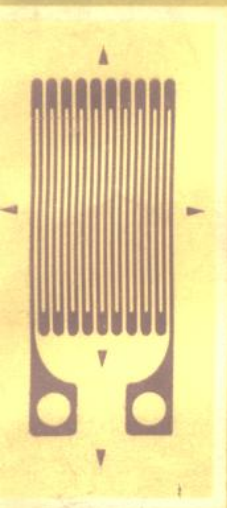


实验应力分析 实验指导

张如一 沈观林
潘真微 编 著

清华大学出版社



52.58057
553

实验应力分析 实验指导

张如一 沈观林 潘真微

349.51

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是一本以实验实践为主的实验应力分析书籍，书中列出了电阻应变测量技术、光弹性法、脆性涂层法、云纹法、全息干涉法和激光散斑法等三十个教学实验，详细介绍了这些方法的实验技术、操作工艺和有关的实验设备及仪器。为了便于阅读，对各种方法的原理作了扼要的介绍。本书可供力学、机械、化工、土载专业在实验应力分析课程中教学实验教材，亦可作为工程技术人员在强度工作中的参考书。

实验应力分析实验指导

张如一、沈观林、
潘真微 编 著



清华大学出版社出版

北京 海淀 清华园

岳各庄印刷厂印刷

北京·丰台

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售



开本：787×1092 1/32 印张：7 1/4 字数：161 千字

1982年3月第一版 1982年4月第一次印刷

印数：1~15000

统一书号：15235·32 定价：0.85 元

目 录

前 言	1
教学实验注意事项	3
第一章 电阻应变测量技术	6
实验 1 电阻应变片粘贴技术	19
实验 2 电阻应变片灵敏系数测定(方案一)	22
(方案二)	26
实验 3 电阻应变片横向效应系数测定(方案一)	30
(方案二)	33
实验 4 电阻应变片在电桥中的接法(方案一)	37
(方案二)	40
实验 5 电阻应变仪灵敏系数校准	43
实验 6 电阻应变花和静态多点应变测量	46
实验 7 动态应变测量	48
实验 8 旋转轴的动态应变测量	60
实验 9 高温电阻应变片的热输出曲线测定	68
实验10 高温电阻应变片灵敏系数随温度变化 曲线测定	76
实验11 电阻应变片低温热输出曲线测定	80
实验12 高压水下应变测量	83
实验13 有机玻璃的弹性模量 E 及泊松比 μ 的测定	92
附录一 YJ—5 型静态电阻应变仪	99
附录二 YJD—1 型静、动态电阻应变仪	102

36677

附录三	Y 6 D—2 型动态电阻应变仪	105
附录四	YD—15 型动态电阻应变仪	109
附录五	UJ—36型电位差计	112
附录六	SG—16型光线示波器	114
附录七	X—Y 函数记录仪	116
附录八	SZ4 型磁带记录器	119
第二章	光弹性法	123
实验14	光弹性实验方法观察实验	123
实验15	梁的弯曲实验	131
实验16	对径受压圆盘的应力分析	137
实验17	用冻结切片法测量纯扭转圆轴的应力	142
实验18	环氧型光弹性材料制作	151
实验19	用贴片光弹性法测量带圆孔板 拉伸时的应力	155
实验20	用散射光弹性法测量对径受压圆盘 及纯扭圆轴的应力	160
第三章	脆性涂层法	166
实验21	脆性涂料的配制	166
实验22	脆性涂料初裂应变 ϵ_0 的标定	168
第四章	云纹法	172
实验23	用云纹法测量面内应变	183
实验24	用投影云纹法测量板的挠度	187
实验25	用反射云纹法测量板的转角	189
第五章	全息干涉法	194
实验26	用全息干涉法测量悬臂梁的挠度	197
实验27	用全息干涉法测量悬臂矩形板的振型	200
实验28	用全息光弹性法测量对径受	

压圆盘的应力.....	203
第六章 激光散斑干涉法	208
实验29 用激光散斑干涉法测量面内位移.....	217
实验30 用激光散斑干涉法测量板的转角.....	221

前 言

实验应力分析是用实验方法测定构件中应力和变形的一门学科，它和材料力学、弹塑性理论……等理论一样，是解决工程强度问题的一个重要手段，对改进产品的工作性能、节省所使用的材料及保证安全生产起重大作用。在机械、化工、土建、航空……等工业中得到广泛的应用。

近年来，由于电学、光学……等技术的进展，给实验应力分析提供了良好的条件，使实验应力分析得到了迅速发展，今天它已成为解决工程强度问题的一门独立学科，现有以下十几种可供实用的实验方法：电阻应变测量法、光弹性法、脆性涂层法、云纹法、全息干涉法、散斑干涉法、网格法、机械测量法、比拟法、声发射法、声全息法、x光衍射法、磁测量法、焦散线法……等。应用这些方法可解决一般工程上的应力分析问题，其中有些方法还可在高（低）温、高压液下、强磁及核辐射等特殊环境下进行测试。不仅可以测定应变、应力及位移，而且还可测定裂纹扩展位移和速率，构件的残余应力，以及压力、加速度……等物理量。

实验应力分析课程由以下二部分内容所组成，一是上述诸方法的基本原理；另一是实验方法与实验技术。两者具有同样的重要性，只有了解实验方法的基本原理，才能对复杂的实验现象作出正确的判断，指导实验实践。但是理论的实现，必需通过正确的实验方法及熟练的技能才能获得。这就要求在实验应力分析的课程中，既要重视基本原理的教学，亦要重视教学实验环节，通过教学实验，一方面可加深对基本原

理的理解，另一方面可掌握有关仪器的操作及培养动手能力，为强度测试工作打下基础。

本书是一本以介绍实验方法为主的实验应力分析书籍，对实验应力分析中应用较广和有发展前途的上面所列前六种实验方法，编写了三十个教学实验指导书。其中详细的介绍了各种实验的测试方法、操作工艺及有关仪器的型号、性能及使用方法。实验选择基本的及工程实践中常用的内容，力求具体及易于掌握。通过这些教学实验的实践后，能够学会这些实验的测试方法，并在强度测试中具有一定的独立工作能力。为利于教学，按照不同的实验方法本书共分为六章，在每章前对该实验方法的基本原理作了简要的介绍。本书除了供教学用外，亦可作为工程技术人员及强度测试工作者参考书。

教学实验是整个实验应力分析课程教学的一个重要组成部分，应占有总学时的一定比例，根据各种实验方法的特点，其所占比例应有所不同，例如电阻应变测量技术因实验项目及使用仪器较多，教学实验应有较多的学时，光测实验方法则可略少一些。这本实验指导书是为固体力学专业的本科生及研究生而用，其它各专业可根据各自的具体条件及要求，选择部分实验进行。

本书是由清华大学工程力学系张如一、沈观林和潘真微共同编写而成的。刘宝琛和章玮宝审阅了第五章和第六章；书中插图由葛占基完成。在编写过程中参考了部分兄弟院校有关资料和仪器产品说明书。限于编者水平，书中可能存在不少缺点和错误，请予批评、指正。

教学实验注意事项

为了确保实验顺利进行，达到预定的目的，应做到下列几点：

一、作好实验前的准备工作：

1. 预习实验指导书，明确本次实验的目的、方法和步骤。
2. 弄清与本次实验有关的基本原理。
3. 对实验中所用到的仪器、设备，实验前要有一定的了解，阅读有关仪器的使用说明。
4. 必须清楚地知道本次实验需记录的数据项目及数据处理的方法，事前作好记录表格。
5. 除了解实验指导书中规定的实验方案外，亦可多设想一些其它方案。

二、遵守实验室的规章制度：

1. 实验时应严肃认真，保持安静。
2. 爱护设备及仪器，并应严格遵守操作规程，如发生故障应及时报告。
3. 非本实验所用的设备及仪器切勿任意动用。
4. 实验完毕后，应将设备和仪器擦拭干净，并恢复到原来正常状态。

三、认真做好实验：

1. 注意听好教师对本次实验的讲解。
2. 清点实验所需设备、仪器及有关器材，如发现遗失，及时向教师提出。
3. 实验时，应有严格的科学作风，认真细致地按照实

验指导中所要求的实验方法与步骤逐步进行。

4. 对于带电或贵重的设备及仪器，在接线或布置后，应请教师检查，检查通过后，才能开始实验。

5. 在实验过程中，应密切观察实验现象，随时进行分析，若发现异常现象，应及时总结。

6. 记录下全部所需测量数据，以及所用仪器的型号（及实验室对该仪器的编号）及精度、试件的尺寸，量具的量程等。如实验结果与温度有关，还需记录下实验时的环境温度。对原始数据不得任意修改。

7. 教学实验是培养学生动手能力的一个重要环节，因此学生在实验小组中虽有一定的分工，但每个学生都必须自己动手，完成所有的实验环节。

8. 如学生希望观察一些与本实验有关的其它现象，或用另外方案来进行测量，在完成试验全部规定项目后，经教师同意可以进行。

9. 实验记录需交教师审阅签字，若不符合要求应重做。

四、写好实验报告：

实验报告是实验的总结，通过实验报告的书写，可以提高学生的分析能力，因此报告必须由每个学生独立完成，报告要求整洁清楚，要有分析及自己的观点，并进行讨论。一般实验报告应具有下列基本内容：

1. 实验名称，实验日期，实验者及同组人员。

2. 实验目的。

3. 实验原理、方法及步骤简述。

4. 实验所用的设备和仪器的名称，型号（及编号），精度及量程等。

5. 实验数据及其处理：实验数据应包括全部的测量原始数据，并注明测量单位。最好以表格的形式，列出数据的运算过程。并根据数据处理和误差分析的要求给出实验误差。如实验只进行一次，则要求作定性的误差分析。

最后将所得的结果作出曲线。

6. 讨论：应根据实验所得的结果及实验中观察到的现象，结合基本原理进行分析讨论，如实验的对象有理论解，则希望能与理论计算结果进行比较。在本书中每一实验后均有讨论题可供参考。

第一章 电阻应变测量技术

电阻应变测量技术可用于测定构件的表面应变，根据应力与应变之间关系，确定构件的应力状态。它具有下列优点：1. 测量灵敏度与精度高，其最小应变读数为 10^{-6} ，在测量常温下静态应变时精度可达1%；2. 频率响应好，可以测量从静态到数十万赫的动态应变；3. 测量应变范围广，一般可测量从 10^{-6} 到2%的应变值，采用特殊大应变应变片可测量到20%的应变值；4. 易于实现测量数字化、自动化及无线电遥测；5. 可在高(低)温、高速旋转、高压液下、强磁场及核辐等环境条件下进行测量；6. 可制成各种传感器，测量力、压力、位移、加速度等物理量，在工业中作为控制或监视的敏感元件。其主要缺点是：1. 一个应变片只能测定构件表面上一点某一方向的应变；2. 现在应变片最小栅长为0.2毫米，但仍有一定的长度，只能测得栅长范围内的平均应变。

按作用原理电阻应变片测量技术可看成由电阻应变片、电阻应变仪及记录器三部分组成，它的工作原理大致如下：将电阻应变片固定在被测的构件上，当构件变形时，电阻应变片的电阻值发生相应的变化。通过电阻应变仪中的电桥将此电阻值变化转化为电压或电流的增量，并经放大器放大，最后换算成应变数值或输出与应变成正比的模拟电信号（电压或电流），输入记录器进行记录，也可输入计算机按预定的要求进行处理，得到所需要的应力和应变数值。

下面将简单介绍电阻应变片测量技术各部分的基本原理：

一、电阻应变片(即电阻应变计简称应变片或应变计)
常用的应变片构造如图 I -1 所示,主要由四部分组成,

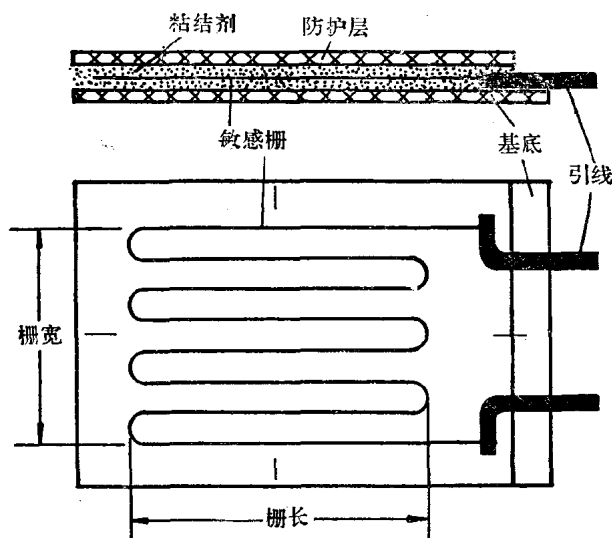


图 I -1 常用应变片的构造图

1.敏感栅是用具有一定电阻值的金属丝绕制或用金属箔光刻而成, 通常所用敏感栅材料有铜镍合金、镍铬合金、铁铬铝……等; 2.引出线作为测量敏感栅电阻值时与外部导线连接用; 3.基底用纸或胶膜、金属薄片等制成, 作固定敏感栅用; 4.粘结剂是为固定敏感栅在基底上而用, 另外在一些应变片敏感栅上还复盖一层(纸或胶膜……等)防护层。

如将应变片固定在构件被测点上, 当构件受载后产生应变时, 应变片中敏感栅随之发生相同的应变, 由于金属丝在伸长(或缩短)时, 其电阻值会相应的变化, 因此应变片便将构件的应变转化为电阻值的变化, 现在我们来研究应变片的

应变与电阻变化之间的关系。

先从敏感栅上取出一直线线段来进行分析，设此线段的长度为 L ，截面积为 A ，电阻率为 ρ 。则其电阻值为：

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{I}-1)$$

将上式取对数后再微分，即可得电阻变化与其它诸量变化的关系式：

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$$

若此线段处于单向受力状态时，由于泊松效应则，（ μ 为泊松比）

$$\frac{dA}{A} = -2\mu \frac{dL}{L}$$

将此式代入上式得：

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (\text{I}-2)$$

将金属丝在高压液下进行试验，得知金属丝的单位电阻率变化 $\frac{d\rho}{\rho}$ 与单位体积变化 $\frac{dV}{V}$ 成正比即：

$$\frac{d\rho}{\rho} = m \frac{dV}{V}$$

在单向应力状态下

$$\frac{dV}{V} = (1 - 2\mu) \frac{dL}{L}, \text{ 代入 } (\text{I}-2) \text{ 式可得:}$$

$$\frac{dR}{R} = [(1 + 2\mu) + m(1 - 2\mu)] \frac{dL}{L} \quad (\text{I}-3)$$

设 $K_0 = [(1+2\mu) + m(1-2\mu)]$, 同时因应变 $\varepsilon = \frac{dL}{L}$,

则上式可写成:

$$\frac{dR}{R} = K_0 \varepsilon \quad (I-4)$$

在一定的应变范围内, μ 与 m 为常数 (即 K_0 为常数), 由此可见, 金属丝的应变与单位电阻变化成正比, 其比例系数 K_0 称为金属丝的灵敏系数。

在测量应变时, 要求应变片的敏感栅线有足够的长度, 以获得测量所需的电阻值, 同时又要求其尽量接近“一点”的真实应变, 为此敏感栅被制成栅状, 其电阻变化与应变之间关系与上述单丝情况不同, 但我们仍用类似 (I-4) 式关系来表示:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon \quad (I-5)$$

上式中 R 为应变片的初始电阻值; ΔR 为应变片的电阻变化值; ε 为应变片纵轴方向 (即与栅线直线部分平行的方向) 的应变值; K 为应变片的灵敏系数。

由于应变片敏感栅随构件而变形, 其圆弧部分的电阻变化值, 不仅与应变片纵轴方向应变 ε 有关, 而且与其它方向应变有关, 它直接影响应变片的电阻变化值对纵轴方向应变的敏感度, 这种现象称为横向效应, 因此应变片的灵敏系数与构件应变状态有关, 为有一个统一标准, 将应变片的灵敏系数定义为: 应变片安装在被测试件上, 在应变片纵轴方向的单向应力作用下, 应变片电阻的单位电阻变化与引起此变化的应变片纵轴方向应变的比值。

实际上, 应变片的灵敏系数还与敏感栅材料性能、加工

工艺及所使用的粘结剂等因素有关，因此其灵敏系数均由实验标定给出，其实验是在纯弯梁及等强度悬臂梁（单向应力状态）等试件上按照上述定义的条件下进行。因此在测量处于其它应变状态构件的应变时，采用标定给出的灵敏系数，根据被测出单位电阻变化值来确定应变时，带有一定的误差，但一般误差不大，特殊情况下需给予修正。

应变片有下列主要性能指标：

1. 栅长：应变片敏感栅的长度（现有 0.2mm, 0.5mm, 1mm, ……100mm 等）。

2. 电阻值：应变片未粘贴前初始电阻值，常用的为 120 Ω ，其它还有 60 Ω ，350 Ω ……600 Ω 等。

3. 灵敏系数：其定义已在前面给定，其值一般由生产单位给出，并给出其测量误差。

4. 横向效应系数：应变片安装在单向应变场的零应变方向的指示应变与同样应变片安装在应变场的最大应变方向的指示应变比值，以百分数表示。

5. 绝缘电阻：应变片引线和安装应变片的试件之间的电阻。一般应大于 200 M Ω 。

6. 热输出：当应变片安装在某一定材料的试件上，试件可自由膨胀，并不受外力作用，由温度变化引起的指示应变。

7. 最大工作电流：允许通过应变片而不影响其工作特性的最大电流值。

另外还有：零点漂移、蠕变、机械滞后、应变极限、疲劳寿命……等。

应变片的种类很多，根据敏感栅的材料及构造可分为：金属丝式（绕丝式及短接式）和箔式及半导体应变片；按基底

分为：纸基、胶膜、金属基底，临时基底等；按使用温度分为：常温、中温、高温及低温等应变片；另外还有一个基底上有几个敏感栅的应变花及特殊用途的裂纹扩展片、疲劳寿命片、测压片……等。

二、电阻应变仪

1. 测量电路：在电阻应变仪中一般用电桥将应变片的电阻变化转换为电压或电流的变化，以如图 I-2 所示直流电桥为例说明之，直流电桥的桥臂系由 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 四个电阻组成， A 、 C 两端为电源端，其直流电压为 E 。 B 、 D 两端为输出端，其负载电阻为 R_g 。

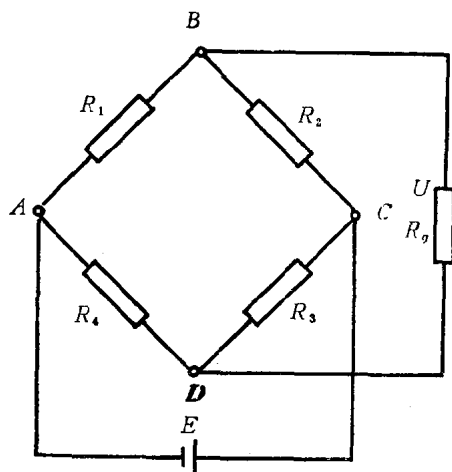


图 I-2 直流电桥

一般情况下电桥输出端配有电阻应变仪高输入阻抗的放大器，其负载电阻可认为为无限大，输出端处于开路状态，这种电桥称为电压桥。根据电路计算，可得其输出电压 U 与电源电压 E 及各桥臂电阻的关系式：