

应用理论

多极磁性橡胶编码器的空间磁场分布仿真分析

田友峰^{1,2,3}, 柯玉超^{1,2*}, 梁一凡², 高水权^{2,3}, 夏迎松^{1,2}

(1. 高性能橡胶材料与制品安徽省重点实验室, 安徽 宁国 242300; 2. 安徽中鼎密封件股份有限公司, 安徽 宁国 242300; 3. 安徽库伯密封技术有限公司, 安徽 宁国 242300)

摘要: 基于空间磁场理论对多极磁性橡胶编码器的空间磁场分布开展仿真分析与试验研究, 获取磁感应强度在气隙高度方向和径向方向的变化规律, 证明了仿真分析的准确性。对磁极对数、磁性橡胶层厚度和宽度对多极磁性橡胶编码器的磁感应强度影响规律的仿真结果可为多极磁性橡胶编码器的设计提供指导。

关键词: 多极磁性橡胶编码器; 空间磁场分布; 磁感应强度; 磁性橡胶; 仿真分析

中图分类号: TQ336.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2024)03-0178-05

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2024.03.0178



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

多极磁性橡胶编码器主要作为测量转动角度和速度的传感器部件之一, 广泛应用于各类工况恶劣、精度要求较高的装备中, 如汽车ABS系统及发动机、风力发电机、机床、工程机械、航空设备等需要测速的系统及设备^[1-5]中。多极磁性橡胶编码器通过充磁将磁性橡胶圈环向等分为多对交叉分布的N极与S极, 利用磁场探测元件测量磁场变换, 进而换算成转角与转速。因此, 多极磁性橡胶编码器的磁场强弱及空间磁场分布精度将直接影响测试精度。

国内对于多极磁性编码器的研究主要集中在材料研制与试验方面。李振环等^[5]介绍了典型的汽车ABS系统用多极磁性橡胶编码器的结构、性能要求、研制要素及实施技术, 指出磁感应强度与磁极角度误差是主要技术指标。陈盛等^[6]结合时栅位移传感器的信号处理技术, 设计了分辨力达0.1°的高分辨力磁性编码器, 有效解决了磁性编码器精度问题。杨占锋等^[7]研制了一种可以对汽车ABS磁性编码器的磁感应强度、磁极偏差进行自动检测、分析的检测装置, 解决了磁编码器定量

试验分析问题。田友峰等^[8]试验研究了多极磁性橡胶编码器的空间磁场分布规律。针对多极磁性橡胶编码器的磁场仿真分析暂时未见报道, 但类似静态磁场的研究成果^[9-12]为本研究提供了参考思路。

本研究基于磁性橡胶的基本性能和多极磁性橡胶编码器的结构特性, 通过仿真分析与试验研究相结合的方法研究多极磁性橡胶编码器的空间磁场分布, 为多极磁性橡胶编码器的设计提供参考。

1 空间磁场分布理论

宏观电磁场的基本定律由麦克斯韦方程组描述:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \end{cases} \quad (1)$$

式中, \mathbf{H} 为磁场强度, \mathbf{J} 为电流密度, \mathbf{D} 为电感应强

作者简介: 田友峰(1981—), 男, 安徽颍上县人, 安徽中鼎密封件股份有限公司高级工程师, 学士, 主要从事橡胶材料及橡胶复合材料的相关研究。

*通信联系人(hgckeyuchao14@163.com)

引用本文: 田友峰, 柯玉超, 梁一凡, 等. 多极磁性橡胶编码器的空间磁场分布仿真分析[J]. 橡胶工业, 2024, 71(3): 178-182.

Citation: TIAN Youfeng, KE Yuchao, LIANG Yifan, et al. Simulation analysis on spatial magnetic field distribution of multipole magnetic rubber encoder[J]. China Rubber Industry, 2024, 71(3): 178-182.

度, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{B} 为磁感应强度, t 为时间, ρ 为电荷密度。

多极磁性橡胶编码器的磁场是一个恒定磁场, 即空间中 $\mathbf{J}=0, \rho=0, \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}=0$, 式(1)可以简化为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

采用矢量磁位来简化和辅助计算。由 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ 知, 可引入 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$, \mathbf{A} 即为矢量磁位, 单位为 $\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$ 。由 $\nabla \times \mathbf{H} = 0$ 和 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ (μ 为真空中的磁导率) 可得

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = 0 \quad (3)$$

认为 μ 为线性, 方程(3)可以变换为:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (4)$$

为确定 \mathbf{A} 的唯一性, 这里采用库伦规范 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$, 方程(4)化为

$$\nabla^2 \mathbf{A} = 0 \quad (5)$$

2 多极磁性橡胶编码器的仿真模型

多极磁性橡胶编码器主要由磁性橡胶和金属骨架组成, 磁性橡胶通过硫化粘接在金属骨架表面, 如图1所示。磁性橡胶经过硫化成型后, 通过充磁设备充磁, 就形成了表面有交替变化的磁极构成的多极磁性橡胶编码器。本研究多极磁性橡胶编码器的橡胶圈内径为33 mm, 厚度为0.9 mm, 宽度为5 mm。此外, 影响磁场强度的磁性橡胶的剩余磁感应强度为0.179 mT, 橡胶圈的磁极对数为36, 信号读取直径为38.5 mm。

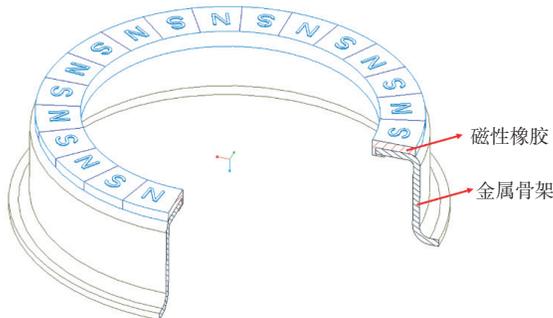


图1 多极磁性橡胶编码器示意

Fig. 1 Multipole magnetic rubber encoder

根据几何模型, 建立相应的分析模型, 将磁性橡胶环向分成 n 对磁极, 采用永磁模型, 每个磁极

设置极化方向向上或向下, 设置剩余磁感应强度为材料实际测得的剩余磁感应强度。除了磁性编码器的几何模型, 还需在外侧建立分析空间, 以便于计算磁场在空间中的分布, 如图2所示。

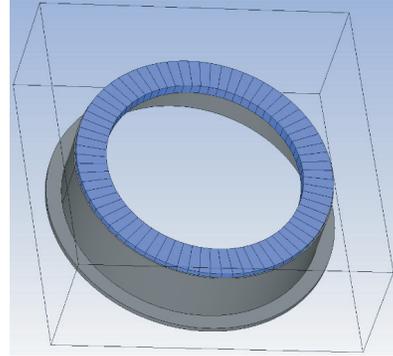


图2 多极磁性橡胶编码器的磁场计算域

Fig. 2 Magnetic field calculation domain of multipole magnetic rubber encoder

3 结果分析

多极磁性橡胶编码器的三维磁场分布如图3所示。其中, N极的磁感线从磁体内流出到磁体外, S极的磁感线从磁体外流入到磁体内。充磁过程中交替变化充磁方向, 磁性橡胶磁化后, 磁化方向向上, 则上方是N极, 下方是S极; 磁化方向向下, 则上方是S极, 下方是N极。在磁性橡胶编码器上方可以看到N极与S极沿环向交替排列, 磁极对数为36, 如图3(a)所示。由图3(b)可见: 代表磁感应强度矢量的矢量箭头在N极垂直磁性橡胶表面向外, 在S极垂直磁性橡胶表面向内; 在N极和S极交界处, 磁感应强度矢量由N极水平指向S极。

图4示出了测量高度为2.27 mm、直径为38.5 mm处的多极磁性橡胶编码器的磁感应强度环向分布规律。由图4可见, 磁感应强度的大小沿环向呈周期性变化。对于多极磁性橡胶编码器, 理论上磁感应强度沿环向各个周期的极大值与极小值是相同的, 但实际上由于磁性橡胶制造工艺和充磁工艺等因素的影响, 磁感应强度沿环向各个周期的极大值与极小值存在波动。多极磁性橡胶编码器的磁感应强度仿真结果与试验结果基本相同, 但仿真结果的极值绝对值略大, 这主要受制造工艺和充磁工艺的影响, 磁性橡胶内的磁性材料

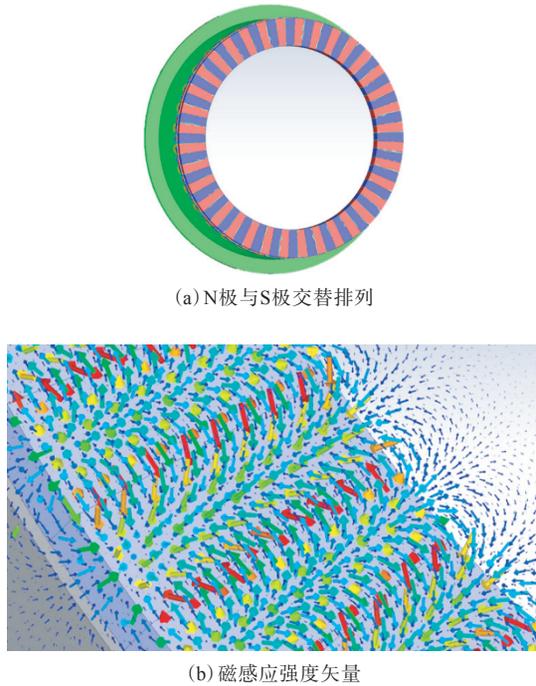


图3 多极磁性橡胶编码器的三维磁场分布
Fig. 3 3D magnetic field distribution of multipole magnetic rubber encoder

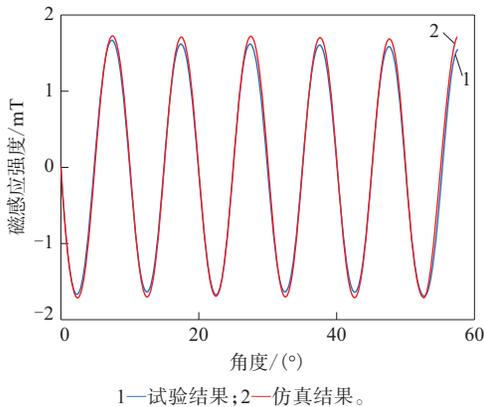


图4 磁感应强度环向分布
Fig. 4 Circular distributions of magnetic induction intensities 未全部磁化。

图5展示了多极磁性橡胶编码器的磁感应强度随气隙高度的变化,测量点为编码器轴向直径67 mm处。由图5可见:磁感应强度仿真结果与试验结果吻合非常好;磁感应强度随着气隙高度的增大迅速减小,到气隙高度为2 mm左右时,减小速度逐渐变缓。

图6示出了多极磁性橡胶编码器的磁感应强度与磁极对数的关系,测量直径为38.5 mm,测量高度为2.27 mm。由图7可见,其他参数不变的情况下,磁极对数越多,磁感应强度越小。这是由于

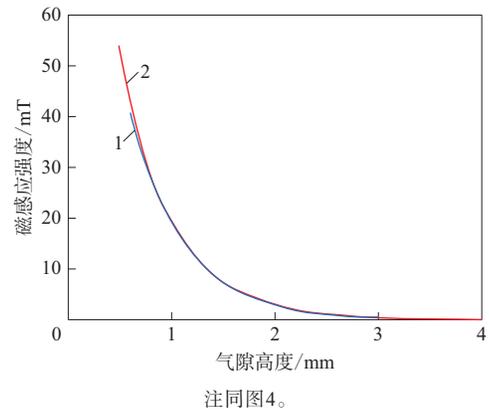


图5 磁感应强度随气隙高度的变化曲线
Fig. 5 Variation curves of magnetic induction intensities with air gap heights

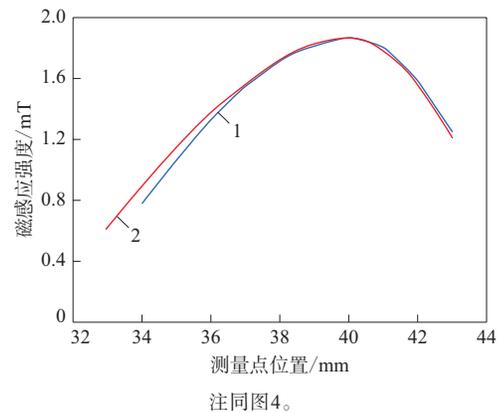


图6 磁感应强度径向分布
Fig. 6 Radial distributions of magnetic induction intensities 2.27 mm。由图6可见,磁感应强度仿真结果与试验结果吻合较好,磁感应强度随着测试点所在直径的增大呈现先增大后减小的趋势,最大磁感应强度点在直径40 mm附近。但由于试验数据采用了环向最大磁感应强度,而实际测试过程中环向部分区域的磁感应强度会较小,产生的误差主要由磁性橡胶中磁粉不均匀和充磁不均匀等因素导致。

此外,两种气隙下多极磁性橡胶编码器的磁感应强度径向分布极大值均靠近环外侧,这主要是由于磁极靠环外侧的部分比靠环内侧的部分宽,磁场叠加后自然更大。

图7示出了多极磁性橡胶编码器的磁感应强度与磁极对数的关系,测量直径为38.5 mm,测量高度为2.27 mm。由图7可见,其他参数不变的情况下,磁极对数越多,磁感应强度越小。这是由于

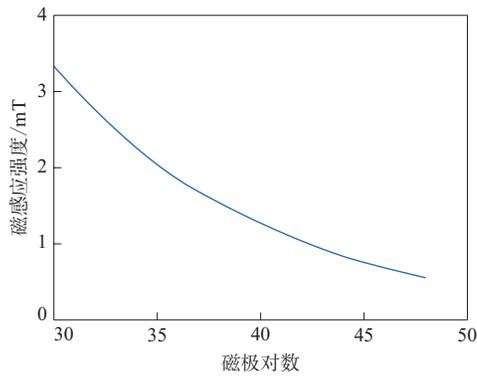


图7 磁感应强度与磁极对数的关系

Fig. 7 Relationship between magnetic induction intensities and number of magnetic pole pairs

多极磁性橡胶编码器的周长以及磁性橡胶的剩余磁感应强度不变,当磁极对数增多后,磁极宽度变窄,导致磁性橡胶上方的磁感应强度变小。虽然多极磁性编码器的磁极对数主要根据需求来确定,但磁极对数过多,磁极宽度过窄,会导致磁感应强度减小,需要在设计之初就考虑到。

图8示出了在其他参数不变时,多极磁性橡胶编码器的磁感应强度与磁性橡胶层厚度的关系。由图8可见,磁性橡胶层厚度增大,磁感应强度增大,这主要由于磁性橡胶层厚度增大使磁性材料用量增大。但是随着测量点与磁性橡胶表面的距离变大,磁感应强度迅速下降;磁性编码器下部增多的磁性橡胶由于与测量点距离较大,对测量点的磁场贡献逐渐减小,因此当磁性橡胶厚度增大到一定程度后,测量点的磁感应强度不再明显变大。

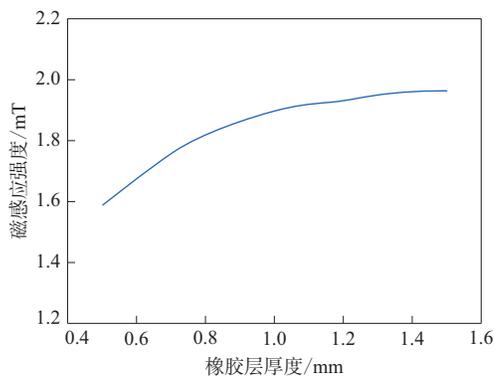


图8 磁感应强度与磁性橡胶层厚度的关系

Fig. 8 Relationship between magnetic induction intensities and magnetic rubber layer thicknesses

磁性橡胶层宽度也会对多极磁性橡胶编码器的磁感应强度造成影响。图9示出了多极磁性橡胶编码器的磁感应强度与橡胶层宽度的关系。由图9可见,磁感应强度随着磁性橡胶层宽度的增大基本呈线性增大趋势。但多极磁性橡胶编码器由于内部空间和充磁尺寸限制,磁性橡胶层宽度方向不能无限增大。

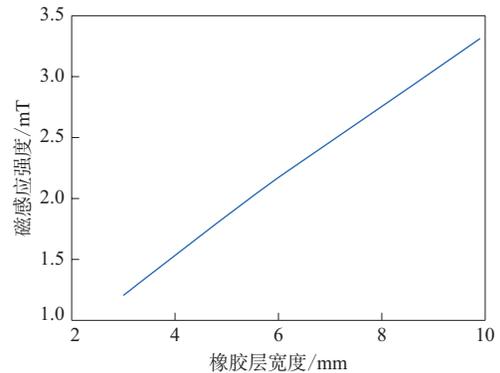


图9 磁感应强度与磁性橡胶层宽度的关系

Fig. 9 Relationship between magnetic induction intensities and magnetic rubber layer widths

4 结论

(1) 对多极磁性橡胶编码器的磁感应强度进行了仿真分析与试验研究,对比研究了磁感应强度随气隙高度和径向位置的变化规律,结果表明:磁感应强度随着气隙高度的增大而减小;磁感应强度随着径向位置向外移动先增大后减小;仿真结果与试验结果吻合非常好,证明了仿真方法的可靠性。

(2) 仿真分析了磁极对数、磁性橡胶层厚度和宽度对磁感应强度的影响,结果表明:磁感应强度随着磁极对数增多而减小;磁感应强度随着磁性橡胶层厚度和宽度的增大而增大。

参考文献:

- [1] 杜玉玲,马殿春,王丽华. 磁性编码器在凿岩钻机自动控制中的应用[J]. 煤矿机械,2006,27(2):349-351.
DU Y L, MA D C, WANG L H. Magnetism encoder in automatic control of drilling rig application[J]. Coal Mine Machinery, 2006, 27(2):349-351.
- [2] 张宇,闵子建,陈庆永,等. 磁旋转编码器在汽车测速系统中的应用[J]. 仪表技术与传感器,2008(9):76-77,98.

- ZHANG Y, MIN Z J, CHEN Q Y, et al. Application of magnetic rotary encoder in automobile speed-measuring system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2008 (9) : 76-77, 98.
- [3] 陈晋阳. 磁性橡胶在汽车上应用的现状和发展[J]. 中国橡胶, 2011, 27(14) : 33-36.
- CHEN J Y. Current situation and development of application of magnetic rubber in automobiles[J]. China Rubber, 2011, 27(14) : 33-36.
- [4] 康芳, 佟兴嘉, 张建亮. 磁性编码器在航空动力燃油系统试验中的应用[C]. 2012年航空试验测试技术学术交流会议论文集. 桂林: 《测控技术》编辑部, 2012: 61-63.
- [5] 李振环, 孔建, 杨家义, 等. 汽车ABS系统用多极磁性橡胶密封圈的研制、应用及展望[J]. 液压气动与密封, 2017, 37(3) : 1-5.
- LI Z H, KONG J, YANG J Y, et al. Development and prospect of magnetic sealing ring for automobile ABS system[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2017, 37(3) : 1-5.
- [6] 陈盛, 彭东林, 王淑娟, 等. 基于时栅传感技术的高分辨率磁编码器设计与研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(4) : 66-69.
- CHEN S, PENG D L, WANG S X, et al. Design and research of high resolution magnetic encoder based on time grating sensing technology[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(4) : 66-69.
- [7] 杨占锋, 马朝永, 徐鹏跃, 等. 汽车ABS磁性编码器检测装置研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(1) : 132-136.
- YANG Z F, MA Z Y, XU P Y, et al. Research on the inspection platform of magnetic encoder of ABS[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(1) : 132-136.
- [8] 田友峰, 柯玉超, 孙卫华, 等. 多极磁性橡胶编码器的制备与性能研究[J]. 橡胶工业, 2020, 67(12) : 890-893.
- TIAN Y F, KE Y C, SUN W H, et al. Preparation and performance of multipole magnetic rubber encoder[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(12) : 890-893.
- [9] RADIONOV A, PODOLTSEV A, ZAHORULKO A. Finite-element analysis of magnetic field and the flow of magnetic fluid in the core of magnetic-fluid seal for rotational shaft[J]. Procedia Engineering, 2012, 39: 327-338.
- [10] 杨帆, 刘露露. 基于Ansoft Maxwell的永磁磁力耦合器磁场分析[J]. 煤矿机电, 2019, 40(3) : 26-28.
- YANG F, LIU L L. Magnetic field analysis of permanent magnetic coupler based on Ansoft Maxwell[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2019, 40(3) : 26-28.
- [11] 熊君, 胡国辉, 全小康, 等. 基于Ansoft Maxwell仿真分析的永磁应用磁路优化设计例析[J]. 磁性材料及器件, 2018, 49(6) : 28-33.
- XIONG J, HU G H, QUAN X K, et al. Design analysis on applicable permanent magnetic circuit based on Ansoft Maxwell[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2018, 49(6) : 28-33.
- [12] 樊红卫, 景敏卿, 张旭辉, 等. 电主轴用电磁式主动平衡装置启动磁场仿真分析[J]. 磁性材料及器件, 2017, 48(2) : 18-24.
- FAN H W, JING M Q, ZHANG X H, et al. Simulation and analysis on starting magnetic field of electromagnetic active balancing device for motorized spindle[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2017, 48(2) : 18-24.

收稿日期: 2023-12-16

Simulation Analysis on Spatial Magnetic Field Distribution of Multipole Magnetic Rubber Encoder

TIAN Youfeng^{1,2,3}, KE Yuchao^{1,2}, LIANG Yifan², GAO Shuiquan^{2,3}, XIA Yingsong^{1,2}

(1. Key Laboratory of High-performance Rubber & Products of Anhui Province, Ningguo 242300, China; 2. Anhui Zhongding Sealing Parts Co., Ltd, Ningguo 242300, China; 3. Anhui Cooper Sealing Technology Co., Ltd, Ningguo 242300, China)

Abstract: Simulation analysis and experimental research on the spatial magnetic field distribution of the multipole magnetic rubber encoder were carried out based on the spatial magnetic field distribution theory. The variation rule of magnetic induction intensity in the air gap height direction and radial direction was obtained, which proved the accuracy of the simulation analysis. The simulation results of the influence of the magnetic pole pairs, the thickness and the width of the magnetic rubber layer on the magnetic induction intensity of the multipole magnetic rubber encoder could provide guidance for the design of multipole magnetic rubber encoders.

Key words: multipole magnetic rubber encoder; spatial magnetic field distribution; magnetic induction intensity; magnetic rubber; simulation analysis