

高等学校优秀教材辅导丛书

自动控制原理 学习指导与解题指南

任伟建 于 镒 董宏丽○主编

HEUP

哈尔滨工程大学出版社

高等学校优秀教材辅导丛书

自动控制原理 学习指导与解题指南

(配李友善第三版教材·国防工业版)

主 编 任伟建 于 镒 董宏丽
主 审 关学忠 邵克勇

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书是以李友善编著的《自动控制原理》为基础,为学生复习和考研编写的指导书。本书共分 10 章,每章内容包括知识要点、书后习题解析、同步训练题和同步训练题答案四部分,旨在帮助学生熟练掌握自动控制原理的基本理论,从而理清思路、掌握重点、突破难点,提高解题技巧和应试能力。

本书内容全面、重点突出、分析透彻,可作为高等学校电类、机械类学生的学习辅助参考书,也是专业教师的教学参考书,还可作为各类工程技术人员和自学者的辅导书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理学习指导与解题指南/任伟建,于镐,
董宏丽主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2013. 8
ISBN 978 - 7 - 5661 - 0661 - 2

I. ①自… II. ①任… ②于… ③董… III. ①自动控
制理论 - 研究生 - 入学考试 - 自学参考资料 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 189043 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省委党校印刷厂
开 本 787mm × 960mm 1/16
印 张 17.5
字 数 350 千字
版 次 2013 年 8 月第 1 版
印 次 2013 年 8 月第 1 次印刷
定 价 33.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn



P r e f a c e

前言

自动控制技术广泛应用于国民经济的各个领域,并成为探索各种新技术的工具,自动控制原理已经成为各工科类的专业技术基础课。自动控制原理课程内容抽象,涉及的数学知识较多,学生普遍感觉难学。本书是为帮助学生理清思路、总结归纳和系统地学习,也为满足报考研究生的读者提高复习效率的需要,针对该课程的特点,并结合作者多年从事该课程的教学经验编写而成的。

本书以李友善编著的第三版《自动控制原理》教材为基础,对各章知识要点进行了系统地归纳总结,通过书后习题解析,帮助读者正确理解课程的基本理论和基本方法,选择具有代表性的典型题作为同步训练题,旨在提高读者分析问题、解决问题的能力。本书既可作为本专科生及自学者学习《自动控制原理》的辅导资料,又可作为考研者系统复习的参考书。

本书由任伟建、于镒、董宏丽主编,关学忠、邵克勇主审。其中第3、10章由董宏丽编写,第5、6、9章由于镒编写,第2、4、7章由任伟建编写,第1、8章由王艳芹编写,全书由任伟建统稿。研究生孙勤江、沈彬为本书的文字录入、编辑做了大量工作,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中可能存在错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2013年6月

Contents 目录

第1章 控制系统的一般概念	1
知识要点	1
1.1 基本概念	1
1.2 自动控制的基本方式	1
1.3 控制系统的分类	2
1.4 反馈控制系统的组成及基本要求	3
同步训练题	5
同步训练题答案	7
第2章 控制系统的数学模型	9
知识要点	9
2.1 控制系统的时域模型	9
2.2 线性系统的复域模型	11
2.3 控制系统的方框图和信号流图	14
2.4 脉冲响应	16
书后习题解析	17
同步训练题	32
同步训练题答案	34
第3章 线性系统的时域分析	37
知识要点	37
3.1 典型输入信号	37
3.2 一阶系统的时域分析	38
3.3 二阶系统的时域分析	40
3.4 线性系统的稳定性与稳定判据	46
3.5 反馈系统的误差与偏差	49
3.6 反馈系统的稳态误差及其计算	50
3.7 顺馈控制的误差分析	53
书后习题解析	55
同步训练题	75

C o n t e n t s

同步训练题答案	76
第4章 根轨迹法	78
知识要点	78
4.1 反馈系统的根轨迹	78
4.2 绘制根轨迹的基本规则	80
4.3 典型反馈系统的根轨迹	82
4.4 根轨迹与系统性能的关系	83
书后习题解析	84
同步训练题	99
同步训练题答案	100
第5章 线性系统的频域分析	104
知识要点	104
5.1 频率响应及其描述	104
5.2 频率响应的绘制	106
5.3 Nyquist 稳定判据	113
5.4 控制系统的相对稳定性	114
5.5 频域指标与时域指标间的关系	115
书后习题解析	116
同步训练题	132
同步训练题答案	133
第6章 控制系统的综合与校正	135
知识要点	135
6.1 引言	135
6.2 基本控制规律分析	136
6.3 常用校正装置及特性	137
6.4 串联校正	139
6.5 反馈校正	143
书后习题解析	144
同步训练题	158
同步训练题答案	159

Contents

第7章 线性离散系统的分析与综合	162
知识要点	162
7.1 基本知识	162
7.2 Z 变换	163
7.3 脉冲传递函数	165
7.4 离散系统脉冲响应	166
7.5 稳定性分析	168
7.6 线性离散系统的数字校正	168
书后习题解析	170
同步训练题	179
同步训练题答案	182
第8章 线性系统的状态空间分析法	183
知识要点	183
8.1 基本概念	183
8.2 状态空间表达式的建立	184
8.3 线性定常系统的分析	192
8.4 线性连续状态方程的离散化	196
8.5 李雅普诺夫稳定性分析	196
书后习题解析	198
同步训练题	210
同步训练题答案	211
第9章 线性系统的状态空间综合法	215
知识要点	215
9.1 线性系统的能控性与能观测性	215
9.2 线性系统的状态反馈与输出反馈	216
书后习题解析	218
同步训练题	228
同步训练题答案	230

C o n t e n t s

第 10 章 非线性控制系统分析	234
知识要点	234
10.1 非线性系统概念	234
10.2 相平面法	235
10.3 描述函数法	240
10.4 非线性控制系统稳定性分析	243
书后习题解析	246
同步训练题	266
同步训练题答案	268

第1章 控制系统的一般概念



1.1 基本概念

自动控制——在无人直接参与的情况下,利用控制装置使被控对象自动按预定规律运行。

控制系统——用以完成一定控制任务的元、部件的组合。

被控对象——需要控制的机器、设备或生产过程。

控制器——对被控对象起控制作用的设备总体,即控制装置。

输出量——按控制系统或被控对象的需要进行控制的物理量,即被控制量。

输入量——作用于控制系统的物理量,可分为使系统具有预定功能的控制输入量(简称控制量)和破坏系统控制输入量和输出量之间预定规律的干扰输入量(简称干扰或扰动量)。

反馈——将系统输出量引到输入端,以改变输入量的大小,分正、负反馈两种。

1.2 自动控制的基本方式

1.2.1 开环控制系统

输出信号只受控于输入信号,而不反馈到输入端产生控制作用的控制系统为开环控制系统。典型的开环控制系统方框图如图1-1所示。信号在方框图中是单向传递的,一定的控制量对应一定的输出量。当系统受到扰动量的作用,使得实际输出偏离期望的输出量时,该系统不具备自动修正的能力,即抗干扰性差。但该类系统结构简单,成本低廉,不存在系统稳定性问题,故常用在系统结构、参数稳定性较高而扰动信号弱的场合。



1.2.2 闭环控制系统

将输出量直接或间接反馈到输入端形成闭环参与控制的控制系统为闭环控制系统。典型的闭环控制系统方框图如图 1-2 所示。由于干扰的存在,使得系统实际输出偏离期望输出,系统自身便利用负反馈产生的偏差所取得的控制作用去消除偏差,使系统输出量重新恢复到期望值上,这正是负反馈的工作原理。可见,闭环控制系统具有较强的抗干扰能力,从而

有可能采用精度不高、成本低廉的元件来构成控制质量较高的系统。但由于闭环控制系统结构相对复杂,系统稳定性问题显得尤为重要。

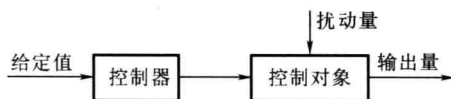


图 1-1 开环控制系统

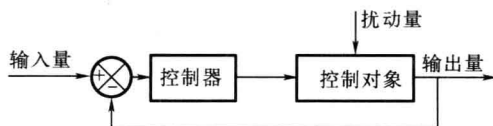


图 1-2 闭环控制系统

1.3 控制系统的分类

按照不同的要求,对控制系统可以进行不同的分类。

1.3.1 恒值控制系统和随动控制系统

若系统的控制输入为常量,这种系统称为恒值或定值控制系统;若控制输入是随时间变化的,这种系统则称为随动控制系统。其中控制输入随时间任意变化,不能写成时间的解析函数的随动系统又称跟踪系统;相反,控制输入随时间变化有一定变化规律,可写成时间的解析函数的随动系统称为程序控制系统。

1.3.2 线性系统和非线性系统

当系统各元件的输入输出特性均为线性特性时,系统的数学模型可用线性微分方程或线性差分方程描述,称这种系统为线性系统。如果线性微分方程或差分方程的系数为常数,则称之为线性定常系统;否则,称为线性时变系统。线性系统的特点是满足线性叠加原理。系统中只要有一个元件具有非线性特性,系统的数学模型就要用非线性方程描述,则该类系统称为非线性系统,它不满足线性叠加原理。

1.3.3 连续系统和离散系统

当系统中所有变量或信号均随时间连续变化时,其动态模型是以时间为自变量的微分方程,属于连续时间模型,该类系统称为连续系统;采样或数字控制系统有一个或 n 个变量只在特定的瞬间是已知的,其数学模型是以离散时间为自变量的差分方程,属于离散时间模型,该类系统称为离散系统。

1.3.4 确定性系统和不确定性系统

若系统的结构、参数及输入信号都是确定的,则该类系统称为确定性系统;否则,当系统本身的结构或参数以及输入信号为不确定时,称为不确定性系统。

1.3.5 集中参数系统和分布参数系统

若系统变量在同一时刻不随空间位置变化或仅取一个值时,得到的动态模型为仅含时间自变量的常微分方程,该类系统称为集中参数系统;否则,若系统变量是在空间中连续分布的,系统变量不仅随时间也随空间坐标的变化而变化,由此导出的动态数学模型是以时间和空间坐标为自变量的偏微分方程,该类系统称为分布参数系统。

1.3.6 单输入单输出(SISO)系统和多输入多输出(MIMO)系统

若系统的输入和输出信号的数量均为一个,则称为SISO系统;若系统的输入和(或)输出信号的数量大于一个则称为MIMO系统。单输入单输出系统可采用经典控制理论进行控制系统的分析和设计,而多输入多输出系统则可采用现代控制理论的状态空间法。

1.3.7 其他分类方法

除以上分类方法外,还可按系统功用分为温度控制系统、液位控制系统、压力控制系统等,也可按元件类型将系统分为机电控制系统、液位控制系统等,需要说明的是一个控制系统可兼顾多种分类方式的特点,如温度定值控制系统。

1.4 反馈控制系统的组成及基本要求

图1-3给出了反馈控制系统的方框图,其各组成元件及功能介绍如表1-1所示。

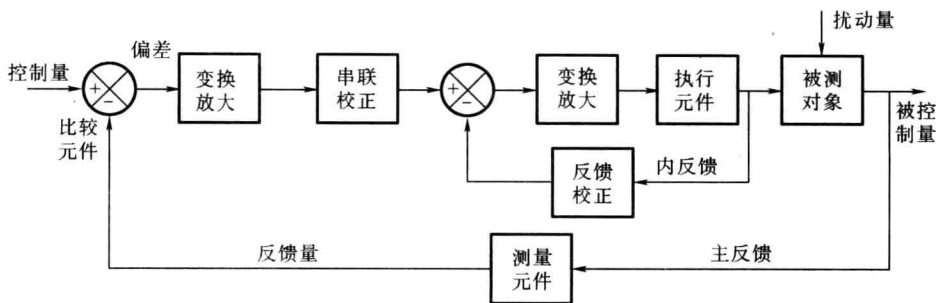


图 1-3 反馈控制系统方框图

表 1-1 一般反馈控制系统的组成元件及功能

组成元件	功 能
测量元件	测量输出信号(有时需变送元件进一步转换成标准信号)
比较元件	对输入信号与反馈信号进行综合
前置放大器(放大元件)	放大偏差信号的幅值,为系统提供较大的回路增益
功率放大器(放大元件)	对控制信号进行能量放大,使之达到执行元件的要求
执行元件	根据已放大的控制信号对被控对象进行操纵,即执行控制任务
被控对象	控制系统要操纵(控制)的设备、生产过程等
校正元件	用于改善控制系统的动态和(或)稳态性能

各种自动控制系统,为了完成一定的控制任务,必须具备一定的性能,具体归结为以下三点。

稳定性:要求系统在克服外作用后,能够恢复到平衡状态。这是保证系统能够正常工作的首要条件。

快速性:指系统消除偏差的快慢程度。一个动态性能好的控制系统,应具有较短的响应时间,或具有较快的响应速度。

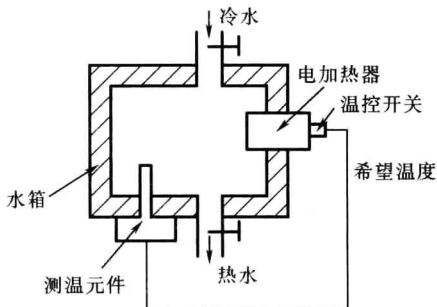
准确性:指系统在输入信号作用下稳态误差的大小。稳态误差越小,系统的稳态性能越好,控制精度越高。



TONG BU XUN LIAN TI

同步训练题

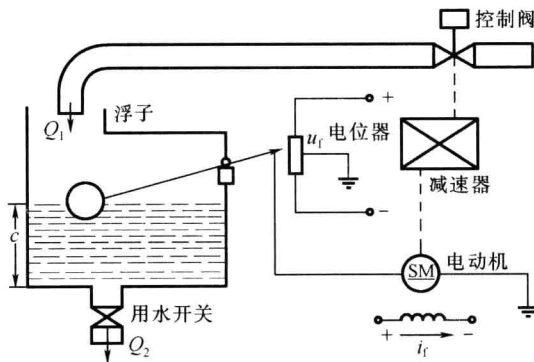
1. 设热水电加热器如图所示。为了保持希望的温度,由温控开关接通或断开电加热器的电源。在使用热水时,水箱中流出热水补充冷水。试说明系统工作原理并画出系统原理方框图。



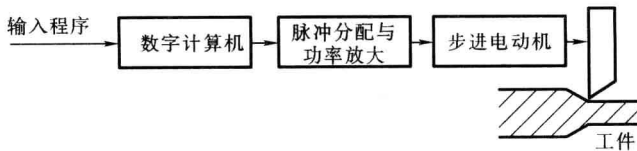
题 1 图

2. 题 2 图是液位自动控制系统原理示意图。在任何情况下,希望液面高度 c 不变,试说明系统的工作原理并画出系统方框图。

3. 题 3 图为数字计算机控制的机床刀具进给系统方框图。要求将工件的加工过程编制成程序预先存入数字计算机,加工时,步进电机按照计算机给出的信息工作,完成加工任务。试说明该系统的工作原理。



题 2 图



题 3 图

4. 下列各式是描述系统的微分方程,其中 $c(t)$ 为输出量, $r(t)$ 为输入量,试判断哪些是线性

定常或时变系统,哪些是非线性系统?

$$(1) c(t) = 5 + r^2(t) + t \frac{d^2 r(t)}{dt^2};$$

$$(2) \frac{d^3 c(t)}{dt^3} + 3 \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 6 \frac{dc(t)}{dt} + 8c(t) = r(t);$$

$$(3) t \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t) + 3 \frac{dr(t)}{dt};$$

$$(4) c(t) = r(t) \cos \omega t + 5;$$

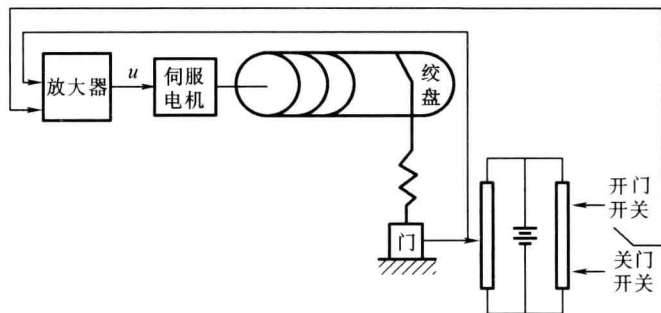
$$(5) c(t) = r^2(t);$$

$$(6) c(t) = 3r(t) + 6 \frac{dr(t)}{dt} + 5 \int_{-\infty}^t r(\tau) d\tau;$$

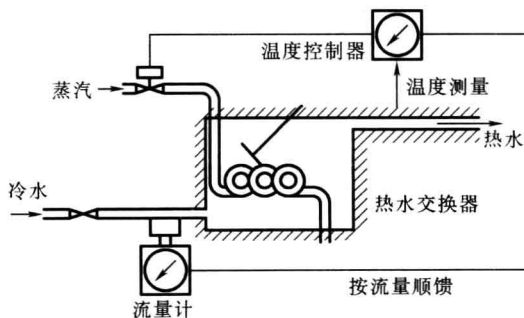
$$(7) c(t) = \begin{cases} 0 & t < 6 \\ r(t) & t \geq 6 \end{cases}$$

5. 题5图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关的工作原理,并画出系统方框图。

6. 题6图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,并说明为了保证热水温度为期望值,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5图



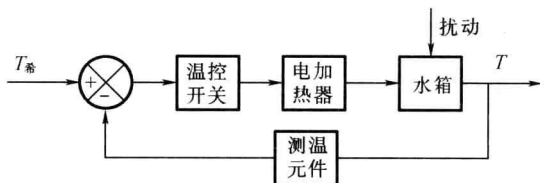
题6图

同步训练题答案

TONG BU XUN LIAN TI DA AN

1. 解 在热水电加热器系统中,输入量为预置的希望温度(给定值),设为 $T_{\text{希}}(^{\circ}\text{C})$;输出量为水箱的实际水温,设为 $T(^{\circ}\text{C})$;控制对象为水箱;扰动信号主要是因为放出热水并注入冷水而产生的降温作用。

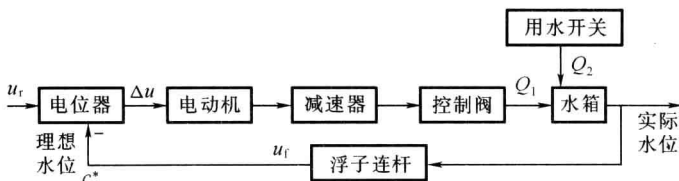
当 $T(^{\circ}\text{C}) = T_{\text{希}}(^{\circ}\text{C})$ 时,电加热器不工作,此时水箱中水温保持在希望温度上。当使用热水时,由于扰动作用使实际水温下降,测温元件感受 $T(^{\circ}\text{C}) < T_{\text{希}}(^{\circ}\text{C})$ 的变化,并把这一温度变化转化为电信号使温控开关工作。温控开关接通电源,使水箱中水升温,直至 $T(^{\circ}\text{C}) = T_{\text{希}}(^{\circ}\text{C})$ 为止。系统原理方框图如图所示。



题1解图

2. 解 系统的控制任务是保持液面高度不变。水箱是被控对象,水箱液位是被控量,电位器设定电压 u_r (表征液位的希望值 c^*) 是给定值。

当电位器电刷位于中点位置(对应 u_r)时,电动机不动,控制阀门有一定的开度,使水箱中流入水量与流出水量相等,从而使液面保持在希望高度 c^* 上。一旦流出量发生变化(相当于扰动),例如当流出水量减小时,液面升高,浮子位置也相应升高,通过杠杆作用使电位器电刷从中点位置下移,从而给电动机提供一定的控制电压,驱动电动机通过减速器减小阀门开度,使进入水箱的液体流量减小。这时,水箱液面下降,浮子位置相应下降,直到电位器电刷回到中点位置为止,系统重新处于平衡状态,液面恢复至给定高度。反之,当流出水量在平衡状态基础上增大时,水箱液位下降,系统会自动增大阀门开度,加大流入水量,使液位升到给定高度 c^* 。系统方框图如题2解图所示。



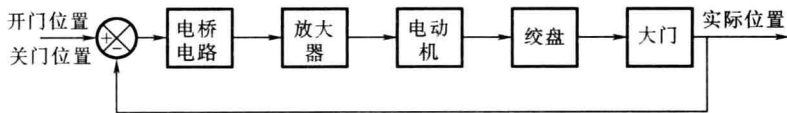
题2解图

3. 解 该系统是开环程序控制系统,被控对象为刀具,被控量为刀具位置,给定量是程序设

定的刀具位置。计算机按编制的程序调节输出脉冲频率,通过脉冲分配与功率放大装置控制步进电机的转动,从而带动刀具按预定的轨迹进刀,完成加工任务。

4. 解 (1)非线性时变动态系统; (2)线性定常动态系统;
(3)线性时变动态系统; (4)非线性时变静态系统;
(5)非线性定常静态系统; (6)线性定常动态系统;
(7)线性时变静态系统。

5. 解 当合上开门开关时,电桥会测量出开门位置与大门实际位置间对应的偏差电压,偏差电压经放大器放大后,驱动伺服电动机带动绞盘转动,将大门向上提起。与此同时,和大门连在一起的电刷也向上移动,直到桥式测量电路达到平衡,电动机停止转动,大门达到开启位置。反之,当合上关门开关时,电动机带动绞盘使大门关闭,从而可以实现大门远距离开闭自动控制。系统方框图如解图所示。

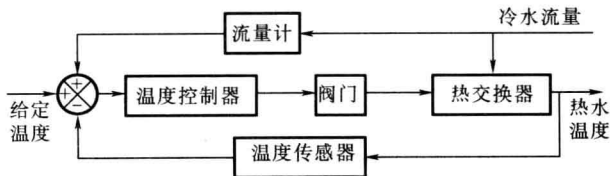


题 5 解图

6. 解 温度传感器不断测量交换器出口处的实际水温,并在温度控制器中与给定温度相比较,若低于给定温度,其偏差使蒸汽阀门开大,进入热交换器的蒸汽量加大,热水温度升高,直至偏差为零。如果由于某种原因,冷水流量加大,则流量值由流量计测得,通过温度控制器,开大阀门,使蒸汽量增加,提前进行控制,实现按冷水流量进行顺馈补偿,保证热交换器出口的水温波动不大。

系统中,热交换器是被控对象,控制装置由控制器(完成比较、运算功能),阀门(执行机构),温度传感器和流量计(测量元件)组成。实际水温为被控量,给定量(希望温度)在控制器中设定;冷水流量是干扰量。

系统方框图如解图所示。这是一个按干扰补偿的复合控制系统。



题 6 解图

第2章 控制系统的数学模型



2.1 控制系统的时域模型

在控制系统的分析和设计中,一个非常关键的问题就是要建立系统的数学模型。不同类型(如机械、电子等)的控制系统,可以有相同的数学模型(相似原理),因此只有通过数学模型,才能抛开各种类型的系统的外部特征,研究其内在的共同性规律。

控制系统的数学模型,是描述系统内部各种变量间关系的数学表达式。系统平衡时,系统变量(输入变量、输出变量、状态变量)间的对应关系称为静态数学模型;在动态过程中得到的数学模型称为动态数学模型。本章主要研究控制系统的动态数学模型,简称数学模型。

常用的数学模型形式有微分方程(或差分方程)、传递函数(或脉冲传递函数)、频率特性(或描述函数)、状态方程以及由数学表达式演化而来的数学图示——方框图和信号流图。本章重点介绍微分方程、传递函数及两种数学图示形式的数学模型。其他形式的数学模型在后面章节中将分别予以介绍。图2-1给出了系统模型及建立过程。

控制系统数学模型的建立方法有实验法和解析法两种。实验法是对系统施加典型输入信号(如阶跃、脉冲、正弦信号等),通过测取系统的时域响应或频率响应来获得数学模型。解析法则是从系统或元件所遵循的物理或化学定律出发,列出变量间的数学关系或建立数学模型。本章仅讨论解析法。

2.1.1 系统运动方程的列写

控制系统的运动方程亦称微分方程,是描述系统动态性能的一种动态数学模型,建立系统或元件运动方程的一般步骤如下。