

高等学校通用教材

工程控制理论基础

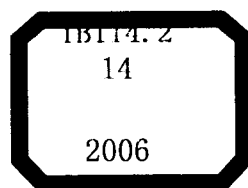
—— 学习指导与习题解答

杨咸启 编著



北京航空航天大学出版社

高等学校通用教材



工程控制理论基础

——学习指导与习题解答

杨咸启 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是针对“工程控制理论基础”课程的教学和学习而编写的。在工科机械与自动化专业中,“工程控制理论基础”作为一门专业基础课,理论性较强,学生学习时难度较大,特别是对考研的学生来说更需要针对性的指导。

本书主要包括:自动控制的基本概念、线性系统的数学模型、机电系统传递函数简化、系统时域响应、频率特性、稳定性与误差分析、控制系统设计与校正、线性离散控制系统、非线性控制系统、状态空间理论等。

本书的特点:概念清楚、理论简明扼要、重点内容突出,并总结了分析方法,还包括例题与习题详解等;书中图、文、表并重,有利于读者自学和总结。

本书可作为机械类及其他专业工程控制基础课程的辅导教材,也可供相关专业的本科生、研究生和科技人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程控制理论基础——学习指导与习题解答/杨咸启编著.

北京:北京航空航天大学出版社,2006.11

ISBN 7-81077-809-9

I.工… II.杨… III.工程控制论-高等学校-
教学参考资料 IV.TP114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 105916 号

工程控制理论基础——学习指导与习题解答

杨咸启 编著

责任编辑 韩文礼

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail:bhpress@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:15.25 字数:390 千字

2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 7-81077-809-9 定价:22.00 元

前 言

为了配合“工程控制理论”课程的教学,帮助学生掌握学习控制论的思想和方法,提高其分析和设计机械工程领域中出现的控制问题的能力,帮助学生更好地掌握本课程的内容,编者编写了这本学习指导和习题解答。

本书内容的编排,首先总结重点内容和关键方法,然后通过一系列典型例题的详细分析,说明方法的运用,最后对各章的典型习题进行详细的解答。全书理论清晰、结构独特,为教学和读者学习提供了方便。

本书的主要内容包括:第1章介绍自动控制的基本概念,第2章介绍线性系统的数学模型,第3章介绍机电系统传递函数的简化,第4章介绍系统的时域响应,第5章介绍系统的频域特性分析,第6章介绍系统的稳定性与误差,第7章介绍控制系统的设计与校正,第8章介绍线性离散控制系统,第9章介绍非线性控制系统,第10章介绍状态空间初步理论等。

本书是针对“机电工程控制基础”、“工程控制理论基础”等课程的学习而编写,书中的例题和习题大多具有典型性,利于教学和学生自学。本书初稿在中国海洋大学机械专业控制工程课的教学中使用,得到广大老师和同学们的好评。这次出版得到北京航空航天大学出版社编辑的大力支持,在此表示衷心感谢。书中引用了参考文献中的部分资料,对其作者也一并致谢。由于本人水平所限,书中错误和不妥之处恳请读者批评指正。

编 者

2006年7月

目 录

第 1 章 基本概念	1
1.1 概念要点	1
1.2 系统要素与分类	2
1.3 典型例题分析	3
1.4 典型习题解答	5
第 2 章 数学模型	9
2.1 时域建模要点	9
2.2 传递函数模型要点.....	10
2.3 典型例题分析.....	12
2.4 典型习题解答.....	21
第 3 章 传递函数简化	29
3.1 传递函数框图简化要点.....	29
3.2 信号流图分析要点.....	31
3.3 典型例题分析.....	32
3.4 典型习题解答.....	43
第 4 章 时域响应	48
4.1 时域响应要点.....	48
4.2 输入函数总结.....	48
4.3 系统响应总结.....	49
4.4 典型例题分析.....	55
4.5 典型习题解答.....	66
第 5 章 频率特性	75
5.1 频率特性要点.....	75
5.2 图示法要点.....	77
5.3 典型例题分析.....	78
5.4 典型习题解答.....	91
第 6 章 稳定性与误差	101
6.1 系统稳定性要点	101
6.2 误差分析要点	104
6.3 典型例题分析	106
6.4 典型习题解答	117

第 7 章 设计与校正	130
7.1 系统性能指标要点	130
7.2 校正方法要点	131
7.3 典型例题分析	132
7.4 典型习题解答	145
第 8 章 离散控制系统	153
8.1 离散信号要点	153
8.2 脉冲传递函数要点	153
8.3 离散系统性能要点	154
8.4 典型例题分析	155
8.5 典型习题解答	167
第 9 章 非线性控制系统	177
9.1 非线性控制系统特点	177
9.2 分析方法要点	177
9.3 典型例题分析	180
9.4 典型习题解答	193
第 10 章 状态空间初步理论	202
10.1 状态空间主要概念.....	202
10.2 状态方程求解要点.....	204
10.3 系统性能判定.....	205
10.4 典型例题分析.....	205
10.5 典型习题解答.....	217
附录 A 硕士研究生入学考试模拟试题	229
附录 B 典型函数的拉普拉斯变换和 Z 变换	234
参考文献	237

第 1 章 基本概念

1.1 概念要点

自动控制：利用给定量，通过自动调节装置，在不需要人直接参与的情况下，使被控对象的某些物理量准确地按照预期的规律变化。

被控对象：通常指控制系统中某些物体或过程。

被控量：被控对象的输出物理量，也称为输出量。

控制量：作用于被控制对象，改变对象的运行状态的量。

输入量：系统中的给定量，也称参考输入，简称输入。输入分为控制输入和干扰。控制输入使控制系统按预定的输出。对系统的输出产生扰动的输入称为干扰。

信号：系统中的输入、输出量及控制量。

系统：整个控制有机实体，其中某些部分称为环节。

将控制问题抽象为一个系统，系统中的设定值作为输入信号(激励)，用箭头表示信号的流动方向，用框图的形式将它们联系起来，如图 1-1 所示，这就是控制论的图示方法。

开环控制：在系统框图中，当系统中的信号只是单路前向传递时称为开环控制系统，如图 1-2 所示。

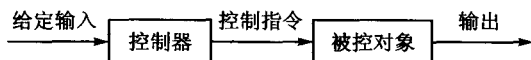
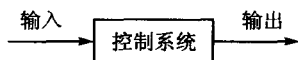


图 1-2 开环控制系统框图

反馈：从系统的输出量中取出信号量，经检测变换后返回到系统的输入端，与输入信号比较之后，再对系统起控制作用，达到减小偏差或消除偏差的目的。若比较后的信号为误差信号则这种控制为负反馈控制。若比较后的信号为增强信号则这种控制为正反馈控制。

闭环控制：带有反馈控制的系统又称为闭环控制系统(见图 1-3)。

顺馈控制：存在多路前向信号传递的系统。

复合控制：各类控制组成有机整体的控制方法。

物理框图：用一个方框代表一类物理元件，而比较、计算部分以圈叉符号表示，每条带箭头的线表示信号流的传递路线和方向，这样构成的控制框图为物理框图，如图 1-3 所示。

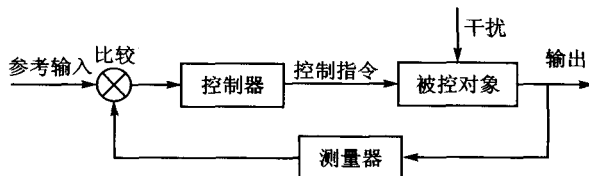


图 1-3 闭环控制系统框图

1.2 系统要素与分类

被控制对象：系统中要控制(操纵)的设备或生产过程等,它是控制动作的受体。

给定元件：产生输入信号,用于确定被控对象的目标值。

测量元件：测量被控量,并转化为与输入量可比较的信号。

比较与运算元件：进行输入信号与反馈信号的比较环节,通常分为偏差比较和信号叠加。

放大元件：将控制信号进行放大以利于执行机构动作。

执行元件：接受控制信号,对被控对象进行控制的元件。

反馈元件：从输出信号中测量出所需要的信号,并产生反馈信号。

校正元件：用于改进系统性能的装置。

根据不同的划分依据,控制系统有不同的分类。

1. 按信号流分类

开环系统：当系统中没有信息返回,系统的输入不受输出的影响,这种系统称为开环系统。它的主要特点是系统中的信息流只有一条路线,系统的各部分是串联的。这种系统对外界的干扰抵抗力较弱。图 1-2 为开环控制系统的框图。

闭环系统：当系统中出现信息返回到输入端,控制信号为比较信号,这种系统称为闭环系统。它的主要特点是系统中的信息流是一条环形线。前向通道为闭环中的主信息流线。图 1-3 为典型的反馈控制模式的框图。

在闭环系统中还可以进一步细分为按偏差调节(图 1-4)和按干扰补偿(图 1-5)两种。

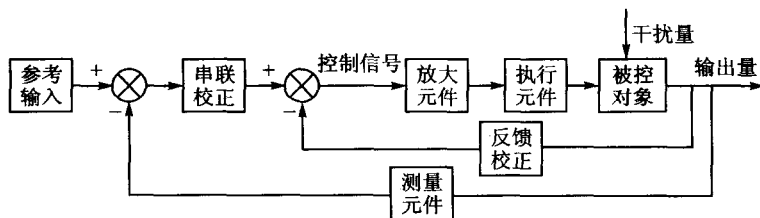


图 1-4 按偏差调节的负反馈控制系统

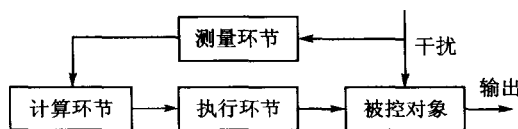


图 1-5 按干扰补偿的反馈控制系统

顺馈系统：当系统中的信息前向流线出现两条以上的路线时,这种系统称为顺馈系统。图 1-6 为顺馈控制系统的框图。

2. 按输出量分类

恒值控制系统：系统的输入量与输出量在控制过程中不调节,系统在可能的外界干扰时输出基本保持恒定值。

随动控制系统：系统的输入量的变化规律不能预先确定,但要求系统的输出跟随输入的

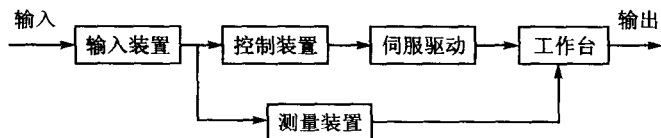


图 1-6 顺馈控制系统

变化而变化,排除干扰,准确地复现控制信号的变化。

程序控制系统:控制系统中将控制信号转化为程序指令,被控对象按程序指令运动,系统输出能保持很高的精度。

3. 按系统特性分类

线性定常系统:系统的数学模型是线性常系数微分方程,系统的输入与输出都有确定的变化规律。

非线性系统:系统的数学模型是非线性方程,系统的输出可能是确定的,也可能是不确定的变化规律。

4. 按控制模式分类

连续控制系统(又称为模拟系统):系统中各部分传递的信号是时间的连续函数。

离散控制系统(又称为数字系统):系统中各部分传递的信号是数字脉冲信号,数字控制系统是由计算机实现的。

5. 系统性能基本要求

机电自动控制理论是用系统的观点,以信息传递方法与可控制的思想来研究工程技术中的动力学问题。通常要求控制系统具有:

稳定性 在系统输出偏离期望值后,系统动态过程中的振荡倾向及其平衡状态恢复能力;

精确性 系统的控制精度,常以稳态误差来衡量;

快速性 系统的输出量与输入量之间产生偏差时,消除这种偏差的快慢程度;

误差 期望输出值与实际输出值间的差。

1.3 典型例题分析

例 1-1 分析位置随动控制。随动控制在汽车转向机构、导弹发射架方位角控制机构、摄像机角位置随动机构中均有应用。图 1-7 是随动机构的工作原理图,转向轮的转角随着转向盘机构的转动而转动,这是一种位置随动控制机构。

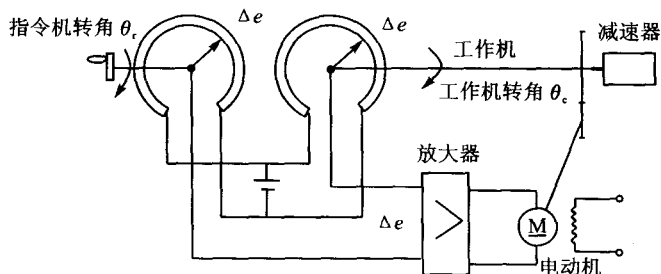


图 1-7 位置随动系统

分析：被控对象是工作机，被控量为转角 θ_o 。控制量为定的指令角 θ_i ，执行机构为电动机与减速装置，测量与比较由电位计和桥式电路完成。这也是一种反馈控制。当指令角 θ_i 改变时，测量电位随之改变，电桥的端电压也发生改变，电动机开始转动，带动工作机转动。图 1-8 是其控制系统物理框图。

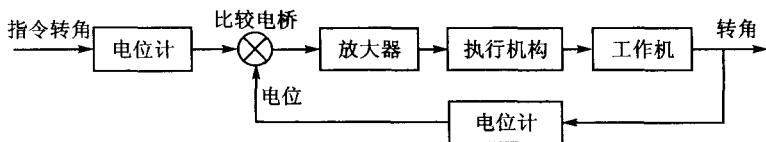


图 1-8 位置随动控制系统物理框图

例 1-2 分析机器设备的振动控制问题，如图 1-9 所示。

分析：控制系统的组成包括质量 m 、弹簧 k 和阻尼 c 。系统的控制量为干扰力 $N(t)$ ，系统的被控对象选择为质量块，被控量为其位移 $x(t)$ 。控制(干扰)量是系统的外力，联系系统输入与输出的数学模型是牛顿定律。图 1-10 为控制系统物理框图。

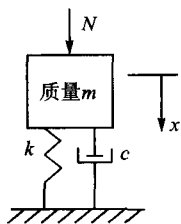


图 1-9 振动控制系统

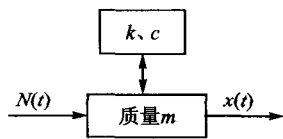


图 1-10 振动控制系统物理框图

例 1-3 分析图 1-11 所示的典型的电动机转速控制系统。

分析：被控对象为电动机，执行机构也是电动机，被控量为电动机转速，控制量是给定的电压。当采用设定模式控制，即开环控制时，没有测量与比较元件。电动机的转速随给定电压而定。图 1-12 为电动机转速开环控制系统物理框图。当采用反馈模式控制，即闭环控制时(图 1-13)，电动机的转速由测速发电机测量并转换为电动势，测速发电机的电动势与外接电位比较，以其电位差驱动工作电动机。当电动机转速因干扰而发生改变时，测速发电机的电位也改变，引起电位差改变，工作电动机的转速也跟着调节，达到保持电动机转速不变的目的。图 1-14 为电动机转速闭环控制系统物理框图。

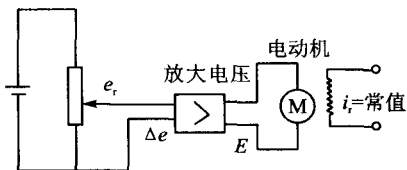


图 1-11 电动机转速设定模式控制

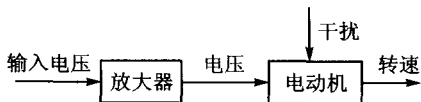


图 1-12 电动机转速开环控制物理框图

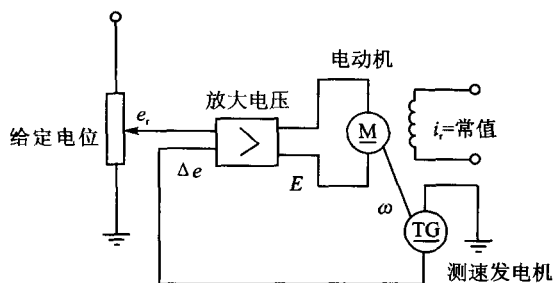


图 1-13 电动机转速反馈模式控制

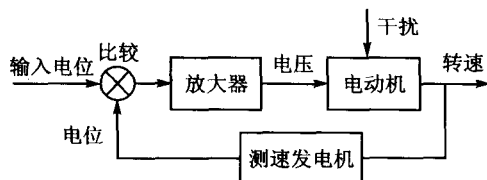


图 1-14 电动机转速闭环控制物理框图

1.4 典型习题解答

1-1 某液位控制系统如图 1-15 所示,液面高度保持不变。试说明系统的工作原理,画出系统框图。

分析:从图示的水箱平衡水位开始,打开阀门 2 向外排水,水箱中的水位下降,浮球跟着下降,这样,控制阀 1 开始打开,水管向水箱中注水。当注水量大于排水量时,水箱的水位会升到原来的位置,控制阀 1 关闭,达到新的平衡,水位得到控制。

采用框图来表示时,选择水箱为控制对象,水位是被控制量,控制阀是执行机构,浮球为测量机构,杠杆为比较机构,阀 2 出水为干扰(图 1-16)。

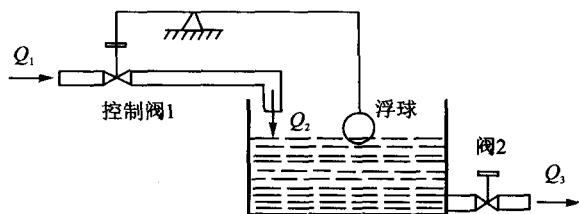


图 1-15 题 1-1 图

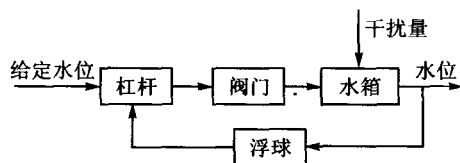


图 1-16 题 1-1 物理框图

1-2 他激直流发电机的电压控制系统如图 1-17 所示,在各种情况下系统电压保持不变。画出系统框图。

分析:选择发电机为被控制对象,电机电压为被控制量,电机的负载会引起电机电压变化,是干扰,给定的电压与电机的电压比较后加到电机上。物理框图如图 1-18。

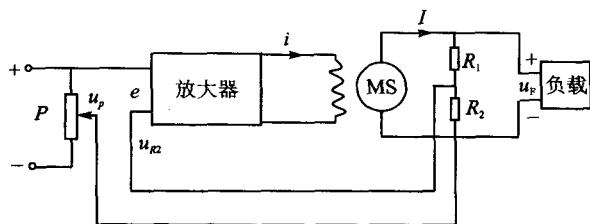


图 1-17 题 1-2 图

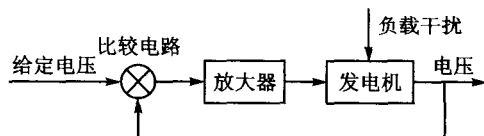


图 1-18 题 1-2 物理框图

1-3 图 1-19 是仓库大门自动控制系统原理图。试说明大门开闭的工作原理,画出系统框图。

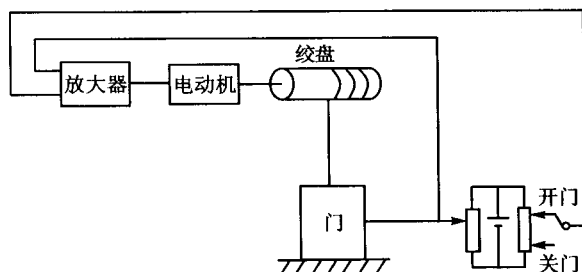


图 1-19 题 1-3 图

分析: 当开关放在“开门”的位置,电桥的电压改变,电路中产生电压差,经放大后驱动电机,再带动绞盘提升大门。当门提升到位时电桥的电位差消失,电动机停止转动。当开关放在“关门”的位置,与开关放在“开门”的位置时控制系统的工作过程相似。物理框图如图 1-20 所示。

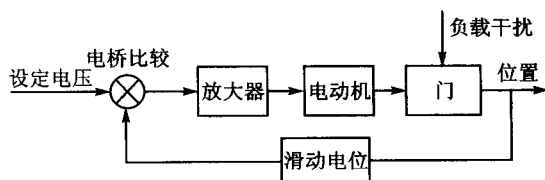


图 1-20 题 1-3 物理框图

1-4 自整角机的随动系统如图 1-21 所示。系统的功能为接受自整角机 TR 的转子角位移 θ_o 与发送自整角机 TX 的转子角位移 θ_i 始终保持一致。说明系统的工作原理,画出系统框图。

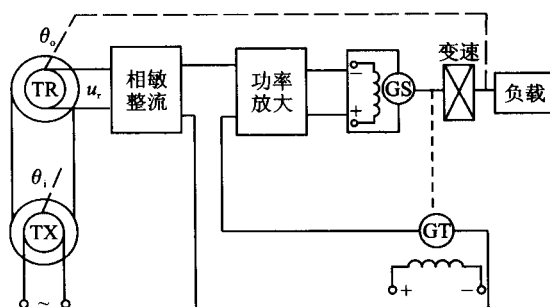


图 1-21 题 1-4 图

分析: 当发送自整角机 TX 的转子角位移 θ_i 改变时,接受自整角机 TR 会感应出电压偏差 u_e ,经整流、放大后加到电动机上,电动机转动带动负载运动,负载与接受自整角机 TR 一起转动,使其与发送自整角机 TX 的转子角位移一致,这就是跟随运动。为使电动机转动平稳、恒速,加入测速负反馈。选择负载为控制对象,电动机为执行机构,测速电机是反馈元件。系统框图如图 1-22 所示。

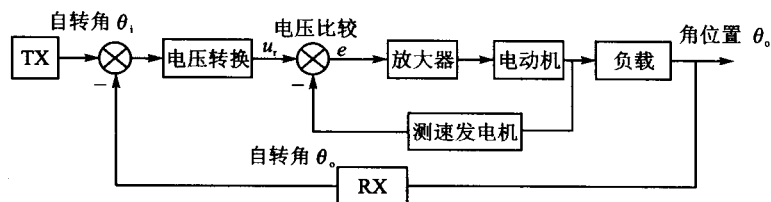


图 1-22 题 1-4 物理框图

1-5 图 1-23 是水温控制系统,冷水经过热蒸汽管加热后变为热水。说明系统工作原理,并绘系统框图。

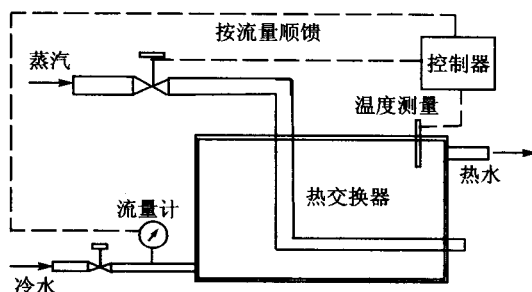


图 1-23 题 1-5 图

分析: 系统为复合型控制。采用温度测量、干扰测量和蒸汽控制对水箱中水的温度进行自动控制。当温度过高时,控制器使阀门关小,热蒸汽减少,水箱散热,水温将降到给定值。水温再下降时,控制器使阀门开大,热蒸汽增加,水箱加热,达到保持水温恒定的目的。而冷水注入水箱作为对系统的干扰,用流量计测量干扰量,将其送到控制器,进行扰动补偿。注入的冷水多,补偿量大,阀门开大,热蒸汽流过多,水温增加快,达到温度稳定平衡。选择水箱为被控制对象,水温为被控制量。物理框图如图 1-24 所示。

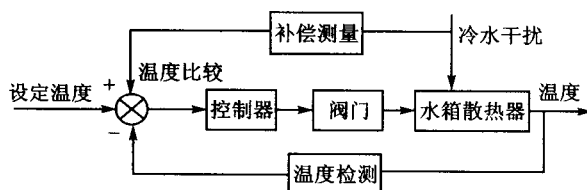


图 1-24 题 1-5 物理框图

1-6 图 1-25 是晶体管稳压电源电路,试说明控制系统各要素,并画系统框图。

分析: 由图 1-25 知,当负载电流增加或电网电压下降引起负载电压 U_L 减少时,因放大器 V_1 的发射极电位一定,故集电极电位减小,从而集电极电流减少,电阻 R_L 上的电压降也减少,导致调整管 V_2 的基极电位升高。 V_2 的导通程度增大,使输出电压 U_L 增大,这样,使输出电压 U_L 达到稳定;反之,当输出电压 U_L 超高时也能使其减低。选择负载电压为被控制量,控制过程如图 1-26 所示。

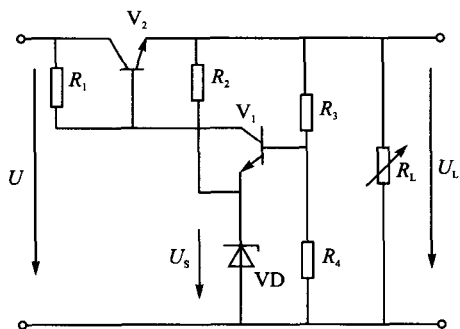


图 1-25 题 1-6 图

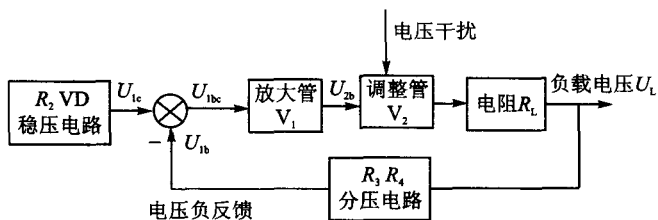


图 1-26 题 1-6 物理框图

1-7 试说明开环和闭环系统的优缺点。

答：

开环的主要特点是系统中的信息流只有一条路线，系统的各部分是串联的，控制原理比较简单。这种系统对外界干扰的抵抗力较弱。

闭环的主要特点是系统中的信息流至少有一条环形线。闭环控制的优点是抗干扰，控制精度高。但闭环控制系统比开环系统复杂。又因为元件会存在惯性滞后，当闭环控制不当时会使系统出现振荡。

1-8 试说明控制系统的性能指标有哪些。

答：

稳定性：指在系统输出偏离期望值后，系统动态过程中的振荡倾向及其平衡状态恢复能力。系统的稳定性是系统正常工作的前提。线性系统的稳定性由系统参数决定与外输入无关。

精确性：指系统的控制精度，常以稳态误差来衡量。所谓稳态误差是指系统在一定的输入信号作用下，当调整过程结束处于稳定时，输出量的实际值与期望值的差，它反映了动态过程后期的系统性能。

快速性：指系统的输出量与输入量之间产生偏差时，消除这种偏差的快慢程度。

第 2 章 数学模型

2.1 时域建模要点

建立控制系统的时间域数学模型通常有解析和实验两种方法。

用解析方法建模就是利用控制系统的各变量所遵循的变化规律或定律,经理论推导出变量间的数学关系式的方法。在建立控制系统模型时可能需要理论力学、流体力学、机械原理、电工学等方面的知识。

试验方法建模是通过多组实验数据来确立控制变量间的变化关系。

利用解析法建模的一般步骤为:

① 分析系统的性质、工作原理,确定系统和各元件的输入、输出量。输入量可能是给定的,也可能是系统的干扰。

② 弄清各环节的变化特点、服从的物理规律以及它们之间的相互联系。确定系统的信号传递过程,从系统输入端开始,依次建立各环节的物理方程。

③ 消除环节中的辅助变量,导出系统输入、输出量间直接的关系式。

④ 整理方程使之成为标准形式。让包含输入量的项在方程一边,输出量在方程另一边。

一般的高阶线性系统的模型方程可以写成下列形式,即

$$\sum_{i=0}^n a_{n-i} \frac{d^{n-i} x_o(t)}{dt^{n-i}} = \sum_{i=0}^m b_{m-i} \frac{d^{m-i} x_i(t)}{dt^{m-i}}, \quad n \geq m \quad (2-1)$$

式中, x_i 为系统输入, x_o 为系统输出, $a_{n-i} (i=0, 1, \dots, n, a_n \neq 0)$, $b_{m-i} (i=0, 1, \dots, m)$ 为系统常数。这种系统又称为高阶定常线性系统。

线性系统的特点是系统输出符合叠加原理。

如果系统是非线性系统,首先选取系统的平衡点或额定工作点作为系统的参考点,对系统的非线性部分进行泰勒级数展开,取其线性项,从而使系统整体模型简化为线性模型。有时需要采用增量形式的模型。

在进行系统模型线性简化时需要注意以下几点:

① 方程线性化是相对与系统平衡点或额定工作点来进行的,不同的参考点得到的线性方程是不同的。

② 当变量偏离参考点越小,线性化方程的精度越高,因此要选择合适的参考点。此线性化方法也称为小偏差法。

③ 增量线性化的方程的初值可以认为是零,也就是广义坐标的原点。

④ 不连续的方程,或折线(分段线性)方程等模型不适合小偏差线性化。

在已知系统输入和初始条件后,微分方程求解可以采用:①经典解析方法;②传递函数方法;③计算机数值解法。而运动解可具有某种模态,如指数函数、三角函数等。

2.2 传递函数模型要点

传递函数(又称为系统的复域模型)是经典控制理论中的核心内容和有力的分析工具,它使控制问题的分析得到了简化。

1. 传递函数定义

设系统的输入为 $x_i(t)$, 输出为 $x_o(t)$, 在零初值条件下, 它们的拉普拉斯变换(简称拉氏变换)分别为 $X_i(s)$ 、 $X_o(s)$, 系统的传递函数定义为

$$G(s) = \frac{X_o(s)}{X_i(s)} \quad (2-2)$$

显然, $G(s)$ 是复变函数, 它随系统的结构参数不同而不同。

一般情况下, 设系统为线性定常系统, 系统方程为式(2-1), 初值为零, 对式(2-1)进行拉氏变换后, 可得一般系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \cdots + b_0}{a_ns^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_0}, \quad n \geq m \quad (2-3)$$

从式(2-3)可以看出, 系统传递函数只与系统的结构规律和结构参数有关, 与输入的具体形式无关。因此, 有时也称传递函数为系统的控制数学模型。当已知传递函数为有理式时, 利用拉氏变换与微分的关系也可以反求出系统的等价微分方程。

当复变量 $s = j\omega$ (ω 为频率) 时, 有

$$G(s) = G(j\omega) \quad (2-4)$$

上式称为系统的频率特性模型。

当已知系统的传递函数和输入后, 可求出系统输出的拉氏变换, 即

$$X_o(s) = G(s)X_i(s) \quad (2-5)$$

系统的稳定输出值可由拉氏变换的终值定理求出, 即

$$x_o(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} x_o(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sX_o(s) = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)X_i(s) \quad (2-6)$$

2. 传递函数特性、框图与零极点

传递函数是联系系统输入与输出的纽带, 它反映了系统的特征, 但也有一定的局限。其具体特性如下:

- ① 传递函数是控制系统的结构固有特性的表现;
- ② 传递函数是通过拉氏变换求得, 它只适合于线性定常系统, 并且只能对应一个输入、输出。是单位脉冲输入下系统输出的拉氏变换;
- ③ 选择系统中不同的物理量为输入、输出时, 系统的传递函数形式也不同, 系统中的每一个环节都可以有自己的传递函数;
- ④ 传递函数的量纲由系统输入、输出的量纲来决定, 同一个系统, 如选取不同的输入和输出时, 系统的传递函数是不一样的。不同性质的问题可以有相同形式的传递函数;
- ⑤ 传递函数是复变函数, 它在复频率域中反映系统的特征; 对于大多数实际系统, 传递函数为有理分式, 分母中变量 s 的指数 n 应不小于分子中 s 的指数 m , 它反映实际系统中元件总存在惯性特性, 输出要慢于输入;

- ⑥ 当已知系统的输入拉氏变换和传递函数后可以求出系统的输出拉氏变换, 进而求出系

统的时域输出;

⑦ 可以用框图直观表示输入、输出与传递函数的关系,如图 2-1 所示;

⑧ 传递函数是在零初值条件下定义的,因此不能反映非零初值系统的全部运动。

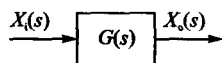


图 2-1 传递函数框图

在式(2-3)中,分母等于零的方程称为系统的特征方程,即

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0 = 0 \quad (2-7)$$

特征方程的根 p_i 称为传递函数的极点,而使传递函数为零的 s 则为零点 z_i 。可将传递函数写成零、极点的因式乘积的形式,即

$$G(s) = K \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{i=1}^n (s - p_i)}, \quad n \geq m \quad (2-8)$$

式中, K 为系统的放大系数。上述系统有 m 个零点, n 个极点。一般的系统也可能有重零点和重极点。这些零点和极点值与系统微分方程的系数有关。在复平面中,零点和极点的位置决定了系统的稳定性质。

当传递函数 $G(s)$ 具有 n 个不同的极点 $p_k (k=1, 2, 3, \dots, n)$ 时,它又可表示为极点因子的代数数和的形式,从而求出其拉氏逆变换,如

$$G(s) = \frac{\sum_{j=0}^m b_j s^j}{\sum_{k=0}^n a_k s^k} = \frac{\sum_{j=0}^m b_j s^j}{a_n \prod_{k=1}^n (s - p_k)} = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{s - p_k} \quad (2-9)$$

则

$$g(t) = \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t}, \quad t \geq 0 \quad (2-10)$$

当 $G(s)$ 有重极点时,有

$$G(s) = \frac{\sum_{j=0}^m b_j s^j}{a_n (s - p_1)^r \prod_{k=2}^{n-r} (s - p_k)} = \sum_{k=1}^r \frac{A_k}{(s - p_1)^k} + \sum_{k=2}^{n-r} \frac{B_k}{s - p_k} \quad (2-11)$$

$$g(t) = \sum_{k=1}^r \frac{A_k t^{k-1} e^{p_1 t}}{(k-1)!} + \sum_{k=2}^{n-r} B_k e^{p_k t}, \quad t \geq 0 \quad (2-12)$$

3. 框图基本要素

① **传函方框**:表现传递函数。不管是简单的传递函数还是复杂的函数都能用一种方框表示。

② **信号流线**:用带箭头的线表示信号传递及其方向。

③ **分支点**:当信号从一条线上分成多条线时,分叉点称为分支点。分支点每条线上的信号是相同的。图 2-2 是为分支点的情况。

④ **比较点**:两个或两个以上的输入信号进行相减或相加的环节称为比较点。图 2-3 为比较点的符号,用“+”表示信号相加(可省略),用“-”表示信号相减。在比较点上信号的量纲应相同。