



电气自动化技能型人才实训系列

DIANQIZIDONGHUA
JINENGXINGRENCAI
SHIXUNXILIE

电气测试技术

郝忠敬 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



电气自动化技能型人才实训系列

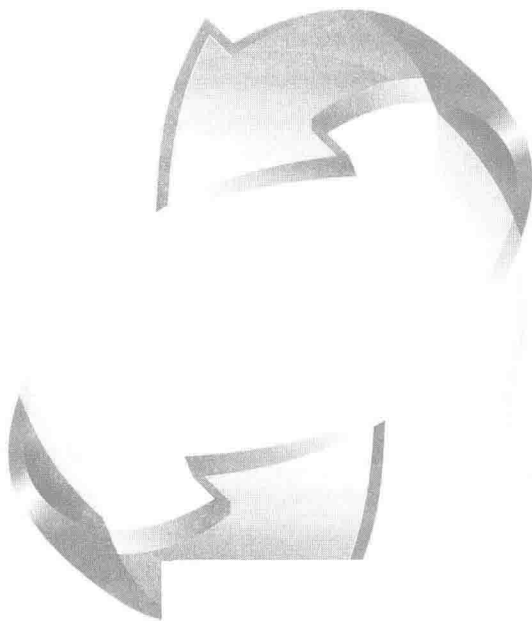
电气测试技术

主 编 郝忠敬

副主编 陈珍萍 高育芳

参 编 伍 龙 刘继承 孟翔飞

主 审 胡德霖 徐惠钢



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书由浅入深地介绍了电气检测技术的基本原理及应用,按照顺序先后介绍了概论,电气测试基础知识,温度检测,压力检测,机械位移检测,速度、加速度、振动检测,电压与电流检测,时间与频率检测,电功率和功率因数检测,磁学量检测,现代传感器,电气测量抗干扰技术等内容。

本书适合作高等学校中电气工程与自动化、机械工程及自动化、电子与信息工程、计算机工程等工科专业的教材,也可供科研、设计单位及企业等有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气测试技术/郝忠敬主编. —北京:中国电力出版社,2017.8

(电气自动化技能型人才实训系列)

ISBN 978-7-5198-0976-8

I. ①电… II. ①郝… III. ①电气测量 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 167464 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:崔素媛(Cuisuyuan@gmail.com)

责任校对:王小鹏

装帧设计:赵姗姗

责任印制:蔺义舟

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2017 年 8 月第一版

印 次:2017 年 8 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:16.5

字 数:440 千字

印 数:0001—2000 册

定 价:45.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前 言

随着社会进步和科学技术的发展,电气测试技术发生着巨大的变革,电气测试范围从低中压测试向高压测试方向发展,电气测试内容从电磁量测试向非电量测试、复合电量测试方向发展,电气测试模式也从传统测试向智能测试方向发展。

近年来,电气测试技术发生了很大变化,计算机网络技术以及智能测量等技术的发展为现代电气测试技术提供了新的支撑条件。

本书在满足教育部教学指导委员会制定的教学基本要求的基础上,参考教育部制定的《“卓越工程师教育培养计划”通用标准(征求意见稿)》,针对课程特点,本书的编写思路从工科学生的人才培养目标和学生特点出发,秉承“学以致用”的原则,以“激发学生兴趣”为着眼点。本书在教学使用过程中,并非全部内容都要讲解,可根据专业、课时进行删减。

本书为“电气自动化技能型人才实训系列”之一。“电气自动化技能型人才实训系列”为电气类高技能人才的培训教材,以培养学生实际综合动手能力为核心,采取以工作任务为载体的项目教学方式,淡化理论,强化应用方法和技能的培养。

本书由苏州电器科学研究院股份有限公司郝忠敬担任主编,苏州科技大学陈珍萍、苏州大学高育芳担任副主编,淮南师范学院伍龙以及常熟理工学院刘继承、孟翔飞参加了编写。全书共12章,郝忠敬编写第1、2、11、12章,陈珍萍编写第3、7章,高育芳编写第4、5章,伍龙编写第8、9章,孟翔飞编写第6章,刘继承编写第10章。全书最后由苏州电器科学研究院郝忠敬统稿;苏州电科院胡德霖院长、常熟理工学院电气与自动化工程学院徐惠钢院长审稿。

在编写中,编者参阅了许多专家的教材、著作和论文,并得到了相关同行和企业的支持,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中的缺点和错误及不妥之处在所难免，敬请广大师生和读者批评指正。

编者

2017年6月 苏州

目 录

前言

第1章 概论	1
1.1 电气测试概述	1
1.1.1 测试的任务和作用	1
1.1.2 测试技术研究的内容	1
1.2 电气测试系统的组成	2
1.2.1 传感器	3
1.2.2 信号调理器	3
1.2.3 终端输出器	3
1.3 电气测试信号的描述	3
1.3.1 信号的分类和描述	4
1.3.2 周期信号的频谱	8
1.3.3 非周期信号的频谱	9
1.3.4 傅里叶变换的常用性质	10
1.3.5 几种典型信号的频谱	11
1.4 电气测试技术的发展	13
1.4.1 DPS 应用技术	13
1.4.2 高精度 A/D 转换技术	14
1.4.3 传感器自评估技术	15
1.4.4 多传感器数据融合技术	16
1.4.5 动态误差修正技术	16
习题与思考	18
第2章 电气测试基础知识	19
2.1 电磁量测试基础	19
2.1.1 测试标准	19
2.1.2 测量方法	20
2.1.3 测量结果的表示	21
2.1.4 电学量和电学基准	22
2.2 非电量测试基础	25
2.2.1 传感器的静态特性	25
2.2.2 传感器的动态特性	27

2.2.3	传感器的标定与校准	31
2.3	测量误差分析	32
2.3.1	测量误差的概念和分类	32
2.3.2	测量误差的表示方法	36
2.3.3	测量不确定度	37
	习题与思考	41
第3章	温度检测	42
3.1	温标及测温方法	42
3.1.1	温标	42
3.1.2	常用测温方法	43
3.2	膨胀式温度计	44
3.2.1	双金属温度计	44
3.2.2	压力式温度计	45
3.3	电阻式温度传感器	47
3.3.1	金属热电阻传感器	47
3.3.2	热敏电阻	49
3.4	热电偶	52
3.4.1	热电偶的工作原理	52
3.4.2	热电偶的基本定律	55
3.4.3	热电偶的冷端温度补偿	56
3.5	光纤温度传感器	57
3.5.1	功能型光纤温度传感器	57
3.5.2	传输型光纤温度传感器	60
3.6	红外温度传感器	61
3.6.1	红外测温的原理	61
3.6.2	红外测温的特点	62
3.6.3	常见红外温度传感器	63
3.7	温度传感器的应用	64
3.7.1	浴池水温控制器	64
3.7.2	压电晶体极化温度控制器	65
3.7.3	无触点恒温控制器	65
	习题与思考	66
第4章	压力检测	68
4.1	压力的概念及测量方法	68
4.1.1	压力的概念	68
4.1.2	压力测量方法	69
4.2	应变式压力传感器	70
4.2.1	电阻应变效应	70
4.2.2	电阻应变片	71
4.2.3	电阻应变片的粘贴及温度补偿	72

4.2.4	转换电路	73
4.2.5	应变式压力传感器	75
4.3	压电式压力传感器	77
4.3.1	压电效应	77
4.3.2	压电式压力传感器等效电路和测量电路	81
4.3.3	压电式压力传感器的应用	83
4.4	电容式压力传感器	84
4.4.1	电容式压力传感器的工作原理及特性	84
4.4.2	变极距型电容式压力传感器	84
4.4.3	变面积型电容式压力传感器	85
4.4.4	变介电常数型电容式压力传感器	87
4.4.5	电容式压力传感器的应用	88
4.5	霍尔式压力传感器	91
4.5.1	霍尔效应	91
4.5.2	霍尔式压力传感器工作原理	91
4.5.3	霍尔式压力传感器的应用	92
4.6	电子秤	93
4.6.1	电子秤的工作原理	93
4.6.2	称重传感器的工作原理	94
4.6.3	电子秤的应用	94
4.7	压力传感器的应用	95
	习题与思考	96
第5章	机械位移检测	97
5.1	电容式位移传感器	97
5.2	电感式位移传感器	100
5.3	差动变压器式位移传感器	102
5.4	光栅位移传感器	103
5.4.1	光栅位移传感器	103
5.4.2	感应同步器	104
5.4.3	角数字编码器	106
5.5	位移传感器的应用	108
	习题与思考	110
第6章	速度、加速度、振动检测	111
6.1	速度传感器	111
6.1.1	模拟式转速传感器	111
6.1.2	计数式转速传感器	113
6.2	加速度传感器	116
6.2.1	电容式加速度传感器	116
6.2.2	差动变压器式加速度传感器	116
6.2.3	电阻式加速度传感器	117

6.2.4	霍尔式加速度传感器	117
6.2.5	压电式加速度传感器	118
6.3	振动检测传感器	119
6.3.1	机械振动测试系统的构成	119
6.3.2	单自由度系统的受迫振动	120
6.3.3	由系统的基础运动引起的受迫振动	121
6.3.4	电感式振动传感器	122
6.3.5	电阻式振动传感器	123
6.4	速度、加速度、振动传感器的应用	123
	习题与思考	125
第7章 电压与电流检测		126
7.1	电压与电流测量基本原理	126
7.1.1	直接测量法	126
7.1.2	间接测量法	129
7.2	几种常用的直读式测量仪表	130
7.2.1	磁电系仪表	130
7.2.2	电磁系仪表	134
7.2.3	电动系仪表	136
7.3	电压互感器和电流互感器	138
7.3.1	电压互感器	138
7.3.2	电流互感器	140
7.3.3	电子式互感器	142
7.4	电压与电流检测技术的应用	147
	习题与思考	149
第8章 时间与频率检测		150
8.1	概述	150
8.1.1	时间与频率的基本概念	150
8.1.2	时间与频率标准	151
8.2	频率的频率响应法测量	152
8.2.1	谐振法测量频率	152
8.2.2	电桥法测量频率	153
8.3	时间和频率的数字化测量	154
8.3.1	电子计数器的工作原理	154
8.3.2	频率和频率比的测量	155
8.3.3	时间和时间间隔的测量	156
8.4	电子计数器的误差	158
8.4.1	电子计数器误差的来源	159
8.4.2	测量频率的误差	160
8.4.3	测量周期的误差	161
	习题与思考	161

第9章	电功率和功率因数检测	163
9.1	概述	163
9.1.1	电功率的基本概念	163
9.1.2	交流电路的功率因数	164
9.1.3	功率和功率因数的测量方法	165
9.2	单相功率的检测	165
9.2.1	间接法测量	165
9.2.2	直接法测量	166
9.3	三相功率的检测	167
9.3.1	间接法测量	167
9.3.2	用单相功率表测有功功率	169
9.3.3	用单相功率表测无功功率	170
9.4	功率因数的检测	172
9.4.1	直接测量法	172
9.4.2	间接测量法	172
9.5	电功率和功率因数检测技术的应用	173
	习题与思考	175
第10章	磁学量检测	177
10.1	概述	177
10.1.1	概述	177
10.1.2	磁学基础	178
10.1.3	磁性材料及磁场分类	184
10.1.4	磁学量的测量方法	185
10.1.5	常用测量仪器仪表	186
10.2	磁场测量技术	186
10.2.1	磁感应法	186
10.2.2	霍尔效应法	187
10.2.3	磁通门法	188
10.2.4	其他磁测量法	189
10.3	磁性材料测量	191
10.3.1	磁性材料测量的意义	191
10.3.2	磁性材料特性及其测量特点	191
10.3.3	退磁	192
10.3.4	磁性材料静态特性测量	193
10.3.5	磁性材料动态特性测量	196
10.3.6	磁性材料特性测量电路的发展	198
10.4	磁传感器	199
10.4.1	霍尔元件	199
10.4.2	半导体霍尔元件	200
10.4.3	霍尔元件的应用	201

习题与思考	204
第 11 章 现代传感器	205
11.1 智能传感器	205
11.1.1 智能传感器的功能	205
11.1.2 智能传感器的结构与设计	206
11.1.3 智能传感器的实现	207
11.1.4 智能传感器的应用	208
11.2 微传感器	210
11.2.1 MEMS 与微加工	210
11.2.2 微传感器的概述	211
11.2.3 压阻式微传感器	212
11.2.4 电容式微传感器	214
11.2.5 电感式微传感器	216
11.2.6 热敏电阻式微传感器	217
11.3 网络传感器	217
11.3.1 网络传感器的概念及特点	217
11.3.2 网络传感器的类型	218
11.3.3 基于 IEEE1451 标准的网络传感器	219
11.3.4 网络传感器测控系统的体系结构	222
11.3.5 网络传感器的应用前景	223
习题与思考	224
第 12 章 电气测量抗干扰技术	225
12.1 常见干扰源分析	225
12.1.1 干扰的定义、类型及来源	225
12.1.2 干扰信号的耦合方式	226
12.2 常用的抑制干扰技术	227
12.2.1 差模干扰及抑制技术	228
12.2.2 共模干扰及抑制技术	229
12.2.3 电源引入干扰的抑制	233
12.2.4 其他抑制干扰的措施	235
12.3 电磁兼容	235
12.3.1 电磁兼容含义	235
12.3.2 电磁兼容设计	236
12.3.3 电磁干扰滤波器	246
12.4 电气测量抗干扰技术的应用	249
习题与思考	252
参考文献	253

第1章 概 论



本章重点

通过电气测试概述、电气测试系统的组成、电气测试信号的描述及电气测试技术发展等内容的介绍,使读者对电气测试技术有一个总体概括的了解,为读者今后学习电气测试技术奠定好基础。

1.1 电气测试概述

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。试验是为了解物质的性能或结果进行的试探性操作。因此,测试技术包含测量和试验两个方面。凡需要考查事物的状态、变化和特征等,并要对它进行定量的描述时,都离不开测试工作。电气测试是利用电气技术进行的测量和试验的技术,被测物可以是电磁量,也可以是非电磁量。

人类对客观世界的认识和改造活动总是以测试工作为基础的。测试是人类认识自然、掌握自然规律的实践途径之一,是科学研究中获得感性材料、接受自然信息的途径,是形成、发展和检验自然科学理论的实践基础。人类早期在从事生产活动时,就已经对长度、面积、时间和质量进行测量,其最初的计量单位或是和自身生理特点相联系(如长度),或是和自然环境相联系(如时间)。我国在2000多年前就建立了统一的度量衡制度,这说明测试工作对发展生产和社会交往的重要性。在测试技术发展史中,伽利略不满意古代思想家对宇宙进行哲理性的定性描述,他主张观测和实验,对自然界的现象和运动规律进行定量描述。他开创了实验科学,从而开创了近代意义的自然实验科学。

现代制造工程已从单机自动化和自动生产线发展到柔性制造系统(FMS),并朝着智能化、无人化工厂方向发展。而且生产中除了加工后的自动测量外,还应包括在线测量、智能等。因此,先进的测试技术已成为今天生产系统中不可缺少的一个重要组成部分。

1.1.1 测试的任务和作用

测试技术在科学研究和生产实践中具有极其重要的作用,测试的基本任务和作用如下:

(1) 通过测试,发现科学规律,验证科学理论。科学规律和科学理论必须通过实践的检验,检验过程离不开测试技术。

(2) 为产品设计和设备改造提供依据。在产品设计中,通过对新旧产品的模型试验或现场实测,为产品质量和性能提供客观的评价,为优化技术参数和提高效率提供基础数据。

1.1.2 测试技术研究的内容

测试技术研究的主要内容包括测量原理、测量方法、测量系统和信号处理四个方面。

(1) 测量原理(Measurement Principle)是指用作测量基础理论。例如,用于应力测量的应

变产生电阻变化的应变效应；用于振动加速度测量的压电晶体受力产生电荷量的压电效应；用于测量温度的热电效应。不同性质的被测对象可以用不同的原理进行测量，同一性质的被测对象也可用不同的原理进行测量。

(2) 测量方法 (Measurement Method) 是指在测量过程中使用的操作方法。根据测量任务的具体要求和现场实际情况，需要采用不同的测量方法，如替代测量法、微差测量法、零位测量法、直接测量法、间接测量法等。

(3) 测量系统 (Measuring System) 是指用于测量而构建的测量系统，它包括测量所需的仪器、仪表、试剂和电源等。为了准确获得被测对象的信息，要求测试系统中每一个环节的输出量与输入量之间必须具有一一对应关系，并且其输出的变化在给定的误差范围内反映其输入的变化，即实现不失真的测试。系统的传输特性确定了输出与输入之间的关系，若通过理论分析或测试确定了其中两者的数学描述，则可以求出第三者的数学描述。所以，工程测试问题都可以归结为输入、输出和系统传输特性三者之间的关系问题。

(4) 信号处理 (Signal Processing) 是指将测量到的数据按照需要对其进行模拟信号/数字信号等转换。通过去干扰、变换、分析、综合等信号处理方法，提取需要的信息，为分析判断和决策提供依据。

电气测试具体内容，可分为电磁量测试和非电磁量测试两大类。电磁量测试是指电学量测试和磁学量测试，电学量测试包括电流、电压、电功率、功率因数、频率等测试；磁学量测试包括磁通、磁导率、磁感应强度、磁场强度等测试。非电磁量测试是指将非电物理量如机械量（速度、加速度、位移、力、力矩、应力、振动等）、热工量（温度、流量、压力、物位等）、化工量（浓度、成分、密度、黏度等）等转换成电量进行的测试。非电磁量电测技术的关键是研究如何将非电量转换成电量的技术——传感技术。

常见的电气测试涉及的主要内容如表 1-1 所示。

表 1-1 电气测试涉及的内容

测试类型	测试量	测试类型	测试量
电磁量	电流、电压、电功率、无功功率、功率因数、频率、电阻、电容、电感、相位、波形、脉宽、频谱、电场强度、磁通、磁导率、磁感应强度、磁场强度、磁性能等	非电磁量	温度、压力、流速、液位、机械位移、速度、加速度、振动、质量（重量）、噪声、时间、频率、运动状态、异常状态（超温、过载、泄漏、变形、断裂……）等

1.2 电气测试系统的组成

通常一般测试系统是由一些不同功能环节组成的，这些环节保证了由获取信号到提供观测的最必要的信号流程功能。图 1-1 是一测试系统最基本的组成结构框图。其中包括三个基本环节：传感器、信号调理器和终端输出器。测试对象的信息总是通过一定的物理量即信号表现出来。信号通过不同的系统或环节传输，流入时被称为输入 (Input)，流出时被称为输出 (Output)。



图 1-1 测试系统组成原理框图

1.2.1 传感器

传感器 (Transducer) 是将物理量、化学量和生物量转换为电量的装置。传感器包括敏感器和变换器两部分。敏感器可以把温度、压力、位移、噪声等被测量转换成某种物理量, 然后通过变换器把这些物理量转换成容易检测的电量, 如电阻、电容、电感的变化。某些传感器产品被称为变送器 (Transmitter), 其中包括变换电路, 可输出标准范围的电压或电流信号 (如 $1\sim 5\text{V}$ 或 $4\sim 20\text{mA}$)。传感器的输入是被测量, 传感信号指传感器输出的电信号, 作为信号调理器的输入信号。

虽然使用传感器的目的是接收被测量, 但是传感器同时也会接收其他可能的输入, 即影响量。例如, 一个压力传感器可能受加速度的影响; 测量应变的电阻应变计会因温度的变化, 而发生变化等。实际上, 很难找到单一选择性的传感器, 因此必须对传感信号进行补偿和修正。

1.2.2 信号调理器

信号调理器 (Signal Conditioner) 把传感器的输出信号转换成适合于进一步传输和处理的形式, 对终端设备提供模拟驱动信号, 又称为测量系统的中间电路。该环节可以实现一种或多种操作, 如选择性滤波、微分、积分或遥测等。信号调理器最基本的功能是放大信号的幅值或功率, 以便达到驱动终端输出器所要求的电平。此外, 在传感器与信号调理器之间、信号调理器与终端输出器之间, 必须保证特性的匹配, 如输入、输出阻抗的匹配等。

1.2.3 终端输出器

终端输出器 (Terminating Read-out) 将来自信号调理器的信号以易于观察的形式显示或存储。它的形式一般包括指示器、记录器、处理器和控制器等。指示器 (Indicator) 如指针式或数字式电压表等。记录器 (Recorder) 如磁带记录仪、曲线记录仪和存储示波器等。

处理器 (Processor) 指各种通用或专用计算机系统, 用于信号分析并且向显示、记录装置和控制系统提供信息。控制器 (Controller) 用于驱动各种受控设备, 工业生产常用控制器控制电动机的启动、停止和调速, 使生产装置的温度、压力、流量、液位等工艺变量保持一定的数值或按照一定的规律变化。这种形式包括以直流电流信号、电接点通断信号、脉冲信号等电信号输入的执行器, 执行器定义为控制系统正向通路中直接改变操纵变量的仪表, 由执行机构和调节机构组成。

注意, 信号调理器所提供的是模拟信号, 这一环节中需要进行模拟量和数字量之间的转换时, 应包含 A/D 转换器和 D/A 转换器。如用电桥将电路参量 (如电阻、电容、电感) 转换为可供传输、处理、显示和记录的电压或电流信号; 利用滤波电路抑制噪声, 选出有用信号; 对在测量装置及后续各环节中出现的一些误差作必要的补偿和校正; 信号送入计算机以前需经过 A/D 转换及在计算机处理后送出时需经 A/D 转换等。经过这样的处理使测量装置输出的信号变为符合需要且便于传输、显示或记录以及可作进一步后续处理的信号。显示与记录部分将所测信号变为一种能为人们所理解的形式, 以供人们观测和分析。

1.3 电气测试信号的描述

不随着时间变化的信号称为静态信号, 随着时间变化的信号称为动态信号。电气测试技术以动态信号为研究对象。信号既可以在时域表示, 也可以在频域表示。时域表示以时间为自变量描述信号的变化规律。频域表示以频率为自变量描述信号中所含频率成分的分布规律。频域描述的结果是以频率为横坐标的各种物理量的谱线或曲线, 如幅值谱、相位谱和功率谱等。传感器的输出信号是时域信号, 为了识别各频率成分的幅值或能量的分布情况, 分析与之相对应的系统状

态,在测试中经常把信号的时域表示转换为频域表示,然后进行频谱分析。常用的转换工具是傅里叶级数变换和傅里叶积分变换,分别简称为傅里叶级数(Fourier Series)和傅里叶变换(Fourier Transform)。

1.3.1 信号的分类和描述

按照信号随着时间变化的规律,信号可分为确定性信号和非确定性信号两大类,如图1-2所示。确定性信号是可以明确的时间函数表示的信号,例如集中参量的单自由度振动系统作无阻尼自由振动时的位移。非确定性信号又称为随机信号(Random Signal, Stochastic Signal),不能用准确的数学关系式描述,只能用概率统计方法估计其参数。



图 1-2 动态信号分类

1. 周期信号

周期信号(Periodic Signal)是其量值随着时间自变量经过某一相同增量(周期)后,能重复出现的信号,可表示为

$$x(t) = x(t+T)$$

式中 T ——信号的周期。

在周期信号中,简谐信号(Simple Harmonic Signal)是可由时间自变量的正弦函数描述的信号,

复杂周期信号是由两种以上具有公共周期的简谐信号合成的。

准周期信号(Quasi-Periodic Signal)也是由两种以上简谐信号合成的,但在其组成分量之间无法找到准确的公共周期,所以无法严格地按照某一周期重复出现。

简谐振动的位移信号可以表示为简谐信号,即

$$x(t) = A\sin(\omega t + \varphi)$$

式中 A, ω, φ ——振幅、角频率、初相角。

可以用时间函数的统计量描述周期信号的强度,常用的统计量如下。

均值为

$$\mu_x = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (1-1)$$

绝对均值为

$$\mu_{|x|} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (1-2)$$

均方值为

$$\psi_x^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (1-3)$$

均方根值为

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (1-4)$$

互相关函数为

$$r_{12}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t)x_2(t+\tau) dt \quad (1-5)$$

在式(1-1)~式(1-5)中, T 为信号的周期。

信号的均值表示信号的常值分量;绝对均值是信号取绝对值后,在一个周期内的均值;均方值(均方根值又称为信号的有效值)是有效值的二次方,表示信号的平均功率;互相关函数描述两个时间函数 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 之间的相关程度,当 $x_1(t) = x_2(t) = x(t)$ 时,称为自相关函数,即

$$r_x(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (1-6)$$

2. 瞬变信号

瞬变信号 (Transient Signal) 的特征是在一定时间区间内存在或者随着时间的增长而衰减至零。例如, 常用作系统给定输入 (激励), 以确定系统传输特性或输出 (响应) 的单位脉冲函数和单位阶跃函数, 常用于描述电容器的放电或有阻尼自由振动的振幅衰减等过程的指数衰减函数。单位阶跃函数、指数衰减函数和有阻尼自由振动位移曲线如图 1-3 所示。

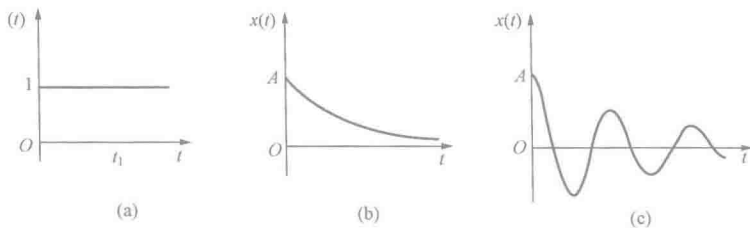


图 1-3 常见瞬变信号

(a) 单位阶跃函数; (b) 指数衰减函数; (c) 有阻尼自由振动的位移函数

单位脉冲函数常用单位长度的箭头来表示, 常用于描述一个电脉冲或一个冲击力, 其定义和主要性质如下:

(1) 单位脉冲函数的定义。在时间 τ 内激发一个宽度为 τ 、高度为 $1/\tau$ 的矩形脉冲 $S_\tau(t)$, 如图 1-4(a) 所示。

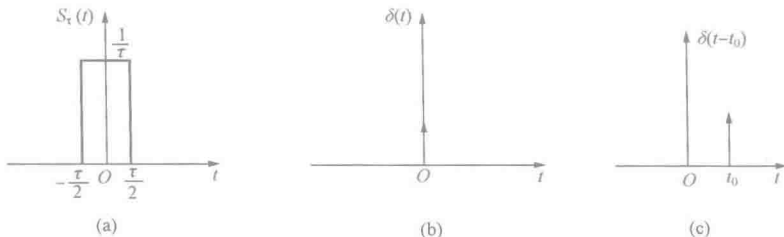


图 1-4 矩形脉冲与 δ -函数

定义单位脉冲函数为

$$\delta(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} S_\tau(t)$$

可写成

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & \tau = 0 \\ 1, & \tau \neq 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

并且

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = \lim_{\tau \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{+\infty} S_\tau(t) dt = 1 \quad (1-8)$$

该函数称为函数, 如图 1-4(b) 所示。若延迟到 t_0 时刻, 有

$$\delta(t-t_0) = \begin{cases} \infty, & \tau = t_0 \\ 1, & \tau \neq t_0 \end{cases} \quad (1-9)$$

(2) 函数的采样性质。如果函数与一个连续的函数 $x(t)$ 相乘, 其乘积仅在 $t=0$ 处有 $x(0)\delta(t)$, 其余各点之乘积均为零, 于是有

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)x(t)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)x(0)dt = x(0) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)dt = x(0) \quad (1-10)$$

同理

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t-t_0)x(t)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t-t_0)x(t_0)dt = x(t_0) \quad (1-11)$$

可见,在脉冲发生点 t_0 可以集函数的值 $x(t_0)$ 。

3. 随机信号

随机信号是瞬时值不可预知的信号,但是可以用某一概率分布函数描述瞬时值在某一指定区间的概率。

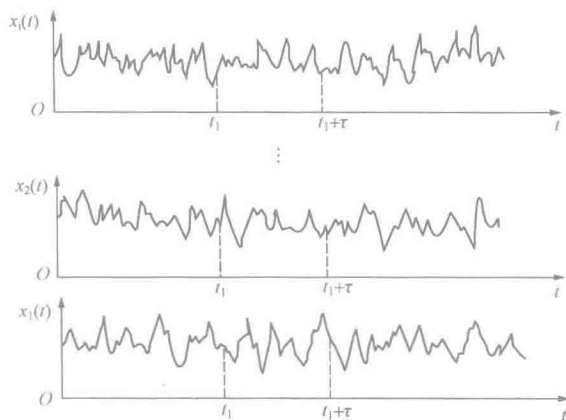


图 1-5 随机过程的样本函数

在工程实际中,随处可见随机信号,如环境温度的变化、机器振动的变化、电流的变化、电阻的变化等。以统计特性来表达特征的时间历程的集合(Ensemble),也称为随机过程(Random Process, Stochastic Process),表示随机信号的单个时间历程 $x_i(t)$ 称为样本函数。图 1-5 所示为汽车在水平路上行驶时车架主梁上一点的应变时间历程,在工况完全相同(车速、路面、驾驶条件等)的情况下,各时间历程的样本记录不同,这种信号就是随机信号。

对于持续时间足够长的正弦波,如果随机地多次记录其波形,那么所得正弦波形的

幅值和角频率保持不变,初相角为随机变量。这些波形被称为随机相位正弦波。

随机过程可分为平稳过程和非平稳过程。平稳过程又分为遍历过程和非遍历过程。

随机过程在任何时刻 t_k 的各统计特性采用集合平均方法来描述。所谓集合平均,就是对全部样本函数在某时刻之值 $x_i(t)$ 求平均。例如,图 1-5 中时刻 t_1 的均值为

$$\mu_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t_1) \quad (1-12)$$

随机过程在和两个不同时刻的相关性可用相关函数表示为

$$r_x(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t_1)x_i(t_1 + \tau) \quad (1-13)$$

若随机过程的统计特征不随着时间变化,则称之为平稳过程(Stationary Process)。对于平稳过程而言,可以在方便和适当的时间进行测量与统计分析。若平稳随机过程的每个时间历程的平均统计特征均相同,且等于总体统计特征,则该过程称为遍历(即各态历经)过程,图 1-5 中第 i 个样本的时间平均为

$$\begin{aligned} \mu_{x_i} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t)dt = \mu_x \\ R_{x_i}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t)x_i(t+\tau)dt = R_x(\tau) \end{aligned} \quad (1-14)$$

工程中遇到的多数随机信号具有遍历性,有的即使不算严格的遍历过程,也可当作遍历过程处理。从理论上说,求随机过程的统计参量需要无限多个样本,这是难以办到的。实际测试工作常把随机信号按照遍历过程来处理,以测得的有限个函数的时间平均值来估计随机过程的集合平