

自动控制原理

ZIDONG KONGZHI YUANLI

刘明俊 于明祁 杨泉林



国防科技大学出版社

前 言

随着工业生产和科学技术的发展,自动控制技术已广泛地应用于工农业生产、交通运输和国防、宇航等领域。“自动控制原理”就是专门研究有关自动控制系统之中的基本概念、基本原理和基本方法的一门课程,是工科院校自动控制专业或自动化专业学生必修的专业技术基础课之一。

国防科技大学自动控制系的“自动控制原理”课程于1991年被湖南省教委列为省重点建设课程。在课程小组成员的努力下,“自动控制原理”课程建设取得了可喜的成果,湖南省教委于1995年底组织专家评审,该课程被评为省优秀建设课程。根据当前国内外自动控制系统理论的发展,参考国内外有关教材,总结多年来的教学经验,面向培养跨世纪人材的需要,我们修定了教学大纲,突出基本内容、基本概念和基本方法以及对整体认识具有代表性的内容;在“自动控制原理”课的教学中,安排了一定时数的控制系统计算机辅助设计实践教学,把课堂教学与控制系统计算机辅助设计实践有机结合起来;开设了具有一定数量和质量的实验课项目,把本系的某些科研成果经过加工作为“自动控制原理”课的实验项目,并作为课程设计的典型实例;建立了“自动控制原理”试题库,并研制了更好的自动控制系统设计CAD软件。把课堂教学、CAD设计、实验课和课程设计作为“一条龙”,密切配合,有机联系,更好地培养学生的独立工作能力和动手能力。

在编写这本教材的过程中,我们总结多年的教学经验和某些科研成果,参考了国内外有关书籍和文献,同时也在教材中反映了课程建设的指导思想和成果。在注意全书的系统性和完整性的同时,力图贯彻“少而精”原则,理论联系实际,注意工程背景,在叙述方法上力求深入浅出,突出重点。

本教材重点介绍自动控制原理的经典理论内容。第一章、第五章、第六章由刘明俊编写,第三章、第四章、第七章由于明祁编写,第二章和第六章“磁悬浮球控制系统”部分由杨泉林编写。张良起教授仔细地审阅了全书,提出了许多宝贵的修改意见,作者在此表示由衷的感谢。

对于本书中存在的错误和不妥之处,恳请读者提出宝贵意见。

刘明俊

2000年1月

目 录

第一章 绪论

1.1 自动控制和自动控制系统	(1)
1.2 自动控制系统的工作原理	(1)
1.2.1 开环控制系统	(1)
1.2.2 闭环控制系统	(2)
1.2.3 复合控制系统	(3)
1.3 闭环控制系统的基本组成	(4)
1.4 对控制系统的基本要求	(5)
1.5 自动控制系统的分类	(6)
1.6 控制系统举例	(7)
1.7 自动控制理论的发展简史	(11)
1.8 控制系统的计算机辅助设计	(13)
1.8.1 控制系统的计算机辅助设计发展概况	(13)
1.8.2 控制系统计算机辅助设计的主要内容	(14)
习题	(15)

第二章 控制系统的数学描述

2.1 线性微分方程的建立及求解	(18)
2.2 传递函数	(20)
2.2.1 传递函数的定义和主要性质	(20)
2.2.2 典型元件的传递函数	(22)
2.3 控制系统的结构图及其等效变换	(34)
2.3.1 控制系统结构图的组成	(34)
2.3.2 系统结构图的等效变换和简化	(38)
2.3.3 用梅森公式求系统的传递函数	(42)
2.3.4 闭环控制系统的传递函数	(44)
2.4 自动控制系统例题	(45)
2.4.1 液位控制系统	(45)

2.4.2 位置伺服系统.....	(47)
2.4.3 速度控制系统.....	(50)
2.4.4 液压调速系统.....	(52)
习题	(54)

第三章 时域分析法

3.1 引言.....	(58)
3.2 线性系统的时域性能指标.....	(59)
3.3 一阶系统的时域分析.....	(60)
3.3.1 一阶系统的数学模型.....	(60)
3.3.2 一阶系统的单位阶跃响应.....	(61)
3.3.3 一阶系统的冲激响应.....	(62)
3.3.4 一阶系统的单位速度响应.....	(62)
3.3.5 一阶系统的单位加速度响应.....	(63)
3.4 二阶系统的时域分析.....	(63)
3.4.1 二阶系统的数学模型.....	(63)
3.4.2 二阶系统的单位阶跃响应.....	(64)
3.4.3 二阶系统的性能改善.....	(70)
3.5 线性控制系统的稳定性.....	(72)
3.5.1 稳定性的概念.....	(72)
3.5.2 线性系统稳定的充要条件.....	(73)
3.5.3 代数稳定性判据.....	(74)
3.6 稳态误差及其计算.....	(80)
3.6.1 误差和稳态误差.....	(80)
3.6.2 系统的类型与稳态误差系数.....	(82)
3.6.3 动态误差系数.....	(84)
3.6.4 扰动作用下的稳态误差.....	(87)
3.6.5 减小稳态误差的方法.....	(90)
习题	(91)

第四章 根轨迹法

4.1 引言.....	(96)
4.2 根轨迹的概念.....	(96)
4.3 绘制根轨迹的规则.....	(99)
4.4 非最小相位系统的根轨迹	(111)
4.4.1 正反馈系统的根轨迹	(111)

4.4.2 具有正反馈性质的系统根轨迹	(112)
4.4.3 时滞系统的根轨迹	(113)
4.5 广义根轨迹	(115)
4.6 增加开环零、极点对根轨迹的影响	(117)
4.6.1 增加开环零点对根轨迹的影响	(118)
4.6.2 增加开环极点对根轨迹的影响	(118)
4.6.3 增加开环偶极子对根轨迹的影响	(121)
4.7 用根轨迹分析系统性能	(122)
4.7.1 闭环零、极点分布与阶跃响应的定性分析	(122)
4.7.2 主导极点和偶极子的概念	(123)
4.7.3 用主导极点估算系统的性能	(123)
习题	(125)

第五章 频率响应法

5.1 频率特性	(130)
5.2 典型环节的频率特性	(132)
5.3 典型环节的对数频率特性	(139)
5.4 对数幅相图	(143)
5.5 系统开环频率特性的绘制	(144)
5.5.1 系统开环幅相特性的绘制	(144)
5.5.2 系统开环对数频率特性的绘制	(148)
5.5.3 由频率特性曲线求系统传递函数	(151)
5.6 基于频率特性的稳定性判据	(152)
5.6.1 基于幅相特性的稳定性判据——奈奎斯特稳定性判据	(152)
5.6.2 在对数坐标图上应用奈奎斯特稳定性判据	(158)
5.6.3 在对数幅相图上应用奈奎斯特稳定性判据	(159)
5.7 稳定裕度	(159)
5.8 闭环频率特性与时域性能指标	(164)
5.8.1 闭环频率特性主要性能指标	(164)
5.8.2 一阶系统和二阶系统频域指标与时域指标	(165)
5.8.3 高阶系统频域指标与时域指标	(167)
5.9 闭环频率特性的绘制	(168)
5.9.1 等M圆图和等N圆图	(168)
5.9.2 尼柯尔斯图	(170)
5.9.3 非单位反馈系统的闭环频率响应	(171)
5.10 开环对数频率特性与时域指标	(172)
5.10.1 开环对数幅频特性“三频段”概念	(173)

5.10.2 二阶系统最佳参考模型	(174)
5.10.3 期望开环对数幅频特性的确定	(175)
习题	(176)

第六章 控制系统补偿与综合

6.1 引言	(183)
6.2 频率响应法串联补偿	(184)
6.2.1 串联超前补偿	(184)
6.2.2 串联滞后补偿	(188)
6.2.3 串联滞后—超前补偿	(191)
6.2.4 按二阶最佳参考模型设计	(192)
6.2.5 按期望开环对数频率特性设计串联补偿装置	(193)
6.3 根轨迹法串联补偿	(195)
6.3.1 串联超前补偿	(196)
6.3.2 串联滞后补偿	(202)
6.4 PID 控制器的设计	(205)
6.4.1 PID 控制器的基本结构	(205)
6.4.2 比例微分控制器(PD)	(206)
6.4.3 比例积分控制器(PI)	(210)
6.4.4 比例积分微分控制器(PID)	(213)
6.5 反馈补偿	(216)
6.5.1 反馈补偿的功能	(216)
6.5.2 常用的反馈补偿形式	(216)
6.5.3 反馈补偿举例	(219)
6.5.4 基于根轨迹法确定反馈补偿参数	(221)
6.6 复合补偿	(222)
6.6.1 附加输入前馈补偿的复合控制系统	(223)
6.6.2 附加干扰补偿的复合控制系统	(225)
6.7 采用零、极点相消法实现补偿与综合	(228)
6.8 控制系统设计举例	(230)
6.8.1 磁悬浮球控制系统	(230)
6.8.2 导弹滚动回路姿态角稳定控制系统	(237)
6.8.3 天线方位角伺服系统	(241)
习题	(244)

第七章 非线性系统分析

7.1 引言	(248)
7.2 非本质非线性和本质非线性	(248)
7.2.1 非本质非线性及其线性化	(248)
7.2.2 本质非线性	(249)
7.2.3 非线性系统的特点	(251)
7.3 描述函数法	(253)
7.3.1 基本概念	(253)
7.3.2 典型非线性特性的描述函数	(254)
7.4 用描述函数法分析稳定性	(259)
7.4.1 在奈奎斯特图上的稳定性分析	(259)
7.4.2 在对数频率特性图上的稳定性分析	(261)
7.5 双输入描述函数	(266)
7.6 相平面分析法	(268)
7.7 相轨迹的作图法	(270)
7.7.1 解析法	(270)
7.7.2 等倾线法	(272)
7.8 相平面图的分析	(273)
7.8.1 由相平面图求时间解	(273)
7.8.2 线性控制系统的相平面分析	(275)
7.8.3 非线性控制系统的相平面分析	(279)
7.9 利用非线性特性改善系统的控制性能	(298)
习题	(305)

第一章 绪论

1.1 自动控制和自动控制系统

利用采集和加工的信息,按一定的控制规律产生控制作用,使受控客体(控制对象)达到所要求的性能或实现预定目标的系统称控制系统。控制系统通常都具有输入量、干扰量和输出量,系统本身通过这些量与外部进行联系,输出量与输入量之间的内部关系则取决于系统本身固有的运动规律和特性。控制对象是控制系统要进行控制的受控客体,如飞机、坦克、各种机器设备或生产过程等,控制对象又称被控对象。控制对象要实现控制的量称被控量,也称系统的输出,如飞机的姿态角、飞行速度、船舶的航迹、电机的转速、生产过程中的压力、温度、流量、湿度等。控制装置是指对控制对象进行控制的设备装置总体。输入量又称输入信号、给定值,它是表征输出量预期目标的量。

在没有人直接参与下,自动实现上述控制功能的控制系统称自动控制系统。在国民经济各部门,国防和宇航各个领域都广泛、大量地应用各种自动控制系统,如控制无人驾驶飞机按预定航迹飞行的飞行控制系统,飞机自动着陆系统,雷达自动跟踪系统,炉温控制系统,电机转速控制系统等。

1.2 自动控制系统的工作原理

自动控制系统种类繁多,其功能和组成也是多种多样的,就其工作原理来说,可分为开环控制、闭环控制和这两种控制的组合——复合控制。相应的控制系统称为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

1.2.1 开环控制系统

系统的控制输入不受输出影响的控制系统称开环控制系统。在开环控制系统中,输入端与输出端之间,只有信号的前向通道而不存在由输出端到输入端的反馈通路。因此,开环控制系统又称为无反馈控制系统,开环控制系统由控制器与控制对象组成。

图 1.1 给出了一个电加热炉炉温控制系统原理图。该控制系统要求炉温维持在给定值附近一定的范围内。给定炉温所要求的期望值(给定值,输入量)后,根据经验和实验数据,把调压器滑头置于某一给定位置上,接通电源后,通过电阻丝给电炉加热。该系统控制对象是加热炉,被控量是炉内温度,控制装置是调压器、电阻丝。由于电源的波动,炉门开闭的次数不同,炉内实际温度与期望的温度(给定值)会出现偏差,有时偏差可能较大。但该系统不可能由于存在偏差,自动调整调压器滑头的位置,通过改变电阻丝的电流来消除温度偏差,也就是说输出量对系统的控制作用没有任何影响。因此,该炉温控制系统是一

个开环控制系统,可用图 1.2 的方框图表示。

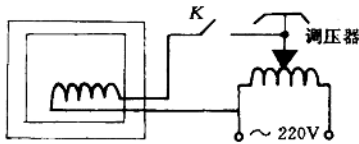


图 1.1 开环控制的电加热炉原理图

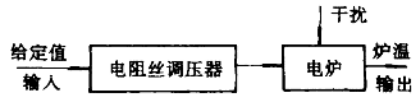


图 1.2 开环控制的电加热炉方框图

开环控制有两种形式:按给定值控制的开环控制,图 1.3(a)就是这种形式的开环控制;另一种形式是按干扰补偿的开环控制,如图 1.3(b)所示。该系统对干扰进行测量,利用测量得到的干扰值修正控制作用,补偿干扰对被控量的影响。从干扰作用端至输出端,也仅有顺向作用而无反向联系,因此,也是开环控制。这种控制方式的前提条件是干扰能够被测量。

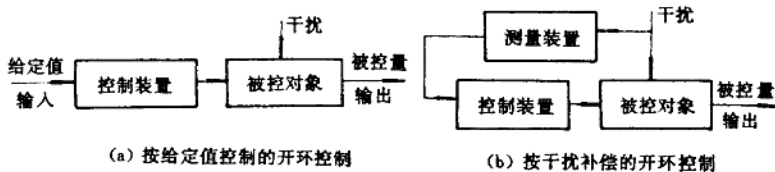


图 1.3 两种开环控制形式方框图

目前国民经济各部门都广泛应用开环控制系统,如自动售货机、自动洗衣机、产品自动生产流水线及交通指挥的红绿灯转换等。

1.2.2 闭环控制系统

闭环控制系统又称反馈控制系统。在闭环控制系统中,既存在由输入端到输出端的信号前向通路,也存在从输出端到输入端的信号反馈通道,两者组成一个闭合的回路。控制系统要达到预定的目的或具有规定的性能,必须把输出量的信息反馈到输入端进行控制。通过比较输入值与输出值,产生偏差信号,该偏差信号以一定的控制规律产生控制作用,逐步减小以至消除这一偏差,从而实现所要求的控制性能。闭环控制是最常用的一种控制方式,显然,有简单的闭环控制,也有复杂的闭环控制。闭环控制在工程系统和社会经济系统中正得到广泛的应用,在生命有机体的生长和进化过程中也普遍存在着这种反馈控制。生命有机体为适应环境的变化而作出有效的动作反应,主要是依靠这种反馈作用。人具有学习能力,能通过学习积累经验,用过去的经验来调节未来行为的策略。人具有通过学习来适应环境和改造世界的能力,本质上也是一种反馈控制。

图 1.4 给出了电加热炉炉温控制的闭环控制系统原理图。电加热炉内的温度要稳定在某一个给定的温度 T_r 值附近, T_r 值是由给定的电压信号 u_r 决定的,热电偶作为温度测量元件,测出炉内实际温度 T_c ,热电偶输出电压 u_c 比例于炉内实际温度 T_c ,误差信号反映炉内期望的温度与实际温度的偏差值,即 $e = u_r - u_c$ 。该误差信号经放大后控制电机旋转以带动变压器滑头移动,通过改变流过加热电阻丝的电流,消除温度偏差,使炉内实际温

度等于或接近预期的温度值。

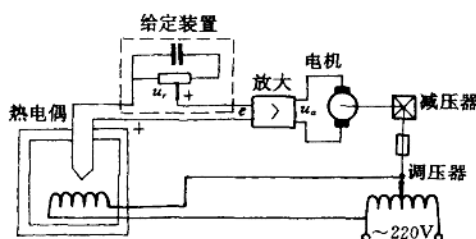


图 1.4 闭环控制的电加热炉原理图

如果某一时刻, $e < 0$, 表明 $T_r > T_c$, 电机旋转带动滑头向右移动, 通过电阻丝电流增大, 炉温升高, 直到偏差 e 等于或接近零, 这种状态称负反馈作用。如果 $e > 0$, 电机旋转使变压器滑头向左移动, 通过电阻丝电流减小, 炉温继续下降, 偏差 e 将不断增大, 这种状态称正反馈作用。概括地说, 若反馈信号与输入信号相减, 称为负反馈; 若反馈信号与输入信号相加, 则称正反馈。实现反馈, 首先要测量输出量, 然后再与输入量相比较而构成反馈回路。因此, 存在比较、测量装置是闭环控制系统的基本结构特征。电加热炉炉温闭环控制系统方框图如图 1.5 所示, 其中 $\otimes$ 表示比较环节, 箭头表示信号的作用方向, “-”号表示负反馈。

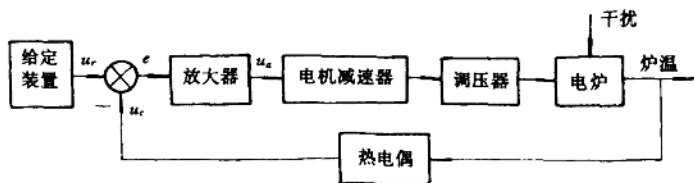


图 1.5 闭环控制的电加热炉方框图

一般地说, 开环控制系统结构比较简单, 成本较低。开环控制系统的缺点是控制精度低和抑制干扰能力差, 而且对系统参数变化很敏感。一般用于可以不考虑外界影响或精度要求不高的场合, 如洗衣机、步进电机控制及水位调节等。

同开环控制相比, 闭环控制具有很大优点。闭环控制系统, 不论是输入信号的变化, 或者干扰的影响, 或者系统内部的变化, 只要是被控量偏离了规定值, 都会产生相应的作用去消除偏差。因此, 闭环控制抑制干扰能力强, 与开环控制相比, 对参数变化不敏感, 并能获得满意的动态特性和控制精度。但是引入反馈增加了系统的复杂性, 如果闭环系统参数的选取不适当, 系统可能会产生振荡, 甚至系统失稳而无法正常工作, 这是自动控制理论和系统设计必须解决的重要问题。

1.2.3 复合控制系统

反馈控制是在外部作用(输入信号或干扰)对控制对象产生影响后才能作出相应的控制, 尤其是控制对象具有较大延迟时, 反馈控制不能及时地影响输出的变化。前馈控制能

预测输出随外部作用的变化规律,在控制对象还没有产生影响之前就作出相应的控制,使系统在偏差即将产生之前就注意纠正偏差。前馈控制和反馈控制相结合构成了复合控制,也就是说复合控制是开环控制和闭环控制相结合的一种控制方式。复合控制是构成高精度控制系统的一种有效控制方式,使自动控制系统具有更好的控制性能。复合控制基本上具有两种形式:按输入前馈补偿的复合控制和按干扰前馈补偿的复合控制,如图 1.6 所示。

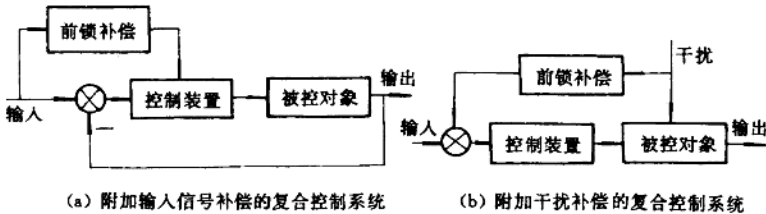


图 1.6 复合控制系统

1.3 闭环控制系统的基本组成

图 1.7 是一个典型的闭环控制系统方框图,该图表示了组成该系统的各环节(或装置)在系统中的位置及相互关系。一个典型的闭环控制系统应该包括给定装置、比较装置(用 $\otimes$ 表示)、放大装置、测量装置、串联校正和反馈校正装置、执行机构及控制对象,校正装置又称补偿装置。

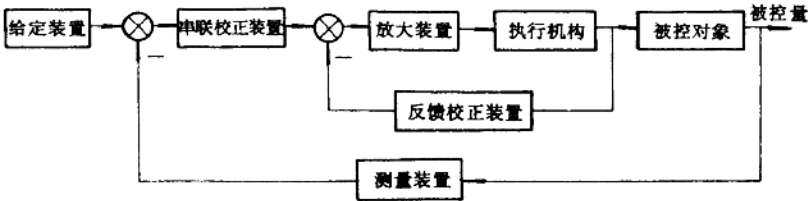


图 1.7 闭环控制系统基本组成(纯直流控制方案)

给定装置:用于产生给定值或输入信号,如图 1.4 中产生给定值 u_r 的电位计装置。

比较装置:用来比较输入给定值与输出值,并形成偏差信号,如差动放大器、桥式双电位计装置、自整角机、旋转变压器、机械差动装置等。

测量装置:测量被控量和某些中间变量,用来产生反馈信号。测量装置有位置传感器、速度传感器、压力、温度、流量传感器等等,如电位计、热电偶、测速发电机、角度编码器、速率陀螺等。有些测量装置可以同时实现测量和比较的双重作用,如旋转变压器、桥式电位计、自整角机等。通常要求测量装置有较高的灵敏度,较宽的测量范围,较好的线性度,并且测量精度要满足控制系统的要求。

放大装置:对偏差信号进行幅值和功率放大,满足驱动执行机构的要求。

执行机构:直接对控制对象进行操纵的装置,如直、交流电机,液压马达等。执行机构根据输入能量不同可分为电动、气动和液压三类。电动执行机构安装灵活,使用方便,在自动控制系统中应用最广;气动执行机构结构简单,重量轻,工作可靠,并且有防爆特性,在中、小功率的化工石油设备和机械工业自动生产线上应用较多;液压执行机构功率大,快速性好,运行平稳,广泛用于大功率的控制系统。

补偿装置:分为串联和反馈补偿装置,用以改善和提高控制系统的性能。

图 1.7 给出的控制方案是纯直流控制结构,这种结构简单,容易实现,在控制系统中获得了广泛的应用。但是由于直流放大器的漂移较大,限制了增益不能很高,因此,系统的精度受到限制。工程上还广泛应用一种交直流混合控制方案,该控制结构的方框图如图 1.8 所示。采用交流调制的测量元件,测量元件输出经交流放大、相敏检波、滤波后,形成直流控制信号,经直流补偿,放大后送至执行机构,这种控制结构有助于系统精度的提高。

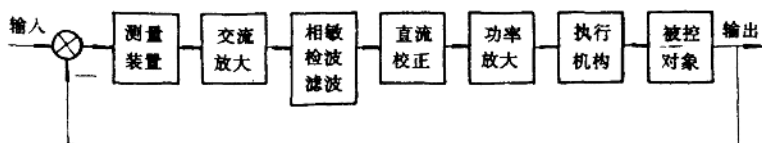


图 1.8 交直流混合控制方案结构方框图

1.4 对控制系统的基本要求

由于控制系统总是含有储能元件或惯性元件,因而系统的输出量和反馈量总是迟后于输入量的变化。因此,当输入量发生变化时,输出量从原平衡状态变化到新的平衡状态总是要经历一定时间。在输入量的作用下,系统的输出变量由初始状态达到最终稳态的中间变化过程称过渡过程,又称暂态过程、瞬态过程。过渡过程结束后的输出响应称为稳态过程。系统的输出响应由暂态过程和稳态过程组成,工程上的各类控制系统都存在暂态过程。

自动控制系统的种类繁多,控制功能、性能要求往往也不一样,但对控制系统的共同要求一般可归结为下面三点:

(1) 稳定性:稳定性是系统受到短暂的扰动后其运动性能从偏离平衡点恢复到原平衡状态的能力。控制系统都含有储能或惯性元件,若闭环系统的参数选取不合适,系统会产生振荡或发散而无法正常工作。稳定性是一切自动控制系统必须满足的最基本要求,对稳定性的研究是自动控制理论中的一个基本问题。

(2) 良好的过渡过程性能:描述过渡过程性能可以用平稳性和快速性加以衡量。平稳性指系统由初始状态运动到新的平衡状态时,具有较小的过调和振荡性;系统由初始状态运动到新的平衡状态经历的时间表示系统过渡过程的快速程度。良好的过渡过程性能是指系统运动的平稳性和快速性满足要求。

(3) 稳态误差:稳态误差是在系统过渡过程结束后,期望的稳态输出量与实际的稳态输出量之差。控制系统的稳态误差越小,说明控制精度越高。因此,稳态误差是衡量控制系统性能好坏的一项重要指标,控制系统设计任务之一就是在兼顾其他性能指标的情况下,使稳态误差尽可能小或者小于某个允许的限制值。

上面提到的三点是对控制系统的基本要求,对于不同用途的控制系统,还有一些其他要求,如:被控量应能达到的最大速度,最大加速度,最低速度以及在低速工作时的运动平稳性;对参数变化敏感要求,即要求控制系统参数在某个范围内变化时,仍能稳定地工作;可靠性,成本要求;还有对环境的要求,如环境的温度、湿度、腐蚀性和防爆性等。

1.5 自动控制系统的分类

自动控制系统的功能和组成多种多样,因而控制系统有多种分类方法。按其工作原理可分为开环控制、闭环控制和复合控制;按其数学模型可以分为线性系统和非线性系统,定常系统和时变系统;按系统内部的信号特征可分为连续系统和离散系统;也可按系统的功能分类,如温度控制系统、位置控制系统等;按系统装置类型可分为机电系统、液压系统和电气系统等;按系统输入信号变化规律可分为伺服控制系统、恒值控制系统和程序控制系统等。

1. 线性系统与非线性系统

根据所描述的系统的数学模型,凡是由线性微分方程或线性差分方程描述的系统称为线性系统,而由非线性方程描述的系统则称为非线性系统。线性系统具有可叠加性和均匀性。当有几个输入信号同时作用于系统时,系统的总响应等于每个输入信号单独作用所产生的响应之和,就表明系统具有可叠加性,即:当输入信号为 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 时,系统输出响应分别为 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$,则当输入为 $r_1(t) + r_2(t)$ 时,输出为 $c_1(t) + c_2(t)$ 。

所谓均匀性是指当输入信号乘一常数时,则输出响应也倍乘同一常数,即:输入为 $r(t)$,输出为 $c(t)$,当输入为 $kr(t)$,则输出为 $kc(t)$,其中 k 为任意常数。

线性系统的一个重要性质是系统的响应可以分解为两个部分,即零输入响应和零状态响应之和。前者指由非零初始状态所引起的响应;后者是指仅由输入引起的响应,两者可以分别计算。这一性质为线性系统的分析和研究带来很大方便。

非线性系统不满足叠加原理,即不具有可叠加性。非线性控制系统的形成基于两类原因,一是控制系统中包含有不能忽略的非线性因素或非线性元件,二是为提高控制性能或简化控制系统结构而人为地引入非线性元件。非线性系统的分析远比线性系统复杂,缺乏能统一处理的有效数学工具,因此非线性控制系统至今尚未像线性控制系统那样建立一套完美的理论体系和设计方法。

严格地说,实际的物理系统都不可能是完全的线性系统,但是在很多情况下通过近似处理和合理简化,大量的物理系统都可在足够准确的和在一定的范围内化作线性系统来进行分析。

2. 时变系统与定常系统

特性随时间变化的系统称时变系统,特性不随时间变化的系统称定常系统,又称时不

变系统。描述其特性的微分方程或差分方程的系数不随时间变化的系统是一个定常系统。定常系统分为定常线性系统和定常非线性系统。对于线性定常系统,不管输入在哪一时刻加入,只要输入的波形是一样的,则系统输出响应的波形也总是同样的;对于时变系统,其输出响应的波形不仅与输入波形有关,而且还与输入信号加入的时刻有关,这一特点,增加了对时变系统分析和研究的复杂性。

严格地说,没有一个系统是定常的,例如系统的特性或参数会由于元件的老化、温度变化或其他原因而随时间变化,引起模型中方程的系数发生变化,但是,在许多情况下,在所考察的时间间隔内,其参数的变化相对于系统运动变化要缓慢得多,则该系统可近似作为定常系统处理。在工程中,应用最广的是所谓冻结系数法,这一方法的实质是在系统工作时间内,分段将时变系数“冻结”为常值。通常,冻结系数法只对参数变化比较缓慢的时变系数才可行。对时变系统,可以通过对参数进行在线估计的同时,采用自适应控制方法实现控制。

3. 连续系统与离散系统

系统各组成部分的变量都具有连续变化形式的系统称连续系统,即系统中各部分的信号均为时间变量的连续函数,连续系统的数学模型是用微分方程描述的。系统一些组成部分的信号具有离散信号形式的系统称离散系统。离散系统的特点是,在系统中的一处、几处或全部的信号为脉冲序列或数码的形式,其信号在时间上是离散的。离散系统的数学模型可用差分方程描述。

对一个控制系统,如果信号在离散时间上取值,其幅值是连续变化的,则称该系统为采样数据控制系统;如果它的幅值也是离散或量化的,则称为数字控制系统。

1.6 控制系统举例

1. 恒值调节系统

设系统的输入值为零或为某一常值,当系统受到各种干扰作用时,该系统能维持输出量与输入量相应的恒值关系,称恒值调节系统,又称镇定系统。常见到的有压力调节系统,温度调节系统,水位调节系统,稳压电源,导航稳定平台,船舶稳定系统都属于这一类系统,恒值控制系统在工业、农业、国防等部门有广泛的应用。

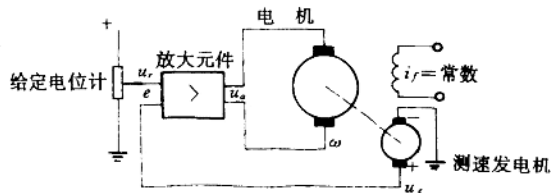


图 1.9 调速系统原理图

图 1.4 给出的炉温控制系统是一个恒值控制系统。该控制系统的控制功能是在各种干扰作用下,维持炉温不变。图 1.9 给出的是一个调速系统工作原理图。控制任务是保持

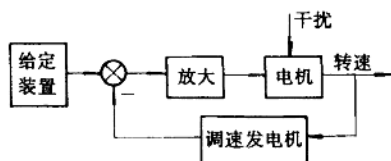


图 1.10 调速系统方框图

电机转速恒定。当电机负载加大或减小时,电机转速下降或上升,测速发电机输出电压变化,与给定 u_r 值比较后,偏差信号 $e(t)$ 将增大或减小,使电机电枢电压 u_a 也跟着增大或减小,从而使电机转速得到补偿,而维持电机转速恒定。调速系统的方框图如图 1.10 所示。

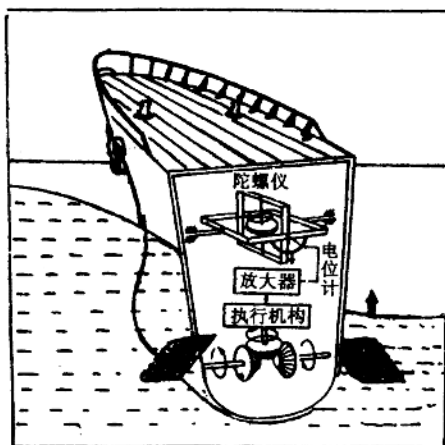


图 1.11 船舶稳定系统工作原理图

图 1.11 给出了船舶稳定系统的工作原理图,该系统能减小风浪所引起的船舶摇摆,力图使船体保持稳定。陀螺仪测出船体的摇摆角,并给出与此角成正比的信号,该信号经放大变换后,送给执行机构,按一定的控制规律分别驱动船舶的左鳍和右鳍,产生与船体摇摆方向相反的力矩,以减少船体摇摆,达到稳定船体的目的,其方框图如图 1.12 所示。

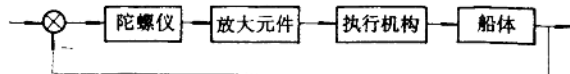


图 1.12 船舶稳定系统方框图

2. 伺服系统

伺服系统,又称随动系统、跟踪系统,要求系统的输出以一定的精度和快速性跟踪输入信号变化的自动控制系统。输入量的变化可以是随机、任意的,不能预先知道的。在很多情况下,伺服系统专指被控量是机械位移(或位移、速度、加速度)的闭环控制系统,即要

求输出的机械位移(或转角)跟踪输入的位移(或转角)。伺服系统要求高精度的测量元件。伺服系统按所采用的执行机构的类型可分为机电伺服系统、液压伺服系统和气动伺服系统等。伺服系统最初用于船舶的自动驾驶,火炮控制和指挥仪中,后来逐步推广到很多领域,如天线位置伺服系统,导弹和飞船的制导等。

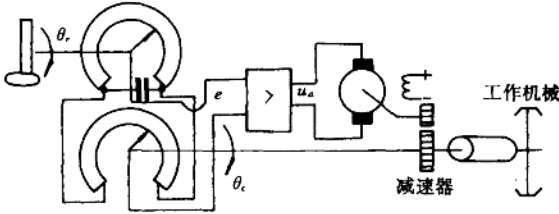


图 1.13 位置伺服系统工作原理图

图 1.13 给出了一个位置伺服系统的工作原理图,控制的任务要求工作机械跟踪输入指令机构同步转动,即要求工作机械输出角位置 θ_c 以一定的精度和快速性跟踪输入指令转角位置 θ_r 。在这个系统中,控制对象是工作机械,被控量是工作机械输出角位置 θ_c ,输入量是 θ_r ,测量装置是两个相同的电位计,分别把转角 θ_c 、 θ_r 转换成电压 u_c 和 u_r ,其偏差信号经放大元件放大后送至执行机构,驱动工作机械转动。双电位计结构实现测角和比较作用。位置伺服系统方框图如图 1.14 所示。

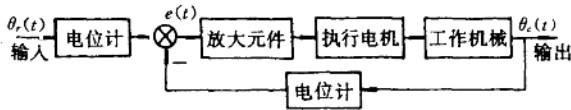


图 1.14 位置伺服系统方框图

图 1.15 是一个火炮伺服系统原理图,火炮伺服系统的任务是控制火炮跟踪空中目标,以便适时开炮,并提高命中精度。图中一对自整角机组成测角线路,“Ⅰ”为自整角发射机,它的转子轴与系统的输入轴相固联;“Ⅱ”为自整角接收机,它的转子轴与火炮的转轴相固联,此轴为系统的输出轴。这一对自整角机组成的测角线路,测出系统的输入轴与输出轴之间的角度差,并转换成相应的电压,其电压的幅值与角度差成正比,而输出电压的相位由差角的符号决定,即

$$u_1 = K_1(\theta_r - \theta_c)$$

式中 K_1 是自整角机的传递系数,单位是伏/密位或伏/度。电压信号 u_1 经交流放大、相敏检波、滤波、直流校正、放大后,通过执行机构,控制火炮的方位角和俯仰角以一定的精度和快速跟踪输入信号 $\theta_r(t)$ 的运动。输入信号 $\theta_r(t)$ 是指挥仪根据炮弹的飞行弹道、空中目标的速度、高度、距离和飞行方位等数据,计算出使炮弹能击中目标时 t 时刻火炮口所应有的角度值,火炮伺服系统的方框图如图 1.16 所示。为了提高火炮伺服系统的跟踪精度,采用复合控制系统,指挥仪引出的方位角信号 $\theta_r(t)$ 经前馈补偿装置产生前馈补偿信号送

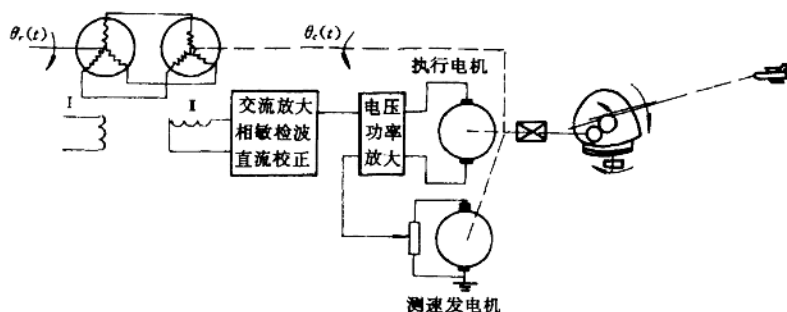


图 1.15 火炮伺服系统工作原理图

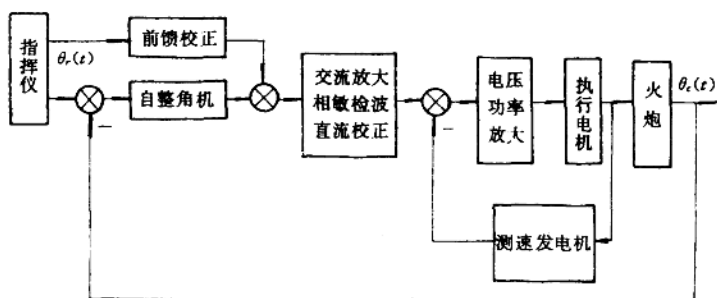


图 1.16 火炮伺服系统方框图

入放大器。

3. 火力控制系统

火力控制系统包括防空系统、航空火力控制系统、船载火力控制系统、反坦克导弹控制系统等。火力控制系统常用于地面和舰上火炮、防空火炮、轰炸机防御火炮以及船上和飞机上的火箭、导弹的控制。

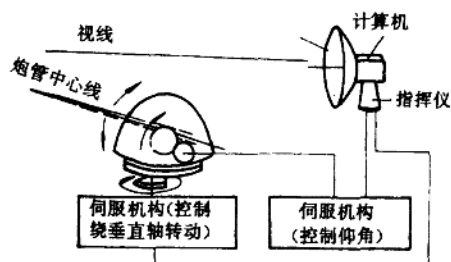


图 1.17 自动防空火力控制系统工作原理图

图 1.17 是一个自动防空火力控制系统的工作原理图,测量元件是装在火炮指挥仪上的雷达,用以测量目标飞机的方向和距离,自动跟踪目标。根据天线的角度和速度以及达