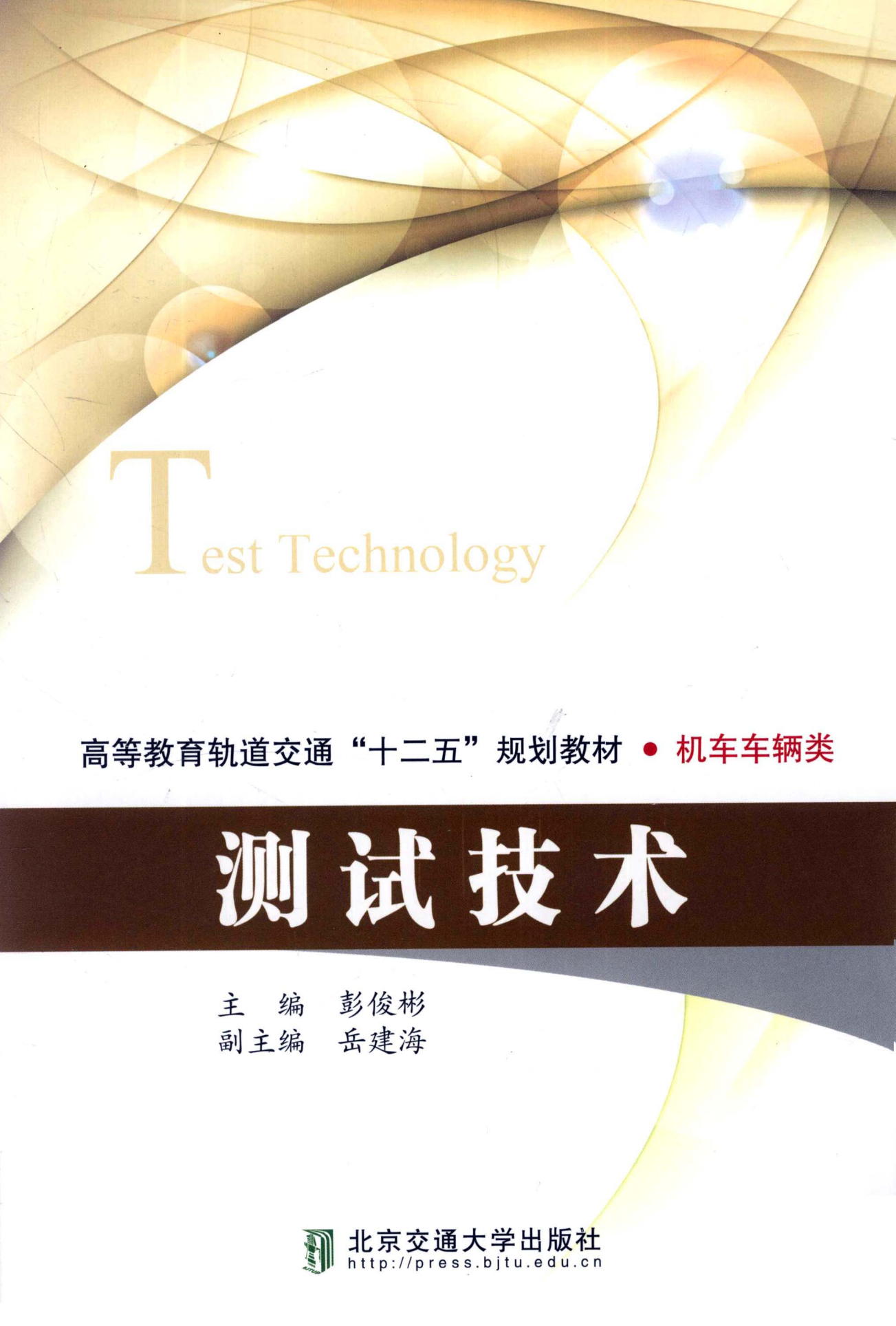




T est Technology

高等教育轨道交通“十二五”规划教材 • 机车车辆类

测试技术

主 编 彭俊彬
副主编 岳建海



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·机车车辆类

测试技术

彭俊彬 主 编
岳建海 副主编



北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书内容包括信号描述、测试装置的基本特性、常用传感器、信号的调理与记录、信号分析与处理、测试技术的工程应用、计算机测试系统与虚拟仪器等。本书着重基本概念和原理的阐述,突出理论知识的应用,加强了针对性和实用性。

本书可作为高等学校机械类和相近专业本科生教材,也适于作为各类职业学院、职工大学等有关专业的教学用书,还可供相关专业研究生和工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

测试技术/彭俊彬主编. —北京:北京交通大学出版社, 2012. 12

(高等教育轨道交通“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5121-1324-4

I. ①测… II. ①彭… III. ①测试技术-高等学校-教材 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 313373 号

责任编辑:杨 硕 田秀青

出版发行:北京交通大学出版社 电话:010-51686414 <http://press.bjtu.edu.cn>

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号 邮编:100044

印刷者:北京时代华都印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:11.25 字数:275 千字

版 次:2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-1324-4/TB·33

印 数:1~3 000 册 定价:26.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·机车车辆类

编 委 会

顾 问：施仲衡

主 任：司银涛

副 主 任：李建勇 陈 庚

委 员：(按姓氏笔画排序)

王文静 史红梅 刘 伟

刘志明 齐红元 宋永增

宋雷鸣 张励忠 张欣欣

周明连

编委会办公室

主 任：赵晓波

副 主 任：孙秀翠

成 员：(按姓氏笔画排序)

吴嫦娥 郝建英 徐 琤

总 序

我国是一个内陆深广、人口众多的国家。随着改革开放的进一步深化和经济产业结构的调整,大规模的人口流动和货物流通使交通行业承载着越来越大的压力,同时也给交通运输带来了巨大的发展机遇。作为运输行业历史最悠久、规模最大的龙头企业,铁路已成为国民经济的大动脉。铁路运输有成本低、运能高、节省能源、安全性好等优势,是最快捷、最可靠的运输方式,是发展国民经济不可或缺的运输工具。改革开放以来,中国铁路积极适应社会的改革和发展,狠抓制度改革,着力技术创新,抓住了历史发展机遇,铁路改革和发展取得了跨越式的发展。

国家对铁路的发展始终予以高度重视,根据国家《中长期铁路网规划》(2005—2020年):到2020年,中国铁路网规模达到12万千米以上。其中,时速200千米及以上的客运专线将达到1.8万千米。加上既有线提速,中国铁路快速客运网将达到5万千米以上,运输能力满足国民经济和社会发展需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。铁路是个远程重轨运输工具,但随着城市建设和经济的繁荣,城市人口大幅增加,近年来城市轨道交通也正处于高速发展时期。

城市的繁荣相应带来了交通拥挤、事故频发、大气污染等一系列问题。在一些大城市和一些经济发达的中等城市,仅仅靠路面车辆运输远远不能满足客运交通的需要。城市轨道交通节约空间、耗能低、污染小、便捷可靠,是解决城市交通的最好方式。未来我国城市将形成地铁、轻轨、市域铁路构成的城市轨道交通网络,轨道交通将在我国城市建设中起着举足轻重的作用。

但是,在我国轨道交通进入快速发展的同时,解决各种管理和技术人才匮乏的问题已迫在眉睫。随着高速铁路和城市轨道新线路的不断增加以及新技术的开发与引进,管理和技术人员的队伍需要不断壮大。企业不仅要对新员工进行培训,对原有的职工也要进行知识更新。企业急需培养出一支能符合企业要求、业务精通、综合素质高的队伍。

北京交通大学是一所以运输管理为特色的学校,拥有该学科一流的师资和科研队伍,为我国的铁路运输和高速铁路的建设作出了重大贡献。近年来,学校非常重视轨道交通的研究和发展,建有“轨道交通控制与安全”国家级重点实验室、“城市交通复杂系统理论与技术”教育部重点实验室,“基于通信的列车运行控制系统(CBTC)”取得了关键技术研究的突破,并用于亦庄城轨线。为解决轨道交通发展中人才需求问题,北京交通大学组织了学校有关院系的专家和教授编写了这套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材”,以供高等学校学生教学和企业技术与管理人员培训使用。

本套教材分为交通运输、机车车辆、电力牵引和土木工程四个系列，涵盖了交通规划、运营管理、信号与控制、机车与车辆制造、土木工程等领域，每本教材都是由该领域的专家执笔，教材覆盖面广，内容丰富实用。在教材的组织过程中，我们进行了充分调研，精心策划和大量论证，并听取了教学一线的教师和学科专家们的意见，经过作者们的辛勤耕耘以及编辑人员的辛勤努力，这套丛书得以成功出版。在此，我们向他们表示衷心的感谢。

希望这套系列教材的出版能为我国轨道交通人才的培养贡献绵薄之力。由于轨道交通是一个快速发展的领域，知识和技术更新很快，教材中难免会有诸多的不足和欠缺，在此诚请各位同仁、专家予以不吝批评指正，同时也方便以后教材的修订工作。

编委会
2013 年 1 月

出版说明

为促进高等轨道交通专业机车车辆类教材体系的建设,满足目前轨道交通类专业人才培养的需要,北京交通大学机械与电子控制工程学院、远程与继续教育学院和北京交通大学出版社组织以北京交通大学从事轨道交通研究教学的一线教师为主体、联合其他交通院校教师,并在有关单位领导和专家的大力支持下,编写了本套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材·机车车辆类”。

本套教材的编写突出实用性。本着“理论部分通俗易懂,实操部分图文并茂”的原则,侧重实际工作岗位操作技能的培养。为方便读者,本系列教材采用“立体化”教学资源建设方式,配套有教学课件、习题库、自学指导书,并将陆续配备教学光盘。本系列教材可供相关专业的全日制或在职学习的本专科学生使用,也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

本系列教材得到从事轨道交通研究的众多专家、学者的帮助和具体指导,在此表示深深的敬意和感谢。

本系列教材从2012年1月起陆续推出,首批包括:《互换性与测量技术》、《可靠性工程基础》、《液压与气动技术》、《测试技术》、《单片机原理与接口技术》、《计算机辅助机械设计》、《控制理论基础》、《机械振动基础》、《动车组网络控制》、《动车组运行控制》、《机车车辆设计与装备》、《列车传动与控制》、《机车车辆运用与维修》。

希望本套教材的出版对轨道交通的发展、轨道交通专业人才的培养,特别是轨道交通机车车辆专业课程的课堂教学有所贡献。

编委会
2013年1月

前 言

21 世纪机械制造业正经历着飞速的发展,但我国在该领域还远远落后于世界发达国家,特别在高技术含量、大型高效或精密、复杂的机电新产品开发方面,缺乏现代设计理论和知识的积累,实验研究和开发能力较弱,仍需依靠进口或引进技术。造成这种情况的重要原因之一是缺乏掌握现代设计理论知识、具有实验研究和创新开发能力的人才。

对现有人员进行网络继续教育是目前解决人才不足最方便快捷的方式。为了在“机械设计制造及其自动化专业(机车车辆方向)”(专升本)培养掌握现代设计理论知识、具有试验研究和创新开发能力的人才,我们编写了本书。在教材编写过程中,结合多年的教学经验,不仅继承了传统知识,而且根据我国机械工程测试技术的发展,注入新的内容。本书注重基本理论、基本方法与实际应用相结合,力求简明扼要,通俗易懂。书中图文并茂,内容由浅入深,便于读者自学。本书主要内容包括以下方面。

① 信号描述:主要介绍信号的分类与描述及周期信号和瞬变非周期信号的频谱。

② 测试装置的基本特性:主要介绍测量系统的主要性质、静态与动态特性,测量系统的频率响应特性及其在典型输入下的响应,实现不失真测量的条件、动态特性的测试、抗干扰性与负载效应。

③ 常用传感器:主要介绍传感器的分类及电阻式、电容式、电感式、压电式、磁电式、热电式、光电式和半导体等传感器的工作原理与结构特点。

④ 信号的调理与记录:主要介绍电桥工作原理、调制与解调、信号的放大与衰减、滤波器、信号的显示与记录。

⑤ 信号分析与处理:主要介绍数字信号处理系统的基本组成、随机信号、相关分析、功率谱分析及应用。

⑥ 测试技术的工程应用:主要介绍应变、力与力矩的测量及温度的测量。

⑦ 计算机测试系统与虚拟仪器:主要介绍自动测试系统、智能仪器和虚拟仪器。

本书各章还附有思考题与习题,有利于学生复习巩固所学知识,提高学生分析和解决问题的能力。

本书由北京交通大学彭俊彬主编,岳建海副主编。岳建海编写绪论、第1章和第4章,彭俊彬编写第2章、第3章和第5章、第6章、第7章。

限于学识和经验,书中缺点错误在所难免,望同行专家和读者不吝指教。

编 者
2012 年 12 月

目 录

绪论	1	4.3 滤波器	94
第1章 信号描述	5	4.4 信号的放大	99
1.1 信号分类及描述	5	4.5 信号的显示与记录	102
1.2 周期信号的频谱	9	复习参考题	105
1.3 瞬变非周期信号的频谱	14	第5章 信号的分析与处理	107
复习参考题	23	5.1 数字信号处理概述	107
第2章 测试装置的基本特性	24	5.2 信号的相关分析及应用	113
2.1 概述	24	5.3 信号的功率谱分析及应用	121
2.2 测试系统的静态特性	27	5.4 D/A 与 A/D 转换	126
2.3 测试系统的动态特性	29	复习参考题	131
2.4 测试系统的响应特性	37	第6章 测试技术的工程应用	132
2.5 测试系统不失真测量的条件	39	6.1 应变、应力的测量	132
2.6 测试系统动态特性的测量	41	6.2 力的测量	137
2.7 测试系统的负载效应	44	6.3 转矩的测量	143
2.8 测试系统的抗干扰问题	45	6.4 温度的测量	145
复习参考题	47	复习参考题	152
第3章 常用传感器	48	第7章 计算机测试系统与虚拟仪器	153
3.1 传感器的基本概念	48	7.1 自动测试系统	153
3.2 电阻、电容和电感式传感器	49	7.2 智能仪器	157
3.3 磁电、压电和热电式传感器	60	7.3 虚拟仪器	159
3.4 半导体传感器	71	复习参考题	163
3.5 传感器的选用原则	79	附录A 模拟试题	164
复习参考题	81	A1 模拟试题一	164
第4章 信号的调理与记录	83	A2 模拟试题二	166
4.1 电桥	83	参考文献	169
4.2 调制与解调	88		

绪 论

1. 测试与测试系统

测试是人们认识客观事物的方法，其目的是获取研究对象中有用的信息。它的基本过程是检测出被测对象的有用信息并加以处理，然后将其结果提供给观察者或其他信息处理装置、控制系统。

信息总是蕴涵在某些物理量之中并依靠它们来传递的，这些物理量就是信号。在科学研究和工程技术上所要测量的参数大多为非电量，如机械量的位移、速度和加速度，热工量的温度、压力和流量，成分量的化学成分和浓度及状态量的颜色、磨损量和裂纹等。这些参数的物理特性或化学特性千差万别，在测量过程中，测量结果的传输、保存及显示非常不便。由于电测技术具有测量精度高、反应速度快、数据传输和变换方便及能够连续自动记录等优点，因而成为目前使用最广泛的信号。各种非电信号（如各种被测的机械量）往往被转换成电信号，以便于传输、处理和运用，这样就形成了非电量的电测技术。非电量的电测技术具有两个方面的内容：一方面是研究用电测手段测量非电量的仪器和仪表，另一方面是研究如何能正确和快速地进行非电量的测试。

在测试工作的许多场合中，并不考虑信号的物理性质，而是将其抽象为变量之间的函数关系，特别是时间函数或空间函数，从数学上加以分析研究，从中得出一些具有普遍意义的理论。这些理论就是信号的分析 and 处理技术，它们极大地发展了测试技术，并成为测试技术的重要组成部分。

测试系统要完成对被测量的测试，首先要获得被测量的信息，并根据被测量信息的物理学特性，将其转换成容易处理和传输的电量信号；然后将电量信号所表示的信息进行变换或放大，再用指示仪或记录仪将信息显示或记录下来；有时还需对信息进行处理，以获得反映实际被测量数值大小的测试结果。一般的测试系统包括传感器（信息的获得）、测量电路、放大器（信息的变换和调理）、数据处理装置（信息的处理）、显示与记录装置（信息的显示）。这些组成部分之间的关系如图 1 所示。

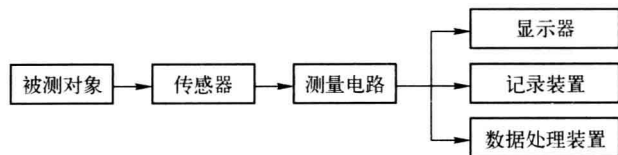


图 1 测试系统的组成

传感器处于被测对象与测试系统的接口位置，它是将被测量的非电信息变换成电信号的装置，因此是一个获得测试系统信号输入的重要元件。传感器直接从被测对象中提取被测量

的信息,感受其变化并将其变换成便于测量的其他电量信号,例如将速度变换成电压,将应变变换成电阻,将流量变换成压力等。因此,传感器获得信息的正确与否直接影响着整个测试系统的精度。

测量电路又称中间转换器,它的作用是将传感器输出的电信号进行传输、放大和转换等。测量电路的种类根据传感器的类型而定,如电阻式传感器需采用一个电桥电路把电阻值的变化变换成电流或电压的变化输出,所以它属于测试信号的转换电路。由于测量电路的输出信号一般都比较小,不能直接驱动显示或记录装置工作,故常常需将信号加以放大,因此在测量电路中通常装有放大器。为了使被测量信号易于传输和处理,测量电路中有时还装有调制与解调器、模/数转换器等。

测试结果的显示目前通常有三种方式,即模拟显示、数字显示和图像显示。模拟显示是利用指针相对标尺的位置来读数;数字显示是用数字形式来显示测试结果的数值大小;图像显示是用屏幕显示读数或者被测参数的变化曲线。在实际测试过程中,有时不仅要读出被测量的具体数值,而且还要了解它的变化过程,特别是在动态测试过程中,测试结果随时变化,无法用显示仪器指示,在这种情况下,就必须将测量信号送入记录装置中自动记录下来。目前常用的自动记录装置有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪及阵列式记录仪等。

以计算机为基础,配备部分外设装置组成测试信号的记录和处理系统,是近年来测试系统的发展趋势。测试系统中的计算机既可以完成测试结果的记录或显示,同时又能对测试结果进行计算处理,并且对测试结果的分析处理方式可根据测试者的要求编写不同的程序,使得测试系统的功能大大加强。

2. 测试技术的地位和作用

在科学研究中,任何科学理论的建立和科学研究成果的提出都必须通过大量的试验与测量,并对通过测量所获得的数据进行分析和计算,以验证科学理论及研究成果的正确性和可靠性。在工农业生产过程中,为了保证生产的正常进行,必须对生产过程中的各种参数进行测量,并在分析测量结果的基础上,对生产过程进行监视和控制,以保证产品的质量。在这些测量过程中所应用的测量手段就是测量仪器或仪表,而应用测量仪器或仪表来实现测量目的的技术工艺则称为测试技术。现代化的测试仪器是科学研究和生产实践的必要手段,它的水平高低是科学技术发展的重要标志,同时也是科学研究和生产技术发展的一个重要技术基础。

测试技术的发展是随着科学技术和生产实践的发展而前进的,因为科学技术和生产实践向前发展,就要求提供新的测试手段以满足需要,这样又促进了测试仪器及测试技术的发展,而科学技术的发展又为研制新型的测试仪器提供了条件。近30年来,随着电子技术和计算机应用技术的飞速发展,传统的测试技术得到了较大的改进和提高,如测试准确度和灵敏度得到提高,测试速度变得更快,测试结果能连续实时地自动记录,并可用计算机对测试结果进行分析计算及实时完成生产过程的自动控制等。在工程技术领域,测试技术的作用有如下几个方面。

① 通过测量生产过程中的有关工艺参数,对生产过程的运行情况进行监视,使之保持在最佳的工作状态;或者对生产设备在运转过程中的有关技术参数进行测量,并对测试结果进行分析,判断设备的工作状态。

② 将生产过程中各种工艺参数的测量结果与要求的数值相比较,并且根据偏差的大小

范围要求进行反馈,以对工艺参数进行调整和控制,保证生产过程的要求。

③ 根据对工艺过程参数和设备性能参数测试结果的分析评价,找出存在的问题,并提出改进工艺过程和设备性能的措施。在改进措施实施以后,是否达到了改进的效果,仍需进行测试来分析和评定。这些测试结果是工艺过程参数及设备性能参数进一步改进设计的基础。

④ 通过测试技术手段研究机械系统的响应特性和系统参数及进行载荷识别,为机械系统的动态设计提供依据。

随着近代科学技术的发展,特别是机械、电子、生物、海洋、航天、气象、地质、通信和控制等,都离不开测试技术,测试技术在这些领域中也起着越来越重要的作用。并且随着科技和生产的发展,测试技术越来越多地从静态测量向动态测量方向发展,从而对测试仪器和测试手段提出了更高的要求。

3. 测试技术的发展趋势

科学技术的快速发展和生产实践领域的不断扩大,对测试技术提出了越来越高的要求,因此也促进了测试技术的迅速发展。现代测试技术除了进一步提高测试的精度和可靠性外,总的发展趋势是测试系统的小型化、智能化、多功能化及无接触化,其特点主要表现在下述几个方面。

① 测试仪器应用范围的扩大随着科学技术的不断发展,对测试仪器的性能要求也在不断提高,特别是对生产实际和科学研究过程中极端参数的测量,要求原有测试仪器的技术指标得以提高,以扩大其应用范围。例如连续测量液态金属的温度、连续长时间测量超高温介质的温度($2\,500^{\circ}\text{C} \sim 3\,000^{\circ}\text{C}$),超低温温度的连续测量,超高压的测量及超精度质量测量等。这些极端参数的测试要求测试仪器具有较大的测量范围,并且具有足够高的精度和可靠性。

② 新型传感器的研究。测试技术的应用领域随着生产和科学研究的发展在不断扩大,需要测量的参数种类也在不断增加,如颜色、味觉、化学成分、超高温、超低温等。因此,促使人们不断地探讨新型的测量机理,研制新型的传感器及测量系统。这方面研究除了采用新的物理效应、化学反应及生物功能外,还不断地研究具有仿生功能的新型传感器。在新型传感器的开发研究过程中,新型传感器敏感元件材料的开发与应用具有十分重要的意义。目前,半导体材料、陶瓷材料及高分子聚合材料作为传感器敏感元件材料的研究正在不断深入,开发出了仿生化、智能化及生物化的传感器。

③ 多功能测试仪器的开发。传统的传感器大多是进行一个点的单参数测试,这已不能满足生产实际和科学研究发展的需要。在有些场合,希望在某一测量点测得多个参数,因此需要具有多种参数同时变换的传感器,并且测量电路能够将不同参数的电信号同时处理和记录,也就是要求测试系统的多参数测量和多功能化。例如要同时测量一点的温度和湿度,就必须寻求一种能同时感受温度和湿度的敏感元件材料,并将其制造成同时将温度和湿度变换成不同电量的传感器,并互不影响。由钛酸钡和钛酸锶组成的多孔陶瓷的电容量与温度有关,而其电阻值与湿度呈函数关系,这样就可以通过测量电容和电阻值间接获得温度和湿度的数值。

多功能化测试系统的另一层含义是指除传感器之外的其他测试部分具有普遍的通用性,即测量电路对电信号的转换和放大及测试系统的显示和记录可应用于多种场合下不同种类参

数的测量。对于不同参数的测量,只是对测试系统连接相应的合适传感器。这样,就使得测试系统的功能和应用范围得到了扩大。

④ 测试系统的智能化。随着微电子技术和计算机技术在测试领域的应用,微处理器与传感器的相互结合及与测试信号处理过程的结合,使得测试系统具有一定的智能化功能。微电子处理器的信号调节与微机接口电路和信号处理电路可与传感器封装成一体,使得传感器不仅仅具有信号的检测能力,同时还可以对信号进行判断和处理,并且根据测试信号的变化自动调节信号处理电路的信号放大和传递方式。这样,可以使测量精度得到较大的提高,并且可以消除测试过程中的随机因素干扰,以得到精确的测试结果。

4. 课程的主要内容

测试技术课程研究的对象是机械工程领域测试过程中常用的传感器、中间变换电路及显示和记录装置的结构和工作原理,测试系统的静态和动态特性及评价方法,测试信号的分析及测量数据处理方法,常见物理量的测试过程及测试方法。

对高等学校机械类的各个专业而言,测试技术是一门技术基础课。通过本课程的学习,使学生掌握合理选用测试装置并初步掌握静、动态测量和常用工程实验所需的基本知识和技能,为进一步学习、研究和处理工程技术问题打下基础。学生在学完本课程之后,应具备下述六方面的知识和能力。

① 掌握信号的时域及频域的描述方法,建立明确的信号频谱结构的概念;掌握频谱分析和相关分析的基本原理和方法;掌握数字信号分析中的一些基本概念。

② 掌握测试装置基本特性的评定方法,包括测试装置传递特性的时域、频域描述,脉冲响应函数和频率响应函数,一阶、二阶系统的动态特性及其参数的测量方法和不失真的测试条件。

③ 掌握常用传感器的种类、结构、工作原理及传感器的典型应用,并具备根据实际测试要求选择合适传感器的能力。

④ 熟悉传感器输出信号的常用处理方法及中间变换电路的结构、工作原理、适用特点,具备根据不同种类传感器选用适宜中间变换电路,进而设计中间变换电路的能力。

⑤ 了解和掌握各种常用显示与记录装置的结构、工作原理及适用特点,并能根据实际需要选用合理的显示与记录装置。

⑥ 在掌握测试系统特性的基础上,具备根据实际被测量的特点,将传感器、中间变换电路和显示记录装置正确地组成测试系统的能力。

测试技术是一门多学科交叉的技术学科,需要多种学科知识的综合运用。与本课程直接相关的基础知识包括高等数学、物理学、工程力学、机械振动、电工学、电子学、计算机及自动控制等。同时,测试技术又是一门实践性很强的应用学科,只有在学习过程中加强理论与实践的结合,注重实验课对理论知识理解和掌握的作用,才能使使学生通过课程的学习,具备处理实际测试工作的能力。

第1章

信号描述

【本章内容概要】

本章主要介绍信号的分类、时域描述与频域描述、周期信号与傅里叶级数、周期信号的离散频谱、周期信号的强度表达、非周期信号与傅里叶变换、非周期信号的连续频谱。

【本章学习重点与难点】

学习重点：信号的分类、信号的频域描述。

学习难点：信号的频谱分析。

信息是客观存在的物体或物理过程的本质特征。为了观测到这些特征，人们采用各种技术手段来表达所需信息，以供人们记录和分析。这种对信息的表达形式就是信号。

测试就是要观测、记录和分析各种机械在运行中的物理现象和参数变化，一般是借助测试装置或仪器，把待测的力、速度、加速度、位移和温度等非电量信号变换成容易测量、记录和分析的电信号，如电流、电压等。这些信号包含着反映某个物理系统状态和特性的有用信息，是人们认识客观事物内在规律、研究事物之间相互关系及预测事物未来发展的依据。因此，了解各类信号及其描述是工程测试的基础。

1.1 信号分类及描述

1.1.1 信号的分类

信号可按不同的标准进行分类。根据信号随时间的变化规律，可把信号分为确定性信号与非确定性信号；根据时间变量的取值是否连续，可分为连续信号和离散信号；根据信号在有限区间具有有限的能量还是功率，可分为能量信号和功率信号。

1. 确定性信号与随机信号

1) 确定性信号

若信号可表示为一个确定的时间函数，任何时刻都有确定的值，这种信号称为确定性信号。确定性信号又可分为周期信号和非周期信号。

(1) 周期信号

按一定时间间隔周而复始、重复出现的信号称为周期信号，其数学表达式为：

$$x(t) = x(t + nT_0) \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1-1)$$

式中 T_0 ——信号的周期。

例如, 一个单自由度无阻尼的质量-弹簧振动系统(如图 1-1 所示)的位移信号 $x(t)$ 就是一种最典型的周期信号, 可用下式来确定质点的瞬时位置:

$$x(t) = A \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t + \varphi_0\right) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1-2)$$

式中 A ——振幅的最大值;

k ——弹簧刚度;

m ——质量;

φ_0 ——初始相角;

$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ——振动系统的固有圆频率。

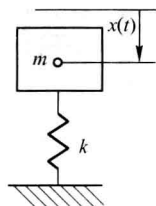


图 1-1 单自由度振动系统

也可以用 $x(t)-t$ 曲线来描述这一位移随时间变化的过程(如图 1-2 所示)。工程上将这种按正弦(或余弦)规律变化的最简单的周期信号称为谐波信号, 它具有单一的频率 $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ 。

由若干个频率比为有理数的正弦信号叠加而成, 合成后仍存在公共周期的信号称为一般周期信号或复杂周期信号(如图 1-3 所示)。

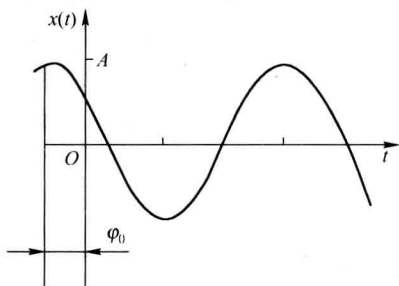


图 1-2 单一频率的周期信号波形

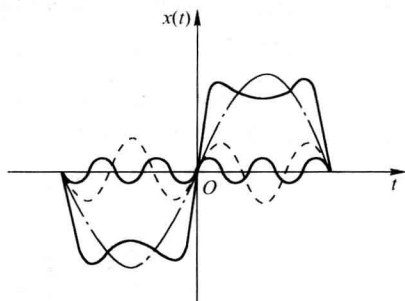


图 1-3 由 1, 3, 5 次谐波叠加的方波波形

(2) 非周期信号

确定性信号中不具有周期重复性的信号称为非周期信号, 它分为准周期信号和瞬变非周期信号两种。

准周期信号是由两种以上的周期信号叠加而成的, 但其组成分量之间无法找到公共周期, 因而无法按某一时间间隔周而复始重复出现。除准周期信号之外的其他非周期信号是一些在一定时间区间内存在, 或随着时间的增长而衰减至零的信号, 统称为瞬变非周期信号或指数衰减瞬变信号。图 1-1 所示的振动系统若加上阻尼装置, 其质点位移 $x(t)$ 可用下式表示:

$$x(t) = Ae^{-at} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1-3)$$

其波形如图 1-4 所示, 它是一种常见的瞬变非周期信号, 为指数衰减振荡信号, 随时间的无限增加而衰减至零。

虽然任何确定性信号都可以用一个时间函数(或表达式)来描述, 但由于工程实际中的信号一般都是比较复杂的, 所以当直接对其原始时间函数进行分析描述有困难时, 可以将

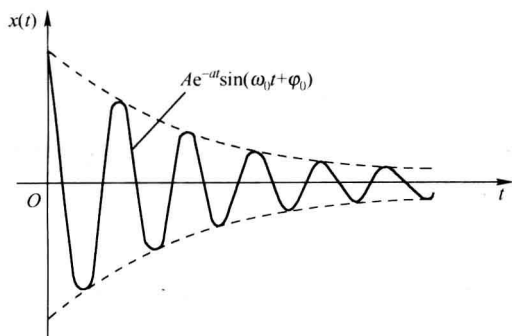


图 1-4 指数衰减振荡信号波形

其分解成某种基本函数之和的形式或按某种级数展开,所采用的基本函数必须是易于实现和分析的简单函数。正弦函数就是广泛应用的一种基本函数。

2) 随机信号

无法用明确的数学解析关系式描述的信号称为非确定性信号,这种信号通常又称为随机信号。

随机信号在客观世界中普遍存在,在工程测试中更是大量出现,如在道路上行驶的车辆所受到的振动、切削材质不均匀的工件时所产生的切削力都属于这类信号。它们的特点是每次的观测结果都不一样,只是许多可能的结果中的一种,未来任何瞬时的精确值均不能预测,所以也无法用实验的方法重复再现,但其值的变动服从统计规律。所以,这类信号需要用统计的特征参数来描述,这些统计特征参数主要有均值、方差、概率密度函数等一些数字特征量及相关函数和功率谱密度函数等。根据某统计特征参数的特点,随机信号可分为平稳随机信号和非平稳随机信号两类。其中,平稳随机信号又可分为各态历经随机信号和非各态历经随机信号。

2. 连续信号与离散信号

无论周期信号还是非周期信号,从时间变量的取值是否连续出发,又可分为连续信号和离散信号。如信号在所有连续时间上均有定义,则称为连续信号(如图1-5所示);若信号的取值仅在一些离散的时间点上有定义,则称离散信号(如图1-6所示)。

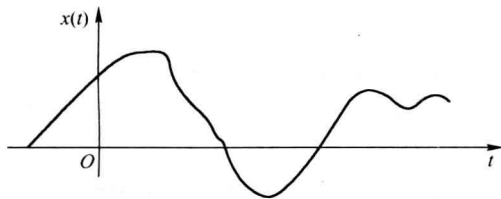


图 1-5 连续信号

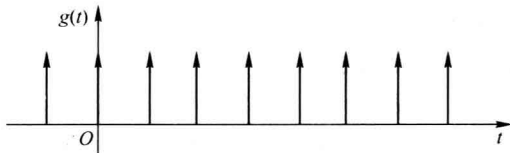


图 1-6 离散信号

若连续信号的幅值也是连续的,称为模拟信号;若离散信号的幅值也是离散的,则称为数字信号。数字计算机的输入、输出都是数字信号。在实际应用中,连续信号和模拟信号两个名词常常不予区分,离散信号和数字信号也往往通用。

3. 能量信号与功率信号

在非电量测量中,常把被测信号转换为电压或电流信号来处理。电压信号 $x(t)$ 加到电

阻 R 上, 其瞬时功率 $P(t) = x^2(t)/R$ 。当 $R=1$ 时, $P(t) = x^2(t)$ 。瞬时功率对时间的积分就是信号在该积分时间内的能量。由此, 不考虑信号的实际量纲, 而把信号 $x(t)$ 的平方 $x^2(t)$ 及其对时间的积分分别称为信号的功率和能量。

在所分析区间 $(-\infty, +\infty)$ 能量为有限值的信号称为能量有限信号, 简称能量信号, 如矩形脉冲信号、衰减指数函数等。此时, $x(t)$ 满足条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt < \infty \quad (1-4)$$

有许多信号, 如周期信号、随机信号等, 它们在区间 $(-\infty, +\infty)$ 能量不是有限值, 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt \rightarrow \infty \quad (1-5)$$

但它们在有限区间 (t_1, t_2) 的平均功率是有限的, 即

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt < \infty \quad (1-6)$$

这种信号称为功率有限信号, 或功率信号。

图 1-1 所示振动系统的位移信号 $x(t)$ 就是能量无限的正弦信号, 但在一定时间区间内其功率却是有限的。如该系统加上阻尼装置, 其振动能量随时间而衰减 (如图 1-4 所示), 这时, 位移信号就变成能量有限信号了。

需要注意的是信号的能量和功率, 未必具有真实物理功率和能量的量纲。

1.1.2 信号的时域描述和频域描述

为了从信号中提取某种有用的信息, 需要对其进行必要的分析和处理。所谓“信号分析”, 就是采取各种物理的或数学的方法提取有用信息的过程。为了实现这个过程, 需要对原始信号进行各种不同变量域的数学变换, 以研究信号的构成或特征参数的估计等。

通常以时间域 (简称时域) 和频率域 (简称频域) 来描述信号。直接观测或记录的信号一般是随时间变化的物理量, 即以时间作为独立变量, 称为信号的时域描述。时域描述是信号最直接的描述方法, 它只能反映信号的幅值随时间变化的特征, 而不能明确揭示信号的频率组成关系。而机械工程中, 大量的有用信息 (如振动、噪声等) 均与频率有关。为了研究信号的频率组成和各频率成分的幅值 (或能量) 大小、相位关系, 就要把时域信号通过适当的数学方法处理变成以频率 f (或圆频率 ω) 为独立变量的, 相应的幅值或相位为因变量的频域描述, 这种描述方法称为信号的频域描述。频域分析对于研究诸如被测对象的振动特性、振型和动力反应等问题十分重要。

对于连续系统的信号, 时域信号到频域信号的转换常采用傅里叶变换和拉普拉斯变换; 对离散系统的信号则采用 Z 变换。频域分析将时域分析中的微分或差分方程转换为代数方程, 有利于问题的分析。

信号的各种描述方法仅是从不同的角度去认识同一事物, 它们相互间可以通过一定的数学关系进行转换。图 1-7 形象地表示出由一系列幅值和频率不等、相角为零的正弦信号叠加而成的周期方波信号的时域和频域描述方法之间的关系。

需要指出的是, 由于电子计算机及其软件的发展, 特别是快速傅里叶变换 (FFT) 的应用, “信号分析” 这一过程在今天已基本上由以计算机为核心的测试仪器来完成。