

普通高等教育“十三五”规划教材



过程装备与控制工程专业 实验教程

石腊梅 主编

GUOCHENGZHUANGBEI YU KONGZHI GONGCHENG ZHUANYE

SHIYAN JIAOCHENG



化学工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

过程装备与控制工程 专业实验教程

石腊梅 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《过程装备与控制工程专业实验教程》将基础理论和实验实践融会贯通，在编排上先简单介绍实验中所涉及的专业理论知识，然后再给出实验的具体过程指导，以利于学生学习掌握。

本书第1篇是过程装备类实验，涵盖了过程设备设计、过程流体机械、压力容器无损检测涉及的9个专业实验项目和换热器性能测试所涉及的4个综合实验项目。

本书第2篇是过程控制类实验，涵盖了单片机应用技术和过程装备控制技术及应用涉及的17个实验项目，包括13个专业实验项目和4个综合实验项目。

本书可作为高等工科院校过程装备与控制工程及相关专业的专业实验指导教材，也可作为高等职业教育相关专业的实验教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程装备与控制工程专业实验教程/石腊梅主编.
北京: 化学工业出版社, 2016.6
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-122-27025-2

I. ①过… II. ①石… III. ①化工过程-化工设备-实验-高等学校-教材②化工过程-过程控制-实验-高等学校-教材 IV. ①TQ051-33②TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 097440 号

责任编辑: 旷英姿 林 媛
责任校对: 王 静

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 8 $\frac{1}{4}$ 字数 179 千字 2016 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 24.00 元

版权所有 违者必究

过程装备与控制工程专业将“过程”、“装备”与“控制”这3个相关知识领域有机紧密地结合在一起，是以机械为主，工艺与控制为辅的“一机两翼”的复合型交叉专业。为适应这一专业特色和应用型本科人才培养要求，服务于国家和地方经济建设，专业实验改革向提高学生知识综合应用能力、动手能力和创新能力等方向发展，培养学生的综合素质。为此我们在原化工设备与机械专业的基础上，结合本专业特点，将过程装备与控制工程专业多门课程结合，开发了多功能综合实验装置，体现了集过程、设备及控制为一体的专业特色。

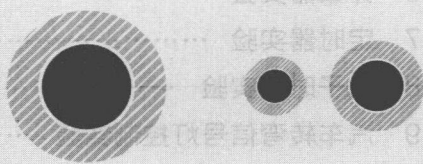
本书共2篇、6章，第1篇是过程装备实验，涵盖了过程设备设计、过程流体机械、压力容器无损检测和换热器性能测试涉及的13个实验项目。第2篇是过程控制类实验，涵盖了单片机应用技术和过程装备控制技术及应用涉及的17个实验项目。每个实验项目都详细介绍了该实验的目的要求、实验内容、实验设备设施、实验原理、实验步骤和实验报告要求，并针对实验内容列出了思考题。对于一些综合性较强、涉及内容较多的实验还给出了实验数据记录与整理表格及实验数据处理与分析方法，供学生参考。

本书可作为过程装备与控制专业及相关专业的专业实验教材使用。

本书由荆楚理工学院石腊梅担任主编。具体编写分工如下：第1章、第4章由石腊梅编写，第2章由荆楚理工学院周颖编写，第3章由荆楚理工学院樊金巧编写，第5章由荆楚理工学院李波编写，第6章由荆楚理工学院黄向龙编写。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，希望广大读者给予批评指正。

编者
2016年2月



第1篇 过程装备实验

第1章 过程设备设计实验	1
1.1 薄壁容器应力应变测定实验	1
1.2 薄壁容器外压失稳实验	14
1.3 厚壁容器爆破实验	18
1.4 安全阀泄放性能测定实验	25
第2章 过程流体机械实验	31
2.1 离心泵性能测定	31
2.2 活塞式压缩机性能测定	36
2.3 柔性转子临界转速的测量	43
第3章 压力容器无损检测实验	49
3.1 超声波探伤检测试验	49
3.2 磁粉无损检测实验	52
第4章 换热器性能测试综合实验	56
4.1 换热器综合实验系统 HETS-2.0	56
4.2 换热器换热性能实验	58
4.3 流体传热系数测定实验	60
4.4 换热器管程和壳程压力降测定实验	62
4.5 换热器拆装实验	64

第2篇 过程控制类实验

第5章 单片机应用技术实验	67
5.1 TKSCM-1 单片机开发综合实验装置使用说明	67
5.2 存储器块清零	68
5.3 二进制到 BCD 码的转换	70
5.4 P1口输入、输出实验	71
5.5 8255 输入、输出实验	74

5.6	计数器实验	76
5.7	定时器实验	78
5.8	电子时钟实验	81
5.9	汽车转弯信号灯控制实验	83
第 6 章	过程装备控制技术及应用实验	86
6.1	实验装置的基本操作与仪表调试	86
6.2	单容/双容水箱对象特性的测试	88
6.3	单容水箱液位 PID 控制系统	92
6.4	双容水箱液位 PID 控制系统	96
6.5	智能仪表的温度控制系统	100
6.6	流量控制系统	103
6.7	单容水箱压力的 PID 调节控制	106
6.8	液位串级控制系统	108
6.9	控制工程基础 MATLAB 实验仿真	110
附录	水箱控制对象参数	123
参考文献		124

第 ① 篇

过程装备实验

第 ① 章

过程设备设计实验

1.1 薄壁容器应力应变测定实验

1.1.1 薄壁容器的应力分布与计算

薄壁容器是指壳体厚度 t 与其中面曲率半径 R 的比值 $(t/R)_{\max} \leq 1/10$ 的壳体，对于圆筒， $(D_o/D_i)_{\max} \leq 1.1 \sim 1.2$ 称为薄壁圆筒。当壁厚较薄，薄壳的抗弯刚度非常小，弯曲内力很小，可以忽略其影响，忽略弯曲内力的壳体理论，称为无力矩理论或薄膜理论，通过薄膜理论求出的应力解称为薄膜应力。

1.1.1.1 薄壁容器应力分析

(1) 薄壁圆筒应力

根据薄壁壳体的无力矩理论可以求得受均匀气压内压的薄壁容器筒体部分的应力值:

$$\text{径向应力 (轴向应力): } \sigma_{\varphi} = \frac{p(D_i + t)}{4t}$$

$$\text{环向应力 (周向应力): } \sigma_{\theta} = \frac{p(D_i + t)}{2t} \quad (1-1)$$

式中 p ——容器所受内压力, MPa;

D_i ——容器内直径, mm;

t ——容器壁厚, mm;

$\sigma_{\varphi}, \sigma_{\theta}$ ——径向应力, 环向应力, MPa。

(2) 锥形封头应力

根据薄壁壳体的无力矩理论可以求得受均匀气压内压的锥形封头(见图 1-1)的应力值:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{px \tan \alpha}{2t} = \frac{pr}{2t \cos \alpha}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{px \tan \alpha}{t} = \frac{pr}{t \cos \alpha} \quad (1-2)$$

式中 r ——锥形封头任一点处半径, mm;

x ——锥形封头任一点到锥顶的距离, mm;

α ——半锥角。

由上式可知, 锥形壳体上径向应力、周向应力与 x 呈线性关系, 离锥顶越远, 应力越大。

(3) 球形封头应力

根据薄壁壳体的无力矩理论可以求得受均匀气压内压的球形封头的应力值:

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_{\theta} = \frac{p(D_i + t)}{4t} \quad (1-3)$$

(4) 椭圆形封头上各点的应力

根据薄壁壳体的无力矩理论可以求得受均匀气压内压的椭圆形封头的应力值:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{p}{2t} \frac{[a^4 - x^2(a^2 - b^2)]^{1/2}}{b} \quad (1-4a)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{p}{2t} \frac{[a^4 - x^2(a^2 - b^2)]^{1/2}}{b} \left[2 - \frac{a^4}{a^4 - x^2(a^2 - b^2)} \right] \quad (1-4b)$$

在壳体顶点处 ($x=0$), $\sigma_{\varphi} = \sigma_{\theta} = \frac{pa^2}{2bt}$

在壳体赤道上 ($x=a$), $\sigma_{\varphi} = \frac{pa}{2t}$, $\sigma_{\theta} = \frac{pa}{t} \left(1 - \frac{a^2}{2b^2} \right)$ (1-5)

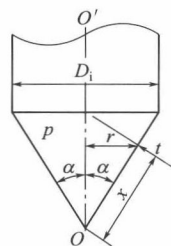


图 1-1 锥形封头

式中 a ——椭圆形封头长半轴, mm;

b ——椭圆形封头短半轴, mm。

由式(1-4)可知,椭圆形封头的应力值大小与 a/b 有关。当 $a/b=2$ 时, σ_φ 、 σ_θ 绝对值与筒体应力大小相等,故称标准椭圆形封头。

1.1.1.2 薄平板应力分析

承受均布载荷时圆平板会发生弯曲变形,平板中的应力为弯曲应力。平板根据支承情况不同可分为周边固支圆平板和周边简支圆平板,其受力情况如图1-2所示。

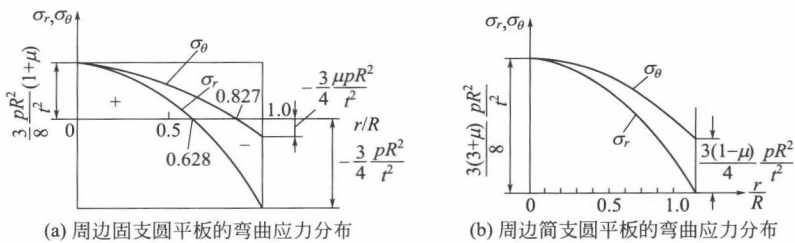


图1-2 圆平板的弯曲应力分布

σ_r —平板径向弯曲应力, MPa; σ_θ —平板周向弯曲应力, MPa;

R —平板外圆半径, mm; t —容器壁厚, mm; r —平板任一点到板中心的距离, mm; μ —材料的泊松比

1.1.1.3 回转薄壳的不连续分析

大多数容器都是由多种结构组合而成,这时候在这些结构的结合处,总体结构不连续,组合壳在连接处附近的局部区域出现衰减很快的应力增大现象,称为“不连续效应”或“边缘效应”。由此引起的局部应力称为“不连续应力”或“边缘应力”。分析组合壳不连续应力的方法,在工程上称为“不连续分析”。

工程上常把壳体应力的解分解为两个部分:①薄膜解或称主要解,即壳体的无力矩理论的解,求得的薄膜应力与相应的载荷同时存在,这类应力称为一次应力;有矩解或称次要解,即在两壳体连接边缘处切开后,自由边界上受到的边缘力和边缘力矩作用时的有力矩理论的解,求得的应力称二次应力。它是由于相邻部分材料的约束或结构自身约束所产生的应力,有自限性。组合壳的不连续应力可以根据一般壳体理论计算,但较复杂,工程上常采用简便的算法:边缘问题求解=薄膜解+弯曲解。

薄膜应力:容器的圆筒中段①处(见图1-3),可以忽略薄壁圆筒变形前后圆周方向曲率半径变大所引起的弯曲应力。用无力矩理论来计算。

弯曲应力:在凸形封头、平底盖与筒体联接处②和③,则因封头与平底的变形小于筒体部分的变形,边缘连接处由于变形谐调形成一种机械约束,从而导致在边缘附近产生附加的弯曲应力。必须用复杂的有力矩理论及变形谐调条件才能计算。

由中低容器设计的薄壳理论分析可知,薄壁回转容

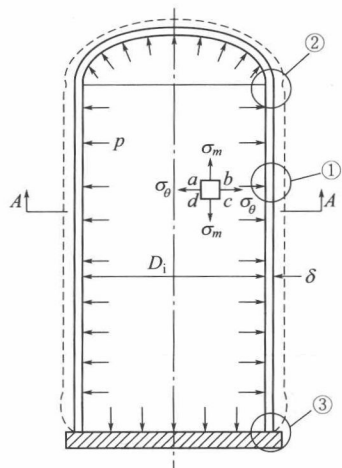


图1-3 边缘应力

器在承受内压作用时，圆筒壁上任一点将产生两个方向的应力，径向应力和环向应力。在实际工程中，不少结构由于形状与受力较复杂，进行理论分析时，困难较大；或是对于一些重要结构在进行理论分析的同时，还需对模型或实际结构进行应力测定，以验证理论分析的可靠性和设计的精确性。所以，实验应力分析在压力容器的应力分析和强度设计中有十分重要的作用。

1.1.2 实验指导

1.1.2.1 目的要求

- (1) 掌握应变电测法测定容器应力的基本原理和测试技术。
- (2) 了解容器应变测量时的布片原则和测量方法。
- (3) 测定内压薄壁容器的应力分布情况和边缘应力的影响。
- (4) 对应不同封头，验证薄壁容器应力的理论公式。
- (5) 学会测量数据的处理和测量值的误差分析。

1.1.2.2 实验内容

实测在不同内压作用下四种封头与筒体上各测点的应变值，计算并绘制其应力分布曲线。

1.1.2.3 实验设施设备

离心水泵、手动试压泵、不锈钢容器（+封头）、应力应变仪（CM-1H-32型）、应变片、丙酮、导线、电烙铁等（见表1-1）。

表1-1 薄壁容器应力应变测定实验装置基本配置

序号	设备名称	规格型号	数量
1	不锈钢容器 $\phi 400\text{mm} \times 4\text{mm}$, $L=500\text{mm}$	椭圆形+球形封头	1
2	不锈钢容器 $\phi 400\text{mm} \times 4\text{mm}$, $L=500\text{mm}$	锥形+平板封头	1
3	手动试压泵	SY-40	1
4	温度变送器	Pt100	1
5	数据采集板	PCI8310	1
6	压力变送器	SM9320DP (0~1MPa)	2
7	计算机	CPU 酷睿 1.6G, 内存 1.0G, 硬盘 160G, DVD 光驱, 17 in液晶显示器 (触摸屏)	1
8	离心水泵	WB50/025	1
9	压力表	0~1.6MPa	2
10	静态电阻应变仪	CM-1H-32	1
11	数字显示器	AI-501B24V	4
12	不锈钢水箱		1

实验装置示意如图1-4所示。

1.1.2.4 实验原理

现在实验应力分析方法已有十几种，而应用较广泛的有电测法和光弹法，其中前者

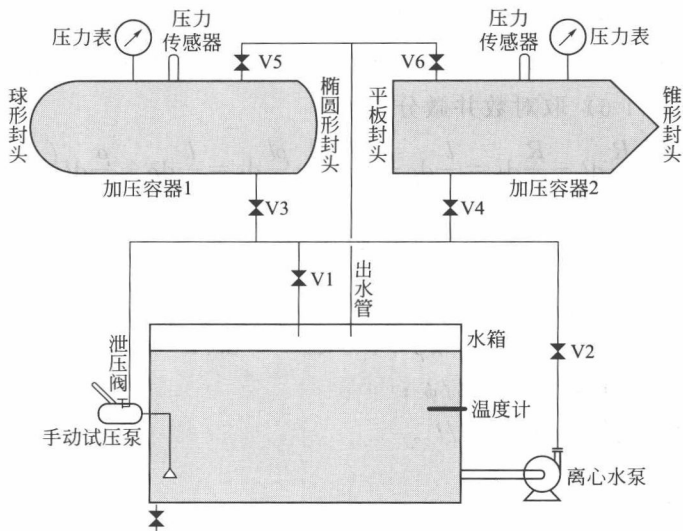


图 1-4 实验装置示意图

在压力容器应力分析中广泛采用。可用于测量实物与模型的表面应变，具有很高的灵敏度和精度；由于它在测量时输出的是电信号，因此易于实现测量数字化和自动化，并可进行无线电遥测；既可用于静态应力测量，也可用于动态应力测量，而且高温、高压、高速旋转等特殊条件下可进行测量。

(1) 电阻应变测量原理

电阻应变片（简称应变片）测量应变的大致过程如下：将应变片粘贴或安装在被测构件表面，然后接入测量电路（电桥或电位计式线路），随着构件受力变形，应变片的敏感栅也随之变形，致使其电阻值发生变化，此电阻值的变化与构件表面应变成比例，测量电路输出应变片电阻变化产生的信号，经放大电路放大后，由指示仪表或记录仪器指示或记录。这是一种将机械应变量转换成电量的方法，其转换过程如图 1-5 所示。测量电路的输出信号经放大、模数转换后可直接传输给计算机进行数据处理。



图 1-5 用电阻应变片测量应变

① 电阻应变片结构 电阻应变片是用于测量应变的元件。它能将机械构件上应变的变化转换为电阻变化。电阻应变片是由 $\phi = 0.02 \sim 0.05\text{mm}$ 的康铜丝或镍铬丝绕成栅状（或用很薄的金属箔腐蚀成栅状）夹在两层绝缘薄片中（基底）制成（见图 1-6）。用镀银铜线与应变片丝栅连接，作为电阻片引线。

由物理学可知，金属导线的电阻值 R 与其长度 l 成正比，与其截面积 s 成反比，若金属导线的电阻率为 ρ ，则用公式表示为

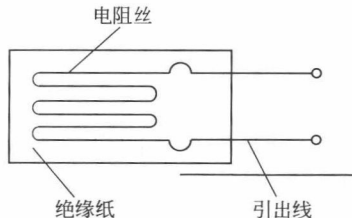


图 1-6 电阻应变片结构示意图

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1-6)$$

② 应变-电阻效应 当金属导线沿其轴线方向受力而产生变形时, ρ 、 l 、 s 要发生变化, 其电阻值也随之发生变化, 这一现象称为应变-电阻效应。为了说明产生这一效应的原因, 可将式 (1-6) 取对数并微分, 得

$$dR = \frac{R}{\rho} d\rho + \frac{R}{l} dl - \frac{R}{s} ds = \frac{l}{s} d\rho + \frac{\rho}{s} dl - \frac{\rho l}{s^2} ds = \frac{l}{s} d\rho + \frac{\rho}{s} dl \left(1 - \frac{ds}{s} \times \frac{l}{dl} \right) \quad (1-7)$$

式中, $s = \frac{\pi}{4} \phi^2$, $ds = \frac{\pi}{2} \phi d\phi$; ϕ 为电阻丝直径。

$$\text{则} \quad \frac{ds}{s} \times \frac{l}{dl} = \frac{\pi \phi d\phi / 2}{\pi \phi^2 / 4} \times \frac{l}{dl} = 2 \frac{d\phi / \phi}{dl / l} = 2 \frac{\epsilon'}{\epsilon} \quad (1-8)$$

式中 ϵ' ——电阻丝的横向应变 $d\phi / \phi$;

ϵ ——电阻丝的轴向应变 dl / l 。

导线的泊松比 $\mu = -\frac{\epsilon'}{\epsilon}$ 。

将式 (1-8) 代入式 (1-7) 得:

$$dR = \frac{l}{s} d\rho + \frac{\rho}{s} dl (1 + 2\mu) \quad (1-9)$$

$$\text{得} \quad \frac{dR}{R} = \frac{l}{sR} d\rho + \frac{\rho}{sR} dl (1 + 2\mu) \quad (1-10)$$

将式 (1-6) 代入式 (1-10) 得:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} (1 + 2\mu) = \frac{d\rho}{\rho} + \epsilon (1 + 2\mu) \quad (1-11)$$

式 (1-11) 表明, 当金属导线受力变形后, 由于其几何尺寸和电阻率发生变化, 从而使其电阻发生变化。可以设想, 若将一根金属丝粘贴在构件表面上, 当构件产生变形时, 金属丝也将随之变形, 利用金属丝的应变-电阻效应就可将构件表面的应变直接转换为电阻的相对变化量。电阻应变片就是利用这一原理制成的应变敏感元件。

等式两边同除 ϵ 得

$$\frac{dR}{R\epsilon} = \frac{d\rho}{\rho\epsilon} + (1 + 2\mu) \quad (1-12)$$

实验表明, 对一定的材料, $\frac{d\rho}{\rho\epsilon} + (1 + 2\mu)$ 为常量。

$$\text{令} \quad \frac{d\rho}{\rho\epsilon} + (1 + 2\mu) = K$$

$$\text{得} \quad \frac{dR}{R} = K\epsilon \quad (1-13)$$

这就是应变片的电阻变化率与应变值的关系, 对于同一 ϵ 值, K 值越大则 dR/R 也越大; 测量时, 易得较高的精度, 因此 K 值是反映应变片对应变敏感程度的物理量, 称为应变片的“灵敏系数”, K 值的大小与金属丝的材料和应变片的结构形式有关, 一般制造厂已给出具体的数值 (本实验应变片的灵敏系数 $K = 2.08$)。

(2) 电桥的工作原理

通过应变片可以将被测件的应变转换为应变片的电阻变化。但通常这种电阻变化是

很小的。为了便于测量，需将应变片的电阻变化转换成电压（或电流）信号，再通过放大器将信号放大，然后由指示仪或记录仪器指示或记录应变数值。这一任务是由电阻应变仪来完成的。而电阻应变仪中将应变片的电阻变化转换成电压（或电流）变化是由应变电桥（即惠斯顿电桥）来完成的。

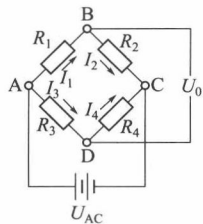


图 1-7 惠斯顿电桥

惠斯顿电桥如图 1-7 所示。设电桥各桥臂电阻分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ，其中的任意一个桥臂电阻都可以是应变片电阻。电桥的 A、C 为输入端，接直流电源，输入电压为 U_{AC} ；而 B、D 为输出端，输出电压为 U_{BD} 。下面分析当 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 变化时，输出电压 U_{BD} 的大小。从 ABC 半个电桥来看，AC 间的电压为 U_{AC} ，流经 R_1 的电流为：

$$I_1 = \frac{U_{AC}}{R_1 + R_2}$$

由此得出 R_1 两端的电压降为：

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

同理， R_3 两端的电压降为：

$$U_{AD} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_{AC}$$

故可得到电桥输出电压为：

$$\begin{aligned} U_0 &= U_{AB} - U_{AD} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{AC} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_{AC} \\ &= \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_{AC} \end{aligned} \quad (1-14)$$

由式 (1-14) 可知，要使电桥平衡，即要使电桥输出电压 U_0 为零，则桥臂电阻必须满足

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (1-15)$$

若电桥初始处于平衡状态，即满足式 (1-15)。当各桥臂电阻发生变化时，电桥就有输出电压。设各桥臂电阻相应发生了 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 、 ΔR_4 的变化，则由式 (1-14) 可计算得到电桥的输出电压为：

$$U_0 = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_4 + \Delta R_4) - (R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} U_{AC} \quad (1-16)$$

将式 (1-15) 代入式 (1-16)，且由于 $\Delta R_i \ll R_i$ ，可略去高阶微量，故得到：

$$U_0 = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) U_{AC} \quad (1-17)$$

式 (1-16) 和式 (1-17) 分别为电桥输出电压的精确计算公式和近似计算公式。用直流电桥进行应变测量时，电桥有等臂电桥、卧式电桥或立式电桥三种应用状态，本实验采用等臂电桥。四个桥臂电阻值均相等的电桥称为等臂电桥。即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ，此时式 (1-17) 可写为：

$$U_0 = \frac{U_{AC}}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (1-18)$$

如果四个桥臂电阻都是应变片，它们的灵敏系数 K 均相同，则将关系式 $\Delta R/R = K\varepsilon$ 代入式 (1-18)，便可得到等臂电桥的输出电压为：

$$U_0 = \frac{U_{AC}K}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \quad (1-19)$$

式中 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 ——电阻应变片 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 所感受的应变。

如果只有桥臂 AB 接应变片，即仅 R_1 有一增量 ΔR ，即感受应变 ε_1 ，则得到输出电压为：

$$U_0 = \frac{U_{AC}}{4} \times \frac{\Delta R}{R} = \frac{U_{AC}}{4} K\varepsilon \quad (1-20)$$

式 (1-20) 表明，应用电桥电压输出近似计算公式，得到的电桥输出电压与应变呈线性关系。若应用精确式 (1-16)，则得到电桥输出电压为

$$U_0 = \frac{U_{AC}}{4} \frac{\Delta R}{R} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}} \right) \quad (1-21)$$

将式 (1-21) 与式 (1-20) 比较可知，在式 (1-21) 中增加了一个系数（括号部分），该系数称为非线性系数。它越接近于 1，说明电桥的非线性越小，即按近似公式计算与精确公式计算得到的输出电压数值越接近。

通常应变片的灵敏系数 $K=2$ ，若应变为 1000 微应变，则由 $\Delta R/R = K\varepsilon$ 可得到式 (1-21) 中的非线性系数等于 0.999，非常接近于 1。因此一般应变测量按近似公式计算输出电压，所产生的误差是很小的，通常可以忽略不计。

(3) 静态电阻应变仪

电阻应变仪是根据应变检测要求而设计的一种专用仪器。它的作用是将电阻应变片组成测量电桥，并对电桥输出电压进行放大、转换，最终以应变值显示或根据后续处理需要传输信号。它由测量电桥、测量通道切换网络、模拟放大电路、A/D 转换电路、光电隔离、单片计算机、键盘输入、显示输出、测量数据保有电路和直流电源等组成。通过单片计算机完成了应变数据采集、处理、显示、通信等各种功能。

电阻应变仪的工作原理如图 1-8 所示。

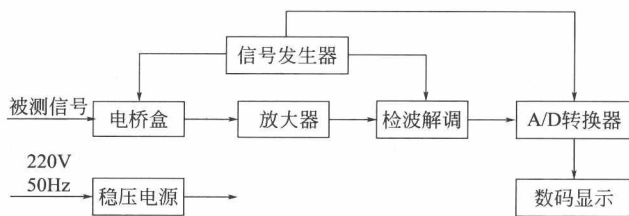


图 1-8 电阻应变仪的工作原理

电阻应变仪的基本原理就是将应变片电阻的微小变化用电桥转变成电压或电流的变化，其大致过程为：应变片— dR/R —电桥— ΔV (ΔI)—放大器—放大的 ΔV (ΔI)—检流计—指示读数。

(4) 应变-应力换算关系

用电阻应变片测出的是构件上某一点处沿某一方向的线应变，必须经过应变-应力

换算才能得到主应力。不同的应力状态有不同的换算关系。下面讨论平面应力状态时的应变-应力换算关系。

① 单向应力状态 构件在外力作用下,若被测点为单向应力状态,则主应力方向已知,只有主应力 σ 是未知量,可沿主应力 σ 的方向粘贴一个应变片,测得主应变 ϵ 后,由虎克定律即可求得主应力 σ 。

$$\sigma = E\epsilon \quad (1-22)$$

式中 E ——被测构件材料的弹性模量。

② 已知主应力方向的二向应力状态 如图1-9所示,受内压力作用的薄壁容器,其表面各点为已知主应力方向的二向应力状态,有主应力 σ_φ 、 σ_θ 两个未知量,可沿主应力方向,粘贴互相垂直的两个应变片(组成二轴 90° 应变花),测得主应变 ϵ_φ 和 ϵ_θ ,由广义虎克定律通过“应变电测法”测定容器中某结构部位的应变,然后根据以上应力和应变的关系,就可确定这些部位的应力。而应变 ϵ_φ 、 ϵ_θ 的测量是通过粘贴在结构上的电阻应变片来实现的;电阻应变片与结构一起发生变形,并把变形转变成电阻的变化,再通过电阻应变仪直接可测得应变值 ϵ_φ 、 ϵ_θ ,然后根据式(1-24)可算出容器上测量位置的应力值。

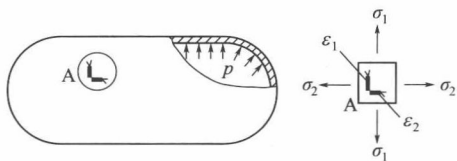


图 1-9 承受内压力的容器

电阻应变片与结构一起发生变形,并把变形转变成电阻的变化,再通过电阻应变仪直接可测得应变值 ϵ_φ 、 ϵ_θ ,然后根据式(1-24)可算出容器上测量位置的应力值。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_\varphi &= \frac{\sigma_\varphi}{E} - \mu \frac{\sigma_\theta}{E} \\ \epsilon_\theta &= \frac{\sigma_\theta}{E} - \mu \frac{\sigma_\varphi}{E} \end{aligned} \right\} \quad (1-23)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\varphi &= \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_\varphi + \mu\epsilon_\theta) \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_\theta + \mu\epsilon_\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (1-24)$$

式中 σ_φ 、 σ_θ ——径向应力,环向应力;

ϵ_φ 、 ϵ_θ ——径向应变,环向应变;

E ——弹性模量。

1.1.2.5 实验步骤

(1) 了解试验装置(包括管路、阀门、容器、压力自控泵等在实验装置中的功能和操作方法)及电阻片粘贴位置,测量电气线路,转换旋钮等。

(2) 电阻片的粘贴步骤和方法介绍如下。

① 应变片的布置方案是根据封头的应力分布特点来决定的。封头在轴对称载荷作用下可以认为是两向应力状态,同一个平行圆上各点受力相同,所以只需在同一个平行圆上一点沿着径向和环向各贴一个应变片即可。

椭圆形封头的应变片布置如图1-10所示,椭圆形封头各测点距封头顶点的曲线距离如表1-2所示。

表 1-2 椭圆形封头各测点距封头顶点的曲线距离

单位: mm

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
距离	0	50	100	140	175	205	235	255	270	290	305	320	335	355	375	415

球形封头的应变片布置如图 1-11 所示, 球形封头各测点距封头顶点的曲线距离如表 1-3 所示。

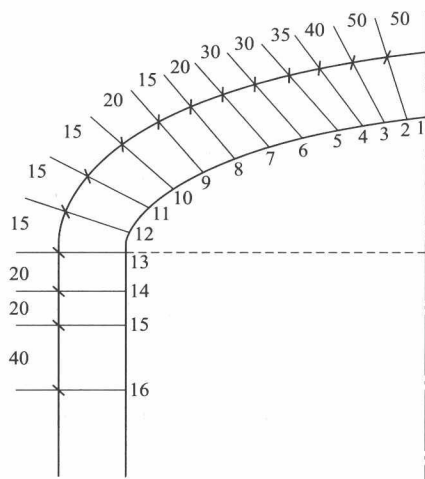


图 1-10 椭圆形封头应变片布置

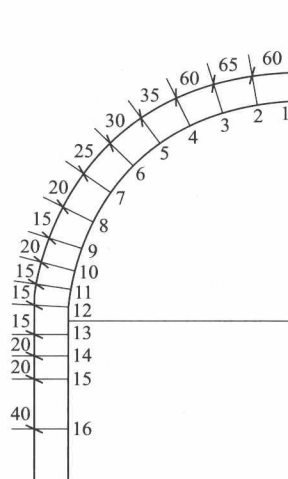


图 1-11 球形封头应变片布置

表 1-3 球形封头各测点距封头顶点的曲线距离

单位: mm

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
距离	0	60	125	185	220	250	275	295	310	330	345	360	375	395	415	455

锥形封头的应变片布置如图 1-12 所示, 锥形封头各测点距封头顶点的曲线距离如表 1-4 所示。

表 1-4 锥形封头各测点距封头顶点的曲线距离

单位: mm

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
距离	0	30	85	130	175	220	260	285	305	320	340	355	375	380	395	410

平板封头的应变片布置如图 1-13 所示, 平板封头各测点距封头顶点的曲线距离如表 1-5 所示。

表 1-5 平板封头各测点距封头顶点的曲线距离

单位: mm

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
距离	0	40	70	90	105	120	146	166	176	191	211	231	256	286	316	346

② 根据选择的测点位置, 用砂纸打光; 按筒体的经线和纬线方向用画针或铅笔画出测点的位置及方向; 再用棉球、丙酮等除去污垢。

③ 将“502”胶液均匀分布在电阻片的背面(注意: 胶液均匀涂在电阻片反面, 不可太多, 引出线须向上)。随即将电阻片粘贴在欲测部位, 并用滤纸垫上, 施加接触压

力, 挤出贴合面多余胶水及气泡 (注意: 电阻丝方向应与测量方向一致, 用手指按紧 1~2min)。

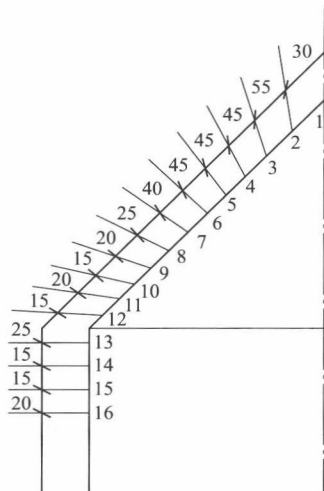


图 1-12 锥形封头应变片布置

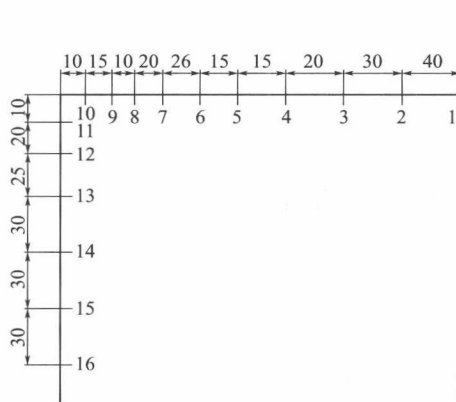


图 1-13 平板封头应变片布置

④ 在电阻片引出线下垫接线端子 (用胶液粘贴), 用于电阻应变片的引出线和测量导线的焊接连接 (测量导线和仪器的连接以及补偿片的粘贴已由实验室准备好)。

⑤ 电阻片的粘贴步骤和方法可由指导教师讲清要点和示范粘贴后再进行, 所有粘贴的电阻片和焊接接线经指导教师检查合格后, 再进入应变测量仪器测量的调节步骤。

(3) 了解 CM-1H-32 静态应变仪的使用方法 (自动测量)。

① 打开计算机和静态应变仪 (预热 15~20min), 确保设备之间连接完好。检查接线情况确保接线正确。记录测点与接线位置之间的对应关系。

② 打开电脑桌面上的测量软件, 完成相关参数设置并保存。

(4) 实验操作过程。

① 检查加压泵润滑油是否加满, 确保水箱内水位正常, 将所有阀门全部关闭, 启动离心水泵, 打开阀门 V_2 、 V_3 、 V_5 向压力罐送水。当出水管内有液体出现时, 关闭阀门 V_2 、 V_3 , 关闭离心水泵, 关闭阀门 V_5 。

② 在确认设备上各压力表读数均为“0”的状态下将应变仪调零, 并进行一次扫描采样。

③ 若对容器 1 进行实验, 打开 V_3 阀门摇动加压泵手柄对容器 1 进行加压, 试验时加压顺序为: 压力 p (MPa) 为 0.15—0.3—0.5, 加压应缓慢平稳, 且待压力稳定后关闭阀门 V_3 进行测量, 并记录各压力等级下的应变值。

④ 保存实验数据, 利用实验装置上的溢流阀给装置泄压至零点。

⑤ 改变封头, 重复上述操作。

1.1.2.6 实验数据记录与整理

以椭圆形封头为例, 将椭圆形封头在 0.15MPa、0.3MPa、0.5MPa 压力测得的径向应变和环向应变值填入表 1-6 中。其他封头表格相同。