

自动控制原理

陈玉宏 胡学敏 主编

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书为计算机专业系列教材之一。全书内容包括:自动控制的基本概念、物理系统的数学模型、系统的时间响应、反馈的基本原理、根轨迹设计方法、频率响应设计方法、数字控制、附录。每章末附有习题。

本书可供计算机专业专科作教材,也可供其他相关专业作教材或参考书。

自动控制原理

陈玉宏 胡学敏 主编

责任编辑:曾令维 版式设计:曾令维

责任校对:任卓惠 责任印制:张永洋

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400044

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(市场营销部)

全国新华书店经销

重庆大学建大印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:13.75 字数:343千

1997年6月第1版 2002年7月第3次印刷

印数:11 001—14 000

ISBN 7-5624-1330-4/TP·108 定价:15.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

序

面对知识爆炸,社会学家们几乎都开出了一个相同的药方:计算机。计算机也深孚众望,以其强大的功能,对人类作出了巨大的贡献,取得了叹观止矣的成就。它自1946年2月14日在美国费城诞生以来,至今已过“知天命”的年龄了。现在,计算机已是一个庞大的家族。如果说,它的成员占据了世界的每一个角落和每一个部门也并不过分,甚至找不到这样一个文明人,他的生活不直接或间接与计算机有关。目前,全世界计算机的总量已达数亿台,而且,现在正以每年几千万台的速度增长。

作为计算机在信息传递方面的应用,计算机加上网络,被认为是和能源、交通同等重要的基础设施。这种设施对信息的传递起着异常重要的作用。西方发达国家和我们国家对此都非常重视。例如,美国的信息高速公路计划,全球通讯的“铍”计划,我国也开始实行一系列“金”字头的国民经济管理信息化计划。这些计划中唱主角的设备便是计算机。计算机在各个方面的应用不胜枚举,我们每个人都自觉不自觉地处于计算机包围中。

计算机对社会生产来说是一个产业大户,对每个现代人来说是一种工具,对学生们来说,它是一个庞大的知识系统。面对计算机知识的膨胀,面对计算机及其应用产业的膨胀,计算机各个层次的从业人员的需要也在不断膨胀,计算机知识的教育也遍及从小学生到研究生的各个层次。

为了适应计算机教学的需要,重庆大学出版社近几年出版了大量的计算机教学用书,这一套教材就是一套适应专科层次的系列教材。我们将会看到,这一套教材以系列、配套、适用对路,便于教师和学生选用。如果再仔细研究一下,将会发现它的一系列编写特色:

1. 这些书的作者们是一些长期从事计算机教学和科研的教师,不少作者在以前都有大量计算机方面的著作出版。例如本系列书中的《Visual Fox Pro 中文版教程》的作者,十年前回国后最早将狐狸软件介绍到祖国大陆,这一本书已是他的第八本著作了。坚实的作者基础,

是这套书成功的最根本的保证。

2. 计算机科学是发展速度惊人的科学,内容的先进性、新颖性、科学性是衡量计算机图书质量的重要标准,这一套书的作者们在这方面花了极大的功夫,力求让读者既掌握计算机的基础知识,又让读者了解最新的计算机信息。

3. 在内容的深度和知识结构上,从专科学生的培养目标出发,在理论上,从实际出发,满足本课程及后续课程的需要,而不刻意追求理论的深度。在知识结构上,考虑到全书结构的整体优化,而不过分强调单本书的系统性。这样,在学过这一套系列教材后,学生们就可在浩瀚的计算机知识中,建立起清晰的轮廓,就会知道这些知识的前因后果,就会了解这些知识的前接后续。使学生们能在今后的工作实践中得心应手。

4. 计算机是实践性很强的课程,仅靠坐而论道是学习不了这些知识的。所以从课程整体设置来讲,包括有最基本的操作技能的教材。对单本书来说,在技术基础课和专业课中,都安排有一定的上机实习或实验,这样可使学生既具备一定的理论知识以利今后发展和深造,又掌握实际的工作技能胜任今后的实际工作。

编写一套系列教材,这是一个巨大的工程。这一套书的作者们,重庆大学出版社的领导和编辑们,都为此付出了辛勤的劳动。作为计算机工作者,以此序赞赏他们的耕耘,弘扬他们的成绩。

A handwritten signature in black ink, reading '周明' (Zhou Ming). The characters are written in a cursive, calligraphic style.

1997年6月15日

前 言

本书是国家教委批准的计算机专业系列专科教材之一。作为该专业《计算机控制》的先修课程《自动控制原理》的教材,本书讲述包括计算机控制系统在内的各种自动控制系统分析和设计的基本理论和方法。尽管本书首先是为计算机专业编写的,然而也可作为工科其他专业专科开设的40学时~60学时《自动控制原理》课程的教材。

编者认为,工科学生,特别是工科专科学生,学习自动控制理论的目的在于应用。所以,教材内容应当突出工程学科的特点,强调工程应用。理论则以够用为度。为此,我们注意联系理论的工程背景,讲清分析和设计控制系统所需要的数学模型是如何从实际系统抽象得来的,还注意紧紧围绕设计来安排全书的基本内容。这当然不是说要对专科学生提出过高的要求;相反,正是为了在讲述自动控制系统分析方法时,避免片面追求理论完整性的倾向,突出改进和设计系统是进行分析的目的。这样既可使内容主次分明、突出重点,使删繁就简有所依据,又能使学生感到学习目标清楚,提高学生学习的积极性。当然,分析是设计的基础。自动控制系统的基本分析方法是学生首先应当掌握的。而在自动控制系统的分析中,响应特性的分析比响应的求解更重要。为此,本书以极点零点为线索讲述系统的基本分析方法。

根据这样的考虑,本书的内容安排如下:第一章到第三章讲述自动控制系统的基本概念、物理系统的数学模型和系统的时间响应,属于控制系统分析的基本部分。第五章和第六章讲述根轨迹和频率响应设计方法,属于控制系统设计方法部分。在这两部分之间安排第四章讲述反馈的基本原理,作为由前一部分向后一部分过渡的转折点,以帮助学生理解对系统实现自动控制的基本原理。在学习了连续时间控制系统的各种分析设计方法的基础上,第七章讲述数字控制系统的分析和设计,以便于将两种系统的分析设计方法对照起来进行学习。考虑到用微型计算机构成的数字控制器应用日益广泛,本章用“数字控制”作为标题以加强内容的针对性。在本书最后的附录中,给出了一个较为完整的数字控制系统设计示例,以期读者在学习本课程后,对于理论的应用有一个系统的了解。

编者希望,通过采取以上措施,能够在适合专科培养目标的前提下,以较小的篇幅,讲述自动控制的基础理论。但由于编者水平有限,不当和疏漏之处,欢迎读者批评指正。

本书第一、三、四、六章和附录 由陈玉宏编写。第二、七章由胡学敏编写。第五章和附录 I 由赵四化编写。全书由陈玉宏负责统稿。

编 者

1997年4月

目 录

第一章 自动控制的基本概念.....	1
§ 1-1 自动控制及其发展简史	1
§ 1-2 开环控制与闭环控制	2
§ 1-3 控制系统的构成	4
§ 1-4 准确性与稳定性	5
§ 1-5 控制系统的分类和应用	6
§ 1-6 控制系统的分析和设计	9
习题	10
第二章 物理系统的数学模型	12
§ 2-1 引言	12
§ 2-2 物理系统的微分方程模型	14
§ 2-3 非线性系统微分方程的线性化	17
§ 2-4 传递函数	19
§ 2-5 系统的方块图	29
习题	36
第三章 系统的时间响应	39
§ 3-1 引言	39
§ 3-2 系统的极点零点和自然响应	39
§ 3-3 系统的稳定性和条件	46
§ 3-4 标准二阶系统的时间响应 以极点表示的瞬态响应指标	47
§ 3-5 增加零点和极点的影响	52
习题	56
第四章 反馈的基本原理	58
§ 4-1 引言	58
§ 4-2 反馈的作用	58
§ 4-3 反馈的类型	64
§ 4-4 稳态精度和系统的类型	68
§ 4-5 劳斯稳定判据	75
§ 4-6 反馈控制系统的指标	79
习题	81
第五章 根轨迹设计方法	86
§ 5-1 引言	86
§ 5-2 根轨迹与根轨迹方程	87
§ 5-3 绘制根轨迹图的基本法则	90
§ 5-4 控制系统根轨迹分析	102
§ 5-5 根轨迹设计方法	105
习题	114

第六章 频率响应设计方法	116
§ 6-1 引言	116
§ 6-2 频率响应的概念	116
§ 6-3 传递函数的伯德图	118
§ 6-4 传递函数的极坐标图	127
§ 6-5 奈奎斯特稳定判据	128
§ 6-6 相对稳定性:增益裕度和相位裕度	138
§ 6-7 控制系统的频率响应指标	141
§ 6-8 超前校正和滞后校正的伯德图设计	145
习题	150
第七章 数字控制	153
§ 7-1 引言	153
§ 7-2 数字控制系统的构成	153
§ 7-3 采样和采样定理 保持器	155
§ 7-4 z 变换	157
§ 7-5 脉冲传递函数	164
§ 7-6 数字控制系统的稳态误差和瞬态响应	174
§ 7-7 数字控制器的连续设计法和离散设计法	185
习题	187
附 录	189
附录 拉普拉斯变换	189
习题	198
附录 数字控制系统设计示例	201
参考文献	207

第一章 自动控制的基本概念

§ 1-1 自动控制及其发展简史

一、自动控制及其作用

“控制”是一个具有广泛意义的概念。它可以指人与人的关系,也可以指其他方面的关系。当指人-机关系时,指的是人对于机器或设备的控制。为使某种机器或设备处于希望的状态而对其进行的操作,称为控制。例如驾驶汽车,使之沿着预定的路线达到目的地所进行操作,就是控制。

当这个概念仅仅涉及机器或设备时,控制由机器或设备自动完成,这就是自动控制。

在现代生活的所有方面,自动控制发挥着重要的作用。而且,随着社会的发展,这个作用将会与日俱增。

从宇宙飞船、导弹制导和飞机驾驶到机器制造和工业生产过程,自动控制系统是极其重要而不可缺少的组成部分。例如,在化工生产过程中,对压力、温度、流量、液位和成分的控制;在机器制造工业中,机器零件的加工、处理和装配,也广泛采用自动控制。而且,自动控制还将日益渗透到我们的日常生活之中。

随着自动控制理论和实践的不断发 展,给人们提供了获得动态系统最佳性能的方法。自动控制的采用,可以提高产品的质量,降低生产成本,提高劳动生产率,保护工人的身体健康(在一些危险的或有毒的工作环境代替人工操作)。同时,它还能使人们从繁重的体力劳动和单调重复的脑力劳动中解放出来。

自动控制系统中,使用着各种类型的元件,如机械的、电的、电子的、液动的和气动的元件等。从事自动控制工作的人员必须熟悉这些器件的原理和特性。特别是,必须熟悉控制对象的特性。

自动控制是一个使用很多数学方法的边缘学科。它从很多领域汲取知识。它的研究有利于把很多已经分别进行研究的学科联系在一起,并把它们应用于同一问题之中。同时,自动控制系统的概念正在扩充到其他领域的研究。人本身就是一个最复杂而完善的控制系统。

二、自动控制的发展

自动控制的萌芽和应用,早在古代就已开始。我们中华民族的祖先发明的指南车,就是一个例子。

一般认为,第一个工业上应用的自动控制系统,是瓦特 1788 年发明的用在蒸汽机上的调速器。人们曾经试图改善调速器的准确性,然而准确性改善的副产物却是不稳定。其特征是系统在规定的工作状态上下振荡。对于反馈系统稳定性的研究,代表了自动控制理论的早期

发展。

通常,人们把在第二次世界大战前后形成的,以系统的传递函数作为数学模型,以频率响应和根轨迹作为设计方法的控制理论,称为经典控制理论;而把在 1960 年前后形成的,以系统的状态变量描述作为数学模型,以最优控制和卡尔曼滤波作为设计方法的控制理论,称为现代控制理论。80 年代以来,自动控制理论又取得了突破性发展,这就是鲁棒控制理论的诞生和走向成熟。由于它能在数学模型存在不确定性下设计出实现准确控制的系统,所以是一种更严格而又更实用的自动控制理论。

值得一提的是,数字计算机对自动控制发展所起的作用。计算机不仅作为强有力的计算工具,支撑和促进了自动控制理论的发展;随着微处理器和微型计算机的出现和发展,计算机(包括单片微型计算机和数字信号处理器 DSP),也作为在线实现各种控制算法的数字控制器出现在实际的控制系统中。工业上广泛应用的可编程控制器、可编程调节器和集散系统(DCS)的核心都是数字计算机。目前,数字控制器已有取代模拟控制器的趋势。

§ 1-2 开环控制与闭环控制

基本控制系统可以用图 1-1 的简单方块图(有关方块图的详细叙述见 §2-5)表示。输出变量 c 由输入变量 r 通过控制系统各元件来控制,所以输出变量 c 又叫受控变量。例如,汽车方向盘的角位置控制其前轮的方向,方向盘的位置是输入变量 r ,前轮的方向是受控变量(输出) c 。

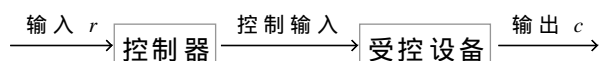


图 1-1 基本控制系统

一、开环控制系统

并不是各种类型的控制都能提供满意的性能。开环控制系统是最简单和最经济的控制系统。然而,它们通常是不精确的,开环系统的控制调整必须依赖于人的判断和估计。一个装有定时机构的房间加热炉是一个开环控制系统。操作人员必须估计为达到希望的温度所需要的炉子工作的时间,然后据此整定定时器,预定的时间一经达到,炉子就停止工作。然而,十分可能的是,房间的温度或许高于、或许低于所希望的值。自动洗衣机也是一个开环系统,因为清洗的时间完全由操作者的判断和估计来决定,而不管衣服清洁程度如何。基本的开环控制系统方块图示于图 1-2。

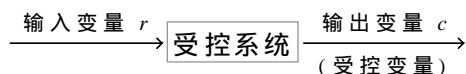


图 1-2 基本开环控制系统

开环系统的另一个重要缺点是系统不能适应环境条件的变化即外界扰动。为使房间温度达到一定的值,即使由一个有经验的人准确地估计了炉子的工作时间,但是,如果在工作期间,由于偶然的原因,门窗间断地开、关,那么,房间的最终温度一定不会希望的值。

由此可见,如果房间温度不能令人满意,这个事实本身并没有以任何方式改变对于房间的控制输入。因此可以说,输出量不影响输入量,这样的控制系统叫做开环控制系统。其特征是输出量和输入量之间缺乏一个环节,即反馈通路。

二、闭环控制系统

实际上,控制系统元件的性能随时间而变化着(例如某些元件的老化),同时环境条件等外界扰动都是不可避免的。这个问题如何解决呢?我们或许会想到,能否使输入刚好抵消元件特性和环境改变的影响。这样,必须预计上述不希望的变化而对被控设备提供校正输入。所谓的前馈控制正是基于这样的思想而提出来的。遗憾的是,这些变化一般是不可预测的。那么,如何寻找适当的校正输入呢?这个问题有一个简单的解决办法:既然不可预测的变化影响输出,使之偏离所希望的输出值,那么可以观测实际的输出并且把它和所希望的输出值比较,实际的输出与所希望的输出之间的偏离就是系统中不可预测的变化的一个量度。因此可以把它用作校正输入,这要把输出反馈至输入以进行比较。这样一来,对于控制器的输入就由两个分量组成:(1)某个外部输入(叫做参考输入);(2)系统的输出,输出被连续地加以监视并反馈给控制器,这样就对受控设备的控制输入连续地加以调整,以获得所希望的响应。这样的输出影响输入的控制系统叫做闭环控制系统或反馈控制系统,如图 1-3 所示。注意,这里的反馈是负反馈,以使校正输入的方向是在减小这个偏离的方向上。

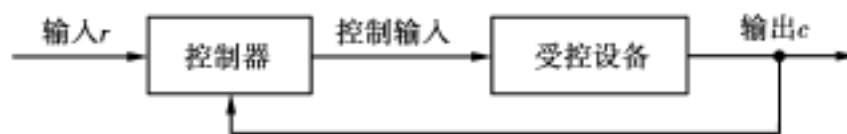


图 1-3 基本闭环控制系统

在日常生活中,我们能够观察到成百上千的反馈系统的例子。人本身就是最复杂和最完善的反馈控制系统。例如:当人拿桌上的书时,人的大脑送出一个信号给他的手臂去拿书,他的眼睛用作一个检测机构。它连续地反馈他的手的严格位置。手和书之间的距离是误差。如果他被蒙上眼睛,并告诉他要拿书,那么,他就只能够估计书的严格位置,然后朝这个方向去拿。在他的眼睛被蒙住后,反馈环断开,他作为一个开环系统工作。

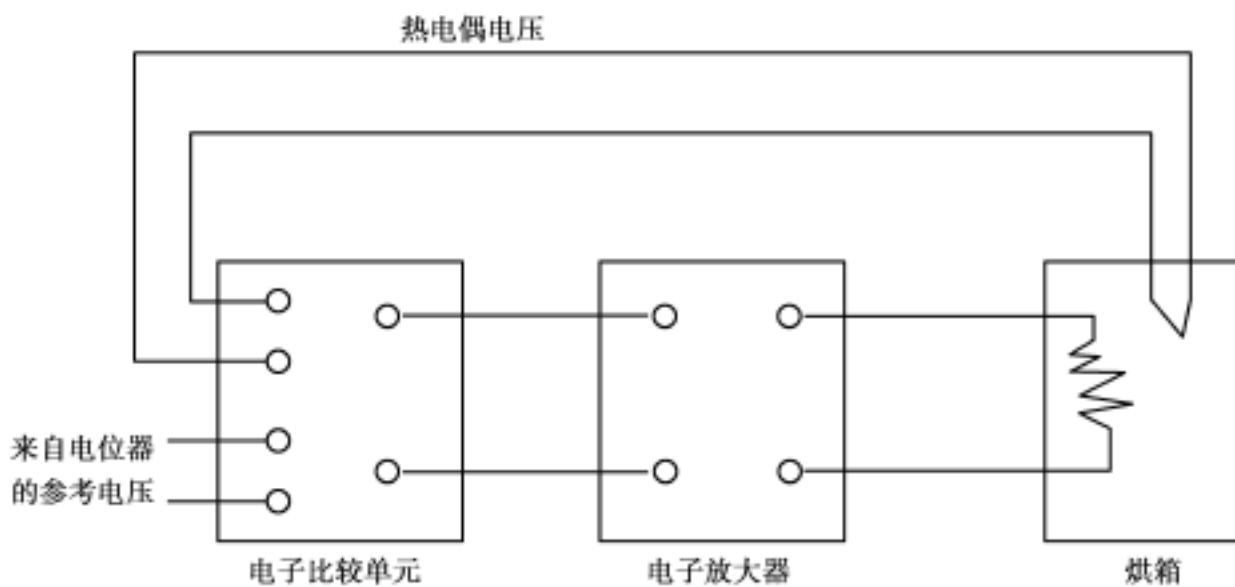


图 1-4 烘箱温度控制系统

图 1-4 是一个烘箱温度闭环控制系统。烘箱的温度由热电偶测量,它产生与温度成比例的电压。这个电压被反馈并与代表所希望温度的参考电压相比较。这两个电压之差由电子放大器放大,并控制加热元件的电流。因为反馈电压被从参考电压中减去,故称它为负反馈信号。

不论什么原因使烘箱温度(输出变量)和所希望的温度(设定值)不一致,就会产生一个和这个误差成比例的控制输入(它在功率上已被放大以推动执行机构:加热元件),使加热元件的电流增加或减少,以保持烘箱温度为所希望的值。

综上所述,在控制系统中使用反馈的主要原因是为了减少环境变化(外部扰动)和系统本身参数变化对于输出的影响而使之自动地维持在所希望的数值上。因此,反馈的概念已经成了自动控制系统设计的基础。反馈在控制系统中的地位如此重要,以至于“反馈控制”几乎就是“自动控制”的同义语。

事实上,上述烘箱温度控制的闭环控制系统正是人工闭环控制系统的一种模拟。只不过热电偶和电子比较机构代替了工人监视温度计的眼睛,电子放大器等控制元件代替了工人的大脑和操作的手(通过操作以某种办法改变电流)而已。

§ 1-3 控制系统的构成

把图 1-4 所示的烘箱温度控制系统作为一个典型例子,画出其一般形式的方块图(见图 1-5)。一个基本的反馈控制系统,通常由以下几个部分构成。

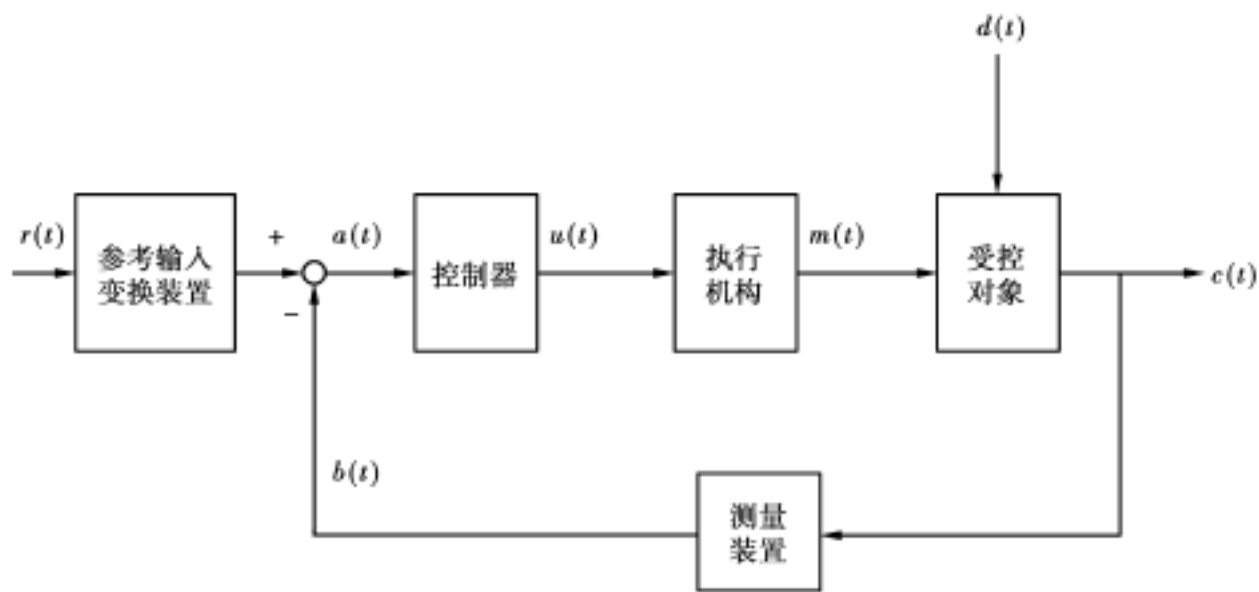


图 1-5 控制系统的构成

1. 受控对象(或过程)。指需要对它的某个特定的量进行控制的设备或过程。对于图 1-4 的系统,就是烘箱,它的温度需要进行控制。受控对象的输出变量是受控变量(这里就是温度),常常记作 $c(t)$ 或 $y(t)$ 。受控对象所受到的外部扰动是它的一个输入变量,常常记作 $d(t)$ 。受控对象是控制系统的核心部分,它的特性对控制系统的性能具有重要影响。

2. 测量装置。如传感器和测量仪表,本例中是热电偶,它感受或测量受控变量的值并把它变换为可以进行比较的信号。测量装置的输出信号是反馈信号 $b(t)$ 。

3. 参考输入变换装置。它的输入信号是所希望的受控变量值。通常称为参考输入或指令输入或设定值,记作 $r(t)$ 。它的作用是把参考输入变换为能和反馈信号 $b(t)$ 相比较(同量纲)的信号。本例是一个电位器。

4. 比较装置。它比较参考输入变换装置的输出信号和反馈信号 $b(t)$ 。其输出为激励信号 $a(t)$ (有些书籍也称之为偏差信号)作为控制器的输入,以产生校正误差的控制作用。由于

比较装置中是减去反馈信号,所以形成一个负反馈系统。

5. 控制器。由其输入即激励信号 $a(t)$, 按一定规律产生控制信号 $u(t)$ 作为其输出信号。本例中的电子放大器就是一个比例控制器。其输出信号 $u(t)$ 与输入信号 $a(t)$ 成比例。比例控制作用是基本的控制作用。实际的控制器常常兼有比较装置与控制器两者的功能。

6. 执行机构。是能够影响受控过程的装置或设备,例如电动机、气动控制阀等。本例中它由可控硅和加热元件组成。通常,为了能够影响受控过程,必须把控制信号变换为具有一定功率的信号,执行机构正是起这一作用的。它的输入信号为控制器的输出 $u(t)$, 其输出信号为受控过程的输入信号 $m(t)$, 常常称为操纵变量。

应当指出,系统中某一部分本身可能就是一个具有反馈的系统,例如,一个复杂系统的执行机构本身,可能是用带反馈的控制阀来实现的。在这个意义上,这里讲的是“基本”的反馈控制系统的构成,忽略了系统中的某些细节。

§ 1-4 准确性与稳定性

控制系统的一个主要要求是当条件变化、系统受到扰动时,受控变量能准确地保持在规定的界限以内。闭环控制有助于获得良好的控制准确性,因为负反馈力图连续地减少任何误差到一个可容许的值。然而,在某些条件下,负反馈的校正作用却能够使系统变得不稳定。在一个稳定的系统中,对于输入的响应将在一定的时间内达到稳态值。反之,不稳定的系统不可能把受控变量保持在所希望的值,输出可能不受控制地增大(实际上,输出增加到一定程度,系统可能就被破坏了;或者,由于系统的非线性,最终将达到某个极限值或激烈地持续振荡)。如果稳定的闭环系统的性能类似于一个具有熟练操作者的手动系统的话,那么一个不稳定的系统就好像是一个具有未经训练的和不负责的操作者的手动系统。

一些控制元件和受控对象具有时间延迟或惯性,是不稳定的原因。为了解释不稳定行为,假定出现在系统中的校正作用不再需要了,即误差已经变为零。然而,系统中固有的时间延迟会使控制作用不能及时停止以阻止受控变量的过调,即受控变量仍然按原来的变化趋势变化而产生过调,而过调的出现将引起相反方向的校正作用。这个连续的校正过程能够使系统的输出持续振荡甚至增幅振荡。

从另一个观点来看,系统的时间延迟可能造成反馈是加强而不是削弱输入信号。在这个情况下,它是正反馈而不是负反馈。因此,能够引起持续的振荡。这时系统类似于一个振荡器电路。

重要的是应当注意,准确性和稳定性的要求是相互矛盾的。系统的准确性随着环路增益的增加而得到改善。然而,增益的增加却往往使系统不稳定,因为给定的误差信号将产生更大的校正作用。这个

特性示于图 1-6 中,它画出了系统对于参考输入突然变化的响应。在系统增益低时,响应变得缓慢而且最终误差即稳态误差会比较大。另一方面,高增益的系统则表现出显著的过调和振荡。然而,当系统最后稳定下来时,稳态误差可能是十分小的。

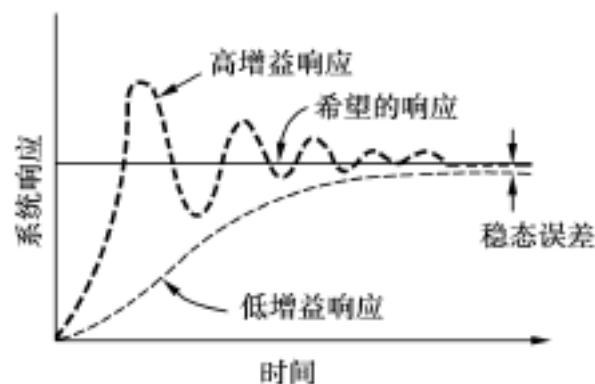


图 1-6 对阶跃输入的响应

一般地,控制系统设计者面临着满足准确性、稳定性和响应速度三个方面的要求。在非常粗略的意义上,可以说,设计一个反馈控制系统本质上就是要获得两个矛盾的因素:准确性和稳定性之间的折衷。

§ 1-5 控制系统的分类和应用

控制系统可以按照不同的方法分类。比如前面曾按照有无反馈存在分为开环控制系统和闭环控制系统。也可以按照系统是线性还是非线性的,分为线性控制系统和非线性控制系统。另外,按照系统中激励信号是时间连续信号还是时间离散信号,还可分为连续控制系统与离散时间系统。

这里按参考输入的性质分类。

1. 随动控制系统:参考输入随时间任意变化的系统。控制的目的在于使受控变量能够相应于参考输入的变化而变化。这样的控制系统常常用在位置(或速度或加速度)自动跟踪的控制系统里。有时叫做伺服机构或伺服系统。

对于随动控制系统,主要的输入信号是参考输入信号。这种控制的目的是

$$\frac{c}{r} = 1$$

2. 定值控制系统:参考输入保持不变的系统。控制的目的在于尽可能减少扰动的影响,以保持受控变量为一定值。比如保持电压、速度、频率、温度等不变的系统。有时定值控制系统又称为“调节系统”(regulating systems)。

对于定值控制系统,主要的输入是外部扰动 d 。这种控制的目的可以表达为

$$\frac{r - c}{d} = 0$$

换句话说,对于随动控制,参考输入 r 的变化应当在受控变量中迅速地反映出同样的变化。而对于定值控制,误差 $e = r - c$ 在系统受到扰动时,应当保持越小越好。当然,应当指出的是,同一个系统,由于反馈,这两种控制作用,即跟踪参考输入的伺服作用和抑制扰动的调节作用,将同时存在。只是根据系统的要求,在设计时有所侧重而已。

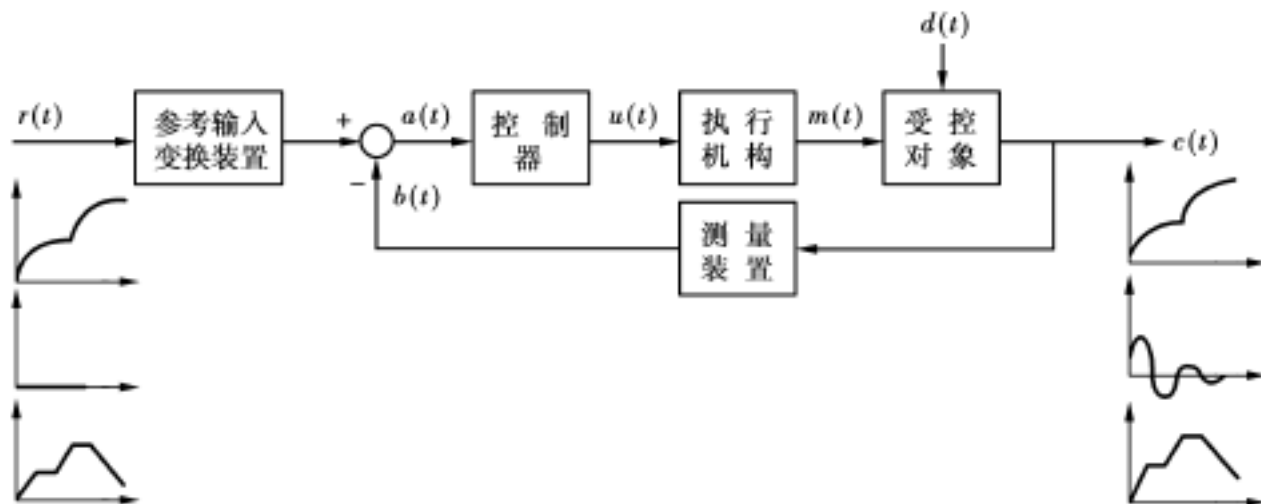


图 1-7 三种控制系统的不同参考输入

3. 程序控制系统:参考输入随时间按一定规律变化的系统。

图 1-7 表明了这三种类型的控制系统的特点。

各种类型的控制系统在军事、工业和日常生活中,得到了广泛应用。可以毫不夸张地说,没有自动控制就没有现代文明。

下面举几个例子说明自动控制的广泛应用。

图 1-8 的太阳跟踪系统是反馈控制系统在天文上应用的一个例子。它由天文望远镜、两个硅太阳电池、放大器、电动机和齿轮机构组成。两个太阳电池反向并联,装在望远镜的极轴上,如果定位方向有误差,落在一个电池上的阴影将比另一个电池上的阴影多。这对电池将表现为一个电流源,并起到定位误差传感器的作用。放大器能够提供足够的增益,使得小的误差信号产生一个足以驱动电动机的放大器输出。电动机带动望远镜极轴旋转,并使其速率和太阳的“运动”相匹配。这个系统的用途不限于天文望远镜。任何必须跟踪太阳的系统,例如光生伏打电池或太阳能装置,都可以利用太阳跟踪系统来使之达到最高效率。

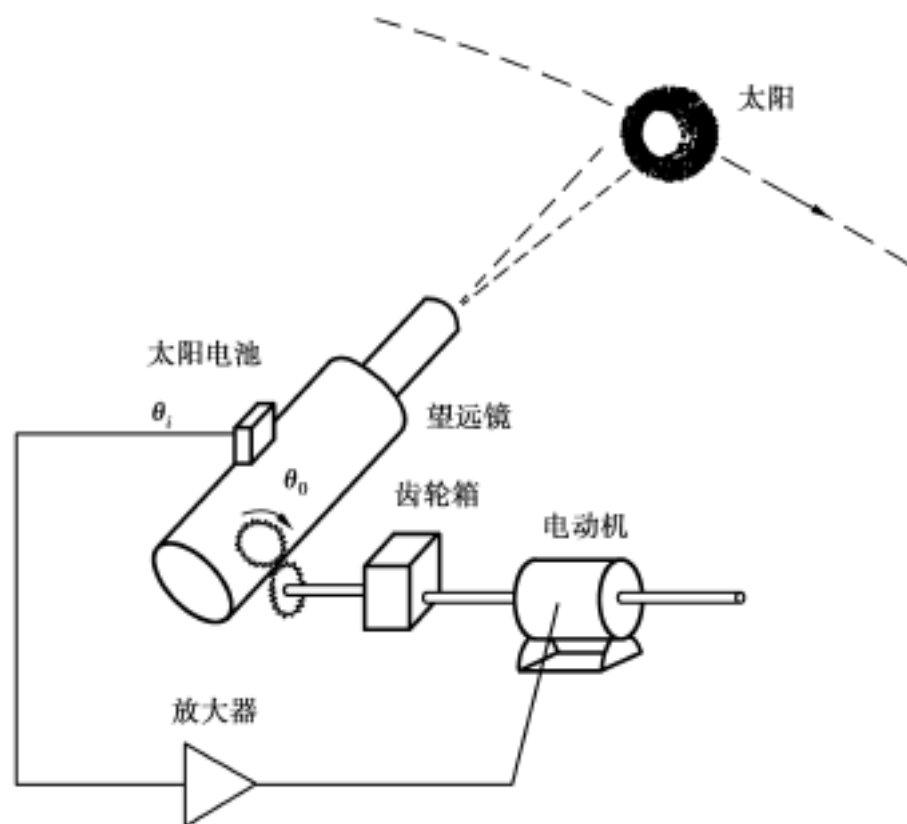


图 1-8 太阳跟踪系统

过程控制是自动控制的一类重要应用。过程控制指的是对生产过程中的变量进行的控制。化工、炼油、粮食加工、轧钢等是需要进行自动控制的生产过程。过程控制的主要任务是保持温度、压力、流量、液位、粘度、密度和成分等过程变量在所希望的值(设定值)。它主要应用的是定值控制,随动控制也有使用,但场合较少。

图 1-9 的液位控制系统是一个利用常规仪表对过程变量(液位)进行闭环控制的例子。如果流入和流出的流量相等,槽的液位将保持不变。如果它们不等,则液位将上升或下降。反馈元件(变送器)是一个浮子机构,它送出一个与液位成比例的信号。这个值和反映设定值的信号相比较以产生一个激励信号,控制器接受这个信号并按一定的控制规律产生控制信号去调整阀门开度,改变流入流量以恢复液位到所希望的值。控制阀在这里是执行机构。在过程控制中,设置设定值,并把它和受控变量进行比较的功能以及产生和送出必要的控制信号的功能统一由一个装置来完成,这个装置叫做控制器。一般地说,一个典型的过程控制系统正是由受控对象、测量变送装置、控制器和控制阀几个典型元件所构成。变送器、控制器和控制阀等一

一般都选用定型仪表和设备,然后根据系统的具体情况对控制器的参数进行调整。

自动控制的另一类重要应用是机器人控制系统。工业机器人常常在工业中用来改善生产效率。机器人能够处理单调的和复杂的工作而无操作失误。机器人能在人无法忍受的恶劣环境下工作。

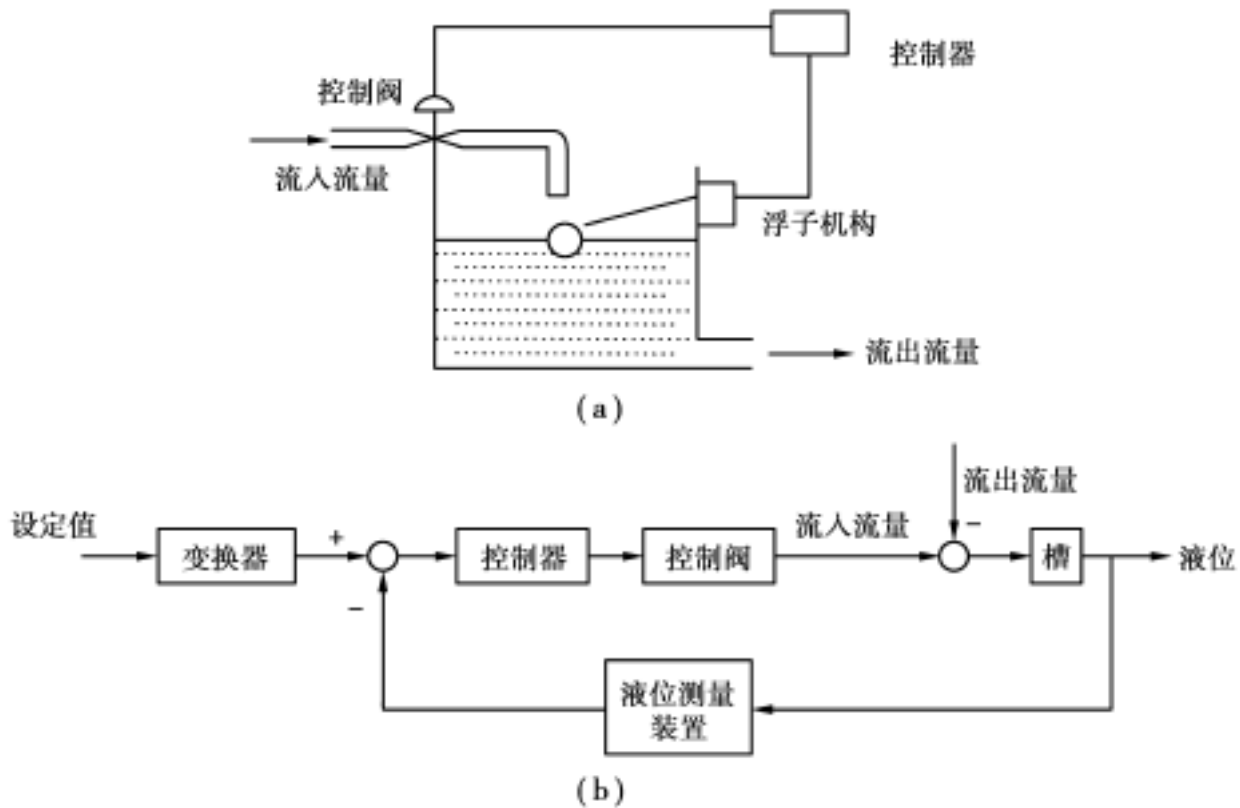


图 1-9 液位控制系统

机器人必须对付具有特定形状和重量的机器零部件。所以它至少必须有一只手臂、手腕和手。它必须有足够的功率来执行任务,并且至少能作有限的移动。事实上,有些机器人能在工厂的限定范围内自由移动。显然,机器人本身就是一个复杂的自动控制系统。

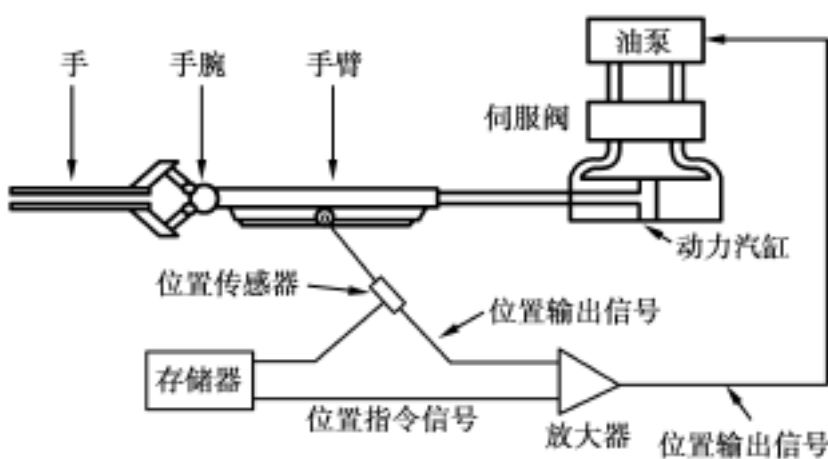


图 1-10 机器人手臂控制系统

图 1-10 是一个机器人手臂的简化控制系统示意图。图上示出对手臂直线运动的控制。直线运动是一个自由度的运动。实际的机器人手臂具有三个自由度(上下、前后和左右运动)。手腕接于手臂的末端,也有三个自由度。手有一个自由度(提物运动),机器人的手臂共有 7 个自由度。如果其躯体必须在平面上运动,则还需要另外的自由度。

伺服系统用来定位手臂和手腕。因为机器人手臂运动常常要求速度和功率,可以采用液压或气压伺服马达,中等功率可以采用直流电动机,小功率可以采用步进电动机。

对于顺序运动控制,指令信号被存贮在磁盘里。一些高级的机器人系统,由人先“教”机器人运动顺序,机器人中的计算机记忆希望的顺序运动。然后从第二次开始,机器人忠实地重复这样的运动顺序。

数控机床在机械制造工业中发挥了重要作用。数控机床采用数值控制系统。

数值控制是使用数字来控制机器部件运动的方法。在数值控制中,刀具受存贮在磁盘中的二进制信息控制。

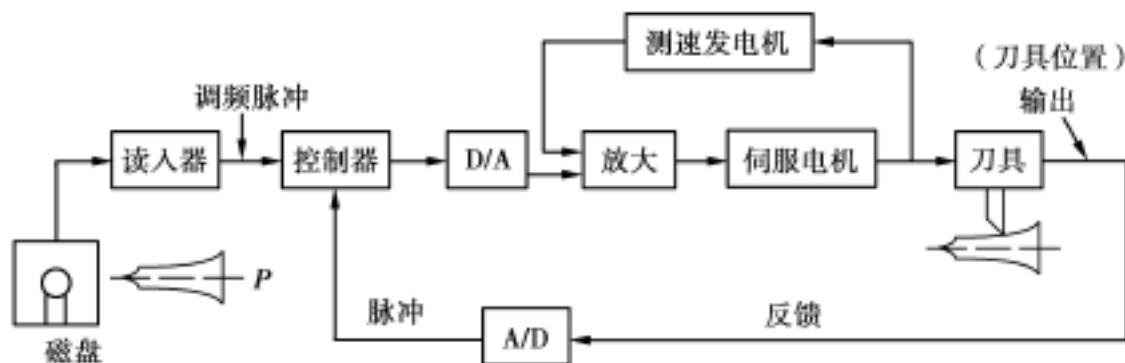


图 1-11 机床数控系统

图 1-11 的系统工作过程如下:在磁盘中先准备好以二进制形式表示的希望的零件 p 。系统开始工作时,磁盘被读入。频率调制的脉冲信号和反馈的脉冲信号相比较,控制器对脉冲信号之差进行数学运算。数模转换器转换控制器输出的脉冲为模拟信号,再送给伺服电动机,驱动其旋转。这样,刀具的位置是受伺服电动机的输入控制的。接在刀具上的传感器把刀具的运动变换为电信号,再由模数转换器转换为脉冲信号。然后,这个信号再和输入脉冲信号进行比较,只要这两者之间有任何差别,控制器都将输出信号给伺服电动机,推动它旋转来减少这个差值。

数值控制的一个优点是它能以最快的速度加工出准确性一致的复杂零部件。

§ 1-6 控制系统的分析和设计

自动控制理论研究对控制系统进行分析和设计的方法。

无论对控制系统进行分析还是设计,首先要有一个标准,即对控制系统的要求。前面已经提到,任何一个控制系统,首先必须是稳定的,这是它能正常工作的前提。除了这个绝对稳定性的要求之外,控制系统还必须具有合理的相对稳定性,即其响应必须表现出合理的阻尼。响应速度还必须快,而且控制系统必须能够减少误差到零或者减少到一个能容许的范围以内。任何一个控制系统都必须满足这些要求,才是有用的。在 § 1-4 中已经指出,相对稳定性和稳态准确性是相互矛盾的要求,必须进行合理的折衷。

所谓控制系统分析,就是在规定的条件下,对于给定的控制系统性能进行研究。一般这需要对给定的系统求出响应,并按一定的指标加以评价。由于控制系统是由多个部分(子系统)构成的,所以,分析必须从建立其每个组成部分的数学模型入手,并获得整个系统的数学模型。一旦获得了整个系统的数学模型,对系统的分析就和物理系统具体是气动的、机械的还是电的等等无关了。人们进行瞬态响应分析以确定系统对于参考输入或扰动输入的瞬态响应特性。进行稳态分析,以确定在瞬态响应消失后,系统的稳态响应特性。

所谓控制系统设计是指求出一个能完成给定任务的系统。如果动态响应特性和/或稳态响应不能令人满意,还必须对系统加上一个补偿器(或称校正装置)。一个设计过程常常包括如下步骤:

- (1) 研究受控系统,决定采用什么类型的传感器、执行机构以及它们的安装位置。

(2) 建立受控系统的数学模型。简化它,分析它以确定其性质。

(3) 确定控制系统的性能指标。

(4) 确定需要使用的控制器类型。设计控制器使该系统满足指标。有时,提出的指标可能根本无法实现(如前所述,控制能够做到多好,很大程度上取决于受控对象的特性)。这种情况下,甚至还要修正控制性能指标。

(5) 在模型机上或计算机上对所设计的系统进行仿真研究。如不满意,还要重复以上过程。

(6) 用硬件和/或软件实现所设计的控制器。如有必要,控制器参数还要进行现场调整。

显然,控制系统分析和设计是密切联系的。分析是设计的基础,然而,不是为分析而分析,分析常常是为了改进或设计控制系统而进行的。

根据这样的特点,本书的内容安排如下:第1章到第3章讲述自动控制系统的基本概念、物理系统的数学模型和系统的时间响应。属于控制系统分析的基础部分。第5章和第6章讲述根轨迹和频率响应设计方法。属于控制系统设计方法部分。在这两部分之间的第4章,讲述反馈的基本原理,帮助读者在学习控制系统设计方法之前理解实现系统控制的基本原理。在学习了连续时间控制系统的各种分析设计方法的基础上,再在第7章讲述数字控制系统的分析和设计,以便将两种系统的分析设计方法对照起来进行学习。

如无特别说明,本书所指的系统都是线性非时变系统。

习 题

1-1 什么叫开环控制?什么叫闭环控制?

1-2 基本的反馈控制系统由哪些部分组成?

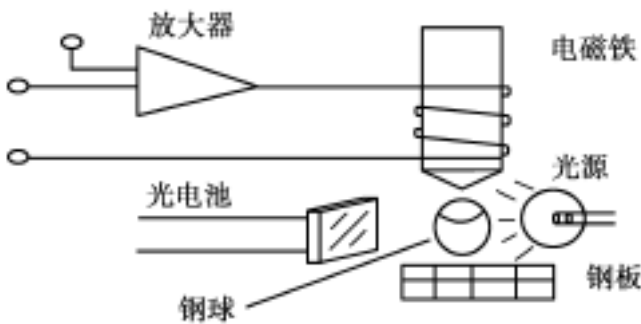


图 1-12

1-3 闭环控制系统不稳定的现象是什么?原因是什么?

1-4 磁悬浮控制系统如图 1-12,钢球由电磁铁吸引悬浮在空中一定的位置,这时射向光敏电池的射线被钢球挡住。当小球偏离要求位置时,光照到光电池上再通过电压和功率放大使电磁铁的电流改变,从而调节对钢球的吸引力使它

回到要求的悬浮位置,试画出闭环控制方块图。

1-5 图 1-13 是一个全自动热水器的示意图。为了保持水箱的期望温度,由温控开关接通或者断开电加热器的电源。在使用热水时,水箱中流出热水并补充冷水。试画出这一水温控制系统的原理方框图,并说明若要改变水温,应怎样操作?另外,当水箱中向外放出热水和向里补充冷水时,系统是如何工作的?画出对应的方框图。

1-6 画出图 1-14 自动门开、闭系统的方块图,指出输入量的特点和电位器 B 的作用。