

弧形永磁体外部磁场的均匀性分析^{*}康 瑞¹ 郭彦青¹ 段志强² 张盼盼¹ 高宏伟²

(1. 中北大学机械工程学院 太原 030051; 2. 陕西晟思智能测控有限公司 西安 712000)

摘要: 在精密测量和航空航天领域,类磁栅位移传感器对永磁体产生磁场的均匀性有很高的要求,但常见的永磁体磁场均匀性较差,从而影响液压缸位移的高精确、高可靠测量。因此,本文设计了一种具有独特结构的弧形永磁体,首先基于分子电流假说和比奥-萨伐尔定律,推导弧形永磁体在空间任一点产生磁感应强度的表达式;其次利用Maxwell电磁场分析软件对永磁体的结构尺寸进行优化,确定弧形永磁体的基本尺寸;最后搭建实验平台测量永磁体对应位置处的磁感应强度,通过对比实测数据和Maxwell仿真数据,结果表明:仿真与实验结果基本吻合,弧形永磁体能够产生较为均匀的磁场,磁场均匀区域的相对误差最大不超过3%;在类磁栅位移传感器的实际应用中,敏感元件在弧形永磁体均匀磁场内测试得到一致性较好的简谐信号,为传感器后续细分处理保证信号质量,从而提升传感器的测试精度,进一步证明了弧形永磁体产生均匀磁场的实际意义。

关键词: 弧形永磁体;均匀磁场;磁感应强度;Maxwell电磁仿真;类磁栅位移传感器

中图分类号: TN203 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 535.1020

Uniformity analysis of external magnetic field of curved permanent magnet

Kang Rui¹ Guo Yanqing¹ Duan Zhiqiang² Zhang Panpan¹ Gao Hongwei²

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shaanxi Sens Smart Measure Control Co., Ltd., Xi'an 712000, China)

Abstract: In the field of precision measurement and aerospace, the magnetic-grating-like displacement sensor has high requirements on the uniformity of magnetic field generated by permanent magnet. While the magnetic field uniformity of common rectangular permanent magnet is poor, which affects the high precision and reliable measurement of hydraulic cylinder displacement. Therefore, this paper designed a curved permanent magnet with a unique structure. First based on the molecular current hypothesis and the Biot-Savart Law, to derive the expression of the magnetic induction intensity of a curved permanent magnet at any point in space; then, the structure size of the permanent magnet was optimized using the Maxwell electromagnetic field analysis software, to determine the basic size of the curved permanent magnet; finally, the experimental platform is built to measure the magnetic induction intensity at the corresponding position of the permanent magnet. By comparing the measured data and Maxwell simulation data, the results show that the simulation is basically consistent with the experimental results. The curved permanent magnet can produce a uniform magnetic field, and the relative error of the uniform field does not exceed 3%. In the practical application of the Magnetic-grating-like displacement sensor, the sensitive element tests the uniform magnetic field, ensuring the signal quality for the subsequent subdivision of the sensor, thus improving the test accuracy of the sensor, which further proves the practical significance of the arc permanent magnet.

Keywords: curved permanent magnet; uniform magnetic field; magnetic induction intensity; Maxwell electromagnetic simulation; the magnetic-grating-like displacement sensor

0 引言

在精密测量和航空航天等领域,永磁体外部磁场的均

匀性对装置的物理设计与研制有着重要影响。永磁体作为一种独特的材料,不仅可以用来制造各种控制装置、飞行器导航系统等^[1-3],还可以用来制造各种高灵敏度的传感

器^[4-5],如类磁栅位移传感器。类磁栅位移传感器是一种高集成、易维护、精度满足要求的新型液压缸位移测量技术,其结构主要由永磁体、敏感元件和活塞杆组成。永磁体用来产生激励磁场,敏感元件通过检测磁场的变化情况,从而实现位移的测量^[6]。类磁栅位移传感器的性能在很大程度上取决于所处磁场的质量,如果磁场不均匀,会影响测量的准确性。

目前,常见的永磁体形状有圆柱形永磁体、方形永磁体和环形永磁体等。周恩全等^[7]推导了圆柱形永磁体空间磁感应强度解析式,并通过 MATLAB 求解出理论值与实验测量值进行对比,结果基本吻合。然而通过分析其数据发现圆柱形永磁体产生的磁场存在不均匀问题。何永周^[8]以矩形永磁体为例,分析了影响永磁体外部磁场不均匀性的因素主要与空间距离及永磁体的外形设计有关,但其主要是从磁学与磁材料方面进行研究。除了常见的圆柱形和方形永磁体,根据特定的应用需求,永磁体还可以被设计成一些非标准形状,如弧形(瓦形、面包形)永磁体等。这种异形永磁体在磁共振成像(MRI)等医疗设备领域^[9]和飞行器姿态控制等航空航天领域中都有着广泛的应用。Wu 等^[10]设计了一种不等厚弧形永磁体用于永磁无刷直流电机中,并分析了永磁体厚度、半径对齿槽转矩的影响,但没有过多描述弧形永磁体结构对磁场强度及磁场均匀性的影响。范璐等^[11]采用多个镶嵌分布的瓦形永磁体,可以使磁场能量聚集在加工区域,提高加工效率,但其磁场均匀性指标不明确,难以确定磁场均匀程度。其次,线圈和永磁体的拓扑结构能够产生均匀磁场^[12],但其结构复杂,在空间狭窄的环境下难以适用,且以上研究多聚焦于多个永磁体,对单独弧形永磁体产生的磁场强度以及磁场均匀性鲜少研究。因此,设计一种能够产生均匀磁场的新型永磁体,意义重大。

为了解决常见永磁体磁场分布不均匀的问题,本文设计了一种具有特殊结构的弧形永磁体能够产生较为均匀的磁场。首先,通过建立弧形永磁体的数学模型,找到影响磁感应强度大小的因素;其次,通过 Maxwell 仿真软件对永磁体的结构尺寸进行仿真分析,在保证磁感应强度的同时,进一步确定弧形永磁体的基本尺寸;最后,搭建实验平台验证弧形永磁体能够产生较为均匀的磁场,以及可以进一步改善类磁栅位移传感器中敏感元件的响应信号,证明了本文所提出结构的可行性,该结构对于类磁栅位移传感器等其他需要产生均匀磁场的设备具有重要意义。

1 弧形永磁体数学模型

本文以弧形永磁体为例,对任一弧形永磁体,假设其长、宽、高尺寸分别为: $2a$ 、 $2b$ 、 $2c$,以米为单位。将永磁体按轴对称的方式布置在正交坐标系中, $\mathbf{M}$ 与 z 轴平行,且指向 Z 轴负方向。如图 1 所示,弧形永磁体的边长满足以下条件:

$$\begin{cases} BC = B'C' = AD = A'D' = 2a \\ AA' = BB' = CC' = DD' = 2b \\ AB = A'B' = DC = D'C' = 2c \end{cases} \quad (1)$$

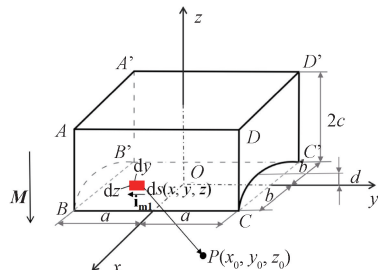


图 1 弧形永磁体对空间任一点 P 的磁感应强度

Fig. 1 Magnetic induction strength of an arc permanent magnet to any point P in space

依据物质磁化理论,弧形永磁体在空间的磁场分布,完全由 $ADD'A'$, $BCC'B'$, $ABCD$, $A'B'C'D'$, $ABB'A'$, $DCC'D'$ 6 个表面决定,现分别讨论各表面在空间任一点所产生的磁感应强度情况。

本文选用 N35 标号的钕铁硼作为弧形永磁体材料,其剩余磁感应强度为^[13]: $B_r = 1.2 \text{ T}$ 。由磁场强度公式 $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}$ 可得: $\mathbf{M} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{H}$, 其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 为真空中的磁导率。由于剩磁在磁场强度时测得,则永磁体的剩余磁化强度模如式(2)所示。

$$|\mathbf{M}_r| = \left| \frac{\mathbf{B}_r}{\mu_0} \right| = \frac{1.2}{4\pi \times 10^{-7}} \approx 954\,930 \text{ (A/m)} \quad (2)$$

由于平面 $ADD'A'$, $BCC'B'$ 的法线与磁化强度 $\mathbf{M}$ 方向平行,这两个平面所产生的磁化电流面密度为 0,由此可知该两平面在空间任一点所产生的磁感应强度为 $0 \text{ N/(A}\cdot\text{m)}$ 。

在平面 $ABCD$ 中,其法向单位矢量 $\mathbf{e}_n = \{0, 0, -1\}$,永磁体磁化单位向量: $\mathbf{e}_M = \{0, 0, -1\}$,从而可得平面 $ABCD$ 任一点处的磁化电流面密度:

$$\mathbf{i}_{m1} = \mathbf{M} \times \mathbf{e}_n = 954\,930 \times \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -954\,930 \mathbf{j} \quad (3)$$

通过式(3)可知,平面 $ABCD$ 的磁化电流面密度只有沿 y 轴的分量,且指向 y 轴的负方向。对于平面 $ABCD$ 上的任一微面元 ds 来说,当该面元很小时,其位置可由面元上的任一点坐标 $\{x, y, z\}$ 来表示,如面元 ds 的长和高分别为 dy, dz 。则面元 ds 上的电流值为: $\mathbf{I}_{m1} = \mathbf{i}_{m1} dz = -954\,930 \mathbf{j} dz$ 。

依据分子电流假说和比奥 - 萨伐尔定律,面元 ds 在空间任一点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 处所产生的磁感应强度^[14]如式(4)所示。

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{i}_{m1} dz dy \times \mathbf{e}_r}{|\mathbf{r}|^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{-954\,930 \mathbf{j} dz dy \times [(x_0 - x)\mathbf{i} + (y_0 - y)\mathbf{j} + (z_0 - z)\mathbf{k}]}{[(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2]^{3/2}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{[-954\,930(z_0 - z)\mathbf{i} + 954\,930(x_0 - b)\mathbf{k}] dz dy}{[(x_0 - b)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2]^{3/2}} \quad (4)$$

永磁体上,整个平面 $ABCD$ 对点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 产生的磁感应强度:

$$\mathbf{B}_{ABCD} = \iint_D \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{i}_m dz dy \times \mathbf{e}_r}{|\mathbf{r}|^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-a}^a \left[\int_0^{2c} \frac{[-954\ 930(z_0 - z)\mathbf{i} + 954\ 930(x_0 - b)\mathbf{k}]}{[(x_0 - b)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2]^{3/2}} dz \right] dy \quad (5)$$

同理可得平面 $A'B'C'D'$, $ABB'A'$, $DCC'D'$ 对点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 产生的磁感应强度如式(6)所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{A'B'C'D'} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-a}^a \left[\int_0^{2c} \frac{[954\ 930(z_0 - z)\mathbf{i} - 954\ 930(x_0 + b)\mathbf{k}]}{[(x_0 + b)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2]^{3/2}} dz \right] dy \\ \mathbf{B}_{ABB'A'} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-b}^b \left[\int_0^{2c} \frac{[-954\ 930(y_0 + a)\mathbf{k} + 954\ 930(z_0 - z)\mathbf{j}]}{[(x_0 - x)^2 + (y_0 + a)^2 + (z_0 - z)^2]^{3/2}} dz \right] dx \\ \mathbf{B}_{DCC'D'} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-b}^b \left[\int_0^{2c} \frac{[954\ 930(y_0 - a)\mathbf{k} - 954\ 930(z_0 - z)\mathbf{j}]}{[(x_0 - x)^2 + (y_0 - a)^2 + (z_0 - z)^2]^{3/2}} dz \right] dx \end{aligned} \quad (6)$$

综上所述,弧形永磁体在空间任一点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 产生的磁感应强度如式(7)所示。

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_{ABCD} + \mathbf{B}_{A'B'C'D'} + \mathbf{B}_{ABB'A'} + \mathbf{B}_{DCC'D'} \quad (7)$$

从式(4)~(6)可以看出:在相同的介质条件下,空间中任一点处的磁感应强度取决于永磁体的结构尺寸以及物体与永磁体表面之间的距离。为了产生较为均匀的磁场且保证磁场强度的大小,下面通过 Maxwell 仿真来进行弧形永磁体的结构优化,以便进一步确定弧形永磁体的基本尺寸。

2 不同结构尺寸对磁感应强度的影响

为了直观地展示各结构尺寸对磁感应强度和磁场均匀性的影响。本文使用 Ansys Maxwell 电磁场分析软件对物体距永磁体表面的距离、永磁体长度、宽度、厚度以及弯曲弧度对永磁体中心轴线上磁感应强度的影响情况进行仿真分析,以便确定弧形永磁体的基本尺寸。弧形永磁体在 Maxwell 软件中的仿真模型如图 2 所示。

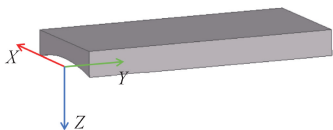


图 2 弧形永磁体模型

Fig. 2 Curved permanent magnet model

2.1 物体距永磁体表面的距离对磁感应强度的影响

物体与弧形永磁体之间的距离是可变化的,为方便讨论,永磁体的材料选用 NdFe35,将其他尺寸固定,仅研究该尺寸变化对磁感应强度及磁场均匀性的影响。依据永磁体常见结构尺寸,将永磁体尺寸设定如下:

长:20 mm、宽:5 mm、厚度:2 mm、弧度: $R=11$ mm,物体距永磁体表面距离的变化范围为 1~10 mm,以 1 mm 的变化间隔对其进行讨论,得到距永磁体不同距离下的磁感应强度曲线如图 3 所示。

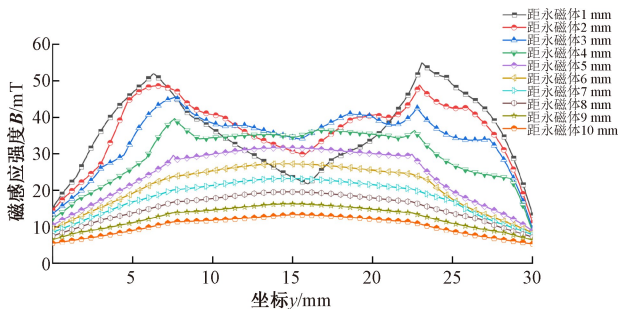


图 3 距永磁体表面不同距离下的磁感应强度

Fig. 3 Magnetic induction intensity at different distances from the surface of the permanent magnet

由图 3 可以看出,在其他尺寸不变的条件下,距离永磁体表面距离越近磁感应强度越强,同时存在较大的不均匀性;当距离达到 4 mm 时,磁感应强度已逐渐趋于稳定。为保证磁场的均匀性,物体距离永磁体表面的最佳距离为 4~10 mm。

2.2 永磁体弯曲弧度对磁感应强度的影响

弧形永磁体弯曲的弧度是可变化的。为方便讨论,在实际仿真过程中,将其他尺寸固定,仅研究弧度变化对磁感应强度及磁场均匀性的影响。依据常见的永磁体结构,将尺寸设定如下:

长:20 mm、宽:10 mm、高:2 mm、距离永磁体表面:5 mm、弧度变化为 $0^\circ \sim 80^\circ$,以 10° 的变化间隔对其进行仿真分析,得到永磁体在不同弧度下产生的磁感应强度曲线如图 4 所示。

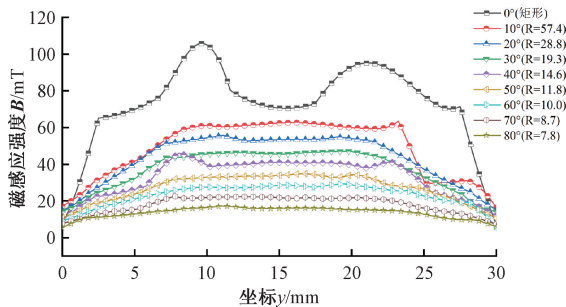


图 4 不同弧度下的磁感应强度

Fig. 4 Magnetic induction intensity at different radians

由图 4 可以看出,在其他尺寸不变的条件下,当弧度达到 20° 以上时产生的磁场较为均匀。为保证磁感应强度的大小,在此取 $20^\circ (R=28.8$ mm)。

2.3 永磁体厚度对磁感应强度的影响

永磁体的厚度会影响磁感应强度的大小,增加永磁体的厚度可以增加永磁体的磁感应强度^[15]。本节主要讨论永磁体厚度对磁感应强度及磁场均匀性的影响。厚度变化时,其他尺寸固定,具体参数如下:

距离永磁体表面:5 mm、弧度: $R=28.8$ mm、长度:20 mm、宽度:10 mm、厚度:1~5 mm,间隔 1 mm。

永磁体厚度变化时,产生的磁感应强度曲线如图 5 所示。

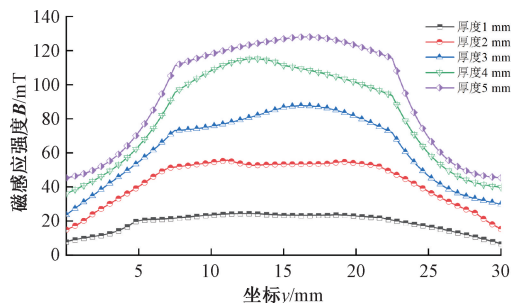


图 5 不同厚度下的磁感应强度

Fig. 5 Magnetic induction intensity at different thicknesses

由图 5 可以看出,永磁体厚度对磁感应强度有较大影响,当永磁体厚度较小时,磁感应强度也比较小,但磁场均匀性较好,随着厚度的增加,磁感应强度也逐渐变大,磁场均匀性有小范围波动,在此取 2 mm。

2.4 永磁体长度和宽度对磁感应强度的影响

永磁体宽度和长度也是影响磁感应强度的重要尺寸,依据上面得到的结果,讨论宽度对磁感应强度和磁场均匀性的影响,将永磁体的各尺寸设定如下:

距离永磁体表面:5 mm、弧度: $R=28.8$ mm、长度:20 mm、宽度:10 mm、厚度:2 mm、宽度 5~15 mm,间隔 1 mm,结果如图 6 所示。

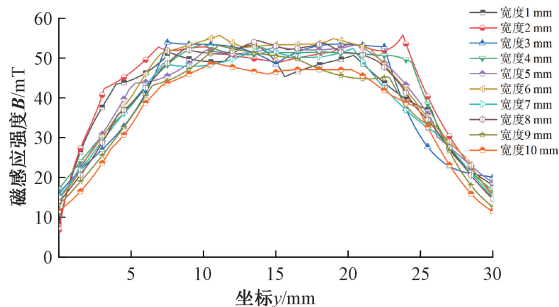


图 6 不同宽度下的磁感应强度

Fig. 6 Magnetic induction intensity at different widths

当永磁体宽度变化时,永磁体磁感应强度如图所示。由图 6 可知,宽度对中心轴线上磁感应强度的影响较小,在此取 10 mm。

最后,在确定了其他尺寸的基础上,讨论长度对磁感应强度和磁场均匀性的影响。主要尺寸设定如下:

距离永磁体表面:5 mm、弧度: $R=28.8$ mm、长度:20 mm、宽度:10 mm、厚度:2 mm、宽度:10 mm、长度:5~50 mm,间隔 5 mm。

永磁体长度变化时,其中心轴线上产生的磁感应强度如图 7 所示。

由图 7 可以看出,永磁体长度对中心轴线上磁感应强度有较大影响,当永磁体长度较小时,磁感应强度幅值较

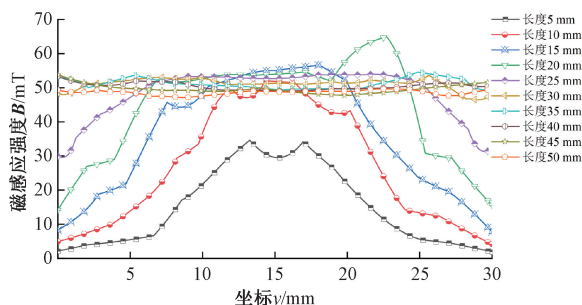


图 7 不同长度下的磁感应强度

Fig. 7 Magnetic induction intensity at different lengths

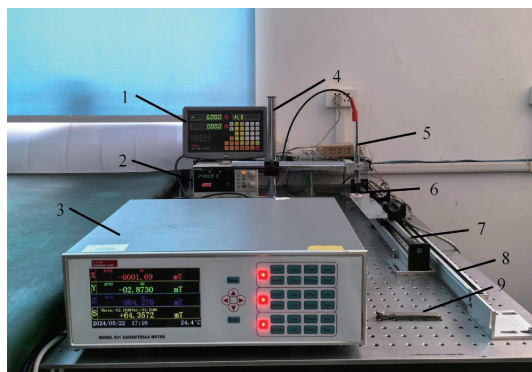
小且磁场均匀性较差,随着长度的增加,磁感应强度也逐渐变大。当永磁体长度增加到一定程度(>30 mm)时,磁感应强度大小变化不再明显,磁场均匀性较好,在此取 30 mm。

综上所述,通过对上面各尺寸变化时的磁感应强度曲线进行分析,进一步确定了弧形永磁体的基本尺寸:30 mm×10 mm×2 mm,弯曲弧度: $R=28.8$ mm。

3 实验及结果分析

3.1 弧形永磁体磁场均匀性实验验证

为验证弧形永磁体模型的准确性,可采用实测数据进行分析对比。对永磁体进行磁场强度测试,其中永磁体材料选用 NdFe35,尺寸为 30 mm×10 mm×2 mm, $R=28.8$ mm,充磁方向沿厚度方向。具体测试时将永磁体的 N 极对准 z 轴的正方向,建立对应的直角坐标系,并在 zoy 平面布置相应的测试点,采用 Model 931 数字化高精度三维高斯计,测量永磁体中心轴线处不同位置的磁感应强度。实验平台如图 8 所示。



1-数显表,2-程控电源,3-高斯计,4-固定装置,5-三维霍尔探头,6-永磁体,7-随动平台,8-光栅尺,9-高精度塞尺

图 8 实验平台

1-Digital display meter, 2-Programmed power supply, 3-Gaussian meter, 4-Fixing device, 5-3D Hall probe, 6-Permanent magnet, 7-Following platform, 8-Grating ruler, 9-High precision plug ruler

Fig. 8 Experimental platform

如图 8 所示,整个实验平台由高斯计、永磁体、程控电源、数显表、随动平台、三维霍尔探头固定装置,高精度塞尺等组成。程控电源用来给随动平台供电,光栅尺数显表监测位置变化情况,高斯计三维探头用来测试对应点的磁感应强度,固定装置用来固定高斯计探头,高精度塞尺用来确定霍尔探头与永磁体之间的距离,具体测试方案示意图^[16]如图 9 所示。

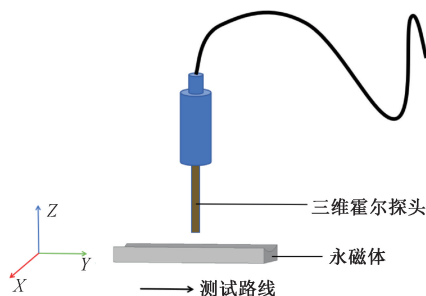


图 9 磁感应强度测试方案

Fig. 9 Magnetic induction strength test scheme

根据以上磁感应强度测试方案,在相应的测试点处进行 3 次重复性测量,3 次测量的标准差均小于 1,测量过程具有良好的稳定性^[17],得到实测数据与 Maxwell 软件仿真数据对比结果如图 10 所示。

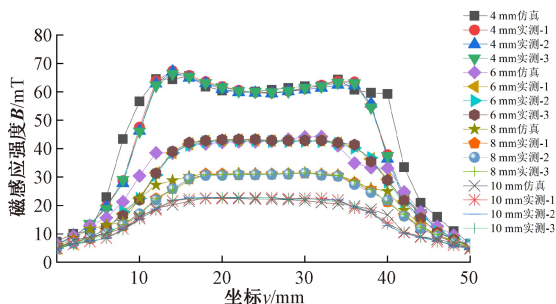


图 10 仿真数据与实测数据对比

Fig. 10 Comparison of simulation data and measured data

由图 10 可知,Maxwell 仿真数据与实测数据具有较高的相似度和一致性,反映了所建立模型的准确性。其次,仿真数据与实测数据有一定的差值,该差值多发生在永磁体边缘位置,产生差异的原因可能来自永磁体制造过程中产生的加工误差和实际测量时带入的测量误差,但不妨碍对模型准确性的判断。同时可以观察到,在永磁体的中心轴线上,永磁体边缘位置处磁场均匀性较差,中间区域 16~34 mm 处产生的磁场较为均匀。

其在 16~34 mm 位置处的仿真与实测数据的相对误差分布如图 11 所示。

通过以上比较可见,弧形永磁体模型的磁场仿真结果基本准确,仿真数据与实测数据在磁场均匀处的相对误差^[18]基本不超过 3%。同时可以看出,随着距离的增大,

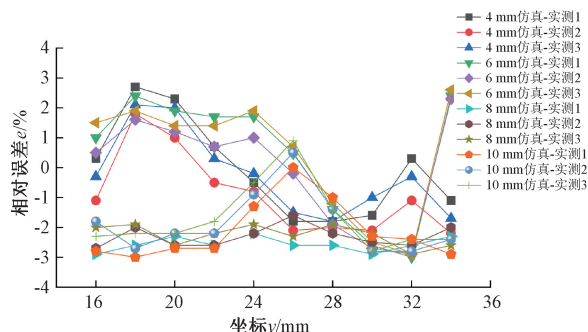


图 11 仿真数据与实测数据在磁场均匀处的相对误差

Fig. 11 Relative error between simulated and measured data

8 mm 和 10 mm 处的相对误差普遍较大,且实测值绝大部分小于仿真值,主要原因可能是仿真模型的理想化假设以及随着距离的增大,磁感应强度减弱,实际测量过程中受环境因素的影响较大,且 8 mm 和 10 mm 处实测值本身相对较小,计算过程中分母较小也是导致相对误差较大的一个原因。

3.2 类磁栅位移传感器测试

类磁栅位移传感器能较好的应用于新型液压作动机构,其结构主要包括 3 部分:永磁体、敏感元件和活塞杆,如图 12 所示。其中,活塞杆表面被加工成多个凹凸相间的栅齿结构,敏感元件置于活塞杆旁边。当敏感元件和活塞杆发生相对移动时,每移动一个栅齿的距离,就会在敏感元件上产生一个简谐信号,通过对简谐信号的计数和进一步处理,即可实现位移测量。所以,产生理想的简谐信号是液压缸位移测量的关键。

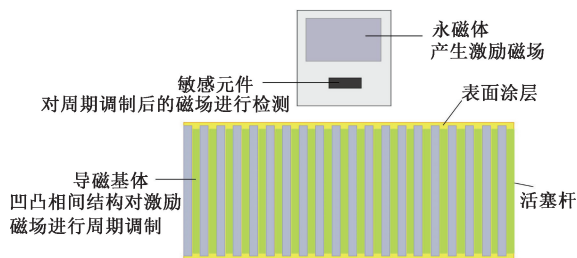


图 12 类磁栅位移传感器结构

Fig. 12 Magnetic-grating-like displacement sensor structure

为了考察弧形永磁体对敏感元件响应的影响,选择相同尺寸的矩形永磁体做对比,对敏感元件的响应信号进行测试,测试结果如图 13 所示。

如图 13 所示,图 13(a)是弧形永磁体下敏感元件的响应信号曲线,图 13(b)是矩形永磁体下敏感元件的响应信号曲线,可以看出,相比矩形永磁体,敏感元件在弧形永磁体均匀磁场内测试得到的简谐信号具有较好的一致性,利于信号后期处理,从而提升传感器的测量精度,进一步验证了该结构的可行性。

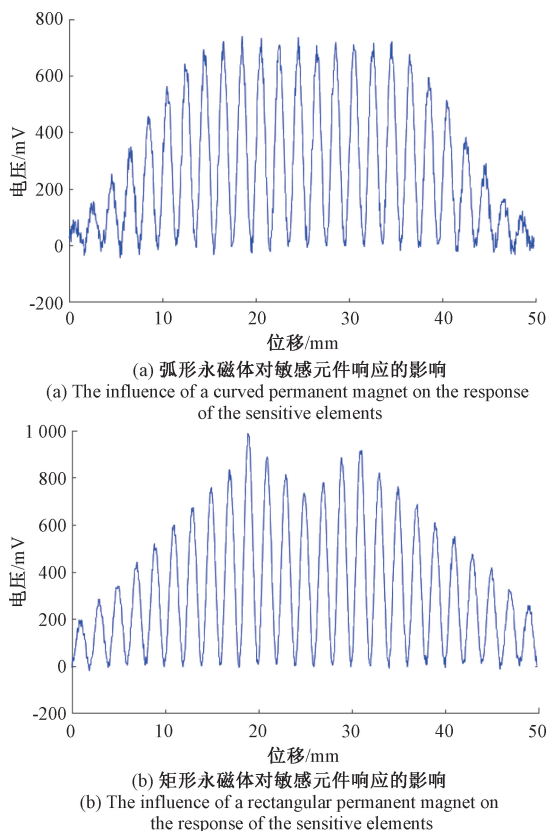


图 13 不同永磁体对敏感元件响应的影响

Fig. 13 The influence of different permanent magnets on the response of sensitive element

4 结 论

本文设计了一种能够产生均匀磁场的弧形永磁体,推导出了弧形永磁体在空间任一点产生的磁感应强度解析式,为弧形永磁体结构的分析提供了理论依据。通过 Maxwell 仿真确定了上述永磁体满足均匀性条件的最佳结构尺寸。最后搭建实验平台测定了该永磁体对应位置处的磁感应强度,结果表明,弧形永磁体能够产生较为均匀的磁场,并且在磁场均匀区域的相对误差不超过 3%。同时,在类磁栅位移传感器的实际应用中,敏感元件在弧形永磁体均匀磁场区域测试得到的简谐信号一致性较好,为传感器的准确性测量奠定了基础。本文设计的弧形永磁体不仅可以应用于类磁栅位移传感器,还可应用于精密测量和航空航天等领域其他需要产生均匀磁场的高精度永磁装置,具有较大的实际意义。

参考文献

- [1] 王润,杨宾峰,孙欢,等.基于磁梯度张量的旋转永磁体定位技术[J].系统工程与电子技术,2020,42(9):2085-2090.
WANG R, YANG B F, SUN H, et al. Rotating permanent magnet positioning technology based on

magnetic gradient tensor[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(9): 2085-2090.

- [2] 李庆伟,徐冬秦,牛福洲,等.机械-电磁混合驱动磁控微机器人系统设计[J].机械设计与制造工程,2023,52(2):9-13.
LI Q W, XU D Q, NIU F ZH, et al. Design of magnetic-controlled microrobotdriven system by mechanical-electromagnetic hybrid[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2023, 52(2): 9-13.
- [3] 陈云云,李紫茵,周鑫,等.复合结构混合永磁电机抗退磁性能分析及优化[J].电子测量技术,2023,46(11):1-6.
CHEN Y Y, LI Z Y, ZHOU X, et al. Analysis and optimization of anti-demagnetization performance of composite structure hybrid permanent magnet motor[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(11): 1-6.
- [4] 孙英,武泽航,张耀松.永磁体对磁致伸缩位移传感器波导丝扭转应变的影响分析[J].仪器仪表学报,2021,42(4):10-23.
SUN Y, WU Z H, ZHANG Y S. Analysis of the influence of permanent magnet on the torsional strain of waveguide wire of the magnetostrictive displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 10-23.
- [5] 乔海,高云鹏,陈进华,等.基于面包形磁钢的直线电机位置检测技术应用[J].电机与控制应用,2023,50(8):46-51.
QIAO H, GAO Y P, CHEN J H, et al. Application of linear motor position detection technology based on bread shaped magnet steel[J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(8): 46-51.
- [6] 李闯闯,郭彦青,付永领.类磁栅液压缸位移传感器工作机理及仿真分析[J].液压与气动,2018(1):65-70.
LI CH CH, GUO Y Q, FU Y L. Working mechanism and simulation analysis of displacement sensor for magnetic-like cylinde [J]. Chinese Hydraulic and Pneumatic, 2018(1): 65-70.
- [7] 周恩权,郑仲桥,张燕红,等.圆柱形永磁体磁场建模及仿真研究[J].河南科技,2017(21):139-143.
ZHOU EN Q, ZHEN ZH Q, ZHANG Y H, et al. Modeling and simulation for cylinder permanent magnetic field [J]. Henan Science and Technology, 2017(21): 139-143.
- [8] 何永周.永磁体外部磁场的不均匀性研究[J].物理学报,2013,62(8):145-151.
HE Y ZH. Inhomogeneity of external magnetic field for permanent magnet[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(8): 145-151.
- [9] 程艺苑,苏明阳,万书佳,等.基于 ANSYS 的便携 MRI

- 系统中环对型永磁体仿真[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(6): 148-152.
- CHENG Y Y, SU M Y, WAN SH J, et al. Simulation of ring-pair permanent magnet for the portable magnetic resonance imaging system based on ANSYS[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2022, 41(6): 148-152.
- [10] WU SH SH, WANG B J, ZHANG T, et al. Design optimization and electromagnetic performance analysis of an axial-flux permanent magnet brushless DC motor with unequal-thickness magnets[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15): 7863.
- [11] 范璐, 李唯东, 杨胜强, 等. 基于液体磁性磨具的相对式磁极头设计及实验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 353-360, 369.
- FAN L, LI W D, YANG SH Q, et al. Design and experimental study of opposite magnet pole based on fluid magnetic abrasives [J]. Surface Technology, 2019, 48(6): 353-360, 369.
- [12] 李想. 高均匀度核磁共振 Halbach 磁体研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- LI X. Study on high-uniformity NMR Halbach magnets[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [13] 郭志明, 梁亮, 蔺代永. 胶囊机器人磁驱动力建模与测量[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 253-261.
- GUO ZH M, LIANG L, LIN D Y. Modeling and measurement of magnetic driving force in the capsule robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 253-261.
- [14] 李赛, 郭彦青, 段志强, 等. 基于 MAXWELL 的磁栅传感器磁场仿真分析[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(4): 8-11, 14.
- LI S, GUO Y Q, DUAN ZH Q, et al. Magnetic field simulation and analysis of magnetic grating sensor based on MAXWELL[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(4): 8-11, 14.
- [15] 喻曹丰, 杨坤, 郑爽, 等. 基于 Halbach 阵列宏微复合驱动器的输出力优化研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(13): 37-42.
- YU C F, YANG K, ZHENG SH, et al. Output force optimization analysis of the macro-micro composite actuator based on Halbach array[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(13): 37-42.
- [16] TAZAWA T, YAMAGUCHI H. Synthesis of identical pole permanent magnet [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021(537): 168180.
- [17] 张少峰, 李强, 费飞, 等. 基于 MLS 检测的一维绝对位移的误差分析与标定[J]. 电子测量技术, 2019, 42(7): 68-73.
- ZHANG SH F, LI Q, FEI F, et al. Error analysis and calibration of one dimensional absolute displacement based on MLS detection[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(7): 68-73.
- [18] 刘少飞. 永磁系统与通电线圈静磁场求解以及应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- LIU SH F. Static magnetic field solution and application research of permanent magnet system and energized coil[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.

作者简介

康瑞, 硕士研究生, 主要研究方向为机器表面感知、机电系统高精度控制。

E-mail: 18395450284@163.com

郭彦青(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为智能感知与模式识别。

E-mail: 376719455@qq.com