



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

自动控制系统

(第2版)

李先允 主 编



YZLI0890126696



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

自动控制系统

Zidongkongzhi Xitong
(第2版)

李先允 主编
陈黎来 金晓华 副主编
郑建勇 主审



YZLI0890125696



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育),在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。全书共分八章,主要内容有自动控制原理概论;自动控制系统的分析与校正;闭环直流调速系统;可逆直流调速系统;直流脉宽调速系统;位置随动系统;交流调速系统;变频器应用技术等。

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类专业教材,也可供有关专业师生、从事现场工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制系统/李先允主编. —2版. —北京:高等教育出版社,2010.11

ISBN 978-7-04-030977-5

I. ①自… II. ①李… III. ①自动控制系统-高等学校:技术学校-教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第196408号

策划编辑	孙 薇	责任编辑	许海平	封面设计	张志奇	责任绘图	尹文军
版式设计	王艳红	责任校对	杨雪莲	责任印制	朱学忠		

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 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 河北省财政厅票证文印中心

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×1092 1/16
印 张 13.75
字 数 330 000

版 次 2003年7月第1版
2010年11月第2版
印 次 2010年11月第1次印刷
定 价 23.80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

物料号 30977-00

前 言

本书在前一版普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育)的基础上,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修订编写而成。

“自动控制系统”是电气技术、工业电气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中的基本内容,自动控制系统的分析与校正,闭环直流调速系统,可逆直流调速系统,直流脉宽调速系统,位置随动系统,交流调速系统中的变频调速、矢量控制等新技术,同时结合工程实际,介绍了变频器的使用技术。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。

本书由李先允任主编,陈黎来、金晓华任副主编。第一章、第二章由陈黎来修订编写;第三章、第八章由金晓华修订编写;第四章、第七章由徐开芸修订编写;第六章由陈刚修订编写;其余各章由李先允修订编写,并负责全书的统稿和编写组织工作。

本书由东南大学郑建勇教授任主审。郑建勇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。汪木兰教授也对本书的编写提出了具体的修改意见,在此表示衷心的感谢!

本书在编写过程中,参考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

2010 年 9 月

目 录

第一章 自动控制原理概论 1

1.1 概述 1

1.1.1 引言 1

1.1.2 自动控制系统的结构 2

1.1.3 自动控制系统的分类 5

1.1.4 自动控制系统的的基本要求 6

1.1.5 自动控制系统的分析与设计 7

1.2 自动控制系统的数学模型与 传递函数 8

1.2.1 建立数学模型的方法 8

1.2.2 自动控制系统的微分方程 9

1.2.3 自动控制系统的传递函数 11

1.2.4 自动控制系统的动态结构图 12

1.3 自动控制系统的典型环节与 反馈控制 19

1.3.1 自动控制系统的典型环节 19

1.3.2 自动控制系统的反馈控制 23

习题 25

第二章 自动控制系统的分析与 校正 29

2.1 自动控制系统的时域分析 29

2.1.1 基本概念 29

2.1.2 一阶系统阶跃响应分析 32

2.1.3 二阶系统阶跃响应分析 33

2.2 自动控制系统的稳定性分析 39

2.2.1 自动控制系统的稳定性基本 概念 39

2.2.2 自动控制系统的稳定性判据 39

2.2.3 自动控制系统的稳态性能 分析 42

2.3 自动控制系统的频域分析 47

2.3.1 基本概念 47

2.3.2 自动控制系统的伯德图 49

2.3.3 自动控制系统的频域稳定性

基本概念 56

2.4 自动控制系统的频域校正 58

2.4.1 基本概念 58

2.4.2 自动控制系统的校正方法 59

习题 69

第三章 闭环直流调速系统 73

3.1 直流调速系统概论 73

3.1.1 调速指标与直流调速的基本 方法 73

3.1.2 直流调速系统的结构 81

3.1.3 直流调速系统的检测方法 83

3.1.4 晶闸管-电动机系统的开环 特性分析 85

3.2 直流调速系统中典型环节的 传递函数 87

3.2.1 晶闸管触发整流装置 87

3.2.2 直流电动机 89

3.2.3 比例、积分及比例-积分 调节器 90

3.2.4 测速发电机 94

3.3 单闭环调速系统分析 94

3.3.1 有静差转速负反馈调速系统 94

3.3.2 无静差转速负反馈调速系统 98

3.3.3 电流截止负反馈 99

3.4 转速、电流双闭环调速系统 分析 102

3.4.1 双闭环调速系统的组成及 工作原理 102

3.4.2 双闭环调速系统稳态分析 105

3.4.3 双闭环调速系统动态分析 105

习题 108

第四章 可逆直流调速系统 109

4.1 可逆直流调速系统的实现 方法 109

4.1.1 电枢反接可逆电路	109	6.1.1 位置随动系统的定义	144
4.1.2 励磁反接可逆电路	111	6.1.2 位置随动系统的组成	144
4.1.3 电枢反接可逆电路与励磁 反接可逆电路的比较	111	6.1.3 位置随动系统的分类	145
4.2 可逆直流调速系统的环流 分析	111	6.1.4 位置控制方法	147
4.2.1 环流的种类	111	6.2 位置随动系统检测元件	151
4.2.2 静态环流的分析	112	6.2.1 伺服电位器	152
4.3 有环流可逆直流调速系统	113	6.2.2 感应同步器	152
4.3.1 $\alpha=\beta$ 工作制有环流可逆直流 调速系统	113	6.2.3 光电编码器	154
4.3.2 可控环流的可逆调速系统	115	6.2.4 磁性编码器	157
4.4 无环流可逆直流调速系统	117	6.3 位置随动系统分析与设计	157
4.4.1 逻辑无环流可逆直流调速 系统	117	6.3.1 位置随动系统静态误差 分析	157
4.4.2 错位无环流可逆直流调速 系统	123	6.3.2 位置随动系统动态校正 设计	159
4.4.3 数字控制逻辑无环流可逆 调速系统	126	习题	162
习题	126	第七章 交流调速系统	163
第五章 直流脉宽调速系统	128	7.1 交流调速的基本原理	163
5.1 脉宽调制变换器	128	7.1.1 交流调速系统的特点	163
5.1.1 不可逆 PWM 变换器	128	7.1.2 交流调速系统的分类	163
5.1.2 可逆 PWM 变换器	131	7.2 交流调压调速系统	164
5.2 脉宽调速系统的开环机械 特性	135	7.2.1 交流调压调速系统的原理	164
5.3 脉宽调速系统的控制电路	136	7.2.2 交流调压调速的方法	165
5.3.1 脉宽调制器	136	7.3 串级调速系统	166
5.3.2 逻辑延时环节	140	7.3.1 串电阻调速的原理	166
5.3.3 基极驱动器	140	7.3.2 串级调速的原理	166
5.4 直流脉宽调速系统的特殊 问题	141	7.4 变频调速的基本原理	167
5.4.1 电流脉动量	141	7.4.1 基频以下调速及其机械 特性	168
5.4.2 转速脉动量	141	7.4.2 基频以上调速及其机械 特性	170
5.4.3 电力晶体管的开关损耗和 最佳开关频率	142	7.5 异步电动机矢量变换控制 系统	171
5.4.4 泵升电压限制电路	142	7.5.1 异步电动机矢量变换控制的 工作原理	171
习题	143	7.5.2 矢量变换运算规律及实现	176
第六章 位置随动系统	144	7.5.3 矢量变换控制中的异步电 动机数学模型	178
6.1 位置控制原理	144	7.5.4 异步电动机矢量变换控制 基本方程式	180
		7.5.5 异步电动机矢量变换控制 系统	181

习题	184	8.5 变频器与 PLC 及上位机的 连接	197
第八章 变频器应用技术	185	8.5.1 变频器的输入输出电路	197
8.1 变频器的分类及主要功能	185	8.5.2 使用时应注意的问题	201
8.1.1 变频器的分类	185	8.5.3 通过数据传输进行的控制	202
8.1.2 变频器的主要功能	190	8.5.4 接地和电源系统	202
8.2 变频器的选择	192	8.6 变频器的安装、调试及使用	203
8.2.1 变频器类型的选择	192	8.6.1 通用变频器的安装	203
8.2.2 控制方式的选择	193	8.6.2 变频器的接线	204
8.2.3 控制系统	193	8.6.3 通用变频器的调试	204
8.2.4 变频器容量的选择	193	8.6.4 通用变频器的使用方法	206
8.2.5 变频器外围设备的选择	194	习题	208
8.3 电动机容量的选择	196	参考文献	209
8.4 电缆的选择	196		

第一章 自动控制原理概论

本章首先介绍有关自动控制原理的一般概念、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。然后较详细地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。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,它们在推动社会进步和科学技术发展方面起到举足轻重的作用。

控制论的奠基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。以上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)控制系统的分析和设计问题,如图 1.1.1(a)所示。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际问题。这部分内容也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,如图 1.1.1(b)所示。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。

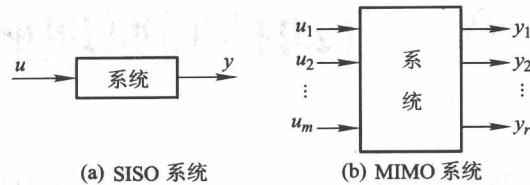


图 1.1.1 单输入-单输出系统与多输入-多输出系统

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 自动控制系统的结构

图 1.1.2 所示为自动控制系统的基本结构,下面结合此图介绍控制系统中的常用术语。

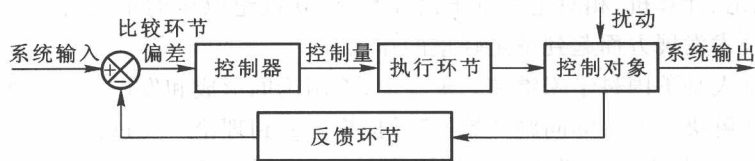


图 1.1.2 控制系统典型方框图

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、经济学系统等。

系统输出——是指被控制的量。表征对象状态和性能,也称系统响应。

控制量——是由控制器产生的量值或状态,它将施加于控制对象,从而影响系统输出,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的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等于或近似于零。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,在控制系统中可将其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 1.1.3(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 1.1.3(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 1.1.3(c)所示。

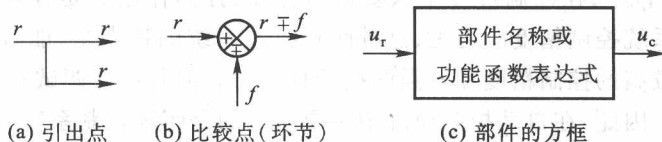


图 1.1.3 系统方框图的基本组成单元

至此,可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,见图 1.1.2。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,然后根据设计好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。

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,没有计算和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,这类信号路径传递不闭合的控制方式称为开环控制。开环控制系统的方框图如图 1.1.4 所示。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,被控制的系统输出即使偏离了期望的轨迹,系统也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。

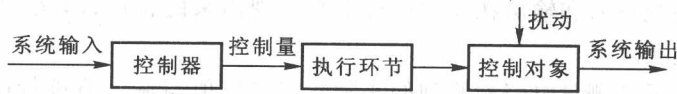


图 1.1.4 开环控制系统方框图

图 1.1.5 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 1.1.5 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,故称为闭环控制或反馈控制。典型的闭环控制系统方框图见图 1.1.2。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,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。

图 1.1.6 所示为采用转速负反馈的直流电动机闭环调速系统原理图。图中 U_g 为给定的系统输入, U_m 为测速发电机输出,对应于电动机的实际转速,其偏差为 $\Delta U = U_g - U_m$ 。它经放大器、触发器和晶闸管整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 1.1.7 所示。

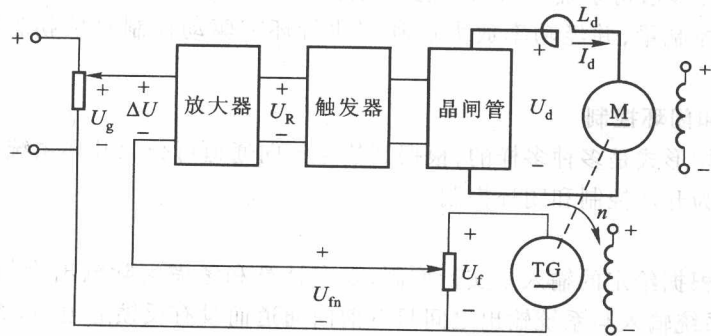


图 1.1.6 直流电动机闭环调速系统原理图

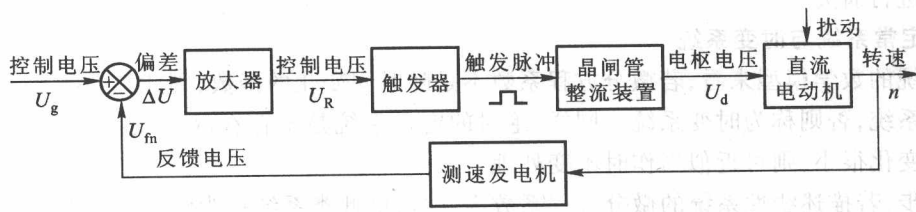
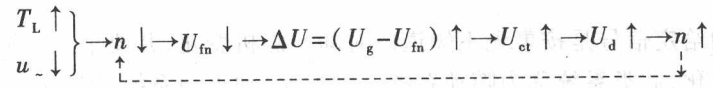


图 1.1.7 直流电动机闭环调速系统方框图

图 1.1.7 所示闭环控制系统中,输出转速 n 取决于给定控制电压 U_g 。但是对于电网电压波动,负载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_{fn} 减小,误差电压 ΔU 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。上述调节过程也可表示如下:



现假设去除图 1.1.6 中测速发电机元件,相当于断开图 1.1.7 中的反馈电路,则就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 $\Delta U = U_g$ 。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,其转速就会随之而变,无法再维持 U_g 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 $\Delta U = U_g - U_{fn}$ 。而正反馈系统 ($\Delta U = U_g + U_{fn}$) 不稳定,这里不予研究。

1.1.3 自动控制系统的分类

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,则此元件称为线性元件,否则是非线性元件。若一个系统中所有元件均为线性的,则此系统称为线性系统。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,则此系统称为非线性系统。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,则此类系统称为定常系统或时不变系统,否则称为时变系统。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,若描述线性系统的微分方程系数为常数,则此类系统称为线性定常系统。此类系统即为本书的研究重点。

三、连续系统与离散系统

从系统中的信号来看,若系统中各部分的信号都是时间的连续函数(即模拟量),则此类系统称为连续系统。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输入-单输出系统(SISO)和多输入-多输出系统(MIMO)等。

1.1.4 自动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 1.1.8 所示;否则称为不稳定,如图 1.1.9 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 1.1.10 所示。

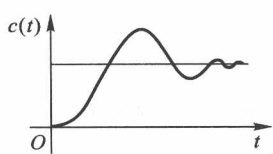


图 1.1.8 稳定系统的
动态过程

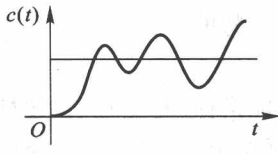


图 1.1.9 不稳定系统的
动态过程

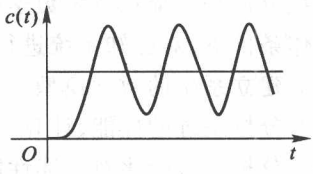


图 1.1.10 临界稳定系统的
动态过程

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 1.1.11 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。

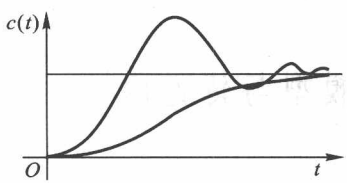


图 1.1.11 控制系统的快速性

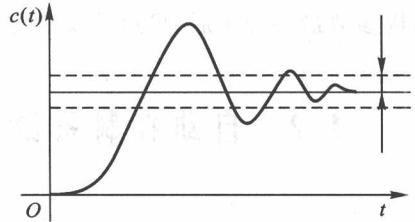


图 1.1.12 控制系统的稳定精度

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 1.1.12 所示。它反映了系统的稳定精度。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、准确性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 自动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(稳定性、快速性和准确性)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其数学模型,并画出系统结构图。
- (3) 按结构图与数学模型关系,根据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 自动控制系统的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分析和定量计算,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 自动控制系统的微分方程

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 $u_i(t)$,输出电压为 $u_o(t)$ 。试推导出其微分方程。

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

$$\begin{cases} i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} + u_o(t) = u_i(t) \\ i(t) = C \frac{du_o(t)}{dt} \end{cases}$$

消去中间变量 $i(t)$, 则得

$$LC \frac{d^2 u_o(t)}{dt^2} + RC \frac{du_o(t)}{dt} + u_o(t) = u_i(t) \quad (1.2.1)$$

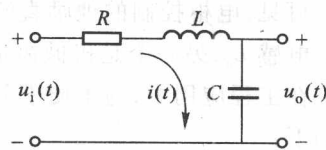


图 1.2.1 RLC 电路

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 $u_i(t)$ 作用下电容器 C 两端电压 $u_o(t)$ 的变化规律。

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系统的微分方程。系统输入为电枢电压 $u_a(t)$,系统输出为电动机角速度 ω 。

解 直流电动机是将电能转化成机械能的一种典型机电转换装置。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 $i_a(t)$,再由电枢电流与励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反电动势,其大小与励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

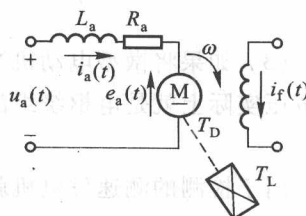


图 1.2.2 电枢控制他励直流电动机系统

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

若忽略电枢反应、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 $V \cdot s$ 。

$$\text{电动机电磁转矩} \quad T_D(t) = C_m i_a(t) \quad (1.2.4)$$

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

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

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 $T_D(t)$, 即可得到 $u_a(t)$ 、 $\omega(t)$ 及 $T_L(t)$ 之间关系的微分方程

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

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

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

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 。

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,使系统变得简单。常见形式如下:

(1) 对于普通电动机来讲,电枢绕组的电感 L_a 一般都较小,忽略后可将式(1.2.7)简化为一阶线性定常系统

$$T_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \frac{1}{C_e} u_a(t) - \frac{T_m}{J} T_L(t) \quad (1.2.8)$$

(2) 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(1.2.8)可进一步简化为

$$\omega(t) = \frac{1}{C_e} u_a(t) \quad (1.2.9)$$

(3) 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动势,即

$$u_a(t) = C_e \omega(t) \quad (1.2.10)$$

用于检测的测速发电机就属于这类情况。

(4) 在位置随动系统中,电动机输出一般取转角 $\theta(t)$, 由于 $\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$, 则代入式(1.2.8)

中得