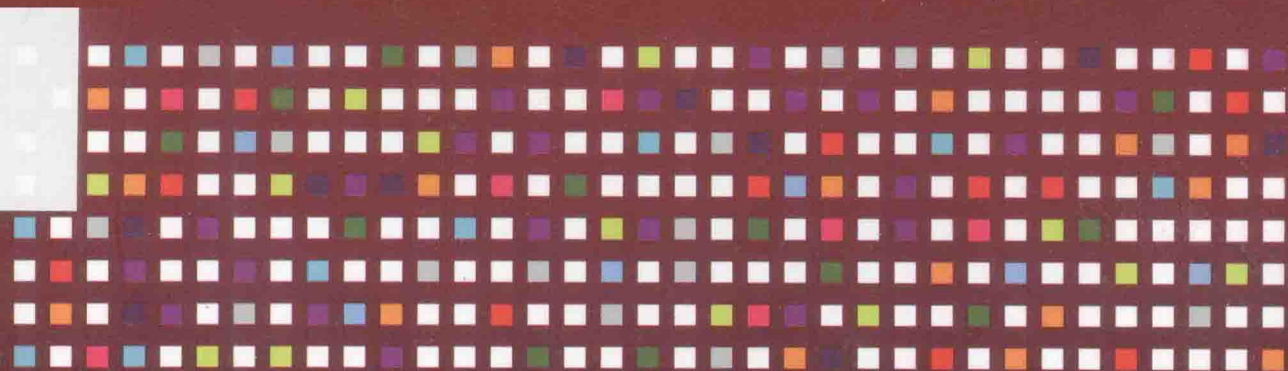


朱宁 主编

自动控制理论



清华大学出版社

自动控制理论

朱宁 主编

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书依据高等院校本科自动控制理论课程的教学要求,从重视理论基础与基本概念、拓宽专业面出发,结合电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化以及相近专业的知识结构和教学特点,比较全面和详细地介绍了经典控制理论的基本内容,包括自动控制系统的概念和数学模型、时域分析法、根轨迹法、频率法和频率法校正等,此外还包括离散控制系统分析等内容。

教材编写力求从理论出发,突出实用性。重视理论的系统性,简化繁琐的推导,重视培养读者的自学能力,培养读者的分析问题、解决问题以及综合分析设计问题的能力。

本书适用专业为:电气工程及其自动化,机械设计及其自动化,电子信息工程。部分内容(例如控制对象方面例题)稍加修改,也可以适应其他如建筑环境与能源应用工程专业等。本教材是与上述的教学学时和专业相配套的教学参考书(80学时及以上的还需要略微补充一点内容),同时也可作为学生自学教材。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论/朱宁主编.--北京:清华大学出版社,2014
ISBN 978-7-302-37692-7

I. ①自… II. ①朱… III. ①自动控制理论—高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 202544 号

责任编辑:邹开颜 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:13.5 字 数:328 千字

版 次:2014 年 9 月第 1 版 印 次:2014 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:30.00 元

产品编号:053856-01

目前普通高等院校“自动控制理论(原理)”教学学时大致有三种,48学时、64学时和80学时。自动控制理论(原理)涉及专业比较多,教学内容以经典控制理论为主,控制对象依据专业而不同。本书主要适用专业为:电气工程及其自动化,机械设计及其自动化,电子信息工程。部分内容(例如控制对象方面的例题)稍加修改,也可以适应其他如建筑环境与能源应用工程专业等。本教材是与上述的教学学时和专业相配套的教学参考书(80学时及以上的还需要略微补充一点内容),同时也可作为学生自学教材。

在编写《自动控制理论》的过程中,我们重视基础理论知识,加入拉普拉斯变换内容,从第3章开始,加入MATLAB仿真的内容。通过细化根轨迹和频率特性绘图过程,使学生更好地掌握图形绘制,掌握自动控制系统的分析和设计方法。在注重应用的前提下,精选教学内容和配套习题,在文字叙述方面力求清晰、准确,教材内容适度。

本教材的所有编者长期工作在教学第一线,也有很强的自动控制和电气控制的实践经验,我们力求将这些经验融入本教材中。

本书第1章由赵浩老师编写,第2章和第6章由朱宁老师编写,第3章由童佳老师编写,第4章由丁立军编写,第5章由高慧敏老师编写,第7章由林立老师编写。陈叠峰和任美华两位同学编写了部分的MATLAB章节。

由于编者水平有限、编写时间紧迫,教材中难免有缺点和错误,恳请读者批评指正,使我们有更大的进步。

编者

2014年8月

第 1 章 自动控制的基本知识	1
1.1 自动控制的发展历史和基本概念	1
1.2 自动控制的基本控制方式	4
1.3 自动控制系统的分类	5
1.4 自动控制系统的性能指标	6
习题 1	6
第 2 章 控制系统的数学模型	11
2.1 数学模型的基本概念	11
2.2 控制系统数学模型——微分方程	11
2.3 拉普拉斯变换与反变换	14
2.4 传递函数	23
2.5 控制系统的动态结构图、信号流图与梅逊公式	26
习题 2	39
第 3 章 线性系统的时域分析法	43
3.1 系统分析的基本假设条件和分析指标	43
3.2 一阶系统的时域分析	44
3.3 二阶系统的时域分析	47
3.4 高阶系统的时域响应	56
3.5 线性定常系统的稳定性	57
3.6 线性系统的稳态误差计算	66
3.7 用 MATLAB 辅助分析控制系统时域性能	71
习题 3	72
第 4 章 控制系统的根轨迹法	75
4.1 根轨迹的基本概念	75
4.2 绘制根轨迹的规则和方法	77
4.3 广义根轨迹	89

4.4	控制系统根轨迹的性能分析	93
4.5	用 MATLAB 绘制根轨迹	98
	习题 4	99
第 5 章	控制系统的频域分析法	103
5.1	频率特性的基本概念	103
5.2	对数频率特性及其绘制	106
5.3	幅相频率特性及其绘制	116
5.4	稳定判据	119
5.5	稳定裕度	124
5.6	系统的开、闭环频率特性与阶跃响应的关系	127
5.7	MATLAB 在频率法中的应用	130
	习题 5	133
第 6 章	控制系统的校正	135
6.1	控制系统校正的基本概念	135
6.2	基本控制规律和常用校正装置	138
6.3	频率校正方法	146
6.4	反馈校正	155
6.5	复合控制方法	159
6.6	Simulink 在控制系统仿真中的应用	162
	习题 6	163
第 7 章	离散控制系统	164
7.1	离散控制系统基本概念	164
7.2	信号的采样与复现	165
7.3	离散控制系统的数学模型	171
7.4	离散系统分析	186
7.5	应用 MATLAB 进行离散系统分析	203
	习题 7	207
	参考文献	210

第 1 章

自动控制的基本知识

自动控制技术广泛应用于各领域,例如国防领域中的导弹和火箭弹的控制和导引系统、自动火炮的控制系统,工业领域中的焊接、冲压、机械加工、热处理、电镀等各个系统的电气控制,家用电器中电冰箱的自动恒温系统、空调的自动恒温系统,等等。基本上有电器的地方都能应用到自动控制的理论,学好自动控制理论将为学习相关课程如自动控制系统、过程控制、电力系统自动化、计算机控制技术、楼宇自动化等打下良好基础。

1.1 自动控制的发展历史和基本概念

1.1.1 自动控制理论的发展历史

自动控制系统的早期应用可追溯到两千年前的古埃及和古希腊。如图 1-1 所示的水钟示意图,它利用水流的恒定控制,使水位按时间线性升高,带动浮子向上移动,浮子连着齿轮等机械机构,最终带动从动齿轮使时间指示针按预定规律变化,用于指示时间。公元 6 世纪后引入到中国,按照相应原理,又产生了几种中国式的水钟。

又如中国汉代的指南车,如图 1-2 所示。小车上方一般有一个木人,其手指方向为预定前进方向(假定是指南方向),小车行进过程中无论左转还是右转前进,利用齿轮和绳索,联动木人所在机构,始终使小车在行进过程中控制木人手指方向不变。

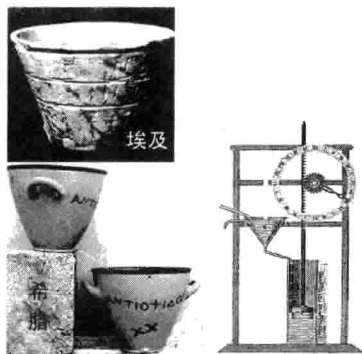


图 1-1 古代埃及和希腊水钟示意图

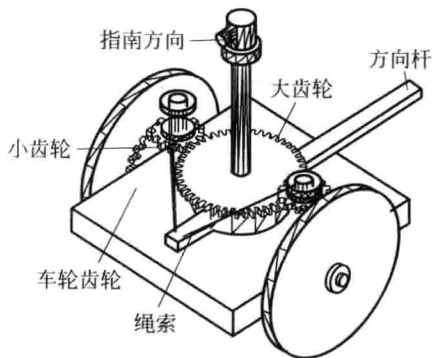


图 1-2 中国汉代指南车示意图

被认为最早的自动控制理论的工程应用是 1788 年英国科学家基米·瓦特 (James Watt) 在解决蒸汽机的速度控制问题时专门设计的飞球调节器,可以在蒸汽机车运行时使速度自动稳定在给定值。由于在应用时已经注意到相关物理量会出现振荡现象,因此已经

应用到了数学模型分析法,后来麦克斯韦(Maxwell)对微分方程系统的稳定性进行了理论研究,之后又出现了古尔维茨(Hurwitz)和劳斯(Routh)等人的稳定性研究成果,控制器的设计和校正问题的研究是由迈纳斯基(Minorsky)等人在1922年开始研究的,其研究成果可以看成是现在广泛应用的PID控制器的前身,而在1942年,齐格勒-尼科尔斯(Ziegler-Nichols)提出了PID调节器参数的设计方法,其方法对当今的PID整定仍有影响。

经典自动控制理论的基本分析设计方法是频域分析法和根轨迹法。系统的频域分析技术是在奈奎斯特(Nyquist)和伯德(Bode)等关于通信学科的频域研究工作的基础上建立起来的,哈里斯(Harris)于1942年提出了传递函数的概念首先将通信学科的频域技术移植到了控制领域,构成了控制系统频域分析技术的理论基础。埃文斯(Evens)等在1946年根据反馈系统中开、闭环传递函数之间的内在联系,提出的线性反馈系统求解闭环特征方程根的图解分析方法即根轨迹法。频域分析法和根轨迹法是经典自动控制理论的核心,这两种方法的首要问题是系统稳定性,动态性能要求是使系统按预定要求动态变化,满足相关性能要求。经典自动控制理论只涉及单输入、单输出系统。1948年,美国数学家维纳(Wiener)出版了《控制论》,是控制理论的里程碑,在理论上第一次系统地阐述了控制理论,从而将控制理论带到了一个新时代。

由于具有多输入和多输出的现代设备变得越来越复杂,所以需要大量方程来描述控制系统,就需要用现代控制理论来解决。

1.1.2 自动控制的基本概念

在我们周围,存在着许多能实现自动控制的自然和人造系统。

人体本身就是一个自动控制系统。考虑我们的体温保持在 37°C 的自动温控系统、心跳控制系统、眼球聚焦系统。从肾脏、肺和肝脏的功能来看,它们也可以称为自动系统。利用水流做动力的水车可以用于灌溉,也可以用于较复杂的自动控制的机械系统,如磨盘、打夯。

在人们的现代家居中,温度由空调自动温度控制系统来调节,热水器由水箱中的加热温度控制来完成,全自动洗衣机由自动控制系统来完成整个洗衣过程等。在大型办公楼或旅馆,电梯调度系统按照快捷和方便的原则搭载乘客。汽车导航控制系统使汽车自动保持在设定车速,刹车防抱死系统自动防止汽车在湿滑的路面上打滑。在工业制造业,自动控制在自动化生产和运行中发挥着巨大的作用,在加工工件的焊接、冲压、机械加工、热处理、电镀过程中,自动控制贯穿了整个加工过程。自动控制理论大规模应用以来,极大地促进了科学技术的进步,各生产行业随着自动化程度的提高,大大提高了生产率,促进了经济增长,改善了人们的生活质量。

我们可以从人工控制和自动控制的实例开始认识自动控制理论。

图1-3是一个热处理炉的人工恒温控制系统,由于炉温受各种干扰的影响,在进行热处理时温度不能保持恒定,为了使温度变化尽可能小,就安排一名操作人员经常监视温度检测显示仪表上的温度显示值,当温度不符合要求时,就调节自耦变压器,使温度恢复到规定值。这样就可以在某种程度上使温度按照指定规律变化,达到控制的目的。

图1-4是一个热处理炉的自动恒温控制系统,热电偶通过信号处理放大电路输出为表达温度的电压信号,经与给定的电压信号比较,产生一个偏差信号,由此,再经过放大电路、触发电路去控制可控硅交流变压电路,使之产生电炉丝供给电流。当温度低于给定值时偏

差控制使供给电流增大,提高温度并逐渐达到给定值;当温度高于给定值时偏差控制使供给电流减小,减小温度并逐渐达到给定值。这样就完成了自动控制所要求的控制。

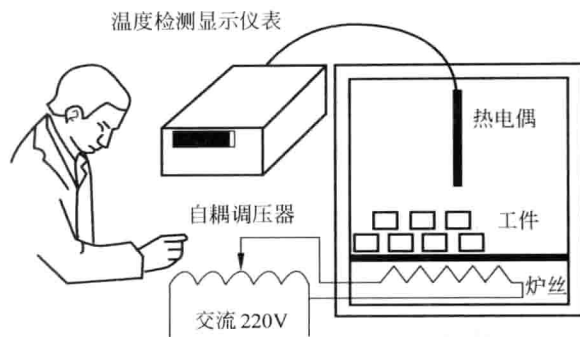


图 1-3 热处理炉人工恒温控制系统

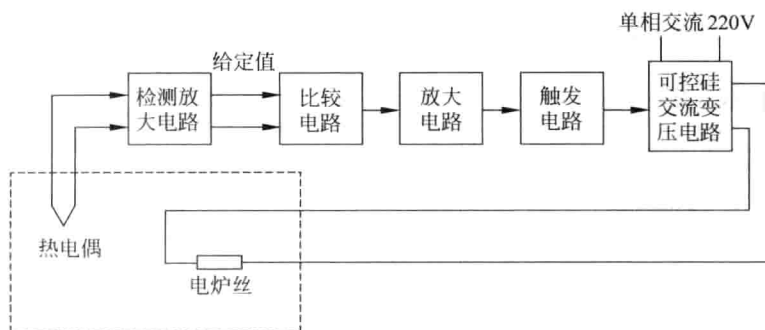


图 1-4 热处理炉的控制系统方框图

在自动控制实例中,热处理炉称为**被控制对象**,其温度称为**被控制量**(简称**被控量**),热电偶感知温度通过比较电路、放大电路、触发电路和可控硅交流变压电路改变通过电炉丝的电流引起温度变化并使温度按预定的温度保持恒定,这种控制方法称为**反馈控制**。自动控制就是在无人直接参与的情况下,利用控制装置,使工作机械或生产过程中的被控对象的某一个被控物理量按预定的规律运行。

典型的自动控制系统如图 1-5 所示。这个反馈控制系统中,基本组成有:给定值和反馈值的**比较元件**,它将测量元件检测到的被控量反馈值与给定值进行比较,“—”号代表两者符号相反,即负反馈;测量与信号处理是将被控量检测并进行处理的电路,称为**反馈元件**或**反馈系统**;串联校正正是根据系统的要求进行校正设计的环节,称为**校正元件**或**校正系统**;功率放大是将前级信号变为与执行系统相匹配的控制信号,驱动执行系统改变被控量,使之朝预订的规律变化;执行系统是实现控制系统的关键,是**被控量**受控按预定规律变化的执行部件或系统。在自动控制系统中还会有局部反馈通路以及由它构成的内回路,包含一个主反馈通路的系统称**单回路系统**;有两个或两个以上反馈通路的系统称**多回路系统**。经典控制理论中一般有一个输入量、一个输出量和一个或几个扰动量。输入量一般是给定值;输出量一般是被控量;扰动是系统不希望有的外作用,它破坏有用输入对系统的控制,在实际系统中,扰动总是不可避免的,它可能作用于系统中的任何元部件上,可能同时受到几种

扰动作用,例如,电源电压波动,环境湿度、压力以及负载的变化。

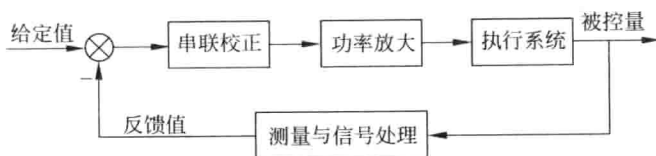


图 1-5 自动控制系统的组成

自动控制理论是研究自动控制系统组成、进行系统分析设计的一般性理论,是研究自动控制过程共同规律的技术学科。

1.2 自动控制的基本控制方式

按结构来分类分为开环控制系统和闭环控制系统。另外,开环控制系统也包括按干扰补偿或对被控量间接控制系统;闭环控制系统也包括复合控制(按干扰补偿结合反馈控制)。

1.2.1 开环控制系统

某直流电机开环控制系统如图 1-6 所示,要求电机可以调速。

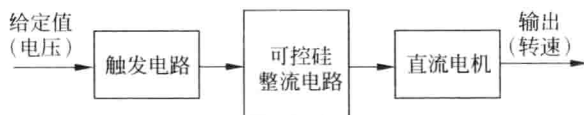


图 1-6 直流电机开环控制系统方框图

在某给定值电压作用下可控硅整流电路输出一定的直流电压,直流电机将根据负载情况在相应的转速下工作。调节给定值,转速将发生变化。由于没有测量反馈系统及相应控制,在负载扰动下,转速将按其机械特性发生变化。

这种控制的特点是:系统仅受输入量控制;输出端和输入端之间不存在测量反馈回路;输出量在整个控制过程中对系统的控制不产生任何影响。显然这种系统由于没有自动调节能力,遇到负载变化或其他扰动量变化时,其输出将有变化。

如上所述,如果控制系统的被控量发生变化而对控制系统没有控制作用,则相应的系统称为开环系统。

在开环系统中为了改善系统的性能,有的增加了干扰补偿控制或者被控量间接控制。例如,某干扰补偿控制实例示意如图 1-7 所示,焊接的被控量是温度,焊接时为了使温度基本恒定,应保证焊接电流或两极焊接电阻基本保持一个固定值,这需要在焊接前对焊接工件进行表面工艺处理。焊接电流较难精确检测,因此焊接电器一般控制要求是使焊接电压基本恒定。焊接一般是大负载,影响焊接电压的最大干扰来自供给电源因负载变化而变化,因此电路采用了对电源电压补偿控制,从而保证焊接电压基本不变,间接保证了焊接电流的要求。

又如某 LED 路灯控制器原理框图如图 1-8 所示,该系统的要求是被控制量 LED 灯珠的光强保持恒定,而采用电流反馈,能够达到灯珠的电流恒定的目的。

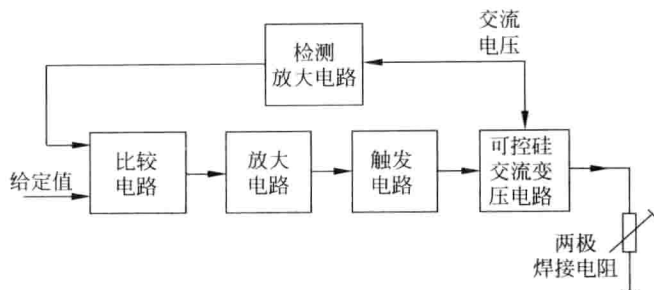


图 1-7 点缝焊电压扰动补偿控制系统框图

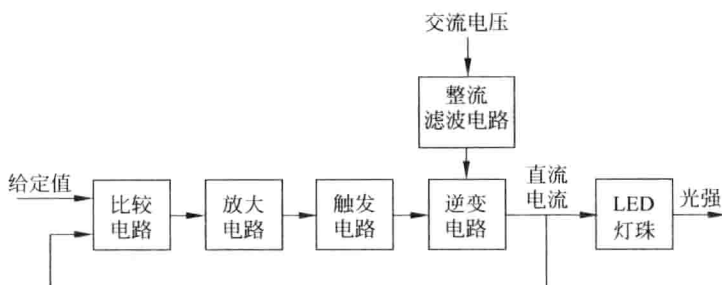


图 1-8 LED 路灯控制器原理框图

1.2.2 闭环控制系统

图 1-4 所示的热处理炉的自动恒温控制系统就反映了闭环控制系统的结构，闭环控制系统是一种能对输出量与参考输入量进行比较，并力图保持两者之间的既定关系的系统，它利用输出量与输入量的偏差来进行控制。

在闭环系统中为了提高系统的动态性能，会采用多环控制的策略，如直流电机经常采用电流环和转速环双环控制，在保证电流不过载的情况下提高系统的动态响应性能。

1.3 自动控制系统的分类

1.3.1 按输入量的特征分类

(1) 恒值控制系统。系统输入量为恒定值，控制任务是保证在任何扰动作用下系统的输出量为恒值。实际应用如：恒温箱控制，电网电压、频率控制等。

(2) 随动系统(伺服系统)。输入量的变化规律不能预先确知，其控制要求是输出量迅速、平稳地跟随输入量的变化，并能排除各种干扰因素的影响，准确地复现输入信号的变化规律。实际应用如：仿形加工系统、火炮自动瞄准系统等。

1.3.2 按系统中传递信号的性质分类

(1) 连续控制系统。系统中各部分传递的信号为随时间连续变化的信号。连续控制系统通常采用微分方程描述。

(2) 离散(数字)控制系统。系统中某一处或多处的信号为脉冲序列或数字量传递的系统。离散控制系统通常采用差分方程描述。

1.3.3 按系统中元件的性质分类

(1) 线性系统和非线性系统。

系统内部各组成元件为线性参数则称为线性系统,否则称为非线性系统。

(2) 定常系统和时变系统。

系统内部各组成元件为时不变参数则称为定常系统,否则称为时变系统。

本书介绍的内容以连续线性定常系统和恒值控制系统为主。

1.4 自动控制系统的性能指标

对于自动控制系统,首先要求系统的稳定性,然后是系统在整个平衡过程中的动态性能以及动态稳定后的稳态特性。

1. 稳定性

稳定性是系统的关键能力,主要是指系统在给定值作用下从静止状态到达指定状态的能力,也包括系统在某一个状态下由于扰动的原因偏离原来的运行值后恢复到指定状态的能力。稳定性是控制系统正常工作的先决条件。控制系统稳定性由系统结构所决定,与外界因素无关。稳定性由控制系统内部储能元件的能量不可能突变所产生的惯性滞后作用所导致。

2. 动态性能

系统从一个状态到另一个状态的动态过渡过程要用动态性能描述。

系统动态过程主要表现在振荡及恢复到平衡状态的过程。当输出量偏离平衡状态时,稳定的系统能够使其输出量能随时间的增长收敛并回到初始平衡状态,即满足稳定性要求。

动态性能指标主要反映系统的时间响应速度(快速性)、过渡过程中的振荡程度(相对稳定性)和最终平衡点位置(准确性)。

3. 稳态性能

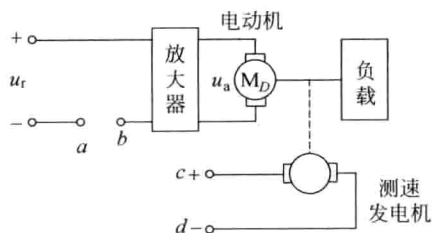
稳态性能一般以稳态误差来衡量。稳态误差是指系统的调整(过渡)过程结束而趋于稳定状态时,系统输出量的实际值与给定量之间的差值。

习题 1

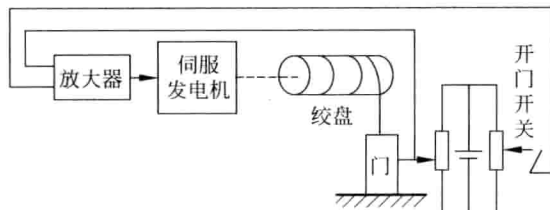
1-1 根据图示的电动机速度控制系统工作原理图,(1)将 a, b 与 c, d 用线连接成负反馈状态;(2)画出系统方框图。

1-2 图示为仓库大门自动控制系统原理示意图。试说明系统自动控制大门开闭的工作原理,并画出系统方框图。

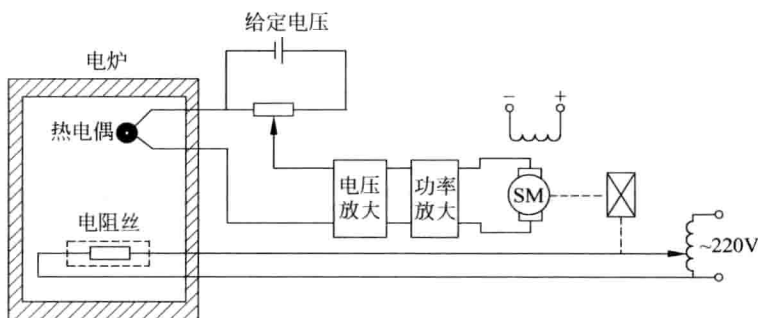
1-3 图示为工业炉温自动控制系统的工作原理图。试分析系统的工作原理,指出被控对象、被控量和给定量,画出系统方框图。



题 1-1 图

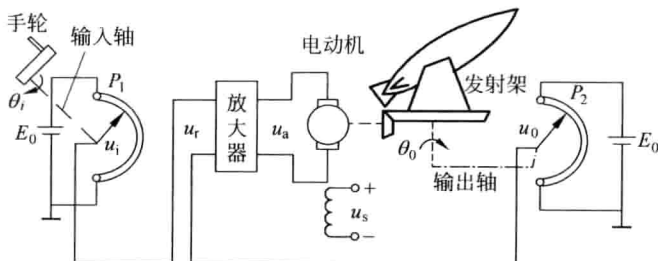


题 1-2 图



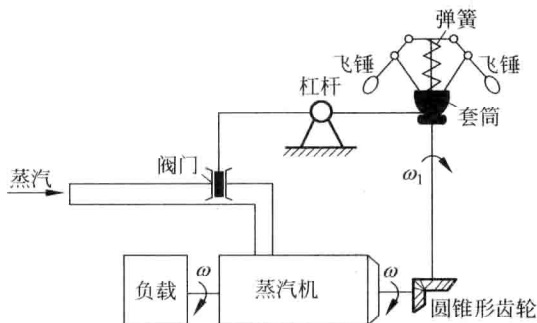
题 1-3 图

1-4 图示为控制导弹发射架方位的电位器式随动系统原理图。图中电位器 P_1 、 P_2 并联后跨接到同一电源 E_0 的两端，其滑臂分别与输入轴和输出轴相联结，组成方位角的给定元件和测量反馈元件。输入轴由手轮操纵；输出轴则由直流电动机经减速后带动，电动机采用电枢控制的方式工作。试分析系统的工作原理，指出系统的被控对象、被控量和给定量，画出系统的方框图。



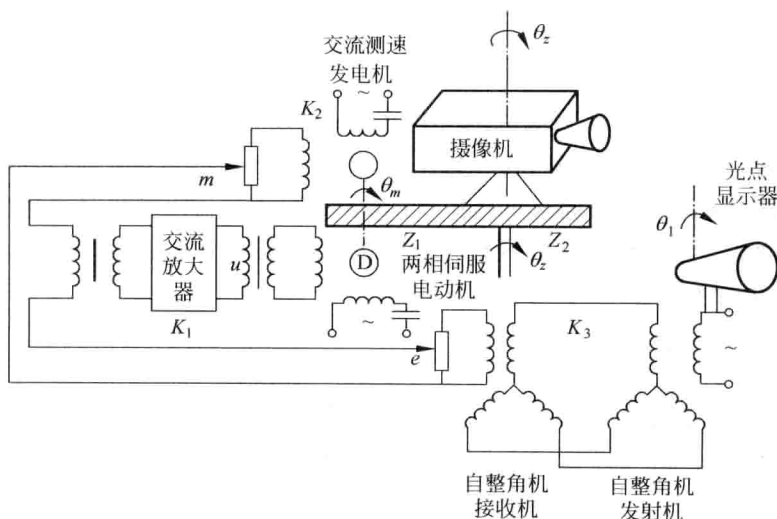
题 1-4 图

1-5 采用离心调速器的蒸汽机转速控制系统如图所示。其工作原理是：当蒸汽机带动负载转动的同时，通过圆锥齿轮带动一对飞锤作水平旋转。飞锤通过铰链可带动套筒上下滑动，套筒内装有平衡弹簧，套筒上下滑动时可拨动杠杆，杠杆另一端通过连杆调节供气阀门的开度。在蒸汽机正常运行时，飞锤旋转所产生的离心力与弹簧的反弹力相平衡，套筒保持某个高度，使阀门处于一个平衡位置。如果由于负载增大使蒸汽机转速 ω 下降，则飞锤因离心力减小而使套筒向下滑动，并通过杠杆增大供气阀门的开度，从而使蒸汽机的转速回升。同理，如果由于负载减小使蒸汽机的转速 ω 增加，则飞锤因离心力增加而使套筒上滑，并通过杠杆减小供气阀门的开度，迫使蒸汽机转速回落。这样，离心调速器就能自动地抵制负载变化对转速的影响，使蒸汽机的转速 ω 保持在某个期望值附近。指出系统中的被控对象、被控量和给定量，画出系统的方框图。



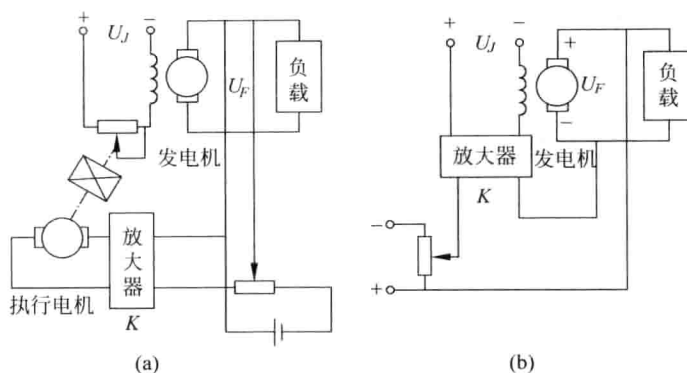
题 1-5 图

1-6 摄像机角位置自动跟踪系统如图所示。当光点显示器对准某个方向时，摄像机会自动跟踪并对准这个方向。试分析系统的工作原理，指出被控对象、被控量及给定量，画出系统方框图。



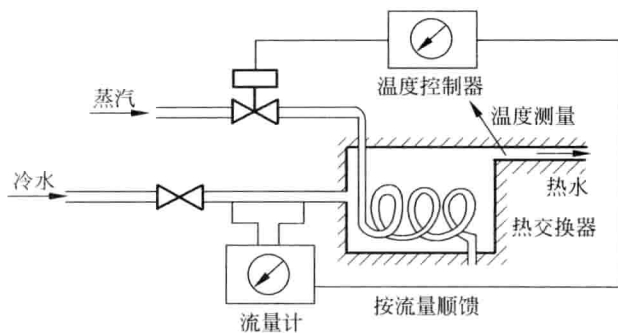
题 1-6 图

1-7 图(a),(b)所示的系统均为电压调节系统。假设空载时两系统发电机端电压均为110V,试问带上负载后,图(a),(b)中哪个能保持110V不变,哪个电压会低于110V,为什么?



题 1-7 图

1-8 图示为水温控制系统示意图。冷水在热交换器中由通入的蒸汽加热,从而得到一定温度的热水。冷水流量变化用流量计测量。试绘制系统方框图,并说明为了保持热水温度为期望值,系统是如何工作的?系统的被控对象和控制装置各是什么?



题 1-8 图

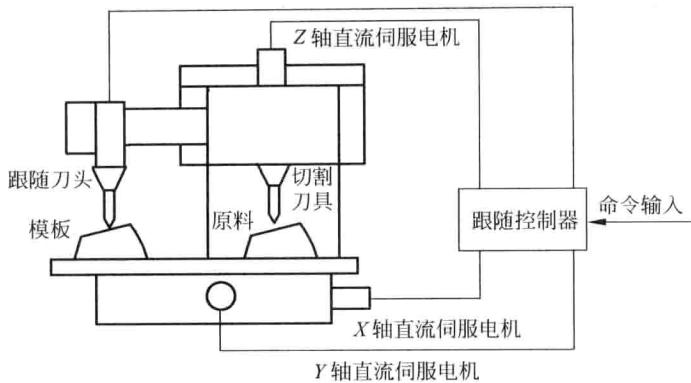
1-9 许多机器,像车床、铣床和磨床,都配有跟随器,用来复现模板的外形。题 1-9 图就是这样一种跟随系统的原理图。在此系统中,刀具能在原料上复制模板的外形。试说明其工作原理,画出系统方框图。

1-10 图(a),(b)所示均为调速系统。

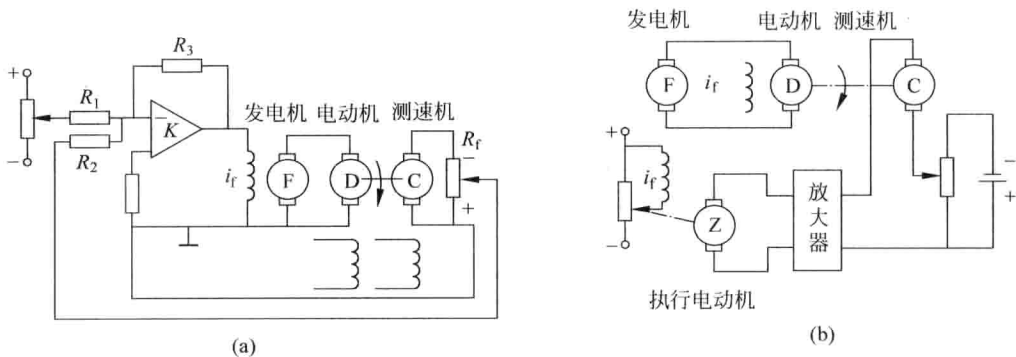
(1) 分别画出图(a)、图(b)对应系统的方框图。给出图(a)正确的反馈连线方式。

(2) 在恒值输入条件下,图(a)、图(b)中哪个是有差系统,哪个是无差系统,说明其道理。

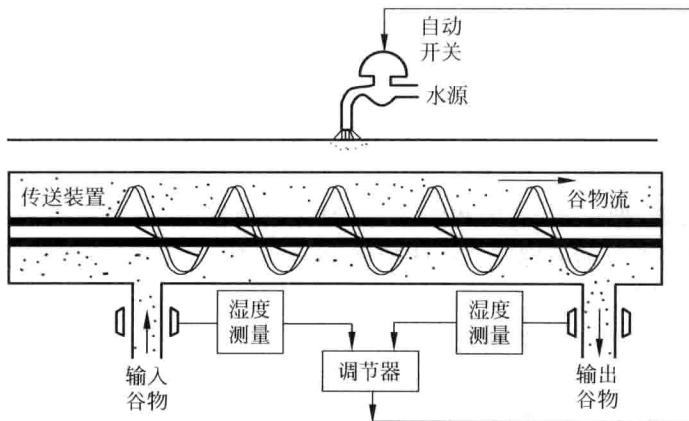
1-11 题 1-11 图为谷物湿度控制系统示意图。在谷物磨粉的生产过程中,有一个出粉最多的湿度,因此磨粉之前要给谷物加水以得到给定的湿度。图中,谷物用传送装置按一定流量通过加水点,加水量由自动阀门控制。加水过程中,谷物流量、加水前谷物湿度以及水压都是对谷物湿度控制的扰动作用。为了提高控制精度,系统中采用了谷物湿度的顺馈控制,试画出系统方框图。



题 1-9 图



题 1-10 图



题 1-11 图

分析和设计自动控制系统,首要任务是建立系统的数学模型。通过数学模型才能从理论上研究控制系统的工作原理及运动变化过程中的规律。

2.1 数学模型的基本概念

数学模型是对系统运动规律的描述,分为静态数学模型和动态数学模型。静态数学模型一般以代数方程来表示,表示系统在动态平衡时各相关物理变量的关系。描述系统动态关系的模型是动态数学模型,线性定常控制系统的数学模型为常系数线性微分方程,由微分方程可以得到其他形式的系统动态数学模型,如传递函数和频率特性等。

建立数学模型的方法分为解析法和实验法。解析法是根据系统及元件各输入输出变量之间所存在的物理、化学、机械、电子等已有的定律而产生的数学表达式,所谓已有的定理定律是通过实验方法和理论推导所得到的。当各变量之间关系复杂,且没有已有定理定律来描述时,则需要通过实验来确定其数学关系式,称为实验法。

2.2 控制系统数学模型——微分方程

按照控制系统各物理量之间的动态关系,采用解析法或实验法可列出相应的微分方程组,一般削去中间变量留下输入和输出变量,使化简后的微分方程只有输入和输出变量,通常情况下这时输入为给定变量,输出为被控量;也可以根据分析的需要指定系统内部某物理量为输入或输出量,化简过程中有意留下指定的输入和输出量。

2.2.1 解析法建立控制系统微分方程的步骤

- (1) 确定系统的输入和输出量(分析和研究需要)。
- (2) 按照系统顺序列写原始方程。利用适当的物理和化学定理定律等列写各变量的动态方程,构成微分方程组。
- (3) 消去中间变量,得到关于输入输出变量的微分方程。
- (4) 控制系统微分方程标准化。微分方程按输出变量在等号左边,输入变量在等号右边,并按微分阶数降幂排列,方程左边零阶输出变量系数为1。

2.2.2 举例

例 2-1 图 2-1 为由 RC 组成的四端无源网络,试列写以 u_r 为输入量, u_c 为输出量的微