



教育部“专业综合改革试点”项目资助

中国机械工程学科教程配套系列教材
教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会推荐教材

机械控制工程基础

李郝林 主编

中国机械工程学科教程
China Mechanical Engineering Curricula
中国机械工程学科教程

清华大学出版社

清华大学出版社

内 容 简 介

机械控制工程是利用控制论的理论与方法解决机械工程实际问题的一门技术学科,本书所论述内容主要涉及机械控制工程的基本理论与方法。学习内容主要包括:绪论、系统的数学模型及传递函数、控制系统的时域分析、控制系统的频率特性分析、系统的稳定性、控制系统的综合与校正。

本书可以用作机械工程类专业本科生和大专生的教材,也可供相关人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

机械控制工程基础/李郝林主编.--北京:清华大学出版社,2014

中国机械工程学科教程配套系列教材暨教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会推荐教材

ISBN 978-7-302-36481-8

I. ①机… II. ①李… III. ①机械工程—控制系统—高等学校—教材 IV. ①TH—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 099312 号

主 编 李 郝 林

责任编辑:庄红权

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市李旗庄少明印装厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:11.25 字 数:269千字

版 次:2014年7月第1版 印 次:2014年7月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:26.00元

产品编号:052319-01

中国机械工程学科教程配套系列教材暨教育部高等学校
机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会推荐教材

编 委 会

顾 问
李培根院士

主任委员
陈关龙 吴昌林

副主任委员
许明恒 于晓红 李郝林 李旦 郭钟宁

编 委(按姓氏首字母排列)
韩建海 李理光 李尚平 潘柏松 芮执元
许映秋 袁军堂 张慧 张有忱 左健民

秘 书
庄红权

丛书序

PREFACE

我曾提出过高等工程教育边界再设计的想法,这个想法源于社会的反应。常听到工业界人士提出这样的话题:大学能否为他们进行人才的订单式培养。这种要求看似简单、直白,却反映了当前学校人才培养工作的一种尴尬:大学培养的人才还不是很适应企业的需求,或者说毕业生的知识结构还难以很快适应企业的工作。

当今世界,科技发展日新月异,业界需求千变万化。为了适应工业界和人才市场的这种需求,也即是适应科技发展的需求,工程教学应该适时地进行某些调整或变化。一个专业的知识体系、一门课程的教学内容都需要不断变化,此乃客观规律。我所主张的边界再设计即是这种调整或变化的体现。边界再设计的内涵之一即是课程体系及课程内容边界的再设计。

技术的快速进步,使得企业的工作内容有了很大变化。如从20世纪90年代以来,信息技术相继成为很多企业进一步发展的瓶颈,因此不少企业纷纷把信息化作为一项具有战略意义的工作。但是业界人士很快发现,在毕业生中很难找到这样的专门人才。计算机专业的学生并不熟悉企业信息化的内容、流程等,管理专业的学生不熟悉信息技术,工程专业的学生可能既不熟悉管理,也不熟悉信息技术。我们不难发现,制造业信息化其实就处在某些专业的边缘地带。那么对那些专业而言,其课程体系的边界是否要变?某些课程内容的边界是否有可能变?目前不少课程的内容不仅未跟上科学研究的发展,也未跟上技术的实际应用。极端情况甚至存在有些地方个别课程还在讲授已多年弃之不用的技术。若课程内容滞后于新技术的实际应用好多年,则是高等工程教育的落后甚至是悲哀。

课程体系的边界在哪里?某一门课程内容的边界又在哪里?这些实际上是业界或人才市场对高等工程教育提出的我们必须面对的问题。因此可以说,真正驱动工程教育边界再设计的是业界或人才市场,当然更重要的是大学如何主动响应业界的驱动。

当然,教育理想和社会需求是有矛盾的,对通才和专才的需求是有矛盾的。高等学校既不能丧失教育理想、丧失自己应有的价值观,又不能无视社会需求。明智的学校或教师都应该而且能够通过合适的边界再设计找到适合自己的平衡点。

我认为,长期以来,我们的高等教育其实是“以教师为中心”的。几乎所有的教育活动都是由教师设计或制定的。然而,更好的教育应该是“以学生

为中心”的,即充分挖掘、启发学生的潜能。尽管教材的编写完全是由教师完成的,但是真正好的教材需要教师在编写时常怀“以学生为中心”的教育理念。如此,方得以产生真正的“精品教材”。

教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会、中国机械工程学会与清华大学出版社合作编写、出版了《中国机械工程学科教程》,规划机械专业乃至相关课程的内容。但是“教程”绝不应该成为教师们编写教材的束缚。从适应科技和教育发展的需求而言,这项工作应该不是一时的,而是长期的,不是静止的,而是动态的。《中国机械工程学科教程》只是提供一个平台。我很高兴地看到,已经有多位教授努力地进行了探索,推出了新的、有创新思维的教材。希望有志于此的人们更多地利用这个平台,持续、有效地展开专业的、课程的边界再设计,使得我们的教学内容总能跟上技术的发展,使得我们培养的人才更能为社会所认可,为业界所欢迎。

是以有序。是月以的业业半业普道,求需业业企业否研是下五千人的人业业半大,业业

2009年7月

前 言

FOREWORD

机械控制工程是利用控制论的理论与方法解决机械工程实际问题的一门技术学科。《机械工程控制基础》作为机械类专业的一门专业理论基础课,主要涉及机械控制工程的基本理论与方法。为满足工程型人才培养的需要,结合卓越工程师培养的理念,本书除了介绍机械控制工程的基础理论外,还将重点介绍这些理论方法在工程实际中的应用方法。本书将通过大量的工程实例,说明机械控制理论在工程实际中的应用情况,例如校正控制在电机控制性能改善方面的应用等,所有实例都来源于工程实例。另外,为了使掌握控制理论的应用技能,教材还将补充有关控制对象建模方法以及控制对象性能测试方法的内容。通过这些内容介绍,让学生系统地了解机械控制理论的应用方法。

本书在编写中力求保持内容的完整性和系统性。第1章绪论,主要概要介绍机械工程控制论;第2章系统的数学模型及传递函数,主要介绍适用于单输入单输出线性定常系统动态特性描述的传递函数的概念以及数学模型的建立方法;第3章控制系统的时域分析,主要介绍如何利用所描述系统的微分方程式或传递函数,分析系统的输出量随时间的变化规律,并由此来确定系统的性能;第4章控制系统的频率特性分析,主要介绍频率特性的概念,重点讲述典型环节的频率特性及系统频率特性的极坐标图和对数坐标图的绘制,以及如何利用频率特性分析闭环系统性能;第5章系统的稳定性,主要介绍判定系统是否稳定的方法以及评价系统稳定程度的指标;第6章控制系统的综合与校正,主要介绍系统的综合与校正所要解决的问题对象,以及在预先规定了系统的各项性能指标情况下,如何选择适当的环节和参数使系统满足这些性能指标要求。本书适于机械工程类专业的本科生使用。

本书由上海理工大学李郝林主编并统稿。其中第1章、第2章以及第3章由李郝林编写;第4章由姜晨编写;第5章由陈光胜编写;第6章由林献坤编写。

由于编者水平所限,书中可能存在误漏欠妥之处,竭诚欢迎读者批评指正。

编 者

2014年4月于上海

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 机械控制工程的研究对象与任务	2
1.2 控制的方法	2
1.3 自动控制系统的几种分类	3
1.4 对控制系统性能的基本要求	4
1.5 机械工程系统中典型的几个控制问题	5
1.6 本课程学习内容及其知识所能解决的问题	6
第 2 章 系统的数学模型及传递函数	8
2.1 微分方程	8
2.2 传递函数	10
2.3 传递函数的典型环节	12
2.4 控制系统的方块图及其变换	16
2.5 传递函数的实验建模方法	24
习题	24
第 3 章 控制系统的时域分析	28
3.1 时间响应的概念	28
3.2 典型输入信号	28
3.3 时间响应	31
3.4 稳态误差分析与计算	38
3.5 传递函数辨识的时域法	44
3.6 工程案例分析	46
习题	49
第 4 章 控制系统的频率特性分析	51
4.1 频率特性的基本概念	51
4.2 典型环节的频率特性	57
4.3 系统的对数频率特性	68
4.4 频域性能指标及其与时域性能指标间的关系	72

4.5	频率实验法估计系统的数学模型	74
4.6	工程案例分折	76
	习题	88
第5章	系统的稳定性	91
5.1	系统稳定的条件	91
5.2	劳斯-胡尔维茨稳定性判据	93
5.3	奈奎斯特稳定判据	97
5.4	稳定性裕量	106
5.5	根轨迹简介	110
5.6	工程案例分折	114
	习题	124
第6章	控制系统的综合与校正	127
6.1	概述	127
6.2	系统的串联校正	130
6.3	系统的反馈校正	141
6.4	系统的PID校正	147
6.5	工程案例分折	159
	习题	165
参考文献	167

绪 论

“机械控制工程”是一门技术学科,它研究控制论在机械工程中的应用,是一门跨控制论与机械工程学科的边缘学科。机械控制工程论是研究以机械工程技术为对象的控制论问题。机械工程科技的研究与发展,不仅是促使机械控制工程的理论得以产生和发展的内在推动因素,而且也是机械控制工程的广阔应用天地。

顾名思义,控制论是关于控制的理论。“用计算机控制机床运动”、“控制室内温度”、“控制物价上涨”等已成为人们习以为常的口语了。如果我们仔细分析各种不同的控制过程,虽然“机床控制”、“室内温度控制”、“物价上涨控制”的控制对象不同,但作为控制过程,有两点却是它们共有的:

(1) 被控制的对象必须存在着多种发展的可能性。如果事物的未来只有一种可能性,就无所谓控制了。比如光在真空中的传播速度是确定的,每秒 209 793km,既不会高于这个速度也不会低于这个速度,只有一种可能性。因此人们不能说“控制了光在真空中传播的速度”之类的话。

(2) 被控制的对象不仅必须存在多种发展的可能性,而且,人可以在这些可能性中通过一定的手段进行选择,才谈得到控制。比如一座火山,它在下一时刻面临着爆发或不爆发两种可能性,但目前人类的能力还不能在这两种可能性中选择。所以,我们也不能说“控制了火山爆发”这样的话。所谓我们不能控制,就是无法选择或不存在选择的余地。

由此可见,控制的概念与事物发展的可能性密切相关。我们将事物发展变化中面临的各种可能性集合称为这个事物的可能性空间,它是控制论中最基本的概念。对对象的控制过程,就是使其可能性空间不断缩小的过程。每实行一次控制后,事物发展的可能性空间就缩小了。可能性空间缩得越小,标志着我们的控制能力越强。例如,高水平的篮球运动员可以在远处准确地将篮球投入到篮网中,而一般人则很难做到。这说明高水平的篮球运动员可以将篮球运动的轨迹控制在较小的可能性空间内,具有较强的篮球控制能力。在实际对象控制过程中,对于绝大多数的控制过程,人们并不是把事物的可能性空间精确地缩小到某个唯一的、而是只是把可能性空间缩小到一定的范围就达到控制的目的了。例如,任何恒温箱都只能把温度控制在一个目标值附近的小区间内。虽然恒温箱内的温度每一时刻有一个特定的值,但是这个值究竟是多少并不是我们事先确定的,只要温度值在确定的区间之内,就算实行了控制。同样的道理,任何机械加工都必须规定出一定的误差范围。

控制论是机械控制工程的技术理论方法论的基础。它的引入,使人们对于机械工程的认识从经验性阶段上升到理论性阶段,它提供理论与方法,使各种机械工程对象、系统或过

程能够实现各种形式和多层次技术水平的控制,能够逐步实现机械工业生产与管理过程的高水准的自动化;它使结构形态或机理复杂的机械对象与过程也能实现辨识与建模,进行动态分析、设计和优化;对于某些古典的机械工程问题,如机械振动、动态特性及机械精密度等,应用它有可能揭示出更深刻的本质,找到改进或控制其性能的更有效途径与方法。

1.1 机械控制工程的研究对象与任务

机械控制工程论实质上是研究机械工程技术中系统的动力学问题。它研究的是机械工程系统在一定的外界条件(即输入或激励)作用下,从系统的初始状态出发,所经历的由其内部的固有特性所决定的整个动态历程,研究这一系统及其输入、输出三者之间的动态关系。

从系统、输入、输出三者之间的关系出发,根据已知条件与求解问题的不同,机械控制理论的任务可以分为以下4个方面:

- (1) 已知系统和输入,求系统的输出,即系统分析问题;
- (2) 已知系统和系统的理想输出,设计输入,即最优控制问题;
- (3) 已知输入和理想输出,设计系统,即最优设计问题;
- (4) 已知系统的输入和输出,求系统的结构与参数,即系统辨识问题。

本书主要是以经典控制理论来研究问题(1),解决系统的分析问题。

1.2 控制的方法

本节主要讨论一下控制的方法问题。为了达到控制的目的,人们可以根据控制对象的不同、控制要求的不同,而采取不同的控制策略与方法。常见的控制方法有随机控制、负反馈调节控制等,它们是一切复杂控制方法的基础。

1. 随机控制

人们遇到棘手的科学问题时,即使对解决问题所必需的条件完全不了解,对于对象的性质一无所知,仍然可以采用随机控制的方法来找到问题的答案。比如我们要进一个上了锁的房间,手里有一大串钥匙,但不知道其中哪一把钥匙能把锁打开。人们所采用的最通常的方法就是“一个一个地试试看”,不行就换一把钥匙,直到把锁打开。

因此在科学发展的某些阶段,尤其当人们对某一个领域的研究刚刚开始,还不能用其他方法来控制对象时,随机控制往往就成为人们唯一可以采用的方法。例如,古代的时候,人们没有任何科学知识,没有仪器,对疾病的本质和药物的性质都一无所知,我们的祖先如何对付疾病呢?祖先们是从“尝”开始了解药物对人体的作用的。人得了病,就用各种树皮草根来试着服用。通过无数次的随机选择草药试吃开始了对药物治疗作用的了解,这样就形成了控制。

2. 负反馈调节控制

台球运动中,为了将目标球精确地送入袋口,首先要根据目标球与袋口的相对位置,确定瞄准点,即应该将母球向什么方向击出才能将目标球击进袋,其次是运杆击球,将目标球精确地击向瞄准点。在机械传动控制中,为了控制步进电机旋转 60° 的角度,可根据其步距角的大小(例如步距角为 3°)以及步进电机的通电方式(例如三相双三拍),确定向步进电机发送 20 个控制脉冲。根据步进电机的控制原理,一个控制脉冲可以使其旋转一个步距角(即 3°),20 个控制脉冲即可使其旋转 60° 的角度。

但是,如果我们选择了某一目标,但我们所具备的控制方法达不到所需要的控制能力又怎么办呢?例如二次大战前后,随着科学技术的发展,飞机的速度越来越快,性能越来越好,用老式高射炮来击落飞机也就越来越困难了。人们发现,无论怎样提高发射炮弹的准确性,控制能力总是有限的。飞机飞行的轨道因驾驶员动作的随机性几乎是不能预先求出的,经典的思想方法暴露出一些根本的缺点。其实,这一类被工程师视为极困难的问题我们可以从自然界不少动物身上找到答案。鹰击长空,不但能准确地扑到固定目标,甚至连飞速躲避的兔子、老鼠也不能逃脱。显然,鹰没有也不可能事先计算自己和目标的运动方程。鹰不是按照事先计算好的路线飞行的。鹰发现兔子后,马上用眼睛估计一下它和兔子的大致距离和相对位置,然后选择一个大致的方向向兔子飞去。在这个过程中它的眼睛一直盯着兔子,不断向大脑报告自己的位置跟兔子之间差距。不管兔子怎么跑,大脑作出的决定都是缩小自己跟兔子位置的差距。这种决定通过翅膀来执行,随时改变着鹰的飞行方向和速度,调整鹰的位置,使差距越来越小。直到这个差距为 0 时,鹰的爪子就够着兔子了。

我们来仔细分析一下这个控制过程。这个控制系统主要由眼睛、大脑和翅膀三部分组成,眼睛在盯住兔子的同时,也注意到了自己的位置,并把这两者作一个比较。经过比较以后的信号代表鹰的位置跟兔子位置的差距,通常称为目标差,眼睛主要是接收这种目标差信息,并把它传递到大脑。大脑指挥着翅膀改变鹰的位置,使鹰向目标差减小的方向运动,这个控制重复进行,就构成了鹰抓兔子的连续动作。这里最关键的一点是大脑的决定始终使鹰的位置向减小目标差的方向改变,控制论中把这类控制过程称为负反馈调节控制。负反馈调节的本质在于设计了一个目标差不断减少的过程,通过系统不断把自己的控制结果与目标作比较,使得目标差在一次一次控制中慢慢减少,最后达到控制的目的。负反馈调节是扩大控制能力的有效方法,它把有限的控制能力累积起来,从而扩大了控制能力。每一次反馈,实际都是将上一次作为输出的可能性空间作为输入,让控制机构在这个已被缩小了的范围内进行新的选择。

1.3 自动控制系统的几种类别

所谓控制系统,是指系统的输出,能按照要求的参考输入或控制输入进行调节的系统。控制系统的分类方式很多,这里仅按系统是否存在反馈,将系统分为开环系统和闭环系统。

1. 开环系统

开环系统是指系统的输出量对系统无控制作用,或者说系统中无反馈回路的系统。例如洗衣机,它按洗衣、清水、去水、干衣的顺序进行工作,无须对输出信号即衣服清洁程度进行测量;又如简易数控机床的进给控制,输入指令通过控制装置和驱动装置推动工作台运动到指定位置,而位置信号不再反馈。这些都是典型的开环系统,开环系统的方框图如图 1-1 所示。

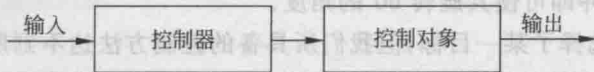


图 1-1 开环系统的方框图

2. 闭环系统

闭环系统是指系统的输出量对系统有控制作用,或者说系统中存在反馈回路的系统。例如,数控机床中为了实现高精度的导轨运动位置控制,可在直线移动导轨机构上安装线位移光栅传感器,用于导轨移动量的测量,控制系统根据该测量结果控制伺服电机的运动位置。闭环系统的方框图如图 1-2 所示。



图 1-2 闭环系统

1.4 对控制系统性能的基本要求

评价一个控制系统好坏的指标是多种多样的,但对控制系统的基本要求一般可归纳为稳定性、准确性和快速性。

(1) 系统的稳定性: 由于闭环控制存在反馈,系统又存在惯性,当系统参数匹配不当时,将会引起系统的振荡乃至越来越远离平衡位置而失去工作能力。稳定性就是指系统抵抗动态过程振荡倾向和系统能够恢复平衡状态的能力。

(2) 响应的准确性: 在调节过程后输出量与给定的输入量之间的偏差程度,这一偏差也称为静态精度,这也是衡量系统工作性能的重要指标。

(3) 响应的快速性: 当系统输出量与给定的输入量之间产生偏差时,消除这种偏差的快速程度。

稳定性要求是系统工作的必要条件,响应的准确性和快速性是在系统稳定的前提下提出的。系统的稳定性、准确性和快速性是相互制约的,快速性好,可能引起强烈振荡;而改善系统的稳定性又可能减小快速性,控制精度也可能变差。由于被控对象的具体情况不同,

各种系统对稳定性、准确性和快速性的要求各有侧重,应视被控对象的具体要求,综合确定控制系统的性能指标。

1.5 机械工程系统中典型的几个控制问题

实际中的控制系统,分为单输入单输出系统和多输入多输出系统。经典控制理论主要研究单输入单输出系统的控制问题。而现代控制理论以状态的概念,研究复杂的多输入多输出系统的控制问题。本书只涉及经典控制理论所解决的控制问题,即单输入单输出系统的控制问题。

从机械工程控制理论应用的角度,其解决的典型问题分为控制系统分析与控制系统的设计问题。

1. 控制系统的分析问题

所谓系统分析问题,就是已知系统和输入,求系统的输出问题。这里我们以汽车振动系统分析为例,说明此类问题的解决方法。

把汽车作为一个系统来研究时,可看作一个具有质量、弹簧和阻尼的振动系统。由于汽车内部各部分的固有频率不同,汽车在行驶中常因路面不平,车速和运动方向的变化,车轮、发动机和传动系统的不平衡,以及齿轮的冲击等各种外部和内部的激振作用而极易产生整车和局部的强烈振动。汽车的这种振动会使汽车的动力性能变差,同时还要影响乘坐的舒适性。因此分析汽车的振动问题对于改进汽车设计是十分必要的。

对于汽车振动系统分析,引起汽车振动的输入量主要是路面不平所导致的颠簸、汽车本身的发动机激励和传动轴激励。为了分析这些振动源对汽车振动的影响,可分别测试汽车在不同道路上(例如沥青、砂石、山路等)、不同车速情况下,座椅和车身地板的垂直振动加速度。然后通过功率谱分析法对发动机工作产生的振动和路面不平度引起的振动信号进行功率谱密度分析,这种分析能够反映引起振动的各频率成分的能量,从而找到对乘员产生影响最大的频段。由于人体最敏感的频段为 $4\sim 8\text{Hz}$,当所测试振动信号的频率成分接近该频段时,说明这个车人的乘坐舒适性不好,否则可认为汽车具有较好的平顺性能。

如果以上测试结果表明,部分振动信号在人体最敏感的频段 $4\sim 8\text{Hz}$ 附近的振幅较大,说明这部分振动信号将导致汽车乘坐的舒适性。那么如何改进设计,去除 $4\sim 8\text{Hz}$ 附近的振动信号,这就是控制系统设计所需要解决的问题。

2. 控制系统的设计问题

所谓系统设计问题,就是已知输入和理想输出,进行系统设计的问题。本书所要介绍的传递函数是在拉氏变换的基础上,以系统本身的参数描述的线性定常系统输入量与输出量的关系式。它表达了系统内的固有特性,而与输入量或驱动函数无关,反映了系统对信号的传递特性。传递函数不同,在给定的输入情况下,其输出就不同。因此,上述改进汽车振动性能的设计问题,就成为一个如何改变汽车系统的传递函数,使汽车振动信号远离人体最敏感的频段 $4\sim 8\text{Hz}$ 的问题。

通过功率谱分析法可以分析引起振动的各频率成分的能量,然后根据汽车的机械结构分析,确定接近人体最敏感频段 4~8Hz 的振源,并对该振源的机械结构进行优化设计,并确定其传递函数。建立一个机械系统的传递函数,是一件较为困难的事情,但随着计算机技术的发展,一些专用的软件系统(如机械系统动力学自动分析软件 ADAMS),可辅助用于传递函数的计算。这样,在已知振动激励信号(输入信号)和汽车系统传递函数的情况下,即可分析计算出系统的输出信号,从而对改进的设计结构能否满足汽车舒适性的要求进行性能评价,直至找到一种保证乘坐人员舒适性的设计方案。

1.6 本课程学习内容及其知识所能够解决的问题

机械控制工程是利用控制论的理论与方法解决机械工程实际问题的一门技术科学,本书所论述的内容主要是机械控制工程的基本理论与方法,所学习的内容主要包括以下几点。

1. 系统的数学模型

系统建模是经典控制理论和现代控制理论的基础,数学模型可以有許多不同的形式,例如微分方程、传递函数、单位脉冲响应函数等。本书主要介绍适用于单输入单输出线性定常系统动态特性描述的传递函数的概念以及数学模型的建立方法。

2. 系统的瞬态响应及误差分析

一个实际的系统,在建立系统的数学模型之后,就可以采用不同的方法来分析和研究系统的动态性能。研究的方法主要分为时域分析与频域分析。时域分析法是一种直接分析法,它是根据所描述系统的微分方程式或传递函数,求出系统的输出量随时间的变化规律,并由此来确定系统的性能。因此,通过这部分内容的学习,重点掌握了系统动态性能的时域评价方法。

3. 系统的频率特性分析

在机械工程科学中,有许多问题需要研究系统与过程在不同频率的输入信号作用下的响应特性。例如,机械振动学主要研究机械结构在受到不同频率的作用力时产生的强迫振动和由系统本身内在反馈所引起的自激振动,以及与其有关的共振频率、机械阻抗、动刚度、抗振稳定性等概念。这实质上就是机械系统的频率特性。通过这部分内容的学习,重点掌握系统动态特性的频域分析方法。

4. 系统的稳定性

稳定性要求是系统工作的必要条件,也是机械工程系统的重要性能指标之一。通过这部分内容的学习,重点掌握判定一个系统是否稳定的方法以及评价系统稳定程度的指标。

5. 系统的综合与校正

上述内容都是在系统结构和参数已知的情况下分析和评定系统的稳定性、快速性和准

确性。而系统的综合与校正所要解决的问题,却是在预先规定了系统的各项性能指标,如何选择适当的环节和参数使系统满足这些性能指标要求。通俗地说,就是如何改善系统的控制性能的方法。

总之,本书所介绍的内容主要是为从事机械控制技术的人员提供一些基本的概念与方法,而不涉及具体的控制算法。

将式(2-3)代入式(2-1),并整理得

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F \sin pt$$
式(2-4)为质量块的运动微分方程,其稳态响应的表达式为

$$x = X \sin(pt - \varphi)$$
以上通过一个电路方程说明了,质量块的运动微分方程,其稳态响应的表达式为

$$x = X \sin(pt - \varphi)$$
式(2-4)为质量块的运动微分方程,其稳态响应的表达式为

$$x = X \sin(pt - \varphi)$$

下面介绍机械动力学分析中,常见的刚体作直线运动与定轴转动情况。
定轴转动是指刚体绕某一固定轴转动,其运动方程为

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + k\theta = T \sin pt$$
式中, J 为转动惯量, θ 为转角, T 为驱动力矩, b 为阻尼系数, k 为弹性系数, p 为激励频率。

式(2-5)为转动系统的运动微分方程,其稳态响应的表达式为

$$\theta = \Theta \sin(pt - \varphi)$$
式中, Θ 为转角幅值, φ 为相位差。

2. 定轴转动

定轴转动是指刚体绕某一固定轴转动,其运动方程为

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + k\theta = T \sin pt$$
式中, J 为转动惯量, θ 为转角, T 为驱动力矩, b 为阻尼系数, k 为弹性系数, p 为激励频率。

第 2 章

系统的数学模型及传递函数

描述系统运动特性的数学表达式,称为系统的数学模型。连续时间系统常用的数学模型有微分方程、传递函数及状态变量表达式。系统各元件间的连接和因果关系也可用方块图与信号流图表示,由它们可方便地求出系统的传递函数。

数学模型是对系统进行定量计算和定性分析的基础,因此建立系统的数学模型是分析研究系统的首要工作。建立系统数学模型的方法有两种,即分析法和实验辨识法。分析法是从元件或系统所遵循的有关定律出发,建立相应的数学模型,主要用于对系统结构及参数的认识都比较清楚的简单系统。实验辨识法是根据元件或系统对某些典型信号的响应或其他实验数据建立其数学模型。由于实际工程问题的复杂性,实际中多采用实验辨识法建立系统的数学模型。

无论是机械系统、电气系统、液压系统、热力系统还是经济系统、生物系统,只要是确定的系统都可以用数学模型描述其运动特性。但是,要建立一个系统的合理数学模型并非是一件容易的事。所谓合理的数学模型是指它具有最简化的形式,但又能正确反映所描述的系统特性。在工程上,常常是做一些必要的假设和简化,需要正确处理模型简化和模型精度的辩证关系,忽略对系统特性影响小的因素,并对一些非线性关系进行线性化处理,建立一个比较准确的近似数学模型。

2.1 微分方程

微分方程是在时域中描述系统(或元件)动态特性的数学模型,或称为运动方程。利用它可得到描述系统(或元件)动态特性的其他形式的数学模型。

建立系统的微分方程,通常按以下三个步骤进行:

- (1) 确定系统(或元件)的输入量和输出量;
- (2) 根据系统(或元件)遵循的有关定律列出原始微分方程式;
- (3) 消去中间变量,最后得到只包含输入量和输出量的微分方程式,即系统(或元件)的输入-输出微分方程式。

下面举例说明建立微分方程的步骤与方法。

例 2.1 图 2-1 所示 RLC 无源网络中的 R、L、C 均为常值, $u_1(t)$ 为输入电压, $u_o(t)$ 为输出电压,试列写其运动方程。