

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



GONGCHENG CAILIAO
LIXUE SHIYAN

工程材料 力学实验

鞠彦忠 赵 强 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



GONGCHENG CAILIAO
LIXUE SHIYAN

工程材料 力学实验

主 编 鞠彦忠 赵 强
编 写 陈景彦 陈建华
主 审 杨 刚



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。本书根据教育部工科力学指导委员会对力学系列课程的要求,结合作者多年的力学理论教学和实验教学的实践编写而成。全书分为5章,内容包括:材料力学试验技术,实验数据的统计分析,常用实验仪器设备,拉伸破坏、压缩破坏、扭转破坏、拉伸测E、弯曲正应力、弯曲变形、剪切、冲击等基本力学性能实验以及偏心拉伸等综合性、设计性试验。

本书介绍了配合材料力学理论教学而设的各种实验项目。基本试验适用于所有学习力学课程的专业;选择性实验是根据机电类、土木工程类、工程管理等不同专业要求而安排选择不同的实验项目。

本书主要作为高等学校机械类、土木工程类专业教材,也可供工程技术人员、实验技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料力学实验 / 鞠彦忠, 赵强主编. —北京: 中国电力出版社, 2008

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-7319-5

I. 工… II. ①鞠…②赵… III. 工程材料—材料力学—实验—高等学校—教材 IV. TB301-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第070178号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008年7月第一版 2008年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 6印张 138千字

定价 10.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书是作者在东北电力大学自编教材《工程力学实验指导书》的基础上,经过十余年的使用、修改完善,并且随着试验设备的更新、试验技术的提高,结合力学系列课程改革要求,对内容进行修订、充实而成。

材料力学实验是材料力学课程的重要组成部分。材料力学中的一些理论和公式是建立在实验、观察、推理、假设的基础上,它们的正确性还必须由实验来验证。学生通过做实验,用理论来解释、分析实验结果,又以实验结果来证明理论,互相印证,以达到巩固理论知识和学会实验方法的双重目的。

材料力学实验在工程实践和力学研究上都具有举足轻重的作用。工程力学的结论及定律,新材料的机械性能,都需要通过实验来验证或测定;工程实际中无法用理论分析解决的复杂力学问题也需要用实验方法加以解决。

材料力学实验可以为工程技术人员进行工程设计提供可靠的依据,为质量检验提供法定的依据,是施工工程技术人员对重要结构的材料质量和结构性能进行检验的重要方法和依据。因此,材料力学实验是工程技术人员必须掌握的技能之一。

本书在内容编写上,不仅涵盖了材料力学实验的基本内容,而且在第2章“实验数据的统计分析”中,为更加快捷、精确、直观进行曲线拟合及误差分析,编者增加了利用Matlab软件进行定量计算的内容,给出了相应的源程序,并且配有计算实例。使用者只要按照源程序要求输入试验数据,运行程序,不仅能够得出拟合函数,而且还能够显示出“试验数据闪光点”、“拟合曲线图”以及“相对误差值”。

全书内容分为5章:第1章介绍了部分力学实验的试验技术;第2章介绍实验数据的统计分析方法;第3章介绍了目前常用的实验教学及工程检测的仪器设备;第4章安排了6项力学基本实验项目,包括拉伸破坏、压缩破坏、扭转破坏、拉伸测弹性模量、弯曲正应力、弯曲变形等基本力学性能实验;第5章安排了10项选择性试验,包括剪切、冲击等基本力学性能实验和偏心拉伸等综合性、设计性试验。

本书由鞠彦忠、赵强主编,陈景彦、陈建华参编,赵强负责全书的撰写执笔,并且邀请大连海事大学交通与物流工程学院道路与桥梁系杨刚教授主审。

限于编者水平,书中必然存在不少错误或不足,殷切希望读者批评指正。

编 者

2008年4月

目 录

前言	1
学生实验须知	1
绪论	2
第1章 材料力学试验技术	4
§1-1 材料力学性能测试	4
§1-2 电测法的基本原理	6
§1-3 其他应力测试技术概述	13
§1-4 实验载荷	14
第2章 实验数据的统计分析	18
§2-1 实验测量值的有效数字处理	18
§2-2 实验误差	19
§2-3 实验数据的数值拟合	22
第3章 常用实验仪器设备	26
§3-1 静态液压式万能材料试验机	26
§3-2 微机屏显式液压万能试验机	28
§3-3 电液伺服万能试验机	29
§3-4 微机控制扭转试验机	31
§3-5 冲击试验机	32
§3-6 II型组合式实验台	33
§3-7 材料力学多功能实验台	34
§3-8 电阻应变仪	34
§3-9 引伸仪	38
第4章 基本试验	41
§4-1 拉伸破坏实验	41
§4-2 压缩实验	45
§4-3 拉伸时弹性常数 E 、 μ 的测定	49
§4-4 扭转实验	52
§4-5 梁弯曲正应力实验	56
§4-6 弯曲变形实验	59
第5章 选择性实验	62
§5-1 薄壁圆筒在弯曲和扭转组合变形下主应力测定实验	62
§5-2 压杆稳定实验	65
§5-3 工字梁主应力的测定实验	68
§5-4 超静定梁实验	71
§5-5 扭转求 G 实验	73

三、材料力学实验的特点和要求

学生实验须知

1. 实验前必须预习实验教材中相关的内容,了解本次实验的目的、实验原理,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,不准乱丢纸屑,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,方能继续实验。
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,主动锻炼自己的独立动手能力。
8. 实验结束后,将试验设备复原,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。

绪 论

一、材料力学实验的意义和任务

1. 材料力学实验的意义

材料力学实验是材料力学课程的重要组成部分。材料力学中的一些理论和公式是建立在实验、观察、推理、假设的基础上,它们的正确性还必须由实验来验证。学生通过做实验,用理论来解释、分析实验结果,又以实验结果来证明理论,互相印证,以达到巩固理论知识和掌握实验方法的双重目的。

材料力学实验在工程实践和力学研究上都起到举足轻重的作用。工程力学的结论及定律,新材料的机械性能,都需要通过实验来验证或测定;工程实际中无法用理论分析解决的复杂力学问题也需要用实验方法加以解决。

材料力学实验可以为工程技术人员进行工程设计提供可靠的依据,为质量检验提供法定的依据,是施工工程技术人员对重要结构的材料质量和结构性能进行检验的重要方法和依据。因此,材料力学实验是工程技术人员必须掌握的技能之一。

2. 材料力学实验的任务

(1) 通过实验研究和测定工程材料的力学性能,包括弹性、塑性、强度、韧性和疲劳性等性能参数。

测定材料力学性能的实验,主要包括拉伸、压缩、扭转、硬度、冲击、剪切、疲劳等实验。这类实验的目的是测定材料的特性数值,目前广泛用于了解新材料的力学性能和在实际工程中鉴定材料的质量。该类实验均有国家标准的实验方法,实验中应遵照执行。

(2) 验证材料力学理论公式和主要结论,并通过实验来熟悉变形和应变的测试方法和主要测试仪器的使用方法。

在工程力学的理论研究中通常将实际问题抽象为理想的模型,再根据科学的假设推导出一般公式。但这些简化和假设是否正确,理论公式是否能用于实际的设计,都需要通过实验加以验证。工程力学的基础理论正是在实验的基础上建立起来的。该类实验的一般方法是根据所要验证的理论确定实验模型和实验条件,以实验结果是否能和理论分析的预期结果相吻合来判定理论的正确性。

(3) 研究受力和形状较复杂构件的应力分布规律,进行实验应力分析。

该类实验一般以解决工程中的实际问题为目的,主要解决工程中实际构件形状和承载情况十分复杂或边界条件不能确定等用理论分析无法有效解决的问题。该类实验包括电测法、光测法、脆性涂层法等实验方法,其中以电测法应用最为广泛,本书中将把其作为讲解的重点内容。

(4) 进行科学实验的基本训练,培养严肃认真的工作作风和实事求是的科学态度,增强观察、发现、分析和解决工程实际问题的能力。

二、材料力学实验的特点和要求

1. 材料力学实验的特点

实验课不同于课堂教学,它是借助于材料试样、试验机和仪器、仪表等试验手段,通过学生亲手操作,给试样加载,同时观察其变形,并经历观察、记录、分析处理和推理的过程来进行学习的,一般需要几个人相互配合才能很好完成实验的全过程。因此,需要组成实验小组并明确分工。在上实验课时,要求人人遵守实验规则和纪律,集中精力,认真操作,细心观察,详细记录,仔细推理。

2. 材料力学实验的要求

(1) 实验前每个人都应明确本次实验的目的、要求、原理和步骤,了解所使用试验设备、仪器、装置的基本构造和操作规程(使用方法),做好必要的预习和实验准备,并写出预习报告。

(2) 在正式开始实验以前,要检查试验设备的状态,仪器是否安装稳妥,试样装置是否正确等。最后还应请指导教师检查,待教师检查无误后方可开动实验机或安装实验装置。实验过程中应集中精力,认真操作,细心观察、测试和记录各种现象及数据,同时也要记录实验日期、实验场所的温度、湿度、试验机设备和仪器的名称、试样尺寸和实验装置的示意图等。要求记录清楚整洁,保持原始状态。在实验中还应提倡主动思考,发挥独立思考能力,结合有关理论对试验中的现象和数据进行分析,使理论与实际联系起来,把实践中获得的感性认识上升为理性认识。

(3) 实验后要及时做好小结,编写实验报告。实验报告是实验者最后交出的成果,是实验资料的总结。报告应当包括下列内容:

1) 实验名称、实验日期、实验者及组员姓名,实验目的,注明使用的设备和仪表的名称、型号和精度(或放大倍数)等。

2) 实验数据处理。实验数据记录、数据处理和实验误差分析讨论要求数据真实、计算正确,书写整洁,描绘实验曲线时应用坐标纸,按多数点的位置绘成光滑曲线。

(4) 为了避免试样形状和尺寸偏差对实验结果的影响,材料力学实验所用的试样,必须按国家标准制作。

(5) 对试样的加载,主要是运用各种材料试验机,应根据试样所能承受的最大载荷选择适当的量程,其最大载荷不得超过试验机所选量程的80%。静载试验的加载速率,要注意缓慢和均匀,按各种试验的有关国标规定进行加载。

(6) 对试样变形量的测定,由于弹性变形一般很小,需用变形仪放大变形后再测量。因此应了解变形仪构造原理、使用方法和放大倍数。在选用时,要注意使实验中最小变形远大于变形仪上的最小刻度,而最大变形则不得超过变形仪满量程的80%。

第1章 材料力学试验技术

本章用于为实验方案的制定提供参考,包括以下几方面内容:力学性能测试原理和相关标准,电测法的基本原理,实验中仪器设备的选用原则,实验加载方法。

§ 1-1 材料力学性能测试

材料力学性能又称机械性能,是指材料在力或能量的作用下所表现的行为。

构件在工作中要传递力或能量,在拉、压、弯、剪、扭、冲击、疲劳等各种负荷条件下,常常由于过量变形、尺寸改变、表面损伤或断裂而失效。为避免各种失效现象的发生,必须通过实验测定材料在不同负荷条件下的力学性能,并规定具体的力学性能指标,以便为构件的选材和预防失效提供可靠的依据。材料主要的力学性能指标有屈服强度、抗拉强度、弹性模量、断后伸长率、断面收缩率、冲击韧性、疲劳极限、断裂韧性和裂纹扩展特性等。本书主要介绍在常温、静荷下测定材料弹性模量、冲击、剪切、疲劳等试验方法。

1. 常温、静荷拉伸破坏试验

单向拉伸试验是研究材料机械性能的最基本、应用最广泛的试验。由于试验方法简单且易于得到较可靠的试验数据,一般工程中都广泛利用其试验结果来检验材料的机械性能。试验提供的 E 、 $R_{eL}(\sigma_s)$ 、 $R_m(\sigma_b)$ 、 $A(\delta)$ 和 $Z(\psi)$ 等指标是评定材质和进行强度与刚度计算的重要依据。金属材料出厂时一般都要提供上述指标以供使用和参考,但对于应用在重要结构上的金属材料仍需要进行试验,以检验其质量是否符合标准要求。

进行单向拉伸实验时,外力必须通过试件的轴线以确保材料处于单向应力状态。一般试验机都设有自动绘图装置用以记录试件的拉伸图即 $F-\Delta L$ 曲线。 $F-\Delta L$ 曲线形象地体现了材料的变形特点以及各阶段受力和变形的关系。但是 $F-\Delta L$ 曲线的定量关系不仅取决于材质而且受试件几何尺寸的影响。因此,拉伸图往往用名义应力、应变曲线即 $\sigma-\varepsilon$ 曲线来表示:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{试件的名义应变}$$

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad \text{试件的名义应力}$$

A_0 和 L_0 分别代表试件初始条件下的截面面积和标距。 $\sigma-\varepsilon$ 曲线与 $F-\Delta L$ 曲线相似,但消除了几何尺寸的影响。因此能代表材料的属性。单向拉伸条件下的一些机械性能指标就是在 $\sigma-\varepsilon$ 曲线上定义的。试验如能提供一条精确的拉伸图,那么单向拉伸条件下的主要力学性能指标即可精确地测定。

不同性质的材料拉伸过程不同,其中 $\sigma-\varepsilon$ 曲线会存在很大的差异。低碳钢和铸铁是性质截然不同的两种典型材料,它们的拉伸曲线在工程材料中具有典型意义,掌握它们的拉伸过程和破坏特点有助于正确、合理地认识和选用材料。

2. 压缩试验

压缩试验是研究材料机械性能常用的试验方法。对铸铁、铸造合金、建筑材料等脆性材料尤为适合。

通过压缩试验观察材料的变形过程、破坏方式,并与拉伸试验进行比较,可以分析不同应力状态对材料强度、塑性的影响,从而对材料的机械性能有较全面的认识。

3. 扭转试验

很多传动零件都在扭转条件下工作。测定扭转条件下的机械性能,对于零件的设计计算和选材有实际意义。

纯扭转时,圆试件表面为纯剪应力状态。其断裂方式为分析材料的破坏原因和抗断能力提供了直接有效的依据。这一点是其他试验方法不能相比的。

4. 弹性模量 E 、泊松比 μ 的测定

单向拉伸时材料在线弹性范围内服从胡克定律,应力和应变呈正比关系,即 $\sigma = E\varepsilon$, 比例系数 E 称作弹性模量。在 $\sigma - \varepsilon$ 曲线上, E 是弹性阶段直线的斜率,代表材料抵抗弹性变形的能力。 E 愈大,产生一定弹性变形所需的应力愈大,弹性变形愈困难。工程上常把 E 称作材料刚度。 E 是弹性元件选材的重要依据,是力学计算的一个重要参量。同时,试样的轴向伸长必然引起横向收缩。试验表明在弹性范围内,若横向应变为 ε' , 轴向变形为 ε_p , 二者之

比为一常数,其绝对值称为横向变形系数,又称泊松比,用 μ 来表示,即 $\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_p} \right|$ 。

E 和 μ 都是在变形很小的情况下测量的。如果变形的测量精度不高,就会产生很大的误差。因此,不论采用什么方式进行测量,必须有高灵敏度的引伸计,以便感受试件的微小变形。一般常用的引伸计是机械式和应变式两种。机械式引伸计工作原理简单,有一定的测量精度,试件的变形可以直接读取。应变式引伸计(包括夹式引伸计或应变片)虽不能直接显示读数,但和应变仪、记录仪器配套使用可测出试件上的应变并将试件的变形过程记录下来,为测定指标提供可靠的依据。

5. 冲击试验

实践表明,金属材料在动载荷作用下和静载荷作用下所表现的力学性能是不同的。在静载荷作用下表现塑性良好的材料,在动载荷作用下可能会呈现脆性断裂。因此,研究材料在冲击载荷作用下的力学性能具有很重要的意义。冲击试验是传统的常规力学性能试验,该试验通过一次冲击施加过载应力而显示试样的缺口特性(韧性和脆性),揭示材料在静载荷试验时不能反映的材料内部缺陷对力学性能的影响。它广泛用于检验金属材料的冷脆、热脆、回火脆性、工程选材、质量控制以及金属材料开发研究等方面。通过试验可以测定低碳钢和铸铁的冲击性能指标——冲击韧性值 α_k ; 了解金属材料常温下一次冲击的试验方法;比较低碳钢与铸铁两种材料抵抗冲击载荷的能力及破坏断口的特征。

6. 剪切试验

在工程实际中,经常遇到剪切问题。如常用的销、螺栓、平键等。这些构件的受力和变形特点是:作用在构件两侧面上的横向外力的合力大小相等,方向相反,作用线相距很近。在这样的外力作用下,其变形特点是两力间的横截面发生相对错动,这种变形形式叫剪切。通过剪切试验,可以测出材料的剪切强度性能指标——抗切强度 τ_b , 观察材料的剪切破坏形式。

以上各种试验在第四章和第五章将分别详细介绍。

§ 1-2 电测法的基本原理

电测应力应变实验方法(简称电测法)是一种使用极为广泛的重要实验手段,对验证力学理论、测量材料机械性能、解决实际工程问题以及从事科学研究提供了良好的实验基础。电测法就是通过敏感元件将物理量、力学量、机械量等非电量转换成电量来进行量测的一种实验方法,其原理如图 1-1 所示。

电测法之所以得到广泛应用,是因为它具有以下优点:

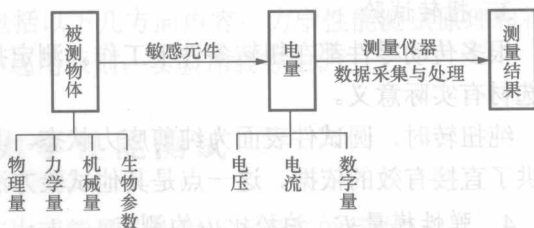


图 1-1 电测法原理图

- (1) 灵敏度高,测量范围广。例如应变范围为 $\pm 1 \sim 10^4 \mu\epsilon$,力或重力的测量范围为 $10^{-2} \sim 10^5 \text{N}$ 等。
 - (2) 进行静、动态测量,频响范围为 $0 \sim \pm 50 \text{kHz}$ 。
 - (3) 能在高、低温及高压液体等特殊条件下进行测量。
 - (4) 轻便灵活,适用于现场及野外等恶劣环境下进行测试。
 - (5) 便于与计算机连接进行数据采集与处理,可广泛应用于生产管理的自动化及控制。
- 正因为电测法具有上述优点,所以得以广泛应用于各个领域:

- (1) 直接应用于工业生产的现实实测与控制。
- (2) 生产新产品前的模型设计实验。
- (3) 高科技、现代科学领域中的应用。
- (4) 应用于运动力学测试。
- (5) 应用于生物医学及康复事业。
- (6) 制造各种传感器,如力、压力、位移传感器等。

下面我们着重介绍电测法的基本原理及其实验方法。

一、电阻应变片的构造及工作原理

在电测法中,信号的感受与转换的关键是靠传感器或称敏感元件。

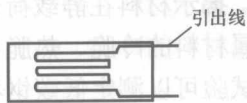


图 1-2 电阻片

敏感元件按性质可分为光敏、气敏、声敏、压敏等。按工作原理则分为电阻式、电感式、电容式、压电式、电磁式及其他特殊形式等。本书介绍的电阻应变片(简称电阻片)如图 1-2 所示,即为电阻式敏感元件,其结构最简单,应用最广泛。

1. 电阻片应变片的应变—电性能

金属丝的电阻值随着机械变形而发生变化的现象称为应变—电效应。电阻片就是利用金属的这一性能工作的。

电阻片分为丝式电阻应变片和箔式电阻应变片两大类。

丝绕式应变片是用直径为 $0.003 \text{mm} \sim 0.01 \text{mm}$ 的合金丝绕成栅状而制成;箔式电阻片则是用 $0.003 \text{mm} \sim 0.01 \text{mm}$ 厚的箔材经化学腐蚀成栅状。主体敏感栅丝,在感受被测物体的应

变时,其电阻也同时发生变化。实验表明被测物体测量部位的应变 $\Delta L/L$ 与电阻的变化率 $\Delta R/R$ 成正比关系,即

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \frac{\Delta L}{L}$$

式中: K_s 为金属丝的电阻应变灵敏系数。

电阻应变片的敏感栅并非是一根直丝,所以电阻片的应变灵敏系数一般在标准应变梁上由抽样标定测得,标定梁为纯弯梁或等强度梁。

电阻值 R 与电阻丝长度与截面积 A 之间的关系为

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

式中: ρ 为电阻丝的电阻率,上式等号两边取对数后再微分得

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

根据金属物理和材料力学理论得知 $\frac{\Delta A}{A}$ 、 $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ 也与 $\frac{\Delta L}{L}$ 成线形关系,由此得到

$$\frac{\Delta R}{R} = [(1+2\mu) + m(1-2\mu)] \frac{\Delta L}{L} = K_s \frac{\Delta L}{L}$$

式中: μ 为金属丝材料的泊松比; m 为常数,与材料的种类有关。对于电阻片来说,上式可写成

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \varepsilon$$

2. 电阻片的温度效应

温度变化时,金属丝的电阻值也随之发生变化,称之为 $(\Delta R/R)_T$ 。该电阻变化是由两部分引起的,一是电阻丝的电阻温度系数引起的。

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)'_T = \alpha_T \Delta T$$

另一部分是由于金属丝与构件的材料膨胀系数不同而引起的。

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

因而温度引起的电阻变化为

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

式中 α_T ——金属丝材料的电阻温度系数;

β_1 ——金属丝材料的热膨胀系数;

β_2 ——构件材料的热膨胀系数。

要想准确地测量构件的应变,就要克服温度对电阻变化的影响,一种方法是使电阻应变

片的系数 $[\alpha_T + K_s(\beta_2 - \beta_1)]$ 等于零, 这种电阻应变片称为温度自补偿电阻应变片; 另一种方法是利用测量电路—电桥的特性来克服, 这将在后面仔细阐述。

3. 电阻片的粘贴方法

粘贴电阻片是应变电测法的一个重要环节, 它直接影响测量的精度。粘贴时, 首先必须保证被测构件表面的清洁平整, 无油污、无锈, 其次要保证粘贴位置的准确, 第三要选用专用的粘接剂。粘贴的步骤如下:

(1) 打磨。测量部位的表面, 经过打磨后应平整光滑, 无锈点。打磨可使用砂轮、砂纸等。打磨时按与试样纵轴线成 45° 夹角的两个方向进行打磨。

(2) 画线。测量点精确地用钢针画好十字交叉线以便定位。

(3) 清洗。用浸有丙酮的药棉清洗欲测部位表面, 以清除油污, 保持清洁干净。

(4) 粘贴。在电阻应变片背面均匀地涂上一层粘接剂, 且胶层厚度要适中, 然后对准十字交叉线粘贴在欲测部位。粘接剂有 502 快干胶及其他常温及高温固化胶。再用同样的方法粘贴引线端子。

(5) 焊接。将电阻片的两根引出线焊在引线端子上, 再焊出两根导线。

二、测量电路—电桥的工作原理

测量电路的作用是将电阻片感受的电阻变化率变换成电压变化输出, 再经放大电路放大。

测量电路有多种, 最常用的是桥式测量电路, 如图 1-3 所示, 有四个桥臂 R_1, R_2, R_3, R_4 顺序地接在 A, B, C, D 之间。电源的对角点 AC 接电源 E 。另一对角 BD 为电桥的输出端, 其输出电压为 U_{DB} 。可以证明输出电压

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

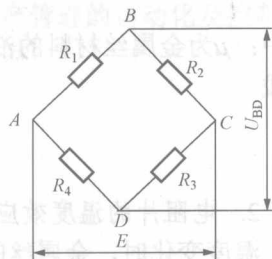


图 1-3

若电桥的四个桥臂与四片粘贴在构件上的电阻片联接, 当构件变形时, 其电阻值的变化分别为: $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$, 此时, 电桥的输出电压即为

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

由以上两式可以解出电桥电压变化量 ΔU_{BD} 。当 $\Delta R/R \ll 1$, 且 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 时, 有

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

上式表明, 电桥输出电压的变化量 ΔU_{BD} 与四个桥臂的电阻变化率成线性关系。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

$$\Delta U_{BD} = \frac{EK_s}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

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 感受的应变值。

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 成线性关系。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。根据上式可以看出，相邻两桥臂的 ε 符号一致时，二应变相抵消；如符号相反，则二应变绝对值相加。而相对两桥臂的 ε 符号一致时，其绝对值相加，否则二者相互抵消。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。

1. 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

$$\Delta U_{BD} = \frac{E}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{EK_s}{4} \varepsilon_1$$

(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

$$\Delta U_{BD} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) = \frac{EK_s}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

(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

$$\Delta U_{BD} = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) = \frac{EK_s}{4} (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)$$

(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

$$\Delta U_{BD} = \frac{EK_s}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

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中，其测量结果为两片电阻片电阻变化率的平均值。

2. 温度补偿

前面已讲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（图1-4）：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

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

(2) 半桥测量 (图 1-5): 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, 无需另接温度补偿片, 即

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

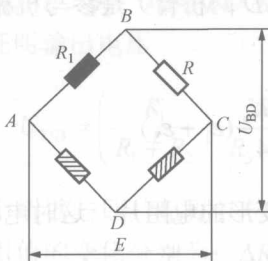


图 1-4 单臂测量

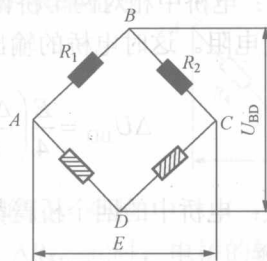


图 1-5 邻臂测量

(3) 对臂测量 (图 1-6): 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 (图 1-7): 四个桥臂都是工作片, 由于它们处于相同的温度条件下, 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。

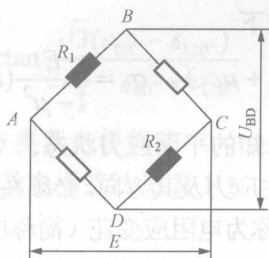


图 1-6 对臂测量

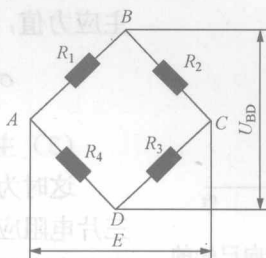


图 1-7 全桥测量

3. 桥臂系数及电阻应变仪读数的修正公式

电阻应变仪是测量应变的专用仪器，电阻应变仪的输出电压 ΔU_{BD} 是用应变值 $\varepsilon_{\text{仪}}$ 直接显示的。与电阻片的灵敏系数 K_s 相对应，电阻应变仪也有一个灵敏系数 $K_{\text{仪}}$ 。有些仪器的 $K_{\text{仪}}$ 是可调的，也有一些 $K_{\text{仪}}$ 是固定值。

当 $K_{\text{仪}} = K_s$ 时， $\varepsilon_{\text{仪}} = \varepsilon$

即电阻应变仪的读数 $\varepsilon_{\text{仪}}$ 值不必修正，否则，需要按下式进行修正。

$$K_{\text{仪}} \varepsilon_{\text{仪}} = K_s \varepsilon$$

前面已讲到，同一测量，组桥方式不同，其输出电压（或电阻应变仪读数）也不相同。因此，我们定义测量出的电阻变化率（或应变）与待测的电阻变化率（或应变）之比为桥臂系数。测量出的电阻变化率（或应变）是四个桥臂电阻变化率（或应变）的代数和，即

$\sum_{n=1}^4 (-1)^{n+1} \frac{\Delta R_n}{R_n}$ ，而待测的电阻变化率（或应变）为 $\frac{\Delta R}{R}$ （或 ε ）。

因此，桥臂系数 B 为：
$$B = \frac{\sum_{n=1}^4 (-1)^{n+1} \frac{\Delta R_n}{R_n}}{\frac{\Delta R}{R}}$$

用应变表示为：
$$B = \frac{\sum_{n=1}^4 (-1)^{n+1} \varepsilon_n}{\varepsilon}$$

如上所述，单臂测量值就是待测值，此时桥臂系数 $B = 1$ ，熟悉桥臂系数的计算，正确掌握组桥的方法是提高精度和灵敏度的关键。

4. 应力测量方法

电阻应变片直接测量的是其轴线方向的应变值，根据应力应变关系，即可计算出应力值。分以下几种情况来讨论。

(1) 单向应力状态。

构件在轴向拉伸（压缩）或梁在纯弯时，都是单向应力状态。

此时，只需沿其应力方向粘贴一片电阻应变片 R_1 ，如图 1-8 所示，并测出其应变值 ε ，根据胡克定律即可计算出应力 $\sigma = E\varepsilon$ 。

图 1-8 单向应力状态

(2) 主应力方向已知的平面应力状态。

如图 1-9 所示的主应力方向粘贴两片电阻片，测出 ε_1 和 ε_2 即可根据广义胡克定律计算出