



教育部高职高专规划教材
Jiaoyubu Gaozhi Gaozhuan Guihua Jiaocai

电气自动控制 原理与系统

陈渝光 主编



机械工业出版社
China Machine Press

教育部高职高专规划教材

电气自动控制原理与系统

主编 陈渝光

参编 薛明君 王海萍 肖蕙蕙 卢光飞

主审 李鹤轩

机械工业出版社

《电气自动控制原理与系统》全书分为四部分，第一部分（第一～第五章）为经典的线性自动控制原理，第二部分（第六～第九章）为直流调速系统，第三部分（第十章）为位置随动控制系统，第四部分（第十一～第十三章）为交流调速系统。

本书以经典线性自动控制原理为主线，讲解自动控制系统数学模型的建立，系统稳定性、稳态性能、动态性能分析方法，自动控制系统校正和工程设计方法；讲解直流调速系统、位置随动系统、转差功率消耗型调速系统——交流调压调速系统、转差功率回馈型调速系统——异步电动机串级调速系统和转差功率不变型调速系统——异步电动机变频调速系统的工作原理、动静性能、自动调节过程以及系统实例分析。在系统实例中重视目前常用的集成芯片的应用。

本书的特点是突出应用性、实践性，做到理论联系实际，图文并茂、通俗易懂、应用性强。

本书可作为高等职业技术学院、高等专科学校教材，也可供从事电气自动化的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气自动控制原理与系统/陈渝光主编. —北京: 机械工业出版社, 2000.9

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-111-08163-3

I. 电… II. 陈… III. 电气控制-自动控制系统-高等教育-教材
N. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 64990 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 张世琴 责任校对: 李秋荣

封面设计: 李雨桥 责任印制: 路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mmB5. 9. 25 印张·358 千字

0 001—4 000 册

定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

出版说明

教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、学校和有关出版社的共同努力下,各地已出版了一批高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设仍落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育基础课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。出版后的教材将覆盖高职高专教育的基础课程和主干专业课程。计划先用2~3年的时间,在继承原有高职、高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决好新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专教育教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

“教育部高职高专规划教材”是按照《基本要求》和《培养规格》的要求,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的,适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2000年4月3日

前 言

本书主要包括:自动控制系统的基本概念、自动控制系统的数学模型、自动控制系统的时域分析法、自动控制系统的频域分析法、自动控制系统的波德图校正、单闭环直流调速系统、转速、电流双闭环直流调速系统、可逆直流调速系统、直流脉宽调速系统、位置随动控制系统、转差功率消耗型调速系统、转差功率回馈型调速系统和转差功率不变型调速系统。

本教材突出应用性、实践性,做到理论联系实际,图文并茂、通俗易懂、实用性强。本书由重庆工学院陈渝光副教授主编。其中第一章至第五章由陈渝光编写,第六、七、十章由薛明君编写,第八、九章由王海萍编写,第十一至第十三章由肖蕙蕙、陈渝光和卢光飞合编。本书由清华大学李鹤轩教授主审。参加审稿的还有栗书贤教授张凤池副教授、郑有根副教授以及王文郁、黄家善、石玉高级讲师等,作者在此谨致谢意。

本书为教育部高职高专规划教材,也可供从事电气自动化的工程技术人员参考。

限于作者水平有限,书中难免有缺点和错误,恳请读者批评指正。

作 者
2000年4月

目 录

出版说明	
前言	
第一章 自动控制系统的的基本	
概念	1
第一节 开环控制与闭环控制	1
第二节 自动控制系统分类	4
第三节 对控制系统的性能要求	8
第四节 研究自动控制系统的基本方法	10
小结	11
思考题与习题	12
第二章 自动控制系统的数学模型	
型	14
第一节 数学模型简介	14
第二节 典型环节的传递函数及其功能框图	21
第三节 框图	28
第四节 自动控制系统传递函数	37
小结	40
思考题与习题	41
第三章 自动控制系统的时域分析	
析法	44
第一节 概述	44
第二节 一阶系统阶跃响应分析	45
第三节 二阶系统阶跃响应分析	49
第四节 二阶系统欠阻尼单位阶跃响应性能指标	53
第五节 二阶系统扰动阶跃响应	55
第六节 自动控制系统稳定性分析	58
第七节 自动控制系统稳态性能分析	62
小结	68
思考题与习题	69
第四章 自动控制系统的频率分析	
析法	72
第一节 频率特性的基本概念	72
第二节 典型环节的波德图	74
第三节 控制系统开环波德图的绘制	84
第四节 对数频率稳定判据与稳定裕量	86
第五节 典型系统的开环波德图与频域指标	89
第六节 开环频率特性与阶跃响应之间的关系	95
小结	98
思考题与习题	99
第五章 自动控制系统的波德图校正	
校正	102
第一节 自动控制系统校正的基本概念	102
第二节 自动控制系统的设计方法	110
第三节 预期开环频率特性校正自动控制系统示例	115
小结	120
思考题与习题	120
第六章 单闭环直流调速系统	
统	122

第一节	转速负反馈有静差调速系统	122	小结	201	
第二节	单闭环调速系统的动态模型和稳定性分析	130	思考题与习题	202	
第三节	转速负反馈无静差调速系统	133	第十章 位置随动控制系统	203	
小结	139	第一节	概述	203	
思考题与习题	139	第二节	位置的检测装置	204	
第七章 转速、电流双闭环直流调速系统	141	第三节	数控机床的伺服系统	210	
第一节	转速、电流双闭环调速系统	141	第四节	直流电动机速度/位置控制系统实例	
第二节	双闭环调速系统的动态性能	144	小结	225	
第三节	双闭环调速系统实例分析	146	思考题与习题	226	
第四节	双闭环调速系统工程设计方法	153	第十一章 转差功率消耗型调速系统——异步电动机调压调速系统	227	
第五节	弱磁控制的直流调速系统	165	第一节	概述	227
小结	168	第二节	调压调速系统基本概念	228	
思考题与习题	169	第三节	调压调速系统	230	
第八章 可逆直流调速系统	173	第四节	利用电动机的自身结构调速	232	
第一节	实现可逆运行的电路	173	第五节	电磁调速电动机	235
第二节	可逆系统中的环流	177	小结	237	
第三节	自然环流可逆系统的工作状态	180	思考题与习题	237	
第四节	可控环流可逆系统的工作原理	183	第十二章 转差功率回馈型调速系统——异步电动机串级调速系统	239	
第五节	逻辑无环流可逆调速系统	185	第一节	串级调速原理	239
小结	190	第二节	能量传递关系及串级调速系统分类	241	
思考题与习题	190	第三节	串级调速系统基本特性	243	
第九章 直流脉宽调速系统	191	第四节	具有双闭环控制的串级调速系统	245	
第一节	直流脉宽调制电路的工作原理	191	第五节	双馈串级调速系统	249
第二节	脉宽调速系统的控制电路	195	小结	250	
			思考题与习题	251	
			第十三章 转差功率不变型调速系统——异步电动机变频调速系统	252	

第一节	变频调速原理	252	小结	279
第二节	变频调速的基本控制方式和 机械特性	252	思考题与习题	280
第三节	变压变频装置及其基本控制 方式	255	附录	281
第四节	SPWM 变压变频器	257	附录 A 常用文字符号	281
第五节	变频调速系统控制方 式	265	附录 B 新旧变压器绕组联结组标 号对照表	284
第六节	SPWM 变压变频系统	271	附录 C Laplace 变换	285
			参考文献	287

第一章 自动控制系统的基本概念

自动控制技术已广泛地应用于工业、农业、国防、交通运输、空间技术、管理工程各个科学领域。尽管自动控制系统种类繁多，其结构和用途各异，但它们的基本原理是一样的。自动控制理论就是建立在各种自动控制系统之上的一门学科，它是分析、设计和调试自动控制系统的理论基础。

自动控制理论大致可分为经典控制理论 (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概念基础上的，采用时域分析法、频域分析法、根轨迹法等方法研究单输入、单输出控制系统；而现代控制理论则是建立在状态变量概念基础上的，采用状态空间分析法等方法，研究复杂的多输入、多输出控制系统、变参数非线性系统，实现最佳控制、系统辨识、自适应控制、人工智能控制、以及将过程控制与信息处理相结合的综合自动控制。

第一节 开环控制与闭环控制

在电力电子变流技术课程中，我们已经接触到了晶闸管供电的直流调速系统，如图 1-1 所示。

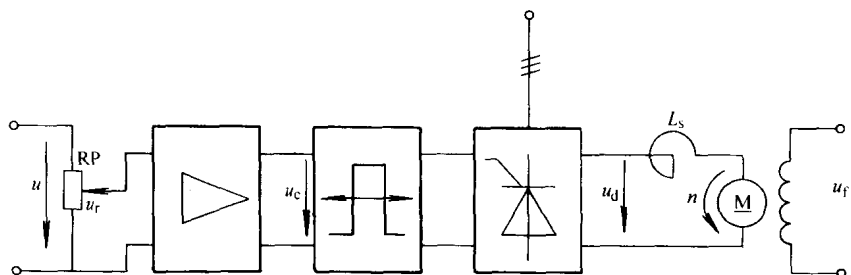


图 1-1 晶闸管直流调速系统框图

所谓控制系统 (Control System) 就是通过执行规定的功能来实现某一给定目标的一些相互关联单元的组合。由人直接或间接操作执行装置的控制方式称为手动控制 (Manual Control)；而无需人去直接或间接操纵执行机构，利用控制装置控制被控制量自动地按预定的规律变化的过程则称为自动控制 (Automatic Control)。

图 1-1 由电位器、放大器、触发器、晶闸管整流装置，以及直流电动机等组成

控制系统，其规定的功能是指改变晶闸管输出电压，而它的给定目标是通过调节晶闸管输出电压来达到调节电动机转速的目的。它是通过手工调节 u_r 来达到改变转速 n 的目的，这种控制方式属于手动控制。

由于该控制系统无反馈环节，只有输入量的前向控制作用，输出量并不反馈回来影响输入量的控制作用，因而，我们将它称为开环控制系统 (Open-Loop Control System)。开环控制系统可用图 1-2 所示的框图表示。

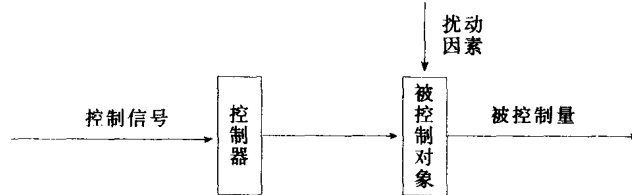


图 1-2 一般开环控制系统框图

开环系统的优点是结构简单，系统稳定性好，调试方便，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测并进行补偿的前提下，应尽量采用开环控制系统。

开环控制的缺点是当控制过程中受到来自系统外部的各种扰动因素，如负载变化、电源电压波动等，以及来自系统内部的扰动因素，如元件参数变化等，都将会直接影响到输出量，而控制系统不能自动进行补偿。因此，开环系统对元器件的精度要求较高。

为了消除或减少扰动的影响，常采用闭环控制 (Close-Loop Control)。图 1-3 为具有转速负反馈的闭环控制系统。

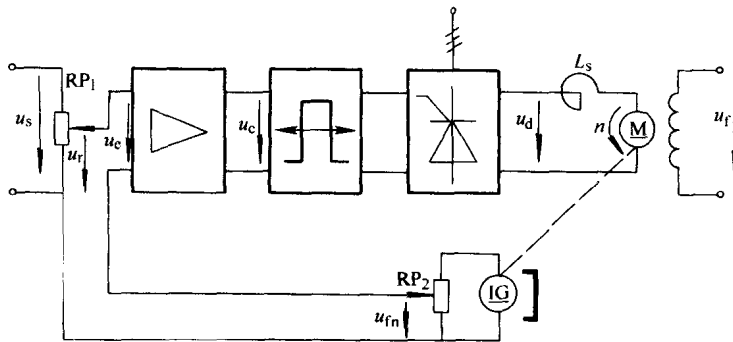


图 1-3 闭环控制系统示例

图中电动机同轴联结了一台永磁式直流测速发电机 TG (Tacho-Generator)，它将检测到的转速信号 n 转变成电压信号 u_{fn} ，并以负反馈形式反馈回输入端作用于控制部分，形成闭合环路。当 u_r 固定不变时，而转速 n 因某些因素（如负载转矩 T_L 增加，或电源电压 U_2 下降）而降低时，通过负反馈的调节作用，将使转速

回升。其调节过程如下：

$$n \downarrow \rightarrow u_{in} \downarrow \rightarrow u_e = (u_r - u_{in}) \uparrow \rightarrow u_c \uparrow \rightarrow u_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

闭环控制系统利用了负反馈获取偏差 $(u_r - u_{in})$ 信号，利用偏差产生控制作用去克服偏差。这种控制原理称为反馈控制原理。因而，闭环控制系统又称为反馈控制系统 (Feedback Control System)。该系统具有抗扰能力，除对反馈通道上的元件精度要求较高外，对系统中的其他元器件的要求不高。但缺点是调试困难，如调试水平欠佳，系统可能工作不稳定 (详见第三章第六节)。闭环控制系统的一般形式如图 1-4 所示。

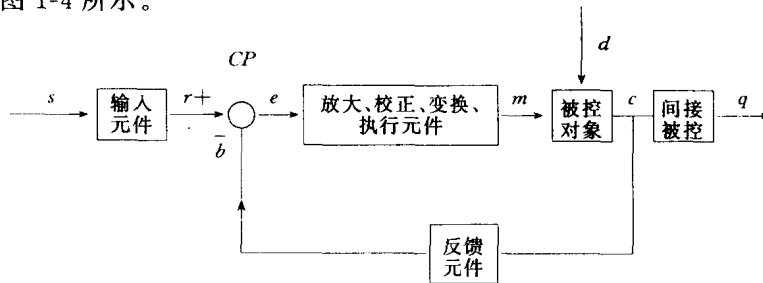


图 1-4 一般闭环控制系统框图

由图 1-4 可知，一般控制系统包括：

指令信号 (Command Signal) s ——又称为输入信号，系统设计时已经确定。

输入元件 (Input Element) ——将指令信号变换为系统所需的参考输入量。

参考输入量 (Reference Variable) r ——又称为给定量，实际输入到系统的控制信号。

比较元件 (Comparing Element) cp ——具有两个或两个以上的输入信号，而输出信号是输入信号的代数和。

偏差信号 (Error Signal) e ——反馈控制系统比较元件的输出信号。

放大元件 (Application Element) ——由于偏差信号一般很小，所以要经过该元件进行电压及功率放大，以驱动执行元件。

校正元件 (Compensation Element) ——用以改善系统性能指标的元件。

执行元件 (Executive Element) ——驱动被控对象的装置。

操纵量 (Manipulation Variable) m ——执行装置作用于被控对象的信号。

被控对象 (Controlled Plant) ——自动控制系统中需要进行控制的设备或生产过程。

被控量 (Controlled Variable) c ——系统被控制对象的输出，它是系统的控制目标。

扰动量 (Disturbance) d ——所有妨碍参考输入量对被控制量按要求进行正常控制的因素。

反馈元件 (Feedback Element) —— 它对被控量进行测量, 并输出反馈信号。

反馈信号 (Feedback Signal) b —— 与被控量成某种函数关系并反馈回到比较元件上的信号。

此外, 还有间接被控制装置及间接被控量 q 。

第二节 自动控制系统分类

一、按控制策略分类

可分为顺序 (Sequential) 自动控制 (即开环控制) 与反馈控制系统两类。其中顺序自动控制系统又可分为:

(1) 时间顺序控制 按时间安排顺序执行预先给定的顺序命令。

(2) 条件顺序控制 顺序根据前一阶段的控制结果, 选定下一阶段所要完成的控制目标。

二、按照参考输入量变化的规律分类

(1) 恒值控制系统 (Control System With Fixed Set-Point) 系统的参考输入量是恒值, 并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, 以及工业生产中的恒压 (压力)、稳压 (电压)、稳流 (电流)、恒频 (频率) 自动控制系统都属于恒值控制系统。

如图 1-3 所示为一自动调速系统。其控制过程如前所述, 它能保持恒速运行。

图 1-5 所示为一恒温自动控制系统。其控制过程如下:

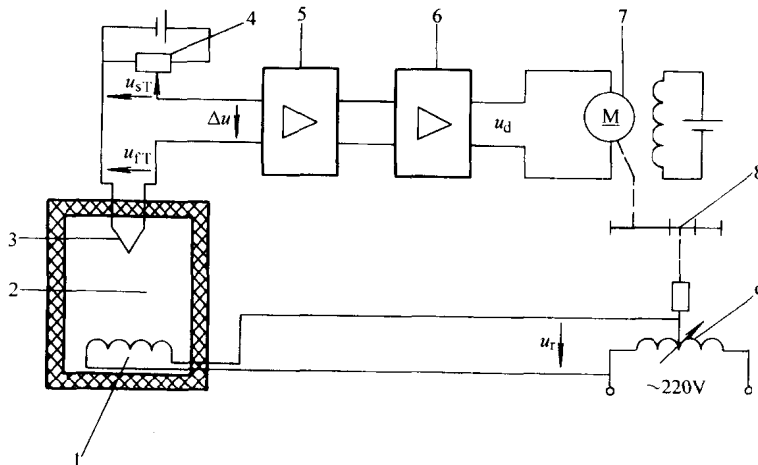


图 1-5 恒温箱自动控制系统

- 1—加热电阻丝 2—电炉箱 3—热电偶 4—给定电位器 5—电压放大器
6—功率放大器 7—直流伺服电动机 8—减速器 9—调压变压器

温度 $\uparrow \rightarrow u_{rr} \uparrow \rightarrow \Delta u \downarrow \rightarrow$ 产生电压 $u_d \rightarrow$ 电动机转动 \rightarrow 带动调压器滑动臂转动 $\rightarrow u_r \downarrow \rightarrow$ 温度 $\downarrow \rightarrow$ 直到 $\Delta u = 0 \rightarrow$ 电动机停转 \rightarrow 温度恒定。

图 1-6 所示为一液位自动控制系统，其调节过程如下：

水位 $\uparrow \rightarrow$ 浮子上浮 \rightarrow 下触点闭合 \rightarrow 电动机正转 \rightarrow 关小阀门 \rightarrow 水位 $\downarrow \rightarrow$ 触点断开 \rightarrow 电动机停止工作 \rightarrow 水位恒定在规定的范围内。

图 1-7 所示为一恒张力自动控制系统。在纸张卷绕系统中，为避免发生拉裂、拉伸变形，或摺绉等现象发生，通常应将张力保持为一定值。图中右边为卷绕筒驱动系统（恒定线速度的自动调速系统），它以恒定的线速度卷绕被卷绕物。左边为开卷筒张力控制系统，其调节过程如下：

张力 $\uparrow \rightarrow$ 滚筒摇臂失去平衡而上移 \rightarrow 产生偏角位移量 \rightarrow 偏差电压 $\uparrow \rightarrow$ 电制动器制动力矩 $\downarrow \rightarrow$ 张力 $\downarrow \rightarrow$ 直到张力达到平衡。

(2) 随动系统 (Follow-up Control System) 系统参考输入量按一定规律变化（或随机变化），并要求系统的输出量能跟随输入量的变化而变化。这种控制系统通常以功率很小的输入信号操纵大功率的工作机械。

随动系统广泛地应用于船闸牵曳系统，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。图 1-8 所示为一随动系统，其调节过程如下：

$\varphi_1 \uparrow \rightarrow \Delta u \uparrow \rightarrow u_d \uparrow \rightarrow$ 电动机带动 $\varphi_2 \uparrow \rightarrow$ 直到 $\varphi_1 = \varphi_2 \rightarrow \Delta u = 0 \rightarrow u_d = 0 \rightarrow$ 电动机停转。

(3) 程序控制系统 (Programmed Control) 这种控制系统的参考输入量不为常值，它是按预先编制的程序变化的。如炉温控制系统中的温度调节，要求温度按预先一设定的规律（程序）变化（自动升温、恒温和降温）。

三、按被控制量来分类

(1) 运动控制系统 (Motion Control System) 运动控制系统的特点是以电动机为被控制对象控制机械运动，其中包括恒值控制系统。

(2) 生产过程自动控制系统（简称过程控制）(Process Control System) 生产过程通常指在某设备中将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。如化工、石油、造纸中的原料生产；冶金、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、

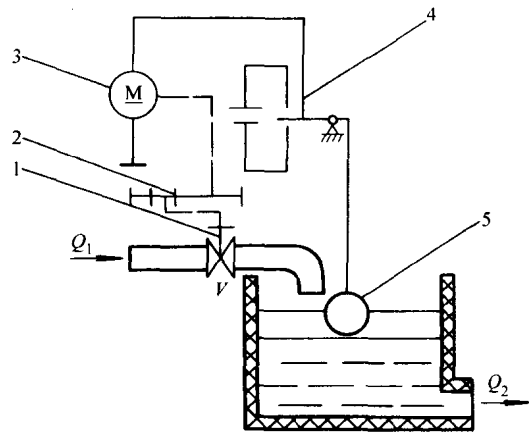


图 1-6 液位控制系统

1—水阀 2—减速度器 3—直流伺服电动机 4—机械式触点开关 5—浮子

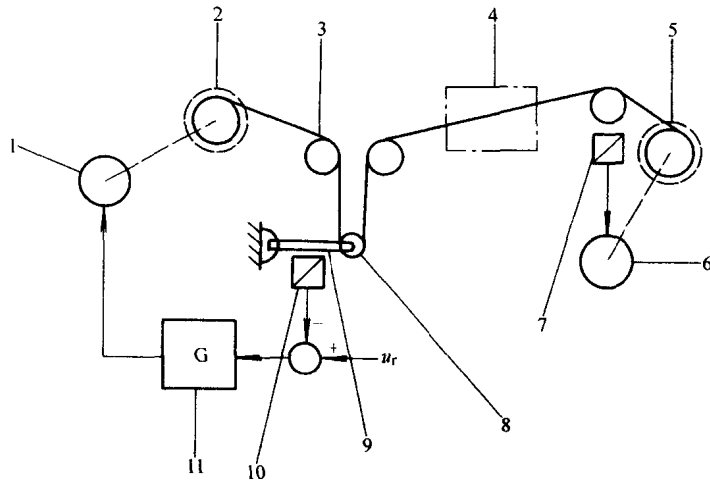


图 1-7 恒张力控制系统

- 1—电制动器 2—开卷筒 3—被卷物 4—被卷物加工设备 5—卷绕筒
6—卷绕筒驱动系统 7—速度检测器 8—浮动滚筒 9—浮动滚筒臂
10—偏角检测仪 11—线性控制器

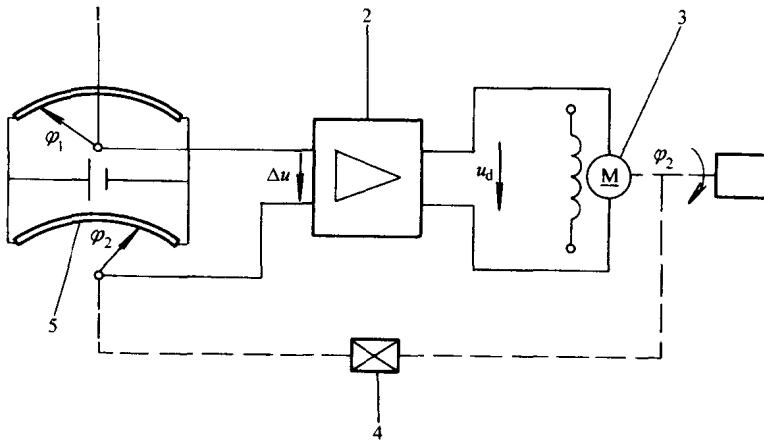


图 1-8 随动系统

- 1—控制器电位器 2—放大器 3—直流伺服电动机 4—减速器 5—反馈电位器

液位、粘度、浓度等参量保持为恒值或按一定的规律变化。

四、按照信号的作用特点分类

(1) 连续控制系统 (Continuous Control System) 也称为模拟控制系统 (Analogue Control System)。系统中各组成部分元件输出量都是输入量的连续函数。上述示例均为连续控制系统。

(2) 断续控制系统 (Discontinuous Control System) 系统中包含有断续元

件，其输入量是连续量，而输出量是断续量。常见的断续控制系统有：

继电器控制系统 (Relay Control System)，亦称为开关控制系统，如常规的机床电器控制系统。

离散控制系统 (Discrete Control System)，又称为采样数据控制系统 (Sampled-data Control System)。系统中的信号是脉冲序列或采样数据量，其脉冲的幅度、宽度及符号取决于采样时刻的输入量。离散控制系统通常用差分方程来描述。

数字控制系统。数字控制系统中，信号以数码形式传递，如计算机控制系统。

五、按照元件特性分类

(1) 线性控制系统 (Linear System) 线性控制系统的特点是组成系统所有元件的输入量和输出量之间的关系是线性的。线性系统的性能可以使用线性微分方程描述，可以应用叠加原理和拉氏变换分析线性系统。

(2) 非线性控制系统 (Nonlinear System) 非线性控制系统的特点是系统中的某些元件具有非线性性质 (例如出现饱和、死区、库伦摩擦等)。非线性控制系统不能用叠加原理进行分析。分析非线性控制系统的工程方法常用相平面法和描述函数法。

六、按系统中参数对时间的变化情况分类

(1) 定常系统 又称为时不变系统 (Time-Invariant System)，其特点是系统的全部参数不随时间而变化，它可用定常微分方程式来描述。

(2) 时变系统 (Time-Varying System) 时变系统特点是系统的部分参数是时间的函数，随时间变化而变化。

七、按自动控制系统的功能分类

(1) 自动调节系统 (Automatic Regulating System) 即恒值控制系统。

(2) 最优控制系统 (Optimum Control System) 最优控制系统是指使控制系统实现对某种性能指标为最佳的控制。

(3) 自适应控制系统 (Adaptive Control System) 自适应控制系统是一种能够连续测量输入信号和系统特征的变化，自动地改变系统的结构与参数，使系统具有适应环境变化并始终保持优良品质的自动控制系统。例如飞机特性随飞行高度、气流速度而变化；轧机张力随卷板机卷绕钢板多少而变化等等。在这些情况下，普通固定结构的反馈自动控制系统就不能满足需要了，它们只能采用自适应控制系统。

(4) 自学习系统 (Self Learning System) 它具有辩识、判断、积累经验和学习的功能。在控制特性不能确切地用数学模型描述时，采用自学习控制系统可以在工作过程中，不断地测量，估价系统的特性，并决定最优控制方案，实现性能指标最优控制。

第三节 对控制系统的性能要求

对自动控制系统性能 (Performance Specification) 的基本要求可以归纳为三点: 稳定性、快速性和准确性, 通常用系统的稳定性、稳态特性和动态特性来描述。

一、系统的稳定性 (Stability)

当扰动量 (或给定量) 发生变化时, 输出量将会偏离原来的稳定值, 这时, 通过系统的反馈调节作用, 系统可能回到 (或接近) 原来的稳定值 (或跟随给定量) 稳定下来, 如图 1-9a 所示, 则该系统是稳定的。但控制系统输出也可能是发散的不稳定现象, 如图 1-9b 所示。不稳定的控制系统无法完成正常的控制任务, 甚至会损坏设备, 造成事故。因此, 对任何控制系统, 系统正常工作的首要条件是其稳定性。

另外, 对于系统稳定性的要求, 还要求达到一定的稳定裕量 (Stability Margin), 以免由于系统参数随环境等因素的变化而导致系统进入不稳定状态。

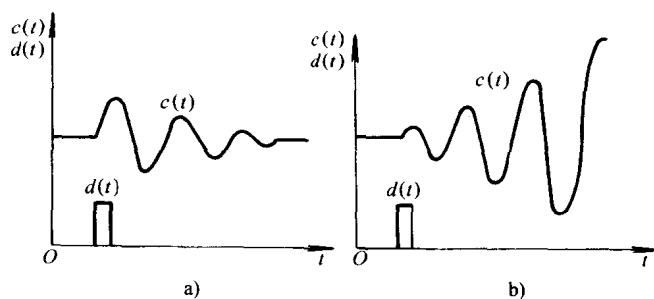


图 1-9 系统的稳定性

a) 稳定系统 b) 不稳定系统

二、系统的动态性能指标 (Dynamic Performance Specification)

由于控制系统的元件和被控制对象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, 系统中各种参数 (如速度、位移、电流、温度等) 的变化不可能突变。因此, 系统从一个稳态过渡到另一稳态需要经历一段时间, 即需要经历一个过渡过程。表征这个过渡过程的性能指标称为动态性能指标 (又称为动态响应指标)。通常用系统对突加给定时的动态响应来表征其动态性能指标。

图 1-10 为系统对突加给定信号的动态响应。

动态响应指标通常用最大超调量 $\sigma_p\%$ (Maximum Overshoot)、建立时间 t_s (Setting Time) 和振荡次数 N (Order Number) 来评价。

(1) 最大超调量 $\sigma_p\%$ 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

$$\sigma_p \% = \frac{\Delta C_{\max}}{C(\infty)} \times 100\%$$

最大超调量反映了系统的动态精度，超调量越小，说明系统过渡过程进行得越平滑。控制系统不同，对最大超调量的要求也不同。

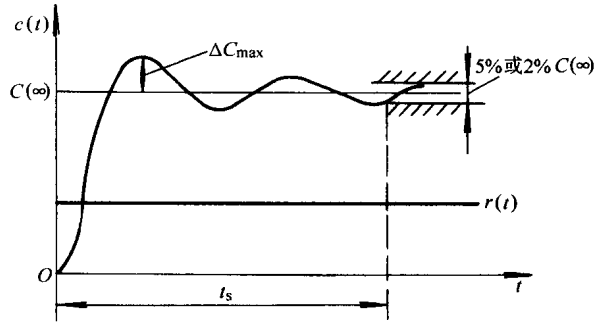


图 1-10 系统对突加给定信号的动态响应曲线

(2) 建立时间 t_s 建立时间(又称为调节时间)指系统响应曲线与其稳态值之差达到并且不再超过规定的误差范围 $\delta C(\infty)$ 所需的时间,其误差范围一般定为 $\delta = \pm 2\% \sim \pm 5\%$ 。它反映了系统的快速性能,建立时间越小,系统快速性越好。

(3) 振荡次数 N 振荡次数指 t_s 时间范围内输出信号的振荡周期数,即 t_s 时间内系统响应曲线穿越稳态值次数的一半。振荡次数越少,系统稳定性能越好。

三、系统的稳态性能指标 (Steady-State Performance Specification)

系统从一个稳态过渡到另一个稳态,或系统受到扰动作用又重新进入平衡状态后,系统会出现偏差,这种偏差称为稳态误差 e_{ss} (Steady-State Error)。系统稳态误差的大小表征系统的稳态精度,即系统的准确程度。稳态误差越小,则系统的稳态精度越高。对于 $e_{ss} = 0$ 的系统,称为无静差系统;而 $e_{ss} \neq 0$ 的系统,则称为有静差系统,如图 1-11 所示。

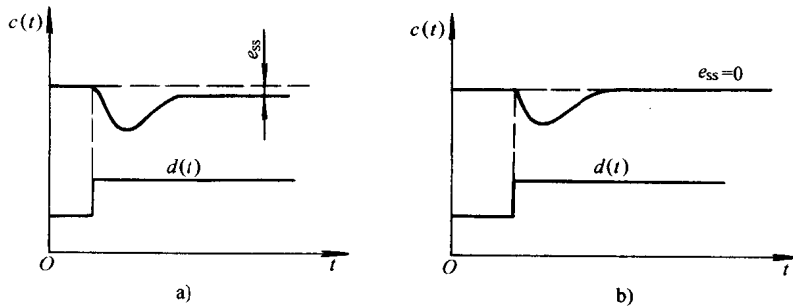


图 1-11 自动控制系统的稳态性能

a) 有静差系统 b) 无静差系统