

(非控制类专业用书)

# 自动控制概论

曹克民 主编

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

自动控制概论/曹克民主编.—北京:中国建材工业出版社,2002.1

ISBN 7-80159-231-x

I.自... II.曹... III.自动控制概论 IV.TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第098279号

自动控制概论

曹克民 主编

\*

中国建材工业出版社出版

(北京三里河路11号 邮编100831)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

北京丽源印刷厂印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:14.125 字数:335千字

2002年1月第1版 2003年1月第2次印刷

印数:3 001—6 000册 定价:22.00元

ISBN 7-80159-231-x/G·039

# 序

“自动控制”现已成为包括电气、机械、化工、动力、核反应堆及国防武器等各类大学科的本专科生或研究生都要学习的一门课程,同时也是一门普遍反映不太容易学习和掌握的课程。究其原因,一方面其所属学科“控制科学与工程”与工业、国防等有密切联系且发展迅速、内容更新较快;另一方面涉及到一些较深的数学知识。更为重要的是,缺少一本对非控制类专业深度适中、讲述清楚的教材。

我认为本书有如下几个特点(1)专门为非控制类专业编写,具有针对性(2)教材的内容比较全面丰富(3)叙述方式上采用了“具体到一般”的归纳推理方式,使一个个新的概念容易被初学者接受(4)介绍了诸如“状态空间法”等新内容,有一定的前瞻性(5)介绍了应用MATLAB语言于自动控制系统的分析和设计,具有一定的先进性(6)每章之后都备有习题,颇有启发性(7)专门有一节讲述典型控制系统的应用,综合地介绍如何设计和实现一个控制系统,具有示范性(8)讲解清楚,深入浅出,便于自学。

作者二十世纪60年代就读于西安交通大学自动控制专业,毕业后在工厂从事专业工作多年,后转入高等学校从事教学工作。所以他具有较丰富的实践经验,同时又很好地掌握了自动控制理论并有长期教学经验。由他主编的这本教材,是他在长期讲授“自动控制原理”和多次讲授“自动控制概论”的基础上,反复修改、完善而成,我感觉是一本适合现代教育要求的新教材。

我相信本书的出版,将为非控制类专业的本专科生或研究生以及在职技术人员提供了一本好教材,因而也会对我国自动化的教育起到积极的推动作用。

万百五

西安交通大学电信学院

2001年12月19日

# 前 言

当代科学技术的发展和社会的进步,是以数字计算机技术和自动控制技术的迅猛发展为先导的,特别是在不断开拓的边缘学科及不断创新的研究方法和技术手段上,也是以计算机技术和自动控制技术向各个领域渗透、转移最为明显。国内外运用其解决火箭、卫星、导弹制导等高新技术领域及一般的工程问题等方面所取得的成就也有目共睹。在解决社会科学、经济、管理、生物工程及环境工程等领域的问题,都已取得了举世瞩目的成果。随着科学技术及计算机技术的飞速发展,控制论正朝着图象识别、人工智能、机器人的方向发展,它们将成为融合于一体的更先进的科学技术。因此,自动化的理论基础——自动控制原理,作为非控制类专业的学生及技术人员必须问津的基础知识,已是时代的呼唤,熟悉和掌握控制论的基本原理和思想方法,也是现代高技术人才必备的最基本素质之一。《自动控制概论》讲述了自动控制原理中最基本而且最重要的基础知识,为非控制类专业学生和技术人员掌握控制论的基本理论和思想奠定坚实的基础,它是迈进自动控制大门的领路者。

本书是根据高等工科院校非控制类专业的需求而编写的,参考学时为60~70学时。在编写方法上采用了归纳推理式思维方法,符合初学者的认识规律,在内容的取舍上尽可能地把经典控制论与近代控制论、常规控制与数字控制有机地结合;在深度和广度上以基本理论、基本概念、基本计算为主,适当地加深和拓宽,尽量避免艰深的理论推导和繁复的证明,在层次上以控制理论为基础,加入了过程控制系统,并适当加入了理论的实际应用;在学习手段上加入了应用当前最新的MATLAB语言进行学习的简便、快捷而又有效的方法。通过对本书的学习能使读者在较短的时间内,初步掌握自动控制的基本理论和思想方法。

本书共有七章及三个附录,第一章讲述自动控制的基本原理及基本概念;第二章讲述自动控制系统及元器件数学模型的建立,简要介绍自动控制系统常用元器件的原理及模型;第三章讲述线性连续控制系统的分析方法;第四章讲述线性连续控制系统的设计与校正;第五章讲述离散控制系统的分析与设计;第六章讲述过程控制系统的分析与设计;第七章讲述非线性控制系统的分析与设计。附录I、II介绍Laplace变换和矩阵初步,附录III简明扼要介绍MATLAB语言及其在自动控制中的应用。

本书第一、二、三、四、五、七章及附录I、II由曹克民编写,第六章及其插图和附录III由稽启春编写。书中除第六章外的所有插图由曹克民和信控学院自动化九七级谭彬同学共同完成。全书由曹克民主编。

本书是作者在计算机应用专业讲授《自动控制概论》课的手稿,经过多次修改形成讲义,并经过多届教学实践,进行反复修改和补充而形成的。在编写和修改本书的过程中,得到了自动控制系任庆昌教授、高等教育研究室秦春魁研究员等同仁的关注和大力支持。本书由自动化教研室刘冠章教授、席爱民教授对初稿进行了审阅,并提出了很多宝贵意见和建议。曾担任中国自动化学会常务理事、现为荣誉理事、博士生导师的万百五教授为本书书写了序言。本书能

正式与大家见面,还得益于校教材科同志的全力帮助。本教材的正式出版还与出版社同志特别是郑奕编辑的辛勤工作密不可分,本书在重版印刷时佳木斯煤矿机械厂的阎德春同志提出了许多宝贵意见。谨在此一并向他们表示由衷的感谢。

本书为非控制类专业的教学用书,也可以作为非控制类科技人员的自学用书。由于作者水平有限,书中难免会存在欠缺和不足,望读者及同仁不吝赐教。

作 者

2003. 1. 于西安建筑科技大学

Emil. Wang Com@pub. xaonline. com

## 目 录

1	自动控制的基本概念 .....	( 1 )
1.1	状态的转移和自动控制的基本原理 .....	( 1 )
1.2	自动控制系统的组成 .....	( 6 )
1.3	自动控制系统的分类 .....	( 7 )
2	自动控制系统的的基本元部件和数学模型 .....	( 9 )
2.1	电位器 .....	( 9 )
2.2	晶闸管变流器 .....	( 10 )
2.3	电力传动装置 .....	( 13 )
2.4	控制微电机 .....	( 15 )
2.5	齿轮减速器 .....	( 22 )
2.6	液压元器件 .....	( 22 )
2.7	几种常用的检测元件 .....	( 27 )
2.8	动态方程和传递函数 .....	( 30 )
2.9	状态空间描述 .....	( 41 )
2.10	状态空间描述与传递函数的关系 .....	( 44 )
2.11	频率响应与频率特性 .....	( 49 )
2.12	自动控制系统典型环节的频率特性 .....	( 52 )
2.13	自动控制系统的频率特性 .....	( 55 )
3	线性连续控制系统的特性分析 .....	( 62 )
3.1	自动控制系统的时域性能指标 .....	( 62 )
3.2	闭环特征方程的根与过渡响应 .....	( 64 )
3.3	一阶和二阶系统的时域响应 .....	( 65 )
3.4	高阶系统的时域响应 .....	( 70 )
3.5	线性定常系统状态方程的求解 .....	( 71 )
3.6	闭环系统的稳定性 .....	( 73 )
3.7	闭环系统的稳态特性 .....	( 81 )
3.8	根轨迹分析法 .....	( 85 )
3.9	频率域的分析方法 .....	( 90 )
4	线性连续控制系统的设计与校正 .....	( 97 )
4.1	概述 .....	( 97 )
4.2	常用的电校正装置 .....	( 98 )
4.3	工业自动控制器 .....	( 101 )

4.4	自动控制系统的校正 .....	(105)
4.5	自动控制系统的工程设计方法 .....	(111)
5	离散控制系统 .....	(120)
5.1	采样过程与采样定理 .....	(120)
5.2	保持器 .....	(122)
5.3	Z 变换及 Z 反变换 .....	(124)
5.4	线性定常离散时间系统的状态空间表达式 .....	(128)
5.5	脉冲传递函数 .....	(131)
5.6	闭环系统的脉冲传递函数 .....	(132)
5.7	离散控制系统的稳定性分析 .....	(134)
5.8	离散控制系统的稳态误差 .....	(136)
5.9	离散控制系统的时域响应 .....	(138)
5.10	离散控制系统的设计与校正 .....	(143)
6	过程控制系统 .....	(146)
6.1	过程控制系统的构成及其性能指标 .....	(146)
6.2	过程对象的特性 .....	(147)
6.3	常规过程控制系统 .....	(148)
6.4	计算机过程控制系统 .....	(152)
6.5	直接数字控(DDC)系统 .....	(157)
6.6	集散控制系统(DCS) .....	(165)
6.7	典型过程控制系统的应用 .....	(167)
7	非线性控制系统 .....	(171)
7.1	概述 .....	(171)
7.2	描述函数 .....	(172)
7.3	非线性控制系统的描述函数分析 .....	(176)
7.4	相平面和相轨迹 .....	(178)
7.5	非线性系统的相平面分析 .....	(183)
7.6	伺服系统的最佳控制 .....	(184)
7.7	非线性系统性能的改善 .....	(185)
附录 I	拉普拉斯变换 .....	(188)
附录 II	矩阵初步 .....	(193)
附录 III	MATLAB 语言及其在自动控制中的应用 .....	(196)
参考文献	.....	(217)

# 1 自动控制的基本概念

在工程和科学的发展过程中,自动控制起着重要的作用。人类企图控制自然的要求,一直是促使整个历史发展的动力,控制自然的目的是借以完成超出人们力所能及的任务。除了在宇宙飞船、导弹制导和飞机驾驶系统等领域中,自动控制具有特别重要的作用之外,它已成为现代机器制造业及工业生产过程中的重要而不可缺少的组成部分。例如在生产过程中,对压力、温度、粘性和流量等的控制,冶金工业中轧钢机的速度、带钢轧制中的张力等等更是离不开自动控制。

自动控制技术的广泛应用,是由于它能大大提高产品的质量和数量,降低生产成本和消耗,大大提高生产设备的效能和资金周转的速度,大大改善劳动条件,代替人在恶劣和特殊环境下劳动作业,它还能极大地提高人们对社会生产和其它活动进行科学预测及决策的能力。自动控制理论是一门介于许多学科之间的学科,同时又渗透到各个学科之中。如电气、机械、航空、化工、核反应、经济管理、生物工程及其它有关的所有领域之中。因此,这门多科性的学科,对大多数工程技术人员和科技工作者是必须具备的基础知识。

人类早就在自动控制技术、自动测量等领域作出了惊人的发现和广泛的应用。例如公元78~139年张衡发明的浑天仪、候风地动仪,公元三世纪发明的记里鼓车,公元前2689~78年间黄帝发明的指南车等等的发明和创造,就是我们中华民族在自动控制技术领域最早应用的见证。控制论自1945年开始形成学科至今发展非常迅速,特别是近代空间技术及计算机技术的迅猛发展,大大地促进了自动控制理论和技术的发展,已经在“经典控制论”的基础上,进一步发展的“近代控制论”及“大系统理论”,又极大地促进了科学技术的重大突破和发展。

一个系统如何进行控制?怎样才能实现自动控制?自动控制系统如何构成?以及它的运动规律等等,就是我们这门课程研究和探讨的主要内容。

## 1.1 状态的转移和自动控制的基本原理

### 1.1.1 状态的转移和控制

首先,我们来考察一下作为浴盆的水位和水温调节的实例,如图1-1所示。水、煤气可以分别由阀门 $V_w$ 和 $V_G$ 来调节。人们未沐浴时,首先将浴盆的水位和水温调至最理想的状态(也称希望状态): $T = 42^\circ$ ,  $h = 60\text{ cm}$ ,用 $S(42, 60)$ 表示。当人们进入浴盆后,水位 $h$ 和水温 $T$ 都要发生变化,偏离了希望状态,这时的实际状态用 $y(T, h)$ 来表示。为了能在希望状态下沐浴,应该怎样操纵阀门 $V_w$ 和 $V_G$ 呢?人们通常是先求出希望状态 $S(42, 60)$ 和实际状态

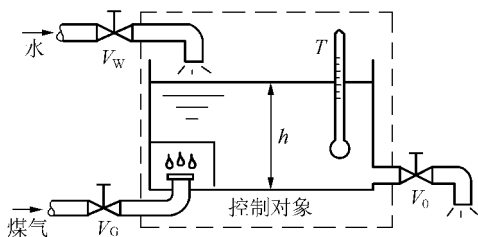


图 1-1 浴盆的水温水位调节示意图

$y(T, h)$  之间的差异, 也就是偏差, 用  $E(42 - T, 60 - h)$  表示, 然后以此偏差为依据来操纵阀门, 使水位和水温保持在希望状态。

为了便于分析, 这个过程可用图 1-2 所示的方框图来表示, 通常把这种方框图叫做职能方框图。它是由带箭头的线段(线段表示信号, 箭头表示信号流动的方向)、方框(方框表示元器件, 方框内写明元器件的功能)和圆圈(表示信号的综合)组成, 它清楚地表示出了控制的过程。由方框图可以看到, 把实际状态与希望状态进行比较, 得到偏差, 以偏差操纵元件( $V_w, V_G, V_0$  阀门), 产生必须的操纵量, 并传递给被控制的对象浴盆, 使浴盆从实际状态朝着希望状态转移。

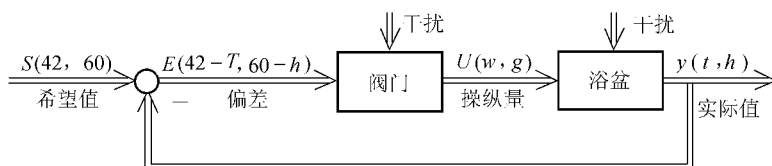


图 1-2 浴盆水温水位调节过程的方框图表示

从上面的分析可以看到, 浴盆由希望状态向实际状态转移, 是由于人进入的结果, 对浴盆来说就是受到了干扰的缘故。然而由实际状态再要向希望状态转移, 并保持在希望状态, 就必须进行适当地操纵才能达到, 这个操纵过程就是控制。现仅以图 1-3 所示的方框图来表示浴盆温度控制的过程。

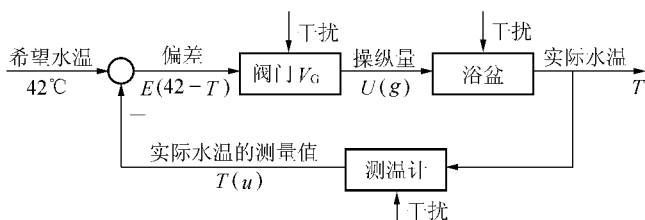


图 1-3 浴盆水温控制系统的职能方框图

为了完成上述的控制过程, 必须构成由控制环节、被控制对象、检测环节等组成的有机整体, 形成一个能完成上述特定任务的系统。系统的实际状态  $y(T, h)$  随着各种干扰(也叫扰动)因素的不断变化而变化着。要克服扰动因素的影响, 就要不断地提供适当地操纵, 才能使实际状态向希望状态转移, 并使之保持在希望状态, 这个过程就叫做控制。若此过程有人直接参与, 就称为人工控制; 若没有人直接参与, 从测量到操作阀门等全部过程都用机器代替人来完成, 就称为自动控制。

### 1.1.2 自动控制的基本原理

通过上面的分析可以看到, 要实现系统的状态按人们的要求进行转移, 就必须进行控制。那么要实现自动控制, 应采用何种控制方式(也称控制原理)呢? 最基本的控制方式有以下三种:

## 一、开环控制

对图 1-1 所示的系统,若仅考虑对液位进行控制,要求液位  $h$  保持恒定不变。它是根据希望液位  $h_0$  预先调节阀门  $V_w$  和  $V_0$  的开度比例,调好后就不再改变,运行过程也无人直接参予,若没有干扰或干扰很小,液位将保持或接近希望液位。这个过程可用如图 1-4 的职能方框图表示。此系统测量的是希望液位  $h_0$ ,而不测量实际液位  $h$ ,其信号是沿箭头方向单方面流动。当进水压力等扰动存在时,液位将无法保持希望液位。那么,要保持或接近希望液位,它只能依靠正确地选择高精度的控制装置等来近似地实现。这种控制方式称为开环控制。此种控制方式,由于对干扰无能为力,会使系统存在不允许的误差,则控制精度低。但是它结构简单、功耗小、动作快,不存在稳定性问题,故仍被广泛采用。如自动售票机、磁带录音机、自动机床装置以及积分运算的某些计算变换器、实现微分运算将一物理量转变为另一物理量的线性变换器等等。

## 二、补偿控制

如果扰动作用是可以测量的,那么,可将扰动作用经检测变换后,作为控制作用,用它来消除或削弱该扰动对被控量的影响,这种控制方式称为补偿控制方式。如指南车的控制。其职能方框图如图 1-5 所示。但是当扰动作用较多时,将使系统复杂化,很难协调地进行控制。这种控制方式也属于开环控制。

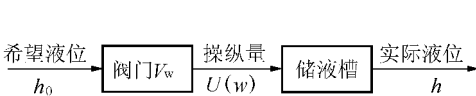


图 1-4 储液槽水位控制系统(开环控制)方框图

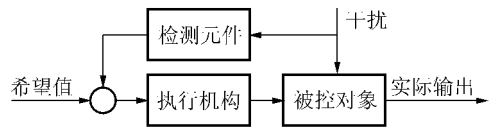


图 1-5 扰动补偿控制系统职能方框图

## 三、反馈控制(通常称闭环控制)

图 1-1 所示系统若采用人工控制,当通过阀门  $V_0$  的流量或进水压力等扰动的影响,引起液位  $h$  变化时,人用眼睛观察实际的液位,送入大脑与希望液位比较,经过思考(计算、判断、决策),确定对  $V_w$  的操作量,然后用手去操纵阀门  $V_w$ ,使液位保持在希望液位上。这个过程可用图 1-6 所示的方框图表示。如果能用一些相应的元部件来代替人工控制时各部分的功能,就可以组成如图 1-7 所示仿人液位控制系统。在图中用浮球代替人的眼睛,完成测量实际液位的作用;用杠杆代替人的大脑,完成比较、计算、决策的作用;用连杆和阀门代替人的手,完成调节阀门  $V_w$  的作用。其工作过程是:当进水压力在增大(或减小)时,贮槽液位将上升(或下降),浮球随之上升(或下降),带动杠杆使之倾斜,使连杆带动阀门下移(或上移),

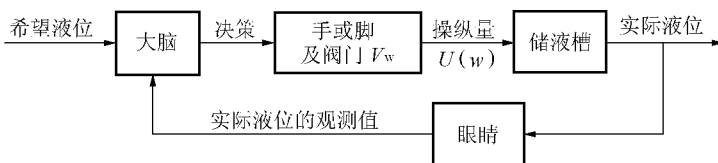


图 1-6 储液槽水位人工控制过程的职能方框图

$V_w$  开度减小(或增大),进水量减小(或增加),液位降低(或上升),浮球下降(或上升),这个过程循环往复,直至液位回到希望值。整个过程是在无人直接参予的条件下,借助浮球杠杆连接机构自动地维持液位恒定不变。其控制过程用职能方框图如图 1-8 表示。由图可清晰地看到这种控制的特点是:测量被控制对象(贮液槽)的实际液位,并送回去与希望液位进行比较,得到实际液位相对于希望液位的差值,通常叫偏差,产生控制作用,去控制贮液槽的实际液位,最终使实际液位与希望液位保持一致,直至消灭偏差,称为按偏差控制的方式。系统中的信息沿着箭头方向单方向流动,形成一个闭合的回路,循环往复完成控制过程,故也称为闭环控制方式。这种控制是不断地把对象的被控制量的实际工作状态的信息全部或部分传送到

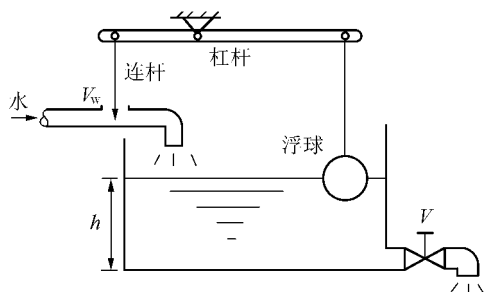


图 1-7 储液槽水位自动控制系统原理图

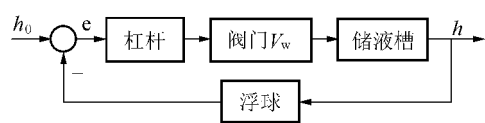


图 1-8 储液槽液位自动控制系统的职能方框图

系统的输入端,与希望值进行比较,此过程称为反馈,由反馈而获得偏差,又通过反馈最终消除偏差,所以也称为反馈控制。该系统虽然结构较复杂,但是,它对扰动作用具有较强的抵抗作用。它的主要优点在于考虑了实际运行的结果,而构成控制作用,因此控制精度高,得到极为广泛的应用。下面举几个实例。

**例 1-1 飞机-自动驾驶仪系统** 飞机-自动驾驶仪是一种能保持或改变飞机飞行状态的自动装置。它可以稳定飞行的姿态、高度和航迹;可以操纵飞机爬高、下滑和转弯。飞机与自动驾驶仪组成的自动控制系统称为飞机-自动驾驶仪系统。

如同飞行员操纵飞机一样,自动驾驶仪控制飞机飞行是通过控制飞机的三个操纵面(升降舵方向舵副翼)的偏转,改变舵面的空气动力特性,以形成围绕飞机质心的旋转转矩,从而改变飞机的飞行姿态和轨迹。现以比例式自动驾驶仪稳定飞机俯仰角为例,说明其工作原理。图 1-9 为飞机-自动驾驶仪系统稳定俯仰角的原理示意图。

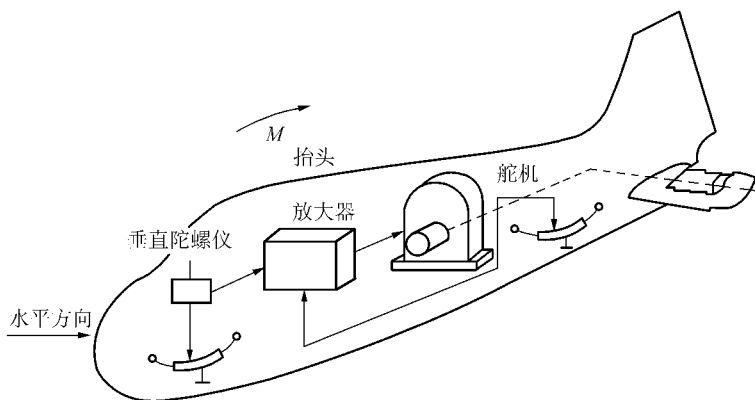


图 1-9 飞机-自动驾驶仪系统原理图

图中,垂直陀螺仪作为测量元件用以检测飞机的俯仰角,当飞机以给定俯仰角水平飞行时,陀螺仪电位器没有电压输出,如果飞机受到扰动,使俯仰角向下偏离期望值,陀螺仪电位器输出与俯仰角偏差成正比的信号,经放大器放大后驱动舵机,一方面推动升降舵面向上偏转,产生使飞机抬头的转矩,以减小俯仰角偏差;与此同时,带动反馈电位器滑臂,输出与舵偏角成正比的电压,并反馈到输入端。随着俯仰角偏差的减小,陀螺仪电位器输出信号越来越小,舵偏角也随之减小,直到俯仰角回到期望值,这时,舵面也恢复到原来状态。

图 1-10 是该系统的职能方框图。图中,飞机是被控对象,俯仰角是被控量,放大器舵机垂直陀螺仪反馈电位器等是控制装置,即自动驾驶仪。参考量是给定的常值俯仰角。控制系统的任务是在任何扰动(如阵风或气流冲击)作用下,始终保持飞机以给定俯仰角飞行。

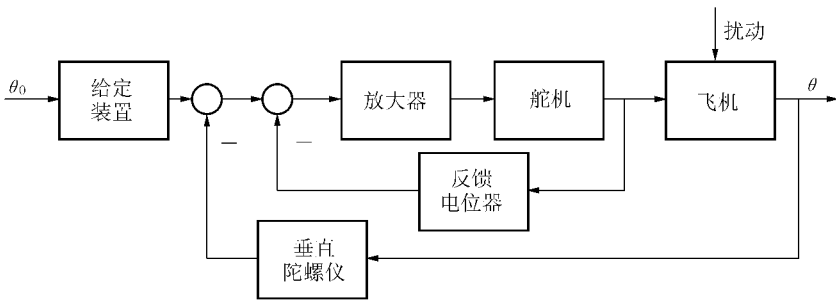


图 1-10 俯仰角控制系统方框图

**例 1-2 飞行模拟器的视景系统** 飞行模拟器是一种能逼真地复现飞行器在空中飞行的状态和环境的设备。它用模拟的方法,把驾驶员在操纵飞机时所能感觉到的飞机姿态、飞行状况、所能看到的各种仪表设备的指示、机外景物以及所能听到的各种噪音都逼真地反映出来,使驾驶员就像处在真实驾驶舱中一样地操纵飞机。用飞行模拟器培养飞行员,可以节约经费,缩短训练周期,且不受场地和气象条件的限制。飞行模拟器的核心部分是视景系统,其功能是采用闭路电视投影的方法,向驾驶员提供外景的模拟。视景系统由电视摄像机系统和电视投影机组成。摄像机镜头相对于外地景模型可以沿  $X$ (水平)、 $Y$ (高度)、 $Z$ (横向)三个直线方向和  $\alpha$ (俯仰)、 $\gamma$ (横滚)、 $\varphi$ (偏航)三个角方向移动。摄像机在每个方向的运动分别由一套反馈系统控制,电视投影机将所摄制的地景模型投影到驾驶员座椅前的电视屏幕上,给驾驶员提供了飞行过程的真实感受。现在以摄像机沿高度方向运动的控制系统为例,说明其工作原理。

视景系统的各套反馈系统都是数字计算机控制的系统。其中,高度控制系统的功用是控制摄像机镜头沿地景模型的垂直方向运动,以模拟飞机在飞行过程中的高度变化,其原理示意图如图 1-11。图中,摄像机镜头安装在由减速器和丝杆所带动的支架  $S$  上,可沿  $Y$  方向运动,并受视景系统程序计算机的控制指令控制,其位置反馈信号由电位器  $W$  检测并经 A/D 变换器反馈到计算机。计算机发出的控制指令是飞行高度的变化速率,它是根据飞行程序的有关信息并经位置反馈信号修正后形成的。首先,计算机给出数字量控制指令,经 D/A 变换器转换为连续的物理量;然后,经直流放大器放大,驱动直流伺服电动机  $M$ ,并通过传动机构带动支架  $S$  按照控制指令运动,同时还带动电位器  $W$  的滑动臂移动,输出位置反馈信息,用以修正控制指令,提高控制精度。

图 1-12 是视景系统高度控制系统的职能方框图。被控对象是装有摄像机的支架,它的

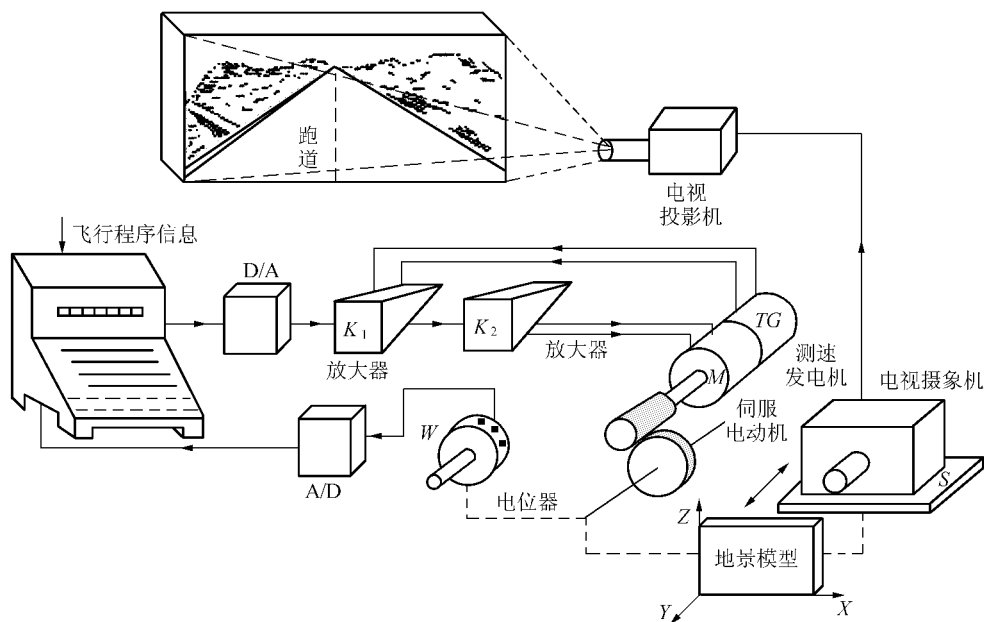


图 1-11 视景系统的高度控制系统

位置代表飞行高度,也就是被控量,系统的参考量便是飞行程序中的有关信息。

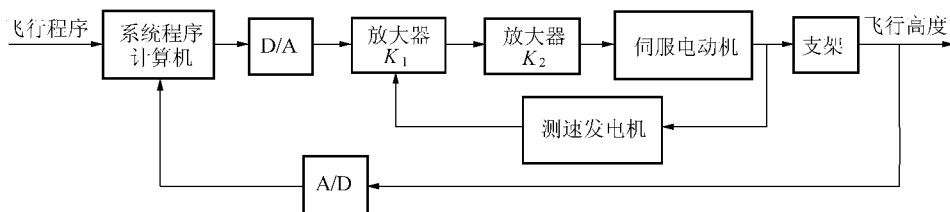


图 1-12 高度控制系统方框图

## 1.2 自动控制系统的组成

由上一节中的实例分析可以看出,要自动地完成某一任务,必须由一些相应的基本元部件有机地组合在一起,形成一个自动控制系统。如图 1-13 所示为一般自动控制系统的职能方

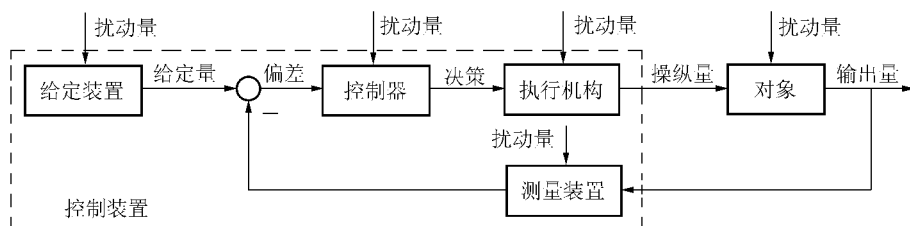


图 1-13 反馈控制系统的基本构成部分和信号形成的职能方框图

框图。自动控制系统基本组成部分如下：

- 1) 被控制的对象(简称对象)需要控制的元部件或装备。它是由一些零部件有机地组合在一起,能完成特定功能的装置。如贮液槽。
- 2) 执行机构:对被控制对象需要控制的物理量完成控制功能的装置。它是由一些元部件有机的组合在一起的装置。如连杆阀门机构。
- 3) 测量装置:对被控制量的实际工作状态进行检测变换的装置。它是由一些元部件有机组成的装置。如浮球。
- 4) 比较装置:将被控制量实际值的测量值与希望值进行比较、计算的装置。如杠杆机构。
- 5) 控制器:产生控制算法而进行决策的装置。如杠杆机构。
- 6) 给定装置:给出被控制量希望值的装置。如给出要求液面位置的机构。

自动控制系统的主要信号：

- 1) 被控制量(也称输出量):对象需要控制的物理量。如贮液槽的液位  $h$ 。
- 2) 给定量(也称给定输入量,指令或参考输入量):被控制量的希望值。如希望液位  $h$ 。
- 3) 扰动量(也称干扰):对系统输出量产生相反作用的一切物理量。产生于系统内部的扰动称为内扰,产生于系统外部的扰动称为外扰。如进水压力等为外扰。

实际的控制系统可能是一个部件实现几种功能,或者几个部件实现一种基本功能,如把测量、比较、给定作用组成一个部件,称作误差检测器。目前工业上批量生产的一种调节器,把给定、放大、比较、校正环节都包含在一台仪表中。

## 1.3 自动控制系统的分类

上述分析可知,自动控制系统的主要任务是保持系统输出量恒定不变,或使输出量按预先给定的规律变化,或使输出量按某种任意的规律变化。

自动控制系统应用范围很广,由于使用场合、用途及其要求等各不相同,系统所用的元件也不一样,对系统没有统一的分类方法。现将几种通常的分类方法简述如下：

### 一、按描述自动控制系统运动规律的动态方程式来分类

1) 线性控制系统:描述系统的动态方程是线性微分方程,这种系统就叫线性控制系统,它的最重要特性是可用叠加原理。由于其分析、研究简单,便于得出规律性的东西,所以线性系统的分析、设计已形成一套完整、成熟的理论并得到广泛的实际应用。

2) 非线性控制系统:描述系统的动态方程是非线性微分方程,这种系统就叫非线性系统,其最重要的特性之一是系统的响应取决于输入的幅值和形式,而且它不能应用叠加原理。

### 二、按给定作用的形式来分类

1) 按照给定的精度保持输出量恒定不变的系统称为恒值控制系统(也叫镇定系统)。如发电机电压稳定系统、电动机转速控制系统、火箭及宇宙飞船的镇定系统、血液循环节律控制系统等等。

2) 输出量按预先编制的给定程序变化的系统称为程序控制系统(也叫程序系统)。在实际应用中两种形式:一类是按时间给定的程序系统,给定装置直接给出确定的时间函数。如装有发条的玩具、电唱机和磁带录音机等;一类是按空间坐标规定的程序系统,执行机构的行动按空间给定的轨迹进行,其轨迹的运行规律与时间无关。如仿形机床等。

3) 输出量按任意的预先未知的规律变化的系统称为伺服控制系统。当要求输出量复现事先未知的给定作用, 跟随给定作用而变化时, 这样的系统称为随动系统。如飞行器的距离、速度、方向自动跟踪, 无线电定位系统, 天线位置随动系统, 射电望远镜、机器人、机械手的拖动控制、带钢飞剪系统、火炮自动跟踪系统等等。

### 三、按系统中信号的类型来分类

1) 系统中所有的信号均为连续的模拟函数, 称为连续数据系统。大多数系统都属于此类。

2) 系统中一处或几处的信号是断续的脉冲函数称为离散数据系统。当信号以脉冲形式时称为脉冲控制系统; 当信号为数码形式时为数字控制系统, 如计算机控制系统等。

自动控制系统还有许多种其它分类方法, 如按输入量输出量的数量分类有单输入单输出的单变量系统和多输入多输出的多变量系统; 按控制精度分类有无静差和有静差系统等等。

随着自动化技术的发展, 出现了最优控制系统、自适应控制系统和自学习系统等。

## 习 题

1. 说明自动控制系统中给定环节的作用。

2. 人骑自行车前进, 这个过程是开环控制还是闭环控制? 试简述理由。

3. 一晶体管稳压电源如图所示。试画出其职能方框图, 并说明各部分的作用。简要说明当负载增大时, 稳压的物理过程。

4. 在定值控制系统里, 若偏差为零, 而操作量不是零, 系统还能正常工作吗? 试叙述其理由。

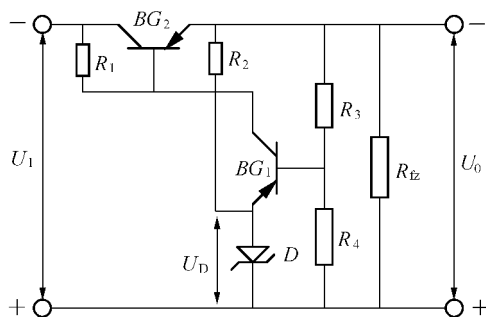
5. 在手动控制系统里, 必须要有人介入, 试论述由此而产生的问题和不良后果。

6. 试论述反馈控制的本质是什么?

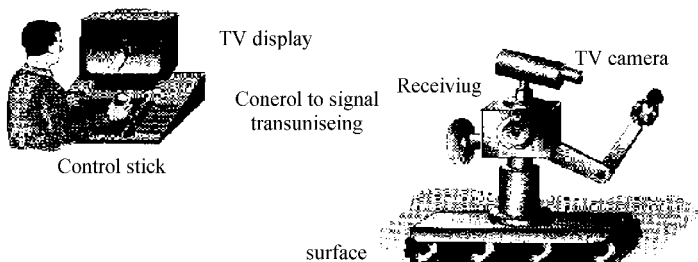
7. 为什么补偿控制属于开环控制?

8. 试比较开环控制与闭环控制的优缺点及其使用的场合。

9. 如图所示是遥控机械手的示意图。试分析它是开环控制还是闭环控制? 画出系统职能方框图。



题 3 图



## 2 自动控制系统的的基本元部件和数学模型

通过上一章的学习我们已经知道,任何一个自动控制系统都是由许多基本的元部件构成的,它们分别完成不同的功能。由于系统的用途不同,组成系统的元部件的物理性质也相差很大,有电气的、机械的、热力的、液压的、气动的等等。为了能统一定量地研究自动控制系统的性能,就必须找出具有本质的而且具有共性的东西。物理学家伽利略曾指出:“自然规律要用数学语言来描述”。要深入研究自动控制系统,就必须首先建立系统的数学模型。所谓系统(或元部件)的数学模型是指,描述其输入量、输出量及其内部各变量之间相互关系的数学表达式。数学模型(简称模型)分为静态模型和动态模型,通常静态模型可由动态模型来获得,所以我们这里仅讨论动态模型。建立数学模型的方法主要有实验法和理论推导法两种,这里仅介绍后者。一个系统要处理的问题不同或要求达到的精度不同等,可以得到不同的模型。在建立模型时,根据系统的实际结构、参数及所要求的精度,抓住影响系统运动的主要因素,忽略一些次要因素,使模型既能准确地反映系统的动态本质,又能简化分析计算工作。所以,要建立简单、准确而且通用的数学模型,不仅需要广泛的知识,而且需要足够的经验和技巧。

本章首先简要介绍最常用的一些元部件的工作原理及其应用。重点讨论系统数学模型建立的过程和思想方法,并介绍几种常用数学模型的特点。

### 2.1 电位器

控制系统最常用于给定或检测的元件是电位器,大多以环形电位器为主。如图 2-1(a)所示为一单层环形电位器。它是在瓷圆环上绕上电阻丝,形成的线圈接上电源,根据滑动触臂的位移,便可得到对应于触点位置的输出电压值。在系统中通常用图 2-1(b)来表示。在电位器的  $a, b$  两端加上电压  $E$ , 设滑动臂的位移为  $\theta$ , 则在输出端  $b, c$  间的输出电压为:

$$u = \left( \frac{E}{\theta_m} \right) \theta = k_p \theta \quad (2-1)$$

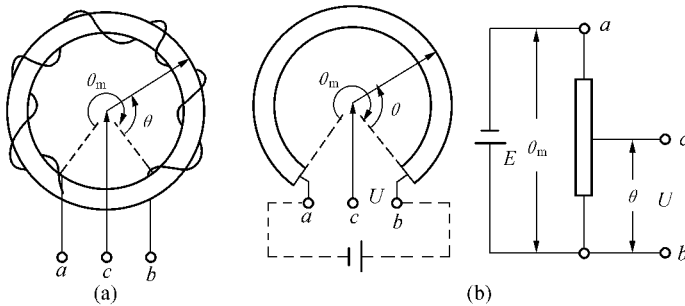


图 2-1 单层环形电位器

(a) 单层环形电位器示意图 (b) 单层环形电位器原理图

式中  $\theta_m$ ——滑臂的最大位移；

$$k = \frac{E}{\theta_m} \text{ (伏/电角度) —— 电位器的传递系数。}$$

当一个电位器做好后,  $K_p$  是一个常数。由式(2-1)可知, 电位器的输出电压  $u$  与滑臂转过的角位移  $\theta$  成正比例关系, 故  $K_p$  通常也称为比例系数。因此电位器也称为比例元件, 它们之间的函数关系可用如图 2-2 所示的方框图表示。

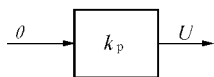


图 2-2 电位器的方框图

由于它能方便地把角位移(或直线位移)变换成电压量, 它通常在控制系统中作为角位移或线位移的检测元件或给定元件, 也可以在电路中作为可变电阻等, 应用非常广泛。图 2-3 是用电位器作为位置控制系统误差检测器的典型实例。图中(a)表示用两个相同的电位器  $P_1$  和  $P_0$  构成的桥式电路, 将二者输出的电压差  $e = K_p(\theta_i - \theta_0)$  经放大后驱动电动机, 同时带动输出端的电位器  $P_0$  的触点滑动臂, 当转到使  $(\theta_i - \theta_0) = 0$  时, 则偏差  $e = 0$ , 电动机停止运转, 并得到  $\theta_i = \theta_0$ 。图中(b)是该系统的职能方框图。

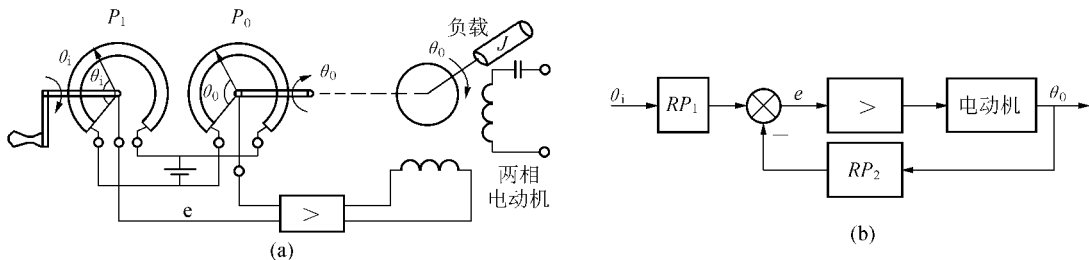


图 2-3 电位器在位置随动系统中的应用

(a)位置随动系统中的电位器 (b)位置随动系统的方框图

## 2.2 晶闸管变流器

晶闸管是由  $P$  型和  $N$  型半导体构成的, 具有四层三结三端的功率半导体器件, 它主要用于整流(将交流转换为可控直流)、逆变(将直流转换为可控交流)、斩波(将固定直流转换为可控直流)、变频(将直流或交流转换为频率可调的交流)以及开关(控制电路通断)等。由于它具有容量大、体积小、效率高、控制特性和寿命长等诸多优点, 因此自 60 年代问世以来, 获得迅速发展和广泛应用。目前晶闸管已成为以弱电控制强电的主要供电功率元件, 故称为电力电子器件。其应用技术也已形成一门独立的学科——电力电子学。其中最具有代表性的是 SCR (Silicon Controlled Rectifier), 它是由晶闸管及电子线路构成的可控整流装置, 在动力—电子设备领域, 越来越广泛地用于电力拖动控制及其它控制。图 2-4 是晶闸管的结构和符号。

图 2-5 所示为晶闸管的静特性测试线路及伏-安特性曲线。通常, 当阳极  $A$  和阴极  $K$  之间加上正向电压的同时, 在控制极  $G$  与阴极  $K$  之间加上正向触发电压后, 则晶闸管  $A$  和  $K$  之间导通。一旦导通, 即使把触发电压拿掉或阳极电流  $I_A$  减小到保持电流以上, 如不在  $A-K$  间加反向电压,

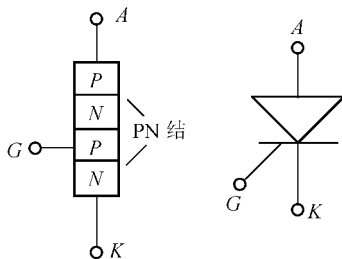


图 2-4 晶闸管的结构及符号