

文章编号: 0258-7025(2009)09-2290-05

永磁体双磁环结构的磁场均匀性分析

底楠 赵建林 王志兵

(西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 提出了可用于四频差动激光陀螺法拉第室的永磁体双磁环结构,用以产生较强且均匀的轴向磁场。推导了永磁体磁环轴线上磁场分布的解析式,理论并实验证明了该解析式的正确性。引入磁场均匀度概念,提出了类亥姆霍兹线圈的双磁环结构,模拟了磁环间距对磁场分布的影响,数值计算了不同均匀度下双磁环结构的磁场分布特征。在此基础上,针对四频差动激光陀螺法拉第室的要求,给出了适用的设计方案。

关键词 光学器件;磁场均匀性;面磁化电流密度;永磁体双磁环;法拉第室;四频差动激光陀螺

中图分类号 O482.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093609.2290

Analysis on Magnetic Field Homogeneity of Dual-Ring Permanent Magnets

Di Nan Zhao Jianlin Wang Zhibing

(*Institute of Optical Information Science and Technology, Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xian, Shaanxi 710072, China*)

Abstract A dual-ring permanent magnets structure is presented, which can be used as Faraday cell in four-mode differential laser gyro so as to provide appropriate intensity and axial uniform magnetic field. The analytic expression of the magnetic field distribution along the ring magnet axes is deduced, which is proved thereafter theoretically and experimentally. The conception of magnetic homogeneity is introduced. The distribution curve of the dual-ring magnets is simulated with different intervals and the characteristics of magnetic field distribution are calculated in given homogeneities. In the end, an appropriate design scheme of Faraday cell in four-mode differential laser gyro is proposed.

Key words optical devices; magnetic field homogeneity; dual-ring permanent magnets; surface magnetization current density; Faraday cell; four-mode differential laser gyro

1 引言

四频差动激光陀螺^[1]是新一代采用光学偏频方案的激光陀螺,它将法拉第效应引入到环形激光谐振腔内来克服激光陀螺存在的闭锁效应^[2]。因此,法拉第室的性能在很大程度上决定激光陀螺的工作性能。高性能磁光偏频器对法拉第室的要求包括两个方面:一是法拉第室内的磁场需要足够强以便能够提供足够的偏频量;二是保证磁场具有良好的温

度稳定性及轴向分布均匀性。在法拉第效应的其他对温度要求不敏感的应用中,均匀的强磁场可由螺线管或亥姆霍兹线圈提供。然而,线圈长时间工作会造成磁光器件的温度上升,磁光材料费尔德常量的温度特性将降低器件的工作性能^[3]。这就要求当磁光器件应用于大温差环境或长时间工作(如应用于激光陀螺中)时,须采用永磁体为磁光材料提供轴向磁场。在激光陀螺法拉第室的设计中,文献[4]对

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2009-01-09

基金项目: 国家自然科学基金委员会和中国航空工业第一集团公司航空科技联合基金(10477016)资助项目。

作者简介: 底楠(1981—),男,讲师,博士研究生,主要从事光电子技术、磁光学方面的研究。

E-mail: dinan@mail.nwpu.edu.cn

导师简介: 赵建林(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光信息技术及应用等方面的研究。

E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn

常见的单磁环、双磁环及八极矩磁路等结构的磁场分布进行了模拟和分析,但由于未能就磁场分布进行解析讨论,因而无法对磁场分布的均匀性做出定量衡量。本文提出一种亥姆霍兹线圈的永磁体双磁环结构,基于分子电流观点详细讨论了双磁环结构的磁感应强度分布特性,定量给出了均匀性判定标准,并给出了适用的法拉第室设计方案。

2 环形永磁体磁感应强度分布计算

如图 1(a)所示,设直角坐标系的原点为磁环底

面中心, z 轴为磁环轴线方向。由分子电流观点可知^[5],永磁体外部空间任意一点的磁感应强度,由永磁体内排列整齐的所有分子电流共同激发。假设永磁体磁环沿 z 方向均匀磁化,由于体内分子电流效应相互抵消,在宏观上则表现为仅有表面电流而无体电流。即外部空间中任意一点的磁感应强度,由环形永磁体内表面闭合电流环路 I_1 和外表面闭合电流环路 I_2 共同激发。根据右手螺旋法则, I_1 沿顺时针方向,计算时取负号; I_2 沿逆时针方向,计算时取正号,如图 1(b)所示。

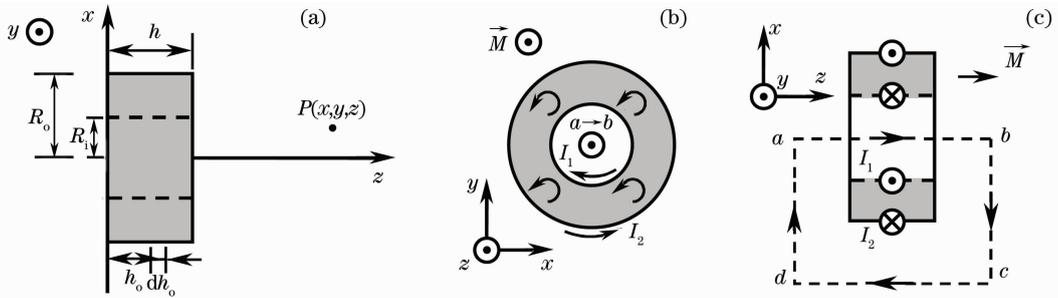


图 1 计算单磁环磁感应强度分布时的坐标关系

Fig. 1 Coordinate relationship in calculating magnetic induction distribution of single-ring permanent magnet

对于法拉第器件,有意义的是 z 方向的磁感应强度分量,故为简便起见,本文提到的“磁场”或“磁感应强度”均指“轴向磁感应强度”,即“磁感应强度的 z 轴方向分量”。

根据毕奥-萨伐尔定律^[5],直角坐标系下圆电流环路在空间任意一点处所产生的磁感应强度可表示为^[6]

$$B = \frac{\mu_0 I k}{8\pi \sqrt{\rho R}} \left[2K(k) + \frac{Rk^2 - (2 - k^2)\rho E(k)}{\rho(1 - k^2)} \right], \quad (1)$$

式中 R 为环路半径, μ_0 为磁导率, I 为电流, $k = \sqrt{\frac{4\rho R}{z^2 + (\rho + R)^2}} < 1$, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$, $K(k)$ 和 $E(k)$ 分别为第一类和第二类完全椭圆积分。

取磁环内外径及厚度分别为 R_i, R_o 和 h ,并假设其内外表面磁化电流密度分别为 J_1 和 J_2 ,则磁环内外表面在 $z = h_0$ 处的环路电流强度分别为 $I_1 = -\mu_0 J_1 dh_0$, $I_2 = \mu_0 J_2 dh_0$ 。因此根据(1)式,环形永磁体对空间任一点 $P(x, y, z)$ 产生的轴向磁感应强度为

$$B = B_i + B_o = \int_0^h \left\{ -\frac{\mu_0 J_1 k_i}{8\pi \sqrt{\rho R_i}} \left[2K(k_i) + \frac{R_i k_i^2 - (2 - k_i^2)\rho E(k_i)}{\rho(1 - k_i^2)} \right] + \frac{J_2 k_o}{\sqrt{R_o}} \left[2K(k_o) + \frac{R_o k_o^2 - (2 - k_o^2)\rho E(k_o)}{\rho(1 - k_o^2)} \right] \right\} dh_0. \quad (2)$$

特别地,对磁环轴线(即 z 轴)上的轴向磁感应强度,可简化为

$$B_0 = -\frac{\mu_0}{2} J_1 \left[\sin\left(\arctan \frac{z}{R_i}\right) - \sin\left(\arctan \frac{z-h}{R_i}\right) \right] + \frac{\mu_0}{2} J_2 \left[\sin\left(\arctan \frac{z}{R_o}\right) - \sin\left(\arctan \frac{z-h}{R_o}\right) \right]. \quad (3)$$

利用磁介质中的安培环路定理^[7]可以对(3)式的正确性予以验证。取如图 1(c)所示的闭合有向回路 l : $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow a$,且 $\overline{ab} = \overline{cd} \rightarrow \infty$, $\overline{ad} = \overline{bc} \rightarrow \infty$ 。对 B_0 取基于回路 l 的线积分,有

$$\begin{aligned}
\oint_l B_0 dz &= \int_{-\infty}^{+\infty} B_0 dz = \int_{-\infty}^{+\infty} B_0 dz = \\
&= -\frac{\mu_0}{2} J_1 \left[\sqrt{R_i^2 + z^2} - \sqrt{R_i^2 + (z-h)^2} \right] \Big|_{-\infty}^{+\infty} + \frac{\mu_0}{2} J_2 \left[\sqrt{R_o^2 + z^2} - \sqrt{R_o^2 + (z-h)^2} \right] \Big|_{-\infty}^{+\infty} = \\
&= -\frac{\mu_0}{2} J_1 \left[\frac{2zh - h^2}{\sqrt{R_i^2 + z^2} + \sqrt{R_i^2 + (z-h)^2}} \right] \Big|_{-\infty}^{+\infty} + \frac{\mu_0}{2} J_2 \left[\frac{2zh - h^2}{\sqrt{R_o^2 + z^2} + \sqrt{R_o^2 + (z-h)^2}} \right] \Big|_{-\infty}^{+\infty} = \\
&= -\mu_0 J_i h + \mu_0 J_o h,
\end{aligned} \quad (4)$$

另一方面,与回路 l 所交链的宏观传导电流 $\sum I = 0$, 磁化电流为

$$\sum I' = \oint_l \mathbf{M} dl = -J_i h + J_o h, \quad (5)$$

式中 \mathbf{M} 为磁化强度。根据安培环路定理,有

$$\oint_l B_0 dz = \sum (I + I') = -\mu_0 J_i h + \mu_0 J_o h, \quad (6)$$

与(4)式的计算结果相吻合,证明解析(3)式是正确的。

通过实验对(3)式的结果进行验证。将给定的永磁体磁环样品 ($R_i = 5.25$ mm, $R_o = 10$ mm, $h = 5$ mm) 置于无磁空间中,将轴向霍尔探头固定于微位移平台上,测量磁环轴线上的磁感应强度分布,并利用(3)式对测量结果进行拟合,如图2所示,可见拟合曲线与测量点完全吻合。由此可求出样品的内外表面磁化电流密度分别为 $J_1 = 8.012 \times 10^5$ A/m, $J_2 = 8.111 \times 10^5$ A/m。不同磁环的 J 取决于其各磁体的磁化强度 \mathbf{M} 。

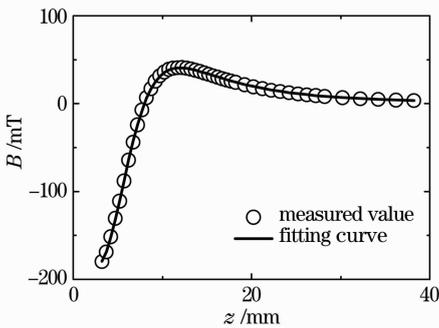


图2 磁环样品轴线上磁感应强度分布

Fig. 2 Distribution of magnetic induction on ring magnetic axes

需要注意的是,对于大多数环形形状的永磁体, $h \ll R_o$, 因此 z 方向为难磁化方向,存在较大的退磁因子^[8],磁环不会工作在饱和磁化强度上,而是工作在回复线上(对钕铁硼材料,回复直线与去磁曲线的直线部分,即膝点与饱和磁化强度之间的部分相重合)。因此,(5)式中提到的与表面磁化电流密度 J

相关联的磁化强度 \mathbf{M} 是磁环工作点处的表观磁化强度,由磁环的形状决定,而与饱和磁化强度 $M_s = \frac{B_r}{\mu_0}$ 无关。

此外,尽管出于避免法拉第器件中的线圈发热而选取永磁体提供轴向磁场,但也要注意,许多永磁材料的去磁特性仍然受到温度场的微弱影响,钕铁硼和铁氧体材料表现得尤为明显^[9]。因此在应用中,应根据实际工作条件需要选取耐温程度高的牌号的永磁体,同时设计好永磁体的工作点。在本文的实验中,永磁体保持在恒温状态下进行测量,并且也假设本文其他的计算结果在恒温的前提下进行。

3 磁感应强度均匀性分析

在法拉第器件中,出于设计、定标、测量的需求,通常需要为磁光材料提供一个足够强且均匀的轴向磁场。为此,引入一个定量衡量磁场均匀性的参量——磁感应强度均匀度:对于给定的某基点 A,将任意一点 B 处的轴向磁感应强度与 A 处的轴向磁感应强度相对变化的百分比定义为 B 点相对 A 点的磁感应强度均匀度,用 Δ 表示,即

$$\Delta = \left| \frac{|B_A| - |B_B|}{|B_A|} \right| \times 100\%. \quad (7)$$

对于上述单个磁环的情况,轴线上任一点相对于上一

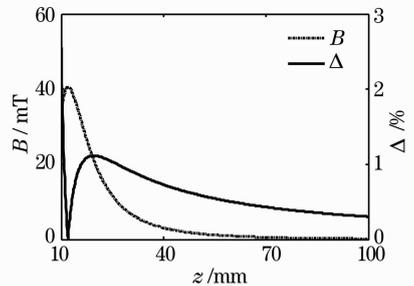


图3 单磁环轴线上磁感应强度及磁感应强度均匀度分布

Fig. 3 Distribution of magnetic induction and magnetic homogeneity on ring magnetic axes

点的磁感应强度均匀度为 $\Delta = \left| \frac{(B_{k+1} - B_k)}{B_k} \right| \times 100\%$ ($k = 1, 2, \dots$), 若取步长 $\Delta z = 0.1 \text{ mm}$, 可得如图 3 所示的单磁环磁感应强度及磁感应强度均匀度分布。

从图 3 可见, 仅使用单磁环时, 即使在远场也无法得到理想的磁感应强度均匀分布, 且远场的磁感应强度也衰减到无法应用。为此, 提出图 4 所示的与亥姆霍兹线圈结构类似的永磁体双磁环结构。两块相同的永磁体磁环平行放置间距为 d , 磁化方向均取 z 轴正方向。钕铁硼永磁体的典型回复磁导率为 $\mu_{rec} = 1.05$, 与空气的相对磁导率接近, 故计算时可对两磁环的磁场进行线性叠加。

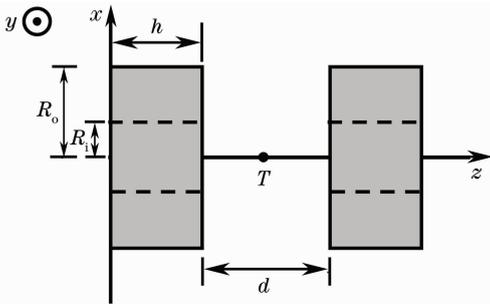


图 4 计算永磁体双磁环结构磁感应强度分布时的坐标关系

Fig. 4 Coordinates relations in calculating magnetic induction distribution of dual-ring permanent magnet

图 5 所示为 d 取不同值时永磁体双磁环间磁感应强度分布的模拟结果。可见, 随着 d 的增大, 磁感应强度分布曲线由中心凸起向中心凹陷过渡, 在某一间距时可在两磁环的对称中心 T 附近提供一段磁感应强度相对较强且均匀性较好的空间, 作为偏频材料的工作区间。取 T 点作为评价该结构的磁感应强度均匀度的基点, 则轴线上其他各点的磁感应强度均匀度为 $\Delta = \left| \frac{(B_z - B_T)}{B_T} \right| \times 100\%$ 。当

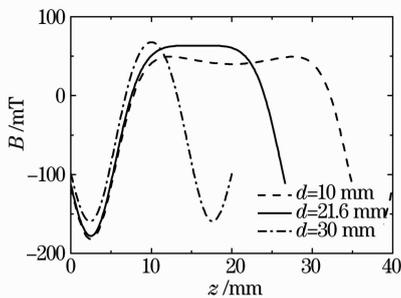


图 5 间距 d 对永磁体双磁环间磁感应强度分布的影响

Fig. 5 Distribution of magnetic induction between dual-ring magnets in different d

d 变化时, 小于特定均匀度的空间长度也不同, 令均匀长度最长的磁环间距为最佳间距 D 。通过数值模拟, 可以计算出在不同磁感应强度均匀度要求下, 采用上述磁环样品的永磁体双磁环结构的最佳间距 D , 中心磁感应强度 B_{mid} 和均匀长度 L , 如表 1 所示 (取步长 $\Delta d = 0.1 \text{ mm}$, $\Delta z = 0.01 \text{ mm}$)。

表 1 不同均匀度下双磁环结构的磁场分布特性表征
Table 1 Parameters of magnetic field distribution in different homogeneity

$\Delta / \%$	D / mm	B_{mid} / mT	L / mm
≤ 0.1	21.6	63.4	4.68
≤ 1	22.7	59.9	8.64
≤ 5	24.9	53.3	13.60

从表 1 可见, 满足特定均匀度要求的均匀长度可达几毫米至十几毫米, 可以满足多数法拉第器件的应用需要。而实际应用中, 对于不同用途的法拉第室, 还需要根据具体的空间尺寸和磁感应强度均匀性要求对磁环的形状、材料和耐温程度进行选择。例如, 以文献[4]提到的四频差动激光陀螺为例, 通过计算可知, 由上述钕铁硼材料构成的两个内径 1 mm, 外径 7 mm, 厚 1.1 mm 的磁环, 在相距 4.6 mm 平行放置时, 可构成满足需要的永磁体双磁环结构, 磁感应强度分布的模拟结果如图 6 所示。该结构满足法拉第室 7 mm × 7 mm 的尺寸要求^[4]; 且中心磁感应强度为 139.8 mT, 磁感应强度均匀度 $\Delta \leq 0.1\%$ 的空间长度为 1.15 mm, 不同长度的积分磁场值 $\sum_{-L}^L B_z dl_i \approx \sum_{-L}^L B_z dl_i = 0.161 \text{ T} \cdot \text{mm} > 0.084 \text{ T} \cdot \text{mm}$, 满足文献[4]提出的磁场强度要求。需要注意的是, 上述针对该陀螺的计算结果的绝对数值仅仅用来说明永磁体双磁环结构的可行性。详细定量的结果需根据具体磁环的形状、材料等参数进行计算。

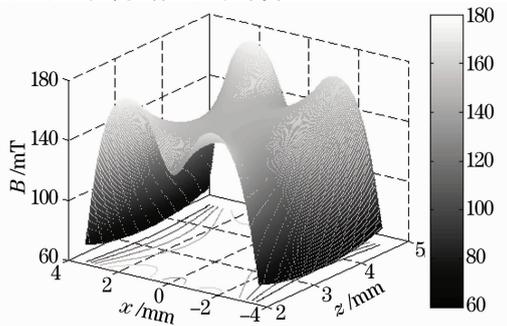


图 6 用于激光陀螺的双磁环法拉第室的磁感应强度分布

Fig. 6 Distribution of magnetic induction in dual-ring magnets Faraday cell in laser gyro

4 结 论

在分析圆电流环路空间磁感应强度分布的基础上导出了永磁体磁环轴线上磁感应强度分布的解析式。利用磁介质中的安培环路定律,对该解析式的正确性进行了证明。利用微位移平台实验测定了给定铁硼磁环样品轴线上的磁感应强度分布,实验分布与理论结果相符。通过数值模拟不同磁环间距下两磁环间磁感应强度的分布曲线,证实了两磁环间存在均匀磁感应强度空间的可能性。引入了磁感应强度均匀度的概念,并理论计算了给定磁场均匀性分布条件下,采用上述磁环样品时永磁体双磁环结构的最佳间距、中心磁感应强度和满足均匀性条件的空间长度。在此基础上,给出了满足激光陀螺法拉第室的设计方案,给出了磁感应强度分布的模拟结果。

参 考 文 献

- 1 J. M. Graham, C. G. Steven, H. V. Charles. The Litton 11 cm triaxial zero-lock gyro [C]. *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, 1996: 49~55
- 2 W. W. Chow, J. Gea-Banacloche, L. M. Pedrotti *et al.*. The ring laser gyro [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1985, **57**(1): 61~104
- 3 Di Nan, Zhao Jianlin, Jiang Yajun *et al.*. Experiment research on temperature response of Faraday effect in paramagnetic terbium glass [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1645~1648
- 4 底楠,赵建林,姜亚军等. 顺磁性铽玻璃法拉第效应温度特性实验研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(11): 1645~1648
- 4 Han Wenfa. Optimization of Faraday cell design in the four mode differential laser gyroscope [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. 12~62
- 5 韩文法. 四频差动激光陀螺法拉第室的优化设计[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005. 12~62
- 5 Zhao Kaihua, Chen Ximou. Electromagnetics (2nd edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. 352-367 (I), 549~560 (II)
- 5 赵凯华,陈熙谋. 电磁学(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2001. 352-367 (I), 549-560 (II)
- 6 Zhu Ping. Spatial distribution of magnetic field generated by current loop [J]. *College Physics*, 2005, **24**(9): 13~17
- 6 朱平. 圆电流空间磁场分布[J]. *大学物理*, 2005, **24**(9): 13~17
- 7 Zou Jibin, Liu Baoting, Cui Shumei *et al.*. Magnetic Circuit and Magnetic Field [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press. 1998. 15~16
- 7 邹继斌,刘宝廷,崔淑梅等. 磁路与磁场[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1998. 15~16
- 8 Yan Mi, Peng Xiaoling. Basis of Magnetism and Magnetic Materials [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press. 2006. 7~8
- 8 严密,彭晓领. 磁学基础与磁性材料[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2006. 7~8
- 9 Xia Pingchou. Permanent Magnetic Mechanism [M]. Beijing: Beijing Industrial University Press. 2000. 25~30
- 9 夏平畴. 永磁机构[M]. 北京:北京工业大学出版社, 2000. 25~30