

高等学校“十一五”规划教材

实验力学

© 盖秉政



哈尔滨工业大学出版社

高等学校“十一五”规划教材

实 验 力 学

盖秉政



哈爾濱工業大學出版社

内 容 提 要

本书主要讲述固体力学中常用的实验方法,内容包括模型实验原理,实验数据处理,电测法基本原理及测试方法,光测法原理,三向光测,贴片光弹,散光光弹,全息光弹,比拟法,莫尔(云纹)法,X射线法,全息干涉法,散斑法及焦散线法等。同时,书中也用一定的篇幅介绍了一些常见的力学实验,即断裂实验、振动与撞击实验,以及流体实验。

本书注重概念与实验方法原理的说明,尽力作到浅显易懂,而又具有一定深度。因此本书适合力学、航天、航空、机械、土木及相近专业的本科生或研究生作为教材使用,同时也可供有关工程技术人员及力学专业教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

实验力学/盖秉政. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.10

ISBN 7-5603-2387-1

I.实… II.盖… III.应用力学 IV.039

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 109866 号

责任编辑 尹继荣

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 17.25 字数 384 千字

版 次 2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷

印 数 1~3 000

定 价 26.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

实验力学是通过实验来解决力学问题的一门科学,是高等工业学校工程力学专业学生必修的技术基础课程。本书即是适应这门课程的教学需要编写的。

实验力学的范围很广,它包含力学的各种实验方法及各类力学问题(例如强度问题,材料的损伤、断裂问题,材料本构问题,结构的振动与冲击问题,热问题,波动问题,高速撞击问题,水动与气动问题等等)的实验技术。本书不可能,也没有必要一一讲述所有内容。本书的主要对象是力学专业本科生、研究生及相关的工程技术人员。讲述的内容主要是与固体强度有关的一些问题,即通常所说的实验应力分析的内容。但对其他一些常用的实验力学内容也作了简单的介绍。

本书共7章,第1章是绪论,内容为实验力学的任务、方法及实验力学的发展概况;第2章讲述模型实验原理;第3章讲述实验数据处理;第4章讲述电测方法;第5章讲述光测方法;第6章讲述其他实验方法,包括比拟法、脆性漆层法、莫尔法、X射线法、全息干涉法、焦散线法、压痕法;第7章介绍几个常用的力学实验,即断裂实验、振动与撞击实验以及流体实验。

为了使学生真正掌握实验力学这门课程,编写本书时,编者尽力作到概念清晰,内容浅显易懂,尽力把实验方法的基本原理阐述清楚,从而使学生在此基础上有所发挥。

本书是在作者1979年编写的“实验力学”讲义的基础上重新组织写成的。在编写过程中,参考了国内外公开出版的一些图书、会议资料及兄弟院校的有关讲义,并得到了同行们的协助和我校主管部门的大力支持,在此特向有关人员表示感谢。

在本书编写过程中,编者尽管作了不少努力,但仍不免有这样或那样的缺点和不足,敬请读者批评指正。

盖秉政

2006年5月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 实验力学的任务与作用	(1)
1.2 实验力学中的基本方法	(2)
1.2.1 直接法	(2)
1.2.2 间接法	(3)
1.2.3 比拟法	(4)
1.3 实验力学的发展概况	(4)
习题 1	(6)
第 2 章 模型实验原理	(7)
2.1 量及其测量	(7)
2.2 量纲与量纲公式	(8)
2.3 π 定理	(10)
2.4 相似原理	(14)
2.5 模型设计	(18)
习题 2	(19)
第 3 章 实验数据处理	(21)
3.1 误差及其分布	(21)
3.2 数据的分析方法	(25)
3.3 经验公式的建立	(31)
3.3.1 定点法	(31)
3.3.2 最小二乘法	(32)
习题 3	(33)
第 4 章 电测法	(35)
4.1 基本原理	(35)
4.1.1 传感器	(35)
4.1.2 测量系统	(43)
4.2 测试方法	(53)
4.2.1 应变片的选用	(54)
4.2.2 应变片的粘贴	(54)

4.2.3	应变仪的选用	(56)
4.2.4	应变片的布置与桥接	(57)
4.2.5	复杂应力状态下主应力的测定	(59)
4.2.6	温度补偿问题	(66)
4.2.7	多点测量问题	(67)
习题 4		(69)
第 5 章	光测法	(72)
5.1	光学基础	(72)
5.1.1	光的概念	(72)
5.1.2	晶体光学	(74)
5.1.3	波片与偏振片	(75)
5.2	光测法原理	(76)
5.2.1	应力 - 光学定律	(76)
5.2.2	等倾线与等差线	(77)
5.2.3	圆偏振光的利用	(78)
5.2.4	白光的利用	(80)
5.3	光测实验	(81)
5.3.1	光弹性仪	(81)
5.3.2	等差线的观测	(82)
5.3.3	等倾线的观测	(85)
5.4	等差线与等倾线的应用	(87)
5.4.1	应力场的计算	(87)
5.4.2	绘制主应力迹线	(92)
5.5	三向光测实验	(93)
5.5.1	应力的冻结与切片	(93)
5.5.2	三向应力光学定律	(94)
5.5.3	三向光测方法	(95)
5.5.4	自由表面应力测定	(98)
5.6	光测材料	(99)
5.6.1	基本要求与参数	(99)
5.6.2	常用光测材料	(100)
5.6.3	材料与模型制作	(101)
5.6.4	材料条纹值的测定	(102)
5.7	贴片光弹	(103)
5.7.1	基本原理	(103)
5.7.2	f_e 的标定	(104)
5.7.3	主应变分离	(105)
5.7.4	应变修正	(106)

5.7.5 贴片材料与贴片粘接	(108)
5.8 散光光弹	(109)
5.8.1 散射光及其光强	(109)
5.8.2 应力-光学定律	(112)
5.8.3 实验与应力计算	(113)
5.9 全息光弹	(118)
5.9.1 全息图及其再现	(118)
5.9.2 全息光弹的基本原理	(121)
5.9.3 平面全息光弹	(126)
习题5	(133)
第6章 其他实验方法	(136)
6.1 比拟法	(136)
6.1.1 薄膜比拟法	(136)
6.1.2 流体比拟	(139)
6.1.3 电场比拟	(140)
6.1.4 电网比拟	(141)
6.2 脆性漆层法	(144)
6.2.1 涂漆的操作	(145)
6.2.2 漆层常数(应变灵敏度)与裂纹密度	(146)
6.2.3 例题	(147)
6.2.4 脆性漆的制造及其性能	(150)
6.3 莫尔(云纹)法	(152)
6.3.1 莫尔图案的解析与结构应变的确定	(152)
6.3.2 模型栅格的制作方法	(156)
6.3.3 失配技术对莫尔法的应用	(157)
6.3.4 例题	(159)
6.4 X射线法	(160)
6.4.1 X射线应力测量原理	(160)
6.4.2 X射线应力测量公式	(161)
6.4.3 X射线应力测量方法	(165)
6.5 全息干涉法	(167)
6.5.1 位移-相(程)差方程	(167)
6.5.2 位移场分析	(168)
6.5.3 振动测量	(171)
6.6 散斑法	(174)
6.6.1 散斑大小	(174)
6.6.2 光强分布	(175)
6.6.3 散斑场的运动	(175)

6.6.4	散斑照相	(175)
6.6.5	散斑干涉	(178)
6.6.6	散斑剪切干涉	(179)
6.7	焦散线法	(180)
6.7.1	基本关系式	(181)
6.7.2	平面问题	(182)
6.7.3	裂纹问题	(183)
6.7.4	光路布置	(185)
6.8	压痕法	(185)
6.8.1	基本原理	(186)
6.8.2	实验设备与方法	(188)
	习题 6	(193)
第 7 章	常用力学实验简介	(196)
7.1	断裂实验	(196)
7.1.1	穿透裂纹 K_{IC} 的测试	(196)
7.1.2	表面裂纹 K_{IC} 的测试	(201)
7.1.3	COD 临界值 δ_c 的测试	(204)
7.1.4	J 积分临界值 J_{IC} 的测试	(207)
7.1.5	疲劳裂纹扩展速率的测试	(211)
7.2	振动与撞击实验	(213)
7.2.1	测振系统与设备	(214)
7.2.2	振动参量测量	(228)
7.2.3	撞击实验	(243)
7.3	流体实验	(248)
7.3.1	压力测量	(248)
7.3.2	速度测量	(251)
7.3.3	流量测量	(257)
7.3.4	风洞的应用	(260)
	习题 7	(263)
	参考文献	(265)

第 1 章 绪 论

理论分析与实验研究历来是人们认识自然和解决工程问题的两个不可缺少的手段。在力学范围当然也不例外,实验力学即是通过实验来解决力学问题的一门科学,它与力学中的理论分析互相补充,形成了一个解决力学问题的完整体系。在实验力学中,为了解决力学问题,广泛地运用了物理学中的最新成就,它往往避开复杂的数学分析,直接获得问题的实际“图像”,这是它与理论分析的明显差别。实验力学所处理的问题多半都带有“个体”的性质,因此它比起理论分析又尚欠一般化,这又是它的不足之处。实验力学的范围很广,在本课程中我们所要涉及的主要是有关固体强度的问题,即所谓的实验应力分析的内容。但对实验力学中的其他方面,如断裂、振动与撞击、流体等实验也开辟一章(第 7 章)作了简短的讲述。下面我们仅就上述内容,略作进一步的叙述。

1.1 实验力学的任务与作用

强度问题是所有工程实际中的基本问题之一。实验应力分析的任务是研究各种零件、结构处于不同工作条件下(如不同温度、湿度、介质等),在各种载荷(静载荷或动载荷等)作用下内部所引起的应力分布及其变化,内力大小及其与位移的联系等客观规律,从而合理地选择它们的几何尺寸和截面形状,使强度设计达到既安全又经济的目的。

为了完成这个任务,实验应力分析的研究工作可以在模型、样品或真实结构上进行,通过不同的实验方法,测定其变形、应力、内力、位移及有关的参数(如速度、加速度等);研究在不同状态下,它们之间的内在联系。为强度设计提供基本的、可靠的资料。因此,实验应力分析作为一种方法是现在解决各种强度问题的有效武器之一。

具体来说,实验应力分析方法可以解决下面的问题:

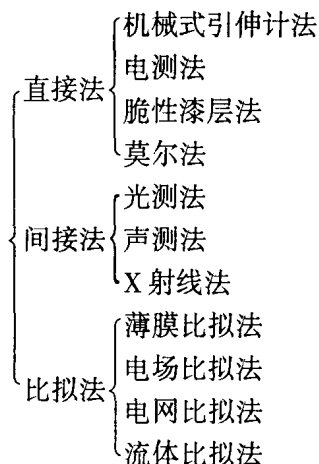
(1)测定零件或结构本身在工作过程中所受的载荷(如力、力矩、惯性力等)的大小、方向、特征及其变化情况,或测定影响载荷情况的各种运动参数(如位移、速度、加速度等)。

(2)确定零件模型或结构模型及真实零件或真实结构的应力状态,确定危险截面上的应力分布情况和特征,研究应力集中现象,确定应力集中系数。

(3)根据实验应力分析的研究结果,可以合理地选择零件或结构的几何尺寸和截面形状,同时可对现行的强度计算方法进行校核,并以其研究结果作为依据,拟定新的计算方法或验证新的计算方法的可靠性。

1.2 实验力学中的基本方法

实验力学中,研究物体受力变形和应力的方法,按其性质来说大致可分为三类,即



1.2.1 直接法

直接法即直接测定物体变形的方 法。它是在物体变形前,把“变形指示物”,如双杠杆式引伸计、镜式引伸计、电阻应变片、脆性漆层、网格等固定在物体待测处,当物体变形时,这些“指示物”亦随之变形,从而给出物体变形情况的指示。根据“指示物”的不同,直接法又可分为:引伸计法(包括机械式引伸计法及非电量的电测法)、脆性漆层法、莫尔法。

1. 引伸计法

方法要点:在模型或真实零件待测表面一段长度上,安装上变形仪传感器(引伸计或应变片),当实测表面产生变形时,传感器即引起相应的变化,其结果被引伸计转换、放大并记录下来。

应用范围:(1)就变形而言,可用于静荷和动荷。(2)就对象而言,可用于模型试验和现场的真实结构(原型)试验。(3)就试验条件而言,可用于实验室、车间、野外;可用于常温、高温等情况。(4)就变形范围而言,可测弹性变形和微小的弹-塑性变形。(5)就仪器的计算长度而言,可测量 30 mm 以上的平均应变。

优缺点:(1)测量的精度较高,适应性较强。(2)计算长度可任意选择,因此可测量应力集中处的最大应力值和应力的分布情况。(3)所测量的仅为试件的表面变形。(4)单靠这种方法来确定危险截面位置和危险应力的 大小和寻求结构的合理形状,工作量很大。

可测量量:(1)直接确定变形的大小和符号。(2)根据测得的变形可以计算主应变及主应力的 大小和方向。

误差范围: $\pm 1\% \sim \pm 7\%$ 。

2. 脆性漆层法

方法要点:在被研究的物体表面涂上一层特殊的漆料,当应力作用时,某点的变形达到一定数值后,涂层即沿着与最大主应力垂直的方向裂开,根据裂纹的出现顺序及方向,便可确定主应力的数值。

应用范围:(1)就变形速度而言,可用于静荷和动荷。(2)就对象而言,可用于模型和原型。(3)就实验条件而言,适用于温度为 $5 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 情况下的任何场合。(4)就变形范围而言,适用于 $0.03\% \sim 0.30\%$ 的弹性变形。

优缺点:(1)应用范围很广,直观性很强,不受研究对象的限制。(2)精度低,定量分析不够可靠。(3)漆层对温度、湿度等自然条件适应性较差,在载荷作用下会发生移位现象,在温度影响下会自然开裂。

可测量量:直接测出最大主应力的数值和危险截面位置。

误差范围: $\pm 10\% \sim \pm 20\%$ 或更大些。

3. 莫尔法

方法要点:在被研究的物体表面,按一定方式“画”上网格,当应力作用时,网格随同物体一起发生变形,然后把它同标准网格进行比较,从而确定物体的变形及应力。

应用范围:(1)就变形而言,可用于静荷和动荷。(2)就对象而言,可用于模型和原型。(3)就试验条件而言,可用于实验室、现场试验;可用于常温及高温测量。(4)就变形范围而言,可测量弹性及塑性变形。

优缺点:(1)应用范围广。无论是金属材料,还是非金属材料;小弹性变形,或薄膜及低弹性模数材料的大弹-塑性变形都可以应用。(2)可解决高温测量问题。(3)使用嵌固栅格对透明模型可作三维应变分析。(4)可作应变的绝对测量。(5)栅格的制作要求严格。

可测量量:(1)直接确定变形的大小和符号。(2)根据测得的变形可以计算主应变及主应力的方向和大小。

误差范围:取决于主控栅格与模型栅格制作精度。

1.2.2 间接法

间接法即间接测定物体变形的办法。当物体受力时,除了物体要发生变形之外,其他物理量也要发生相应的变化。例如,产生人工双折射,晶格间距变大(或变小),改变声波在其中的传播速度等等。于是,我们就可以通过这些物理量的变化来了解物体的变形,这就是间接法进行结构应力分析的基本原理。

1. 光测法(偏光应力分析法)

方法要点:将特殊的透明塑料制成平面或立体模型,置于偏振场中进行研究,模型受应力后产生人工双折射效应,它与该平面内的主应力差成比例,故可通过此法确定模型任一点的主应力大小和方向。

应用范围:(1)就变形而言,可用于静荷和动荷。(2)就对象而言,一般用于模型试验,但通过贴片法也可以用于原型。(3)就试验条件而言,适于实验室也适于现场。(4)就变形范围而言,通常用于弹性范围,也可用于弹-塑性范围。

优缺点:(1)可以足够精确地获得平面模型的任一点的主应力大小和方向,相当精确地获得三向模型任一点的主应力大小和方向。(2)直观性很强,通过应力光图可以直接确定边界应力和应力集中系数。(3)模型形状可以是任意的。(4)进行三向应力分析时,实验技术较为复杂。(5)原型(即贴片法)及动光弹性应力分析技术尚不够完善。

可测量量:(1)可以直接确定模型上任一点的最大剪应力、边界应力及主应力方向。(2)可以通过计算获得任一点的主应力值。

误差范围:(1)对平面模型: $\pm 1\% \sim \pm 5\%$ 。(2)对三向模型: $\pm 5\% \sim \pm 20\%$ 。

2. X 射线法

方法要点:把 X 射线投射到变形物体上,测定衍射环半径的变化,从而确定变形体晶格间距的变化,进而找出物体的变形及应力。

应用范围:(1)适用于晶体材料(单晶体或多晶体)的应力分析。(2)适用于残余应力的测定。

优缺点:(1)可对应变作非破坏性的绝对测量。(2)只能通过决定个别晶粒的变形,平均地确定物体的变形。(3)材料弹性模量、X 射线的强度等对应力值的确定影响较大。

可测量量:(1)可以直接确定出一点的 X 射线入射方向的法向应变。(2)通过计算可以求出一点的六个应变分量及应力分量。

误差范围: $\pm 1.0\% \sim \pm 10\%$ 。

1.2.3 比拟法

方法要点:运用自然界物理现象与数学中微分方程的相似性而建立起来的实验应力分析方法。当模型的边界与所求问题的边界存在几何与力学相似时,在模型中测得的数值,可立即模拟出所求问题的解。

应用范围:(1)就变形速度而言,适于静载荷的应力分析。(2)就对象而言,适用于平面模型的应力分析。(3)就条件而言,适用于实验室条件下进行。(4)就变形范围而言,通常用于弹性范围。

优缺点:(1)可以足够精确地测得模型上任一点的应力函数。(2)模型的形状可以是任意的。(3)边界的调整较为困难。(4)对于解决三向和动荷问题尚有许多困难。

可测量量:(1)模型中任一点的应力函数。(2)根据应力函数可以计算任一点的主应力大小及方向。

误差范围: $\pm 1.0 \sim \pm 10\%$ 。

在实验力学中,为了获得良好的试验结果,通常要把几种方法结合起来使用。例如把电场比拟法同光测法结合起来,就可以直接确定出一点的主应力和与主应力差,进而直接求出该点的主应力。而且对上面所列的各种实验方法,也必须根据具体的测定对象作合理的选择,以达到预期的最好效果。

1.3 实验力学的发展概况

实验力学是在解决工程中的力学问题时出现的,实验力学也正是在解决这些力学问题时得到了发展。工程中提出的力学问题非常多,而且多半是比较复杂的,为了解决这些复杂的力学问题,实验力学就要不断地采用新的实验技术、新的材料、新的设备;不断地完善已有的实验方法、实验材料、实验设备。

1856 年开尔文(Lord Kelvin)从实验中发现铜丝及铁丝被拉伸时,它们的电阻增加,而且丝中的应变越大,电阻增加的越多。在同样应变条件下铁丝的电阻比铜丝电阻变化大。开尔文用惠司登电桥(Wheatstone bridge)测量了金属丝中电阻的变化,并得出如下三个重要结论:(1)金属丝中的电阻变化是丝中应变的函数;(2)不同金属丝材料的电阻对应变有

不同的灵敏度;(3)惠司登电桥可以精确地测量出金属丝电阻的变化。开尔文这个经典实验及所给出的结论奠定了电阻丝应变片(the electrical-resistance strain gage)制造及应变电测的理论基础。20 世纪 30 年代,商售的电阻丝应变片问世,标志着应变电测方法步入正轨,开始为科研与工程服务。与此同时,美国贝尔电话实验室(Bell Telephone Laboratories)对晶体管的研制获得了意外的收获,1954 年,史密斯(Smith)测得了硅与锗晶体的压阻性质,1957 年梅森(Mason)与瑟斯顿(Thurston)制成半导体压阻传感器(transducer),1960 年压阻应变片(piezoresistive strain gages)投入市场。从而使半导体应变片(semiconductor strain gage)开始进入应变的电测行列。半导体应变片实质就是一块固定在载体上的硅之类单晶,可以做得很小、很薄,但它的灵敏度 K_0 却非常高,根据硅单晶中掺入杂质的数量的不同, K_0 可在 50~175 的范围内变化。半导体应变片的问世与使用,使应变的电测实验上升到一个新的台阶。此后的近半个世纪,应变片的需求不断在增加,应变片的性能与质量也不断在提高,适用于高温、高压、动载、防水、复杂应力、大变形、疲劳、断裂等用途的各种特殊应变片(或传感器)也相继被研发出来。同一时期,用于应变测量的(静、动态)电阻应变仪及各种配套设备,特别是记录设备随着电子技术,特别是计算机及计算技术的发展获得了迅速发展。设备(仪器)中的电子管与晶体管已被淘汰,大规模集成电路的使用不仅使应变仪及配套设备体积大为减小,而且仪器精度、灵敏度及稳定性等也得到了大幅度的提高。

1816 年,戴维·布伦斯特(David Brewster)发现透明的光学各向同性非晶材料,受到载荷作用后,它将变成光学各向异性,而且直到载荷被移去,材料的光学各向异性才消失。戴维·布伦斯特把非晶材料展现出的这种现象称为暂时双折射现象。实验力学中的光弹性方法就是建立在透明非晶材料这一物理性质基础上的。到了 19 世纪中叶,马克斯韦尔(Maxwell T. C.)、钮曼(Neumann F. E)找到了暂时双折射非晶物体中一点的应力状态(即它的三个主应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)与沿主应力方向入射到该点的光的折射率(n_1, n_2, n_3)之间的定量关系为

$$\left. \begin{aligned} n_1 - n_0 &= A\sigma_1 + B(\sigma_2 + \sigma_3) \\ n_2 - n_0 &= A\sigma_2 + B(\sigma_3 + \sigma_1) \\ n_3 - n_0 &= A\sigma_3 + B(\sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned} \right\} \quad (1.3.1)$$

这就是著名的钮曼 - 马克斯韦尔应力光学定律,它是光弹性实验的基本方程。其中 n_0 是材料受载荷作用前光的折射率; A, B 是两个常数,称为材料的应力 - 光学常数。由此打开了实验应力分析光测技术研究的大门,在以后的几十年里,平面光测问题有了长足的发展。1936 年,欧佩尔(Oppel)始创了三向光弹的应力冻结方法,以后经过 20 多年,由于环氧型光弹材料、聚碳脂光弹材料的开发与使用,冻结与切片技术、制模方法的发展,用光弹性方法测定结构构件中的三向应力已经十分成熟,并成为解决诸如坝体、原子反应堆、转轮叶片、桥墩、大型水泵顶盖等各种工程应力分析问题强有力的实验手段。与此同时,在这一段时间内除了传统的光测方法之外,1930 年,在法国还开发了贴片光弹,后来得到了广泛应用;1939 年韦勒(Weller)提出了解决三向应力分析问题的散射光法,继而有众多学者进行了深入的研究,并用于工程实际问题;1928 年,图齐(Tuzi)开始动光弹的研究,1946 年,西尼尔(Senior)与韦尔(Well)用高强度瞬时闪光照像技术测得了动光弹条纹图;1952 年,出现了连续电火花照像设备,以及后来的超高速摄影设备,在很大程度上推动了动应力问题的光测分析。1945 年前后,光学中的莫尔效应(Moire' effect)开始用于位移与应变测量,这就是应变分析中的莫尔法(Moire' method)或称云纹法。莫尔条纹的一种几何解释

最初是由托利纳尔(Tollencar)给出的。1948年韦勒与谢泼德(Shepard)对位移测量中的莫尔条纹给出了另一个分析方法,1954年丹图(Dantu)把它用于平面弹性问题位移莫尔条纹的解释。1960年,莫尔斯(Morse)、杜赖里(Durelli)和夏马赖拉(Sciamarella)等人对应变分析中的莫尔条纹做了一个完整的分析,推导了莫尔法的基本方程并提供了计算应变及转动的相应曲线。1961年,夏马赖拉和杜赖里把韦勒等人的分析方法推广到大应变范围。1964年,西奥卡里斯(Theocaris)用莫尔法测量了平板的离面位移(out-of-plane displacement),莱坦伯格(Ligtenborg)测量了平板的斜率与弯矩。与此同时,莫尔法的栅格(grating)制作技术(线条数,制作精度,制作工艺与方法等)也在不断地完善与提高,并成为结构构件位移、应变测试的重要手段。20世纪60年代初,由于激光器的问世,解决了全息摄影要求时空相干性好的光源问题,从而全息摄影获得了迅速的发展,全息干涉与全息光弹也成为应力与振动等测试的重要手段。在这一时期,全息光弹条纹分离及三向问题的全息光弹测试方法成为研究上的热点。在同一时期,激光散斑效应用于力学量,如物体表面的面内位移、离面位移,倾斜及振动等的测量理论与实验也得到了迅速的发展,成为力学测试技术上的一个新亮点。1979年,伍小平与何世平在对阿奇博尔德(Archbold)与恩诺司(Ennos)有关空间散斑场运动规律及格雷戈里(Gregory)的小镜理论做充分研究的基础上,以光传播的弗雷斯内尔-克希霍夫(Fresnel-Kirchhoff)衍射公式为基础,由干涉的观点出发,做一些简化后,经推导建立了物表面作各种运动和转动时,空间散斑场运动公式,并用实验验证了这些公式的正确性。它是散斑效应在理论与实验研究上的一次突破,为散斑规律的正确应用奠定了基础。

20世纪下半叶以来,计算机与计算技术、激光技术、微电子技术、控制技术、精密加工技术等现代技术的发展,各种新材料的不断涌现,使力学量测试的自动化程度也在逐年提高,据报道美国1974年就有了自动光弹仪商品出售(S.Redner New automato polariscope system, Exp mech. 14(12), 1974)。目前,力学中的数值方法,特别是有限元方法,可用来分析求解大部分的力学问题。数值计算与力学实验相辅相成,它们是解决实际工程问题两个不可缺少的侧面。力学实验是获得材料力学性质及本构关系的基础。近些年来,力学量测试中的微压痕法发展得很快,它已成为测取涂层、晶片、微电子器件等力学性质的重要手段。

实验力学的范围十分广泛,这里仅就它们一个很窄的侧面(即通称的实验应力分析的内容)作了简短的回顾。探讨新的测试原理与方法,寻找适应于各种特殊环境与尺度下力学量测试的新途径,开发新的测试仪器与设备,充分利用计算机高速运算能力及(光纤之类)新式传感器实现遥感遥测,使力学量的测试快捷方便与智能化,将是实验力学今后的发展方向。

习 题 1

1. 什么是实验力学,它有何特点,它与其他力学又有什么区别和联系?
2. 实验应力分析的任务是什么? 举例说明它可以解决的力学问题。
3. 举例说明测量物体变形和应力的基本方法。
4. 试设计一种验证弹簧伸长与所受力成正比的直接测量方法。
5. 试设计一种间接测量物体质量的方法。
6. 列举一二个可用比拟法测量的物理量及可能的测量方法。

第 2 章 模型实验原理

用实验方法研究力学现象时,例如进行结构的应力分析,当实验不便在实物上进行的时候,常常采用模型,于是便产生这样的问题:模型实验能反映实物原型的真实状态吗?如果能够,那么对模型实验是否还有什么要求?模型实验结果又怎样移植到原型上去?量纲分析与相似原理给这个问题以理论上的回答,本章我们就来讲述这一内容。

2.1 量及其测量

量是研究自然现象与工程问题遇到的最基本的概念之一,正如几何学中的点的概念一样,我们不能给它下一个确切的定义,但是我们可以指出它的特性。那么量的最主要的特性是什么呢?应该说是它的可测量性,也就是说可以用某种方法与取作标准的同类某特定量来作比较,比较的方法随着所论量的性质而定(可以是直接的,也可以是间接的),而这种比较的步骤则叫做测量。测量的结果得出抽象的数,它表示所论量与取作标准的同类某特定量之比。例如长度是一个量,测量长度,则可以用一个取作标准的长度,如“米”来同它进行比较,得出的数则说明这个长度是多少“米”,这是直接的测量。又如速度也是个量,可以用与取作标准的速度直接进行比较,但通常是用间接的方法来进行测量的。实验指出,物体的运动速度 v 与长度 s 成正比,与通过此长度花费的时间 t 成反比,即 $v = ks/t$ (k 是个比例系数),如果把 k 取作 1,则速度的测量就可以由长度的测量与时间的测量之比来决定了。

在测量中取作标准的量称为测量单位,不同性质的量有不同的测量单位,但是由于现象的内在联系,不同量间表现出函数关系,所以描述某类问题的所有测量单位,并非都是独立的。例如上例中的长度单位、时间单位、速度单位就不都是独立的。独立的测量单位称为基本单位,而由基本单位确定的单位称为导出单位。而描述某类问题所需基本单位的全体称为测量单位系。在描述力学问题所需要的基本单位有三个,常用的测量单位系有:CGS系(长度(厘米,cm),质量(克,g),时间(秒,s));MKS系(长度(米,m),质量(千克,kg),时间(秒,s));MTS系(长度(米,m),质量(吨,t),时间(秒,s));工程系(长度(米,m),力(牛,N),时间(秒,s))。通过基本测量单位大小的改变可以相互转换的测量单位系的组合称为测量单位系族或简称系族。例如 CGS、MKS、MTS 就属于同一系族,因为三个系中的基本测量单位都是长度、质量和时间,只是测量单位的大小不同;1 m = 100 cm, 1 t = 1 000 kg = 1 000 000 g。而工程系则属于另一系族,因为它与 CGS、MKS、MTS 系族包含的基本测量单位不同,因此不能通过基本测量单位大小的改变相互转换。所以测量单位系族是由测量单位取作基本的那些量来确定的。由此可以用这些量符号的组合来表示:长度(L),质量(M),时间(T),力(F),于是 CGS、MKS、MTS 属于 LMT 系族;工程系属于 LFT 系族。应该指

出:在不同的测量单位系族中,测量单位导出的那些量的定义是各不相同的。

在研究某一个具体问题时所涉及到的量称为特征量,已知的特征量称为已定特征量,待求的特征量,称为待定特征量,研究一个具体问题,就是要寻求待定特征量同已定特征量间的数值关系。

2.2 量纲与量纲公式

上节我们看到,导出单位是由基本单位来确定的,因此,当基本单位发生变化时,导出单位亦发生变化。显然,我们最好找出一个关系,它能明显地反应出导出单位是如何随基本单位变化的。这样的关系称为相应于导出单位量的量纲。量 A 的量纲通常用符号 $[A]$ 来表示。当 A 是相应于基本测量单位的量时, A 的量纲可以不加方括号。量纲为纯数 1 的量称为无量纲量,否则称为有量纲量。无量纲量即是一个数,它不随基本单位大小的改变而改变。例如路程除速度与时间的乘积,直径除周长等都是无量纲量。

现在我们来考查任何一个量,它的量纲所应有的形式。假定有一个量,它在某一单位系中的数值为 A ,而当转入另一同族的单位系时,它的数值变为 A' 。 A'/A 是这样的一个数,它说明转换后的测量单位是原来单位的多少倍,这个比值,一般来说可以和出发测量单位的选择有关,也和两个系中基本测量单位的比数 $\alpha_1', \alpha_2', \dots, \alpha_n'$ 有关。但是,当二系是同族的时候,我们自然要求二单位系是彼此等价的,亦即要求 A'/A 只和数 $\alpha_1', \alpha_2', \dots, \alpha_n'$ 有关,而和原始测量单位系的选择无关,亦即

$$\frac{A'}{A} = f(\alpha_1', \alpha_2', \dots, \alpha_n') \quad (2.2.1)$$

式中 f 是个待定的函数。基于上面关于测量单位系等价性的假定,我们可以证明 f 具有非常简单而又十分特殊的形式。为此我们考虑第三个等价系,它的基本测量单位是第一测量单位系的 $\alpha_1'', \alpha_2'', \dots, \alpha_n''$ 倍。于是有

$$\frac{A''}{A} = f(\alpha_1'', \alpha_2'', \dots, \alpha_n'') \quad (2.2.2)$$

式中 A'' 是所考查的量在第三测量单位系中的数值。

由于测量单位系的等价性又有

$$\frac{A''}{A'} = f\left(\frac{\alpha_1''}{\alpha_1'}, \frac{\alpha_2''}{\alpha_2'}, \dots, \frac{\alpha_n''}{\alpha_n'}\right) \quad (2.2.3)$$

式(2.2.2)除式(2.2.1)得

$$\frac{A''}{A'} = \frac{f(\alpha_1'', \alpha_2'', \dots, \alpha_n'')}{f(\alpha_1', \alpha_2', \dots, \alpha_n')} \quad (2.2.4)$$

比较式(2.2.3)与式(2.2.4)得

$$f\left(\frac{\alpha_1''}{\alpha_1'}, \frac{\alpha_2''}{\alpha_2'}, \dots, \frac{\alpha_n''}{\alpha_n'}\right) = \frac{f(\alpha_1'', \alpha_2'', \dots, \alpha_n'')}{f(\alpha_1', \alpha_2', \dots, \alpha_n')} \quad (2.2.5)$$

这就是函数 f 应满足的函数方程。

式(2.2.5)对 α_j'' 取微分得

$$\frac{1}{\alpha_j'} \cdot \frac{\partial}{\partial(\frac{\alpha_j''}{\alpha_j'})} f(\frac{\alpha_1''}{\alpha_1'}, \frac{\alpha_2''}{\alpha_2'}, \dots, \frac{\alpha_n''}{\alpha_n'}) = \frac{\frac{\partial}{\partial \alpha_j''} f(\alpha_1'', \alpha_2'', \dots, \alpha_n'')}{f(\alpha_1', \alpha_2', \dots, \alpha_n')} \quad (2.2.6)$$

这是一个恒等式,因此当 $\alpha_1'' = \alpha_1' = \alpha_1, \alpha_2'' = \alpha_2' = \alpha_2, \dots, \alpha_n'' = \alpha_n' = \alpha_n$ 时也是正确的。此时式(2.2.6)变为

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_j'} f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \frac{k_j}{\alpha_j'} f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \quad (2.2.7)$$

式中

$$k_j = \left. \frac{\partial}{\partial(\frac{\alpha_j''}{\alpha_j'})} f(\frac{\alpha_1''}{\alpha_1'}, \frac{\alpha_2''}{\alpha_2'}, \dots, \frac{\alpha_n''}{\alpha_n'}) \right|_{\alpha_1'' = \alpha_1', \alpha_2'' = \alpha_2', \dots, \alpha_n'' = \alpha_n'}$$

积分式(2.2.7)得

$$f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = f_j(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{j-1}, \alpha_{j+1}, \dots, \alpha_n) \alpha_j^{k_j} \quad (2.2.8)$$

在式(2.2.8)中把 j 换成 i , 并代回式(2.2.7)得

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_j'} f_i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{i-1}, \alpha_{i+1}, \dots, \alpha_n) = \frac{k_j}{\alpha_j'} f_i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{i-1}, \alpha_{i+1}, \dots, \alpha_n) \quad (2.2.9)$$

积分式(2.2.9)得

$$f_i = f_{ij}(\alpha_1, \dots, \alpha_{i-1}, \alpha_{i+1}, \dots, \alpha_{j-1}, \alpha_{j+1}, \dots, \alpha_n) \alpha_j^{k_j} \quad (2.2.10)$$

如此继续下去,则得

$$f = f_i \alpha_i^{k_i} = f_{ij} \alpha_i^{k_i} \alpha_j^{k_j} = f_{ijm} \alpha_i^{k_i} \alpha_j^{k_j} \alpha_m^{k_m} = \dots = f_{1,2,\dots,n} \alpha_1^{k_1} \alpha_2^{k_2} \dots \alpha_n^{k_n} \quad (2.2.11)$$

式中, $f_{i,j,m}$ 等是与 $\alpha_i, \alpha_j, \alpha_m$ 无关的函数,因此 $f_{1,2,\dots,n}$ 是一常数。把式(2.2.11)代入式(2.2.5)得

$$f_{1,2,\dots,n} = 1 \quad (2.2.12)$$

于是,最后我们得到

$$f = \alpha_1^{k_1} \alpha_2^{k_2} \dots \alpha_n^{k_n} \quad (2.2.13)$$

式(2.2.13)用量纲符号写出,即是

$$[A] = [A_1]^{k_1} [A_2]^{k_2} \dots [A_n]^{k_n} = A_1^{k_1} A_2^{k_2} \dots A_n^{k_n} \quad (2.2.14)$$

如果量 A 的测量单位是基本的,则有

$$[A] = A \quad (2.2.15)$$

如果量 A 是无量纲的,则有

$$[A] = 1 \quad (2.2.16)$$

在构成一复杂量的量纲时,可按如下两条规则:

(1) 如一量 C 的数值等于量 A 与 B 的数值乘积,则 C 的量纲等于 A 与 B 量纲的乘积

$$[C] = [A \cdot B] = [A][B]$$

(2) 如一量 C 的数值等于量 A 与 B 的数值之比,则 C 的量纲等于 A 与 B 量纲之比

$$[C] = \left[\frac{A}{B} \right] = \frac{[A]}{[B]}$$