

465

实验应力分析

SHI YAN YING LI FEN XI

知识出版社

实验应力分析

SHI YAN YING LI FEN XI

实验应力分析

52.58
647

实验应力分析

知 识 出 版 社

北 京 · 上 海

2F57/03

实验应力分析
知识出版社出版

(北京安定门外外馆东街甲1号)

新华书店北京发行所发行 煤炭工业出版社印刷厂印刷

开本850×1168 1/32 印张5.75 插页8 字数134千字

1984年3月第1版 1984年3月第1次印刷

印数：1—6350

书号：13214·7 定价：0.88元

主 编 傅梦蘧

副主编 吴宗岱

编写组成员(按姓氏笔画顺序)

云大真	方萃长	刘先龙	杨槐堂
苏先基	李伯芹	吴宗岱	张如一
柯敬唐	洪水棕	顾学甫	傅梦蘧
鲍乃铿	戴福隆		

说 明

1. 本书的内容摘自《中国大百科全书》的《力学》稿,它较全面地介绍了实验应力分析的各种方法及其基本原理,其中包括电阻应变计测量技术、光弹性法、全息术和云纹法等。书中附有英汉对照和汉英对照的分析索引、实验应力分析大事年表和符号表等,并附有阅读本书所需的名词解释。

2. 条目的分类目录,反映出层次关系,例如:

电阻应变计测量技术.....

 电阻应变计.....

 灵敏系数(见电阻应变计、电容应变计).....

光弹性法.....

3. 条目标题上方加注汉语拼音,一般附以外文名,例如
yunwenfa

云纹法(moiré method)。

4. 本书条目的释文力求使用规范化的现代汉语。条目释文开始一般不重复条目标题。

5. 一个条目的内容涉及其他条目并需由其他条目的释文补充的,采用“参见”的方式。所参见的条目标题在本条释文中出现的,用楷体字排印,例如“采用全息光弹性法,可以同时获得等差线及等和线的数据”;所参见的条目标题未在本条释文中出现的,另用括号加“见”字标出,例如“常常需要用模型作实验(见模型理论)”。

6. 条目释文中出现的外国人名、地名,一般不附原文。重要的外国人名和著作名在“汉英对照索引”和“英汉对照索引”中注出原文。释文中的外国人名,一般在姓的前面加上外文名字的缩写,

印以名字的第一个字母，例如 M.M. 弗罗希特。人们所熟知的外
国人名，不冠缩写字母，例如英国大力学家牛顿，不作 I. 牛顿。

7. 在重要的条目释文之后，附有参考书目，供读者选读。

目 录

说明	1
条目分类目录	3
正文	(1)
名词解释	(142)
符号表	(151)
实验应力分析大事年表	(153)
汉英对照索引	(156)
英汉对照索引 (English-Chinese Index)	(163)
附：外国人名译名对照表	(171)

条目分类目录

实验应力分析·····(1)

〔电测方法〕

电阻应变计测量技术·····(5)

 电阻应变计·····(12)

 应变花·····(17)

 电阻应变测量装置·····(18)

 应变遥测技术·····(23)

 电容应变计·····(25)

 电阻应变计式传感器·····(27)

 集流器(引电器)·····(31)

 灵敏系数(见电阻应变计、电容应变计)·····(34)

 横向效应(见电阻应变计)·····(34)

〔光测方法〕

光弹性法·····(34)

 应力-光学定律(见光弹性法)·····(44)

 等差线(等色线, 见光弹性法)·····(44)

 等倾线(见光弹性法)·····(44)

 切应力差法(见光弹性法)·····(44)

 光弹性斜射法(见光弹性法)·····(44)

 光弹性应力冻结法·····(44)

 光弹性夹片法·····(46)

光弹性材料	(46)
光弹性仪	(47)
光弹性贴片法	(48)
光弹性应变计	(51)
光弹性散光法	(53)
动态光弹性法	(61)
热光弹性法	(65)
光塑性法	(66)
全息照相	(68)
全息图(见全息照相)	(72)
全息干涉法	(72)
双曝光法(两次曝光法, 见全息干涉法)	(76)
即时法(实时法, 见全息干涉法)	(76)
均时法(时间平均法, 见全息干涉法)	(77)
全息光弹性法	(77)
位移场全息干涉分析	(81)
散斑干涉法	(89)
单光束散斑干涉法(见散斑干涉法)	(96)
双光束散斑干涉法(见散斑干涉法)	(96)
云纹法	(96)
面内云纹法(见云纹法)	(111)
离面云纹法(见云纹法)	(111)
焦散线法	(111)
网格法	(114)
[其他方法]	
脆性涂层法	(116)
等应力线(见脆性涂层法)	(119)
X射线应力测定法	(119)
比拟法	(121)

薄膜比拟(见比拟法).....	(128)
电比拟(见比拟法).....	(128)
电阻网络比拟(见比拟法).....	(128)
沙堆比拟(见比拟法).....	(128)
声弹性法.....	(128)
声全息法.....	(129)
声发射技术.....	(131)
引伸计.....	(133)
模型理论.....	(135)

实验应力分析

傅 梦 蓬

实验应力分析是用实验分析方法确定物体(例如工程构件)在受力情况下的应力状态的学科。在固体力学的各分支(如弹塑性力学、断裂力学、复合材料力学等)中,都常用这方法研究基本规律,为发展新理论提供依据。在工程领域内,它又是提高设计质量,进行失效分析的一种重要手段。有效地应用实验应力分析方法,不仅能提高工程结构的安全度和可靠性,还能达到减少材料消耗、降低生产成本和节约能源的要求。

早在 17 世纪,人们将力学原理用于工程问题时,就曾用实验测定材料的力学性能,并阐明工程结构的某些力学特征。但与现代的实验技术相比,早期的实验是很粗糙的。到了 19 世纪后期,虽然出现了较为灵敏的机械式应变测量装置,但在工程实用上,仍受到很大的限制。直到 20 世纪 30 年代,粘贴式电阻应变计的出现,光弹性实验技术的进一步完善,以及其他实验技术的发展,才使实验应力分析蓬勃地发展起来,并得到广泛的应用。目前已有电学的、光学的、声学的以及其他类型的实验方法。

电学方法 有电阻、电容、电感等多种方法,而以电阻应变计测量技术的应用较为普遍,实际效果也较好。电阻应变计不仅可用于模型实验,而且可在机器工作条件下,用它进行应变及其他参数(如扭矩、压力等)的测量。利用无线电遥测技术,还可进行远距离的应变遥测(见应变遥测技术)。电容应变计可在 650℃ 以上的

温度环境中,长期进行应变测量。此外,根据各种特殊的用途,还可制成相应的传感器和测力装置(见电阻应变计式传感器)。其中电感式传感器多用于位移的测量。

光学方法 这方法发展较快,方式也较多,逐渐形成了一门光测力学。其中经典的光弹性实验技术,已从二维、三维模型实验(见光弹性法、光弹性应力冻结法)扩展成能用于工业现场测量的光弹性贴片法,用来解决扭转和轴对称问题的光弹性散光法,研究应力波传播和热应力的动态光弹性法和热光弹性法,进行弹-塑性应力分析的光塑性法,以及研究复合材料力学的正交异性光弹性法。除了这些经典方法之外,还有下述一些方法。对云纹法的研究和应用,已日趋完善,特别是在大变形测量方面,其效果尤为明显。全息干涉法和散斑干涉法虽是20世纪60年代后期发展起来的一门新技术,但它在分析复杂构件的振型和振幅、测量物体的微小变形、对三维位移场进行定量分析(见位移场全息干涉分析)以及测定含裂纹构件的应力强度因子等方面,都已取得一定的成效。在全息技术和散斑技术中应用脉冲激光,还可以研究应力波在固体中的传播。采用全息光弹性法,可以同时获得等差线及等和线的数据,便于分离主应力,可用来解决平面的应力分析问题。用焦散线法,可以测量裂纹尖端的塑性区和应力强度因子,也可测量角隅区的应力奇异性和两物体间的接触应力等,这是一种测量奇异变形的光学方法。

声学方法 ①声弹性法,它可用来测量焊接件的残余应力。②声发射技术,可以用来确定含裂纹试件的开裂,以及监测疲劳裂纹的扩展等。③声全息技术,可以用来显示试件内部缺陷的形状和大小。

其他方法 脆性涂层法是应用较广泛的一种。一般先用它定性地(或粗略定量地)测出试件应力集中的区域和相应的主应力方向。如须作精确的定量分析,可在已测出的应力集中的区域里,沿相应的主应力方向粘贴电阻应变计,作进一步的测量。若用X射

线应力测定法,可以无损地直接测定试件表层的应力或残余应力。

此外,还可采用比拟法。两种(或两种以上)不同的物理现象,如可用相同形式的数学方程来描述,则可利用其中一个物理现象的观测试验,研究另一个物理现象。常用于实验应力分析的这类方法,有薄膜比拟、电比拟、电阻网络比拟和砂堆比拟等。

模型和原型实验 应用上述这些实验应力分析方法进行工程构件的应力分析时,往往利用模型或原型进行实验。对于新设计的复杂工程结构,常常需要用模型作实验(见模型理论),校核该设计方案的可靠性,或选择较优的设计方案。在工程完成后,有时还须进行现场原型实验,验证模型实验的结果。除此之外,还可通过模型或原型实验,找出工程构件失效的原因,以便提出改进的方案。非金属材料制成的模型,在小载荷作用下容易变形,加上制造方便,可在同一个模型上修改原设计方案和重复进行实验,故通常倾向于采用这类材料(例如硬聚氯乙烯、有机玻璃、铝粉增强环氧树脂等工程塑料)制造模型。在进行模型或原型实验时,往往采用多种实验应力分析方法相结合的测试方式。

发展趋势 实验应力分析的发展有如下特点:①实验技术向广度和深度发展。就广度而言,例如,日趋广泛地应用电阻应变计测量技术,使得从真空到高压,从深冷到高温,从静态到数十万赫频率条件下的应变,都可获得有效的测量数据。又如把经典方法和新兴科学技术结合起来(如全息干涉法、全息光弹性法、散斑干涉法、声发射技术),不断增加测试手段,扩大了测量和应用的范围,或提高试验的精度。在深度方面,开展宏观和微观相结合的实验研究,深入探索失效的机理和各种影响材料强度的因素的规律性。②实验装备的自动化。在实验数据的采集、处理、分析和控制等方面,力图实现计算机化,如大型动载实验,已能做到实时的数据处理,大大缩短实验周期,及时提供准确的实验分析数据和图表。即使是多年来难以实现自动化的光弹性仪,也已出现多种光弹性自动测试装置的方案。③随着电子计算机及有限元分析和其

他数值分析方法的应用，经典的应力分析正朝着实验和计算相结合、物理模型和数学模型相结合的方向发展。

dianzu yingbianji cellang jishu

电阻应变计测量技术 (resistance strain gage technique)

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,确定构件表面应力状态的一种实验应力分析方法。将电阻应变计固定在被测构件上,则构件变形时,电阻应变计的电阻将发生相应的变化。用电阻应变仪(见电阻应变测量装置)测量此电阻的变化,换算成应变;或输出与此应变成正比的模拟电信号(电压的或电流的),由记录器记录下来;或用计算机按预定的要求进行数据处理;就可得到所测定的应力或应变。

电阻应变计测量技术有如下的优点:①测量精度和灵敏度高;②频率响应好,可以测量从静态到数十万赫的动态应变;③应变测量的数值范围广;④易于实现测量的数字化和自动化,以及无线电遥测;⑤可在高温、低温、高速旋转、高压液下、强磁场和核辐射等环境下进行测量;⑥可制成各种传感器,测量力、压力、位移、加速度等物理量,在工业过程和科学实验中用作控制或监视的敏感元件。主要缺点:①一个电阻应变计只能测定构件表面一点在某个方向的应变;②只能测得栅长范围内的平均应变。

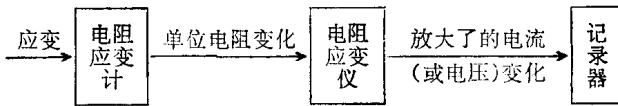
发展简史 电阻应变计测量技术起源于19世纪。1856年,W.汤姆逊对金属丝进行了拉伸试验,发现金属丝的应变和电阻的变化有一定的函数关系,说明应变关系可转换为电量变化的关系,可用电学方法测定应变。1938年,E.西尔曼和A.鲁格制出了第一批实用的纸基丝绕式电阻应变计。1953年,P.杰克逊利用光刻技术,首次制成了箔式应变计。随着微光刻技术的进展,这种应变计的栅长可短到0.178毫米。1954年,C. S.史密斯发现半导体材料的压阻效应,1957年,W. P.梅森等研制出半导体应变计,其灵敏系数(见电阻应变计)比金属丝应变计高50倍以上,现已用于测量力、扭矩和位移等的传感器上。

电阻应变计的品种规格繁多,其中包括适用于高温、低温、强磁场和核辐射等条件的,以及用于测量残余应力和应力集中的特

殊应变计。

早期的电阻应变计测量仪器，用直流电桥和检流计显示的方法测量应变，其灵敏度和精度都比较差，不能满足要求。到了 20 世纪 40 年代，出现由可调节的测量电桥和放大器组成的电阻应变仪，使电阻应变计的测量技术，在工程技术和科学实验领域内获得广泛的应用。为了克服直流放大器信息的漂移和线性精度差等缺点，传统的电阻应变仪都采用交流放大器，以载波放大方式传递信号。这种仪器的性能稳定，其精度能满足一般的测试要求，但它的工作频率受载波频率的限制，而且存在电容、电感影响测量精度等问题。60 年代，出现了采用直流放大器的电阻应变仪。电阻应变仪正朝向数字化、自动化和多功能方向发展，已有用于静态应变测量数字显示的应变仪和多点自动巡回检测的应变测量装置，以及用于动态应变测量的数据采集处理系统等产品。电阻应变计测量技术在机械、化工、土建、航空等部门的结构强度试验中，获得了广泛的应用(参见彩图插页第 1 页图 1)。

测量原理 电阻应变测量系统由电阻应变计、电阻应变仪和记录器三部分所组成，其工作过程如下所示：



电阻应变计可按下式将构件的应变转换为单位电阻变化：

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

式中 R 为初始电阻， ΔR 为该电阻的变化， e 为轴线方向的应变， K 为灵敏系数。

电阻应变仪采用电桥或电位差计的测量线路，将电阻应变计的电阻变化转换为电压(或电流)的变化。

在直流电桥测量线路中(图 1)，应根据不同的输出要求选择负载电阻。负载电阻 $R_L \approx \infty$ 时，电桥的输出电压最大，这种电桥称