

V211.74-62

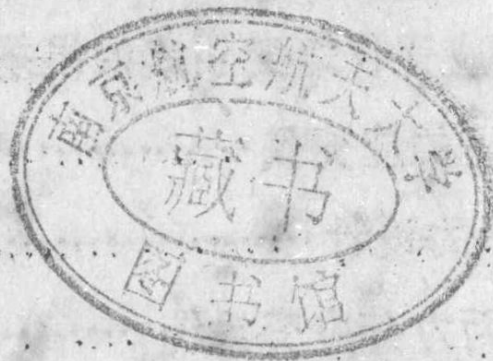
1003-B1

说 明

随着空气动力学的发展，风洞天平也在不断地变化。继国外低速风洞天平手册上册出版又译制了中册。中册的内容主要是介绍应变天平。从目前国外国内情况来看，几乎所有低速风洞都具备机械式和应变式两种型式的天平，因此译此文想必会对我们有些帮助。

另外附图序号未按自然顺序，照片集中在后面，请注意查对。

全文是根据徐德康等二同志的译稿经北京大学力学系风洞实验室整理出版，未经详细校对，不当之处请读者指正，另外藉手册出版之际向译校者和参加有关工作的同志表示谢意。



国外低速风洞天平手册组



30895107

目 录

3. 力的测量

3.1. 应变仪	4
3.1.1 应变仪的应用、防潮和试验	9
3.1.2 应变仪测量所连系到的仪器	10
3.1.2.1 惠斯登电桥的理论和实际考虑 ...	11
3.1.2.2 几种典型的应变仪电路	17
3.1.3 应变仪的误差	18
3.1.3.1 电阻和热系数	19
3.1.3.2 电桥中的温度差	22
3.1.3.3 不等的膨胀影响	23
3.1.3.4 由电桥内没有匹配好的校准 因子所引起的误差	24
3.1.3.5 应变仪蠕变引起的误差	24
3.1.4 用在高温的应变仪	26
3.2 常规应变天平的设计	27
3.2.1 基本的两力矩应变系统	28
3.2.2 法向力的直接测量	33
3.2.3 混合电桥的使用	36
3.2.4 应变天平的设计考虑	37
3.2.4.1 材料(文献 123)	41
3.2.4.2 截面尺寸和指示器灵敏度对重复 性的影响	42

3.2.4.3	模型在內式天平上的固定.....	43
3.2.5	滚转力矩测量.....	43
3.2.6	轴向力的测量.....	46
3.2.6.1	轴向力测量的应变仪技术.....	46
3.2.6.2	诱导的附面层转捩.....	52
3.2.7	力测量的干扰效应.....	52
3.2.7.1	机械干扰.....	52
3.2.7.2	气动力干扰.....	56
3.2.8	应变天平的校测.....	62
3.2.8.1	基本加载系统.....	63
3.2.8.2	读数系统.....	65
3.2.8.3	加载过程.....	66
3.2.8.4	干扰方程的推导.....	68
3.2.8.5	干扰源及其消除方法.....	69
3.2.8.6	偏离校正.....	73
3.2.8.7	滚转方位校正.....	76
3.3	外式天平.....	80
3.3.1	六分量液压天平.....	80
3.3.1.1	外式天平的优点.....	82
3.3.1.2	外式天平的工作性能	
	范围 and 精度.....	84
3.3.2	反射平面技术.....	85
3.3.2.1	侧壁天平.....	87
3.3.2.2	挠性轴壁式天平.....	88

3.4	铰链力矩天平	89
3.4.1	支杆固定的铰链力矩模型	92
3.4.2	铰链力矩天平的校准	93
3.5	特殊目的的天平和支持	94
3.5.1	间接的滚转指示和阻力支持	94
3.5.2	高攻角设备	97
3.5.3	同时可测力和测压的天平	98
3.5.4	微量天平	100
3.5.5	表面摩擦天平	101
3.6	动态安定性测量	103
3.6.1	动态俯仰测量	108
3.6.1.1	半模技术	108
3.6.1.2	用于动态俯仰测量的三元模型技术	111
3.6.2	动态滚转测量	113
3.6.3	横向导数的测量	116
3.6.4	马格纳斯力	117
3.6.5	奥恰尼克阻尼测量仪	119
3.7	数字模拟转换器	122
3.7.1	电机械数字模拟转换器	122
3.7.2	电子管数字模拟转换器	123
3.7.2.1	工作原理	124
3.7.2.2	部件介绍	125
3.7.2.3	优点	127
3.8	自动数据作图方法	128
3.8.1	数学数据作图法	129

3.8.2 模拟计算机.....	130
3.9 电位计.....	132

附表和图	134
------------	-----

3. 力的测量

在继续对力的测量讨论之前，简单地观察那些用于测量的基本术语（图 3-1）和定义（文献 265）是值得的。

准确度 是用测量方法产生的欲测之值的“真”值正确性的程度。这真值引用可接受的工程标准，如标准米，克，等等。即使确定真值是不可能的，也假定它是始终存在的。

精确度 是在指定条件下，用一套仪器对同一真值的几个独立的测量之间再现性的程度。这时常叫“重复性”。时常用测量中的偏差来表达。

误差 是由测量得的值和相应的真值之间的代数差。正误差表示在代数学上测值比真值大。误差时常以欲测值的单位，或作为总尺度值或实际值的函数（或百分比）表达。

偏差 是代表同一真值各独立测量中偶然性的一个统计数。偏差以多样的表达：1）任一测值和两个或多个测值的平均值间的差值；2）几个独立的平均值离开测值的距离（即平均偏差）；3）从几个独立变量计算得的均方根值（即标准偏差）；或 4）第 1），2），3）对测值平均值的比率。任何情况中，应指定一些观测数目。

灵敏度 是欲测变量中输出反映对指定改变的比率。例如，具有净输出压力为 15 磅/时² 和 0 到 150° F 的全刻度范围的一个自动温度控制器，将有 0.1 磅/时² OF 的灵敏度。这里包含有非线性关系应指定给出灵敏度的点或一些点。

分析灵敏度 是产生仪器或自动控制有效反应的欲测变量中的最小改变。分析灵敏度可以欲测变量的单位，作为全尺度值的函数或百分比，或作为实际值的函数或百分比来表达。

临界灵敏度 是产生仪器或自动控制器有效反应的欲测变量的最低值。

无信号带 是欲测变量能够变化而没有引进有效反应的欲测值范围。

电桥 是有平衡能力的四个端点的网络。

桥臂 是两相邻接头间电桥网络的部分。

电桥输入 是施加到电桥的电压。

电桥输出是电桥网络的检流器分路的电流或电压。

平衡 是当(直流)电阻或(交流)阻抗的值引起零输出电压或电流时在电桥中存在的情况。获得这条件时,电阻或阻抗值满足在零输出假定上推导出的电桥方程。

非平衡 在桥臂阻抗没有适当的电桥等式时发生(即电桥是不平衡的)。有些电桥有意工作在不平衡状态,其输出电压或电流的变量用作特殊电桥元件数值改变的量度。

电阻(或电阻的)平衡为电阻元件有满足电桥方程条件的适当值时存在于交流电桥中的情况。除非电阻和反馈元件两者都同时有适当的值,具有电阻和反馈元件两者的交流电桥不可能调整到平衡。如电容反馈元件对平衡没有调节到适当的值以及变化电阻元件,检波器将对某个变量值指示出最小值。除等电桥而外,发生这最小值的桥臂电阻值不会满足基本电桥方程的,然而,对这最小值调节电阻时常叫做获得电阻平衡”。交流电桥中为获得平衡的一般程序是成功地调节电阻和反馈元件到更小和最小,直到获得零位检波器指示。

电容平衡 是电容元件具有满足电桥方程条件的适当值时存在于交流电桥中的情况。它有类似于上面所限定的电阻平衡列举

的限制条件。

电桥电阻或阻抗 是短路电源端时，输出端间的电阻或阻抗。

百分比不平衡是变化的桥臂阻抗或电阻违背平衡这电桥的值的百分数（假是只变化一臂）。如两个或四个相对臂都同时变化（超音速风洞天平中最常发生的），百分比不平衡是两或四臂的百分比不平衡的总和。

电桥中的沾染不是由于电桥不平衡产生的任何输出。

六十周沾染 是当电桥元件或检波器对60周功率系统或静电或电磁耦合时，60周电压或电流的电桥输出的现象。

检波器 是对电压或电流敏感，用来确定电桥输出值的设备，当检波器指示为零时，认为电桥是平衡的。

平衡的精确度（或灵敏度） 是对给定的电源、电桥和检波器的组合能够调节到平衡的程度。可用许多方法表达，如以给出最小可观察到检波器输出的特殊电桥元件，对一给定施加电压的百分比值改变。注意，这取决于下列三项：电源电压，最小可感知的检波器输入，和电桥一个或多个元件中的百分比改变。

杂波 存在于没有相应的电桥输入而偶然变化输出的检波器中，因为当电桥输出电压或电流产生一与杂波指示值可比较的检波器指示值时，要从杂波中分离出输出值变得困难了，这检波器特性限制了平衡的精确性。

电容沾染 为通常用于电阻电桥的一个术语，是由电桥元件或电桥元件内电容之间的小寄生电容引起的电桥输出。即使可能使电阻元件平衡，但这产生电容不平衡。

3.1 应变仪

目前，最主要的应变测量设备是电阻型的应变仪（文献95）。

它的结构和操作是十分简便的，但它是如此的精密。可测量0.1%量级的应变。其尺寸只如邮票样大，只是稍重些。由电阻随线的变化而变化的金属丝或片所组成。应变仪牢固地粘在受应变的元件上，因此元件的任何应变传递到丝上。百多种类型的应变仪是大量可用的，每一种应变仪遇到的特殊情况的要求而发展了。应变仪型式间差别的说明（见更详细论述的文献96）将指出。

应变仪最基础的部分是金属丝本身（文献97）。部分由于长度的增加和横截面的减少，以及部分由于特定电阻的实际改变，引起展开的金属丝电阻增加，校准因子定义为电阻改变时对长度改变的比率：

$$G = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} \quad (3-1)$$

如完全是由于尺度的改变，这公式是准确的，从泊松比，任何金属丝的校准因子近似为1.7。然而材料在这方面有广泛的变化，并且实际上某些具有负的校准因子。对不同的材料，校准因子不同，从镍的-12到铂的+6。不幸的是具有高校准因子的材料在电阻系数上也呈现出高的温度效应（文献98），最广泛使用于应变仪的两种材料是称为 *advanco*，*copel*，或 *constantan* 的具有校准因子约为2的铜-镍合金，与具有校准因子为3.5的镍，铬，铁和钼的等弹性合金。当在一段时间内控制应变为常值，并应变的改变用作阶梯函数时，希望使用康铜（铜镍

合金)细丝应变仪, 虽则具有较低的灵敏度, 但也有低的温度灵敏度, 在应变、改变率高的研究中, 使用更灵敏的等弹性细丝为好, 而不顾其较大的温度灵敏度。

应变仪型式的第二种变化是格栅的实际结构。通常粘贴的应变仪是由直径为 $10/100(0.025\text{mm})^2$ 长为 5 吋 (127mm) 的金属丝形成串联的长的平行迴线所组成的, 对长为 3/8 吋或更少些的应变仪, 金属丝时常围绕一圆柱形的纸质线心缠绕成封闭缠绕旋线的形成。这线心则是很平的。更新式的箔型应变仪, 应变敏感成分是由其上印染格栅图案的具有抗酸计的金属质箔组成的。没有印染的部分的腐蚀掉, 箔型应变仪通常是用康铜或镍铬合金做成的。为了在不同方向测量应变的便利起见, 发展了称为“应变花”的应变仪, 这些应变仪有三个或四个分开的具有各种角度方位的格栅, 并且能粘牢在对所有格栅方位不用特别注意的部分上。每个格栅上的合成应变可以记录下来, 且重要表面的部分应变的真值和方向能从这些数据计算得到。一般应变仪的电阻是 (120) 欧姆, 但标准应变仪也可以做成具有 60、75、240、300、350、500、1000 和 2000 欧姆的电阻。

应变仪构造中可能变化的第三个因数是作为细金属丝的基础或载体, 对最多的应用, 这种载体是一种提供很坚实的和充分的应变仪的布质熔合的纸。而在许多应变仪应用中, 应用的容易性和快速的干燥时间是要素, 因此, 基础是发展成特别薄的纸以用来代替布质熔合纸。这种型式的载体允许粘贴溶剂的更快速蒸发; 它也有利于在平板或曲面上快速的装置。某些应变仪上, 使用毛氈保护层来覆盖应变仪的顶侧。

温度的考虑尚导致第三种基础。这种型式利用浸透酚醛塑胶

的纸，敏感成分在两层这种浸透的纸间加压烤烘，其结果为细丝坚实地埋置于酚醛塑胶纸中，这种应变仪能在 300°F 时坚持连续工作，并给出极限贡献达 500°F 。

箔型应变仪不固定在纸上，但固定在具有极好机械和电气性质的很薄的漆上。这就意味着，改进了从试验表面到格栅的应变传递，因而也改进了应变仪的性能和稳定性，对给定的横截面积来说，导体的矩形横截面给出了较大的表面积，在应变仪和试验表面间提供了更好的胶粘作用，箔型应变仪的极端的可挠曲性允许应用于圆角和其它事先未形成的曲面。

用作连接应变仪的粘合剂也可以变化，在过去，使用了硝石——纤维素或苯酚——树脂胶结剂。然而，具有优良性质和更短干燥时间的新的结合作用药剂生产了，应变仪的制造通常应用一种对每种型式应变仪适合的粘剂。可以获得具有狭条状背的箔型应变仪。

在应变仪结构上要考虑的最后一种变化是导线和应变仪细丝间连接的型式。粘贴的应变仪可以有圆形的或板形的与格栅金属丝末端焊接或钎接的较大直径的导线。对静的或变化的载荷下普通的应力分析，这些是满足的。这种场合中，每个应变仪承受适度数值应力改变的相当小量。但当应变仪用作疲劳研究时，试验中早期的许多情况中细金属丝有时遭到疲劳破坏，相似地，当包含大的应变时，迟滞性成为显著的，且过早的破坏可能发生。遇到这种情况时，发展了具有在导线和格栅丝间引入中等尺寸金属丝的，双重导线应变仪，用了分配应力集中于两个接点之间而代替一个后，有效地增加了疲劳寿命和显著地减少了高应变时的迟滞性。通常没有导线或带状物应用箔型应变仪。应变仪设置好后，

用钎接导线到大的格栅的似带状的延伸线来做连接。

目前，大量利用了印刷电路布线的狭条。用约0.006吋厚的玻璃——环氧树脂胶——铜薄片腐蚀出这些狭条，并在有些应变仪设备的型式具有上等单股实金属线连接中使用，因为它们提供了内部应变仪布线的钎接点和可靠击紧较重的引出线，对多样的设备是特别有用的。

因为继续不断地改进了应变仪的设计和发展了新的特征，在对特殊目的选择应变仪之前应该研究制造的样本，这样的资料从下列单位可现成地利用。

Baldwin-Lima-Hamilton

Electromiocs and Instrumentation

Division

Waltham 54 Massachusetts

Tatnall Measuring Systems Company

Phoenixville Pennsylvania

欧州制造的应变仪也已经成功地应用于天平工作中。这应变仪 (TEPIC) 有高校准因子，较高的防潮，以及容易应用。透明的弹性体 (BL型) 或固定的纸 (BP型) 是可以利用的。空气干燥和加热硫化的两种类型粘合剂也是可利用的，制造的地址是：

Huggenberglr

Ackorsteinstr. 119

Zwrich 10/49

Switzerland

(海外电报略号: Tenso.Zurich)

因与这种应变仪有关系的情报不是视成可利用的, BL型应变仪的详细说明述于下列表中。

型式	BL 型 应 变 仪 清 单				电 阻 (欧 姆)	标准因子
	有效长度 (吋)	有效密度 (吋)	总长 (吋)	总宽 (吋)		
BL1/2/120	0.20	0.14	0.47	0.40	120	2.50
BL1/120	0.40	0.06	0.67	0.40	120	2.50
BL2/120	0.83	0.02	1.10	0.40	120	2.50
BL2/350	0.83	0.10	1.10	0.40	350	2.50
BL2/500	0.83	0.14	1.10	0.40	500	2.50
BL2/1000	0.83	—	—	0.40	1000	2.50
BL3/350	1.22	0.06	1.50	0.40	350	2.50
BL6/350	2.40	0.02	2.70	0.40	350	2.50

3.1.1 应变仪的应用, 防潮和试验:

为了以应变仪得到最大的准确度, 这是重要的: 极度仔细地依照对应变仪的每一步制造所包含的教导设置它的。因为新粘贴技术和新粘贴剂的不断出现, 并因为完全适用的工具和特殊的教导容易利用(例如, 见文献99), 这节只得出一般的讨论。

应用——应变仪所应用的表面必须清洁和平坦。锈色, 锈皮, 油脂等等必须除去, 凹坑或不平度必须研磨。高度发亮的表面应该弄粗糙。用拖把可应用溶剂(甲苯, 丙酮和四氯化碳), 同时在清洁后, 表面不应该再触摸。适当地应用粘洁剂(随应变仪而来的)时, 它将绕应变仪的周围泄漏。夹子应用砝码或弹簧加载夹子做成。(C形夹因在整个干燥周期中不能给出不变的压力, 故应该避免)。应变仪则可以加热干燥。任何特殊应变仪干燥周期的详细说明可利用随应变仪而来的教导手册(例如, 对 Baldwin SR-4 应变仪见文献99)。用核对应变仪到金属的电阻或用拿下应变仪并试验溶剂的气味(注意: 四氯化碳是有毒的)可以试验干燥进展。

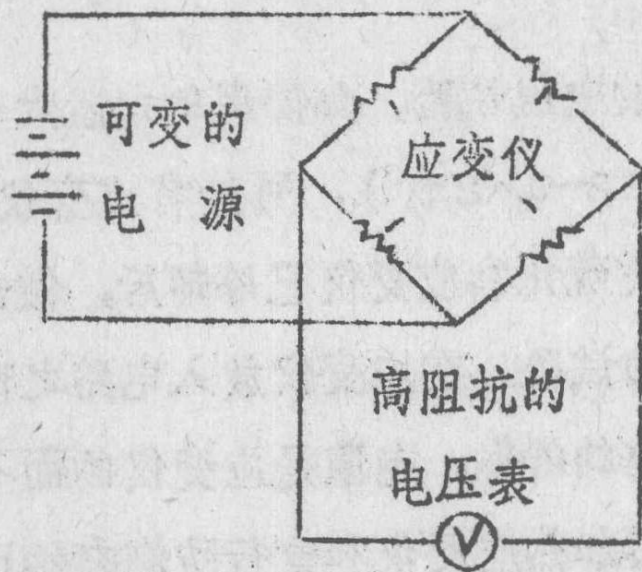
防潮——因在应变仪测量中, 电阻的稳定性是重要的, 而不稳定的主要原因是潮湿(其它的原因是技术问题, 不在这里讨论), 当情况和需要要求时, 应变仪必须防潮。(即在干燥空气中的短时间测量不能称为防潮的, 而在潮湿空气中不断地工作才算)。潮湿气有两个效应: 1) 尺度的改变, 和 2) 水气吸收作用; 两者均引起电阻的改变, 首先通过应变仪的改变, 其次由导电性的改变引起的。油脂, 蜡, 或合成橡胶可用来涂在应变仪和周围面积上。涂层依赖于应变仪使用下的条件。粘结剂必须完全硫化, 应变仪在防潮前必须干燥。从随应变仪而来的手册可以获得特殊

的教导（例如，见文献 99）。

试验——用任一欧姆计可以做电阻试验。如使用的电阻太高（例如，对 Baldwin 应变仪用 $22\frac{1}{2}$ 伏），可能有应变仪绝缘性破坏的危性。粘结剂已干燥或硫化和应变仪已冷却后，做击穿泄漏电阻（应变仪对金属的）的试验。在应变仪放入电路之前，完成这试验更可取，以便知这测量的泄漏，电阻是应变仪的而不是电路的。由潮湿引起的泄漏可用加热应变仪和重行防潮来矫正。在随应变仪而获得的教导手册中能够详细地找到特殊的知识（例如，见文献 99）。

3.1.2. 应变仪测量所连系到的仪表

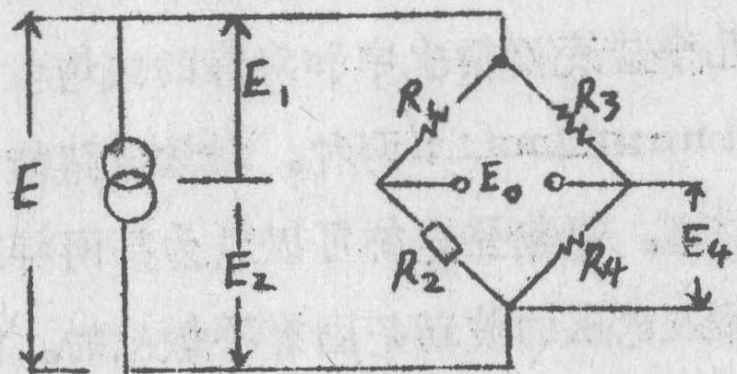
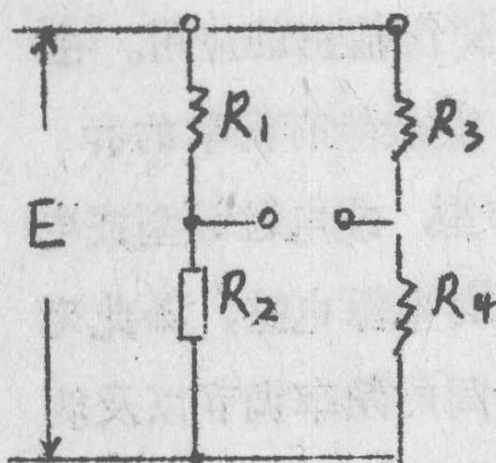
应变仪敷设到表面后，必须连到有能测量和记录或至少指示电阻小改变的仪表上去。这些仪表可能有复合的和 expensive 两种，特别对那些希望同时记录许多应变仪输出的应用。在几个应变仪情况中和对静的或增量的应变，仪表能有简单的和 inexpensive 两种。计量电路能有两种类型，或电位计型或电桥型。惠斯登电桥可以认为是两并联的电位计电源电路，如此对输入电压的波动是固有不敏感的。简易和宽阔的频率调节以及测量如 0.001 欧姆样小的电阻改变的能力证实惠斯登电桥的几乎是独一无二的使用性。下面表示了一简单的电路并在下列章节中作简洁的评述。



一般的惠斯登电桥由四个工作应变仪组成

3.1.2.1 惠斯登电桥的一些理论和实际的考虑

在臂 R_2 应变仪电阻改变一小量 ΔR_2 时, 下列的分析 (文献 100) 建立了引起的输出电压的改变 E_0 。



对原始的“平衡”电桥, $E_4 = E_2$, 当 R_2 变成 $(R_2 + \Delta R_2)$ 时, E_2 变成 $(E_2 + \Delta E_2)$ 。因而,

$$E_0 = (E_2 + \Delta E_2) - E_4 = \Delta E_2$$

因而
$$E_2 = \frac{E}{R_1 + R_2} \cdot R_2$$

则
$$E_0 = \Delta E_2 = E \left(\frac{R_2 + \Delta R_2}{R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$