

一种动力调谐陀螺仪大加矩力矩器设计

韦宇聪, 吕英豪, 罗麟经

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 为满足捷联惯性导航系统用动力调谐陀螺仪大跟踪速率的要求, 提出了一种新的力矩器永磁磁钢结构。新结构参考 Halbach 永磁体阵列, 在常规的双径向充磁磁环中间增加了一个轴向充磁磁环。利用电磁场仿真软件 Maxwell 对典型结构和新结构力矩器的工作气隙磁场进行分析, 分析结果表明, 新结构力矩器的力矩系数可提高 36%。陀螺仪样机的实测结果验证了分析的结果。

关键词: 动力调谐陀螺仪; 力矩器; Halbach 永磁体阵列; 磁场

中图分类号: V249 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2015)03-0108-06

Design of the Torquer with High Scale Factor for DTG

WEI Yu-cong, LV Ying-hao, LUO Lin-jing

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: A new structure of the permanent magnet for torquer is put forward to satisfy the requirement of high processing rate of the DTG for the strap-down inertial navigation. Refer to the Halbach magnet array, an axial-magnetized magnetic ring is mounded between the two radial-magnetized magnetic rings in the new torquer. The magnetic field in the air gap of the typical torquer and the new torquer is analyzed using the FEA software Maxwell. According to the analysis, the scale factor of the new torquer can increase 36%. The result of the analysis is verified by the test of the DTG.

Key words: DTG; Torquer; Halbach magnet array; Magnetic field

0 引言

力矩器是动力调谐陀螺仪(以下简称“陀螺仪”)的基本元件,用来对陀螺转子施加力矩,以产生修正和补偿效应,并间接测量陀螺仪的输入角速度。因此,陀螺仪对力矩器的力矩系数提出了高稳定性、高线性度和高对称性的要求^[1]。特别地,对应用于捷联惯导系统的陀螺仪,其最大跟踪速率一般要求达到 $60 \sim 400 (^{\circ})/s$, 甚至更高,因此力矩器应具备较高的力矩系数,以产生足够的进动力矩。

根据 $\omega = M/H$ 可知,为实现大的跟踪速率,捷

联陀螺仪在设计上一般有以下特点:一是力矩器的力矩系数较大,保证在电流一定的前提下获得较大的进动力矩 M ;二是陀螺仪的调谐转速较低,即陀螺仪的角动量 H 较小。但是较小的陀螺仪角动量,将带来挠性接头刚度低,陀螺仪抗冲击能力弱的不良影响,限制了陀螺仪的使用范围。

在某改进型陀螺仪研制过程中,为了提高陀螺仪的抗冲击能力,需增大陀螺仪挠性接头的角刚度,并提高陀螺仪的调谐转速。陀螺仪转速提高,转子角动量提高,为保持一定的跟踪速率,需要力矩器提供更大的进动力矩。为此,本文提出了一种新的力矩器结构。该方案参考 Halbach 永

收稿日期: 2015 - 03 - 10; 修订日期: 2015 - 04 - 02。

作者简介: 韦宇聪 (1981 -), 男, 硕士, 工程师, 主要从事陀螺电机方面的研究。

磁体阵列结构，在常规力矩器的双径向充磁磁环中间增加一个轴向充磁磁环。增加的轴向充磁磁环可以有效地增加永磁体的体积，同时改变力矩器的磁路，达到增强工作气隙的有效磁感应强度的效果，实现了不改变陀螺仪外形尺寸而提高力矩器力矩系数的目的。

1 陀螺仪力矩器结构设计

1.1 力矩器的典型结构

陀螺仪一般采用动铁式永磁力矩器。它的永磁体装配在陀螺仪转子上，作为陀螺仪转子的一部分，参与转动。力线圈则装配在陀螺仪底座上，保持不动。为获得尽可能大的力矩器力矩系数，陀螺仪采用双有效边结构，即在陀螺仪转子上装配两个径向充磁磁环，而力线圈有效边安放在正对永磁磁环的气隙中心位置上。它的典型结构如图1所示。

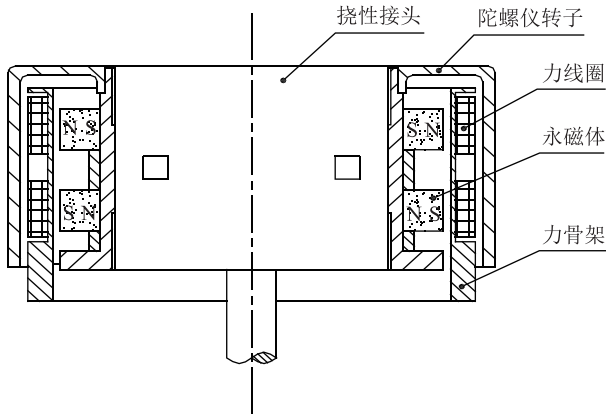


图1 力矩器典型结构示意图

Fig. 1 The diagram of the structure of the typical torquer

从图1可以看出，永磁磁环产生的主磁通经“上永磁磁环-气隙-外侧转子体-气隙-下永磁磁环-内侧转子体”各部分形成闭合回路。经上永磁磁环的上部气隙、下永磁磁环的下部气隙，以及上下永磁磁环之间气隙闭合的部分磁通为力矩器的漏磁通。它的磁力线分布如图2所示。

在力矩器线圈中通入直流电或电流脉冲，通电线圈在磁场中将产生力和力矩，根据作用力与反作用力原理，在陀螺转子上将受到大小相等、方向相反的力矩作用。力矩器的力矩系数如下

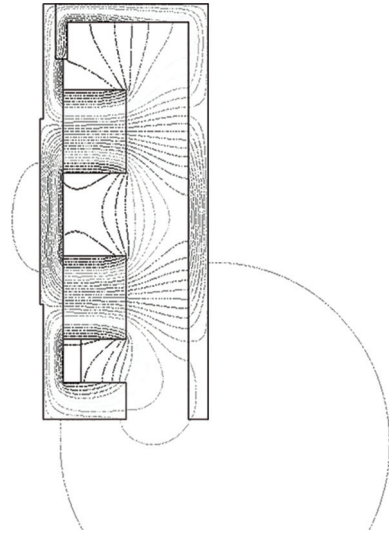


图2 磁力线分布图

Fig. 2 The distribution diagram of the flux line

$$k_M = M/i = 0.102 \cdot \sigma_0 \cdot \lambda_0 \cdot r_{cp} \cdot L \cdot B_\delta \cdot W \times 10^{-3} \text{ (g} \cdot \text{cm/A)} \quad (1)$$

式中： σ_0 —同轴力线圈的有效边数，推挽式力矩器取2或者4；

λ_0 —力线圈圆弧系数，表示力线圈圆弧有效边较直线有效边力矩减少的程度；

r_{cp} —力线圈有效边的平均半径，cm；

L —力线圈有效边长度，cm；

B_δ —力线圈所在位置磁感应强度的径向分量，Gs；

W —每组力线圈匝数。

从式(1)中可以看出，力矩器的力矩系数与力线圈的有效边数、平均半径、有效边长度、磁感应强度径向分量和力线圈匝数等因素成正比关系。

1.2 大加矩力矩器结构设计

在改进型陀螺仪设计时，由于陀螺仪的主要结构尺寸无法改变，提高力矩器力矩系数主要靠增强力矩器工作气隙的磁感应强度。

增强力矩器工作气隙的磁感应强度可以通过提高永磁磁环的充磁性能和优化磁路结构来实现。由于在当前条件下，提高永磁磁环的充磁性能存在较大的技术难度，因此，优化磁路结构是解决问题的主要途径。

从图2可以看出，力矩器的工作气隙（力线

圈的位置) 位于永磁体的外侧。相对于永磁体而言, 力矩器的磁场为单边磁场。采用 Halbach 永磁体阵列是增强单边磁场的磁感应强度的有效方法。

Halbach 永磁体阵列是 1979 年美国劳伦斯伯克利国家实验室的物理学家 K.Halbach 博士提出的一种新颖的永磁结构。这种永磁体阵列完全由稀土永磁材料构成, 通过将不同充磁方向的永磁体按照一定的规律排列, 能够在永磁体的一侧汇聚磁力线, 而在另一侧消弱磁力线, 从而获得比较理想的单边磁场^[2]。由于无法实现永磁体充磁方向的连续变化, 因此在实际应用中, Halbach 阵列永磁体常常通过将离散的永磁体拼接在一起的方式来实现。

参考 Halbach 永磁体阵列, 新结构力矩器在图 1 所示的两个径向充磁磁环中间增加一个轴向充磁磁环, 轴向充磁磁环的充磁方向根据上下径向充磁磁环的充磁方向决定。当上下磁环的充磁方向如图 1 所示时, 中间轴向充磁磁环的充磁方向为自下而上, 即充磁后, 磁环上端为 N 极, 下端为 S 极。新结构力矩器的示意图如图 3 所示。

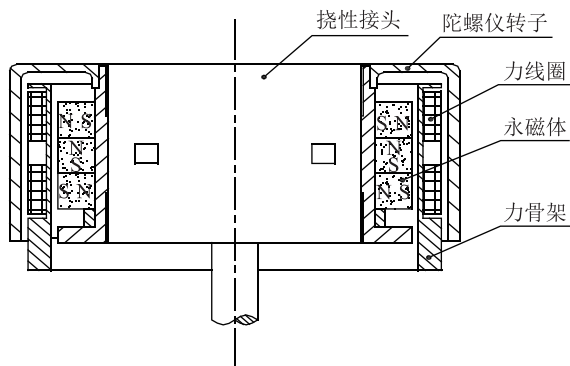


图 3 力矩器新结构示意图

Fig. 3 The diagram of the structure of the new torquer

增加了轴向充磁磁环后, 新结构力矩器的主磁通包括两部分, 一部分经过“上永磁磁环 - 气隙 - 外侧转子体 - 气隙 - 下永磁磁环 - 内侧转子体”进行闭合, 另一部分经过“上永磁磁环 - 气隙 - 外侧转子体 - 气隙 - 下永磁磁环 - 轴向充磁磁环”进行闭合。漏磁通则分别经“上永磁磁环上部气隙 - 转子 - 上永磁磁环”、“下永磁磁环下部气隙 - 转子 - 下永磁磁环”和“轴向充磁磁环 - 轴向充磁磁环外侧和力线圈内侧之间气隙”三种

路径闭合。新结构力矩器的磁力线分布如图 4 所示。

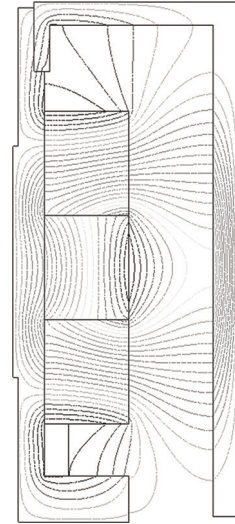


图 4 新结构力矩器磁力线分布图

Fig. 4 The distribution diagram of the flux line of the new torquer

2 力矩器磁场仿真分析

2.1 典型结构力矩器的磁场

利用电磁场有限元分析软件 Maxwell 对某型号陀螺仪典型结构力矩器永磁磁环产生的静磁场进行分析, 得到力矩器各部分及工作气隙的磁感应强度幅值分布如图 5 所示。

在力矩器中, 工作气隙中力线圈所在位置磁感应强度的径向分量为产生力矩的有效分量。利用后处理器中的计算器对磁感应强度进行分解, 得到力矩器工作气隙磁感应强度径向分量的沿气隙中心线分布曲线, 如图 6 所示。图中, 红色曲线为磁感应强度径向分量沿气隙中心线的分布曲线, 绿色和蓝色曲线分别对应为气隙中心线左侧 0.3mm (靠近永磁体, 力线圈内侧) 和右侧 0.3mm (远离永磁体, 力线圈外侧) 位置的磁感应强度径向分量。

2.2 大加矩力矩器的磁场

利用 Maxwell 对新结构力矩器的磁场进行分析, 得到新结构力矩器气隙磁感应强度幅值分布如图 7 所示。

参照 2.1 在后处理器中对新结构力矩器工作气

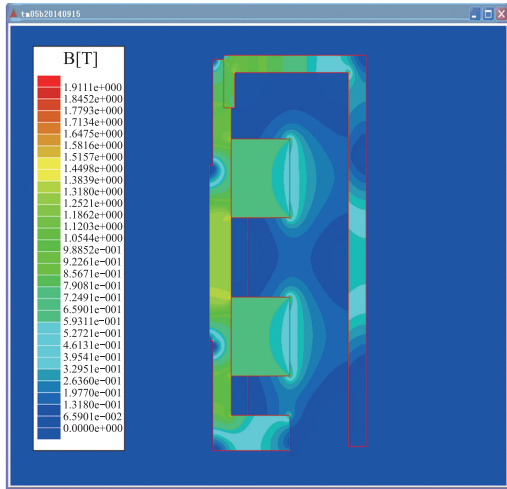


图 5 磁感应强度幅值分布云图
Fig. 5 The distribution diagram of the amplitude of the flux density

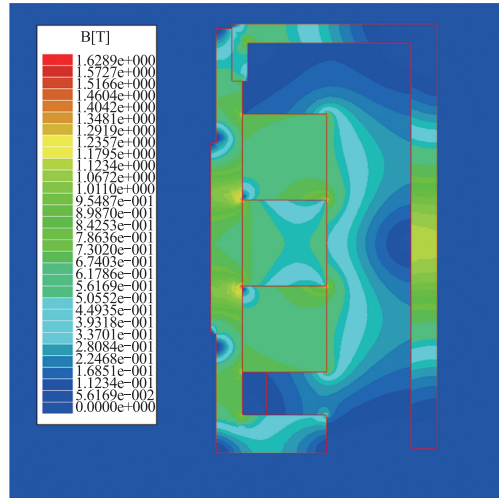


图 7 新结构力矩器感应强度幅值分布云图
Fig. 7 The distribution diagram of the amplitude of the flux density

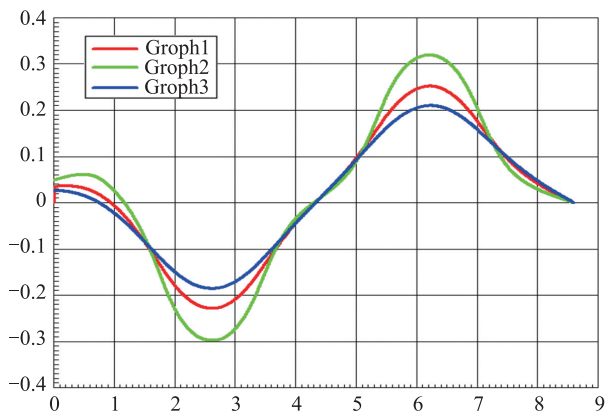


图 6 典型结构力矩器工作气隙磁感应强度
径向分量轴向分布曲线
Fig. 6 The distribution curve of the flux density (radial component) of the typical torque

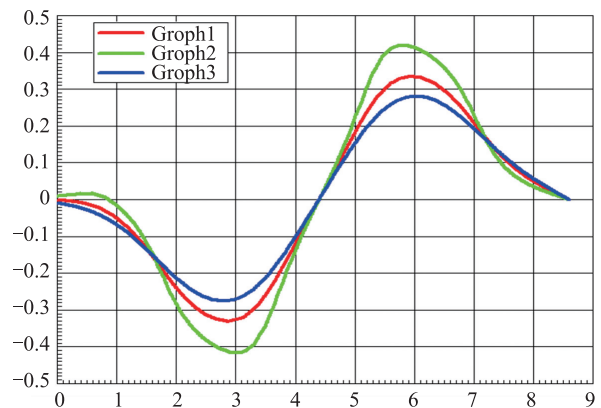


图 8 新结构力矩器工作气隙磁感应强度
径向分量轴向分布曲线
Fig. 8 The distribution curve of the flux density (radial component) of the new torquer

隙的磁感应强度径向分量进行分解，结果如图 8 所示。

2.3 两种结构力矩器对比

对比图 2 和图 4 两种结构的磁力线分布可以看出，新结构力矩器的磁路较典型结构力矩器发生了改变。新结构力矩器的磁力线除了通过典型结构力矩器的磁场路径外，还增加了经过由三个永磁磁环、工作气隙和陀螺仪转子组成的闭合的磁场路径。此外，典型结构力矩器的磁力线还有一部分通过陀螺仪转子外侧，经陀螺仪转子组件下

部闭合的磁力线。而新结构力矩器的磁力线几乎都在转子组件内部闭合，也就是说新结构力矩器的漏磁相对减小。

对比图 6 和图 8 两种结构力矩器工作气隙磁感应强度径向分量的分布曲线可以看出，在气隙中心线位置，新结构力矩器的磁感应强度径向分量较典型结构力矩器的有了明显的提高。在正对上两个径向充磁磁环的位置（力线圈所在位置），典型结构力矩器的磁感应强度径向分量在 1300~2300Gs 之间，新结构力矩器的磁感应强度径向分

量达到 1800~3300Gs。

对曲线进行分段线性化, 粗略估算平均值, 典型结构力矩器工作气隙中心线上径向磁环正对位置的磁感应强度径向分量大约为 1900Gs, 新结构力矩器为 2600Gs, 新结构力矩器较典型结构的有效磁感应强度提高了 36%。在气隙中心线的左右侧 0.3mm 处, 新结构力矩器的磁感应强度径向分量同样出现类似的现象。也就是说, 在其他因素不变的前提下, 新结构力矩器的力矩系数提高 36%。

3 样机试制及测试结果分析

根据仿真分析的结果, 在某型陀螺仪的改进型上开展了新结构力矩器试验。陀螺仪样机共两个, 新结构力矩器装配完成后随陀螺仪进行了相关测试, 其中采用典型结构和新结构力矩器的力矩系数测试结果如表 1 所示。

表 1 力矩器力矩系数测试结果

Tab. 1 The test result of the scale factor of the torquer

陀螺仪样机状态	力矩器标度因数/ [(mg·cm)/mA]	
	X	Y
力矩器结构	X	Y
典型结构	258	259
典型结构	259	259
新结构	366	363
新结构	365	366

从表 1 中测试结果的数值看, 新结构力矩器的力矩系数平均值约为 365(mg·cm)/mA, 为典型结构力矩器的力矩系数平均值 259(mg·cm)/mA 的 1.41 倍, 与仿真结果吻合。

根据陀螺仪的工作原理, 可知

$$\begin{cases} \omega = M/H = K_T I \\ M = K_M I \\ H = J_Z N \\ J_Z = \sum m_i R_i^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: M —力矩器通入电流所产生的进动力矩;

H —陀螺仪角动量;

K_T —陀螺仪标度因数;

K_M —力矩器力矩系数;

J_X —陀螺仪极转动惯量;

N —陀螺仪调谐转速;

m_i —陀螺仪旋转部分各质点的质量;

R_i —陀螺仪旋转部分各质点的旋转半径。

根据式 (2), 在陀螺仪调谐转速一致的前提下, 采用新结构力矩器的陀螺仪标度因数与采用典型结构力矩器的陀螺仪标度因数比值如式 (3) 所示。

$$\frac{K_{T\text{新}}}{K_{T\text{典型}}} = \frac{(\omega/i)_{\text{新}}}{(\omega/i)_{\text{典型}}} = \frac{K_{M\text{新}} J_{Z\text{典型}}}{K_{M\text{典型}} J_{Z\text{新}}} \quad (3)$$

新结构力矩器的陀螺仪增加了轴向充磁磁环, 重量增加了 2.85g, 陀螺仪的极转动惯量增加为采用典型结构力矩器陀螺仪的 1.08 倍。

再根据表 1 的测试结果的平均值, 即可以计算得到某型陀螺仪采用新结构力矩器与采用典型结构力矩器的陀螺仪标度因数比值

$$\frac{K_{T\text{新}}}{K_{T\text{典型}}} = \frac{k_{M\text{新}} J_{Z\text{典型}}}{K_{M\text{典型}} J_{Z\text{新}}} = \frac{365}{259} \times \frac{1}{1.08} = 1.3 \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 采用新结构力矩器之后, 陀螺仪的标度因数可以提高 30%, 与表 2 所示的陀螺仪标度因数实际测试结果吻合。

表 2 陀螺仪标度因数测试结果

Tab. 2 The test result of the scale factor of the DTG

陀螺仪样机状态	陀螺仪标度因数/ [(°)/(h·mA)]	
	X	Y
力矩器结构	X	Y
典型结构	1093	1094
典型结构	1103	1107
新结构	1455	1444
新结构	1466	1457

4 结论

本文参考 Halbach 永磁体阵列结构, 提出了一种新的力矩器结构——在常规力矩器的双径向充磁磁环中间增加一个轴向充磁磁环。从分析和陀螺仪样机的实测结果可以看出, 新结构力矩器可以有效提高力矩器的力矩系数。该结构方案陀螺仪改动少, 可以有效缩短改进型陀螺仪的研制周

期, 同时对陀螺仪小型化过程中力矩器的设计提供了积极的参考意义。

参考文献

- [1] 林士谔. 动力调谐陀螺仪 [M]. 国防工业出版社, 1983.
- [2] 张一鸣, 乔德治, 高俊侠. Halbach 阵列永磁体的研究现状与应用 [J]. 分析仪器, 2010, 28 (2): 5-10.