



21世纪 高职高专通用教材

自动控制 原理

● 孙荣林 主编

上海交通大学出版社

21 世纪  通用教材

自动控制原理

主 编 孙荣林

副主编 朱光衡 陆锦军

江苏工业学院图书馆
藏书章

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书系高等职业技术学院电气工程和自动化、计算机、机电一机化、应用电子技术等专业“自动控制原理”课程的教程。本着以够用为度、突出应用的原则,书中介绍了经典控制理论及其应用,内容包括:自动控制的一般概念,自动控制的数学模型,时域分析法,根轨迹法,频域分析法,控制系统的校正,非线性系统分析以及采样系统分析等。为便于学习,书中每章均选录了大量的例题与习题,在自动控制理论的具体应用上安排了较大的篇幅加以介绍。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 孙荣林主编. - 上海: 上海交通大学出版社, 2001

21 世纪高职高专通用教材

ISBN 7-313-02741-9

I. 自… II. 孙… III. 自动控制理论-高等学校: 技术学校-教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 048309 号

自动控制原理

孙荣林 主编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 张天蔚

太仓市印刷厂有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 11.75 字数: 283 千字

2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1-5050

ISBN 7-313-02741-9/TP·460 定价: 18.50 元

版权所有 侵权必究

序

发展高等职业技术教育,是实施科教兴国战略、贯彻《高等教育法》与《职业教育法》、实现《中国教育改革与发展纲要》及其《实施意见》所确定的目标和任务的重要环节;也是建立健全职业教育体系、调整高等教育结构的重要举措。

近年来,年青的高等职业教育以自己鲜明的特色,独树一帜,打破了高等教育界传统大学一统天下的局面,在适应现代社会人才的多样化需求、实施高等教育大众化等方面,作出了重大贡献。从而在世界范围内日益受到重视,得到迅速发展。

我国改革开放不久,从1980年开始,在一些经济发展较快的中心城市就先后开办了一批职业大学。1985年,中共中央、国务院在关于教育体制改革的决定中提出,要建立从初级到高级的职业教育体系,并与普通教育相沟通。1996年《中华人民共和国职业教育法》的颁布,从法律上规定了高等职业教育的地位和作用。目前,我国高等职业教育的发展与改革正面临着很好的形势和机遇:职业大学、高等专科学校和成人高校正在积极发展专科层次的高等职业教育;部分民办高校也在试办高等职业教育;一些本科院校也建立了高等职业技术学院,为发展本科层次的高等职业教育进行探索。国家学位委员会1997年会议决定,设立工程硕士、医疗专业硕士、教育专业硕士等学位,并指出,上述学位与工程学硕士、医学科学硕士、教育学硕士等学位是不同类型的同一层次。这就为培养更高层次的一线岗位人才开了先河。

高等职业教育本身具有鲜明的职业特征,这就要求我们在改革课程体系的基础上,认真研究和改革课程教学内容及教学方法,努力加强教材建设。但迄今为止,符合职业特点和要求的教材却似凤毛麟角。由泰州职业技术学院、上海第二工业大学、金陵职业大学、扬州职业大学、彭城职业大学、沙州职业工学院、上海交通高等职业技术学校、上海交通大学技术学院、江阴职工大学、常州职业技术师范学院、苏州职业大学、锡山市职业教育中心、上海商业职业技术学院、福州大学职业技术学院、芜湖职业技术学院、青岛职业技术学院、上海工程技术大学等百余所院校长期从事高等职业教育、有丰富教学经验的资深教师共同编写的《21世纪高职高专通用教材》,将由上海交通大学出版社陆续向读者朋友推出,这是一件值得庆贺的大好事,在此,我们表示衷心的祝贺。并向参加编写的全体教师表示敬意。

高职教育的教材面广量大,花色品种甚多,是一项浩繁而艰巨的工程,除了高职院校和出版社的继续努力外,还要靠国家教育部和省(市)教委加强领导,并设立高等职业教育教材基金,以资助教材编写工作,促进高职教育的发展和改革。高职教育以培养一线人才岗位与岗位群能力为中心,理论教学与实践训练并重,二者密切结合。我们在这方面的改革实践还不充分。在肯定现已编写的高职教材所取得的成绩的同时,有关学校和教师要结合各校的实际情况和实训计划,加以灵活运用,并随着教学改革的深入,进行必要的充实、修改,使之日臻完善。

阳春三月,莺歌燕舞,百花齐放,愿我国高等职业教育及其教材建设如春天里的花园,群芳争妍,为我国的经济建设和社会发展作出应有的贡献!

叶春生

2001年4月5日

前 言

自动控制理论自 20 世纪 40 年代发展到现在,共经历了半个多世纪,相继建立了经典控制理论和现代控制理论。本书只介绍经典控制理论,作为高等职业技术学院的《自动控制原理》教材,可供电气工程和自动化、计算机应用与维护、机电一体化、过程控制自动化等专业使用。

本着高等职业教育以够用为度、突出应用的宗旨,本书在理论方面不作过多过深的阐述,而把主要篇幅放在具体应用上。

为了帮助读者能很好地应用自动控制理论,本书每章选录了典型的例题和习题。在书后附录中编入了有关数学基础的内容。

本书讲授总学时数约为 90 学时,各校教师在教学时,可以根据具体情况对教材内容进行适当取舍。

本书由青岛职业技术学院孙荣林副教授主编,南京化工学校朱光衡高级讲师和南通职业技术学院陆锦军副教授任副主编,泰州职业技术学院彭霞老师和上海工程技术大学戎自强讲师参编。

书中第 1 章、第 4 章和第 8 章由孙荣林编写,第 2 章和第 5 章由朱光衡编写,第 3 章和第 6 章由陆锦军编写,第 7 章由彭霞编写,戎自强对书中习题和插图做了大量工作。

在编写过程中,我们学习并参考了兄弟院校教材,许多同行对本书提出了宝贵的意见,在此表示衷心感谢。

由于高职教育还处于起步阶段,编者水平又有限,同时编写时间较为仓促,书中不妥之处难以避免,恳请广大读者批评指正。

编者

目 录

1 自动控制的一般概念	1
1.1 自动控制的基本方式	1
1.2 自动控制系统的示例	3
1.3 控制系统的性能要求	6
习题	8
2 自动控制系统的数学模型	10
2.1 自动控制系统的微分方程	10
2.2 传递函数	14
2.3 自动控制系统的动态结构图	22
2.4 系统动态结构图的简化	26
2.5 控制系统的传递函数	35
习题	38
3 时域分析法	42
3.1 典型输入信号和时域性能指标	42
3.2 一阶系统的瞬态响应	44
3.3 二阶系统的瞬态响应	46
3.4 系统的稳定性分析	53
3.5 稳态误差分析	57
习题	62
4 根轨迹法	66
4.1 根轨迹与根轨迹方程	66
4.2 绘制根轨迹的基本法则	67
4.3 系统阶跃响应的根轨迹分析	72
习题	76
5 频域分析法	78
5.1 频率特性	78
5.2 典型环节的频率特性	83
5.3 系统的开环频率特性	92
5.4 奈奎斯特稳定判据	100
5.5 系统的相对稳定性	107
5.6 闭环频率特性与系统阶跃响应的关系	110
5.7 开环频率特性与系统阶跃响应的关系	113
习题	118
6 控制系统的校正	123

6.1	概述	123
6.2	PD 控制(比例+微分控制)和超前校正	124
6.3	PI 控制(比例+积分控制)和滞后校正	127
6.4	PID 控制(比例+积分+微分控制)和滞后超前校正	130
6.5	反馈校正	131
6.6	复合校正	134
	习题	138
7	非线性系统分析	140
7.1	非线性系统动态过程的特点	140
7.2	非线性系统的描述函数及性能分析	141
	习题	148
8	采样系统分析	150
8.1	采样过程和采样定理	151
8.2	信号复现与零阶保持器	153
8.3	采样系统的数学模型	154
8.4	脉冲传递函数	162
8.5	采样系统性能分析	167
	习题	171
	附录 常用函数拉氏变换对照表	172
	参考文献	175

1 自动控制的一般概念

自动控制是多科学性的学科,它涉及到电气工程、计算机应用、机电一体化、过程控制等各种专业,应用领域极为广泛,它的发展趋势是无可限量的。

本章从自动控制的基本控制方式、自动控制的示例、控制系统的性能要求三个方面阐述自动控制的一般概念。

1.1 自动控制的基本方式

各种自动控制系统之间千差万别,但具有相同的规律性。任何一个控制系统都是由控制装置与被控对象两大部分组成的。控制装置是对被控对象实行控制的设备的总称,它具有三大职能,即测量、计算和执行。被控对象是控制系统中要求实行控制的机器、设备和生产过程等。

任何一个控制系统都有给定量、被控量和干扰量。给定量是系统的输入量,它通过控制系统,对系统的输出量进行控制。被控量是被控对象的输出量,也是系统的输出量。干扰量是影响控制量对被控量进行控制的一切系统的内、外因素。

一个自动控制系统不管多么复杂,都是由最基本的方式组成。根据系统的输入量(给定量和干扰量)到被控量之间信号传递的方向是否循环,自动控制有两种基本控制方式,即开式控制与闭式控制。

1.1.1 开式控制

开式控制方式的原理是输入量到被控量之间信号的传递是单向的。

根据输入量的类型不同,开式控制分为给定量作用下的开式控制和扰动量作用下的开式控制两种控制方式。

1) 给定量作用下的开式控制

这种控制方式的原理是需要控制的量是被控量,测量的量是给定量。系统的原理方框图如图 1.1 所示。

这种控制方式比较简单。但当控制装置、被控对象的参数发生变化时,外界干扰信号的进

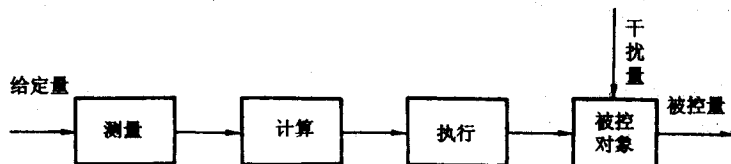


图 1.1 给定量作用下的开式控制原理方框图

人引起被控量偏离给定量,系统对此无法自动补偿。因此控制精度难以保证。

2) 干扰量作用下的开式控制

这种控制方式的原理是需要控制的量为被控量,测量的量是干扰量。系统的原理方框图如图 1.2 所示。

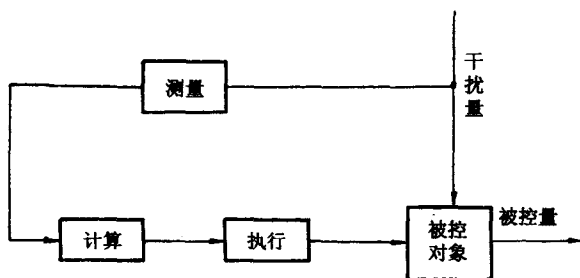


图 1.2 干扰量作用下的开式控制原理方框图

这种控制方式也比较简单。对可测的外界干扰量,系统能自动补偿;但对于不可测的外界干扰量以及控制装置与被控对象的参数发生变化时引起的内部干扰,系统不能自动补偿。因此控制精度也不理想。

1.1.2 闭式控制

这种控制方式的原理是,需要控制的量是被控量;测量的量是给定量与被控量之间的偏差。系统的原理方框图如图 1.3 所示。

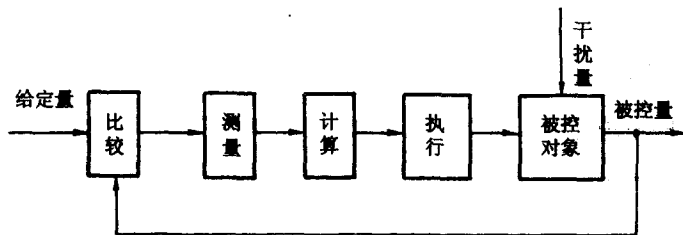


图 1.3 闭式控制原理方框图

系统中由于被控量从输出端又反馈到输入端与给定量进行比较,所以称为闭式控制,又叫反馈控制。

这种控制方式比较复杂,但对于外界干扰,控制装置与被控对象的参数发生变化引起的内部干扰,系统都能自动补偿。因此控制精度比较高。是自动控制系统中最基本的控制方式,在工程中广泛应用。

要创建一个新系统,都是在这两种基本控制方式的基础上加以创新。例如计算机控制系统,就是由计算机担任了比较、计算的职能以后而成。自校正控制系统,就是一般计算机控制系统,在控制装置中增加了估计器而成。

1.2 自动控制系统的示例

分析一个系统,一般应首先了解它的工作原理,然后按下列顺序分析问题:

- (1) 被控对象,被控量,干扰量。
- (2) 测量元件。
- (3) 给定量。
- (4) 计算装置。
- (5) 执行元件。
- (6) 画出原理方框图。

1.2.1 生产机械的恒速控制系统

生产机械的恒速控制系统的工作原理图如图 1.4 所示。

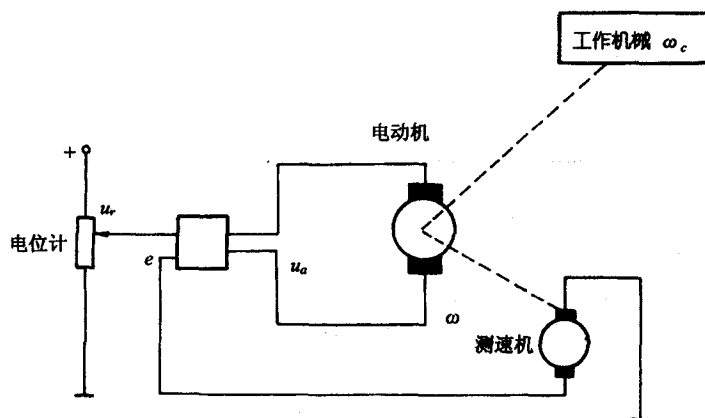


图 1.4 生产机械的恒速控制系统的原理图

被控对象:工作机械。

被控量:工作机械的输出量 ω_c 。

干扰量:主要是工作机械上的负载所产生的干扰力矩。

测量元件:测速机,测出电动机的转速,并把转速转变成电压输给放大器。

给定量:给定电位计的输出量 u_r 。在自动控制系统中常常把产生给定量的装置叫给定装置。

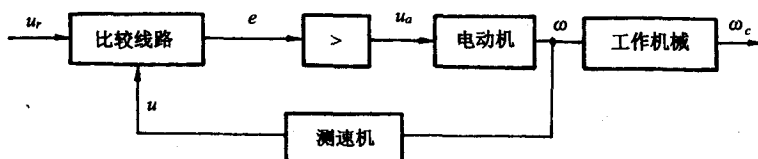


图 1.5 生产机械的原理方框图

计算装置:放大器,其中放大器的输入线路起了比较作用。

执行元件:电动机,带动工作机械运行。

生产机械的恒速控制系统的原理方框图如图 1.5 所示。

1.2.2 轧钢计算机控制系统

轧钢计算机控制系统的工作原理图如图 1.6 所示。

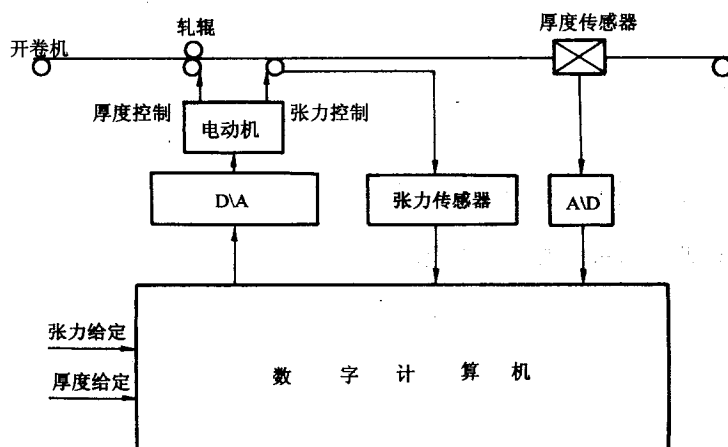


图 1.6 轧钢计算机控制系统的原理图

被控对象:轧辊。

被控量:轧辊的输出量——厚度和张力。

干扰量:主要是元件参数的变化而引起的干扰力矩。

测量元件:厚度传感器,张力传感器。

给定量:厚度给定,张力给定,是人们设计的希望值。

计算装置:数字计算机。

执行元件:电动机。

轧钢计算机控制系统的原理方框图如图 1.7 所示。

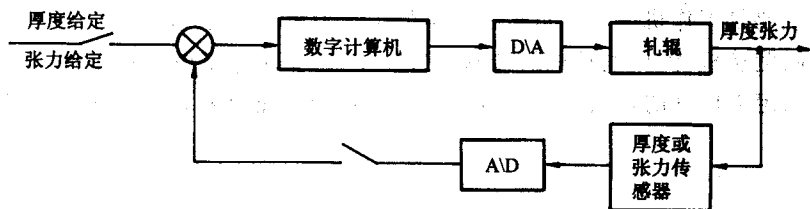


图 1.7 轧钢计算机系统的原理方框图

1.2.3 机床台控制系统

机床台控制系统的工作原理如图 1.8 所示。

被控对象:工作台。

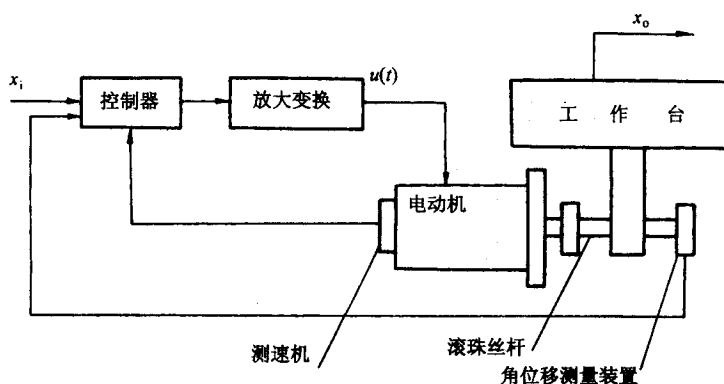


图 1.8 机床台系统的原理图

被控量:工作台的输出量——位移 x_o 。

干扰量:主要是元件参数的变化而引起的干扰力矩。

测量元件:角位移测量装置和测速机。角位移测量装置测出滚珠丝杆转角,即测出了工作台的位移;测速发电机测出电动机的转速,即测出工作台的运动速度。

给定量: x_i ,是设计者要把零件的毛胚加工成理想的那个模线。

计算装置:控制器,把三个输入信号比较后得到的差值输给放大变换器,进而控制电动机的转动。

执行元件:电动机,拖动工作台按理想的模线运动。

机床台控制系统的原理方框图如图 1.9 所示。

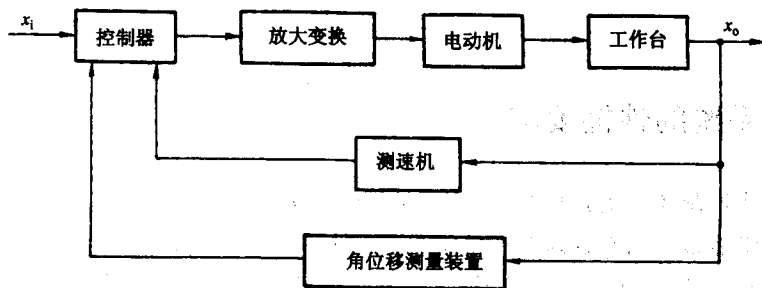


图 1.9 机床台控制系统的原理方框图

1.2.4 液位控制系统

液位控制系统的工作原理如图 1.10 所示。

被控对象:液体贮罐。

被控量:液体贮罐的输出量液位 x_o 。

扰动量:主要是液压的变化。

给定量:液体贮罐中液位的希望高度 x_i 。

测量元件:变送器。

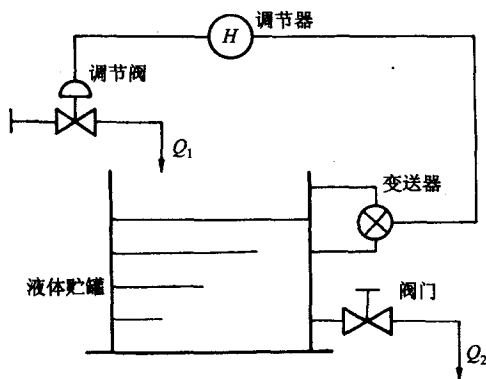


图 1.10 液位控制系统的原理图

计算装置:调节器。

执行元件:调节阀。

液位控制系统的原理方框图如图 1.11 所示。

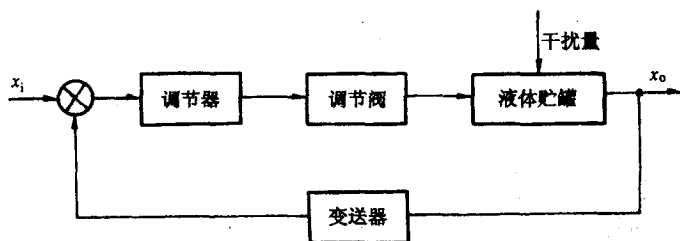


图 1.11 液位控制系统的原理方框图

1.3 控制系统的性能要求

不管是开式控制还是闭式控制,其给定量不管是恒值还是随时间变化,一个理想的系统总是要求其被控量能很快而平稳地等于给定量。但由于控制装置、被控对象中元件的惯性、能源功率的限制、相互之间作用的不同等因素,系统往往不能达到理想状态,甚至有可能相背。人们研究系统的目的在于要使被控量能跟随给定量,在跟随的过程中时间短且平稳,最终被控量与给定量之间的差值又要小。

一个系统的运行过程可以分成两种状态:一种是动态,即过渡过程状态;另一种是稳态,即静态。动态是指系统从一种平衡状态到另一种新的平衡状态的全过程。例如电动机的运行,原来转速为 n_0 ,后来改变了电动机的输入电压,转速变成 n_1 。那么从 n_0 变到 n_1 的全过程叫动态。转速达到了 n_1 的状态叫稳态。

对于一个系统,工程上往往从稳、快、准三个方面来进行设计。

1.3.1 稳

稳是指在动态中,被控量的变化趋势越来越接近给定量,并且在变化的过程中振荡的幅值

小,振荡的次数少。若在动态过程中,被控量越来越偏离给定值,或始终在给定值的上下振荡,那么这个系统是不稳定的,不稳定的系统是不能用的。若动态过程中被控量振荡的幅值较大,次数较多,但最终还是能接近给定值,那么这个系统的稳定性较差。例如有四个系统,给定量都是阶跃信号,其输出信号的变化如图 1.12 所示。那么(1)和(2)两个系统是稳定的,但(2)系统的稳定性差。(3)和(4)两个系统不稳定。

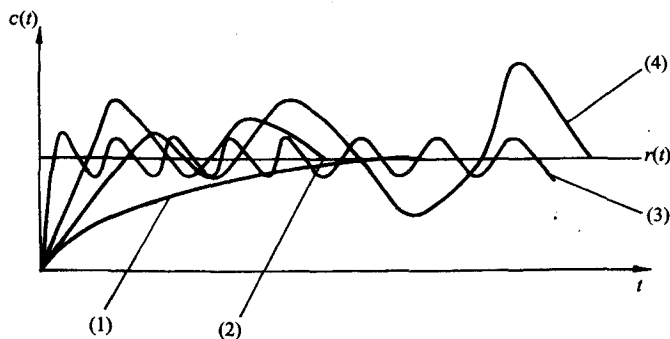


图 1.12 系统的动态过程

1.3.2 快

快是指动态过程的时间短。系统能很快从一种平衡状态到达另一种新的平衡状态。例如有两个系统的给定量都是阶跃信号,并且都是稳定的,其输出信号的变化如图 1.3 所示。那么(1)系统的响应速度快,(2)系统的响应速度慢。

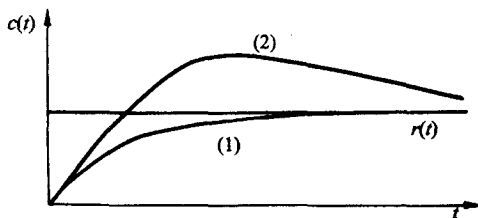


图 1.13 系统的快速性比较

1.3.3 准

准是指系统稳态下的实际输出与给定量之间的差值小。

例如有两个系统的响应曲线如图 1.14 所示。那么(1)系统较准,(2)系统不够准。

对于不同的系统,由于使用目的不同,对稳、快、准的要求有不同和侧重。例如随动系统(给定量是随机的,要求被控量能随着给定量的不断变化而变化),对快的要求严格,对稳的要求不太严格。对于调速系统,稳的要求严格,快的要求不太严格。

对于同一个系统,稳、快、准常是矛盾的。提高了系统的稳定性,很有可能快速性、准确度变差。所以一个自动控制系统设计者的任务,就是要分析它们之间的矛盾,寻求解决矛盾的方法,以满足控制的要求。

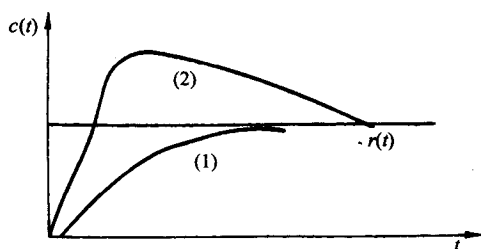


图 1.14 系统准确性的比较

小结

(1) 自动控制系统主要由两大部分组成:被控对象和控制装置。控制装置有三大职能:计算、测量和执行。

(2) 自动控制的基本方式有两种:开式控制和闭式控制。开式控制又有给定量作用下的开式控制和干扰量作用下的开式控制两种。

(3) 分析控制系统的顺序为:被控对象,被控量,干扰量;测量元件;给定量;计算装置;执行元件。

(4) 控制系统的性能要求是稳、快、准。

习题

1.1 贮槽液位自动控制系统如图 1.15 所示。

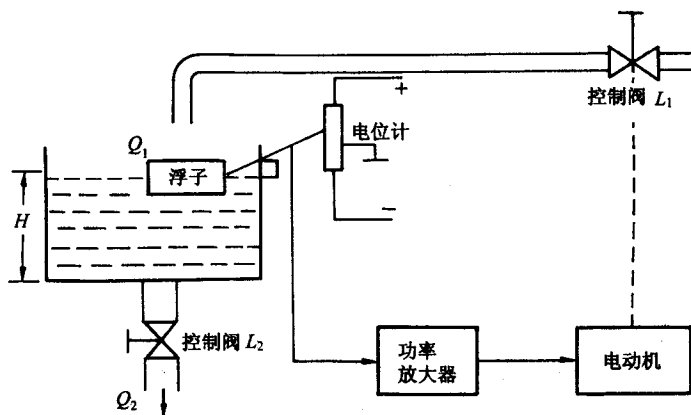


图 1.15 习题 1.1 图

要求 Q_2 不管发生什么变化,贮槽中和液面都要保持在允许的偏差之内。

(1) 说明系统的工作原理。

(2) 试说明系统的被控对象、被控量、干扰量、给定量、测量装置和执行元件。

(3) 画出系统的原理方框图。

1.2 位置随动系统如图 1.16 所示。

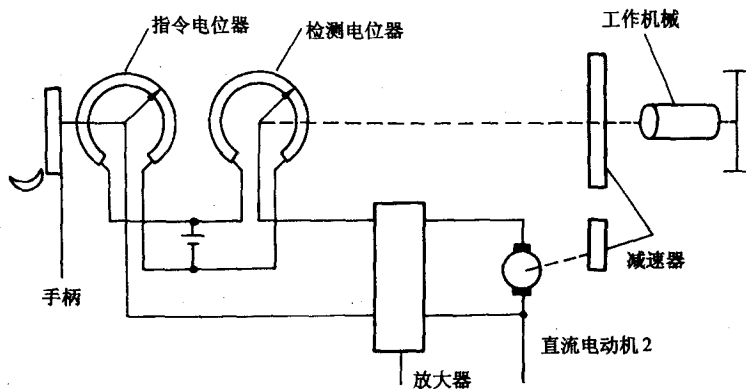


图 1.16 习题 1.2 图

要求工作机械的角位置能跟踪指令电位器的转角位置。

- (1) 试说明系统的工作原理。
- (2) 试说明系统的被控对象、被控量、干扰量、给定量、测量装置和执行元件。
- (3) 画出系统的原理方框图。

1.3 串联型晶体管稳压电路如图 1.17 所示。

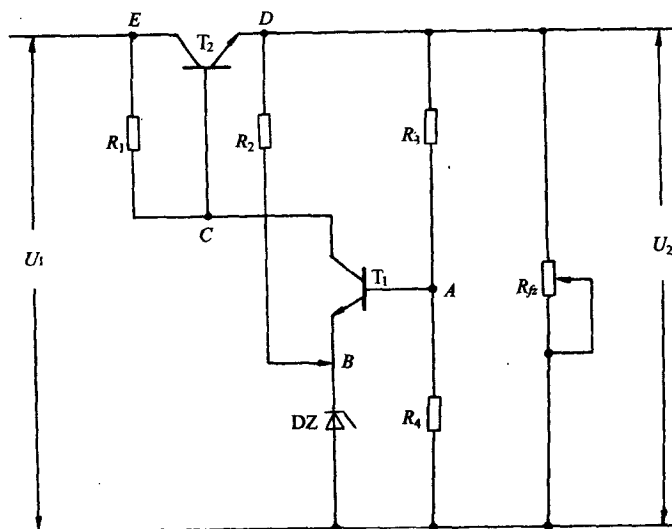


图 1.17 习题 1.3 图

要求输出电压 U_2 保持稳定。

- (1) 试说明系统的工作原理。
- (2) 试说明系统的被控对象、被控量、干扰量、给定量、测量装置和执行元件。
- (3) 画出系统的原理框图。

2 自动控制系统的数学模型

分析和设计自动控制系统,就要应用自动控制理论所提供的原理和方法。自动控制理论首先是把具体的自动控制系统抽象为数学模型;然后,根据自动控制理论所提供的方法,来分析系统的性能和指标,或对系统进行改进。因此,建立自动控制系统的数学模型是分析和研究系统的基础。

在经典控制理论中,经常采用的数学模型有微分方程、传递函数和动态结构图。它反映了系统被控变量、输入量和中间变量之间的关系,表征了系统的内部结构和特性。数学模型是对系统进行时域法、频率特性法和根轨迹法分析的基础。

2.1 自动控制系统的微分方程

描述系统输入量和输出量之间的关系的微分方程,是以时间 t 为变量的函数,适用于单输入、单输出的系统,是经典控制理论最基本的数学模型。

2.1.1 系统微分方程的建立步骤

控制系统的微分方程是通过有关的物理学、化学定律而建立的。一般说来,建立系统微分方程的步骤是:

- (1) 分析系统的工作原理,确定系统的输入变量和输出变量。
- (2) 从系统的输入端开始,根据支配系统的动态特性的物理(或化学)定律,依次列写系统各部件的动态方程组。
- (3) 消去中间变量,并将该方程化成标准形式,将输出量的有关项放在方程左边,而将输入量的有关项放在右边,按各导数项降幂排列,并使有关系数化成具有一定物理意义的系数。

2.1.2 系统微分方程建立举例

下面以控制系统中常见的电气元器件、力学元件等构成环节的微分方程的建立为例,说明建立数学模型的过程。

例 2.1 图 2.1 所示为一有源 RC 网络,设电路输入电压为 $u_r(t)$,输出电压 $u_c(t)$ 。图中 A 为理想运算放大器,试列写其微分方程。

解 由于理想运算放大器 A 工作在线性状态,其开环增益很大,根据理想运算放大器“虚地”的概念,有

$$i_1 = i_2 + i_3$$

$$\text{且 } i_1 = \frac{u_r(t)}{R_0}, \quad i_2 = -\frac{u_c(t)}{R_1}, \quad i_3 = -C_1 \frac{du_c(t)}{dt}$$

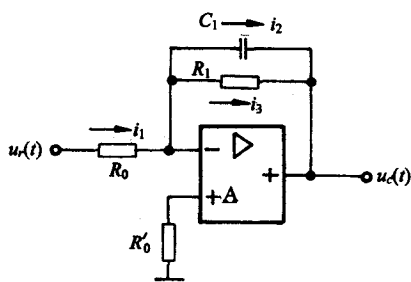


图 2.1 有源 RC 网络