



电测技术是实验应力分析方法中的一种最基本的方法,也是应用最广泛的一种。电测技术对科学技术和工业的发展,起着十分重要的作用。为了帮助读者提高电测技术的水平和了解其发展动向,自本期起,连载电测技术系列讲座。讲座共分六讲,包括应变计和应变电测技术,应变仪,数据处理技术,静、动态测量基本技术,工程应用和在新学科中的应用。每讲都由编辑部聘请专家撰写,希望对广大读者有所助益,并欢迎来自读者的反应。

第一讲 应变计和应变电测技术

吴宗岱

(北京航空学院)

自1938年E. Simmons和A. Ruge研制出第一个电阻应变计以来,应变电测技术有了飞速的发展。应变电测技术是用电阻应变计测定构件的表面应变,再根据应力、应变的关系式确定这构件表面应力状态的一种实验应力分析方法。目前,这一技术的应用和所起的作用,已远远越出了实验应力分析的范畴。

电阻应变计具有尺寸小、重量轻、价格低廉、使用方便、测量精度高等优点。它已广泛用于机械、化工、土建、水利、航空、航天、医学等民用和国防部门进行应变与应力的测量。它还可作为检测元件制成用于测量各种物理量的传感器。它的应用范围现仍在日益扩大。

1 应变计的工作特性

用来表达电阻应变计性能的数据或曲线,称为电阻应变计的工作特性。我国的专业标准ZBY117-82对于丝式及箔式电阻应变计规定了它们的工作特性及其检定方法。工作特性有应变计电阻、灵敏系数、机械滞后、蠕变、应变极限、绝缘电阻、横向效应系数、疲劳寿命、灵敏系数随温度的变化、热输出、零点漂移、热滞后和瞬时热输出等。还规定了不同精度等级下各工作特性的具体数值。

要能恰当地使用电阻应变计并满足一定的精度要求,就应当了解下面介绍的电阻应变计的某些工作特性或测量条件对测量精度的影响,以及为了消除或减少不利影响可能采取的某些措施。

1.1 灵敏系数

电阻应变计的灵敏系数 K 是指应变计电阻的相对变化与安装应变计的试件表面上轴向应变的比值, 即 $K = \frac{\Delta R}{R} / \epsilon_s = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta L}{L}$. 实际使用时, 是将应变计的相对电阻变化, 除以应变计生产厂家提供的灵敏系数值, 以得到试件表面上的轴向应变值。标准 ZBY117-82 中规定灵敏系数 A 级的误差 (对平均值的分散) 为 1%。因此, 在实际使用时, 如果要想使测量精度接近此值, 许多因素需要加以考虑。

按规定, 灵敏系数的标定是在下列条件下进行的: 当试件材料和标定梁材料不同, 试验的应力状态和标定时状态不同, 应变计的安装方法和试件中主应力方向有差异等, 则可能产生误差, 需要对指示应变加以修正。

对于丝式应变计与箔式应变计, 敏感栅两端部的应力状态与栅条中的应力状态是有差异的, 而灵敏系数的标定则是在均匀的应变场中进行。应变计如在应变梯度大的场合中使用, 实际灵敏系数会与标定值有差异。例如当应变计基长与园孔半径之比为 0.5 时, 测量结果的误差可达 37%^[6]。此时, 用数个应变计按阶梯形粘贴或用数个不等基长的应变计重叠粘贴的方法才能减少测量误差^[7]。

由于生产工厂提供的应变计灵敏系数值是在机械应变量为 $1000\mu\epsilon$ 下测得的, 如欲在超出被测材料或敏感栅材料的弹性范围进行测量, 不能使用此灵敏系数值。有人推导出在塑性状态下, 应变计的灵敏系数

$$K_s = \frac{\Delta R}{L} / \frac{\Delta L}{L} = 2 + \frac{\Delta L}{L} = 2 + \epsilon \quad (1)$$

ϵ 为测量的应变值。测量时可以将仪器的灵敏系数置于 2.0, 测出指示应变 ϵ_i , 则

$$\epsilon_i = \frac{\Delta R}{R} / 2 \quad (2)$$

实际的塑性应变

$$\epsilon_s = \frac{\Delta R}{R} / (2 + \epsilon_s) \quad (3)$$

从式 (2) 与式 (3) 消去 $\frac{\Delta R}{R}$, 可得

$$\epsilon_s = \sqrt{1 + 2\epsilon_i} - 1 \quad (4)$$

当将应变计接入恒压电桥的一个臂时, 电桥具有非线性。对于大应变测量, 电桥的非线性较大, 会引起较大的测量误差, 此时可采用下述措施。

如 E = 供桥电压, E_0 = 电桥的输出电压, 则

$$\frac{E_0}{E} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{4 + 2 \frac{\Delta R}{R}}$$

将仪器的灵敏系数置于 2.0, 则指示应变

$$\epsilon_i = \frac{4 \frac{E_0}{E}}{2} = \frac{4 \frac{\Delta R}{R}}{2 \left(4 + 2 \frac{\Delta R}{R}\right)}$$

将式(3)代入上式, 可得

$$\epsilon_i = 2 \left[\frac{(2 + \epsilon_s) \epsilon_s}{4 + 2(2 + \epsilon_s) \epsilon_s} \right]$$

解此式可求得实际的应变

$$\epsilon_s = \sqrt{1 + \frac{2\epsilon_i}{1 - \epsilon_i}} - 1 \quad (6)$$

1.2 横向效应系数

灵敏系数的标定是在单向应力场中进行的, 故应变计生产厂家提供的灵敏系数值中包括了标定梁的波桑比所产生横向应变的影响。实际使用时, 如果试件中纵向应变与横向应变之比值, 与标定梁中由于波桑比而产生的纵向应变与横向应变之比 (即 $-1/\mu_0$) 不同, 则由于应变计的横向效应系数, 测量的结果将具有误差

$$c = \frac{K_i \left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_s} + \mu_0 \right)}{1 - \mu_0 K_i} \times 100\%$$

式中 K_i ——应变计的横向效应系数;

μ_0 ——标定梁的波桑比 (一般为 0.285);

ϵ_s, ϵ_i ——与应变计纵轴和横轴平行的实际应变。

丝式应变计的横向效应系数一般为正值。箔式应变计的横向效应系数可以为正值或负值, 决定于敏感栅的尺寸、形状和材料等。常用标距的丝式应变计和箔式应变计的横向效应系数一般不大, 约为百分之几。短标距的应变计的横向效应系数值则较大。在金属试件上进行常规的实验应力分析时, 由于横向效应系数引起的误差通常不很重要。当用二轴应变花或三轴应变花测定主应力时, 由于至少有一个敏感栅的 ϵ_i/ϵ_s 比值较大, 通常需要对测量结果进行修正。

当在某些复合材料例如正交异性的纤维加强塑料上进行应变测量时, 横向效应的影响会很显著。

1.3 热效应

如果在非等温状态下用应变计进行应变测量, 由于温度效应会产生热输出 (或虚假应变), 应变计的灵敏系数也会随温度而变。

在金属材料上进行应变测量时, 可以使用温度自补偿应变计, 并利用可以自由膨胀的和试件相同的材料, 粘贴规格及性能相同的应变计, 在相同的温度条件下标定的热输出曲线, 进行修正, 以消除由于热效应所产生的误差。也可以采用线路补偿的方法 (补偿块法), 即在另一块和被测结构材料相同而不受应力的补偿块上, 贴上和工作应变计规格及性能相同的另一补偿应变计, 使补偿块和被测结构处于相同的温度环境, 以使两应变计由于热效应而产生的热输出相互抵消。

在复合材料上进行测量时, 由于复合材料的各向异性, 不同方向上的热输出性能不同,

因此,在标定热输出曲线或使用补偿应变计时,要注意标定应变计或补偿应变计在材料上的粘贴方向;在使用三轴应变花测量,需要在三个敏感栅相同的粘贴方向标定热输出,或使用三个补偿应变计进行补偿。

在塑料或非金属材料上,用应变计进行应变测量时,这些材料的传热性能差,流过应变计中的电流会使敏感栅的温度升高,遂有虚假应变产生,有时甚至影响到试件上的应力分布;前者可以用补偿应变计加以补偿,对于后者,只有设法减少流过敏感栅的电流或采用大电阻应变计。

应变计的灵敏系数随温度的变化对测量结果的影响一般不象热输出那样大。可以根据应变计生产厂家提供的数据,对测量结果进行修正。

如果试件上有很大的温度梯度或瞬变温度,要消除温度效应,曲线修正法和线路补偿法都很难有效,此时测量结果将具有很大的不确定性。

1.4 电阻应变计的加强效应

电阻应变计的尺寸小,质量小,在一般的应变测量中,不会有应变计对被测试件产生加强效应的问题。但在低弹性模量的材料或薄的试件上使用时,由于被粘贴的应变计对于试件有加强效应,甚至影响被测量的应力分布情况,就会导致测量误差。试件材料的弹性模量越小,厚度越薄,测量误差将越大。

应变计粘贴在试件表面,由应变计,粘结剂等组成的综合体(或称为应变计装置)的弹性模量一般在 $7\sim 20\text{GPa}$ 范围内,其值与敏感栅的材料、尺寸和形状、基底的材料和厚度、粘结剂的种类和底层的厚度等有关。

加强效应对测量精度的影响是一个相当复杂的问题,特别是在正交异性的薄壁材料上进行测量时。在最后列举的 M. F. Beatty 和 L. F. Mc Calvey 的文献,对于具有加强效应时测量误差的估计,以及如何进行补偿或减少误差的问题,作了一些研究,但仍然有许多内容需要进行深入研究和了解。

2 电阻应变计的误差

应变电测工作中不可避免地包括许多误差。它可以分为两类:一类是元件和仪器设备的误差;另一类是由人造成的误差,此处的“人”包括操作人员和工程技术人员。后一类误差又可以分为两种:一是对环境或条件的估计或判断不当或对材料的选用不当引起的误差,一是对材料、数据使用不当引起的误差。当选用了恰当的元件和仪器设备后,在全部误差中由人造成的误差可能占其中的75%。因此,应对这些误差的来源加以了解,并在实际工作中设法加以防止或避免,以求得到合理的试验精度。

在应变计测量工作的每一阶段中,都包含着误差的许多来源。下面列出不同阶段中这些误差的来源。

2.1 在设计试验阶段

2.1.1 对于试验的环境与条件(如时间、空间、试验周期、温度、压力、电磁场、静电场、辐射场等)作出错误的估计。

2.1.2 关于材料和技术方面

1) 针对下述条件对于采用的材料和技术作出不正确的选择;安装条件、试验

条件、要求的精度、试验周期等。

- 2) 在实际情况下试验不够。
- 3) 应变计的操作人员缺乏足够的训练。

2.1.3 在拟订试验步骤时

- 1) 不恰当的试验步骤会导致不符合要求的结果。
- 2) 所拟订的试验步骤只对于某种特定情况适用,而未考虑情况发生变化的可能。

2.2 在安装应变计阶段

2.2.1 应变计: 灵敏系数的分散, 温度引起灵敏系数的改变, 大应变引起灵敏系数的改变, 应变线性度, 疲劳寿命超过了指定的数值, 热输出, 试件材料的膨胀系数与温度自补偿应变计适用的试件材料的膨胀系数有差异, 零漂。应变计基长是否适用于被测量的应变梯度和应变峰值区, 应变计的自热效应, 应变计的加强效应, 试件中轴到试件表面与到敏感栅距离的比值等。

2.2.2 粘结剂: 超过了允许的伸长量, 蠕变, 滞后, 固化是否充分, 胶层厚薄是否适当, 粘帖时在应变计基底下是否有气泡或杂质。

2.2.3 防护: 防护剂是否会侵蚀敏感栅和焊点, 是否会引起电阻分路或电容分路, 防护物加强效应。

2.2.4 环境: 水、酸、锈蚀物对防护物的影响, 压力、阳光、核辐射、电磁场、静电场、机械冲击和热冲击等的影响。

2.3 应变计与导线连接

2.3.1 接头(敏感栅与引线的接头、引线与导线的接头): 焊剂对焊接点的侵蚀, 接头不合格, 锡焊料的锡病, 接头引起热电势。

2.3.2 在线路连接及机械触点中, 接触电阻引起灵敏系数下降, 在桥路中接触电阻变化的影响, 产生热电势。

2.3.3 导线: 导线电阻使得灵敏系数下降, 在桥路中导线电阻变化的影响, 产生热电势, 拣拾“噪声”。

2.4 在读数系统中

2.4.1 桥路: 温度和压力引起电阻值的改变, 桥路中切换的影响, 桥路的非线性。

2.4.2 供电: 电源的稳定性, 灵敏系数调节的影响, 恒压型或恒流型电源的选用和调节。

2.4.3 信号调理: 设备不适用, 设备的参数调定不适当, 读数的误读, 设备的校准不满意, 频率响应不够, 放大器输入和读数装置的分路作用, 读数的分辨率与线性度, 放大器的漂移与线性度。

2.4.4 电噪声: 开关噪声或传输噪声, 串模与共模抑制, 电磁场与静电场中拣拾的噪声, 接地与屏蔽不正确。

2.5 数据处理阶段

2.5.1 应变计的位置: 应变计粘帖的方向不正确使指示应变减少或增大, 应变计的位置不正确而得不到正确的数据, 未能消除不需要的信号例如弯曲效应, 应变花

中敏感栅相对位置不准确,被测应变物中的应变梯度。

2.5.2 校准:计算校准电阻时采用了不正确的灵敏系数值,校准电阻值采用了应变计的名义电阻值的影响,单臂并联电阻校准时导线长度的影响。

2.5.3 材料常数:灵敏系数标定梁与试验材料的波桑比值不同,温度变化对被测材料杨氏模量的影响,构件的常数实际值与计算时使用的数值有差别。

2.5.4 计算:对于应变花的几个敏感栅采用相同的灵敏系数值,假定材料的杨氏模量、波桑比和线膨胀系数是均匀的,数据未对横向效应系数进行修正,忽略了测量时超出了材料的弹性范围。

国外有人根据大量试验分析得出下列结果:对于最良好的试验环境和条件、简单的工作,专业知识与技术掌握和熟练程度最高和最低的人员用电阻应变计测量的误差分别为1~2%和5~10%。对于最恶劣的试验环境和条件、复杂的工作,专业知识与技术掌握和熟练程度最高和最低人员的测量误差分别为8~15%和15~30%。由此可知,对于同一应变电测工作,专业技术知识的掌握与熟练程度不同的人员所得到的误差会有很大的差别。

因此,所有参加应变电测工作人员,提高专业知识与技术的掌握和熟练程度,保持高度的工作责任感及良好的身体状况和精神状态,是减少测量误差的重要途径。

3 应变计的近期发展

3.1 电阻应变计的微型化 要在应变梯度大处比较精确地测量某点处的应力,必须使用微型应变计。国内外一些厂家已制出许多栅长 $<1\text{mm}$ 的微型应变,最短的栅长为 0.178mm 。

3.2 高阻值的电阻应变计 为了提高测试精度,降低对二次仪表的要求,使用者往往希望获得较大的输出信号;制造尺寸不大而阻值高的应变计是解决这一问题的途径。利用半导体技术,真空沉积或溅射方法可以生产出尺寸小阻值高的应变计。现时已有敏感栅有效面积为 $1.25 \times 1.5\text{mm}$ 阻值高达 5000Ω 的应变计、桥臂电阻为 3000Ω 的 $\phi 6\text{mm}$ 圆膜应变计和桥臂电阻为 5000Ω 的全桥应变计出现。

3.3 弹性模量温度补偿应变计和双重温度补偿应变计 制造传感器的弹性膜片的不同材料具有不同的弹模随温度而变化的性质。对于改良型的卡玛合金采用不同的热处理规范可以改变其灵敏系数的温度系数。如果应变计的灵敏系数随温度变化性能与弹性膜片的弹模随温度变化的性能相匹配,则温度变化时,由于弹模变化与灵敏系数变化而引起应变计的输出变化可以相互抵消,此种应变计称为弹性模量温度补偿应变计。在此基础上又发展了一种双重温度补偿应变计,它对于传感器的弹性元件具有模数补偿与温度自补偿两种性能,这样可以简化传感器的线路,使传感器的性能高度稳定可靠而价格又很便宜。

3.4 可调蠕变应变计 金属弹性膜片本身的蠕变是正值,如果应变计本身的蠕变是负值而两者数值相等,则蠕变可以相互抵消,提高测试精度。改变传递横向应变的栅条,就可以对应变计的蠕变进行调节。现已有利用此原理制成的可调蠕变应变计供应,有力传感器用和压力传感器膜片用的两种全桥式可调蠕变应变计,这种应变计还可调节各臂的阻值以达到桥路的零点平衡。对于应力测量用箔式应变计,可改变端部横栅的设计来减少应变计的蠕变,有人提出将敏感栅端部制成框状可减少蠕变,也能提高灵敏系数和减少其分散。

3.5 在不同使用温度范围内制成热输出性能良好的应变计 对于静态应变测量,要求应

变计的热输出性能良好以获得较高的测量精度。国外制造的温度自补偿箔式应变计,在使用温度范围内(康铜约为 $-75\sim+200^{\circ}\text{C}$,卡玛约为 $-269\sim+290^{\circ}\text{C}$)的热输出性能最好为 $1\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$,分散最佳值为:康铜 $\pm 0.18\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$,卡玛 $\pm 0.36\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ 。美国市售高温应变计最高温度为 650°C ,多用铂钨丝制成,单丝片的热输出为 $800\mu\epsilon/^{\circ}\text{F}$ 。我国工厂生产有 150°C 、 250°C 、 400°C 温度自补偿应变计;一些单位研制成了不同品种的高温应变计,已达到了较高水平,计有 450°C 粘贴式和焊接式, 550°C 焊接式, 600°C 和 650°C 粘贴式, 700°C 粘贴和焊接式(热输出 $<\pm 1000\mu\epsilon$), 800°C 粘贴式及火焰喷涂式(热输出分别小于 $2.5\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ 和 $3000\mu\epsilon$), 750°C 金属箔基底焊接式与可焊接和粘贴的金属网状基底应变计。 900°C 粘贴式应变计正在研制中。

3.6 测量大应变的应变计 国外一些厂家已有 80°C 以内可测量应变量为10%、18%、20%、和25%的应变计。有一种液态金属应变计可测量大应变至50%以上,系将水银注入内径为 $0.08\sim 0.38\text{mm}$ 的软导管中,导管两端用铜丝塞入作为引线,使用时将导管粘贴于试件上,测量导管中水银的电阻变化,即可测知试件的应变,用它可以制成应变花。这种应变计特别适宜于在柔软的物体(为人体结构)或材料上使用。

我国已研制出能在常温下测量5%和10%的电阻应变计和可用达 300°C 测量7%的温度自补偿电阻应变计。

3.7 可预先校准的应变计和重复使用的应变计 日本制成了一种粘贴式可预先校准的电阻应变计,其敏感栅的两面均用聚酰亚胺的膜复盖,首先用室温固化聚酯粘结剂粘贴于试件上进行热输出等性能校准,然后用刀片将应变计剥离,将另一面用相同粘结剂粘贴进行实测,此种应变计可以工作达 250°C ,校准时与实测时的热输出差异在 $50\epsilon\mu$ 以内。

我国出现了一种能适用于一般金属结构和水泥制品、不同规格的可以重复使用的弓形应变计。这种应变计的灵敏度较大,可以实现温度自补偿。用502胶粘贴可以剥下重复使用,测量精度为3%。

3.8 使用非晶态合金制造应变计 目前国内外正在研究利用电阻温度系数低、机械强度高、抗腐蚀性好的Ni-Si-B等非晶态合金制造应变计,这样可以简化敏感栅材料的制备工艺和改善应变计的某些性能。

3.9 新工艺的采用 国内外已广泛应用半导体技术、薄膜技术和厚膜技术制造出薄膜应变计、厚膜应变计等多种传感器。这样制成的应变计稳定性优良,传感器可以向小型化、集成化、多功能化发展。又用溅射法在涡轮叶片上制出薄膜应变计,由于厚度很薄,可以减少工作时应变计对于气流的干扰。对于箔式应变计,有人采用电化学腐蚀工艺或试用离子铣切工艺以改善箔栅的制造工艺。

3.10 利用其他工作原理制成应变计 电阻应变计的工作原理是利用应变计的电阻变化来测量试件表面的应变。现已有一些利用其他工作原理制成的应变计出现,如电容应变计、钢弦应变计、光纤应变计等。

电容应变计特别适于在高温下长期稳定地进行应变测量,国外已制成三种不同型式的高温电容应变计,其中一种最高工作温度可达 954°C ,高温零漂约为 $0.2\sim 0.3\mu\epsilon/\text{小时}$ 。

钢弦应变计是利用钢弦的长度变化可以改变钢弦的振动频率的原理制成,国内外已制成可在混凝土和模型试验中长期稳定使用的钢弦应变计。

光纤应变计发展迅速,另有专文介绍,这里只简介一种。从氦-氖激光器发出的光在分光后射入长度大致相等的两根光纤,从光纤另一端射出的光可以发生干涉因而产生干涉条纹,如果将两根光纤或其中一根固定于构件上,构件负载变形时,可以从干涉条纹的运动测量出构件上的应变。光纤应变计可以测量出小于 $0.4\mu\epsilon$ 的应变,也可以制成光纤应变花。它还可以用于测量温度、压力、位移、速度、振动、加速度等,可以实现读数的自动计算和数字显示,具有发展前途。

3.11 关于电阻应变计的性能鉴定 国际法制计量组织(OIML)对于金属电阻应变计的性能鉴定,于1985年提出了第62号国际建议。在该建议中,对于金属电阻应变计的某些主要性能(应变计电阻、灵敏系数、横向效应系数、热输出)的试验条件和方法、数据处理等作了规定,并推荐了一种给使用者校核灵敏系数的设备。我国沈阳仪器仪表工艺研究所制出了高精度的SK-1型灵敏系数测定装置。这些对于电阻应变计技术的发展,均将起到一定的促进作用。

此外,国内外均生产测量残余应力的应变花和钻孔装置,我国研制出可在 $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ 水下使用的电阻应变花。

4 电测技术的发展动向

首先,电测技术正在不断地向广度和深度发展。就广度而言,有三个方面:①不断适应新的科研和生产需要,着重研究特殊环境和条件下的电测技术,使从真空到高压液下,从深冷到高温、强磁场、强辐射、从静态到高频振动和高速旋转、从近距离到远距离、气流冲刷和温度剧烈变化等等都可以得到有效的测量数据;②在测试技术中,把电测技术与其他测试技术(如光测技术、光纤技术、半导体技术等)相结合,以提高测试精度、扩大应用范围和解决生产实际问题与科学试验中新出现的问题的能力;③随着科学技术的发展,出现了许多新的科学分支和边缘学科如断裂力学、地质力学、岩石力学、粘弹性力学、生物力学、复合材料力学等等,促使电测技术向这些学科渗透,并进而促进这些学科发展。此外,电测技术也还在扩大它的应用领域,如医学、体育活动、计量、食品工业、商品服务等。至于深度方面,则是开展宏观与微观相结合的实验研究,深入探索材料和结构的失效机理以及各种影响因素的规律,例如对于工程结构的动强度试验分析,从时域、幅度域、频域等方面来分析研究结构的冲击强度和随机疲劳强度与寿命的估计等问题。

其次,电测装置向实验数据的采集、分析和处理计算机化,生产过程的检测、控制自动化发展。由于计算技术的迅速发展,促使传统的电测装置向高速度、高精度、多功能、集成化、小型化、数字化、程控化、自动化、智能化方向发展。测量结果不仅可以进行存贮式机分析处理,并可进行实时在线分析处理;工业的生产过程可以实现参数的自动检测和质量自动控制,实现检测和生产流水线的自动化。

第三,向混合技术(或杂交技术)发展。随着电子计算机和有限元以及其他数值分析方法的应用,近年来科学界和工程界正将电测技术与其他实验技术和计算分析相结合的混合技术用来分析工程结构的应力分布问题,以获得更全面有效的分析结果。

5 有关的重要参考书籍和文献

- [1] 吴宗岱、陶宝祺主编：应变电测原理及技术，国防工业出版社，1982年第一版。
- [2] Dally, J. W., Riley:W. F., *Experimental Stress Analysis*, 2nd edition, 1978.
- [3] Window, A. L., Holister, G. S., *Strain Gauge Technology*, 1982.
- [4] Pople, J., BSSM Strain Measurement Reference Book, 1979.
- [5] 阿弗里尔主编：实验应力分析手册，机械工业出版社，1985。
- [6] Perry, C. C., The Resistance Strain Gage Revisited. *Experimental Mechanics* 24(1984), No. 12.
- [7] 庄德恩，实验应力分析的若干问题及方法，科学出版社，1979。
- [8] Beatty, M. F., Chewning, S. W., Numerical Analysis of the Reinforcement Effect of a Strain Gage Applied to a Soft Material, *Int. J. Eng. Sci.* 17(1979), 907—915.
- [9] McCalvey, L. F., Strain Measurements on Low Modulus Materials, Presented at BSSM Conf., Univ. of Surrey, U. K., Sept. 1982.
- [10] Pople, J., Errors in Strain Measurement-the Human Factor (or How Much Do I Contribute?), *Experimental Techniques* 8(1984), No. 9.
- [11] 花正中、陆廷贵，机械结构强度分析研究发展概况，郑州机械研究所，1982.5。