

加速度计标度因数温度补偿方法研究

邢冲 常欢 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: 标度因数是加速度计的重要性能参数, 标度因数受温度的影响不容忽视, 本文分析了标度因数受温度变化影响的原因, 分析了标度因数温度补偿原理, 给出了使用磁温度补偿合金补偿的方法, 对磁温度补偿合金的热处理方法进行了探究, 并进行了试验验证。

关键词: 加速度计; 标度因数; 温度补偿; 热处理

引言

加速度计作为惯性导航和制导系统中的重要元件, 对系统的精度、机动性、快速性和灵活性等有关键性的影响^[1], 标度因数是加速度计的重要技术指标。随着现代武器装备的发展, 惯性导航和制导系统对加速度计的要求越来越高, 由温度变化引起的误差是加速度计误差的重要来源。摆式加速度计的力矩器多数由永久磁铁构成, 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^[2]。需要通过对加速度计进行温度补偿来减少温度变化对加速度计标度因数的影响, 使加速度计标度因数在整个工作温度范围内的变化符合使用要求。本文分析了标度因数受温度变化影响的原因, 分析了使用磁温度补偿合金补偿标度因数的原理, 对磁温度补偿合金的热处理方法进行了探究, 并通过试验进行了验证。

1 标度因数温度补偿原理

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。其中摆组件作为质量块, 力矩器用于平衡惯性力, 电涡流传感器用于测量位移。在加速度测量中, 当有沿输入轴向的加速度时, 摆组件绕轴线偏转一个小角度, 电涡流传感器检测到该小角度后电路产生力矩电流, 摆组件线圈在磁场中受到磁力作用使得摆组件反向偏转, 回到平衡位置。力矩电流与加速度成比例, 同时作为加速度的测量输出。

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

$$K_1 = \frac{ml_1}{NB_o L l_2} \quad (1)$$

式中: m 为惯性摆的质量; l_1 为惯性摆的质心到枢轴的垂距; 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。

加速度计的力矩器包含永磁体, 因其磁性材料的特性, 磁感应强度随温度的升高而变小, 磁感应强度随温度的降低而变大, 磁感应强度的变化对标度因数产生影响。标度因数的温度系数是标度因数在温度变化时的变化量与温度变化量的比值, 可以反映标度因数随温度变化的程度, 其表达式为

$$K_{1T_1} = \frac{K_{1(T_1)} - K_{1(T_0)}}{T_1 - T_0} \quad (2)$$

式中: $K_{1(T_1)}$ 为温度为 T_1 时的标度因数; $K_{1(T_0)}$ 为温度为 T_0 时的标度因数。

为了减小温度变化对标度因数的影响, 需要对加速度计力矩器磁路进行温度补偿。磁温度补偿是将具有较低居里温度的材料并联于磁路中, 该材料在居里温度以下磁感应强度会随温度的升高而快速减小, 在温度变化时对磁路磁通的分流随之改变, 从而对气隙磁场产生补偿作用, 使气隙磁通基本保持不变^[3]。简单的磁温度补偿磁路如图1所示, 磁路中包含永磁体、软铁极靴、气隙和磁温度补偿合金。磁温度补偿合金具有饱和磁感应强度在一定温度范围内会随温度升高而快速呈线性减小、磁阻增大的特点, 永磁体因具有可逆温度系数, 当温度升高时其磁感应强度减小, 工作气隙磁感应强度也随之减小^[4]。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减小得更快, 原本经它分流的一部分磁通因无法通过而只好改道通过工作气隙, 使得工作气隙磁感应强度有所增强, 从而对工作气隙磁场产生补偿作用, 使工作气隙磁通基本保持不变^[5]。

如图1所示, 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。

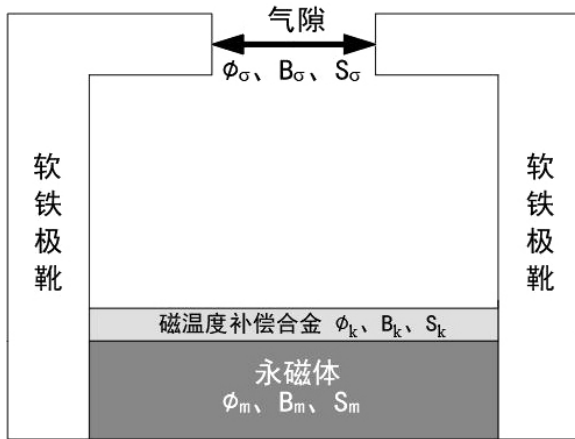


图1 简单磁温度补偿磁路

2 标度因数温度补偿方法

基于磁温度补偿的原理,当永磁体和磁温度补偿合金的磁性能参数符合(6)式时,可以使工作气隙磁通基本不受温度的影响,达到稳定气隙磁通的目的。由于磁温度补偿合金的磁感应强度随温度的升高而迅速减小,即 $\Delta B_k / \Delta t$ 数值较大,永磁体 $\Delta B_m / \Delta t$ 数值较小,因此在磁温度补偿磁路中,较小截面积的磁温度补偿合金就可使磁路中工作气隙磁感应强度基本不变。在永磁体磁路确定后,通过选用合适的磁温度补偿合金材料及调整其横截面积,可以使得工作气隙的磁通在一定温度范围内基本保持不变,从而减小温度带给标度因数的影响。

铁镍合金为常用的磁温度补偿合金,种类主要有1J30、1J31、1J32、1J33和1J38等。铁镍磁温度补偿合金随着镍含量的增高其磁温度补偿能力呈下降趋势。热处理工艺可以去除磁温度补偿合金在冷加工中产生的应力,对其组织产生一定影响,从而可以改变磁温度补偿合金的磁性能,但是这种影响因磁温度补偿合金成分不同而有所差异。

本文选用1J30作为加速度计的磁温度补偿合金,使用两种方法对磁温度补偿合金进行热处理,第一种方法为在氢气中进行热处理、加热至800℃保温2小时、炉冷至200℃出炉,第二种方法为在氢气中进行热处理、加热至900℃保温2小时、炉冷至200℃出炉。

将经过热处理的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,并分别进行试验。

3 试验结果

根据标度因数温度补偿方法,采用在氢气中进行热处理、加热至800℃保温2小时、炉冷至200℃出炉的磁温度补偿合金对编号为1#~4#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,温度补偿前试验结果如表1所示,使用磁温度补偿合金补偿后试验结果如表2所示。

表1 补偿前标度因数 K_1 温度系数试验结果

温度/℃	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
-50	5.65E-05	5.55E-05	5.60E-05	5.74E-05
-30	5.31E-05	5.45E-05	5.47E-05	5.71E-05
-20	5.11E-05	5.32E-05	5.35E-05	5.66E-05
-10	4.77E-05	5.10E-05	5.17E-05	5.57E-05
10	4.14E-05	4.21E-05	4.54E-05	5.18E-05
30	3.04E-05	3.38E-05	3.58E-05	4.58E-05
50	2.27E-05	3.06E-05	3.30E-05	4.27E-05
70	2.50E-05	3.38E-05	3.60E-05	4.38E-05

表2 800℃热处理磁温度补偿合金补偿后标度因数 K_1 温度系数试验结果

温度/℃	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
-50	3.28E-05	3.74E-05	3.85E-05	4.32E-05
-30	3.03E-05	3.44E-05	3.60E-05	4.12E-05
-20	2.68E-05	3.21E-05	3.40E-05	3.96E-05
-10	2.37E-05	3.02E-05	3.27E-05	3.87E-05
10	1.45E-05	2.27E-05	2.76E-05	3.47E-05
30	-2.60E-06	9.95E-06	1.55E-05	2.37E-05
50	-9.63E-06	2.12E-06	5.64E-06	1.43E-05
70	-7.56E-06	3.35E-06	5.45E-06	1.44E-05

改变磁温度补偿合金的热处理条件,将磁温度补偿合金在氢气中进行热处理,加热至900℃保温2小时,炉冷至200℃出炉。将经过上述方法热处理后的磁温度补偿合金对编号为1#~4#的加速度计进行温度补偿,补偿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,试验结果如表3所示。

表3 900℃热处理磁温度补偿合金补偿后标度因数 K_1 温度系数试验结果

温度/℃	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
-50	2.73E-05	2.63E-05	2.93E-05	2.96E-05
-30	2.26E-05	2.19E-05	2.55E-05	2.62E-05
-20	1.91E-05	1.88E-05	2.27E-05	2.37E-05
-10	1.46E-05	1.47E-05	1.92E-05	2.06E-05
10	9.02E-07	1.28E-06	7.80E-06	1.13E-05
30	-1.61E-05	-1.19E-05	-6.50E-06	-6.05E-06
50	-2.02E-05	-1.96E-05	-1.59E-05	-1.71E-05
70	-1.52E-05	-1.63E-05	-1.32E-05	-1.47E-05

编号为1#~4#的加速度计在补偿前和使用两种热处理的磁温度补偿合金进行温度补偿后标度因数温度系数对比如图2所示。

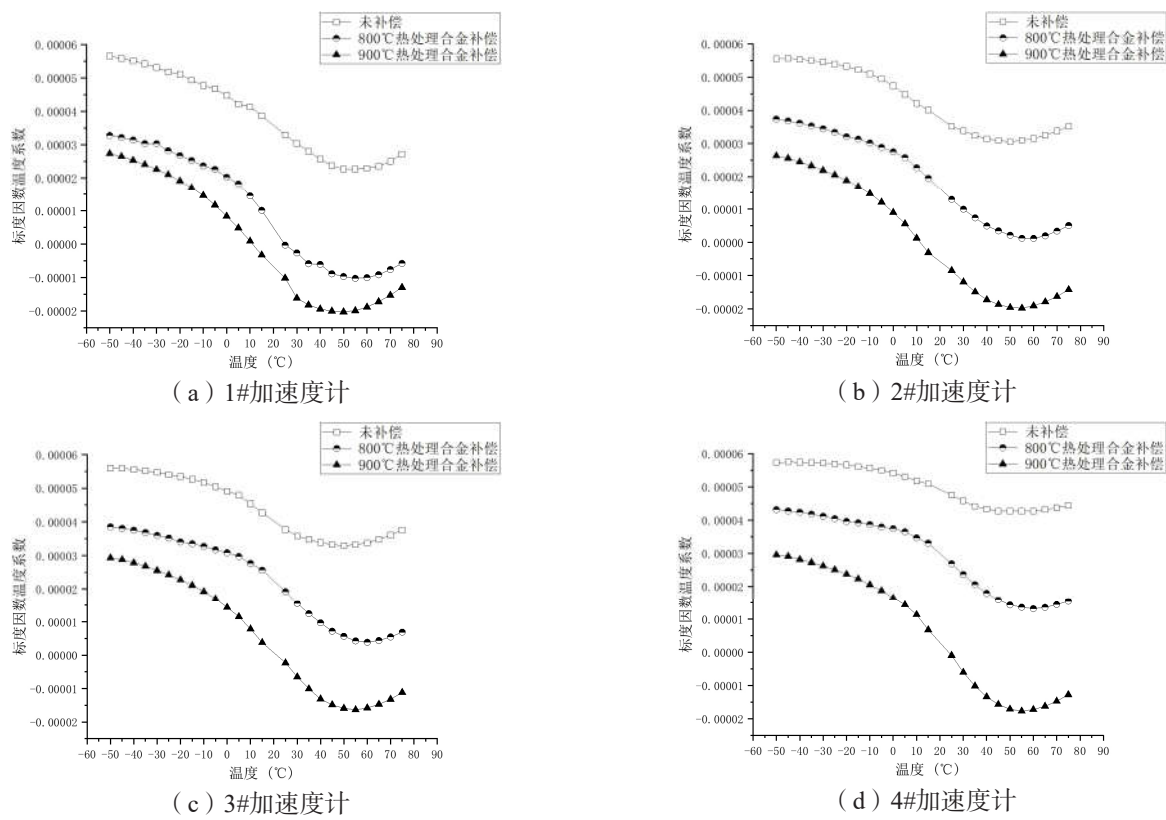


图2 补偿前和两种热处理磁温度补偿合金补偿后标度因数温度系数对比

4 结论

对上述的试验结果进行分析可以得出,使用磁温度补偿合金后加速度计标度因数受温度的影响减小。磁温度补偿合金使用两种方法进行热处理,第一种方法为在氢气中进行热处理、加热至800℃保温2小时、炉冷至200℃出炉,第二种方法为在氢气中进行热处理、加热至900℃保温2小时、炉冷至200℃出炉,经第二种方法热处理的磁温度补偿合金对标度因数的补偿能力优于第一种。

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]赵君轍,潘卫红.悬丝支撑加速度计标度因数温度系数补偿方法研究[J].计测技术,2007(06):26-28.

[3]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.

[4]邢馨婷,熊磊,赵君轍,等.加速度计温度补偿方法[J].计测技术,2008(01):51-52+56.

[5]熊磊,张朋好,杨中柳,等.加速度计力矩器设计[J].计测技术,2008(02):16-17+20.