

悬丝摆式加速度计磁场仿真研究

邢 冲 邹晓喻 于丰源

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：悬丝摆式加速度计力矩器磁路的稳定性受温度的影响较大，进而标度因数也随之发生变化。为了提高悬丝摆式加速度计的稳定性及测量精度，利用有限元仿真分析磁路中工作气隙处的磁场分布，对比了在-50℃~70℃时有无磁温度补偿合金对工作气隙磁感应强度的影响，验证了磁温度补偿合金的温度补偿作用，对比了在-50℃~70℃时磁温度补偿合金并排放置与叠加放置对工作气隙磁感应强度补偿效果，并进行了实验验证。

关键词：加速度计；标度因数；磁场仿真；温度补偿

0 引言

加速度计作为惯性导航和制导系统的核心元件之一，对系统的精度有关键性的影响^[1]，标度因数是加速度计的重要技术指标。加速度计的力矩器多由永磁体构成，而力矩器的工作气隙磁场受温度变化影响较大，呈现出与温度变化相反的趋势，因此加速度计的标度因数会随温度的变化而发生改变。本文通过有限元仿真分析了温度的变化对力矩器中工作气隙磁场的影响，分析了磁温度补偿合金的温度补偿作用，对比了磁温度补偿合金并排放置与叠加放置对工作气隙磁感应强度补偿效果，并通过实验进行了验证。

1 工作原理

悬丝摆式加速度计主要由惯性摆、力矩器和电涡流传感器和伺服电路模块组成。当悬丝摆式加速度计感受到敏感方向的线加速度时，涡流片因惯性摆绕旋转轴的惯性力矩而出现位移，造成传感器中感应电感改变，伺服电路将其转化为电信号，经过起反馈作用的力矩器平衡回路产生使涡流片保持平衡位置的电磁力，并输出与加速度成比例的电流信号^[2]。

根据摆式加速度计的结构和工作原理，标度因数 K_1 的表达式为

$$K_1 = \frac{m l_1}{N B_o L l_2} \quad (1)$$

式中： m 为惯性摆质量； l_1 为惯性摆质心至枢轴的垂距； N 为线圈匝数； B_o 为力矩器工作气隙磁感应强度； L 为切割磁力线长度； l_2 为安培力作用点到枢轴的垂距。

为了减小温度变化对标度因数的影响，通过在加速度计力矩器磁路中与永磁体并联一个磁温度补偿合金组成磁分路，进行温度补偿，磁温度补偿合金相对磁导率会随环境温度的降低而增加^[3]。磁温度补偿合金在一定温度范围内随温度的升高磁感应强度会快速下降，当温度升高时，

具有可逆温度系数的永磁体，其磁感应强度下降，使得工作气隙磁感应强度也随之下降。由于磁温度补偿合金分路的饱和磁感应强度随温度升高而下降的更快，使得原来经它分流的磁通有一部分通不过去而只好改道通过工作气隙，这又使得工作气隙磁感应强度有所升高，从而对气隙磁场产生补偿作用，使气隙磁通基本保持不变^[4]。

设永磁体中的磁通、磁感应强度和磁路的截面积分别为 Φ_m 、 B_m 和 S_m ；工作气隙中的磁通、磁感应强度和磁路的截面积分别为 Φ_o 、 B_o 和 S_o ；磁温度补偿合金分路中的磁通、磁感应强度和磁路的截面积分别为 Φ_k 、 B_k 和 S_k 。

永磁体的磁通等于工作气隙的磁通与磁温度补偿合金的磁通之和，即

$$\Phi_m = \Phi_o + \Phi_k \quad (3)$$

$$B_m S_m = B_o S_o + B_k S_k \quad (4)$$

由温度变化而引起磁感应强度的变化可表示为下式：

$$\frac{\Delta B_m S_m}{\Delta t} = \frac{\Delta B_o S_o}{\Delta t} + \frac{\Delta B_k S_k}{\Delta t} \quad (5)$$

通过调节磁温度补偿合金垂直于磁通方向的截面积，可以使在温度变化时磁温度补偿合金分路的磁通变化量与永磁体磁通变化量相同，即

$$\frac{\Delta B_m S_m}{\Delta t} = \frac{\Delta B_k S_k}{\Delta t} \quad (6)$$

则 $\frac{\Delta B_o}{\Delta t} = 0$ ，从而使得工作气隙磁感应强度不受温度变化的影响，实现标度因数的温度补偿。

2 磁场仿真分析

对磁路中工作气隙的磁感应强度进行有限元仿真分析。力矩器中各组件的主要参数如表1所示。

2.1 静态温度仿真

建立力矩器三维模型，永磁体通过胶粘剂与底座进行连接，永磁体排布如图1所示，其中N磁钢有倒角，S磁钢无倒角，永磁体磁极相吸布置。

表1 力矩器中各组件的主要参数

名称	材料	主要参数	数值
永磁体	Sm ₂ Co ₁₇	20℃剩磁 (Gs)	10000
		剩磁温度系数/(%/℃)	-0.003
		20℃矫顽力/(A/m)	676000
		矫顽力温度系数/(%/℃)	-0.2
		相对磁导率	12016
底座	DT4C	-50℃相对磁导率	70.63
补偿合金	1J30	20℃相对磁导率	36.80
		70℃相对磁导率	9.95

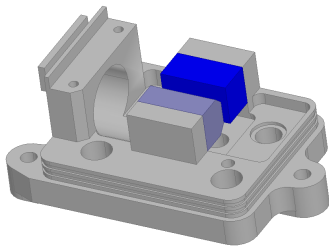


图1 永磁体排布图

环境温度设置为20℃,输入各材料的主要参数,剩余空间材料属性设定为空气,定义永磁体极化方向,划分网格,将空气膜外表面定义为磁平行边界条件,进行求解可得力矩器中整个气隙在加速度敏感轴方向上的磁感应强度分布云图,如图2所示。可知工作气隙磁加速度敏感轴方向上感应强度的变化趋势为先增大后减小。

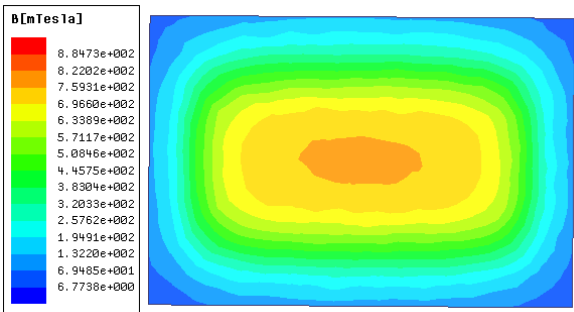


图2 磁路中气隙的磁感应强度分布云图

惯性摆在工作气隙的线圈部分切割磁感线,该线圈部分中心线上的磁感应强度如图3所示,线圈所在位置的平均磁感应强度约为703.28 mT。

2.2 动态温度仿真

在上述线圈部分中心线处作动态温度仿真分析。以-50℃、20℃、70℃三个温度作对比实验,磁温度补偿合金的宽为3mm,厚度为0.8mm,将磁温度补偿合金并联于加速度计的磁路中,放置方法是跨工作气隙搭在N磁钢和S磁钢上。模拟有无磁温度补偿合金情况下线圈所在区域磁感应强度的变化,结果如表2所示。

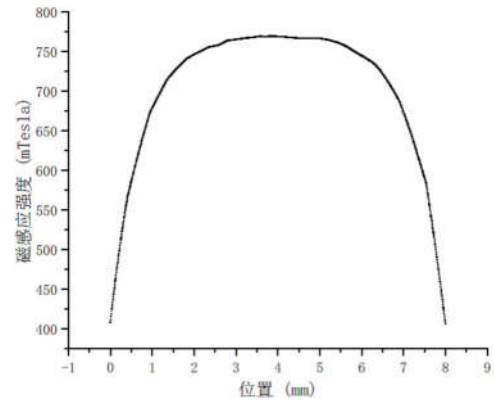


图3 中心线上磁感应强度

表2 有无磁温度补偿合金情况下工作气隙磁感应强度

温度/℃	有无磁温度补偿合金	磁感应强度/mT
-50	有	715.72
	无	732.90
20	有	686.64
	无	703.28
70	有	668.63
	无	680.45

可知从-50℃到70℃,有磁温度补偿合金时工作气隙平均磁感应强度减小了47.09 mT,无磁温度补偿合金时工作气隙平均磁感应强度减小了52.45mT。由于磁温度补偿合金的存在,线圈所在区域平均磁感应强度在温度变化120℃时补偿了约5.36mT。

可通过改变磁温度补偿合金的放置方式来改变补偿效果,将两块磁温度补偿合金以并排和叠加两种放置方式进行补偿,对比两种方式补偿效果。工作气隙在加速度敏感轴方向上的磁感应强度分布云图,如图4所示。

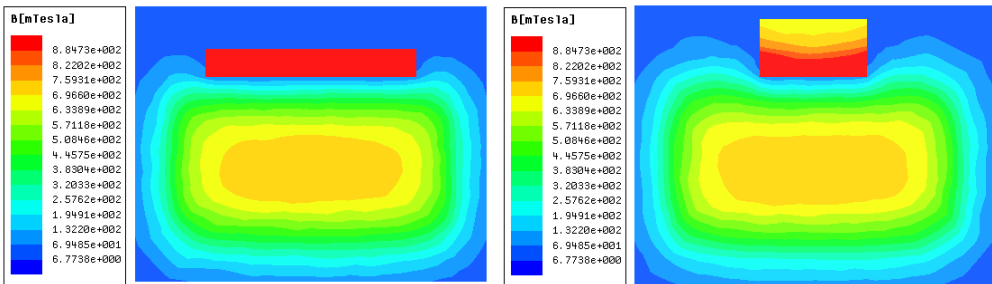


图4 并排和叠加两种放置方式下磁感应强度分布云图

模拟磁温度补偿合金两种放置方式下线圈所在区域磁感应强度的变化,结果如表3所示。

表3 有无磁温度补偿合金情况下工作气隙磁感应强度

温度/℃	磁温度补偿合金放置方式	磁感应强度/mT
-50	并排放置	706.16
	叠加放置	714.22
20	并排放置	677.47
	叠加放置	684.96
70	并排放置	660.55
	叠加放置	666.37

可知从-50℃到70℃,磁温度补偿合金并排放置时工作气隙平均磁感应强度减小了45.61mT,由于磁温度补偿合金并排放置的存在,线圈所在区域平均磁感应强度在温度变化120℃时补偿了约6.84mT。从-50℃到70℃,磁温度补偿合金叠加放置时工作气隙平均磁感应强度减小了47.85mT,由于磁温度补偿合金叠加放置的存在,线圈

所在区域平均磁感应强度在温度变化120℃时补偿了约4.60mT。磁温度补偿合金并排放置时比叠加放置时对工作气隙磁感应强度补偿效果强。

3 实验对比

为了验证磁场仿真的准确性,进行加速度计工作气隙磁场温度稳定性实验。磁感应强度的变化会影响标度因数,标度因数温度系数可以反映标度因数随温度变化的程度,因此可以通过测试加速度计标度因数温度系数来反映工作气隙磁场随温度的变化情况。

采用磁温度补偿合金对编号为1#~5#的加速度计进行温度补偿,补偿前后在不同温度下进行加速度计标度因数 K_1 温度系数测试,温度补偿前后实验结果如表4所示。可知在有磁温度补偿合金的情况下标度因数 K_1 温度系数比无磁温度补偿合金时明显减小,磁温度补偿合金补偿效果明显。

表4 补偿前标度因数 K_1 温度系数实验结果

温度/℃	有无磁温度补偿合金	1# K_1 温度系数	2# K_1 温度系数	3# K_1 温度系数	4# K_1 温度系数	5# K_1 温度系数
-50	有	4.65E-05	4.50E-05	4.42E-05	4.71E-05	4.52E-05
	无	6.15E-05	5.88E-05	5.87E-05	6.11E-05	5.83E-05
70	有	1.52E-05	1.07E-05	8.54E-06	2.81E-05	1.55E-05
	无	4.41E-05	3.71E-05	3.82E-05	5.49E-05	3.90E-05

对编号为6#~10#的加速度计分别采用将两块磁温度补偿合金以并排和叠加两种放置方式进行补偿,两种放置方式下在不同温度时进行加速度计标度因数 K_1 温度系数测

试,两种放置方式下实验结果如表5所示。可知磁温度补偿合金并排放置时标度因数 K_1 温度系数比叠加放置时小,磁温度补偿合金并排放置时比叠加放置时补偿效果强。

表5 磁温度补偿合金两种放置方式下标度因数 K_1 温度系数实验结果

温度/℃	有磁温度补偿合金放置方式	6# K_1 温度系数	7# K_1 温度系数	8# K_1 温度系数	9# K_1 温度系数	10# K_1 温度系数
-50	并排放置	3.83E-05	3.79E-05	3.81E-05	4.11E-05	3.74E-05
	叠加放置	4.37E-05	4.20E-05	4.36E-05	4.45E-05	4.13E-05
70	并排放置	4.34E-06	1.58E-06	4.08E-06	4.74E-06	7.90E-07
	叠加放置	9.24E-06	6.48E-06	8.98E-06	9.64E-06	4.79E-06

4 结论

本文通过加速度计磁场有限元仿真和温度性能实验,验证了磁温度补偿合金的有效作用,并得出以下结论:在敏感轴方向上,加速度计工作气隙磁感应强度的变化趋势为先增大后减小,使用磁温度补偿合金后加速度计工作气隙磁感应强度受温度的影响减小,磁温度补偿合金并排放置时比叠加放置时对工作气隙磁感应强度补偿效果强。

参考文献

[1]尚克军,刘飞,孙刚,等.飞航导弹用小型高精度加速

度计技术综述[J].飞航导弹,2021(06):133-138.

[2]鲁瀚杰,刘亚斌,周强.一种基于惯导系统的线加速度计动态性能测试方法[J].兵器装备工程学报,2019,40(12):165-170.

[3]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):1678-1683.

[4]贺文海,常亮,王方军,等.Mn、Cr元素含量对1J30热磁合金性能的影响[J].金属功能材料,2017,24(02):28-30+42.