

爬壁机器人永磁轮优化设计

闫海涛¹, 徐凤辉², 张云^{1*}

1. 山东交通学院轨道交通学院, 山东 济南 250357; 2. 济南吉美乐电源技术有限公司, 山东 济南 250104

摘要:为解决爬壁机器人永磁轮体积较大、质量较大、吸附力较小等问题,以减小永磁轮质量并增大吸附力为设计目标,结合轻量化设计方法,对永磁轮两侧的导磁盘进行结构优化设计。采用电磁场仿真软件 ANSYS Maxwell 对永磁轮进行建模仿真分析,获取磁力线分布情况,通过减少磁力线稀疏区域或对永磁轮吸附铁磁壁面无直接作用区域的导磁材料,增加磁力线密集区域的导磁材料,增大永磁轮的吸附力。通过调整导磁盘的主要结构参数,仿真分析永磁轮与铁磁壁面间吸附力的变化规律,得到吸附力最大时导磁盘的结构参数,对优化后导磁盘的吸附力进行仿真和实物测试验证。结果表明:优化后导磁盘质量为 232.54 g,比优化前减小 16.24%;优化后永磁轮与铁磁壁面间吸附力仿真结果为 487.65 N,比优化前增大 20.74%;50 次永磁轮拉力测试结果均大于吸附力仿真结果,测试平均拉力为 493.83 N,表明优化结构后永磁轮质量和吸附力指标达到设计目标。

关键词:爬壁机器人;永磁轮;导磁盘;结构优化;电磁场仿真

中图分类号:U489;TP242.1

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)03-0079-07

引用格式:闫海涛,徐凤辉,张云.爬壁机器人永磁轮优化设计[J].山东交通学院学报,2025,33(3):79-85.

YAN Haitao, XU Fenghui, ZHANG Yun. Optimized design of permanent magnetic wheel for wall-climbing robot[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(3): 79-85.

0 引言

随着现代工业技术的不断发展,爬壁机器人在高空、管道及复杂导磁材料壁面作业中的应用日益广泛^[1-2],在储罐防腐^[3]、船舶除锈^[4]、管道巡检^[5]、焊缝修形^[6]、高杆照明检测^[7]、变压器内部检测^[8]等高风险作业中发挥着不可替代的作用。国内外大部分爬壁机器人采用永磁轮吸附方式,无需额外提供能量,不会因系统故障脱离壁面,可靠性较高。永磁轮设计水平决定爬壁机器人的工作性能,影响爬壁机器人作业的稳定性^[9-10]。

研究铁磁壁面攀爬机器人永磁轮的重点为优化永磁体的结构、分布及充磁方式等。潘柏松等^[11]通过多岛遗传算法优化基于 Halbach 阵列爬壁机器人永磁轮的结构参数,提高磁能利用率;袁硕等^[12]对 Halbach 阵列中电力机器人的永磁体采用水平和垂直结合充磁的方法减少结构漏磁;常睿等^[13]设计用于石油储罐检测的永磁吸附轮式爬壁机器人,采用电磁场仿真软件 ANSYS Maxwell 计算普通径向充磁磁轮和基于 Halbach 阵列的磁轮在不同转角下的吸附力变化情况,吸附力随磁隙的增大而减小,但减小速度放缓;陈彦臻等^[14]优化永磁爬壁机器人的永磁轮结构设计方案,改进混合型环状对称磁路,建立壁面吸附模型,得到环型永磁铁对钢壁吸附力的计算公式,验证在磁体磁极反向排布时磁轮的吸附力明显增大。已有研究对永磁轮中导磁盘的磁力线分布情况研究较少。一方面,优化永磁体时,永磁体的性能易受高

收稿日期:2024-11-22

基金项目:山东省重点研发计划项目(2024-TSGC-0104)

第一作者简介:闫海涛(1998—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为机器人永磁同步电机的控制,E-mail:23221027@stu.sdjtu.edu.cn。

*通信作者简介:张云(1977—),男,山东青岛人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为电机控制,E-mail:zhangyun0204@126.com。

温或强振动环境等影响,永磁体可能出现退磁现象;另一方面,优化永磁体时,采用高性能永磁材料或复杂的永磁体加工工艺,往往会大幅增加成本,且对加工工艺要求苛刻。导磁盘在永磁轮中起到引导和约束磁场的作用,优化导磁盘可使磁场分布更均匀合理,减少漏磁,提高磁路的磁导率,进而提高永磁轮的吸附力。永磁体优化工艺复杂、对外界抗干扰能力弱且成本高,导磁盘优化在工艺性能和成本上更具优势^[15-16]。

永磁轮的吸附力和质量相互制约。为在永磁轮质量不变或减小的情况下增大永磁轮的吸附力,本文以增强磁场强度为目标,结合轻量化设计方法,对永磁轮两侧的导磁盘进行结构优化设计,通过软件 ANSYS Maxwell 分析导磁盘的结构变化对永磁轮吸附力的影响,改变磁路中磁通密度的饱和程度,优化导磁盘的结构,为提高爬壁机器人的应用稳定性提供可靠方案。

1 永磁轮磁力理论计算

基于麦克斯韦方程组^[17]计算永磁轮的磁场强度和吸附力。麦克斯韦方程组是电磁学的基本方程组,描述电场和磁场随空间和时间变化的关系。麦克斯韦方程组为:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H}(r, t) = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}(r, t) + \mathbf{J}(r, t) \\ \nabla \times \mathbf{E}(r, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(r, t) \\ \nabla \times \mathbf{D}(r, t) = \rho(r, t) \\ \nabla \times \mathbf{B}(r, t) = \mu_0 \mathbf{J}(r, t) + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}(r, t) \end{cases},$$

式中: ∇ 为矢量微分算子; $\mathbf{H}(r, t)$ 为磁场强度时变函数,其中, r 为空间位置坐标, t 为时间; $\mathbf{D}(r, t)$ 为电位移矢量时变函数; $\mathbf{J}(r, t)$ 为电流密度时变函数; $\mathbf{E}(r, t)$ 为电场强度时变函数; $\mathbf{B}(r, t)$ 为磁通量密度时变函数; $\rho(r, t)$ 为电荷密度时变函数; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; ε_0 为真空介电常数, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m。

永磁轮与铁磁壁面间吸附力

$$\mathbf{F} = \oint_s \mathbf{T} dS = \oint_s \left[\frac{1}{\mu} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{M}) \mathbf{B} - \frac{1}{2\mu} \mathbf{B}^2 \mathbf{M} \right] dS,$$

式中: $\mathbf{T}$ 为应力张量, N/m^2 ; S 为包围磁场中介质的闭合面积, m^2 ; μ 为磁导率, H/m ; $\mathbf{B}$ 为闭合面上的磁感应强度, T ; $\mathbf{M}$ 为微元 dS 外法线单位矢量, A/m 。

2 永磁轮组成材料和结构设计

2.1 永磁轮组成材料

永磁轮吸附铁磁壁面时,永磁体通过两侧的导磁盘与铁磁壁面形成导磁回路。采用钕铁硼 N35 制备永磁体,永磁体剩磁感应强度为 1.17~1.21 T,矫顽力不小于 868 kA/m,内禀矫顽力不小于 955 kA/m,最大磁积能为 263~287 kJ/m³,工作温度不超过 80 ℃,充磁方式为平行充磁^[18-19]。

导磁盘采用符合 GB/T 699—2015 的优质碳素结构钢 U20082,其所含硫、磷及非金属夹杂物比普通碳素结构钢少,导磁性能较好且磁阻较小,有利于提高永磁轮的吸附能力。优质碳素结构钢 U20082 密度 $\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3$,硬度不大于 131 HB,抗拉强度不小于 325 MPa,下屈服强度不小于 195 MPa,断后伸长率不小于 33%,相对磁导率在中等磁场强度下为 1 000~3 000 H/m^[20-21]。

2.2 永磁轮结构设计

永磁轮由 2 块完全相同的导磁盘及导磁盘中间的环形永磁体组成^[22],如图 1 所示。初步设计永磁

体内直径 $d_9 = 50 \text{ mm}$, 外直径 $d_8 = 80 \text{ mm}$, 厚度 $h_7 = 6.0 \text{ mm}$ 。为防止永磁体与铁磁壁面直接接触导致碰撞损坏, 导磁盘的外直径比永磁体的外直径大 2.0 mm 。初步设计导磁盘的外直径 $d_1 = 82.0 \text{ mm}$, 内直径 $d_2 = 32.0 \text{ mm}$, 厚度 $h_1 = 8.0 \text{ mm}$ 。在导磁盘上设计通孔和沉孔, 通孔直径 $d_3 = 4.0 \text{ mm}$, 沉孔直径 $d_4 = 6.0 \text{ mm}$, 深度 $h_2 = 0.5 \text{ mm}$ 。4 个通孔圆心形成的孔位圆直径 $d_{10} = 64.0 \text{ mm}$ 。单个通孔与沉孔体积 $V_{k1} = \pi(d_3/2)^2(h_1 - h_2) + \pi(d_4/2)^2h_2 = 108.33 \text{ mm}^3$, 单个导磁盘体积 $V_{p1} = \pi[(d_1/2)^2 - (d_2/2)^2]h_1 - 4V_{k1} = 35\,362.68 \text{ mm}^3$, 单个导磁盘质量 $m_1 = \rho V_{p1} = 277.60 \text{ g}$ 。

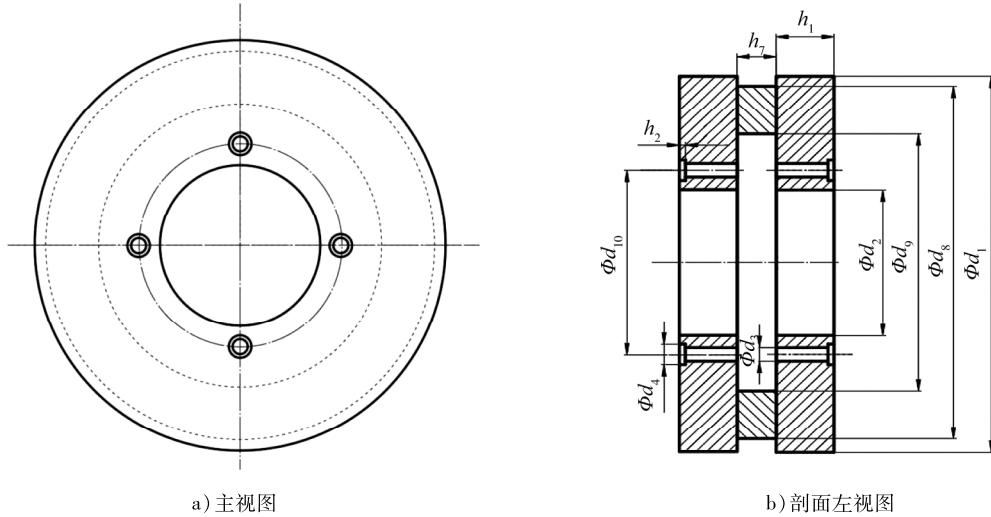


图1 永磁轮结构

永磁轮攀爬的铁磁壁面一般涂有防护涂层或因长期未防护导致壁面生锈, 永磁轮与铁磁壁面间存在不完全接触的空隙。采用软件 ANSYS Maxwell 仿真时需考虑实际工作环境, 设置永磁轮与铁磁壁面间距为 0.5 mm 。软件 ANSYS Maxwell 材料库中无优质碳素结构钢 U20082, 美国标准 SAE1008 的优质碳素结构钢 steel 1008 的性能与 U20082 相近, 设置导磁盘和铁磁壁面为优质碳素结构钢 steel 1008, 永磁体采用钕铁硼 N35。根据上述参数建立仿真模型, 磁场强度如图 2 所示。仿真结果显示永磁轮与铁磁壁面间的吸附力 $F_1 = 403.89 \text{ N}$ 。

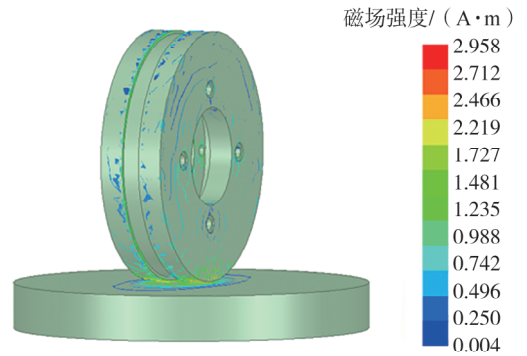


图2 永磁轮磁场强度云图

3 永磁轮优化设计

3.1 永磁轮导磁盘结构优化

优化设计永磁轮的目标为在永磁轮质量不变或减小的情况下, 增大永磁轮的吸附力。采用软件 ANSYS Maxwell 对永磁轮与铁磁壁面间导磁情况进行仿真分析, 永磁轮吸附铁磁壁面时永磁体、导磁盘和铁磁壁面中磁力线分布情况如图 3 所示。根据导磁盘中磁力线的疏密分布情况可辨识导磁盘磁通密度分布情况。磁力线越密, 磁通密度越大, 则磁感应强度越强。

由图 3 可知: 导磁盘区域 a 的磁力线对永磁轮

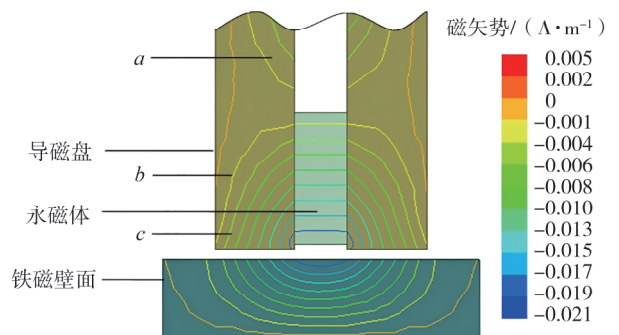


图3 永磁体、导磁盘和铁磁壁面中磁力线分布

吸附铁磁壁面无直接作用;区域 b 的磁力线分布较稀疏,对永磁轮吸附铁磁壁面的作用较弱;区域 c 的磁力线分布较密集,对永磁轮吸附铁磁壁面的作用较强。根据轻量化设计方法,结合导磁盘磁力线分布情况,削减区域 a 、 b 材料进行结构优化,即在导磁盘内、外两侧(靠近永磁体一侧为内侧,反之为外侧)各削减一块圆环状材料,减小导磁盘质量。优化后的导磁盘结构如图 4 所示。

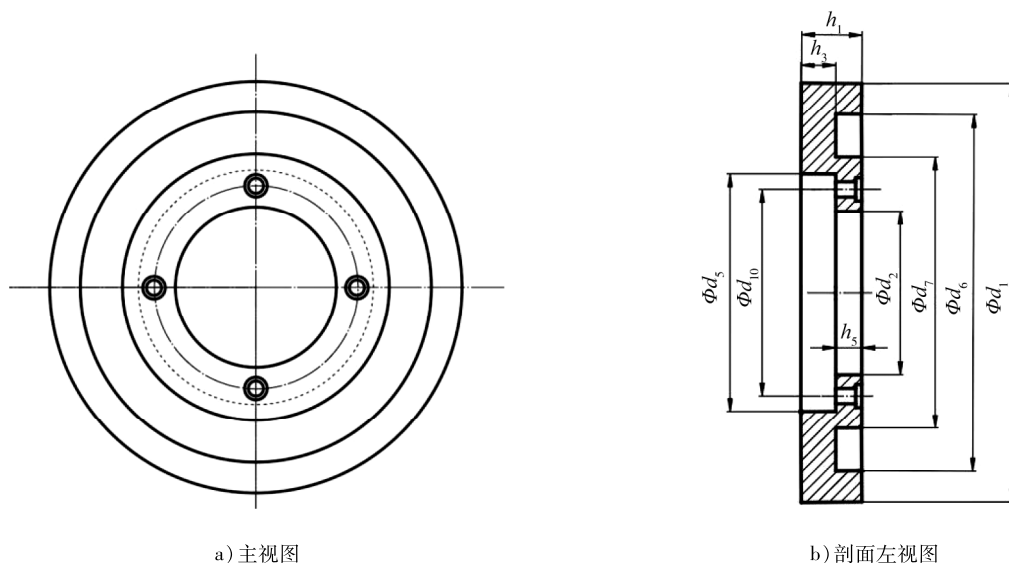


图 4 结构优化后的导磁盘结构

由图 4 可知:结构优化后的导磁盘外径、内径、厚度均保持不变;在导磁盘内侧,初步设计削减一块外径 $d_5=50$ mm、内径 $d_2=32$ mm、深度 $h_3=5$ mm 的圆环状材料;在导磁盘外侧,初步设计削减一块外径 $d_6=72$ mm、内径 $d_7=56$ mm、深度 $h_5=3$ mm 的圆环状材料。单个沉头孔体积 $V_{k2}=\pi(d_4/2)^2h_2+\pi(d_3/2)^2(h_5-h_2)=45.53$ mm³,单个导磁盘体积 $V_{p2}=\pi[(d_1/2)^2-(d_6/2)^2]h_1+\pi[(d_6/2)^2-(d_5/2)^2]h_3+\pi[(d_7/2)^2-(d_2/2)^2]h_5-4V_{k2}=24\,997.54$ mm³,单个导磁盘质量 $m_2=\rho V_{p2}=196.23$ g。

3.2 导磁盘结构变量灵敏度分析

为研究导磁盘结构变量影响永磁轮与铁磁壁面间吸附力的灵敏度,选择导磁盘边缘宽度 X 、变量 Y 和内侧凹槽深度 Z 三个主要结构变量作为研究对象, $X=(d_1-d_6)/2$, $Y=h_1$, $Z=h_3$, 分析结构变量的变化对导磁盘导磁性能的影响。

在软件 ANSYS Maxwell 中设置导磁盘 3 个主要结构变量 X 、 Y 、 Z 的初始值分别为 5、8、5 mm, 结束值分别为 10、11、10 mm, 步长为 1 mm。对 3 个结构变量分别进行仿真试验,通过控制单一变量的方式,分析 3 个结构变量分别对永磁轮与铁磁壁面间吸附力的影响,结果如图 5 所示,评估每个变量对导磁盘导磁性能的影响程度。

由图 5 可知: Y 对永磁轮与铁磁壁面间吸附力的影响最大, X 、 Z 对永磁轮与铁磁壁面间吸附力的影响较小。据此研究在不同 X 、 Z 下 Y 对吸附力的影响,获得 X 、 Y 、 Z 的最优组合。

3.3 结构参数优化

设置 8 组对照试验, X 分别取 5、5.5、6、6.5、7、8、9 mm, Z 对应分别取 5、6、7、5、6、5、5.5 mm。通过软件 ANSYS

Maxwell 仿真分析在 8 组 X 、 Z 下, Y 的变化对永磁轮与铁磁壁面间吸附力的影响,结果如图 6 所示。

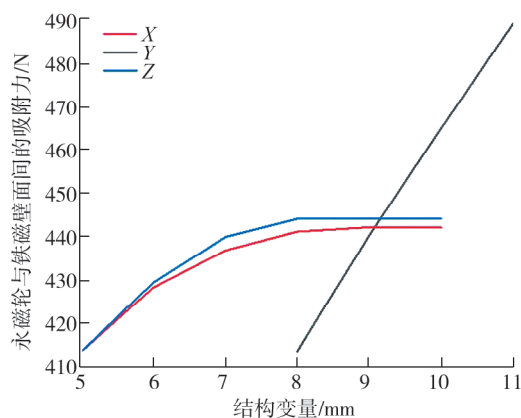


图 5 导磁盘 3 个结构变量对永磁轮与铁磁壁面间吸附力的影响

由图6可知:当 $X=9\text{ mm}$ 、 $Z=5\text{ mm}$ 时, Y 对永磁轮与铁磁壁面间吸附力影响最大。考虑永磁轮设计目标,选取 $Y=9\text{ mm}$ 。

根据不同 X 、 Z 下 Y 对吸附力影响情况确定 X 、 Y 、 Z ,优化导磁盘的结构参数。根据 $X=9\text{ mm}$,则优化后 $h_4=9\text{ mm}$, $d_6=64\text{ mm}$; $Y=9\text{ mm}$,则优化后为 $h_1=9\text{ mm}$; $Z=5\text{ mm}$,则优化后为 $h_3=5\text{ mm}$ 。其余参数保持不变。单个通孔与沉孔体积 $V_{k3}=\pi(d_4/2)^2h_2+\pi(d_3/2)^2(h_5-h_2)=45.53\text{ mm}^3$,单个导磁盘体积 $V_{p3}=\pi[(d_1/2)^2-(d_6/2)^2]h_1+\pi[(d_6/2)^2-(d_5/2)^2]h_3+\pi[(d_7/2)^2-(d_2/2)^2]h_5-4V_{k3}=29\,622.76\text{ mm}^3$,单个导磁盘质量 $m_3=\rho V_{p3}=232.53\text{ g}$ 。

采用软件ANSYS Maxwell 仿真分析优化结构参数后的永磁轮磁场强度,永磁体、导磁盘、铁磁壁面采用的材料及永磁轮与铁磁壁面间距与2.2节试验一致,优化后的永磁轮磁场强度如图7所示。仿真结果显示:永磁轮与铁磁壁面间的吸附力 $F_3=487.65\text{ N}$,优化结构参数后 F_3 比 F_1 增大83.76 N,增大20.74%; m_3 比 m_1 减小45.07 g,减小16.24%,达到了在永磁轮质量减小情况下增大永磁轮吸附力的设计目标。结构参数优化试验表明,通过增大导磁盘厚度,可增大永磁轮吸附力;削减导磁盘近心端材料,可减小永磁轮质量,但对减小永磁轮吸附力产生的影响较小。

3.4 实物拉力测试

根据爬壁机器人永磁轮结构参数优化后的数据制作导磁盘和永磁体并装配,如图8所示。为验证装配完成的永磁轮吸附力是否达到软件ANSYS Maxwell 仿真试验中吸附力 F_3 ,进行爬壁机器人永磁轮实物拉力测试。

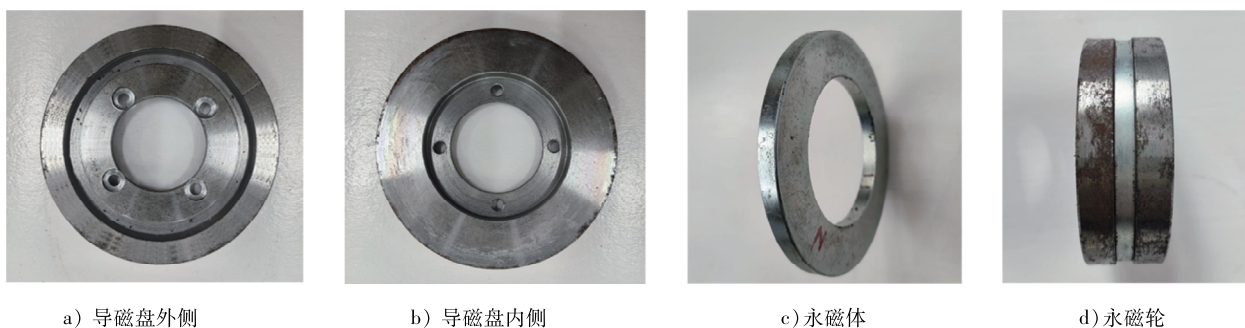


图8 永磁轮实物

实物拉力测试具体步骤为:将永磁轮吸附在一块有锈斑的铁磁壁面,测试环境尽可能接近仿真环境。将拉力计通过绳索与永磁轮相连,缓慢向上提升永磁轮,直至其完全脱离铁磁壁面,记录此时的拉力,重复测量50次,拉力测试数据如表1所示。由表1可知:50次永磁轮拉力测试结果均大于仿真试验中吸附力 F_3 ,测试最小拉力为487.80 N,平均拉力为493.83 N,达到爬壁机器人永磁轮优化设计方案预期目标。

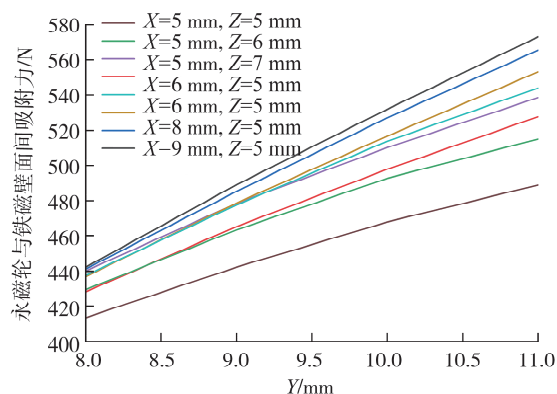


图6 不同 X 、 Z 下 Y 对永磁轮与铁磁壁面间吸附力的影响

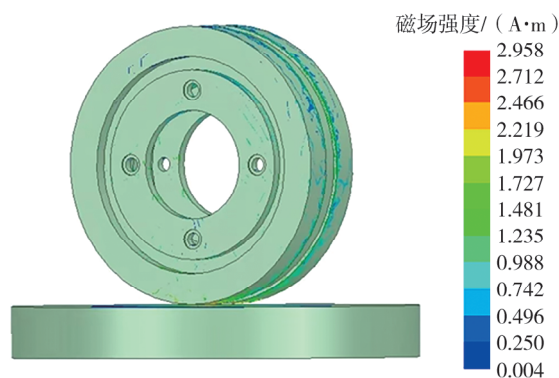


图7 优化后的永磁轮磁场强度云图

表 1 拉力测试数据

单位: N

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
拉力	492.2	496.5	495.4	495.2	497.2	491.4	490.4	489.9	496.5	489.3
序号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
拉力	490.6	495.1	494.8	489.2	495.5	494.4	498.5	496.0	494.2	493.1
序号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
拉力	495.5	496.7	498.2	489.5	495.1	495.5	487.8	489.4	488.5	489.5
序号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
拉力	489.3	495.1	494.6	495.5	489.0	493.4	496.2	498.8	490.1	495.4
序号	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
拉力	492.9	498.5	496.5	492.0	498.0	497.6	494.9	495.4	494.8	492.6

4 结论

1)以减小永磁轮质量并增大永磁轮与铁磁壁面间吸附力为设计目标,结合轻量化设计方法,对永磁轮两侧的导磁盘进行结构优化设计,采用软件 ANSYS Maxwell 对永磁轮进行建模仿真分析,根据导磁盘磁力线分布情况,通过增、减导磁盘材料进行结构优化。

2)选择导磁盘边缘宽度 X 、厚度 Y 及内侧凹槽深度 Z 共 3 个主要结构变量作为研究对象,分析结构变量的变化对导磁盘导磁性能的影响。 Y 对永磁轮与铁磁壁面间吸附力的影响最大, X 、 Z 对吸附力的影响较小。

3)采用软件 ANSYS Maxwell 仿真分析在 8 组 X 、 Z 下, Y 的变化对永磁轮与铁磁壁面间吸附力的影响。当 $X=9\text{ mm}$ 、 $Z=5\text{ mm}$ 时, Y 对永磁轮与铁磁壁面间吸附力影响最大。考虑永磁轮设计目标,选取 $Y=9\text{ mm}$ 。

4)对优化后导磁盘的吸附力进行仿真和实物测试验证。结果表明:导磁盘质量 $m_3=232.53\text{ g}$,比优化前减小 16.24%;仿真中永磁轮对铁磁壁面的吸附力 $F_3=487.65\text{ N}$,比优化前增大 20.74%;50 次永磁轮拉力测试结果均大于仿真试验中的吸附力 F_3 ,测试平均拉力为 493.83 N,达到优化设计方案预期目标。

参考文献:

[1] 张博洋,冯永利,黄金凤,等. 新型水冷壁机器人设计及其电永磁轮研究[J]. 工程设计学报, 2024, 31(4): 446-455.

[2] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Incremental sampling-based algorithms for optimal motion planning[EB/OL]. (2010-05-03) [2024-10-18]. <https://arxiv.org/abs/1005.0416v1>.

[3] 付生洪. 防腐爬壁机器人磁轮特性研究及仿真分析[J]. 广州化工, 2023, 51(10): 112-116.

[4] 孙涛,姜哲,罗高生,等. 船体表面清洗机器人磁吸附机构的优化设计[J]. 船舶工程, 2021, 43(5): 145-153.

[5] 李浩男,侯宇,蒋怡蔚,等. 永磁轮式管外攀爬机器人结构设计与力学分析[J]. 机械传动, 2023, 47(10): 48-54.

[6] 崔宗伟,孙振国,陈强,等. 两端吸附式焊缝修形爬壁机器人研制[J]. 机器人, 2016, 38(1): 122-128.

[7] LI P, DUAN X G, SUN G L, et al. Design and control of a climbing robot for inspection of high mast lighting[J]. Assembly Automation, 2019, 39(1): 77-85.

[8] 李雨潭,张传金,张行,等. 永磁轮式变压器内部检测机器人行走系统设计[J]. 机械设计与制造, 2023(2): 282-285.

[9] ALKALLA M G, FANNI M A, MOHAMED A F, et al. EJBOT-II: An optimized skid-steering propeller-type climbing robot with transition mechanism[J]. Advanced Robotics, 2019, 33(20): 1042-1059.

- [10] 孟宪宇,董华伦.爬壁机器人结构设计及曲面磁力吸附关键技术研究[J].制造业自动化,2018,40(6):19-22.
- [11] 潘柏松,张晋,魏凯,等.基于Halbach阵列爬壁机器人永磁轮吸附单元的设计与优化[J].浙江工业大学学报,2015,43(4):393-397.
- [12] 袁硕,刘天羽.基于Ansoft的电力机器人永磁吸附单元有限元分析[J].电机与控制应用,2018,45(2):71-74.
- [13] 常睿,樊建春,张来斌.爬壁机器人磁轮特性研究及其运动仿真[J].石油机械,2020,48(1):124-131.
- [14] 陈彦臻,胡以怀,袁春旺,等.爬壁机器人永磁吸附轮的磁路及结构设计分析[J].制造业自动化,2019,41(6):83-87.
- [15] YUAN Y, DENG Z G, ZHANG S, et al. Working principle and primary electromagnetic characteristics of a permanent magnet electrodynamic wheel for maglev car application[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021,31(8):3603905.
- [16] 孙涛.船体表面清洗浮游与爬壁水下机器人总体设计及关键技术研究[D].上海:上海海洋大学,2021.
- [17] 熊君,全小康,贾立颖,等.基于Ansoft Maxwell干压多极磁环的磁路优化设计[J].金属功能材料,2019,26(2):30-35.
- [18] 刘新,邓自刚,梁乐,等.基于斜置环形Halbach永磁轮的磁浮列车“悬浮-导向-推进”一体化方案设计[J].机车电传动,2023(2):90-96.
- [19] 熊嘉阳,邓自刚.高速磁悬浮轨道交通研究进展[J].交通运输工程学报,2021,21(1):177-198.
- [20] 王吉岱,辛加旭,孙爱芹,等.基于ANSYS的爬壁机器人永磁轮吸附装置的设计与优化[J].科学技术与工程,2020,20(17):6931-6937.
- [21] 刘俊锋,洪晓玮,陈勇,等.大型钢结构巡检爬壁机器人永磁轮优化设计[J].制造业自动化,2022,44(1):46-50.
- [22] 陈怡浩,梁乐,刘新,等.环形Halbach永磁轮新型充磁设计及磁力特性研究[J].机车电传动,2024(4):107-117.

Optimized design of permanent magnetic wheel for wall-climbing robot

YAN Haitao¹, XU Fenghui², ZHANG Yun^{1*}

1. School of Rail Transportation, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Jinan Jimeile Power Technology Co., Ltd., Jinan 250104, China

Abstract: To address issues such as large volume, heavy weight, and low adsorption force of permanent magnetic wheel in wall-climbing robot, the design aims to reduce the wheel mass and increase adsorption force. Combining lightweight design methods, the magnetic disks on both sides of the permanent magnetic wheel are designed by structural optimization. Electromagnetic field simulation software ANSYS Maxwell is used to model and simulate the permanent magnetic wheel, obtaining the magnetic field line distribution. By reducing the magnetic material in areas with sparse field lines and increasing it in dense areas, the wheel's adsorption force is enhanced. Through adjusting the main structural parameters of the magnetic disk and simulating the adsorption force changes between the permanent magnetic wheel and ferromagnetic wall surface, the optimal structural parameters for maximum adsorption force are determined. Simulation and physical tests verify the adsorption force of the optimized magnetic disk. Results show that the magnetic disk mass is 232.53 g, reduced by 16.24%; the simulated adsorption force between the permanent magnetic wheel and ferromagnetic wall is 487.65 N, increased by 20.74%; 50 pull tests of the permanent magnetic wheel all exceed the simulated adsorption force, with an average of 493.83 N. The results show that after structural optimization, the mass and adsorption force indicators of the permanent magnet rotor meet the design objectives.

Keywords: wall-climbing robot; permanent magnetic wheel; magnetic disk; structural optimization; electromagnetic field simulation

(责任编辑:边文超)