

实验应力分析的 若干问题及方法

庄 德 恩 编 著

科
学
出
版
社

52.58
198

实验应力分析的 若干问题及方法

庄德恩 编著

3K849/24

科学出版社

内 容 简 介

本书从解决工程实践问题出发,论述了有关电测法、光测法中的若干实验技术(主要是电测法),以及弹性结构设计中的一些模拟技术问题。在书末,对较新的实验应力分析工具——激光全息摄影也作了简单介绍。书中有许多实验验证及应用实例。

实 验 应 力 分 析 的 若 干 问 题 及 方 法

庄德恩 编著

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979 年 7 月 第 一 版 开 本: 787 × 1092 1/32

1979 年 7 月 第 一 次 印 刷 印 张: 12

印 数: 0001—23,120 字 数: 270,000

统一书号: 13031 · 1005

本社书号: 1418 · 13—2

定 价: 1.25 元

序 言

实验应力分析这门学科是随着生产的发展而产生出来的。因为仅仅依靠理论方法不能完全解决复杂结构及零件的强度计算问题,特别是对于解决应力集中问题,用理论方法只能解一些典型的问题。这一矛盾的出现,推动着人们去研究用实验的方法直接测定或用模拟法确定结构零件和部件中的应力分布情况,从而发展了各种实验应力分析方法,如光弹法、电阻应变计法、电模拟、薄膜比拟法,现在还有全息摄影法等。解决应力分析理论解的困难的另一途径是数值计算法,特别是有限单元法^[1]。这是最近二十年来随着电子计算机的出现而发展起来的一种解决结构分析的有效方法。实际上,它是一种在电子计算机上的数值模拟实验,可用来计算固体力学中的大部分问题及进行应力分析。

我国的实验应力分析工作已相当普及,在这个基础上自然还有提高的问题;另外,要把许多新的实验技术用来解决工程实践问题还得做一番努力,而就实验技术本身来说也还需要进一步研究和探索并加以完善。总之,在实验应力分析方面还得做很多工作。

本书不象一般的实验应力分析书籍那样对很多实验方法的基本原理作系统的介绍,关于这方面已出版了一些书籍,有编著的,也有翻译国外的。本书仅从解决工程实践问题出发论述有关电测法、光测法中的若干实验技术(主要是电测法)以及弹性结构设计中的某些模拟技术问题。由于激光全息摄影是较新的实验应力分析工具,故在本书中也用了一定篇幅

作介绍和研究。

书中所论述的问题，大多数是根据作者在过去实践中所获得的技术成果以及经验和体会的总结等写成的。另外，结合本书的内容也还补充了一些国内外的有关技术。虽然从全书来看并不全面，但就所述问题本身看却较为系统、详细。为了使开始从事这方面工作的同志便于理解和应用，对于有些问题作了顺序的论证，这对于熟悉应力测量工作的人来说可能感到有些多余，他们可以不必读这些论证。

全书共有四编，分十六章。第一编有八章，叙述电测法中的若干技术问题，如实验精度及误差分析问题、标定问题、应变计的安置及测量分析法、动应力实验的数据处理及应力集中的测量方法等，这些都是常温电测法中的几个主要技术问题。第二编叙述变态模型设计方法及光弹变态模型实验问题。第三编有三章，写的是平面光弹实验中的若干技术问题，内容包括有关提高光弹实验的精确度问题、应力集中的光弹实验、确定主应力方向与主应力和的一些方法等。重点是研究头两个问题，因为提高精度是大家共同关心的，而分析应力集中则为光弹法解决工程实践时很有效的一种手段。第四编有三章，介绍激光全息摄影在应力测量中的应用，本编在对全息摄影的原理作了简要的叙述后，主要介绍全息摄影在光弹性实验中的应用。另外，在利用全息干涉术测量物体位移的基础上研究了应变的计算方法。关于利用等值线图法解决结构设计最佳化问题也作了一些简单介绍。

本书对应力集中的测量方法以及有关型钢结构的实验研究法等方面作了较为详细的论述。这些技术理论及一些解题方法有的经过了实践的验证，有的尚未经过再实践的考验，可能还有许多不够和不当之处，甚至也可能存在着一些错误的东西。

还要说及的是, 由于本书大部分内容是在实践过程逐步总结形成的, 其中许多方法虽然是第一次发表的, 但远不是目前最新的实验技术。现在, 国内外实验应力分析技术已发展到更高的阶段, 在应力测量中除了应用激光全息摄影外, 还有光电转换技术, 用电子计算机进行数值计算, 以及实验数据的自动处理, 自动记录, 实验状态的模拟技术等都有相当进展, 而这些在书中都没有反映出来。实际上, 书中很多方法都可以应用电子计算机进行处理, 这样就更有利于应用。

最后要说的是, 作者在书中所发表的许多结果, 有的是和一些同志共同研究以及一起从实践中获得的, 例如在电测法方面有华尚钧同志, 在光测法方面有张曾昌同志。另外李家驹、曲维先、华尚钧、张曾昌诸同志在审查中还提出了许多宝贵的意见和建议, 谨此表示感谢。由于水平有限, 错误之处在所难免, 希望读者多多指正。

庄德恩

目 录

序言	v
----------	---

第一编 电阻应变计测量中的若干问题及方法

第一章 电阻应变计测量的精度与误差分析	1
§ 1.1 应力电测法的误差因素综述	1
§ 1.2 长导线引起的误差分析	3
§ 1.3 应变计粘贴引起的误差	8
§ 1.4 环境对测量的影响	10
§ 1.5 测量过程可能产生的其他误差	22
第二章 电阻应变仪的误差及确定方法	31
§ 2.1 动态电阻应变仪的误差及确定方法	31
§ 2.2 静态电阻应变仪的误差及确定方法	45
第三章 电阻应变计的误差分析及确定方法	47
§ 3.1 电阻应变计灵敏系数 K 的误差及确定方法 ..	47
§ 3.2 电阻应变计名义电阻不同的影响	53
§ 3.3 应变计横向效应的影响	54
§ 3.4 应变计组成形式的影响	58
§ 3.5 应变计机械滞后的影响	60
§ 3.6 应变计的频率响应问题	60
第四章 应力测量综合误差的确定问题	65
§ 4.1 关于精密度与准确度的一些概念	65
§ 4.2 应力测量综合误差的计算	67
§ 4.3 用实验方法直接确定应力测量的综合误差 ..	70

第五章 动应力测量的标定问题	80
§ 5.1 动应力实验的静态标定法	80
§ 5.2 动应力实验的动态标定问题	89
第六章 应变计沿构件截面的布置与测量分析法	95
§ 6.1 布置应变计前的分析研究	95
§ 6.2 应变计沿工字型截面的布置及测量分析法	98
§ 6.3 槽型截面应变计的布置及测试分析法	117
§ 6.4 T 型及角型截面的布点及测量算法	125
§ 6.5 关于多点测量结果的处理问题	129
第七章 随机振动应力实验数据的处理问题	135
§ 7.1 研究数据处理的意义	135
§ 7.2 随机振动应力记录曲线的数字特征	136
§ 7.3 由统计数据求无限次典型的理论常态密度函数	142
§ 7.4 数字特征近似值的精确性和可靠性的估计问题	145
§ 7.5 对总体情况的估计问题	148
§ 7.6 安全系数的计算	151
第八章 电阻应变计测量应力集中的若干方法	160
§ 8.1 测量应力集中的引伸计法	160
§ 8.2 应变的积分表示法	161
§ 8.3 阿德斯法	162
§ 8.4 用相等的长基长应变计测量应力集中的原理和方法	166
§ 8.5 用不相等的长基长应变计测量应力集中的方法	176
§ 8.6 实验过程中的若干问题	181
§ 8.7 方法的应用问题	185

§ 8.8	应用测量法确定应力集中系数	188
§ 8.9	曲梁结构应力集中的分析及测量	196
§ 8.10	关于应用长、短基长应变计测量应力集中的 误差问题	202

第二编 结构变态模型的设计问题

第九章	弹性结构模型的设计	207
§ 9.1	弹性结构相似模型的设计	207
§ 9.2	弹性结构变态模型的设计问题	212
第十章	光弹变态模型的设计实验	242
§ 10.1	原型的实验	242
§ 10.2	光弹变态模型的设计实验	245

第三编 光弹实验中的若干问题及方法

第十一章	关于提高光弹实验的精确度问题	254
§ 11.1	材料的选择及加工处理问题	254
§ 11.2	试样外形尺寸的选择及加荷问题	256
§ 11.3	模型条纹值的准确测定	256
§ 11.4	关于等倾线的确定	266
§ 11.5	关于主应力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ 值 (或等色线) 的准确获 得问题	269
第十二章	光弹法研究应力集中的若干问题	281
§ 12.1	应力集中点最大应力的确定	281
§ 12.2	应力集中系数的计算	282
§ 12.3	光弹法求应力集中的模拟问题	291
§ 12.4	光弹涂层法研究结构的应力集中	294

第十三章 确定主应力方向及主应力和的一些方法305

§ 13.1 不用等倾线确定主应力方向的方法.....305

§ 13.2 求主应力和的一个近似方法.....313

第四编 激光全息摄影在应力测量中的应用

第十四章 全息摄影的一般原理321

§ 14.1 全息干涉效应.....321

§ 14.2 造图和建象的理论分析.....322

§ 14.3 两次曝光法的原理.....326

第十五章 全息光弹性329

§ 15.1 全息光弹性的基本原理.....329

§ 15.2 静态全息光弹性的实验装置.....333

§ 15.3 等厚线、等差线、等倾线的摄取.....336

§ 15.4 主应力的分离.....343

§ 15.5 图象全息光弹.....349

§ 15.6 全息摄影在光弹贴片法中的应用.....351

第十六章 用全息干涉术测量结构应变353

§ 16.1 线应变的定义.....353

§ 16.2 两相邻点位移差的确定.....356

§ 16.3 应变的定量计算.....362

§ 16.4 用等值线图法确定结构设计的最佳化问题...365

第一编 电阻应变计测量中的若干问题及方法

第一章 电阻应变计测量的精度与误差分析

§ 1.1 应力电测法的误差因素综述

在具体分析各种误差的起因之前,首先概括地讨论一下误差的种类,以便对误差的来源有一个总体概念,然后再逐一进行讨论。

总的说来,电测实验的误差可分为系统误差及偶然误差两类,所谓系统误差就是可以通过实验或标定加以预先确定的误差,如仪器本身的精确度、应变计的灵敏系数、横向效应及导线电阻的影响等所形成的误差;另一种是偶然误差,是具有随机性的误差,如周围环境温、湿度的影响,振动的影响及各种干扰等所形成的误差。但这种偶然误差也可以在相同的条件下进行多次重复的测量,并用统计的方法加以确定。概括起来应力电测法可能产生的误差有以下诸方面:

一、应变仪产生的误差:

- (一) 仪器振幅特性引起的误差
- (二) 仪器频率特性引起的误差
- (三) 仪器稳定性的影响
- (四) 电源电压波动的影响
- (五) 仪器内部标定装置的误差

二、记录装置引起的误差

- (一) 振子的惯性(阻尼)引起的振幅与频率特性的误差
- (二) 记录曲线的形状及测量引起的误差

三、电阻应变计的误差

- (一) 应变计灵敏系数的误差
- (二) 应变计名义电阻不同的影响
- (三) 横向效应的影响
- (四) 应变计组成形式的影响
- (五) 应变计机械滞后的影响
- (六) 应变计频率特性引起的误差

四、粘贴过程引起的误差

- (一) 粘贴方向偏差引起的误差
- (二) 粘贴厚度引起的误差

五、长导线引起的误差

- (一) 长导线电阻对测量的影响
- (二) 长导线电容对测量的影响
- (三) 长导线引起的温度影响

六、环境对测量的影响

- (一) 被测材料不同的影响
- (二) 绝缘不良引起的误差
- (三) 温度变化及补偿不良的影响
- (四) 电磁的干扰问题

七、测量过程引起的误差

- (一) 标定引起的误差
- (二) 测读引起的误差
- (三) 接触电阻产生的误差
- (四) 应变计基长选择不当引起的误差

列宁说：“要真正地认识对象，就必须把握和研究它的一切方面、一切联系和‘媒介’”。所以必须分析这些矛盾，然后才能指出解决矛盾的方法。下面将逐一对上述误差进行分析研究，从而提出一些消除误差的方法。

关于仪器及应变计本身所引起的误差及确定方法，将在

后两章中专门讨论，这里先研究有关其他方面的一些误差问题。

§ 1.2 长导线引起的误差分析

一、长导线电阻引起的误差

应变计与应变仪在测量时必须用导线联接，而有时候在测量过程中往往需要用较长的导线（有的长达 100 米以上）。由于导线本身存在一定数值的电阻，它和应变计是一起串联在应变仪的桥臂上，所以导线的电阻也是桥臂电阻的一部分，但它本身又不参加变形。试件变形后的应变为

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R} \quad (1.1)$$

其中， K ——应变计的灵敏系数； ΔR ——应变计随试件变形时的电阻增量； R ——应变计的电阻值。

设导线的电阻为 R_L ，如果还要获得与公式(1.1)相同的应变值 ε 时，则必须改变 K 值，即

$$\varepsilon = \frac{1}{K'} \cdot \frac{\Delta R}{R + R_L} \quad (1.2)$$

由(1.2)式比(1.1)式得

$$1 = \frac{\frac{1}{K'} \cdot \frac{\Delta R}{R + R_L}}{\frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta R}{R}} = \frac{K}{K'} \cdot \frac{R}{R + R_L}$$

即

$$K' = K \frac{R}{R + R_L} \quad (1.3)$$

由公式(1.3)知 $K' < K$ ，即由于导线电阻使灵敏系数降低了。对静应力测量，一般当导线超过 10 米时就须加以修正，

否则就会引起较大的误差,其误差为

$$\begin{aligned}\Delta &= \frac{\frac{\Delta R}{R} - \frac{\Delta R}{R + R_L}}{\frac{\Delta R}{R}} \times 100\% \\ &= -\frac{R_L}{R + R_L} \times 100\% \quad (1.4)\end{aligned}$$

设 $R = 120$ 欧姆, $R_L = 2$ 欧姆, 则有

$$\Delta = \frac{-2}{122} \times 100\% = -1.6\%$$

有二种解决误差问题的办法, 一种是用修正的方法, 即依下式:

$$\varepsilon = \varepsilon' \left(1 + \frac{R_L}{R} \right) \quad (1.5)$$

其中, ε ——真实的应变值; ε' ——由仪器测量所得之应变值。

另一种方法是按照公式 (1.3), 把应变计的 K 值乘以因子 $R/(R + R_L)$ 作为仪器的 K 值, 这样由仪器测读出来的应变即为真实的应变 ε 。

二、长导线电容的影响

一般应变仪的供桥电源系交流电, 因之必须考虑长导线及应变计的电容影响问题, 特别在供桥电源电压频率高, 导线长及应变计电阻大的情况下, 引起误差就会更大。由于长导线电容的影响会导致仪器调节不平衡, 或者当导线电容变动而引起了仪器零点的漂移等。另外它也会影响到测量的灵敏度。现在来具体分析这些影响。

按一般半桥式测量时导线的联接方式, 如果考虑到电容的影响, 如图 1.1 的情形, 这时可把由导线电容的影响视为在工作臂及补偿臂上各并联上一个电容 C_a 及 C_b 。按电桥理论^[2]

知,当电桥平衡时其阻抗基本方程为:

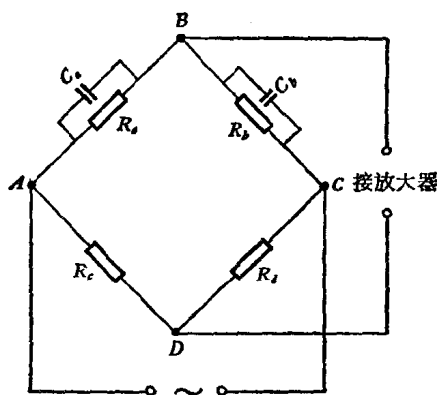


图 1.1

$$Z_a \cdot Z_d = Z_b \cdot Z_c \quad (1.6)$$

即

$$\frac{1}{\frac{1}{R_a} + j\omega C_a} R_d = \frac{1}{\frac{1}{R_b} + j\omega C_b} R_c$$

整理后得

$$\frac{R_a \cdot R_d}{1 + j\omega R_a C_a} = \frac{R_b \cdot R_c}{1 + j\omega R_b C_b} \quad (1.7)$$

要使方程(1.7)成立,则其实数部分应满足下式:

$$R_a \cdot R_d = R_b \cdot R_c \quad (1.8)$$

虚数部分亦应相等,即

$$j\omega R_c \cdot C_a = j\omega R_d \cdot C_b \quad (1.9)$$

由此知,除了电阻乘积相等外,还应满足以下条件(这里设 $R_c = R_d$):

$$C_a = C_b$$

所以,若不能满足电容平衡条件,则仪器也不能平衡了.一般应变仪中都具有电容平衡器,但如果导线太长,或导线

不是三芯隔离线等,都可能导致电桥难以调节平衡。

设电桥桥臂电阻改变 ΔR 和全部阻抗的改变为 ΔZ ,由

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C}$$

故

$$dZ = \frac{dR}{(1 + j\omega CR)^2}$$

由于在测量过程中应变计的电阻变化较小,故可用差分代替微分得:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\frac{\Delta R}{(1 + j\omega CR)^2}}{\frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C}} = \frac{\Delta R}{R(1 + j\omega CR)} \quad (1.10)$$

可设 $\omega CR \ll 1$,这在一般情况下是允许的,故可将公式(1.10)右边括号内展开成级数,并略去高次项后,其实数部分为:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta R}{R} (1 - \omega^2 C^2 R^2) \quad (1.11)$$

由此可知,电容的变化使全部相对阻抗减小了。所以在桥臂上有电容影响的应变仪所测量的应变值 ε 必须加以修正。和长导线电阻引起的误差一样,可以用修正灵敏系数 K 的办法来解决这个矛盾,即令:

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{K'} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} \quad (1.12)$$

故

$$K' = K \frac{\Delta Z}{Z} \cdot \frac{R}{\Delta R} \quad (1.13)$$

将方程(1.11)代入公式(1.13)得

$$K' = K(1 - \omega^2 C^2 R^2) \quad (1.14)$$

由公式(1.14)可知,当 K' 值给出允许的误差时,也就可确定出允许的电容值.设 K' 的误差等于0.2%时,则最大的允许电容值为

$$C_{\max} = \frac{1}{\omega R} \sqrt{\frac{2}{10^3}} \quad (1.15)$$

另外由(1.14)知

$$\frac{K'}{K} = 1 - \omega^2 R^2 C^2$$

因 $\omega^2 C^2 R^2 \ll 1$,故当电桥上电容对称时,则导线电容对灵敏度几乎毫无影响.

现在来分析当导线电容变动而引起的仪器零点漂移的计算问题^[3].将

$$\frac{\Delta Z}{Z} \approx \omega^2 C^2 R^2 \frac{\Delta C}{C}$$

代入公式(1.12),得

$$\varepsilon = \frac{1}{K'} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{1}{K(1 - \omega^2 C^2 R^2)} \omega^2 R^2 C^2 \frac{\Delta C}{C} \quad (1.16)$$

按泰勒级数展开,并略去高次项,得

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\Delta C}{KC} \omega^2 C^2 R^2 (1 - \omega^2 C^2 R^2) \\ &\approx \frac{\Delta C}{KC} \omega^2 C^2 R^2 = \frac{\Delta C}{K} \omega^2 C R^2 \end{aligned} \quad (1.17)$$

所以为减小导线抖动引起的电容变化而产生的仪器零点漂移的办法是采用三蕊隔离线,若采用单股导线,则因导线抖动时使工作臂和补偿臂的导线电容变动不一致,从而严重地引入误差.

三、长导线引起的温度影响^[4]

在下述两种情况下要考虑到温度对于导线的影响

(一) 测量应变计与补偿应变计的导线电阻相同但二者