

高等学校教材

# 过程装备与控制 工程专业实验

(附实验报告)

► 宋树波 邵泽波 张建伟 主编



化学工业出版社

教材出版中心

2-33  
5

高等学校教材

# 过程装备与控制工程专业实验

(附实验报告)

宋树波 邵泽波 张建伟 主编



化学工业出版社  
教材出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

过程装备与控制工程专业实验/宋树波,邵泽波,张建伟主编. —北京:化学工业出版社,2004.10  
高等学校教材  
ISBN 7-5025-6131-5

I. 过… II. ①宋…②邵…③张… 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. TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 100006 号

---

高等学校教材  
**过程装备与控制工程专业实验**  
(附实验报告)

宋树波 邵泽波 张建伟 主编  
责任编辑:程树珍 李玉晖  
责任校对:郑捷  
封面设计:于剑凝

化学工业出版社 出版发行  
教材出版中心  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)  
发行电话:(010)64982530  
<http://www.cip.com.cn>

\*  
新华书店北京发行所经销  
化学工业出版社印刷厂印刷  
三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$  字数 307 千字  
2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷  
ISBN 7-5025-6131-5/G·1605  
定 价:22.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

# 前 言

伴随着我国普通高等学校本科专业的建设和改革,原“化工设备与机械专业”名称已改为“过程装备与控制工程(080304)专业”(隶属于机械类),不论从课程体系和课程内容都有了很大改革和调整,于是,原专业所设置的专业实验远远满足不了新形势下该专业的基本要求。为了适应和满足调整后的“过程装备与控制工程”专业的真正内涵及其专业培养目标的总体要求,重新构建现专业所对应的专业实验势在必行,基于这点,编写了本实验教材。

为了能真正达到本专业的培养目标要求,就迫切要求该专业的学生不但要具有扎实的理论基础,而且还要具有较强科研实验技能。通过本专业的实验教学能够加深对理论知识的理解,培养和训练学生进行科学实验和独立操作的工作能力,培养学生严肃认真的科学态度和工作作风,并使學生掌握过程装备的失效分析、控制工程的实践技能以及结构相对过程的影响等实际知识和研究方法。

过程装备与控制工程专业实验的教学目的,是加深学生对本专业所学理论的理解,掌握一些最基本的本专业的实验方法和测试技术,培养学生观察问题,分析问题和实验数据处理的能力,以及了解和掌握用科学实验解决工程问题的方法。

为此,要求学生做好实验前的预习,明确实验目的、要求、进行步骤、实验需测定的数据,了解所使用的仪器、仪表及工具。实验过程中,细心操作,仔细观察,发现问题,考虑问题。实验完后,认真整理数据,根据实验结果及观察到的现象,加以分析,给出结论,并按规定要求提交实验报告。

根据过程装备与控制工程专业规范的要求,一般学校应将该专业实验单设课程。本教材建议课堂教学定为22学时,实验24学时。

本书共分5章,其中,宋树波编写第1章第2、3节、第2章第1、2、3节、第3章第1节、第4章;邵泽波编写第2章第4节、第3章第2、3节及附录;张建伟、佟以丹编写第1章第1、4、5、6节、第2章第5节;王海波编写第3章第4、5、6、7节;刘铁虎编写第5章。

本书编写过程中主要参阅了贾高顺主编的《化工机械专业实验》及列于书后的参考文献和标准,对所有作者在此一并致谢。

由于编者水平有限加之时间仓促,书中难免有不足之处,恳请读者提出宝贵意见。

编 者  
2004年6月

## 内 容 提 要

本书主要是针对过程装备与控制工程专业编写的专业实验教材，共分 5 章。内容包括：过程设备设计实验、过程流体机械实验、过程装备控制技术及应用实验、过程装备制造与检测实验、过程装备综合实验。

结合 5 部分的专业实验，在附录 A 中列出了 18 个对应的实验题目，供在教学中选用。

本教材既可作为高等学校过程装备与控制工程专业实验教材，也可供从事相关专业工程技术人员或管理人员参考。

# 目 录

<b>1 过程设备设计实验</b> .....	1
1.1 压力容器的应力应变测量 .....	1
1.1.1 应力测量基本原理 .....	1
1.1.2 电阻应变测量法 .....	2
1.2 容器的耐压试验和气密性试验 .....	5
1.2.1 压力容器的耐压试验 .....	5
1.2.2 压力容器气密性试验 .....	7
1.2.3 试验压力 .....	7
1.2.4 耐压试验装置 .....	8
1.3 残余变形试验 .....	9
1.3.1 直径变形测量 .....	10
1.3.2 电阻应变测量 .....	10
1.3.3 容积变形测量 .....	10
1.4 压力容器爆破试验 .....	15
1.4.1 压力容器爆破基本理论 .....	15
1.4.2 爆破试验装置及程序 .....	17
1.4.3 爆破断口分析 .....	18
1.4.4 爆破试验结果评定 .....	18
1.4.5 气瓶水压爆破试验 .....	19
1.5 压力容器疲劳试验 .....	20
1.5.1 疲劳试验装置及工作原理 .....	21
1.5.2 疲劳试验中人工裂纹预制及裂纹扩展留痕方法 .....	22
1.5.3 气瓶疲劳试验装置和流程 .....	22
1.6 外压容器失稳试验 .....	23
1.6.1 失稳现象 .....	23
1.6.2 临界压力 .....	23
1.6.3 临界长度 .....	25
1.6.4 外压容器试验 .....	25
<b>2 过程流体机械实验</b> .....	26
2.1 泵性能实验 .....	26
2.1.1 常规测试 .....	26
2.1.2 自动化测试 .....	30
2.1.3 热力学法测试 .....	31
2.2 容积式压缩机性能测试实验 .....	31
2.2.1 容积型压缩机的主要性能指标 .....	31

2.2.2	性能测量方法	32
2.2.3	试验结果的计算	36
2.2.4	示功图的录取与分析	41
2.3	制冷压缩机制冷量测定	43
2.3.1	制冷量的基本概念	43
2.3.2	测定制冷量的主要方法	43
2.3.3	测定制冷量的校核方法	45
2.4	轴的临界转速试验	45
2.4.1	基本理论	45
2.4.2	测试方法	46
2.4.3	实验过程	48
2.5	机器振动与隔振试验	50
2.5.1	简化的振动模型	50
2.5.2	基础振动试验	51
2.5.3	离心机和分离机表面机械振动的测试方法	52
<b>3</b>	<b>过程装备控制技术及应用实验</b>	<b>54</b>
3.1	单回路反馈控制系统	54
3.1.1	单回路反馈控制系统简介	54
3.1.2	控制器参数对系统控制质量的影响及控制规律的选择	54
3.1.3	单回路系统的投运和整定	56
3.2	串级控制系统	60
3.2.1	概述	60
3.2.2	串级控制系统的实施	61
3.2.3	串级控制系统的投运和整定	62
3.2.4	串级控制系统的特点	63
3.3	比值控制系统	64
3.3.1	概述	64
3.3.2	比值控制系统的计算	65
3.3.3	比值控制方案的实施	67
3.3.4	比值控制系统的投运与整定	67
3.3.5	比值控制系统的其他问题	68
3.4	前馈控制系统	70
3.4.1	前馈控制系统的特点	70
3.4.2	前馈控制规律的实施	70
3.4.3	前馈控制系统的参数整定	71
3.5	选择性控制系统	74
3.5.1	概述	74
3.5.2	选择性控制系统的类型及应用	75
3.5.3	选择性控制系统的设计	78
3.5.4	积分饱和及其防止措施	78

3.6	分程控制系统	80
3.6.1	概述	80
3.6.2	分程控制的应用场合	81
3.6.3	分程控制系统控制器参数的整定	84
3.6.4	分程阀总流量特性的改善	84
3.7	双输入双输出控制系统	85
<b>4</b>	<b>过程装备制造与检测实验</b>	<b>87</b>
4.1	超声波检测	87
4.1.1	超声波检测原理	87
4.1.2	超声波检测有关技术介绍	88
4.1.3	超声波检测的一般工艺过程	91
4.2	射线检测	96
4.2.1	X射线检测的基本原理	96
4.2.2	射线检测有关技术介绍	96
4.2.3	射线探伤一般工艺操作	103
4.3	磁粉检测	104
4.3.1	磁粉探伤原理	104
4.3.2	磁粉检测有关技术介绍	105
4.3.3	磁粉探伤一般工艺操作	110
4.4	液体渗透检测	111
4.4.1	渗透检测原理	111
4.4.2	常用的渗透探伤方法	111
4.4.3	工件质量级别评定	111
4.4.4	渗透探伤的一般工艺过程	112
4.5	涡流检测	114
4.5.1	涡流检测原理	114
4.5.2	涡流检测的工艺操作	114
<b>5</b>	<b>过程装备综合实验</b>	<b>116</b>
5.1	装备性能测试技术	116
5.1.1	有关传热的测量技术	116
5.1.2	流动研究中的测试技术	118
5.1.3	二相流研究中的测量技术	120
5.2	换热器性能的测试	123
5.2.1	换热管形式对性能的影响	123
5.2.2	换热器管束支撑结构对壳程性能的影响	125
5.2.3	换热器实验的发展方向	129
5.2.4	实验与分析	130
<b>附录</b>		<b>134</b>
实验1	内压容器应力测定实验	134
实验2	压力容器爆破实验	136



实验 3	外压容器失稳实验 .....	137
实验 4	离心泵性能测定实验 .....	137
实验 5	压缩机性能测定实验 .....	138
实验 6	临界转速实验 .....	139
实验 7	单回路控制系统实验 .....	140
实验 8	串级控制系统实验 .....	142
实验 9	比值控制系统实验 .....	144
实验 10	前馈控制系统实验 .....	145
实验 11	选择控制系统实验 .....	146
实验 12	分程控制系统实验 .....	147
实验 13	双输入双输出控制系统实验 .....	148
实验 14	温度控制系统实验 .....	149
实验 15	压力控制系统实验 .....	150
实验 16	超声波探伤实验 .....	152
实验 17	X射线探伤实验 .....	152
实验 18	换热器性能测试实验 .....	152
<b>参考文献</b>	.....	155

# 1 过程设备设计实验

## 1.1 压力容器的应力应变测量

压力容器的种类很多，而某些部位的应力分布相当复杂。为了确保结构的安全，就必须对这些部位进行必要的应力分析。在压力容器的应力分析与强度设计中，实验应力分析占有重要的地位。

实验应力分析的方法主要有：电阻应变测量、脆性涂层、密栅云纹、光弹性实验、激光全息干涉、激光散斑干涉等方法。下面仅介绍常用的电阻应变法在压力容器应力测量中的应用。

### 1.1.1 应力测量基本原理

#### 1.1.1.1 理论计算（以筒体部分为例）

根据薄壁壳体无力矩理论，可求得受内压的薄壁容器筒体部分的应力值，见图 1-1。

经向应力（轴向应力）：

$$\sigma_1 = \frac{pD}{4\delta_n} \quad (1-1)$$

环向应力（周向应力）：

$$\sigma_2 = \frac{pD}{2\delta_n} \quad (1-2)$$

$$D = D_i + \delta_n$$

式中  $p$ ——操作压力，MPa；  
 $D$ ——容器筒体中间面直径，mm；  
 $D_i$ ——筒体内径，mm；  
 $\delta_n$ ——筒体壁厚，mm；  
 $\sigma_1$ ——筒体经向应力，MPa；  
 $\sigma_2$ ——筒体环向应力，MPa。

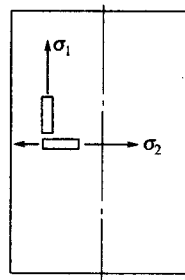


图 1-1 筒体应力

#### 1.1.1.2 应力测定的基本原理（以筒体部分为例）

容器器壁中的应力一般不能直接观察，但是表面变形不管多么微小总是可以测量的。只要找到应力与变形（应变）的关系，便可以通过测量变形达到测量应力目的。由材料力学可知，材料在弹性范围内，应力与应变的关系符合虎克定律。对于两向应力状态的圆筒形容器来说，由广义虎克定律可以导出下列公式：

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_1 + \mu\epsilon_2) \quad (1-3)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_2 + \mu\epsilon_1) \quad (1-4)$$

式中  $E$ ——材料的弹性模量，对于碳钢  $E=2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ ；

$\mu$ ——泊松系数，对于碳钢  $\mu=0.3$ ；

$\epsilon_1$ ——测定的轴向应变值；

$\epsilon_2$ ——测定的周向应变值；

$\sigma_1$ ——轴向应力，MPa；

$\sigma_2$ ——周向应力，MPa。

所以，只要测量出筒体的轴向应变和周向应变即可根据虎克定律求得  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 。

通常采用电测法测得应变值。

### 1.1.2 电阻应变测量法

电阻应变测量法是在构件表面指定点上粘贴传感元件（电阻应变片），使电阻应变片随着构件一起变形，把感受到的机械量（应变）转换成电量（电阻变化），再通过专门仪器（电阻应变仪）转换为电压或电流，并加以放大、调制和解调，然后按机械量（应变）给予指示。

#### 1.1.2.1 电阻应变片

电阻应变片（简称应变片）是一种电阻式传感器，是电阻应变测量中的关键元件。它以本身的电阻变化反映所测量的机械应变变量。

(1) 结构 应变片主要由电阻金属丝（或箔栅）、基底、和覆盖层、黏结剂、引出线组成。图 1-2 为丝绕式应变片结构示意图。图中  $L$  为丝栅长度， $B$  为丝栅宽度。电阻金属丝是传感元件，常称之为敏感栅。它把应变变量转换为电阻变化量。基底用作定位和保护电阻丝，它与黏结剂一起把机械应变传递给电阻丝，并使电阻丝和被测构件之间绝缘。引出线是用作连接导线用。

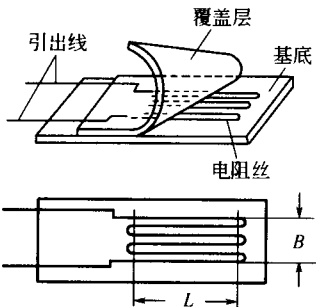


图 1-2 丝绕式电阻应变片结构示意图

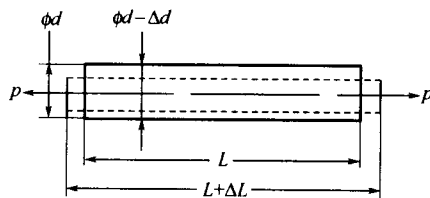


图 1-3 电阻丝受拉伸变形情况

(2) 工作原理 应变片是利用金属丝的电阻随其变形而变化的电阻应变效应而工作的。由物理学可知，电阻金属丝的电阻  $R$  和其长度  $L$ ，截面积  $F$  及电阻率  $\rho$  有以下关系：

$$R = \frac{\rho L}{F} \quad (1-5)$$

当电阻丝受拉伸变形时，如图 1-3，其长度、截面积、电阻率分别改变了  $\Delta L$ 、 $\Delta F$ 、 $\Delta \rho$ ，因而电阻值也改变了  $\Delta R$ 。由数学分析可近似得到：

$$\Delta R = \frac{\rho}{F} \Delta L - \frac{\rho L}{F^2} \Delta F + \frac{L}{F} \Delta \rho$$

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

因为  $\frac{\Delta L}{L} = \epsilon$ , 所以  $\frac{\Delta F}{F} = \left[ \frac{1}{4} \pi d^2 - \frac{1}{4} \pi (d - \Delta d)^2 \right] / \left( \frac{1}{4} \pi d^2 \right) = \frac{2d\Delta d - (\Delta d)^2}{d^2} \approx 2 \frac{\Delta d}{d} = -2\mu\epsilon$

上式中,  $\mu$  是电阻丝材料的泊松比。所以电阻变化率为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \epsilon + 2\mu\epsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho} = K_s \epsilon \quad (1-6)$$

$$K_s = \left( \frac{\Delta R}{R} \right) / \epsilon = (1 + 2\mu) + \left( \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) / \epsilon \quad (1-7)$$

式中,  $K_s$  称为电阻丝灵敏系数, 它受两个因素影响, 一是  $(1 + 2\mu)$ , 表示几何形状变形关系; 二是  $\left( \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) / \epsilon$ , 表示电阻丝材料的电阻率随应变的变化关系, 也称压阻系数。

用电阻丝绕制而成的电阻应变片, 还受到黏结剂、基底、横向布置的电阻丝变形等的影响。将之综合表达为, 电阻应变片的电阻变化率与其长度方向的应变有如下的关系:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} = K\epsilon \quad (1-8)$$

式中,  $K$  为电阻应变片的灵敏系数, 一般由制造厂商从产品中按一定比例抽样, 在单向应力状态下 (弹性范围内) 从标定装置中由实验方法得出。在应变片包装上标明其平均值及误差范围。一般  $K$  值范围在 1.7~3.6 之间。

### 1.1.2.2 电阻应变仪

使用电阻应变片来测量构件的应力, 敏感栅中的电阻变化是很微小的。微小的电阻变化测量不是一般电阻测量仪器所能完成。另外, 被测量的应变中有拉应变、压应变等静应变和不同频率的动应变等情况。为了便于测量必须有一种专门的电子仪器, 把微小的应变电阻变化信号转换为电压信号, 经放大器放大后, 以刻度或数字显示或向记录仪器输出模拟应变变化的电信号。这种仪器就是电阻应变仪。

电阻应变仪按照其测量应变频率的大小可分为以下几种。

(1) 静态电阻应变仪 用于测量静态应变; 配用多点预调平衡箱可进行多点静态应变测量。如 YJ-5 型, YJB-1 型等 (Y 表示“应”; J 表示“静”; B 表示半导体)。

(2) 静态电阻应变仪 可用于静态或频率在 200Hz 以内的单线动态应变测量。如 YJD-1, YJD-17 型等。这种应变仪基本上是静态应变仪, 只是兼做较低频率的单线动态应变测量用。

(3) 动态电阻应变仪 用于测量频率在 0.5~5kHz 以下的动态应变。一般做成多通道的, 即可同时测量数个动态应变信号。如 Y6D-2 型, Y6D-3A 型, YD-15 型等。

国内电阻应变仪已有很多定型产品, 它们朝着多点、高精度、自动化、数字化及数据自动处理的方向发展。

应变仪中大多数是采用交流放大技术。下面介绍采用交流放大器的电阻应变仪结构原理。

电阻应变仪主要由电桥、放大器、相敏检波器、滤波器、振荡器及电源等部分组成。图

1-4 是电阻应变仪的组成方框图。

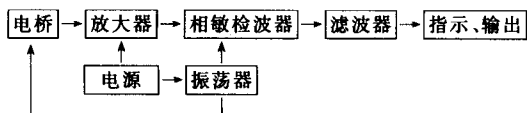


图 1-4 电阻应变仪的组成方框图

**振荡器** 产生一定频率的正弦波电压，供给电桥作载波桥压源（调制用），供给相敏检波器作参考电压（解调用）。

**电桥** 是一个中间变换器，将桥臂上的电阻变化转换为电压变化信号。由于供给电桥的是有一定频率的桥压，因而电桥输出的是调幅波电压（调制过程）。

**放大器** 将电桥送来的电压信号进行放大，送给相敏检波器。

**相敏检波器** 将放大器输出的信号与振荡器的参考电压输入进行解调。得到和应变大小及方向相对应的电压信号。

**滤波器** 将相敏检波器输出信号中的高频成分滤去，经滤波器输出的信号形像和电桥输入的信号形像相同。

### 1.1.2.3 电阻应变测量中的一些问题

(1) 测量应变片的桥路接法 电桥由四个桥臂组成，测量某一方向应变的应变片只相当于一个电阻，称之为工作片。

如图 1-5 (a) 所示，当等截面杆受单向力  $P$  拉伸时，将  $R_1$ 、 $R_2$  两应变片都贴于试件上成为工作片并互相补偿组成半桥。由材料力学知  $R_2$  的应变  $\epsilon_2$  与  $R_1$  应变  $\epsilon_1$  有  $\epsilon_2 = -\mu\epsilon_1$  关系，因而  $\frac{\Delta R_2}{R_2} = -\mu \frac{\Delta R_1}{R_1}$ 。这样的桥路接法，使测量的灵敏度提高了。

图 1-5 (b) 中，试件上贴上四块应变片， $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  都作为工作片组成仪器外的全电桥，称全桥法。

图 1-5 (c) 中利用相邻桥臂的作用相减， $R_a$  与  $R_b$  所受到拉力均产生正应变，相减后为零，而弯曲产生的应变则大小相等符号相反，因而应变仪的指示读数为  $R_a$  弯曲应变的两倍。而图 (d) 的应变仪读数为  $R_a$  所受拉伸力产生应变的两倍。

图 1-5 (e) 用于测量转矩，其应变仪读数为  $R_1$  应变值的 4 倍。

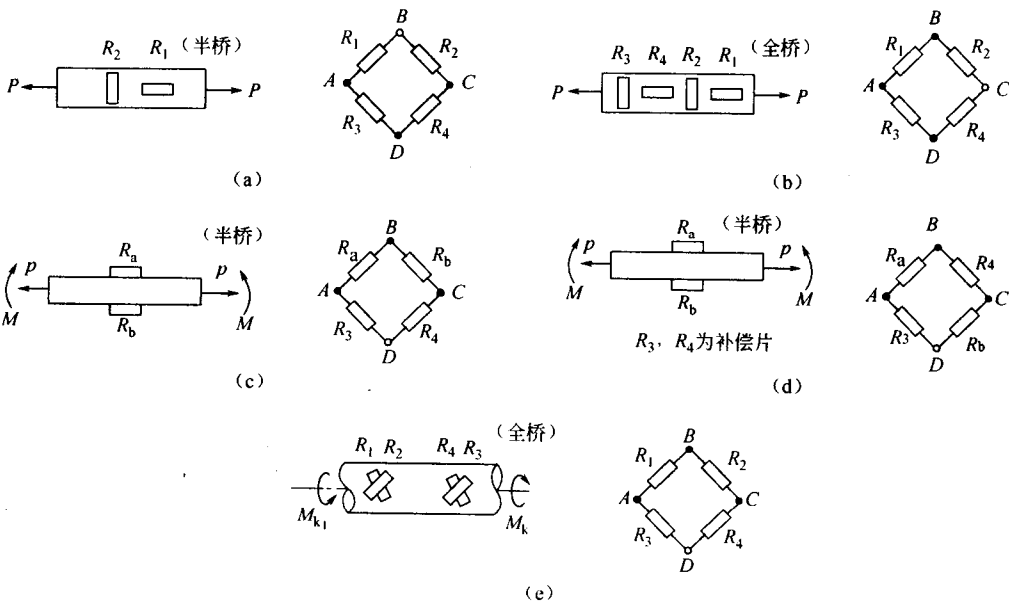


图 1-5 应变值与桥路接法图

利用适当的桥路组合可以达到测量中的一些要求又能提高测量的灵敏度，这是在测量中应充分注意的问题。

(2) 温度补偿问题 由于应变片的电阻变化除应变引起之外也受温度变化的影响，因此，当测量环境或试件的温度有变化时，必须考虑温度补偿问题。可考虑采取下列方法。

a. 补偿片补偿法 在测量时选一块与被测构件相同的材料，在它上面粘贴与工作应变片同一类型、同一阻值、相同灵敏系数的应变片（称为温度补偿片），并使它处于与工作片相同的温度条件，但不使它受力。将它们接到电阻应变仪半电桥的相邻臂上，如图 1-6 所示。当构件受力并有温度变化时，工作片由于受力和温度变化而引起电阻变化，而温度补偿片则只有由温度变化而引起的电阻变化。相邻桥臂互相抵消，所以应变仪的指示读数只显示被测构件受力所引起的应变值。

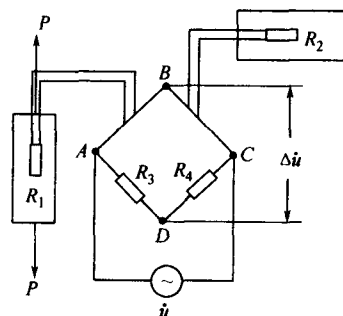


图 1-6 补偿片补偿法

b. 工作片补偿法 测量时如果在被测构件上能找到应变符号相反或比例关系已知、温度条件相同的两点，在这两点上各贴一个工作应变片，接在相邻的桥臂上，也可实现温度补偿。图 1-5 中 (a)、(b)、(c)、(e) 都是工作片做温度补偿的很好例子。试件上各应变片的温度相同、类型一样。它们各自由于温度变化所致的电阻变化，由于桥路接法上的抵消作用，因而在应变仪的指示读数只反映应力变化的结果。必须注意图 1-5 (d) 的电桥接法由于工作片处在电桥的相对桥臂上，因而不能起到温度补偿作用。

c. 使用温度自补偿应变片 这是选择不同温度特性材料；组合不同温度特性材料；利用热电阻，热电偶等方式制造出适应于一定热膨胀系数材料而热输出很小的电阻应变片供不同场合下使用。

d. 计算补偿法 无法采用上述补偿方式时，若知道所使用的应变片在工件材料上随温度变化的数据（经试验或制造厂提供），则可测量出测试时工件的实际温度，计算出因温度变化而产生的读数值，由应变仪的指示读数减除温度影响值后便可得应力部分的数值。

(3) 连接线路电阻的影响 应变片是通过连接线路接入应变仪的，因而连接线路本身的电阻变化就对测量结果有影响。

(4) 动态应变测量 随时间而变化的应变称为动态应变。动态应变测量是将应变随时间变化的过程记录下来，然后进行分析研究。

## 1.2 容器的耐压试验和气密性试验

### 1.2.1 压力容器的耐压试验

耐压试验的主要目的是检验容器在超工作负荷条件下的宏观强度。即验证它在静载设计压力下安全运行所必需的承压能力，同时检验容器密封结构的严密程度、焊缝的致密性及有无局部变形等，从而可在容器投入运行之前及时发现材料、结构和制造工艺中存在的缺陷和问题。压力容器的耐压试验分为液压试验和气压试验两种。

### 1.2.1.1 压力容器液压试验要求

① 凡在试验时，不会导致发生危险的液体，在低于其沸点的温度下，都可用作液压试验介质；一般应采用水。当采用可燃性液体进行液压试验时，试验温度必须低于可燃性液体的闪点，试验场地附近不得有火源，且应配备适用的消防器材。

② 以水为介质进行液压试验，其所用的水必须是洁净的。奥氏体不锈钢压力容器用水进行液压试验时，应严格控制水中的氯离子含量不超过 25mg/L。试验合格后，应立即将水渍去除干净。

③ 压力容器中应充满液体，滞留在压力容器内的气体必须排净。压力容器外表面应保持干燥。当压力容器壁温与液体温度接近时，才能缓慢升至设计压力；确认无泄漏后继续升压到规定的试验压力，保压 30min，然后，降到规定试验压力的 80%，保压足够时间进行检查。检查期间压力应保持不变，不得采用连续加压来维持试验压力不变。压力容器液压试验过程中不得带压紧固螺栓或向受压元件施加外力。

④ 碳素钢、16MnR 和正火 15MnVR 制压力容器在液压试验时，液体温度不得低于 5℃；其他低合金钢制压力容器，液体温度不得低于 15℃。如果由于板厚等因素造成材料无延性转变温度升高，则需相应提高液体温度。其他材料制压力容器液压试验温度按设计图样规定。铁素体钢制低温压力容器在液压试验时，液体温度应高于壳体材料和焊接接头两者夏比冲击试验的规定温度的高值再加 20℃。

⑤ 换热压力容器液压试验程序按 GB 151 规定执行。

⑥ 新制造的压力容器液压试验完毕后，应用压缩空气将其内部吹干。

液压试验后的压力容器，符合下列条件为合格：

- ① 无渗漏；
- ② 无可见的变形；
- ③ 试验过程中无异常的响声；
- ④ 对抗拉强度规定值下限大于等于 540MPa 的材料，表面经无损检测抽查未发现裂纹。

### 1.2.1.2 压力容器气压试验要求

① 由于结构或支承原因，不能向压力容器内充灌液体，以及运行条件不允许残留试验液体的压力容器，可按设计图样规定采用气压试验。

② 试验所用气体应为干燥洁净的空气、氮气或其他惰性气体。

③ 碳素钢和低合金钢制压力容器的试验用气体温度不得低于 15℃。其他材料制压力容器，其试验用气体温度应符合设计图样规定。

④ 气压试验时，试验单位的安全部门应进行现场监督。

⑤ 应先缓慢升压至规定试验压力的 10%，保压 5~10min，并对所有焊缝和连接部位进行初次检查。如无泄漏可继续升压到规定试验压力的 50%。如无异常现象，其后按规定试验压力的 10% 逐级升压，直到试验压力。保压 30min，然后降至规定试验压力的 87%，保压足够时间进行检查。检查期间压力应保持不变，但不得采用连续加压维持试验压力，气压试验过程中严禁带压紧固螺栓。

符合下列条件为合格：

气压试验过程中，压力容器无异常的响声；经肥皂液或其他检漏液检查无漏气、无可见

的异常变形即为合格。

### 1.2.2 压力容器气密性试验

压力容器气密性试验的要求如下。

① 介质毒性程度为极度、高度危害或设计上不允许有微量泄漏的压力容器，必须进行气密性试验。

② 气密性试验应在液压试验合格后进行。对设计图样要求做气压试验的压力容器，是否需再做气密性试验，应在设计图样上规定。

③ 碳素钢和低合金钢制压力容器，其试验用气体的温度应不低于5℃，其他材料制压力容器按设计图样规定。

④ 气密性试验所用气体，应符合《压力容器安全技术监察规程》的规定。

⑤ 压力容器进行气密性试验时，一般应将安全附件装配齐全。如需投用前在现场装配安全附件，应在压力容器质量证明书的气密性试验报告中注明装配安全附件后需再次进行现场气密性试验。

⑥ 经检查无泄漏，保压不少于30min即为合格。

### 1.2.3 试验压力

压力试验的压力应符合设计图样要求，且不小于表1-1的规定。

表 1-1 压力试验的试验压力

压力容器名称	压力等级	耐压试验压力 $p_T = \eta p / \text{MPa}$		气密性试验压力 / MPa
		液(水)压	气压	
钢制和有色金属制压力容器	低压	1.25p	1.15p	1.00p
	中压	1.25p	1.15p	1.00p
	高压	1.25p		1.00p
铸铁		2.00p		1.00p
搪玻璃		1.25p	1.00p	1.00p

表 1-1 说明：

① 钢制低压压力容器耐压试验压力取 1.25p 和  $p + 0.1$  二者中较大值；

② 对不是按内压强度计算公式决定壁厚的压力容器（如考虑稳定性等因素设计的），应当提高耐压试验压力；

③ 对设计温度（壁温）200℃的钢制或≥150℃的有色金属制压力容器，耐压试验压力  $p'_T$  按下式计算。

$$p'_T = p_T [\sigma] / [\sigma]' = \eta p [\sigma] / [\sigma]'$$

式中  $p$ ——容器的设计压力，MPa（对在用压力容器为最高工作压力）；

$p'_T$ ——设计温度下的耐压试验压力，MPa；

$p_T$ ——试验温度下的耐压试验压力，MPa；

$\eta$ ——耐压试验压力系数（见表 1-2）；

$[\sigma]$ ——试验温度下材料的许用应力，MPa；

$[\sigma]'$ ——设计温度下材料的许用应力，MPa。



表 1-2 耐压试验的压力系数

压力容器形式	压力容器材料	压力等级	耐压试验压力系数	
			液(水)压	气压
固定式	钢和有色金属	低压	1.25	1.15
		中压	1.25	1.15
		高压	1.25	
	铸铁		2.00	
	搪玻璃		1.25	1.15
移动式		中、低压	1.50	1.15

耐压试验时，应校核圆筒的应力  $\sigma_T$ ，计算公式为：

$$\sigma_T = \frac{p_T(D_i + \delta_e)}{2\delta_e\varphi} \quad (1-9)$$

式中  $p_T$ ——试验压力，MPa；

$D_i$ ——圆筒内径，mm；

$\delta_e$ ——圆筒的有效厚度，mm；

$\varphi$ ——焊缝系数。

压力容器壳体的环向薄膜应力值应符合下列要求：

- ① 液压试验时，不得超过试验温度下材料屈服点的 90% 与圆筒的焊接接头系数的乘积；
- ② 气压试验时，不得超过试验温度下材料屈服点的 80% 与圆筒的焊接接头系数的乘积。

校核耐压试验压力时，所取的壁厚应扣除壁厚附加量，对液压试验所取的压力还应计入液柱静压力。对壳程压力低于管程压力的列管式热交换器，可不扣除腐蚀裕量。

#### 1.2.4 耐压试验装置

下面以气瓶的耐压试验为例，介绍耐压试验装置。其中待试瓶是指准备进行水压试验的气瓶，受试瓶是指正在进行水压试验的气瓶。当其充装介质相同且试验压力相同时，允许对多只受试瓶同时进行试验。

##### 1.2.4.1 试验装置流程

试验装置流程如图 1-7 所示。

##### 1.2.4.2 操作步骤

(1) 记录待试瓶的有关数据 将待试瓶上标记的出厂编号、公称工作压力、试验压力、气瓶质量、气瓶容积等记入记录，测量并记录试验温度。

(2) 安装受试瓶 用专用接头  $R_1 \sim R_n$  将受试瓶  $I_1 \sim I_n$  连接到试验装置上。

(3) 排气 在阀  $F_0$ 、 $E_T$  关闭的状态下开启其余阀门，使试验用水注入试验装置并排放试验装置中的空气，必要时开启水压泵 J 加速空气的排放。当有水从阀  $E'_1 \sim E'_n$  流出能确认空气已排尽时，依次关闭阀  $E'_1 \sim E'_n$ 。

(4) 检漏 启动或继续开动水压泵 J，当压力测量仪表  $K_C$  和  $K_1 \sim K_n$  的示值升到受试瓶的公称工作压力时，停止水压泵 J，关闭阀 E 后检查是否有泄漏。