

# 用于水下测量的二分力天平

李战华 鄂学全

(中国科学院力学研究所)

## 摘 要

本文介绍一种用于水下测量的二分力天平。天平采用内式悬臂梁双变形结构,把力和力矩的测量分开,避免了力作用点变化对测量结果的影响;天平设计和严格的加工精度保证了二分力之间干扰系数接近零;天平防水层采用了特制涂料。使用该天平在水洞中进行了单柱水动力系数测量实验,并将实验结果与已有的数据作了比较。

**关键词:** 二分力天平, 水动力。

## 一、引 言

目前风洞中使用的气动力天平的性能和规格已日趋完善,而用于水洞的水动力天平却很少有报道。随着海洋工程及水动力学研究的发展,水下结构物的载荷测量对工程设计和绕结构物流动的理论分析越来越显得重要,因此研制水下使用的分量天平,完善水动力系数的测量对应用和理论研究都是十分必要的。

在船池和波浪水槽中进行水中柱体载荷的测量,一般采用水上悬臂梁式测力天平。这种天平通过力矩的测量来测力,标定和测量中力的作用点位置的变化对测量结果有很大影响。研制水下分量天平,要解决力和力矩分开测量、防水以及分量之间干扰等技术问题。

本文介绍一种用于水洞测力的二分力天平。天平采用内式悬臂梁双变形结构和电阻丝应变片。1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>天平的阻力量程分别为0~1公斤和0~4公斤,升力量程为0~0.1公斤和0~1公斤,二分力之间干扰系数接近零。在水洞中对圆柱体阻力和升力的测量实验表明:天平防水性能好、分量之间无干扰、使用方便,达到了设计要求,较好地解决了水洞实验中的圆柱二分力测量问题。

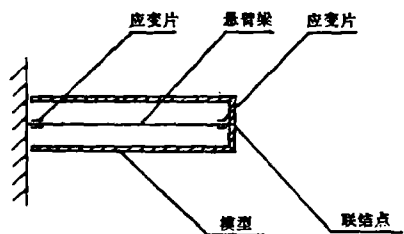


图1 内式悬臂梁双变形测力天平原理

## 二、天平结构

### 1. 原理

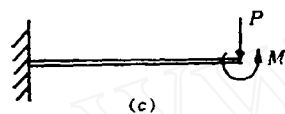
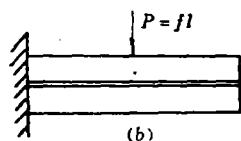
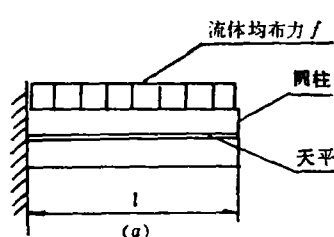
在水池或水槽中测量柱体所受流体动力载荷一般采用悬臂梁测力天平。圆柱体模型的一端为自由端,另一端与悬臂梁连接,应变片贴在悬臂梁根部。这样应变片的微应变与柱体载荷的大小和作用位置有关,标定

本文于1988年11月26日收到。

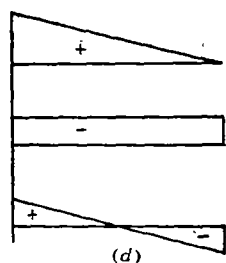
比较麻烦，而且影响力的测量精度。

内式悬臂梁双变形测力天平(图1)采用圆柱形套筒模型，模型套在悬臂梁外面，模型底部固定在悬臂梁外端。应变片贴在悬臂梁根部和外端附近。这种结构使得天平产生的微应变只与模型上作用力大小有关，而与力的作用点无关。这里分析一下受力原理。

假设模型在流场中受到均布载荷  $f$  (图2)，如果模型长为  $l$ ，则相当一个量值为  $fl$  的集中力  $P$  作用在圆柱中心(图2b)；此时悬臂梁上的合力矩使应变片  $R_1$  和  $R_4$  (图2e)产生正应变， $R_2$



附加力矩  $M = -P \frac{l}{2}$



集中力  $P$  产生的力矩  $M_P = Pl$

附加力矩  $M = P - \frac{l}{2}$

合力矩图

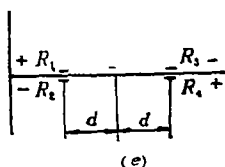
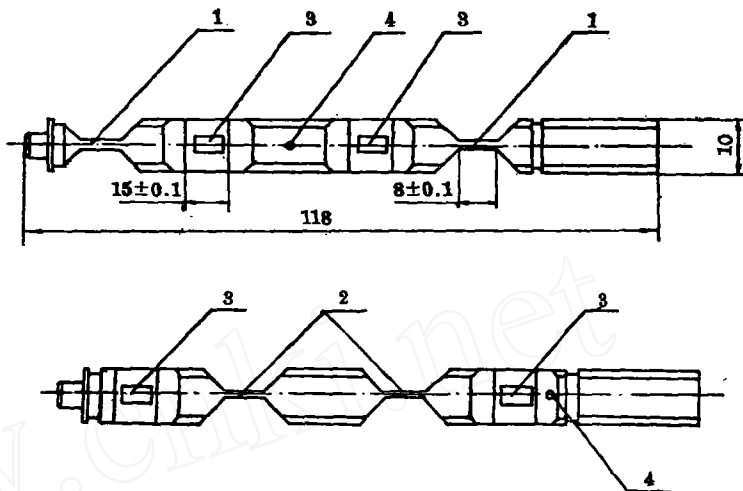


图2 天平受力分析

与  $P$  的作用点位置无关，解决了把力和力矩分开测量的问题。更一般情况的证明请参阅附录1。

## 2. 结构

天平杆上有四个弹性元件(图3)，外侧的二片为A组，内侧的二片为B组。A、B两组元件



1. A组弹性片 2. B组弹性片 3. 应变片 4. 导线引出孔  
图3 天平结构图

和  $R_3$  产生负应变。应变可用下式表示：

$$\varepsilon_i = \frac{M_i}{EW} \quad (1)$$

式中， $M_i$  是产生应变  $\varepsilon_i$  的力矩； $E$  是材料弹性模量； $W$  是抗弯截面模量。设第  $i$  个应变片距离集中力  $P$  作用点的距离为  $l_i$ ，则

$$M_i = Pl_i \quad (2)$$

由图2可知  $l_i = d$ ，故

$$M_1 = M_4 = Pd, \quad M_2 = M_3 = -Pd \quad (3)$$

天平上的应变片联成全桥，其输出电压由下式确定：

$$\Delta E = \frac{UK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \quad (4)$$

由(1)、(2)、(3)和(4)式得到集中力  $P$  作用下天平输出电压  $\Delta E$ ：

$$\Delta E = \frac{UKPd}{EW} \quad (5)$$

可见电桥输出电压  $\Delta E$  只与桥压  $U$ 、应变片灵敏系数  $K$ 、弹性模量  $E$ 、抗弯截面模量  $W$ 、被测力  $P$  和应变片粘贴位置  $d$  有关，而

互相垂直, 分别感受两个方向的载荷, 即阻力和升力。每个弹性元件的两个侧面上都贴有应变片。

为保证天平二分量之间的干扰尽量小, 两个方向的弹性片的不垂直度必须小于 0.04 毫米, 同一方向的弹性片的不平行度必须小于 0.04 毫米。采用线切割加工, 以保证弹性元件不变形。本套天平材料为铍青铜, 加工后要进行热处理, 以消除预应力, 保证其具有良好的弹性。粘贴应变片时, 应注意位置, 尽可能将其粘贴在天平杆中轴线上, 以确保天平精度。

应变片的连接导线要安排紧凑, 引出线由天平杆内孔引出, 便于防水。

### 3. 防水层

天平的防水层是将一种特制的硅胶涂在天平的表面上而形成的一层具有挠性的薄层。涂料配制中, 催化剂和固化剂的比例要根据具体情况掌握, 使得天平表面涂层光滑、均匀。一般涂两层涂料效果更佳。防水层涂好后要在室温下自然干燥 24 小时。

## 三、天平标定

### 1. 防水性能实验

实验中使用高精度直流稳压电源供给天平应变片电桥 6 伏桥压; 用高精度数字电压表测量电桥输出电压值; 两个分量输出的切换用 8385 型无热电势转换开关控制。

实验时, 先记录入水前天平输出电压值。把天平放入水中待输出电压稳定后再记录电压值, 然后每隔 1 小时作一次记录。连续 7 小时的水中实验结果表明, 1# 和 2# 天平的阻力每小时零点相对漂移量分别为 0 和 0.125%, 升力的分别为 0.04% 和 0.095%, 防水性能是令人满意的。

### 2. 天平静态标定

实验使用的仪表同上, 并使用 0.5 级精度的标准砝码标定。

对二分量天平作标定时, 特别要注意消除因安装不当带来的分量间干扰, 因此首先要正确地安装天平, 把天平固定在标定台分度头上。在天平某一分量上加载, 慢慢转动分度头寻找使另一分量输出电压为零的位置, 然后固定分度头。在此位置上开始对天平这一分量做连续加载和卸载标定。

天平的主系数及精度的确定: 对同一载荷下的三次重复加、卸载时的输出电压取平均值, 求出每步载荷增量对应的电压输出增量  $\Delta E_i$ 。如果天平满量程标定分为  $n$  步加载, 则对  $n$  个  $\Delta E_i$  取平均, 求出每步载荷  $\Delta P$  下输出电压的平均增量:

$$\overline{\Delta E} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta E_i}{n} \quad (6)$$

由  $\overline{\Delta E}$  求出单位载荷对应的输出电压值, 即天平的主系数  $K$ :

$$K = \frac{\overline{\Delta E}}{\Delta P} \quad (7)$$

天平的相对线性精度为

$$\varepsilon = \frac{|\Delta E_i - \overline{\Delta E}|_{\max}}{\overline{\Delta E}} \times 100\% \quad (8)$$

表 1 给出静态标定结果。

表 1 天平静态标定

天平序号	加载 (公斤)	输出电压值 (微伏)				平均值	每步载荷 输出电压 增量 $\Delta E$ ,	电压增量 平均值 $\overline{\Delta E}$	$ \Delta E, -\overline{\Delta E} $	主系数 $K$ (毫伏/公斤)	精度 $\epsilon$
		加载	卸载	加载	卸载						
1* 升力 (白)	0		5876		5887	5881.5	0				
	0.02	7331	7374	7351	7391	7361.8	1480.3	10.1			
	0.04	8823	8875	8843	8890	8857.8	1496.0	5.6	74.5	0.68%	
	0.06	10320	10368	10338	10384	10352.5	1494.7	4.3			
	0.08	11821	11854	11837	11870	11845.5	1493.0	2.6			
	0.10	13323		13344		13333.5	1488.0	2.4			
1* 阻力 (兰)	0		-2227		-2223	-2225	0				
	0.2	-619	-607	-618	-606	-612.5	1612.5	0.3			
	0.4	995	1008	997	1010	1002.5	1615	2.2	8.064	0.25%	
	0.6	2612	2621	2614	2622	2617.3	1614.8	2.0			
	0.8	4225		4227		4226	1608.7	4.1			
2* 升力 (红)	0		-5588		-5588	-5588	0				
	0.1	-3760	-3750	-3759	-3749	-3754.5	1833.5	2.3			
	0.2	-1924	-1913	-1922	-1912	-1917.8	1836.7	0.9	18.358	0.13%	
	0.3	-85	-76	-84	-76	-80.3	1837.8	2.0			
	0.4	1755		1755		1755	1835.3	0.5			
2* 阻力 (黄)	0		770		771	770.5	0				
	1	2764	2770	2764	2772	2767.5	1997	0.9			
	2	4761	4769	4763	4771	4766	1998.5	0.6	1.998	0.045%	
	3	6762	6766	6762	6768	6764.5	1998.5	0.6			
	4	8761		8763		8762	1997.5	0.4			

表 2 测力系统标定

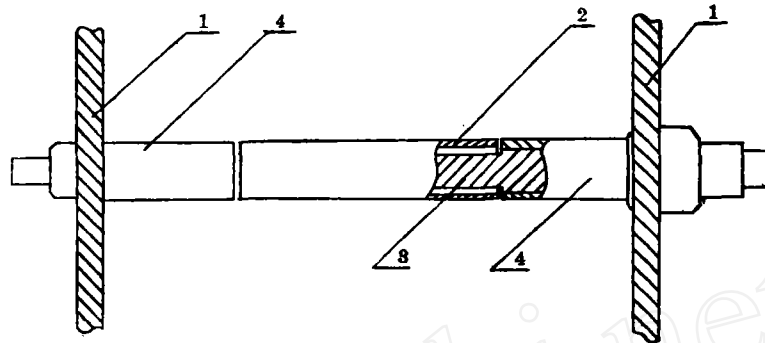
天平序号	加载 (公斤)	输出电压值 (毫伏)				平均值	每步载荷 输出电压 增量 $\Delta E$	电压增量 平均值 $\Delta E$	$ \Delta E, -\Delta E $	主系统 K (毫伏/公斤)	精度 $\epsilon$	另一分量输出电压值 (毫伏)				干扰 系数	
		加载	卸载	加载	卸载							加	卸	加	卸		
1* 升力 (白)	0	0	0	0	0	2.17						0	0	0	0	0	0
	0.02	73	78	72	77	74.83	72.66	0.03				0	0	0	0	0	0
	0.04	145	151	145	150	147.5	72.67	0.04	3631.5	0.51%		0	0	0	0	0	0
	0.06	218	223	218	223	220.5	73.0	0.37				0	0	0	0	0	0
	0.08	292	295	291	294	292.83	72.33	0.30				0	0	0	0	0	0
	0.1	365		365		365.33	72.5	0.13				0	0	0	0	0	0
1* 阻力 (兰)	0	0	0	0	0	0						-0	0	0	0	0	0
	0.2	114	116	115	116	115.33	115.33	0.58	573.75	0.5%		-0	0	0	0	±0	±0
	0.4	229	231	229	231	230.0	114.67	0.08				-0	±0	±0	0	+0	±0
	0.6	344	345	344	345	344.5	114.5	0.25				-0	±0	-0	0	0	0
	0.8	459		459		459.0	114.5	0.25				0	±0	±0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0							0	0	0	0	0
2* 升力 (红)	0	0	0	0	0	0						0	0	0	0	0	0
	0.1	133	135	134	135	134.33	134.33	0.33				0	0	0	0	0	0
	0.2	268	269	268	269	268.5	134.17	0.17	1340.0	0.37%		0	0	0	0	0	0
	0.3	402	403	402	403	402.5	134.0	0.0				0	0	0	0	0	0
	0.4	536	537	536	536	536	133.5	0.5				0	0	0	0	0	0
	0.5	670															
2* 阻力 (黄)	0	0	0	0	0	0						0	0	0	0	0	0
	1	143	144	143	144	143.5	143.5	0.75				0	0	0	0	0	0
	2	285	287	286	287	286.3	142.8	0.05	142.75	0.5%		0	0	0	0	0	0
	3	428	429	428	429	428.5	142.2	0.55				0	0	0	0	0	0
	4	571		571		571	142.5	0.25				1	1	1	1	1	1
	0	0	0	0	0	0							0	0	0	0	0

天平二分量之间的干扰系数与天平安装位置有关，在系统标定中给出。

### 3. 测力系统标定

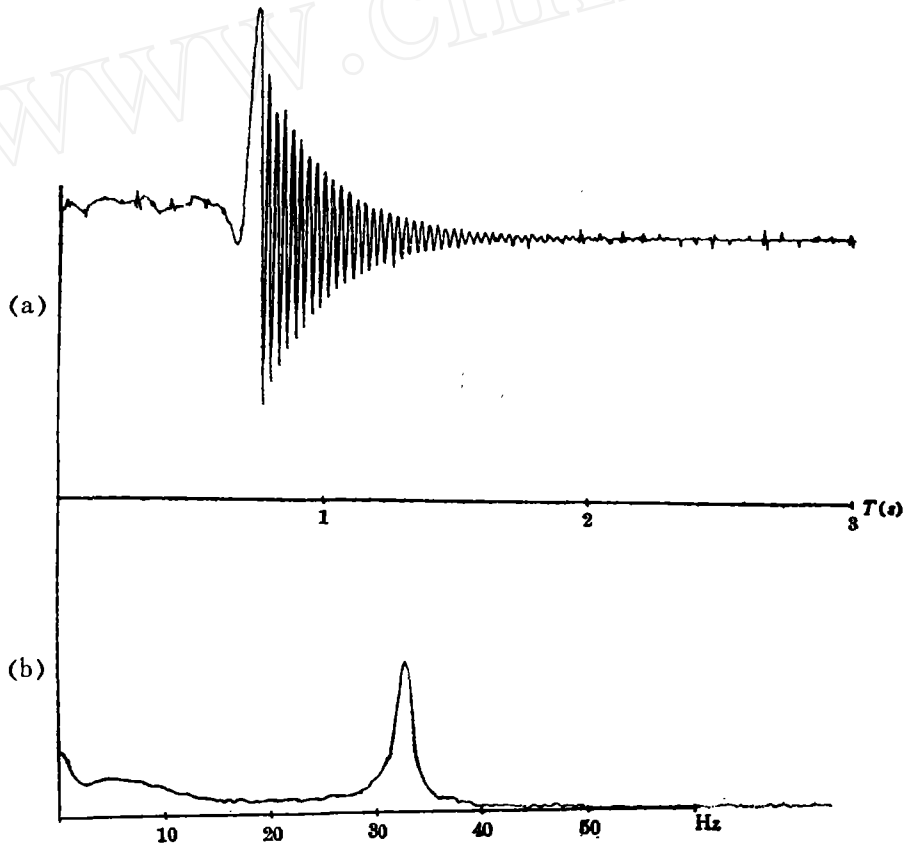
把天平按图 4 方式安装在水洞实验段窗口板上。天平输出信号接到 Y6D-3A 动态应变仪；使用 PZ-8 数字电压表显示应变仪输出；电桥电压为 3 伏。

与静态标定相同，首先要正确安装天平，把窗口板固定在标定台上。在天平的一个分量上加载，调整天平杆位置使另一分量输出电压为零，然后固定天平杆。采用静态标定同样的方法加载和卸载并计算天平主系数和精度。



1. 实验段窗口板 2. 模型 3. 天平 4. 固定圆柱

图 4 天平安装图



(a) 记录曲线; (b) 频谱分析

图 5 天平自振频率标定曲线

标定结果由表 2 给出。测量的线性相对精度接近 0.5%，二分量之间的干扰很小，可以忽略不计。

#### 4. 自振频率标定

按系统标定时的方法安装天平。天平电桥输出仍接 Y6D-3A 动态应变仪，应变仪输出电压用 PS-85 微机采集，其采样频率为 300Hz。

实验时先给天平加一固定载荷，突然卸载瞬间开始记录天平输出的振荡衰减曲线和数据。微机对数据作频谱分析，得出天平自振频率。图 5 给出 2\* 天平不带模型时的自振频率标定曲线，表 3 给出了天平自振频率数据。

表 3 天平自振频率标定数据 (单位: Hz)

天平序号	元件类别	不带模型(在空气中)	带模型(在空气中)	水中带模型
1* 天平	升力	32.5	24.76	19.0
	阻力	32.8	25.2	
2* 天平	升力	74.4	58.3	
	阻力	74.1	58.3	

### 四、测量结果

使用 1\* 和 2\* 天平分别在实验段截面为  $200 \times 100$  毫米<sup>2</sup>、最大流速 1 米/秒 的重力式水洞和截面为  $200 \times 200$  毫米<sup>2</sup>、最大流速 13 米/秒的循环水洞中进行了单圆柱水动力系数测量。水洞实验段流速均经过激光测速仪标定，满足实验要求。实验时流速由 MZL-A 型转子流速仪和收缩段静压测量仪给出。实验雷诺数范围为  $4 \times 10^3 \sim 1.8 \times 10^5$ 。

模型用外径为 2.0 厘米的有机玻璃管制成，安装方式见图 4。天平输出信号经 Y6D-3A 动态应变仪放大，再由 PS-85 微机采集，采样频率 100Hz。每种流速下采样二次，每次采 1040 个数据。数据先存入磁盘，待实验结束再处理。

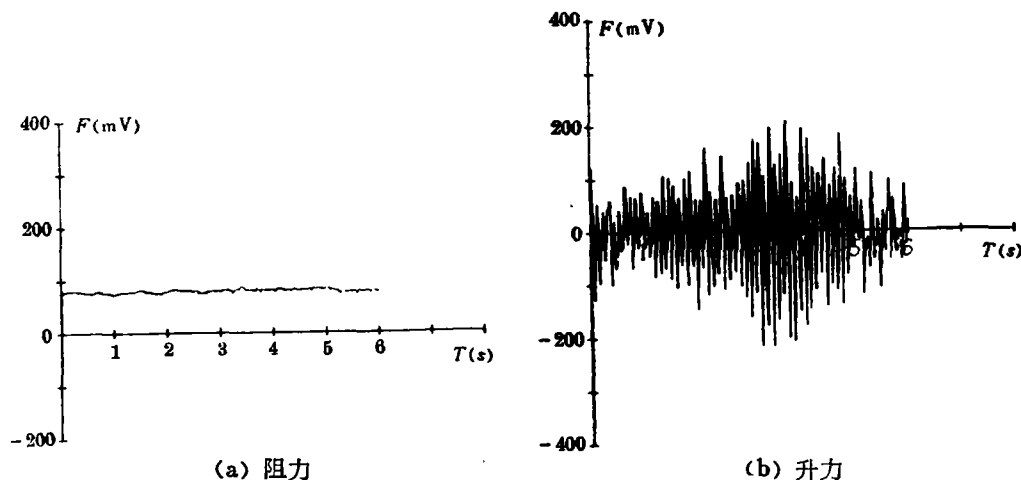


图 6 同步测量的阻力和升力波形

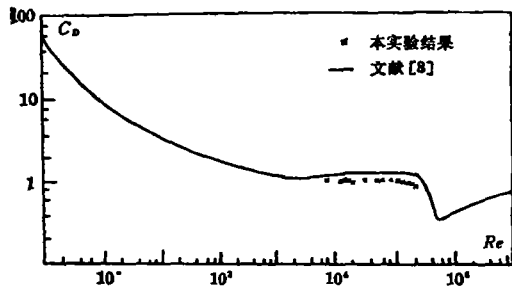


图 7 阻力系数  $C_D$  随  $Re$  数分布

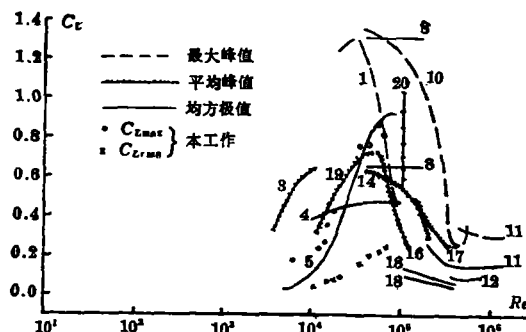


图 8 升力系数随  $Re$  数分布(图中数字是文献[2]中第 3 章参考文献)

图 6 记录了流速 2 米/秒 下同步测出的阻力和升力波形曲线。阻力是平滑的直线，升力有脉动。

图 7 表示了阻力系数  $C_D$  随雷诺数的变化。图中的实曲线是海洋工程中通常使用的曲线<sup>[8]</sup>，本次实验的数据点接近这条曲线。

升力系数的测量受实验条件影响很大，至今没有统一的实验曲线发表。图 8 将本次实验结果与文献 2 给出的实验曲线族作一比较，可以看出实验曲线的趋势是合理的，而且在相应  $Re$  数范围内最大升力系数  $C_{Lmax}$  与已有结果接近， $C_{Lrms}$  值相差较大，不过图中曲线 5 是振荡水流中的实验结果，已有实验表明，振荡流中的升力系数要比均匀流中的升力系数高许多，因此本实验的结果还是较合理的。

实验中还测量了柱体升力的响应频率。在雷诺数为  $4 \times 10^3 \sim 7 \times 10^4$  范围内响应频率的  $S_r$  数均为 0.2。这与众所周知的涡脱落频率的  $S_r$  数一致。详细结果请参阅文献[4]。

## 五、结 论

本文介绍了一种用于水下测量的二分力天平，其精度接近 0.5%，二分力之间干扰可以忽略不计。天平采用内式悬臂梁双变形结构，避免了力作用点变化对测量结果的影响；互为正交的弹性元件之间的不垂直度小于 0.04 毫米，大大减小了二分量之间的干扰；采用特制硅胶涂料作防水层具有良好防水性能和挠性。在水洞中进行了单圆柱阻力、升力和升力响应频率的实测实验，符合已有的实验结果。该类天平使用方便，适于在水洞或水槽里进行柱体水动力二分力的测量。

王书京同志参加了其中的测力实验工作。感谢航天部 701 所王从新、吴永杞和郭金铃等同志及中科院化学所谢择民同志在天平的研制中给予的诚恳的大力协助。

## 附 录

在前述天平结构中，当外加力  $P$  作用在天平任一位置时，天平输出电压同样与力作用点的位

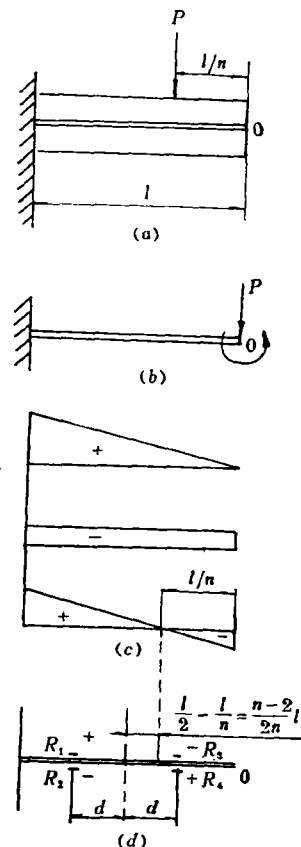


图 9 天平测力原理



置无关, 下面加以证明。

假设  $P$  作用在距天平端点  $O$  为  $\frac{l}{n}$  处(图 9a); 将力  $P$  向  $O$  点简化, 得到力  $P$  和力矩  $M$ (图 9b);  $P$  对天平产生正力矩,  $M$  对天平产生负力矩, 其合力矩在  $P$  作用点处为零(图 9c); 在这种合力矩作用下, 应变片  $R_1$  和  $R_4$  产生正应变,  $R_2$  和  $R_3$  产生负应变(图 9d)。应变由下式确定:

$$\varepsilon_i = \frac{M_i}{EW} \quad (\text{A-1})$$

其中,  $M_i$  是产生应变  $\varepsilon_i$  的力矩,  $E$  是材料弹性模量,  $W$  是抗弯截面模量。设第  $i$  个应变片距  $P$  作用点距离为  $x_i$ , 则

$$M_i = Px_i \quad (\text{A-2})$$

由图 9d 得

$$x_1 = x_2 = d + \frac{n-2}{2n} l, \quad x_3 = x_4 = d - \frac{n-2}{2n} l \quad (\text{A-3})$$

其中  $d$  是应变片距天平中心的距离。由(A-2)和(A-3)得

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= P \left( d + \frac{n-2}{2n} l \right), & M_2 &= -P \left( d + \frac{n-2}{2n} l \right) \\ M_3 &= -P \left( d - \frac{n-2}{2n} l \right), & M_4 &= P \left( d - \frac{n-2}{2n} l \right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A-4})$$

将(A-1)、(A-3)式代入(4)式得

$$\Delta E = \frac{UK}{EW} Pd \quad (\text{A-5})$$

由此证明天平输出电压  $\Delta E$  只与电桥电压  $U$ 、应变片灵敏系数  $K$ 、材料弹性模量  $E$ 、抗弯截面模量  $W$ 、被测力  $P$  以及应变片位置  $d$  有关, 而与力作用点无关。

### 参 考 文 献

- [1] 吉林工业大学农机系和一机部农机科学研究院编,《应变片电测技术》,机械工业出版社,1978年。
- [2] Sarpkaya T. and Isaacson M., Mechanics of Wave Forces on Offshore Structure, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1981.
- [3] Schlichting H., Boundary Layer Theory, Mc-Graw-Hill Book Co. New York 6th ed., 1968.
- [4] E Xuequan, Li Zhanhua and Ling Guacan, The Effect of the Sea-bottom on the Hydrodynamic Forces Acting on Offshore Pipelines, China Ocean Engineering, Vol. 3, No. 4, 1989.

# A Two-component Balance Used in Measuring Hydrodynamic Forces on a Cylinder under Water

*Li Zhanhua E Xuequan*

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080, China)

## Abstract

A two-component balance used in measuring forces on a cylinder under water is presented. The balance is designed in the form of a cantilever beam, one end of which is mounted to the wall of the test section and the other is fixed on the bottom of the model. Two sets of elastic elements mounted orthogonally on the beam are capable of yielding respectively the transverse and the in-line forces without any coupling and moment effects. The balance is perfectly waterproofed. The experimental data obtained by the balance are in agreement with the previous results.

**Key words:** two-component balance, hydrodynamic forces.