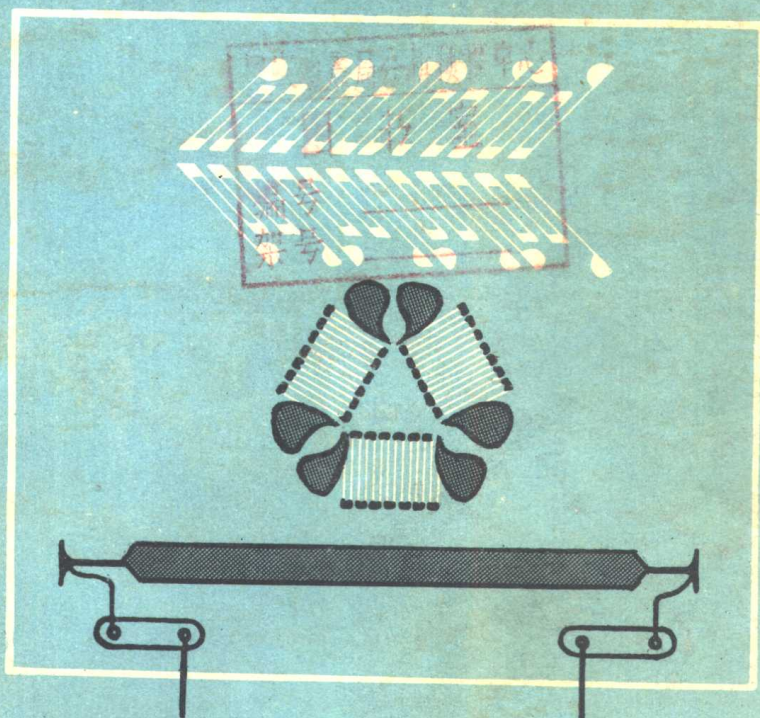


56.288

03944

实验应力分析中的 电测法



国防工业出版社

实验应力分析中的电测法

刘烈全 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书前五章论述了电测法的原理与实验技术,包括应力应变分析,电阻应变片,电阻应变仪,静态应变的测量,动态应变的测量等。第六章介绍误差分析与实验数据处理的基本理论问题。第七章论述了量纲分析与相似理论的基本问题及其应用。

本书可供从事实验应力分析的科技人员及有关专业的师生参考。

实验应力分析中的电测法

刘烈全 编

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

山西新华印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 5 103 千字

1979年3月第一版 1979年3月第一次印刷 印数: 00,001—23,000册

统一书号: 15034·1792 定价: 0.54元

前 言

电测法具有灵敏度高，适于在动载荷、高温、大加速度下以及在其它特殊环境中对结构进行应力分析等特点，如果结合无线电和电子计算技术的应用，电测法还可用于遥测和测量与分析计算自动化。所以在实验应力分析中，电测法已成为一门非常重要的技术，并为各种工程部门和科研单位广泛使用。为了适应广大实验应力分析工作者和有关专业师生的需要，本书较系统地论述了电测法的原理，在各种应力状态下由应变测量计算应力的方法，有关仪器设备的工作原理及使用技术，以及误差分析与实验数据的处理方法。最后，考虑到模型实验对于结构分析与研究的作用，扼要地讨论了量纲分析与相似理论方面的基本问题。

电测技术从本世纪三十年代初问世以来，已有五十年的历史，但与经典的光弹性实验技术相比（后者是在上个世纪的二十年代由布卢斯特（Brewster）发现人工双折射开始的），它还是年轻的和具有广泛发展前途的。目前在电阻丝材料方面还在继续研究，以便满足更高的温度、强核辐射、长期稳定性等方面的要求。在实验技术方面，对高速旋转零件的应力测量技术（可达100000转/分），应变遥测技术，模型内部应力的测量技术等等，都在广泛地进行研究。在仪器设备方面，除了提高单台仪器的质量之外，国外已开始采用所谓双电流原理代替传统的桥式电路，这样就便于使应变仪

与小型可编程序台式电子计算机相结合，实现测量-分析计算-打印输出各种预先安排的结果全部自动化，大大节省了人力和时间，提高了测量精度。应变仪与计算机的直接连接（文献中称为计算机在线(On Line)使用）可说是电测法的一大进步，这对结构在长期工作中所受的外力以及结构的反应进行统计研究是十分重要的技术。把电测应力技术应用于其它新的物理量测试的方面的研究，也十分活跃。由于本书的目的只是向读者介绍电测法的基本原理及应用技术，上面提到的这些专题性问题，不在本书讨论的范围之内。

船舶工程系的骆东平同志对本书的编写，提了许多宝贵意见，作者深表感谢！由于作者水平有限，缺点和错误一定不少，望读者批评指正。

编 者

目 录

序言	1
第一章 应力应变分析	5
§ 1-1 一维应力应变分析	5
§ 1-2 二维应力应变分析 ——主方向已知	8
§ 1-3 二维应力应变分析 ——主方向未知	12
第二章 电阻应变片	19
§ 2-1 电阻丝	19
§ 2-2 电阻片的典型构造	23
§ 2-3 半圆弯头丝绕式电阻片的横向效应系数	26
§ 2-4 电阻片的主要形式	31
§ 2-5 应变花数据的修正和图解	38
§ 2-6 电阻片的选用	43
§ 2-7 电阻片的粘贴工艺、胶水和防护处理	44
第三章 电阻应变仪	49
§ 3-1 单四臂电桥直接测量原理	50
§ 3-2 交流电桥与电容平衡	52
§ 3-3 双桥串联平衡测量原理	55
§ 3-4 相敏检波器的工作原理	58
§ 3-5 静态电阻应变仪使用性能的检查	60
第四章 静态应变的测量	63
§ 4-1 温度的影响及其补偿方法	63
§ 4-2 电阻片在测量电桥中的不同接法及其应用	66
§ 4-3 静态多点测量	70

§ 4-4	大应变的测量	71
§ 4-5	应变仪读数的修正计算	74
§ 4-6	静态应变测量中常见故障及处理方法	75
第五章	动态应变的测量	78
§ 5-1	动态应变测量的一般知识	78
§ 5-2	动态电阻应变仪	81
§ 5-3	示波器的简介	84
§ 5-4	电测法在各种物理参数测量中的应用	88
§ 5-5	旋转件的应力测量	94
第六章	误差分析与数据处理	96
§ 6-1	误差及其分类	96
§ 6-2	误差的分布规律	97
§ 6-3	精确度和准确度	100
§ 6-4	电测应力的误差分析	101
§ 6-5	真值与平均值	104
§ 6-6	误差的表示方法	104
§ 6-7	可疑观测值的舍弃	106
§ 6-8	线性增量的最佳值	107
§ 6-9	平均值的误差与观测次数的关系	111
§ 6-10	实验结果精确度的表示法	113
第七章	模型实验原理	114
§ 7-1	量纲	114
§ 7-2	量纲齐次原则与完全方程	117
§ 7-3	量纲分析	119
§ 7-4	关于巴金罕 (Buckingham) 的 π 定理	124
§ 7-5	相似的基本概念	128
§ 7-6	函数关系已知时的相似条件	133
§ 7-7	量纲分析与相似理论对结构力学实验的指导	134
§ 7-8	变态模型的应用	140
附录	常用国产电阻应变仪的技术数据	146
	主要参考书	152

序 言

尽管材料力学、结构力学和弹性理论在解决工程结构的应力分析方面已经相当地成熟，而且由于结构的矩阵分析方法和有限元法的研究和应用，把解题的范围又向前大大地推进了一步，使得很多过去用传统的分析方法不易解决和不能解决的问题都可以比较满意地获得解答，但是应该承认还有不少的实际问题暂时还处于不能求解的状况。其次，不论是用传统的方法或者是用近代的数值方法，对于那些复杂的工程结构所求得解都需要通过实验的检验才能作出最后的结论。此外，由于结构的工作条件（如外载、环境等）以及结构本身的性状一般都带有随机性，因而需要通过实验的手段获得大量的、长期的统计资料，方能作为分析的依据。如近年来在船舶所受外力和船体反应的研究中采用统计分析就是一例。仅仅考虑到上面所列举的这些理由，就足以使我们确信随着理论分析方法的不断改进与完善，实验应力分析的重要性将越来越大。

现代的工程结构，如航空、造船、飞行器等等，它们的特点是越来越大型化和结构的复杂化；另外一些，如仪器、装备等，又越来越轻巧和精密。它们的共同特点就是工作条件越来越复杂，例如外载条件、温度变化、加速度以及介质特性等等，相应地对实验应力分析技术提出了一系列的新课题。在这种需要的推动下，实验应力分析技术有了很大的发

展，出现了许多新技术。例如经典的光弹性实验，由早期的限于二维应力的分析方法，发展到三维的光弹分析，动荷光弹分析，光弹涂层法等，现在又与全息摄影术相结合，使这一古老的实验技术走向新的发展阶段。在电测法方面，早期主要用于常温下测量物体的表面应变，但近年来在高温和低温、动态应变和各种动力学参数、各种性质的介质环境、极大的加速度、高压、强辐射以及遥测技术等方面都得到了很好的应用，而且在测量模型的内部应力方面的研究也取得了不小的进展。在实验应力分析科学的领域内还有不少其它的新技术。不同的方法可能在不同的条件下显出其优越性，但是用途最广泛和适应能力最强的还是电测方法。

电测法所使用的仪器设备主要有三部分，即电阻片、电阻应变仪和指示记录仪器。简单地说，电测法就是用牢固地粘贴在分析对象上的电阻片将被测量的应变转换成电量，经过电阻应变仪的放大后再将电信号输给指示记录仪器，完成对应变的指示或记录。电测法的主要特点是：

(1) 灵敏度高 由于利用电阻片将非电量转换成电量，再经电子仪器进行放大、显示和记录，所以能获得很高的放大倍数，从而达到很高的灵敏度。目前的电阻应变仪可以精确地分辨出 1×10^{-6} 应变，这个应变的量级对于钢材而言约相当于 2 公斤/厘米^2 的应力。为了对电测法的高灵敏度有个比较的概念，我们假定用一个千分表（表盘刻度为每格 0.001 毫米）装在标距为 20 毫米的测量段上，用表盘上的每一格对应于应变 $0.001/20 = 50 \times 10^{-6}$ ，这个灵敏度比 1×10^{-6} 要低 50 倍。

(2) 电阻片尺寸小且粘贴牢固 这个特点十分重要，当

对某些工程结构（如船体、桥梁、飞机、机床等）进行全面的应力分析时，往往要测量数十点乃至数百点的应力，电阻片可以很容易地大量粘贴使用。对于结构十分紧凑以致使用其它测量仪表（如杠杆引伸仪）根本无法安装の場合，这种情况下电测法就能发挥很大的作用。尺寸小还有另一个重要意义，即可以用来测量局部应力。现在电阻片的标距可以小于1毫米，这对于应力集中区的测量是比较合适的。

（3）电阻片质量小（重量轻） 这是一个突出的优点，它使得电测法不仅可以作静态应力的测量，而且可在动态应力分析方面发挥独特的作用，使得一系列重要的动力学参数（如加速度、振幅、频率、冲击力及爆炸压力等）能够比较精确地进行实验研究，正是由于这一特点使得电测技术成为某些科技部门所不可缺少的研究手段。如用电阻片作成的加速度传感器，可以测量由 $0 \sim \pm 250000 \text{ g}$ 的加速度。测量动态应变的频率可由静态直到 50 千周/秒以上。

（4）适于高温和低温下测量 除了飞行器和原子反应堆工程等在这方面有明显的要求以外，一般工程技术领域也对温度提出了要求，如汽轮机叶片的振动和机壳的应力分析，要求电阻片能够承受 500°C 的高温，而在某些化工设备和制冷设备方面又要求作低温下的应力分析。目前电测法可以在 $-268 \sim 1093^{\circ}\text{C}$ ($-450 \sim 2000^{\circ}\text{F}$) 的范围内成功地使用，技术上的主要问题是电阻丝材料和粘接剂材料的性能问题。

（5）高介质压力 可以在数千大气压的气体介质或液体介质中进行测量，这对于高压结构和深水结构的研究是十分有利的。

（6）结构在工作状态下进行测量 这对于检验理论计

算的可靠性和研究结构的工作特性都有重要的作用，如可以对高速旋转着的轴和轮盘、行驶中的车辆、船舶、飞机等的结构应力进行实测。还可以在生产过程的控制与调节中应用。

(7) 可进行遥测 如果与无线电遥测技术结合起来可以满足一些特别的测试要求。例如在汽轮机转子的研究方面近年来不少单位进行多次试验，证明是行之有效的方法。

电测法还有其它一些优点，读者在以后各章的讨论中，将会逐步了解。

第一章 应力应变分析

§ 1-1 一维应力应变分析

假定有一个复杂的空间桁架结构，现在要分析在工作载荷作用下其中某些杆的应力，对于这样的问题，如果进行大量的计算工作还不如直接测试这几根杆的应变来得方便省事。我们知道，桁架中的每一根杆都是在一维应力状态下工作的，就是说它们不是承受简单拉伸就是承受简单压缩，因此我们可以沿着杆的轴线方向测量杆在工作时的应变，然后换算应力和杆的内力。如图 1-1

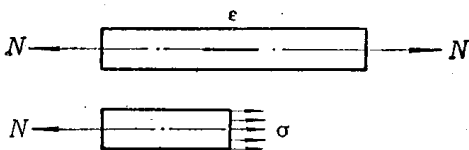


图 1-1

所示，假定测得的应变为 ϵ ，于是该杆的应力和内力为：

$$\begin{aligned}\sigma &= E\epsilon \\ N &= F\sigma = FE\epsilon\end{aligned}\tag{1-1}$$

式中 E ——材料的弹性模量；

F ——杆的横截面积。

至于如何测量应变 ϵ ，这是本书在后面要详细讨论的问题。

对于一个承受弯曲变形的梁，情况也是相似的，梁的上、下表层纤维处于一维应力状态之下。如果我们测出了表层的应变(图 1-2)，则表层的弯曲应力和截面上的弯矩便可由下

式算得：

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$M = W\sigma = WE\varepsilon \quad (1-2)$$

式中 W ——梁的抗弯剖面模数。

如果梁除了受到弯矩作用之外还受到轴向力作用，

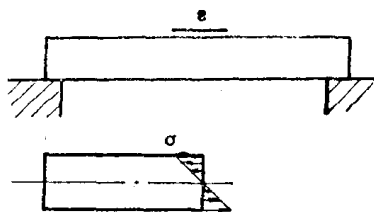


图 1-2

为了通过应变测试能把弯矩和轴向力以及弯曲应力和轴向力引起的应力都能计算出来，就必须在梁的上下表层同时测量应变。对于横截面对称于中性轴的情形，如图 1-3 中所示之

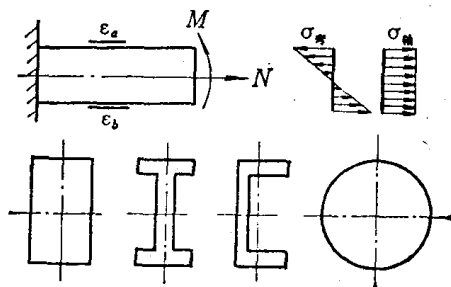


图 1-3

矩形、工字形、槽形以及圆形等，则有：

$$\sigma_a = E\varepsilon_a$$

$$\sigma_b = E\varepsilon_b$$

$$\sigma_m = 0.5(\sigma_a + \sigma_b)$$

$$\sigma_{\text{avg}} = 0.5(\sigma_a - \sigma_b) \quad (1-3)$$

$$N = F\sigma_m$$

$$M = W\sigma_{\text{avg}}$$

式中下标 a 和 b 分别表示梁的上表层和下表层纤维。对于上

下不对称的截面，如图 1-4 所示之 T 形，则有：

$$\sigma_a = E\varepsilon_a = \sigma_{\text{中}} + M/W_a$$

$$\sigma_b = E\varepsilon_b = \sigma_{\text{中}} + M/W_b$$

式中 W_a 表示梁截面上边纤维的剖面模数，当

y 轴以向上为正时 W_a

为正； W_b 表示下边纤维

的剖面模数，当 y 轴向上

为正时 W_b 为负。对上

面两式联立求解可得：

$$\sigma_{\text{中}} = \frac{E(\varepsilon_b W_b - \varepsilon_a W_a)}{W_b - W_a}$$

$$M = \frac{E W_a W_b}{W_b - W_a} (\varepsilon_a - \varepsilon_b) \quad (1-4)$$

$$N = F \sigma_{\text{中}}$$

对于一维应力状态下的应变，还要提出两点注意，因为后面的讨论要涉及这些问题。

(1) 应力是一维的，但应变并非一维。若一维应力 σ_x 作用方向的应变为 ε_x ，则与 x 方向垂直的 y 方向上 $\sigma_y = 0$ ，但 y 方向应变为 $\varepsilon_y = -\mu \varepsilon_x$ ，此处 μ 表示材料的泊松系数。

(2) 由 x 方向到 y 方向，应变的大小和符号是随着角度 α 的变化而变化的，如图 1-5 表示一受一维拉应力作用之板。与 x 轴

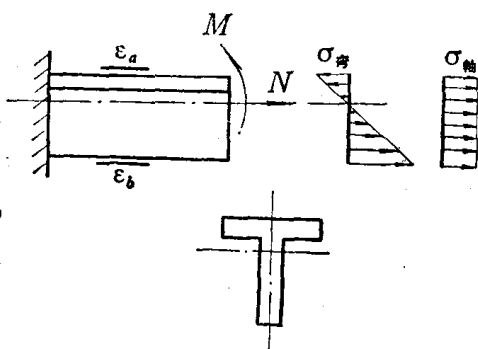


图 1-4

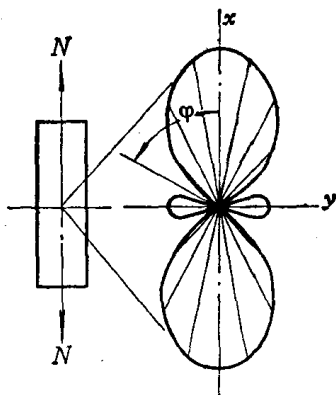


图 1-5

夹角为 α 的方向之应变为(参看式 1-7):

$$\begin{aligned}\varepsilon_\alpha &= \varepsilon_x \cos^2 \alpha + \varepsilon_y \sin^2 \alpha \\ &= \varepsilon_x (\cos^2 \alpha - \mu \sin^2 \alpha)\end{aligned}$$

因为 x 方向应变为正, 而 y 方向应变为负, 故在这个象限中必有某个方向 ϕ 存在, 而 $\varepsilon_\phi = 0$, 若将此条件代入上式, 则可找到 ϕ 角为:

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{1/\mu} \quad (1-5)$$

例如, 对于钢材取 $\mu = 0.3$, 则 $\phi = 61.3^\circ (61^\circ 17')$ 。

§ 1-2 二维应力应变分析

——主方向已知

所谓二维应力, 是指结构内的一点在两个互相垂直的方向上受到拉伸或压缩应力的作用, 而这两个方向上的剪应力都为零, 这样的应力称为主应力, 而其作用方向称为主方向^①。例如一个圆筒形高压容器(图 1-6), 受内压力 p 作用, 由于容器的结构和所受的内压力都是轴对称的, 所以筒体上任一点的母线和环线是其主方向。当我们需要测试筒体中的应力时, 需要同时沿母线和环线两个方向进行应变测量, 然后按下面的公式计算主应力:

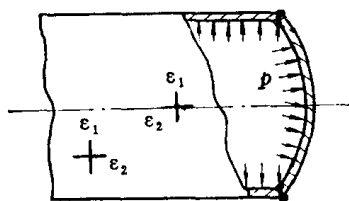


图 1-6

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1)\end{aligned} \quad (1-6)$$

① 关于应力状态的详细分析可在任何一本《材料力学》教科书中找到。

公式(1-6)是由主应变计算主应力的式子,虽说计算并不复杂,但当测试点很多时仍觉费时和容易出错,所以下面讨论两种图解法。

(1) **三列线图解法** 作三条竖直的列线如图 1-7 所示,左边的一条代表 ε_1 , 右边的一条代表 ε_2 , 中间的一条是量取主应力 σ_1 和 σ_2 用的。三条列线的 0 点是在同一水平线上,均以向上为正,向下为负。在两条应变列线上各有两种不同的比例尺,其中较稀的一种是基本比例尺,为 $a \times 10^{-6}/\text{毫米}$,而较密的一种为 $\mu\varepsilon$ 的比例尺,其比例为 $(a \times 10^{-6}/\mu)/\text{毫米}$,中间应力尺的比例为 $a \times 10^{-6} (2E/1-\mu^2)/\text{毫米}$ 。三根列线间的距离是等距的,其距离大小可任意选取。图中画出了一个应用的例子,假定数字为 $a=20$, $E=2 \times 10^6 \text{ 公斤/厘米}^2$, $\mu=0.3$, $\varepsilon_1=1200 \times 10^{-6}$, $\varepsilon_2=400 \times 10^{-6}$, 结果是 $\sigma_1=2900 \text{ 公斤/厘米}^2$, $\sigma_2=1670 \text{ 公斤/厘米}^2$ 。

(2) **四列线图解法** 在三列线图解法中,要分两次用直尺在列线图上求取 σ_1 和 σ_2 , 不够方便。下面讨论的四列线图解法,只要一次就可以同时读出 σ_1 和 σ_2 的值。如图 1-8 所示,作四根竖直列线,外边的两根分别为 ε_1 和 ε_2 , 中间的两根分别为 σ_1 和 σ_2 , 四条尺的 0 点均在同一水平线上,并均以向上为正,向下为负。四根线间的距离之比分别为 $\mu:1-\mu:\mu$ 。应变列线的比例尺作为基本比例尺,取为 $a \times 10^{-6}/\text{毫米}$, 应力列线的比例尺为 $a \times 10^{-6} (E/1-\mu)/\text{毫米}$, 图中仍以上述数字例子画出了读数方法。

这里要注意的是,上面的两种列线图都是针对一定的材料来绘制的,如果材料的 E 、 μ 不同则应重新绘制列线。这种图解法除了适用于由主应变求主应力之外,对于二维应力

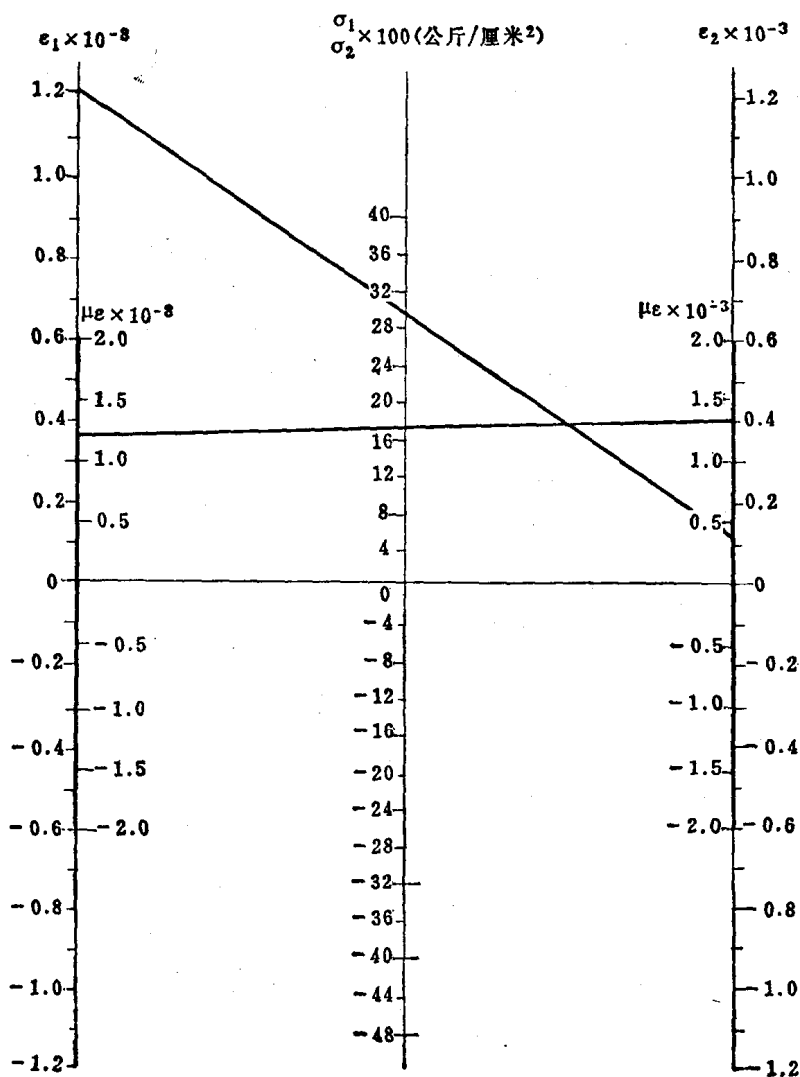


图 1-7