

风洞应变天平手册



《风洞应变天平手册》编写组

风洞应变天平手册

《风洞应变天平手册》编写组

一九八三年十月

前 言

建国三十多年来,随着风洞实验技术的发展和实验范围的扩大,各种类型和用途的空气动力天平的研制工作也不断向前发展。

众所周知,风洞实验的主要任务之一,是测量在各种实验条件和状态下,模型所受的空气动力的量值、方向和作用点的位置。而完成上述任务的主要测量设备是空气动力天平。空气动力天平性能的优劣,对风洞测力试验结果的可靠性有重要影响。因此,风洞试验工作者十分重视空气动力天平的研究工作。

空气动力天平在风洞实验过程中的主要功用是:

- 1、按一定的座标系分解和测量作用在模型上的空气动力。
- 2、将模型支撑在风洞流场中,并借助于相应的机构改变模型的试验状态。

风洞空气动力天平按其工作原理可分为机械式、液压式、应变式、压电式和电磁式等几种类型。

与风洞实验的其它测量设备相比,空气动力天平与风洞实验技术的关系更为密切。风洞实验除要求空气动力天平有足够的测量精度和准确度外,还要求它对风洞流场具有尽可能小的空气动力干扰和不影响模型的空气动力外形模拟。此外,还要求空气动力天平具有良好的动态特性,以适应特种实验快速测量的需要。与机械天平相比较,应变天平具有结构简单、体积小、动态性能好、应用范围广、成本低等优点。因此,国内各类型的风洞都广泛使用这类天平。

风洞应变天平是在应变片技术发展的基础上出现的,是应变测量技术在空气动力测量上的具体应用。目前,风洞应变天平逐步向结构型式典型化、量程范围系列化、几何尺寸小型化和元件布局内式化的方向发展。随着天平设计、加工工艺、应变片质量、检测仪表性能的不不断提高,以及天平校准设备和校准方法的不断改进和完善,风洞应变天平的测量精度和准确度不断提高。

在我国,一九五八年开始仿制第一台纵向四分量应变天平,并于一九六〇年用于风洞试验。目前,在国内现有的风洞中已经配备了自行设计的各种类型和量程范围的常规天平和特种天平。近十几年来,广泛开展了内式六分量天平的研制工作,并已开始用于风洞实验中。与此同时,天平校准设备和校准方法的研究工作也取得了很大进展。用于天平的各种应变片的品种和规格不断增多、质量不断提高,为天平的发展创造了有利条件。

在总结近二十年来风洞应变天平研制工作的基础上,编写此《风洞应变式天平手册》(以下简称《手册》)。其目的是:

- 1、为从事风洞应变天平的设计和使用的工程技术人员提供参考的技术资料;
- 2、制定风洞应变天平设计、校准、使用的基本准则和规范,取得共同语言,以便更好地鉴定天平设计质量及使用性能。

本《手册》由“7210”办公室在《第一次全国风洞天平会议》上,责成航空工业部的六二六所、南京航空学院、航天工业部的七〇一所和中国人民解放军八九九五六部队等单位分头编写,六二六所负责组织、汇总和编辑。中国空气动力学研究会测控专业委员会主持了《手册》

的定稿工作。

《手册》共包括前言和七个章节，其中：前言、第一章、第二章、第四章和第六章由六二六所王朝安、王洁琴编写；第三章由八九九五六部队沈鸿桥编写；第五章由南京航空学院韩步璋编写；第七章由七〇一所王从新、杜庆祯、孙镇波和于连生编写。

《手册》由上述单位分头编写后，先后又邀请了全国各有关单位的有关人员进行了三次审定工作，即初稿审查、修订稿审定及最后修正定稿。参加《手册》的审稿及定稿人员有（以姓氏笔划为序）：王从新、王朝安、王洁琴、王宜昭、刘永昌、刘宗陶、叶镜明、陈广玉、陈明钻、陆文祥、李志安、沈鸿桥、张可忠、拓怀德、杨祥西、杨惠忠、段有义、屠兴、赵润祥、顾兴若、贾庚仁、苑玉华、韩步璋、薛启智等。封面设计：六二六所李存诚。在《手册》编写过程中，得到了国内各有关单位和有关同志的大力支持，并为《手册》编写工作提出了不少宝贵意见，为此《手册》编写组全体人员深表谢意。

本《手册》的编写人员分散全国、在一起讨论修定的时间较少，加之我们水平有限，经验不多。因此《手册》的错误和缺点在所难免，敬请读者及时予以批评指正。

《风洞应变天平手册》编写组
一九八二年五月于杭州

符 号

E	弹性模数[kg/mm^2]
G	剪切弹性模数[kg/mm^2]
J	截面惯性矩[mm^4]
J_p	截面极惯性距[mm^4]
k	应变片的灵敏度系数
M	弯矩[$\text{kg}\cdot\text{mm}$]
M_K	扭距[$\text{Kg}\cdot\text{mm}$]
R	应变片电阻值[欧姆]
ΔR	应变片电阻增量[欧姆]
U	电桥电压[V]
ΔU	电桥输出电压[mV]
W	抗弯断面系数[mm^3]
W_K	抗扭断面系数[mm^3]
Y	法向力[kg]
M_z	俯仰力距[$\text{Kg}\cdot\text{m}$]
X	轴向力[Kg]
M_x	滚转力矩[$\text{Kg}\cdot\text{m}$]
Z	侧向力[Kg]
M_y	偏航力距[$\text{Kg}\cdot\text{m}$]
$K_y, K_{M_z}, \dots, K_{M_y}$	天平各分量主体系数[Kg/mv]或[$\text{Kg}\cdot\text{m}/\text{mv}$]
$K_x^y, K_x^{M_z}, \dots, K_x^{y_z}, \dots, K_x^{M_z^2}$	天平各分量之间的干扰系数
b	弹性元件宽度[mm]
f	挠度[mm]
h	弹性元件厚度[mm]
l	弹性元件长度[mm]
n	蠕变系数
θ	转角[弧度]
ρ	旋转半径[mm]
σ	正应力[Kg/mm^2]
[σ]	法向许用应力 [kg/mm ²]
τ	切应力[Kg/mm^2]
[τ]	切向许用应力[Kg/mm^2]
δ	绝对误差; 机械滞后; 偏差; 变形;
δ_{max}	极限误差
α	模型迎角[度]; 应变材料的电阻温度系数[1/°C]

- α_t 补偿电阻的电阻温度系数[1/°C]
 β 模型侧滑角[度]
 β_s 天平元件材料的线膨胀系数[1/°C]
 β_G 应变材料的线膨胀系数 [1/°C]
 r 模型滚转角 [度]
 ε 应变

目 录

符号

第一章 基本概念	
§ 1.1 风洞天平	(1)
§ 1.2 风洞应变式天平	(1)
§ 1.3 应变天平的分类	(1)
§ 1.4 应变天平的主要特性	(2)
第二章 应变天平的基本原理	
§ 2.1 基本原理	(3)
§ 2.2 天平元件	(3)
§ 2.3 应变片	(4)
§ 2.4 应变天平的测量线路	(7)
§ 2.5 检测仪表	(8)
第三章 应变天平的设计	
§ 3.1 设计的基本任务和工作程序	(18)
§ 3.2 应变天平的设计参数	(18)
§ 3.3 应变天平的设计准则	(18)
§ 3.4 应变天平的总体设计	(19)
§ 3.5 工作图设计	(28)
§ 3.6 对天平材料的要求	(29)
§ 3.7 应变天平元件设计	(30)
§ 3.8 一些典型的支杆天平介绍	(38)
第四章 应变天平的施工	
§ 4.1 概述	(86)
§ 4.2 应变片的粘贴	(86)
§ 4.3 防潮处理	(87)
§ 4.4 测量线路的连接和敷设	(88)
第五章 应变天平的校准	
§ 5.1 概述	(90)
§ 5.2 静校坐标系及天平使用公式	(90)
§ 5.3 静校设备	(91)
§ 5.4 静校前的准备工作	(92)
§ 5.5 静校方法	(93)
§ 5.6 静校精度和准度	(99)
§ 5.7 弹性角测定	(101)
§ 5.8 天平静校报告	(101)

§ 5.9	天平动态校准.....	(102)
第六章 应变天平的使用和维护		
§ 6.1	概述.....	(113)
§ 6.2	应变天平在使用中常遇到的问题.....	(113)
§ 6.3	应变天平的使用和维护.....	(118)
第七章 特种天平		
§ 7.1	半模型天平.....	(119)
§ 7.2	铰链力矩天平.....	(120)
§ 7.3	大迎角天平.....	(121)
§ 7.4	马格努斯天平.....	(122)
§ 7.5	高温天平.....	(123)
§ 7.6	炮风洞天平.....	(125)
§ 7.7	动导数天平.....	(129)

参考资料

各章中的表及图

附录 I 截面的几何特性

附录 II 材料的受力状态和计算公式

附录 III 各种梁的弯曲受力状态和计算

第一章 基本概念

§ 1.1 风洞天平

在风洞实验中，用于测量作用在模型上空气动力的大小、方向和作用点的装置，称为风洞天平。

§ 1.2 风洞应变式天平

天平在空气动力作用下产生应变，利用粘贴在天平元件上的应变片作为变换器来测量相应的空气动力（力矩）的天平，称为风洞应变式天平（以下简称应变天平）。

§ 1.3 应变天平的分类

一、按所测空气动力分量分：

- 1、单分量天平—测量一个空气动力分量的天平；
- 2、多分量天平—测量两个以上空气动力分量的天平。

二、按实验模型的型式分：

- 1、全模型支杆天平—用于全机（弹）的纵横向测力实验；
- 2、半模型天平—用于半模型测力实验；
- 3、部件天平—用于飞行器模型各种部件的测力实验；

常用的部件天平有：

- (1) 操纵面天平—用于飞行器操纵面的测力实验（包括测定铰链力矩压力中心位置）；
- (2) 外挂物天平—用于飞行器外挂物（机载导弹、付油箱等）的测力实验；
- (3) 进气道阻力天平—用于测量进气道内阻。

4、其它特种用途天平，如大阻力天平、零升力矩天平、压心天平、微量天平、喷流和通气模型实验的天平、马格努斯天平、高温天平和动导数天平等。

三、按模型与天平测力元件的相对位置分：

- 1、内式天平—天平的全部测力元件均位于模型的内部；
- 2、外式天平—天平的全部或部分测力元件位于模型的外部。

四、按天平元件的传力形式分：

- 1、复合式天平—模型载荷经由串，并联的天平测力元件传递。
- 2、浮框式天平—模型载荷经由并联的天平测力元件传递。

§ 1.4 应变天平的主要特性

一、 **量程**：天平所能测量的载荷范围称为天平的量程。天平的量程分为：

1、 **设计量程**：天平在设计时所确定的载荷称为设计载荷。由设计载荷确定的量程称为天平设计量程。

2、 **使用量程**：天平经过调试和使用，在保证天平的刚度、强度和测量精度的条件下所能达到的实际载荷测量范围。

二、 **最大输出**：天平某一测量分量的电桥在设计载荷作用下的信号输出称为天平该分量的最大输出。

三、 **感度(分辨力)**：天平测量系统(包括检测仪表)所能分辨的被测载荷的最小值。

四、 **精度**：天平某一分量对同一载荷多次测量的重复程度。天平的精度一般用测定值的标准误差来表示。

五、 **准度**：天平某一分量的测定值与真值的差值。

第二章 应变天平的基本原理

§ 2.1 基本原理

应变天平是基于非电量电测的原理,把应变测量技术具体应用在风洞实验中,来测量作用在模型上的空气动力和力矩。用专门设计的天平元件来感受作用在模型上的空气动力,并将其按一定的坐标系统分解成空气动力和力矩分量。在此空气动力和力矩分量的作用下,天平元件产生相应的应变。粘贴在天平元件上的应变片将天平元件产生的应变量变换成与此成比例的电阻增量。由应变片组成的测量电桥,将电阻增量变换成电压输出,然后由检测仪表测量和记录下来。应变天平系统由以下几个部分组成(见图(2.1)):

一、天平元件:感受作用在模型上的空气动力分量(P),并产生与所测空气动力分量成比例的应变(ϵ)。

二、应变片:感受天平元件的应变(ϵ),并将其变换成与此成比例的电阻增量(ΔR)。

三、测量线路:将应变片的电阻增量(ΔR)变换成与其成比例的电压输出(Δu)。

四、检测仪表:测量和记录测量线路的电压输出(Δu),并以模拟量或数字量(Δn)的型式显示。

综上所述,应变天平在测量过程中经过了如下的参量变换过程:

$$P \rightarrow \epsilon \rightarrow \Delta R \rightarrow \Delta u \rightarrow \Delta n$$

因此

$$P \propto \Delta n$$

§ 2.2 天平元件

天平元件一般是用具有较高强度和韧性的合金钢制成的。在空气动力载荷作用下,天平元件中的应力不得超过材料的比例极限。通常要求天平元件通过它所具有的特殊结构型式,只对它要测的空气动力分量敏感,并产生与此成比例的应变量(ϵ)。而对其它分量只产生较小的应变量。这就是天平元件对空气动力载荷的分解作用和选择性。这一性能是衡量天平元件优劣的重要标志,也是影响天平性能的主要因素之一。

对天平元件的要求是:

一、尽可能的减小甚至消除各测量分量之间的相互干扰,力求使某一天平元件只对它所测量的载荷分量敏感,而对其它分量的作用具有较大的刚度。

二、具有较大的系统刚度,较高的固有频率。

三、对所测载荷分量具有较高的输出。

- 四、各测力元件力求设计成整体结构，尽量减少机械连接。
- 五、各测量元件应尽量集中对称布置，具有较好的热平衡，以避免产生较大的结构应力。
- 六、具有较小的几何尺寸，并具有较高的载荷测量范围。
- 七、力求结构简单、加工容易、施工（应变片粘贴、导线敷设）方便。

§ 2.3 应变片

应变片的性能和粘贴质量，对应变天平的测量精度和准确度有十分重要的影响。

一、对应变片的要求

与一般的应力测量相比较，对用于应变天平上的应变片有更高的要求。这不仅因为风洞实验要求天平测量结果有较高的精度，而且应变天平是工作在空间受到严格限制，温度、湿度变化大，载荷脉动等不利的条件下。因此，对应变片的要求为：

- 1、具有较高的电阻值和阻值稳定性、较大的灵敏度系数、良好的粘贴性能；
- 2、具有良好的温度特性；
- 3、具有较小的机械滞后和蠕变；
- 4、具有较高的疲劳寿命；
- 5、具有较小的阻值、电阻温度系数和灵敏度系数分散度，以便使测量电桥达到初始平衡，并减小各分量间的相互干扰和温度效应；
- 6、具有较小的尺寸。

二、应变片的结构

常用的应变片有丝式、箔式和半导体应变片三种。

1、丝式应变片

丝式应变片的结构如图（2.2）所示。它主要由以下几部分组成：

（1）电阻丝。目前用于制作应变片的丝材及其性能如表（2.1）所示。丝材的直径通常为0.015~0.030mm。

（2）基底和复盖层。基底和复盖层可用薄纸或有机聚合物材料，前者为纸基应变片，后者为胶膜应变片。用于应变天平上的应变片多属胶膜应变片。

（3）引出线。引出线一般多是直径为0.15~0.25mm左右的裸铜线、镀锡软铜线或其它形式的导线。

2、箔式应变片

箔式应变片的电阻敏感元件是金属丝栅，而是通过光刻、腐蚀等工序制成的一种很薄的金属箔栅。金属箔的厚度一般为0.003~0.010mm。箔式应变片的基底多为胶膜、基底厚度多在0.03~0.05mm之间

3、半导体应变片

半导体应变片的敏感元件是很薄的单晶硅片或锗片，上下复以胶膜，两端有接线端子可连接引出线。

丝式应变片具有制作工艺简单，性能稳定等优点，可用于不同温度环境下的测量。但不易实现小型化。箔式应变片与丝式应变片相比较，由于金属箔栅很薄，与天平元件的粘贴面积

大，因此具有良好的散热条件，允许通过较大的电流，便于提高测量输出信号。除此之外，它具有较高的粘贴强度，并易于实现小型化。由于箔式应变片具有上述特点，因此越来越广泛地应用在应变天平上。

应变天平常用的丝式应变片的规格及特性见表(2.2)(a)~(d)，箔式应变片的规格及特性见表(2.2)(e)。

半导体应变片最主要的优点是灵敏度系数高。另外它具有机械滞后小、横向效应小、体积小等特点。但它的温度稳定性差，不仅电阻温度系数大，而且灵敏度系数也受温度的影响。因此目前在风洞应变天平上还很少使用，仅用于短时间的动态测量。

三、应变片的主要性能

1、电阻值及电阻值偏差

粘贴在天平元件上的应变片，受载荷的作用所产生的电阻增量为

$$\Delta R = KR \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

对于用相同丝材制成的应变片而言，由于丝材只允许一定的额定电流，因此只有提高应变片的阻值才能提高电桥电压，从而提高电桥的输出信号。

目前在应变天平上使用的应变片通常有120Ω，200Ω，300Ω，400Ω等几种电阻值。组成测量电桥的各应变片电阻值偏差不应大于0.2Ω。

2、灵敏度系数

式(2.1)中的 $K = 1 + 2\mu$ ，称为应变片的灵敏度系数，其值表示应变片将应变量变换为电阻增量的能力，是应变片的主要特性之一。

3、热输出

应变片受温度影响产生的电阻变化，称为应变片的热输出。

粘贴在天平元件上的应变片，由于温度变化引起电阻变化的原因有两个：一是应变材料本身的特性(电阻温度系数)引起的；二是丝材与天平元件材料的线膨胀系数不同引起的。

当温度变化 Δt °C时，应变片电阻的增量可用下式表示

$$\begin{aligned} \Delta R_t &= R\alpha\Delta t + RK(\beta_s - \beta_G)\Delta t \\ &= R[\alpha + K(\beta_s - \beta_G)]\Delta t \end{aligned}$$

令 $\alpha_t = \alpha + K(\beta_s - \beta_G)$

则 $\Delta R_t = R\alpha_t\Delta t$

$$\alpha_t = \frac{\Delta R_t}{R\Delta t} \quad \text{应为: } \alpha_t = \frac{\Delta R_t}{R \cdot \Delta t} \quad (2.3)$$

式中

α_t 粘贴在天平元件表面上的应变片电阻温度系数(1/°C)。

α 应变材料的电阻温度系数(1/°C)

β_s 天平元件材料的线膨胀系数(1/°C)

β_G 应变材料的线膨胀系数(1/°C)

应变片的电阻温度系数 α_t 表示应变片对温度变化的敏感程度。其值越小，应变片的温度特性越好。安装在风洞中的应变天平，通常要求有较好的温度特性。实践表明由于应变片的

温度效应，将使应变天平产生零点飘移（不回零）。它是影响测量精度的主要因素之一。为了消除这一影响，通常采用线路补偿法或数据修正法。比较理想的是采用温度自补偿应变片。其原理是通过对应变材料的热处理，改变其温度系数 α ，来满足下述自补偿条件：

$$\alpha_t = \alpha + K[\beta_s - \beta_G] = 0 \quad (2.4)$$

例如，当 $K = 2.0$,

$$\beta_s = 11 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C} \quad (30\text{C}_r\text{M}_n\text{S}_i)$$

$$\beta_G = 13 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C} \quad (\text{N}_i\text{C}_r\text{M}_n\text{S}_i \text{丝材})$$

料的电阻温度系数为

$$\begin{aligned} \alpha &= K(\beta_s - \beta_G) \\ &= 2 \times (13 - 11) \times 10^{-6} = 4 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

则 $\alpha_t = 0$ 。达到了 $\text{N}_i\text{C}_r\text{M}_n\text{S}_i$ 丝应变片粘贴在 $30\text{C}_r\text{M}_n\text{S}_i$ 天平元件上的温度自补偿。

实践证明，通过上述方法可以使应变片的电阻温度系数 α_t 控制在 $(0.1 \sim 0.5) \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ 的范围内。这样，在一定的温度变化范围内，对天平测量结果的影响就很小了。

除此之外，天平设计中为了尽可能地消除电桥的热输出，还应使同一测量电桥中的各应变片处于相同的温度条件下，并在天平的结构设计中尽可能地避免结构热应力。

4、机械滞后

当天平承受加载和卸载时，检测仪表的示数不重复的现象称为应变片的机械滞后，如图(2.3)所示。

机械滞后用曲线的最大宽度与测量范围的最大值的百分比来表示，即

$$G = \frac{\delta}{H} \times 100\% \quad (2.5)$$

也可用在某一应变范围内机械滞后的绝对值 δ 来表示。

造成机械滞后的主要原因有：

(1) 应变片本身特性不好；

(2) 天平元件材料材质不好；

(3) 粘贴剂及其固化处理不良，粘贴技术不佳造成部分脱落、翘起，或粘结层太厚以及粘贴剂受潮变质等。

就应变片本身而言，在受3~5次往复循环载荷作用之后，机械滞后值将急剧减小。这也是应变天平在试验中经多次吹风后其性能逐渐趋于稳定的原因。

5、蠕变

粘贴在天平元件上的应变片，在恒定载荷作用下和恒定的温度环境中，电阻值随时间而变化的特性称应变片的蠕变。

应变片的蠕变系数通常是用在某段时间内，应变的相对变化量来表示：

$$n = \frac{\delta_\epsilon}{\epsilon_0} \times 100\% \quad (2.6)$$

典型的蠕变曲线如图(2.4)所示。应变片的蠕变现象主要是由于粘贴层所引起的。如粘贴剂性能不佳，粘贴层过厚或固化不够充分以及粘结层受潮等。

6、用于天平上的应变片的技术指标

为了保证天平的测量精度，用于天平上的常温应变片应满足下列要求：

- (1) 电阻值 R ：见表(2.2)。
- (2) 每个电桥中应变片的阻值偏差 δR ：不大于 0.2Ω ；
- (3) 灵敏度系数偏差 δK ：不大于 $\pm 1\%$ ；
- (4) 电阻温度系数 α_t ：不大于 $1 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ ；
- (5) 蠕变系数 n ：不大于 0.1% ；
- (6) 机械滞后 δ ：不大于 $6\mu\varepsilon$ （当 $\varepsilon = 2000\mu\varepsilon$ 时）；
- (7) 零点飘移 δ^0 ：不大于 $10\mu\varepsilon/1$ 小时；
- (8) 绝缘电阻（与所粘贴天平之间）：不小于 $3 \times 10^4 \text{M}\Omega$ ；
- (9) 允许最大电流 I_{max} ：不超过规定值。

§ 2.4 应变天平的测量电路

应变天平的测量电路是由粘贴在天平元件上的应变片所组成。它的主要功用是将应变片电阻值的改变转换成与其成比例的电压信号。将电阻增量转换成电压变化的基本电路是桥式电路，它是应变天平广泛使用的电路，能测出小至 0.001Ω 的电阻变化。

一、电桥的平衡条件

简单的惠斯顿电桥如图(2.5)所示。其中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为电桥的桥臂电阻， U 为电桥的供桥电压， ΔU 为输出电压。当电桥的输出电压 $\Delta U = 0$ 时，电桥处于平衡状态。电桥的平衡条件是：

$$R_1 \cdot R_2 = R_3 \cdot R_4 \quad (2.7)$$

即当电桥两个相对桥臂电阻的乘积相等时，电桥处于平衡状态。

二、电桥的输出电压 ΔU

应变天平对空气动力载荷的测量是通过测量电桥电路的输出电压来实现的。当连接在电桥电路中的应变片在载荷作用下时，它们的电阻值将发生变化，电桥便失去原有的平衡状态而产生电压输出。根据应变片在桥路中所占桥臂的数量可分为单臂电桥、双臂电桥和四臂电桥（或称全桥）。其相应的电压输出见表(2-3)，并可用下式表示：

$$\Delta U = \frac{N}{4} \cdot U \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (2.8)$$

式中 N 为测量桥臂数。由此可得

$$\Delta U = \frac{1}{4} \cdot U \cdot N \cdot K \cdot \varepsilon \quad (2.9)$$

在应变天平上大多采用全桥测量线路。这是因为全桥测量即可增加输出，又可有效地消除各分量之间的相互干扰，并实现温度补偿。

三、补偿电桥

在应变天平中，除应用上述简单的惠斯顿电桥线路外，有时为了实现载荷和温度影响的

补偿作用，需采用不同类型的补偿电桥。例如对于图(2.6)所示的情况，为了将力矩测量参考点从力矩元件中心 O_1 处补偿到 O 点，必须补偿法向力所引起的附加力矩 $\Delta M_z = Y \cdot \Delta l$ 的干扰。为此，可将粘贴在法向力元件上的应变片组成补偿电桥，并与力矩测量电桥相连接，以达到补偿的目的。

图中电桥(d)是由电桥(b)和(c)串联组成的补偿测量电桥。其中 R_f 为分流电阻，调整 R_f 值可改变补偿作用的大小，从而实现对指定点的补偿。为了不减小电桥输出，应选取电源电压为 $U_{M_z} = U_{M_{z1}} + U_{y_k}$ 。

电桥(e)是由电桥(b)和(c)并联组成的补偿测量电桥，它具有与电桥(d)同样的补偿作用。其中 R_j 为降压电阻，调整 R_j 值可改变补偿作用的大小，从而实现对某一指定点的补偿。

R_f 和 R_j 的数值通常通过实验获得。当测量电桥有热输出时，为了进行温度补偿，可在测量电桥的一个桥臂中接入对温度敏感的电阻丝。电阻丝的电阻值 R_t 通常可通过实验获得，也可用计算求得。例如，当温度变化 $t^\circ\text{C}$ 时，电桥输出为 Δu_t ，相当于电桥各臂的电阻增量为

$$\Delta R = \frac{\Delta u_t \cdot R}{U}$$

为了达到 Δu_t 的补偿，补偿电阻 R_t 在相同温度条件下的电阻增量应为

$$\Delta R_t = 4\Delta R = 4 \frac{\Delta u_t \cdot R}{U} = R_t \alpha_t \cdot t$$

由此可求得

$$R_t = 4 \frac{\Delta U_t \cdot R}{U \alpha_t \cdot t} \quad (2.10)$$

式中 α_t 是补偿电阻丝的电阻温度系数($1/^\circ\text{C}$)。

§2.5 检测仪表

检测仪表是应变天平测量系统中的一个重要组成部分。它用来测量和记录电桥线路的信号输出。

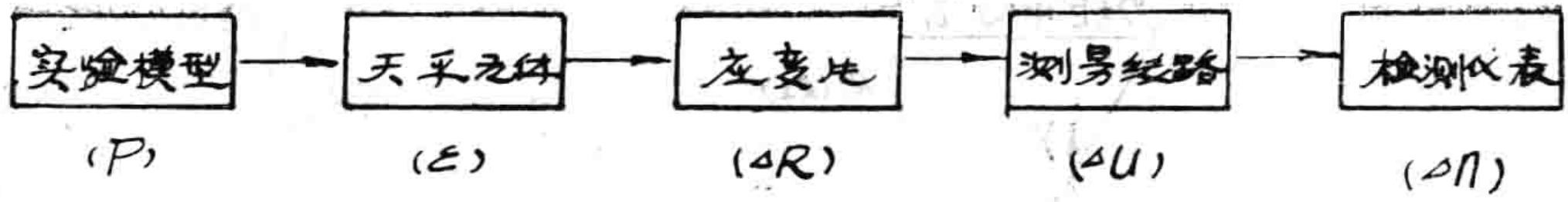
风洞测力实验对应变天平测量系统中的检测仪表有如下要求：

一、测量范围：0-20mv，通常分为0.1-1、0-10、0-20mv三档。

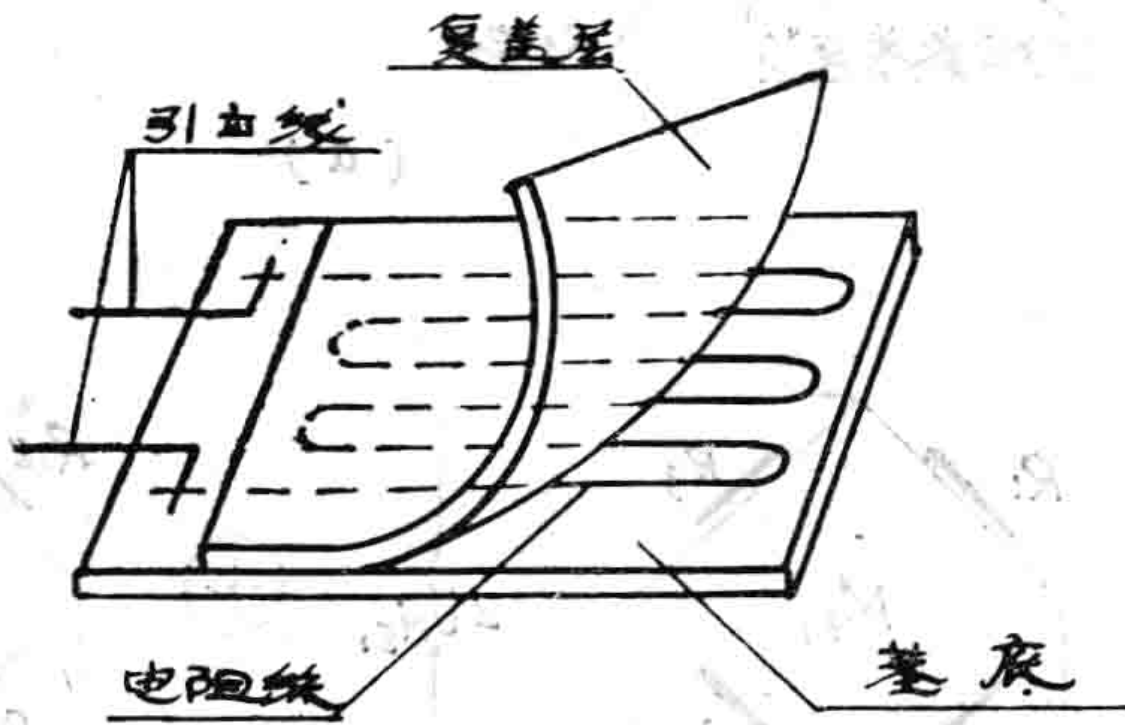
二、精度和分辨力：检测仪表的精度应不低于0.3%。分辨力不大于 $1\mu\text{v}$ 。对于在实验室里检查天平的机械滞后和温度效应等所用的检测仪表，应能测出 $0.1\mu\epsilon$ 的应变，即要求检测仪表具有更高的测量精度和更高的分辨力。

三、检测速度：在风洞实验中，要求尽快地采集和记录各被测参数，并转换成数字量，以便于直接输入到电子计算机上，尽快地获得实验结果。

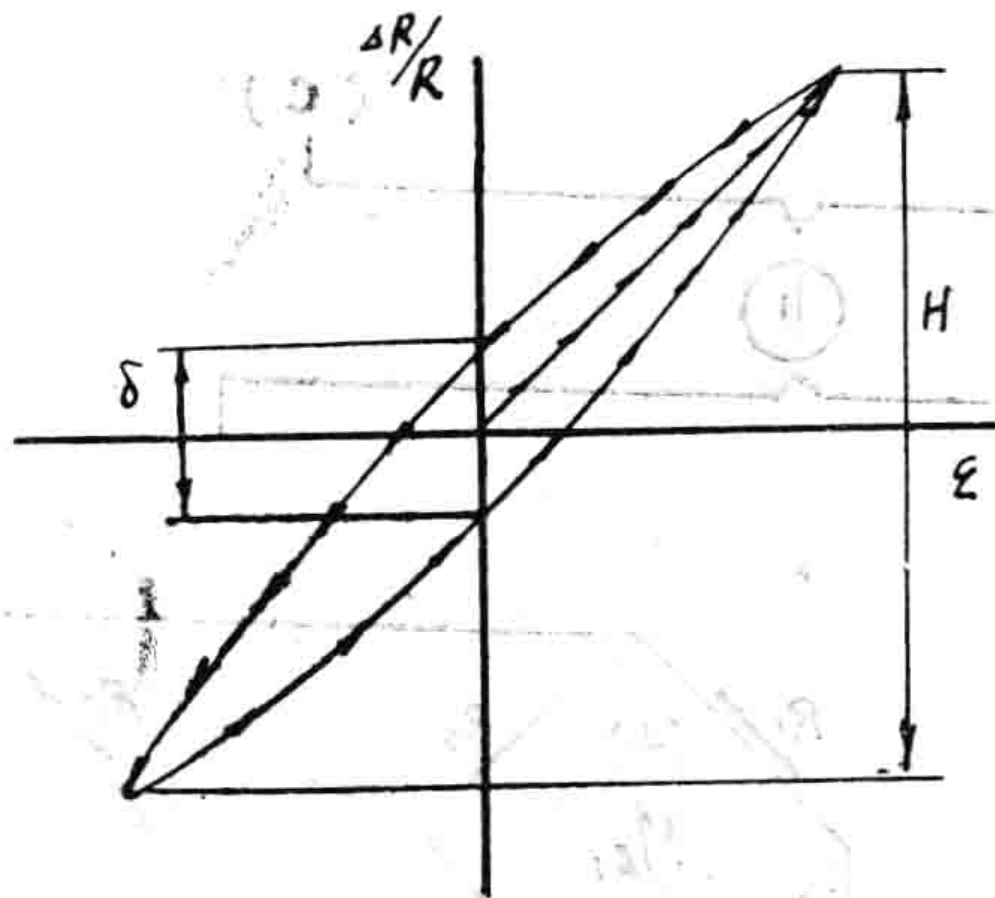
为了迅速采集各被测参数，用于跨、超音速风洞中的检测仪表的采集速度应不低于100次/秒。



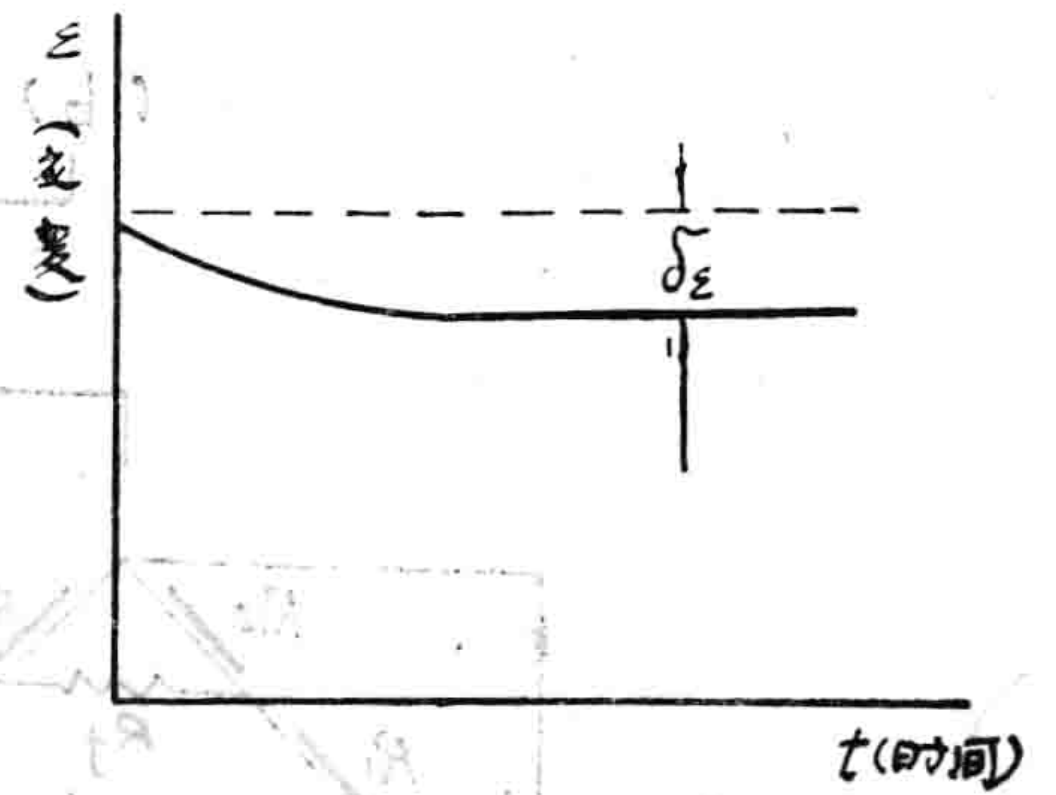
图(2.1) 应变天平测量系统组成部份



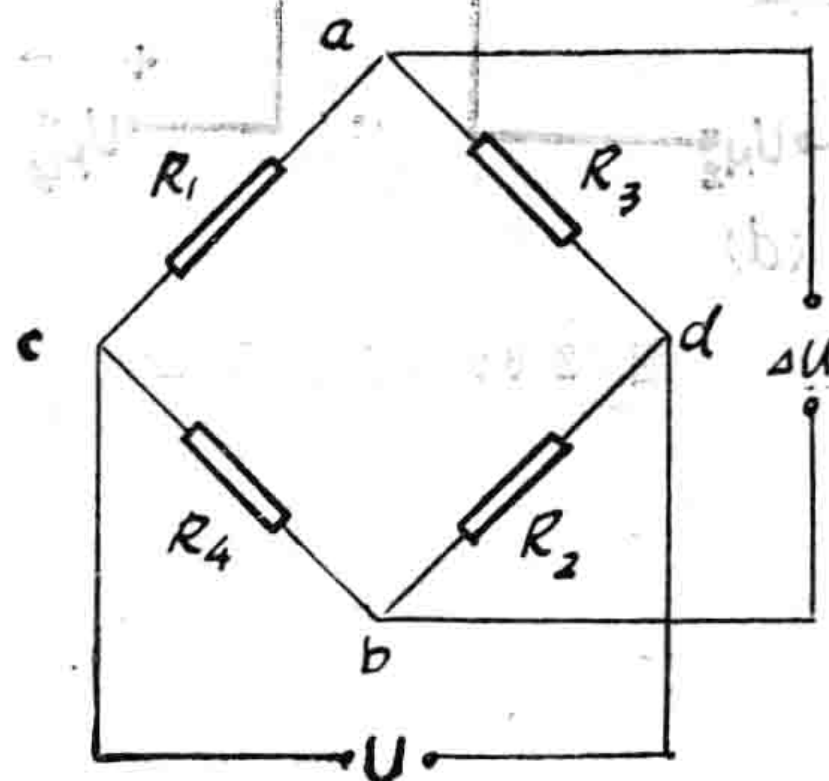
图(2.2) 应变片的结构简图



图(2.3) 应变片机械滞后曲线



图(2.4) 应变片蠕变曲线



图(2.5) 惠斯顿电桥线路