



国家级实验教学示范中心系列规划教材
普通高等院校机械类“十三五”规划实验教材

机械工程测控技术 实验教程

JIXIE GONGCHENG CEKONG JISHU SHIYAN JIAOCHENG

主 编 蒙艳玫 陆冠成 唐治宏 董 振

非
外
借



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



国家级实验教学示范中心系列规划教材
普通高等院校机械类“十三五”规划实验教材

机械工程测控技术实验教程

JIXIE GONGCHENG CEKONG JISHU SHIYAN JIAOCHENG

主 编 蒙艳玫 陆冠成 唐治宏 董 振



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 提 要

本书是在总结多年实验教学经验的基础上,基于国家级实验教学示范中心和国家级虚拟仿真实验教学中心——广西大学机械工程实验教学中心的开放式实验教学体系架构编写而成的。本书系该中心教材建设中的系列教材之一。

本书主要包括机械工程控制基本理论、综合设计实验和网络化远程测控实验三部分内容。本书既适用于实验教学与理论教学同步进行的教学,也适用于实验课程单独开设的教学和开放性实验的指导,并通过网络化远程测控实验实现 24 小时完全开放教学。

本书设置多类综合实验,以帮助读者领悟与学会应用控制工程技术、测试技术和检测技术来解决实际工程问题,为实验教学面向工程实际应用奠定必要基础。

本书既可作为高等工科院校机械工程类、自动化类以及其他与测控相关专业的实验教材,特别是机械设计制造及其自动化和机械电子工程专业的实验教材,也可作为相关人员教学、科研及实验工作的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程测控技术实验教程/蒙艳玫等主编. —武汉:华中科技大学出版社,2018.9

普通高等院校机械类“十三五”规划实验教程

ISBN 978-7-5680-3721-1

I. ①机… II. ①蒙… III. ①机械工程-计算机控制系统-实验-高等学校-教材 IV. ①TP273-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 144826 号

机械工程测控技术实验教程

蒙艳玫 陆冠成 唐治宏 董 振 主编

Jixie Gongcheng Cekong Jishu Shiyao Jiaocheng

策划编辑:万亚军

责任编辑:吴 晗

封面设计:潘 群

责任校对:何 欢

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:武汉华工鑫宏印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:10.5 插页:2

字 数:279 千字

版 次:2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:28.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换

全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务

版权所有 侵权必究

国家级实验教学示范中心系列规划教材
普通高等院校机械类“十三五”规划实验教材

编委会

丛书主编 吴昌林 华中科技大学

丛书编委 (按姓氏拼音顺序排列)

邓宗全 哈尔滨工业大学

葛培琪 山东大学

何玉林 重庆大学

黄平 华南理工大学

孔建益 武汉科技大学

蒙艳玫 广西大学

芮执元 兰州理工大学

孙根正 西北工业大学

谭庆昌 吉林大学

唐任仲 浙江大学

王连弟 华中科技大学出版社

吴鹿鸣 西南交通大学

杨玉虎 天津大学

赵永生 燕山大学

朱如鹏 南京航空航天大学

竺志超 浙江理工大学

前言

实验是科学技术创新的重要手段,也是理论面向实际应用的重要途径,在现代科学活动中运用实验技术具有非常重要的意义。在技术发明和改进中,实验是检验新设想和新方法的重要手段,是理论转为实际应用的重要法宝,对科学技术发展具有非凡意义。

目前人类正以惊人的速度走出工业文明,步入信息时代和新型技术时代,迫切需要复合型和工程应用型人才。这种发展新趋势对人才提出了新要求,即不仅要具备学科理论知识,还应具备知识综合运用能力、创新实践能力和工程实践能力。实验教学是理论联系实际的重要环节,是培养学生动手能力、创新能力、综合分析问题能力、综合运用知识能力和解决实际问题能力的重要途径。在高等院校教学中,实验教学是一个必不可少的实践环节。培养学生掌握科学实验的基本方法和技能,不但是实验教学的基本目标,而且对培养具有创新精神和实践能力的高级人才具有重要意义。

机械工程控制实验、测试技术实验以及相关的检测技术实验是高等院校测控实验的核心实验内容的一部分,对培养学生的工程实践能力、科学实践能力、创新设计能力和动手能力起着重要作用。为了满足社会需求,培养学生从验证理论知识扩展到应用知识,从知识的基础运用到面向实际工程运用,从模仿设计上升到独立思考和创新设计,从单一设计拓宽到综合设计的能力,我们在总结多年实验教学经验的基础上,基于国家级实验教学示范中心和国家级虚拟仿真实验教学中心——广西大学机械工程实验教学中心的“虚实结合”实验教学体系架构,编写了本书。本书力求在完成机械工程控制基础和测试技术等课程实验的前提下,更多地结合工程实际应用,设置多类综合实验,以帮助读者领悟与学会应用控制工程技术、测试技术和检测技术来解决实际工程问题,为实验教学面向工程实际应用奠定必要基础。

本书是广西大学机械工程实验教学中心组织出版的系列实验教材之一,主要包括基本理论、综合实验和网络化远程测控实验。基本理论主要包括机械工程控制基础、机械工程测试技术基础等。综合设计实验主要包括控制系统校正设计与仿真实验、调速控制系统设计与仿真实验、机械振动系统固有频率的测量实验等内容。网络化远程测控实验主要包括基于 LabVIEW 的网络远程测控实验和“虚实结合”网络远程测控实验。本书既可作为高等工科院校机械工程类、自动化类以及其他与测控相关专业的实验教材,特别是机械设计制造及其自动化和机械电子工程专业的实验

教材,也可作为相关人员教学、科研及实验工作的参考书。

在本书的编写过程中,编者参阅了以往其他版本同类教材、资料及文献,并得到了同行多位专家的支持和帮助,在此衷心致谢。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和错误,诚请读者批评指正,以求改进。

编 者

2015 年 6 月

主要符号说明

$L[\]$	Laplace 变换	ω_n	无阻尼固有频率
$F[\]$	Fourier 变换	ω_d	有阻尼固有频率
$x_i(t)$	输入(激励)	ω_T	转角频率
$x_o(t)$	输出(响应)	ω_g	相位相交频率
$X_i(s)$	$L[x_i(t)]$	ω_c	增益交接频率或剪切频率
$X_o(s)$	$L[x_o(t)]$	ω_b	截止频率
$X_i(j\omega)$	$F[x_i(t)]$	ω_r	谐振频率
$X_o(j\omega)$	$F[x_o(t)]$	ξ	阻尼比
$\delta(t)$	单位脉冲函数	M_r	相对谐振峰值
$u(t)$	单位阶跃函数	M_p	超调量
$r(t)$	单位斜坡函数	K_g	增益裕度
$w(t)$	单位脉冲响应函数	γ	相位裕度
$G(s)$	传递函数或者前向通道传递函数	$\epsilon(t)$	偏差
$H(s)$	反馈回路传递函数	$E(s)$	$L[\epsilon(t)]$
$G(j\omega)$	频率特性	$e(t)$	误差
$H(j\omega)$	反馈回路频率特性	$E_1(s)$	$L[e(t)]$
$B(s)$	闭环系统反馈信号	u	一般表示电压
$G_K(s)$	系统的开环传递函数	i	一般表示电流
$G_B(s)$	系统的闭环传递函数	j	虚数单位, $j^2 = -1$
$G_K(j\omega)$	系统的开环频率特性	f_s	采样频率
$G_B(j\omega)$	系统的闭环频率特性	$x^*(t)$	$x(t)$ 采样后的时间序列
$n(t)$	干扰信号	R	电阻
$N(s)$	$L[n(t)]$	C	电容
n	单独使用时一般表示转速	L	电感
ω	角速度	K	增益或放大系数
T	时间常数或者时间	m	质量
τ	延迟时间或者时间	g	重力加速度
$\dot{x}$	x 的一阶导数	F	力
$\ddot{x}$	x 的二阶导数	J	扭矩或者惯性矩

目 录

第一章 基本理论	(1)
第一节 机械工程控制基础	(1)
1.1.1 控制工程概述	(1)
1.1.2 控制系统基本原理	(2)
1.1.3 系统的数学模型	(5)
1.1.4 控制系统的时域分析	(7)
1.1.5 控制系统的频域分析	(8)
1.1.6 控制系统的稳定性	(8)
1.1.7 自控系统的校正	(10)
第二节 机械工程测试技术基础	(11)
1.2.1 测试工程概述	(11)
1.2.2 信号描述及处理初步	(11)
1.2.3 测试系统基本原理	(19)
第二章 综合设计实验	(23)
实验一 控制系统校正设计与仿真	(23)
实验二 调速控制系统设计与仿真	(24)
实验三 PID 控制器的设计与仿真	(25)
实验四 汽车操控系统的 PID 控制设计与仿真	(26)
实验五 机械振动系统固有频率的测量	(29)
实验六 运动小车测控系统设计与仿真	(32)
实验七 快速傅里叶频谱分析实验	(33)
实验八 系统状态空间设计	(37)
实验九 磁悬浮系统 PID 控制设计	(40)
实验十 龙门吊车控制系统设计	(44)
实验十一 基于 Modbus 协议设计测控系统	(46)
实验十二 振动时效消除工件残余应力控制系统设计	(48)
实验十三 双容水箱液位控制系统设计与仿真	(50)
实验十四 液位动平衡控制系统设计	(52)
实验十五 简支梁固有频率测量	(54)
实验十六 主动隔振设计	(56)
实验十七 被动隔振设计	(58)
实验十八 温度采集系统设计	(61)
实验十九 转速测量系统设计	(64)
实验二十 转子动平衡系统设计	(66)
实验二十一 电子称重设计	(68)

实验二十二	无损检测设计	(71)
实验二十三	粮库粮情测控系统设计	(74)
实验二十四	基于数据融合方法设计测控系统	(77)
实验二十五	基于数据融合方法设计测控系统	(81)
实验二十六	基于 CCD 成像技术设计微粒检测方法	(82)
实验二十七	基于 Modbus 协议远程控制设备	(84)
实验二十八	基于信号编解码方法设计测控系统	(85)
实验二十九	基于组态软件的校园建筑能耗监测系统设计	(86)
实验三十	基于组态软件的热交换器性能测试综合实验平台设计	(90)
第三章	网络化远程测控实验	(92)
第一节	基于 LabVIEW 的网络远程测控实验	(92)
实验一	信号发生与分析实验	(92)
实验二	信号采集与分析实验	(97)
实验三	信号频谱分析实验	(104)
实验四	信号滤波实验	(107)
实验五	信号调制解调实验	(114)
实验六	信号相关分析实验	(120)
实验七	信号时域响应分析实验	(125)
实验八	信号频域响应分析实验	(128)
实验九	串口数据采集实验	(130)
实验十	声卡数据采集实验	(133)
实验十一	光照度检测实验	(137)
实验十二	多通道虚拟示波器设计实验	(140)
实验十三	虚拟频谱分析仪设计实验	(143)
第二节	“虚实结合”网络远程测控实验	(147)
实验十四	网络化远程振动分析实验	(147)
实验十五	网络远程噪声测试实验	(152)
实验十六	网络化远程车辆行驶仿真监控实验	(156)
附录		(160)
参考文献		(161)

第一节 机械控制基础

1.1.1 控制工程概述

在科学技术迅猛发展的当代社会,控制论作为一门系统理论,已越来越为人们所重视。由控制论所阐明的各种控制作用和方法,不但对科学技术的发展产生了显著的影响,而且也为规划社会经济活动和其他领域的发展提供了一种先进的科学研究手段。可以预料,随着社会的发展和科学文明的进步,控制论作为一门新兴的学科,必将发挥其日益重要的作用。

控制论与工程技术的结合,便产生了“工程控制论”;而控制论与机械工程的结合,则产生了“机械控制工程”这门新的学科。由于当前机械制造技术正朝着高度自动化方向发展,各种先进的自动控制加工系统不断涌现,过去那种只侧重于局部和静态的机械研究方法已经不再适用于当下的发展情况。事实上,即使是对过去那种普通的机械加工过程,也不能孤立地只去研究速度和频率的选择。因为在整个加工过程中,实际上存在着一种动力的传递过程,也就是说,这实际上是一个动力系统在工作。从这一点出发,我们可以把机械制造技术归纳到动态系统的范围内来加以研究。“机械控制工程”这门学科正是抓住问题的本质,将机械加工过程各个环节的组合看作是一个系统,因而就可以从控制论的角度来研究和解决加工中所出现的各种技术问题。

控制理论发展初期,众多杰出的学者做出了重大贡献。1788年英国科学家詹姆斯·瓦特(James Watt)为控制蒸汽机速度而设计的离心调解器,可以誉为自动控制领域的第一项重大成果。为了克服当时调解器的震荡现象,麦克斯韦(James Clerk Maxwell)于1868年开始对微分方程系统稳定性进行分析,后来又有劳斯(E. J. Routh)和霍尔维茨(A. Hurwitz)分别于1874年和1895年对稳定性的研究成果。1892年,李雅普诺夫对调解鲁伦做出了重大贡献,提出了几个重要的稳定性判断。1922年麦纳斯基(Minorsky)研制出船舶操纵自动控制器,验证了从描述系统的微分方程到确定系统稳定性的方法。1932年奈奎斯特(Nyquist)提出了一种可以根据稳态正弦输入的开环响应确定闭环系统稳定性的简便方法。1934年,海森(H. L. Hazen)提出了用于位置控制系统的伺服机构概念。

为了设计出满足性能指标要求的线性闭环控制系统,20世纪40年代发展了系统的频

域分析方法,它是在奈奎斯特、伯德(H. W. Bode)等早期的关于频域研究工作的基础之上建立起来的。1942年,哈里斯(Harris)提出传递函数的概念并首次将频域分析方法应用到了控制领域,构成了控制系统频域法理论研究的基础。20世纪40年代末到50年代初,伊万思(W. R. Evans)提出并完善了线性反馈系统的根轨迹分析技术,成为另一个里程碑。

频域分析法和根轨迹法是经典控制理论的核心。采用这两种方法能设计出稳定的并满足一定性能指标要求的系统。但是,通过这两种方法设计出的系统还不是最优秀的。因此,从20世纪50年代开始,控制系统设计问题的重点转移到最优系统的设计上。原苏联学者庞特里亚金(Pontryagin)于1956年提出的极大值原理,贝尔曼(R. Richard Bellman)于1957年提出的动态规划和卡尔曼(Rudolf Emil Kalman)于1960年提出的状态空间分析技术开创了控制理论研究的新篇章,他们的理论当时被统称为“现代控制理论”。从那个时期以后,控制理论研究中出现了线性二次最优调节器(Kalman,1959)、最优状态观测器(Kalman,1960)以及线性二次型高斯问题的研究(Linear Quadric and LQG)。

从1960到1980年这段时间,人们对确定系统和随机系统的最优控制,复杂系统的自适应控制和学习控制进行了充分的研究。大约从1960年起,电子计算机开始应用于控制系统的研究和设计。

从1980年到现在,现代控制理论的研究主要集中于鲁棒控制(Robust control)、 H_∞ 控制以及相关的课题,其中鲁棒控制是控制系统设计中一个令人瞩目的研究领域。1981年,美国学者查莫斯(Chalmers)提出了基于哈代(Hardy)空间范数最小化方法的鲁棒最优控制理论。1992年多伊尔(Doyle)等人提出了最优控制的状态空间数值法,为该领域的发展做出了重要的贡献。目前,自动控制理论正向以控制论、信息论和人工智能为基础的智能控制理论方向发展;同时,由于大规模信息网络管理控制的需要,自动控制理论也向大系统控制理论方向前进。

1.1.2 控制系统基本原理

1. 控制系统基本概念

控制论是在研究系统工作原理的基础上建立起来的。而系统工作原理的中心问题,则是系统中的控制问题。所谓“控制”,又有主动干预、管理和操纵之意,具体来说,就是指人或能代替人的机械使被控对象按照给定的条件来动作。工程上一般把上述的“人或能代替人的机械”称为控制装置。

所谓被控对象,广义地可指生物体、经济或社会的某些部门,在工程上则一般是指工作状态(或者生产过程)需要给予控制的生产机械或技术装置;而表征被控对象工作状态的参量(物理量或化学量)则称为被控量。由控制装置与被控对象所组成的总体就称为控制系统。被控对象可以是很复杂、很庞大的生产机械或科技设施,如轧钢机、电冶炉、发电机组、化工反应塔、船闸、舰艇、飞机、火炮群、雷达、天文望远镜、机床;也可以是很小的机构,如记录笔、电位器、摄像机磁头等。被控量可以是对被控对象的转速、角位移、进给量、温度、电压、频率、功率,也可以是流量、压强、pH值等。

控制装置也常称为控制器或自动调节器,它一般具有信号的测量、变换、运算、放大和执行等功能。但对于一个具体的系统来说,承担某一功能可能需要一个部件或较为复杂的装置,也可以是一个简单的元件或部件就能具备几种功能。

我们以简单的水箱液位控制系统为例,来阐述控制系统的一般概念。在人们的生活中经常见到水箱这种装置。传统的水箱示意图如图 1-1-1 所示,水箱由进水阀、出水阀、浮子和杠杆等组成,是一个恒定水位输出的自动控制装置。通过调整杠杆和浮子之间的位置关系,就可以调整水箱的水位。

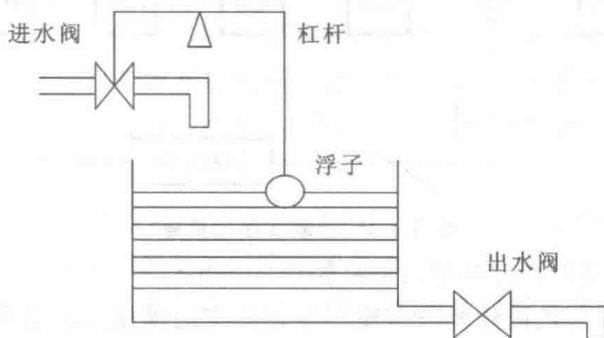


图 1-1-1 水箱液位控制系统

当打开出水阀放出水箱中的水并关闭出水阀后,浮子的位置将下降,通过杠杆的传递,进水阀将被开启;开启进水阀后,通过进水管向水箱注水;随着水位的升高,浮子在浮力的作用下不断升高,当水位达到设定的水位高度时,浮子将达到设定的高度,通过杠杆的传递作用,进水阀被关闭。这时,水箱中就注入了设定水位高度的水。

如图 1-1-1 所示的水箱液位控制系统是由以下四个部分所组成:

被控对象——水箱液位;

测量元件——浮子;

比较机构——求水箱期望水位和实际位置之差;

执行元件——直接驱动被控对象,以改变被控制量。这个部分也是一般自动控制系统的基本单元。此外,当检测信号与给定信号比较后得到的误差信号不足以使执行元件动作时,一般都需要加放大元件,以提高系统的控制精度。为了改善控制系统的动、静态性能,通常还在系统中加上了某种形式的校正装置。

为了使控制系统的表示既简单又明了,在控制工程中一般采用方框表示系统中的各个组成部件,在每个方框中填入它所表示的部件名称或其功能函数的表达式,不必画出它们的具体结构。根据信号在系统中的传递方向,用有向线段依次把它们连接起来,就得到整个系统的框图。控制系统的框图由以下三个基本单元所组成。

引出点:见图 1-1-2(a),表示信号的引出,箭头表示信号的传递方向。

比较点:见图 1-1-2(b),表示两个或两个以上的信号在该处进行减或加的运算,减号表示信号相减,加号表示信号相加。

部件的方框:如图 1-1-2(c)所示,输入信号置于方框的左端,方框的右端为其输出量,方框中填入部件的名称。

据上所述,控制系统的组成一般可用图 1-1-3 所示的框图来表示。

参照图 1-1-3,将控系统中常用术语介绍如下。

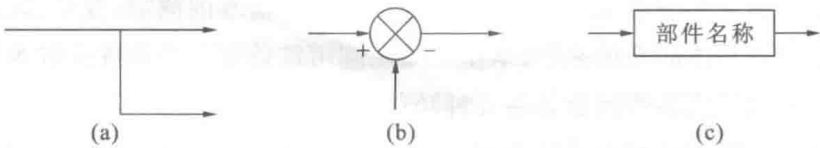


图 1-1-2 方框图符号

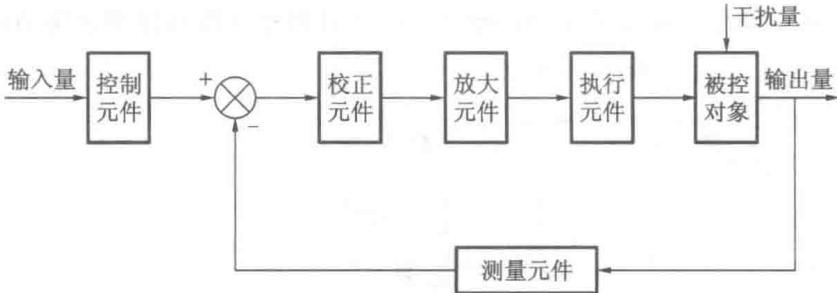


图 1-1-3 控制系统的组成

输出量(即被控量,又称被控参量):最终控制的目标值。

给定量(又称控制量):依设计要求与输出量相适应的预先给定信号。

干扰量(又称扰动量):引起输出量变化的各种外部条件(如电源电压的波动或负载的变化等)和内部条件(如系统中某些元件的变化等)。应当指出,干扰量属于一种偶然的无法人为控制的随机输入信号。

输入量:控制量与干扰量的统称,但在一般情况下多指控制量。

反馈量:由输出端引回到输入端的信号。

偏差量:控制量与反馈量之差值。

误差量:实际输出量与希望输出量之差值。

2. 控制系统基本控制方式

自动控制系统有两种最基本的控制方式,即开环控制和闭环控制。复合控制是将开环控制和闭环控制适当结合的控制方式,可用来实现复杂且控制精度较高的控制任务。

所谓开环系统,就是输出端与输入端之间没有反馈通道的系统。其一般形式如图 1-1-4 所示。



图 1-1-4 开环系统

由图 1-1-4 可以看出,开环系统的输出量对系统的控制作用是没有影响的。因此,一旦输出量确定后,系统的工作状态(如速度、位移等)亦即随之确定。当然,假如系统受到干扰的影响,输出量就会偏离规定值而产生误差,使控制目标难以实现。所以,在一些生产工艺要求较高的控制系统中不宜采用开环控制。但开环控制系统结构比较简单,成本低,故在很多场合下还是得到广泛的应用。如家庭洗衣机和交通管理系统的控制。

闭环系统,就是输出端与输入端之间有反馈通道的系统。如图 1-1-3 所示的框图就是闭环系统。其一般形式也可用图 1-1-5 表示。

由于闭环系统有反馈,所以其输出量对系统的控制作用有着直接的影响。在这种系统中,输入量与反馈量比较后所产生的偏差,就是系统的控制信号。因此,输出量的变化将会直接影



图 1-1-5 闭环系统

响到系统的工作状态。然而,正是由于这一点,使闭环系统具有自动“纠缠”的作用,即当系统受到干扰影响而产生误差时,闭环系统能使这种误差减小到最低程度;当然,也正是由于闭环系统有反馈,所以若系统中的元件有惯性或者参数匹配不当,则系统容易产生振荡或不稳定。因此,在设计闭环系统时,要着重考虑其稳定性问题。总的来说,由于闭环系统具有“抑制干扰,减小误差”的作用,故其工作精度较高。目前在工程上使用的控制系统,大多属于闭环系统。

3. 控制系统基本要求

(1) 稳定性。受扰动作用前系统处于平衡状态,受扰动作用后系统偏离了原来的平衡状态,如果扰动消失以后系统能够回到受扰以前的平衡状态,则称系统是稳定的。如果扰动消失后,系统不能够回到受扰以前的平衡状态,甚至随时间的推移对原来平衡状态的偏离越来越大,这样的系统就是不稳定的系统。稳定是系统正常工作的前提,不稳定的系统是无法应用的。

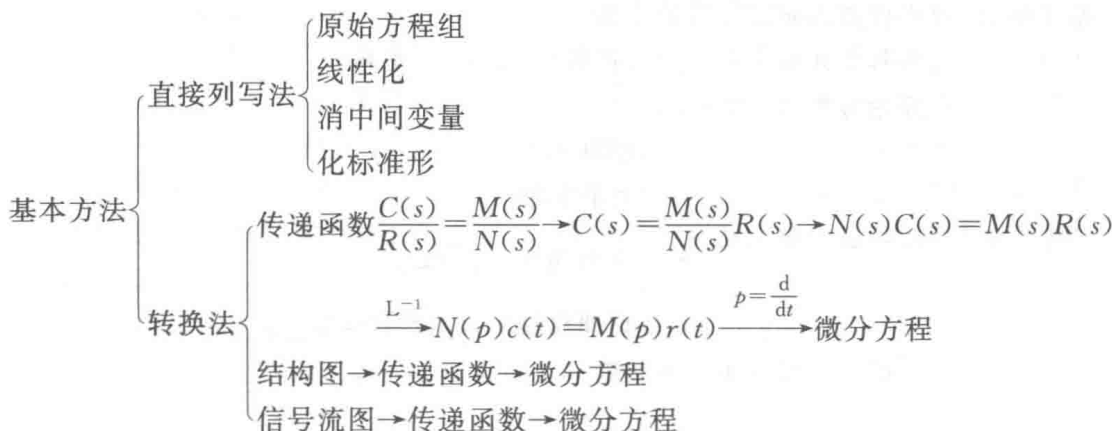
(2) 准确性。它是对稳定系统稳态性能的要求。稳态性能用稳态误差来表示,所谓稳态误差,是指系统达到稳态时被控量的实际值和希望值之间的误差,误差越小,表示系统控制精度越高。一个暂态性能好的系统既要过渡过程时间短(快速性),又要过渡过程平稳、振荡幅度小(平稳性)。

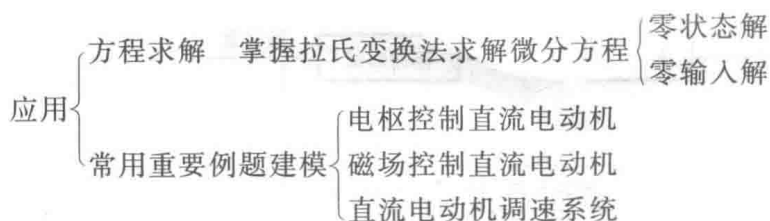
(3) 快速性。这是对稳定系统暂态性能的要求。因为控制系统总是存在惯性,致使系统在扰动给定量发生变化时,被控量不能突变,要有一个过渡过程,即暂态过程。这个暂态过程的过渡时间可能很短,也可能经过一个漫长的过渡达到稳态值,或经过一个振荡过程达到稳态值,这反映了系统的暂态性能。

1.1.3 系统的数学模型

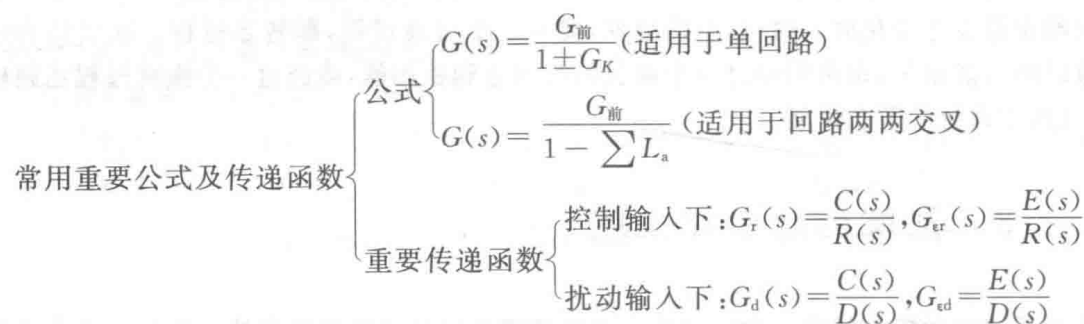
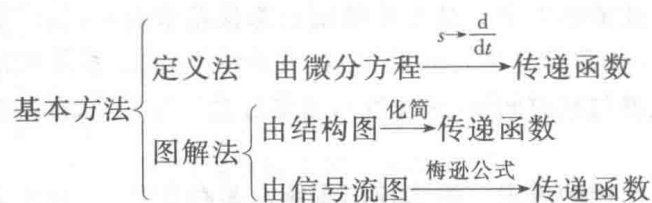
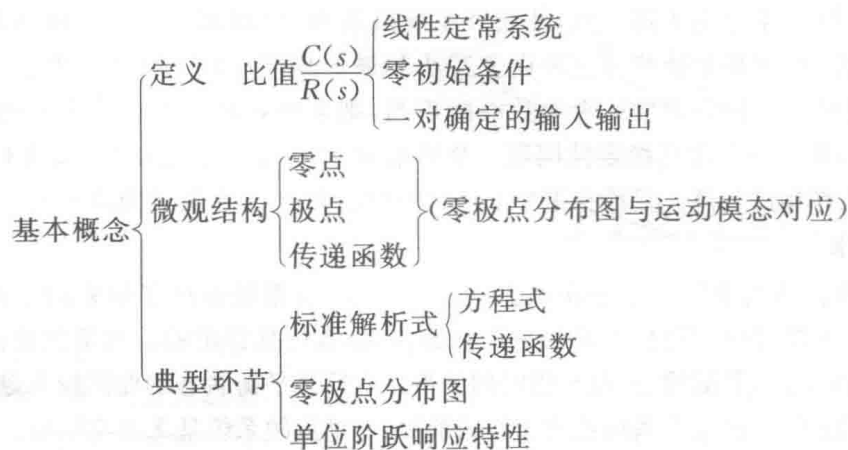
控制系统数学模型的建立方法主要有理论建模和实验建模两种方法。作为线性系统数学模型的理论建模形式,常用的有解析法和图解法。

1. 微分方程式

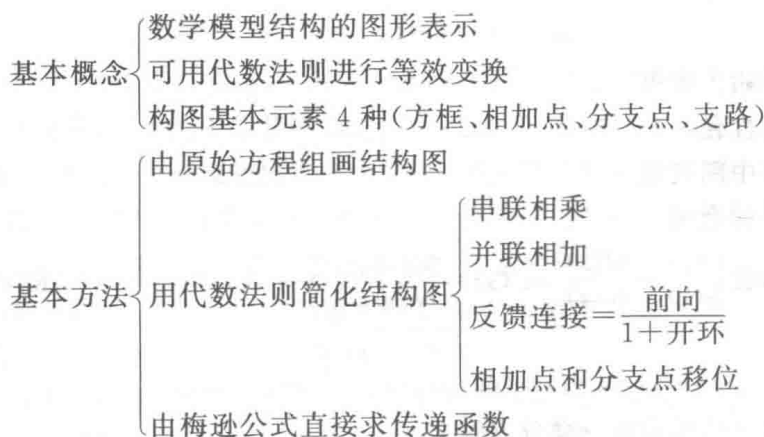




2. 传递函数



3. 结构图



注意:

(1) 相加点与分支点相邻,一般不能随便交换。

(2) 等效原则 $\begin{cases} \text{前向通路的传递函数乘积保持不变} \\ \text{各回路中传递函数乘积保持不变} \end{cases}$

(3) 结构图可同时表示多个输入与输出的关系,并可以由图直接写出任意多个输入下的总响应。如:运用叠加原理,当给定输入和扰动输入同时作用时,则有 $C(s)=G_r(s)R(s)+G_d(s)D(s)$ 。

(4) 四种模型之间的转换关系可用图 1-1-6 表示:

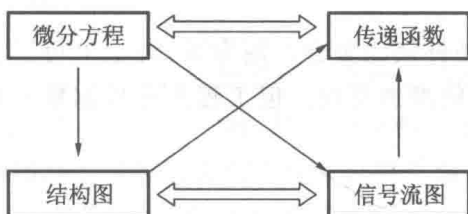


图 1-1-6 模型转换

1.1.4 控制系统的时域分析

时域分析法是通过直接求解系统在典型输入信号作用下的时间响应,来分析控制系统的稳定性和控制系统的动态性能及稳态性能的方法。工程上常用单位阶跃响应的超调量、调节时间和稳态误差等性能指标评价系统的优劣。许多自动控制系统经过参数整定和调试,其动态特征往往近似于一阶或二阶系统。因此一、二阶系统的理论分析结果,常是高阶系统分析的基础。

时域分析法的基本方法是拉氏变换法:

$$\text{结构图} \rightarrow \Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} \rightarrow C(s) = \Phi(s)R(s) \rightarrow c(t) = L^{-1}[C(s)]$$

1. 时域分析

1) 一阶系统的时域分析

一阶系统的动态特性用一阶微分方程描述。一阶系统只有一个结构参数,即其时间常数 T 。时间常数 T 反映了一阶系统的惯性大小或阻尼程度。一阶系统的性能由其时间常数 T 唯一决定,而一阶系统的时间常数 T 可由实验曲线求出。

2) 二阶系统的时域分析

二阶系统的性能分析在自动控制理论中有着重要的地位。二阶系统含有两个结构参数,即阻尼比 ξ 和无阻尼振荡频率 ω_n 。阻尼比 ξ 决定着二阶系统的响应模态。当 $\xi = 0$ 时,系统的响应为无阻尼响应;当 $\xi = 1$ 时,系统的响应称为临界阻尼响应;当 $\xi > 1$ 时,系统的响应为过阻尼响应;当 $0 < \xi < 1$ 时,系统的响应为欠阻尼响应。欠阻尼工作状态下,合理选择阻尼比 ξ 的值,可使系统具有令人满意的动态性能指标。其动态性能指标有 M_p 、 t_r 、 t_p 、 t_s ,这些指标一方面可以从响应曲线上读取,另一方面只要已知 ξ 、 ω_n ,就可以根据 M_p 、 t_r 、 t_p 、 t_s 与 ξ 、 ω_n 相应的关系求出。

2. 稳态误差

稳态误差是系统很重要的性能指标,它标志着系统最终可能达到的控制精度。稳态误差定义为稳定系统误差信号的终值。稳态误差既和系统的结构及参数有关,也取决于外作用的形式及大小。

稳态误差可应用拉氏变换的终值定理计算,步骤如下:①判别系统的稳定性。只有对稳定的系统计算其稳态误差才有意义。②根据误差的定义求出系统误差的传递函数。③分别求出系统对给定和对扰动的误差函数。④用拉氏变换的终值定理计算系统的稳态误差。要注意,终值定理的使用条件为误差的相函数在右半 s 平面及虚轴上(原点除外)。系统稳定是满足终值定理使用的前提条件。如果误差函数在右半 s 平面及虚轴上不解析,只能应用定义计算稳态误差。

对三种典型函数(阶跃、斜波、抛物线)及其组合外作用,也可利用静态误差系数和系统的型数计算稳态误差。

采用具有对给定或对扰动补偿的复合控制方案,理论上可以完全消除系统对给定或扰动量的误差,实现输出对给定量的准确复现。但工程上常根据输入信号的形式实现给定无稳态误差的近似补偿。

1.1.5 控制系统的频域分析

(1) 频率特性是线性系统(或部件)在正弦函数输入下,稳态输出与输入之比与频率的关系,概括起来即为同频、变幅、相移。它能反映动态过程的性能,故可视为动态数学模型。

频率特性是传递函数的一种特殊形式。将系统传递函数中的 s 换成纯虚数 $j\omega$ 就得到该系统的频率特性。

频率特性可以通过实验方法确定,这在难以写出系统数学模型时更为有用。

(2) 开环频率特性可以写成因式形式的乘积,这些因式就是典型环节的频率特性,所以典型环节是系统开环频率特性的基础。典型环节包括:比例环节、积分环节、微分环节、惯性环节、一阶微分环节、振荡环节、二阶微分环节和延迟环节。

(3) 开环频率特性的几何表示方法:开环极坐标图和开环伯德图。

①开环极坐标图的绘制。由开环极点-零点分布图,正确地确定出起点、终点以及与坐标轴的交点,即可绘制出开环极坐标草图。

②开环伯德图的绘制。先把开环传递函数化为标准形式,求每一典型环节所对应的转折频率,并标在 ω 轴上;然后确定低频段的斜率和位置;最后由低频段向高频段延伸,每经过一个转折频率,斜率作相应的改变。这样很容易地绘制出开环对数幅频特性渐近线曲线,若需要精确曲线,只需在此基础上加以修正即可。

对于对数相频特性曲线只要能写出其关系表达式,确定出 $\omega=0$ 、 $\omega=\infty$ 时的相角,再在频率段内适当地求出一些频率所对应的相角,连成光滑曲线即可。

1.1.6 控制系统的稳定性

1. 稳定性的概念

稳定性是系统在一定的干扰作用下,偏离了稳定的平衡状态,在干扰消除后,能以足够的精度逐渐恢复到原来的状态的能力。它是系统固有的特性,与初始条件及输入无关。

2. 稳定的充分必要条件

线性系统稳定的充分必要条件是:系统的所有闭环特征根都具有负的实部,或闭环特征根