DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.04.107

环形Halbach永磁轮新型充磁设计及磁力特性研究

陈怡浩[1]，梁　乐[2,3]，刘　新[1]，邓自刚[1,2]
（1.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都 610031；
2.西南交通大学 超高速真空管道磁浮交通研究中心，四川 成都 610031；
3.西南交通大学 轨道交通国家实验室（筹），四川 成都 610031）

摘　要：径向永磁轮具有“悬浮–推进”一体化的独特优势，但是由于永磁轮存在非气隙侧漏磁现象，使得永磁轮利用率较低，需要进一步提高悬浮承载能力。鉴于此，文章提出了一种新型永磁轮充磁方案，能在相同永磁轮质量的条件下，有效提高悬浮驱动能力。文章提出在相邻永磁体之间插入斜向磁化的永磁体和径向充磁永磁体等分的永磁轮结构，阐述分析其基本原理，并搭建了三维有限元模型，以浮重比和驱重比为性能指标，求解各结构的最优尺寸。仿真结果表明，对于插入斜向磁化永磁体的永磁轮结构，其悬浮力提升了14.80%，驱动力提升了14.98%；对于径向充磁永磁体等分的永磁轮结构，其悬浮力提升了9.2%，驱动力提升了7.6%。研究结果表明，在永磁体用量相同的情况下，文章提出的充磁方法能够有效改善系统的悬浮力和驱动力特性，节约了成本，并提升了系统的运行效率，为后续永磁轮结构的优化和磁悬浮车辆的设计提供参考。

关键词：永磁轮；Halbach阵列；充磁结构；永磁轮利用率

中图分类号：U237　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2024)04-0107-11

0　引言

磁悬浮交通具有无机械接触摩擦、运行安全、环境友好等优点，成为轨道交通领域竞争的热点。根据悬浮原理，磁悬浮可分为永磁悬浮（Permanent Magnet Levitation, PML）、电磁悬浮（Electromagnetic Suspension, EMS）、电动悬浮（Electrodynamic Suspension, EDS）、高温超导钉扎悬浮（High-Temperature Superconducting Pinning Levitation, HTSPL）。永磁电动悬浮系统（Permanent magnet electrodynamic suspension, PMEDS）包括非磁性导体和位于其上方的移动永磁体，轨道感应涡流形成的镜像磁场与永磁体磁场同极相斥，进而实现悬浮，与其他磁悬浮方式相比，PMEDS结构简单，成本低，具有广阔的应用前景[1-3]。

由于永磁材料的发现，使得永磁悬浮系统得以发展。永磁材料生产工艺不断提高，以及Halbach型永磁结构的独特优势，极大地促进了PMEDS系统的发展，使得现有永磁体技术已能满足轨道交通运用要求，相关研究学者也提出了多种车载永磁体的电动悬浮技术方案，麻省理工学院Montgometry教授提出Magplane方案，该方案采用车载Halbach永磁体，轨道为弧形铝板结构，可实现悬浮导向一体化[4]；美国通用原子公司设计了2套Inductrack悬浮系统，利用车载Halbach永磁体与轨道线圈相对运动产生感应磁场，与永磁体相互作用产生排斥力实现悬浮[5]。

基金项目：四川省自然科学基金项目（2023NSFSC1004）；中央高校基本科研业务费专项资金项目（2682023ZTPY043，2682022CX062）；磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室课题
通信作者：邓自刚，男，博士，研究员，博士生导师，研究方向为磁悬浮技术及应用；E-mail: deng@swjtu.cn
引用格式：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.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.04.107.
Citation：CHEN Yihao, LIANG Le, LIU Xin, et al. Novel design of magnetization and study of magnetic force characteristics of annular Halbach permanent magnet electrodynamic wheel[J]. Electric drive for locomotives,2024(4): 107-117.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.04.107.

永磁体固有的磁阻力限制了直线型Halbach永磁电动悬浮系统的应用，一些研究集中在减小磁阻力，提高浮阻比和浮重比等问题[6-7]。J. Bird和N. Fuji等人研究了一种新型环形Halbach结构即永磁轮（Permanent Magnet Electrodynamic Wheel, PMEDW），可以将磁阻力转化为驱动力[8-9]，根据充磁方向的不同分为轴向永磁轮和径向永磁轮。2014年，J. Bird提出一种针对有限宽度和厚度导体板中的力和功率损耗进行三维解析建模方法，该方法适用于任何类型磁源力的求解[10-11]。文献[12]通过建立两自由度电动车轮悬浮架的三维模型，按照有限元方法模拟和试验验证了描述场和力的分析模型。西南交通大学邓自刚团队提出一种新型磁悬浮汽车及其运行模式[13-17]，在仿真的基础上设计并制作了双EDW结构试验平台，测试了不同转速下的悬浮力和磁阻力，验证了磁浮汽车的可行性。但是，永磁轮磁场利用率低，悬浮承载能力较差，限制了其进一步发展。因此，目前大量研究集中在永磁轮结构参数的优化上[13]，也有学者尝试用超导磁体替代永磁轮以提高悬浮力和驱动力，但是超导体成本高，实用性较差[18]，此外，J. Bird提出通过增加永磁轮的数量来提高推力效率，但是会增加成本[19]。文献[20]介绍了环形Halbach永磁电动悬浮系统磁阻力，在动态运行过程中，由于磁阻力存在为零的情况，故“浮阻比”指标没有意义，为此提出“滚动磁阻力”（Magnetic Rolling Resistance, MRR）的概念来表征磁阻力，并确定了可最小化的EDW的几何设计参数。

当前关于磁轮的研究工作基本都是以浮阻比和浮重比作为优化指标，以增加磁体体积为代价提高悬浮或驱动性能[13, 21]，这不仅增加了成本，而且有悖于轻量化设计理念。因此，本文在保持传统环形Halbach永磁轮尺寸的前提下，通过改变永磁体的磁化角与充磁结构，即在相邻永磁体之间插入斜向充磁的永磁体和对径向充磁永磁体分段这2种拓扑结构，减小Halbach充磁结构的漏磁现象，以改善磁场。本文将详细分析其基本结构与原理，通过有限元方法分析单磁轮在不同充磁结构下的电磁力特性，并对结构参数进行优化，以提高永磁轮的悬浮力和驱动力，实现磁浮汽车较大的悬浮承载能力和驱动能力。

1 永磁轮结构及原理

1.1 永磁轮工作原理

永磁电动轮系统通常是由环形Halbach永磁体阵列和接地导体板组成，导体板是由非磁性材料制成，通常为铝或铜，如图1所示。

永磁轮磁化方向如图2所示，当永磁轮以一定的转速在导体板上旋转时，根据电磁感应定律，导体板内感应出电流，感应电流产生的磁场（即镜像磁场）与永磁体磁场相互作用产生沿y轴方向的悬浮力F_l和沿x轴方向的驱动力F_p。

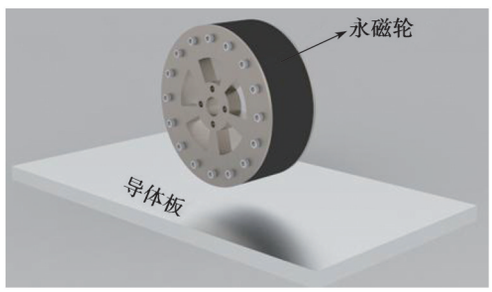


图1 永磁轮结构

Fig. 1 Structure of PMEDW

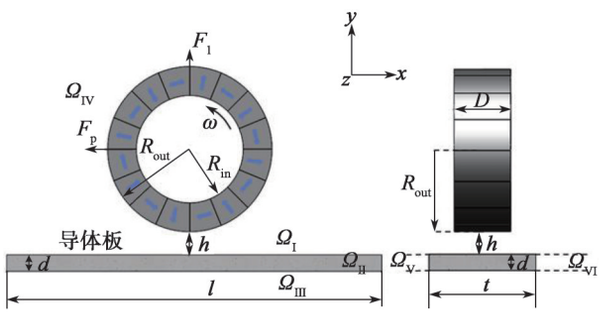


图2 永磁轮原理图

Fig. 2 Schematic diagram of PMEDW

Halbach永磁轮主要是由径向充磁的永磁体和切向充磁的永磁体按照一定的排列顺序组合形成，径向充磁永磁体和切向充磁永磁体组合后，一侧磁感应强度大幅度增加，而另一侧被削弱，磁轮内部即非工作侧会有部分感应磁场，由于永磁体之间拼合不可避免会导致在交界处产生磁饱和现象，磁轮内侧会出现漏磁现象。

目前，本研究团队已开展了大量试验，验证了永磁轮的力特性及有限元方法的正确性[13-17]，试验设备如图3所示，并在此基础上进行了小磁轮力试验，并与仿真结果进行对比，试验结果对比如图4所示。由图4可知，当转速为1 000 r/min时，悬浮力试验平均值为21.457 N，驱动力试验平均值为18.540 N，而仿真值分别为21.794 N、15.397 N，误差分别为1.57%、16.95%。由于感应涡流产生的热量会导致导体板电导率变化，在试验期间分别测试了试验开始和试验结束时的悬浮力和驱动力。经过对比，悬浮力从试验开始时的21.592 N衰减到试验结束时的21.055 N，下降了2.49%，而驱动力在低速下略有上升，从18.307 N上升到18.593 N，增加了1.56%。

随后，又对比了不同转速下永磁轮的悬浮力和驱动力的仿真值和试验值，对比结果如图5所示。由图5可知，悬浮力平均误差约为5.90%，驱动力平均误差约为23.38%。悬浮力和驱动力试验结果和仿真结果存在差异的原因一方面是由于简化模型未考虑导体板边缘效应，另一方面是导体板材料纯度不高、永磁轮加

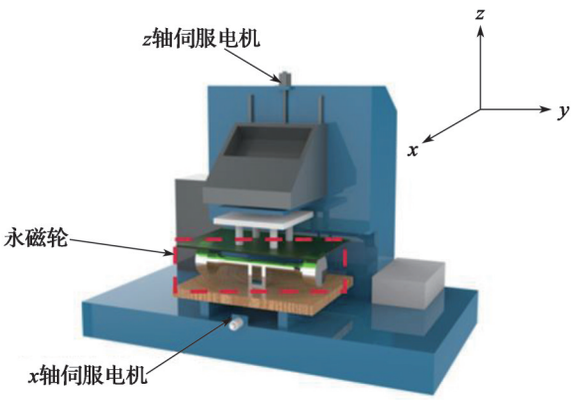
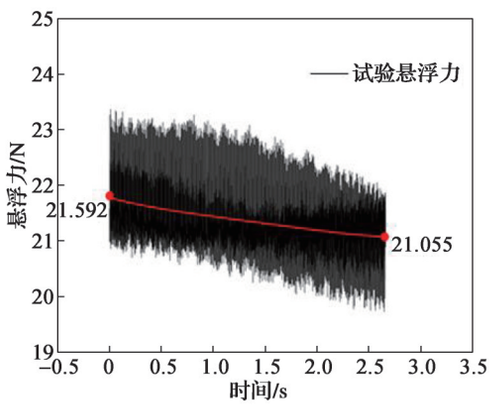
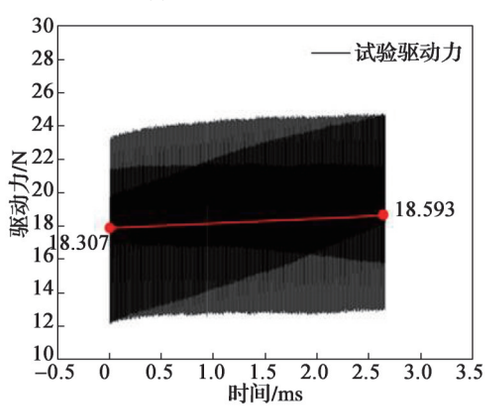


图 3　永磁轮试验设备

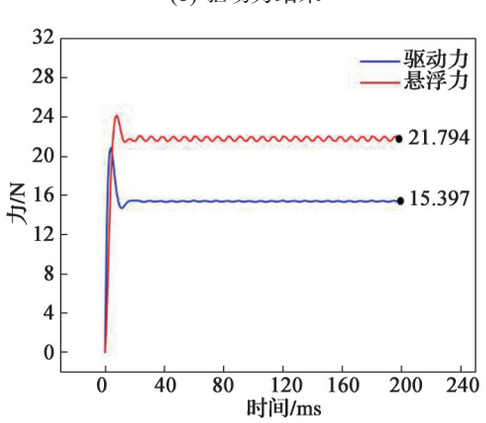
Fig. 3　Experimental setup of PMEDW



(a) 悬浮力试验结果



(b) 驱动力结果



(c) 悬浮力和驱动力仿真结果

图 4　永磁轮试验结果和仿真结果

Fig. 4　Experimental and simulation results of PMEDW

工精度和机械磨损导致试验中使用的永磁轮磁通密度较小，最终呈现出仿真值要比试验值大。

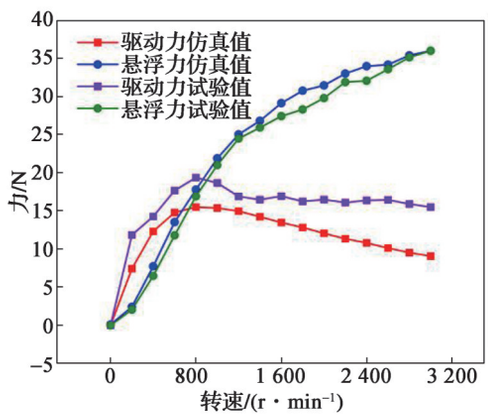


图 5　不同转速下悬浮力和驱动力试验值和仿真值

Fig. 5　Experimental and simulation results of levitation force and propulsion force at different rotational speeds

1.2　永磁轮分析模型

对于永磁轮的理论分析模型，国际上已有文献进行了详细的分析和推导，因此本节只描述必不可少的解析公式，采用涡流分析模型用于计算有限宽度和厚度的导体板涡流和力[11-12]。由于永磁轮悬浮系统感应涡流场属于低频电磁场，引入准静态 Maxwell 方程组：

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{B}}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

$$\nabla\times\boldsymbol{H}=\boldsymbol{J} \tag{2}$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0 \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度；$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度；$\boldsymbol{J}$ 为感应涡流。

将求解区域划分为 6 个子区域并进行求解，如图 2 所示，导体板上部、导体板和导体板下部划分为 Ω_{I}、Ω_{II} 和 Ω_{III}，永磁轮所在区域为 Ω_{IV}，导体板横向区域即 z 轴两侧空气区域为 Ω_{V} 和 Ω_{VI}，导体板内控制方程可以用磁矢势 $\boldsymbol{A}$ 来表示[12]，具体为

$$\nabla^2\boldsymbol{A}=\mu_0\sigma\left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{A}}{\mathrm{d}t}+\nabla V\right) \tag{4}$$

式中：μ_0 为真空磁导率；σ 为电导率。

区域 Ω_{II} 控制方程标量形式[12]为：

$$\nabla^2 A_x^{\mathrm{II}}=\mu_0\sigma\left[\mathrm{j}\omega_{\mathrm{e}}A_x^{\mathrm{II}}+v_x\frac{\partial A_x^{\mathrm{II}}}{\partial x}+v_y\frac{\partial A_x^{\mathrm{II}}}{\partial y}\right] \tag{5}$$

$$\nabla^2 A_z^{\mathrm{II}}=\mu_0\sigma\left[\mathrm{j}\omega_{\mathrm{e}}A_z^{\mathrm{II}}+v_x\frac{\partial A_z^{\mathrm{II}}}{\partial x}+v_y\frac{\partial A_z^{\mathrm{II}}}{\partial y}\right] \tag{6}$$

利用洛伦兹力求解永磁体与导体板之间的相互作用力[12]，其中在 x 方向和 y 方向的分力分别为：

$$F_x=-\frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\int J_z^{\mathrm{II}}\,B_y^{\mathrm{II}\,*}\,\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{II}}\right] \tag{7}$$

$$F_y=\frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\int\left(J_z^{\mathrm{II}}\,B_x^{\mathrm{II}\,*}-J_x^{\mathrm{II}}\,B_z^{\mathrm{II}\,*}\right)\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{II}}\right] \tag{8}$$

2 新型永磁轮基本结构及磁力特性

环形 Halbach 永磁轮通常由多个钕铁硼（NdFeB）永磁体拼接而成，能实现外部磁场的变化，通过改变永磁体的磁化角，使其逐渐接近理想 Halbach 阵列，理论上磁化角越小，越接近理想 Halbach 阵列。但是在实际工程应用中，NdFeB 永磁体由于受加工制造工艺的限制，磁化角越小，其充磁难度也会逐渐增大，因此本文提出一种新型永磁轮结构。

2.1 新型永磁轮结构

在不改变永磁轮质量大小情况下，合适的极对数和较小的磁化角可以提高悬浮力和驱动力，但会导致较小的磁化角生产加工愈发困难。本节将介绍新型永磁轮充磁方法的拓扑结构和工作原理，通过仿真对优化方法进行验证，归纳总结得到影响永磁轮力特性的一般准则，仿真参数如表 1 所示。

表 1 永磁轮具体参数

Table 1 Specific parameters of PMEDW

参数名称	参数值或说明	参数名称	参数值或说明
材料	FeNdB35	导体板材料	Al
气隙 h/mm	10	导体板长度 l/mm	1 000
外径 R_{out}/mm	250	导体板宽度 t/mm	650
内径 R_{in}/mm	170	导体板厚度 d/mm	10
宽度 D/mm	250	转速 n/(r·min^{-1})	0~3 000

为增加永磁轮的外部聚磁能力，可以采取增加每极永磁体的数量的方法，具体方法是在永磁轮相邻永磁体之间插入 1 块斜向充磁的永磁体，充磁方向为相邻永磁体充磁方向的平分线，如图 6 所示。通过插入的永磁体引导在切向和径向永磁体交界处的磁感应线回路，避免 2 块磁体交界处磁饱和，使得大部分磁场聚集在环形 Halbach 阵列永磁体的外侧，内侧磁感应强度大幅削弱。

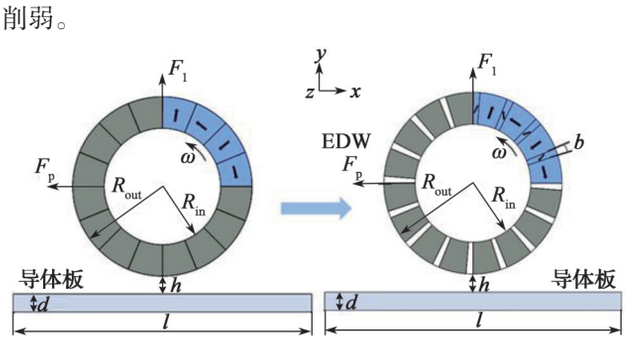


图 6 结构对比示意图

Fig. 6 Schematic diagram of structure comparison

2.2 结构及磁化角优化

2.2.1 磁化角优化

对插入永磁体的磁化方向进行参数优化，仿真结果如图 7 所示，悬浮力和驱动力随着插入永磁体的磁化角的增大呈先增大后减小的趋势，当磁化角为 45°时，悬浮力和驱动力达到最大，经仿真分析，当插入永磁体磁化角的大小为相邻两永磁体磁化角的一半时，力达到最大。

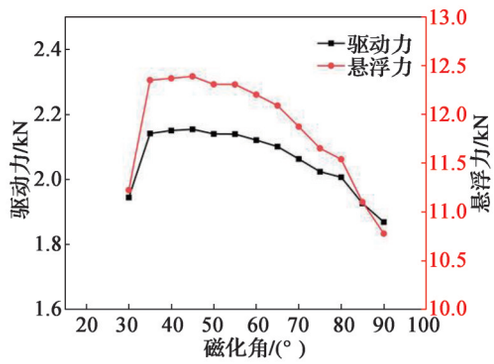
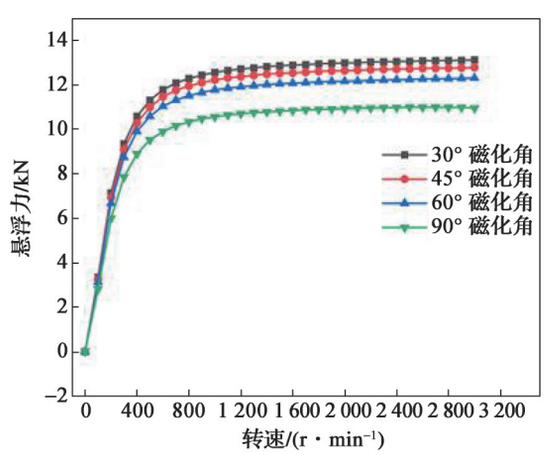


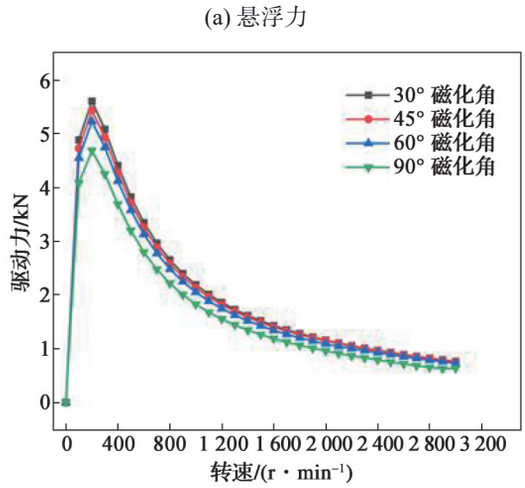
图 7 悬浮力和驱动力与插入永磁体磁化角之间的变化趋势

Fig. 7 Variation trend of levitation force and propulsion force with magnetization angle of inserted permanent magnets

环形 Halbach 永磁轮常用的磁化角为 45°和 90°，仿真计算结果如图 8 所示。由图 8 可知，在恒定转速下，随着磁化角的减小，悬浮力和驱动力逐渐增大，并且



(a) 悬浮力



(b) 驱动力

图 8 悬浮力和驱动力与磁化角之间的变化趋势

Fig. 8 Variation trend of levitation force and propulsion force with magnetization angle

悬浮力的增加幅度较大，这是由于磁化角越小，环形 Halbach 阵列的磁场越接近理想的正弦分布，进而产生的电磁力较大。

2.2.2　宽度优化

在确定插入永磁体的磁化角后，接着对插入永磁体宽度进行优化分析，考虑到宽度难以表征，采用宽度对应的圆心角 b 来进行优化，仿真结果如图 9 所示。由图 9 可知，随着宽度的不断增大，悬浮力和驱动力也逐步增大；当 b=8°和 n=2 000 r/min 时，驱动力达到了 1.128 kN，悬浮力达到了 12.817 kN，相比传统永磁轮驱动力提高了 17.62%左右，悬浮力提高了 17.37%。悬浮力、驱动力与充磁角度 30°的永磁轮仿真结果相差不大，但是充磁角度 30°的永磁体生产加工较为困难，采用该结构不仅可达到相同效果，而且结构工艺更加简单。

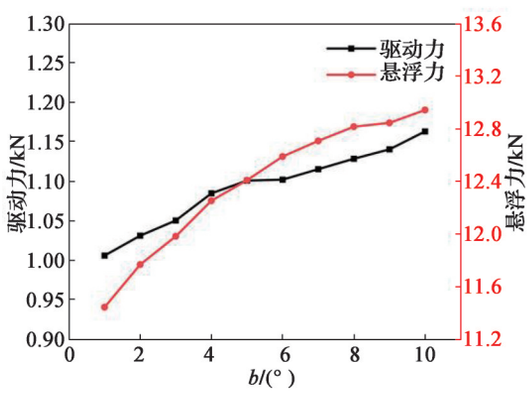


图 9　悬浮力和驱动力与插入永磁体宽度之间的关系

Fig. 9　Correlation of levitation force and propulsion force with width of inserted permanent magnet

2.3　永磁轮利用率

永磁轮利用率可通过悬浮力与永磁轮重量的比值（浮重比）、驱动力与永磁轮重量的比值（驱重比）进行评估，如式(9)、式(10)，仿真计算结果如图 10 所示。由于永磁轮的整体尺寸没有发生变化，意味着永磁轮的重量也没有发生变化，因此在图 10 中浮重比和驱重比呈逐渐增加的趋势。

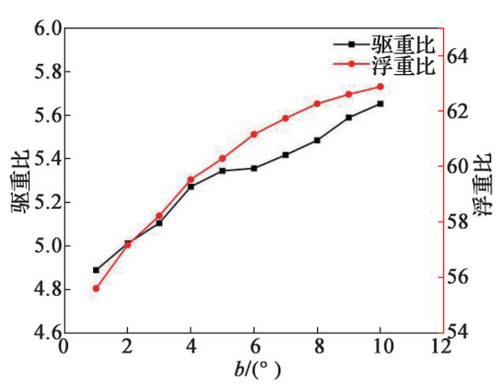


图 10　浮重比 L_f 和驱重比 L_p 与插入永磁体宽度之间变化趋势

Fig. 10　Variation trend of L_f and L_p with width of inserted permanent magnet

$$L_f=\frac{F_l}{mg} \tag{9}$$

$$L_p=\frac{F_p}{mg} \tag{10}$$

式中：F_l 为悬浮力；F_p 为驱动力；L_f 为浮重比；L_p 为驱重比；m 为单个永磁轮质量；g 为重力加速度。

2.4　气隙磁密

为了研究宽度对永磁轮外部磁场的影响，以宽度对应的圆心角 b 为参数变量，仿真计算 b 取不同值时，距永磁轮 5 mm 处的垂向磁通及其最大值，结果如图 11 所示。由图 11 可知，新结构永磁轮的最大垂向磁通大于 30°磁化角的永磁轮。

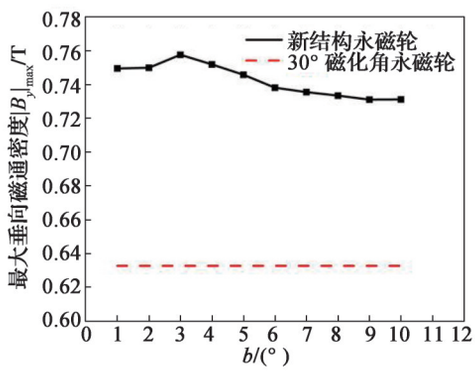


图 11　不同宽度 b 时永磁轮外侧 5 mm 处 $\left|B_y\right|_{max}$

Fig. 11　$\left|B_y\right|_{max}$ at 5 mm from the outer side of PMEDW for different widths b

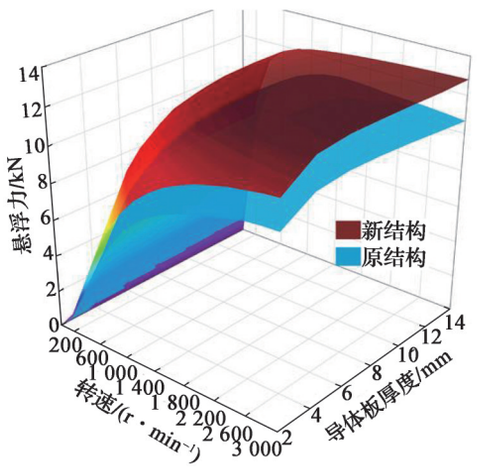
2.5　导体板参数

永磁轮之所以能产生悬浮力和驱动力，在于导体板感应磁场与永磁轮原磁场相互作用。因此，导体板参数对永磁轮的电磁力特性影响较大，本节将对导体板厚度、电导率和宽度等参数进行分析。

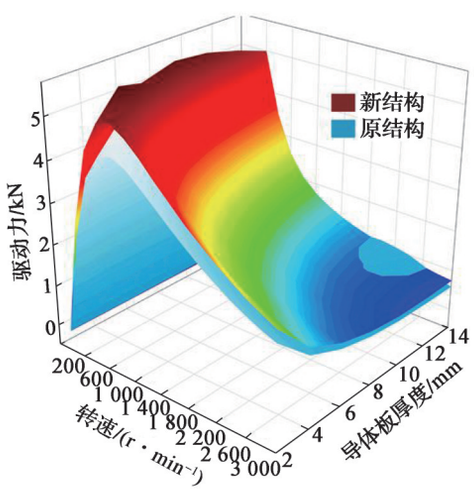
图 12 为永磁轮悬浮力和驱动力关于导体板厚度的仿真计算结果。由图 12 可知，悬浮力随着导体板厚度的增加逐渐趋于饱和，这是由于集肤效应使得磁场对导体板的渗透存在饱和厚度；而驱动力则随着导体板厚度的增加，呈现出先增大后减小的趋势：当导体板厚度小于集肤深度时，导体板厚度增加，驱动力增加；当导体板厚度大于集肤深度时，导体板的厚度增加会引起系统等效电阻减小，进而驱动力减小，并且转速越高导体板的集肤深度越小，驱动力越小。

图 13 为永磁轮悬浮力和驱动力关于导体板电导率和宽度的仿真计算结果。由图 13(a)可知，在相同的电导率下，新结构悬浮力和驱动力始终大于原结构；悬浮力随着电导率增加呈先增加后逐渐饱和的变化趋势，驱动力随之逐渐减小。这是由于电导率的增大使集肤效应更明显，导体板中垂向涡流减小，因此驱动力会减小。永磁轮在导体板上以一定的转速旋转时，导体

板内感应的涡流面积一般大于永磁轮在导体板的垂向投影面积。由图 13(b)可知，在相同的宽度下，新结构的悬浮力和驱动力始终大于原结构；随着感应轨道的增加，悬浮力先增加后逐渐平稳，驱动力也出现小幅度的上升。这是由于当导体板宽度较小时，导体板内部分涡流被截断，随着导体板宽度的增加，电磁力会逐渐增加；当导体板足够宽时，感应涡流将不再受宽度的限制，电磁力趋于平稳。



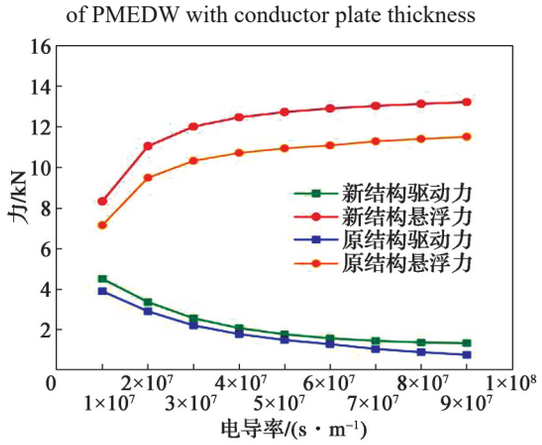
(a) 悬浮力



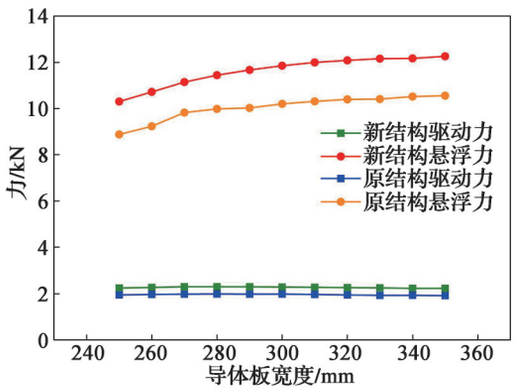
(b) 驱动力

图 12　永磁轮悬浮力和驱动力随导体板厚度变化

Fig. 12　Variation of levitation force and propulsion force of PMEDW with conductor plate thickness



(a) 电导率



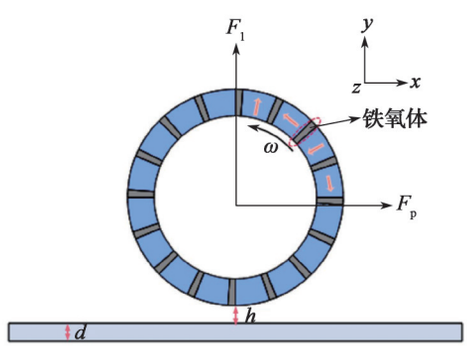
(b) 宽度

图 13　永磁轮悬浮力和驱动力随导体板宽度和电导率变化

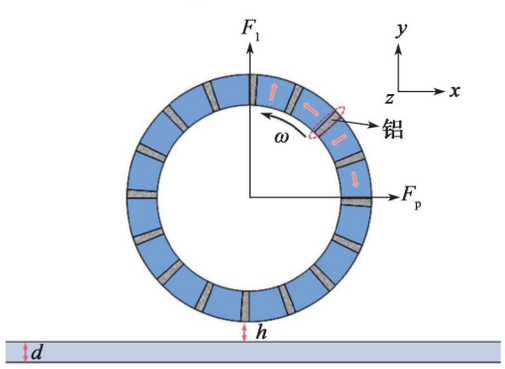
Fig. 13　Variation of levitation force and propulsion force of PMEDW with conductor plate width and conductivity

2.6　不同材料对力特性的影响

在相邻永磁体之间采用顺磁性材料或铁磁性材料（如图 14 所示），永磁轮悬浮力和驱动力的仿真计算结果如图 15 所示。由图 15 可知，当 2 个永磁体之间插入铁磁性材料（如铁氧体）或顺磁性材料（如 Al）时，永磁轮悬浮力和驱动力都会减小，并且减小幅度很大，这是由于铁磁性材料或顺磁性材料在经过永磁体磁化之后，其磁感应强度相较于永磁体来说很小；而插入永磁体材料要比插入铁磁性材料和顺磁性材料对永磁轮的力特性影响更加明显。



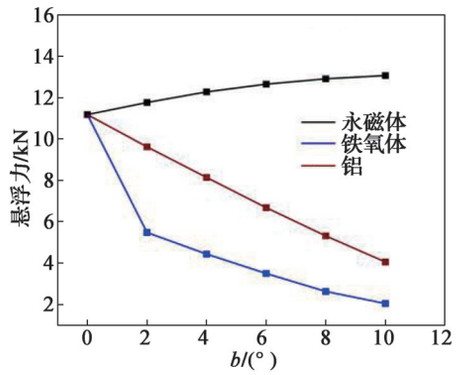
(a) 铁磁性材料



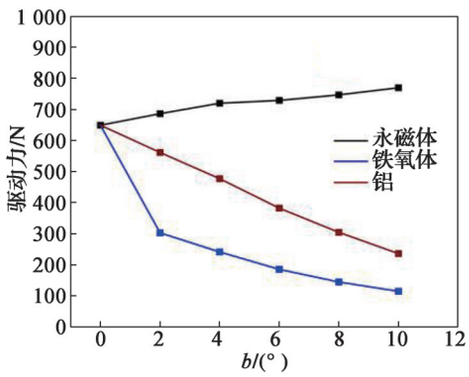
(b) 顺磁性材料

图 14　插入不同材料的永磁轮结构

Fig. 14　PM EDW structure of EDW with inserted different materials



(a) 悬浮力



(b) 驱动力

图 15　悬浮力和驱动力与不同材料宽度之间关系

Fig. 15　Correlation of levitation force and propulsion force with width of different materials

3　永磁轮径向充磁分段结构

3.1　永磁体径向充磁分段基本结构与原理

单块永磁体的磁场呈上下对称分布，而 Halbach 永磁排列则能实现永磁体磁场一侧增强一侧削弱的效果。本研究在保持永磁体用量相同的前提下，将单块永磁体等分为不同块数的斜向磁化永磁体，人为地制造磁场不均匀分布，进而提高工作侧磁场。环形 Halbach 永磁轮外侧磁场主要是由径向永磁体实现的，因此可将径向充磁永磁体分为 3 部分，每一部分弧长相等，如图 16 所示，其中充磁角度为 α，每一部分宽度对应的圆心角为 w。

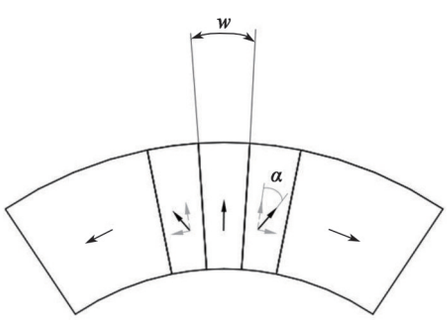


图 16　径向充磁结构分段的永磁轮结构

Fig. 16　PM EDW structure equally partitioned with radially magnetized permanent magnets

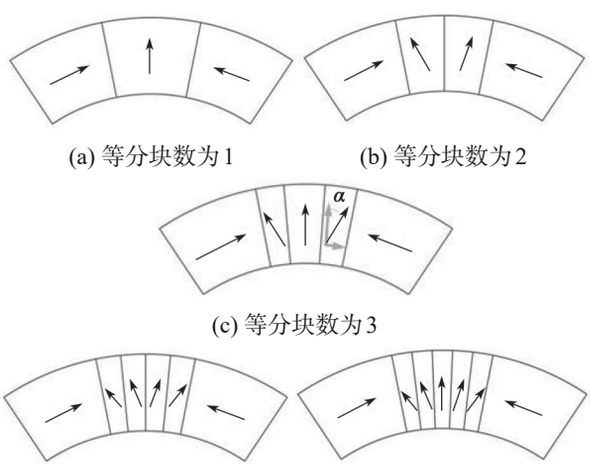
3.2　结构及磁化角优化

3.2.1　磁化角优化

在三维磁轮模型中，充磁角会对悬浮力和驱动力产生影响，为了确定径向充磁永磁轮的块数和最优磁化角，设置了块数为 1、2、3、4、5 的永磁轮结构，如图 17 所示，并在此基础上设置充磁角 α 分别为 20°、30°、36°、45°、50°、60°、70°、80°、90°，仿真计算结果如图 18 所示。由图 18 可知，最大悬浮力和驱动力分别出现在磁化角为 30°、36°、45°、60°、90°。因此，当充磁角度与等分的块数相匹配时，悬浮力和驱动力达到最大，相邻 2 块切向方向充磁的永磁体之间夹角为 180°，可得充磁角度与块数之间的关系为

$$n=\frac{180°}{\alpha}-1 \tag{11}$$

式中：α 为充磁角度；n 为永磁体等分块数。



(a) 等分块数为 1　(b) 等分块数为 2

(c) 等分块数为 3

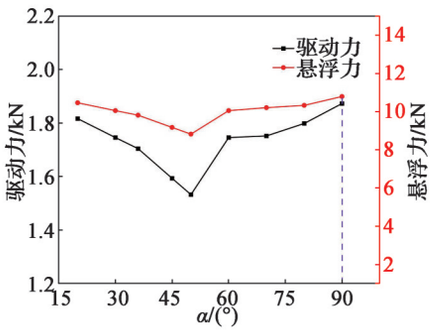
(d) 等分块数为 4　(e) 等分块数为 5

图 17　径向充磁永磁体多段等分

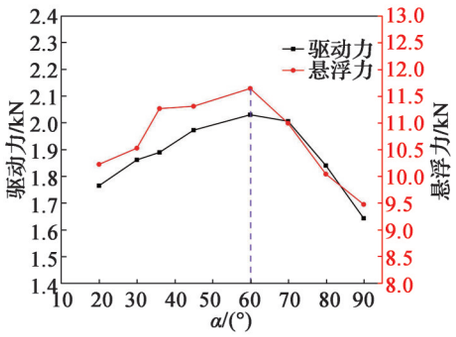
Fig. 17　Equal partition with radially magnetized permanent magnets

3.2.2　宽度优化

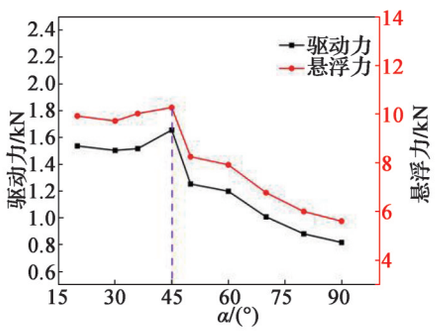
由于永磁轮外径和内径不同，永磁体宽度不容易计算，为了分析分块永磁体宽度对永磁轮悬浮力和驱动力的影响，考虑采取宽度相对应的圆心角来进行定义，对不同转速和永磁体宽度进行仿真计算，仿真计算结果如图 19 所示。由图 19 可知，在给定宽度的前提下，永磁轮悬浮力、驱动力与转速的变化关系基本一致；分块的永磁体越宽，相应的悬浮力和驱动力也越大。因此，在保证永磁体极对数和宽度一定的情况下，永磁体的宽度选择考虑 3 个原因：①永磁体的宽度过窄会给整体环形永磁轮的加工与粘合带来难度，而永磁体的电磁力特性并未得到有效改善；②永磁体的宽度不能过大，否则会降低切向磁化永磁体对整个永磁轮的影响；③考虑实际加工的情况，永磁体的宽度尽量选择整数。因此，选取 w= 10°，相较于不分段环形 Halbach 永磁轮结构，不仅能够提升悬浮力和驱动力，



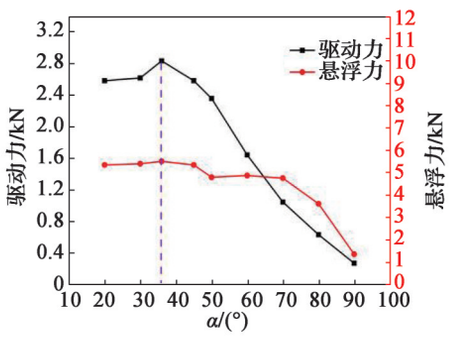
(a) 块数为 1 悬浮力和驱动力



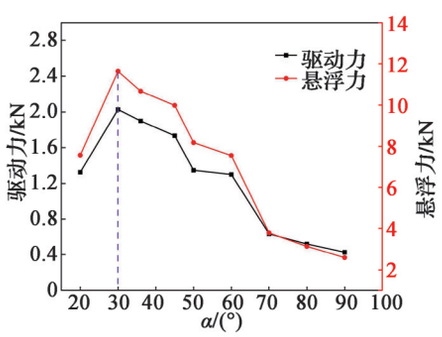
(b) 块数为 2 悬浮力和驱动力



(c) 块数为 3 悬浮力和驱动力



(d) 块数为 4 悬浮力和驱动力

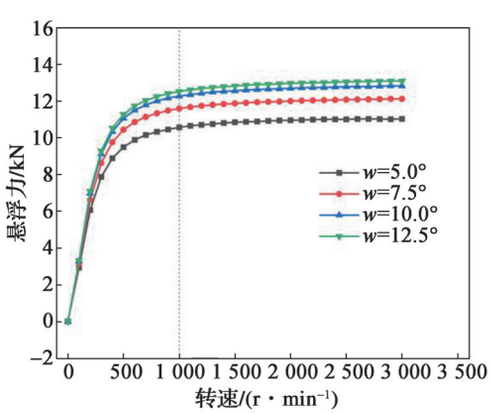


(e) 块数为 5 悬浮力和驱动力

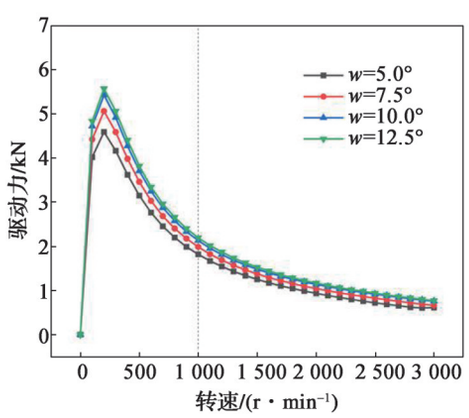
图 18　悬浮力、驱动力与充磁角度变化关系

Fig. 18　Variations of levitation force and propulsion force with magnetization angle

而且还能保证切向充磁永磁体和径向充磁永磁体的宽度相当，使得永磁体的尺寸更加合理，同时避免了较小磁化角的永磁体的生产。



(a) 悬浮力



(b) 驱动力

图 19　悬浮力和驱动力与分块永磁体宽度之间关系

Fig. 19　Variations of levitation force and propulsion force with width of split permanent magnets

3.3　永磁轮利用率

由于永磁轮总体尺寸不变，只是改变了充磁结构，因此永磁轮的质量大小保持不变，浮重比和驱重比会随着悬浮力和驱动力的增加而增加，仿真计算结果如图 20 所示。

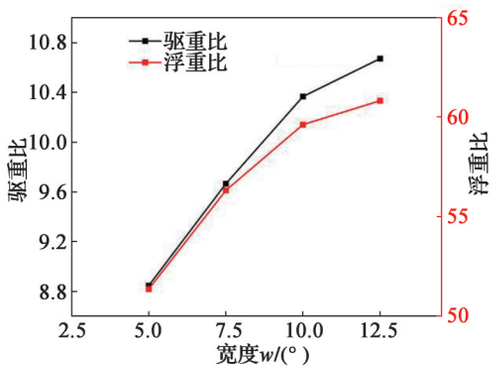
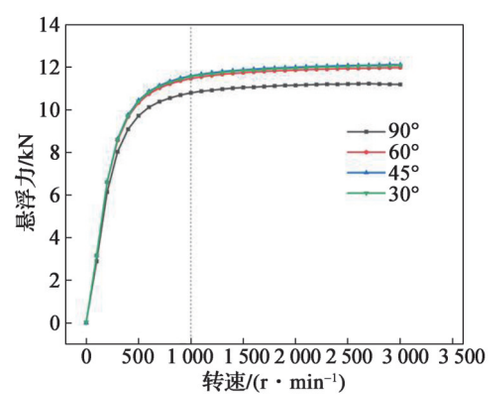


图 20　浮重比 L_f 和驱重比 L_p 与分块永磁体宽度之间变化

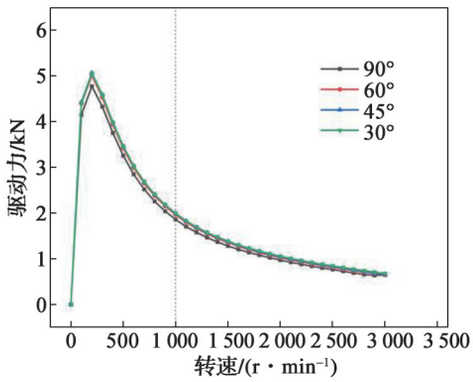
Fig. 20　Variations of L_f and L_p with width of the split permanent magnets

3.4　不同块数的力特性

若磁化角发生变化，为保证悬浮力和驱动力最大，径向永磁体块数也要相应发生变化。当磁化角分别为 30°、45°、60°、90°时，由式(11)可知，对应块数分别为 5、3、2、1，其中磁化角为 90°的永磁轮为传统 Halbach 永磁轮结构。经过仿真计算，在不同转速下，悬浮力和驱动力随转速变化的情况如图 21 所示。由图 21 可知，在径向充磁结构分段之后，永磁轮悬浮力和驱动力均有提高，在转速为 1 000 r/min 的条件下，磁化角为 45°的分层永磁轮的悬浮力为 11.67 kN，驱动力为 1.83 kN；磁化角为 90°的永磁轮悬浮力为 10.69 kN，驱动力为 1.70 kN；前者悬浮力相较于后者提高了 0.98 kN，提升幅度约为 9.2%，同时驱动力提高了 0.13 kN，提升幅度约为 7.6%。综上所述，考虑永磁轮径向充磁结构宽度和磁化角，选择磁化角 α 为 45°，此时块数为 3，宽度对应的中心角 w 为 10°。



(a) 悬浮力



(b) 驱动力

图 21　悬浮力和驱动力随磁化角的变化趋势

Fig. 18　Variation trend of levitation force and propulsion force with magnetization angle

4　结论

为提高传统环形 Halbach 永磁轮驱动承载能力，本文提出了一种关于永磁轮充磁结构改进的新思路，对其结构进行优化设计，可有效提高悬浮驱动性能并具有工程应用可行性，该系统结构简单、能耗少、浮重比和驱重比大，在研究过程中，得到以下结论：

①在相邻永磁体之间插入斜向磁化永磁体，可以改善 2 块永磁体交界处存在的磁饱和现象。在相同转速下，对插入永磁轮的宽度进行优化设计，确定合适的尺寸，与原永磁轮相比，悬浮力和驱动力分别提高了 17.37% 和 17.62%。

②对永磁轮径向充磁结构进行等分，可以有效增强外部磁场。分析不同等分块数与不同充磁角条件下永磁轮的悬浮力和驱动力，当等分块数与充磁角相匹配的时候，悬浮力和驱动力达到最大；在相同的尺寸下，磁化角为 45°的分层永磁轮的悬浮力和驱动力相较于磁化角为 90°的永磁轮分别提高 9.2% 和 7.6%。

本文从永磁轮的充磁结构入手，设计了可提高永磁轮利用率的拓扑结构，可为永磁电动悬浮系统的进一步优化设计提供参考，同时可将研究结论应用于新型磁悬浮车辆等系统，进一步促进新型载运工具的研发，实现科技创新。

参考文献：

[1]　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.
XIONG Jiayang, DENG Zigang. Research progress of high-speed maglev rail transit[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(1): 177-198.

[2]　邓自刚, 刘宗鑫, 李海涛, 等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 455-474.
DENG Zigang, LIU Zongxin, LI Haitao, et al. Development status and prospect of maglev train[J]. Journal of southwest

jiaotong university, 2022, 57(3): 455-474.

[3] POST R F, RYUTOV D D. The inductrack: a simpler approach to magnetic levitation[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2000, 10(1): 901-904.

[4] 张瑞华, 刘育红, 徐善纲. 美国Magplane磁悬浮列车方案[J]. 变流技术与电力牵引, 2005(5): 40-43.
ZHANG Ruihua, LIU Yuhong, XU Shangang. American magplane schemes[J]. Converter technology & electric traction, 2005(5): 40-43.

[5] 武瑛严, 陆光, 徐善纲. Inductrack磁浮技术及其在磁浮列车系统中的应用[J]. 电气应用, 2006(1): 1-3.
WU Yingyan, LU Guang, XU Shangang. Inductrack maglev technology and its application in maglev train systems[J]. Electrotechnical applications, 2006(1): 1-3.

[6] 袁成, 韩亚鹏, 马卫华, 等. 基于Halbach阵列的永磁电动悬浮仿真与性能影响因素分析[J]. 磁性材料及器件, 2021, 52(3): 8-13.
YUAN Cheng, HAN Yapeng, MA Weihua, et al. Simulation and performance of permanent magnet electric suspension based on Halbach array[J]. Journal of magnetic materials and devices, 2021, 52(3): 8-13.

[7] LIU Mingxin, TAN Yiqiu, YANG Qing, et al. Three-dimensional analytical calculation and optimization of plate-type permanent magnet electrodynamic suspension system[J]. Applied sciences, 2022, 12(19): 9926.

[8] BIRD J, LIPO T A. Characteristics of an electrodynamic wheel using a 2-D steady-state model[J]. IEEE transactions on magnetics, 2007, 43(8): 3395-3405.

[9] FUJII N, OGAWA K, MATSUMOTO T. Revolving magnet wheels with permanent magnets[J]. Electrical engineering in Japan, 1996, 116(1): 106-118.

[10] PAUL S, BIRD J Z. A 3-D analytic eddy current model for a finite width conductive plate[J]. The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 2014, 33(1/2): 688-706.

[11] PAUL S, BIRD J Z. Analytic 3-D eddy current model of a finite width conductive plate including edge-effects[J]. International journal of applied electromagnetics and mechanics, 2014, 45(1/4): 535-542.

[12] DUAN Jiaheng, ZHANG Wenlong, XIAO Song, et al. Investigation of the characteristics of the electrodynamic wheel suspension device with two-DOF motion[J]. IEEE transactions on plasma science, 2020, 48(6): 2274-2279.

[13] YUAN Yuan, DENG Zigang, ZHANG Shuai, 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): 1-5.

[14] ZHANG Ze, DENG Zigang, ZHANG Shuai, et al. Design and operating mode study of a new concept maglev car employing permanent magnet electrodynamic suspension technology[J]. Sustainability, 2021, 13(11): 5827.

[15] SHI Hongfu, DENG Zigang, ZHANG Baojian, et al. Thermal-force coupling analysis of permanent magnet electrodynamic wheel system for maglev car[J]. IEEE transactions on magnetics, 2023, 59(1): 1-9.

[16] LIN Peng, DENG Zigang, KE Zhihao, et al. Dynamic characteristics and working modes of permanent magnet electrodynamic suspension vehicle system based on six wheels of annular Halbach structure[J]. Technologies, 2023, 11(1): 16.

[17] SHI Hongfu, KE Zhihao, ZHENG Jun, et al. An effective optimization method and implementation of permanent magnet electrodynamic wheel for maglev car[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(7): 8369-8381.

[18] ZHANG Hongye, KAILS K, MACHURA P, et al. Conceptual design of electrodynamic wheels based on HTS Halbach array magnets[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2021, 31(5): 1-6.

[19] BIRD J, LIPO T A. A 3-D magnetic charge finite-element model of an electrodynamic wheel[J]. IEEE transactions on magnetics, 2008, 44(2): 253-265.

[20] QIN Wei, BIRD J Z. Electrodynamic wheel magnetic rolling resistance[J]. IEEE transactions on magnetics, 2017, 53(8): 1-7.

[21] HASANZADEH S, REZAEI H, QIYASSI E. Analysis and optimization of permanent magnet dimensions in electrodynamic suspension systems[J]. Journal of electrical engineering & technology, 2018, 13(1): 307-314.

[22] DENG Zigang, ZHANG Weifeng, CHEN Yang, et al. Optimization study of the Halbach permanent magnetic guideway for high temperature superconducting magnetic levitation[J]. Superconductor science and technology, 2020, 33 (3): 034009.

Novel design of magnetization and study of magnetic force characteristics of annular Halbach permanent magnet electrodynamic wheel

CHEN Yihao[1], LIANG Le[2,3], LIU Xin[1], DENG Zigang[1,2]

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China；
2. Research Center for Super-High-Speed Evacuated Tube Maglev Transport, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China；3. National Laboratory for Rail Transit (under construction), Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Radial permanent magnet electrodynamic wheels (PMEDW) offer a distinctive advantage through their integration of levitation and propulsion. However, they are prone to non-air-gap side magnetic flux leakage, resulting in a reduced utilization rate. To address this limitation and improve their load-carrying capacity through levitation, this paper proposes a novel magnetization scheme for PMEDWs, with the objective of enhancing their levitation drive capability without altering their overall mass. The proposed design employs a PMEDW structure featuring obliquely magnetized permanent magnets and radially magnetized permanent magnets, which are equally inserted between adjacent permanent magnets. The study investigated the basic principle of the permanent magnet wheel structure modified by introducing new magnetization methods. A three-dimensional finite element model was created to determine the optimal size of each structure through a solving process that incorporates two performance indexes: the levitation-to-weight and levitation-to-drag ratios. The simulation results revealed that the levitation force of the permanent magnet wheel structure increased by 14.8% with the introduction of obliquely magnetized permanent magnets, while the propulsion force showed a 14.98% enhancement. The permanent magnet wheel structure with equally inserted radially magnetized permanent magnets demonstrated a 9.2% increase in levitation force and a 7.6% improvement in propulsion force, respectively. The study findings indicate the proposed magnetization methods effectively elevate both the levitation and propulsion forces of the system, while maintaining the consumption of permanent magnets unchanged. The novel design not only reduces cost but also enhances the operating efficiency of the system, providing insights for future optimizations of the PMEDW structure and the design of magnetically levitated vehicles.

Keywords: permanent magnet electrodynamic wheel (PMEDW); Halbach array; magnetization structure; permanent magnet wheel utilization

收稿日期：2023-11-28；修回日期：2024-05-23