

新型二维水平传感器*

余和五

(南京师范大学物理科学与技术学院 南京 210097)

摘要 提出一种新型高精度二维水平传感器,其输出为直流毫伏信号,测量灵敏度为 $0.5\text{mV}/\text{arcsec}$,检测范围为 $\pm 200\text{arcsec}$,精度达 1arcsec ,时间响应为 1s 。该传感器可直接与自动测量系统连接,也可接二次仪表成为水平仪。

关键词 二维水平传感器,弹性簧片,扭转角度

A NEW TYPE OF TWO-DIMENSIONAL HORIZONTAL SENSOR

YU He-Wu

(College of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract A new type of high-precision sensor two-dimensional horizontal sensor is described which gives a DC mV output signal. The measurement sensitivity is $0.5\text{mV}/\text{arcsec}$ over a range of $\pm 200\text{arcsec}$. The accuracy is 1arcsec and the response time 1 second. This sensor can be directly connected to an auto-detect system, or to a secondary meter to form a horizontal meter.

Key words two-dimension horizontal sensor, elastic reed, rotation angle

1 引言

水平传感器是一种重要的测量用传感器件,利用这种传感器制作的水平仪广泛地应用于工程、建筑以及实验室中。目前常用水平仪有液面式、电阻式、电感式、应变式、悬挂式等等。其中最常用的是水泡型的水平仪。水泡型的水平传感器又分为两类:一类是测量一维水平误差的长水泡,其测量精度最高可达 2arcsec ;另一类是测量二维水平面的圆水泡,其测量精度一般为 $30'$ 。圆水泡不能实现高精度二维水平测量,而长水泡精度高,体积大,做二维测量时需要相互垂直的两个,占用体积更大,且无法与智能化的自动测量系统直接连接起来工作。其他几种水平传感器也有类似的种种缺点,不能满足现代测量仪器的需要,尤其是大地测量仪器对体积小的高精度二维水平传感器的要求。本文提出的新型水平传感器,采用十字型簧片作为敏感元件,对于紧固其下的平衡板受到的重力方向变化,具有很高的灵敏度,造成平衡板偏离水平面的倾斜。通过对于平衡板倾斜造成的微小电容变化的精确测量,从而实现二维水平倾角的精确测量。

2 水平传感器的基本原理

要使传感器能进行二维水平度的测量,反映水平度的平衡板必须具有二维自由度。平衡板由弹性

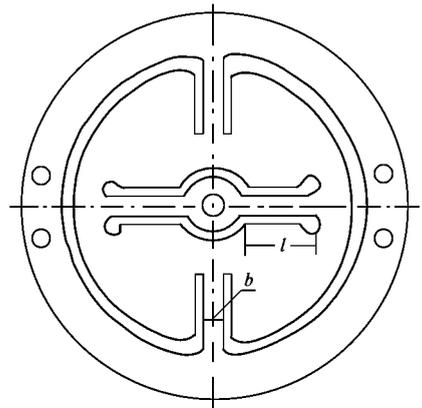


图1 弹性簧片结构



簧片支撑,悬挂在弹性簧片的下方,且与簧片刚性连接。因此,弹性簧片应具有二维自由度。考虑到上述因素,我们将弹性簧片的结构设计成十字型簧片形状(见图1),该十字型簧片具有二维自由度。

弹性簧片中心圆孔与平衡板刚性连接(见图1),簧片通过外圈4个圆孔固定在水平传感器壳体上。当被测平面发生倾斜时,放置在该平面上的水平传感器以同样的角度 γ 发生倾斜。平衡板由于重力

* 江苏省自然科学基金(批准号:BJ95111)资助项目
2001-04-09 收到初稿,2001-04-26 修回

的作用,支持它的弹性簧片筋条发生扭转,使水平平衡板与水平传感器底座之间产生一扭角 α (见图2),该扭转角 α 的方向与被测平面倾斜角 γ 的方向相同,其大小与 γ 成正比例.由于平衡板表面有4个圆形电极,与测量电路组成相互垂直的两组电容-位移传感器.通过高精度的电容测量,可测出 x 轴与 y 轴两相互垂直方向的水平角度的变化.因任意方向上水平角度变化总可以分解为绕 x 轴和 y 轴的角度变化,从而实现二维水平倾角的测量.

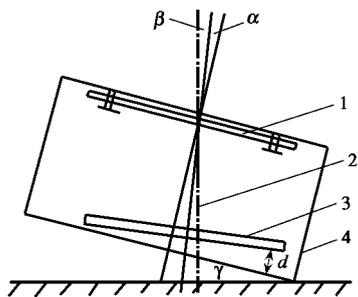


图2 水平传感器原理图

1 弹性簧片;2 垂直线;3 平衡板;4 壳体

3 水平传感器的设计

该传感器的结构分为三部分:扭转部分、阻尼部分和测量部分。

3.1 扭转部分

主要由外壳、十字簧片、平衡板组成.为保证传感器的高精度和长期稳定性,簧片的材料应选微塑性形变抗力 σ_r 高的材料. σ_r 高,表征材料及其制件在长期负载下,保持自身尺寸和形状稳定性的能力强.铍青铜 QBe_2 是一种物理机械性能非常好的材料,在 770°C 淬火水冷, 315°C 时效3小时,其 σ_r 可高达 $30\text{kg}/\text{mm}^{[1]}$,所以我们选用 QBe_2 作为弹性簧片的材料.

由图2可见,支持平衡板的簧片的筋条为矩形等截面应变梁,设应变梁的长度为 l ,宽度为 b ,厚度为 a .根据弹性学理论^[2,3],当一矩形等截面杆在两端受到力矩 M_t 作用时,当杆件两端的变形不受外界的约束时,此杆的扭变是自由扭转,扭转力矩 M_t 与单位扭角的关系为:

$$M_t = G\theta \left\{ \frac{a^3 b}{6} \left[1 + \frac{96}{\pi^4} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^4} - \frac{384}{\pi^5} \cdot \frac{a}{b} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\text{th}(k_n \cdot b/2)}{(2n+5)^5} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中: M_t 为施加于杆件端面上的力矩; G 为材料的

剪切弹性模量; θ 为杆件的单位扭转角(rad/m);

$$k_n = \frac{(2n+1)\pi}{a}.$$

(1)式中大括号内几何量仅与矩形截面尺寸有关,以符号 I_t 表示, I_t 称为扭转惯性矩,则(1)式可改写成:

$$\theta = \frac{M_t}{G \cdot I_t}, \quad (2)$$

其中

$$I_t = \frac{a^3 b}{6} \left[1 + \frac{96}{\pi^4} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^4} - \frac{384}{\pi^5} \cdot \frac{a}{b} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\text{th}(k_n \cdot b/2)}{(2n+5)^5} \right] = Ca^3 b, \quad (3)$$

式中 C 仅与 a 、 b 的比值有关,其大小在2.25—5.3之间.当杆长为 l 时,可得杆的扭转角度:

$$\alpha = \frac{M_t l}{G \cdot Ca^3 b}. \quad (4)$$

在水平传感器中(图2),力矩 M_t 由平衡板产生.如果水平平衡板的中心柱轴线与垂直线的夹角为 β ,中心柱高为 h ,平衡板的质量为 m ,则由平衡板产生的力矩为

$$M_t = \frac{1}{2} mgh \sin \beta, \quad (5)$$

式中 $\frac{1}{2}$ 因子是因为平衡板由弹性簧片的2个筋条支撑.考虑到倾斜角 γ ,扭转角 α 和平衡板中心柱垂直线的夹角 β 三者间的关系为

$$\gamma = \alpha + \beta. \quad (6)$$

将(5)式和(6)式代入(3)式,因为 α 、 β 、 γ 都很小, $\sin \beta \approx \beta$,得

$$\gamma = \left(1 + \frac{2Ca^3 bG}{mghl} \right) \alpha = K\alpha, \quad (7)$$

扭转角 α 与倾斜角 γ 成正比,测出 α 就可求得 γ .

(7)式中 K 的倒数称为传感器的灵敏度,与平衡板的质量 m 和中心柱高 h 有关,还与十字簧片的筋长 l 、宽度 b 和厚度 a 有关.根据正应力和剪应力的强度校核以及挠度的刚度校核:

最大剪应力 τ_{\max} 为

$$\tau_{\max} = \frac{2M_t}{qab^2},$$

式中 q 为与 a 、 b 有关的常数;

最大正应力 σ_{\max} 为

$$\sigma_{\max} = \frac{3mgl}{ba^2};$$

最大挠度 y_{\max} 为

$$y_{\max} = \frac{mgl^3}{2Eba^3}$$

式中 E 为材料的杨氏模量。

我们用上述方法,在满足校核公式的前提下,设计铝制平衡板($m = 14.0g, h = 3.0mm$);十字簧片($l = 10.0mm, b = 3.0mm, a = 0.12mm$),可得 $K = 3.01$ 。

3.2 阻尼部份

当被测平面发生倾斜变化时,为尽快使平衡板能在新的平衡位置平衡下来,我们采用磁阻尼的方法,将平衡板的边缘浸在强磁场中(见图3,采用钕铁硼永磁铁)。

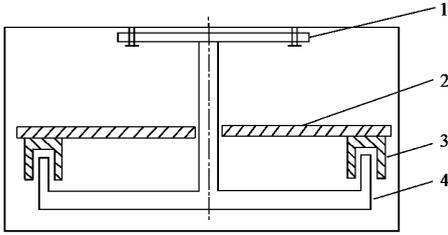


图3 磁阻尼示意图

- 1 弹性簧片;2 电路板;3 钕铁硼永磁铁;4 水平平衡板

当平衡板振动时,切割磁力线,由于磁阻尼的作用,使平衡板能很快静止下来.实验结果时间响应约为 $1s$ 。

3.3 测量部份

由于平衡板边缘对称设有四个圆形电极,与测量电极组成正交的两组电容-位移传感器,对应于 x 轴和 y 轴的倾角测量.每组又分别有两个电容-

位移传感器,组成差分输入,增加了测量灵敏度,抑制了共模噪声.测量电路见图4。

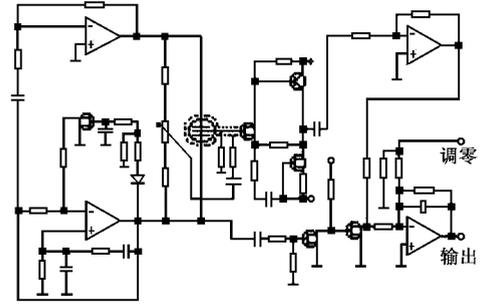


图4 电容-位移传感器测量电路

测量电路共两组,分别对应 x 轴和 y 轴的测量,图4为其中一组测量电路。

上述三个部份全部封装在直径 $90mm$,高 $40mm$ 的传感器内,外接 $\pm 5V$ 直流电源,输出两组直流毫伏信号。

4 水平传感器的性能检验

我们将设计好的水平传感器做成样品,在精密小角度发生器上进行了检测.该精密小角度发生器可二维变化,调节灵敏度为 $0.4arcsec$.用青岛永前电子设备厂生产的一维 SDS11 型电子仪对精密小角度发生器进行标定,该一维电子水平仪的分辨率为 $0.2arcsec$.我们分别改变 x, y 方向的倾角,测量结果见表1。

表1 x, y 方向倾角变化的测量数据

$x \backslash y$	-200.0	-150.0	-100.0	-50.0	0.0	50.0	100.0	150.0	200.0	σ_x
-200.0	-100.3 -100.4	-74.7 -99.8	-50.2 -100.2	-24.8 -100.4	-0.3 -99.7	24.9 -99.8	50.1 -100.0	75.4 -100.2	99.9 -99.7	0.26
-150.0	-100.1 -75.2	-75.2 -75.2	-50.1 -74.9	-24.5 -75.1	-0.2 -75.2	25.3 -74.6	49.8 -75.3	75.0 -74.7	100.2 -75.2	0.26
-100.0	-100.2 -49.7	-75.4 -49.5	-49.9 -49.6	-24.7 -49.8	0.1 -49.6	25.4 -49.5	49.8 -50.5	75.1 -49.6	99.8 -50.4	0.27
-50.0	-100.0 -25.2	-74.8 -25.3	-50.1 -25.2	-25.3 -24.9	0.4 -25.4	24.8 -24.8	49.6 -25.1	75.1 -24.9	100.3 -24.7	0.28
0.0	-99.9 -0.2	-75.5 0.3	-50.2 0.1	-24.7 0.4	0.2 -0.3	24.6 -0.4	49.9 -0.1	74.8 0.0	99.6 0.3	0.32
50.0	-100.2 24.7	-75.2 24.7	-49.8 24.6	-25.0 25.2	-0.2 25.2	24.9 24.9	50.4 24.8	74.9 25.2	100.4 25.1	0.25
100.0	-99.8 50.2	-75.0 50.2	-50.3 49.9	-25.1 49.8	0.3 49.8	24.7 50.3	49.9 49.7	75.2 50.4	99.7 49.8	0.24
150.0	-99.9 74.8	-75.2 74.6	-50.1 75.5	-25.3 74.9	-0.2 74.6	24.6 75.0	49.8 75.2	75.3 74.8	99.9 75.4	0.25
200.0	-100.0 99.6	-74.8 100.3	-50.2 99.8	-25.4 100.3	-0.1 99.8	24.7 99.6	50.2 100.1	75.4 99.7	100.2 100.2	0.27
σ_y	0.30	0.33	0.30	0.27	0.32	0.34	0.26	0.28	0.30	

上表中 x, y 的单位为 arcsec, 数据格中有两组数据, 上面的数据为 x 方向输出, 下面的数据为 y 方向输出, 单位为 mV.

对上述数据分别用最小二乘法作一元线性回归, 可得 x 方向和 y 方向的变化率均为 0.5mV/arcsec (已分别调整过 x 方向和 y 方向的放大器的增益), x 方向的平均均方差为 0.27mV , y 方向的平均均方差为 0.30mV . 折算到角度, 倾角的均方差为 0.6arcsec , 测量范围为 $\pm 200\text{arcsec}$.

5 结论

本传感器用十字簧片作为敏感元件, 由于采用了磁阻尼, 平衡板能很快平衡下来, 时间响应约为 1s . 同时由于采用差分输入, 能有效抑制共模噪声,

使得水平传感器的精度得到提高. 该传感器可以与智能化的自动测量系统连接, 也可以加上显示装置组成二维高精度水平仪.

参 考 文 献

- [1] 范钦珊, 朱祖成译. 材料力学手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1975. 666—669 [Fan Q S, Zhu Z C trans. The Handbook of Material Mechanics. Beijing: Chinese Build Industry Press, 1975. 666—669 (in Chinese)]
- [2] 奚绍中, 郑世瀛. 应用弹性力学. 北京: 中国铁道出版社, 1985. 147—151 [Xi S Z, Zheng S Y. Application Elasticity. Beijing: Chinese Railway Press, 1985. 147—151 (in Chinese)]
- [3] 三十八所院校联合编写组. 工程力学(下). 南宁: 广西人民出版社, 1982. 95—96 [The Writing and Edition Group of Thirty-eight Universities. Engineering Mechanics (secondary). Nanning: Guangxi People Publisher, 1982. 95—96 (in Chinese)]

· 信息服务 ·

美国伦斯勒理工学院招生信息



Rensselaer

Troy, New York, U.S.A.

February 2002

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph.D. in Department of Physics, Applied Physics and Astronomy

Areas of research: Astronomy, Elementary Particles Physics, Origins of Life, THz Imaging, THz Electronics, Nano-Particles Physics.

Teaching, research assistantships and fellowships are available.

Application <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

Information <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

Email: gradphysics@rpi.edu