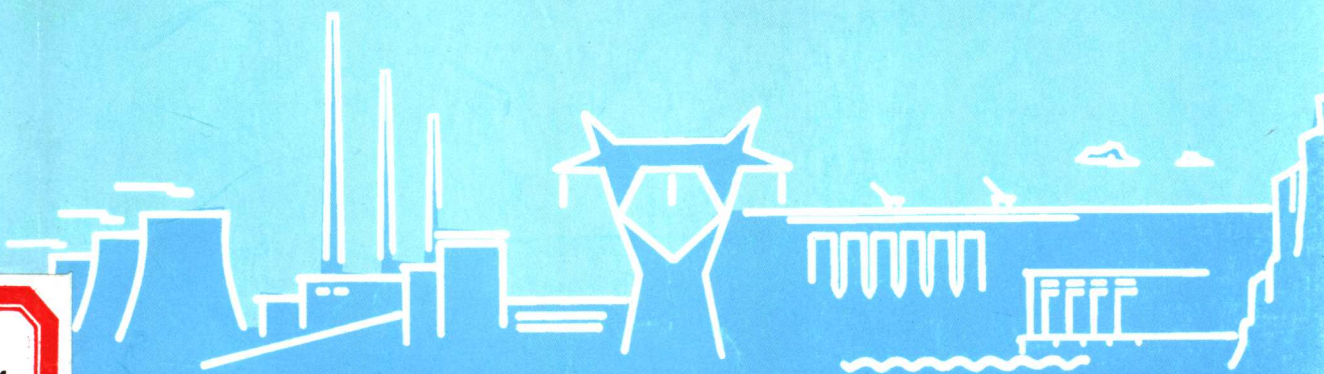


高等学校教材

自动控制理论解题指导

文 锋 贾光辉 主编



3-44
2

中国电力出版社

高等学校教材

自动控制理论解题指导

中国电力出版社

内 容 提 要

本书为《自动控制理论》教科书的学习指导性配套用书。书中各章结构相同,即按内容提要、例题及解答、练习题、参考答案的顺序分为四节。其中,练习题部分又按:经典练习题(A类)、普通练习题(B类)、考研试题选编(C类)分别编写,并附有参考答案。

本书各例题和练习题系由有关老师多年教学积累精选而成,题目有代表性,便于读者按需要选择学习参考。本书可作为高等院校理工科自动化类专业学生学习使用,也可供从事自动化类工作的工程技术人员自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论解题指导/文锋,贾光辉主编.-北京:
中国电力出版社,2000.7

高等学校教材

ISBN 7-5083-0373-3

I. 自… II. ①文…②贾… III. 自动控制理论
-高等学校-解题 IV. TP13-44

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第35615号

中国电力出版社出版

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

2000年10月第一版 2000年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 9.25印张 220千字

印数 0001—2500册 定价 12.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

《自动控制理论》是高等院校理工科多数专业的主干课程，是自动化技术的理论基础。该课程理论性强，数学公式和计算量多，因此要学好本课程，除掌握电路、电机学、电子技术和高等数学的相关理论外，还必须学习多种有关工程计算方法。这就需要系统的例题学习和练习题的演练。为帮助读者学好本课程，我们在总结多年教学经验的基础上，将自己的教学积累和收集到的国内外教科书上的练习题精选汇编，与我们 1998 年所编《自动控制理论》教科书相对应，编写了这本《自动控制理论解题指导》。

考虑教学辅助用书的特点，受篇幅所限，本书共选入例题及练习题 360 个。每章精选例题 10 个左右，练习题 35 个左右，并分为三种类型：A 类，经典练习题，10 个，供教师布置课外作业使用；B 类，普通练习题，20 个，供扩展和选择练习使用，以上 A、B 类练习题皆附有参考答案；C 类为考研试题选编，每章 5 题，供报考研究生复习参考之用，该类题系从清华大学、浙江大学、华中理工大学等全国 20 多所重点大学及中科院等多所研究院所近年来考研试题中精选编入。

本书由山东工业大学文锋、贾光辉主编，山东轻工业学院常易康、山东工程学院李素玲、山东工业大学张利、山东建材学院黄明键、山东矿业学院常青等老师参加编写。山东工业大学张荣祥教授主审，对全书进行了全面指导。

本书适于高等院校自动化类专业相关教师、学生学习使用，也可供从事自动化类工作的工程技术人员自学参考。



前言

第一章 控制系统的基本概念	1
第一节 内容提要.....	1
第二节 例题及解答.....	1
第三节 练习题.....	6
第四节 参考答案.....	9
第二章 控制系统的数学模型	11
第一节 内容提要	11
第二节 例题及解答	12
第三节 练习题	20
第四节 参考答案	27
第三章 控制系统的时域性能分析	32
第一节 内容提要	32
第二节 例题及解答	33
第三节 练习题	39
第四节 参考答案	44
第四章 频率响应法	47
第一节 内容提要	47
第二节 例题及解答	47
第三节 练习题	55
第四节 参考答案	61
第五章 根轨迹法	66
第一节 内容提要	66
第二节 例题及解答	67
第三节 练习题	74
第四节 参考答案	79
第六章 控制系统的校正	83
第一节 内容提要	83
第二节 例题及解答	87
第三节 练习题	95
第四节 参考答案.....	101
第七章 非线性系统分析	104
第一节 内容提要.....	104
第二节 例题及解答.....	104

第三节	练习题	113
第四节	参考答案	120
第八章	线性离散控制系统	124
第一节	内容提要	124
第二节	例题及解答	125
第三节	练习题	133
第四节	参考答案	138

第一章 控制系统的基本概念

第一节 内 容 提 要

本章的任务是使学生通过习题的练习,确切了解开环控制与闭环控制的区别,以及实现闭环控制的基本原理和组成环节;理解什么是被控对象,什么是被控制量,什么是控制量,什么是干扰量,通过本章还将使学生学会由系统原理图抽象成方框图的方法。

自动控制系统中常用的术语有:

(1) 自动控制。无需人经常直接参与,而通过某种装置对某一对象施加合乎目的的作用,以使其产生所希望的行为或变化的控制。

(2) 自动控制系统。为了一定的目的将控制器、被控对象等部件有机地连接成的一个进行自动控制的总体。

(3) 控制器。对被控对象施行控制作用的设备的总体。

(4) 被控对象。要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。

(5) 参考输入信号。希望被控制量达到的数值。

(6) 扰动。除参考输入外,对输出产生作用的信号,有内扰和外扰之分。

(7) 反馈。将系统的输出量馈送到输入端,并与输入信号进行比较的过程。

(8) 偏差。系统的被控制量偏离希望值的差。

(9) 反馈控制。按偏差进行控制称为反馈控制。

(10) 反馈回路。将输出量取作反馈信号,引向输入端的通道。

(11) 前向回路。从参考输入到被控制量的通道。

(12) 开环控制系统。控制器的信息来源中不包含来自被控对象输出端的反馈信息这样的控制系统称为开环控制系统,也称前馈控制系统。

(13) 闭环控制系统。控制器的信息来源中,包含来自被控对象输出端的反馈信息,这样的控制系统称为闭环控制系统,也称反馈控制系统。

第二节 例 题 及 解 答

例 1-1 某调速系统如图 1-1 所示,试说明:

(1) 系统工作原理。

(2) 指明系统中的被控对象、给定值、被控量和干扰量是什么?画出系统功能方框图。

(3) 说明该系统属于何种基本控制方式。

(4) 对系统“稳”、“快”、“准”三项技术指标进行定性评价并提出改进方案。

解 本题意在使读者通过对最简单的自动控制系统的分析,加深对教材中介绍的基本概念和术语的理解。另外,本系统中有反馈,但并未构成闭环控制系统,以使读者掌握引入什么样的负反馈才能构成闭环控制系统,即开环控制和闭环控制的最根本分界线在哪里。

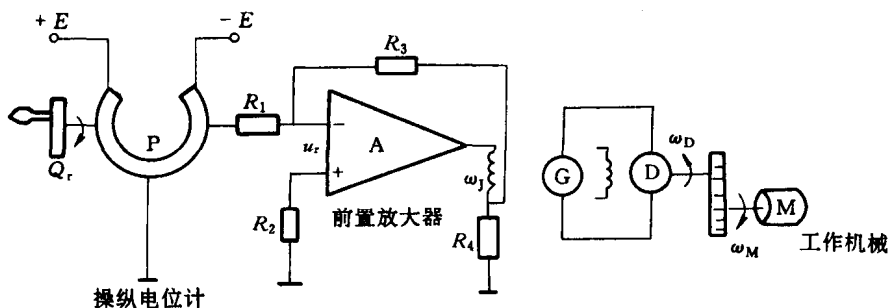


图 1-1 例 1-1 图

G—直流发电机；D—伺服电动机

本系统的控制任务是使工作机械 M 的转速受操纵者的控制。原理为：操纵者转动操纵电位计 P 的手柄，改变电位计输出电压 u_r 的大小和方向，经前置放大器和直流发电机两级放大，使加在伺服电机上的端电压也随之改变大小和方向，从而使工作机械具有所要求的转速。

为找出本系统的被控对象、被控量、给定值和干扰，应根据这些术语的定义，紧密结合系统的实际进行分析判断，就可一一确定。

(1) 被控对象。本系统中要求实现自动控制的是工作机械，因此，被控对象是工作机械。要注意，不要将伺服电机误认为是被控对象。因为伺服电机是对工作机械进行调节的执行机构，是手段，不是对象。试将伺服电机换成液压马达、气动马达，都可使工作机械实现预定的功能，不改变系统的功用。

但也不要把工作机械的加工对象（如控制机床上被加工的零件、烘炉中的工件等）误认为是被控对象。

(2) 被控量。本系统为调速系统，这说明被控对象中要求保证的主要参量是工作机械的转速 ω_M 。因此 ω_M 就是本系统的被控量。

要注意，单凭系统原理图有时还不足以确定被控量，还必须理解题目中或实际系统说明书中对系统功用的叙述。就本例而言，单凭原理图只能说该系统是一个速度控制系统。而速度控制系统中又分调速系统、稳速系统和积分系统。当该系统充当积分系统时，其被控量就是被控对象的转角而不是转速。

另外，不要将电机转速 ω_D 误认为是被控量。因为尽管 ω_D 与 ω_M 间存在着简单的函数关系，但从概念上讲， ω_D 是描述系统的一般状态变量，而 ω_M 则是考核系统性能优劣的状态变量——被控量。从工程实践看，即使减速器速度比为 1，由于齿轮转动存在空程和运动误差，所以 ω_D 和 ω_M 也不可能在每个瞬时都相等。

(3) 给定值。对本系统而言，它应是操纵电位计的转角。因为给定值应具有三重属性：首先它应能表征被控量的希望值；其次，它应是自控系统中实际存在，并对被控量有实际影响的真实物理量；最后，它应是自控系统最原始的输入量。

注意，被控量希望值自身（如写在纸面上的、人头脑中认定的）不一定为给定值。首先，它对自控系统不能直接起作用，必须经过人、计算机或前级自控系统将它“翻译”成电位计转角，被控对象的被控量才能自动跟随它变化。其次，被控量希望值与被控量肯定是同量纲的物理量；但是除少数位置随动系统、稳压电源等自控系统外，大多数自控系统中，不存在

与被控量同量纲的输入量。因此，若将希望值自身理解为给定值，就往往在实际系统中找不到给定值。

另外，也不要将本系统中电位计的输出电压 u_r 误认为给定值。这里 u_r 并不是系统的原始输入量，而是电位计将输入转角变换成的电压量，它只能算是中间量。另外，操纵电位计输出电压与转角间的关系，也并不只是线性关系的一种，工程上常常采用各种各样的函数电位计作为操纵电位计。即使电位计输出电压与转角保持线性关系，但因电位计的误差和分辨力都不可能是零，因此，二者在精度上也是不等价的。

(4) 干扰。就本系统而言，影响工作机械转速的不仅有操纵电位计手柄的转角，实际上，负载力矩、伺服电机的激磁电压、发电机的转速、放大器的增益和零点波动，都会使工作机械的转速发生所不希望的波动，这些因素对本系统来讲就是干扰。

确定了被控对象、被控量、给定值、干扰之后，按照信息在系统传递的顺序，将每个功能部件用一个方框表示，用箭头线段表示信号的传输通道，就可以画出系统的功能方框图。依照惯例，在画功能方框图时，应使信号按从左至右的方向流过系统主通道，也就是说，给定装置在左，被控对象在最后。若有主反馈，则应沿从右至左的方向画出。

根据上述分析，遵照上述规则，参照系统原理图，可画出系统的功能方框图如图 1-2 所示。

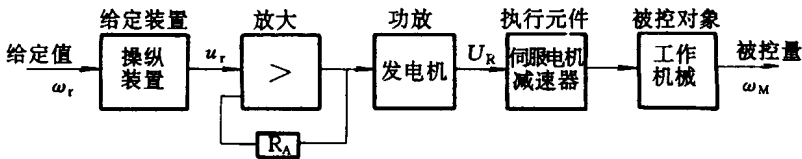


图 1-2 例 1-1 系统方框图

从图 1-2 看出，该系统对被控量 ω_M 并未进行测量，更没有反馈到输入端与给定值进行比较，因此，该系统属于开环控制系统。

由于该系统属于开环控制，其稳定性不难保证，但是在干扰作用下，工作机械的转速将远远偏离期望值，无法进行自动补偿，所以本系统的精度一定很差，以致没有工程上的实用价值。改进的方法是引入负反馈，构成闭环控制系统。

例 1-2 日常生活中有许多闭环和开环系统，试举几个具体例子，并说明它们的工作原理。

解 开环控制系统如自动售米机、自动售邮票机、自动取款机、火车站的报时钟等。它们的工作原理相类似，兹举自动售米机一例说明。参考输入信息使控制粮食的阀门打开，粮食进入电秤过磅，当其数量和输入量参考信息相对应时，即已称足，粮仓阀门关闭。经过一定的延时后，使电秤阀门打开；输出预定数量的粮食，接着电秤中粮食数量减少至零，发出信号使全机停止，自动售米的任务完成。由于该系统输出粮食数量的信息没有反馈到输入端与参考信息进行比较，所以系开环控制系统。

闭环控制系统如骑自行车、运动员表演平衡木、杂技演员走钢丝、健康肌体对待随机入侵的细菌、人体体温的自动调节等过程，现以骑自行车为例说明其工作原理。当自行车骑到十字路口需要右拐弯时，人的大脑发出转弯指令（即参考输入信息）于肌体（手），操纵自行车车把向右转，而眼睛随时在观察自行车是否是在按预定指令行动，并将这一信息反馈至大脑，与参考输入信息（即人脑所发出的转弯指令）比较，力图使转弯的偏差减至最小；如

此过程就是一个闭环控制系统。显然，系统输出信号对控制作用有直接影响。若遇有干扰，比如要碰着人时，可自动排除干扰，立即避让再右转。

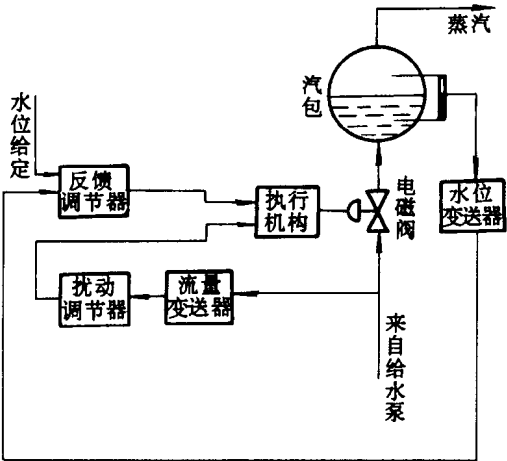


图 1-3 例 1-3 图

首先，考察反馈调节环路的作用。当汽轮机用汽量过大或给水泵所给水量过小时，会引起汽包水位下落。水位变送器将下落量转换为电信号，传送到反馈调节器，并与水位给定信号相比较。当水位给定信号不变时，反馈调节器的输出量上升，通过执行机构开大电磁阀门，增大给水量。反之，则会减小给水量。

由上述分析可知，水位给定信号是输入量，汽包的水位值是输出量，水位变送器是反馈环节，其输出量是反馈信号，而汽包中蒸汽的使用量和给水压力则是扰动量。

扰动量的变化会使水位波动，最终会通过反馈调节器调整到给定水位，但由于是通过汽包水位下落后才开始调节的，延长了调整时间。

为此，在控制系统中引入了扰动调整环路。当给水量减少时，流量变送器即刻响应，不等汽包水位下落，便通过扰动调节器加大给水量。这就使系统反应迅速，且减轻了反馈调节环路的负担。它与反馈调节环路相互补充，改善了调节质量和速度。

在上述两个控制环路中，反馈控制环路是将其输出量反馈回来，与输入量比较后进行控制的，属于全系统的闭环控制；扰动调节则没有反映输出量，仅仅反映了扰动量，属于局部反馈控制。

例 1-4 带钢连轧机架轧辊的转速控制系统如图 1-4 所示。试简要分析系统的工作原理，

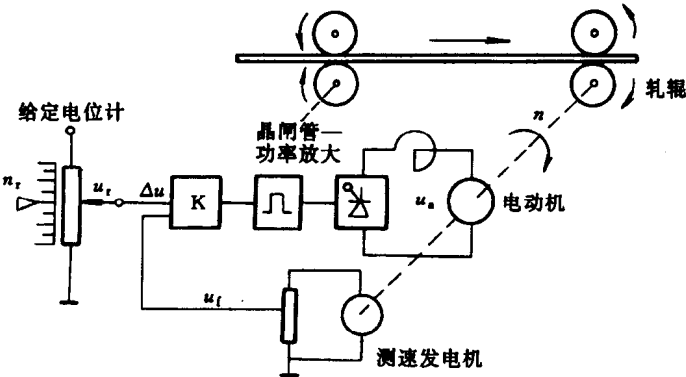


图 1-4 例 1-4 图

并画出系统的方框图。

解 连轧机在轧钢过程中，通过各机架的带钢必须保持秒流量相等，否则将出现拉钢或叠钢，影响产品质量或造成故障。这就要求各机架轧辊的转速保持一定比例，而对某机架轧辊来说，即要求其转速恒定。

该系统控制的是轧辊的转速，故被控对象是轧辊，被控量是轧辊的转速 n 。直流电动机直接拖动轧辊转动，电机又是由晶闸管整流装置供电的，所以电动机承担了执行的功能，整流装置相当于变换和放大部件。要求的转速值 n_r 是通过给定电位计（或指令机构）以电压 u_r 给出的。 n_r 称给定值， u_r 相当于指令信号。轧辊实际转速是通过同轴的测速发电机测量的，并以电压 u_f 输出。 n_r 与 n 的比较是由线路上 u_r 与 u_f 相减实现的，比较电路就相当于计算装置。按照信号的传递顺序，可画出系统的方框图如图 1-5 所示。

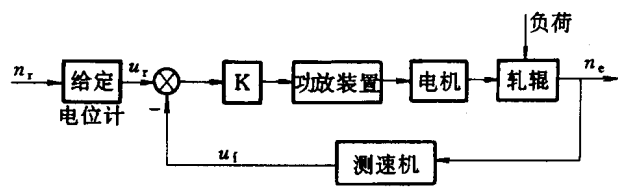


图 1-5 例 1-4 系统方框图

轧辊实际转速是通过同轴的测速发电机测量的，并以电压 u_f 输出。 n_r 与 n 的比较是由线路上 u_r 与 u_f 相减实现的，比较电路就相当于计算装置。按照信号的传递顺序，可画出系统的方框图如图 1-5 所示。

如果由于负荷的扰动使轧辊转速下降了，则 u_f 随之下降， $u_r - u_f$ 上升，可晶闸管整流功放输出的电压 u_a 加大，从而电机拖动轧辊增速，完成了控制作用，补偿了扰动对被控量 n 的影响。系统的被控量是轧辊转速 n ，而测量的也是 n ，并且按 n 对 n_r 的偏差（亦即 $u_r - u_f$ ）进行控制，所以该系统属于按偏差控制的负反馈控制方式。

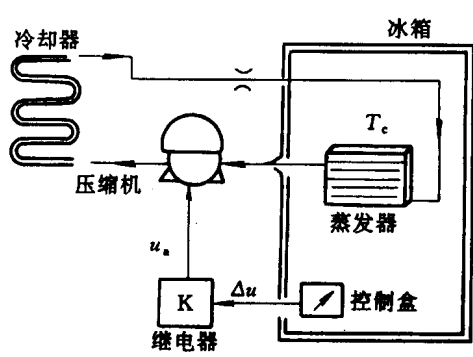


图 1-6 例 1-5 图

例 1-5 电冰箱制冷控制系统原理图如图 1-6 所示，试简述系统的工作原理，画出原理方框图。

解 系统的任务是保持箱内的温度 T_c 等于给定的温度 T_r 。系统由箱体、温度控制盒、电动机、压缩机、冷却管、蒸发器等部件组成。

温度控制盒通过双金属感温元件，测量箱内的温度，并与要求的温度比较。偏低时则接通继电器、接触器，输出供给电动机的电压 u_a ，所以温度控制盒起到测量、比较、变换的作用。

电动机带动压缩机，将蒸发器中的高温低压氟里昂气态制冷剂，送经冷却管散热，降温后的低温高压制冷剂节流成低温高压液态进入蒸发器，急速降压扩散成气态，吸收箱体内部的热量，冰箱的温度随之下降。而高温低压氟里昂又被压缩机从蒸发器中吸出送入冷却管，如此循环流动，使冰箱达到制冷的效果。其中，电动机相当于执行元件。但是，电机需要通过氟里昂循环系统才能控制冰箱的温度，该循环系统也可以看作是执行装置，而一般常称作调节机构，可视为“执行”和“被控对象”的中介。控制的目的是保持冰箱的低温。所以箱体应该被控对象，箱内温度应该被控量。

电冰箱制冷控制系统的原理方框图如图 1-7 所示。

方框图中，将功能部件分得较细，方框可以画得多一些；也可以概括一些，将几个部分用一个方框表示。同一系统，原理方框图不是唯一的，但是各方框所代表的具体部件，以及方框之间的联系，必须和系统的实际情况一致。

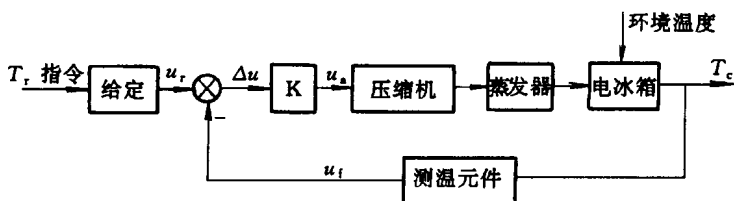


图 1-7 例 1-5 系统方框图

从图 1-7 中看出，电冰箱采用的是按被控量偏差控制的反馈控制方式。

第三节 练习题

A 类 题

1-A-1 试比较开环控制系统和闭环控制系统的优缺点，并举出五个以上工程技术和日常生活中的例子进行分析说明。

1-A-2 图 1-8 为自动平衡式记录仪表原理图，该仪表实际上是一个电压—位置随动系统，试绘制系统的原理方框图，并说明其工作原理。

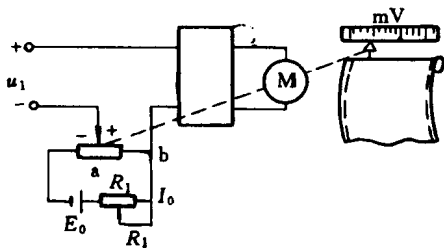


图 1-8 题 1-A-2 图

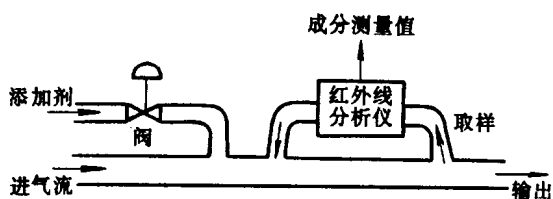


图 1-9 题 1-A-3 图

1-A-3 在化工过程控制系统中需要对化工产品的化学成分进行控制，为此利用红外线分析仪对化学成分进行测量，图 1-9 为利用红外线分析化学成分的原理图，试绘出控制系统的原理方框图，并进行分析。

1-A-4 图 1-10 为自整角机随动系统，试指出系统的输入量和被控制量，区分控制对象和发送自整角机 接收自整角机

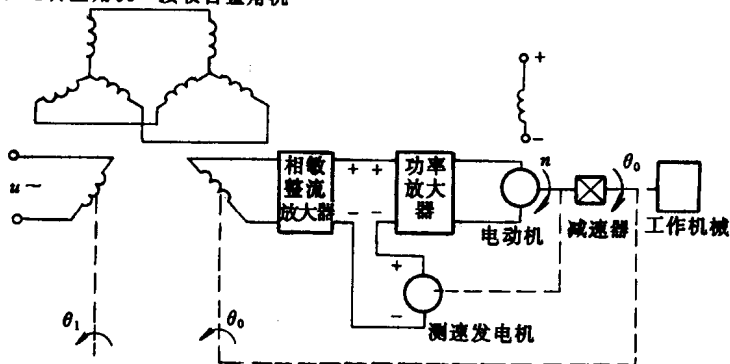


图 1-10 题 1-A-4 图

自动控制器。说明控制器各组成部分的作用，画出原理方框图，并分别说明系统偏差出现后是如何检测和消除偏差的。

1-A-5 试分析反馈控制系统中反馈的性质和作用。

1-A-6 画出一个冰箱的温度反馈控制系统的原理框图。

1-A-7 造纸机分部传动速度反馈控制系统如图 1-11 所示，试分析系统的工作原理。

1-A-8 图 1-12 所示为一个压力控制系统，试述系统如何自动保持炉膛内的压力恒定。

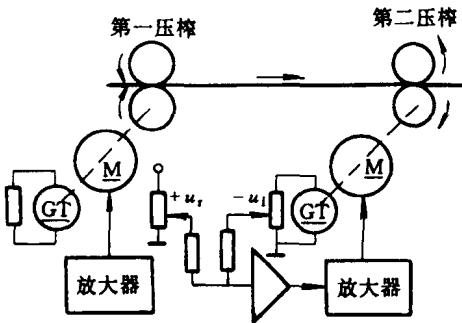


图 1-11 题 1-A-7 图

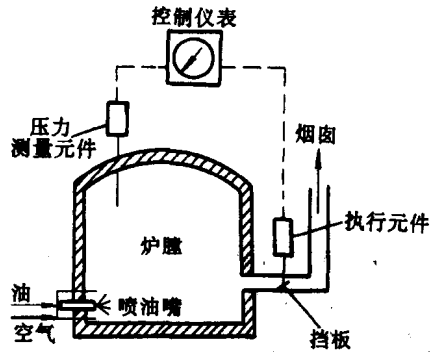


图 1-12 题 1-A-8 图

B 类 题

1-B-1 试列举三个你所接触到的自动控制装置，说明每个装置的控制结构是开环的还是闭环的。

1-B-2 核反应堆的裂变反应水平受石墨棒插入深度的控制，当插入愈深时，其反应水平愈降低。反应水平可用一个电离箱来测量，它的输出电流与反应水平成正比。其原理示意图如图 1-13 所示。试设计一台自动控制装置控制该核反应堆，使其裂变反应程度维持在给定水平。

1-B-3 洗衣机控制系统方框图如图 1-14 所示，试问该系统属于开环控制还是闭环控制系统？请设计一个闭环控制的洗衣机系统方框图。

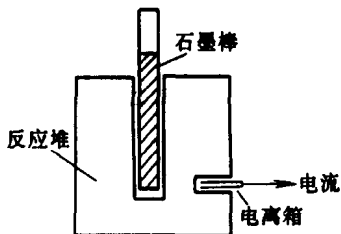


图 1-13 题 1-B-2 图

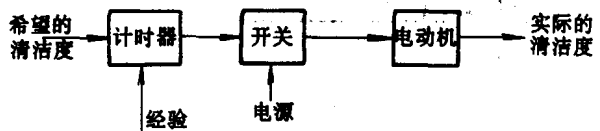


图 1-14 题 1-B-3 图

1-B-4 有两台汽轮发电机组其转速调节系统如图 1-15 (a)、(b) 所示。试分析它们的控制原理，指出两者是开环控制还是闭环控制系统。你能画出它们的系统方框图吗？

1-B-5 试说明开环控制系统与闭环控制系统的主要特征，比较它们的优缺点。

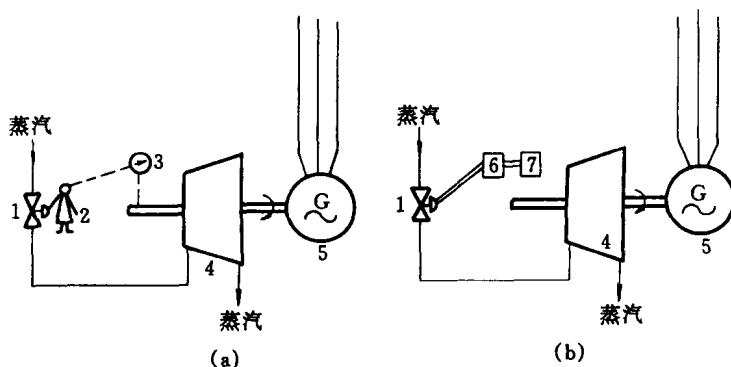


图 1-15 题 1-B-4 图

1—进汽阀门；2—操作人员；3—转速表；4—汽轮机；
5—同步发电机；6—调节器；7—转速检测元件

1-B-6 试举例说明一个控制系统采用闭环结构或采用开环结构，但加装扰动补偿环节，两者各有什么优缺点？

1-B-7 有一水位控制装置如图 1-16 所示。试分析它的控制原理，指出它是开环控制系统还是闭环控制系统，它的被控制量、参考输入量、扰动量是什么？并给出它的系统方框图。

1-B-8 人的一切活动都体现出反馈控制的原理，人本身就是一个具有高度复杂控制能力的反馈控制系统。试通过人用手从桌上取书的过程，分析一下它所包含的反馈控制机理，并画出系统方框图。

1-B-9 图 1-17 是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。

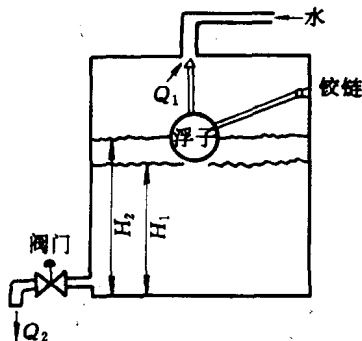


图 1-16 题 1-B-7 图

Q_1 —输入流量； Q_2 —输出流量；
 H_1 —实际水位； H_2 —希望水位

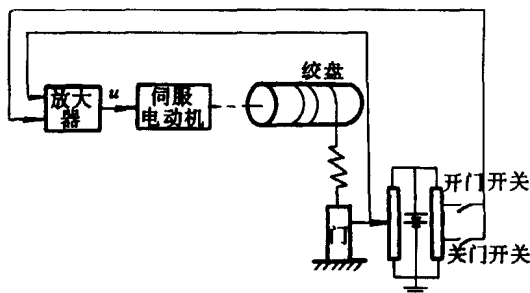


图 1-17 题 1-B-9 图

1-B-10 图 1-18 (a) 和 (b) 均为自动调压系统。设空载时，(a) 与 (b) 发电机端电压均为 110V。试问带上负载后，(a) 和 (b) 哪个系统能保持 110V 电压不变？哪个系统的电压会稍低于 110V？为什么？

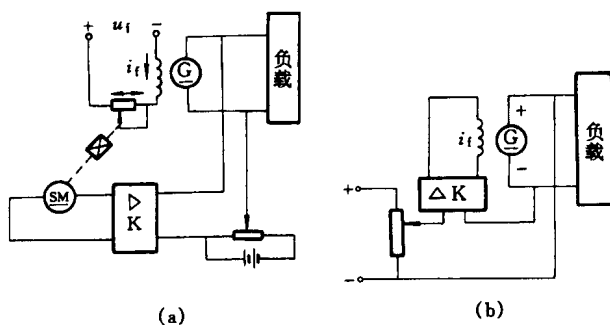


图 1-18 题 1-B-10 图

第四节 参 考 答 案

1-A-2

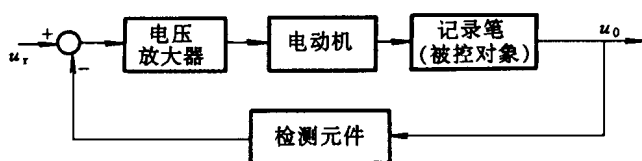


图 1-19 题 1-A-2 的方框图

1-A-3

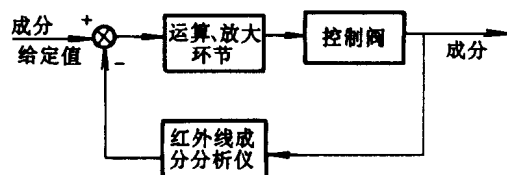


图 1-20 题 1-A-3 的方框图

1-A-4

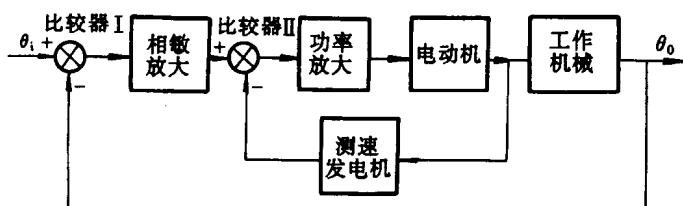


图 1-21 题 1-A-4 的方框图

1-A-6

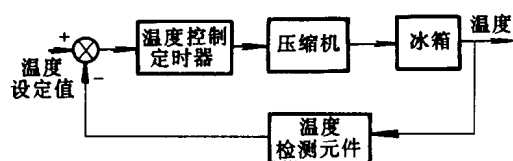


图 1-22 题 1-A-6 的方框图

1-A-7

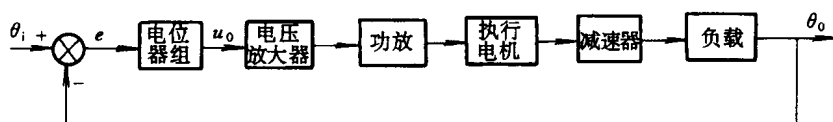


图 1-23 题 1-A-7 的方框图

第二章 控制系统的数学模型

第一节 内 容 提 要

本章介绍连续时间、线性、定常的动态系统的三种图解表示方法,即传递函数方框图、信号流图和状态变量模拟图。

一、传递函数方框图

线性定常系统的输入与输出关系在工程上通常用传递函数进行描述。用传递函数作为数学模型来分析系统,就是分析具有相同运动规律系统的共性。用方框图及其等效变换,求取复杂环节和系统的传递函数是一种方便的方法。方框图是由带箭头的线段与系统各元件的传递函数连接而成。主要连接形式有串联、并联和反馈三种:

方框图等效变换,必须遵守下列两个原则:

- (1) 前向通道的传递函数,其乘积保持不变;
- (2) 回路中的传递函数,其乘积保持不变。

二、信号流图

系统传递函数的求取,除了用代入法和方框图等效变换方法外,还可以将 s 域中的代数方程画成信号流图,用 Mason 公式求取。这样可免去方框图等效变换的繁琐。特别是对于较复杂的控制系统,应用 Mason 公式求其传递函数显得更方便。

求系统传递函数的 Mason 公式:

$$G(s) = \frac{\sum_{k=1}^n P_k \Delta_k}{\Delta}$$

$$\Delta = 1 - \Sigma L_1 + \Sigma L_2 - \Sigma L_3 + \cdots + (-1)^m \Sigma L_m$$

式中 Δ ——流图的特征式;

ΣL_1 ——信号流图中所有环路的环路传输之和;

ΣL_2 ——每两个互不接触环路的环路传输乘积之和;

ΣL_3 ——每三个互不接触环路的环路传输乘积之和;

P_k ——从 $R(s)$ 到 $C(s)$ 的第 k 条通路的通路传输;

Δ_k ——在特征式 Δ 中除去与第 k 条通路相接触的那些环路之后剩余的部分。

三、状态变量模拟图

如果在系统的传递函数方框图中所有环节都不超出比例、积分和一阶滞后环节,只要把系统中所有积分环节和一阶滞后环节的输出取作状态变量,就可以方便地画出状态变量模拟图,求出该系统的状态空间描述。

从传递函数求状态空间描述,称为传递函数的实现。对于给定的真有理函数形式的传递函数,可以找到多个实现。本章介绍可控标准型和可观测标准型两种比较重要的实现。可控标准型实现的特点是其状态完全可控,但却不一定完全可观测;可观测标准型实现的特点是