度。稳态误差 e_{ss} 越小，则系统的稳态精度越高。若 $e_{ss} = 0$ ，则系统称为无静差系统。如图 1-13 b 所示。反之，若 $e_{ss} \neq 0$ ，则称为有静差系统。如图 1-13 a 所示。

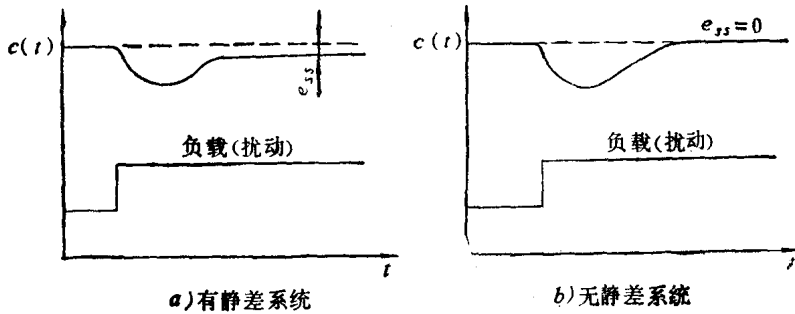


图1-13 自动控制系统的稳态性能

在上述指标中，最大超调量和振荡次数反映了系统的稳定性能。调整时间反映了系统的快速性。稳态误差反映了系统的准确度。一般说来，我们总是希望最大超调量小一点，振荡次数少一点，调整时间短一些，稳态误差小一点。总之，希望系统能达到稳、快、准。

以上对自动控制系统的性能指标只作了扼要的介绍，详细的分析请见第六、七、八章。事实上，以后的分析将表明，这些指标要求，在同一个系统中往往是相互矛盾的。这就需要具体对象所提出的要求，对其中的某些指标有所侧重，同时又要注意统筹兼顾。分析和解决这些矛盾，正是本学科讨论的重要内容。

此外，在考虑系统的技术指标要求时，还要充分注意到系统的可靠性和整个装置的经济性。

§ 1-6 研究自动控制系统的的方法

对自动控制系统进行分析研究，首先是对系统进行定性分析。所谓定性分析，主要是搞清各个单元及各个元件在系统中的地位和作用，以及它们之间的相互联系，并在此基础上搞清系统的工作原理。然后，在定性分析的基础上，可以建立系统的数学模型；再应用自动控制理论对系统的稳定性、稳态性能和动态性能进行定量分析。在系统分析的基础上就可以找到改善系统性能，提高系统技术指标的有效途径；这也就是系统的校正和设计。

自动控制理论又分为经典控制理论 (Classical Control Theory) 和现代控制理论 (Modern Control Theory)。经典控制理论是建立在传递函数 (transfer function) 概念基础之上的，它对单输入—单输出系统是十分有效的。现代控制理论是建立在状态变量 (State Variable) 概念基础之上的，它适用于复杂的多输入—多输出控制系统及变参数非线性系统，实现自适应控制 (Adaptive Control) 最佳控制 (Optimal Control) 等。我们现在研究的自动控制系统基本上都是单输入—单输出系统，所以应用的是经典控制理论。

在经典控制理论中，又有时域分析法 (Time-Domain Analysis Method)、频率响应法 (Frequency Response Method) 和根轨迹法 (The Root Locus Method) 等几种分析方法。这几种方法各有所长，是目前并行采用的。由于国内大多数采用频率响应法进行设计

计算。所以我们也将以频率响应法作为主要的分析方法。

理论虽然为我们的研究提供了重要的方法，但实际系统往往比较复杂，有许多无法确定的因素，因而通过实验或根据现场实践进行研究，也是一条基本的途径。事实上，在进行设计时，也要依靠一些经验公式和经验数据；这也说明理论的分析必须和实践紧密结合起来，才能找到切实可行的有效的解决问题的途径。

小 结

1. 开环控制系统结构简单、稳定性好，但不能自动补偿扰动对输出量的影响。当系统扰动量可以预先进行补偿或影响不大时，采用开环控制是有利的。当扰动量无法预计或控制系统要求较高时，则应采用闭环控制。

2. 闭环控制系统具有反馈环节，它能依靠负反馈环节进行自动调节，以补偿扰动对系统产生的影响。闭环控制极大地提高了系统的精度。

3. 对自动控制系统的性能指标的要求主要是一稳、二快、三准。最大超调量 (σ) 和振荡次数 (N) 反映了系统的平稳性。调整时间 (t_s) 反映了系统的快速性。稳态误差 (e_{ss}) 反映了系统的准确性。

其中 (σ)、(t_s)、(N) 为系统的动态指标，(e_{ss}) 为系统的稳态指标。

4. 恒值控制系统的特点是：输入量是恒量，并且要求系统的输出量也相应地保持恒定。

随动控制系统的特点是：输入量是变化着的，并且要求系统的输出量能跟随输入量的变化而作出相应的变化。

5. 自动控制系统的研究方法，包括理论分析和实践探索。我们主要应用频率响应法来进行分析计算。即

系统工作原理→传递函数→动态结构图→对数频率特性→工程计算法。

习 题

1. 画出如图 1-7 所示的恒温控制系统的方块图。并写出该系统的自动调节过程（方块图中要注明各种作用量，下同）。

2. 写出如图 1-9 所示的位置随动系统的自动调节过程。

3. 画出如图 1-8 所示的恒张力控制系统的方块图，并写出该系统的自动调节过程。

4. 图 1-14 为一水位控制系统，在运行中，希望水位 H 保持不变。试画出该系统的方块图，并写出该

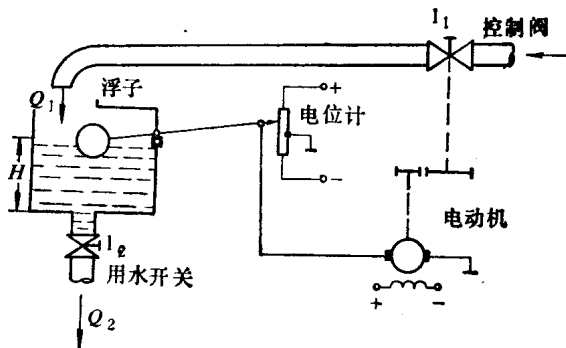


图1-14 水位控制系统