

# 伺服加速度计用于高精度倾角测量的研究

王有隆\*

陈福深

(中国民航飞行学院 四川广汉 618307) (电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】伺服加速度计是测量加速度的传感器件，利用其传感重力加速度的原理可以方便地测量其传感轴方向上的倾角。该文以石英挠性伺服加速度计的理论分析为基础，通过对加速度计在不同角度下的输出电压特性的实验研究与分析，说明利用这种伺服加速度计进行高精度倾角测量是可行的。再应用超低频滤波、16位A/D转换、CPU信号处理等技术，通过汇编程序软件进行数字滤波，可形成一个完整的高精度倾角测量系统。

关键词 倾角测量；高精度；伺服加速度计；A/D转换；CPU信号处理

中图分类号 U666.12<sup>2</sup>

伺服加速度计是测量加速度的传感器件，主要用于重力加速度以及各种运动设备加速度的测量。利用伺服加速度计还能用于倾斜角度(俯仰角度)的传感测量，可以达到很高的精度，且具有体积小、重量轻、寿命长、可靠性高等优点。伺服加速度计的种类较多，本文主要针对具有力矩线圈的石英挠性加速度计在高精度倾角测量时的一些问题进行分析与研究。在此基础上，接入自行研制的信号处理系统，可形成一套完整的倾角实时测量仪器<sup>[1]</sup>。

## 1 伺服加速度计的工作原理

目前国内工作性能与成熟度较高的石英挠性伺服加速度计原理结构如图1所示<sup>[2]</sup>。当沿敏感轴线(图1中所示点划线)有加速度输入时，由挠性片及力矩线圈组成的敏感质量块相对平衡位置运动而产生惯性力(或惯性力矩)，然后通过换能器将此机械运动转换成电信号，再通过伺服放大器变成电流信号，将此电流信号反馈到处于恒定磁场中的力矩器导致产生反馈力 $F_b$ (或反馈力矩 $M_b$ )，与惯性力 $F$ (或惯性力矩 $M$ )相平衡，直至再次恢复到平衡位置。在平衡状态下 $F_b = F$ ，根据 $F = ma$ ，再由恒定磁场内线圈流过电流产生电磁力的公式 $F = Bil$ ，则在平衡状态下，有

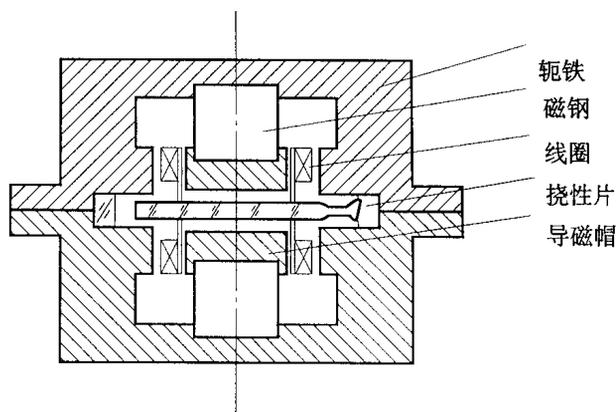


图1 具有力矩线圈的石英挠性伺服加速度计原理图

$$ma = Bil \quad (1)$$

所以

$$i = \frac{ma}{Bl} = Ka \quad (2)$$

式中  $K = m/Bl$ ， $B$ 是恒定磁场的磁感应强度； $l$ 为力矩线圈的总长度； $m$ 为受力部分的总质量。由此可见，反馈电流 $i$ 正比于被测加速度 $a$ 的值。当加速度为重力加速度时，则有

$$i_g = Kg \quad (3)$$

2001年4月9日收稿

\* 男 55岁 大学 副教授

利用伺服加速度计敏感重力加速度的原理，可以构成倾斜角传感器。加速度计置于零位状态即敏感轴线水平时，无重力加速度输入，其输出为零。当沿敏感方向倾斜一个角度时，加速度计便感受一个重力加速度分量，任意角度下的输出电压为<sup>[2]</sup>

$$V_q = V_{\pi/2} \sin q \tag{4}$$

式中  $q$  为倾斜角； $V_q$  和  $V_{\pi/2}$  分别是倾斜角为  $q$  和  $90^\circ$  的输出，可认为  $V_{\pi/2}$  即为敏感重力加速度  $g$  的输出，故可得

$$q = \arcsin(V_q / V_{\pi/2}) \tag{5}$$

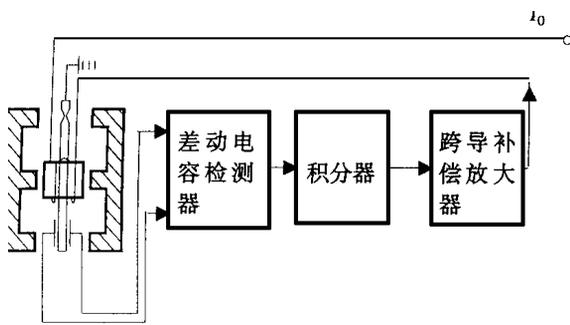


图2 石英挠性加速度计的伺服电路框图

石英挠性加速度计的伺服放大电子线路框图如图2所示。加速度引起的差动电容变化量  $\Delta C$  由差动电容检测器检出，经电流积分器、跨导补偿放大器输出电流，此电流大小与输入加速度成正比，如果负载电阻为  $R$ ，则有

$$\begin{cases} V_q = iR = KaR \\ V_{\pi/2} = i_g R = KgR \end{cases} \tag{6}$$

把式(6)代入式(5)，得

$$q = \arcsin \frac{a}{g} \tag{7}$$

## 2 测量误差分析

利用上述加速度计在大型精密分度头上进行倾斜角度测量的数据如表1所示。表中因器件安装时未使机械零位与电气零位保持一致，故导致角度为  $0^\circ$  时的输出不是最小电压，但这不影响计算相对变化值<sup>[3]</sup>。

表1 伺服加速度计在不同角度下对应的输出电压值

角度值	正角度输出/V	负角度输出/V
0	-0.001 94	-0.001 94
1'	-0.001 01	-0.002 86
3'	+0.000 84	-0.00474
5'	+0.002 72	-0.006 61
1°	+0.054 22	-0.058 17
5°	+0.278 83	-0.282 71
10°	+0.557 45	-0.561 34
20°	+1.099 86	-1.103 72
30°	+1.608 80	-1.612 60
45°	+2.276 00	
50°	+2.465 90	

### 2.1 误差分析

1) 由式(4)可知，因  $V_{\pi/2}$  是常数，所以输出与角度关系是正弦函数关系而非线性关系，只要分析最大角度的误差，就能代表测试状态的最大误差，当小于最大角度时，绝对误差随之减小。由于数字电压表的相对误差为  $5 \times 10^{-5}$ ，当选择最大测试角  $50^\circ$  时，可得到  $50^\circ \times 60 = 3\ 000'$ ，所以误差=

$3\ 000' \times 5 \times 10^{-5} = 0.15'$ 。

2) 分度头的精度为 $\pm 1''$ , 折合成 $0.017'$ 。

3)  $q=50^\circ$  时 增加一个 $\Delta q=1'$ 时,  $\Delta V=600\ \mu\text{V}$ 。当加速度计漂移为 $200\ \mu\text{V/h}$ 时, 则最大漂移误差 $\Delta q=0.3'$ 。所以, 总误差为

$$\Delta q = \sqrt{0.15^2 + 0.017^2 + 0.3^2} = 0.34' \quad (8)$$

## 2.2 分辨率

由式(5)、(7)可知, 加速度计在进行倾角传感测量时, 其输出电压与角度之间呈现正弦函数关系。正弦函数的非线性必然导致加速度计的测量分辨率不是常量, 为此本文仅选小角度和大角度进行计算, 就能得到分辨率的变化范围。分辨率的计算公式为

$$q = \frac{\Delta q}{(V_2 - V_1)/0.0001} \quad (9)$$

式中  $V_2$  和  $V_1$  分别是所选择的相邻两角度  $q_2$  和  $q_1$  对应的输出电压;  $\Delta q$  是相邻两角度的差值, 即  $\Delta q = q_2 - q_1$ 。

采用式(9)计算的原因在于加速度计在分度头角度变化时, 输出电压也随之变化, 此电压是用精密的5位半数字电压表测量的, 最末一位的读数跳动频繁, 属非可靠数字, 因此, 最小的可靠位是倒数第二位, 即电压的最小变化量 $0.0001\ \text{V}$ 所对应的角度增量就是测量分辨率。

依据式(9), 选择 $q_2=5'$ , 并以 $q_1=0$ 作为参考, 则有

$$q = \frac{5 - 0}{(0.00272 + 0.00194)/0.0001} = 0.11' \quad (10)$$

同理在大角度时, 选择 $q_2=50^\circ$ ,  $q_1=45^\circ$ , 利用表1中对应的 $V_2$ 和 $V_1$ , 则有

$$q = \frac{(50 - 45) \times 60}{(2.4659 - 2.276)/0.0001} = 0.16' \quad (11)$$

上述计算结果表明, 当加速度计在 $0 \sim 50^\circ$  测量范围内, 其分辨率在 $0.11 \sim 0.16$ [角]分之间。此分辨率的变化范围很小, 对于传感测量十分有益; 重要的是, 分辨率小于测量误差, 为器件的有效运用打下了基础。此外, 所选择相邻的两个角度其 $\Delta q$  较小, 则可认为在该范围内是线性变化, 这样才能保证式(9)的正确性。

## 3 传感测量系统

伺服加速度计传感测量系统如图3所示, 加速度计输出的模拟电压信号经过16位A/D变换、CPU芯片处理后, 直接显示相关的角度值, 最小可显示 $0.1$ [角]分, 这与器件分辨率基本一致。该系统主要有以下几个特点:

1) 加速度计输出电压与倾斜角是正弦函数关系, 但在实际的器件中, 两者的函数曲线由于工艺制作水平的限制, 只能说是近似的正弦曲线<sup>[4]</sup>, 如果应用式(5)来确定电压对应的角度, 测量精度肯定下降。所以, 本测量系统采取先将加速度计在精密分度头上定标, 在设计的测量范围内, 从零角度开始, 每间隔 $2^\circ$  取值, 然后把这些标准值输入存储器中, 对于任意的电压值, 采用线性插值法计算, 即可得到对应的任意角度值。

2) 采用电子滤波与软件数字滤波, 目的在于防止干扰信号, 保证测量的精度<sup>[5]</sup>。一般使用电子低通滤波器时, 其截止频率应低于 $10\ \text{Hz}$ 。数字滤波要由软件实现, 主要功能是对极短时间的若干取值进行算术平均, 使测量显示角度值不致于跳跃太快, 趋于稳定。系统的测量结果如表2所示。

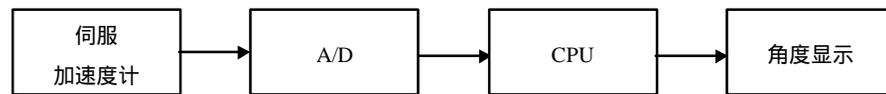


图3 伺服加速度计倾角传感测量系统

表2 计量部门的测试结果(室温状态)

标准值	实测值	偏差值
0°	-0° 0.3'	-0.3'
4°	3° 59.6'	-0.4'
8°	7° 59.3'	-0.7'
12°	11° 59.2'	-0.8'
16°	15° 59.1'	-0.9'
20°	19° 59.2'	-0.8'
24°	23° 59.3'	-0.7'
28°	27° 59.4'	-0.6'
32°	31° 59.6'	-0.4'
36°	35° 59.7'	-0.3'
40°	40° 0.1'	+0.1'
44°	44° 0.5'	+0.5'
48°	48° 0.9'	+0.9'
-2°	-2° 0.0'	0.0'
-6°	-5° 59.8'	+0.2'
-10°	-9° 59.5'	+0.5'

#### 4 结束语

采用石英挠性伺服加速度计作为倾角传感器, 经过 A/D 变换、CPU 处理, 可以当作一台高精度倾角测量仪。由表2可看出, 在 $-50^{\circ} \sim +50^{\circ}$  范围内, 测量误差不超过 $\pm 1$ [角]分, 这对各种高精度的倾角测量是很有实用价值的, 只要扩展定标在 $-50^{\circ} \sim +50^{\circ}$  范围, 同样能够达到这个指标。

测试结果表明, 由于信号处理部分采用了较高位数的A/D变换, 能充分保证总体测量精度。试验分析表明, 信号处理部分造成的误差不超过0.1[角]分。

需要指出的是, 伺服加速度计原则上只适用于静态或准静态的倾角测量。当被测对象处于运动状态时, 只要有等效的曲线运动产生, 就会有离心加速度; 一旦此离心加速度叠加到加速度计的敏感方向, 必然导致传感器输出电压降低<sup>[6]</sup>, 从而引起信号处理后的角度值偏小。为了解决动态测量问题, 需要新的组合结构设计(如双传感器<sup>[6]</sup>)或新的传感器件。

因正弦函数在接近 $90^{\circ}$  时变化率急剧降低, 所以, 在 $90^{\circ}$  附近的倾角测量, 其精度肯定要下降, 这是加速度计工作原理所决定的。

## 参 考 文 献

- 1 Zhu Zhongan. Research and development of Mechatronics. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1997, 26(1):50~53[朱钟淦. 机械电子学的研究与发展. 电子科技大学学报, 1997, 26(1): 50~53]
- 2 侯正君. 微机械线加速度计. 压电与声光, 1996, 18(3): 174~178
- 3 Liu Xiaodong, Zhang Qingfu, Luo Bingwei. The study of new algorithm for interpolation. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1996, 25(8): 219~223[刘晓栋, 张庆孚, 罗炳伟. 一种新的内插算法的研究. 电子科技大学学报, 1996, 25(8): 219~223]
- 4 吕志清. 倾斜传感器及其技术动向. 压电与声光, 1992, 14(4): 24~28
- 5 Finley T D. Model attitude measurements at NASA langley research center. 30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 1992: 6~9
- 6 陈福深. 伺服加速度计在抗振动干扰攻角测量中的应用与设计. 中国惯性技术学报, 2000, 8(2): 50~53

## Research on Inclination Angle Measurements with High Accuracy Using Servo-accelerometer

Wang Youlong

(China Civil Aviation Flying College, Sichuan Guanghan 618307)

Chen Fushen

(National Key Lab of Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** A servo-accelerometer is a kind of sensor for acceleration measurement. By using a servo-accelerometer, the measurements of the inclination angle along its sensing axis can be easily got. This paper presents theoretical analysis for a servo-accelerometer with flexible quartz and experimental study of the device output voltages with different inclination angles, which proves that the inclination angle measurements with high accuracy by means of sensing characteristics of the device are very feasible. The servo-accelerometer with flexible quartz, which is connected to a signal processor including the technology of extro-low frequency filtering, 16-bit A/D transformation and CPU controlled by a software, becomes a high accuracy instrument for inclination angle measurements.

**Key words** inclination angle measurement; high accuracy; servo-accelerometer; A/D conversion; CPU signal processing