

动态参量测试技术

陈锦荣 等 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地叙述了兵器动态参量测试中常用的各种传感器、测量电路、记录仪器等基本原理。介绍了振动、压力、温度及速度等动态参量的测试技术问题，并对遥测及数据处理等有关知识做了介绍。

本书可作为兵器专业或机械类专业的测试技术教材，也可供有关工厂、研究所的测试技术人员学习与参考。

动态参量测试技术

陈锦荣 等 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张18 418千字

1985年12月第一版 1985年12月第一次印刷 印数：70,001—1,720册

统一书号：15034·3017 定价：3.70元

前 言

随着教学与科研的不断发展,兵器工业战线上的工程技术人员和院校师生,很需要有一本能较系统地介绍兵器动态参量测试基本原理方面的书籍,为此,我们根据多年的教学与科研实践,收集了国内外有关资料编写成本书。

全书共分九章,主要内容是以兵器为对象,介绍动态参量测试中常用的各种传感器的工作原理、特性及应用;基本测量电路原理;常用记录仪器的基本原理;振动、压力、温度、速度测试技术;遥测及数据处理。

本书由华东工程学院 102 教研室集体编写,编写分工如下:

陈锦荣负责主编并编写第一、三、八、九章;徐国安、曹毓华第二、四章;郭预权、雷道明第六、七章;林知良第五章,杨锦文负责全书插图的整理工作。全书由北京工业学院陆际联副教授审阅,并提出许多宝贵意见。在编写过程中还得到了院系有关领导的大力支持,在此特表谢意。

由于我们业务水平不高,难免有谬误之处,请读者批评指正。

编 者

一九八四年七月于南京

目 录

绪论	1	1.4.1 外光电效应与光电管	53
第一章 传感器原理	3	一、外光电效应	53
1.1 应变式传感器	3	二、光电管与光电倍增管	53
1.1.1 应变片	3	1.4.2 光敏晶体管	56
一、电阻应变片的工作原理	3	一、光敏二极管及光敏三极管	56
二、应变片的参数与特性	5	二、光敏晶体管的特性	58
三、温度误差及其补偿	10	1.4.3 其它固态光敏器件	60
四、金属箔式应变片	15	一、光电池	60
五、半导体应变片	17	二、发光二极管	61
六、粘接剂	20	1.4.4 光学纤维	62
七、应变片的粘贴	22	一、光学纤维的传光原理	62
1.1.2. 力敏器件及固态		二、光学纤维的主要特性	63
压阻传感器	22	三、光纤位移传感器	64
一、力敏器件	22	四、光纤压力、振动传感器	65
二、固态压阻传感器	23	1.4.5 光电器件的应用	66
1.1.3 应变式传感器及其应用	25	1.5 角速度陀螺传感器	67
1.2 电感式及感应式传感器	30	1.5.1 陀螺工作原理	67
1.2.1 电感式传感器	30	1.5.2 微动同步器的工作原理	69
一、电感传感器的工作原理	30	1.5.3 速度陀螺仪的特性	71
二、电感传感器的特性	31	1.6 传感器的静态指标与	
三、电感传感器的特点	36	动态特性	72
1.2.2 电涡流式传感器	38	1.6.1 传感器的静态指标	72
一、工作原理	38	一、灵敏度	72
二、影响传感器性能的因素	41	二、线性度	73
三、电涡流式传感器实例	42	三、迟滞	74
1.2.3 感应式传感器	43	四、重复性	74
1.3 压电式传感器	44	1.6.2 传感器的动态特性	75
1.3.1 压电效应及压电材料	44	一、传感器的运动方程式	75
1.3.2 压电式传感器	47	二、传递函数与频率响应	77
一、压电式加速度传感器	48	三、一阶与二阶传感器的频率响应	78
二、压电式压力传感器	49	四、一阶传感器及二阶传感器的阶跃	
1.3.3 压电传感器对测量		输入响应	80
线路的要求	49	五、动态测量误差	83
1.3.4 压电式传感器的应用	52	第二章 基本测量电路	84
1.3.5 压电薄膜	53	2.1 电桥的原理及特性	84
1.4 光电传感器	53	2.1.1 直流电桥的输出特性	84

一、电压输出特性	84	3.2.6 磁带记录器的主要性能	
二、负载条件下的输出	86	术语	130
三、电桥输出的非线性	87	3.3 瞬态信号记录器	132
2.1.2 电桥应用中测量臂的		3.3.1 基本工作原理	132
选择	88	3.3.2 BC-V型瞬态波形存储器	
2.1.3 交流电桥	89	简介	133
2.1.4 电桥的预调平衡	91	3.3.3 TCCK-4000E瞬态记录器	
一、电阻平衡装置	91	简介	133
二、电容平衡装置	91	第四章 振动测量	136
2.2 调制与解调	93	4.1 振动的一般理论	136
2.2.1 调幅器	93	4.2 测振传感器的类型及使用中	
2.2.2 环形相敏检波器	94	的合理选择	143
2.2.3 调频器电路	97	4.2.1 接触式位移传感器	144
2.2.4 鉴频器	98	4.2.2 惯性式测振传感器	146
2.3 集成运算放大器的应用	99	一、惯性式加速度计	146
2.3.1 直流放大器	101	二、惯性式位移计	149
2.3.2 有源滤波器	105	4.2.3 伺服式测振传感器	150
2.3.3 电荷放大器	108	4.2.4 瞬态振动测量及滤波	152
2.3.4 幅度比较器	109	4.2.5 测振传感器使用安装上的	
2.4 数模(A/D)与模数(A/D)		某些问题	154
转换	109	4.3 测振传感器的标定和某些	
2.4.1 数字/模拟(A/D)转换器	110	参数的简易测定	157
2.4.2 模拟/数字(A/D)转换器	112	4.3.1 传感器的动态标定及参数	
第三章 记录仪器	117	测定	157
3.1 光线示波器	117	4.3.2 测振传感器的静标定及 ω_0 ,	
3.1.1 工作原理	117	ξ 值的简易测定	160
3.1.2 光学系统	117	4.4 振动测试分析中的其它	
3.1.3 记录纸传动系统	118	问题	161
3.1.4 时标基准系统及控制		4.4.1 角振动的测量	161
系统	118	4.4.2 用机械阻抗来分析结构的	
3.1.5 磁系统	118	动态特性的测量问题	162
3.1.6 振子	119	4.4.3 振动作为随机变量处理的	
3.2 磁带记录器	123	情况	164
3.2.1 基本部件组成及功用	123	第五章 压力测量	166
3.2.2 磁带记录器的记录方式	124	5.1 测压系统	166
3.2.3 记录和重放过程	125	5.1.1 应变式压力测量系统	167
3.2.4 改善磁记录器性能的一些		5.1.2 压电式压力测量系统	168
措施	127	5.1.3 电感式压力测量系统	168
3.2.5 磁带消磁	130	5.1.4 电容式压力测量系统	169

5.2 测压系统的静态标定与动态 标定	169	6.3.3 光学高温计介绍	213
5.2.1 静态标定	170	6.3.4 光电高温计	214
5.2.2 动态标定	171	6.3.5 全辐射式高温计	215
一、激波管法	172	6.3.6 比色高温计	216
二、正弦压力发生器	177	第七章 速度测量	222
三、落锤法	180	7.1 概述	222
5.3 压力传感器的安装问题	181	7.2 电子测时仪测速	223
5.3.1 直管无腔室管道系统	182	7.3 利用多卜勒雷达测量弹丸飞 行速度	227
5.3.2 有空腔的传压管系统	182	第八章 遥测基本知识	229
5.3.3 非谐振传压管系统	183	8.1 单通道遥测系统	229
5.4 测压实例	183	8.1.1 直接调频(FM)系统	229
5.4.1 燃气流压力场的测试	183	8.1.2 调频-调频(FM-FM) 系统	230
5.4.2 冲击波压力场的测试	185	8.1.3 调幅-调频(AM-FM) 系统	231
第六章 温度测量	187	8.2 多路传输遥测系统	231
6.1 概述	187	8.2.1 频分制多路传输	231
6.1.1 温度测量的重要性	187	8.2.2 时分制遥测系统	233
6.1.2 对测温的要求	187	第九章 信号处理	238
6.1.3 测温方法分类	188	9.1 信号的分析	238
6.2 热电偶	188	9.1.1 周期信号	238
6.2.1 基本原理	189	9.1.2 非周期信号	242
6.2.2 热电偶的制作	192	9.1.3 随机信号	249
6.2.3 测量线路及二次仪表	197	9.2 信号的数字化处理	255
6.2.4 热电偶的标定	198	9.2.1 信号的采样及预处理	255
6.2.5 热电偶的动态特性	199	9.2.2 离散傅立叶变换	264
6.2.6 表面温度测量	202	9.2.3 快速傅立叶变换(FFT)	270
6.2.7 火箭燃气射流温度测量	203	9.2.4 微机在数据处理中的 应用	276
6.2.8 瞬态温度测量	207	主要参考资料	282
6.3 辐射高温计	208		
6.3.1 概述	208		
6.3.2 辐射高温计的理论基础	208		

绪 论

通过科学实践,人们越来越清楚地看到,测试技术是现代科学的一个组成部分。现代化科学技术的发展,使测试技术水平的提高成为可能与现实。反过来,现代化的、高性能的测试手段,又会使科学技术的成就更加深入和广泛。同时,科学技术的进一步发展,又为测试技术的发展提供了新的前提和途径,也为以后的发展方向提出了新的课题。可以说,现代科学技术的发展离不开测试技术,测试技术的发展也离不开现代科学技术。所以,测试技术在现代科学技术中占有着重要的位置。在兵器科学这一领域中也是同样。

众所周知,任何一门学科的发展都离不开实验。兵器理论的发展更是如此。外弹道和内弹道学中的很多定律、状态方程,兵器设计中的各种经验公式等,都是通过人们的大量实验测试总结出来的。

在研制一种新的兵器时,经过设计、试制之后,还必须通过试验,来检验各方面的性能是否合乎要求。在设计过程中,有时也要对各种方案的技术性能进行摸底试验,取得所需的各种数据。现代测试技术为正确测出各种工作过程的性能参数提供了强有力的手段,为工程设计提供可靠的有用数据,为设计指出方向,为设计的实现创造了条件。

此外,兵器的发展尽管已有很久的历史,但是各种兵器的设计理论还是很不完备的,还需要不断研究和探索。例如火炮和火箭发射架在射击中的振动,对射击密集度的影响问题;发射状态下发射架的受力问题;枪管寿命问题;火炮身管的温升问题等等。要研究和探索这些问题,就必须进行各种科学实验。这些实验都离不开测试技术,否则就不可能得到各种必要的数据和正确的结论。

从事军事科学技术的技术人员,熟练地掌握本专业的知识固然重要,如果再能够懂得和熟悉一定的测试技术,在科学研究和产品设计中,能合理地组织和进行各种实验,取得所需要的数据,总结实验中所出现的规律,从而有效地解决所遇到的技术问题。这也应该是工程技术人员的基本技能之一。

在我国社会主义建设事业中,随着现代科学技术的发展,测试技术已日益被各技术领域所重视。近年来,由于电子技术特别是微电子和计算技术的飞速发展,测试技术也成为蓬勃向上的富有生命力的一门科学。所以学习一定的测试技术也是掌握现代科学知识的内容之一,应该在思想上加以重视。本书的目的是以兵器为对象向读者介绍动态参量测试中所常用的一些基本原理。掌握了这些基本原理,对每个具体的单项实验就可以很容易地理解,也只有掌握了基本原理才能在实践中灵活运用,并可以有所创造和发挥。由于篇幅的限制,本书对具体的实验方法与操作一般不做具体介绍,这项任务由实验指导书去完成。为了方便,在后面的所有叙述中,把动态参量测试简称为兵器测试。

这里所提到的动态参量测试技术用的是目前在各个技术领域中已被广泛采用的非电量的电测技术。所谓非电量的电测,就是把非电学的物理量转换成与之有确定对应关系

的电学量之后再测量的方法。它的主要优点是反应速度快；便于传输和信号调整（调制、放大等等），同时也便于记录、显示、控制和分析。

一个非电量电测量系统，根据其作用可以分为下面几个部分（如图1所示）：①传感器，②测量电路，③记录和显示器。

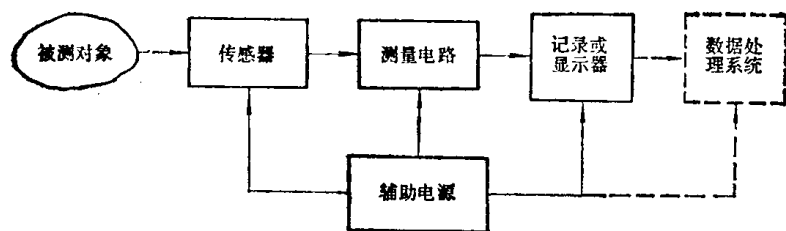


图1 非电量电测量系统组成

（1）传感器——它是把被测的物理量（非电学量）转换成与之有确定对应关系的电学量的装置。通常传感器由敏感元件及变换元件组成。

敏感元件，通常是弹性元件。它直接与被测介质接触，其作用是把一种物理量，变为另一种物理量。如测压传感器的膜片就是敏感元件。当压力变化时，膜片的变形量就发生相应的变化。

变换元件是把非电量的变化（敏感元件输出量的变化），变为电学量的变化的装置。如应变片就是一种变换元件，它是把应变的变化转换为电阻的变化。有的传感器，敏感元件同时兼为变换元件，例如热电偶，既是敏感元件又同时把被测量转换为电学量。

（2）测量电路——把传感器输出的电信号转换为便于记录、显示和处理的电信号的电路。它通常包括电桥、放大器、检波器、滤波器、微分、积分电路、模/数或数/模转换电路等等。

（3）记录或显示器——它的作用是以曲线的形式或数字的形式记录或显示测量结果。兵器测试中，常用的有光线示波器、磁带记录器、瞬态记录仪及其他数字式仪表等。由于微电子及计算技术的发展，应用微型计算机进行数据处理，在记录器之后配备通用的数据处理微型机系统，或者在一些测试系统上装备专用的微型机处理设备，已得到了广泛地、迅猛地发展，成为测试系统发展的一个重要动向。

第一章 传感器原理

实现非电量的电测量，首先要把非电学量转换为电学量，没有这一环，非电量的电测量就不可能实现。转换后，电量的变化规律是否能真实地反映被测非电量的变化规律，即转换性能的好坏，直接影响到测试系统的技术性能，所以实现这个转换的装置——传感器，在非电量的电测系统中是极其重要的。下面按其工作原理介绍几种常用的传感器类型。

1.1 应变式传感器

应变式传感器的变换器是电阻应变片。按其结构形式可以分为粘贴式与非粘贴式两种。按其材料可以分为金属式及半导体式两大类。在金属式中用得最多的是粘贴式。

1.1.1 应变片

一、电阻应变片的工作原理

典型应变片的结构如图 1-1 所示。它由敏感元件、基底和引出线组成。敏感元件是高电阻系数的金属丝（直径一般为 $0.02\sim 0.04\text{mm}$ ）绕成的丝栅，丝栅的两端焊有较粗的引出线。丝栅和引出线用粘合剂粘在两张基底之间，使用时直接将应变片粘贴在零件上。

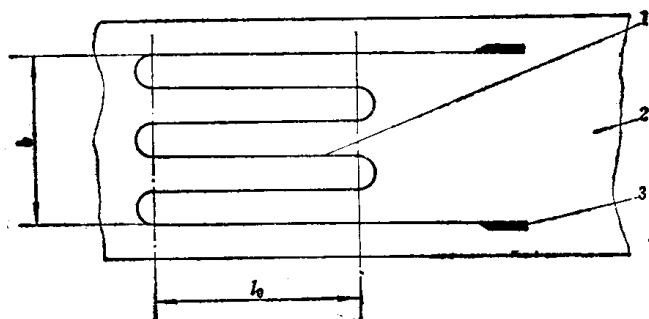


图1-1 应变片结构

1—敏感元件；2—基底；3—引出线。

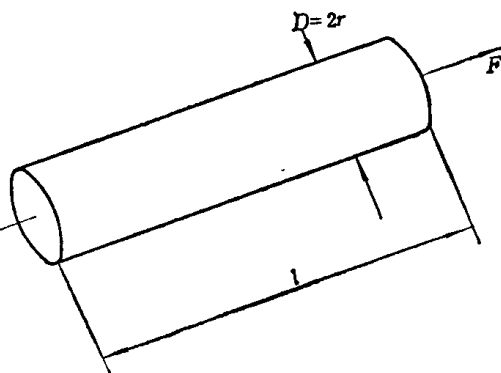


图1-2 金属丝的拉伸变形

为了说明工作原理，假设有一根长为 l [m]，横截面积为 s [cm^2]，电阻率为 ρ [$\Omega\text{cm}^2/\text{m}$] 的金属电阻丝（如图 1-2），它的电阻为 R [Ω]。它们之间的关系为：

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1-1)$$

当这根金属丝的两端受轴向力 F 作用，在弹性范围内变形时，长度增加，横截面减小，而且由实验知道其电阻率 ρ 也发生变化。为了求得它们的相互关系，我们对 (1-1) 式求全微分：

$$dR = -\frac{l}{s} d\rho + \frac{\rho}{s} dl - \rho l \frac{ds}{s^2} \quad (1-2)$$

由于 $s = \pi r^2$ ——导线横截面积;

$ds = 2\pi r dr$; r ——导线半径。

$$\text{可得} \quad \frac{ds}{s} = 2 \frac{dr}{r} \quad (1-3)$$

径向应变 ε_r 与轴向应变 ε_l 之比为泊松比, 即

$$\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_l} = \frac{\frac{dr}{r}}{\frac{dl}{l}} = -\mu \quad (1-4)$$

将式(1-3)及式(1-4)代入(1-2)中, 则有:

$$dR = -\frac{l}{s} d\rho + \frac{\rho}{s} dl + 2\mu \frac{\rho l}{s} \frac{dl}{l} \quad (1-5)$$

电阻的相对变化由式(1-5)和(1-1)相比, 可以求得:

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\text{或写成} \quad \frac{dR}{R} \bigg/ \frac{dl}{l} = 1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\rho} \bigg/ \frac{dl}{l} \quad (1-6)$$

上式说明了电阻变化率 dR/R 与导线的伸长率 dl/l 间的关系。 $\frac{dR}{R} \bigg/ \frac{dl}{l}$ 称为金属电阻丝的灵敏系数, 用 K_0 表示, 即:

$$K_0 = 1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\rho} \bigg/ \frac{dl}{l} \quad (1-7)$$

从(1-7)式可知, 金属电阻丝的灵敏系数受两个因素的影响: 其一是受力后由于导线几何形状发生变化而引起的电阻变化, 即 $(1 + 2\mu)$ 项; 另一个因素是受力后由于导线材料的电阻率 ρ 发生变化, 由 $\left(\frac{d\rho}{\rho} \bigg/ \frac{dl}{l}\right)$ 表示。

一般金属材料的 μ 值为 $0.2 \sim 0.4$, 故 $1 + 2\mu = 1.4 \sim 1.8$ 。实验证明, 在弹性范围内, $\frac{d\rho}{\rho} \bigg/ \frac{dl}{l}$ 为一常数。所以在弹性范围内, 电阻丝的灵敏系数 K_0 为一常数。因此, (1-6)式可以写为:

$$\frac{dR}{R} \bigg/ \frac{dl}{l} = K_0 \quad (1-8)$$

即

$$\frac{dR}{R} = K_0 \frac{dl}{l} \quad (1-8')$$

该式表示, 金属电阻丝的电阻变化率与沿它的轴线方向的应变成比例。利用这个原理做成了电阻应变片。它的输入量为应变 dl/l , 其输出为电学量——电阻值的相对变化 dR/R 。

对电阻丝的材料有下面几个要求:

1. 灵敏系数 K_0 尽量大, 以使变换器的输出大。
2. 灵敏系数 K_0 在尽可能大的应变范围内应是常数, 即电阻变化与应变成线性关系。
3. 具有足够的热稳定性, 电阻温度系数要小, 以减少温度变化引起电阻变化所产

生的误差。

4. 电阻率高。当要求应变片具有一定的电阻值时, 线材的长度短, 因而丝栅的尺寸小。

5. 具有优良的加工与焊接性能。

常用电阻材料的一般性能如表 1-1 所示。

表1-1 常用电阻丝材料性能表

合金类型	牌号或名称	成分		灵敏系数 K_0	电阻率 ρ [$\Omega \cdot \text{m}^2/\text{m}$]	电阻温度系数 $\gamma_f [10^{-6}/^\circ\text{C}]$	对铜热电势 [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]
		元素	%				
铜镍合金	康铜	Cu	55	1.9~2.1	0.45~0.52	± 20	43
		Ni	45				
铁镍铬合金	—	Fe	55.5	3.6	0.84	300	—
		Ni	36				
		Cr	8				
		Mo	0.5				
镍铬合金	镍克洛姆 V	Ni	80	2.1~2.3	1.0~1.1	110~130	3.8
		Cr	20				
	6 J 22(卡马)	Ni	74	2.4~2.6	1.24~1.42	± 20	3
		Cr	20				
		Al	3				
		Fe	3				
	6 J 23	Ni	75	2.4~2.6	1.24~1.42	± 20	3
		Cr	20				
		Al	3				
		Cu	2				
铁铬铝合金	0Cr25Al5	Fe	70	2.8	1.3~1.5	30~40	223
		Cr	25				
		Al	5				
贵金属及合金	铂	Pt	100	4~6	0.09~0.11	3900	7.6
	铂-铱	Pt	80	6.0	0.32	850	—
		Ir	20				
	铂-钨	Pt	92	3.5	0.68	227	6.1
		W	8				

二、应变片的参数与特性

为了恰当地选用应变片, 应该了解它的主要参数和工作特性。

(1) 几何尺寸:

基长——应变片敏感元件在纵轴方向的长度, 用 l_0 表示。对于各种形式的应变片, 其基长的规定如图 1-3 所示。

基宽——在与应变片主轴线垂直的方向上, 应变片敏感元件外侧之间的距离, 以 b 表示。

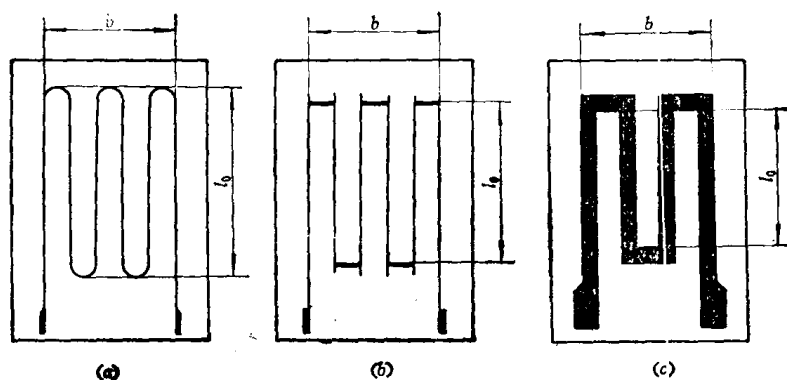


图1-3 应变片的几何尺寸

(2) 电阻值(原始电阻)。所谓应变片电阻是指应变片没有粘贴到试件上,也不受外力,在室温时测定的阻值。目前阻值已渐趋于标准化,绝大部分应变片的阻值为60Ω、120Ω、350Ω、600Ω或1000Ω,其中最常用的是120Ω。

(3) 绝缘电阻——指应变片引线与被测试件之间的电阻值。它取决于粘合剂及基底材料的种类以及它们的固化工艺。绝缘电阻过低,会造成应变片与试件之间漏电,产生测量误差,一般应不低于100MΩ。

(4) 允许电流——在允许温升范围内,可以通过的最大电流值。温升的大小与很多因素有关,例如电流密度、零件的热容量、散热条件等,所以要结合具体情况选择,在大多数情况下依靠实验决定。一般,静态测量时规定为25mA;动态测量时可达75~100mA;箔式应变片可更大一些。

(5) 灵敏系数 K 。

当把金属电阻丝弯成栅形,做成电阻应变片后,应变片的灵敏系数 K 与金属丝的灵敏系数 K_0 是不同的,因此必须按规定的统一标准进行实验,来求得 K 值。由于一般应变片粘贴到试件上后不能取下再用,所以规定取每批产品中的百分之几(如5%)进行测定,取其平均值,作为这批产品的灵敏系数。测定时,将应变片贴在单向应力作用下的试件上,试件材料为泊松比 $\mu = 0.285$ 的钢,用一定加载方式使试件(受轴向拉压的直杆或纯弯梁等)发生变形,应变片的电阻则发生相应的变化。测出试件的应变及电阻的相应变化,则应变片的灵敏系数就可求出,即

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon \quad (1-9)$$

实验证明,应变片的灵敏系数 K 总是小于金属丝的灵敏系数 K_0 的,究其原因,除了胶体传递变形失真以外,另一个原因是存在着横向效应。

(6) 横向效应。

测定应变片的灵敏系数 K 值,是规定在单向应力下的试件上进行的。由材料力学可知,试件在受单向力 P 拉伸时,除受力方向的应变 ε 外,在垂直于受力方向上,则按泊松比的关系发生符号相反的应变 $\varepsilon' = -\mu\varepsilon$ (单向应力场,平面应变场),这部分应变就由栅状应变片的弯曲部分或折回部分所感受,使电阻值减小,因此使应变片的灵敏系数下降,这种现象称为应变片的横向效应。在标定 K 值时,规定试件的材料为泊松比 $\mu = 0.285$ 的钢材,已把横向效应的影响包括在内。但在实际使用中,应变片往往粘贴在平面

应变场中, 沿纵向的应变 ε_x 和沿横向的应变 ε_y 并不呈标定状态 ($\varepsilon_y = -0.285\varepsilon_x$) 的关系, 这时横向效应就要引起一定误差, 需要加以考虑。

当应变片处在任意平面应变场中时 (如图1-4), 由于横向效应, 横向应变 ε_y 也能引起电阻的变化, 所以实际电阻的变化为:

$$\frac{\Delta R_x}{R} = K_x \varepsilon_x + K_y \varepsilon_y \quad (1-10)$$

式中 K_x ——纵向灵敏系数;

K_y ——横向灵敏系数。

若以横向效应系数 H 来表示 K_x 与 K_y 的关系,

$$H = \frac{K_y}{K_x} \quad (1-11)$$

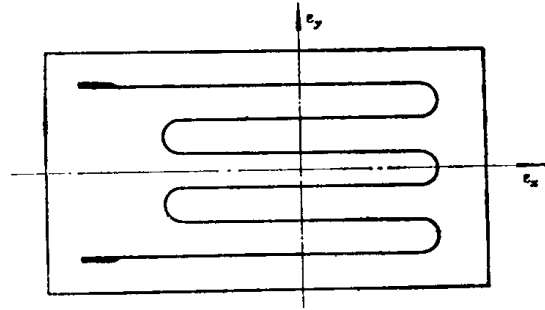


图1-4 横向效应

式(1-10)可写为:

$$\frac{\Delta R_x}{R} = K_x (\varepsilon_x + H \varepsilon_y) \quad (1-12)$$

根据应变片灵敏系数 K 的定义知:

$$K = \frac{1}{\varepsilon_x} \frac{\Delta R_x}{R} = \frac{K_x (\varepsilon_x + \mu \varepsilon_x H)}{\varepsilon_x} = \frac{K_x \varepsilon_x (1 + \mu H)}{\varepsilon_x} \quad (1-13)$$

$$\text{即} \quad K = (1 + \mu H) K_x \quad (1-14)$$

由(1-14)式知: 在任意平面应变场的情况下, 应变片的实际灵敏系数比纵向灵敏系数 K_x 减少了 $\mu H K_x$ 。因此在这种情况下, 仍用应变片出厂合格证上给出的 K 值, 测量结果就会有误差, 横向效应所产生的误差可以按下列方法计算。

由式(1-12)和(1-14)知

$$\frac{\Delta R_x}{R} = K_x (\varepsilon_x + H \varepsilon_y)$$

$$K = (1 + \mu H) K_x$$

若按制造厂标明的灵敏系数 K 所测得的应变值为:

$$\varepsilon'_x = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R} \quad (1-15)$$

$$\text{但此时} \quad K = K_x (1 + \mu_0 H)$$

μ_0 ——标定 K 时试件材料的泊松比 (一般规定 0.285)

由于

$$\varepsilon'_x = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R} = \frac{K_x (\varepsilon_x + H \varepsilon_y)}{K_x (1 + \mu_0 H)} = \frac{\varepsilon_x + H \varepsilon_y}{1 + \mu_0 H} \quad (1-16)$$

相对误差 δ 为:

$$\delta = \frac{\varepsilon'_x - \varepsilon_x}{\varepsilon_x} \times 100\% = \frac{H (\varepsilon_y + \mu_0 \varepsilon_x)}{(1 + \mu_0 H) \varepsilon_x} \times 100\% = \frac{H (\mu_0 + \varepsilon_y / \varepsilon_x)}{(1 + \mu_0 H)} \times 100\% \quad (1-17)$$

应该指出, 横向效应所引起的误差一般是较小的, 只有在测量精度要求高的情况下才需予以考虑。

(7) 线性、滞后、零漂、蠕变和应变极限。

应变片粘贴在试件上, 对试件逐渐加载时, 应变片的 $\Delta R/R - \varepsilon$ 特性曲线在开始一段

为直线，而后 $\Delta R/R$ 不随 ε 成线性增加，如图1-5所示。在后一段， $\Delta R/R$ 随 ε 的增加，变化较慢，这种关系称为应变片的非线性。当加载达到某一最大应变值后开始减小载荷，当载荷为零，应变回到0时，曲线不回到原点（如图1-5的曲线2），第二次再加载时特性曲线如图中的曲线3所示。图1-6是反复加载时应变片的特性曲线。可见，加载与卸载时特性曲线是不完全重合的。

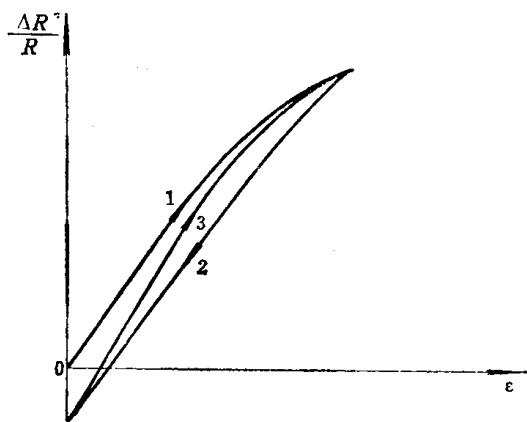


图1-5 应变片的非线性

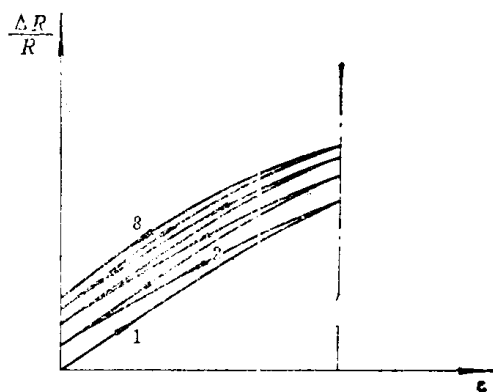


图1-6 应变片的机械滞后

机械滞后就是在循环加载时，加载特性曲线与卸载特性曲线的不重合程度。通常用最大差值 $\varepsilon_{\max}$ 表示，如图1-7所示。

零漂是在恒定温度下，应变片指示的应变值随时间而变化的特性（见图1-8）。一般观测时间为三小时。单位时间内应变的最大变化量，即为应变片（在该温度条件下）的零漂值。常温下零漂极小，可以不必考虑。

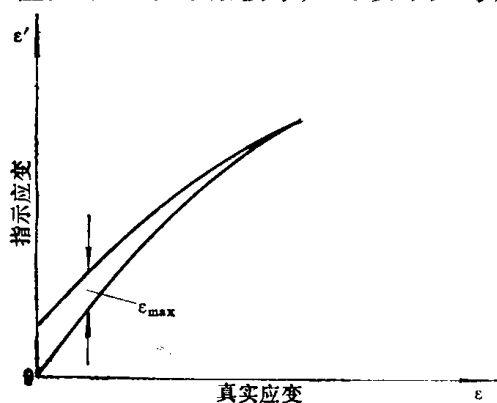


图1-7 机械滞后的表示

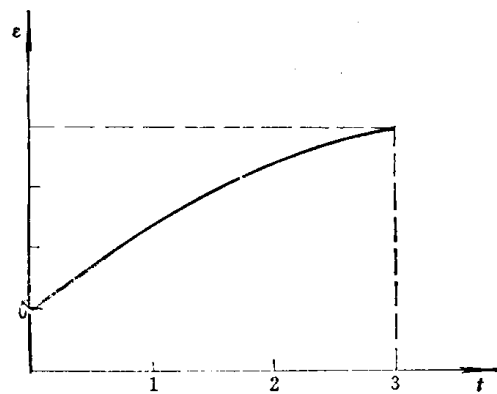


图1-8 应变片的零漂

在一定温度下，对贴好应变片的试件加以一恒定的外力，指示的应变值随时间而变化的特性，称为应变片的蠕变。

显然，零漂和蠕变是衡量应变片特性的时间稳定性的，因此对长时间测量的应变片才有意义。

应变片的应变极限值是在一定误差允许范围内应变片能够测量的最大应变值。这个值有常温和极限使用温度的两种。

（8）应变片的动态特性：

在动态测量时，应变片的基长对测量会产生很大影响。我们分别讨论应变波为阶跃波形与正弦波形两种情况。

当应变波为阶跃波形时（冲击应变，见图 1-9 (a)），由于应变片具有一定长度，所以应变波的前沿上升到最大值需要一定的时间 l_0/c ，（其中 l_0 为基长， c 为应变波的传

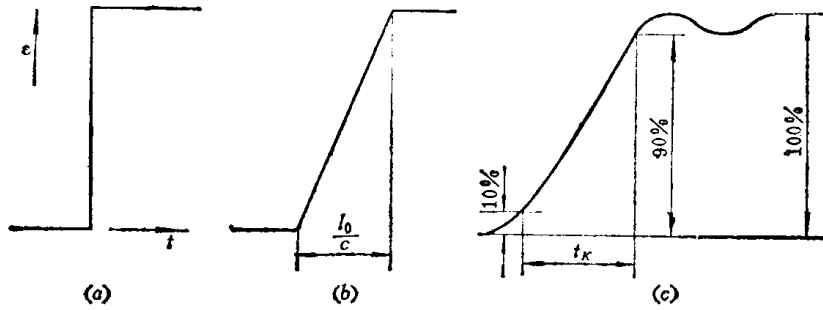


图1-9 应变片的阶跃响应

递速度，其值与声波在试件中的传播速度相同，对钢材 $c = 5100 \text{ m/s}$ ，见图 (b))。因为粘接剂对应变波中的高次谐波有衰减作用，实际波形如图 (c) 所示。前沿从 10% 上升到 90% 的时间为：

$$t_k = 0.8 \frac{l_0}{c} \quad (1-18)$$

当 $l_0 = 10 \text{ mm}$ 及 3 mm 时， t_k 分别为 $1.6 \mu\text{s}$ 和 $0.47 \mu\text{s}$ 。可以看出，边沿时间是很小的。

当应变波按正弦规律变化时，由于应变片具有一定长度，在同一瞬间沿基长方向各点上所感受的应变是不同的，当应变片所反应的平均应变值与基长中点处的真实应变值相差太多，即误差太大，就会使测量失真。我们假定应变正弦波按图 1-10 所示的规律变化。

即：

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (1-19)$$

$$\omega = 2\pi f$$

f —— 应变波变化的频率。

为了计算，将波长 λ 和基长 l_0 都用角度表示，设 $\lambda = 2\pi$ ，则基长 l_0 用角度表示时将 为：

$$\varphi = \pi \frac{l_0}{\lambda} \quad (1-20)$$

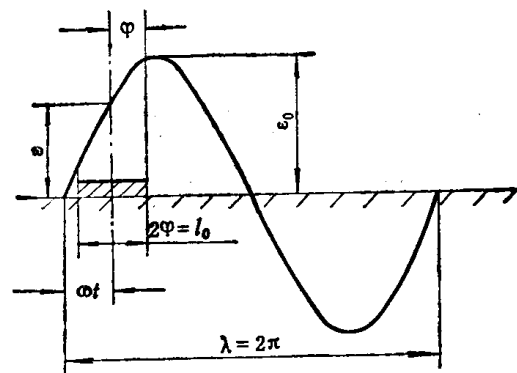


图1-10 应变片对正弦波的响应

应变片所反应的平均应变值为：

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2\varphi} \int_{\omega t - \varphi}^{\omega t + \varphi} \varepsilon_0 \sin \omega t dt = \varepsilon_0 \frac{\sin \varphi}{\varphi} \sin \omega t \quad (1-21)$$

当角 φ 较小时，函数 $\sin \varphi / \varphi$ 可用展开级数的头两项来代替。

即

$$\frac{\sin \varphi}{\varphi} \approx 1 - \frac{\varphi^2}{6} \quad (1-22)$$

● c 值可以用下式求得：

$$c = \sqrt{\frac{E}{\gamma}} g$$

其中 E 为试件弹性模量； γ 为试件材料的比重； g 为重力加速度。

所以应变片中点处的真实应变值与应变片所反应的平均应变值的相对误差为:

$$\delta = \frac{\varepsilon - \bar{\varepsilon}}{\varepsilon} = 1 - \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon} = 1 - \frac{\sin \varphi}{\varphi} \approx \frac{\varphi^2}{6} \quad (1-23)$$

再用长度替换角度得:

$$\delta = \frac{1}{6} \left(\frac{\pi l_0}{\lambda} \right)^2 = \frac{1}{6} \left(\frac{\pi l_0 f}{c} \right)^2 \quad (1-24)$$

其中 $c = \lambda \cdot f$ 为应变波传递速度。

所以

$$f = \frac{c}{\pi l_0} \sqrt{6\delta} \quad (1-25)$$

或

$$l_0 = \frac{c}{\pi f} \sqrt{6\delta} \quad (1-26)$$

由此可知, 当允许误差 δ 及应变波的传播速度 c 为一定时, 所测应变的极限频率 (最高工作频率) 是由基长来决定的。在允许误差较大时, 极限频率与基长的关系可用下式近似表示:

$$f = \left(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{20} \right) \frac{c}{l_0} \quad (1-27)$$

表 1-2 列出按 $\frac{1}{20} \frac{c}{l_0}$ 求出的不同基长所对应的极限频率。

表 1-2

基长 l_0 (mm)	1	2	3	5	8	10	15	20	25
极限频率 (KC)	250	125	83	50	31	25	17	12.5	10

三、温度误差及其补偿

1. 温度变化对应变片的影响

应变片的电阻变化不仅由试件的应变大小来决定, 也与其他因素有关。当应变片所处的环境温度变化时, 由于电阻丝有一定的电阻温度系数, 它的电阻也发生变化, 其电阻变化率为:

$$\frac{\Delta R_t}{R} = \alpha_0 \Delta t \quad (1-28)$$

α_0 ——电阻丝的电阻温度系数, 表示温度改变 1°C 时电阻的相对变化;

Δt ——温度变化量。

线栅在温度变化时, 还要发生伸缩变形, 其长度变化率为:

$$\left(\frac{\Delta l}{l} \right)_r = \beta_r \Delta t \quad (1-29)$$

β_r ——电阻丝的线膨胀系数, 表示温度改变 1°C 时的长度的相对变化。

同样, 试件在温度变化时, 也发生变形, 其长度变化率为:

$$\left(\frac{\Delta l}{l} \right)_s = \beta_s \Delta t \quad (1-30)$$

β_s ——试件材料的线膨胀系数。

由于应变片是粘贴在试件上的, 线栅不能自由地膨胀或收缩, 而只能跟着试件变

形, 因此它受到一个附加的拉伸或压缩, 其应变值为:

$$\varepsilon_{\beta} = \left(\frac{\Delta l}{l} \right)_g - \left(\frac{\Delta l}{l} \right)_r = (\beta_g - \beta_r) \Delta t \quad (1-31)$$

这一应变使应变片所产生的电阻变化率为:

$$\frac{\Delta R_{\beta}}{R} = K \varepsilon_{\beta} = K (\beta_g - \beta_r) \Delta t \quad (1-32)$$

应变片受温度影响而产生的总电阻变化率为:

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_r = \frac{\Delta R_t}{R} + \frac{\Delta R_{\beta}}{R} = \alpha_0 \Delta t + K (\beta_g - \beta_r) \Delta t = [\alpha_0 + K (\beta_g - \beta_r)] \Delta t \quad (1-33)$$

在动态测量中, 由于被测量变化速度很快, 应变片的温度往往与试件的温度不同。此时由于温度变化所产生的总电阻变化率为:

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_r = (\alpha_0 - K \beta_r) (T_r - T_0) + K \beta_g (T_g - T_0) \quad (1-34)$$

式中 T_0 ——试件与应变片的原始温度;

T_r ——应变片温度;

T_g ——试件温度。

可见, 因温度变化所产生的电阻变化率 $\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_r$ 与 α_0 、 β_g 、 β_r 及 K 有关, 这个电阻变化率是由温度的变化而产生的附加输出, 是个虚假信号, 因而引起测量的误差, 必须设法消除或尽量减小。

2. 补偿方法

温度补偿的目的就是消除温度变化对测量值的影响, 提高测量精度。温度补偿问题不仅在高温测量的情况下, 需要认真解决, 就是常温下的测量, 也要充分注意。常用的补偿法有:

(1) 补偿片法:

应变片一般都接在电桥测量电路中, 做为一个桥臂。把两个应变片一个贴在试件上需要测应变的地方, 称为工作片 (图1-11中的 R_a); 另一片贴在试件的不变形 (或贴在与试件相同的材料上) 而温度与工作片的温度一样的地方, 这一片称为补偿片 (图1-11中的 R_b)。

根据电桥原理, 此时电桥的输出电流为:

$$I_c = \frac{R_a R_4 - R_b R_3}{A} U = B (R_a R_4 - R_b R_3) \quad (1-35)$$

其中 A 为与桥臂参数及负载电阻有关的常数 (见第二章电桥原理部分), $B = U/A$ 。

若 $R_3 = R_4$, 且 R_a 与 R_b 满足下列条件, 即能消除温度影响。

① R_a 与 R_b 是属于同一批产品, 即它们的电阻温度系数 α_0 , 线膨胀系数 β_r 及灵敏系数 K 是相同的, 且它们的初始值 $R_{a_0} = R_{b_0}$ 。

② 补偿片与工作片贴在相同的材料上, 即线膨胀系数 β_g 相同。

③ 补偿片与工作片处于同一温度场内, 即 Δt 相同。

当试件不受外力, $\varepsilon = 0$ 时, 使电桥平衡, $R_a R_4 - R_b R_3 = 0$; $I_c = 0$ 。

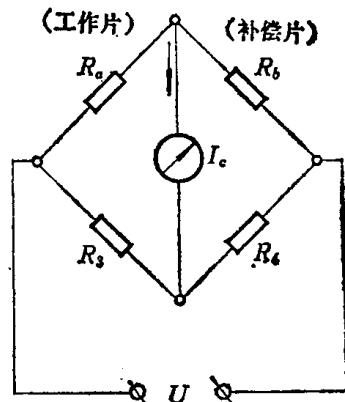


图1-11 补偿片法原理