

石英挠性加速度计标度因数温度系数补偿技术研究

于丰源 常欢 邢冲 邹晓喻

中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所 北京 100095

摘要: 在石英挠性加速度计的宽温范围应用方面,本研究对温度影响标度因数的机制进行了深入探究。结合ANSYS仿真,分析了磁路的温度特性,并提出一种基于磁钢材料改进和补偿环尺寸优化的补偿方法。实验验证该方法能将加速度计在 $-50^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围的标度因数温度系数控制在 $(-3\times 10^{-5}\sim 3\times 10^{-5})\text{mA}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ 内,满足导弹、卫星等领域对温度稳定性的要求,为石英挠性加速度计在极端温度下的应用提供了技术支持。

关键词: 石英挠性加速度计; 标度因数温度系数补偿; 宽温范围; 有限元仿真

1 引言

石英挠性加速度计广泛应用于导航、定位等重要技术领域。在极端温度条件下,加速度计的性能稳定尤为关键。当前,工作温度范围的需求已经从原本的 -40°C 至 60°C 扩展到 -50°C 至 80°C 。保持加速度计温度稳定性的挑战愈发凸显。

2 工作原理

当加速度计的敏感轴方向有比力输入时,惯性质量摆发生偏转,摆片两边出现容差。伺服电路检测并放大电容变化量,输出电流再反馈到力矩线圈中产生电磁力,使惯性质量摆恢复到平衡位置,根据反馈电流可以解算出输入比力的大小。见图1^[1]。

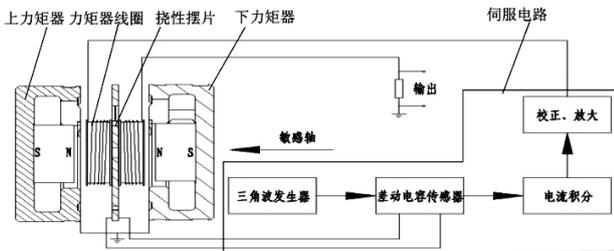


图1 石英挠性加速度计工作原理

3 温度变化对标度因数的影响分析

石英挠性加速度计标度因数:

$$K_1 = \frac{K_B}{K_I} = \frac{ml_p}{NB_g l} \quad (3.1)$$

由(3.1)式可知, K_1 对温度 T 的导数为:

$$\frac{dK_1}{dT} = \frac{1}{K_0} \frac{dK_B}{dT} - \frac{K_{B_0}}{K_0^2} \frac{dK_I}{dT} \quad (3.2)$$

$$\frac{dK_B}{dT} = \frac{dm}{dT} L + \frac{dl_p}{dT} m \quad (3.3)$$

$$\frac{dK_I}{dT} = Nl' \frac{dB_g}{dT} + NlB_g \frac{dl'}{dT} + NB_g l \frac{dl}{dT} \quad (3.4)$$

式中 K_1 为标度因数, K_B 为摆组件的摆性, K_I 为力矩器

的力矩系数。

由式(3.2)、(3.3)和(3.4)可知,温度影响加速度计的标度因数主要通过摆性和力矩器系数的变化。崔黎等^[2]通过骨架形变对比,选用氮化铝陶瓷作为骨架材料;徐立黄等^[3]通过仿真和试验得到 $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内1J32的最佳补偿环高度;葛颂等^[4]通过仿真确认补偿环高度为影响补偿效果的关键因素,并对 $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内1J30的补偿环尺寸进行了优化。本研究通过改进磁钢材料、优化补偿环高度来提高加速度计的温度性能。

4 标度因数温度系数的补偿原理

石英挠性加速度计内部,一部分磁力线穿过线圈工作间隙,经轭铁、磁钢和磁极片形成主磁路。另一部分磁力线出磁钢后沿补偿环返回磁钢,形成补偿回路。磁路中工作气隙磁场随着温度的升高逐渐减小,采用与永磁体并联磁补偿合金组成磁分路的方法,对气隙磁感应强度的变化进行补偿,补偿原理如下:

设永磁体、工作气隙中的磁通、磁感应强度和磁路的截面积分别为 φ_m 、 φ_g ; B_m 、 B_g 和 S_m 、 S_g ;磁补偿合金分路中的磁通、磁感应强度、磁路的截面积磁阻、磁导率和磁补偿合金高度分别为 φ_k 、 B_k 、 S_k 、 R_k 、 ρ_k 和 l_k 。由磁路间的关系有:

$$\varphi_m = \varphi_g + \varphi_k \quad (4.1)$$

$$B_m S_m = B_g S_g + B_k S_k \quad (4.2)$$

$$R_k = \rho_k \frac{l_k}{S_k} \quad (4.3)$$

由温度变化引起的磁感应强度的变化:

$$\frac{\Delta B_m S_m}{\Delta T} = \frac{\Delta B_g S_g}{\Delta T} + \frac{\Delta B_k S_k}{\Delta T} \quad (4.4)$$

由式(4.1)和(4.2)知,只要正确调整垂直于磁通方向的磁补偿合金分路的截面积和高度,在温度变化时使永磁体磁通变化量等于磁补偿合金分路的磁通变化

量, 即

$$\frac{\Delta B_m S_m}{\Delta T} = \frac{\Delta B_k S_k}{\Delta T} \quad (4.5)$$

那么 $\frac{\Delta B_k}{\Delta T} = 0$, 从而保证了工作气隙磁感应强度 B_g 不随温度变化而变化, 实现了标度因数温度系数的补偿。

5 磁补偿合金和永磁材料性能分析与选用

由GB/T32286.1-2015可得表1, 其中补偿能力最强的是1J30。

表1 磁补偿合金的直流磁性能

牌号	在磁场强度8000A/m时不同温度下的磁感应强度B (T)				
	-20℃	20℃	40℃	60℃	80℃
1J30	0.40~0.60	0.20~0.45	—	0.02~0.13	—
1J31	0.60~0.85	0.40~0.65	—	0.15~0.45	—
1J32	0.80~1.10	0.60~0.95	—	0.40~0.75	—
1J33	—	0.40~0.70	—	—	0.10~0.40
1J38	0.25~0.42	0.05~0.24	0.015~0.12	—	—

永磁材料的微观结构各向异性导致其在温度变化下表现出磁滞效应, 影响加速度计的性能。为改善这一问题, 研究者们关注了铝镍钴和钐钴这两种高稳定性永磁材料。尽管铝镍钴具有理想的剩磁特性, 但较低的矫顽力限制了其应用。相比之下, 钐钴永磁材料凭借高矫顽力和环境适应性, 通过重稀土元素补偿机制, 可以有效降低剩磁温度系数, 从而提升加速度计的标度因数温度稳定性。

6 标度因数温度系数补偿仿真分析

标度因数温度系数的补偿方法主要涉及磁补偿材料的选择、磁补偿材料尺寸选择。磁补偿材料选择的依据是加速度计的工作温度范围、加速度计输出随温度变化情况和磁补偿材料的补偿能力。磁补偿材料尺寸主要包括补偿环的横截面积和高度, 其中横截面积对工作气隙

磁通密度的影响较小, 高度是影响工作气隙磁通密度温度稳定性的关键因素。

表2 力矩器材料和主要参数

名称	材料	主要参数	数值
磁钢	Sm ₂ Co ₁₇	20℃剩磁(Gs)	10000
		20℃矫顽力(A/m)	676000
		剩磁温度系数(%/℃)	-0.003
磁极片	DT4C	相对磁导率	12016
轭铁	4J36	相对磁导率	8000
补偿环	1J30	-50℃下的磁感应强度(T)	0.65~0.85
		20℃下的磁感应强度(T)	0.20~0.45
		80℃下的磁感应强度(T)	0.01~0.09

使用ANSYS软件在-50℃~80℃范围内对工作气隙的磁通密度进行仿真, 主要参数见表2。常温时磁通密度云图见图2, 磁通密度最大值出现在磁极片位置和磁钢边缘区域。

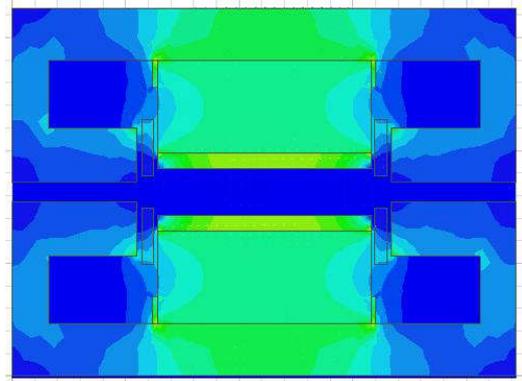


图2 常温时磁通密度云图

设置不同补偿环高度, 分别在-50℃、20℃、80℃条件下进行仿真, 结果见表3。当补偿环高度约1.2mm时, 补偿效果最佳。

表3 不同温度下标度因数温度系数和补偿环高度关系

补偿环高度/mm	温度/℃	标度因数mA/g	-50℃~80℃标度因数温度系数[mA/(g·℃)]
0.8	20	1.168294	—
	-50	1.168445	-1.85 × 10 ⁻⁶
	80	1.170560	3.53 × 10 ⁻⁵
1.0	20	1.181404	—
	-50	1.182068	-8.03 × 10 ⁻⁶
	80	1.183019	2.49 × 10 ⁻⁵
1.2	20	1.159219	—
	-50	1.160185	-1.19 × 10 ⁻⁵
	80	1.159999	1.22 × 10 ⁻⁵
1.4	20	1.158612	—
	-50	1.160398	-2.20 × 10 ⁻⁵
	80	1.158862	3.92 × 10 ⁻⁶

续表:

补偿环高度/mm	温度/℃	标度因数mA/g	-50℃~80℃标度因数温度系数[mA/(g·℃)]
1.6	20	1.175135	—
	-50	1.177737	-3.16×10^{-5}
	80	1.175032	-1.59×10^{-6}

7 标度因数温度系数的试验验证

范围内测量其标度因数温度系数,见表4。

装调5只补偿环高度为1.2mm的加速度计,在-50℃~80℃

表4 加速度计标度因数温度系数

编号	1	2	3	4	5
标度因数温度系数[mA/(g·℃)]	1.49×10^{-5}	1.23×10^{-5}	1.20×10^{-5}	1.29×10^{-5}	1.37×10^{-5}

根据测试结果,1.2mm高度具有较好的补偿效果。

5只加速度计在-50℃~80℃标度因数温度系数最大为 1.49×10^{-5} mA/(g·℃),满足指标要求。

8 结论

本研究针对石英挠性加速度计在宽温范围内的温度稳定性进行了探讨。为实现在-50℃~80℃范围内保持加速度计标度因数稳定,对磁钢材料进行了改进。采用ANSYS对加速度计的磁通密度进行了仿真,并优化了补偿环高度,通过温度性能测试验证了其有效性,结果表明补偿方案能够满足标度因数温度系数($-3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-5}$) mA/(g·℃)的技术指标。提高了加速度计在极端温度条件下的性能。

参考文献

- [1]孙英龙.石英挠性加速度计三维多物理场耦合仿真分析与改进设计[D].国防科学技术大学,2013.
- [2]崔黎,聂鲁燕,李立勇等.石英挠性加速度计温度稳定性改进设计[J].中国惯性技术学报,2022,30(05):658-665+673.DOI:10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2022.05.016.
- [3]徐立黄,温姣,焦舰等.石英挠性加速度计标度因数温度稳定性仿真设计研究[C]//中国惯性技术学会.2023:4. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.040817.
- [4]葛颂,李醒飞,董九志等.石英挠性加速度计中补偿环的优化设计[J].传感技术学报,2016,29(11):6. DOI:10.3969/j.issn.1004-1699.2016.11.009.