

上海市本科教育高地建设
机械制造及其自动化系列教材

机械工程测试技术基础

主 编 杜向阳
副主编 周渝斌

清华大学出版社

上海市本科教育高地建设
机械制造及其自动化系列教材

机械工程测试技术基础

主 编 杜向阳
副主编 周渝斌

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是一本介绍检测技术和检测系统的专业书,全书共有10章,除第1章现代测试技术概述外,分5个部分。第1部分(第2、3章)主要介绍信号的特性、测试装置的输入输出特性等基础理论知识。第2部分(第4章)介绍9种常用及先进的检测技术:电阻式、电感式、涡流式、电容式、压电式、热敏电阻式、热电偶式、光电式、数字式检测技术,除了介绍一般性检测原理外,还列举了一些应用实例。第3部分(第5、6章)介绍中间信号获取、调理技术,分模拟信号和数字信号两大类,除了介绍常规的电桥、滤波、放大等信号获取、处理环节外,还综合分析了信号数字化过程中的各种误差种类以及处理等各种提高检测性能的方法和技术。第4部分(第7、8章)介绍信号分析、误差处理技术。第5部分(第9、10章)对现代先进的计算机检测技术作了一个介绍,如虚拟仪器及LabVIEW技术、嵌入式系统与开发等相关内容。

本书以应用型本科教育为主要目的,力求知识的全面性、应用性、实用性,是自动化、机械、仪器仪表、测控等专业的必修课教材,也可供其他专业(如力学、化工、生物医学和冶金等)选用。

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

机械工程测试技术基础/杜向阳主编. —北京:清华大学出版社,2009.9
(上海市本科教育高地建设机械制造及其自动化系列教材)
ISBN 978-7-302-20706-1

I. 机… II. 杜… III. 机械工程—测试技术—高等学校—教材 IV. TG806
中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第134300号

责任编辑:庄红权
责任校对:赵丽敏
责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦A座
http://www.tup.com.cn 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:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:15.75 字 数:378千字
版 次:2009年9月第1版 印 次:2009年9月第1次印刷
印 数:1~4000
定 价:29.80元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。
联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:032782-01

上海市本科教育高地建设
机械制造及其自动化系列教材编写委员会

顾 问 陈关龙

主 任 程武山

副主任 何法江

编 委 王明红 蔡颖玲 陆 宁 陆 文

秘 书 周玉凤

序言



进入 21 世纪以来,我国制造业得到了飞速发展。中国已成为世界制造业大国,正面临从制造业大国向制造业强国转型的关键时期。培养大批适应中国机械工业发展的优秀工程技术人才,是实现这一重大转变的关键。

遵循高等教育、人才培养和社会主义市场经济的规律,围绕《上海优先发展先进制造业行动方案》,紧贴区域经济和社会需求的发展,上海工程技术大学机械工程学院抓住“上海市机械制造及其自动化本科教育高地建设”这一机遇,把握先进制造业和现代服务业互补、融合的趋势,把打造工程本位的复合应用型人才培养基地作为高地建设的核心,把培养具有深厚的科学理论基础和一定的工程实践能力及创新能力的优秀的复合应用型人才——生产一线工程师,作为高地建设的战略发展目标。

正是基于上述考虑,本编写委员会联合清华大学出版社推出“上海市本科教育高地建设机械制造及其自动化系列教材”,希望根据“以生为本,以师为重,以教为基,以训为媒,突出工程实践”的教育思想理念和当前的科技水平和社会发展的需求,精心策划和编写本系列教材,培养出更多视野宽、基础厚、素质高、能力强和富于创造性的工程技术人才。

本系列教材的编写,注重文字通顺,深入浅出,图文并茂,表格清晰,符合国家与部门标准。在编写时,作者重视基础性知识,精选传统内容,使传统内容与新知识之间建立起良好的知识构架;重视处理好教材各章节间的内部逻辑关系,力求符合学生的认识规律,使学习过程变得顺理成章;重视工程实践与教学实验,改变原教材过于偏重理论知识的倾向,力图引导学生通过实践训练,发展自己的工程实践能力;倡导创新实践训练,引导学生发现问题、提出问题、分析问题和解决问题,培养创新思维能力和团队协作能力。

本系列教材的编写和出版,是上海市本科教育高地建设课程和教材改革中的一种尝试,教材中一定会存在不足之处,希望全国同行和广大读者不断提出宝贵意见,使我们编写出的教材能更好地为教育教学改革服务,更好地为培养高质量的人才服务。

陈关龙

2008 年 12 月

前言

检测技术和检测系统是获取各种物理信息的必要手段。在当今的信息时代,各行各业的工程技术人员都必须具备这方面的专业知识。由于其重要性,这门课程被设为大专院校的一门重要的必修课。检测技术是以物理学、电子学、微电子学、自动控制、计算机等为基础的一门综合性很强的技术学科。它的发展依赖于生产工艺水平的提高、大规模和超大规模集成电路的发展、计算机技术的发展和各种新型材料的出现等;另一方面,人们对研究对象更深入的了解以及研究领域的进一步拓宽,也推动了检测技术的发展。从设立这门课程至今已有近30年的历史。在这30年中,检测技术得到了飞速发展,应用面也越来越广,一些传统的检测技术,近年来多有新的发展和应用。例如,涡流检测技术虽然是一种很传统的检测方法,主要用于测距,但是现在发展到远程涡流检测、涡流层析图像检测等;近年来还产生了一些新的传感元件和应用技术,如Z-半导体敏感元件、压电生物传感器等;数学式传感器的出现对传统检测技术也产生了一定的冲击,为未来检测技术的发展注入了新的元素。我们认为科学技术发展到今天,这门课程也应同步发展,有必要让学生了解和掌握这些新技术、新器件和新方法,以便学生毕业后踏上工作岗位,就能跟上时代的步伐。在编写此书时,考虑到当今培养的学生应是具有宽厚的专业基础知识的综合性人才,因此,全书对各种检测技术除了进行原理性介绍以外,突出在应用方面的介绍。这不仅能满足学生的好奇心以及对新事物强烈渴求的愿望,也可以提高他们检测基础方面的完整性。本书力求能使我们培养出来的学生适应能力更强、发展空间更大。本书考虑到读者基础知识的差异,在内容上注重全面性及实用性,既可作为大学本科的教材,也可作为大学专科的教材,适合机械、仪器仪表、自动控制、力学、热工、化工、冶金和生物医学等学科,教学内容可根据学时数及专业需求进行选择。

本书由杜向阳担任主编、周渝斌担任副主编。杜向阳编写第1、2、3章,4.1节~4.8节、4.10节、5.1节~5.5节以及第6、7、8章,周渝斌编写4.9节、5.6节以及第9、10章。施海峰担任指导工作。

由于我们的水平有限,加之检测技术发展迅速,书中难免有不妥和错误之处,殷切希望各院校师生和广大读者提出宝贵意见。

编者

2009年8月

目录

1	现代测试技术概述	1
1.1	测试技术的地位及作用	1
1.2	测试系统的组成	2
1.3	现代测试技术的发展动向	3
1.3.1	传感器的发展趋势	3
1.3.2	测试技术的发展趋势	4
	复习与思考	5
2	信号及其描述	6
2.1	信号的描述和分类	6
2.2	周期信号	9
2.3	非周期信号	10
2.4	随机信号	12
	复习与思考	15
3	测试装置基本特性	17
3.1	概述	17
3.2	测量系统的静态特性	18
3.3	测量系统的动态特性	20
3.4	实现不失真测量的条件	30
3.5	测量系统动态特性参数的测定	32
	复习与思考	34
4	传感器	35
4.1	概述	35
4.2	电阻式传感器	37
4.2.1	电位器式电阻传感器	37
4.2.2	应变式电阻传感器	38

4.2.3	电阻式传感器应用举例	42
4.2.4	粘合剂和应变片的粘贴技术	45
4.3	电感式传感器	46
4.3.1	自感传感器	46
4.3.2	差动变压器式电感传感器(互感式电感传感器)	49
4.3.3	电感式传感器的特点及应用	49
4.4	涡流式传感器	51
4.4.1	涡电流效应	51
4.4.2	涡流式传感器的类型	52
4.4.3	几种典型的涡流传感器	53
4.4.4	测量电路	56
4.4.5	涡流式传感器的应用	57
4.5	电容式传感器	61
4.5.1	基本工作原理	61
4.5.2	结构形式	62
4.5.3	输出特性	63
4.5.4	电容式传感器的应用	67
4.6	热敏电阻	70
4.7	压电式传感器	76
4.7.1	压电效应	76
4.7.2	压电材料	77
4.7.3	压电式传感器及其等效电路	79
4.7.4	压电式传感器的信号调节电路	80
4.7.5	压电式传感器的应用	80
4.8	热电偶	87
4.9	光电传感器	91
4.9.1	光电传感器原理	91
4.9.2	外光电效应器件	92
4.9.3	内光电效应器件	94
4.9.4	CCD/CMOS 图像传感器	96
4.9.5	常见光电传感器的应用举例	97
4.10	数字式传感器	99
4.10.1	编码器	99
4.10.2	感应同步器	104
4.10.3	计量光栅	108
4.10.4	频率式数字传感器	112
4.10.5	智能传感器简介	117
	复习与思考	119

5	模拟信号的获取与处理	121
5.1	概述	121
5.2	电桥	121
5.3	信号的调制与解调	126
5.4	信号的放大与滤波	130
5.4.1	信号放大	130
5.4.2	信号滤波	134
5.5	模拟信号的显示与记录	138
5.6	数据传输技术	142
	复习与思考	147
6	数字信号的获取与处理	149
6.1	数字信号获取与处理系统简介	149
6.2	模拟信号的数字化	150
6.3	数字信号的预处理	153
6.4	数字信号处理	154
6.4.1	信号的时域截断与泄漏	154
6.4.2	离散傅里叶变换及 FFT	157
6.4.3	细化 FFT	160
	复习与思考	162
7	信号分析	163
7.1	常用稳态信号分析方法	163
7.1.1	时域分析方法	163
7.1.2	频谱分析方法	165
7.1.3	倒谱分析方法	169
7.1.4	相关分析方法	170
7.1.5	功率谱密度分析	177
7.1.6	时序分析方法	181
7.2	常用的非稳态信号分析方法	182
7.2.1	非稳态信号的时频特性	182
7.2.2	时频分析基本原理及方法	184
	复习与思考	190
8	测量误差分析	192
8.1	测量误差	192
8.1.1	真值与测量误差	192
8.1.2	测量误差分类	193
8.2	系统误差的发现与剔除	194

8.2.1	系统误差的发现准则	195
8.2.2	系统误差的消除	196
8.3	随机误差分析	198
8.4	粗大误差的判定与剔除	201
8.5	测量结果误差的估计	203
8.5.1	表征测量结果质量的指标	203
8.5.2	直接测量结果的表达及误差估计	204
8.5.3	间接测量结果的误差估计	205
8.6	误差分配与测量方案的选择	208
	复习与思考	209
9	虚拟仪器及 LabVIEW 技术	211
9.1	虚拟仪器概述	211
9.2	虚拟仪器的分类	213
9.3	虚拟仪器软件 LabVIEW	214
9.4	用 LabVIEW 进行测试仪器编程实例	216
9.5	程序调试技术	217
9.6	LabVIEW 测量与控制模块	218
10	嵌入式系统与开发	219
10.1	主控计算单元 MCU 的发展	219
10.2	单片机基础知识	223
10.3	ARM 基础知识	230
10.4	MIPS 基础知识	234
10.5	嵌入式操作系统与嵌入式编程	235
	参考文献	240

1



现代测试技术概述

1.1 测试技术的地位及作用

人类认识客观世界和掌握自然规律的实践途径之一是试验性的测量——测试。在科学研究中,测试可获得研究对象的原始感性材料,从而为形成自然科学理论奠定基础;同时,测试又是发展和检验自然科学理论的实践基础。在工程技术领域,由于实际研究对象的复杂性,很多问题难以进行完善的理论分析、推导和计算,所以必须依靠试验来获得研究对象的状态、变化和特征等,这正是通过测试来实现的。

测试(measurement and test)是具有试验性质的测量。测量是为确定被测对象的量值而进行的试验过程;试验是对迄今未知事物的探索性认识过程。因此,测试技术包括测量和试验两方面。

测试技术正是研究有关测试方法、测试手段和测试理论的科学,它应用于不同的领域并在各个自然科学研究领域起着重要作用。从尖端技术到生活中的家电,从国防到民用,都离不开测试技术。先进的测试技术也是生产系统不可缺少的一个组成部分。

在机械加工中,数控机床和生产流程的各个阶段都离不开参数的测量。如在自适应控制磨床中,需要连续测定加工过程中的力矩、切削温度、工具的挠度、切削力的大小等参数,由计算机控制以达到最好的加工效果。在军事中,测试技术对武器装备发展的支撑作用越来越突出,综合测试能力已经成为决定武器装备作战效能的重要因素。例如,在发射炮弹的一瞬间,就需要采用多种测试方法来测量各种参数,诸如膛压的变化过程、弹底压力、弹后压力波、身管应力分布、弹丸在膛内运动的轴向加速度和炮口激波压力等,还有外弹道测试和终点弹道测试。现代科技发展的一个鲜明特征就是航空航天技术的迅猛发展,测试技术是航空航天技术发展不可缺少的重要部分。现代飞行器装备着各种各样的显示系统和控制系统,反映飞行器飞行参数和姿态、发动机工作状态的各种物理参数都要进行检测。美国阿波罗飞行器和航天飞船的运载火箭部分需检测加速度、声学、温度、压力、振动、流量、应变等总共 3200 个参数。一架新型飞机测量参数高达几千甚至上万个,包括种类有:各种模拟量参数、数字量信号、各种航空电子总线信号、多路视频和语音、外部测试参数等。在交通领域,一辆现代化汽车需要对车速、方位、转矩、振动、油压、油量、温度等参数进行检测。交通监视系统更是一个典型的监测系统。

1.2 测试系统的组成

测试的目的就是获得研究对象的状态、运动和特征等方面的信息。测试技术的种类以传感器输出的形式分,常见的有机械测试技术、光学测试技术和电测技术。电测技术显示出突出的优势,具有下列主要优点:

- (1) 准确度和灵敏度高,测量范围广;
- (2) 电子装置惯性小,测量的反应速度快,具有比较宽的频率范围;
- (3) 能自动连续地进行测量,便于自动记录,并能根据测量结果,配合调节装置,进行自动调节和自动控制;
- (4) 采用微处理器组成智能化仪器,可与微型计算机一起构成测量系统,实现数据处理,误差校正,自监视和仪器校准功能;
- (5) 可以进行远距离测量,从而能实现集中控制和遥远控制;
- (6) 从被测对象取用功率小,甚至完全不取用功率,也可以进行无接触测量,减少对被测对象的影响,提高测量精度。

电测技术的任务,就是把待测的非电量,通过一种器件或装置变换成与它有关的电信号(电压、电流、频率等),然后对该电信号进行测量,从而通过非电量与电信号之间的函数关系来确定被测非电量的值。

测试系统的结构框图如图 1.1 所示,图(a)是一般测试系统框图,图(b)是反馈测试系统框图。它由传感器、信号变换、信号分析与处理或微型计算机等环节组成,或经信号变换环节后,直接显示和记录。

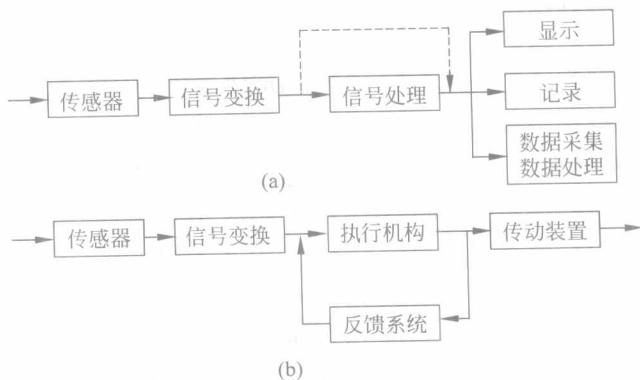


图 1.1 测试系统的结构框图

(a) 一般测试系统; (b) 反馈测试系统

传感器是将外界信息按一定规律转换成可以被该测试系统识别的物理形式的装置。电测技术的传感器是将外界信息按一定规律转换成电信号的装置,它是实现自动检测和自动控制的首要环节。目前,除利用传统的结构型传感器外,大量物性型传感器被广泛采用。结构型传感器是以物体(如金属膜片)的变形或位移来检测被测量的。物性型传感器是利用材料固有特性来实现对外界信息的检测,它有半导体类、陶瓷类、光纤类及其他新型材料等。世界上先进国家都把传感器技术列为核心技术。

信号变换环节是对传感器输出的信号进行加工,如将信号放大、调制与解调、阻抗变换、线性化、将信号变换为电压或电流等。原始信号经这个环节处理后,就变换成便于传输、记录、显示、转换以及可进一步后续处理的信号。这个环节常用的模拟电路是电桥电路、相敏电路、测量放大器、振荡器等;常用的数字电路有门电路、各种触发器、A/D 和 D/A 转换器等。

按照测量信号的种类,测试可以分为静态测试与动态测试。对于动态信号的测量,即动态测试,在现代测试中已占了很大的比重,它常常需要对测试得到的信号进行分析、计算和处理,从原始的测试信号中提取表征被测对象某一方面本质信息的特征量,以利于对动态过程作更深入的了解。这个领域中采用的仪器有频谱分析仪、波形分析仪、实时信号分析仪、快速傅里叶变换仪等。测试系统要测出被测对象中某些特征性信息,要求既不失真,也不受干扰。这就要求系统本身既具有不失真传输信号的能力,又具有在外界各种干扰情况下提取和辨识信号中所包含的有用信息的能力。

1.3 现代测试技术的发展动向

1.3.1 传感器的发展趋势

作为直接与被测量接触的测试系统第一环节的传感器,其主要发展趋势有:①开展基础研究,探索新理论,发现新现象,开发传感器的新材料和新工艺;②实现传感器的集成化、多功能化和智能化;③研究生物感官,开发仿生传感器。

1. 发现新现象

传感器工作的基本原理就是各种物理现象、化学反应和生物效应,所以发现新现象与新效应是发展传感器技术、研制新型传感器的理论基础。例如,日本夏普公司利用超导技术研究成功高温超导磁传感器,是传感器技术的重大突破,其灵敏度比霍尔器件高,仅次于超量子干涉器件(SQUID),而其制造工艺远比超量子干涉器件简单,可用于磁成像技术,具有广泛的推广价值。

2. 开发新材料

材料是传感器的重要物质基础,新型的敏感元件材料会给传感器带来新的功能或特性,特别是物性敏感元件材料。例如半导体氧化物可以制造各种气体传感器;而陶瓷传感器工作温度远高于半导体;光导纤维的应用是传感器材料的重要突破,用它研制的传感器具有突出特点;高分子聚合物材料作为传感器敏感元件材料的研究已引起国内外学者的极大兴趣。

3. 采用微细加工技术

微细加工技术又称微机械加工技术,是随着集成电路(IC)制造技术发展起来的,可使被加工的敏感结构的尺寸达到微米、亚微米级。微型传感器就是利用该技术加工制作的特征尺寸为微米级的各类传感器的总称,是近代先进的微电子机械系统(MEMS)中的重要组成部分。美国研制成功的 MEMS 加速度计能承受火炮发射时产生的近 $2 \times 10^5 g$ (g 为重力加速度)的加速度。

4. 智能传感器

智能传感器是传统传感器与微处理器赋予智能的结合,兼有信息检测与信息处理的功能。智能传感器充分利用微处理器的计算和存储功能,对传感器的数据进行处理并能对它

的内部进行调节使其采集的数据最佳。

智能传感器的结构可以是集成的,也可以是分离的。按结构可以分为集成式、混合式和模块式三种形式。集成智能传感器是将传感器与微处理器、信号调理电路做在同一芯片上所构成的,集成度高、体积小。混合智能传感器是将传感器的微处理器、信号调理电路做在不同芯片上构成的。模块智能传感器是由许多相互独立的模块组成,如将微计算机、信号调理电路模块、输出电路模块、显示电路模块与传感器装配在同一壳体内,组成模块智能传感器。

5. 多功能传感器

多功能传感器能转换多个不同物理量,对多个参数进行测量。如同时检测钠、钾和氢离子的传感器,其尺寸为 $2.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,可直接用导管送进心脏内进行检测。检测血液中的钠、钾和氢离子的浓度,对诊断心血管疾病非常有意义。

6. 仿生传感器

结合物理、化学和生物各方面作用原理,在整体上具有优良特性的复杂系统就是大自然创造的生物。不仅人类集多种感官于一身,还有多种生物具有奇异功能,尤其有些动物的感官功能大大超过了当今传感器技术所能实现的范围。深入广泛研究生物界具有的感知能力的机理,开发出仿生传感器必然能使传感器技术有巨大发展。

1.3.2 测试技术的发展趋势

随着材料科学、微电子技术和计算机技术的发展,测试技术也在迅速发展,从单一学科向多学科相互借鉴和渗透,形成综合各学科成果的测量系统。智能传感器和计算机技术的发展和运用,使得测试系统向自动化、智能化和网络化的方向发展;测试系统的在线实时测试能力在迅速提高;测试与控制密切结合,实现“以信息流控制能量流和物质流”。

测试项目和测试范围与日俱增,测试对象趋向复杂,测试速度和测试精度要求不断提高,这就使传统的单参数测试已经不能适应科技发展的要求,迫切要求测试技术不断改进与完善,自动测试系统是适应要求的产物。自动测试系统(automatic test system, ATS)是指以计算机为核心,在程控指令的指挥下,能自动完成某种测试任务而组合起来的测试仪器和其他设备的有机整体。自动测试系统是将测试技术与计算机技术和通信技术有机的结合在一起的产物。它的发展大体经历了三个阶段:

第一阶段,常见的有数据采集系统、自动分析系统等。

第二阶段,采用了标准接口及总线系统,具有代表性的是 CAMAC 标准接口系统和 IEEE-488 标准接口系统,系统组建方便,可灵活地增加测试内容,得到了广泛的应用。

第三阶段,以通用计算机为核心,配以一定的测试硬件电路和应用软件,共同完成测试仪器或仪器系统的任务。这种插卡式仪器降低了成本,更新方便,在测试系统和网络化方面可发挥巨大作用。

以计算机为核心的更高层次、更高水平的虚拟仪器系统是自动测试系统的发展方向。虚拟仪器(virtual instrumentation)是一些借助于通用的模拟量及数字量输入输出平台,通过计算机软件,按已知的数学模型和时序实现的,具有信号测量、控制、变换、分析、显示、输出等全部或部分功能的智能化输入输出系统。典型特征是不脱离计算机而独立工作。它通常由通用硬件平台、软件平台、计算机以及数学模型几方面组成。典型的虚拟仪器模式可以

理解为除了信号的输入和输出以外,仪器的其他操作、测量、控制、变换、分析、显示等功能均由软件来实现的一种计算机管理的数字化仪器。目前,主流的虚拟仪器主要是 VXI、PXI、各种计算机总线(如 PCI、ISA、RS232、USB)等总线标准的各种插卡和仪器模块,工作方式多是将各种总线式仪器插入有计算机的主机箱内,完成与非虚拟仪器相同的功能,具有同类的性能,将一部分仪器功能软件化。

复习与思考

1. 简述测试的目的。
2. 简述电测技术的主要优点。
3. 简述传感技术和测试系统的形式和发展方向。
4. 举例说明现代测试技术在工业自动化生产中的应用。

2

信号及其描述

生产实践和科学试验中,通过测量将获得大量被测对象的信号。这些信号常以随时间变化的波形表达出来。“信号是信息的载体”,这些信号中,包含着我们所需要的信息,但在大多数情况下,仅通过对这些波形的一般观察,很难获取所需要的信息。信号分析的目的是突出、识别、提取信号中的有用信息。信号的频谱分析,是最经典的信号分析技术之一。

2.1 信号的描述和分类

1. 信号的时域描述和频域描述

直接观测或记录到的信号,一般是以时间为独立变量的,称其为信号的时域描述。信号时域描述能反映信号幅值随时间变化的关系,而不能明显揭示信号的频率组成关系。为了研究信号的频率结构和各频率成分的幅值、相位关系,应对信号进行频谱分析,把信号的时域描述通过适当方法变成信号的频域描述,即以频率为独立变量来表示信号。我们把信号中各次谐波的幅值和相位随频率不同而变化的规律叫信号的频谱特性,其中幅值随频率变化的规律为幅频特性,相位随频率变化的规律为相频特性。以频率为横坐标,以对应的幅值或相位为纵坐标画出的图形叫做信号的频谱图。

例如,图 2.1 是一个周期方波的一种时域描述,而下式则是其时域描述的另一种形式:

$$x(t) = \begin{cases} x(t + nT_0) \\ A, & 0 < t < \frac{T_0}{2} \\ -A, & -\frac{T_0}{2} < t < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

若该周期方波应用傅里叶级数展开,即得

$$x(t) = \frac{4A}{\pi} \left(\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \dots \right) \quad (2.2)$$

式中, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ 。

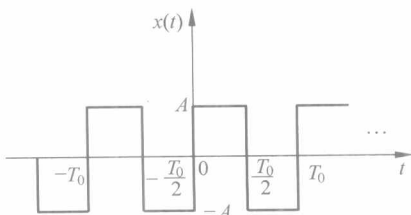


图 2.1 周期方波

此式表明该周期方波是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。实际上此式可改写成

$$x(t) = \frac{4A}{\pi} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n\omega_0 t \right) \quad (2.3)$$

其中 $\omega = n\omega_0, n=1, 3, 5, \dots$, 可见, 此式除 t 之外尚有另一变量 ω (各正弦成分的频率)。若视 t 为参变量, 以 ω 为独立变量, 则此式即为该周期方波的频域描述。在信号分析中, 将组成信号的各频率成分找出来, 按序排列, 得出信号的“频谱”。若以频率为横坐标, 分别以幅值或相位为纵坐标, 便分别得到信号的幅频谱或相频谱。图 2.2 示出了该周期方波的时域图形、幅频谱和相频谱三者的关系。

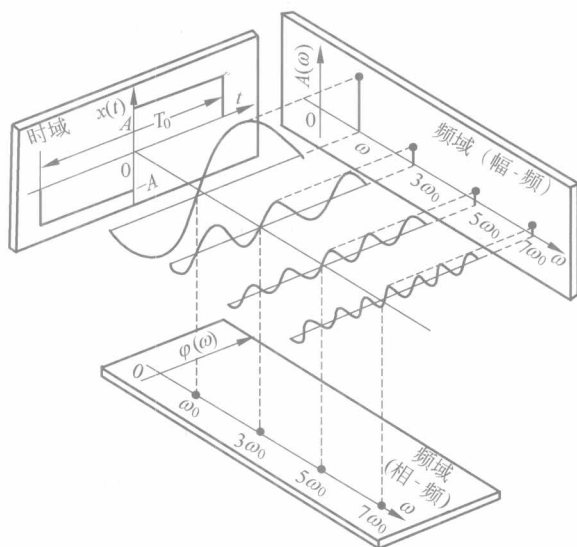


图 2.2 周期方波的描述

表 2.1 列出两个同周期方波及其幅频谱、相频谱。不难看出, 在时域中, 两方波除彼此相对平移 $T_0/4$ 之外, 其余完全一样。但两者的幅频谱虽相同, 相频谱却不同。平移使各频率分量产生了 $n\pi/2$ 相角, n 为谐波次数。

表 2.1 周期方波的频谱

时域波形	幅频谱	相频谱