

工程力学实验指导书

(试用版)

黄跃平 胥明 韩晓林 编

东南大学力学实验中心

2007年02月

实验守则

- 一、要按指定的时间进行实验。准时进入实验室，不得迟到、早退。
- 二、每次实验前，要仔细阅读实验指导书，基本了解实验内容，目的，实验步骤及机器和仪器的主要原理与使用方法等。
- 三、以小组为单位进行实验。小组长负责管理使用的设备，并组织分工和统一指挥。
- 四、要爱护实验室的一切设备，非指定使用的机器设备不得乱动，以免发生危险或损坏事故。
- 五、在实验过程中，如机器或仪器发生故障应立即向实验指导人员报告，进行检查以便及时排除故障，保证实验的正常进行。
- 六、实验结束后，要清理机器、仪器工具。如有损坏、应及时向实验指导人员报告，听候处理。
- 七、要保持实验室的清洁和安静，养成良好的科学作风。
- 八、实验完毕后，要认真做好实验报告，并对思考进行讨论。

目录

实验序号	实验名称	页码
实验 1	金属材料拉伸实验	3
实验 2	应变计的粘贴工艺	9
实验 3	电阻应变计的热输出	10
实验 4	电阻应变计测量原理实验指导	11
实验 5	材料弹性常数(E)实验指导	14
实验 6	弯曲正应力分布实验	16
实验 7	薄壁圆管弯扭组合应力测定实验	18
实验 8	开口薄壁梁弯心及应力等测定实验	22
实验 9	开口薄壁截面的约束扭转和圣维南原理实验	23
实验 10	冲击应力及动荷系数	26
实验 11	电测法测定衰减振动参数	28
实验 12	电测法标定加速度传感器的电压灵敏度	30
实验 13	单自由度系统强迫振动的幅频特性	31
实验 14	曲柄滑块机构角位移测量	33
实验 15	曲柄滑块机构的线位移和加速度测量	36
实验 16	拉伸应变硬化指数 (n 值) 实验(设计型实验)	40
实验 17	工程结构电测应力分析(设计型实验)任务书	42
实验 18	工程结构减振实验(设计型实验)任务书	43
演示实验 19	金属材料压缩剪切及扭转破坏实验	44
演示实验 20	金属材料疲劳演示实验	48
演示实验 21	光弹实验	49
演示实验 22	转子临界转速实验	53

工程力学实验序

20 世纪以来, 工业技术高度发展, 特别是航空航天工业的崛起; 计算机的出现以及迅速地更新换代; 各种新型材料不断问世并应用于广泛的工业部门; 实验设备日趋完善、实验技术水平不断提高。所有这些进展, 使得力学实验所涉及的领域更加宽阔、知识更加丰富多采。特别是面向 21 世纪这样的信息时代, 工程力学实验的改革面临新的问题、新的机遇。归纳起来有以下几个方面:

1. 必须突破以钢铁等金属材料主体的工程力学实验课程内容体系, 引入新材料实验。

20 世纪 50 年代以来, 一些具有良好性能的结构材料, 例如复合材料、高分子材料、结构陶瓷、耐热合金等, 不断从军事工业与高科技领域扩展到许多工业部门。这些材料的使用大大减轻了结构重量, 而结构的强度和寿命却几倍以至十几倍增长。据估计, 到 2000 年, 汽车制造业所采用的非金属材料将占到总重量的 70% 以上。这些材料的力学性能如何, 由这些材料制造的零件和部件应当按怎样的准则进行设计, 这是工程力学实验不能回避的问题。

2. 必须突破与时间无关的线弹性问题, 引入与时间有关的线性和非线性粘弹性问题。

经典工程力学实验主要讨论钢铁一类材料在常温、静载作用下弹性范围的应力变形问题, 因而其应力应变保持线性关系且与时间无关。但是, 对于高分子材料、结构陶瓷以及高温条件下工作的耐热合金等, 它们的应力-应变关系都与时间有关, 当然有些是线性的, 有些是非线性的。

3. 必须突破以静力实验为主教学模式, 增加与动态测试技术有关的新实验。

以往的工程力学实验大都是在静荷载条件下完成的, 缺乏动态测试的内容, 而在工程的实际运用中, 动态测试技术已经成为主要的手段。因此在静荷载条件下传统工程力学实验的基础上, 改造和更新实验内容, 是工程力学实验课程重要组成部分。

4. 必须突破单纯的实验为主教学模式, 紧密结合国家和国际的最新测试标准。

以往的工程力学实验基本上是按照旧的国家标准进行的, 随着我国加入 WTO, 与国际标准接轨, 我国标准的制定和修改的时间将大大缩短。如果仍然按照旧的国家标准进行实验, 显然已不能符合时代的发展需要。积极了解国家标准和国际标准的发展动态, 根据新的国家标准和国际标准改进实验方法已是当务之急。

5. 必须利用信息技术的高速发展的最新成果, 充分利用信息技术, 充分利用计算机在测试中超强的数据分析能力。

根据课程的特点, 是采用人工读取实验数据, 人工分析实验数据。目前随着信息技术的高速发展, 计算机自动采集数据, 自动分析数据已成为工程检测的主流; 在课程中引进新的实验设备 Instron 和新的测试仪器-虚拟仪器 Labview, 加强学生运用计算机采集和分析数据的能力。

6. 必须突破传统的电测实验, 利用光学测试技术的手段, 引进现代光学测试技术实验。

新材料和新结构的发展, 需要更好的测试技术, 现代光测技术已经成为新材料测试技术的手段, 引进光测技术实验, 将扩展学生的视野, 极大提高他们学习的积极性。

工程力学实验的主要内容是以材料力学的实验内容为主, 以理论力学和光测力学的内容为辅。材料的力学性能实验以进口的电子拉伸试验机为主, 结合国家标准和国际标准的要求进行。电测实验在验证理论公式的静态测试基础上, 增加了多项动态电测实验内容。动态测试方面将以虚拟仪器设备为主, 虚拟仪器设备也将应用在材料的力学性能实验和动态电测实验中。

工程力学实验课程对学生提出了更高的要求，主要在以下几个方面：

1 了解试验标准

材料的力学性能是材料的固有属性，不同的材料具有不同的力学性能。我们从试验中知道，材料的力学性能，如屈服极限、强度极限、疲劳极限和冲击吸收功等，除了与材料本身有关外，还与加载速度、试件几何形状、表面光洁度、试验周围环境的温度、湿度有关。因此，在进行工程力学实验性能的测试时，必须做出有关的规定，以便统一试验标准，使测试结果具有可比性。这些规定在我国被称为国家标准（GB）或部标（JB、YB 等）。其他国家也有各自的试验标准，如美国的 ASTM。在国际间进行仲裁时，以国际标准进行试验，代号 ISO。

2 撰写实验报告

它包括实验的目的、原理、方法和步骤，试验所用的仪器设备名称、型号、有关的性能指标、精度，试验的记录、结果的分析与计算，以及对实验中出现的问题进行讨论研究等，以便从中发现新的东西。对于科研实验报告，它是存档和进行交流的重要资料。对于学习者而言，实验报告则是在完成实验的基础上，书写实验、总结分析实验的过程。它可以培养实验者的文字、图表表达能力、对实验结果进行分析的能力，从而提高报告的水平。

3 了解和掌握新的测试工具

在掌握传统的测试手段的同时，引导学生了解新的测试技术，特别是现代动态测试技术和光学测试技术。

实验 1 金属材料拉伸实验

金属材料拉伸试验是材料力学最基本的实验，通过拉伸可以测定出材料一些基本的力学性能参数（弹性模量、强度、塑性等）。国家标准 GB/T228-2002《金属材料室温 拉伸试验方法》，已于 2002 年 7 月 1 日开始实施。新版国家标准与原相关国家标准在引用标准、定义和符号、试样、试验要求、性能测定方法、测定结果数值修约及性能测定结果准确度阐述等方面都作了较大修改和补充。通过等效采用及鼓励和促进采用自动化测试的方式实现了与国际标准接轨。

1、实验目的

- 1.1 了解并掌握 GB/T228-2002 所规定的定义和符号、试样、试验要求、性能测定方法；
- 1.2 了解 Instron 3367 电子万能材料试验机的构造和工作原理，掌握其使用方法；
- 1.3 测定金属材料的上、下屈服强度 (R_{eH} 、 R_{eL})；抗拉强度 (R_m)；最大力总伸长率 (A_{gt}) 和断后伸长率 (A)；截面收缩率 (Z)；
- 1.4 观察和分析金属试样在拉伸过程中的各种现象，并比较断后伸长率 (A) 和最大力总伸长率 (A_{gt}) 差异；
- 1.5 绘制材料的应力-延伸曲线和冷作硬化曲线，观察分析试样在冷作硬化对材料力学性能的影响。

2、实验设备和量具

Instron 3367 电子材料试验机，引伸计，力传感器，位移传感器、游标卡尺等。最常见的拉伸试件的截面是圆形和矩形，如图所示。

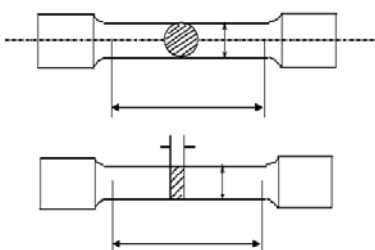


图 1-1 拉伸试件



图 1-2 Instron 3367 电子试验机



图 1-3 Bluehill 软件主界面

电子材料试验机可以做拉伸、压缩、剪切、弯曲等试验，故习惯上称它为万能材料试验机，也称为全能机。全能机有机械、液压等电子多种类型。目前普遍采用电子材料试验机，试验机主要由加力部分和测力部分组成。电子材料试验机的构造、工作原理及操作规程介绍详见电子材料试验机指南。

3、金属材料（低碳钢）的拉伸实验原理（GB/T228-2002）

当试样开始受力拉伸时，材料先呈现弹性状态，然后进行屈服阶段（状态），通常呈水平的锯齿状，试验发生屈服而力首次下降前的最高应力称上屈服极限 (R_{eH})，由于上屈服极限受变形速度等因素的影响较大（初始瞬时效应），一般不作为材料的强度指标；同样，屈服后第一次下降的最低点也不作为材料的强度指标。在屈服期间，不计初始瞬时效应时的最低应力，除此之外的其它最低点中的最小值作为屈服强度 (R_{eL})。当屈服阶段结束后，继续加载，载荷—变形曲线开始上升，材料进入强化阶段。若在这一阶段的某一点卸载至零，则可以得到一条与比例阶段曲线基本平行的卸载曲线。此时立即再加载，则加载曲线沿原卸载曲线上升，以后的曲线基本与未经卸载的曲线重合。经过加载、卸载这一过程后，材料的比例极限和屈服强度提高了，而延伸率降低了，这称为冷作硬化。随着载荷的继续加大。拉伸曲线上上升的幅度逐渐减小，当达到最大值 (R_m) 后，试样的某一局部开始出现颈缩，而且发展很快，载荷也随之下降，迅速到达 F_m 点后，试样断裂。当载荷超过弹性极限时，就会产生塑性变形。金属的塑性变形主要是材料晶面产生了滑移，是由剪应力引起的。描述材料塑性的指标主要有材料断裂后的延伸率 A (δ) 和截面收缩率 Z (ψ) 来表示。标准中共定义了 12 种可测的拉伸性能，即六种延性性能分别为 A ， A_e ， A_{gt} ， A_g ， A_t 和 Z ，六种强度性能 R_{eH} ， R_{eL} ， R_p ， R_t ， R_f 和 R_m 。

序号	强度指标		塑性指标	
	符号	说明	符号	说明
1	R_{eH}	上屈服强度	A_{gt}	最大力总伸长率
2	R_{eL}	下屈服强度	A_g	最大力非比例伸长率
3	R_p	规定非比例延伸强度	A_e	屈服点延伸率
4	R_t	规定总延伸强度	A	断后伸长率
5	R_r	规定残余延伸强度	A_t	断裂总伸长率
6	R_m	抗拉强度	Z	断面收缩率

3.1 上屈服强度(R_{eH})和下屈服强度(R_{eL})的测定

图解方法 按标准规定的试验速率加载,记录力—延伸曲线,直至超过屈服阶段。按照定义在曲线上判定上屈服力和下屈服力的位置点,判定下屈服力时要排除初始瞬时效应的影响。上、下屈服力判定的基本原则如下:

- (1) 屈服前的第一个峰值力(第一个极大力)判为上屈服力,不管其后的峰值力比它大或小。
- (2) 屈服阶段中如呈现两个或两个以上的谷值力,舍去第一个谷值力(第一个极小值力),取其谷值力中之最小者判为下屈服力。如只呈现一个下降谷值力,此谷值力判为下屈服力。
- (3) 屈服阶段中呈现屈服平台,平台力判为下屈服力。如呈现多个而且后者高于前者的屈服平台,判第一个平台力为下屈服力。
- (4) 下屈服力必定低于上屈服力。

上述4条基本原则应该说是十分重要的,不仅对人工判定方法,而且对自动化测定方法中测定程序的编制有帮助。以测得的上和下屈服力分别计算 R_{eH} 和 R_{eL} 。

当规定了要求测定屈服强度性能,但材料在实际试验时并不呈现出明显屈服状态(如高强度材料),而呈现出连续的屈服状态,此种情况材料不具有可测的上(或下)屈服强度。则应测定规定非比例延伸强度($R_{p0.2}$),并注明材料无明显屈服。

3.2 规定非比例延伸强度(R_p)的测定

新标准中删去了旧标准中逐级施力的人工测量方法。仅采用图解方法。

- (1) **常规平行线方法** 此方法仅适用于具有弹性直线段的材料测定 R_p 。试验时,记录力—延伸曲线,直至超过 R_p 对应的力 F_p 。在记录得到的曲线图上图解确定规定非比例延伸力 F_p ,进而计算 R_p 。
- (2) **滞后环方法** 此种方法仅仅适用于不具有明显弹性直线段的材料测定 R_p 。试验时,对试样施加力,同时记录力—延伸曲线,加力至超过预期的规定非比例延伸强度后,将力卸除至约为所加力的10%,接着再施力直至进入力—延伸曲线的包迹线范围。正常情况下会画出一个完整的滞后环。然后经过滞后环两端点划直线和作该直线的平行线确定 F_p ,进而计算 $R_{p0.2} = \frac{F_{p0.2}}{S_0}$ 。

(3) **力—夹头位移方法** 此种方法测定的 R_p 为近似准确。因为,夹头位移(或横梁位移)不是仅仅由试样的平行长度的延伸所产生,而是包括了试样链的非弹性变形和链接间隙等。所以,仲裁试验不采用此种方法。试验时,记录力—夹头位移曲线,直至超过 F_p 。然后作平行线确定 F_p 的值,进而计算 R_p 。

3.3 抗拉强度 R_m 的测定

在旧标准中,测定抗拉强度比较简单,测出拉伸试验过程中的最高应力便是。故判定抗拉强度对应的最大力时,不能完全照搬过去习惯的判定方法。可采用两种方法测定抗拉强度。

图解方法 试验时,记录力—延伸曲线或力—位移曲线。在记录得到的曲线图上按定义判定最大力,对于连续屈服类型,试验过程中的最大力判为最大力 F_m ;对于不连续屈服类型,过了屈服阶段之后的

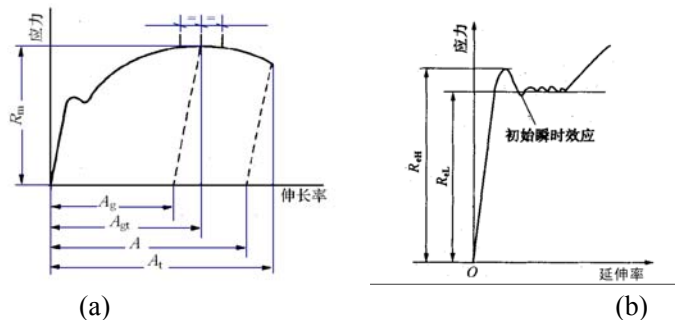


图 1-5 拉伸曲线示意图

最大力判为最大力 F_m ，由最大力计算抗拉强度 $R_m = \frac{F_m}{S_0}$ 。

3.4 最大力总伸长率(A_{gt})和最大力非比例伸长率(A_g)的测定和数据处理方法

图解方法 引伸计标距(L_e)应等于或近似等于试样标距(L_0)。试验时纪录力-延伸曲线，直至力值超过最大力点。测定最大力点的总延伸(ΔL_m)，计算 $A_{gt} = \frac{\Delta L_m}{L_e} \times 100$ 。从最大力总延伸中扣除弹性延伸部分

得到非比例延伸，扣除的方法见图1-5所示，用得到的非比例延伸计算非比例延伸率 A_g 。有些材料在最大力时呈现一平台。当出现这种情况，取平台的中点作为最大力对应的总伸长率。在实验报告中应报告引伸计标距。

3.5 断面收缩率Z的测定(圆形横截面)

由于试样拉断后，圆形横截面试样拉断后缩颈处最小横截面并不一定为圆形横截面形状，但测定的方法基础是建立在假定为圆形横截面形状上。这样，以测定试样原始横截面积(S_0)与断裂后缩颈处最小横截面积(S_u)之差与原始横截面积之比计算断面收缩率。在缩颈最小处两个相互垂直方向上测量直径，取其平均值计算横截面积，必要时将断裂部分在断裂处对接在一起后进行测量。

可以直接计算断面收缩率 $Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$ 。

3.6 断后伸长率(A)的测定

(1) 人工方法 试验前在试样平行长度上标记出原始标距(L_0) (误差 $\leq \pm 1\%$)和标距内等分格标记(一般标记10个等分格)。试样拉断后，将试样的断裂处对接在一起，使其轴线处于同一直线上，通过施加适当的压力以使对接严密。用量具测量断后标距。数据不进行修约，然后计算断后伸长率(A)。

(2) 图解方法(包括自动方法) 应用引伸计系统记录力-延伸曲线，或采集力-延伸数据，直至试样断裂。读取断裂点的总延伸，扣除弹性延伸部分后得到的非比例延伸作为断后伸长。扣除的方法是，过断裂点作平行于曲线的弹性直线段的平行线交于延伸轴，交点即确定了非比例延伸，参见图1-5。引伸计的标距(L_e)应等于试样的原始标距(L_0)。

3.7 断裂总伸长率(A_t)的测定

仅采用图解方法，试验时记录力-延伸曲线，直至试样断裂。以断裂点的总延伸计算 A_t 。

3.8 性能测定结果数值的修约

试验结果数值应按照下表的要求进行修约。其中强度性能 R_{eH} , R_{eL} , R_p , R_t , R_r 和 R_m 的修约间隔与旧标准的相同。而延伸性能 A_e , A_{gt} , A_g , A_t , A 和 Z 的修约间隔与旧标准不同，新标准中规定 A_e 的修约间隔为0.05%，其余五种性能的修约间隔均规定为0.5%。修约的方法按照GB/T 8170。

试验结果数值的修约间隔

性能	范围	修约间隔
$R_p; R_m$	$\leq 200 \text{ N/mm}^2$	1N/mm ²
	200 N/mm ² ~ 1000 N/mm ²	5 N/mm ²
	> 1000 N/mm ²	10N/mm ²
A_{gt}, A		0.5%

4、Instron 电子试验机软件操作流程

4.1 开机登陆，启动测试软件

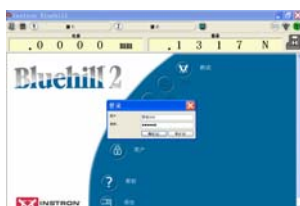


图 1-6 登录界面



图 1-7 测试窗口



图 1-8 程序选择窗口

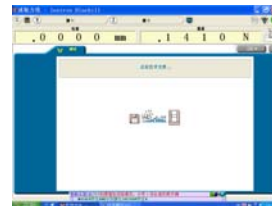


图 1-9 程序载入口

电子试验机软件 Bluehill2 登录界面，登录用户名为“学生”或“Student”，登录密码为“83792247”。登录后显示出 Bluehill2 软件的测试窗口，可以直接点击测试进入测试程序。

步骤 1：选择实验 2 金属拉伸实验（圆形试样）或实验 2 金属拉伸实验（矩形试样），选择后显示出正打开文件窗口，请稍等待片刻。参见图 1-8 与图 1-9。

4.2 输入参数，安装试样

步骤2：输入样品文件名，该文件名为实验结束时测试结果的保存文件的名称。输出文件夹可以选择为桌面。完成步骤2后请点击“下一步”。试验开始前请输入学号和姓名。正确输入后点击下一步进行“试测试前”。实验前测量试样的直径和试样长度（夹具的间距）的测量值。完成后点击下一步进行试验前提示窗口。



图 1-10

4.3 完成设置，观察加载过程

测试前请、按窗口中提示完成限位保护、安装试验、载荷调零、重设标距及请指导教师检查确认后，按下“开始”开始测试。

在加载过程中应注意观察试样在各阶段的应力-应变变化情况和试样的变形情况。

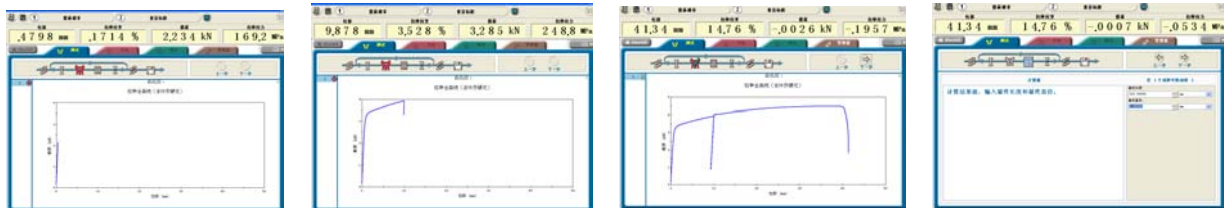


图 1-11

单击“开始”后程序进入测试窗口，同时开始绘制应力-应变曲线，当伸长量达到 10mm 时，由程序控制自动卸载，进行冷作硬化试验，请注意观察实验现象，见图 1-11。

4.4 确定最大力和下屈服强度

试样断裂后，程序自动进入计算前窗口，**取下试样**，请输入断后试样长度和最小直径。

点击“下一步”，程序自动弹出编辑光标选中点窗口，请同学根据应力应变实测曲线和标准的定义用编辑光标选择最大力，用编辑光标选择确定最大力和下屈服强度。

- (1) 用编辑光标选择最大力,点击下一步确定, 见图 1-12 确定最大力;
- (2) 用编辑光标选择下屈服强度点击下一步确定, 图 1-13 确定下屈服强度;
- (3) 光标选择点下屈服强度点击下一步确定,

(4) 已选择点变为蓝色,如果你确认没有问题,点击“完成”,将选择点输入程序。程序界面显示完成后的曲线和测试结果,见图 1-14。

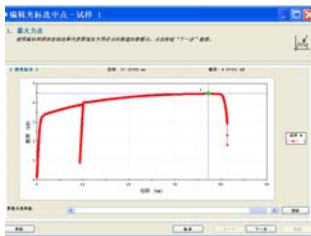


图 1-12 确定最大力

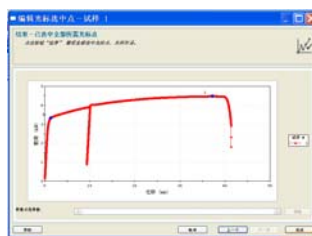


图 1-13 确定下屈服强度

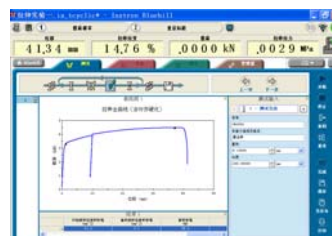


图 1-14 确认完成

4.4 完成报告

点击“下一步”，进入试样失效形态输入窗口，请输入试样断裂状态（文本），见图 1-15。

点击“下一步”，进入正在完成窗口，点击“结束样品”完成实验，见图 1-16。程序弹出“开始另外一个新样品？”对话框，请选择“否”，见图 1-17。



图 1-15



图 1-16



图 1-17

实验数据保存为数据文件，同学可以通过选择文件打开查看实验记录和测试软件完成的实验报告，见图 1-18，如需拷贝请指导教师帮助完成。**不得擅自使用移动硬盘！**



图 1-18

5、金属材料的拉伸（圆形截面低碳钢）实验步骤

拉伸试样分比例试样和非比例试样两种。比例试样系按公式 $L_0 = K\sqrt{S_0}$ 计算而得。式中 L_0 为标距， S_0 为标距部分原始截面积，系数 K 通常为 5.65 和 11.3，前者称为短试样（ $L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$ ），后者称为长试样（ $L_0 = 11.3\sqrt{S_0}$ ）。据此，短、长圆形试样的标距长度 L_0 分别等于 $5d_0$ $10d_0$ 。非比例试样的标距与其原横截面间无上述一定的关系。

5.1 确定标距

选择适当的标距，并测量 L_0 的实际值。为了便于测量 L_u ，可将标距均分为若干格。

5.2 试样的测量

原始横截面积（ S_0 ）的测定，原始横截面积的测定应准确到 $\pm 1\%$ 。用游标卡尺在试样标距的两端和中间的两个截面上测量直径，每个截面在互相垂直的两个方向各测一次，取其平均值，测量每个尺寸应准确到 $\pm 0.05\%$ 。并用三个平均值中最小者作为计算截面积的直径 d ，并计算出 S_0 值。

5.3 设备的准备

打开主机电源，静候数秒，以待机器系统检测；

打开 Bluehill 测试软件，选取或编制相应测试程序（或直接在电脑桌面上双击程序图标）；并输入试样的相关参数。

5.4 安装试件

根据试样长度调整试验机的上、下夹头的位置，达到适当的位置后，试件先安装在试验机的下夹头内，**试样安装必须正确，防止偏斜和夹持部分过短的现象。**试验机调零后，再把试件上夹头夹紧。

5.5 加载

正式加载，并记录各项目试验参数，注意观察试样在试验过程中各阶段的现象与变化情况。

试样断裂后，立即检查试验机是否自动停止加载，如试验机未能停止运行，点击“停止”终止测试并取出试样，如果还不能停止，马上按下**紧急按钮**。

5.6 保存数据

保存测试结果文件，另存为 *.LX 文件，文件名请使用**学号**。

5.7 处理试验数据

将断裂试件的两断口对齐并尽量靠紧，测量断裂后标距段的长度 L_u ；测量断口颈缩处的直径 d_u ，计算断口处的横截面积 S_u 。

5.8 整理实验现场

将断裂试件放到指定的位置，将夹头和试验机清理干净，将工具放回原位置。

6、思考题

- (1) 伸长与延伸的区别是什么？
- (2) 请修约以下数据 $A = 23.65\%$ $A = 23.652\%$ $R_p = 457\text{MPa}$ $R_p = 457.6\text{MPa}$
- (3) 断裂总伸长率与断后伸长率的区别是什么？如何测定？
- (4) 为何在拉伸实验中必须采用标准试件或比例试件？

7、安全注意事项



常规安全预防措施

材料试验涉及由于载荷高、移动速度快和贮存的能量而带来的固有危险。必须清楚，所有的可移动和可操作部件都是潜在的危险，尤其是电动机械试验系统的移动横梁。一旦认为出现危险，立刻按下“紧急停止”按钮，停止试验并切断试样系统的电源。

仔细阅读所有相关手册并查看所有“警告”与“注意”。

确保将要在材料、组件或结构上使用的试验设置和实际试验不会对自己或他人造成危险。充分利用所有的机械和电子限位功能。这些限位可以防止作动缸活塞或移动横梁的移动超过需要的操作区域。同时为试样和设备提供保护以减少潜在的危险。最好的安全预防措施就是从将要使用的试验设备得到培训，并阅读“操作说明及参考手册”，充分了解试验设备。



危险 - 防止电缆损坏和意外断开

电缆的断开或损坏会引起控制信号和反馈信号丢失，导致不能形成闭环控制，可能会使作动缸或横梁迅速达到其动作极限。要防止所有电缆，尤其是传感器电缆的损坏。禁止将没有保护的电缆敷设在地面，或悬挂过度拉紧的电缆。电缆绕过拐角或穿过墙上开孔时要使用衬垫防止擦伤电缆。



挤压危险 - 安装或取出试样时要小心

安装或取出试样、组件或结构时，需要在夹具之间的危险区域工作。要始终避开夹具的夹块。作动缸或横梁移动时，要避开夹具之间的危险区域。确保安装或取出操作所需的作动缸或横梁动作移动缓慢，而且尽可能在低加载设置下取出。

为避免损伤试验机的卡板与卡头，同时防止铸铁试样脆断飞出伤及操作者，应注意：装卡试样时，横梁移动速度要慢，使试样下端缓慢插入下夹头的 V 形卡板中，不要顶到卡板顶部；试样下端不要装卡过长，以免顶到卡头内部装配卡板用的平台。

拆装引伸计时，要插好定位校销钉，试验时要拔出销钉，以免损坏引伸计。



危险 - 确保从计算机控制转换到手动控制时横梁不会产生移动，否则不要将试验系统置于脱机状态

当系统脱离计算机控制时，作动缸或横梁立即转为响应手动控制的状态。在转入手动控制之前，要确保控制的设置不会使作动缸或横梁产生意外的移动。

为保证试验顺利进行，试验时要读取正确的试验条件，严禁随意改动计算机的软件配置。



危险 - 运行闭环调整、波形程序块、或试验前，必须设置合适的限位

试验过程中，当作动缸或横梁的行程、加载力或应变达到试验系统中的操作上限和/或下限时，系统中包含的操作限位将停止运动或关闭系统。试验前，操作员正确设置操作限位可以减小损坏试验设备和系统的危险，以及对操作员的相应危险。



触电危险 - 移开电器设备保护盖之前，必须断开总电源

开启电器安全盖或更换保险丝之前，必须断开设备总电源。安全盖开启时不得接通电源。尽快装回保护盖。

实验 2 应变计的粘贴工艺

1. 实验目的

初步掌握常温用电阻应变片的粘贴技术。

要求掌握选片、粘贴、引线、质量检查、防护措施等方法。

为电阻应变测量实验做好在试件上粘贴应变片的准备工作。

2. 实验设备

试件；电阻应变计、胶水（502胶）、砂纸、万用电表、电烙铁、镊子、丙酮、导线、电阻应变仪。

3. 应变计的粘贴工艺

1. 构件测点部位的表面处理；2. 应变计的粘贴、固化；3. 导线的焊接；4. 应变计和引线的防护以及贴片质量检查等。这是电测技术中的一个关键环节，其中任何一道工序的质量未能保证，都将直接影响测试结果。

4. 实验步骤

4.1 应变计准备

贴片前，凭肉眼或借助放大镜进行对待用的电阻应变计进行外观检查，观察敏感栅有无锈斑，缺陷，是否排列整齐，基底和覆盖层有无损坏，引线是否完好。再用万用电表检查阻值，检查敏感栅是否有断路、短路，并进行阻值分选，对于共用温度补偿的一组应变计，阻值相差不得超过 $\pm 0.5 \Omega$ ，灵敏系数必须相同。

4.2 构件表面处理

对于钢铁等金属构件，首先是清除表面油漆、氧化层和污垢；然后磨平或锉平，并用细砂布磨光。通常称此工艺为“打磨”。打磨光洁度应达 $\nabla 5$ 左右。对非常光滑的构件，则需用细砂布沿 45° 方向交叉磨出一些纹路，以增强粘结力。打磨面积约为应变计面积的5倍左右。打磨完毕后，用划针轻轻划出贴片的准确方位。表面处理的最后一道工序是清洗。即用洁净棉纱或脱脂棉球蘸丙酮或其它挥发性溶剂对贴片部位进行反复擦洗，直至棉球上见不到污垢为止。

4.3 贴片

贴片工艺随所用粘结剂不同而异，用502胶贴片的过程是，待清洗剂挥发后，先在贴片位置滴一点502胶，用应变计背面将胶水涂匀，然后用镊子拨动应变计，调整位置和角度。定位后，在应变计上垫一层聚乙烯或四氟乙烯薄膜，用手指轻轻挤压出多余的胶水和气泡。待胶水初步固化后即可松开。

粘贴好的应变计应保证位置准确，粘结牢固、胶层均匀、无气泡和整洁干净。

4.4 导线的焊接与固定

粘结剂初步固化后，即可进行焊线。常温静态测量可使用双芯多股铜质塑料线作导线，动态测量应使用三芯或四芯屏蔽电缆作导线。

应变计和导线间的连接最好通过接线端子，将应变片引出线轻轻撩起与接线端子焊点间留一定的拉伸环，用电烙铁将应变片引出线与测量导线锡焊，焊点要求光滑小巧，防止虚焊。导线两端应根据测点的编号作好标记。

4.5 贴片质量检查

- (1) 外观检查：观察贴片方位是否正确，应变计有无损伤，粘贴是否牢固和有无气泡等；
- (2) 通路检查：用万用表检查应变片引出导线之间的阻值是否是 120Ω ，检查有无断路、短路；
- (3) 绝缘检查：用万用表检查应变片引出线与试件之间的电阻，应大于 $50 M\Omega$ 。

4.6 应变计及导线的防护

粘结剂受潮会降低绝缘电阻和粘结强度，严重时会使敏感栅锈蚀；酸、碱及油类浸入甚至会改变基底和粘结剂的物理性能。为了防止大气中游离水分和雨水、露水的浸入，在特殊环境下防止酸、碱、油等杂质侵入，对已充分干燥、固化，并已焊好导线的应变计，应涂上防护层。常用室温防护剂有凡士林、蜂蜡、硅橡胶、环氧树脂。

5. 实验报告要求

简述贴片、接线、检查等主要步骤。

实验 3 电阻应变计的热输出

电阻应变式传感器是实际工程中应用较广的传感器之一,将电阻式应变片牢固粘贴到各种弹性敏感元件上,可构成测量位移、加速度、力、力矩、压力等参数的电阻应变式传感器。它的主要优点是:传感器结构简单、使用方便、性能稳定可靠、灵敏度高、测量速度快、适合静态和动态测量等,易于实现测量过程自动化和多点同步测量。在机械、电力、航空、化工、建筑等领域中有着广泛的应用。但是由于温度变化引起应变片电阻变化对测量精度影响很大。通常由于温度变化引起的电阻应变计的附加应变与试件应变具有相同的数量级,所以不可忽视。

1. 实验目的

深入了解电阻应变计的温度特性及温度补偿的重要性和必要性。

掌握电阻应变计的温度特性的测定方法。

2. 电阻应变计的温度特性

当应变计安装在可以自由膨胀的试件上,且试件不受外力作用。若环境温度不变,则应变计的应变为零。若环境温度变化,则应变计产生应变输出。这种由于温度变化而引起的应变输出,称为应变计的热输出。

产生应变计热输出的原因主要是:

- (1) 应变计敏感栅材料本身的电阻温度系数引起的;
- (2) 由于敏感栅材料与试件材料的线膨胀系数不同,使敏感栅产生了附加变形。

电阻应变计阻值变化产生热输出

温度变化引起电阻应变计阻值变化由于温度变化引起电阻应变计敏感栅阻值变化而产生附加应变

为

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\Delta R_{\alpha} / R}{K} = \alpha \frac{\Delta t}{K} \quad (3-1)$$

式中: K ——应变计的灵敏度系数。

α ——应变计敏感栅材料的电阻温度系数;

膨胀系数不同而产生热输出

当温度变化时,牢固粘贴在试件上的应变计与试件在长度方向上一起产生变化,由于试件材料与电阻应变计敏感栅材料的线膨胀系数不同,将产生附加应变。温度变化时,由于膨胀系数不同而产生热输出

出为:

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{\Delta R_{\beta} / R_0}{K} = (\beta_{\text{试样}} - \beta_{\text{丝材}}) \Delta t \quad (3-2)$$

由温度变化而引起电阻应变计总的虚假应变(热输出)为:

$$\varepsilon_t = \alpha \frac{\Delta t}{K} + (\beta_{\text{试样}} - \beta_{\text{敏感栅}}) \Delta t \quad (3-3)$$

式中: $\beta_{\text{试样}}$ ——试样的线膨胀系数 $\beta_{\text{敏感栅}}$ ——敏感栅的线膨胀系数

这个温度引起的应变测量误差(热输出)除与环境温度变化有关外,还与电阻应变片本身的性能参数(K 、 α 、 $\beta_{\text{敏感栅}}$)以及试件的线膨胀系数 $\beta_{\text{试样}}$ 有关。由于这些因素实际上难以测量准确,热输出还与其他因素有关,因此采用实验测定的热输出曲线的方法。

3. 实验设备

电阻应变计、导线、电阻应变仪、烘箱、温度计。

4. 实验步骤

准备试样,打磨至光洁度达 $\nabla 5$ 左右,有 45° 交叉纹,用丙酮清洗干净;将待用的电阻应变计分别粘贴在不锈钢、钢材、铝、石英玻璃等试样上,按三线法接至应变仪工作测试桥臂;将试样放入烘箱内,补偿片置于室温环境下(温度不变化);将电阻应变仪调节至零,烘箱缓慢升温,每隔 10°C 测量一次读数,测量至 100°C ;绘制热输出曲线,计算平均热输出系数。

实验 4 电阻应变计测量原理实验指导

1. 实验目的

了解用电阻应变计测量应变的原理；

了解电阻应变计测量电桥的原理, 掌握电阻应变计的使用；

进行电阻应变计的操作练习, 熟悉测量电桥的接线方法；

测定等强度梁上已粘贴应变计处的应变, 验证等应力梁各横截面上应变(应力)相等；

掌握应变片在测量电桥中各种接线方法的工作原理和性能。

2. 实验设备

等强度梁实验装置； 数字式电阻应变计。

3. 实验装置及原理

4.3.1 金属的电阻应变效应

电阻应变计习惯称为应变片, 是最常用的测力学量传感元件, 用应变片测试时, 应变片要牢固地粘贴在测试体表面, 当测件受力而发生变形时, 应变片的敏感栅随同变形, 其电阻值也相应发生变化; 这种现象称为**金属的电阻应变效应**。通过测量电路将其转换成电信号输出。长度为 l 、截面积为 S 、电阻率为 ρ 的匀质金属丝, 其电阻值 R 为 $R = \rho L/S$, 等式两边取微分, 得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \quad (1) \text{ 式中: } \frac{dR}{R} \text{——电阻的相对变化; } \frac{d\rho}{\rho} \text{——电阻率的相对}$$

变化; $\frac{dl}{l}$ ——金属丝长度相对变化, 且 $\varepsilon = \frac{dl}{l}$ 称为金属丝长度方向上的应变或轴向应变; $\frac{dS}{S}$ ——截面积的相对变化。

由材料力学知 $\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l}(1+2\mu) = \frac{d\rho}{\rho} + (1+2\mu)\frac{dl}{l}$ 。式中, 前一项是由金属丝变形后单位电阻率变化引起的; 后一项是由金属丝变形后几何尺寸发生变化所

引起的。金属丝变形后电阻率变化 $\frac{d\rho}{\rho}$ 与单位体积变化 $\frac{dV}{V}$ 成

$$\text{正比即: } \frac{d\rho}{\rho} = m \frac{dV}{V}$$

在单向应力状态下 $\frac{dV}{V} = (1-2\mu)\frac{dl}{l}$

$$\frac{\Delta R}{R} = [(1+2\mu) + m(1-2\mu)] \frac{dl}{l} = K_s \varepsilon。 \text{比例系数 } K_s \text{ 称为金属}$$

丝的**应变灵敏系数**(单位应变引起的电阻相对变化)。在常温下, 金属丝电阻的相对变化与金属丝的伸长或缩短之间存在比例关系。

4.3.2 测量电桥的基本特性

惠斯登电桥是最常用的非电量测量电路之一, 习惯称为测量电桥, 如图4-1所示。测量电桥以电阻应变计作为桥臂组成电桥电路, 将应变计的电阻变化转化为电压或电流信号。

设电桥的四个桥臂上接上应变计, 电阻分别为 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0 = 120\Omega$, 如果桥臂电阻改变 ΔR_1 、

$$\Delta R_2、\Delta R_3、\Delta R_4, \text{ 则输出电压为 } u_i = \frac{u_0}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{u_0}{4} K_s (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

式中: u_0 为电桥的桥压; u_i 为电桥的输出电压; K_s 为应变计的灵敏系数, 即, $\Delta R_i / R_0 = K_s \varepsilon_i$; ε_i 分别

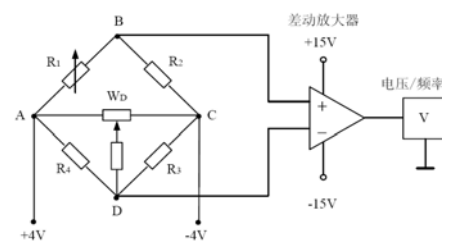


图 4-1 测量电桥电路

为应变计 R_i 所感受的应变值。由上式可见，测量电桥有如下特性：

两相邻桥臂上应变计的应变相减。

应变符号相同时，输出应变为两邻桥臂应变之差；反之为两相邻桥臂应变之和。

两相对桥臂上应变计的应变相加。

应变符号相同时，输出应变为两相对桥臂应变之和；反之为两相对桥臂应变之差。

电阻应变计的应变读数实际上就是测量电桥中的四个桥臂应变的代数和，所以合理地、巧妙地利用测量电桥的特性，增大应变读数，提高测试灵敏度，并且通过合理的组桥方法，可以测出复杂受力杆件中的内力(应力)分量。

4.3.3 温度的影响与补偿

在测量时，当温度发生变化时，电阻应变计将产生热输出 ϵ_t ，如果温度升高 1°C ， ϵ_t 即可达数十微应变。因此，在应变计电测中，必须消除热输出应变 ϵ_t ，**这十分重要**。为达到完全补偿，需满足下列三个条件：

- (1) R_1 和 R_2 须属于同一批号的，即它们的电阻温度系数 α 、线膨胀系数 β 、应变灵敏系数 K_s 都相同，两片的初始电阻值也要求相同；
- (2) 用于粘贴补偿片的构件和粘贴工作片的试件二者材料必须相同，即要求两者线膨胀系数相等；
- (3) 两应变片处于同一温度环境中。

根据测量电桥特性，如果将两个电阻应变计接入电桥的相邻桥臂，或将四个应变计分别接入电桥的四个桥臂，只要每一个电阻应变计的温度输出 (ϵ_t) 相等，即要求电阻应变计相同，被测构件材料相同，所处温度场相同，则测量电桥输出中就消除了 ϵ_t 的影响，达到完全补偿。

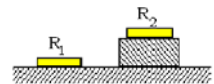
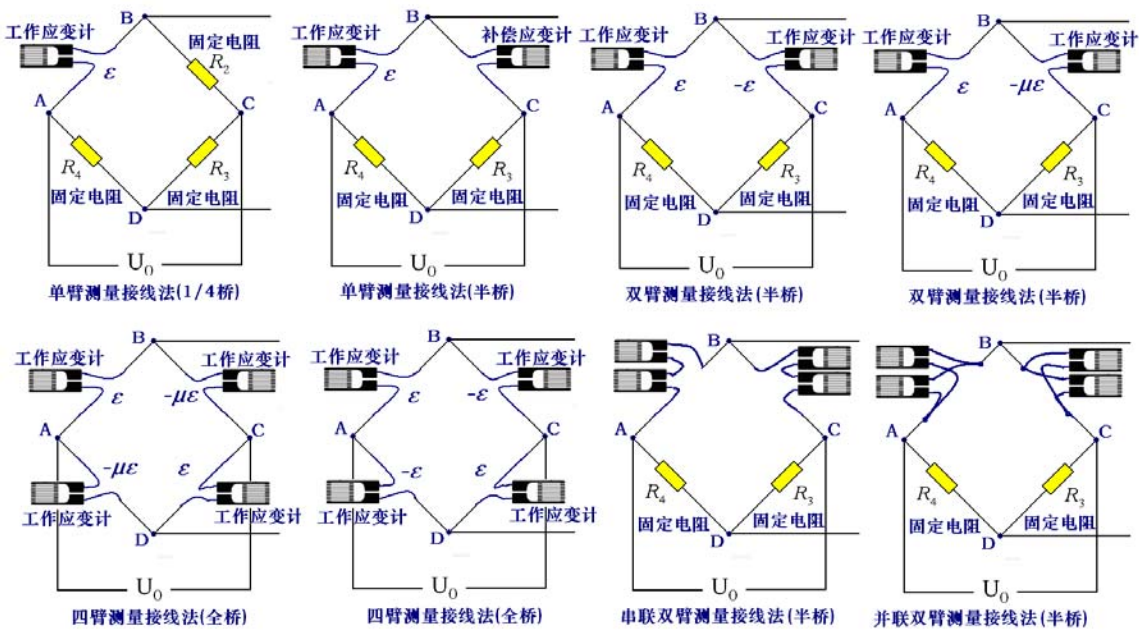


图 4-2

4.3.4 电阻应变计在测量电桥中的接线方法

应变计在测量电桥中有各种接法。实际测量时，根据电桥基本特性和不同的使用情况，采用不同的接线方法，以达到以下目的：1. 实现温度补偿；2. 从受力复杂的构件中测出所需要的某一应变分量；3. 提高被测物体应变的读数，提高测量的灵敏度。为了达到上述目的，需要充分利用电桥的基本特性，精心设计应变计在电桥中的接法。

在测量电桥中，根据不同的使用情况，各桥臂的电阻可以部分或全部是应变计。测量时，应变计在电桥中，常采用以下几种接线方法：



惠斯登电桥 应变计的几种常用接法

图4-3 测量电桥的接线方法

4.3.5 单臂测量接线法

若在测量电桥的桥臂AB上接电阻应变计，而另外三个桥臂BC、CD和DA接固定的标准电阻(R_0)，则称为单臂测量接线法(常称为1/4桥)，此接法无温度补偿作用，仅仅适用于瞬态信号的测试。

4.3.6 单臂半桥测量接线法(补偿块补偿法)

此方法是准备一个其材料与被测构件相同且不受外力的补偿块，并将它置于构件被测点附近，使补偿片与工作片处于同一温度场中。在构件被测点处粘贴电阻应变计，称工作应变计(简称工作片)，接入电桥的AB桥臂，另外在补偿块上粘贴一个与工作应变计规格相同的电阻应变计称温度补偿应变计(简称补偿片)，接入电桥的BC桥臂，在工作过程中补偿块不承受应变，仅随温度发生变形。由于 R_1 与 R_2 接入电桥相邻臂上，造成 ΔR_{1t} 与 ΔR_{2t} 相同。在电桥的CD和DA桥臂上接入固定电阻(标准电阻) R_0 ，称为单臂半桥测量接法(常称为半桥外补偿法)组成等臂电桥。根据电桥理论可知，其输出与温度无关。当工作应变片感受应变时，电桥将产生相应输出电压。

4.3.7 双臂半桥测量接线法(工作片补偿法)

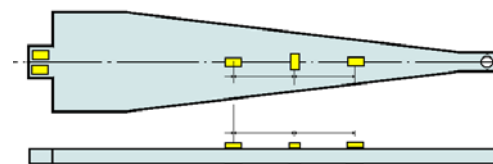
在同一被测试件上粘贴几个工作应变计，使用两个差动的工作应变片(符号相反)将它们适当地接入电桥中(比如相邻桥臂)。如取等强度梁上、下表面各一片应变片，此时，电阻应变计的应变读数与温度无关为 $\varepsilon_d = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ 。当试件受力且测点环境温度变化时，每个应变计的应变中都包含外力和温度变化引起的应变，根据电桥基本特性，在应变计的读数应变中能消除温度变化所引起的应变，从而得到所需测量的应变这种方法叫工作片补偿法(常称为半桥自补偿法)。在该方法中，工作应变计既参加工作，又起到了温度补偿的作用。

4.3.8 四臂全桥测量接线法(工作片补偿法)

在测量电桥的四个桥臂上全部接工作应变片，称为全桥接线法。测量电桥的四个桥臂所接工作应变计感受的应变分别为 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 。亦电阻应变计的应变读数为 $\varepsilon_d = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$ 。

4.3.9 等应力梁

等强度梁如图所示，梁厚为 h ，梁长为 l ，固定端宽为 b_0 ，自由端宽为 b 。梁的截面成等腰三角形，集中力 F 作用在三角形顶点。梁内各横截面产生的应力是相等的，表面上任意位置的应变也相等，因此称为等应力梁，其应变为 $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6Fl}{b_0 h^2 E}$ 。等应力梁结构简单，加工容易，灵敏度高，常用于小压力测量中。



等强度梁及电阻应变计贴片位置示意图

图 4-4

4. 实验步骤

- (1) 测量试件尺寸，拟定实验方案，确定各项要求的组桥方式、接线和设置电阻应变仪参数；
- (2) 选择接单臂测量接线法、单臂半桥测量接线法、双臂半桥测量接线法、四臂全桥测量接线法、串并联测量连线；
- (3) 检查、调零及试加载，正式分级加力前，记录下电阻应变仪的初始读数或将读数清零；
- (4) 每加载一次记录一次应变仪的读数，实验至少重复四次，如果数据重复稳定即可；
- (5) 数据通过后卸载、关闭电源、拆线并整理所用设备。

5. 试验结果处理

- (1) 数据处理，计算出以上各种测量方法下， ΔF 所引起的应变的平均值 $\Delta \varepsilon_{d_{均}}$ ，并计算它们与理论应变值的相对误差；
- (2) 比较各种测量接线法电路的测量灵敏度，并分析各种测量方法中温度补偿的实现方法。
- (3) 对几组实验数据求平均值、测试误差与偏差、桥路测量灵敏度。

实验 5 材料弹性常数(E)实验指导

1. 实验目的

1. 用电测方法测定低碳钢的弹性模量 E 及泊松比 μ ;
2. 验证虎克定律;
3. 掌握电测方法的组桥原理与应用。

2. 实验设备

Instron3367 电子拉力试验机; 静态电阻应变仪; 游标卡尺。

3. 试件

平板试件多用于电测法, 试件形状尺寸及贴片方位如图所示。为了保证拉伸时试验结果的准确性, 同时在试件两面粘贴应变片, 以消除弯曲带来的误差。

4. 实验原理

(1) 测定材料弹性模量 E 一般采用比例极限内的拉伸实验, 材料在比例极限内服从虎克定律, 其荷载与变形关系为:

$$\Delta L = \frac{\Delta F L_0}{EA_0} \quad (5-1)$$

若已知荷载 ΔF 及试件尺寸, 只要测得试件伸长 ΔL 即可得出弹性模量 E 。

$$E = \frac{\Delta F L_0}{(\Delta L) A_0}$$

由于本实验采用电测法测量, 其反映变形测试的数据为应变增量, 即

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

所以 (5-1) 成为:

$$E = \frac{\Delta F}{A_0} \cdot \frac{1}{\Delta \varepsilon} \quad (5-2)$$

式中: ΔF ——荷载增量, kN;

A_0 ——试件的横截面面积, mm^2

为了验证力与变形的线性关系, 采用增量法逐级加载, 分别测量在相同荷载增量 ΔF 作用下试件所产生的应变增量 $\Delta \varepsilon$ 。

增量法可以验证力与变形间的线性关系, 若各级荷载量 ΔF 相等, 相应地由应变仪读出的应变增量 $\Delta \varepsilon$ 也大至相等, 则线性关系成立, 从而验证了虎克定律。

用增量法进行试验还可以判断出试验是否有错误, 若各次测出的变形不按一定规律变化就说明试验有错误, 应进行检查。

加载方案应在测试前就拟定好。最大应力值要在材料的比例极限内进行测试, 故最大的应力值不能超过材料的比例极限, 一般取屈服强度 (R_e) 的 70%~80%。取实验荷载: $F_{\max} = 0.8A_0 R_e$, 加载级数一般不少于 5 级。

(2) 材料在受拉伸或压缩时, 不仅沿纵向发生纵向变形, 在横向也会同时发生缩短或增大的横向变形。由材料力学知, 在弹性变形范围内, 横向应变 ε_y 和纵向应变 ε_x 成正比关系, 这一比值称为材料的泊松比, 一般以 μ 表示, 即

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right|$$

实验时, 如同时测出纵向应变和横向应变, 则可由上式计算出泊松比 μ 。

5. 试验方法与步骤

(1) 用游标卡尺测量试件截面尺寸, 分别测量试样平行段的上、中、下截面尺寸, 计算截面积面积, 取三次的平均值作为初始横截面面积。

(2) 在试件中间截面沿纵向轴线及其垂直方向分别贴三个电阻应变片; 在温度补偿块上贴一个电阻应

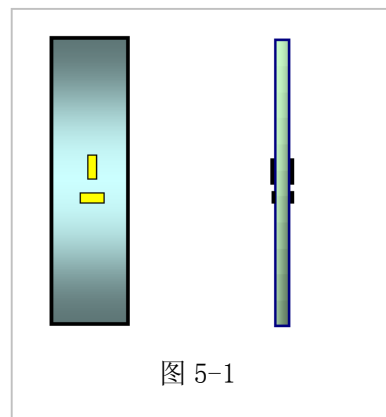


图 5-1

变片。

- (3) 将试件夹于试验机的下夹头，用半桥接桥方法，把三个工作片及补偿片接至电阻应变仪。
- (4) 打开电脑，启动 Bluehill 控制软件，选择学生用户，输入密码进入。
- (5) 选择弹性模量测试方法，启动后输入样品文件名，如图 5-2，然后单击“下一步”。
- (6) 输入学号、姓名，见图 5-3，然后单击“下一步”。



图 5-2

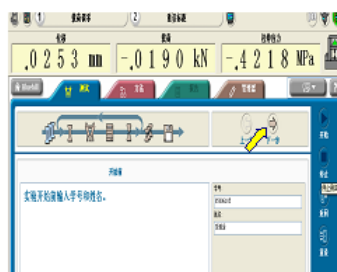


图 5-3



图 5-4

- (7) 输入试样宽度和厚度，图 5-4。然后单击“下一步”。
- (8) 按界面提示要求进行载荷调零和重设标距，见图 5-5。
- (9) 试件上夹头夹紧后，开始加载，单击“开始”，图 5-6。

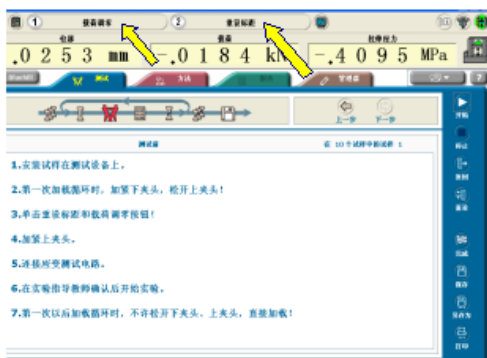


图 5-5



图 5-6

- (10) 每加一级载荷，持荷 30 秒，在此期间读出并记下各测点的应变数值和载荷数值，图 5-7。
- (11) 第一遍测试结束后，界面如图 5-8 所示，然后单击“下一步”。重新回到图 5-2 界面。再按上述操作步骤重新开始实验，共做四次。
- (12) 将后三次的测试结果代入有关公式进行计算弹性模量 E 和横向变形系数 μ 。
- (13) 将后三次的测试结果，再用最小二乘法求出 E 和 μ ，和用有关公式计算的结果进行对比。

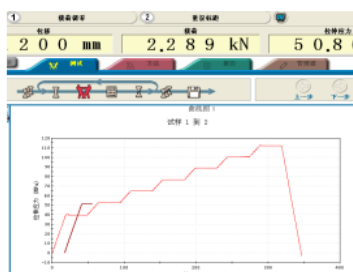


图 5-7

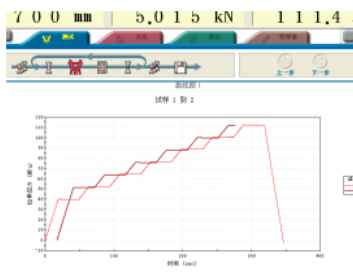
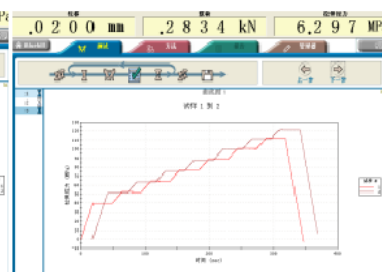


图 5-8



6. 思考题

1. 怎样验证虎克定律？
2. 为何沿试件纵向轴线方向两面贴两片电阻应变片？

实验6 弯曲正应力分布实验

1. 实验目的

测定梁纯弯曲时的正应力分布规律，并与理论计算结果进行比较。
初步掌握电测的基本方法。

2. 实验设备

1、纯弯曲梁加载设备 2、静态电阻应变仪 YJ-28 3、矩形截面梁

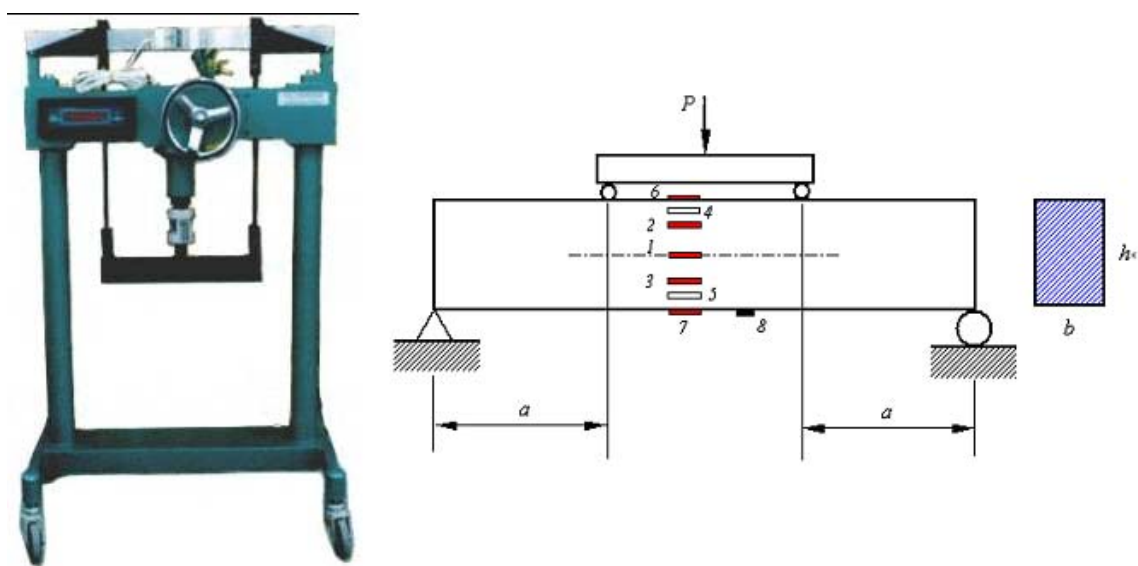


图 7-1

3. 实验原理

本实验采用低碳钢制成的矩形截面梁，如图 7—1 所示，在梁承受纯弯曲的某一截面上，沿梁横截面的高度，每隔 $h/4$ 贴上平行于轴线方向电阻应变片， R_6 和 R_7 分别贴在梁的顶部和底部， R_2 、 R_3 贴在 $Y = \pm \frac{h}{4}$ 的位置， R_1 在中性轴上。当梁受弯曲时，即可测出各点处的轴向应变 $\epsilon_{i实}$ ($i=1、2、3、4、5、6、7$)。由于梁的各层纤维之间无挤压，根据单向应力状态的虎克定律，求出各点的实验应力 为：

$$\sigma_{i实} = E \cdot \epsilon_{i实} \quad (i=1、2、3、4、5、6、7、8)$$

已知梁受纯弯曲时的正应力公式为

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_z}$$

实验采用增量法加载。先选取适当的初荷载 F_0 ，然后估算最大荷载 F_{max} ，它大约相当于最大弯曲正应力

等于许用应力时的荷载，即 $F_{max} \leq \frac{bh^2}{3a} [\sigma]$ 。由 F_0 至 F_{max} 可分成四级或五级加载，每增加等量的载荷

ΔF ，测得各点相应的应变增量为 $\Delta \epsilon_{i实}$ ，求出 $\Delta \epsilon_{i实}$ 的平均值 $\overline{\Delta \epsilon_{i实}}$ ，依次求出各点的应力增量 $\Delta \sigma_{i实}$ 为：

$$\Delta\sigma_{i实} = E\overline{\Delta\varepsilon_{i实}} \quad (6-1)$$

把 $\Delta\sigma_{i实}$ 与理论公式算出的应力增量:

$$\Delta\sigma_{i理} = \frac{\Delta M \cdot y_i}{I_z} \quad (6-2)$$

加以比较从而验证理论公式的正确性。从图 7—1 的试验装置可知, ΔM 应为:

$$\Delta M = \frac{1}{2} \Delta F \cdot a \quad (6-3)$$

4. 实验步骤

- (1) 根据低碳钢的许用应力确定最大荷载, 并根据最大荷载确定每次加载的增量。
- (2) 将各工作片、补偿片接入电阻应变仪, 各点预调平衡。
- (3) 请指导教师检查后, 开始预加载, 检查加载设备和应变仪是否处于正常状态。
- (4) 测试时要缓慢加载, 记下每次荷载的增量 ΔF 和相应的应变增量 $\Delta \varepsilon$; 注意应变是否按比例增长, 每个测点加载后卸载, 重复三次, 重复加载中出现的误差大小, 可表明测量的可靠程度, 应获得具有重复性的可靠试验结果; 测完一点再换另一点, 直至全部测完。
- (5) 小心操作, 应特别注意不要超载, 最大力不超过 **5 kN**, 以免将压坏钢梁。
- (6) 实验结束后, 应将导线从电阻应变仪上拆除, 整理好放回原处。

5. 实验结果的处理

- (1) 根据实验结果, 逐点算出应变增量平均值 $\overline{\Delta\varepsilon_{i实}}$ 代入公式 (6-1) 求出 $\Delta\sigma_{i实}$ 。
- (2) 根据公式 ((6-2)、6-3) 计算各点的理论弯曲应力值 $\Delta\sigma_{i理}$ 。
- (3) 实验值与理论值进行比较, 计算相对误差。
- (4) 绘制应变与梁高的分布曲线, 应变分布是否满足纯弯曲平截面假定?
- (5) 对最后两次实验数据的可靠性进行评价。

6. 思考题

- (1) 实验结果和理论计算是否一致? 如不一致, 其主要影响因素是什么?
- (2) 弯曲正应力的大小是否会受材料弹性系数 E 的影响?
- (3) 在增量法测量中, 未考虑梁的自重, 是不是应该考虑? 还是忽略不计?
- (4) 如何测量钢梁的横向变形系数?
- (5) 什么是测试结果的可靠程度, 如何提高? 结合本次实验数据具体说明。

实验 7 薄壁圆管弯扭组合应力测定实验

1. 实验目的

- 1.1 用应变花测定薄壁圆管在弯扭组合条件下一点处的主应力和主方向。
- 1.2 测定薄壁圆管在弯扭组合条件下的弯矩、扭矩和剪力等内力。*
- 1.3 进一步熟悉和掌握不同的桥路接线方法。*
- 1.4 初步了解在组合变形情况下测量某一内力对应应变的方法。

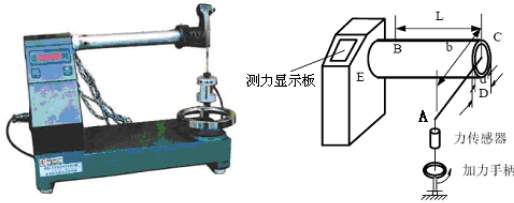


图 7-1 弯扭联合实验装置图

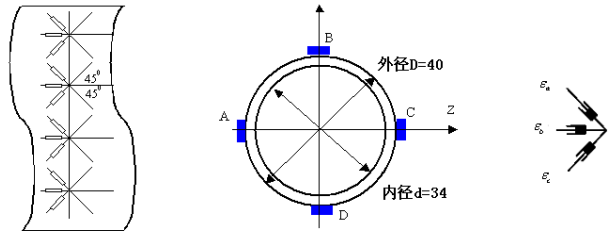


图 7-2 三个方向已知的应变 ε_a 、 ε_b 及 ε_c

2. 实验设备

- (1) 电阻应变仪 YJ-28。
- (2) 薄壁圆管弯扭组合装置，见图 7-1。

本次试验以铝合金薄壁圆筒 EC 为测试对象，圆筒一端固定，另一端连接与之垂直的伸臂 AC，通过旋转加力手柄将集中荷载施加在伸臂的另一端由力传感器测出力的大小。载荷作用在伸臂外端，其作用点距圆筒形心为 b ，圆筒在载荷 F 作用下为弯扭组合变形。要测取圆筒上 B 点（它到载荷 F 作用面距离为 L ）处的主应力大小和方向。试样弹性模量 $E = 72\text{GPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.33$ ，试样尺寸见试样参数表。

试样参数表

外径 D (mm)	内径 d (mm)	b (mm)	L (mm)
40	34	200	300

3. 实验原理

3.1 确定主应力和主方向

平面应力状态下任一点的应力有三个未知数（主应力大小及方向）。应用电阻应变仪及应变花可测得一点沿不同方向的三个应变值，例如图 7-2 所示的三个方向已知的应变 ε_a 、 ε_b 及 ε_c 。根据这三个应变值可以计算出主为 ε_1 及 ε_2 的大小和方向。因而主应力的方向亦可确定（与主应变方向重合）。

弯扭组合下，圆管表面的点处于平面应力状态，根据应变分析，沿与 x 轴成 α 的方向的线应变

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\alpha - \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin 2\alpha \quad (7-1)$$

主应变由下式计算

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \\ \varepsilon_2 &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \end{aligned} \quad (7-2)$$

两个互相垂直的主方向由下式确定

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = -\frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (7-3)$$

把三个已知方向的应变 ε_a 、 ε_b 和 ε_c 间隔一定的角度。组成所谓“应变花”图 7-3 即为常见的“直角应变花”。 a 、 b 、 c 三个应变片的角度分别为 -45° 、 0° 和 45° ，代入式 (7-1) 得到这三个方向的线应变分别是

$$\begin{aligned} \varepsilon_{-45^\circ} &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\gamma_{xy}}{2} \\ \varepsilon_{0^\circ} &= \varepsilon_x \\ \varepsilon_{45^\circ} &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{aligned}$$

从以上三式中解出

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_{0^\circ} \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_{45^\circ} + \varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ} \\ \gamma_{xy} &= \varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{45^\circ} \end{aligned}$$

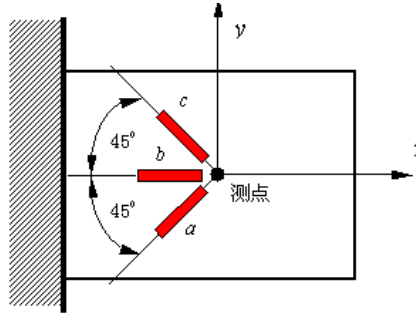


图 7-3

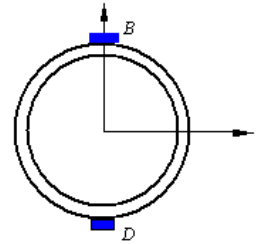


图 7-4

当测量出 ε_{0° 、 ε_{45° 和 ε_{-45° 的结果，

便可求出 ε_x 、 ε_y 和 γ_{xy} ，再代入公式 (7-2)，即可由下式计算出主应变 ε_1 及 ε_2 的大小和方向：

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_{-45^\circ} + \varepsilon_{45^\circ}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ})^2 + (\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ})^2} \quad (7-4)$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ}}{2\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ} - \varepsilon_{45^\circ}} \quad (7-5)$$

主应力的大小可从各向同性材料的广义虎克定律求得：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \end{aligned} \right\} \quad (7-6)$$

3.2 测定弯矩

在靠近固定端的下表面点 D 上，粘贴一个与点 B 相同的应变花，相对位置已表示于图 7-4，圆管虽为弯扭组合，但两点沿 x 方向只有因弯曲引起的拉压应变，且两者数值等值反号。因此，将 B 点的应变片与 D 点的应变片，采用自补偿半桥接线法，得

$$\varepsilon_r = (\varepsilon_0 + \varepsilon_T) - (-\varepsilon_0 + \varepsilon_T) = 2\varepsilon_0$$

式中 ε_T 为温度应变， ε_0 为因弯曲引起的应变。求得弯曲应力为

$$\sigma = E\varepsilon_0 = \frac{E\varepsilon_r}{2}$$

由理论解可求得弯曲应力

$$\sigma = \frac{MD}{2I} = \frac{32MD}{\pi(D^4 - d^4)}$$

由以上两式相等，可求得弯矩为

$$M = \frac{E\pi(D^4 - d^4)}{64D} \varepsilon_r \quad (7-7)$$

3.3 测定扭矩

当圆管受扭转时，C点的应变片和D点的应变片中 45° 和 -45° 都沿主应力方向，但两点的主应力的大小却不相同，由于圆管是薄壁结构，不能忽略由剪力产生的，因此在点A、C上的应力是扭转切应力与弯曲切应力的合成。A点的应变片扭转切应力与弯曲切应力的方向相同，故切应力相加；C点的应变片扭转切应力与弯曲切应力的方向相反，故切应力相减。由应力-应变的关系可以得到

$$\text{A点} \quad \tau^A = \tau_T + \tau_S \quad \sigma_{45^\circ}^A = -(\tau_T + \tau_S) \quad \sigma_{-45^\circ}^A = \tau_T + \tau_S$$

$$\varepsilon_{45^\circ}^A = -\frac{1+\mu}{E}(\tau_T + \tau_S) \quad \varepsilon_{-45^\circ}^A = \frac{1+\mu}{E}(\tau_T + \tau_S)$$

$$\text{C点} \quad \tau^C = \tau_T - \tau_S \quad \sigma_{45^\circ}^C = -(\tau_T - \tau_S) \quad \sigma_{-45^\circ}^C = \tau_T - \tau_S$$

$$\varepsilon_{45^\circ}^C = -\frac{1+\mu}{E}(\tau_T - \tau_S) \quad \varepsilon_{-45^\circ}^C = \frac{1+\mu}{E}(\tau_T - \tau_S)$$

若按全桥接线，则有

$$\varepsilon = \varepsilon_{-45^\circ}^A - \varepsilon_{45^\circ}^A + \varepsilon_{45^\circ}^C - \varepsilon_{-45^\circ}^C = \frac{4(1+\mu)}{E} \tau_T$$

从上式可见，通过桥路的设计消除了弯曲切应力，故有

$$\tau_T = \frac{E}{4(1+\mu)} \varepsilon$$

通过扭转切应力计算公式，可得：

$$\tau_T = \frac{TD}{2I_p} = \frac{16TD}{\pi(D^4 - d^4)}$$

由以上两式不难求出扭矩T

$$T = \frac{E\varepsilon}{4(1+\mu)} \cdot \frac{\pi(D^4 - d^4)}{16D} \quad (7-8)$$

3.4 测定剪力

剪力的测试原理与扭矩的测试原理完全相同，只要调整桥路的接线，便可消除扭转切应力，得到弯曲切应力，进一步计算出剪力。这一问题可由学生独立思考完成。

$$\varepsilon = \varepsilon_{-45^\circ}^A - \varepsilon_{45^\circ}^A + \varepsilon_{45^\circ}^C - \varepsilon_{-45^\circ}^C = \frac{4(1+\mu)}{E} \tau_S$$

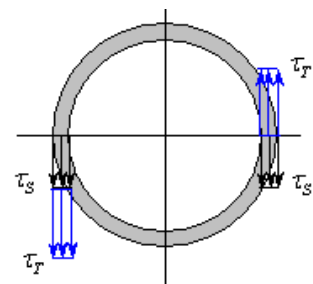


图 7-5

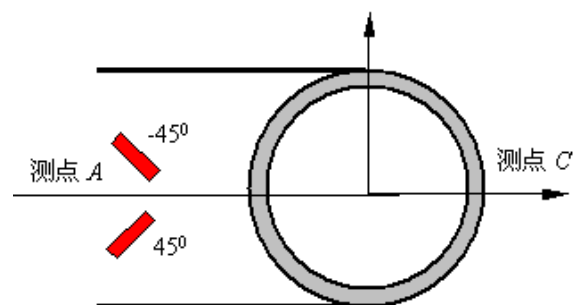


图 7-6

$$\tau_s = \frac{E}{4(1+\mu)} \varepsilon$$

$$\tau_s = \frac{F_s}{2A_0}$$

$$F_s = \frac{E\varepsilon}{4(1+\mu)} \frac{(D^2 - d^2)}{2} \quad (7-9)$$

4. 实验步骤

4.1 试件准备

测量空心圆轴的内、外直径 D 及 d 长度 L 及 b ，见图 7-1，拟定加载方案。

4.2 仪器准备

将各测点电阻应变计的导线接到电阻应变仪上，依次将各点预调平衡。

4.3 进行实验

根据加载方案，逐级加载，逐级逐点测量并记录测得数据，测量完毕，卸载。以上过程可重复一次，检查两次数据是否相同，必要时对个别点进行单点复测，以得可靠的实验数据。

4.4 实验结束

实验结束后，应将导线从电阻应变仪上拆除，整理好放回原处。

5. 实验结果的处理

将整理后的实验数据填写在试验报告的“试验记录”一栏中。由这些数据的 $\Delta \varepsilon_{0^\circ}$ 、 $\Delta \varepsilon_{45^\circ}$ 及 $\Delta \varepsilon_{90^\circ}$ 应用 (7-4) 和 (7-6) 式即可求出 A 点的主应力，并与理论结果进行比较。

根据不同的桥路接线方式，测定内力。

6. 思考题

- (1) 主应力测量中，直角应变花能否沿任意方向粘贴？
- (2) 测弯矩时，可用两个纵向应变片组成相互补偿电路；也可用一个纵向应变片，外接补偿电路。两种方法那种较好，好在哪里？
- (3) 测扭矩时，在一个测点粘贴两个与圆管轴线成 $\pm 45^\circ$ 的应变片，或一个成 45° 的应变片，能否测定扭矩？
- (4) 测剪力时，在一个测点粘贴两个与圆管轴线成 $\pm 45^\circ$ 的应变片，或一个成 45° 的应变片，能否测定剪力？
- (5) 在所做过电测试验中，用到过几种接桥方法，各有何特点？
- (6) 本次试验的误差主要是由那些原因造成的？
- (7) 如何验证实现了“消弯测扭”？
- (8) 本实验能否用二轴 45 应变花代替三轴 45 应变花来确定主应力的大小和方向？
- (9) 贴片位置对实验结果是否有影响，如果有大概有多少？考虑了贴片位置的影响，如何评定实验结果？

实验 8 开口薄壁梁弯心及应力等测定实验

1. 实验目的

根据开口薄壁梁上已粘贴的应变片对其进行测试，完成以下项目（或选做其中几项）。自行设计试验方案、根据试验方案确定组桥和加载方式等。

- 1、确定弯曲中心位置；
- 2、测定翼缘上下外表面中点的弯曲切应力；
- 3、测定腹板外侧面中点的弯曲切应力；
- 4、测定载荷作用于腹板中线时，翼缘上下外表面中点的扭转切应力；
- 5、测定载荷作用于腹板中线时，腹板外侧面中点的扭转切应力；

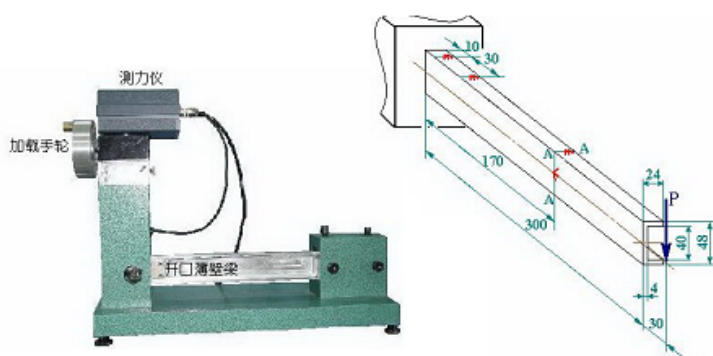


图 8-1 为开口薄壁梁实验装置

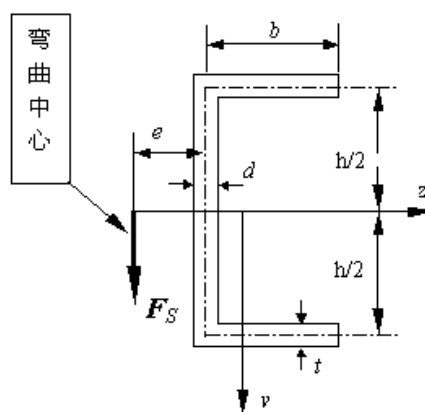


图 8-2 横截面示意图

2. 实验设备和仪器

- (1) 开口薄壁梁实验装置，试验件为一悬臂开口薄壁梁；
- (2) YJ-4501A 静态数字电阻应变仪。

参 数	b	h	d
尺寸 (mm)	22	44	4

3. 实验原理

若杆件有纵向对称平面，且横向力作用于对称平面，则杆件只可能在纵向对称平面内发生弯曲，不会有扭转变形。若横向力作用面不是纵向对称平面，即使是形心主惯性平面，杆件除弯曲变形外，还将发生扭转变形。只有当横向力通过截面某一定点时，杆件只有弯曲变形没有扭转变形。横截面内的这一特定点称为弯曲中心，或剪切中心，简称弯心。弯心的位置可由下式确定

$$e = \frac{h^2 b^2 d}{4 I_z}$$

本次实验就是要通过材料力学和电测原理，自行设计试验方案、根据试验方案确定组桥和加载方式等，由此来确定弯心的位置，并与理论值相比较。

4. 实验报告

用材料力学知识计算开口薄壁梁弯心；
 试验方案，试验数据，试验结果及分析；
 分析内容包括：完成以上各项的测试，用哪些位置的应变片，如何组桥，应注意哪些问题；
 在该实验装置测定弯心，还有哪些贴片方案和组桥方式。

5. 思考题

- (1) 确定开口薄壁弯心有何意义？
- (2) 开口薄壁结构如何进行强度校核，如何确定危险截面和危险点？如果采用试验方法能否测出危险点的主应力？

实验 9 开口薄壁截面的约束扭转和圣维南原理实验

1. 实验目的

根据开口薄壁梁上已粘贴的应变片对其进行测试，完成以下项目（或选做其中几项）。自行设计试验方案、根据试验方案确定组桥和加载方式等。

- 1.1 测定载荷作用于各种位置时，翼缘上下外表面中点的扭转切应力；
- 1.2 测定载荷作用于各种位置时，腹板外侧面中点的扭转切应力；
- 1.3 用实验数据说明圣维南原理的影响范围；
- 1.4 用实验数据说明本实验装置的固定端约束对弯曲正应力的局部影响范围。

2. 实验设备和仪器

- (1) 开口薄壁梁实验装置（见图 12-1）
- (2) YJ-4501A 静态数字电阻应变仪

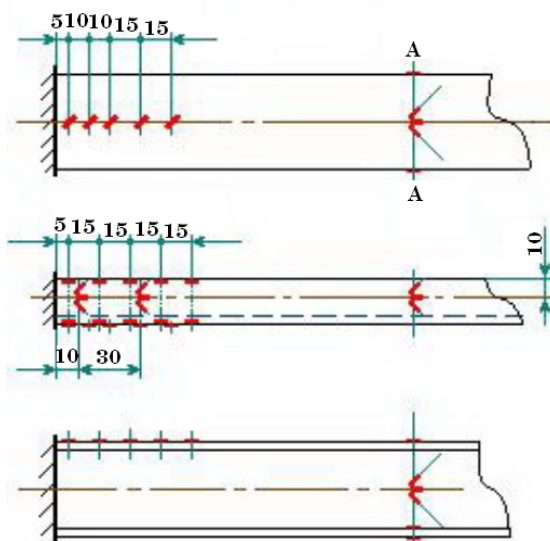


图 9-1 为开口薄壁梁实验装置，试验件为一悬臂开口薄壁梁

3. 实验原理

约束扭转既然引起横截面上的正应力，而相邻横截面上的正应力又不相等，故又将引起附加剪应力。约束扭转杆件截面的应力由两部分组成：扭转剪应力组成的力偶矩为 M_n ，附加剪应力组成的力偶矩为 M_ω ，则两者的总和应与外力的力偶矩 M_z 平衡，

$$M_z = M_n + M_\omega。$$

实验装置为槽形截面的悬臂梁，其一端固定，自由端施加集中力 F 。但由于集中力并没有通过截面的扭转中心，现将集中力向扭转中心平移后，将会附加产生一个扭转力偶矩 $M = Fa$ 。理论计算简图如（图 9-2）：

取悬臂梁的固定端为坐标原点，根据固定端的边界条件和静力

平衡条件，已知的初参数有： $\varphi_0 = 0$ ， $\varphi_0' = 0$ ， $M_0 = M$

根据弹性理论可以解出任意位置的双力矩为： $B(z) = -\frac{M}{\alpha} \frac{sh\alpha(l-z)}{ch\alpha l}$ (9-1)

可求出约束扭转力偶矩为： $M_\omega = \frac{dB}{dz} = \frac{Mch\alpha(l-z)}{ch\alpha l}$ (9-2)

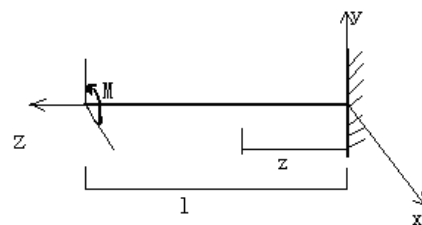


图 9-2

$$\text{自由扭转力偶矩为: } M_n = M - M_\omega = M \left[1 - \frac{c\alpha(l-z)}{ch\alpha l} \right] \quad (9-3)$$

3.1 弯曲正应力

约束扭转产生的正应力为:

$$\sigma_{z\omega} = \frac{B\omega}{I_\omega} = -\frac{M\omega sh\alpha(l-z)}{I_\omega ch\alpha l} \quad (9-4)$$

弯曲产生的正应力为:

$$\sigma_{zm} = \frac{F(l-z)y}{I_x} \quad (9-5)$$

3.2 弯曲剪应力

约束扭转产生的剪应力为:

$$\tau_\omega = -\frac{M_\omega S_\omega}{I_\omega \delta} = -\frac{MS_\omega ch\alpha(l-z)}{I_\omega \delta ch\alpha l} \quad (9-6)$$

考虑约束扭转的自由扭转产生的剪应力为:

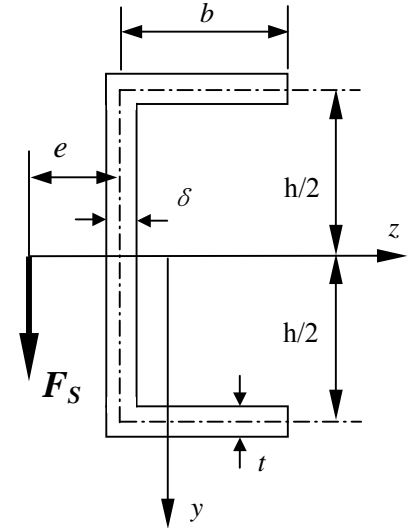
$$\tau_n = \frac{M_n \delta_i}{\frac{1}{3} \sum_i b_i \delta_i^3} = \frac{M \left[1 - \frac{c\alpha(l-z)}{ch\alpha l} \right]}{\frac{1}{3} \sum_i b_i \delta_i^2} \quad (9-7)$$

弯曲产生的剪应力为:

$$\tau_m = \frac{FS_x^*}{I_x \delta} \quad (9-8)$$

材料力学中的扭转产生的剪应力计算公式

$$\tau_n^1 = \frac{M \delta_i}{\frac{1}{3} \sum_i b_i \delta_i^3} = \frac{M}{\frac{1}{3} \sum_i b_i \delta_i^2} \quad (9-9)$$



4. 实验报告

- (1) 自行完成实验方案;
- (2) 实验方案, 试验数据, 试验结果及分析。
- (3) 分析内容包括: 完成以上各项目的测试, 用哪些位置的应变片, 如何组桥, 应注意哪些问题;
- (4) 分析弯曲正应力受固定端处的约束双力矩的影响的大小和范围; 根据实验结果说明开口薄壁结构中圣维南原理的适用范围, 在类似的结构设计中应注意什么问题, 特别是在属于开口薄壁的钢结构的设计中。

5. 开口薄壁杆件的物理特性和截面的几何特征值

截面形状—槽形；尺寸（长 $l=300$ mm 宽 $b=24$ mm 高 $h=48$ mm 厚度 $\delta=4$ mm）

参数	计算公式	数值
弹性模量 E (GPa)		72
泊松比 μ		0.33
剪切模量 G (GPa)	$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$	27
折算弹性模量 (GPa)	$E_1 = \frac{E}{1-\mu^2}$	80.8
弯曲中心的位置 (mm)	$e = \frac{h^2 b^2 \delta}{4I_z}$	8.18
截面对形心惯性主轴 z 的惯性矩 I_z (mm^4)		1.145×10^5
截面抗扭计算极惯性矩 I_n (mm^4)		1.877×10^3
主扇形惯性矩 I_ω (mm^6)		6.01×10^6
系数 α (m^{-1})	$\alpha = \sqrt{\frac{GI_n}{E_1 I_\omega}}$	10.216

实验 10 冲击应力及动荷系数

1. 实验目的

在工程实践中经常会遇到动载荷问题，在动载荷作用下构件各点的应力应变与静载荷作用有很大的不同。按照加载速度的不同，动载荷形式也不同，在极短的时间内以很大的速度作用在构件上的载荷，称为冲击载荷，它是一种常见的动载荷形式。由冲击载荷作用而产生的应力称为冲击应力，它比静应力大得多。因此，对于锻造、冲击、凿岩等承受冲击力的构件，是设计中应考虑的主要问题。本试验就是运用实验的方法测定冲击应力及动荷系数，同时学习了解动应力的电测原理、方法及仪器使用，学习动态电阻应变仪和计算机数据采集系统的使用方法和动态测量数据的分析方法。

2. 实验设备

落锤式冲击试验装置，动态电阻应变仪，计算机数据采集系统；

动态电阻应变仪（参阅本书仪器介绍部分）、数字示波器或数据采集系统；（参阅本书仪器介绍部分）

等强度梁或简支梁及重物冲击试验装置；

游标卡尺和卷尺。

3. 实验原理及装置

本试验采用等强度梁或矩形截面简支梁，在等强度梁端部或简支梁中央受到重物 m 在高度 H 处自

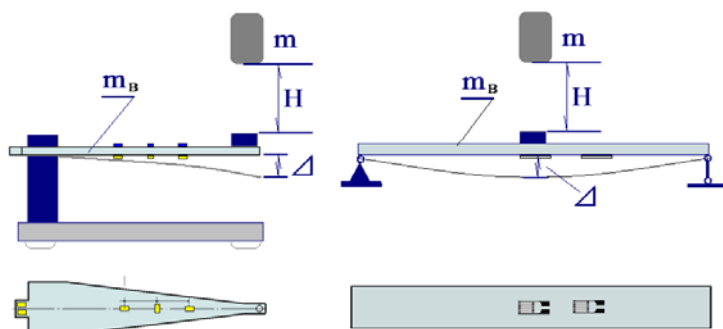


图 10-1 等强度梁

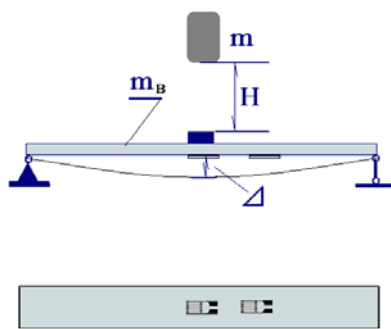


图 10-2 矩形截面简支梁

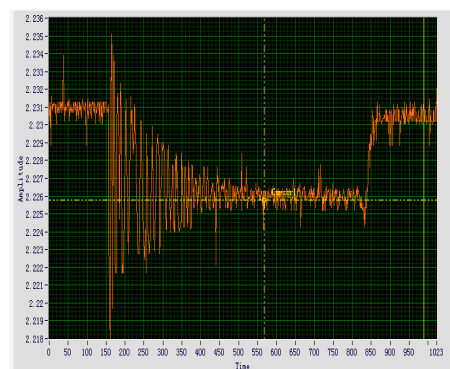


图 10-3 冲击采样波形

由落下的冲击作用。由理论可知发生冲击弯曲时，最大动载应力，按下式确定 $\sigma_{d\max} = K_d \sigma_{st\max}$ ，其中

动荷系数 K_d 为

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\Delta_{st}}} \quad (\text{不考虑梁的质量}) \quad (10-1)$$

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\Delta_{st}(1 + \alpha\beta)}} \quad (\text{考虑梁的质量}) \quad (10-2)$$

式中： H --- 冲击物下落高度，

Δ_{st} --- 受冲击梁在等值静载作用下的挠度，

$$\beta = \frac{m_B}{m}$$

m_B --- 被冲击试样的质量；

m --- 冲击物的质量；

α --- 受冲击梁为等强度梁时取0.066667

α --- 受冲击梁为简支梁时取0.4857

在等强度梁或简支梁上下表面贴上互为补偿的两片(或四片)应变片,用导线接入动态应变仪及计算机数据采集系统。将重物 m 静止放在梁上可测得同一点的静应变 ε_j 。重物 m 从 H 高度落下冲击简支梁时,测点的动应变 $\varepsilon_{d\max}$ 将通过动态应变仪及数字示波器记录下来。

动荷系数实测值为

$$K_{d\text{测}} = \frac{\varepsilon_{d\max}}{\varepsilon_j} \quad (10-3)$$

4. 实验步骤

- (1) 记录等强度梁或简支梁的几何尺寸、及材料的弹性模量,测量重物质量。
- (2) 连接导线,将梁上应变计按半桥接法接入接线盒,然后将接线盒接入动态电阻应变仪的输入插座。将动态电阻应变仪的输出端接入数字示波器。按照动态电阻应变仪的操作规程,设置好各项参数,按照数字示波器的操作规程,设置好各项参数。
- (3) 进行应变标定:桥路调平衡后,然由应变仪给出标定信号(例如 $500 \mu \varepsilon$),记录数字示波器或数据采集系统的测量值。
- (4) 将重物放置在试验梁预定的位置上,测量在重物作用下试验梁的静应变输出。
- (5) 将重物放置在预定的冲击高度(H)位置并选择适当的缓冲垫厚度,突然放下重物冲击试验梁,测量在重物作用下试验梁的动应变输出。
- (6) 计算动荷系数理论值和实验值并比较两者的偏差。

5. 注意事项

实验前应检查应变片及接线,不得有松动、断线或短路,否则会引起仪器的严重不平衡,输出电流过大而导致示波器受损。测量静应变时,重锤要缓慢放下;

实验中,严禁将手伸入重锤以下位置;

记录数字示波器或数据采集系统各项参数应严格按照规定操作,根据采样波形及冲击及脉宽适当加以调整。

6. 预习要求

复习冲击动荷系数的概念及计算方法。

了解动应变测量方法及动应变标定方法。

了解动态应变仪及数字示波器的一般原理与使用方法。

7. 实验报告要求

- (1) 试验报告应包括:
- (2) 试验名称;
- (3) 试验目的;
- (4) 试验装置草图;
- (5) 仪器名称、规格;
- (6) 原始数据;
- (7) 试验结果:包括数据记录,计算结果,曲线绘制。

实验 11 电测法测定衰减振动参数

在材料力学中,测量构件的受力情况常用的方法之一是电测法。这是一种狭义方法,专指用电阻应变片的测量。根据构件受力情况,可分为静态测量和动态测量两种。静态测量应用非常普遍,技术也十分成熟。而动态应变测量特别是数字化测量目前仍是一个难点。本实验着重学习动应变的测量方法。动态应变测试是材料力学中分析力学性能的重要方面。冲击是瞬间完成的,各被测参数的变化过程不易被直接观测。而传统的动态应变测试是使用动态应变仪和示波器记录应变的变化曲线,难以对采集的数据进行精度和多角度的分析。因此,要对冲击过程中的动应力、动应变进行测试,不仅要理解力学中的基本概念和原理,还要掌握信号的静态、动态测试、数字信号处理等综合知识,借助于现代动态测试技术,提高分析问题和实际操作能力。

1. 实验目的

通过用电阻应变计测试方法测定衰减振动法测量系统固有频率和衰减系数的方法;

巩固了电测试验方法的理论和技术;

掌握动态测量应变的方法,测量悬臂梁的固有频率和阻尼比;

了解瞬态激振时的数据处理方法;

了解相关测试仪器的基本原理和简单的操作方法;

学习用计算机和数据采集软件分析系统及相关测试仪器的基本原理和简单的操作方法;

提高学生对工程实际问题复杂性和固有频率和衰减系数的认识。

2. 实验装置

(1) 测试系统:等强度(应力)梁 或 矩形截面简支梁实验装置。

(2) 实验仪器:敲击橡皮锤;电阻应变计;测量电桥;动态电阻应变仪(低通滤波器);计算机数据采集系统等几个部分组成。

(3) 测量仪器系统示意图,见图 11-1。

3. 实验原理

假设梁的厚度为 h ,等应变梁的固有频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EBh^3}{6mL^3}} \quad (11-1)$$

式中: E —— 梁材料弹性模量;

B —— 梁的底边边长;

L —— 梁的长度;

h —— 梁的厚度;

m —— 梁的质量。

两端简支梁一阶固有频率为

$$f_0 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (11-2)$$

式中: E —— 梁材料弹性模量; I —— 梁截面惯性矩;

A —— 梁截面面积;

ρ —— 梁材料的体积密度; L —— 简支梁的长度。

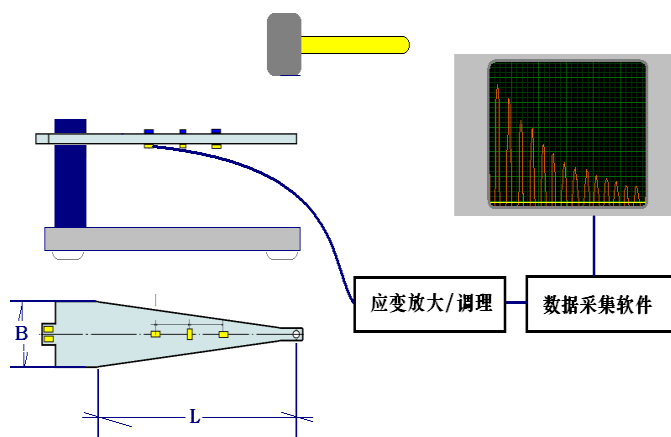


图11-1 测试系统、实验仪器与测量系统示意图

用橡皮锤敲击等强度(应力)梁或矩形截面简支梁实验装置(瞬态激振), 试验梁获得初始速度作自由振动, 因存在阻尼自由振动为振幅逐渐减小的衰减振动。阻尼越大振幅衰减越快。根据记录曲线可分的周期 T_d , 频率 f_d , 对数减幅系数 δ 及阻尼比 ζ 。

$$T_d = \frac{\Delta t}{i} \quad f_d = \frac{1}{T_d} \quad (11-3)$$

$$\delta = \frac{1}{i} \ln\left(\frac{A_1}{A_{i+1}}\right)$$

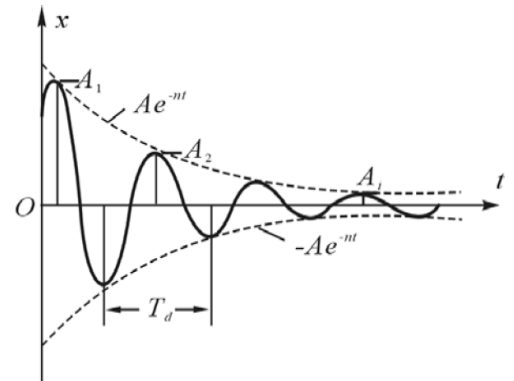
$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \approx \frac{\delta}{2\pi} \quad (11-4)$$

其中: Δt ——为 i 个整周期相应的时间间隔; A_1 ——第一个周期的振幅;

A_i ——第 i 个周期的振幅; T_d ——振动周期。

系统的振动周期、固有频率和计算出衰减系数

$$(n = \delta \times f_d) \quad (11-5)$$



11-2 振动衰减波形

4. 实验步骤

- (1) 记录试样的几何尺寸、及材料的弹性模量;
- (2) 连接导线, 将梁上两应变片按半桥接法接入接线盒, 然后将接线盒接入动态电阻应变仪的输入插座。将动态电阻应变仪的输出端接入数字示波器;
- (3) 按照动态电阻应变仪的操作规程, 设置好各项参数, 按照数字示波器的操作规程, 设置好各项参数;
- (4) 用橡皮锤轻敲或手敲击试验梁上一点, 用单通道示波器与记录软件采样, 把采到的当前数据保存到硬盘上, 设置好文件名、试验名、测点号和保存路径;
- (5) 用软件的分析功能分析系统衰减振动的波形, 移动光标收取波峰值和相邻的波峰值与时间并记录;
- (6) 重复上述步骤, 记录不同位置的波峰值和相邻的波谷值;
- (7) 实验结束, 将各仪器复位, 关闭所有仪器电源, 整理实验现场, 按要求整理实验报告。

实验12 电测法标定加速度传感器的电压灵敏度

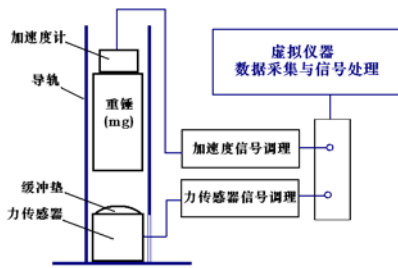
1. 实验目的

传感器的灵敏度是传感器的一个重要参数，使用时必须重复标准，以保证原始的标定值没有变化。虽然技术监督部门通常使用绝对标准法，而在工程中和野外检测现场条件下通常使用比较法。学习用电阻应变计测试方法测定加速度传感器的电压灵敏度的方法；了解相关测试仪器的基本原理和简单的操作方法；学会用计算机和数据采集软件分析瞬态峰值和传感器的灵敏系数；按要求整理实验报告。

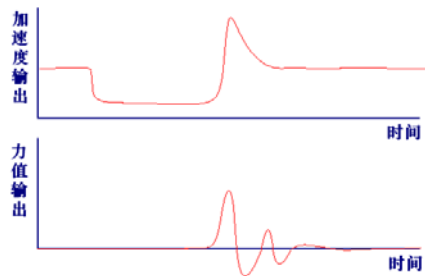
2. 实验仪器与测量系统框图

基于牛顿第二运行定律，可以用重力分析法对加速度传感器进行标定，见图 12-1。

测量系统由安装在刚性基础上带有缓冲垫的力传感器；装有加速度传感器的圆柱形钢质量；导轨；信号调理(放大)器；基于计算机的数据采集与信号处理系统(虚拟仪器)。



12-1 电测法标定加速度传感器示意图



12-2 加速度计与力传感器输出曲线示意图

3. 实验原理与步骤

(1) 试验用质量安装在缓冲垫和力传感器上，当质量迅速取走时，测出力传感器的输出 A_{mg} ，这个读数即是装有加速度传感器的圆柱形钢质量 (mg)。计算出力传感器的输出灵敏系数：

$$K_F = \frac{mg}{A_{mg}} \quad (\text{N/V}) \quad (12-1)$$

(2) 将加速度传感器的钢柱从适当高度落到缓冲垫和力传感器上时，同时记录力传感器的输出峰值 (A_{ma}) 和加速度传感器的输出峰值 (B_{ma})，根据牛顿第二运行定律:作用力等于反作用力，得

$$F = ma = K_F A_{ma} = mK_a B_{ma} \quad (12-2)$$

$$K_a = \frac{K_F A_{ma}}{mB_{ma}} = \frac{mg}{mB_{ma}} \cdot \frac{A_{ma}}{A_{mg}} = \frac{A_{ma}}{A_{mg}} \cdot \frac{g}{B_{ma}} \quad (\text{g/V}) \quad (12-3)$$

这种标定方法对于线性传感器，力传感器的灵敏系数将消除，然而，标定依赖于当地重力加速度。撞击脉冲持续时间由缓冲垫材料和厚度决定，脉冲幅值与自由落体的高度决定，为了覆盖一定的频率和振幅范围，用不同的缓冲垫材料和自由落体的高度组合来完成，这种标定方法可在野外使用，标定精度可在 $\pm 1\%$ 之内。

(3) 实验结束，将各仪器复位，关闭所有仪器电源，整理实验现场，按要求整理实验报告。

实验 13 单自由度系统强迫振动的幅频特性

1. 实验目的

1. 熟悉力学模型，理解实验原理。
2. 掌握实验系统各相关仪器的使用方法。
3. 掌握单自由度强迫振动幅频特性曲线获取的实验方法，能够由此曲线提取固有频率，阻尼比。

2. 实验设备

实验系统装置如图 13-1 所示。

2.1 激振信号源

使用方法：先将输出调节旋钮左旋至最小位置，把激振器与本机输出接线柱相连，打开电源开关，其频率计和数字电流表发光，频率计显示值即为激振信号源输出频率值。调节频率选择开关以选定频率范围，旋转频率输出调节电位器W3，使数字电流表指示值为期望电流值后，仪器处于正常工作状态。

2.2 电动激振器

将来自激振信号源的电信号转换为同频率的激振力，施加于简支梁，其技术指标为：频率范围 10~1000Hz；最大激振力 200g；最大行程 ±1.5mm。

使用方法：将激振器安装在支架上，要保证激振器顶杆对试件有预压力（不能超压），此时顶杆在激振器中位置是其行程的中间位置。启动激振信号源，即可实现对简支梁的激振。

2.3 磁电振动速度传感器

速度传感器将简支梁上对应测点的速度信号以磁电方式转换为定比例的电势，并经导线输入测振仪，直接放大，可测量振动速度。输入测振仪的信号经积分、微分可测量振动的位移和加速度。本传感器只能测量垂直方向的振动。

使用方法：利用传感器的磁性底座，将传感器安装在被测振物体（质量块）上，其外壳随振动体而振动，位于气隙间的线圈借切割磁力线而发，出正比于振动速度的电动势，并经导线输入测振仪。

3. 实验原理

单自由度系统力量模型如图13—2所示，在正弦激振力 $F(t)=B\sin\omega_0 t=B\sin(2\pi f_0 t)$ 作用下系统作简谐强迫振动，设 B 为激振力幅值， f_0 为激振力频率，则系统的运动微分方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + kx = F(t)$$

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega^2 x = F(t)/M$$

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2 x = F(t)/M \quad (13-1)$$

式中： $\omega = \sqrt{\frac{k}{M}}$	系统的固有频率
$n = \frac{C}{2M}$	系统的阻尼系数
$\xi = \frac{n}{\omega}$	系统的阻尼比

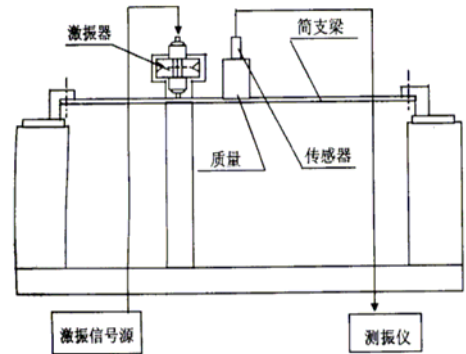


图 13-1

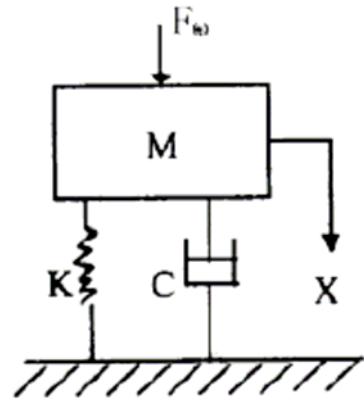


图 13-2

方程 (13-1) 的特解, 即强迫振动 (经一段时间的稳态解) 为

$$x = A \sin(2\pi f_0 t - \varphi) \quad (13-2)$$

式中 A 为强迫振动的振幅 φ 为相位角 (滞后角)。

$$A = \frac{B}{M \sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4n^2 \omega_0^2}} \quad (13-3)$$

上式称为系统的幅频特性, 它对应的 $A-\omega$ 曲线称为幅频特征曲线如图13-3所示。该曲线所反映的是系统的响应水平 (幅度) 对输入 (激励) 频率的依赖关系。

图13—3中 A_{max} 为系统共振时的振幅, 对应频率 f_0 称为共振频率。它与系统固有频率 f 有关系

式

$$f_* = f \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (13-4)$$

作为共振频率。当 ξ 很小 $f_* \approx f$ 经常用 f 作为共振频率。

f_1 、 f_2 称为半功率频率, 在小阻尼情况下有关系

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2f_*} \quad (13-5)$$

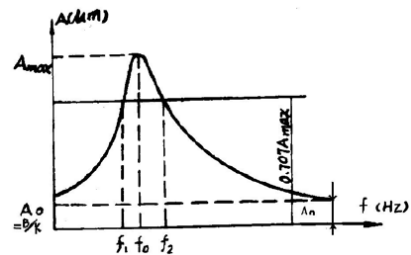


图 13-3

f_1 、 f_2 之确定如图13-3所示。

4. 实验方法

将速度传感器置于被测物体上, 其输出端接测振仪, 用以测量简支梁振幅。

将电动式激振器输入端与激振信号源输出端连接, 开启激振信号源的电源开关, 对振力, 对简支梁施加正弦激振力, 使之产生强迫振动。

调整激振信号源输出信号之频率, 并从测振仪上读出与各频率对应的振幅。

在共振区附近细致扫频, 找出振幅最大值 (A_{max}) 及对应的共振频率 f_0 , 并由此计算出半功率幅值 $0.707A_{max}$, 并扫出对应的半功率频率 f_1 、 f_2 , 最后由 (13-5) 式计算出阻尼比 ξ 。

利用表13-1绘制出幅频特性曲线。

表13-1

频率									
振幅									

实验 14 曲柄滑块机构角位移测量

1. 实验目的

测量曲柄转速；测量摇杆的角位移 - 时间曲线及摇杆摆角范围；测量摇杆角速度 - 时间曲线；绘制摇杆角位移、角速度依赖曲柄转角曲线；学会使用 JXCRAS 随机信号与数据采集系统进行测量数据的采集、分析和处理。

2. 实验对象

机构运动学及动力学试验台实现曲柄摇杆机构，与转速传感器、角位移传感器配合使用。

3. 实验框图



图 14-1

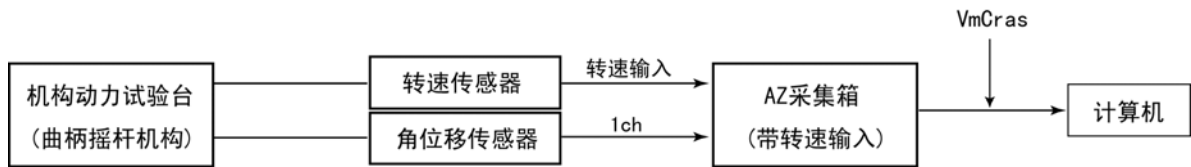


图 14-2 曲柄转速、摇杆角位移测量实验框图

曲柄摇杆机构，连杆与曲柄轮、摇杆轮的连接螺钉可以在其上的径向滑道内滑动，故可调整曲柄和摇杆的长度。调速电机：DC 12V，240rpm，可调曲柄转速；直流电源 PS1502D，给调速电机供电；导电塑料电位器，是一种以转角(角度或弧度)输入，电压输出的测量角位移传感器；转速传感器，测量转速的传感器；AZ 采集箱(带转速输入)或 PCI9111 采集卡与 AZ 调理仪组合；台式计算机或笔记本电脑；VmCras 旋转机械程序，AdCras 数据采集与分析程序，SsCras 信号与系统分析程序。

4. 实验原理

曲柄转速和摇杆角位移同步测量。

在曲柄转速测量中，曲柄转动时，由转速传感器和贴在曲柄上的键相标记发出一系列尖脉冲(若曲柄上贴一个键相标记，当曲柄转动一圈时，转速传感器发出一个尖脉冲)每两相邻脉冲的时间间隔即是曲柄的转动周期(以秒计)，其倒数是曲柄转动频率(Hz)，将其值乘 60 得曲柄每分钟转动的圈数(转速)。

在摇杆角位移测量中，首先经角位移传感器将摇杆角位移变换成便于检测、传输或处理的电压参量，后经采集箱或采集卡、计算机及软件采集试验数据，得摇杆角位移-时间曲线。由于曲柄等角速转动，横坐标的瞬时时间对应该瞬时的曲柄角位移，而纵坐标表示摇杆角位移，所以摇杆角位移 - 时间曲线实际上表示曲柄和摇杆角位移间的关系。

5. 实验步骤

按下图连接各仪器设备，导电塑料电位器是有源传感器，需 5V 供电，其连线方式如下图 14-3 所示：

图上四个空白接线柱，其中两个空白柱+5V、地接 5V 电源带鳄鱼夹一头，另外两个空白柱信号、地连接于带插片的信号线的一头(另一头是 Q9 头)，Q9 头连接于调理仪和采集箱的第 1 通道。

接角位移传感器(出厂时连线已接好,请勿动!)

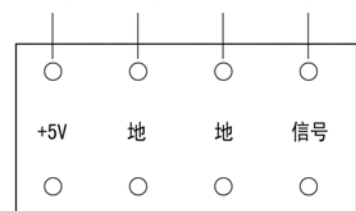


图 14-3 连线图

注意：① 信号插片不能与+5V 接线柱连接，否则会烧坏角位移传感器；

② 先拔 5V 电源电源插头，后卸鳄鱼夹。

连接计算机电源；

在 WINDOWS 下调用 VmCras 程序，建立作业，选择单通道，按确认键；

参数设置

采集方式：外部。所谓外部是指：采样频率随转速变化而变化，对于 64 键相数的键相器，曲柄每转一圈采样 64 个点，在采集过程中，程序显示曲柄转两圈的试验曲线。

采集时间：20 秒

控制方式：监视采集

工程单位：弧度，rad

校正因子：5000mv/2 π ≈ 795.775mV/rad，输入该值按确认键，就完成校正因子设置。

程控放大：供选择的电压范围：±10000 mV，±1000 mV，±100 mV 或 ±5000mV、±1250mV、±625mV、±312.5mV。选择电压范围后按确认键，这就完成了程控放大设置。选择的电压范围值除以输入的校正因子值可得满量程的角位移值(弧度)，该值在记录曲线的纵坐标轴上会自动显示。

选择使用转速传感器。低通滤波 10Hz。



图 14-4 VmCras 程序参数设置(采集方式)

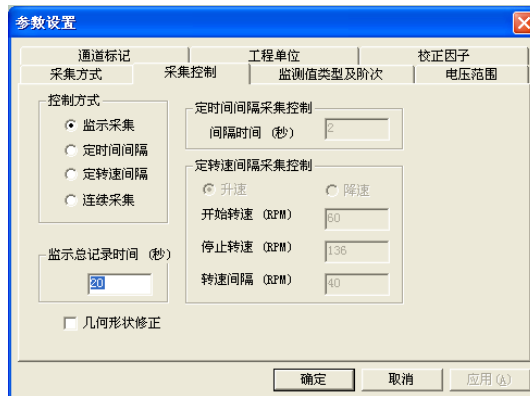


图 14-5 VmCras 程序参数设置(采集控制)

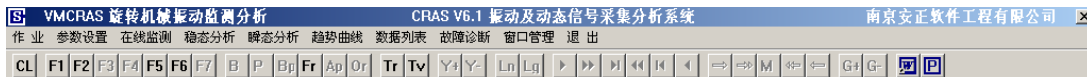


图 14-6

接通曲柄摇杆机构电源，待曲柄达稳态转动，鼠标点击在线监测主菜单，调直流电源电压使曲柄达某一转速，例如 150 转/分，进行数据采集，在屏幕上可以显示摇杆角位移 - 时间曲线，曲线上的一个小圆圈表示键相标记所经历的时刻，两个小圆圈间的时间间隔表示曲柄旋转的周期(图 14. 7)；

采集结束，退出 VmCras 程序(该程序自动存盘)；

注意：不要在关闭直流电源 PS1502D 的情况下，调用 AdCras 程序!!!

调用 AdCras 程序，参数设置为采样频率：125 Hz 或 100Hz，数据块数：1，电压范围：±10000mV，工程单位：rad，校正因子：795.775 mV/rad。采集数据，得角位移 - 时间曲线如图 14. 8 所示(将其存盘)。从角位移 - 时间曲线读摇杆摆动周期(以秒计)，其倒数为摇杆摆动频率(Hz)，将其值乘 60 得曲柄每分钟转动的圈数(转速)；

鼠标点击工具条“D”，对角位移 - 时间曲线进行 1 次微分得摇杆角速度 - 时间曲线(图 14. 9)，并将其存盘。

调用 SsCras 程序，作角位移 - 时间曲线的频谱，读出摇杆摆动频率，将其值乘 60 得曲柄转速(图 14. 10)；鼠标点击主菜单“频谱”。

关闭直流电源。

JXCRAS 点击快捷键 P 生成位图文件或直接打印，也可点击工具条 W 键将图形直接粘贴到 Word 文档中。

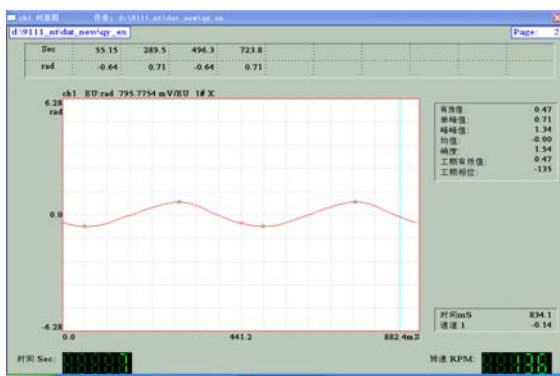


图 14-7 转速及摇杆角位移 - 时间曲线

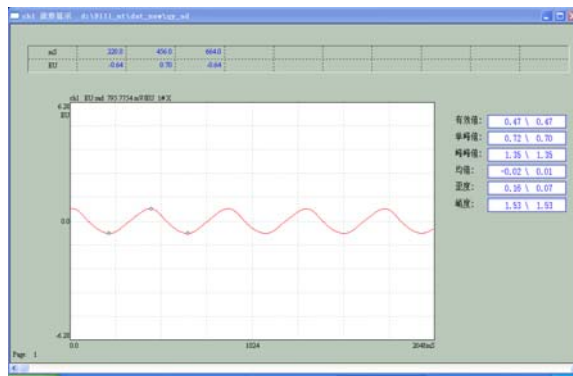


图 14-8 摇杆角位移 - 时间曲线

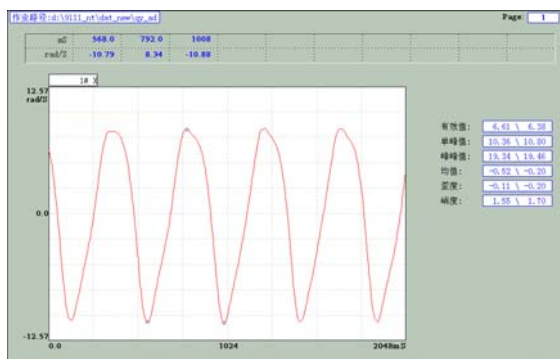


图 14-9 摇杆角速度 - 时间曲线(1 次微分)

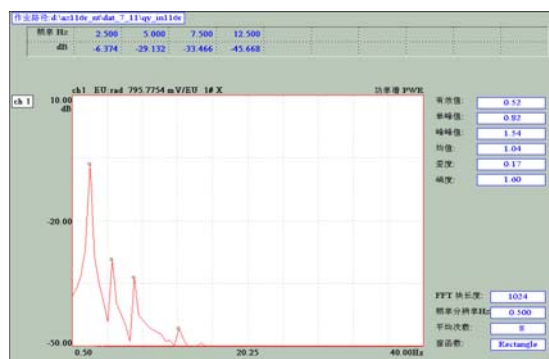


图 14-10 摇杆角位移的频谱

6. 实验报告

- (1) 简述实验目的、实验原理；
- (2) 画实验框图，说明各仪器设备的功能；
- (3) 打印摇杆角位移 - 时间曲线、摇杆角速度 - 时间曲线；
- (4) 从摇杆角位移 - 时间曲线写出测量的摇杆角位移范围；
- (5) 根据摇杆角位移 - 时间曲线列表表示曲柄转角为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 、 360° 所对应的摇杆角位移。若将键相标记沿曲柄粘于曲柄轮上，且取其为曲柄转角为 0° 的位置，则摇杆一(或另一) 极端位置就对应于摇杆角位移 - 时间曲线的负(或正)峰值。
- (6) 比较由 VmCras 测得的曲柄转速与用 AdCras 或 SsCras 测得的摇杆摆动频率推算的转速在数值上是一致的，并说明原由。

7. 问题讨论

- (1) 如何应用 AdCras 程序采集得摇杆角位移 - 时间曲线？
- (2) 测量曲柄转速有哪几种方法？
- (3) 如何根据摇杆角位移 - 时间曲线和摇杆角速度 - 时间曲线绘制摇杆角位移、角速度 - 曲柄转角曲线？
- (4) 实测曲柄摇杆机构曲柄、连杆和摇杆的长度以及两支座中心间距离(设计尺寸为 190mm，连杆长度 193mm)，试计算摇杆摆角范围，并与实测的摆角范围作比较。

实验 15 曲柄滑块机构的线位移和加速度测量

1. 实验目的

- (1) 测量曲柄转速;
- (2) 测量滑块行程及滑块线位移-时间曲线;
- (3) 测量滑块加速度;
- (4) 学会使用 JXCRAS 随机信号与数据采集系统进行测量数据的采集、分析和处理。

2. 实验装置

机构运动和动力学试验台; 曲柄滑块机构 (图 15-1)。



图 15-1

3. 实验框图和仪器



图 15-2a 曲柄转速及滑块线位移测量实验框图

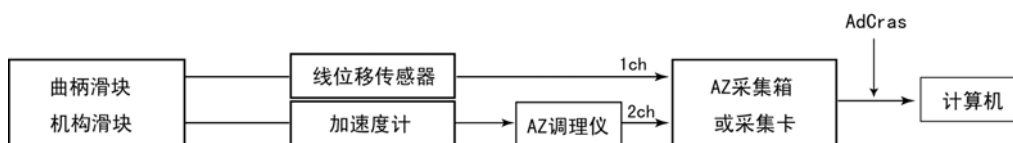


图 15-2b 滑块线位移和加速度测量实验框图

机构动力试验台实现曲柄滑块机构;

调速电机: DC 12V, 240rpm;

PS-1502D 直流电源;

转速传感器, 测量转速的传感器;

WDL50-2 直滑式导电塑料电位器, 是一种以线位移输入, 电压输出的测量线位移传感器。经标定, 位移从 3mm 到 53mm, 位移传感器灵敏度为 93.5mV/mm;

加速度计;

AZ 采集箱或 PCI9111 采集卡、台式计算机或笔记本电脑;

VmCras 旋转机械程序及 AdCras 数据采集及分析程序。

4. 实验原理

曲柄转速和滑块线位移同步测量。

在曲柄转速测量中, 曲柄转动时, 由转速传感器和贴在曲柄上的键相标记发出一系列尖脉冲, 当曲柄上只贴一个键相标记, 则相邻两脉冲的时间间隔即是曲柄的转动周期(以秒计), 其倒数是曲柄每秒钟的转动圈数。

在滑块线位移测量中, 首先经位移传感器接受滑块的线位移再转换成便于检测、传输或处理的电压参量, 后经采集箱或采集卡、计算机及软件采集试验数据, 得滑块线位移-时间曲线。由于曲柄等角速

转动，横坐标的时间读数对应该瞬时的曲柄角位移 φ_1 ，而纵坐标表示相应的滑块线位移 x_c ，所以滑块线位移 - 时间曲线(图15-3)实际上表示的是曲柄和滑块位置间的 $x_c - \varphi_1$ 关系。

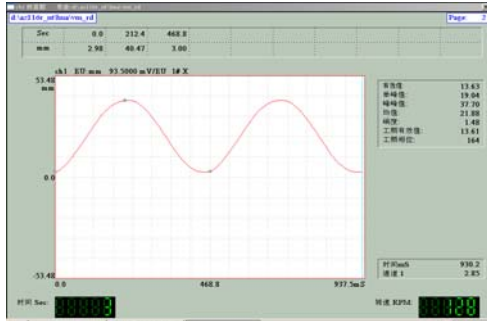


图 15-3 滑块线位移时间 - 曲线

接位移传感器(出厂时连线已接好, 请勿动!)

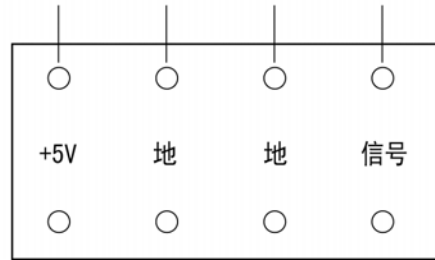


图 15-4 连线图

5. 实验步骤

5.1 转速、线位移测量

(1) 按图 2.2a 连接各仪器设备;

WDL50-2 直滑式导电塑料电位器是有源传感器, 需 5V 供电, 其连线方式如图 15-4 所示:

图上四个空白接线柱, 其中两个空白柱+5V、地接 5V 电源带鳄鱼夹一头, 另外两个空白柱信号、地连接于带插片的信号线的一头(另一头是 Q9 头), Q9 头连接于调理仪和采集箱的第 1 通道。

注意: ① 信号插片不能与+5V 接线柱连接, 否则会烧坏位移传感器;

② 先拔 5V 电源电源插头, 后卸鳄鱼夹。

(2) 连接计算机电源;

(3) 在 WINDOWS 下调用 VmCras 程序, 建立作业, 选择单通道, 按确认键;

(4) 参数设置

采集方式: 外部, 即采样频率随转速而变, 若键相器是 64 位的, 曲柄转一圈采样 64 点, 用曲柄转二圈的时间显示一页的采集结果。

控制方式: 监视采集。

工程单位: mm。

校正因子: 等于线位移传感器灵敏度(mV/mm)。

程控放大: 供选择的电压范围: ± 10000 mV, ± 1000 mV, ± 100 mV 或 ± 5000 mV, ± 1250 mV、 ± 625 mV, ± 312.5 mV。选择电压范围后按确认键, 这就完成了程控放大设置。选择的电压范围值除以输入的校正因子值可得满量程的线位移值(mm), 该值在记录曲线的纵坐标轴上会自动显示。

选择使用转速传感器。AZ 调理仪放大倍率取 1,低通滤波选 10Hz。

(5) 打开 PS-1502A 直流电源开关, 使曲柄滑块机构运转, 鼠标点击在线监测主菜单, 进行整周期的数据采集, 界面的右下方显示的数据便是即时的转速(可以调 PS-1502A 电压, 使曲柄以某一转速作稳定转动, 例如 200 转/分);

(6) 采集一组滑块线位移数据, 显示滑块线位移 - 时间曲线;

(7) 按键盘上的“S”退出在线监测;

(8) 鼠标点击工具条“F2”按钮, 进入时基图, 点击 ch01 进入子窗口, 显示整周期采集的线位移-时间曲线。时基图上的小圆圈是键相标记经过转速传感器时打在线位移-时间曲线上的标记符号。两个小圆圈间的时间对应曲柄转动的角度为 360° , 每移动光标线一格的时间为六十四分之一的曲柄转动周期, 即曲柄转过 5.625° 。

(9) 从曲线的上峰值与下峰值差值读出滑块行程, 移动光标线可读出曲柄转角及相应的滑块线位移值,

VmCras 程序文件自动存盘,在不关闭直流电源开关下,进入滑块线位移及加速度测量。

5.2 滑块线位移及加速度测量

(1) 按图 15-2b 各仪器设备;

(2) 在 WINDOWS 下调用 AdCras 程序,选择双通道,建立作业,按确认键;

(3) 参数设置

采样频率: 200Hz。数据块: 1 块。

采集方式: 自由运行。

工程单位: 1ch mm, 2ch m/s/s。

校正因子: 1ch 等于位移传感器灵敏系数, 2ch 等于加速度计灵敏系数与所取的 AZ504 的放大倍率乘积。

(4) 示波

检查线路、电源开关是否接通及参数设置是否合理;

(5) 采集

鼠标点击“采集”主菜单,采集曲线如图 2.4 所示。ch01 通道表示滑块位移 - 时间曲线, ch02 通道表示加速度 - 时间曲线。

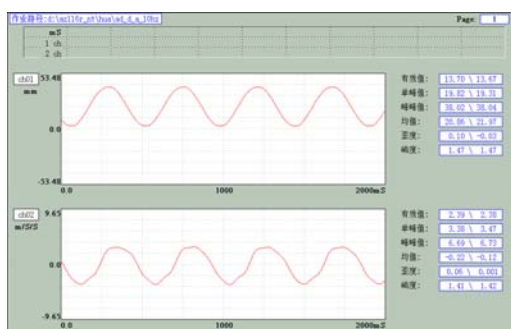


图 15-5 滑块线位移、加速度测量曲线

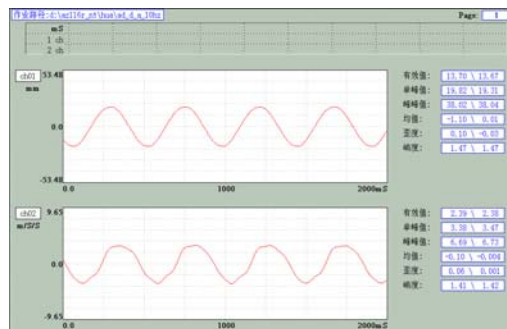


图 15-6 零均值处理后的滑块线位移、加速度曲线

(6) 文件存盘

存采集的滑块线位移、加速度曲线。

(7) 零均值处理

鼠标点击主菜单上零均值处理的工具条“P”按钮,零均值处理后的滑块线位移、加速度曲线如图 15-7 图 15-8 所示,鼠标点击主菜单上的“波形”,刷新界面在框内的数据。

(8) 文件存盘

存零均值处理后的滑块线位移、加速度曲线。

(9) 关闭曲柄滑块机构电源

5.3 结果分析

(1) 返放零均值处理后位移、加速度曲线,鼠标点击图 2.5 上 ch01 或 ch02 处就可进入第 1 通道或第 2 通道子窗口,从第 1 通道子窗口曲线,读取滑块位移行程和频率(图 15-7)。滑块位移行程为 37.62mm, 位移幅值为 18.81mm。

从第 2 通道子窗口曲线,读取加速度的峰-峰值和频率,二分之一峰-峰值是加速度的测量值(图 15-8)。加速度的测量值为 3.315m/s^2 。

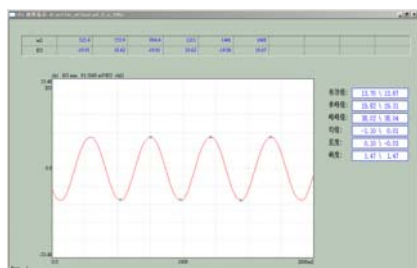


图 15-7 零均值处理后的滑块线位移曲线

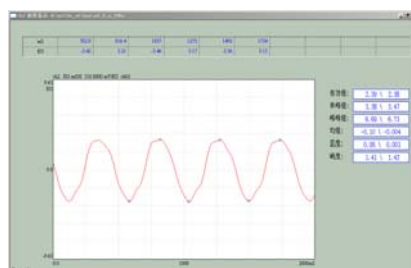


图 15-8 零均值处理后的滑块加速度曲线

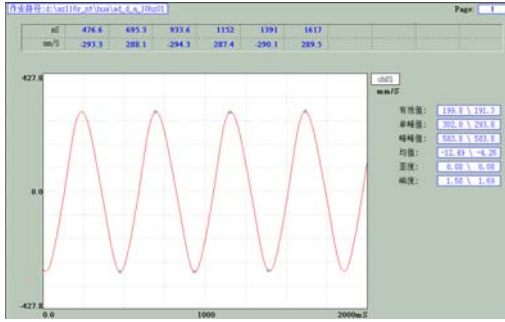


图 15-9 位移 1 次微分后的滑块速度曲线

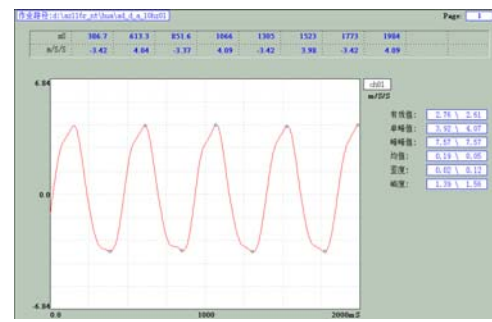


图 15-10 位移 2 次微分后的滑块加速度曲线

(2) 位移两次数字微分得加速度

返放零均值处理后的位移曲线，鼠标点击微分处理的工具条“D”按钮 1 次得滑块速度(图 15-9)，再点击“D”按钮 1 次得滑块加速度(图 15-10)。从图 15-10 读取加速度的峰-峰值和频率，经位移测量值微分运算得到的加速度值为 3.73m/s^2 。

6. 实验报告

- (1) 简述实验目的、实验原理；
- (2) 测量并写出曲柄滑块机构各杆件尺寸；
- (3) 画实验框图，说明各仪器设备的功能；
- (4) 打印测量的滑块线位移 - 时间曲线、滑块加速度 - 时间曲线；
- (5) 根据测量的滑块线位移 - 时间曲线确定滑块行程，且列表表示曲柄转角为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 、 360° 所对应的滑块线位移和加速度值；
- (6) 根据实验中采用的曲柄滑块机构各杆尺寸计算滑块线位移和加速度；
- (7) 比较滑块线位移和加速度的测量值和计算值，分析误差原因。

7. 问题讨论

- (1) 根据试验数据如何绘制 $x_c - \varphi_1$ 、 $\ddot{x}_c - \varphi_1$ 曲线？

实验 16 拉伸应变硬化指数 (n 值) 实验

(设计型实验)

1. 实验目的

- 了解拉伸应变硬化指数的概念
- 学会应变硬化指数的试验方法
- 了解真实应力—应变曲线的概念

2. 实验设备

Instron 3367 电子万能材料试验机；引伸计；游标卡尺；矩形截面拉伸试样

3. 实验原理

试样在均匀塑性变形范围内以规定的恒定速率轴向拉伸变形。用整个均匀塑性变形范围的应力—应变曲线，或用均匀塑性变形范围的应力—应变曲线的一部分计算拉伸应变硬化指数。

4. 实验步骤

- (1) 测量并记录试样标距长度内的原始厚度和宽度；
- (2) 安装试样，保证试样轴向受力；
- (3) 试验机夹头移动速率不应超过 $50\%L_c/\text{min}$ ，在测定 n 值的整个应变区间，试验机夹头移动速率应保持恒定；
- (4) 用整个均匀塑性变形范围内测定 n 值，测量应变的上限应变稍小于最大力所对应的应变；其下限应稍大于屈服应变（不明显屈服材料）或屈服点伸长终点时的应变（明显屈服材料）。
- (5) 采用计算机自动测量方法。

5. 实验结果的处理

- (1) 根据计算机采集的数据，选取整个均匀塑性变形范围，对该范围的数据进行处理；
- (2) 根据力和相应的变形值计算真实应力和真实应变。

$$\sigma = F \frac{L}{L_e S_0} \quad (16-1)$$

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{L}{L_e} \right) \quad (16-2)$$

L — 标距部分的瞬时长度 $L = L_e + \Delta L$

L_e — 引伸计标距

S_0 — 标距内原始截面积

在单轴拉伸力作用下，真实应变指数由真实应力和真实应变的数学方程表示：

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n \quad (16-3)$$

两边取对数得

$$\ln \sigma = \ln k + n \ln \varepsilon \quad (16-4)$$

令 $y = \ln \sigma$ $x = \ln \varepsilon$

$$\text{则} \quad y = \ln k + nx \quad (16-5)$$

由上式导出计算应变硬化指数的关系式

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad (16-6)$$

(3) 根据式 (16-6) 计算应变硬化指数

(4) 计算的应变硬化指数应修约至 0.005。

6. 实验报告

报告的内容应包含以下内容

- (1) 实验设备
- (2) 实验材料说明;
- (3) 采用的方法;
- (4) 采用的试样类型;
- (5) 测定应变硬化指数的均匀应变范围;
- (6) 测定应变硬化指数的点数;
- (7) 实验结果;
- (8) 绘制真实应力—应变曲线 (最大力之前)。

实验 17 工程结构电测应力分析(设计型实验)

任务书

1. 实验目的

1. 学习对工程结构进行应力分析的基本方法;
2. 学习使用动态应变仪进行多点应变测量;
3. 通过电测法确定工程结构模型在不同工况下的应力分布或动静态应变, 并进行综合分析。

2. 实验设备

动静态应变仪, 数据采集系统, 工程结构模型等。

实验装置和实验要求:

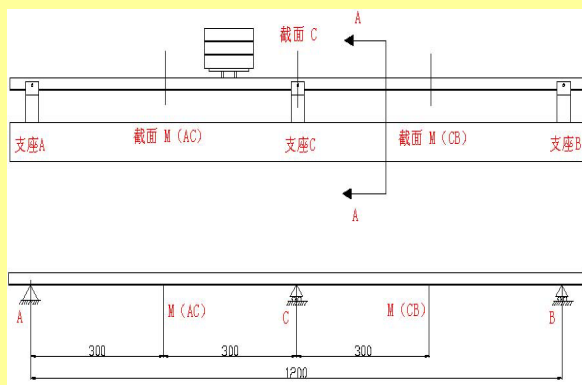
工程结构模型为连续梁结构模型或自行车由同学们组成实验小组选择一种模型, 自行确定实验方案。通过理论分析和实际测试, 找出所选择模型的最危险截面。

连续梁结构模型可以测试小车在梁上不同位置, 梁各截面处的应力大小不同。

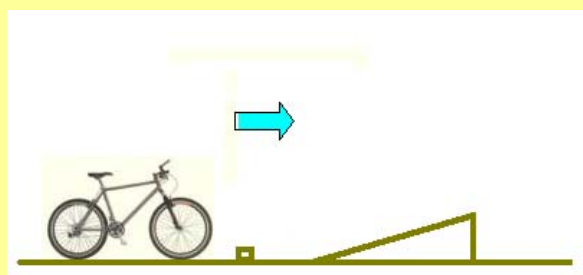
自行车可以测试自行车大梁或实验小组选择的测点在自行车骑行时(路面分别设计为平坦路面、过障碍物、跳车)的应变曲线与动荷系数。

工程结构模型为连续梁结构模型。当车辆从上通过时, 结构中的应力分布是较为复杂的。

3. 实验提示



连续梁结构模型



自行车动应变实验示意图

1. 了解工程结构的构成和工作状况, 如梁的跨度, 截面尺寸, 载荷大小等;
2. 对工程结构进行简化, 建立力学模型, 作初步理论计算;
3. 了解动静数字应变仪的基本功能, 学习其使用方法;
4. 根据理论计算的结果自行设计测试方案;
5. 按照测试方案选择的截面选择测试点并接线;
6. 按照测试方案选择工况进行测试, 记录原始测试数据;
7. 对测试数据进行全面分析, 如有问题, 应修正测试方案, 重新测试;
8. 写出测试分析报告。

4. 思考题:

1. 为何对工程结构测试前要进行理论计算分析?
2. 本工程结构模型中的各贴片位置是否合理?
3. 实测数据与理论计算数据有较大差应如何处理?

实验 18 工程结构减振实验(设计型实验)

任务书

1. 实验目的

1. 学习对工程结构进行减振实验的基本方法;
2. 学习使用振动台与动态检测系统进行减振测量;
3. 通过对输入波与输出波的测试确定工程结构模型减振作用, 并进行综合分析。

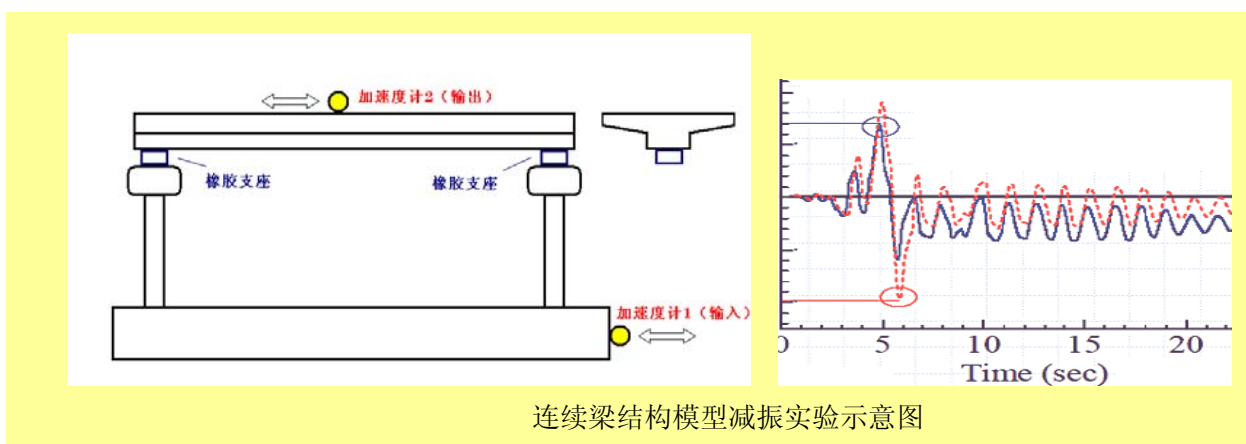
2. 实验设备

动态检测系统, 数据采集系统, 振动台, 工程结构模型等。

实验装置和实验要求:

工程结构模型为梁结构模型和橡胶支座模型, 自行确定实验方案。

3. 实验提示



1. 了解橡胶支座的构成和工作状况, 如梁的跨度, 截面尺寸, 载荷大小等;
2. 对工程结构进行简化, 建立力学模型, 作初步理论计算;
3. 了解振动台和动态检测系统的基本功能, 学习其使用方法;
4. 根据自行设计测试方案;
5. 按照测试方案选择的输入波形;
6. 按照测试方案选择工况进行测试, 记录原始测试数据;
7. 写出测试分析报告。

4. 思考题:

1. 橡胶支座的构成和主要作用?

演示实验 19、金属材料压缩、剪切及扭转破坏实验

1. 实验目的

1. 观察并比较低碳钢及铸铁试件压缩时的各种现象和破坏或失效情况。
2. 观察试样破坏情况。
3. 观察并比较低碳钢及铸铁试件扭转破坏的情况。
4. 比较低碳钢(塑性材料)和铸铁(脆性材料)的压缩力学性能。

2. 设备和量具

万能材料试验机；游标卡尺；剪切器；扭力试验机

3. 压缩实验原理及步骤

低碳钢和铸铁等金属材料的压缩试样一般制成圆柱形，高 h_0 与直径 d_0 之比在 1~3 的范围内。目前常用的压缩试验方法是两端平压法。这种压缩试验方法，试样的上下两端与试验机承垫之间会产生很大的摩擦力，它们阻碍着试样上部及下部的横向变形，导致测得的抗压强度较实际偏高。当试样的高度相对增加时，摩擦力对试样中部的影响就变得小了，因此抗压强度与比值 h_0/d_0 有关。由此可见，压缩试验是与试验条件有关的。为了在相同的试验条件下，对不同材料的抗压性能进行比较，应对 h_0/d_0 的值作出规定。实践表明，此值取在 1~3 的范围内为宜。若小于 1，则摩擦力的影响太大；若大于 3，虽然摩擦力的影响减小，但稳定性的影响却突出起来。

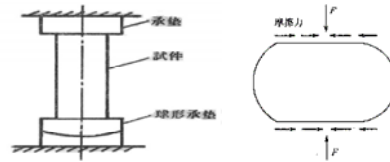


图 19-1 球型承垫图

为了保证使试样中心受压，试样两端面必须平行及光滑，并且与试样轴线垂直。实验时必须加球形承垫。球形承垫的作用是，当试样两端稍不平行，它可起调节作用。低碳钢试样压缩时同样存在弹性极限、比例极限、屈服极限而且数值和拉伸所得的相应数值差不多，但是在屈服时却不象拉伸那样明显。

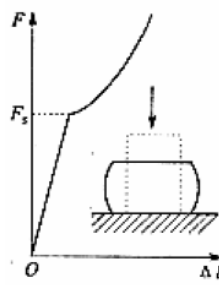


图 19-2 低碳钢压缩图

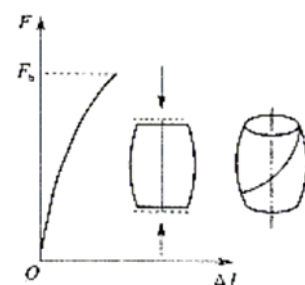


图 19-3 铸铁压缩图

从进入屈服开始，试样塑性变形就有较大的增长，试样截面面积随之增大。由于截面面积的增大，要维持屈服时的应力，载荷也就要相应增大。因此，在整个屈服阶段，载荷也是上升的，在测力盘上看不到指针倒退现象，这样，判定压缩时的 F_s 要特别小心地注意观察。

在缓慢均匀加载下，测力指针是等速转动的，当材料发生屈服时，测力指针的转动将出现减慢，这时所对应的载荷即为屈服载荷 F_s 。由于指针转动速度的减慢不十分明显，故还要结合自动绘图装置上绘出的压缩曲线中的拐点来判断和确定 F_s 。

低碳钢的压缩图(即 $F-\Delta l$ 曲线)，超过屈服之后，低碳钢试样由原来的圆柱形逐渐被压成鼓形。继续不断加压，试样将愈压愈扁，但总不破坏。所以，低碳钢不具有抗压强度极限(也可将它的抗压强度极限理解为无限大)，低碳钢的压缩曲线也可证实这一点。

铸铁试样压缩图如图19-3所示。载荷达最大值 F_b 后稍有下降，然后破裂，能听到沉闷的破裂声。铸铁试样破裂后呈鼓形。灰铸铁在拉伸时是属于塑性很差的一种脆性材料，但在受压时，试件在达到最大载荷 F_b 前将会产生一定的塑性变形，最后被压断裂。灰铸铁试样的断裂有两特点：

一是断口为斜断口。

二是按 F_m/A_0 求得的 R_m 远比拉伸时为高，大致是拉伸时的 3~4 倍。

为什么象灰铸铁这脆性材料的抗拉抗压能力相差这么大呢？这主要与材料本身情况（内因）和受力状态（外因）有关。铸铁压缩时沿斜截面断裂，其主要原因是由剪应力引起的。假使测量铸铁受压试样斜断面倾角 α ，则可发现它略大于 45° 而不是最大剪应力所在截面，这是因为试样两端存在摩擦力造成的。

3.1 低碳钢试样的压缩实验

(1) 测定试样的截面尺寸——用游标卡尺在试样高度中央处测量，沿两个互相垂直的方向各测一次取其算术平均值作为 d_0 来计算截面面积 A_0 。用游标卡尺测量试样的高度。

(2) 试验机的调整——估算屈服载荷的大小，选择测力度盘，调整指针对准零点，并调整好自动绘图仪。

(3) 安装试样——将试样准确地放在试验机活动平台承垫的中心位置上。

(4) 检查及试车——试车时先提升试验活动平台，使试样随之上升。当上承垫接近试样时，应减慢活动台上升的速度。注意：必须切实避免急剧加载。待试样与上承垫接触受力后，用慢速预先加少量载荷，然后卸载接近零点，检查试验机包括自动绘图部分工作是否正常。

(5) 进行试验——缓慢均匀地加载，注意观察测力指针的转动情况和绘图纸上曲线，以便及时而正确地确定屈服载荷，并记录之。

屈服阶段结束后继续加载，将试样压成鼓形即可停止。

3.2 铸铁试样的压缩实验

铸铁试样压缩试验的步骤与低碳钢压缩试验基本相同，但不测屈服载荷而只要测最大载荷。此外，要在试样周围加防护罩；以免在试验过程中试样飞出伤人。

4. 剪切实验原理及步骤

对于以剪断为主要破坏形式的零件，进行强度计算时，引用了受剪面上工作剪应力均匀分布的假设，并且除剪切外，不考虑其他变形形式的影响。这当然不符合实际情况。为了尽量降低此种理论与实际不符的影响，作了如下规定：这类零件材料的抗剪强度，必须在与零件受力条件相同的情况下进行测定。此种试验，叫做直接剪切试验。

试验所用设备，主要是万能试验机和剪切器。这里只介绍剪切器的构造与试验原理。

图 19-4 是一剪切器的构造示意图：它分为上支座 1 和下支座 2 两部分。把方柱形试样 3 按图示情况插入剪切器，用万能试验机对剪切器施加载荷 P ，则试样的 A、B 两个截面就是受剪面。随着载荷 P 的增加，受剪面处的材料经过弹性、屈服等阶段，最后沿受剪面发生剪断裂。取出剪断了的三段试样，可以观察到两种现象。一种现象是这三段试样略带些弯曲，如图 19-5 所示。

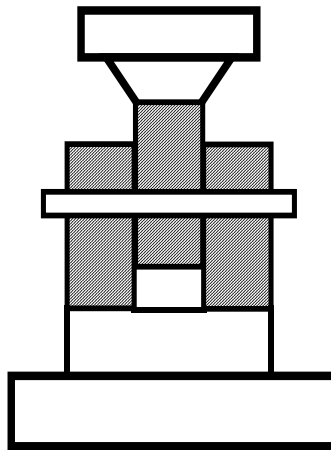


图 19-4 剪切器的构造示意图

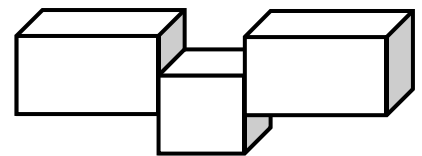


图 19-5

它表明：尽管试样是剪断的，但试样承受的作用却不是单纯的剪切，而是既有剪切也有弯曲，不过以剪切为主。另一种现象是断口明显地区分为两部分：平滑光亮部分与纤维状部分。断口的平滑光亮部分，是在屈服过程中形成的。在这个过程中，受剪面两侧的材料有较大的相对滑移却没有分离，滑移出来的部分与剪切器是密合接触的，因而磨成了光亮面。断口的纤维部分，是在剪断裂发生的瞬间形成的。在此瞬间，由于受剪面两侧材料又有较大的相对滑移，未分离的截面面积已缩减到不能再继续承担外力，于是产生了突然性的剪断裂。剪断裂是滑移型断裂，纤维状断口正是这种断裂的特征。

(1) 测量试样截面尺寸。测量部位应在受剪面附近。测量误差应小于 1%。这就是说，如果试样的公称直径为 10mm，量具的最小读数即精度不大于 $10 \times 1\% = 0.1 \text{ mm}$ 。

(2) 选择试验机及所用量程。根据试样截面面积 F_0 和估计的剪切强度极限 τ_b ，由 $F_m = \tau_0 F$ 值会估计所需最大载荷，据此选择试验机及所用量程。

(3) 安装剪切器及试样，测读破坏载荷。按常规调整好试验机之后，将试样装入剪切器并将剪切器置于试验机活动平台的球面座垫上（注意对中要正确）。开动机器加载直到试样剪断，读取破坏载荷。加载过程中最好利用自动绘图器观察大致的载荷—变形关系，结合示力指针前进情况，看能不能粗略地判定试样开始进入全面屈服时的载荷。

(4) 试验完毕，做好常规的清理工，填写实验报告。

5. 金属材料扭转实验原理

本试验使用圆形截面试件。将试件装在扭力试验机上，开动机器，给试件加扭矩。利用机器上的自动绘图装置，可以得到 $M_n - \varphi$ 曲线。这 $M_n - \varphi$ 曲线也叫扭转图。 $M_n - \varphi$ 曲线中起始直线段 OA 表明试件在这阶段中的 M_n 与 φ 成比例，剪应力呈线性分布。在 A 点处， M_p 与 φ 的比例关系开始破坏，此时截面周边上的剪应力达到了材料的剪切屈服极限 τ_s ，相应的扭矩记为 M_p 。由于这时截面

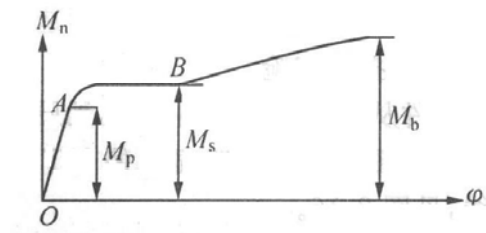


图 19-6 低碳钢试件扭转图

内部的剪应力尚小于 τ_s ，故试件仍具有承载能力， $M_n - \varphi$ 曲线呈继续上升的趋势。扭矩超过 M_p 后，截面上的剪应力分布发生变化。在截面上出现了一个环状塑性区，并随着 M_n 的增长，塑性区逐步向中心扩展， $M_n - \varphi$ 曲线稍微上升，直到 B 点趋于平坦，截面上各材料完全达到屈服，扭矩度盘上的指针几乎不动或摆动，此时测力度盘上指示出的扭矩或指针摆动最小值即为屈服扭矩 M_s 。根据静力平衡条件，可以求得 τ_s 与 M_s 的关系为： $M_s = \int_A \rho \tau_s dA$

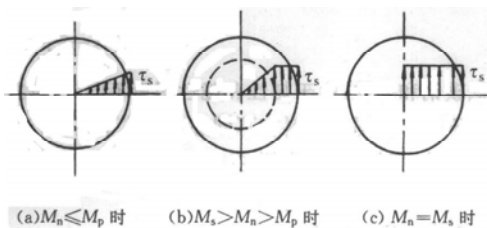


图 19-7 截面上剪应力分布图

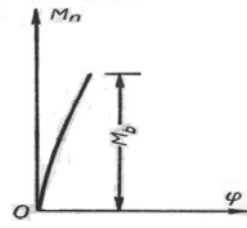


图 19-8 铸铁的扭转图

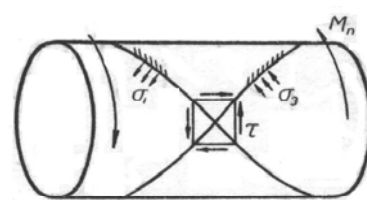


图 19-9 试样受扭的应力分布图

将式中 dA 用环状面积元素 $2\pi\rho d\rho$ 表示，则有 $M_s = 2\pi\tau_s \int_0^{d/2} \rho^2 d\rho = \frac{4}{3}\tau_s W_n$ ；故剪切屈服极限

$$\tau_s = \frac{3M_s}{4W_n}$$

式中： $W_n = \frac{\pi d^3}{16}$ 是试件的抗扭截面模量。

继续给试件加载，试件再继续变形，材料进一步强化。当达到 $M_n - \varphi$ 曲线上的 C 点时，试件被剪

断。由测力度盘上的被动计可读出最大扭矩 M_b ，可得剪切强度极限： $\tau_b = \frac{3M_b}{4W_n}$

铸铁的 $M_n - \varphi$ 曲线从开始受扭直到破坏，近似为一直线，按弹性应力公式，其剪切强度极限：

$$\tau_b = \frac{M_b}{W_n}$$



图 19-10 扭转破坏现象

试件受扭时，材料处于纯剪切应力状态，在垂直于杆轴和平行于杆轴的各平面上作用着剪应力，而与杆轴成 45° 角的螺旋面上。则分别只作用着 $\sigma_1 = \tau$ 、 $\sigma_3 = -\tau$ 的正应力，见试样受扭的应力分布图所示。由于低碳钢的抗拉能力高于抗剪能力，故试件沿横截面剪断，而铸铁的抗拉能力低于抗剪能力，故试件从表面上某一最弱处，沿与轴线成 45° 方向拉断成一螺旋面。

5.1 扭转实验试验步骤

(1) 用游标卡尺测量试件直径。在试件的中央和两端共三处，每处测一对正交方向，取平均值作该处直径，然后取三处直径最小值求出试件抗扭截面模量 W_n 。

(2) 根据求出的 W_n 、估计试件材料的 τ_b ，求出大致需要的最大载荷，确定所需的机器量程。

(3) 将试件两端装入试验机的夹头内，调整好绘图装置，将指针对准零点，并将角度测量盘调零。

(4) 用粉笔在试件表面上画一纵向线，以便观察度件的扭转变形情况。

(5) 对于低碳钢试件，可以先用手动（或慢速电动加载）缓慢而均匀地加载，当测力指针前进速度渐渐减慢以至停留不动或摆动，这时，它表明的值就是 M_s （注意：指针停止不动时间很短，因此要留心观察）。然后卸掉手摇柄，用电动加载（或换成快速电动加载）直至试件破坏并立即停车。记下被动指针所指的最大扭矩，注意观察角度测量盘的读数，记下角度测量盘的读数。

(6) 铸铁试件的试验步骤与低碳钢相同，可直接用电动加载，记录试件破坏时的最大扭矩值。

6. 思考题

(1) 铸铁的破坏形式说明了什么？

(2) 低碳钢和铸铁在拉伸及压缩时机械性质有何差异？

(3) 低碳钢与铸铁扭转试样破坏等情况有何不同？为什么。

(4) 根据拉伸、压缩和扭转三种试验结果，综合分析低碳钢与铸铁的机械性质。

(5) *、铸铁试样压缩，在最大载荷时未破裂，载荷稍减小后却破裂。为什么？

(6) *、铸铁试样破裂后呈鼓形，说明有塑性变形，可是它是脆性材料，为何有塑性变形呢？

注：带*号的思考题，已超越了同学现有的知识范围，仅供参考。

演示实验 20 金属材料疲劳演示实验

1. 实验目的

了解材料的疲劳性质，测定某个应力等级下的疲劳寿命。

了解高频疲劳试验机的工作原理和操作方法。

掌握不确定性测量的基本分析方法

2. 实验设备

高频疲劳试验机，摩尔疲劳试验机，频率——80~250Hz、能力——100kN、负载形式——拉压、对称循环力——最大±50kN。

3. 实验概述

材料疲劳寿命是一个特殊的机械性质。在不同的应力水平下材料具有不同的疲劳寿命。疲劳破坏特征：它是一种潜在的失效方式，在静载荷下无论显示脆性与否，在疲劳断裂时都不会产生明显的塑性变形，而断裂是突发的没有预兆。构件上存在表面缺陷（缺口、沟槽），即使在名义应力不高的情况下，也会由于局部的应力集中而形成裂纹，随着加载循环的增加，裂纹不断扩展，直至断裂。

在测定了各级应力水平的疲劳寿命（包括疲劳极限）时，可以确定一条材料的疲劳寿命曲线，即S-N曲线（应力—寿命曲线）。在交变应力的应力循环中，最小应力和最大应力的比值 $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ 称为循环特征或应力比。在 r 一定的情况下，如试样的最大应力为某一值时，经过N次循环后，发生疲劳失效，则称N为此应力下的疲劳寿命。在同一循环特征下，最大应力越大。则寿命越短。最大应力与寿命的关系曲线见应力—寿命曲线图。

各应力级别的寿命并不是一个确定性的量值。它的对数是按照概率正态分布的一个随机变量。因此，试

验需要测定多个同应力级别的试件的寿命（ n 个寿命），对这 n 个寿命计算对数寿命的平均值和标准差。将试件夹卡到高频疲劳试验机上。注意试件要对中。

启动疲劳试验机静载荷和动载荷。记录寿命。

五根试件计算平均值和标准差、以及变异系数。

三个应力水平或四个应力水平的对数疲劳寿命可画出一条疲劳寿命曲线。

4. 预习要求

阅读本试验讲义及有关的附录标准。

阅读有关高频疲劳试验机的原理和操作指南。

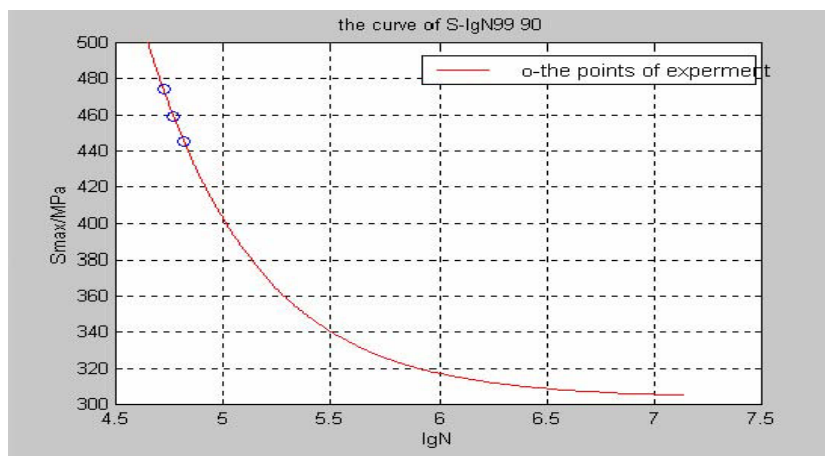


图 20-1 应力—寿命曲线

演示实验 21 光弹实验

1. 实验目的

了解光弹性实验的基本原理和方法，认识偏光弹性仪和光学元件，学习光弹性试验的一般方法。观察模型受力时的条纹图案，识别等差线和等倾线，了解主应力差和条纹值的测量。

2. 实验设备

- (1) 由环氧树脂或聚碳酸脂制作的试件模型。
- (2) 数码光弹性仪。



图 21-1 数码光弹性仪

3. 试验原理及装置

光弹性测试方法是光学与力学紧密结合的一种测试技术。它采用具有暂时双折射性能的透明材料，制成与构件形状几何相似的模型，使其承受与原构件相似的载荷。将此模型置于偏振光场中，模型上即显出与应力有关的干涉条纹图。通过分析计算即可得知模型内部及表面各点的应力大小和方向。再依照模型相似原理就可以换算成真实构件上的应力。因为光弹性测试是全域性的，所以具有直观性强，可靠性高，能直接观察到构件的全场应力分布情况。特别是对于解决复杂构件、复杂载荷下的应力测量问题，以及确定构件的应力集中部位，测量应力集中系数等问题，光弹性法测试方法更显得有效。

3.1 明场和暗场

由光源S、起偏镜P和检偏镜A就可组成一个简单的平面偏振光场。起偏镜P和检偏镜A均为偏振片，各有一个偏振轴(简称为P轴和A轴)。如果P轴与A轴平行，由起偏镜P产生的偏振光可以全部通过检偏镜A，将形成一个全亮的光场，简称为亮场。如果P轴与A轴垂直，由起偏镜P产生的偏振光全部不能通过检偏镜A，将形成一个全暗的光场，简称为暗场。亮场和暗场是光弹性测试中的基本光场。

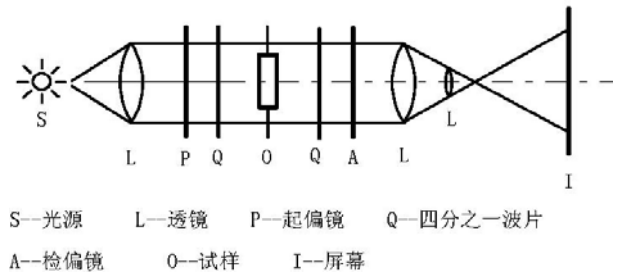


图 21-1 光弹性测试实验装置

3.2 应力—光学定律

当由光弹性材料制成的模型放在偏振光场中时，如模型不受力，光线通过模型后将不发生改变；如模型受力，将产生暂时双折射现象，即入射光线通过模型后将沿两个主应力方向分解为两束相互垂直的偏振光，这两束光射出模型后将产生一光程差 δ 。实验证明，光程差 δ 与主应力差值 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 和模型厚度 t 成正比，称为应力—光学定律：即 $\delta = Ct(\sigma_1 - \sigma_2)$ ，式中的 C 为模型材料的光学常数，与材料和光波波长有关。

两束光通过检偏镜后将合成在一个平面振动，形成干涉条纹。如果光源用白色光，看到的是彩色干涉条纹；如果光源用单色光，看到的是明暗相间的干涉条纹。

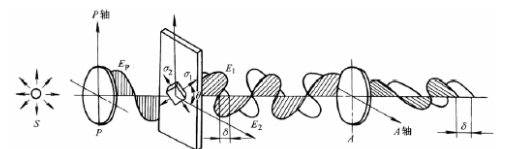


图 21-2 光程差示意图

3.3 等倾线和等差线

从光源发出的单色光经起偏镜P后成为平面偏振光，其波动方程为

$$E_p = a \sin \omega t$$

式中， a 为振幅； t 为时间； ω 为光波角速度。

E_p 传播到受力模型上后被分解为沿两个主应力方向振动的两束平面偏振光 E_1 和 E_2 。设 θ 为主应力 σ_1 与A轴的夹角，这两束平面偏振光的振幅分别为 $a_1 = a \sin \theta$ ， $a_2 = a \cos \theta$ 。一般情况下，主应力 $\sigma_1 \neq \sigma_2$ ，

故 E_1 和 E_2 会有一个角程差 $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta$ 。假如沿 σ_2 的偏振光比沿 σ_1 的慢，则两束偏振光的振动方程

是：

$$E_1 = a \sin \theta \sin \omega t$$

$$E_2 = a \cos \theta \sin(\omega t - \varphi)$$

当上述两束偏振光再经过检偏镜A时，都只有平行于A 轴的分量才可以通过，这两个分量在同一平面内，合成后的振动方程是

$$E = a \sin \theta \sin \frac{\varphi}{2} \cos(\omega t - \frac{\varphi}{2})$$

式中，E 仍为一个平面偏振光，其振幅为： $A_0 = a \sin 2\theta \sin \frac{\varphi}{2}$

根据光学原理，偏振光的强度与振幅 A_0 的平方成正比，即

$$I = KA_0^2 = a^2 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

式中的K是光学常数。把式 $\delta = Ct(\sigma_1 - \sigma_2)$ 和式 $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta$ 代入上式可得：

$$I = Ka^2 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\pi Ct(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda}$$

由上可以看出，光强I 与主应力的方向和主应力差有关。为使两束光波发生干涉，相互抵消，必须 $I = 0$ 。所以：

(1) 当 $a = 0$ ，即没有光源，不符合实际。

(2) 当 $\sin 2\theta = 0$ ，则 $\theta = 0^\circ$ 或 90° ，即模型中某一点的主应力 σ_1 向与A 轴平行(或垂直)时，在屏幕上形成暗点。众多这样的点将形成暗条纹，这样的条纹称为等倾线。

在保持P 轴和A 轴垂直的情况下，同步旋转起偏镜P 与检偏镜A 任一个角度 α ，就可得到 α 角度下的等倾线。

(3) 当 $\frac{\pi Ct(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda} = n\pi$ ，即： $\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{n\lambda}{Ct} = n \frac{f_\sigma}{t}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)

式中的 f_σ 称为模型材料的条纹值。满足上式的众多点也将形成暗条纹，该条纹上的各点的主应力之差相同，故称这样的暗条纹为等差线。随着n 的取值不同，可以分为0级等差线、1 级等差线、2 级等差线。

综上所述，等倾线给出模型上各点主应力的方向，而等差线可以确定模型上各点主应力的差($\sigma_1 - \sigma_2$)。但对于单色光源而言，等倾线和等差线均为暗条纹，难免相互混淆。为此，在起偏镜后面和检偏镜前面分别加入1/4波片Q1 和Q2，得到一个圆偏振光场，最后在屏幕上便只出现等差线而无等倾线。有关圆偏振光场，这里不作详述，读者可参阅有关专著。

4. 演示内容

4.1 对径受压圆盘

对于对径受压圆盘，由弹性力学可知，圆心处的主应力为

$$\sigma_1 = \frac{2F}{\pi Dt} \quad \sigma_2 = -\frac{6F}{\pi Dt}$$

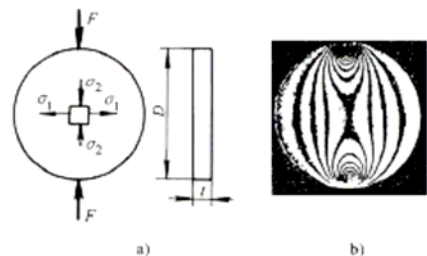
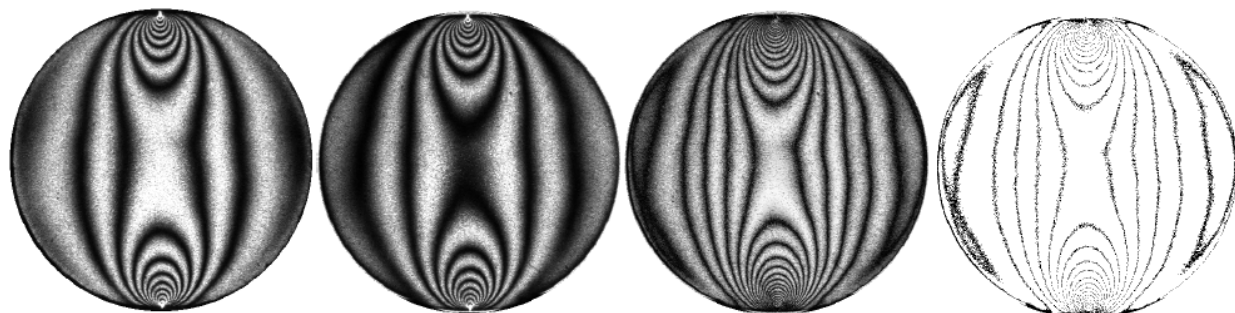


图 21-3 对径受压圆盘

代入光弹性基本方程可得 $f_\sigma = \frac{t(\sigma_1 - \sigma_2)}{n} = \frac{8F}{\pi Dn}$ 对应于一定的外载荷 F ，只要测出圆心处的等差线条纹级数 n ，即可求出模型材料的条纹值 f_σ 。实验时，为了较准确地测出条纹值，可适当调整载荷大小，使圆心处的条纹正好是整数级。



暗场等色线数码图像 亮场等色线数码图像 暗场等色线减亮场等色线取绝对值的数码图像与灰度

图21-4 对径受压圆盘的光弹干涉条纹

4.2 含有中心圆孔薄板的应力集中观察

薄板受拉时，中心圆孔的存在，使得孔边产生应力集中。孔边A点的理论应力集中因数为 $K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m}$ ，

式中的 σ_m 为A点所在横截面的平均应力，即

$\sigma_m = \frac{F}{at}$ 。 σ_{\max} 为A点的最大应力。因为A点为单向

应力状态， $\sigma_1 = \sigma_{\max}$ ， $\sigma_2 = 0$ 得 $\sigma_m = \frac{nf_\sigma}{t}$ 因此，

$$K_t = \frac{nf_\sigma \cdot a}{F}$$

实验时，调整载荷大小 F ，使得通过A点的等差线恰好为整数级 n ，再将预先测好的材料条纹值 f_σ 代入上式，即可获得理论应力集中因数 K_t 。

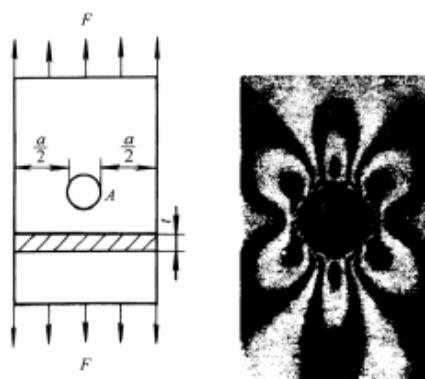


图21-5 中心圆孔薄板的应力集中

5. 实验步骤

- (1) 仪器准备：首先保证设备工作台的各部件完整，牢靠，稳定开启光源箱的点光束，保证光源，偏振片，1/4 波片和场镜，成像的中心在一条轴线上。
- (2) 起偏镜，检偏镜的调整
- (3) 同步操纵箱用来调整两偏振器的角度
- (4) 调整数字式载荷显示仪，接通电源，置于“测力”位置，转动“预调”旋钮，置载荷初读数为0，在将开关置于“标定”位置，用小改锥调节，是读数选定在规定的标定值即可。重复2~3遍后，把开关置于“测力”位置，就可以进行加载
- (5) 调整加力架：模型选定好后，调整架子的空间位置，由于加力架为机械传递，配合误差较大，因此注意调整和对中。
- (6) 相机的准备：松开滑道上紧轮，调整数码相机位置及最佳投影效果。
- (7) 完成拍摄过程：在选定时曝光时间后，开启“开”、“闭”、“定时”等过程，关闭闪光灯。选择微距拍摄，对准好拍摄的干涉图像，调整好焦距和光圈后，先半按快门，再按下快门拍摄。
- (8) 保存拍摄图片：完成拍摄后，用数码相机专用数据线连接到计算机，把拍摄好的图片保存到计算机中，可根据自己的学号建立目录进行存储，以便指导教师检查。
- (9) 在计算机的显示器上观察拍摄好的图片，检查图像是否清晰，如果不清晰，应找出原因重新拍摄。

直到图像清晰为止。

(10) 收拾工具，将试样放回原处。

6. 注意事项

严格避免用手触摸仪器的各光学镜面；
光学镜面上的灰尘和污渍要用专用工具清除；
给试样加载时要缓慢，并注意不要过载。

7. 思考题：

- (1) 如何在光弹性仪上布置正交平面偏振光场和正交圆偏振光场？
- (2) 为何要准确地测定光弹性材料的条纹值？
- (3) 如何区分等差线和等倾线？

演示实验 22 转子临界转速实验

1. 实验目的

- (1) 测量转子的第 1 阶临界转速；
- (2) 测量转子的伯德图，学习从伯德图识别其临界转速；
- (3) 学会使用 JXCRAS 随机信号与数据采集系统旋转机械程序 VmCras 进行测量数据的采集、分析和处理。

2. 实验装置

转子动力学试验台，转子位置距转子支座 12cm。与转速传感器、速度计或位移传感器配合使用。

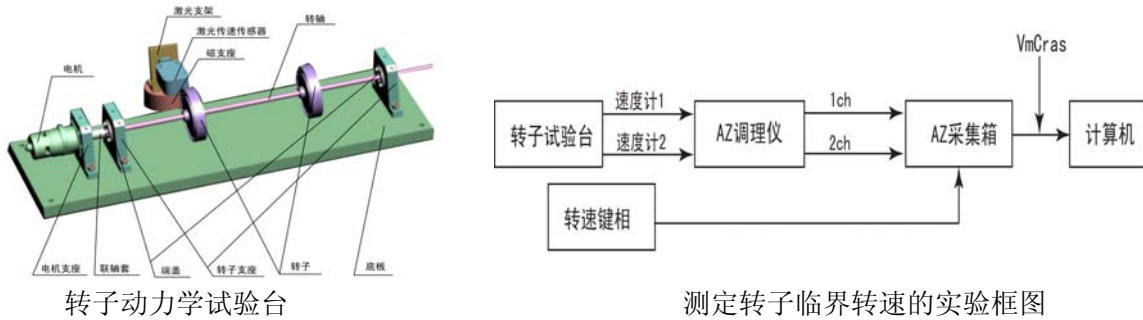


图 22-1

转子动力学试验台；调速电机：DC 24V，可调转子转速；速度传感器；转速传感器；AZ 信号调理仪；AZ 采集箱或 PCI9111 采集卡、计算机；VmCras 旋转机械程序。

3. 实验原理

转子在运转时，转子上的干扰力使回转轴弯曲，且产生轴支座的动压力，在该力作用下支座或基础将产生振动。若在支座上安装测量支座振动的传感器，例如速度传感器，就可接受支座速度的振动信号，当回转轴的转速发生变化时，支座的振动也随之变化。所谓转子的伯德图是一张显示振动幅值与相位随着回转轴转速变化而变化的图线。伯德图的振动幅值—转速曲线反映了振动幅值随回转轴转速变化的规律，曲线的极大值所对应的转速便是回转轴轮系的临界转速，第 1 个极大值处的转速称为第 1 临界转速，依次为第 2 阶、3 阶……的临界转速。

在临界转速测定中，应用旋转机械程序 VmCras 的外部方式采集数据，通过调压缓慢地改变转子的转速，即可在计算机屏幕上观察到转子的转速及振动信号的变化。采集结束后，通过工具条上的“B”按钮显示伯德图，从伯德图识别临界转速。

4. 实验步骤

- (1) 转子试验台底板四个角上各用一块减振橡胶块垫上；
- (2) 按图 2 连接各仪器设备。对于单通道，速度计水平安装于一个支座上，对于双通道，用两个速度计，皆水平安装于两支座上；
- (3) 连接计算机电源；
- (4) 在 WINDOWS 下调用 SsCras 程序，用敲击法自由运行方式或触发方式采集数据作频谱分析，以确定第 1 固有频率值(水平敲击转轴或转子)；
- (5) 在 WINDOWS 下调用 VmCras 程序，建立作业，选择单通道或双通道，按确认键；
- (6) 参数设置

采集方式：外部(图 22-3)
采集时间：60 秒



图 22-2 建立作业图

控制方式：监示采集(图 22-4)

工程单位：mm/s

校正因子：速度传感器灵敏系数与 AZ 调理仪放大倍率处乘积，试验所采用的速度传感器灵敏系数为 20mV/mm/s，AZ 调理仪放大倍率取 10。

电压范围：10V。

选择使用转速传感器。

低通滤波 100Hz。

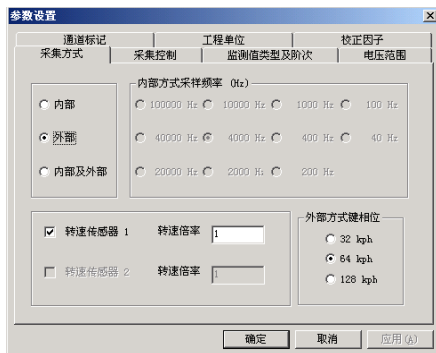


图 22-3 参数设置(采集方式)

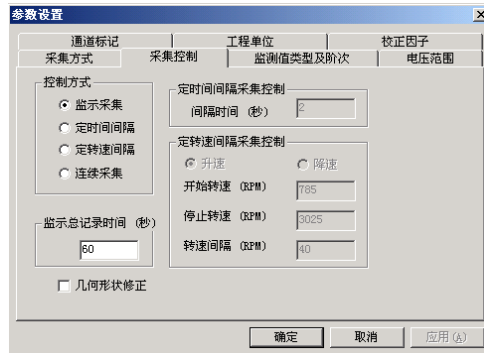


图 22-4 参数设置(控制方式)

(7) 开启直流电源开关，压 VmCras 主界面上在线监测(图 6)，调压使转子转到某一转速，例如 1400 转/分；

(8) 压 VmCras 主界面上在线监测正式进行采集，此时在屏幕上可以观察到振动波形，在波形上还有两个空心的小圆，这是键相标记经过转速传感器时打在波形上的标记，两个标记点间的时间间隔是轮转一圈的周期(以 ms 计)，若将其化成秒(s)，则其倒数便是回转轴的转动频率，再乘以 60 得以每分钟转多少圈的转速，该值应与幕屏右下方测量的转速一致；

(9) 缓慢地调高直流电源电压，提高转子转速，在计算机屏幕上可以看到振动信号的振幅和相位变化。当接近转子的临界转速时，振幅明显地增高，随着转速增加，随之可观察到振幅明显地减少。振幅的这种变化反映了转子在某一转速时，振幅达到极大值，该转速便是临界转速，首次出现是其第 1 临界转速；

(10) 过临界转速为使伯德图完整，再稍许继续调高直流电源，然后压键盘上 S 键退出在线监测；

(11) 压 VmCras 主界面上的工具条“B”进入伯德图，确认临界转速有效，结束试验，否则重新步骤(6)~(11)；

(12) 结束试验，关闭直流电源开关。

VmCras 程序自动存盘。

注：可先进入在线监测调转速至 1400 转/分，退出后再次进入在线监测进行正式测量。

5. 实验报告

- (1) 简述实验目的、实验原理；
- (2) 画实验框图，说明各仪器设备的功能；
- (3) 打印伯德图，从伯德图识别临界转速；

6. 问题讨论

(1) 用敲击法测定回转轴轮系的固有频率，与测得的临界转速比较，其结果说明什么？

(2) 若两转子相对靠近，临界转速如何变化？

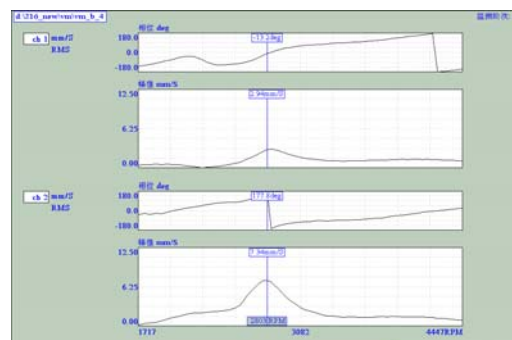


图 22-5 伯德图

附录 A 测量不确定度

A.1 概念

测量误差与不确定度是计量测试的基本问题,任何计量测试都不可避免地存在着测量误差或不确定度。计量测试的直接目的,通常在于得出被测量的量值(数值×计量单位)及其测量误差或不确定度。量值体现被测量的大小,而测量误差或不确定度反映量值的可疑程度。也可以从另一个角度说,测量误差或不确定度是测量精度或可信程度的反映;测量误差或不确定度越小,测量精度或可信程度就越高。只有量值而无测量误差或不确定度的数据不是完整的测量结果,也就不具备充分的社会实用价值。所以,实验报告上的结果应给出测量结果的不确定度,测量结果的报告应尽量详细。完整的测量结果至少含有两个基本量:一是被测量的最佳估计值,在很多情况下,测量结果是在重复观测的条件下确定的。二是描述该测量结果分散性的量,即测量结果不确定度。报告测量结果的不确定度有合成标准不确定度和扩展不确定度两种方式。在报告与表示测量结果及其不确定度时,对两者数值的位数,技术规范 JJF1059-1999《测量不确定度评定与表示》做出了相应的规定。

A.1.1 术语

1) 标准不确定度: 不确定度是说明测量结果可能的分散程度的参数。可用标准偏差表示,也可用标准偏差的倍数或置信区间的半宽度表示。

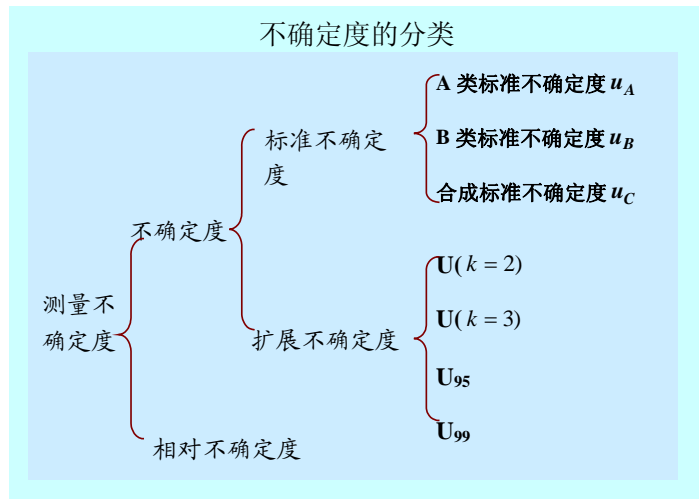
① A类标准不确定度: 用统计方法得到的不确定度。

② B类标准不确定度: 用非统计方法得到的不确定度

2) 合成标准不确定度: 由各不确定度分量合成的标准不确定度,称为合成标准不确定度。

3) 扩展不确定度: 扩展不确定度是由合成标准不确定度的倍数表示的测量不确定度,即用包含因子 k 乘以合成标准不确定度得到一个区间半宽度,用符号 U 表示。

包含因子的取值决定了扩展不确定度的置信水平。扩展不确定度确定了测量结果附近的一个置信区间。通常测量结果的不确定度都用扩展不确定度表示。



关于测量误差

在国内外的诸多论著中,基本上都将测量误差定义为:

测量误差——测量结果与被测量真值之差,即: 测量误差=测量结果-真值

其中,测量结果的定义为:

测量结果——由测量所得到的被测量值。

注1:测量结果包括示值、未修正测量结果、已修正测量结果以及若干次测量的平均值;

2:在测量结果的完整表述中,应包括测量不确定度和有关影响量的值。

另外,关于示值、未修正测量结果、已修正测量结果以及测得值则有如下定义:

(测量器具的)示值——由测量器具所指示的被测量值。

未修正测量结果——有系统误差而未作修正的测量结果。

已修正测量结果——考虑到有系统误差存在,而对未修正结果作修正后所得的测量结果。

测得值——从测量器具直接得出或经过必要计算而得出的量值。

由上述定义可见:

(1)测量结果是由测量所得到的被测量的量值,并可以是示值、未修正测量结果或已修正测量结果。如前所列,示值、未修正测量结果和已修正测量结果均有自己的定义,而且完全不同。其中,示值一般既有系统误差也有随机误差;而未修正测量结果和已修正测量结果则只能针对系统误差,因为随机误差不可能修正。

(2)若考虑到“测量结果”定义中的注2,则测量结果中应包括测量不确定度,而不确定度中又必然含有系统误差和随机误差所导致的成分。也就是说,测量结果中既包括系统误差也包括随机误差。也就是说,测量误差是测量结果的重要组成部分。即:测量结果=测得值±测量误差(或不确定度)。在国内外的文献中,一般皆将测量不确定度描述为:“测量不确定度(Uncertainty of Measurement)是测量结果所带有的一个参数,用以表征合理地赋予被测量之值的分散性。”

A.1.2 不确定度的来源及误差与不确定度的区别

①被测量定义的不完善,实现被测量定义的方法不理想,被测量样本不能代表所定义的被测量。

②测量装置或仪器的分辨力、抗干扰能力、控制部分稳定性等影响。

③测量环境的不完善对测量过程的影响以及测量人员技术水平等影响。

④计量标准和标准物质的值本身的不确定度，在数据简化算法中使用的常数及其他参数值的不确定度，以及在测量过程中引入的近似值的影响。

⑤在相同条件下，由随机因素所引起的被测量本身的不稳定性。

误差与不确定度的区别

测量误差	测量不确定度
客观存在的，但不能准确得到，是一个定性的概念	表示测量结果的分散程度，可根据试验、资料等信息定量评定。
误差是不以人的认识程度而改变	与人们对被测量和影响量及测量过程的认识有关。
随机误差、系统误差是两种不同性质的误差	A类或B类不确定度是两种不同的评定方法，与随机误差、系统误差之间不存在简单的对应关系。
须进行异常数据判别并剔除。	剔除异常数据后再评定不确定度
在最后测量结果中应修正确定的系统误差。	在测量不确定度中不包括已确定的修正值，但应考虑修正不完善引入的不确定度分量。
“误差传播定律”可用于间接测量时对误差进行定性分析。	不确定度传播律更科学，用于定量评定测量结果的合成不确定度

A. 1. 3 多次直接测量量的标准不确定度的评定

A. 1. 3. 1 标准不确定度的 A 类评定方法

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$S(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{式中自由度为 } \nu = n-1.$$

$$u_A = S(\bar{x}) = \frac{S(X)}{\sqrt{n}}$$

③ 自由度意义：自由度数值越大，说明测量不确定度越可信。

A. 1. 3. 2 B 类标准不确定度的评定

由于 B 类不确定度在测量范围内无法用统计方法评定，方法评定的主要信息来源是以前测量的数据，生产厂提供的技术说明书，各级计量部门给出的仪器检定证书或校准证书等。从力学实验教学的实际出发，一般只考虑由仪器误差影响引起的 B 类不确定度 u_B 的计算。在某些情况下，有的依据仪器说明书或检定书，有的依据仪器的准确度等级，有的则粗略地依据仪器的分度或经验，从这些信息可以获得该项系统误差的极限 Δ ，而不是标准不确定度。它们之间的关系为

$$u_B = \frac{\Delta}{C}$$

式中，C 为置信概率 $p=0.683$ 时的置信系数，对仪器的误差服从正态分布、均匀分布、三角分布，C 分别为 3 、 $\sqrt{3}$ 、 $\sqrt{6}$ 。大多数力学实验测量可认为一般仪器误差分布函数服从均匀分布，即 $C=\sqrt{3}$ 。实验中 Δ 主要与未定的系统误差有关，而未定系统误差主要是来自于仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ ，用仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 代替 Δ ，所以一般 B 类不确定度可微明化为

$$u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$$

常用实验设备的 $\Delta_{\text{仪}}$ 值见下表

仪器名称	$\Delta_{\text{仪}}$	仪器名称	$\Delta_{\text{仪}}$
米尺	0.5mm	电阻应变仪	$1 \mu \epsilon$
游标卡尺	0.02mm	拉子拉伸试验机	10N 或 5N
千分尺	0.005	各类数据仪表	仪器最小计数
计时器	仪器最小读数 (1s, 0.1s, 0.01s)	电表	K%M (K 准确度或级别, M 量程)

表附 1-2 几种非正态分布的置信因子 C

分布	三角	梯形	均匀	反正弦
置信因子 C (置信概率 p=0.683)	$\sqrt{6}$	$\sqrt{6}/\sqrt{1+\beta^2}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{2}$

单次直接测量的标准不确定度的评定

在实验中，只测一次大体有三种情况：第一，仪器精度较低，偶然误差很小，多次测量读数相同，不必进行多次测量；第二，对测量结果的准确程度要求不高，只测一次就够了，第三，因测量条件的限制（如金属拉伸试验中试样不可重复使用），不可能进行多次测量。在单次测量中，不能用统计方法求标准偏差，因而不确定度可简化

为： $u_A = 0$ ， $u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$ 。

A1.3.3 合成标准不确定度的计算方法

合成标准不确定度评定

对于受多个误差来源影响的某直接测量量，被测量量 X 的不确定度可能不止一项，设其有 k 项，且各不确定分量彼此独立，其协方差为零，则用方各根方式合成，不论各分量是由 A 类评定还是 B 类评定得到。称合成标准不确定度，用符号 u_C 表示

$$u_C = \sqrt{\sum_{i=1}^k u_i^2}$$

事实上，在大多数情况下，我们遇到的每一类不确定度只有一项，因此，合成标准不确定度计算可简化为：

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^k (xi - \bar{x})^2 + \frac{\Delta_{\text{仪}}^2}{3}}$$

评价测量结果，也写出相对不确定度，相对不确定度常用百分数表示

$$E_x = \frac{u_C}{x} \times 100\%$$

A1.3.4 关于扩展(展伸)不确定度与测量不确定度的报告与表示

扩展不确定度 U (expanded uncertainty) 由合成不确定度 u_C 与包含(覆盖)因子 k (coverage factor) 的乘积得到 $U = u_C \times k$ 。

包含因子是选取方法有以下几种：

1) 如果无法得到合成标准不确定度的自由度，且测量值接近正态分布时，则一般取 k 的典型值为 2 或 3，通常在工程应用时，按惯例取 $k=3$ 。

2) 根据测量值的分布规律和所要求的置信水平，选取 k 值。例如，假设为均匀分布时，置信水平 $p=0.95$ ，查表附 1-3 得 $k=1.65$ 。

完整的测量结果应有两个基本量，一是被测量量的最佳估计值 y ，一般由数据测量列的算术平均值给出，另一个就是描述该测量结果分散性的量，即测量不确定度，为方便起见，在实验中一般以合成标准不确定度 u_C 给出。即

$$\bar{x} \pm u_C \quad (\text{置信概率 } p=68.3\%)$$

$$\bar{x} \pm U \quad (\text{置信概率 } p=95.0\%)$$

A.1.4 测量不确定度的评定步骤

- ①明确被测量的定义及测量条件、原理、方法、被测量的数学模型，以及所用的测量标准、测量设备等；
- ②分析并列对测量结果有明显影响的不确定度来源，每个来源为一个标准不确定度分量；
- ③定量评定各不确定度分量，特别注意采用 A 类评定方法时要剔除异常数据；

对直接单次测量， $u_A = 0, u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{3}$ ， $u_C = u_B$ ；对直接多次测量，先求测量列算术平均值 \bar{x} ，再求平均

表附 1-3 均匀分布时置信概率与置信因子 k 的关系

p (%)	k
57.74	1
95.0	1.65
99.0	1.71
100	1.73

值的实验标准差、A类标准不确定度、B类标准不确定度， $s(\bar{x}), u_A = s(x), u_B = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}$ 。

④计算合成标准不确定度 $u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$ 。

⑤计算扩展不确定度 $U = u_C \times k$ 。

⑥报告测量结果实验中的不确定度简化为： $x = \bar{x} \pm U$ （置信概率 $p=95.0\%$ ）。

A. 1. 5 测量结果的有效位数

A1. 5. 1 技术规范的规定

规范规定：输入和输出的估计值应修约到与不确定度的位数一致。即经计算得到测量结果的不确定度以后，要按测量结果不确定度的有效位数来修约测量结果，确定测量结果的有效位数，使采用同一测量单位的测量结果及其不确定度的末位对齐。

A1. 5. 2 测量结果的修约

测量结果应按国家标准 GB3101-1993《有关量、单位和符号的一般原则》的规定进行修约，使测量结果与不确定度的末位对齐。

例如：对一电阻器的电阻值进行测量，其测量结果为 $y = 10.057\ 62\ \Omega$ ，合成标准不确定度 $u_c(y) = 27\ \text{m}\Omega$ ，据此对测量结果进行修约得： $y = 10.058\ \Omega$ 。

同样，测量结果不允许进行连续修约。即测量结果应经一次修约后得到，而不应该经多次修约后得到。

力学实验中如相关标准有数据修约规定方法按相关标准执行（如 GB228-2002）。

A1. 5. 3 测量结果的补位

若出现测量结果的实际位数不够而无法与测量结果不确定度的末位对齐时，应在测量结果中补零，以与测量结果不确定度的末位对齐。

例如：一砝码质量的测量结果为 $m = 100.021\ 4\ \text{g}$ ，扩展不确定度为 $U_{95} = 0.36\ \text{mg}$ ，则测量结果及其不确定度应表示为： $m=100.02140\text{g}$ ， $U_{95} = 0.36\text{mg}$ 或 $100.021\ 40 \pm 0.000\ 36\text{g}$ （置信概率 $p=95.0\%$ ）。

附录 J

(提示的附录)

误差累积方法估计拉伸试验的测量不确定度

J1 引言

基于误差累积原理和利用试验方法标准及检定标准规定的测量误差要求,提出估计测量不确定度的方法要点。因为不同材料对于某些例如应变速率或应力速率等控制参数呈现不同的响应,所以不可能对所有材料计算出单一的不确定度值。此处提供的误差累积方法可以把它看成为按本标准进行试验(1级试验机和1级引伸计)的实验室的测量不确定度上限。

应当注意,当评定试验结果的总分散度时,测量的不确定度应看做包含由于材料的不均匀性而引起的固有分散度。附录 K 中给出的相互比较试验的分析统计方法,并不能分离出这两种分散度的影响源。估计实验室间分散度的其他有用的方法是,采用一种具有保证材料性能的持证标准材料(CRM)。已经选定供作室温拉伸试验使用的标准材料(CRM)为一种直径 14 mm 每批 1 t 的标准材料镍铬合金(Nimonic75),正在共同体标准物质局(BCR)监督认证程序之中。

J2 不确定度的估计

J2.1 与材料无关的参数

将各种误差源产生的误差累加在一起的方法已做相当详细的处理。最近,两个 ISO 文件(ISO 5725-2 和测量不确定度的表达指南),对精密度和不确定度的估计给出了指导。

下面的分析采用了常规的方和根方法。表 J1 给出了各种拉伸性能试验参数的误差与不确定度的期望值。由于应力应变曲线的形状特点,有些拉伸性能原则上能以较高的精密度测定。例如,上屈服强度 R_{eH} 仅仅取决于力和横截面积的测量误差;而规定强度 R_p 却取决于力、变形(位移)、标距和横截面积的测量误差。对于断面收缩率 Z ,则需考虑试验前、后横截面积的测量误差。

表 J1 确定拉伸试验数据的最大允许测量不确定度(使用方和根方法)

参 数	拉伸性能误差/%					
	R_{eH}	R_{eL}	R_m	R_p	A	Z
力	1	1	1	1	—	—
应变 ¹⁾ (位移)	—	—	—	1	1	—
标距 L_0^1	—	—	—	1	1	—
S_0	1	1	1	1	—	1
S_1	—	—	—	—	—	2
不确定度期望值	$\pm\sqrt{2}$	$\pm\sqrt{2}$	$\pm\sqrt{2}$	$\pm\sqrt{4}$	$\pm\sqrt{2}$	$\pm\sqrt{5}$

1) 假定按照检定过的 1 级引伸计。

J2.2 与材料有关的参数

对于室温拉伸试验,材料受应变速率(或应力速率)控制参数影响明显的拉伸性能是 R_{eH} 、 R_{eL} 和 R_p 。抗拉强度 R_m 也与应变速率相关,但试验中,通常以比测定 R_p 高得多的应变速率进行试验测定,一般受应变速率的影响呈现较小的敏感性。

原则上,在计算累积误差之前需要测定应变速率对材料性能的影响(参见图 J1 和图 J2)。有限的一些数据是可用的,而且也可以用下列例子估算一些材料的测量不确定度。

表 J2 和表 J3 给出了一组用以确定材料受本标准规定应变速率范围影响的典型数据例子。同时,表 J2 也给出了应变速率对几种材料的规定强度的影响。

表 J2 本标准允许的应变速率范围对室温规定强度 $R_{p0.2}$ 影响的例子

材 料	标 称 成 分	$R_{p0.2}$ 平均 值/(N/mm ²)	应变速率对 $R_{p0.2}$ 的影响/%	等效误差/%
铁素体钢: 管线钢 板钢(Fe430)	Cr-Mo-V-Fe(其余)	680	0.1	±0.5
	C-Mn-Fe(其余)	315	1.8	±0.9
奥氏体钢: X5CrNiMo17-12-2	17Cr, 11Ni-Fe(其余)	235	6.8	±3.4
镍基合金: NiCr20Ti NiCrCoTiAl25-20	18Cr, 5Fe, 2Co-Ni(其余)	325	2.8	±1.4
	24Cr, 20Co, 3Ti,	790	1.9	±0.95
	1.5Mo, 1.5Al-Ni(其余)			

J2.3 总测量不确定度

将表 J1 中规定的与材料无关的参数, 与表 J2 所给应变速率对规定强度影响的数据进行合成, 即可给出所示各材料的测量不确定度总估计, 见表 J3 所示。

为了进行合成总不确定度, 将标准中允许的应变速率范围内对规定强度的影响值取其一半, 表示为等效误差。例如 X5CrNiMo17-12-2 不锈钢, 其规定强度 $R_{p0.2}$ 在允许的应变速率范围内受影响为 6.8%, 取其一半的值等于 ±3.4% 的误差。因此, 对于 X5CrNiMo17-12-2 不锈钢, 其总不确定度为:

$$\pm \sqrt{2^2 + 3.4^2} = \pm \sqrt{15.6} = \pm 3.9\%$$

表 J3 按照本标准测定的室温规定强度的总不确定度期望值例子

材 料	$R_{p0.2}$ 平均值/(N/mm ²)	取自表 J1 之值/%	取自表 J2 之值/%	总测量不确定度 期望值/%
铁素体钢: 管线钢 板钢(Fe430)	680	±2	±0.05	±2.0
	315	±2	±0.9	±2.2
奥氏体钢: X5CrNiMo17-12-2	235	±2	±3.4	±3.9
镍基合金: NiCr20Ti NiCrCoTiAl25-20	325	±2	±1.4	±2.4
	790	±2	±0.95	±2.2

J3 结束语

对利用误差累积原理计算室温拉伸试验测量不确定度的方法提出要点, 并给出一些材料对已知试验参数影响的例子。应注意, 计算的不确定度可能需要修正, 以便包含符合测量不确定度表达指南的加权因子。而当欧洲试验室和 ISO 工作部门最后决定他们要采纳推荐的最佳方法后, 将着手这方面的工作。此外, 还存在影响拉伸性能测定的其他因素, 例如试样弯曲、试样夹持方法和试验控制模式, 即引伸计控制模式或十字头控制模式。它们都可能影响拉伸性能的测定。但目前未有足够可用的定量性数据, 所以不可能将其影响包括在累积误差之中。应该指出, 这一误差累积方法仅仅给出由于测量技术所引起的不确定度的估计, 而非对归因于材料不均匀性而引起试验数据的固有分散性作出容限。

最后, 应当知道, 适合的标准材料成为可用之时, 将对试验机, 包括目前没有证明其合格的夹头、弯曲等影响的总测量不确定度提供一种有用的方法。

附录 B 静态电阻应变仪与电阻应变计简介

静态电阻应变仪是专供测量不随时间变化或变化极缓慢的电阻应变仪器，其功能是将应变电桥的输出电压放大，在显示部分以刻度或数字形式显示应变的数值，或者向记录仪输入模拟应变变化的电信号。

B.1 YJ28A-P10R 静态电阻应变仪的工作原理

静态电阻应变仪的种类很多，在此以 YJ28A-P10R 型静态电阻应变仪为例，介绍其工作原理。

YJ28A-P10R 型静态电阻应变仪的工作原理框图如图 B-1 所示，可进行半桥或全桥测量。在测量应变时，把粘贴在构件上的应变片接入电桥，将电桥予调平衡，当构件受力发生变形时，应变片随之产生电阻值的变化，从而破坏了电桥的平衡，产生输出电压，由显示表显示出应变的数值。该静态电阻应变仪可同时测量十个点的应变。

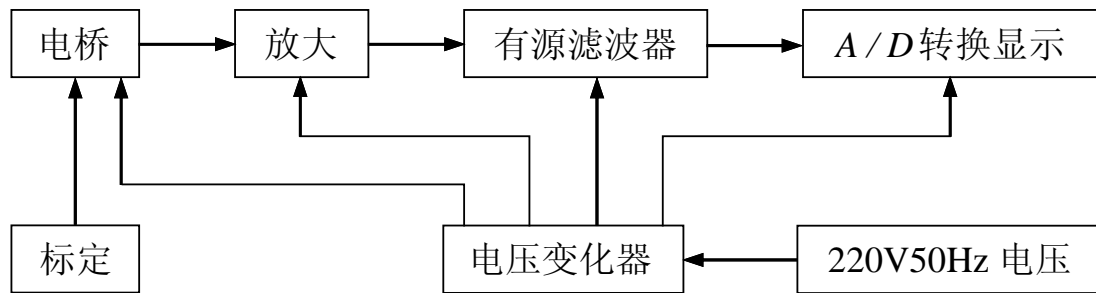


图 B-1 YJ28A-P10R 型静态电阻应变仪原理图

B.2 YJ28A-P10R 型静态电阻应变仪的使用方法

(1) 将电阻应变仪后面板上的电源开关置于关闭状态，后面板上的标定开关拨向下，测量点选择开关置于“ R_0 ”档。

(2) 如图 B-2 所示，将电阻应变仪前面板上的 D_1 、 D 和 D_2 三个接线柱用连接片连接，并旋紧各接线柱，把 $120\Omega \times 2$ 标准电阻的三根引线中同色的两根分别接到 A 和 C 接线柱，并旋紧，另一根接到 B 接线柱，并旋紧。

(3) 通入接地良好的 220V50Hz 交流电源，打开电源开关，前面板上的数码管应有数字显示，预热 30 分钟后，调节前面板上的“ R ”电位器（顺时针旋转显示为“+”，反之则为“-”），使显示表显示为“00000”。

(4) 将电阻应变仪后面板上的标定开关拨向上，进行电阻应变仪的灵敏系数标定。当所用电阻应变片的灵敏系数 $K = 2.00$ 时，调节灵敏度电位器，使显示表显示为“10000”，当所用电阻应变片的灵敏系数 $K \neq 2.00$ 时，必须按表 A-1 进行灵敏系数标定。灵敏系数标定好后即把标定开关拨向下位置。

表 B-1 YJ28A-P10R 型静态电阻应变仪灵敏系数标定表（所用桥臂电阻为 120Ω ）

应变片 K 值	1.80	1.85	1.90	1.95	2.00	2.05	2.10	2.15	2.20
应变仪标定	11111	10811	10526	10256	10000	9756	9524	9302	9091
应变片 K 值	2.25	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65
应变仪标定	8889	8696	8511	8333	8163	8000	7843	7692	7547

(5) 多点测量时，在前面板用 1~10 通道开关选择通道，相应地接通后面板上所选通道的测量桥接线端 A 、 B 、 C 和 D ，调节所选择的每个通道的电位器，分别使显示表显示为“00000”。

(6) 应变片在电桥中的连接方法可根据需要采取半桥或全桥。注意在全桥接法时，电阻应变仪面板上的 D_1 、 D 和 D_2 三个接线柱的连接片必须拆下，如图 B-3 所示。

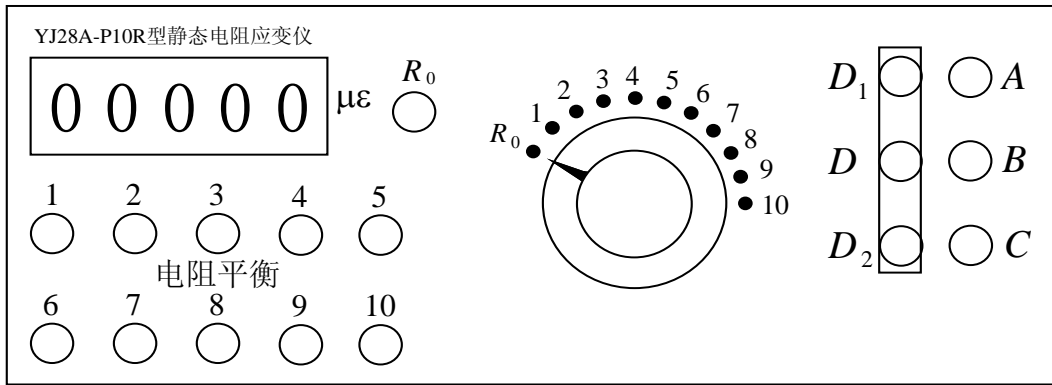


图 B-2 YJ28A-P10R 型静态电阻应变仪面板

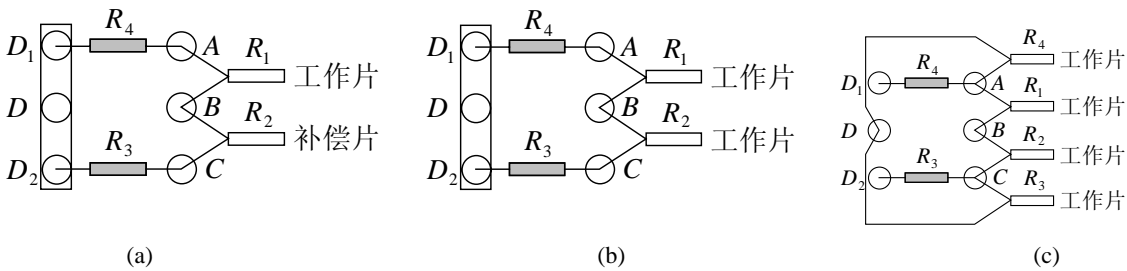


图 B-3 应变片接法 (a) 半桥单臂接法 (b) 半桥双臂接法 (c) 全桥接法 (拆去连接片)

B.3

电阻应变仪的读数修正

有时电阻应变仪的灵敏系数无法调整到与电阻应变片的灵敏系数一致，这时，可对电阻应变仪的读数进行如下修正，得到实际应变 ε

$$\varepsilon = \frac{K_{\text{仪}}}{K} \varepsilon_{\text{仪}}$$

式中： $K_{\text{仪}}$ 为电阻应变仪的灵敏系数； $\varepsilon_{\text{仪}}$ 为电阻应变仪的读数； K 为电阻应变片的灵敏系数。

B.4 电阻应变计及测量电桥简介

(Resistance Strain Gauge)

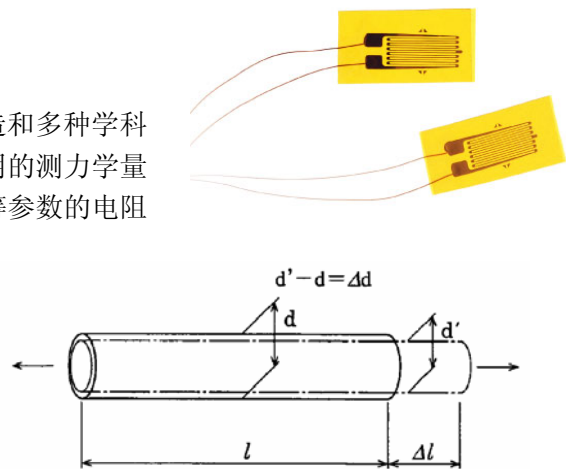
B.4.1 电阻应变计 (GB/T13992-92)

电阻应变计被广泛应用于高精度应变式传感器的制造和多种学科的精密应力分析。电阻应变计习惯称为应变片，是最常用的测力学量传感元件。可构成测量位移、加速度、力、力矩、压力等参数的电阻应变式传感器。

它的主要优点是：传感器结构简单、使用方便、性能稳定可靠、灵敏度高、测量速度快、适合静态和动态测量等，易于实现测量过程自动化和多点同步测量。在机械、电力、航空、化工、建筑等领域中有着广泛的应用。

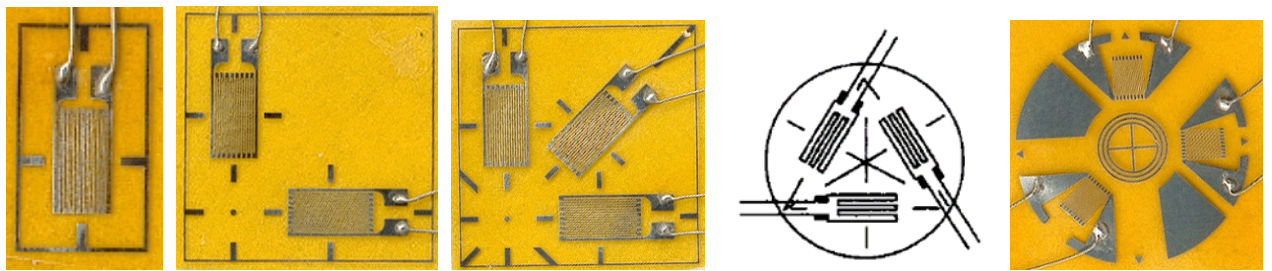
用应变片测试时，应变片要牢固地粘贴在测试体表面，当测件受力而发生变形时，应变片的敏感栅随同变形，其电阻值也相应发生变化；这种现象称为**金属的电阻应变效应**。通过测量电路将其转换成电信号

输出。 $\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}) \frac{\Delta l}{l} = K_s \varepsilon$ 。在常温下，金属丝电阻的相对变化与金属丝的伸长或缩短之间



金属的电阻应变效应

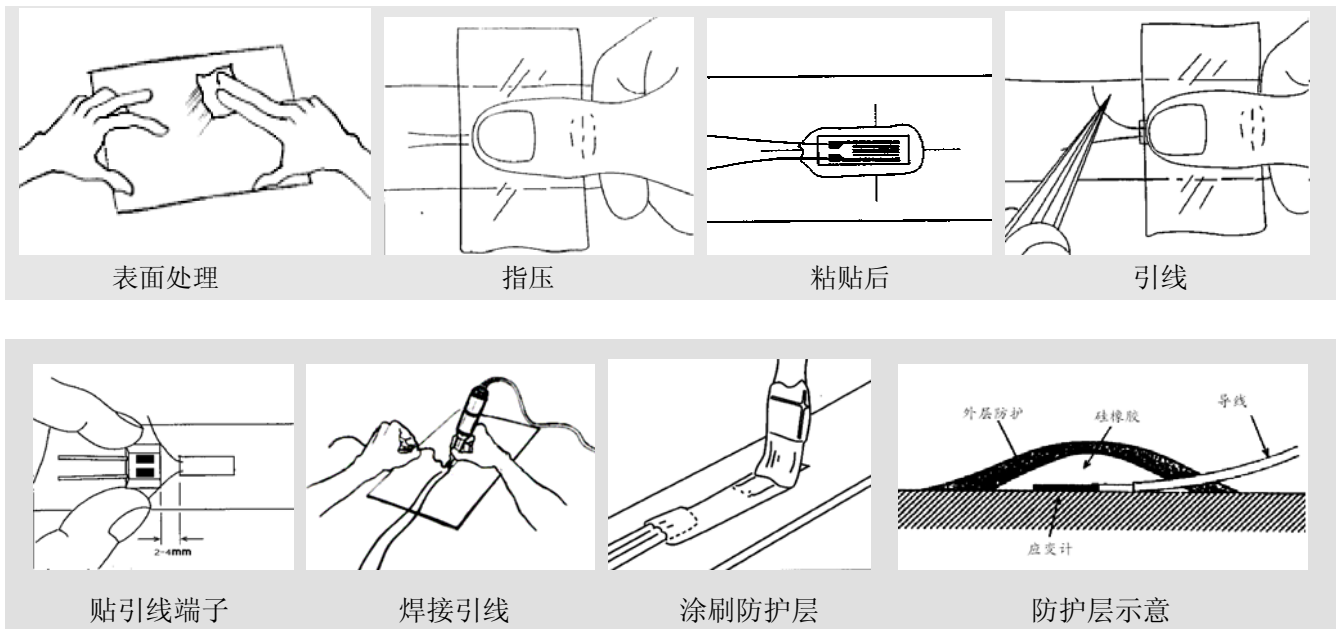
存在比例关系。比例系数 k_s 称为金属丝的应变灵敏系数（单位应变引起的电阻相对变化）。



单向应变 二轴直角应变计(花) 三轴 45° 应变计(花) 三轴 60° 应变计(花) 残余应力应变计
常温下常用应变计的种类

B.4.2 电阻应变计的粘贴工艺简介

电阻应变计的粘贴主要分为以下步骤：



- 表面处理：打磨与清洁，粘片位置的确定与定位划线
- 粘贴处理：点上少许502胶水，定位后隔着塑料膜加指压，约5分钟。
- 处理引线：指压应变计防止扯破应变计，轻轻拉起应变计的引线。
- 粘贴端子：端子与应变计间隔约2mm，引线时应留出拉力环。
- 焊接引线：焊接引线时应注意不要停留时间过长，以免电阻应变计过热损坏！
- 刷防护层：常温下可以直接涂刷硅橡胶作为防护层，涂层应保持均匀，不留气孔。

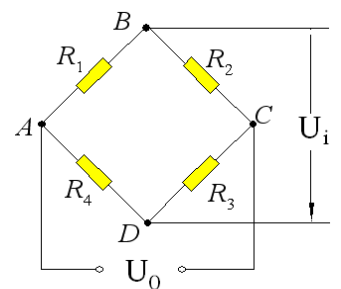
B.4.2 测量电桥的基本特性

惠斯登电桥是最常用的非电量测量电路之一，习惯称为测量电桥，如图所示。测量电桥以电阻应变计作为桥臂组成电桥电路，是将应变计的电阻变化转化为电压或电流信号。

设电桥的四个桥臂上接上应变计，电阻分别为

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0 = 120\Omega,$$

如果桥臂电阻改变 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 、 ΔR_4 ，则输出电压为



电桥线路原理图

$$u_i = \frac{u_o}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{u_o}{4} K_s (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

式中： u_o 为电桥的桥压； u_i 为电桥的输出电压； K_s 为应变计的灵敏系数，即， $\Delta R_i / R_0 = K_s \varepsilon_i$ ； ε_i 分别为应变计 R_i 所感受的应变值。由上式可见，测量电桥有如下特性：

- **两相邻桥臂上应变计的应变相减。**

即应变同号时，输出应变为两邻桥臂应变之差；异号时为两相邻桥臂应变之和。

- **两相对桥臂上应变计的应变相加。**

即应变同号时，输出应变为两相对桥臂应变之和；异号时为两相对桥臂应变之差。

电阻应变仪的输出应变实际上就是测量电桥的读数应变，所以合理地、巧妙地利用测量电桥的特性，可以增大读数应变，并且可测出复杂受力杆件中的内力(应力)分量。

B. 4. 2 温度的影响与补偿

在测量时，当温度发生变化时，电阻应变计将产生热输出 ε_t ，如果温度升高 1°C ， ε_t 即可达数十微应变。因此，在应变计电测中，必须消除热输出应变 ε_t ，**这十分重要**。为达到完全补偿，需满足下列三个条件：

- R_1 和 R_2 须属于同一批号的，即它们的初始电阻值 R 、电阻温度系数 α 、线膨胀系数 β 、应变灵敏系数 K_s 都相同；
- 用于粘贴补偿片的构件和粘贴工作片的试件二者材料必须相同，即要求两者线膨胀系数相等；
- 两应变片处于同一温度环境中。

根据测量电桥特性，如果将两个电阻应变计接入电桥的相邻桥臂，或将四个应变计分别接入电桥的四个桥臂，只要每一个电阻应变计的温度输出(ε_t)相等，即要求电阻应变计相同，被测构件材料相同，所处温度场相同，则测量电桥输出中就消除了 ε_t 的影响，达到完全补偿。

附录 C Instron3367 型双立柱台式电子试验机简介

Instron 3367型双立柱台式电子试验机是机械传动式电子试验机，它的最大测力能力为30KN, 精度为0.5%级，产地：美国。Instron Bluehill 软件主要包含主屏幕、控制器、试验选项卡、方法选项卡、管理器选项卡等功能，可完成拉伸实验、弯曲试验、压缩试验，可以实验以应力控制、应变控制、恒载控制、恒位移控制等多种加载控制方式，具体使用方法参见Instron Bluehill 软件参考手册。



Common Specifications

Crosshead Speed Accuracy: (zero or constant load) $\pm 0.2\%$ of set speed

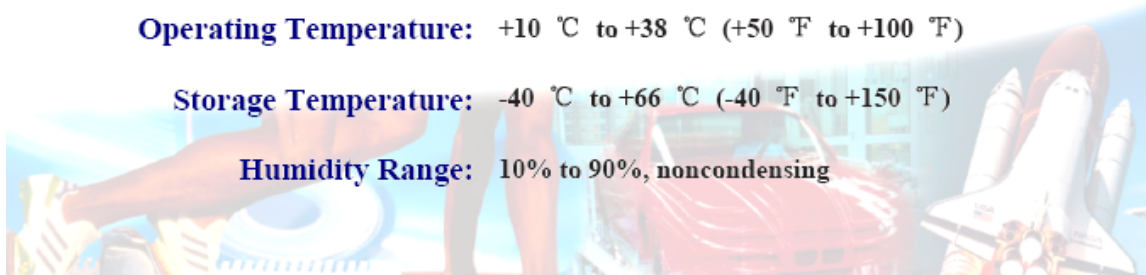
Load Measurement Accuracy: $\pm 0.5\%$ of reading down to 1/100 of load cell capacity.

Strain Measurement Accuracy: $\pm 0.5\%$ of reading down to 1/50 of full scale.

Operating Temperature: +10 °C to +38 °C (+50 °F to +100 °F)

Storage Temperature: -40 °C to +66 °C (-40 °F to +150 °F)

Humidity Range: 10% to 90%, noncondensing



Instron3367 型双立柱台式电子试验机简明操作规程

警告：使用过程中必须时刻注意横梁下限位开关位置，防止上下夹具直接接触受压导致损坏。

1. 准备工作

- (1) 认真阅读相关实验指导书和设备说明；
- (2) 检查试验机和电脑的各电源线及数据线是否连接好；
- (3) 检查试验机横梁上下限位开关是否处在合适位置；
- (4) 接通电源，激活 Bluehill 程序文件。

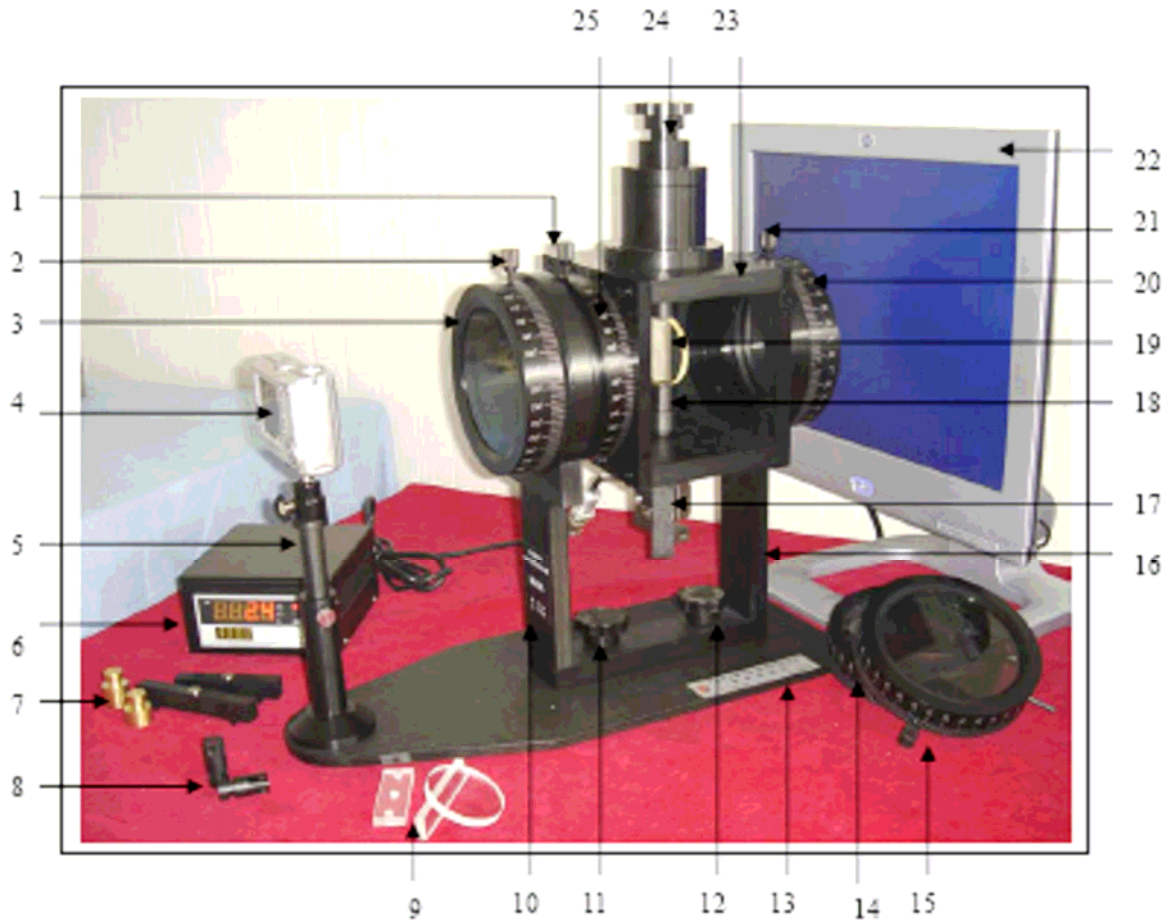
2. 试样安装与加载

- (1) 根据试样选择合适的夹具，调整横梁位置，安装夹具；
- (2) 在 Bluehill 程序中选择相应的实验方法（如程序中没有合适的实验方法需重新编写）；
- (3) 安装试样，注意试样上下对中，锁紧**上夹头**；
- (4) 检查传感器的零位，对传感器进行“置零”操作；
- (5) 锁紧**下夹头**；
- (6) 点击“测试”，按照预先编好的实验方法加载。

3. 实验结束

- (1) 保存实验结果；
- (2) 取下试样；
- (3) 调整上下限位开关到安全位置，关闭电源。

附录D 光(测)弹性仪简介 PhotoElastic Experiment



表D1 光弹仪仪器各部分名称作用

编号	名 称	作 用
1、2、21	紧固旋钮	固定偏振镜
3、20	圆偏振镜	产生圆偏振场
4	数码相机	实时记录试件的受力状况
5	数码相机支架	固定数码相机，调整相机高度
6	数显测力计	实时显示施加力的大小
7	梁的加压头和组件	固定梁和传递压力
8	拉伸组件	固定拉压模型
9	实验模型	演示实验
10、16	主支架	固定加载架和偏振镜等
11、12	固定旋钮	将支架固定在底座上
13	底座	固定主支架和数码相机
14、15	线偏振镜	产生线偏振场
17	传感器及固定架	实时计量出螺旋杆施加的力
18	圆盘加压头	固定圆盘和传递压力
19	圆盘试样	做等倾线等差线实验
22	电脑屏幕	白光和各种单色光的光源
23	加载架	固定试件，转动任意角度观察实验现象
24	拉压螺旋杆	对试件施加规定范围内的力
25、20	定位圈	固定加载架，指示加载架转动角度

光弹性基本知识

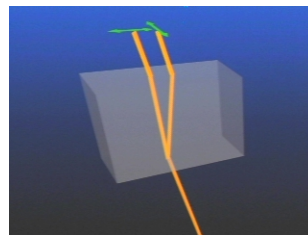
自然光：由七种不同波长的光波组成，在垂直于传播方向的平面内各个方向振动。

单色光：自然光中某一种波长的光波。

偏振光：光波被约束在某一特定方向作规则振动。

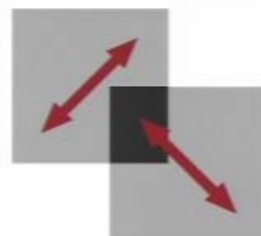
双折射

光从一种介质进入另一种介质（云母，方解石等）分解成两束折射光线（平面偏振光）且波速不同，振动方向相互垂直，称为双折射。



1/4波片

利用双折射现象，调整材料厚度，使两束偏振光射出后的光程差为1/4波长，这种光学元件称作1/4波片。



圆偏振光

当偏振光的振动方向与1/4波片的两个光轴成45度角通过时，就形成圆偏振光。

暂时双折射

在偏振光照射下，某些材料（如环氧树脂等）在其内部有应力作用时会出现双折射现象，应力消失，双折射现象也消失，称为暂时双折射。

应力光学定律

$$R = Ch(\sigma_1 - \sigma_2)$$

式中：R——光程差；c——光学系数，与材料有关；h——试样厚度； σ_1, σ_2 ——两个主应力。

此式表明，当一束平面偏振光垂直入射一个受力光学平板模型时，它沿两个主应力方向分解为两束平面偏振光，由于这两束平面偏振光在平板模型内传播速度不同，它们通过平板后产生的光程差R与平板厚度h及两个主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 之积成正比。

平面模型在平面偏振光下的光学效应

等差线条纹：白光时除了0级其他条纹均为彩色，单色光时各级条纹为黑色。
$$\sigma_1 - \sigma_2 = n \frac{f}{h}$$

物理意义： σ_1, σ_2 为同一点处主应力；n为条纹级数(1, 2, 3...); f为材料条纹值(单位:N/mm级)h为试样厚度。

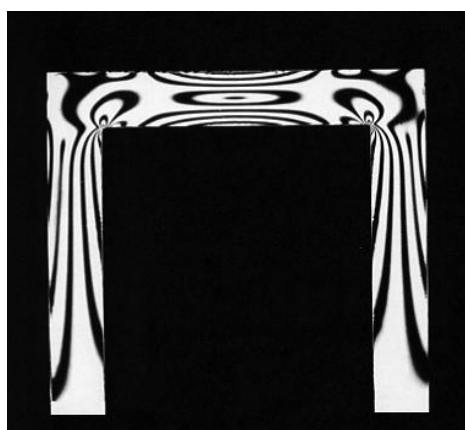
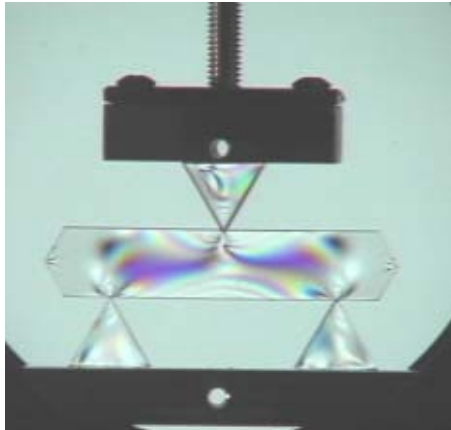
等倾线条纹：代表了各点的主应力方向，其角度 θ 为主应力方向与X轴的夹角。P-P轴垂直，A-A轴水平时，得到的等倾线为0度等倾线。反时针同步转动起、检偏镜，可得到 $0^\circ \sim 90^\circ$ 等倾线。等倾线为黑色条纹。在圆偏振光场下等倾线消失。

注意事项

严格避免用手触摸仪器的各光学镜面；

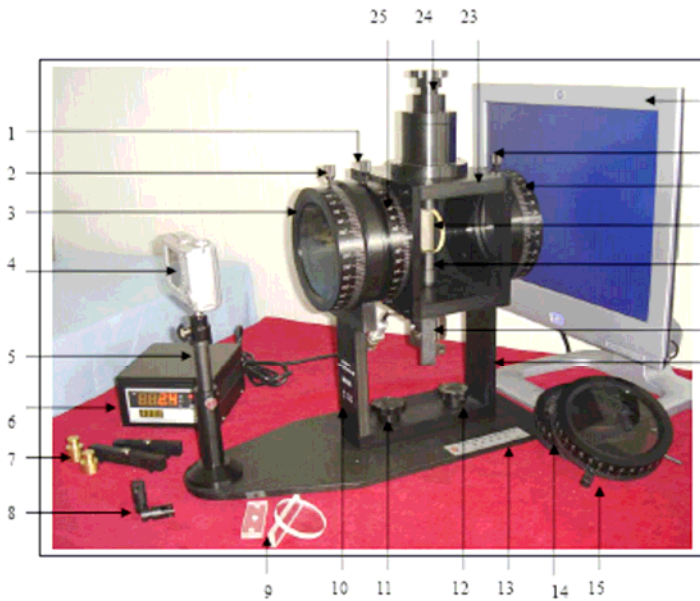
光学镜面上的灰尘和污渍要用专用工具清除；

给试样加载时要缓慢，并注意不要过载。



附录D 光(测)弹性仪简介 PhotoElastic Experiment

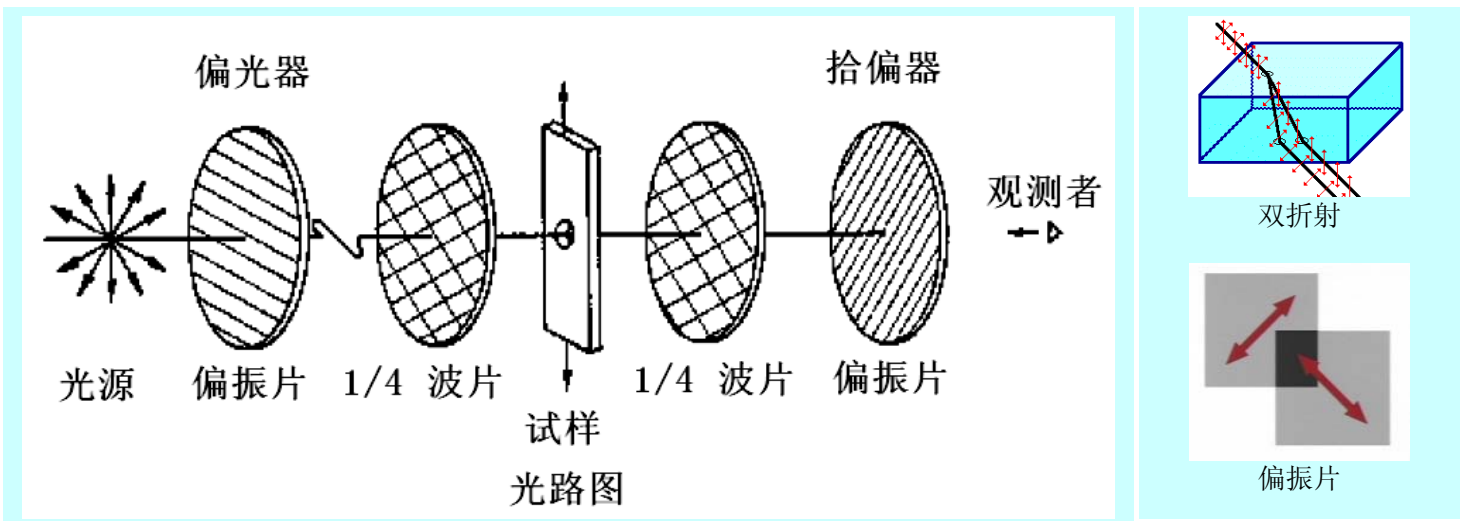
弹性仪主要部件和光路图如下



光弹仪仪器各部分名称作用

编号	名称	作用
1、2、21	紧固旋钮	固定偏振镜
3、20	圆偏振镜	产生圆偏振场
4	数码相机	实时记录试件的受力状况
5	数码相机支架	固定数码相机, 调整相机高度
6	数显测力计	实时显示施加力的大小
7	梁的加压头和组件	固定梁和传递压力
8	拉伸组件	固定拉压模型
9	实验模型	演示实验
10、16	主支架	固定加载架和偏振镜等
11、12	固定旋钮	将支架固定在底座上
13	底座	固定主支架和数码相机
14、15	线偏振镜	产生线偏振场
17	传感器及固定架	实时计量出螺旋杆施加的力
18	圆盘加压头	固定圆盘和传递压力
19	圆盘试样	做等倾线等差线实验
22	电脑屏幕	白光和各种单色光的光源
23	加载架	固定试件, 转动任意角度观察实验现象
24	拉压螺旋杆	对试件施加规定范围内的力
25、20	定位圈	固定加载架, 指示加载架转动角度

弹性仪主要部件



光弹性基本知识

自然光: 由七种不同波长的光波组成, 在垂直于传播方向的平面内各个方向振动。

单色光: 自然光中某一种波长的光波。

偏振光: 光波被约束在某一特定方向作规则振动。

双折射

光从一种介质进入另一种介质(云母, 方解石等)分解成两束折射光线(平面偏振光)且波速不同, 振动方向相互垂直, 称为双折射。

1/4波片

利用双折射现象, 调整材料厚度, 使两束偏振光射出后的光程差为1/4波长, 这种光学元件称作1/4波片。

圆偏振光

当偏振光的振动方向与1/4波片的两个光轴成45度角通过时, 就形成圆偏振光。

暂时双折射

在偏振光照射下, 某些材料(如环氧树脂等)在其内部有应力作用时会出现双折射现象, 应力消失, 双折射现象也消失, 称为暂时双折射。

应力光学定律

$$R = Ch(\sigma_1 - \sigma_2)$$

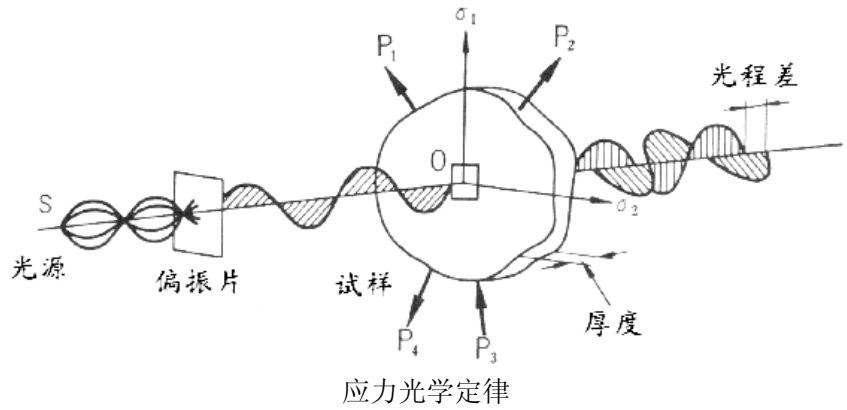
式中：R——光程差；

c——光学系数，

与材料有关；h——试样厚度；

σ_1, σ_2 ——两个主应力。

此式表明，当一束平面偏振光垂直入射一个受力光学平板模型时，它沿两个主应力方向分解为两束平面偏振光，由于这两束平面偏振光在平板模型内传播速度不同，它们通过平板后产生的光程差R与平板厚度h及两个主应力差($\sigma_1 - \sigma_2$)之积成正比。



平面模型在平面偏振光下的光学效应

等差线条纹：白光时除了0级其他条纹均为彩色，单色光时各级条纹为黑色。 $\sigma_1 - \sigma_2 = n \frac{f}{h}$

物理意义： σ_1, σ_2 为同一点处主应力；n为条纹级数(1, 2, 3...)；f为材料条纹值(单位:N/mm级)h为试样厚度。

等倾线条纹：代表了各点的主应力方向，其角度 θ 为主应力方向与X轴的夹角。P-P轴垂直，A-A轴水平时，得到的等倾线为0度等倾线。反时针同步转动起、检偏镜，可得到 $0^\circ \sim 90^\circ$ 等倾线。等倾线为黑色条纹。在圆偏振光场下等倾线消失。

注意事项

严格避免用手触摸仪器的各光学镜面；

光学镜面上的灰尘和污渍要用专用工具清除；

给试样加载时要缓慢，并注意不要过载。

