

Experimental Course of
Mechanical Foundation

机械基础 实验教程

主编 张继平



国防工业出版社
National Defense Industry Press

机械基础实验教程

主 编 张继平

副主编 宋 岩 张 颖

参 编 张立新 曹 彪 岳艳丽 茅 乐

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是在“两级院校会议”精神指导下,为加强学员的实践能力的培养、提高实验教学效果编写的实验教材,主要内容包括实验基础知识、材料力学实验、机械设计基础实验、机械创新设计实验4个部分,共21个实验项目。

本书适合作为我院生长技术干部“材料力学”(50+10)、“工程力学”(50+10)、“机械设计基础”(50+10)和生长指挥干部“工程力学”(50+10)、“机械设计基础”(30+10)以及本科选修课“机械创新设计”(10+10)等机械基础系列课程的配套实验教材。

图书在版编目(CIP)数据

机械基础实验教程/张继平主编. —北京:国防工业出版社,2014.8

ISBN 978-7-118-09543-2

I. ①机… II. ①张… III. ①机械学—实验—高等学校—教材 IV. ①TH11-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第158184号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 9¼ 字数 209 千字

2014年8月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 32.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

本书是在“两级院校会议”精神指导下,为加强学员的实践能力的培养、提高实验教学效果编写的实验教材。

本书主要内容包括实验基础知识、材料力学实验、机械设计基础实验、机械创新设计实验 4 个部分,共计 21 个实验项目,涵盖了 2012 版人才培养方案中,生长技术干部和生长指挥干部各专业工程技术基础模块中“材料力学”、“工程力学”、“机械设计基础”和“机械创新设计”等机械基础系列课程的全部实验内容。

本书具有以下特点:

1. 紧密结合理论教学内容和现有实验设备编写实验项目,不同的专业方向可根据理论内容和实践能力要求从中选择合适的实验项目,具有很强的针对性和实用性。为便于开展实验教学,实验项目的顺序与理论课程内容基本保持一致,使教材既与理论教学内容相呼应,又具有一定的独立性。

2. 适应实验课程的教学改革需要,体现了对实验课程评价方式的改革。学员不需要按传统方式撰写实验报告,实验结束后,按实验项目的类别分别提交综合分析报告,强调对学员知识综合应用能力的培养。

为便于开展实验教学,实验项目的顺序与理论课程内容基本保持一致,教员可根据不同专业方向的理论教学内容和实践能力要求选择合适的实验项目。

本书可作为生长技术干部“材料力学”(50+10)、“工程力学”(50+10)、“机械设计基础”(50+10)和生长指挥干部“工程力学”(50+10)、“机械设计基础”(30+10)以及选修课“机械创新设计”(10+10)等机械基础系列课程的配套实验教材。

本书由张继平负责统稿并编写第 1 章,张立新、曹彪共同编写第 2 章,宋岩编写第 3 章,张颖编写第 4 章,岳艳丽、茅乐负责图片处理。限于编者的学识水平与编写经验,书中难免存在缺点和错误之处,希望广大读者和同行不吝赐教,对此编者表示衷心的感谢。

编 者

2013 年 12 月

目 录

第1章 实验基础知识	1
1.1 测量系统的组成	1
1.2 应变与应力的测量	2
1.2.1 应变电测法	2
1.2.2 应力的测量	6
1.2.3 影响测量精度的因素及消除方法	8
1.3 力与力矩的测量	9
1.3.1 力的测量	9
1.3.2 力矩测量	12
1.4 位移与速度的测量	13
1.4.1 位移测量	13
1.4.2 速度测量	14
第2章 材料力学实验	16
2.1 实验设备	16
2.1.1 多功能材料力学试验机	16
2.1.2 数据采集分析系统	22
2.2 材料的力学性能实验	30
2.2.1 拉伸实验	30
2.2.2 压缩实验	34
2.2.3 扭转实验	38
2.3 电测实验	42
2.3.1 E 、 μ 电测实验	42
2.3.2 梁弯曲正应力电测实验	46
2.3.3 等强度梁电测实验	50
2.3.4 弯扭组合主应力电测实验	55
第3章 机械设计基础实验	60
3.1 机械原理实验	60
3.1.1 机构认知实验	60

3.1.2	机构运动简图测绘与分析实验	62
3.1.3	渐开线齿轮范成实验	67
3.1.4	机械系统动力学调速实验	71
3.1.5	刚性转子动平衡实验	75
3.2	机械设计实验	80
3.2.1	机械设计认知实验	80
3.2.2	螺栓连接性能测试实验	85
3.2.3	带传动效率和滑动率测试实验	90
3.2.4	液体动压滑动轴承性能测试实验	93
3.2.5	减速器拆装与结构分析实验	100
第4章	机械创新设计实验	105
4.1	创新思维训练	105
4.1.1	常用创新技法	105
4.1.2	创新实例分析	106
4.2	机械创新搭接实验	110
4.2.1	杆系搭接实验	110
4.2.2	轴系搭接实验	118
4.2.3	基于慧鱼模型的机械搭接实验	122
4.3	慧鱼模型编程控制	124
4.3.1	控制装置	124
4.3.2	控制方法及控制软件	127
4.3.3	慧鱼模型编程控制实验	132
附录A	材料的力学性能实验报告参考格式	135
附录B	电测实验报告参考格式	137
附录C	机械原理实验报告参考格式	138
附录D	机械设计实验报告参考格式	140
参考文献		141

第 1 章 实验基础知识

在机械基础实验中,经常涉及到拉/压力、扭矩、位移、转速等基本物理量的测量。这些物理量包含了机械部件或机械系统状态的基本信息,可直接或间接地用于评判系统的行为和状态,也提供了对机械系统进行监控的基础。机械基础实验的大部分工作就是对这些基本物理量的测量。

每种基本物理量的测量都有多种方法,测量仪器也是多种多样,涉及到多学科的专门知识。对此,本书不做系统的介绍,而是结合实验室现有设备,概要介绍机械基础实验课程中所用到的基本物理量的测量原理和测量方法,为后续各章节内容的学习提供理论基础。

1.1 测量系统的组成

力、力矩、位移、速度等基本物理量均是随时间变化的非电信号,在这些物理量的测量系统中一般要包含从被测对象拾取机械信号、将非电性质的机械信号转换为电信号、经放大后输入后续设备进行分析处理、对测试数据进行显示或打印等环节,其一般构成如图 1-1 所示。

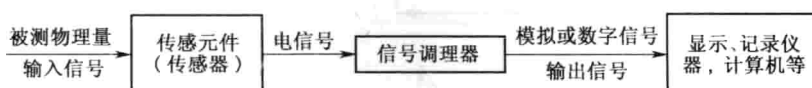


图 1-1 测量系统的一般构成

传感器是测量装置的输入端,是测量系统中的第一个环节。它通过传感元件直接感受被测量并将其转换为易测信号,如电阻应变片就是一种传感元件,它也是能将构件的应变、应力等机械信号转换为电阻变化的传感器。

信号的调理和转换是测量系统中不可缺少的重要环节。经传感器后的微弱电压信号或电阻、电容、电感、电流等非电压信号,难以直接显示或通过 A/D 转换器送入仪器或计算机进行数据采集。因此,需要经过调理、放大、滤波等一系列的加工处理,以将微弱信号放大、将非电压信号转换为电压信号、抑制干扰噪声、提高信噪比,这样才便于后续环节的处理。

信号的显示和记录也是测量系统中不可缺少的组成部分。传统的信号显示和记录装置包括万用表、阴极射线管示波器、XY 记录仪、模拟磁带记录仪等。随着计算机技术的飞速发展,数字式设备已成为显示记录装置的主流,目前主要有两种形式:一种是用数据采集仪器进行信号记录,如奥地利 DEWETRON 公司生产的多通道数据采集分析仪;另一种是用计算机内插 A/D 卡与数据采集软件相结合完成数据的采集与记录,如多功能材料

力学试验机、螺栓连接试验台等实验设备均采用了该种方式。还有一种方式是通过新型仪器前端直接实现数据采集与记录,如美国 DP 公司生产的多通道分析仪,仪器前端带有 DSP 模块和存储器,可实现数据的采集控制与存储。

1.2 应变与应力的测量

在工程上,测量应变和应力最常用的一种方法是应变电测法。它是利用电阻应变片,先测出构件表面的应变,再根据应力、应变的关系式来确定构件表面应力状态的一种实验应力分析方法。这种方法的主要优点是动态特性好、测量范围大、精度高,变换后得到的电信号可以很方便地进行传输和各种变换处理,并可进行连续的测量和记录或直接和计算机数据处理系统相连接等。缺点是只能测量构件表面的应变和应力。

1.2.1 应变电测法

1. 电阻应变片

电阻应变片是电测法中感受应变的传感元件,能够将机械应变转换为应变片电阻值的变化,其基本结构如图 1-2 所示。

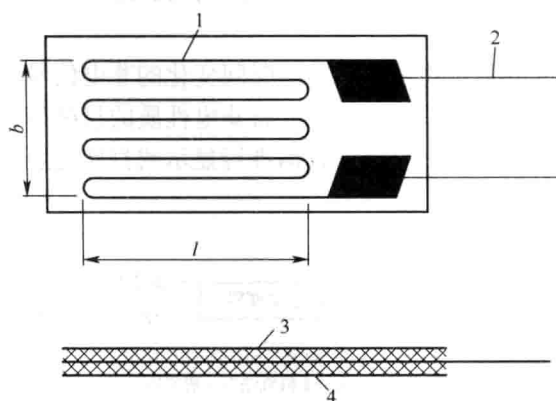


图 1-2 电阻应变片的基本结构

1—敏感丝栅;2—引出线;3—覆盖层;4—胶膜基底。

敏感丝栅相当于一个电阻元件,电阻值为

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

式中: ρ 为丝栅材料的电阻率; l 为丝栅的当量长度; A 为金属丝的横截面积。

使用时,将电阻应变片粘贴在被测构件表面,当构件受力产生变形时,应变片敏感丝栅也随之变形,丝栅长度 l 和横截面积 A 均会发生变化,丝栅的电阻值也就发生相应的变化。在小变形情况下,其变化量的大小与构件变形成一定的比例关系:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_{\text{片}} \frac{\Delta l}{l} = K_{\text{片}} \varepsilon \quad (1-2)$$

式中: $K_{\text{片}}$ 为电阻应变片的灵敏系数,与应变片的材料有关,一般金属电阻应变片灵敏系数为 1.7~3.6,常用的应变片灵敏系数为 2.1 左右; ε 为构件在应变片丝栅范围内沿丝栅

方向的平均线应变, $\varepsilon = \Delta l / l$ 。

因此,只要测出 ΔR 的值,就可以得到线应变 ε 。

2. 应变测量原理

通常情况下,被测构件发生小变形时,应变片的电阻变化 ΔR 也很小,直接测量比较困难,需要通过应变测量装置完成应变量的转换、放大与显示,这类装置称为电阻应变仪。

根据被测应变的性质和工作频率的不同,可采用不同的应变仪。对于静态载荷作用下以及变化十分缓慢或变化后能很快稳定下来的应变,可采用静态电阻应变仪;以静态应变测量为主,兼作 200Hz 以下的低频动态测量可采用静动态电阻应变仪;0~2kHz 范围的动态应变采用动态电阻应变仪,这类应变仪通常具有 4~8 个通道;测量 0~20kHz 的动态过程和爆炸、冲击等瞬态变化过程,则采用超动态电阻应变仪。

电阻应变仪一般采用调幅放大电路,由电桥、前置放大器、功率放大器、相敏检波器、低通滤波器、振荡器、稳压电源等组成,其作用是将应变片的电阻变化 $\Delta R/R$ 转换为电压(或电流)的变化,然后通过放大器将此微弱的电压(或电流)信号进行放大,以便指示和记录。

电阻应变仪中常用的惠斯通电桥原理如图 1-3 所示。

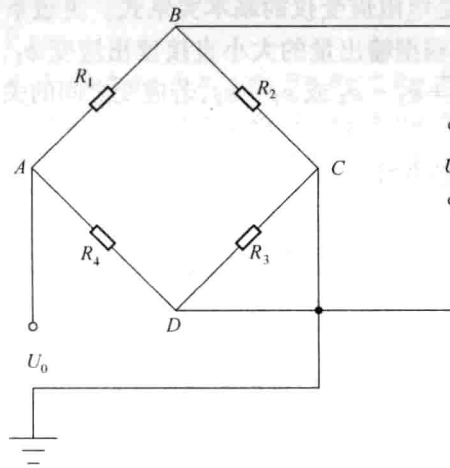


图 1-3 惠斯通电桥原理图

惠斯通电桥是将电阻、电容或电感变化转换为电压或电流输出的一种测量电路,其输出既可用指示仪表直接测量,也可以送入放大器进行放大。这种桥式测量电路简单,具有较高的精确度和灵敏度,在测量装置中被广泛应用。

图 1-3 所示的惠斯通电桥由四个桥臂电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 组成,供桥电压由 A、C 点输入,B、D 点输出电压为 U 。由电工学原理可知

$$U = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_0 \quad (1-3)$$

假定电桥的初始状态为 $R_1 R_3 = R_2 R_4$,此时电桥输出电压 $U = 0$,称之为电桥平衡。

现假设四个桥臂的电阻应变片各自受到应变后分别有微小的电阻增量 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 和 ΔR_4 ,这时电桥的输出电压增量 ΔU 可用下面的公式计算:

$$\Delta U = \left[\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) + \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)^2} \left(\frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \right] \times U_0 \quad (1-4)$$

取四臂电阻片的原始阻值相等,即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, 且 $K_{\text{片}}$ 亦相同,则式(1-4)变为

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{1}{4} U_0 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \\ &= \frac{1}{4} U_0 K_{\text{片}} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \end{aligned} \quad (1-5)$$

这就是电桥的和差特性,它表明电桥输出电压增量 ΔU 与各桥臂电阻的相对增量 $\Delta R/R$ 或应变 ε 成线性关系。

若接成半桥,即 R_1 、 R_2 变化,而 R_3 、 R_4 为仪器内的精密无感电阻,则

$$\Delta U = \frac{1}{4} U_0 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) = \frac{1}{4} U_0 K_{\text{片}} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (1-6)$$

若接成 1/4 桥,即只有 R_1 变化, R_2 、 R_3 、 R_4 不变化,则

$$\Delta U = \frac{1}{4} U_0 \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{1}{4} U_0 K_{\text{片}} \varepsilon_1 \quad (1-7)$$

式(1-5)~式(1-7)是电阻应变仪的基本关系式。灵敏系数 $K_{\text{片}}$ 和供桥电压 U_0 是已知的,故接成 1/4 桥时可根据输出量的大小直接读出应变 ε_1 ,而接成全桥或半桥时可读出应变的代数和 $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4$ 或 $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$,若应变之间的关系是已知的,则可以计算出所测应变值。

3. 应变片的布置和接桥方式

由于应变片粘贴于构件后,所感受的是构件表面的拉应变或压应变,应变片的布置和电桥的连接方式应根据测量的目的、对载荷分布的估计而定,这样才能便于利用电桥的和差特性达到只测出所需应变而排除其他干扰因素的目的。因此,布片和接桥应符合以下原则:

- (1) 在分析构件受力的基础上选择合适的贴片位置;
- (2) 充分合理地利用电桥的和差特性,只使需要测量的应变影响电桥的输出,且有足够的灵敏度和线性度;

- (3) 使构件贴片位置的应变与外载荷成线性关系。

例如,在测量复合载荷作用下的应变成分时,就需通过应变片的布置和接桥方法来消除相互影响的因素,下面通过具体的测量实例进行说明。

例 1 测量拉伸与弯曲组合变形构件中弯矩产生的应变。

图 1-4 为测量拉伸与弯曲组合变形时弯矩产生应变的贴片与接线图。令 ε_F 、 ε_M 、 ε_t 分别代表拉力 F 、弯矩 M 和温度变化产生的表面应变, R_1 、 R_2 为应变片,且 $R_1 = R_2$,分别贴在构件的上下表面上。 R_1 感受的应变为 $\varepsilon_F + \varepsilon_M + \varepsilon_t$, R_2 感受的应变为 $\varepsilon_F - \varepsilon_M + \varepsilon_t$,输出电压增量为

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{1}{4} U_0 K_{\text{片}} [(\varepsilon_F + \varepsilon_M + \varepsilon_t) - (\varepsilon_F - \varepsilon_M + \varepsilon_t)] \\ &= 2 \left(\frac{1}{4} U_0 K_{\text{片}} \varepsilon_M \right) \end{aligned} \quad (1-8)$$

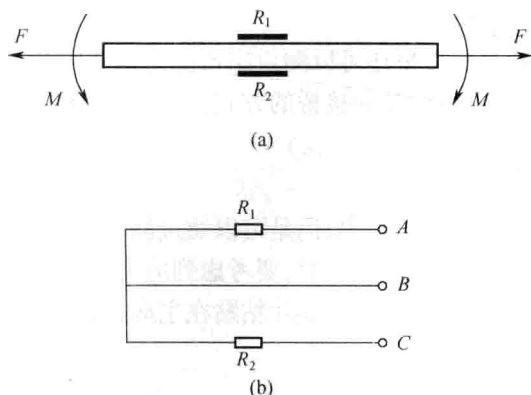


图 1-4 测量弯矩产生应变

(a) 贴片;(b) 接线图。

由式(1-8)可知,测量结果中排除了拉力和温度的影响,仅有弯矩产生的应变,且输出电压增加了一倍,因此, ε_M 的数值应是应变仪的读数除以 2。

例 2 测量弯曲与扭转组合变形构件中扭矩产生的应变。

图 1-5 为测量弯曲与扭转组合变形中扭矩产生应变的贴片与接线图。各载荷使应变片感受的相应应变如下:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_T + \varepsilon_M + \varepsilon_t; \varepsilon_2 = -\varepsilon_T - \varepsilon_M + \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_T - \varepsilon_M + \varepsilon_t; \varepsilon_4 = -\varepsilon_T + \varepsilon_M + \varepsilon_t$$

式中: ε_T 、 ε_M 、 ε_t 分别为扭矩 T 、弯矩 M 和温度变化产生的表面应变。

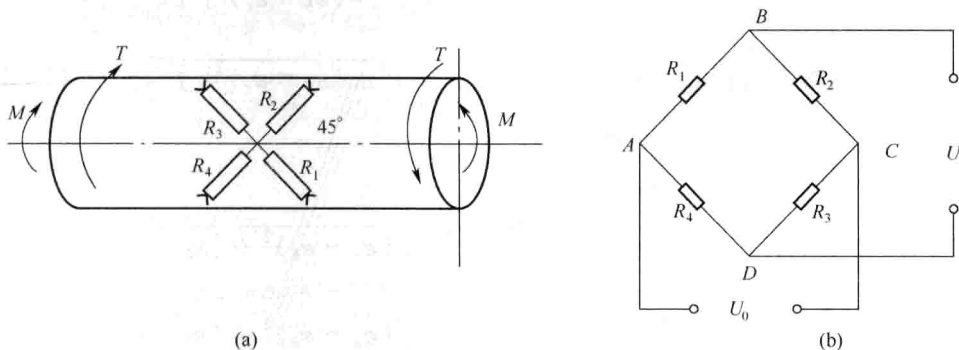


图 1-5 测量扭矩产生应变

(a) 贴片;(b) 接线图。

根据式(1-5),电桥输出电压的增量为

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{1}{4} U_0 K_{\text{片}} [(\varepsilon_T + \varepsilon_M + \varepsilon_t) - (-\varepsilon_T - \varepsilon_M + \varepsilon_t) + \\ &\quad (\varepsilon_T - \varepsilon_M + \varepsilon_t) - (-\varepsilon_T + \varepsilon_M + \varepsilon_t)] \\ &= 4 \left(\frac{1}{4} U_0 K_{\text{片}} \varepsilon_T \right) \end{aligned} \quad (1-9)$$

由式(1-9)可知,测量结果中排除了弯矩和温度引起的应变成分,仅有扭矩产生的应变,且输出电压提高到单片工作时的 4 倍,因此应变仪的读数除以 4 即可得到 ε_T 的数值。当然,利用 R_1 、 R_2 或 R_3 、 R_4 两个工作应变片接成半桥也可以测出扭矩产生的应变,

此时应变仪的读数是 ε_T 的 2 倍。

通过合理的布置应变片和接桥还可以测量出弯曲与扭转组合变形构件中弯矩产生的应变,请大家思考和讨论布置应变片和接桥的方式。

1.2.2 应力的测量

应力不能直接利用应变电测法测出,但是可以通过测量构件表面的线应变,再利用广义胡克定律计算得到。因此,布置应变片时,要考虑到应力状态:

(1) 若被测点是单向应力状态,则应变片粘贴在主应力方向,通过应变仪测出主应变 ε ,得到该点主应力为

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-10)$$

(2) 若被测点是二向应力状态,且其主应力方向已知,则将应变片粘贴在主应力方向,通过应变仪测出两个主应变 ε_1 和 ε_2 ,该点主应力为

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \\ \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \end{cases} \quad (1-11)$$

(3) 若被测点是二向应力状态,但主应力方向未知,则需在被测点粘贴三个不同方向的应变片(即应变花)才能求解。

对于图 1-6 所示的直角应变花垂直粘贴方式,主应变与主应力大小与方向为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{1}{2}\{(\varepsilon_a + \varepsilon_c) + \sqrt{2[(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2]}\} \\ \varepsilon_2 = \frac{1}{2}\{(\varepsilon_a + \varepsilon_c) - \sqrt{2[(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2]}\} \\ \tan 2\alpha_0 = \frac{2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \end{cases} \quad (1-12)$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}\left[\frac{1+\mu}{2}(\varepsilon_a + \varepsilon_c) + \frac{\sqrt{2}(1-\mu)}{2}\sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}\right] \\ \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}\left[\frac{1+\mu}{2}(\varepsilon_a + \varepsilon_c) - \frac{\sqrt{2}(1-\mu)}{2}\sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}\right] \end{cases} \quad (1-13)$$

式中: $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ 为 a, b, c 三个方向的线应变; α_0 为主应变方向与 x 轴的夹角; E 为弹性模量; μ 为泊松比。

对于图 1-7 所示的直角应变花倾斜 45° 粘贴方式,由于三个应变片的相互位置关系并未发生变化,主应变 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 的计算公式同式(1-12),主应力的计算公式同式(1-13),主应变的方向与应变片 a 的夹角 α_a 可表示为

$$\tan 2\alpha_a = \frac{2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad (1-14)$$

对比图 1-6 和图 1-7 可知

$$\alpha_0 = \alpha_a - 45^\circ \quad (1-15)$$

故有

$$\tan 2\alpha_0 = \frac{-1}{\tan 2\alpha_a} \quad (1-16)$$

将式(1-14)代入式(1-16)可得

$$\tan 2\alpha_0 = \frac{-(\varepsilon_a - \varepsilon_c)}{2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)} \quad (1-17)$$

α_0 即为直角应变花倾斜 45° 粘贴时的主应力(主应变)与 x 轴的夹角。

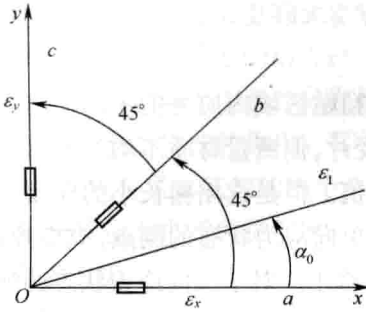


图 1-6 直角应变花垂直粘贴方式

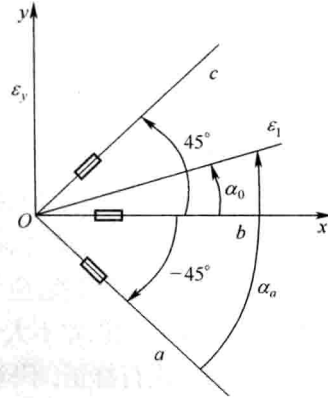


图 1-7 直角应变花倾斜 45° 粘贴方式

对于图 1-8 所示的等角应变花的粘贴方式,其主应变、主应力大小及其方向的表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} + \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_a)^2} \\ \varepsilon_2 &= \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} - \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_a)^2} \\ \tan 2\alpha_0 &= \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c} \\ \sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{1+\mu}{3}(\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c) + \frac{\sqrt{2}(1-\mu)}{3} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_a)^2} \right] \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{1+\mu}{3}(\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c) - \frac{\sqrt{2}(1-\mu)}{3} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_a)^2} \right] \end{aligned} \right. \quad (1-18)$$

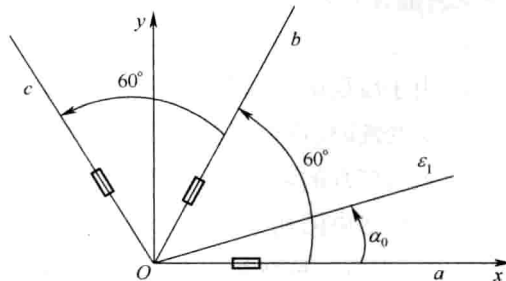


图 1-8 等角应变花的粘贴方式

1.2.3 影响测量精度的因素及消除方法

进行应变和应力测试时,为了保证测量结果的有效性,必须对影响测量精度的各种因素有所了解,并采取一些必要的措施减小或消除它们的影响,以保证测试的精确度。否则,测量将可能产生较大误差甚至失去意义。就电测实验方法本身而言,主要从以下几个方面考虑。

1. 正确选择应变片

根据被测对象的受力状态和构件材质、测试精度要求以及测试环境等条件,选用合适的应变片。

(1) 栅长选择。由于应变片测出的应变是测点粘贴区域内应变的平均值,为保证测出的应变接近于测点真实应变,应选择栅长小的应变片,但测量材质不均匀的木材、混凝土试件时,应采用栅长大的应变片,以测得应变平均值。但是选用栅长小的应变片时,其横向效应较大,会带来测量误差,应予以修正。对于单向应力状态的测点,应变片横向效应系数达 5% 时,应变读数误差不大于 1%,一般可不修正。对于二向应力状态的测点,横向效应的影响一般要进行修正,不同的应变花考虑横向效应时都有相应的修正公式,可查表得到。

(2) 测试环境影响。环境温度变化时,应选用电阻温度系数小的应变片以减小温度变化带来的附加应变;环境湿度大时,应变片受潮后会导致绝缘电阻下降,并产生零点漂移,应选用防潮性能好的胶基应变片;高压下测量时,应选用基底厚度较薄的胶基康铜丝栅箔式应变片,以减小压力效应引起的附加应变。

2. 减小贴片误差

实际测试中,由于应变片的贴片方向与理论主应力方向不一致,会导致测得的应变值不是主应力方向的真实应变,从而产生一个附加误差。随着贴片角度的误差增大,贴片误差也加大,因此贴片时应精细操作以减小贴片误差。

3. 克服附加电阻的影响

接线时,电桥输入端用接线柱或开关会带来因接触电阻而产生的应变,因此实际测量时应采用焊接方式。另外,导线过长产生的附加电阻导致灵敏度下降也不能忽略,需进行修正。

4. 温度补偿

环境湿度和温度对应变测量有显著的影响,使应变读数随时间缓慢漂移,造成读数的不稳定。

应变片在受潮的情况下,由于胶层的蠕变和滞后效应,使应变读数随时间发生缓慢的变化,形成读数的漂移。当胶层受潮时,还会引起绝缘电阻下降,相当于在敏感栅各丝段之间并联了电阻,其效应是导致应变片的阻值下降,产生虚假的应变读数,所引起的误差不可忽视,静态测量中一般要求绝缘电阻在 $100\text{M}\Omega$ 以上。

温度变化比湿度的影响更为严重。粘贴到构件上的应变片的电阻值变化,一方面随构件应变而变化;另一方面因环境温度变化而变化。前者是要测量的应变,后者是温度变

化对测量结果的影响。环境温度产生的附加应变值对测试结果的影响较大,除前述应选用电阻温度系数小的应变片以外,还需考虑在测量中消除其影响。

消除的方法是温度补偿。目前补偿方法有:

(1) 利用温度自补偿应变片。它是通过对应变片的敏感丝栅材料和制造工艺采取各种措施,使应变片在一定的温度范围内工作时 $\Delta R_t = 0$,这种方法常用于中、高温下的应变测量。

(2) 在常温中经常使用桥路补偿法。它是通过布置应变片和接桥的方法即利用电桥的和差特性,来消除温度的影响。一种桥路补偿法是用两个同样的应变片,一片作为工作片,贴在构件上需测量应变的地方;另一片作为补偿片,贴在与构件同材料、同温度条件但不受力的构件上,当两个应变片分别接到电桥的相邻两桥臂上时,温度变化所引起的电桥输出为零,起到温度补偿的作用。另一种桥路补偿法如 1.2.1 节例 2 所示,使用同一构件上温度相同且应变关系已知的两个应变片接成半桥或四个应变片接成全桥,既能消除温度的影响,还能提高电桥的灵敏度。

5. 电磁干扰

测试时可能存在的接地不良、导线分布电容、互感、环境中强磁场干扰等因素,也会导致测试结果的改变,因此应排除测量现场的电磁干扰。

1.3 力与力矩的测量

1.3.1 力的测量

1. 力的测量原理和测量方法

力是物体之间的相互作用,它的作用效应表现在两个方面:改变物体的运动状态或使物体产生变形。力的本身是无法直接测量的,因此,对力的测量总是通过观测物体受力后,其形状、运动状态或具有的能量变化来完成的。

力的测量所依据的原理就是力的静力效应和动力效应。

力的静力效应是指弹性物体受力的作用后产生相应变形的物理现象,在弹性范围内物体的变形量与所受的力成正比,因此,只需通过一定手段测出物体的弹性变形量就可以间接确定物体所受的力的大小。

力的动力效应是指具有一定质量的物体受到力的作用时,其动量发生变化,从而产生相应的加速度的物理现象,此物理现象可用牛顿第二定律描述。当物体的质量确定时,该物体所受的力与产生的加速度间成正比例关系。因此,只要测得物体的加速度就能间接得到力值。

力的测量通常采用比较法。各种力值的测量方法可以归纳为两类:第一类是直接比较法,它是将待测力直接与基准量进行比较,如各种天平,此法只适用于静态测量;第二类是间接比较法,它是将待测力通过测力传感器按比例转换为其他物理量,然后再与标定值比较最后得出力的大小,此法可用于静态或动态的力值测量,机械基础实验设备均采用了此种方法,而且所用的测力传感器基本上都是应变式的测力传感器。

2. 应变式测力传感器

应变式测力传感器由弹性元件、电阻应变片和其他附加构件组成,是利用静力效应测力的位移型传感器。在应变式测力传感器中,弹性元件是传感器的核心部分,其结构形式和尺寸、力学性能、材料选择和加工质量等是保证测力传感器使用质量和测量精度的决定性因素。弹性元件的结构,可根据被测力的性质和大小以及允许的安放空间等因素设计成各种不同的形式。常用的测力弹性元件有柱式、环式、梁式和剪切式等。下面以常用的柱式和剪切式测力传感器为例进行说明。

1) 柱式测力传感器

柱式测力传感器的弹性元件为实心柱体或空心圆筒,如图 1-9(a) 所示。弹性元件受力后变形,粘贴在其上的应变片也随其产生应变,若应力在弹性范围内,则有

$$\varepsilon = \frac{dl}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{EA} \quad (1-19)$$

式中: F 为作用在弹性元件上的集中力; A 为弹性元件的横截面面积; E 为材料的弹性模量。

实际应用中,被测力 F 作用线与弹性元件轴线不可避免地会有偏心或倾斜,因而必须采用适当的结构设计、合理布置应变片位置以及接桥方式以减小偏心或倾斜带来的测量误差。

如图 1-9(a) 所示,一般在柱式弹性元件上粘贴 8 个应变片,分 4 个对称方位纵横粘贴,每个桥臂由两个应变片串联组成图 1-9(b) 所示的全桥,既可以消除横向力和弯矩的影响,实现温度补偿,又将测量灵敏度提高到 $2(1 + \mu)$ 倍。

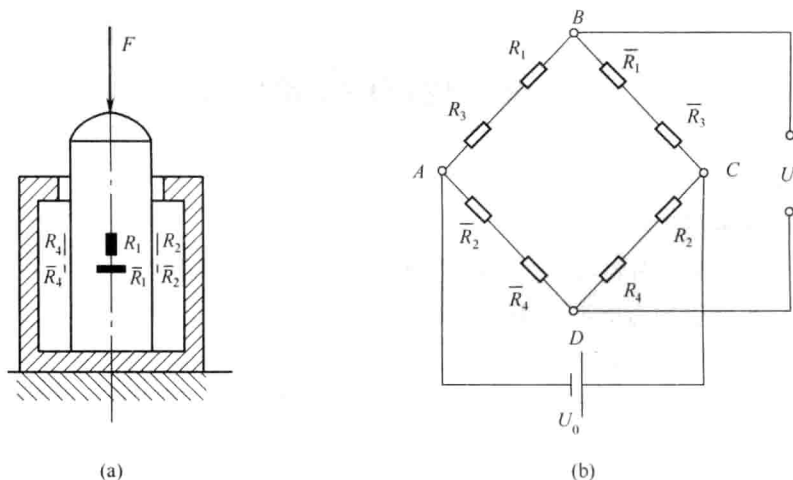


图 1-9 柱式测力传感器及接线图

(a) 柱式测力传感器; (b) 接线图。

2) 剪切式测力传感器

(1) 轮辐式测力传感器。轮辐式测力传感器是一种剪切式测力传感器,其弹性元件由轮轴、轮圈和轮辐构成,如图 1-10 所示。轮辐对称地连接在轮圈和轮轴之间,通常为 4 条或 8 条,每条轮辐相当于一个两端固定的超静定梁。当被测外力 F 作用在轮轴上端

面时,轮辐发生弯曲变形,每条轮辐的剪力均为常数。通过贴在轮辐中性层处、且与中性层夹角为 45° 的应变片测量剪力,各轮辐剪力测量结果之和即为外力 F 。

尽管轮辐数量可有不同,贴片和连接桥路的原则是一致的,即必须设法消除外力 F 相对于轮轴的偏心和倾斜带来的测量误差,并实现有效的温度补偿。由图 1-10 可以看出 4 条轮辐传感器上应变片的贴片位置、方向以及接线方式。被测力 F 的偏心或倾斜对轮辐①、②会产生弯曲效应和扭转效应,由于应变片 R_1 和 R_2 位于轮辐中性层上,不会受到弯曲效应的影响,而其扭转效应使轮辐①、②发生同向、等量的扭转,应变片 R_i 和 $\bar{R}_i$ ($i=1,2$) 产生等量、异号的电阻变化,串联在同一桥臂上能相互抵消,亦即将扭转效应的影响消除。

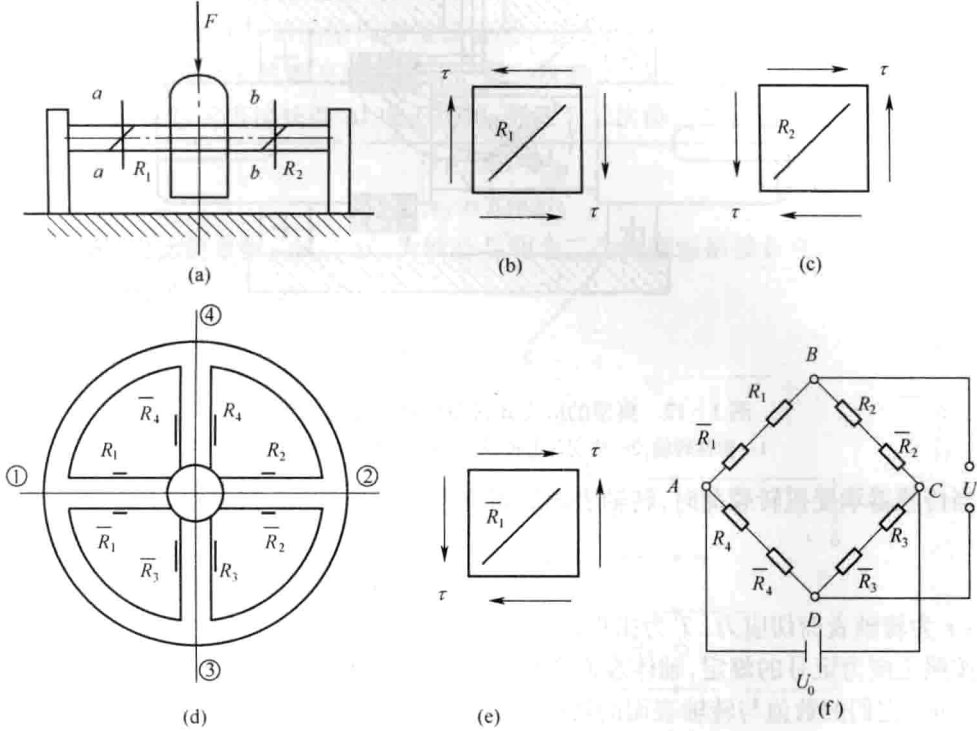


图 1-10 轮辐式测力传感器及接线图

(a) 测力传感器的主视图;(b)、(c)、(e) 应力单元体;(d) 测力传感器的俯视图;(f) 电桥。

轮辐式测力传感器有良好的线性,抗过载能力较强,被测力偏心或倾斜对传感器测量结果影响较小,允许承受拉伸或压缩载荷,可在受力情况较为复杂的情况下使用,传感器外形扁平,纵向尺寸较小,在材料力学试验机上得到广泛应用。

(2) S 形测力传感器。S 形测力传感器也是一种剪切式测力传感器,其弹性元件如图 1-11 所示。传感器工作时 AB 区段既发生弯曲变形也发生剪切变形,而在 AB 区段中间对称截面上的弯矩为零,剪力即为被测外力 F 。若在该截面前、后表面的中性层处,粘贴与中性层各成 $\pm 45^\circ$ 的 4 个应变片,连接组成全桥制成的传感器,可以实现温度互补,使传感器的电桥输出为每个应变片的 4 倍,达到提高测量灵敏度的目的。此种传感器受被测力的偏

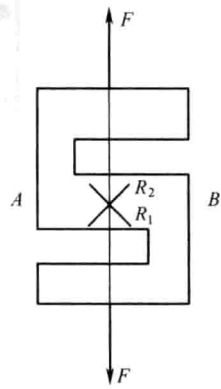


图 1-11 S 形测力传感器