



普通高等教育“十二五”规划教材

材料力学实验

梁丽杰 杨兆海 主 编
冯义显 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

材料力学实验

主 编	梁丽杰	杨兆海
副主编	冯义显	
编 写	张锦光	
主 审	常伏德	



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。书中对本科院校必做的基本实验的原理、方法、步骤作了详细的阐述,知识点容易掌握,可操作性强。除基本实验外,还介绍了一些选择性实验、电测法的基本原理、数据的处理方法、各种实验设备的原理和使用、光弹性法等,对扩大学生的知识面、开阔思维、提高动手能力很有益处。书的最后编写了基本实验和电测实验自测题,题型包括选择题、思考题和计算题。这些习题能够帮助学生加深对材料力学理论知识和实验知识的理解和掌握,方便学生自我检验,同时可以为学生参加力学实验竞赛提供参考。

本书可作为本科院校相关专业的材料力学实验指导书,也可供高职高专院校相关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学实验/梁丽杰,杨兆海主编. —北京:中国电力出版社,2012.5 (2013.6重印)

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-2943-0

I. ①材… II. ①梁… ②杨… III. ①材料力学—实验—高等学校—教材 IV. ①TB301-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第075701号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012年5月第一版 2013年6月北京第二次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 8.75印张 204千字

定价 16.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

实验是进行科学研究的重要方法,科学史上许多重大发明是依靠科学实验而得到的,许多新理论的建立也要靠实验来验证。例如,材料力学中应力—应变的线性关系就是胡克于1668~1678年间作了一系列的弹簧实验之后建立起来的。不仅如此,实验对材料力学有着更重要的一面,因为材料力学的理论是建立在将真实材料理想化、实际构件典型化、公式推导假设化基础之上的,它的结论是否正确以及能否在工程中应用,都只有通过实验验证才能断定。在解决工程设计中的强度、刚度等问题时,首先要知道材料的力学性能和表达力学性能的材料常数,这些常数只有靠材料实验才能测定。有时实际工程中构件的几何形状和荷载都十分复杂,构件中的应力单纯靠计算难以得到正确的数据,这种情况下必须借助于实验应力分析的手段才能解决。所以,材料力学实验是学习材料力学课程不可缺少的重要环节。

材料力学实验包括以下三个方面的内容。

一、测定材料的力学性质

构件设计时,需要了解所用材料的力学性质,如经常用到的材料的屈服极限、强度极限和延伸率等。这些力学性质数据是通过拉伸、压缩、扭转和冲击等实验测定的。学生通过这类实验的基本训练,可掌握材料力学性质的基本测定方法,进一步巩固有关材料力学性质的知识。

二、验证材料力学理论

把实际问题抽象为理想的计算模型,再根据科学的假设,推导出一般性公式,这是研究材料力学通常采用的方法。然而,这些简化和假设是否正确,理论计算公式能否在设计中应用,必须通过实验来验证。学生通过这类实验,可巩固和加深理解基本概念,学会验证理论的实验方法。

三、实验应力分析

工程实际中,常常会遇到一些构件的形状和荷载十分复杂的情况(如高层建筑物、机车车辆结构等)。关于它们的强度问题,单靠理论计算不易得到满意的结果。因此,近几十年来发展了实验应力分析的方法,即用实验方法解决应力分析的问题。其内容主要包括电测法、光测法等,目前已成为解决工程实际问题的有力工具。本书着重介绍目前应用较广的电测技术。

本书由梁丽杰、杨兆海主编,冯义显担任副主编,张锦光参加编写。其中,第1、5、6章由梁丽杰编写,第2、4章和基础实验自测题由杨兆海编写,第3章由冯义显编写,第7章和电测实验自测题由张锦光编写。担任本书主审的长春工程学院常伏德教授提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2012年3月



学生实验须知

(1) 实验前必须预习实验教材中的相关内容,了解本次实验的目的、原理,实验设备和仪器的使用方法、操作规程、数据处理方法等,并按照要求写出预习报告。

(2) 按预约实验时间准时进入实验室,不得无故迟到、早退、缺席。

(3) 进入实验室后,不得高声喧哗、打闹和擅自乱动仪器设备,损坏仪器要赔偿。

(4) 保持实验室整洁,不准在机器、仪器及桌面上涂写,不准乱扔纸屑,不准随地吐痰,实验室内严禁吸烟。

(5) 实验时应严格遵守操作步骤和注意事项。实验中,若遇仪器设备发生故障,应立即向指导教师报告,及时检查,排除故障后方可继续实验。

(6) 实验过程中,若未按操作规程操作仪器,导致仪器损坏者,将按学校有关规定进行处理。

(7) 实验过程中,同组同学要分工明确,密切配合,协调一致,认真操作,仔细观察实验现象,如实测取和记录实验数据,主动锻炼独立动手能力。

(8) 实验结束后,将实验设备复原,仪器、工具清理摆正,不得将实验室的工具、仪器、材料等物品携带出实验室,将实验现场整理打扫干净,培养良好的实验习惯和文明的工作作风。

(9) 实验完毕,及时将实验数据交实验指导教师审阅,经实验指导教师审定后,方可离开实验室。

(10) 课外应及时独立地完成实验报告,并按照实验指导教师要求的时间送交实验报告。实验数据记录及其处理力求真实、准确和规范。对示意图形、关系曲线、记录表格和计算公式,力求正确、整洁和清晰。文字说明通顺,书写工整。不得臆造数据,不得抄袭他人的实验报告。对于不符合要求的实验报告,实验指导教师有权退回令其重做。



目 录

前言

学生实验须知

第 1 章 概述	1
1.1 材料力学中实验的重要性	1
1.2 材料力学实验的内容	1
1.3 实验测量的基本概念	2
1.4 实验的特点和要求	3
第 2 章 电测法的基本原理	5
2.1 敏感元件——电阻应变片的工作原理	5
2.2 测量电路——电桥的工作原理	8
第 3 章 基本实验	14
3.1 低碳钢拉伸破坏实验	14
3.2 铸铁拉伸破坏实验	18
3.3 低碳钢压缩破坏实验	19
3.4 铸铁压缩破坏实验	20
3.5 低碳钢、铸铁扭转破坏实验	22
3.6 材料弹性模量 E 与泊松比 μ 的测定	24
3.7 纯弯曲梁的正应力实验	29
3.8 弯扭组合变形下主应力测试实验	32
第 4 章 选择性实验	38
4.1 剪切实验	38
4.2 扭转求材料切变模量 G 的实验	39
4.3 压杆稳定实验	42
4.4 弯曲变形实验	44
4.5 悬臂梁实验	47
4.6 冲击实验	48
4.7 金属材料的疲劳实验	51
4.8 偏心拉伸实验	53
4.9 电阻应变片灵敏系数标定实验	55
4.10 等强度梁弯曲正应力实验	58
4.11 弯扭管贴片实验	60
第 5 章 实验数据的统计分析	63
5.1 有效数字	63
5.2 实验误差	65

5.3 材料力学实验中常用的数据处理方法	71
习题	74
第 6 章 常用实验设备	76
6.1 WAW 微机控制电液伺服万能试验机 (I)	76
6.2 WAW 微机控制电液伺服万能试验机 (II)	79
6.3 普通液压万能材料试验机	81
6.4 电子式万能材料试验机	83
6.5 NDW 系列微机控制电子扭转试验机	85
6.6 NJ-500 微机控制扭转试验机	88
6.7 CTT500 扭转试验机	89
6.8 材料力学多功能实验装置	91
6.9 千分表、百分表及双表引伸计	95
6.10 刻线机	96
6.11 XL2118B 型力/应变综合参数测试仪	97
6.12 XL2101B2+ 静态应变仪	101
第 7 章 光测弹性实验简介	103
7.1 光学基本知识	103
7.2 应力—光学定律	105
7.3 等倾线和等差线	106
7.4 模型材料条纹值的测定	107
基础实验自测题	109
电测实验自测题	119
参考文献	129



第1章 概述

1.1 材料力学中实验的重要性

材料力学是研究材料或者构件承载能力的科学。实验是材料力学的重要组成部分。作为材料力学的奠基人之一，伽利略最早进行材料力学实验，他提出了一个重要思想——几何相似的结构物，尺寸越大越软弱。为验证这一思想，他用简单的拉伸方法探索了材料的强度，进而借助悬臂梁的弯曲实验，研究了梁的承载能力。材料力学的基石之一是胡克定律，它是胡克先生通过弹簧的拉压实验建立起来的理论。如果没有实验，材料力学所涉及的三大问题——强度问题、刚度问题和稳定性问题便无从谈起。实验不仅是材料力学的基础，也是检验材料力学理论正确性的标准。材料力学理论是建立在真实材料理想化、实际构件典型化、公式推导假设化基础之上的，它是否正确、是否能在工程实际中应用，只有通过实验验证才能断定。此外，工程实际中的构件几何形状和承受的荷载都十分复杂，构件中的应力单纯靠计算难以得到正确的数据，因此，必须借助实验应力分析手段才能解决。

近代工业技术要求工程技术人员合理地设计各种构件和零件，开发优质材料，使之达到强度高、刚度好和重量轻等目的。这促进了材料力学的发展，相应的材料力学实验也不断地采用新技术以适应新的要求。因此，本书还适当地介绍了一些新设备、新技术和新方法。

1.2 材料力学实验的内容

材料力学实验一般包括以下四个方面的内容。

一、测定材料的力学性能

材料力学只能计算出在外荷载作用下构件内应力的大小。为了建立强度条件，必须了解材料的强度、韧度和硬度等力学性能。这些性能只能通过基本力学性能指标的测定及分析得到。另外，通过拉伸、压缩、弯曲、冲击、疲劳等实验，可以测定材料的弹性模量、强度极限、冲击韧性、疲劳极限等力学参数。这些参数是设计构件的基本依据。通过力学参数的测定、变形过程和破坏现象的观察以及断口的分析，便可了解材料的力学性能，掌握力学性能测试的基本方法。

二、验证理论公式

材料力学中的许多公式都是在简化和假设的基础上（平面假设、连续均匀假设、弹性和各向同性假设）推导出来的。例如，弹性杆件的弯曲理论就是以平面假设为基础推导出来的。用实验验证这些理论的正确性和适用范围，有助于加深对理论的认识和理解。通过这类实验的学习，学生们应对所学的书本知识有一个真实的、完整的认识，尤其可以通过理论解与实测结果的比较，对理论的适用范围及精确度建立一个正确的概念。这方面的内容有梁弯曲正应力的测试、弯扭组合变形实验和压杆稳定性实验等。

三、应力分析实验

工程中，很多实际构件的受力情况无法用材料力学公式进行计算。近年来，虽然可以用

有限元等数值计算方法计算,但还是需要简化模型。同时,有限元计算结果的精确性,也需要通过实验应力分析加以验证。此外,零件设计中应力集中系数的确定、机器和建筑结构中的应力实测等,均需靠实验应力分析的方法来实现。电测法和光测法都属于实验应力分析方法。本书对电测应力分析方法作了比较详细的阐述,并简单介绍了光测应力分析方法。

四、综合性和探索性实验

与验证性实验或基础性实验不同,综合性实验着重于综合。不仅是实验技术和实验方法的综合,而且是材料力学理论与材料力学实验的有机结合,是材料力学理论在材料力学实验中的综合应用。探索性实验则更进一步,不仅要在探索中完成实验,而且要通过实验再现科学探索的一般过程,即实现“假设(假说)→理论模型→实验验证→修正假设(假说)→完善理论模型→……”的循环。

1.3 实验测量的基本概念

测量就是用一定的工具或仪器设备来确定一个未知的物理量、机械量、生物医药等参量数值的过程。测量方法可分为直接测量和间接测量。直接测量是借助于测量工具或测量仪器把被测量与同性质的标准量进行比较。例如,测量物体的质量,可以通过天平秤将砝码与被测物进行比较;有时无法将被测量与标准量直接比较,要作一些变换后才能进行,如用压力表测量容器中的压力时,必须将压力转换成压力表上指针的刻度,同时压力的标准量也被转换到压力表的刻度盘上,这样被测量与标准量都被转换成同性质的位移量(中间量),就可以进行比较了。以上两种测量方法都是直接测量。在材料力学实验中,用非电子显示力和位移的液压式和机械式万能材料试验机试验所测得的数据,就属于直接测量。但是,有许多被测量无法用简单的直接测量方法得到,这就需要用间接测量方法。间接测量是对与被测量有确定函数关系的其他物理量(即原始参数)进行直接测量,然后根据函数关系计算出被测量。例如,测量运动物体的加速度时,先将被测的加速度通过相应的传感器转变成电量(参数),并将该电量(参数)放大或转换,再送入显示器或记录仪,或送入计算机进行处理,进而得到被测的加速度,这就是间接测量。为了使测量结果得到确认,用来进行比较的标准量必须准确并得到公认,此外,所用的方法和仪器必须经过校验。在材料力学实验中,用微机控制万能材料试验机试验所测得的数据,就属于间接测量。

采用间接测量方法时,要根据测量原理设计一套测量系统。一个完整的测量系统主要包括以下三部分:

- (1) 传感级。传感级是系统的信息敏感部件,用来感受被测量,并将其转换成与被测量呈一定函数关系(通常是线性关系)的另一种物理量(通常为电量)。
- (2) 中间级。中间级是用来将传感器输出的信号转换成便于传输、显示、记录并进行放大的装置。
- (3) 终端级。终端级是一个显示器、记录仪或某种形式的控制器,用来显示或记录被测量的大小或输出与被测量相应的控制信号,以供应用。

以上测量系统中,信息传输大都为模拟量,其缺点是容易受到干扰,影响测量精度。目前的发展方向是将传感器信号转换成数字信息,其优点是抗干扰能力强、测量精度高、测量速度快。

1.4 实验的特点和要求

实验课不同于课堂的理论教学。第一,学生如果当场没有理解理论教学的内容,课后还可以通过自己复习教材、同学间的相互讨论、教师的答疑再去完成作业。而实验课上,学生面对陌生的仪器设备,必须在有限的时间内亲手操作,给试样加载,同时观测其变形,获取实验数据,甚至拿出实验结果。这一切离开实验条件就无法进行,因此实验课前的充分预习就显得十分重要。第二,课堂理论教学一般不存在安全问题,而实验教学就存在设备安全甚至人身安全问题,特别是材料力学实验,有时对试件所加的荷载较大,如破坏性试验、动载试验、冲击试验就存在一定的危险性。这就要求学生必须严格遵守实验规则和仪器设备的操作规程。第三,理论知识的学习一般都是个体作业,而实验时力和变形要同时测试,一般要有几个人相互配合才能很好地完成实验全过程。这就要求学生要有明确的岗位职责,在实验的每个环节都严谨、认真,并发扬分工协作的团队精神,否则就不可能得到正确的实验结果,有效地完成实验任务。

材料的强度指标,如屈服极限、强度极限、弹性模量等,虽是材料的固有属性,但往往与试样的形状、尺寸、表面加工精度、加载速度、周围环境等有关。为使实验结果能相互比较,国家标准对试样的取材、形状、尺寸、加工精度、试验的手段和方法、数据的处理等都作了统一的规定(我国国家标准的代码为GB)。

对破坏性试验,如材料强度指标的测定,考虑到材料质地的不均匀性,应采用多根试样,然后综合评定结果,得出材料的性能指标。对非破坏性试验,构件变形量的测定,因为要借助于变形放大仪表,为减小测量系统引入的误差,一般也要多次重复,然后综合评定结果。

根据上述的实验课特点,学生应达到以下几个方面的要求:

(1) 实验课前每位学生都必须明确本次实验的目的、原理和步骤,了解所使用的试验机 and 测量仪器的基本构造原理和操作规程,了解所测试样的材料、形状和公差要求,进行充分的预习和实验准备,并应写出预习报告。

(2) 在正式开始实验之前,要检查试验机测力度盘指针是否对准零点,变形仪安装是否稳妥,试件装夹是否正确,电测仪表接线是否正确等,并拟定好相应的加载方案。对试样所能承受的最大荷载,选择适当的量程,注意其最大荷载不得超过试验机所选量程的80%,以保证试验机有足够的灵敏度和示值精度。静载试验的加载速率应缓慢、均匀,特别是材料的仲裁试验,应严格按照相关国家标准或国际标准的规定进行。准备工作完成后,还应请指导教师检查无误后方可启动试验机。第一次加载可以不作记录(不允许重复加载的试验除外),观察试验机和变形仪是否运行正常。如果正常,再正式加载并开始记录实验数据。

(3) 实验过程中应精心操作,细心观察,测量和记录各种实验现象及数据。若出现异常现象,应及时报告指导教师并作原始记录。实验中还应提倡主动思索,发挥独立思考能力,结合所学理论知识对实验中的数据和现象进行分析,使理论与实际联系起来,把实验中获得的感性认识上升为理性知识。对实验中发现的可疑现象和数据,可以重复测试、重复观察并分析其产生的原因再决定取舍,但无论取或舍都必须保持原始记录。

(4) 实验结束要及时撰写实验报告。实验报告的内容应包含:实验名称,实验日期,实

验环境的温度、湿度，实验目的，原理简述，实验布置简图，使用的仪器设备的名称，实验数据的记录，数据处理的表达和实验数据的误差分析讨论，及同组实验人员的分工名单。实验数据记录及其处理力求真实、准确和规范。对示意图形、关系曲线、记录表格和计算公式，力求正确、整洁和清晰。文字说明通顺，书写工整。不得臆造数据，不得抄袭他人的实验报告。

整理实验结果时，应剔除明显不合理的数据。实验数据要用数学归纳法进行整理，并注意有效数字的修正。对材料常数的确定，常用增量平均值法处理，多次实验的平均值最接近真实值。数据运算的有效位数要依据机器、仪表的测量精度来确定，但一般在实验中只保留三位有效数字。实验结果的表示方法一般有表格表示法和曲线表示法。用表格表示两个或两个以上物理量之间的关系时，要使读者能一目了然地看出规律性的结果；而有时用曲线表示实验结果更具有直观性、规律性。对于物理量之间的关系，在它们互相变化的过程中，除非是转折质变的过程，否则一般都是连续的，也就是作成的曲线应连续、光滑，但实验数据点不可能都落在曲线上，这时就必须运用数据处理的方法进行曲线拟合，以真实地显示物理量之间变化的规律性。

(5) 对试样变形的测量，一般由于弹性变形很小，需用变形仪器进行放大测量，因此应了解其构造原理、使用方法和放大倍数。在选用时，要注意使实验中最小变形值应远大于变形仪上的最小刻度值，而最大变形值则不得超过变形仪满量程的 80%。

以上几点是实验成功所必备的基本条件和要求，在实验全过程中都必须严格遵守。

第2章 电测法的基本原理

电测法是利用敏感元件,将构件的物理量、机械量、力学量等非电量转换成电参量的一种实验方法。电测应力应变分析方法使用的敏感元件是电阻应变片(或称电阻应变计),其原理如图2-1所示。将电阻应变片粘贴在被测构件的表面,当构件在外力作用下产生变形时,电阻应变片的电阻值将发生相应的变化,通过电阻应变仪将电阻的变化转化成电压变化,再换算成应变值直接显示或输出给函数记录仪记录下来,也可由计算机进行采集和处理,就可以得到被测量的应变或应力。

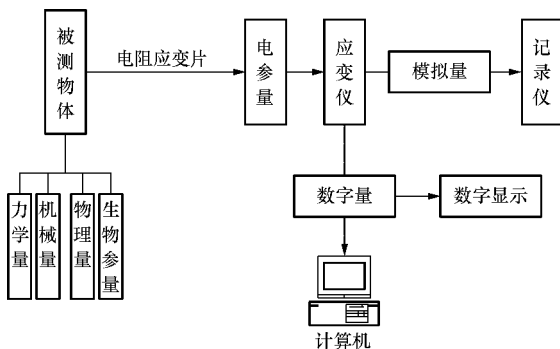


图 2-1 电测法原理图

电测法具有以下优点:

(1) 测量灵敏度和精度高,应变最小分辨率可达 10^{-6} 。

(2) 测量应变的范围广,可测 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 的应变。

(3) 应变片的最小标距(栅长)只有 0.2mm,可以满足大应力梯度的测量要求。

(4) 能进行静、动态测量,频响范围为 $0 \sim \pm 50\text{kHz}$ 。

(5) 轻便灵活,适用于现场与野外等恶劣环境下测试。

(6) 能在高、低温及高压液体等特殊条件下测量。

(7) 测量输出为电信号,便于进行自动化、数字化测量。

由于电阻应变片具有上述优点,因而被广泛应用于以下各领域:

(1) 工业生产线的现场实测与监控。

(2) 新产品投产前的模型设计实验。

(3) 土木工程、航空航天、国防工业、交通运输等领域的大型结构的应力—应变测试。

(4) 运动生物力学测试,如行走步态、足底压力分布、重心轨迹、假肢参数等。

(5) 制造各种传感器,如力、位移、压力、加速度等。

电测法的不足之处是:一枚应变片只能测量构件表面一点(贴片处)沿应变片轴线方向的应变,测出的应变只能代表栅长范围内的平均应变,而且应变片不能重复使用。

2.1 敏感元件——电阻应变片的工作原理

敏感元件有不同种类,按性质可分为光敏、气敏、声敏、压敏等;按工作原理可分为电阻式、电容式、电感式、压电式、电磁式等,其中电阻式结构最简单,应用最广泛。本章主要介绍电阻式敏感元件——电阻应变片。

一、金属丝的应变效应

由物理学可知，物体的几何尺寸与电阻值有如下关系

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2-1)$$

式中： l 和 A 分别代表金属丝的长度和截面面积； R 为电阻值； ρ 为金属丝的电阻率。

对式 (2-1) 取对数后微分可得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \quad (2-2)$$

根据金属的物理性质，有

$$\frac{d\rho}{\rho} = c \frac{dV}{V} \quad (2-3)$$

式中： c 在常温常压条件下为常数； $\frac{dV}{V}$ 为体积变化率。

根据金属的物理性质和材料力学理论可知 $\frac{dA}{A}$ 、 $\frac{d\rho}{\rho}$ 也与 $\frac{\Delta l}{l}$ 呈线性关系，由此可得

$$\frac{\Delta R}{R} = [(1 + 2\mu) + m(1 - 2\mu)] \frac{\Delta l}{l} = K \frac{\Delta l}{l} \quad (2-4)$$

式中： μ 为金属丝材的泊松比； m 为常数，与材料种类有关。

式 (2-4) 反映了金属丝的电阻应变效应，即电阻值随金属丝的变形而发生改变的物理特性。电阻应变片就是利用了金属的这种电阻应变特性，通过粘贴在构件上的电阻应变片的电阻变化率 $\frac{\Delta R}{R}$ 测量出构件的应变 $\frac{\Delta l}{l}$ ，其电阻的变化与构件应变值成正比，比例系数为 K 。应变通常用符号 ϵ 表示，该式可以写成

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon \quad (2-5)$$

二、应变片的温度效应

温度变化时，金属丝的电阻值也随着发生变化，记作 $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_T$ 。该电阻变化是由两部分引起的：一部分是由电阻丝温度系数引起的

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)'_T = a_T \Delta T \quad (2-6)$$

另一部分是由金属丝与构件的材料膨胀系数不同而引起的

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)''_T = K_s(\beta_2 - \beta_1) \Delta T \quad (2-7)$$

因而温度引起的电阻变化为

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_T = [a_T + K_s(\beta_2 - \beta_1)] \Delta T \quad (2-8)$$

式中： a_T 为金属箔材的电阻温度系数； β_1 为金属箔材的热膨胀系数； β_2 为构件材料的热膨胀系数； K_s 为应变片的灵敏系数。

式 (2-8) 说明，应变片的温度效应主要取决于敏感栅和构件材料的性能和温度变化范围。要想准确测量构件的应变，就要克服温度对电阻应变片的电阻变化的影响。一种办法是使电阻片的系数 $[a_T + K_s(\beta_2 - \beta_1)]$ 等于零，这种电阻片称为温度自补偿电阻片；另一种办

法是测量应变时采取增加温度补偿片等措施,利用测量电桥的加减特性来消除温度变化对应变测量的影响。这种方法将在后面仔细阐述。

三、应变片的结构形式及主要性能指标

电阻应变片的结构如图 2-2 (a) 所示,由敏感栅、覆盖层、基底和引线等组成。敏感栅有两种制作方式:一种是由直径为 $0.02\sim 0.05\text{mm}$ 的康铜或镍铬等金属丝绕成栅状,其电阻片称为丝式应变片;另一种是如图 2-2 (b) 所示的用 $0.003\sim 0.01\text{mm}$ 厚的康铜或镍铬箔片,利用光刻技术腐蚀成栅状,其电阻片称为箔式应变片。丝式应变片多采用纸基底和纸覆盖层,且这种敏感栅不易制成小尺寸栅长,所以这种应变片标距较大、适用范围不宽、价格较低。而箔式应变片栅箔薄而宽,因而粘贴牢固、散热性好,能较好反映构件表面的变形,测量精度高,同时易于制成栅长很小或各种形状的应变片,所以在各个测量领域得到广泛应用。

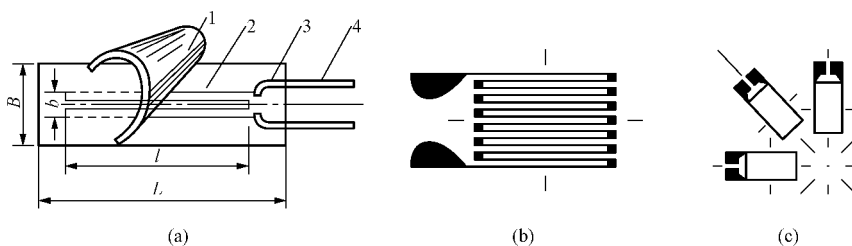


图 2-2 电阻应变片的结构

(a) 电阻应变片的结构; (b) 箔式应变片; (c) 45° 应变花

1—覆盖层; 2—敏感栅; 3—基底; 4—引线

按照敏感栅的结构形状,应变片又可分为单轴应变片和多轴应变片。单轴应变片即在一个基底上只有一个敏感栅,只能测量构件表面沿敏感栅长度方向的应变。而多轴应变片常称为应变花,是将由 2 个或 3 个以上轴线相交成一定角度的敏感栅制作在一个基底上,可测量构件表面贴片处沿几个敏感栅长度方向的应变。应变花有 90° 应变花 (两个敏感栅互成 90°)、 45° 应变花 [如图 2-2 (c) 所示,三个敏感栅互成 45°]、 120° 应变花 (三个敏感栅互成 120°) 和 60° 应变花 (三个敏感栅互成 60°) 等几种规格。

电阻应变片的主要参数如下:

(1) 尺寸。尺寸是指应变片敏感栅的标距长度 (栅长) 和宽度 (栅宽)。应变片栅长一般为 $0.2\sim 100\text{mm}$ 。教学实验常用的应变片尺寸为 $4\text{mm}\times 2\text{mm}$,即敏感栅长为 4mm 、宽为 2mm 。选用时,一定要根据被测构件情况和实验要求选择应变片尺寸。

(2) 标称电阻 R 。标称电阻 R 指应变片未经安装也不受力时常温下测量的电阻值,一般有 60 、 120 、 350Ω 等几种,其中 120Ω 电阻片在电测实验中最为常用。

(3) 灵敏系数 K 。应变片的电阻变化率与应变的关系如同式 (2-5) 所示,其中 K 即为应变片的灵敏系数。应变片的 K 值除了与敏感栅的材料、形式和尺寸有关外,还与应变片的制作工艺有关。该值由制造厂家用专门的设备抽样标定,并在成品上标明。电阻应变片的灵敏系数一般为 $1.5\sim 2.5$ 。

(4) 绝缘电阻。绝缘电阻是指电阻应变片引出线与构件之间的电阻值。短期使用绝缘电阻应达到 $50\sim 100\text{M}\Omega$,长期使用绝缘电阻应保证在 $500\text{M}\Omega$ 以上。

(5) 允许电流。静荷测量 25mA，动荷测量 75~100mA。如电流大，应变片温度将升高，会影响应变测量精度。

四、应变片的粘贴工艺

粘贴应变片是电测法的重要环节，粘贴工艺的好坏直接影响测量的精度，因此，必须严格按照粘贴工艺进行操作。首先，必须保证被测构件表面清洁、平整，无油污和锈迹；其次，要保证粘贴的位置准确；第三，要使用专用黏结剂，一般短时测量常使用瞬间固化胶（俗称 502 胶），长期测量则用环氧类的高温固化胶。

操作步骤如下：

- (1) 打磨。测量部位的表面经打磨后应平整、光滑。
- (2) 画线。测点处用钢针精确画出十字交叉线，以便应变片定位。
- (3) 清洗。一般用丙酮浸泡过的脱脂棉清洗欲粘贴部位的表面。
- (4) 粘贴。在应变片的背面均匀地涂上一层黏结剂，胶层要厚度适中；对准十字交叉线将电阻片粘贴在欲测部位；将聚四氟乙烯薄膜覆盖在应变片上，用手指轻轻地滚压，以便挤出气泡和多余的胶。再用同样的方法粘贴引线端子。
- (5) 焊线。将应变片的两根引线焊在端子上，在端子上焊出两根导线。

2.2 测量电路——电桥的工作原理

通过电阻应变片可以将试件的应变转换成应变片的电阻变化，通常这种电阻变化很小。测量电路的作用就是将电阻应变片感受到的电阻变化率 $\Delta R/R$ 变换成电压（或电流）信号，再经过放大器将信号放大、输出。

测量电路有多种，惠斯登电路是最常用的电路，如图 2-3 所示。设电桥各桥臂电阻分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ，其中任一桥臂都可以是电阻应变片。电桥的 A、C 端为输入端，接电源 E ；B、D 端为输出端，输出电压为 U_{BD} 。

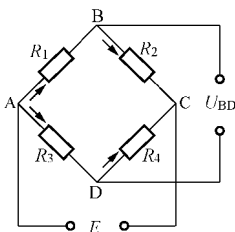


图 2-3 惠斯登电路

从 ABC 半个电桥来看，A、C 间的电压为 E ，流经 R_1 的电流为

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

R_1 两端的电压降为

$$U_{AB} = I_1 R_1 = \frac{R_1 E}{R_1 + R_2}$$

同理， R_3 两端的电压降为

$$U_{AD} = I_3 R_3 = \frac{R_3 E}{R_3 + R_4}$$

因此可得到电桥输出电压为

$$U_{BD} = U_{AB} - U_{AD} = \frac{R_1 E}{R_1 + R_2} - \frac{R_3 E}{R_3 + R_4} = \frac{(R_1 R_4 - R_2 R_3) E}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

由上式可知，当

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad \text{或} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

时，输出电压 U_{BD} 为零，称为电桥平衡。

设电桥的四个桥臂与粘在构件上的四枚电阻应变片连接,当构件变形时,其电阻值的变化分别为 $R_1 + \Delta R_1$ 、 $R_2 + \Delta R_2$ 、 $R_3 + \Delta R_3$ 、 $R_4 + \Delta R_4$,此时电桥的输出电压为

$$U_{BD} + \Delta U_{BD} = \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + R_2 + \Delta R_1 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + R_4 + \Delta R_3 + \Delta R_4} \right) E$$

经整理、简化并略去高阶小量,可得电桥电压变化量为

$$\Delta U_{BD} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

该式表明,电桥输出电压的变化量 ΔU_{BD} 与四个桥臂的电阻变化率呈线性关系。需要注意的是,该式成立的必要条件是:

- (1) 小应变, $\Delta R/R \ll 1$;
- (2) 等桥臂, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 。

当四片电阻片的灵敏系数 K_s 相等时,上式又可写作

$$\Delta U_{BD} = \frac{EK_s}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)$$

式中: ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 、 ϵ_4 分别代表电阻片 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 感应的应变值。

上式表明,电压变化量 ΔU_{BD} 与四个桥臂电阻片对应的应变值 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 、 ϵ_4 呈线性关系。应当注意,式中的 ϵ 是代数值,其符号由变形的方向决定。通常拉应变为正,压应变为负。根据 ΔU_{BD} 计算式可以看出,相邻两桥臂的 ϵ 符号一致时,两应变相抵消;符号相反时,则两应变绝对值相加。而相对两桥臂的 ϵ 符号一致时,其绝对值相加,否则两者相互抵消。显然,若不同符号的应变按不同的顺序组桥,会产生不同的测量效果。利用组桥方式不同,可以提高测量的灵敏度并减小误差。

一、组桥方式

(1) 单臂测量:电桥中只有一个桥臂(常用 AB 臂)是参与机械变形的电阻片,其他三个桥臂的电阻片都不参与机械变形。这时,电桥的输出电压为

$$\Delta U_{BD} = \frac{E}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{EK_s}{4} \epsilon_1$$

(2) 半桥测量:电桥中相邻两个桥臂(常用 AB、BC 两桥臂)是参与机械变形的电阻片,其他两个桥臂是不参与机械变形的固定电阻,这时电桥的输出电压为

$$\Delta U_{BD} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) = \frac{EK_s}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2)$$

(3) 对臂测量:电桥中相对两个桥臂(常用 AB、CD 两桥臂)是参与机械变形的电阻片,其他两个桥臂是固定电阻,这时电桥的输出电压为

$$\Delta U_{BD} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) = \frac{EK_s}{4} (\epsilon_1 + \epsilon_3)$$

(4) 全桥测量:电桥中的四个桥臂都是参与机械变形的电阻片,这时电桥的输出电压为

$$\Delta U_{BD} = \frac{EK_s}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)$$

另外,还有串联组桥方式,即两片参与机械变形的电阻片串联在同一桥臂上,其测量结果为两片电阻片变化率的平均值。

二、温度补偿

电阻应变片的电阻随温度变化而变化,利用电桥的加减特性,可通过温度补偿片来消除

这一影响。所谓温度补偿,是将电阻片贴在与构件材质相同但不参与变形的一块材料上,并与构件处于相同的温度条件下。将温度补偿片正确地连接在桥路中,即可消除温度变化所产生的影响。

下面分别讨论各种组桥方式下的温度补偿。通常,参与机械变形的电阻应变片称为工作片,电桥中用符号■来表示;温度补偿片用符号□来表示;另外,仪器中还设有不随温度变化的内接标准电阻,用符号▨来表示。

(1) 单臂测量(见图 2-4):在 AB 臂接工作片,BC 臂接温度补偿片,CD、DA 臂接仪器内的电阻。考虑温度引起的电阻变化

$$\Delta U_{BD} = \frac{E}{4} \left[\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right) + \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right)_T - \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} \right)_T \right]$$

由于 R_1 和 R_2 温度条件完全相同,因此 $\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right)_T = \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} \right)_T$, 所以电桥的输出电压只与工作片引起的电阻变化有关,与温度变化无关,即

$$\Delta U_{BD} = \frac{E}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

(2) 邻臂测量(见图 2-5):其中 AB、BC 臂接工作片,CD、DA 仍接仪器内的标准电阻。两工作片处在相同的温度条件下, $\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right)_T = \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} \right)_T$, 由桥路的加减特性自动消除了温度的影响,无须另接温度补偿片,即

$$\begin{aligned} \Delta U_{BD} &= \frac{E}{4} \left\{ \left[\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right) + \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right)_T \right] - \left[\left(\frac{\Delta R_2}{R_2} \right) + \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} \right)_T \right] \right\} \\ &= \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \end{aligned}$$

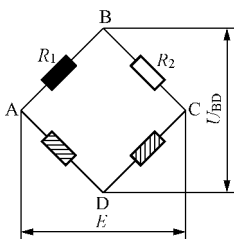


图 2-4 单臂测量

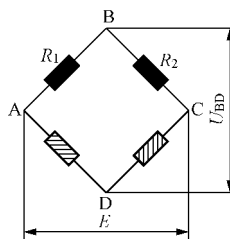


图 2-5 邻臂测量

(3) 对臂测量(见图 2-6):一般 AB、CD 两个对臂接工作片,另两个对臂 BC、DA 接温度补偿片。这时四个桥臂的电阻处于相同的温度条件下,相互消除了温度的影响,即

$$\Delta U_{BD} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)$$

(4) 全桥测量(见图 2-7):四个桥臂都是工作片,由于它们处于相同的温度条件下,因此相互抵消了温度的影响,即

$$\Delta U_{BD} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

在单臂串联测量时,BC 臂需要两个补偿片串联起来才能消除温度的影响。