

工程力学专业规划教材

实验力学

丛书主编 赵 军
本书主编 刘雯雯 侯建华 王志

中国建筑工业出版社

工程力学专业规划教材

实 验 力 学

丛书主编 赵 军
本书主编 刘雯雯 侯建华 王 志



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

实验力学/刘雯雯, 侯建华, 王志本书主编. —北京:
中国建筑工业出版社, 2017. 12
(工程力学专业规划教材/赵军 丛书主编)
ISBN 978-7-112-21448-8

I. ①实… II. ①刘…②侯…③王… III. ①实验应
力分析-高等学校-教材 IV. ①O348

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 269036 号

本教材为适应工程力学、工程结构分析、安全工程等本科专业的实验力学课程教学需要而编写, 较为系统地介绍了常用实验应力分析方法。内容分三篇 (共 17 章)。第 1 篇 (1~7 章) 系统介绍电阻应变测量方法; 第 2 篇 (8~14 章) 系统介绍光弹性实验分析方法; 第 3 篇 (15~17 章) 系统介绍云纹、散斑、数字图像相关方法。教材内容的选择兼顾了传统技术与现代技术的有机结合。为了增强本书的可参考性, 在附录中还编入了不同分析方法的综合性工程应用实例, 以供参考。

本书也可用作其他工科专业工学硕士研究生的实验力学课程教材, 或作为相关工程技术人员的技术参考书。

责任编辑: 尹珺祥 赵晓菲 朱晓瑜

责任设计: 谷有稷

责任校对: 王 瑞 刘梦然

工程力学专业规划教材

实验力学

丛书主编 赵 军

本书主编 刘雯雯 侯建华 王 志

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

唐山龙达图文制作有限公司制版

大厂回族自治县正兴印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15 $\frac{1}{4}$ 字数: 390 千字

2018 年 4 月第一版 2018 年 4 月第一次印刷

定价: 40.00 元

ISBN 978-7-112-21448-8

(31140)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

■ 前 言

实验力学是一门研究工程结构或机械零部件的应力、应变及位移测量方法的学科。它把数学、材料学、电磁学、光学和化学等相关学科巧妙地结合到以应力分析为目的的方法学研究上来，其内容是极其丰富的。应力分析技术的进步与基础科学的发展密切相关，特别是现代电子和计算机技术的快速发展，使实验应力分析这门学科如虎添翼，实验及数据处理方法发生着根本性的变化。这是一门综合性、实践性都非常强的学科。

著名科学家伽利略开创了通过实验研究强度问题的先河。他在建造船闸时遇到梁构件问题，通过实验观察提出了梁强度概念及理论计算公式（1638年的《关于两门新学科的对话》），虽然该公式被烙上了深深的古典刚体力学烙印，现在看来有一些问题，但由于是基于实验的结果，它并不影响设计的可靠性。有趣的是他凭借错误公式得到的关于梁截面的一些结论却是完全正确的。这充分说明实验研究的重要性。但实验应力分析作为一门学科，伽利略的梁强度实验还算不上本学科的起源，其真正的起源可追溯到1856年开尔文（Kelwins）在铺设海底电缆的工程实践中发现的电阻-应变效应。

自电阻应变效应发现80年后，1938年，E·西门斯（E. Simmons）和A·鲁奇（A. Ruge）制出了第一批实用的纸基丝绕式电阻应变计。1953年，P·杰克逊（P. Jackson）利用光刻技术首次制成了箔式应变计。随着微光刻技术的进展，目前这种应变计的栅长可短到0.2mm。1954年，C·S·史密斯（C. S. Smith）发现半导体材料的压阻效应。1957年，W·P·梅森（W. P. Mason）等研制出半导体应变计。目前已有数万种用于不同环境和条件的各类应变计。有关的应变测量仪器也从过去笨重的、手动调节的电子晶体管仪器，发展为轻便的、晶体管乃至集成电路的程控测量设备。

电测方法的精度和在动态测量方面的优势也是其他方法无法与其比拟的，特别是当前的数据采集和虚拟仪器方面的不间断技术研究，使电测分析技术逐步实现了智能化，在试验应力分析方法中居主导地位。

光弹性实验方法是在工程实际中与电测技术并驾齐驱的另一传统应力分析方法。这种方法起源于布瑞斯特（Brewster）1816年发现的透明非晶体材料的暂时双折射效应，和纽曼（F. Neumann）、麦克斯韦（J. C. Maxwell）在19世纪中叶（1841~1852）先后对透明介质在任意力系作用下的双折射理论研究建立的应变光性定律与应力光性定律。但由于当时缺乏适用光弹性试验材料，该技术的发展受到限制。1931年柯克尔和费伦出版《光测弹性力学》，并提出了沿主应力迹线的应力分离法；1938年赫腾尼发展了三维应力冻结技术，1939年威勒发展了三维散光光弹性法。20世纪

40~70年代新型环氧树脂材料的问世,使光弹性方法研究进入鼎盛时期,发展成为一种成熟的试验方法,并在许多大型工程结构的应力分析中得到广泛应用。光弹性方法的最大优点是其全场性和直观性,适合多数结构物的模型试验。但它的实验准备和数据处理工作量非常大。

早在1948年,盖伯就提出了全息照相原理,但由于缺乏相干性好的光源,全息照相术未能真正得到发展。19世纪60年代激光作为一种单色性和相干性极好的新光源的出现,使全息照相技术成为当时的新鲜事物,相片不再是静止不变的东西,人们通过全息底片可以看到活灵活现的三维物体。1962年利恩利用激光器得到第一张全息图。1968年富尔涅与哈万列用全息干涉法得到应力等和线,发展出全息光弹性方法。全息光弹性与普通光弹相结合可以使光弹性实验数据的分析工作大为简化。

虽然如此,20世纪80年代以后快捷、经济的数值分析技术(如有限元方法、边界元方法等)的快速发展,给光弹性方法造成极大的冲击,似乎一度被人们所遗忘。而现代计算机图形技术和高级编程语言的发展可以说是又给光弹性方法发展带来了新的契机,专用的光测分析软件可大大减少试验分析的工作量,缩短研究周期。目前许多实验应力分析工作者都在这方面开展研究,相信在不久的将来,人们会迎来光弹性方法发展的又一个春天。

本教材内容分三大部分,共17章。第1篇(第1~7章)为电测法,系统介绍了电阻应变计、应变测量电路、应变测量记录仪器、静、动态应变测量和特殊条件下的应变测量以及应变计式传感器等;第2篇(第8~14章)为光弹性法,系统介绍了光弹性基本原理、平面及三维光弹性应力分析、模型浇注及材料性质、相似理论与模型设计、贴片光弹性法和全息光弹性法等;第3篇(第15~17章)为其他方法,系统介绍了云纹法、散斑法和数字图像相关法。本书还以附录形式编入主要应力分析方法的工程应用实例,以便参考。

作为力学、结构分析与安全专业的学生,继承优秀的实验应力分析方法,掌握他们的基本内容,以便把它们与现代科技相结合,赋予他们新的生命力,使其更加有效地为社会主义现代化建设服务,是我们义不容辞的责任。在学习这门课程时,同学要以理解和掌握方法原理为难点,以实践环节为重点,通过实践加深理解、提高认识。

本教材内容原以64学时课时要求而编写,2003年12月完成初稿,根据教学使用情况,2007年和2012年曾对教材内容进行了全面修订。根据新培养计划的学时要求(32学时),本次修改对内容做了较大调整,课程实验也安排在课外(16学时)。

由于技术的不断进步,虽然编者努力使教材内容能反映前沿技术,但却自感难以尽善尽美,不足之处在所难免,望读者在使用过程中多提宝贵意见,以便教材的不断完善。好在我们教学的目的旨在抛砖引玉,相信有兴趣的同学通过本课程学习,在掌握基本方法的前提下,再经日后的进一步探讨和扩展,定会对本学科的发展做出有益的贡献。

目 录

第 1 篇 电 测 法

第 1 章 电阻应变计	2
1.1 金属丝的应变灵敏度	2
1.2 应变计的构造	4
1.3 应变计的灵敏系数	7
1.4 应变计的横向效应系数	8
1.5 横向效应的影响	9
1.6 应变计的工作特性	12
1.7 常温胶粘剂	13
1.8 应变计的粘贴	15
1.9 应变计的防护	17
习题	18
第 2 章 应变测量电路	19
2.1 直流电桥	19
2.2 温度效应及其补偿	21
2.3 应变计串联与并联	22
2.4 应变计布置及桥路设计	24
2.5 交流电桥的输出	27
2.6 电位计式测量电路	28
习题	30
第 3 章 应变测量记录仪器	32
3.1 电阻应变仪的种类	32
3.2 应变仪的工作原理	33
3.3 应变仪的技术指标	38
3.4 数据采集系统简介	40
第 4 章 静态应变测量	47
4.1 应变测量的一般步骤	47

4.2	应力的换算	48
4.3	静态应变仪的校验	50
4.4	应变计栅长的选择	50
4.5	横向效应的修正	51
4.6	应变计方位引起的误差	52
4.7	应变计阻值引起的误差	53
4.8	长导线引起的误差	53
4.9	多点测量和接触电阻	54
4.10	电噪声的影响与抑制	55
	习题	56
第5章	动态应变测量	57
5.1	动应变的分类	57
5.2	应变计的频响特性	58
5.3	动态测量仪器系统	59
5.4	仪器系统的动态特性检测	60
5.5	周期信号的计算处理	62
5.6	瞬变信号的计算处理	63
5.7	随机信号的统计计算	65
第6章	特殊条件下的应变测量	69
6.1	高(低)温条件下的应变测量	69
6.2	运动构件的应变测量	74
6.3	高压液下应变测量	80
第7章	应变计式传感器	85
7.1	基本原理与设计制造	85
7.2	测力传感器	87
7.3	压力传感器	89
7.4	扭矩传感器	91
7.5	位移传感器	91
	习题	92

第2篇 光弹性法

第8章	光弹性基本原理	96
8.1	光弹性的物理基础	96
8.2	偏振光的琼斯矢量	98

8.3	偏振器、滞后器及其琼斯矩阵	100
8.4	暂时双折射及应力光性定律	102
8.5	偏光弹性仪及其光场布置	104
8.6	受力模型在平面偏振场中的光弹性效应	105
8.7	等倾线的绘制	107
8.8	主应力迹线的绘制	108
8.9	受力模型在圆偏振场中的光弹性效应	109
8.10	非整数等差线级次的确定	111
8.11	等差线条纹倍增法	111
	习题	112
第 9 章 平面光弹性应力分析		113
9.1	边界应力的确定	113
9.2	应力集中系数的确定	114
9.3	内部应力分离的剪应力差法	114
9.4	内部应力分离的数值法	119
9.5	科克尔—菲伦算法	121
第 10 章 三维光弹性应力分析		125
10.1	冻结应力	125
10.2	次主应力及切片的应力-光学定律	126
10.3	三维模型自由表面的应力测定	126
10.4	三维模型内部应力测定的正射法	129
10.5	内部应力测定的一次正射、两次斜射法	130
10.6	三维模型内部应力分离的数值法	131
第 11 章 模型浇注及材料性质		132
11.1	理想光弹性材料应具备的条件	132
11.2	制作环氧树脂模型的原料	132
11.3	制造光弹性模型的模具	134
11.4	光弹性模型的浇注工艺	135
11.5	三维模型的应力冻结	137
11.6	“云雾”现象及其避免措施	137
11.7	模型材料的时间边缘效应	138
11.8	模型材料的主要性质	139
第 12 章 相似理论与模型设计		143
12.1	量纲及物理方程的齐次性	143

12.2	相似定理	144
12.3	相似判据的确定	146
12.4	光弹性模型设计与相似数误差	148
	习题	149
第 13 章	贴片光弹性法	150
13.1	反射式光弹仪	150
13.2	贴片光弹性法的基本原理	150
13.3	非边界点的主应变分离方法	151
13.4	贴片材料的制作与粘结	154
13.5	贴片材料应变条纹值的标定	155
13.6	影响试验结果的主要因素	156
第 14 章	全息光弹性法	158
14.1	全息照相基本原理	158
14.2	平面全息光弹性实验方法	159
14.3	全息光弹性基本原理	160
14.4	等和线与等差线的分离	164
14.5	全息光弹性试验结果的分析	166
14.6	全息光弹性试验设备及技术要点	168

第 3 篇 其他方法

第 15 章	云纹法	172
15.1	光栅及其云纹效应	172
15.2	面内位移法基本原理	174
15.3	应变计算的图解微分法	177
15.4	应变计算的十字图解法	178
15.5	正应变测量的转角云纹法	179
15.6	面内位移法技术要点	182
15.7	离面位移法	183
15.8	云纹干涉法简介	186
第 16 章	散斑法	189
16.1	激光散斑及其特性	189
16.2	散斑照相法	190
16.3	双光束散斑干涉法	192
16.4	散斑剪切干涉法	194

16.5	电子散斑法	197
第 17 章	数字图像相关法	201
17.1	引言	201
17.2	数字图像相关的基本原理	202
17.3	亚像素搜索方法	204
17.4	应用实例	205
17.5	三维数字散斑相关方法	208
附录 1	工程应用实例	215
附 1.1	内河码头缆车轮压检测及其统计分析	215
附 1.2	V 形拌粉机疲劳裂因分析及其加固	218
附 1.3	小浪底枢纽 2 号进水塔架三维光弹性试验研究	222
附 1.4	紧水滩水电站引水管道三维光弹性试验研究	227
附 1.5	鲁布革水电站地下厂房三维光弹性试验研究	234
附录 2	参考实验项目	241

第 1 篇 电测法

应力分析的电阻应变测量方法，简称电测法，是使用由电阻应变计、电阻应变仪及记录仪器组成的测量系统测量构件表面应变，再根据应力应变关系确定构件表面应力状态的一种实验应力分析方法。本篇各章将逐步介绍电阻应变计、应变测量电路、电阻应变仪及记录器、静态应变测量、动态应变测量、特殊条件下的应变测量、应变计式传感器等内容。

该方法的主要优点是：测量精度高、测量范围广、应变计频率响应好，采取相应措施，可以进行高（低）温、高压液下、高速旋转及强磁场和辐射等特殊条件下的静态及动态应变测量；由于输出信号为电量，测量结果便于数码显示及计算机处理，也容易实现应变远距离非接触性遥测；还可用应变计制造各种传感器，用来测量力、压强、位移、加速度等非应变量学物理量。因此，电阻应变测量技术是实验应力分析实践中优先考虑、应用最多的一种手段。

该方法的主要缺点是：应变计一般只能测量构件表面上一些离散点的应变，获得的信息不是连续的。除混凝土、石膏构件（或模型）等可以设法预埋应变计进行内点应变测量外，对多数材料无法进行内点应变测量。

本部分内容学习要求：掌握应变计的各项性能及测定方法、应变计桥路设计，了解常用记录器的工作原理，熟悉各种条件下的应变测量及应变计式传感器的构造等。

第 1 章 电阻应变计

电阻应变计是应变电测方法中必不可少的基本元件，了解应变计的构造及特性，对于正确使用应变计进行应变测量是至关重要的。本章介绍金属丝电阻应变效应、电阻应变计的构造、常见应变计类型、应变计各项性能指标及其测定方法。了解这些内容，对于合理使用应变计将有很大帮助。

1.1 金属丝的应变灵敏度

实验表明，绝大部分金属丝在伸长（或缩短）时，其电阻值也会增大（或减小），这种电阻值随金属丝变形而发生变化的现象，称为电阻应变效应。图 1-1 所示为几种金属丝的电阻应变效应曲线。可以看到，多数金属都在一定范围之内保持电阻相对变化率与应变之间的线性变化关系，而且拉、压性能是一样的。

设一段长度为 L 、初始电阻值为 R 的导体，在产生应变 $\epsilon = \Delta L/L$ 时引起的电阻变化为 ΔR ，则这种规律可用下式表示

$$\frac{\Delta R}{R} = k\epsilon \quad (1-1)$$

式中 k 为常数，其物理意义是单位应变所产生的电阻相对变化，标志金属丝电阻应变效应的显著程度，故称之为金属丝电阻相对变化率对应变的灵敏度，或简称为金属丝灵敏系数。

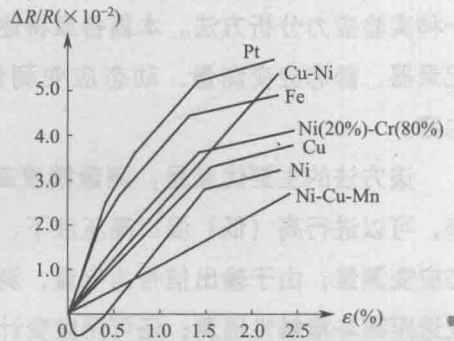


图 1-1 金属丝的电阻应变效应

对式(1-1)所表达的规律，我们可从理论上做如下解释。根据物理学，导体（如金属丝）的电阻是其长度 l 、截面积 A 和电阻率 ρ 的函数，即

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1-2)$$

为求得电阻相对变化率（假定这种变化很小，可以看作微量），将上式两边取自然对数后再求微分，得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \quad (1-3)$$

式中 dA 表示导体长度变化时由于泊松效应造成的横截面积变化。无论导体横截面是圆

形、矩形或其他异型形状，由材料力学知识不难求得

$$\frac{dA}{A} = -2\mu \frac{dl}{l}$$

其中 dl/l 为导体的纵向应变， μ 为导体材料的泊松比。故代入式(1-3) 加以整理，得

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

对照式(1-1)，有

$$k = 1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\rho} \frac{dl}{l} \quad (1-4)$$

此式表明，导体（如金属丝）的电阻应变效应归咎于两方面原因，一是由 $1+2\mu$ 表达的几何尺寸的改变；二是电阻率也随应变发生了变化。这就从机理上对电阻应变效应做了一定的说明。进一步的研究表明，电阻率 ρ 的变化率与金属丝体积 V 的变化率之间呈线性关系，即

$$\frac{d\rho}{\rho} = m \frac{dV}{V} \quad (1-5)$$

其中 m 为常数，取决于材料及其加工工艺。在单向应力状态下，容易导出

$$\frac{dV}{V} = (1-2\mu)\epsilon$$

这里 ϵ 为金属丝的轴向应变。因而

$$\frac{d\rho}{\rho} \frac{dl}{l} = \frac{d\rho}{\rho} \frac{dl}{l} \epsilon = m(1-2\mu)$$

代入式(1-4) 得

$$k = 1 + 2\mu + m(1-2\mu) \quad (1-6)$$

上式表明，当材料确定时， k 只是金属丝材料泊松比 μ 的函数。一般金属材料在弹性应变范围内， $\mu_e \neq 0.5$ （角标 e 表示在弹性范围内），故 $m(1-2\mu_e)$ 一项对 k 值有贡献；而在塑性范围内， $\mu_p \approx 0.5$ （角标 p 表示在塑性范围内），故 $m(1-2\mu_p) \approx 0$ 。所以一般来说，对同一材料的电阻丝，当变形由弹性范围进入塑性范围时，灵敏度是要改变的。对于不同的材料，在弹性变形范围内，当 $m > 1$ 时， $k_e > 2$ （设 $\mu_e = 0.3$ ）， $m < 1$ 时， $k_e < 2$ ；而在塑性区域，各种材料的灵敏度 k 均接近于 2。值得注意的是，对于康铜（Cu-Ni）， $m = 1$ ，因此 k 的表达式中不包含 μ ，从而 $k_e = k_p = 2$ 。上述解释与图 1-1 的实验结果是相符的。不过，实践表明 k 值与合金的成分、杂质、加工工艺以及热处理等有很大关系，故各种材料的灵敏度一般均需通过实验进行测定。一些常用应变计合金的应变灵敏度如表 1-1 所示。

常用应变计合金的应变灵敏度

表 1-1

材 料	化学成分(%)	灵敏度 k
铜镍合金(康铜)	45Ni, 55Cu	2.1
镍铬合金 V	80Ni, 20Cr	2.1
等弹性合金	36Ni, 8Cr, 0.5Mo, 55.5Fe	3.6
卡马镍铬高阻合金	74Ni, 20Cr, 3Al, 3Fe	2.0
装甲钢 D	70Fe, 20Cr, 10Al	2.0
铂钨合金	92Pt, 8W	4.0

铜镍合金具有较广的线性范围、较高的电阻率 ($\rho=0.49\mu\Omega\cdot m$) 和良好的温度稳定性, 有利于制作成具有较大电阻值的小尺寸应变计, 通过按炉分选合金的温度特性还可以制造出适合不同结构材料的温度自补偿应变计。

等弹性合金具有更高的应变灵敏度和疲劳强度, 便于在动态应变测量中应用。但它也有不利的一面, 一是线性范围小, 当应变大于 0.75% 时, 其灵敏度大约从 3.6 降至 2.5, 这会对实际测量的数据处理带来不便; 二是它对温度变化尤为敏感, 用它做成的应变计安装在钢试样上时, 1°C 温度变化会引起大约 $300\sim 400\mu\epsilon$ 的表观应变读数, 因此在测量时温度必须稳定, 或采取必要的温度补偿措施。

卡马镍铬高阻合金与铜镍合金一样可用来制造温度自补偿应变计, 而且它的温度补偿范围更大, 抗疲劳特性也比铜镍合金好。

其他合金, 如镍铬 V 合金、装甲钢 D 和铂钨合金, 主要用来制造特殊测量条件的专用应变计, 如中、高温应变计, 可以在 $230\sim 800^{\circ}\text{C}$ 进行应变测量。

■ 1.2 应变计的构造

由上节可知, 用一段合金丝作为应变的敏感元件就可测量应变, 这在理论上是可能的, 但是为了防止电流过大产生发热及熔断等现象, 要求金属丝有一定的长度以获得较大初始电阻值。电路上对电阻值要求有一个下限, 约为 100Ω , 若用直径为 0.025mm 、电阻为 $1000\Omega/\text{m}$ 的合金丝制造一个 100Ω 的应变计, 单根丝长应为 100mm 。用这么长的合金丝来测量应变, 得到的结果很难接近构件上“一点”的真实应变, 必须尽可能缩短应变计的长度, 人们是把合金丝制成栅状来解决的。以下介绍几种常见应变计类型。

1.2.1 丝绕式应变计

丝绕式应变计是最早出现的应变计种类。它由敏感栅、胶粘剂、基底、引线及覆盖层等 5 部分构成, 如图 1-2(a) 所示。基底材料多为纸基, 并以硝化纤维素系胶粘剂为制片胶。纸基丝绕式应变计使用温度范围是 $-50\sim 60^{\circ}\text{C}$, 胶基丝绕应变计可用到 100°C 。这种应变计耐潮湿性能差, 要干燥保存; 此外不易做得尺寸很小, 一般不小于 2mm ; 横向效应 (见 1.4 节) 也较大。不过这种应变计容易安装、价格便宜, 也适合在石膏、混凝土等非金属构件上应用, 目前国内还有生产, 但多数情况下已被箔式应变计代替。

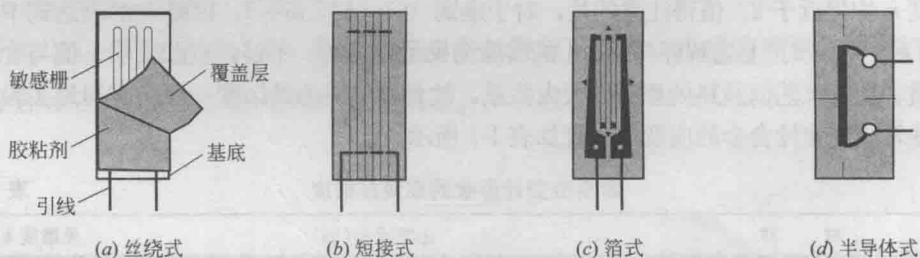


图 1-2 常见的应变计类型

1.2.2 短接式应变计

短接式应变计的构造如图 1-2(b) 所示。它把几条金属丝按一定间距平行拉紧, 然后按栅长大小横向焊上较粗的镀银铜线, 并在适当处切开若干断口, 形成敏感栅和引出线,

再粘上胶膜基底经加温固化而成。这种应变计横向效应很小（见 1.3 节），但由于敏感栅内部有焊点，存在应力集中现象，它的疲劳寿命一般较短。

1.2.3 箔式应变计

这种应变计是把合金扎制成厚 0.003~0.01mm 的箔材，经一定热处理后涂刷一层树脂（环氧、聚酯、聚酰亚胺等），经聚合处理后形成基底；然后在未涂树脂的一面用光刻腐蚀工艺得到敏感栅；最后再焊上引出线，在敏感栅一面涂一层保护膜即成。箔式应变计具有下列优点：尺寸准确，便于成批生产，制造工艺灵活、可以制成小栅长（可达 0.2mm）和特殊用途的应变计；散热性好，允许通过较大的电流，便于提高输出灵敏度；敏感栅横向部分的尺寸可设计得远大于纵向部分的尺寸，使单位长度电阻远远小于纵向栅丝的单位长度电阻，因而可以有效地减小应变计的横向效应系数；箔式应变计多为胶基或浸胶纸基，绝缘性、耐热性好，蠕变及机械滞后小，灵敏系数分散性也小。由于这些优点，在常温应变测量中，箔式应变计将逐渐取代丝绕式应变计。

1.2.4 半导体应变计

半导体应变计的外形如图 1-2(d) 所示。它的敏感栅只有一条，由硅、锗一类的半导体材料制成，最常用的是单晶硅。从单晶硅棒中沿晶向切取出窄而薄的小硅条（如 19mm×0.5mm×0.02mm），粘在胶膜基底上，装上引线即成。这种应变计的最大优点是灵敏系数大，比前三种应变计的灵敏系数大 50 倍以上。普通金属栅应变计的电阻变化主要是由栅丝的几何尺寸变化引起的，电阻率随应变的变化并不大；而半导体应变计则恰恰相反，当它产生轴向应变时，电阻率会发生明显变化，从而造成电阻变化，这种现象称为压阻效应。所以它的工作原理是建立在压阻效应基础上的。压阻效应是否显著与晶向关系很大。譬如，P 型硅沿晶向方向压阻效应最大，而 N 型硅沿晶向 [1 0 0] 方向压阻效应最大，而且是负的。图 1-3 表示了这两种硅元件电阻变化率与应变之间的关系。

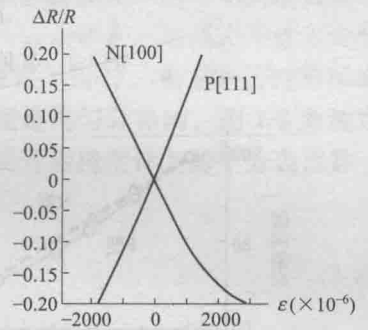


图 1-3 N 型及 P 型硅电阻变化率与应变之间的关系

设 E 为小硅条的轴向弹性模量，理论分析指出，硅条受到轴向应变 ϵ 时，电阻率的变化可由下式表示

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi_L E \epsilon$$

其中 π_L 为压阻效应系数。将上式代入式(1-4)，得硅条的灵敏系数为

$$k = 1 + 2\mu + \pi_L E$$

由于硅条的压阻效应很大，以至于上式中的 $1 + 2\mu$ 可以忽略，由式(1-1)，有

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \pi_L E \epsilon$$

令 $k' = \pi_L E$ ，这就是半导体应变计的应变灵敏系数。

半导体应变计除了上面提到的突出优点：灵敏系数大之外，还有横向效应小和机械滞后小等优点。但目前的半导体应变计还存在一些明显的缺点。首先是它的电阻变化与应变

的关系只在很小的范围内（大约 $\pm 500\mu\epsilon$ ）保持线性，而在此范围之外，拉、压时的灵敏性不同，见图 1-4；其次，单晶硅掺杂浓度强烈影响着敏感元件的特性（比如电阻率可有上千倍的差异），因此掺杂不均匀使切出的硅条之间灵敏系数差异较大；半导体应变计的另一个缺点是温度稳定性差，灵敏系数随温度升高而减小（图 1-5），本身的阻值随温度变化也很大（图 1-6）；最后，由于同样应变水平下半导体应变计的电阻变化要比普通金属箔应变计大得多，如果仍使用普通金属箔应变计的测量线路，将出现明显的非线性（详见第 2 章）。这些就是这种应变计在工程应用中很少见的原因。

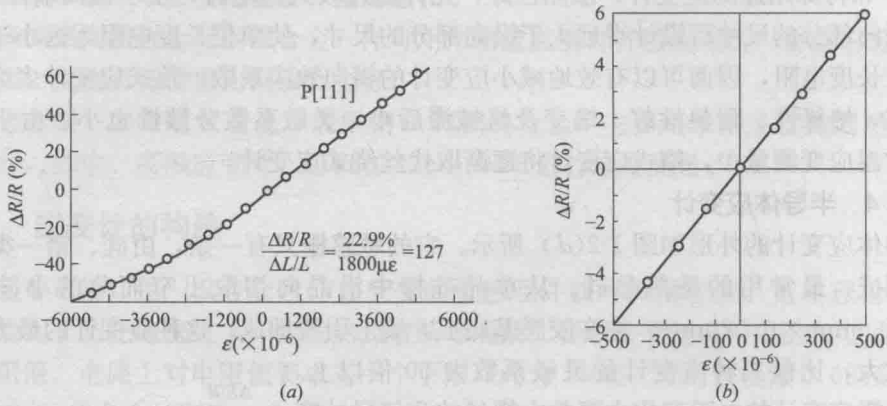


图 1-4 某种 P 型硅半导体应变计的 $\Delta R/R=f(\epsilon)$ 曲线

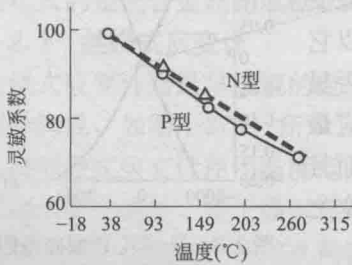


图 1-5 灵敏系数与温度的关系
(在拉伸状态下测得)

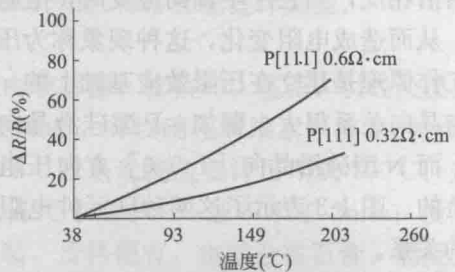


图 1-6 不同电阻率 P 型硅条
的电阻随温度的变化

由此看来，半导体应变计还不可能取代价格比较便宜、测试设备日趋完善的金属箔应变计，而只能作为一种补充，在测量小变形（ $0.1\sim 500\mu\epsilon$ ）、动态应变，以及灵敏度高的微型传感器中发挥其特长。当然，随着研究工作的深入，半导体应变计的缺点有望得到克服。

1.2.5 电阻应变花

将应变计按敏感栅个数及其相互位置来分，前面介绍的应变计均属于单轴应变计，只有一个敏感栅，用来测量敏感栅方向的应变。如果一个基底上沿不同方向安置多个敏感栅，可测量同一位置在不同方向的应变，这样的应变计称为多轴应变计，俗称应变花，如图 1-7 所示。

另外还有用于特殊测量目的的应变计，在以后章节中再逐步介绍。



(a) 双轴直角应变花 (b) 三轴45°应变花 (c) 三轴60°应变花 (d) 四轴45°应变花

图 1-7 各种类型的电阻应变花

1.3 应变计的灵敏系数

用合金丝材制作的应变计类似于合金丝的性能，在较大范围内，应变计的电阻相对变化率 $\Delta R/R$ 与其沿敏感栅轴向所产生的应变 ϵ_x 成正比，即

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon_x \quad (1-7)$$

其中 K 为电阻应变计的灵敏系数。固定在构件上的应变计，其敏感栅的电阻变化不仅与敏感栅轴线方向的构件应变有关，而且与敏感栅形状、基底材料、胶粘剂、构件材料的性质以及测点应变状态都有关系，因此应变计的应变灵敏系数与上一节中合金丝的灵敏系数不同，必须通过实验的方法来确定。为了有一个统一的标准，应变计灵敏系数定义为应变计安装在材料泊松比为 0.285 的单向应力试样表面，并使敏感栅轴线方向与单向应力方向平行所测得的结果。应变计的灵敏系数一般由生产厂家抽样实验测定，这道工序称为应变计的“标定”。应变计的标定必须在符合上述定义的实验装置上进行。通常采用纯弯梁或等强度梁进行实验，这两种梁都保证在一段梁上应力和应变是均匀分布的。图 1-8 为纯弯梁实验装置。在梁的纯弯段内放置一个三点挠度计，由梁受弯后挠度计上的千分表读数 f 即可计算梁的真实轴向应变 ϵ_x 。

$$\epsilon_x = \frac{fh}{l^2 + f^2 + hf} \approx \frac{fh}{l^2} \quad (1-8)$$

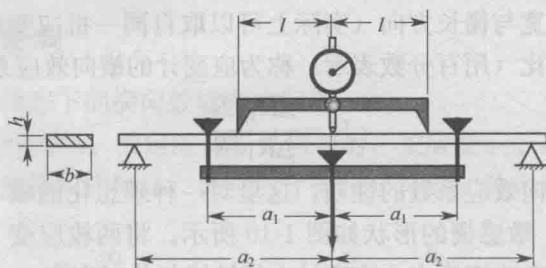


图 1-8 等弯矩标定梁

实验时一般选用精度较高、经过严格校准的电阻应变仪进行实验，将梁上的应变计作为工作应变计，和另一个补偿应变计按半桥接入应变仪，并把仪器灵敏系数置于 2.00，经过预调平衡后，加载并读取相应的应变读数 ϵ_d ，应变计的电阻相对变化率

$$\frac{\Delta R}{R} = 2\epsilon_d$$

与式(1-7) 比较即可确定灵敏系数