

高等学校“十一五”规划教材/自动控制类

自动控制技术及应用



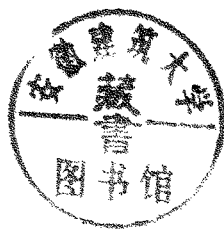
于长官 主编

哈尔滨工业大学出版社

高等学校“十一五”规划教材/自动控制类

自动控制技术及应用

于长官 主编



哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书内容包括自动控制的基本概念、系统的传递函数与方块图、时域分析法、频率特性法、PID 控制、控制系统的基本元件、状态空间法、计算机控制的基础理论、计算机控制的设计与实现及附录。

本书可作为高等职业院校自动控制、计算机、电气自动化专业的本专科学生教材,亦可作为高等普通院校机电类本专科学生的教材,还可作为高级技师及科技人员的培训和自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制技术及应用/于长官主编. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社, 2007.2

ISBN 978-7-5603-2448-7

I. 自… II. 于… III. 自动控制
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 155083 号

责任编辑 田 秋

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 18.25 字数 445 千字

版 次 2007 年 2 月第 1 版 2007 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-2448-7

印 数 1~4 000 册

定 价 27.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

历史与现实表明,经济的腾飞,需要大批既具有基本理论知识,又富有实践经验的掌握较高技术的高级人材。为适应这一要求我们编写了自动控制技术与应用。

该书以高等职业院校教学与高级技师培训为背景,将控制理论、技术与实现予以有机综合。它包括了自动控制元件、自动控制原理(古典理论与现代理论)、计算机控制及自动控制应用四部分。书中将古典控制理论与现代控制理论相结合;将连续系统与离散系统的设计技术相结合;将理论技术与工程应用相结合。该书给出了学习需要的基础知识,并注重知识的连续性与逻辑性,突出计算机控制及应用,用循序渐进方式构造本书结构,力求学习者把握住最基本内容与要领,因此本书不是以作习题为主要的学习考核方法,而是更注重对基本内容的思考、讨论与总结,具体实施见附录。

该书作为教材,对于本科生,可按 40~60 学时组织教学,讲授第 1~9 章内容;对于专科生,可按 40 学时组织教学,讲授第 1~9 章的相应部分;对高级技师与科技人员的培训,可考虑按 24~40 学时组织教学,讲授第 1~9 章的相应部分。

该书由哈尔滨工业大学于长官教授主编,山东理工大学魏修亭编写第 9 章,参加编写工作的还有刘英贤、于涌、尹贵增、贺兵、曹中军、陈业彪、王吉元。

由于内容涉及面宽,加之编者水平所限,一定还存在不妥与疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者
2006 年 10 月

目 录

第 1 章 自动控制的基本概念	(1)
1.1 自动控制简况	(1)
1.2 开环控制与闭环控制	(3)
1.3 控制系统的组成及性能要求	(4)
1.4 控制系统示例	(7)
第 2 章 系统的传递函数与方块图	(10)
2.1 系统的微分方程	(10)
2.2 开环系统的传递函数	(13)
2.3 闭环系统的传递函数	(17)
2.4 传递函数与方块图示例	(22)
第 3 章 时域分析法	(28)
3.1 系统的稳定性	(28)
3.2 一阶系统的阶跃响应	(33)
3.3 二阶系统的阶跃响应	(34)
3.4 高阶系统的阶跃响应	(40)
3.5 系统动态特性示例	(43)
3.6 系统稳态误差的概念	(45)
3.7 系统稳态误差的计算	(49)
第 4 章 频率特性法	(57)
4.1 频率特性的概念	(57)
4.2 典型环节的对数频率特性	(59)
4.3 开环系统对数频率特性曲线的绘制	(68)
4.4 对数奈氏稳定判据与相对稳定性	(72)
4.5 频域性能指标	(76)
第 5 章 PID 控制	(80)
5.1 PID 控制规律及实现装置	(80)
5.2 二阶工程设计法	(85)
5.3 三阶工程设计法	(88)
5.4 按期望对数幅频特性进行串联校正的设计	(90)
5.5 按期望对数幅频特性进行并联校正的设计	(95)
5.6 电力拖动系统控制	(98)
5.7 水泥生料质量控制	(109)
第 6 章 控制系统的基本元件	(117)
6.1 控制元件的作用	(117)
6.2 测量元件(传感器)	(120)
6.3 功率放大元件	(125)

6.4 执行元件	(132)
第7章 状态空间法	(138)
7.1 矩阵代数	(138)
7.2 状态空间法的基本概念	(141)
7.3 状态方程与输出方程的建立	(145)
7.4 系统状态的运动	(152)
7.5 系统的能控性与能观测性	(156)
7.6 状态反馈控制	(162)
7.7 极点配置法	(164)
7.8 倒立摆系统的设计	(165)
7.9 二次型最优法	(169)
7.10 导弹制导规律的确定	(174)
7.11 电液位置控制系统	(177)
第8章 计算机控制的基础理论	(184)
8.1 计算机控制系统概述	(184)
8.2 计算机控制系统结构	(189)
8.3 信号的采样与复现	(193)
8.4 Z 变换	(197)
8.5 脉冲传递函数	(202)
8.6 闭环采样系统的阶跃响应	(207)
8.7 离散系统的稳定性与稳态误差	(208)
8.8 离散系统的状态空间描述	(211)
8.9 离散系统的能控性与能观测性	(221)
第9章 计算机控制的设计与实现	(224)
9.1 数字控制器的模拟化设计	(224)
9.2 数字 PID 控制器设计	(231)
9.3 离散状态反馈设计	(235)
9.4 数字控制器算法编排实现	(239)
9.5 采样周期的确定	(243)
9.6 温度控制系统的设计	(247)
9.7 位置伺服控制系统的设计	(249)
9.8 天线抛物面控制系统的设计	(253)
9.9 退火炉温度控制	(255)
9.10 锅炉工艺参数控制	(261)
附录 思考、回答与讨论	(267)
参考文献	(286)

第1章 自动控制的基本概念

1.1 自动控制简况

自动控制是在无人直接参与的情况下,利用控制装置(控制器)使被控制对象或过程自动按预定的运行规律去运行。导弹能准确地命中目标,人造卫星能按预定轨道运行并返回地面,宇宙飞船能准确地月球上降落并安全返回,都是自动控制技术应用的结果。

自动控制是一门理论性很强的工程技术,称“自动控制技术”,实现这些技术的理论叫“自动控制理论”。它分为三部分,即“经典控制理论”、“现代控制理论”、“大系统理论与智能控制理论”。

1 经典控制理论

经典控制理论多半是用来解决单输入 - 单输出的问题,所涉及的系统大多是线性定常系统。在人类社会早期实践活动中,虽然也使用了一些简单的“反馈”和“前馈”思想,但相当稀少与原始。而蒸汽机的出现,极大地刺激了反馈控制技术的发展。在19世纪,为了解决蒸汽机离心调速器的控制精度和系统稳定性之间的矛盾,马克斯维尔1868年提出了用基本系统的微分方程模型分析反馈系统的数学方法。同时,韦士奈格瑞斯克阐述了调节器的数学理论。1895年劳斯与古尔维茨分别提出了基于特征根和行列式的稳定性代数差别方法。进入20世纪后,电信工业的发展导致了奈奎斯特频率域分析技术和稳定判据的产生,波德进一步研究开发了易于实际应用的波德图。1948年伊文思提出了一种易于工程应用的、求解闭环特征方程根的简单图解法——根轨迹分析法。这样便开始形成一套完整的、以传递函数为基础、在频率域对单输入 - 单输出控制系统进行分析与设计的理论,即所谓经典(古典)控制理论。

由上述不难看出,经典控制理论是与生产过程的局部自动化相适应的,它具有明显的依靠手工进行分析和综合的特点,这个特点是与20世纪40~50年代生产发展的状况,以及电子计算机技术的发展水平尚处于初级阶段密切相关的。经典控制理论在对精确度要求不是很高的情况下是完全可用的。经典控制理论最大的成果之一就是PID控制规律的产生,PID控制原理简单,易于实现,具有一定的自适应性与鲁棒性,对于无时间延迟的回路控制系统很有效,在工业过程控制中仍被广泛应用。

2 现代控制理论

现代控制理论主要用来解决多输入 - 多输出系统的问题,系统可以是线性或非线性的、定常或时变的。20世纪50年代后期,空间技术的发展和计算机的发展与普及,促使控制理论由经典控制理论向现代控制理论转变。被控对象复杂、生产过程的精确要求,对系统的控制要求也越来越高,经典控制理论显得无能为力,简单反馈已无法满足解决不确定性问题的需要,这不仅在航天飞行器、导弹、火炮等控制方面需要新的控制理论,随着工业生产对产品的质量和要求的提高,人们更关注新的控制理论。在这种背景下,更为精巧的控制方法应

运而生。其中最具代表性的就是基于模型的现代控制理论。

其中最优控制的惊人成果,是由前苏联的庞德亚金等学者提出的极大值原理,同时美国学者别尔曼也提出了解决最优控制问题的动态规划法。而当时正在美国从事数控研究的青年科学工作者 R. E. 卡尔曼,对系统采用了状态方程描述方法,指出了系统的能控性、能观测性。与此同时,证明了在二次型性能指标下线性系统最优控制的充分条件,进而提出了对于估计与预测有效的卡尔曼滤波,并证明了对偶性。基于上述结果,人们确认了控制系统的状态方程描述方法的实用性。当时,将这种与状态方程有关控制理论称为“现代控制理论”。因此现代控制理论是以庞德亚金的极大值原理、别尔曼的动态规划和卡尔曼的滤波理论为其发展里程碑,揭示了一些极为深刻的理论结果。

3 大系统理论和智能控制理论

大系统理论和智能控制理论的出现,使控制理论发展到一个新阶段。所谓大系统,是指规模庞大、结构复杂、变量众多的信息与控制系统,它涉及生产过程、交通运输、生物控制、计划管理、环境保护、空间技术等方面的控制和信息处理问题。而智能控制系统是具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统,其中最典型的是智能机器人。智能控制阶段尚处于初始形成过程,往往体现为现代控制理论的推广及延伸。

需特别指出的是数字计算机的出现与发展,在科学技术上引起了一场深刻革命,数字计算机不仅在科学计算与数据处理等方面取得广泛应用,而且在自动控制领域也得到广泛应用。数字计算机在自动控制中的基本应用是直接参与控制,执行控制系统中控制器的任务,形成了计算机控制系统。数字计算机的参与控制,对系统的性能、系统的结构及控制理论等多方面均产生了深刻影响。因此说计算机控制是计算机技术与自动控制理论及自动化技术紧密结合并应用于实际对象控制的结果。它的应用领域非常广泛,不仅是国防、航天航空、制导等高精尖学科必不可少的组成部分,而且在现代化的工、农、医等领域也已发挥着越来越重要的作用。

随着现代化工业生产过程的复杂性与集成化程度的提高,计算机控制系统在工业生产中已成为不可缺少的部分。由于计算机控制系统的优越性表现得越来越突出,使现代的控制系统几乎都是采用计算机进行控制的,而在国民经济及国防等各个领域是否采用计算机控制,成为现代化的重要标志。这样从事自动控制的研究人员与工程技术人员面临一个新的局面,要求他们在掌握自动控制理论和生产工艺流程原理的同时,还必须掌握计算机控制系统的有关硬件、软件、控制策略、数据通信、网络技术、数据库等多方面知识与技术,从而不但能分析与应用,而且能设计且实现满足工业生产过程需求的计算机控制系统。

毫无疑问,自动控制已经是现代工程中非常重要的技术,从机械位移、转速的控制到工业过程中温度、压力、流量、物位的控制,从现代飞机的航向控制到宇宙飞船的姿态控制等,控制工程师们已把人类的许多希望与梦想变为现实。而所有这些形形色色的控制系统,又都是由一些具有几种典型功能的元器件与电子线路所组成的,因此了解与掌握自动控制系统中这些常用的基本元件及线路是十分必要的。

1.2 开环控制与闭环控制

1.2.1 基本定义

(1) 被控对象。被控对象是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程,如电机、锅炉、机床、飞行器及工业生产过程等。

(2) 控制装置。控制装置也称控制器,指对被控对象起控制作用的装置的总称,目的是使被控对象完成既定任务。

(3) 自动控制系统。自动控制系统是由控制装置和被控对象组成的,是以某种规律或互相依赖的方式结合为一个有机整体,并使被控对象工程状态能自动控制。自动控制系统不限于物理系统,它也可应用于抽象的动态现象。

(4) 被控量。被控量是在自动控制系统中,按给定的要求加以控制的物理量。

(5) 控制量。控制量是作为被控量的控制信号,而加给自动控制系统的输入量。

(6) 干扰量。干扰量也称扰动量,在自动控制系统中,是使被控量偏离期望值的不利因素。如果干扰产生于系统的内部,则称之为内部干扰;如果干扰产生于系统的外部,则称之为外部干扰。

1.2.2 开环控制

开环控制是指组成系统的控制装置与被控对象之间,只有顺向作用而没有反向联系的控制。下面以炉温控制系统为例介绍开环控制概念及特点(见图 1.1、1.2)。

(1) 对炉温系统开环控制分析。炉子是被控对象,炉温 c 是被控量,加热线电阻丝的开关 K 受时间继电器控制,按照预先规定的时间接通或断开电源 E ,从而使炉温保持在希望炉温的一定范围内。如果工作条件变化较大,如炉门的开闭引起炉温降低,而偏离希望值,但开关 K 不因此改变接通时间,所以炉温偏差一般无法自动修正。

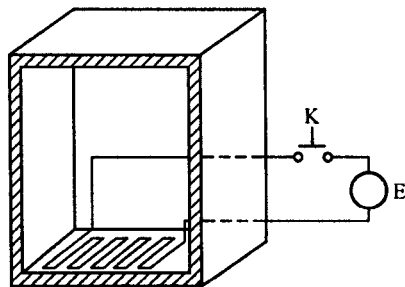


图 1.1 炉温控制系统

(2) 开环控制系统的特点。由上述分析可知,系统输出量(被控量)对系统输入量(控制量)不发生影响,不需要对输出量测量,所以控制容易实现,系统的稳定性不是重要问题。它的问题是对存在变化规律无法预测的干扰,往往无法实现控制。为保证系统精度较高,组成系统的每一个部件(或元件)质量要好,但部件或元件的高精度往往难以保证。

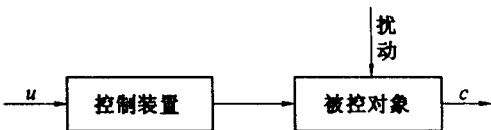


图 1.2 开环控制系统方块示意图

1.2.3 闭环控制

在开环控制的基础上 - 为了解决上述矛盾,人可以直接参与系统工作。如图 1.3 为人直接参与工作的炉温控制系统,开关 K 不是用继电器控制,而是由人操纵,这样人可以通过观察实际炉温,然后根据实际炉温偏离希望炉温的高低来操纵开关 K 的通断时间,从而使炉温保持在希望值。这里人的作用就是完成测量输出并改变输入的任务。用元部件代替人的作用,即实现了无人直接参与的闭环系统。控制系统如图 1.4 所示,方块示意图如图 1.5 所示。

闭环控制是指控制装置与被控对象之间既有顺向作用,又有反向联系的控制。它的控制过程大致为:对被控量(即输出量)进行测量,并与控制信号(输入量)进行比较,得到偏差信号;将偏差信号进行处理(放大与变换);利用变换与放大后的偏差信号产生控制作用;这个控制作用使被控量(即输出量)做与原来相反方向的运动。这种利用偏差产生控制作用,达到消除(或减小)偏差的控制原理叫做反馈原理。如果经过反馈使系统偏差增加,即为正反馈,它不能达到自动控制的目的,所以一般地说,反馈控制系统都是负反馈。

闭环控制系统的特点是通过闭环,随着扰动而变化的直接驱动信号,能使输出恢复到扰动前的状态,因此对扰动有补偿、抵抗的能力;能用精度低的元件(或部件)组成精度较高的控制系统。因为闭环后可能超调、振荡,所以稳定性问题很重要,为此,在系统中,通常要加入校正元件(环节)。

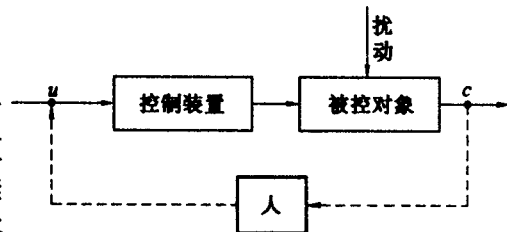


图 1.3 人直接参与工作的炉温控制系统方块示意图

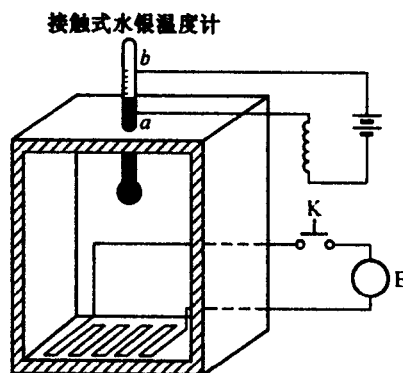


图 1.4 炉温闭环控制系统

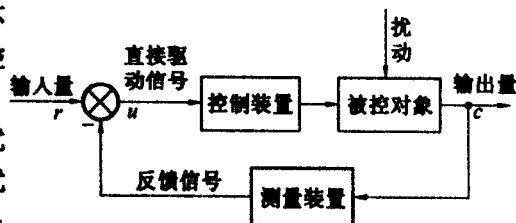


图 1.5 闭环控制系统方块示意图

1.3 控制系统的组成及性能要求

1.3.1 控制系统的基本类型

1. 恒值控制系统

如果控制信号为恒定常量,承受这类控制信号作用的闭环系统为恒值控制系统。自动调速系统,恒温控制系统及稳压、稳流、恒流的控制系统,均是恒值控制系统。电机调速系统如

图 1.6 所示。

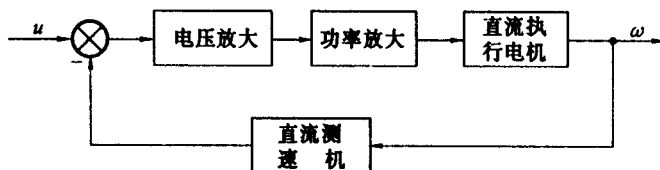


图 1.6 电机调速系统方块示意图

恒值控制系统的特点是控制信号是常量或是极为缓慢的信号。主要任务是补偿干扰,使系统输出保持恒值。

2. 随动控制系统

如果控制信号为任意时间函数,此函数在系统工作之前又是无法预先确定的,承受这类控制信号作用的闭环系统称为随动控制系统。工作机械的位置控制、导弹发射架的控制、火炮的控制均是随动控制系统。工作机械的随动控制系统如图 1.7 所示。

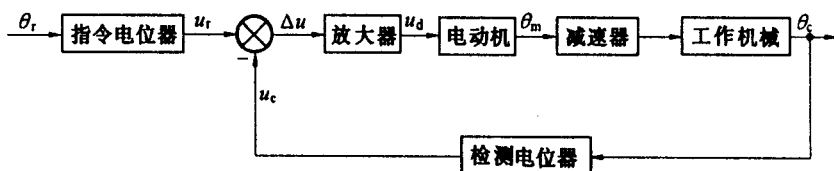


图 1.7 工作机械的随动控制系统方块示意图

随动控制系统的特点是以一定的准确度,使被控对象跟踪(复现)控制信号所给定的预先无法确定的运动规律。其主要任务是解决跟踪,而补偿干扰是次要的任务。

3. 计算机控制系统

计算机不只是作为计算工具,而且还作为系统的核心部件参与工作,以完成高精度复杂系统的控制。宇宙飞船姿态控制系统如图 1.8 所示。



图 1.8 宇宙飞船姿态控制系统方块示意图

计算机控制系统的特点是闭环内采用计算机控制,系统信号中既有模拟量,又有数字量。

1.3.2 控制系统的基本组成

由以上闭环系统实例不难看到,尽管控制系统由不同元件组成,其功能也不一样,但它们都是基于负反馈工作原理。相同的工作原理,决定它们必然具有类似的基本结构。同样,不同系统中,可采用不同元件去实现某种相同的功能。一般来说,一个闭环自动控制系统的组成如图 1.9 所示。

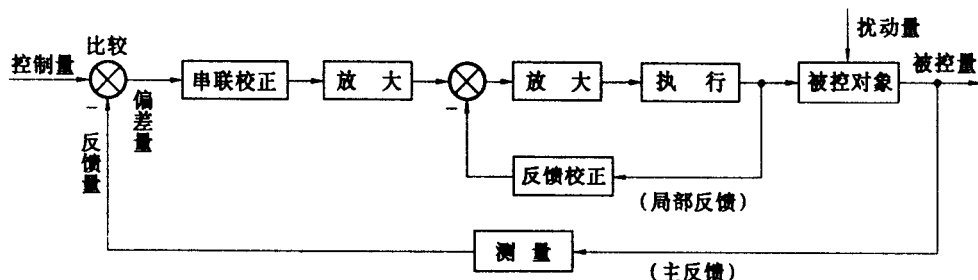


图 1.9 反馈控制系统的组成方块示意图

(1) 测量元件。测量元件是对系统被控量(输出量)进行测量的元件,因为它的精度直接影响控制系统精度,所以应尽可能用精度高的测量元件和合理测量线路。测量元件也称传感器。

(2) 比较元件。比较元件是用来对系统输出量与输入量进行代数运算并给出偏差信号的元件,起综合、比较与变换作用。有时,这个作用是由综合电路或测量元件一起完成的。这时这些元件统称误差检测元件。

(3) 放大元件。放大元件被用来对微弱的偏差信号进行放大,使其有足够的幅值与功率。

(4) 执行元件。执行元件是根据放大后的偏差信号,对被控对象执行控制任务,使输出量与希望值趋于一致。

(5) 被控对象。被控对象是指自动控制系统需要进行控制的机器、设备或生产过程。被控对象要求实现自动控制的物理量称为被控量或输出量。

(6) 校正元件。实践证明,按反馈原理由上述元件简单组合的闭环控制系统,往往不能完成任务。这是因为系统存在不利控制的因素,由于有干摩擦、死区,系统输出并不马上反映输入,只有当偏差信号大到一定时系统才有反应。由于惯性的存在,在反应控制信号过程中还可能产生振荡,严重时破坏系统正常工作。为了使系统能正常工作,要加入能消除或减弱上述不利影响的一些元件,把这样一类元件称为校正元件。

总之,可认为控制系统由对象、比较环节(包含测量元件、比较元件)、放大环节、执行环节和校正环节组成。一般来说,尽管反馈系统控制任务不同,以及使用元件的结构和能源形式不同,但就其信号传递、变换职能来说,都可抽象为上面的基本组成。

1.3.3 对控制系统的基本要求

为了实现自动控制的基本任务,必须对系统在控制过程中表现出的行为提出要求。对控制系统的基本要求,通常是通过系统反应特定输入信号(试验信号),例如单位阶跃信号的过渡过程及稳态的一些特征值来表示。其基本要求可综述为 3 个方面,即系统的稳定性、动态特性和稳态特性。

1. 系统的稳定性

若系统有扰动或给定输入作用发生变化,系统的输出量产生的过渡过程随时间增长而衰减,而回到(或接近)原来的稳定值,或跟踪变化了的输入信号,则称系统稳定。反之,输出

量过渡过程随时间增长而发散或持续等幅振荡,则称系统不稳定。

2. 系统的动态特性

由于系统的对象和元件通常都具有一定的惯性(如电磁惯性、机械惯性),又由于能源功率的限制,系统中的各种物理量(如电压、电流、位移、速度、温度等)的变化不可能突变。因此,系统从一个稳定状态过渡到另一个新的稳定状态,都需要经历一个过渡过程,它反映了系统的动态特性,通常用能描述过渡过程的特征值来表示。现以单位阶跃信号作用下,控制系统的过渡过程来说明,如图 1.10 所示。

(1) 系统上升时间 t_r 。系统过渡过程首先达到新的状态需要的时间为系统上升时间 t_r ,它是说明系统反应速度的量。

(2) 系统超调量 σ_p 。对于稳定系统而言,系统过渡过程的第一次超调量为最大,取其为性能指标之一。即

$$\sigma_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

它是说明系统阻尼性即振荡性的。阻尼大,振荡小,即超调量小,说明系统过渡过程进行得平稳。不同的控制系统,对超调量要求也不同。例如,一般调速系统要求 $\sigma_p = 10\% \sim 35\%$;轧钢机的初轧机要求 $\sigma_p < 10\%$ 。

(3) 系统的过渡过程时间 t_s 。系统的过渡过程时间 t_s 是从给定输入作用于系统开始,到输出量进入离期望值为 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 区域所需时间。当 $t \geq t_s$ 时,则有

$$|c(t) - c(t_s)| \leq \Delta \quad (\Delta = 0.05 \text{ 或 } \Delta = 0.02)$$

过渡过程时间 t_s 是说明系统惯性的,反映了系统的反应速度。例如,连轧机 $t_s = 0.2 \sim 0.5 \text{ s}$;造纸机 $t_s = 0.3 \text{ s}$ 。

(4) 系统振荡次数 N 。系统振荡次数 N 是指在过渡时间内,输出量在期望值上下摆动的次数。振荡次数 N 小,说明系统阻尼性好。例如,普通机床 $N = 2 \sim 3$ 次;造纸机传动 $N = 0$,即不允许有振荡。

3. 系统的稳态特性

对于稳定系统,输出的稳态值与其期望值之间出现的偏差称为系统的稳态误差 e_{ss} 。系统稳态误差的大小反映了系统的稳态精度,说明了系统的准确程度。

综上,对控制系统的性能要求可归结为稳定好、动作快、精度高。

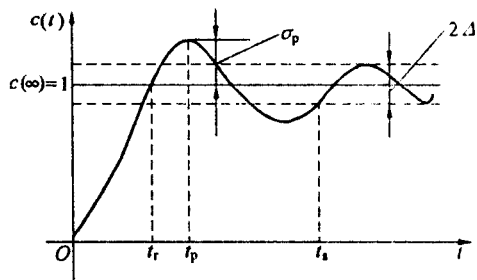


图 1.10 单位阶跃响应特性

1.4 控制系统示例

1. 液位控制系统

液位控制系统原理如图 1.11(a) 所示。其中控制部分(含比较、放大及产生控制信号)通过调整气动阀门的开度,对误差进行修正,使液位保持不变。其控制系统方块示意图如图 1.11(b) 所示。

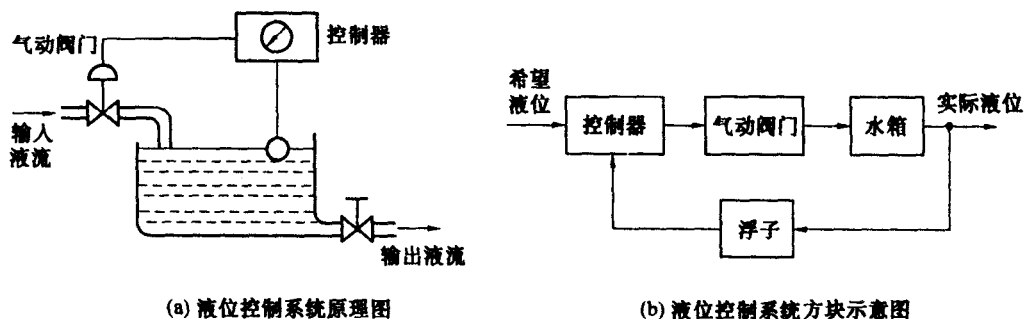


图 1.11 液位控制系统

2. 发动机速度控制系统

发动机速度控制系统如图 1.12 所示。该系统被控对象为发动机,被控量为发动机的速度。给定的希望速度与实际速度之差为误差信号,通过执行环节(导阀、动力油缸、控制阀门)产生控制信号(燃料数量),作用于发动机。

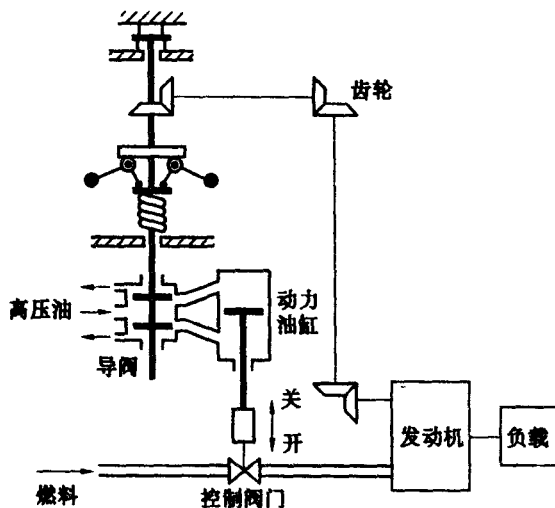


图 1.12 发动机速度控制系统

3. 客车内的温度控制系统

客车内的温度控制原理示意图如图 1.13 所示。要求的温度转变为电信号作为输入量,来自抽气机的空气温度反映了客车内温度,通过传感器转变为电信号,作为系统的被控量,即输出量,经反馈与输入量比较得误差量,经控制产生控制作用,通过控制冷水或暖水数量,使客车内温度趋于要求温度。当客车行驶过程中,客车内温度受到干扰,这来自周围环境的温度和太阳辐射热量不恒定,为此该系统在闭环反馈控制基础上,又采用了前馈控制,从而构成了系统的复合控制。

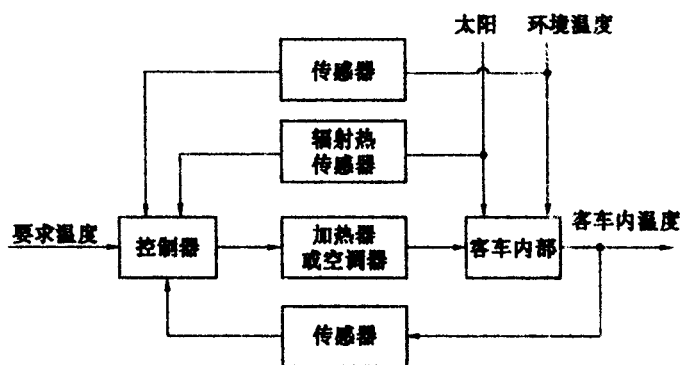


图 1.13 客车内的温度控制原理示意图

第2章 系统的传递函数与方块图

2.1 系统的微分方程

2.1.1 数学模型

根据系统性质,运用相应的物理学、化学、生物学等规律列写的方程式,代表系统动态性能的微分方程式的数学表达式,叫做数学模型。一个合理的数学模型,是指它既能正确地代表被控对象或系统的特性,即要求精确性,又必须是最简化的形式,即要求简化性。因此处理时,通常抓住主要因素(矛盾),忽略对系统特性影响较小的一些物理因素后,可以得到一个简化模型(起码适用于设计初步阶段)。大多数工程控制系统的简化数学模型是一个线性微分方程,这种控制系统称为线性系统。当微分方程的系数是常数时,相应的控制系统称为线性定常系统(或线性时不变系统)。当微分方程的系数是时间函数时,相应的控制系统称为线性时变系统。线性系统的重要特点是可以运用叠加原理,即几个外作用加于系统所产生的总响应,等于各个外作用单独作用时产生的响应之和。

如果系统中存在非线性特性,则需要非线性微分方程来描述,这种系统称为非线性系统。严格地说,实际控制系统的元件都含有非线性,如伺服电动机需一定的启动电源,放大器有饱和,齿轮减速器有间隙存在等等。所以在自然界中,真正的线性系统是不存在的,均为含有非线性特性的系统,虽然可用非线性微分方程描述,但求解很困难,除了可以用计算机进行数值计算外,大部分非线性系统可以在一定工作范围内用线性系统模型近似,称为非线性模型的线性化。工程实践中,常常把非线性特性在工作点附近用台劳级数展开的方法进行线性化。所以线性化是研究非线性系统的一种常用方法,凡是可以进行线性化的系统,都可以用线性理论进行分析,而线性微分方程的求解一般都有标准的方法。因此线性系统的研究具有重要实用意义。

建立微分方程式的一般步骤如下:

- ① 全面了解系统的工作原理,及由哪些部分如何联系在一起组成闭环系统;
- ② 一般从系统的输入端开始,根据各元件或环节所遵循的物理规律,依次列写它们的微分方程;
- ③ 将各元件或环节的微分方程联立起来消去中间变量,得到一个仅含有系统输入量与输出量的微分方程,即为整个系统的运动方程式。

2.1.2 随动系统微分方程

随动系统示意图如图 2.1 所示。

执行元件为交流两相电机,控制相电压与固定相构成 90° 相移,控制绕组与固定绕组空

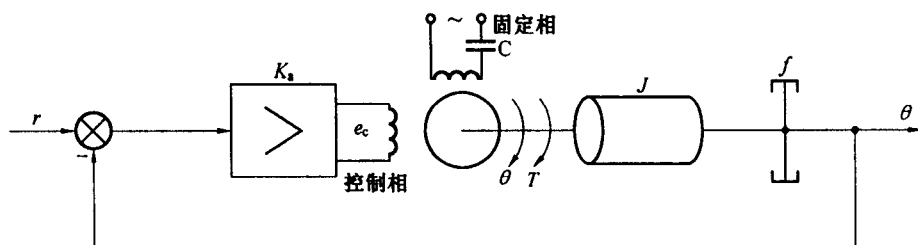


图 2.1 随动系统

间配置相隔 90° ，这样在电机轴上能有效产生转矩（两个定子绕组通过单相电源相连，但参考电压在固定相要通过电容产生 90° 相移）。

J 为电机转动惯量与负载折合到电机轴上转动惯量之和， f 为电机黏性摩擦系数与负载折合到电机轴上黏性摩擦系数之和。

放大元件放大倍数为 K_a ，有

$$e_c = K_a(r - \theta)$$

两相电机列转矩 - 速度曲线方程为

$$T = -K_n \dot{\theta} + K_c e_c \quad (2.1)$$

式中 K_n 、 K_c ——常数。

两相转矩平衡方程式为

$$T = J \ddot{\theta} + f \dot{\theta} \quad (2.2)$$

联解上述 3 个方程，得

$$J \ddot{\theta} + (K_n + f) \dot{\theta} = K_c K_a (r - \theta)$$

整理得闭环系统输入 $r(t)$ 与输出 $\theta(t)$ 的关系为

$$J \ddot{\theta} + (K_n + f) \dot{\theta} + K_c K_a \theta = K_c K_a r \quad (2.3)$$

2.1.3 调速系统微分方程

调速系统示意图如图 2.2 所示。

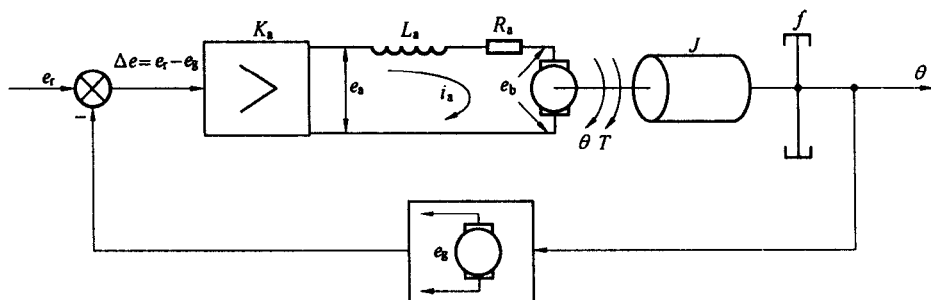


图 2.2 调速系统

执行元件为直流枢控电机， L_a 为电枢绕组自感， R_a 为导线电阻及铁、铜损耗， e_b 为电机反电势。