

文章编号:1002-2082(2010)05-0814-05

塞曼激光陀螺磁屏蔽设计与实现

刘元正, 王维科, 陶伯良, 薛向前

(中航工业飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 为提高塞曼激光陀螺精度, 分析了塞曼激光陀螺磁的磁敏感特性, 指出敏感轴方向是塞曼激光陀螺的最大磁灵敏度方向, 该方向为产生磁误差的主要方向。研究了低频磁场屏蔽理论与加工工艺关键技术, 结合激光陀螺的环境适应性要求, 实现了固态激光陀螺磁屏蔽结构。在三轴磁试验台上进行了陀螺磁敏感性测试, 陀螺磁灵敏度值减少到原来的1/1000, 实测系数达到 $2.0(^{\circ})/(\text{h} \cdot \text{mT})$, 该值满足中等精度激光陀螺的实用要求。

关键词: 激光陀螺; 屏蔽效能; 塞曼偏频

中图分类号: TN248.2

文献标志码: A

Magnetic shield design and realization for Zeeman laser gyroscope

LIU Yuan-zheng, WANG Wei-ke, TAO Bo-liang, XUE Xiang-qian

(The Flight Automatic Control Research Institute of AVIC, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to improve the performance of Zeeman laser gyroscope, its magnetic sensitive characteristics were investigated. It was found that the gyro sensitive axis was the most bias magnetic sensitive axis, which resulted in the primary magnetic errors. Based on the low frequency magnetic shield theory and the key processes, the magnetic shield structure adapted to the laser gyro operation environment was manufactured. By testing it in the three-axis magnetic system, it was found that the magnetic sensitivity of Zeeman laser gyro was decreased to 1/1000 of the original value. The magnetic sensitivity coefficient reached $2.0(^{\circ})/(\text{h} \cdot \text{mT})$, which satisfied the requirements of middle precision guidance system.

Key words: laser gyroscope; shield efficiency; Zeeman biasing

引言

激光陀螺技术是现代惯性制导和导航系统的核心技术之一。相对于传统的机械陀螺, 激光陀螺具有瞬时启动、标度因数线性度好、动态范围宽、可靠性高、抗振动冲击能力强及数字输出等优点, 是捷联惯性导航系统的理想元件, 已广泛应用于航空、航天、航海导航制导系统及地面定位、定向系统之中。激光陀螺是以萨格奈克效应为基础, 由环形激光谐振腔构成的测量角速率的装置。激光陀螺工作原理决定了谐振腔中振荡的只能是圆偏振光或线偏振光, 在磁光效应作用下, 激光陀螺的性能受

外界环境磁场的影响较大, 基于圆偏振光的塞曼激光陀螺在环境磁场变化时, 零偏变化可达每小时几百度, 磁误差是塞曼激光陀螺的主要误差源之一, 制约陀螺的零偏稳定性和零偏重复性。进行塞曼激光陀螺磁屏蔽技术研究, 对于提高该型陀螺性能, 扩展其应用领域具有重要意义, 同时可对其他类型的激光陀螺磁屏蔽提供借鉴。

1 塞曼激光陀螺磁特性

塞曼激光陀螺(ZLGN)是以非共面谐振腔实现圆偏振光振荡, 以纵向塞曼效应进行偏频的全固

收稿日期: 2010-03-03; 修回日期: 2010-06-01

作者简介: 刘元正(1975—), 男, 山东莱阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事激光陀螺技术研究工作。

E-mail: yzliu_mail@yahoo.com.cn

态二频激光陀螺。由于其采用塞曼效应产生的磁光现象进行偏频,使得该型陀螺对环境磁场的变化非常敏感。

由纵向塞曼效应引起的偏频量值^[1]为

$$\Delta\gamma_z = 2g \frac{\mu_B B}{h}$$

式中: μ_B 是玻尔磁子,其值为 9.27×10^{-24} J/T; g 是兰德因数,其大小与谱线能级有关,对激光陀螺常用的 632.8 nm 的氦氖激光谱线, $g \approx 1.3$; B 是外加磁场的磁感应强度; h 是普朗克常量,其值为 6.624×10^{-34} J·s; 计算得到:

$$\Delta\gamma_z = 3.6 \text{ MHz/mT} \times B(\text{mT})$$

由于纵向塞曼效应,每 mT 磁场在气体放电介质产生的频率分裂 $\Delta\gamma = 36 \text{ MHz}$ 。

考虑到模牵引效应后,陀螺偏频输出 $\Delta\nu$:

$$\Delta\nu = 2 \frac{\Delta\nu_c}{\Delta\nu_D} \sqrt{1 + \frac{I}{I_s}} \Delta\gamma \quad (1)$$

式中: $\Delta\nu_c = \frac{C\delta}{\pi\eta L} = 0.9 \text{ MHz}$;

$$\Delta\nu_D = 2\Delta\nu_D \left(\frac{2kT}{mc^2} \ln 2 \right)^{1/2} = 1500 \text{ MHz}$$

上式中: I 为谐振腔内光强; I_s 为饱和光强; $\Delta\nu_D$ 为多谱勒展宽; $\Delta\nu_c$ 为空腔频率。 $I/I_s \ll 1$ 时, $\Delta\nu = 4300 \text{ Hz}$, 因此每 mT 磁场引起的陀螺输出漂移变化量为

$$M_0 = \Delta\nu/B = 4.3 \times 10^3 \text{ Hz/mT}$$

如图 1 所示,塞曼激光陀螺的谐振腔光路由 1-2-3-4 表示,光路同时也是 3 个正交平面 α 、 β 、 γ 磁灵敏度矢量的合成方向。可以看出,水平面 α 方向上的磁灵敏度为

$$S_{\alpha\Sigma} = S_{\alpha12} + S_{\alpha14} + S_{\alpha34} + S_{\alpha32} = 0 \quad (2)$$

在 β 、 γ 平面上的磁灵敏度矢量和相等:

$$S_{\beta\Sigma} = S_{\beta32} + S_{\beta12} + S_{\beta34} + S_{\beta14} \neq 0 \quad (3)$$

$$S_{\gamma\Sigma} = S_{\gamma34} + S_{\gamma32} + S_{\gamma14} + S_{\gamma12} \neq 0 \quad (4)$$

因此,磁灵敏度总矢量 $S_{\Sigma} = S_{\beta\Sigma} + S_{\gamma\Sigma}$ 不为零,方向为陀螺敏感轴方向,该方向为塞曼激光磁误差的主要方向。

实际上,由于腔体加工误差等因素影响,不可能保证腔内运行的激光光束关于敏感轴完全对称,敏感轴方向不可能与 α 平面的法线完全平行,导致陀螺在 X 、 Y 、 Z 方向的磁灵敏度均不为零。计算得到 X 向、 Y 向的零偏最大变化为

$$\Delta\Omega_{MX} = \Delta\Omega_{MY} = \frac{1}{K} \cos 45^\circ \sin(\Delta\theta) M_0 \quad (5)$$

式中 K 为被测陀螺的几何标度因数,其值为

0.299 8 脉冲/($^\circ$)。取误差 $\Delta\theta = 30'$, 磁灵敏度 $M_0 = 4.3 \times 10^3 \text{ Hz/mT}$, 代入上式得到:

$$\Delta\Omega_{MX} = \Delta\Omega_{MY} = 8.9^\circ/\text{h}$$

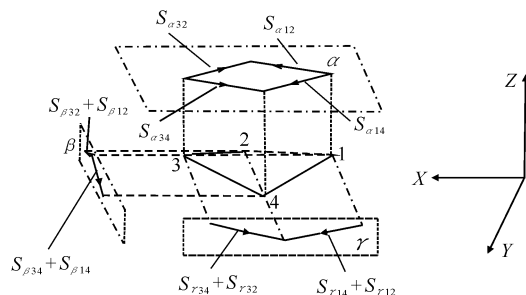


图 1 塞曼陀螺磁性示意图

Fig. 1 Diagram for magnetic characteristic of ZLGN

如此高的磁灵敏度陀螺是无法工程应用的,为此必须采用有效的磁屏蔽技术减少外界磁场的影响。

2 塞曼激光陀螺磁屏蔽技术

影响磁屏蔽性能的因素包括:磁场源的大小和形状、屏蔽面的形状和大小、屏蔽材料的接缝、磁场的频率、屏蔽到磁场源的距离、屏蔽对磁场源的方向、磁屏蔽材料的厚度和热处理等。

对激光陀螺而言,主要是对直流和低频磁场进行屏蔽,磁屏蔽材料在磁场中提供低磁阻磁路,引导磁力线通过自身,使磁场避开敏感部件。

激光陀螺对磁屏蔽材料的基本要求如下:

- 1) 最大限度衰减低频磁场;
- 2) 屏蔽体剩磁最少,或剩磁稳定;
- 3) 具有良好的加工性能;
- 4) 具有相当硬度;
- 5) 表面可达到一定粗糙度要求;
- 6) 耐受应力能力强。

常用的磁屏蔽材料如表 1^[2]所示。

表 1 磁屏蔽材料分类及特点

Table 1 Types and characteristic of magnetic shield materials

种类	特点	用途
电工纯铁	高饱和磁感 B_s	屏蔽强磁场
坡莫合金	高磁导率	用于弱磁场屏蔽
磁屏蔽钢	有良好的磁性能和成型性	用于彩色显像管和彩色显示器
硅钢片	磁性能介于纯铁和坡莫合金之间	用于电抗器或变压器部件
非晶材料	厚度 $10 \mu\text{m} \sim 40 \mu\text{m}$	电磁屏蔽性能较好

综合考虑,坡莫合金板材可作为激光陀螺屏蔽的最佳材料,代表合金有1J50、1J51、1J65、1J79和1J85等,软磁合金在应力状态下的磁导率会下降^[3],设计时应充分考虑该因素的影响。

2.1 磁屏蔽理论

固态磁屏蔽的结构形式有球形、圆筒形等壳体,每种结构形式又可有单层和多层屏蔽。通常用屏蔽效率,即磁屏蔽结构外部磁场与内部磁场的比值,表征屏蔽效果的好坏。对单层屏蔽结构,屏蔽效率与结构大小、磁导率、壳体厚度相关,增加壳体厚度,往往会增大屏蔽体的体积和重量,而屏蔽效率并不会显著增加^[4]。设屏蔽壳体内径为 r ,外径为 R ,取磁导率 $\mu=3\ 000$,单层屏蔽壳体外与内径比与内径值与屏蔽效率的关系如图2所示,由图可以看出,当 $R/r=3$ 时,屏蔽效率达到最大值。

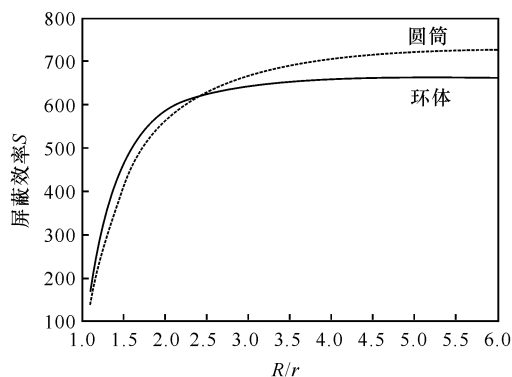


图2 厚度与屏蔽效率关系图

Fig. 2 Relation between thickness and shield efficiency

为了更有效地进行屏蔽,实际多采用多层屏蔽。以双层屏蔽为例,当屏蔽体内外磁场均匀,磁场平行于圆截面时,对双层同心屏蔽球壳,屏蔽效率^[5]有关系式:

$$S_1 = 1 + \frac{2}{9}(\mu - 2) \left\{ \left(1 - \frac{r_1^3 r_2^3}{R_1^3 R_2^3} \right) + \frac{2}{9}(\mu + 2)m_1 m_2 m_{12} \right\} \quad (6)$$

式中: $m_i = 1 - \frac{r_i^3}{R_i^3}$, $i=1, 2$; $m_{12} = 1 - \frac{R_1^3}{r_2^3}$ 。

对双层同轴直圆筒,屏蔽效率为

$$S_2 = 1 + \frac{1}{4}(\mu - 1) \left\{ \left(1 - \frac{r_1^2 r_2^2}{R_1^2 R_2^2} \right) + \frac{1}{4}(\mu + 2)m_1 m_2 m_{12} \right\} \quad (7)$$

式中: $n_i = 1 - \frac{r_i^2}{R_i^2}$, $i=1, 2$; $n_{12} = 1 - \frac{R_1^2}{r_2^2}$ 。

由上式可知, R 越大,屏蔽效率越低,减少屏蔽

结构的有效半径,有利于提高屏蔽效率。

取内壳体内径 $r_1=30\text{ mm}$,壳体厚度 $t=0.5\text{ mm}$,外径 $R_1=r_1+t=30.5\text{ mm}$,外壳体与内壳体之间的距离与屏蔽效率的仿真曲线如图3所示。当两层壳体之间距离为零时,屏蔽效率较低,随着间距的增加,屏蔽效率逐渐提高并达到最大值,随后间距再增大,屏蔽效率出现下降;并且球形屏蔽体屏蔽效率可以是圆筒形屏蔽体效率的2倍。

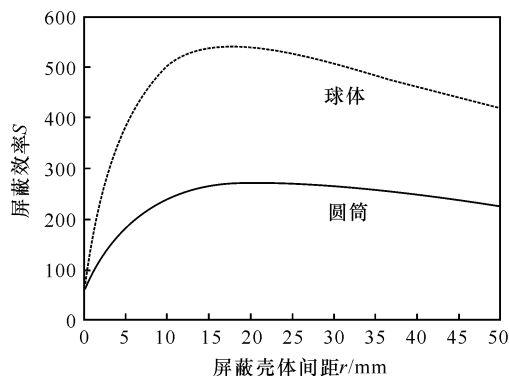


图3 间距与屏蔽效率关系图

Fig. 3 Relation between spacing and shield efficiency

受体积、安装等条件的摄制,实际屏蔽结构往往难以实现球形屏蔽体结构,双层屏蔽层间距离也难以达到最优值,需根据实际需求综合考虑计算。

2.2 设计与实现

屏蔽结构中尖锐的拐角会增加磁阻,通过圆角过渡可以实现最低磁阻路径;如果结构上需要开孔或缝,则应力求其边角采用圆弧形式。

薄片材料具有极高的磁导率,因此使用中应避免连续螺旋状卷绕,否则将有可能在屏蔽体中产生相当于磁极的结构。

当采用搭接焊接时,搭接尺寸应适当,在直径变化或结构拐角的地方,应首选氢弧焊。

当要求屏蔽的磁场较强时,如果使用高磁导率材料,会在强磁场中饱和,丧失屏蔽效能,而使用低导磁率材料,由于吸收损耗不够,将不能满足要求。遇到这种情况时,可采用双层屏蔽,如图4所示。设计的屏蔽结构采取两层圆柱形结构,外层屏蔽具有低导磁率,但不易饱和;内层屏蔽具有高导磁率,但易饱和。外层屏蔽先将磁场衰减到适当的强度,不会使内层屏蔽饱和,内层高导磁率材料能够充分发挥屏蔽效能。由塞曼激光陀螺的磁敏感特性知, Z 方向为磁场影响最大方向,陀螺信号接口A、电源接口B均设计在 X 方向,以保证 Z 方向的屏蔽性

能,为此,接口A、B形状、间距应进行适当控制。

对于屏蔽体外径为 D_1 、 D_2 ,屏蔽壳体厚度为 t_1 、 t_2 的两层屏蔽,取内层磁导率 $\mu_1=8.0\times 10^{10}$,外层磁导率 $\mu_2=500$,计算屏蔽效率 $S=1\ 500$ 。

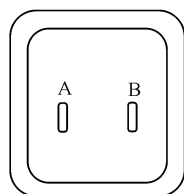


图4 屏蔽结构示意图

Fig. 4 Diagram of magnetic shield structure

实际的屏蔽结构存在必要的穿孔、孔洞和缝隙,引起导磁不连续性,产生电磁泄漏,使屏蔽效能远低于理论计算值。

2.3 磁屏蔽试验

为验证磁屏蔽结构的屏蔽效果,我们进行了磁屏蔽效果试验。将激光陀螺放置于三轴磁实验台中心处,陀螺控制线路置于磁实验台有效作用磁场区域外,激光陀螺输出零偏稳定后,分别沿X、Y、Z三个轴的正、负方向施加10 mT磁场(含地磁场),在此过程中监测陀螺零偏输出变化。

实验过程中,同时监测各轴的磁场分量,对各轴正、负方向的磁场与其相对应的陀螺输出进行差动计算,结果如表2所示。

表2 X、Y、Z方向磁场误差测试数据

Table 2 The test data of magnetic error in three axes

磁场变化量/ μT			输出零偏/ $(^\circ)\cdot\text{h}^{-1}$
ΔX	ΔY	ΔZ	
-200.00	2.40	4.02	-0.33
3.12	-200.00	-0.97	0.41
-1.25	6.69	-200.00	0.15

考虑到磁实验台磁场不正交性的影响,用最小二乘法对测试数据进行处理,结果如表3所示。

表3 X、Y、Z方向磁灵敏度

Table 3 The magnetic sensitivity in three axes

磁场方向	磁灵敏度/ $(^\circ)\cdot\text{h}^{-1}\cdot\mu\text{T}^{-1}$
X	0.001 6
Y	-0.002 0
Z	-0.000 8

由试验结果可见,陀螺敏感轴Z方向磁灵敏度最小,X方向磁灵敏度最大,与设计思路相一致。由于在陀螺X方向设置了信号和电源接口,使得该方向漏磁相对较大,磁灵敏度较高。Z方向磁

试验典型试验曲线如图5所示。

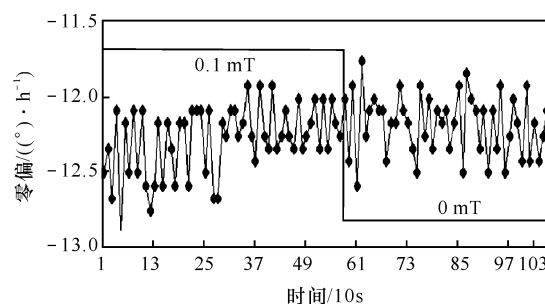


图5 Z向磁灵敏度试验曲线

Fig. 5 The magnetic sensitivity curve of Z axis

3 结论

分析了塞曼激光陀螺的磁敏感特性,指出了敏感轴方向是塞曼激光陀螺的最大磁灵敏度方向,该方向为产生磁误差的主要方向。

通过分析磁场屏蔽理论、设计原理与工艺技术,结合激光陀螺的工程应用,实现双层激光陀螺屏蔽结构,按照GJB5297-2004空空导弹激光陀螺仪通用规范,在三轴磁试验台上进行陀螺磁敏感性测试,实测陀螺磁灵敏度系数达到 $2.0^\circ/(\text{h}\cdot\text{mT})$,满足中等精度激光陀螺的实用要求,具有一定的工程应用价值,同时可为其他类型的激光陀螺磁屏蔽提供借鉴。

参考文献:

- [1] AZAROVA V V, GOLYAEV Y D. Optical gyros and their application [M]. Canada: Canada Communication Group Inc., 1999.
- [2] 翟宇, 聂彦, 沈翔, 等. 电磁屏蔽材料的研究进展与发展趋势[J]. 功能材料, 2004, 35(z1): 917-920.
ZHAI Yu, NIE Yan, SHEN Xiang, et al. Development and prospect of electromagnetic shielding materials [J]. Journal of Functional Materials Contents, 2004, 35 (z1): 917-920. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 尔延徽, 毛昌辉, 扬志民, 等. 应力对1J79软磁合金强场磁导率的影响[J]. 稀有金属, 2007, 31(6): 759-761.
ER Yan-hui, MAO Chang-hui, YANG Zhi-min, et al. Effect of stress on permeability of 1J79 soft magnetic alloy under high magnetic field[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2007, 31(6): 759-761. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 赵启博, 姚腊红, 王向欣. 磁导率与厚度因素对磁屏

蔽效能的影响[J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2008,19(2):13-20.

ZHAO Qin-bo, YAO La-hong, WANG Xiang-xin.

Influence of permeability and thickness on magnetic shielding effect[J]. Journal of Wuhan Engineering Institute, 2008,19(2):13-20. (in Chinese with an

English abstract)

[5] 张雅丽. 激光陀螺磁屏蔽技术的研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.

ZHANG Ya-li. Investigation on magnetic shield technology of laser gyro[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)