



普通高等教育“十五”国家级规划教材

(高职高专教育)

自动控制系统

李先允 主 编

汪木兰 副主编



高等教育出版社

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育),在全国充分汲取高等职业教育的改革成果的基础上编写而成。全书不仅对传统的内容进行合理取舍,而且注重吸收新技术、新产品的应用,并从工程实际应用角度出发,介绍了电力拖动控制系统的设计、安装与调试方法。全书共分十章,主要内容有自动控制理论的基本知识、直流闭环调速系统及工程设计方法;可逆直流调速系统;直流脉宽调速系统;位置随动系统;交流调压、串级调速系统;变频调速;矢量控制;直接转矩控制;变频器的应用技术以及全数字式调速系统等。

本书可作为高等职业技术学院、高等专科学校、成人高校以及民办高校的电气技术、自动化、机电一体化专业教材,也可供有关专业师生、从事现场工作的技术人员和高级技术工人参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制系统/李先允主编. —北京:高等教育出版社,2003.7

ISBN 7-04-012559-5

I. 自... II. 李... III. 自动控制系统—高等学校: 技术学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 037525 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 18.5
字 数 450 000

版 次 2003 年 7 月第 1 版
印 次 2003 年 7 月第 1 次印刷
定 价 23.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

策划编辑	孙 杰
责任编辑	许海平
封面设计	王凌波
责任绘图	朱 静
版式设计	陆瑞红
责任校对	康晓燕
责任印制	杨 明

出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作,2000年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号),提出了“力争经过5年的努力,编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标,并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施:先用2至3年时间,在继承原有教材建设成果的基础上,充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验,解决好高职高专教育教材的有无问题;然后,再用2至3年的时间,在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神,有关院校和出版社从2000年秋季开始,积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》(草案)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(草案)编写的,随着这些教材的陆续出版,基本上解决了高职高专教材的有无问题,完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题,将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略,抓好重点规划”为指导方针,重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设,特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材;同时还要扩大教材品种,实现教材系列配套,并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系,在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

前 言

本书是为了更好地适应电力拖动控制系统技术飞速发展的需要,更好地培养 21 世纪的高级应用型电力拖动控制系统技术人才而编写的。

自动控制系统是电气技术、自动化及机电一体化等专业的重要专业课程之一。本书在认真学习研究有关教材长处及本学科新技术内容的基础上,注重课程内容的整合,将自动控制原理、交直流传动综合在一起编写,精选课程内容,舍弃了现行教材中较为陈旧的内容,注重先进技术的应用。主要介绍了电气传动控制系统所需要的自动控制原理的基本内容,直流闭环调速系统及工程设计方法;可逆直流调速系统;直流脉宽调速系统;位置随动系统;交流调压串级调速系统;交流调速系统中的变频调速,矢量控制,直接转矩控制等新技术;同时结合工程实际,介绍了变频器的使用技术,全数字式电动机调速系统。本书重视理论与实际相结合,以利于读者在理解掌握基本理论的基础上,提高处理实际问题的能力。

本书由李先允高级工程师任主编,汪木兰副教授任副主编。第一章、第二章由汪木兰同志编写;第三章由林琳同志编写;第四章、第六章和第七章由徐开芸同志编写;其余各章由李先允同志编写,并负责全书的统稿和编写组织工作。

本书由合肥工业大学顾绳谷教授审阅。顾绳谷教授在百忙之中对全部书稿进行了认真的审阅,并提出了许多有益的建议。丁珂同学也对本书的编写做了许多具体的工作,在此表示衷心的感谢!

本书在编写过程中,参考了许多图书资料,引用了参考文献中有关章节的内容,在此向作者表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2003 年 2 月

目 录

第一章 自动控制原理概论	1	第五章 直流脉宽调速系统	151
1.1 概述	1	5.1 脉宽调制变换器	151
1.2 系统数学模型与传递函数	8	5.2 脉宽调速系统的开环机械特性	158
1.3 典型环节与反馈控制	18	5.3 脉宽调速系统的控制电路	159
思考题与习题	24	5.4 直流脉宽调速系统的特殊问题	164
第二章 自动控制系统的分析与校正	28	思考题与习题	166
2.1 系统时域分析	28	第六章 位置随动系统	167
2.2 自动控制系统的稳定性分析	38	6.1 位置控制原理	167
2.3 系统的频域分析	46	6.2 位置随动系统检测元件	174
2.4 自动控制系统的频域校正	57	6.3 位置随动系统分析与设计	178
2.5 MATLAB 和 SIMULINK 应用简介	67	思考题与习题	183
思考题与习题	69	第七章 交流调压调速系统和串级调速	184
第三章 闭环直流调速系统	73	7.1 交流调速的基本原理	184
3.1 直流调速系统概论	73	7.2 交流调压调速系统	186
3.2 直流调速系统中典型环节的传递函数	87	7.3 串级调速系统	191
3.3 单闭环调速系统分析	94	思考题与习题	200
3.4 转速、电流双闭环调速系统分析	109	第八章 异步电动机变压变频调速系统	201
3.5 转速、电流双闭环系统调节器的工程设计	114	8.1 变频调速的基本控制方式	201
思考题与习题	131	8.2 异步电动机变频调速的机械特性	203
第四章 可逆直流调速系统	133	8.3 转速开环变频调速系统	204
4.1 可逆直流调速系统的实现方法	133	8.4 转差频率控制的转速闭环调速系统	213
4.2 可逆直流调速系统的环流分析	136	8.5 异步电动机矢量变换控制系统	218
4.3 有环流可逆直流调速系统	137	8.6 异步电动机的直接转矩控制	230
4.4 无环流可逆直流调速系统	140	思考题与习题	236
思考题与习题	149		

第九章 变频器应用技术	237	思考题与习题	257
9.1 变频器装置的分类及主要功能	237	第十章 全数字化交直流调速控制系统	258
9.2 变频器的选择	242	10.1 概述	258
9.3 电动机容量的选择	246	10.2 全数字化直流调速系统	264
9.4 电缆的选择	246	10.3 微机控制的交流调速系统	275
9.5 变频器与 PLC 及上位机的连接	247	思考题与习题	278
9.6 变频器的安装、调试及使用	253	附录 常用符号表	279
		参考文献	284

第一章 自动控制原理概论

本章将要介绍有关自动控制理论的一般概念、自动控制系统的组成和分类、对控制系统的基本要求以及设计方法。然后较详细介绍了建立系统数学模型的方法,包括微分方程、传递函数和动态结构图等。最后对控制系统中使用的典型环节和反馈控制策略进行了分析。

1.1 概述

1.1.1 引言

控制论、信息论、计算机、相对论和量子论等都是 20 世纪取得的重大科学成就,它们为推动社会进步和科学技术发展起到了举足轻重的作用。

控制论的创立人是美国科学家维纳。事实上,控制论的形成和发展始于技术,是控制工程的技术总结。最早从解决生产实际问题开始,然后提炼上升到理论。反过来,控制理论对生产力的发展、尖端技术的研究与尖端武器的研制以及对社会管理系统等都产生了重大影响,并迅速渗透到许多科学技术领域,派生出许多新型的边缘学科,其中包括生物控制论、经济控制论和社会控制论等。

所谓自动控制就是在没有人直接参与的情况下,通过控制器使被控对象或被控过程能自动地按照预定的规律运行。例如:导弹能够准确地命中目标;人造卫星能够按预定的轨道运行并返回地面;宇宙飞船能够在月球着陆然后返回地球;电网电压和频率自动地维持不变等。这些实际系统都是自动控制技术高速发展的结果。

自动控制技术在各个领域的广泛应用,不仅使生产设备和过程实现了自动化,极大地提高了劳动生产效率和产品质量,改善了劳动条件,而且在人类征服自然、探索新能源、发展空间技术等方面都起着极其重要的作用。

纵观自动控制理论的发展过程,一般可将其划分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。“经典控制理论”主要以传递函数为基础,研究单输入-单输出(SISO)一类自动控制系统的分析和设计问题。这些理论由于发展较早现已臻成熟。在工程上,也比较成功地解决了电气传动控制系统的实践问题。这部分内容是本书要讨论的重要内容。“现代控制理论”主要以状态

空间法为基础,研究多输入—多输出(MIMO)、变参数、非线性、高精度、快响应等控制系统的分析和设计问题。例如:最优控制、最佳滤波、系统辨识、自适应控制、鲁棒控制等理论都是这一领域研究的主要课题。特别是近年来由于计算机技术和现代应用数学研究的迅速发展,使现代控制理论又在研究非线性系统理论、离散事件系统理论、大系统和复杂系统理论以及模仿人类智能活动的智能控制(如模糊控制、专家控制和人工神经网络控制)等方面都得到了很大的发展。

总之,自动控制理论正在迅速地向更深层次发展,无论在数学工具、理论基础,还是在研究方法上,都是日新月异,而且它反过来又成为高新技术发展的重要理论依据。但是,自动控制理论在各门学科中的充分应用还远远没有实现,因此,它在应用科学领域将会受到越来越多的重视。

1.1.2 控制系统的结构

一、常用术语

控制对象——指被控设备或被控过程,也可以是其他某些物理量或工作状态。

控制器——使控制对象具有所要求性能或状态的控制设备,它接收输入信号或偏差信号,按控制规律给出控制量,送到控制对象或执行元件。

系统——由一些部件组成的一个整体并可以实现一定的任务。系统的概念不限于物理系统,还可用于抽象的动态现象,如:生物学系统、经济学系统等。

系统输出——指控制对象的表征及其状态和性能的被控制量,也称系统响应。

控制量——是由控制器改变的量值或状态,它将影响系统输出,体现出控制作用的变化信息。

系统输入——是人为给定的,使系统具有预定性能或预定输出的激励信号,它代表输出的希望值,也称为参考输入或系统给定等。

扰动——干扰和破坏系统具有预定性能和预定输出的干扰信号,根据其来源不同可分为内部扰动和外部扰动。

静态特性——在系统稳定以后,表现出来的输入与输出之间的关系。在控制系统中静态是指各参数或信号的变化率为零或处于一个所要求很小的范围内。静态特性主要表现为静态放大倍数,有时也称为稳态特性。

动态特性——系统输入和输出在变化过程中所表现出来的特性,即从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程。

比较环节——把反馈测量电路检测到的实际系统输出值与输入值进行比较,求出它们之间的偏差,并将该值送给控制器实行控制。

反馈环节——检测控制系统输出的实际值,并转换成电量送给比较环节处理。

校正环节——在系统基本结构基础上附加参数可灵活调整的调节器,用以改善或提高系统的静态特性或动态特性。

二、方框图

为了使控制系统的表示简单明了,在控制系统中可将系统中各个部分都用一个方框来表示,并在框中填入它所表示部件的名称或其功能函数表达式,不必画出它们的具体结构。根据信号

在系统中的传递方向,用有向线段依次把各方框连接起来,并标明相应的信息,就得到整个系统的方框图。

控制系统方框图一般由以下三种基本单元组成:

- ① 引出点:表示信号的引出,箭头表示信号的传递方向,如图 1-1-1(a)所示。
- ② 比较点:表示两个或两个以上信号在该处进行相减或相加的运算,其中“-”表示信号相减,“+”表示信号相加,如图 1-1-1(b)所示。
- ③ 部件的方框:表示部件与其输入、输出信号之间的关系,一般输入信号置于方框的左端,输出信号置于方框的右端,如图 1-1-1(c)所示。

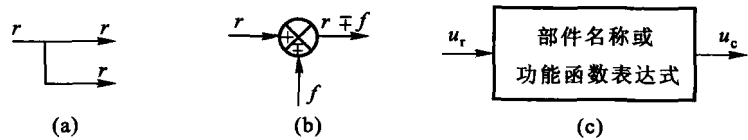


图 1-1-1 系统框图的基本组成单元
(a)引出点 (b)比较点(环节) (c)部件的方框

将上述常用术语与方框图结合起来组成一个典型的控制系统方框图,如图 1-1-2 所示。图中首先通过比较环节求得系统输入期望值与实际输出值(反馈量)之间的偏差,然后根据设计的控制算法求得控制量,并经功率放大后,利用执行环节驱动控制对象朝着减小偏差的方向运动。

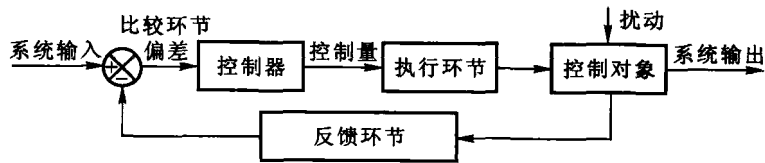


图 1-1-2 控制系统典型方框图

三、开环控制和闭环控制

控制系统的结构形式是多种多样的,根据其信号流向通道可分为开环系统和闭环系统,相对应的控制方式也分为开环控制和闭环控制。

1. 开环控制

如果系统只是根据给定的输入量实行控制,没有考虑实际输出量与系统输入之间的偏差情况,也就是系统输入与系统输出之间只有前向通道而没有反馈通道,这类信号传递路径不闭合的控制方式称为开环控制。如图 1-1-3 所示为开环控制系统的方框图。可见,这种控制系统的特点是结构简单,成本低,也容易稳定。但当系统受到干扰作用后,被控制的系统输出一旦偏离了期望的轨迹,系统就没有消除或减小误差的能力,这是开环控制的一个“致命”缺点,因此它一般只适用于控制性能要求不高的场合。

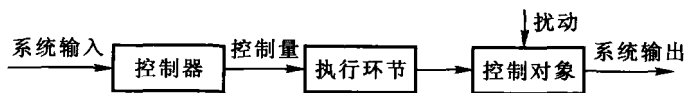


图 1-1-3 开环控制系统方框图

如图 1-1-4 所示为经济型数控机床中广泛采用的工作台定位系统的控制方框图,这是一个典型的开环控制系统。工作台的位移量是系统输出,它是跟随着控制脉冲(系统输入)频率和个数而变化的。显然,这个系统没有抗扰动能力。例如:由于电压波动或负载变化导致步进电动机失步时就无法获得适当的补偿,从而降低了系统的定位精度。

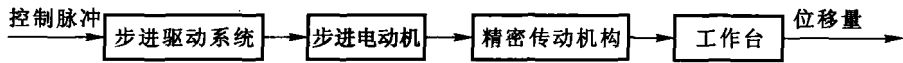


图 1-1-4 数控机床开环位置控制系统

2. 闭环控制

如果系统能将输出量反馈到输入端,并求得给定值与实际值之间的偏差,然后据此实行控制,使偏差越来越小,这类系统由于引入了反馈信息,使整个控制过程成为闭合的,故称之为闭环控制或反馈控制。如图 1-1-2 所示就是一个典型的闭环控制系统方框图。在该系统中实施控制作用的基础是因各种扰动所导致的“偏差”,在控制过程中只要偏差存在,控制作用总是存在的。控制的最终目标是减小偏差,提高系统控制精度。可见,这种闭环控制系统的特点是,能减小或消除由于扰动所造成的偏差,具有较高的控制精度和较强的抗干扰能力。但若设计调试不当,系统易产生振荡或不稳定,不能正常工作。因此,在自动控制原理中主要讨论的是闭环控制系统。

如图 1-1-5 所示为采用转速负反馈的直流电动机调速系统。图中 U_n^* 为给定的系统输入, U_n 为测速发电机输出,对应于电动机的实际转速,其偏差为 $\Delta U_n = U_n^* - U_n$ 。它经放大器、触发器和晶闸管变流装置转变为相应的直流电压 U_d , 供给直流电动机,使之产生一个期望的转速 n 。其对应的方框图如图 1-1-6 所示。

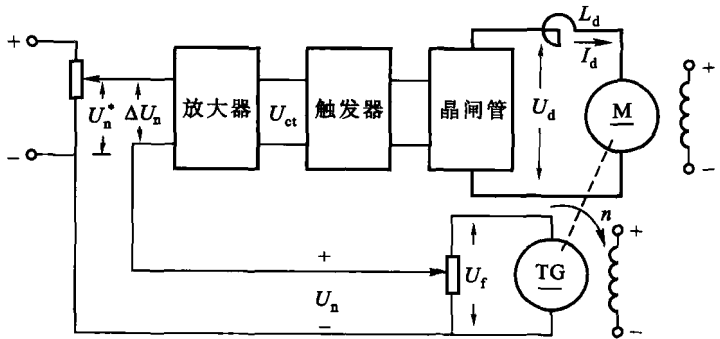


图 1-1-5 直流电动机闭环调速系统原理图

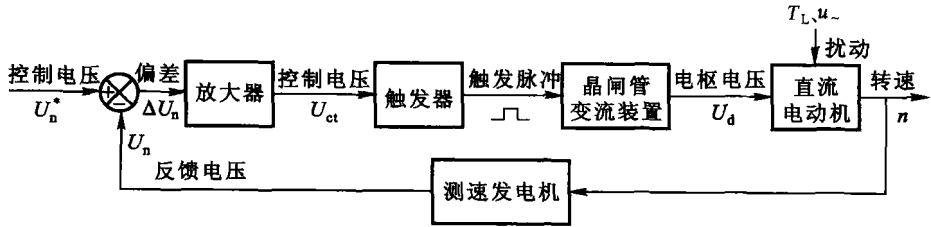
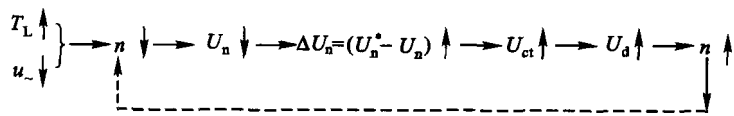


图 1-1-6 直流电动机闭环调速系统方框图

如图 1-1-6 所示闭环控制系统中,输出转速 n 取决于给定控制电压 U_n^* 。但是对于电网

电压 u 波动, 负载 T_L 变化以及除测量装置以外的其他部分参数变化所引起的转速变化, 可以通过自动调整加以抑制。例如: 当电动机负载 T_L 增大时, 流经电动机电枢中的电流相应地增大, 电枢电阻上的压降也增大, 从而导致电动机转速的降低; 而转速的降低使测速发电机的输出电压 U_n 减小, 误差电压 ΔU_n 便相应增大, 经放大器放大后, 使触发脉冲前移, 晶闸管整流装置的输出电压 U_d 增大, 从而补偿了由于负载增大而造成的电动机转速下降, 使电动机的转速近似地保持不变。上述的调节过程, 也可用如下顺序图来表示:



现假设去除图 1-1-5 中测速发电机元件, 相当于断开图 1-1-6 中反馈电路, 则形成了一个开环控制系统。这时电动机输出转速完全受控于 $\Delta U_n = U_n^*$ 。但是, 当电动机负载、交流电网的电压或电动机励磁稍有变化时, 电动机转速就会随之而变, 无法再维持 U_n^* 所期望的转速。可见, 反馈环节起到了监督系统输出跟随系统输入的功能, 在自动控制系统中至关重要。

最后还要说明的是, 闭环控制系统都是使用负反馈方式, 即 $\Delta U_n = U_n^* - U_n$ 。而正反馈系统 ($\Delta U_n = U_n^* + U_n$) 不稳定, 这里不予研究。

1.1.3 控制系统的分类

自动控制系统很多, 现从不同角度对其进行分类。

一、线性系统与非线性系统

若一个元件输出与输入的静态特性曲线是一条过原点的直线, 则称之为线性元件, 否则是非线性元件。若一个系统中所有元件均为线性的, 则该系统称之为线性系统。其突出特点是满足齐次性和叠加原理。一般可用微分方程、传递函数或状态空间表达式来表示。

若系统中含有一个或多个非线性元件, 则该系统称之为非线性系统。这类系统不满足齐次性和叠加原理, 并且其输出响应和稳定性还与其初始状态有关。

严格地说, 绝对的线性控制系统(或元件)是不存在的, 因为所有的物理系统和元件在不同程度上都具有非线性特性。为了简化对系统的分析和设计, 在一定的条件下, 可以对某些非线性特性作线性化处理。这样, 非线性系统就可近似为线性系统, 从而可以用分析线性系统的理论和方法对它进行研究。

二、定常系统与时变系统

从系统的数学模型来看, 若微分方程系数不是随时间变化的函数, 则称此系统为定常系统或时不变系统, 否则称之为时变系统。同样, 绝对的定常系统是不存在的, 一般在一个相对的时间段内如果变化很小, 则可近似当作时不变处理。

进一步, 若描述系统的微分方程系数为常数, 则称之为线性定常系统。此类系统即为本书的研究重点。

三、连续系统与离散系统

从系统中信号来看, 若系统中各部分的信号都是时间的连续函数(即模拟量), 则称此类系统

为连续系统。例如:前面图 1-1-5 所示直流电动机闭环速度控制系统。

如果在控制系统各部分信号中有一处或多处是时间的离散函数,如脉冲或编码信号,则称之为离散系统。一般使用计算机实行控制的系统都是离散控制系统。

四、恒值系统、随动系统和程序控制系统

若给定的系统输入值为一定值,而控制的任务就是克服扰动,使系统输出维持在某一特定值上,此类系统称之为恒值系统。例如:电动机的恒速控制、恒张力控制、恒温控制、恒压控制、恒水位控制等。

若系统输入的给定信号是按事先不知道的时间或随机变化,并要求系统输出快速、准确地跟随给定值变化而变化,此类系统称之为随动系统。例如:自动火炮系统、雷达跟踪系统、自动导航系统和自动驾驶系统等。

若系统输入的给定值按照事先预定的时间函数或规律变化,并要求系统输出也随之变化,此类系统称为程序控制系统。例如:机床数控系统、仿形加工系统和一些自动生产线等。

此外,根据系统元部件的类型,可分为机电系统、液压系统、气动系统和生物系统等。根据系统输入和输出信号的数量可分为单变量系统(SISO)和多变量系统(MIMO)等。

1.1.4 控制系统的基本要求

一个理想的自动控制系统,其任务是使系统输出的被控制量力求等于参考输入信号所要求的期望值。事实上,由于机械部分质量、惯量的存在,电路中储能元件的存在以及能源功率的限制,使得运动部件的加速度受到限制,其速度和位置难以瞬时变化。所以,当给定信号变化时,被控制量不可能立即等于给定值,而需要经过一个过渡过程,即动态过程。所谓动态过程就是指系统受到外加信号(给定值或扰动)作用后,被控制量随时间变化的全过程。

由动态过程可以反映出系统内在性能的好坏,而常见的评价系统优劣的性能指标也是从动态过程中定义出来的。对系统性能的基本要求包括“稳、快、准”三个方面。

一、稳定性

稳定性是对控制系统最基本的要求,是系统分析与综合的前提条件。所谓稳定性就是系统受到扰动作用后,其动态过程的振荡倾向趋于恢复系统平衡的能力。

如果系统受到扰动作用经过一定的时间后,仍然能够达到某一平衡状态,则称系统是稳定的,如图 1-1-7 所示;否则称为不稳定,如图 1-1-8 所示。另外,若系统出现等幅振荡,即处于临界稳定的状态,也属于不稳定,如图 1-1-9 所示。

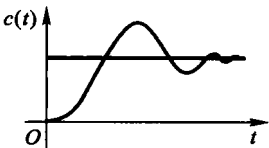


图 1-1-7 稳定系统的动态过程

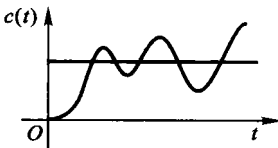


图 1-1-8 不稳定系统的动态过程

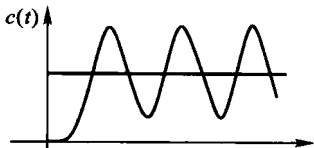


图 1-1-9 临界稳定系统的动态过程

不稳定系统是无法正常工作的。考虑到系统在工作过程中的环境和参数的变化,一般要求系统不仅能稳定,而且还要求具有一定的稳定裕量。

二、快速性

快速性是通过动态过程时间的长短来表征的,如图 1-1-10 所示。上升时间越短,表明快速性越好,反之亦然。快速性表明了系统对输入的响应快慢程度。系统响应越快表明复现快速变化信号的能力越强。

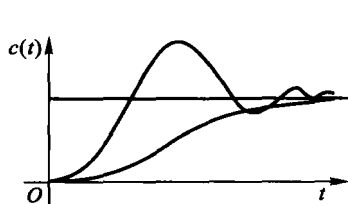


图 1-1-10 控制系统的快速性

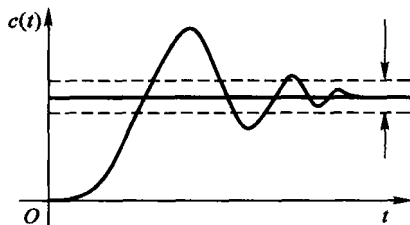


图 1-1-11 控制系统的稳定精度

三、准确性

准确性通常用系统的稳态误差来表示,也就是系统进入稳态后,用输入给定值与输出响应值之间的差值大小来表征,如图 1-1-11 所示。它反映了系统的稳态精度。显然,这种误差越小,表示系统跟随输入信号的精度越高。

在同一个系统中,上述三方面的性能要求通常是互相制约的。例如:过于求稳有可能会引起反应迟缓、精度下降;但反过来过于求快则可能加剧振荡,甚至引起不稳定。所以,如何折中协调处理系统动态响应的快速性、高精度与稳定性之间的矛盾,正是本课程及后续课程所要解决的问题。

1.1.5 控制系统的分析与设计

控制系统的分析和设计,分别是两个互逆的研究过程,前者是从已知确定的系统出发,分析计算系统所具有的性能指标,而后者则是根据要求的性能指标来确定系统应具备的结构模式及参数。

一、系统分析

系统分析是在描述系统数学模型的基础上,用数学的方法来进行研究讨论。因此,必须在规定的工作条件下,对已知系统进行以下步骤的工作:

- ① 建立系统的数学模型。
- ② 分析系统的性能,计算三大性能指标是否满足要求。
- ③ 分析参数变化对上述性能指标的影响,决定如何合理地选取。

二、系统设计

系统设计的目的,是要寻找一个能够实现所要求性能的自动控制系统。因此,在系统应完成的任务和应具备的性能已知的条件下,根据被控对象的特点,构造出适当的控制器是设计的主要任务。应进行的步骤如下:

- ① 根据要求的性能指标综合出系统应有的数学模型。
- ② 根据已知的被控对象求出对象的数学模型,并画出系统结构图。
- ③ 根据结构图与数学模型关系,已知部分和系统应有的数学模型,即可求出控制器的数学模型和控制规律。

④ 各部分结构确定后,按已定结构求出系统数学模型,进行性能分析,验证它在各种信号作用下是否满足要求,若不满足,及时修正。

⑤ 结构参数最终确定后,可进行实验仿真,若效果理想即可制作样机。

1.2 系统数学模型与传递函数

1.2.1 建立数学模型的方法

我们已经知道,自动控制系统是由控制对象、执行机构、放大器、检测装置和控制器等部件组成的。为了从理论上对整个系统进行定性的分析和定量的计算,首先必须建立系统的数学模型。

系统的数学模型就是描述系统输入、系统输出及其内部其他变量之间关系的数学表达式。有了数学模型,通过求解,就可以得到某些物理量随时间变化的规律。

在控制系统中,输入和扰动往往随时间而改变,因此,系统中的变量都和时间有关,即系统的数学模型通常是以时间为自变量的动态模型。但本书所涉及的数学模型主要是线性的、非时变的确定性模型,即线性定常系统的数学模型。

建立控制系统数学模型的方法有解析法和实验法。解析法是对系统各个部分的运动机理进行分析,根据它们所依据的物理规律和化学规律分别列写出每个元件的输入-输出关系式,然后消去中间变量,从而求得系统输出与输入的数学表达式。例如:电工学中的基尔霍夫定律、力学中的牛顿定律等。当然和模型有关的因素很多,在建立模型时不可能也不必要把一些非主要因素都囊括进去而使模型过于复杂,应根据实际情况建立关于系统某一方面属性的描述。实验法是人为地给系统施加某种测试信号,然后记录其响应,并用适当的数学模型去逼近,这种方法称为系统辨识。本章只研究用分析法建立线性定常系统数学模型的方法。

作为线性定常系统,其数学模型可用微分方程、传递函数、动态结构图、频率特性以及状态空间等方法进行描述。本章主要介绍微分方程、传递函数和动态结构图模型等。

1.2.2 控制系统的微分方程

一、微分方程建立的步骤

微分方程是描述自动控制系统动态特性最基本的方法。其建立步骤如下:

① 根据实际工作情况,确定系统或各元件的输入变量和输出变量。

② 从输出端开始,按照信号传递的顺序和各元件所遵循的规律,列写出相应的微分方程。

③ 消去中间变量,得到系统的输出量与输入量之间关系的微分方程。一般情况下,将微分方程写成标准形式,即与输出量有关的项写在方程的左端,与输入量有关的项写在方程的右端,方程两端变量的导数项均按降幂排列。

在列写每个元件的微分方程时,必须注意它与相邻元件间的相互影响。下面说明控制系统中常用电气元件、力学元件等微分方程的列写方法。

例 1.2.1 如图 1-2-1 所示 RLC 电路,其输入电压为 $u_r(t)$,输出电压为 $u_c(t)$ 。试推导其微分方程。

解:根据电路理论中基尔霍夫定律和元件电流与电压的关系,列出下面方程

$$\begin{cases} i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} + u_c(t) = u_r(t) \\ i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} \end{cases}$$

消去中间变量 $i(t)$,则得

$$LC \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_r(t) \quad (1.2.1)$$

式(1.2.1)即为图 1-2-1 所示 RLC 无源网络的数学模型,是一个二阶常系数微分方程,它描述了该电路在 $u_r(t)$ 作用下电容器 C 两端电压 $u_c(t)$ 的变化规律。

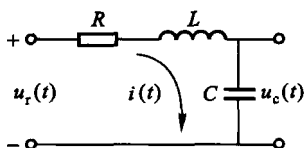


图 1-2-1 RLC 电路

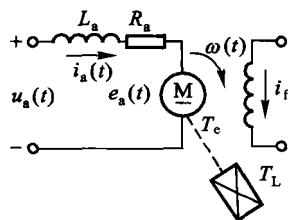


图 1-2-2 电枢控制他励直流电动机系统

例 1.2.2 试推导出如图 1-2-2 所示电枢控制他励直流电动机的微分方程。系统输入为电枢电压 $u_a(t)$,系统输出为电动机角速度 $\omega(t)$ 。

解:直流电动机是将电能转化成机械能的一种典型的机电转换装置。在电枢控制他励直流电动机中,由输入的电枢电压 $u_a(t)$ 在电枢回路中产生电枢电流 $i_a(t)$,再由电枢电流与激磁磁通相互作用产生电磁转矩,从而使电枢旋转,拖动负载 T_L 运动。图 1-2-2 中 R_a 和 L_a 分别是电枢绕组总电阻和总电感, $e_a(t)$ 是绕组在磁场中切割磁力线产生的感应电动势,其大小与激磁磁通及转速成正比,方向与外加电枢电压 $u_a(t)$ 相反。根据基尔霍夫定律写出电枢回路电压方程

$$u_a(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + e_a(t) \quad (1.2.2)$$

若忽略电枢反映、磁滞及涡流等影响,当励磁电流 i_f 恒定时,励磁磁通 Φ 视为恒值。则有

$$e_a(t) = C_e \omega(t) \quad (1.2.3)$$

式中: C_e ——电动势系数,由电动机结构参数确定,单位为 $(V \cdot s)$ 。

电动机电磁转矩

$$T_e(t) = C_m i_a(t) \quad (1.2.4)$$

式中: C_m ——电动机转矩系数,由电动机结构参数确定,单位为 $(N \cdot m/A)$ 。

忽略摩擦等影响,列出转矩平衡方程式

$$T_e(t) = J \frac{d\omega}{dt} + T_L(t) \quad (1.2.5)$$

式中: J ——电动机及负载折算到电动机轴上的转动惯量,单位为 $(N \cdot m \cdot s^2)$ 。

消去中间变量 $i_a(t)$ 、 $e_a(t)$ 和 $T_e(t)$, 即可得到 $u_a(t)$ 、 $\omega(t)$ 及 $T_L(t)$ 之间关系的微分方程

$$\frac{JL_a}{C_m} \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + \frac{JR_a}{C_m} \frac{d\omega(t)}{dt} + C_e\omega(t) = u_a(t) - \frac{R_a}{C_m} T_L(t) - \frac{L_a}{C_m} \frac{dT_L(t)}{dt} \quad (1.2.6)$$

令 $T_m = \frac{JR_a}{C_e C_m}$, 称为机电时间常数, 单位为秒(s);

令 $T_a = \frac{L_a}{R_a}$, 称为电磁时间常数, 单位为秒(s)。

则将式(1.2.6)改写成标准形式

$$T_m T_a \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + T_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \frac{1}{C_e} u_a(t) - \frac{T_m}{J} T_L(t) - \frac{T_m T_a}{J} \frac{dT_L(t)}{dt} \quad (1.2.7)$$

可见, 电枢控制的他励直流电动机是一个二阶系统, 这正好与它有两个储能元件相对应, 一个是电感 L_a , 另一个是机械惯量 J 。

二、微分方程的简化

在工程应用中, 为了便于分析, 往往针对具体情况略去次要因素, 使系统的微分方程变得简单。现以式(1.2.7)为例说明如下:

① 对于普通电动机电枢绕组的电感 L_a 一般都较小, 对于微型电动机来讲转动惯量 J 很小, 而且其 R_a 、 L_a 都可忽略, 则式(1.2.7)可简化为

$$\omega(t) = \frac{1}{C_e} u_a(t) \quad (1.2.8)$$

② 如果将微型电动机当作发电机使用, 则输入为 $\omega(t)$, 输出为电枢电压 $u_a(t)$ 。此时, 电枢电压实际上就是电枢绕组的感应电势, 即

$$u_a(t) = C_e \omega(t) \quad (1.2.9)$$

用于检测的测速发电机就属于这类电机。

1.2.3 控制系统的传递函数

一、传递函数的定义

当控制系统微分方程列出后, 只要给定输入量的初始条件, 便可对微分方程求解, 并可在时域内对系统进行定量分析。但当微分方程阶次较高时, 求解时域解就非常困难。这时, 可用拉氏变换将其转换到复数域进行处理, 为分析控制系统的性能带来很大的方便。

传递函数是指线性定常系统在零初始条件下, 系统输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比。

设线性定常系统由下述 n 阶线性常微分方程描述

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_{n-1} \frac{dy(t)}{dt} + a_n y(t) \\ = b_0 \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_{m-1} \frac{dr(t)}{dt} + b_m r(t) \end{aligned} \quad (1.2.10)$$

式中: $r(t)$ ——系统的输入量;