

CAILIAO CHENGXING JIANCE JISHU

材料成形 检测技术

李晨希 曲迎东 杭争翔 李强 编著



化学工业出版社

CAILIAO CHENGXING JIANCE JISHU

材料成形 检测技术

李晨希 曲迎东 杭争翔 李强 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书从应用角度出发,按照由浅入深、从理论到实践、先分析后综合的原则,系统地介绍了电测法的基本知识和对电测装置的基本要求;常用传感器的基本原理及所测参量;常用测量电路的基本测量原理;各种测量显示及记录仪表的测量原理、特点与使用;应力、应变及位移的测量方法;热工测量技术、传统热分析测试技术、差热分析、示差量热分析、热重分析的基本原理及应用;常用的无损检测方法、金属材料的腐蚀与磨损的检测方法;透射电镜、扫描电镜的基本原理和应用等。

本书可作为材料成形及控制专业的教材,也可供材料,尤其是金属材料成形工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形检测技术/李晨希,曲迎东,杭争翔,李强
编著. —北京:化学工业出版社,2007.1
ISBN 978-7-5025-9936-2

I. 材… II. ①李…②曲…③杭…④李… III. 工
程材料-成形-检测 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 010190 号

责任编辑:丁尚林
责任校对:宋 夏

文字编辑:颜克俭
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 刷:北京市彩桥印刷有限责任公司
装 订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张16 $\frac{3}{4}$ 字数421千字 2007年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

材料成形检测技术是研究与材料成形技术有关的参量的检测原理与方法,包括为保证产品质量而进行的检测。检测技术在材料热加工工程中占重要地位,检测技术的完善和发展推动着材料热加工技术的进步。

《材料成形检测技术》是材料成形与控制工程专业的一门技术基础课,通过本课程的学习,使读者能够建立材料成形检测的基本概念,了解各种物理量或参量的测量原理和方法,掌握各种常用传感器、测量电路及测试方法,熟练使用各种仪表对被测量数据进行记录和处理,为以后进行科学实验和生产过程检测与控制打下基础。

本书从应用角度出发,按照由浅入深、从理论到实践、先分析后综合的原则,把全书内容分为10章,第1章介绍测试技术在材料成形与控制技术中的重要性及通常检测的参量;第2章介绍了电测量法的基本知识和对电测装置的基本要求;第3章着重介绍常用传感器的基本原理及所测参量;第4章介绍了常用测量电路的基本测量原理;第5章介绍了各种测量显示及记录仪表,目的是使读者能够掌握各种测量仪表的测量原理及特点,并熟练使用;第6章介绍了应力、应变及位移的测量方法;第7章为热工测量技术,要求掌握常用的测温方法及基本原理,了解流体压力和流量的测量、炉气成分分析及料位测量显示技术;第8章介绍了传统热分析测试技术、差热分析、示差量热分析、热重分析的基本原理及应用;第9章介绍了常用的无损检测方法、金属材料的腐蚀与磨损的检测方法;第10章介绍了透射电镜、扫描电镜的基本原理和应用。

本书可作为材料成形及控制专业的教材,也可供材料加工、成形工程技术人员参考使用。

本书第2~4章由曲迎东编写;第1、6、10章由李强编写;第5、7章由杭争翔编写;第8、9章由李晨希编写;李晨希负责全书统稿。由于编者水平有限,书中难免存在缺点和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者
2007年2月

目 录

第1章 绪论	1
第2章 电测量法	3
2.1 被测参量的特征及其频谱分析	3
2.1.1 周期过程的频谱分析	4
2.1.2 非周期过程的频谱分析	5
2.2 电测装置的静态特性和动态特性	6
2.2.1 电测装置的静态特性	6
2.2.2 电测装置的动态特性	8
2.3 测量误差及其分类	9
2.3.1 按误差的表示方法分类	10
2.3.2 根据误差的性质和产生的原因分类	10
2.4 对电测装置的基本要求	11
第3章 传感器	13
3.1 传感器的基本概念	13
3.1.1 传感器定义与组成	13
3.1.2 传感器的分类	14
3.2 电阻传感器	15
3.2.1 电位器式电阻传感器	15
3.2.2 应变式电阻传感器	17
3.3 电感式传感器	19
3.3.1 变阻式传感器	19
3.3.2 互感式传感器	22
3.3.3 电涡流式传感器	23
3.4 热电式传感器	25
3.4.1 热电偶	25
3.4.2 金属热电阻	30
3.4.3 热敏电阻	31
3.5 压电式传感器	33

3.5.1	压电效应和压电材料	33
3.5.2	石英晶体的压电特性	35
3.5.3	压电陶瓷的压电现象	36
3.5.4	压电传感器等效电路和测量电路	37
3.6	电容式传感器	38
3.6.1	基本工作原理	38
3.6.2	变间隙型电容式传感器	39
3.6.3	变极板面积型电容式传感器	40
3.6.4	变介质型电容式传感器	41
3.6.5	电容式传感器等效电路	41
3.7	光电式传感器	42
3.7.1	光电效应传感器	42
3.7.2	CCD 图像传感器	48
3.8	霍尔传感器	49
3.8.1	霍尔效应	49
3.8.2	霍尔元件的主要技术参数	50
3.9	传感器的适用原则	52
3.9.1	与测量条件有关的因素	52
3.9.2	与传感器有关的技术指标	52
3.9.3	与使用环境条件有关的因素	52
第4章	常用测量电路	53
4.1	电桥	53
4.1.1	直流电桥	53
4.1.2	交流电桥	55
4.1.3	电桥的平衡	55
4.2	载波放大和相敏检波	56
4.2.1	载波放大原理	56
4.2.2	相敏检波原理	59
4.3	滤波电路	62
4.3.1	滤波器分类	62
4.3.2	RC 滤波器	62
4.3.3	LC 滤波器	63
4.4	数模和模数转换原理	63
4.4.1	模-数转换 (A/D 转换) 原理	63
4.4.2	模-数转换器 (A/D 转换器) 的类型	64
4.4.3	数-模转换 (D/A 转换) 原理	66
第5章	显示和记录仪表	68
5.1	磁电动圈式仪表	68
5.1.1	磁电动圈式仪表的特点及分类	68

5.1.2	磁电动圈式仪表的结构及工作原理	69
5.1.3	磁电动圈式仪表的测量电路及断偶保护电路	72
5.1.4	磁电动圈式温度指示调节仪表的断偶保护电路	73
5.2	电位差计	75
5.2.1	手动平衡直流电位差计	75
5.2.2	自动平衡电子电位差计	78
5.3	函数记录仪	81
5.3.1	函数记录仪的自动平衡原理	81
5.3.2	函数记录仪的主要组成	83
5.3.3	函数记录仪的应用	84
5.4	光线示波器	85
5.4.1	光线示波器的工作原理	86
5.4.2	光线示波器的光学系统	86
5.4.3	光线示波器的振动子及外接电阻	87
5.5	电阻应变仪	89
5.5.1	电阻应变仪的分类	89
5.5.2	电阻应变仪的工作原理	89
5.5.3	电阻应变仪主要组成部分的作用及性能	91
5.5.4	常用电阻应变仪介绍	93
5.6	数字式仪表	94
5.6.1	数字式仪表的特点及构成	94
5.6.2	数字式仪表构成环节的工作原理	95
5.6.3	虚拟仪器简介	98
第6章	应力和应变测量	100
6.1	概述	100
6.2	电阻应变片	100
6.2.1	电阻应变片的类型	101
6.2.2	应变片的应用	104
6.2.3	应变片的工作特性	105
6.2.4	应变片粘贴工艺	105
6.3	电阻应变片对应力、应变的测试	106
6.3.1	线应力状态下的主应力的测量	107
6.3.2	平面应力状态下的主应力的测量	107
6.3.3	测点选择、布片和选片原则	111
6.4	应力、应变的其他测量方法	113
6.4.1	超声波测量方法	113
6.4.2	光弹性测量方法	114
6.4.3	激光全息测量方法	115
6.4.4	密栅云纹方法	116
6.4.5	X射线宏观应力测定方法	117

6.4.6 热辐射应力图分析	119
6.4.7 机械式测量	119
6.4.8 脆性涂层	120
第7章 热工测量技术	121
7.1 温度的测量	121
7.1.1 测温方法的分类	121
7.1.2 热电偶测温	121
7.1.3 热电阻测温	129
7.2 温度的自动控制	135
7.2.1 温度控制的概念	135
7.2.2 位式温度控制及时间比例温度控制	136
7.2.3 炉温连续控制	137
7.3 流体压力和流量的测量	140
7.3.1 流体压力的测量	140
7.3.2 流体流量的测量	145
7.4 炉气成分分析	150
7.4.1 红外线 CO ₂ 气体分析仪	150
7.4.2 奥氏气体分析仪	152
7.4.3 气相色谱分析仪	154
7.5 料位的测量与控制	157
7.5.1 炉气压差式料位测量与控制	157
7.5.2 激光式料位测量与控制	158
7.5.3 γ 射线式料位测量与控制	158
第8章 热分析测试技术	160
8.1 传统热分析法及其应用	160
8.1.1 传统热分析法的基本原理	160
8.1.2 灰铸铁的冷却曲线	161
8.1.3 测试系统	162
8.2 差热分析的原理及其应用	163
8.2.1 差热分析的原理	163
8.2.2 差热分析应用举例	168
8.3 示差扫描量热分析的原理及其应用	170
8.3.1 示差扫描量热分析的基本原理	170
8.3.2 影响 DSC 曲线的因素	171
8.3.3 示差扫描量热法的应用	172
8.4 热重法的原理及其应用	174
8.4.1 热重法的原理	174
8.4.2 影响热重分析的因素	176
8.4.3 热重法的应用	177

第 9 章 无损检测及表面质量检测技术	179
9.1 射线探伤	179
9.1.1 射线的发生及衰减	179
9.1.2 射线照相法探伤的原理及方法	182
9.1.3 射线实时图像法探伤	184
9.2 超声波探伤	185
9.2.1 超声波的产生及传播	185
9.2.2 超声波探伤原理及方法	190
9.3 磁力探伤	192
9.3.1 磁力探伤的原理	192
9.3.2 材料的磁化和退磁	193
9.3.3 磁粉探伤的操作和适用范围	196
9.4 渗透探伤	197
9.4.1 着色探伤	197
9.4.2 荧光探伤	199
9.5 涡流探伤	201
9.5.1 涡流的产生和检测	201
9.5.2 探伤操作	202
9.6 金属耐磨性的检测	203
9.6.1 磨料磨损	203
9.6.2 黏着磨损	204
9.7 金属耐腐蚀性的检测	208
9.7.1 浸泡腐蚀试验	208
9.7.2 盐雾试验	211
9.7.3 局部腐蚀试验	212
9.7.4 金属腐蚀性的评定方法	220
第 10 章 电子显微分析	225
10.1 电子显微镜简介	225
10.2 电子显微镜的基本原理	225
10.2.1 光学显微镜的局限性	225
10.2.2 电子光学基础	226
10.2.3 电磁透镜	227
10.2.4 电磁透镜的景深和焦长	231
10.3 透射电子显微镜	232
10.3.1 透射电子显微镜的构造	232
10.3.2 透射电子显微镜成像原理	234
10.3.3 透射电子显微镜的样品制备	235
10.4 电子衍射分析	237
10.4.1 电子衍射原理	238

10.4.2	选区电子衍射原理.....	239
10.4.3	衍射衬度成像原理.....	239
10.5	扫描电子显微镜.....	240
10.5.1	电子束与固体样品的相互作用.....	240
10.5.2	扫描电子显微镜的基本原理和结构.....	242
10.5.3	扫描电子显微镜的几种电子像分析.....	244
10.5.4	扫描显微镜在金属材料研究中的应用.....	248
10.6	电子探针显微分析.....	250
10.6.1	电子探针的分析原理及构造.....	250
10.6.2	电子探针分析方法.....	253
参考文献		256

第 1 章 绪 论

(1) 检测技术的重要性

检测技术包括测量和实验两方面内容，它是实验科学的重要组成部分。它的主要研究内容为各种物理量的测量原理和测量方法，它是进行科学实验和生产过程参量测量与控制必不可少的手段。测试是人们认识客观事物的重要手段，通过测试可以揭示事物的内在联系和变化规律，从而帮助人们认识和利用它，推动科学技术的不断进步。从科学技术发展的过程来看，很多新的发明和发现都与测试技术分不开；同时科学技术的发展又大大促进了测试技术的发展，为测试技术提供更新的方法和设备。

科学研究中的问题十分复杂，很多问题无法进行准确的理论分析和计算，这就必须依靠实验方法来解决，特别是对于那些影响因素多而且影响因素之间相互作用的问题，通过实验能够快速找出各种因素的影响规律。

测试技术是自动化系统的基础。随着自动控制生产系统的广泛应用，为了保证系统高效率地运行，必须对生产流程中的有关参数进行测试采集，以准确地对系统实现自动控制。此外，对产品质量的评估也要通过测试才能实现。

检测技术在材料科学与工程学科中占有一席重要的地位，检测分析技术的完善和发展推动着现代材料科学技术的进步。同时，检测技术的发展又得益于其他科学技术的研究成果。

(2) 材料成形中经常检测的物理量

材料成形生产中，经常需要检测的物理量和有关参量概括如下。

① 温度 温度是铸造、焊接和锻压生产中的重要工艺参数，金属材料成形过程基本上都是在高温状态下进行的，因此只有准确地测量温度变化，才能正确控制材料加工工艺，从而才能获得高质量的产品。

② 与流体运动有关的参量 主要有气体与液体的速度、流量、液面高度等。

③ 应力与应变 在研究构件的强度与变形、焊接结构、铸造应力及锻压塑性变形时，都涉及应力、应变的测量。

④ 工件缺陷检测 检测工件中的气孔、缩孔、裂纹、夹渣等。

⑤ 材料的成分与结构测定 如化学成分、晶体结构、晶体缺陷、晶粒形貌、断口等。

⑥ 力学性能 如抗拉强度、屈服极限、伸长率、断面收缩率、冲击韧性、显微硬度、布氏硬度等。

⑦ 其他 材料的熔点、相变温度，材料的耐磨、耐蚀、耐热等性能的检测。

上述物理量或参量的检测方法很多，按照测量原理可分为机械测量法、电测法和光测

法等。机械测量法是利用机械器具对被测参量进行直接测量，比如杠杆应变计测量应变、用机械式测振仪测量振动参量。电测法是将被测参量转换成电信号，通过电测仪表进行测量的方法，如利用电阻应变仪测量应力-应变，用电动式测振仪测量振动参量，电测法是目前应用最广泛的一种测试方法。光测法是利用光学原理对被测参量进行测量的办法，如应力/应变的光测法就有：光弹性实验法、密栅云纹法等。

第2章 电测量法

利用各种传感器,将温度、速度、几何尺寸、位移等非电量转换成相应的电量信号,再借助相关的测量电路对这些信号进行滤波、放大等处理,最后将处理的结果显示出来,这就是所谓的电测量法。

材料成形加工过程涉及的参量、变量多,工艺过程复杂,为获得微观组织性能优异、宏观几何尺寸精确的优质零件,检测技术在材料加工过程中不可缺少。目前,电子技术、计算机技术发展迅速,使得电测量检测在材料加工领域里应用的范围正逐步扩大。随着材料成形过程自动化、智能化的发展,各种电测量技术在材料加工领域应用前景更加广泛,许多新的测量技术在材料加工领域里已有应用,如 CCD(电荷耦合器件)摄像头对焊接熔池尺寸的检测、相多普勒分析仪 PDA(phase doppler anemometer)对喷射成形雾化液滴尺寸的检测、喷射沉积坯表面温度远红外线的检测等。

电测量法对物理量检测前,需了解如下内容:①被测量的物理性质及其动态变化特点;②传感器,电测装置的静、动态特性。此外,误差是评价检测准确性的一个重要指标,有关内容在本章也将涉及。

2.1 被测参量的特征及其频谱分析

被测量的特征一般指其物理特征、量值特征和时变特征。物理特征主要包括被测量的密度、质量、速度、形变等反映其物理特点的特征;量值特征是指被测量的量值大小和范围;时变特征指被测量随时间而变化的情况,即物理量的动态变化特征。因为这些特征都是选择与设计传感器和电测装置的主要依据,故掌握被测量的这些特征是实现其精确测量的前提条件。在实际应用中,可根据被测量的物理特征和量值特征选择传感器的种类、电源装置的形式和量程大小;根据被测量的时变特征选择传感器和电测装置的频率特性。由于物理量的时变特征的任何检测过程都必须了解的共性问题,下面将讨论之。

在检测过程中,被测量是时间和空间的函数,可用 $F=F(t, x, y, z)$ 来描述。对于大多数物理量的检测,测试的位置常常固定不变,则被测量只是时间的函数,故上式可简化为 $F=F(t)$,也可用图 2-1 所示的曲线来表示,图中的纵坐标表示被测量 $F(t)$,横坐标表示时间 t , τ 为被测量的持续时间, T 为工作周期。

根据被测量随时间变化的特点可将被测物理量分成两类。

(1) 静态过程

特点是 $F(t)$ 在一定时间 τ 内固定不变,即 $F(t)=\text{常量}$,一般 $\tau=10\text{min}$ 或更大,图 2-1 中最上面的实直线表示的就是静态过程。静态过程也称稳态过程,泛指物理量不随时

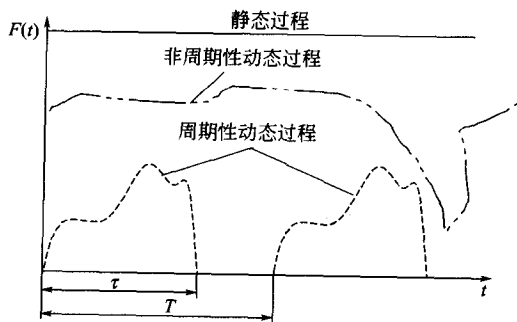


图 2-1 被测参量的变化曲线

检测过程中遇到的更为普遍的一类物理量变化过程, 见图 2-1 中的双点划线。

被测物理量随时间的变化过程, 可直接用时间域的方法描述, 即 $F=F(t)$ 为时间的显示函数。时间域描述方法虽然直观, 但在工程实际中, 被测量的时变过程比较复杂, 其频谱难以从时间域信号中直接获得。为此, 常将复杂的时变函数展开成一系列正弦函数(谐波分量)的和或积分, 即用频率域的方法描述。将复杂的时变函数按谐波分量描述的方法, 称为频谱分析或谐波分析, 这是工程中对信号分析常采用的方法。

2.1.1 周期过程的频谱分析

周期性变化的物理量在时间域内的函数形式可以表达为一系列频率离散的正弦函数(谐波分量)的和, 其频谱分析所采用的方法为傅里叶级数。由高等数学的知识可知, 如果某一周期性函数满足狄利克里(Dirichlet)条件: ①除有限个第一类间断点外, 函数处处连续; ②分段单调, 即单调区间的个数有限, 则该周期性函数可由一个处处收敛的傅里叶(Fourier)级数表达:

$$F(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\Omega t + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin n\Omega t \quad (2-1)$$

式中 $F(t)$ ——满足狄氏条件的周期函数;

$\Omega=2\pi/T$ —— $F(t)$ 的圆频率;

F_0, A_n, B_n ——分别为常数, 可计算为:

$$F_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) dt, A_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) \cos n\Omega t dt, B_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) \sin n\Omega t dt \quad (2-2)$$

式(2-1) 利用三角函数关系, 可变换成:

$$F(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin(n\Omega t + \Phi_n) \quad (2-3)$$

式中:

$$F_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}, \Phi_n = \arctan \frac{A_n}{B_n} \quad (2-4)$$

式(2-3) 的物理意义是: 任何周期性过程都可以表示为满足正交关系的许多谐波分量的叠加。所谓正交关系, 是指式(2-1) 中任意两个不同的正弦、余弦三角函数在 $[-\pi, +\pi]$ 区间内的积分为 0。系数 F_0, F_n, Φ_n 可根据式(2-2) 计算, 利用三角函数的和差公式最终将其表达为式(2-3) 的形式, 该式中第一项称零次谐波或平均值; 第二项 $F_n \sin(n\Omega t + \Phi_n)$ 称第 n 次谐波; $n\Omega, F_n, \Phi_n$ 为 n 次谐波的圆频率、幅值、相位; $n=1$

间发生变化的过程。

(2) 动态过程

$F(t)=$ 变量, 是指物理量随时间变化的过程, 也称非稳态变化过程。根据 $F(t)$ 是否周期地变化, 可将动态过程分为周期性动态过程与非周期性动态过程。周期性动态过程的特点是 $F(t)=F(T+t)$, T 为工作周期, 图 2-1 中的两个虚线就是物理量的周期性变化过程。而非周期性动态过程的特点是 $F(t) \neq F(T+t)$, 这类变化是

时, 第二项称一次谐波或基波, $n=2$ 时称二次谐波, 其余项如此类推。

图 2-2(a) 描述了某物理量与时间的关系曲线, 该物理量由一次谐波、三次谐波和五次谐波叠加而成。其频率域可表示为图 2-2(b), 横坐标表示各谐波的频率 (ω), 纵坐标表示各谐波的幅值 (F_n), 此图清晰地描述了各谐波分量频率和幅值的关系。

周期过程的频谱有三个特点: 频谱的不连续性, 是离散频谱; 各谐波频率对基波频率有简单的倍数关系; 谐波的幅值随频率增加而衰减。这三个特性分别称为周期过程频谱的离散性、谐波性和收敛性。

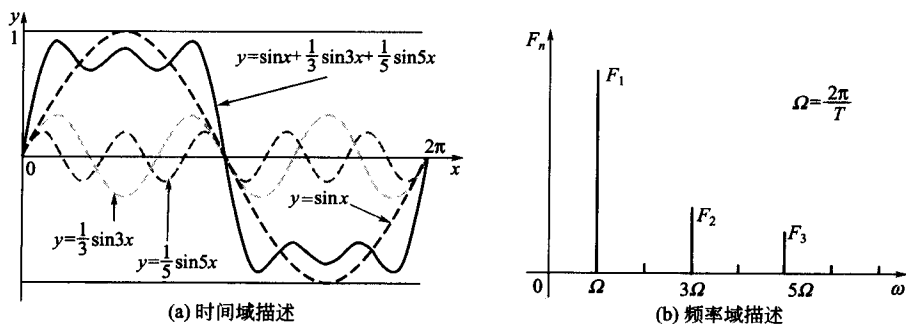


图 2-2 周期过程的频谱分析实例

2.1.2 非周期过程的频谱分析

与周期过程变化的物理量一样, 非周期变化的物理量也可在时间域、频率域内进行描述, 其实质与周期性过程的频谱分析没有分别, 都是将时间域的物理量变换为频率的描述形式, 只是非周期过程的频谱分析采用傅里叶变换而非傅里叶级数的方法。非周期函数 $F(t)$ 的傅里叶变换为:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{-j\omega t} dt = |F(\omega)| e^{j\varphi_\omega} \quad (2-5)$$

式中 ω ——谐波分量的圆频率, 为 $0 \rightarrow \infty$ 的连续量;

$F(\omega), \varphi_\omega$ ——各谐波分量的幅值和相角。

$F(t)$ 也为 $F(j\omega)$ 的逆变换, 即为各谐波分量 (频谱) 在 $(-\infty, +\infty)$ 内的积分:

$$F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2-6)$$

根据傅里叶积分定理, 只要函数 $F(t)$ 满足: ① $F(t)$ 在任一有限区间满足狄利克里条件; ② $F(t)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 区间绝对可积, 即:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |F(t)| dt < +\infty \quad (2-7)$$

则 $F(t)$ 的傅里叶积分收敛, 即式 (2-6) 成立。

例如, 有一过程如图 2-3(a) 所示 ($\tau=1$):

$$y = \begin{cases} e^t & t \leq \tau \\ 0 & t > \tau \end{cases}$$

现对它进行频谱分析:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{-j\omega t} dt = \int_0^{\tau} e^t e^{-j\omega t} dt = -\frac{1}{1-j\omega} e^{(1-j\omega)t} \Big|_0^{\tau} = F(\omega) e^{j\varphi_\omega}$$

解得:

$$F(\omega) = \sqrt{(e^{2\tau} + 1 - 2e^{\tau} \cos \omega \tau) / (1 + \omega^2)}$$

即: $\Phi(\omega) = \Phi_1(\omega) + \Phi_2(\omega)$, 其中 $\Phi_1(\omega) = \arctan \omega$, $\Phi_2(\omega) = \arctan[e^{\tau} \sin \omega \tau / (e^{\tau} \cos \omega \tau - 1)]$ 。

$F(\omega)$, $\Phi(\omega)$ 描述了各谐波分量的幅值、相角与频率 ω 的关系。它的频谱图如图 2-3 所示, 图 2-3(a) 为物理量时间域的描述, 图 2-3(b) 为频率域描述。与周期过程的频谱不同, 非周期过程的频谱是连续频谱, 并且各谐波的幅值随着频率的增加而衰减, 也呈现幅值收敛的特性。

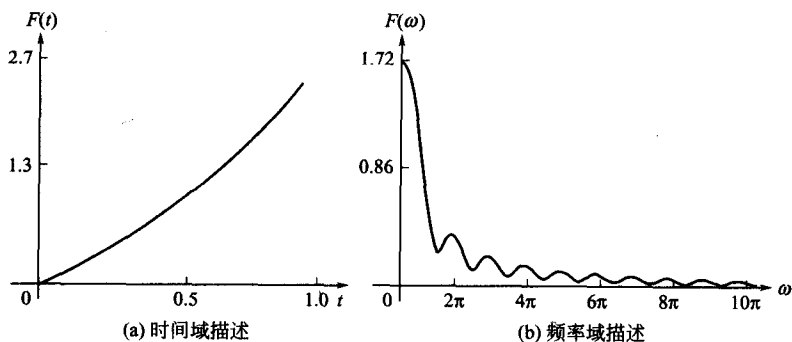


图 2-3 非周期过程得频谱分析实例

可见, 对于任一变化的物理量, 无论它是周期性变化过程, 还是非周期性变化过程, 都可以利用频谱分析的方法将其分解成一系列谐波分量的和或积分, 从而将时间域的函数转换成频率域的描述形式。被测量的频谱分析对于传感器和电测装置的选择具有重要意义。根据频谱分析结果, 可初步估算被测参量的频率范围, 以作为选择与设计传感器和电测装置的依据。被测物理量频率范围的估算过程如下: 对未知的被测量 $F(t)$, 若它为周期函数, 则其变化的周期 T 应已知, 因此可知其基波频率为 $1/T$; 若它为非周期函数, 则其持续时间 τ 应已知, 故可知其主要频率为 $1/\tau$ 。再根据谐波分量的幅值随频率增加而递减的特点, 对周期函数最高谐波取其基本频率的 7~10 倍; 对非周期函数最高频率取其主频率的 4~5 倍。这样, 物理量的频率范围可估算为: 周期动态过程为 $[0, n/T]$, 其中 $n=7\sim 10$; 非周期动态过程为 $0\sim n/\tau$, 其中 $n=4\sim 5$ 。

2.2 电测装置的静态特性和动态特性

对于一般的检测过程, 电测装置是对传感器输出信号进行处理不可缺少的装置, 包括信号放大、滤波、相敏检波等器件。电测装置的输出信号 $y(t)$ 与电测装置的输入信号 $F(t)$ 之间必然存在某种内在的对应关系, 这种关系可由电测装置的静态特性和动态特性来描述。

2.2.1 电测装置的静态特性

电测装置的静态特性又称为“标定曲线”或“校准曲线”, 是指在静态条件下, 电测装置的输出与输入量间的关系。输出量 $y(t)$ 与输入量 $F(t)$ 在静态特性下的关系, 可用代数方程 $y=f(F)$ 来描述, 此时方程中 F 和 y 都是与时间无关的值, 该方程称电测装置

的静态数学模型,可用图 2-4 的曲线描述,此曲线称静态特性曲线或工作曲线。静态方程与曲线的形式完全取决于电测装置各组成环节的特性。电测装置的静态特性可用灵敏度、线性度、迟滞、量程等参数进行表征。

(1) 灵敏度

用检测系统的输出变化量 Δy 与引起该输出量变化的输入变化量 ΔF 之比来表征,见图 2-4,工作曲线上某点的斜率即为该工作点的灵敏度 K_i :

$$K_i = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta F} = \frac{dy}{dF} \quad (2-8)$$

若工作曲线呈线性关系,则各点的灵敏度相同。当输入量或输出量采用相对变化量时,灵敏度还有多种表征形式。灵敏度可用来描述电测装置输出对输入变化的反应能力,灵敏度越大,表示电测装置越灵敏。

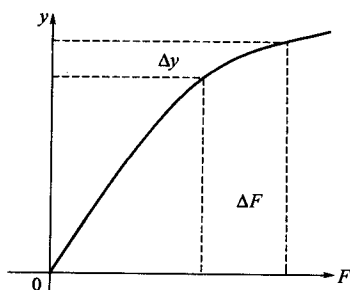


图 2-4 静态特性曲线

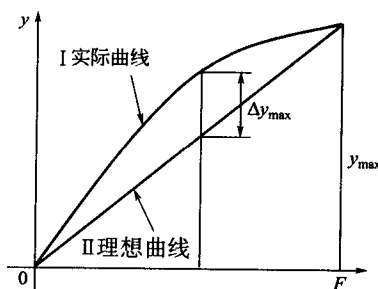


图 2-5 线性和非线性系统

(2) 线性度

用以描述电测装置输出与输入之间关系曲线对直线的接近程度。它用非线性引用误差 γ_L 表示,见图 2-5, I、II 分别为实际和理想工作曲线,最大偏离值 $\Delta a_{\max}$ 与额定输出值 $a_{\max}$ 之比即为 γ_L :

$$\gamma_L = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\max}} \times 100\% \quad (2-9)$$

当 $\gamma_L = 0$ 时,电测装置的工作曲线为直线,此时该系统称为线性系统;当 $\gamma_L \neq 0$ 时,电测装置的工作曲线为曲线,此时该系统称为非线性系统。测量时都希望电测装置为线性系统,但实际的工作曲线,往往与理想的工作曲线有一定偏离, γ_L 正是描述这种偏离程度的参量。线性系统最重要的特点是可应用叠加原理,叠加原理表明,若输入是个复杂信号,但可被分解为几个简单分量的叠加,则总输出就等于各分量单独作用时输出的叠加,这一点正是测试所要求的。对于动态测量,必须采用线性系统,否则会产生非线性失真。对于静态测量,为了便于测量换算或仪器刻度读数方便,也需采用线性系统。所以,线性系统是理想的测量系统。对于实际系统,若 $\gamma_L \ll 1$,则该系统可近似为线性系统。

(3) 迟滞

也称“滞后”,在检测系统的全量范围内,当输入由小到大和由大到小循环变化时,输出的工作曲线不一致的程度,如图 2-6 所示。一般以两个曲线的最大不重合值 H 与额定输出值 $y_{\max}$ 的比值 γ_H 来表示:

$$\gamma_H = \frac{H}{y_{\max}} \times 100\% \quad (2-10)$$