DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.02.100　　文章编号：1000-128X(2023)02-0090-07

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

刘　新[1]，邓自刚[1,2]，梁　乐[2]，李凯文[3]，鲁　浩[1]，郑　珺[1]
（1.西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，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 电气工程学院，四川 成都　611756）

摘　要：基于永磁电动悬浮的原理，将Halbach环形永磁轮和导体板顺时针旋转后倾斜布置，提出一种实现磁浮列车“悬浮–导向–推进”一体化方案。首先，采用ANSYS Maxwell有限元仿真软件对斜置永磁轮的三维力特性进行分析，仿真结果表明：对于单个外径为200 mm的永磁轮，倾斜角度应不小于60°，从而保证浮重比大于5.5，此时仍可获得310 N的推进力和380 N的导向力。然后，进一步分析了永磁轮三维力随工作气隙、导体板厚度和电导率的变化规律：随着工作气隙变大，三维力均呈下降趋势；随着导体板厚度和电导率的增加，悬浮力和导向力先增加后饱和，驱动力则先增大后减小。基于上述分析结果，给出了新型磁浮列车“悬浮–驱动–推进”一体化的概念模型设计，并对更大直径、宽度的磁轮进行了计算分析，结果表明：直径250 mm永磁轮的磁场利用率最大，磁场利用率和磁轮宽度的变化呈正相关。相关的研究工作是对永磁电动悬浮理论的应用和拓展，能够有效降低磁浮列车系统的建设成本，为“悬浮–导向–推进”一体化的新型磁浮列车设计提供参考。

关键词：永磁轮；一体化；磁浮列车；磁轮利用率
中图分类号：U237　　**文献标识码：**A

Levitation–guidance–propulsion integrated design for maglev trains based on oblique ring Halbach permanent magnet wheels

LIU Xin[1], DENG Zigang[1,2], LIANG Le[2], LI Kaiwen[3], LU Hao[1], ZHENG Jun[1]

(1. State Key Laboratory of Traction Power, 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.School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

Abstract: In this paper, a levitation, guidance and propulsion integrated design was proposed for maglev trains on the principle of permanent magnet electrodynamic suspension, in which the Halbach ring permanent magnet wheels and conductor plates were tilted after clockwise rotation. Firstly, the three-dimensional force characteristics of the oblique permanent magnet wheel were analyzed with the ANSYS Maxwell finite element simulation software. According to the simulation results, for a single magnetic wheel with an outer diameter of 200 mm, the oblique angle should not be less than 60 degrees to ensure a buoyancy-weight ratio greater than 5.5 and generate a corresponding propulsive force of 310 N and guiding force of 380 N. Further analysis involved the variation law of the three-dimensional force of the magnetic wheel with the working air gap, conductor plate thickness and conductivity. The three-dimensional force decreased

基金项目：四川省自然科学基金项目（2023NSFSC1004）
通信作者：邓自刚（1982—），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：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.
Citation: LIU Xin, DENG Zigang, LIANG Le, et al. Levitation–guidance–propulsion integrated design for maglev trains based on oblique ring Halbach permanent magnet wheels[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(2): 90-96.

with increasing working air gap. With the increase of the thickness and conductivity of the conductor plate, the suspension force and guiding force increased until reaching saturation, while the propulsion force increased first and then decreased. Based on the above analysis results, a new conceptual model of the levitation, guiding and propulsion integration was presented for maglev trains, and the magnetic wheels with larger diameters and widths were calculated and analyzed. According to the results, the magnetic field utilization rate is the maximum when the diameter is 250 mm in diameter, and the utilization rate is positively correlated with the change in the magnetic wheel width. Applying and extending the permanent magnet electrodynamic suspension theory, the study results can be applied to effectively reduce the construction cost of maglev train systems and provide a reference for the design of new maglev trains with integrated levitation, guidance and propulsion.

Keywords: permanent magnet wheel; integration; maglev train; utilization rate of EDW

0　引言

磁浮列车凭借其无接触、低噪声、绿色环保等优势有望引领未来高速轨道交通的发展。因此，合理统筹发展磁浮列车的工作是建设交通强国的重要组成部分。目前，国际上主要的磁悬浮制式包括电磁悬浮、超导钉扎磁浮和电动悬浮，其中电动悬浮又分为低温超导电动悬浮和永磁电动悬浮。常导电磁悬浮系统通过电磁铁和轨道之间的吸引力实现悬浮和导向[1]，同时需要设计悬浮导向控制器，以实现对悬浮力和导向力的实时控制。高温钉扎悬浮系统利用热力学温度 77 K 的液氮使高温超导体处于超导状态，体现出无源自稳定悬浮优势[2-3]。低温超导电动悬浮系统把线圈浸泡在热力学温度 4.2 K 的液氦中，使其处于超导状态，从而提供悬浮力与导向力[4]。永磁电动悬浮系统基于永磁体和导体板之间的相对运动，在导体板中产生涡流，从而形成感应场与源场相互作用，产生竖直方向的悬浮力和水平方向上的磁阻力[5]。

永磁电动悬浮系统实现容易、成本低且悬浮间隙大，其场源可以分为直线型 Halbach 和环形 Halbach 阵列。国内很多高校和科研院所对直线型 Halbach 阵列做了很多研究。2005 年，王厚生、杜玉梅等相关研究人员用多层相互绝缘的金属片代替整体式导体板，优化了电磁阻力[6]。2009 年，中国科学院李春生、杜玉梅等人对直线型 Halbach 的磁体进行了优化设计[7]。2016 年，西南交通大学陈殷推导出二维双边 Halbach 的电磁力公式，计算结果表明：相较于单边 Halbach 阵列，双边 Halbach 阵列提升了浮阻比[8]。2019 年，中科院电工所提出了三维双边 Halbach 的解析模型[9]，为低速磁浮列车的设计提供了理论和依据。环形 Halbach 阵列即永磁轮，也被称为电动轮[10]（Electro Dynamic Wheel，EDW），可以分为轴向轮和径向轮。文献[11]解析了轴向轮的悬浮力，并采用有限元方法进行了对比。文献[12]介绍了用倾斜布置的轴向永磁轮和部分重叠永磁轮来研究系统的悬浮、导向和推进性能。文献[13]从解析的角度建立了径向 Halbach 排布的永磁轮二维、三维稳态模型，并用有限元的方法验证了模型的准确性。文献[14]分别采用轴向永磁轮和径向永磁轮设计了无接触运输系统和悬浮驱动小车。文献[15]利用径向 Halbach 磁轮提出了磁浮小汽车的可行性。文献[16]设计出了磁浮小汽车并在此基础上探究了其运行模式。

但上述的研究工作均未能考虑永磁电动悬浮系统磁阻力过大、导向功能欠缺等问题，本文通过倾斜布置径向 Halbach 磁轮，提出了一种“悬浮–导向–推进”一体化方案，将永磁轮产生的法向力沿着垂向和水平方向分解，同时获得悬浮与导向性能，同时产生的驱动力可推进列车前进。该设计方案的优点是可自主设计倾斜角度，满足不同工况下的需求。为了验证其结构的合理性，本文详细分析了其工作原理，并结合有限元仿真方法研究了单个倾斜永磁轮的三维力特性。最后，基于一体化装置的磁浮列车概念，对不同尺寸的永磁轮利用率展开了探讨，为探索新型的“悬浮–导向–驱动”一体化的磁浮列车提供一种新的思路。

1　工作原理

根据永磁电动悬浮原理，当永磁体磁场与弱磁性良导体在有限空间内以一定速度发生相对位移时，会在导体内部产生涡流，涡流形成的场即是感应场，永磁体磁场与感应磁场相互作用，同时产生悬浮力和磁阻力。本装置基于永磁电动悬浮原理，提出了一种实现磁浮列车“悬浮–导向–推进”一体化方案，该方案中的 Halbach 环形永磁轮是永磁电动悬浮的一种特殊结构，如图 1 所示。

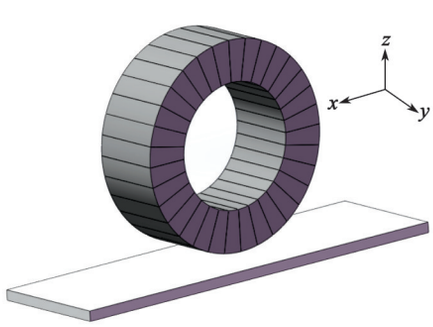
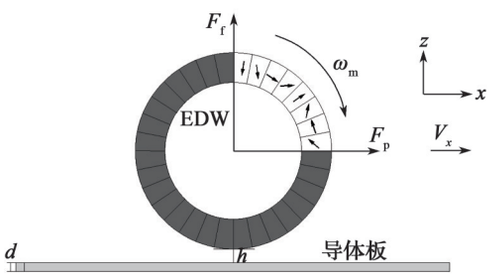


图 1　磁轮三维模型示意图

Fig. 1　3D model schematic of EDW

当磁化方向如图2所示的永磁轮在导体板上方旋转时，产生竖直向上的法向悬浮力F_f和前进方向上的驱动力F_p。悬浮力F_f用来克服重力，驱动力F_p可以提供1个前进方向上的速度V_x，同时磁轮存在1个线速度V_m。



d——导体板厚度；h——气隙。

图2 磁轮磁化方向示意图

Fig. 2 Schematic diagram of magnetization direction of EDW

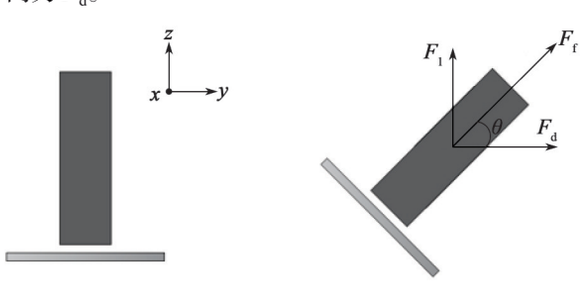
各速度之间满足以下关系：

$$V_s = V_m - V_x \tag{1}$$

$$V_m = \omega_m R_0 \tag{2}$$

式中：V_s为相对滑移速度；V_m为永磁轮的旋转线速度；V_x为相对于导体板的平移速度；ω_m为永磁轮的旋转角速度；R_0为永磁轮的外半径。

当滑移速度V_s>0时，F_p表现为驱动力；当滑移速度V_s<0时，F_p表现为磁阻力。如图3所示，当磁轮导体板整体旋转后，倾斜角度为θ时，永磁轮的法向悬浮力F_f便分解为在z、y两个方向上，表现为悬浮力F_l和导向力F_d。



(a) 常规永磁轮 (b) 旋转永磁轮

图3 常规永磁轮和旋转永磁轮示意图

Fig. 3 Schematic diagram of conventional EDW and rotating EDW

由图3可知，悬浮力F_l、导向力F_d与法向悬浮力F_f的关系为：

$$F_l = F_f \sin\theta \tag{3}$$

$$F_d = F_f \cos\theta \tag{4}$$

本文的设计思路是通过将永磁轮和感应轨道板倾斜布置，充分利用永磁轮产生的涡流场，除提供悬浮力外，同时还提供导向力和驱动力。与以往研究相比，需要牺牲部分悬浮力用于导向功能，因此需要对该设计的三维力特性进行分析，在确保悬浮性能优异的同时兼具导向和驱动性能。

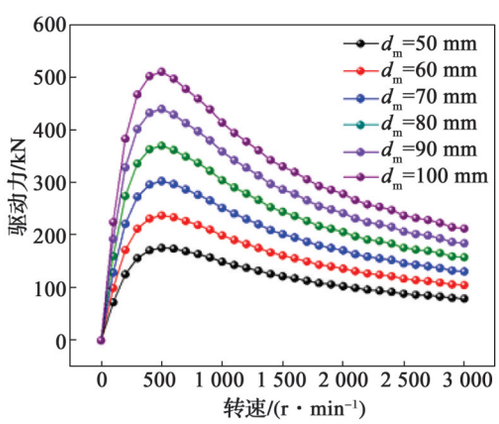
2 三维力特性研究

根据前文对永磁轮工作原理的理论分析可知，永磁轮和导体板的参数会对系统的三维力特性产生影响。因此，本部分将分析永磁轮转速、永磁轮利用率、倾斜角度、导体板参数等对三维力特性的作用规律，总结得到影响系统力特性的一般准则。

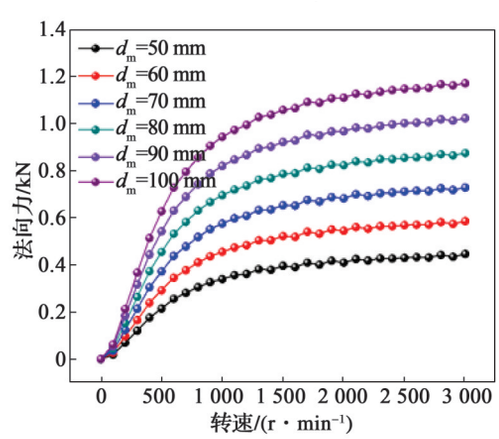
2.1 磁轮转速

对于环形Halbach永磁轮，法向悬浮力F_f、驱动力F_p和磁轮的转速密切相关。为了分析永磁轮转速对系统力特性的影响，以及确定后续仿真计算的工作转速，本小节对不同磁轮转速下的F_f和F_p的关系进行分析计算，仿真参数如表1所示，仿真结果如图4所示。

由图4可知，在给定永磁轮宽度的条件下，法向悬浮力F_f和驱动力F_p随转速的变化趋势基本一致。法向悬浮力F_f随转速增大而增大，但驱动力F_p会先增大后减小；在转速为1 000 r/min时，驱动力F_p衰减速度最快，为保证较大的驱动力F_p和悬浮力F_f，将转速定为1 000 r/min。



(a) 驱动力F_p



(b)法向悬浮力F_f

图4 驱动力F_p和法向悬浮力F_f随转速的变化趋势

Fig. 4 Variation trend of propulsive force (F_p) and normal suspension force(F_f) with rotation speed

表 1　Maxwell 有限元参数表

Table 1　Maxwell finite element parameters

参数名称	参数值
永磁轮外径 D_o/mm	200
永磁轮内径 D_i/mm	140
永磁轮宽度 d_m/mm	50~100
永磁轮极对数 p	4
永磁轮磁化角 θ_m/(°)	45
气隙 h/mm	10
导体板电导率 σ/(s·m^{-1})	3.8×10^7
导体板长度 L/mm	350
导体板宽度 W/mm	180
导体板厚度 d/mm	10

2.2　永磁轮利用率

永磁轮与导体板相互作用产生的力受永磁轮很多参数的影响，如永磁轮外径 D_o、永磁轮内径 D_i 和永磁轮宽度 d_m 等。考虑到永磁轮外径过小导致力值不明显，外径过大计算量增加，将永磁轮外径 D_o 确定为 200 mm，分析永磁轮内径 D_i 和永磁轮宽度 d_m 对法向悬浮力 F_f 和驱动力 F_p 的影响。当磁轮宽度增加或者内径减小，法向悬浮力 F_f 和驱动力 F_p 都会增加[15,17]，但是永磁轮本身的永磁体使用量也会增加。因此，本节通过定义法向力与磁轮重量的比值 P_l、驱动力与磁轮重量的比值 P_p 来评估磁轮的利用率。

$$P_f=\frac{F_f}{mg} \tag{5}$$

$$P_p=\frac{F_p}{mg} \tag{6}$$

$$k=\frac{D_i}{D_o} \tag{7}$$

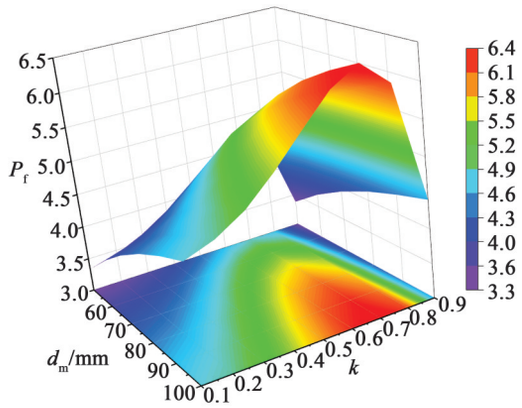
$$P_l=\frac{F_l}{mg} \tag{8}$$

$$P_d=\frac{F_d}{mg} \tag{9}$$

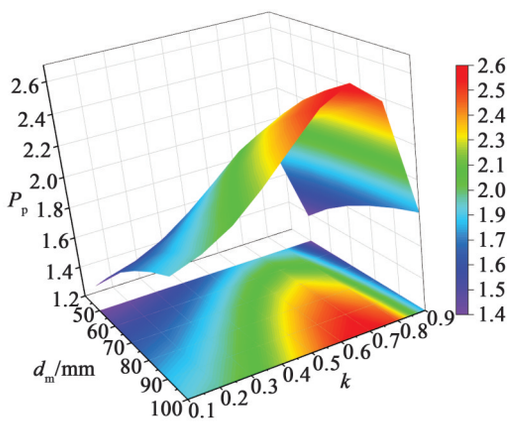
式中：P_f 为法向悬浮力和永磁轮重量的比值；m 为单个磁轮质量；g 为重力加速度；P_p 为驱动力与永磁轮重量的比值；k 为永磁轮内直径和外直径的比值；P_l 为悬浮力与磁轮重量的比值；P_d 为导向力与磁轮重量的比值。

根据表 1 的参数，仿真计算永磁轮法重比 P_f、驱重比 P_p 随永磁轮内径比 k 和宽度 d_m 的变化，计算结果如图 5 所示。

由图 5 可知，永磁轮法重比 P_f 和驱重比 P_p 随永磁轮宽度的增加而单调增加；由于在图 5 中永磁轮宽度只计算到 100 mm，法重比 P_f 和驱重比 P_p 的最佳点在宽度为 100 mm 处取得，此时永磁轮内外径比 k 为 0.7，法向悬浮力与永磁轮重量之比 P_f 最大为 6.43，驱动力与永磁轮重量之比 P_p 最大为 2.64。



(a) 法重比 P_f



(b) 驱重比 P_p

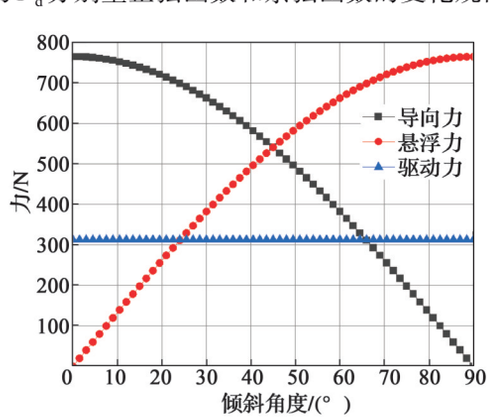
图 5　永磁轮法重比 P_f 和驱重比 P_p 随永磁轮内径比 k 和宽度 d_m 的变化

Fig. 5　Variation of P_f and P_p with k and d_m of the EDW

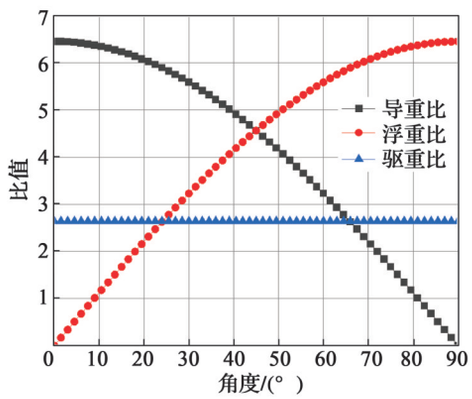
2.3　倾斜角度

通过前文分析可知，倾斜角 θ 是斜置永磁轮“悬浮–导向–推进”一体化系统的重要参数，不同的倾斜角度会引起悬浮力和导向力的变化，两者相位相差 90°。在实际应用中，根据不同的工况，选择不同的倾斜角度以满足悬浮力和导向力要求，永磁轮的三维力特性、导重比 P_d、浮重比 P_l 和驱重比 P_p 的仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知，当倾斜角 θ 为 0°~90°时，悬浮力 F_l 和导向力 F_d 分别呈正弦函数和余弦函数的变化规律，在



(a) 三维力



(b) 比值

图6 永磁轮三维力和3个比值随倾斜角度θ的变化

Fig. 6 Variation of three-dimensional force and three ratios of EDW with tilt angle θ

45°时两者相等，而驱动力F_p保持不变。考虑到倾斜角θ对悬浮力F_1存在衰减，为保证悬浮性能，浮重比P_1应至少保证为5.5[15]，故倾斜角θ不应小于60°；此外，为保证导向力，倾斜角θ应取小为好。综合考虑，取θ=60°。当倾斜角θ=60°时，仿真计算结果如表2所示，此时，单个磁轮产生悬浮力650 N，导向力380 N，驱动力310 N，浮重比5.5。在其他工况下，可根据实际工况需求选择合适的倾斜角θ，以匹配悬浮导向性能。

表2 单个磁轮三维力特性(θ=60°)

Table 2 Three-dimensional force characteristics of single EDW (θ=60°)

参数名称	参数值	参数名称	参数值
F_1/N	650	P_1	5.50
F_d/N	380	P_d	3.20
F_p/N	310	P_p	2.64

2.4 工作气隙

保持表1中永磁轮和导体板基本参数不变，永磁轮宽度d_m取100 mm，对永磁轮和导体板之间气隙作参数化分析，仿真计算结果如图7所示。

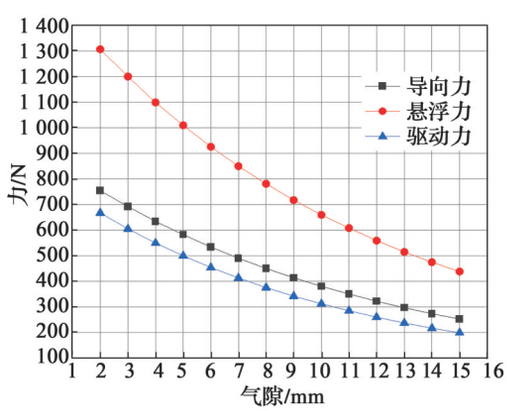


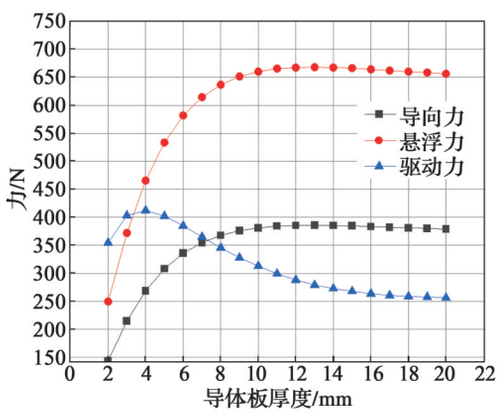
图7 永磁轮三维力随气隙的变化

Fig. 7 Variation of three-dimensional force of EDW with the air gap

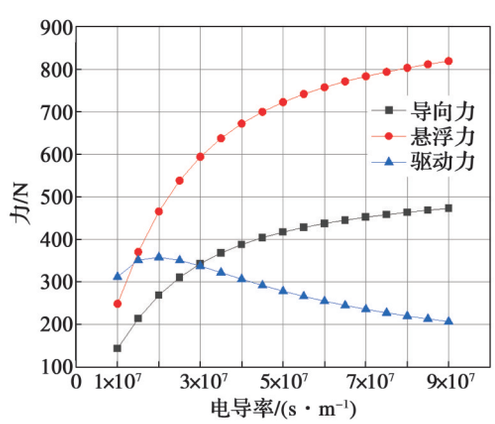
工作气隙决定了永磁轮的磁场在导体板中的穿透深度。气隙比较大，永磁轮磁场透过导体板较少，在导体板中产生的涡流较小，形成的感应场较弱，产生的三维力也小；反之，气隙越小，三维力越大。

2.5 导体板参数

导体板的参数对三维力特性同样存在较大影响，以下对导体板厚度和电导率进行分析。永磁轮和导体板基本参数与表1参数一致，永磁轮宽度d_m取100 mm，分别对导体板厚度和电导率作参数化分析，仿真计算结果如图8所示。



(a) 厚度



(b) 电导率

图8 磁轮三维力随导体板厚度和电导率的变化

Fig. 8 Variation of three-dimensional force of EDW with conductor plate thickness and conductivity

由图8(a)可知，法向悬浮力F_f分解出的悬浮力F_1和导向力F_d收敛不变，这是由于磁轮磁场对导体板的渗透存在一个饱和厚度而造成的；而驱动力会减小，这是由于导体板厚度增加引起电阻减小而造成的。

由图8(b)可知，驱动力F_p随着电导率的增加呈现先增加后减小的趋势，而悬浮力F_1和导向力F_d则是先增加后饱和的趋势。这是由于随着导体板电导率增大，集肤效应更明显，电流聚集在导体板表面，磁场垂直分量受到阻碍，驱动力F_p会减小，而悬浮力F_1和导向

力 F_d 对于涡流增加更加敏感，呈上升趋势。

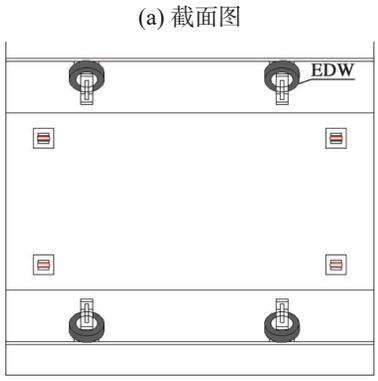
3　模型列车概念设计

3.1　小磁轮方案

根据前文，对于直径 200 mm 的小永磁轮，单个装置的悬浮力 F_l、导向力 F_d 和驱动力 F_p 分别为 650 N、380 N 和 310 N。如图 9 所示，本文采用了 4 个磁轮给出了“悬浮–导向–驱动”一体化的列车模型，其他组成部件包括车架、4 个带动永磁轮转动的旋转电机、特殊轨道、沿着线路铺设的导体板等。



(a) 截面图



(b) 底部示意图

图 9　一体化磁浮列车模型示意图

Fig. 9　Schematic diagram of integrated maglev train model

利用 4 个直径为 200 mm 永磁轮在气隙 10 mm 条件下可以产生 5 000 N 的悬浮力和 0.1g 的驱动加速度；结合优化后的导体板参数，三维力特性可以根据不同工况进行动态调控，以获得最佳的悬浮和导向性能。

3.2　更大尺寸磁轮分析

在上节研究了将直径 200 mm 的永磁轮用于实现列车模型的“悬浮–导向–驱动”一体化设计，但外径 200 mm 的永磁轮产生的力有限，对于未来应用在工程化的列车需要更大的力、更大的浮重比和更大的驱重比，因此本节结合实际工程需要，探索研究更大尺寸永磁轮的适用性指标。对外径 200~500 mm 的永磁轮在宽度在 50~100 mm 的条件下进行仿真计算，仿真结果如图 10 和图 11 所示。

由图 10 和图 11 可知，各个尺寸永磁轮的最大利用率的点仍然在内外径比为 0.7 和磁轮宽度为 100 mm 处取得；随着外径的增大，虽然永磁轮产生的悬浮力、导向力和驱动力在增大，但是其驱重比、浮重比却是在下降的。这里设定永磁轮参数时最大宽度只取到 100 mm，根据上文最大利用率和宽度的结论，有必要对大尺寸永磁轮的宽度进行探讨，大尺寸永磁轮法重比和驱重比的仿真结果如图 12 所示。

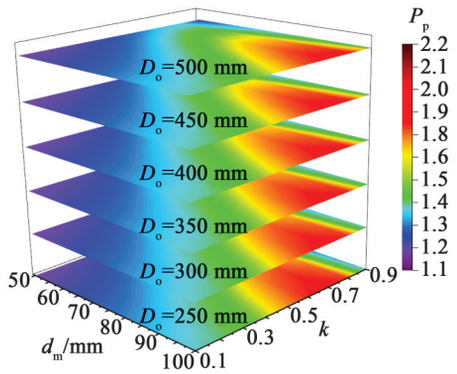


图 10　永磁轮不同外径下驱重 P_p 比与内径比 k 和宽度 d_m 的关系

Fig. 10　Relationship between propulsive force-weight ratio (P_p) and inner diameter ratio (k) and width (d_m) under different outer diameters of EDW

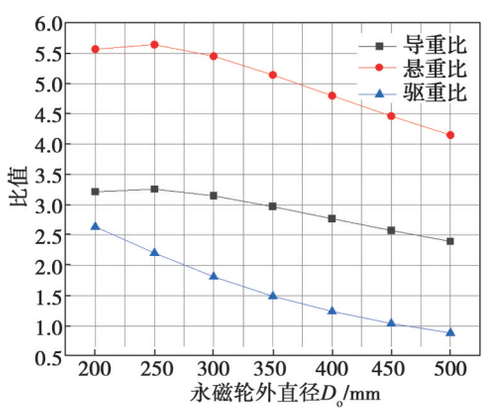
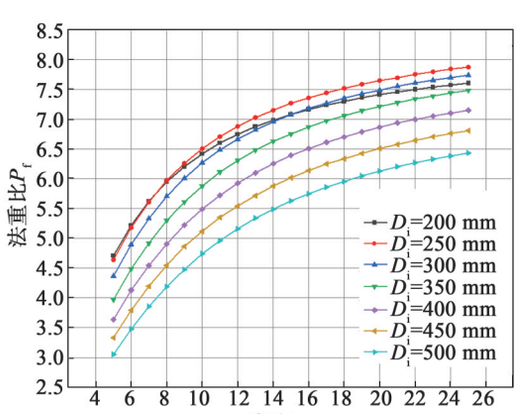


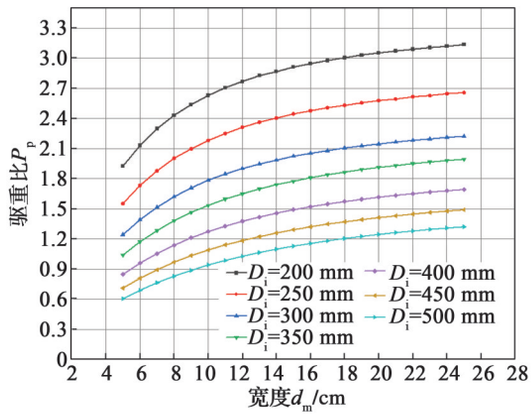
图 11　各比值和永磁轮外直径的关系（k=0.7）

Fig. 11　Relationship between ratios and outer diameter of EDW (k=0.7)

由图 12 可知，在相同宽度下，驱重比随着外径增大而减小，法重比在外径为 250 mm 时最优。综上所述，为提高永磁轮利用率，最好选用小直径、大宽度的永磁轮，然后在车上增加永磁轮数量以提高悬浮力和驱动力。



(a) 法重比



(b) 驱重比

图 12　外径和宽度共同作用下磁轮利用率

Fig. 12　Utilization rate of EDW under the joint action of outer diameter and width

4　结论

本文提出了斜置永磁轮磁浮列车“悬浮–导向–推进”一体化装置的方案，从原理上解决了永磁轮无导向能力的缺点，通过仿真与分析，得出以下结论：①验证了永磁轮和导体板倾斜布置的磁浮列车“悬浮–导向–推进”一体化方案的可行性。对于未来工程化应用，可以选择合适尺寸的永磁轮提高利用率，通过增加永磁轮的数量来增大悬浮力和驱动力。②悬浮力、导向力与永磁轮产生的法向力分别呈正弦函数和余弦函数的关系，可根据不同工况和应用场景，合适选择倾斜角度以匹配悬浮与导向需求。③分析得出了永磁轮的最佳内径比，探讨了永磁轮在不同直径和不同宽度下的利用率，为永磁轮选择提供参考。

斜置永磁轮的磁浮列车“悬浮–导向–推进”一体化方案的难点是该系统对控制系统的要求较高，未来样机研制将聚焦于控制系统研究、悬浮导向匹配等工作。

参考文献：

[1] LEE H W, KIM K C, LEE J. Review of maglev train technologies[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(7): 1917-1925.

[2] HELLMAN F, GYORGY E M, JOHNSON D W, et al. Levitation of a magnet over a flat type II superconductor[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 63(2): 447-450.

[3] HUANG Zhichuan, HONG Ye, LEI Wuyang, et al. Dynamic guidance performance of GdBaCuO and YBaCuO bulk single grain superconductors under a varying external magnetic field[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(35): 355001.

[4] 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.

[5] PAUL S, BOMELA W, PAUDEL N, et al. 3-D eddy current torque modeling[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 905-908.

[6] 王厚生, 杜玉梅, 夏平畴, 等. 电动式磁悬浮列车金属板轨道结构的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 162-165.
WANG Housheng, DU Yumei, XIA Pingchou, et al. Research on DMS train metal guideways construction[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 162-165.

[7] 李春生, 杜玉梅, 夏平畴, 等. 磁浮列车工程中的Halbach永久磁体结构的优化[J]. 工程设计学报, 2007, 14(4): 334-337.
LI Chunsheng, DU Yumei, XIA Pingchou, et al. Structure optimization of PM Halbach array for EDS maglev[J]. Journal of Engineering Design, 2007, 14(4): 334-337.

[8] 陈殷, 张昆仑. 板式双边永磁电动悬浮电磁力计算[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 150-156.
CHEN Yin, ZHANG Kunlun. Calculation of electromagnetic force of plate type null double side permanent magnet electrodynamic suspension[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 150-156.

[9] 陈殷, 李耀华, 李艳. 板式双边永磁电动悬浮三维解析计算[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(12): 29-34.
CHEN Yin, LI Yaohua, LI Yan. Three-dimensional analytical calculation of plate-type double permanent magnet electrodynamic suspension[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(12): 29-34.

[10] FUJII N, CHIDA M, OGAWA K. Three dimensional force of magnet wheel with revolving permanent magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(5): 4221-4223.

[11] 秦伟, 范瑜, 朱熙. 永磁磁轮磁悬浮力的解析与数值方法研究[J]. 微计算机信息, 2010, 26(13): 218-219.
QIN Wei, FAN Yu, ZHU Xi. Levitation force analysis of a permanent magnet wheel[J]. Microcomputer Information, 2010, 26(13): 218-219.

[12] FUJII N, NONAKA S, HAYASHI G. Design of magnet wheel integrated own drive[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(5): 4013-4015.

[13] PAUL S, BIRD J Z. A 3-D analytic eddy current model for a finite width conductive plate[J]. Compel International Journal for Computation & Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2014, 33(1/2): 688-706.

[14] JUNG K S. Parametric design of contact-free transportation system using the repulsive electrodynamic wheels[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2016, 17(3): 310-316.

[15] 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.

[16] ZHANG Ze, DEND 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.

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

收稿日期：2022-09-27
修回日期：2022-10-28