

# 永磁导轨悬浮和导向磁力研究

田录林<sup>1</sup>, 张靠社<sup>1</sup>, 王德意<sup>1</sup>, 田琦<sup>2</sup>, 刘家军<sup>1</sup>, 李知航<sup>3</sup>

- (1. 西安理工大学水电学院, 陕西省 西安市 710048; 2. 西北大学数学系, 陕西省 西安市 710069;  
3. 西安电子科技大学通讯工程学院, 陕西省 西安市 710071)

## Research on the Levitation and Guidance Magnetic Force of Permanent Magnetic Guideway

TIAN Lu-lin<sup>1</sup>, ZHANG Kao-she<sup>1</sup>, WANG De-yi<sup>1</sup>, TIAN Qi<sup>2</sup>, LIU Jia-jun<sup>1</sup>, LI Zhi-hang<sup>3</sup>

- (1. College of Water and Electricity Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China;  
2. Department of Math, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi Province, China; 3. College of Communication Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** To seek the simple calculation method for permanent magnetic guideway (PMG) magnetic force, based on PM (permanent magnet) magnetic force numeral-integral formula which is derived from equivalent magnetic charge method and virtual displacement method, the analytical magnetic force model of PMG was constructed according to the structure character of two parallel rectangle-section PM and PMG. Based on Current Image Method, the virtual image of PM in magnetizer was obtained. PMG levitation and guidance magnetic force were also analyzed. The analysis on such model shows that the magnetic force of two parallel rectangle-section permanent magnets is proportional to the square of residual magnetism induction density and PM longitudinal length. It also shows that the magnetic force increases with the increment of PM cross section and decreases with the increment of gap between two permanent magnets; while that PMG levitation magnetic force decreases with the increment of PMG obliquity and guidance magnetic force increases with the increment of PMG obliquity. More precise calculation results of magnetic force can be achieved by algebra calculation. The calculated values are basically in accordance with those measured.

**KEY WORDS:** permanent magnetic guideway; virtual image of permanent magnet; levitation magnetic force; guidance magnetic force; analytical model

**摘要:** 为了寻求永磁悬浮导轨磁力的简便算法, 基于由磁荷法和虚位移法给出的永磁磁力数值积分公式, 结合两块平行矩形截面永磁体及永磁导轨结构特点, 推导出永磁悬浮导轨解析磁力模型; 根据介质分界面为平面的电流镜像法, 得到了永磁体在铁磁体中的镜像, 分析了永磁导轨的悬浮磁力和导向磁力。模型分析表明: 两块截面平行永磁体的磁力

分别与永磁体剩磁的平方和永磁体的纵向长度成正比, 磁力随永磁体的横截面增大而增大, 随永磁体的间距增大而减小; 永磁导轨悬浮磁力随永磁导轨倾斜度增大而减小, 导向磁力随永磁导轨倾斜度增大而增大。该模型通过代数运算就可得到精度较高的磁力计算结果。经验证, 模型计算值和实验值吻合。

**关键词:** 永磁导轨; 永磁体镜像; 悬浮磁力; 导向磁力; 解析模型

## 0 引言

磁浮导轨是利用磁场力将运动物体悬浮起来的。由于它非接触、无摩擦、无磨损、无污染, 所以具有运行速度快、噪声小、功耗低、寿命长、精度高、隔振等优点, 可广泛应用于导轨发射、轨道运输、机械加工、真空超净技术等领域。电磁<sup>[1-6]</sup>和超导<sup>[7-11]</sup>磁悬浮技术已用于磁悬浮系统。电磁悬浮电耗高, 昂贵的传感器和控制器使得它体积大、造价贵、控制复杂、可靠性降低; 超导磁浮需要致冷设备, 所以它体积大、能耗高、结构复杂、造价不菲, 而永磁悬浮<sup>[12-13]</sup>具有环保、结构简单、体积小、重量轻、成本低、无能耗、可靠性高及承载力大(对NdFeB而言)等优点, 具有广阔的应用前景。目前, 永磁悬浮技术的研究普遍采用有限元等数值计算方法<sup>[14-19]</sup>, 这些方法计算精度较高, 但也存在计算复杂、不便设计和优化永磁结构等问题。为了解决永磁悬浮导轨磁力数值计算复杂的问题, 该文设计了永磁悬浮导轨结构, 引用文献[20]的多重积分磁力公式, 结合两个平行矩形截面永磁体及永磁导轨结构特点, 推导出永磁悬浮导轨显式磁力解析模型; 根据电磁场理论的电流镜像法, 得到了永磁体在介质分界面为平面的铁磁体中的镜像规律, 分

析了永磁导轨悬浮磁力和导向磁力。经验证：模型计算值和实验值基本吻合。该模型用代数法，计算简单且精度较高。

### 1 永磁悬浮导轨的结构及工作原理

永磁悬浮导轨可设计成单条、双条和多条结构。图1所示的是倾角为 $\alpha$ 的单条结构，其中，A为悬式结构，B为坐式结构。由于排斥磁极的磁力有垂直和水平方向分量，所以就产生了悬浮磁力和使磁轨有侧向偏移的导向磁力。倾角为 $0^\circ$ 时，对齐的永磁导轨悬浮磁力最大，导向磁力为零，系统最不稳定，导向完全靠外力(如机械力、其它磁力)；倾角增大，悬浮磁力减小，导向磁力增大。永磁悬浮导轨主要是用来承载竖向载荷的，侧向载荷一般较小，为了确保稳定悬浮，在导轨两侧应安装辅助导向装置。

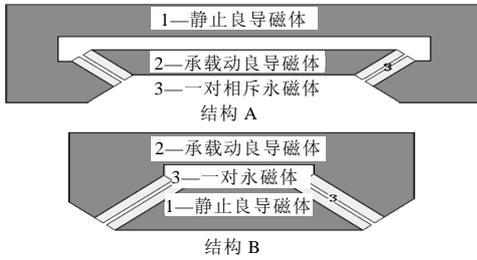


图1 永磁悬浮导轨剖面结构  
Fig. 1 Section of permanent magnetic guideway

### 2 永磁导轨悬浮磁力和导向磁力数学模型

#### 2.1 单位长度的两长直细条形永磁体之间的磁力

单位长度的两长直细条形永磁体之间的磁力<sup>[20]</sup>为

$$dF_z = \frac{J_1 \cdot J_2}{\pi \mu_0 r_{PM}^3} \sin(\beta_1 + \beta_2 - 3\theta) dS_1 dS_2 \quad (1)$$

$$dF_x = -\frac{J_1 \cdot J_2}{\pi \mu_0 r_{PM}^3} \cos(\beta_1 + \beta_2 - 3\theta) dS_1 dS_2 \quad (2)$$

式中： $J_1$ 、 $J_2$ 为永磁体磁极化强度矢量的模，它们在y轴方向的分量是零，其量值分别等于永磁体剩磁感应强度 $B_{r1}$ 、 $B_{r2}$ ； $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$  H/m为真空磁导率； $r_{PM}$ 为同一横截面内永磁体两微元面 $dS_1$ 、 $dS_2$ 间距； $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 分别为 $J_1$ 、 $J_2$ 与x轴正方向的夹角； $\theta$ 为 $r_{PM}$ 与x轴正方向的夹角(见图2)。

#### 2.2 长度为L的2块平行矩形截面永磁体z向磁力 $F_z$

2块平行矩形截面永磁体的横截面参数见图3。设 $\beta_1=-\pi/2$ ， $\beta_2=\pi/2$ (当 $\beta_1=\beta_2=\pi/2$ 时，下文公式的磁力大小不变，但方向相反)，对式(1)积分得：

$$F_z = -\frac{B_{r1} B_{r2} L}{\pi \mu_0} \iint_{s_1 s_2} \frac{1}{r_{PM}^3} \sin 3\theta dS_1 dS_2 = -\frac{B_{r1} B_{r2} L}{\pi \mu_0} \int_0^a \int_0^b \int_c^{c+a} \int_{b+h}^{b+h+d} \frac{\sin 3\theta dx_1 dz_1 dx_2 dz_2}{[(x_2-x_1)^2+(z_2-z_1)^2]^{3/2}} \quad (3)$$

$$\sin 3\theta = 3\sin\theta - 4(\sin\theta)^3 = \frac{3(z_2-z_1)}{[(x_2-x_1)^2+(z_2-z_1)^2]^{1/2}} - \frac{4(z_2-z_1)^3}{[(x_2-x_1)^2+(z_2-z_1)^2]^{3/2}} \quad (4)$$

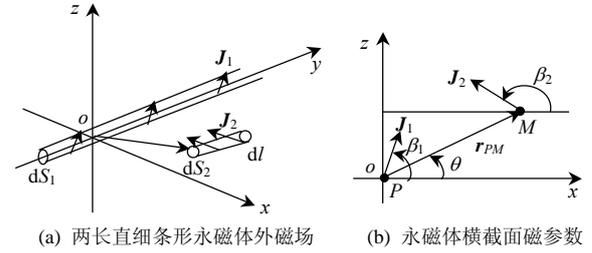


图2 两长直细条形永磁体间的参数  
Fig. 2 Parameters of two slightness PM

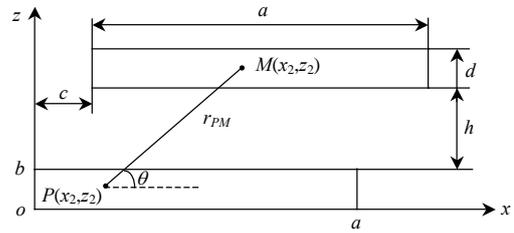


图3 2块平行矩形截面永磁体的横截面参数  
Fig. 3 Section parameters of two parallel-rectangle PM

将式(4)代入式(3)，化简积分得

$$F_z = \frac{-B_{r1} B_{r2} L \times 10^{-6}}{4\pi \mu_0} \{ 2(d+h) \ln[c^2+(d+h)^2] - 2(b+d+h) \ln[c^2+(b+d+h)^2] - (d+h) \cdot \ln[(c+a)^2+(d+h)^2] + (b+d+h) \ln[(c+a)^2+(b+d+h)^2] - (d+h) \ln[(c-a)^2+(d+h)^2] + (b+d+h) \ln[(c-a)^2+(b+d+h)^2] - 2h \ln[c^2+h^2] + h \ln[(c-a)^2+h^2] + 2(b+h) \ln[c^2+(b+h)^2] - (b+h) \ln[(c-a)^2+(b+h)^2] + h \ln[(c+a)^2+h^2] - (b+h) \ln[(c+a)^2+(b+h)^2] + 4c \arctan[(d+h)/c] - 4c \arctan[(b+d+h)/c] - 2(c+a) \arctan[(d+h)/(c+a)] - 2(c-a) \arctan[(d+h)/(c-a)] + 2(c-a) \arctan[(b+d+h)/(c-a)] + 4c \arctan[(b+h)/c] + 2(c+a) \arctan[(b+d+h)/(c+a)] - 4c \arctan[h/c] + 2(c+a) \arctan[h/(c+a)] - 2(c+a) \arctan[(b+h)/(c+a)] + 2(c-a) \arctan[h/(c-a)] \} \quad (5)$$

#### 2.3 长度为L的两块平行矩形截面永磁体x向磁力 $F_x$

当 $\beta_1=-\pi/2$ ， $\beta_2=\pi/2$ 时，对式(2)积分得

$$F_x = -\frac{B_{r1} B_{r2} L}{\pi \mu_0} \iint_{s_1 s_2} \frac{1}{r_{PM}^3} \cos 3\theta dS_1 dS_2 = -\frac{B_{r1} B_{r2} L}{\pi \mu_0} \int_0^a \int_0^b \int_c^{c+a} \int_{b+h}^{b+h+d} \frac{\cos 3\theta dx_1 dz_1 dx_2 dz_2}{[(x_2-x_1)^2+(z_2-z_1)^2]^{3/2}} \quad (6)$$

$$\cos 3\theta = -3\cos\theta + 4(\cos\theta)^3 = \frac{-3(x_2 - x_1)}{[(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]^{1/2}} + \frac{4(x_2 - x_1)^3}{[(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]^{3/2}} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)，化简积分得

$$F_x = \frac{-B_{r1}B_{r2}L \times 10^{-6}}{4\pi\mu_0} \{ (c-a)\ln[(c-a)^2 + (b+h)^2] - 2c\ln[c^2 + (b+h)^2] + (c+a)\ln[(c+a)^2 + (d+h)^2] - (c+a)\ln[(c+a)^2 + (b+d+h)^2] - (c+a)\ln[(c+a)^2 + h^2] + (c+a)\ln[(c+a)^2 + (b+h)^2] + (c-a)\ln[(c-a)^2 + (d+h)^2] - 2c\ln[c^2 + (d+h)^2] - (c-a)\ln[(c-a)^2 + (b+d+h)^2] + 2c\ln[c^2 + (b+d+h)^2] - (c-a)\ln[(c-a)^2 + h^2] + 2c\ln[c^2 + h^2] - 2h\arctan[(c-a)/h] + 2(b+h)\arctan[(c-a)/(b+h)] + 2(d+h)\arctan[(c+a)/(d+h)] + 4(b+d+h)\arctan[c/(b+d+h)] - 2h\arctan[(c+a)/h] - 2(b+d+h)\arctan[(c+a)/(b+d+h)] + 4h\arctan[c/h] + 2(b+h)\arctan[(c+a)/(b+h)] - 4(b+h)\arctan[c/(b+h)] + 2(d+h)\arctan[(c-a)/(d+h)] - 4(d+h)\arctan[c/(d+h)] - 2(b+d+h)\arctan[(c-a)/(b+d+h)] \} \quad (8)$$

式(5)、(8)中：力的单位为 N；长度的单位为 mm。

### 2.4 平行矩形永磁体在铁磁体中的镜像及规律

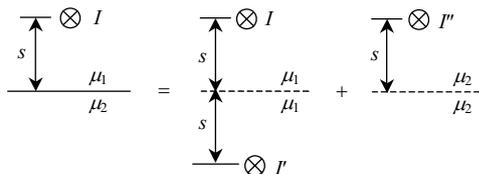
根据电磁场理论的电流镜像法<sup>[21]</sup>(见图 4)，有：

$$\begin{cases} I' = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} I \\ I'' = \frac{2\mu_1}{\mu_2 + \mu_1} I \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\mu_1$ 为第 1 种介质的磁导率； $\mu_2$ 为第 2 种介质的磁导率； $I'$ 、 $I''$ 为镜像电流。第 1 种介质的磁场由图 4(b)求解，求解域为第 1 种介质范围；第 2 种介质的磁场由图 4(c)求解，求解域为第 2 种介质范围。

根据永磁体等效电流模型及镜像法，可得位于两平行良导磁体之间的 2 块矩形永磁体(图 5(a))的镜像(图 5(b))。图 5(a)中：1-1'、2-2'为介质分界面； $\mu_2$ 为钢铁等良导磁体的磁导率； $\mu_1 = \mu_0$ ，为空气磁导率。图 5(b)可用来求解图 5(a)间隙的磁场及磁力。

由于永磁体等效面电流密度 $j_m = B_r/\mu_0$ ，钢铁等



(a) 实际介质及电流 (b) 求 $\mu_1$ 介质磁场镜像法 (c) 求 $\mu_2$ 介质磁场镜像法

图 4 电流在介质分界面为平面的介质中的镜像  
Fig. 4 Electric current virtual image in medium with plane medium interface

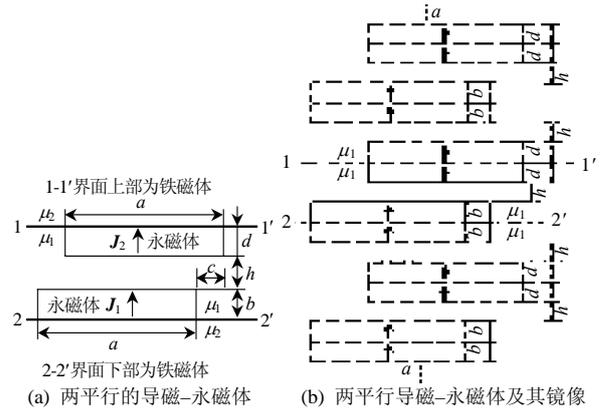


图 5 永磁体在界面为平面的磁导体中的镜像  
Fig. 5 PM virtual image in magnetizer with plane medium interface

良导磁体的磁导率是真空磁导率的千倍以上，根据式(9)可得镜像永磁体的剩磁为

$$B'_r = B_r(\mu_2 - \mu_1)/(\mu_2 + \mu_1) \approx B_r$$

### 2.5 永磁导轨的悬浮磁力和导向磁力

当永磁导轨结构尺寸确定后， $a$ 、 $b$ 、 $d$ 为定值。当图 1 所示的永磁悬浮导轨有竖直和水平方向位移时，其左右间隙对应的磁极参数如图 6(a)、(b)所示，设图中  $P$  点的坐标为( $w$ ,  $v$ )，由图 6(a)得：

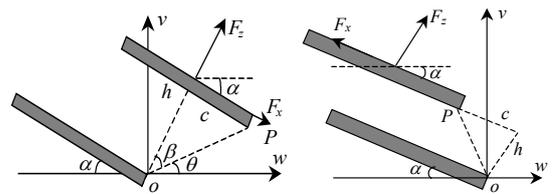
$$h = \sqrt{v^2 + w^2} \cos\beta = \sqrt{v^2 + w^2} \cos[90^\circ - \alpha - \arctan(v/w)] \quad (10)$$

$$c = \sqrt{v^2 + w^2} \sin[90^\circ - \alpha - \arctan(v/w)] \quad (11)$$

由图 6(b)得：

$$h = \sqrt{v^2 + w^2} \cos[90^\circ + \alpha - \arctan(v/w)] \quad (12)$$

$$c = \sqrt{v^2 + w^2} \sin[90^\circ + \alpha - \arctan(v/w)] \quad (13)$$



(a) 永磁导轨左间隙参数 (b) 永磁导轨右间隙参数

图 6 永磁导轨左右间隙参数  
Fig. 6 Parameters of PMG left-right gap

计算永磁导轨的悬浮和导向磁力时，将距磁极间隙中间面等距的一对永磁体及镜像作为计算对象，以  $2b$ 、 $2d$ 代替式(5)、(8)中的 $b$ 、 $d$ ，以 $h_k = h + 2(b+d+h)(k-1)$ 代替式(5)、(8)中的 $h$ (式中 $k$ 为镜像次数)，分别计算永磁导轨左右间隙永磁体及 1 次镜像、2 次镜像、...的磁力，最后叠加得左间隙的 $F_{z1}$ 、 $F_{x1}$ ，和右间隙的 $F_{z2}$ 、 $F_{x2}$ 。永磁导轨左右间隙竖直和水平方向的磁力分别为

$$\begin{cases} F_{v1} = F_{z1} \cos\alpha - F_{x1} \sin\alpha \\ F_{w1} = F_{z1} \sin\alpha + F_{x1} \cos\alpha \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} F_{v2} = F_{z2} \cos \alpha + F_{x2} \sin \alpha \\ F_{w2} = F_{z2} \sin \alpha - F_{x2} \cos \alpha \end{cases} \quad (15)$$

当 $c$ 为负值时,  $F_x$ 的方向与图示相反(即 $F_x$ 取负值)。

永磁导轨的悬浮磁力为

$$F_v = F_{v1} + F_{v2} = (F_{z1} + F_{z2}) \cos \alpha + (-F_{x1} + F_{x2}) \sin \alpha \quad (16)$$

永磁导轨的导向磁力为

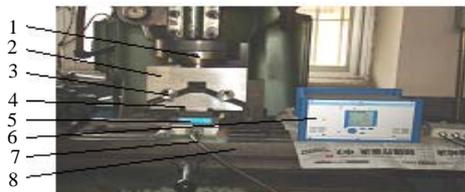
$$F_w = F_{w1} - F_{w2} = (F_{z1} - F_{z2}) \sin \alpha + (F_{x1} + F_{x2}) \cos \alpha \quad (17)$$

由于3次以上的镜像相距较远, 计算的小磁力可忽略。

### 3 实验验证

#### 3.1 实验过程

实验照片如图7所示。实验过程如下: 把2夹装在1上, 再把3固定在2上; 把4固定在5上, 再把5固定在8上。从三坐标立式铣床的刻度盘可读出永磁导轨竖向或水平方向的相对位移量, 从力测量仪可读出永磁导轨的悬浮和导向磁力。实验用牌号为NNF35M、具有线性退磁曲线的稀土NdFeB, 其主要特性如下:  $B_r=1.231\text{ T}$ ;  $H_c=917.53\text{ kA/m}$ ;  $B_{H\max}=283\text{ kJ/m}^3$ ;  $\mu_r=1.067\ 65$ ; 工作温度不超过 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 。图1所示的永磁导轨结构参数如下:  $\alpha=30^\circ$ ; 4块永磁板的尺寸为 $100\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ; 当导轨对齐、磁极面接触时, 上下磁极尖对齐。



1—型号是 X52K 的三坐标立式铣床立轴夹头; 2—图1结构B中的2;  
3—实验时添加的导轨对齐限位挡块; 4—图1结构B中的1;  
2、4斜面上装有永磁板; 5—型号是 9257B 的 KISTLER 三轴测力仪;  
6—型号是 5070 Multi-channel Charge Amplifier 力测量仪;  
7—连接5与6的电缆; 8—铣床工作平台

图7 实验照片

Fig. 7 Photo of experiment

#### 3.2 永磁导轨垂直位移磁力计算和实验验证比较

当 $w=0$ 时,  $F_w=0$ , 将相关参数代入式(5)、(8)及式(10)~(17), 2次以内镜像计算结果和实验结果如图8曲线所示, 其平均误差为7.87%。

#### 3.3 永磁导轨水平位移的磁力计算和实验验证比较

当 $v=5.6$ 时, 将相关参数代入式(5)、(8)及式(10)~(17), 2次以内镜像计算结果和实验结果如图9(a)、(b), 其平均误差分别为3.5%、7.08%。

#### 3.4 计算与测试结果误差分析

(1) 计算误差。由于只进行了2次镜像磁力

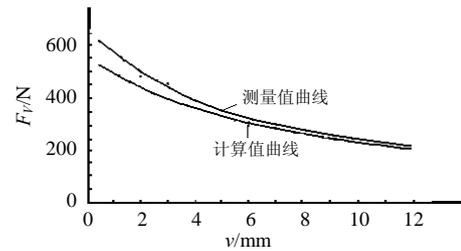
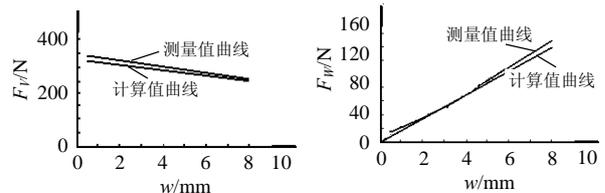


图8 永磁导轨悬浮磁力与垂直位移的计算和实验曲线

Fig. 8 PMG calculation and experiment curves of levitation magnetic force and vertical excursion



(a) 悬浮磁力与水平位移曲线 (b) 导向磁力与水平位移曲线

图9 永磁导轨磁力与水平位移的计算和实验曲线

Fig. 9 PMG calculation and experiment curves of magnetic force and horizontal excursion

计算, 所以图中测量曲线基本都高于计算曲线。

(2) 图1装置与理想镜像条件的误差。镜像法应用条件要求铁磁平面为无限大平面, 图1、图7的结构不满足此要求, 所以会影响实验验证的计算结果。由于永磁体等效电流或等效磁荷的镜像是与铁磁平面垂直且对称的, 所以永磁体在有限铁磁平面中的镜像误差不大。

(3) 测量误差: ①为了确保实验导轨上下永磁板对齐, 加装了4个限位挡块, 它们的摩擦力随挡块接触面的增大而增加, 从图8可以看出, 小间隙时摩擦力对测量结果的影响较明显; ②手摇刻度盘有间隙误差, 导轨间隙越小, 磁力越大, 磁力测量值对手摇刻度盘间隙越敏感, 测量误差越大; ③磁力越小, Multichannel Charge Amplifier力测量仪对磁力越敏感, 读数误差越大。尽管存在误差, 但磁力计算和测试的结果仍比较接近。

### 4 结论

(1) 该文设计了永磁悬浮导轨结构。引用文献[20]的磁力公式, 推导出显式表达的永磁悬浮导轨解析磁力模型。根据电流镜像法, 得到了永磁体在介质分界面为平面的铁磁体中的镜像规律及其磁力计算方法, 分析了永磁导轨的悬浮和导向磁力。模型计算值和实验值基本吻合。

(2) 研究表明: 2块平行矩形截面永磁体的磁力与永磁体剩磁的平方 $B_r^2$ 成正比, 与永磁体的纵向长度 $L$ 成正比; 磁力随永磁体的横截面增大而增大, 随永磁体的间距 $h$ 增大而减小; 永磁导轨的悬浮磁

力随导轨倾斜度增大而减小, 导向磁力随导轨倾斜度增大而增大。永磁体及其在铁磁体的镜像所产生的磁力大于单由原永磁体本身产生的磁力。

(3) 该模型通过简单的代数计算就可得到精度较高的永磁导轨磁力, 便于设计和优化永磁导轨结构。

## 参考文献

- [1] 万尚军, 钱金根, 倪光正, 等. 电动悬浮型磁悬浮列车悬浮与导向技术剖析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 22-25.  
Wan Shangjun, Qian Jingen, Ni Guangzheng, et al. Study of the levitation and guidance technology for electrodynamic suspension maglev vehicle[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 22-25(in Chinese).
- [2] 赵春发, 翟婉明. 常导电磁悬浮动态特性研究[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(4): 464-468.  
Zhao Chunfa, Zhai Wanming. Dynamic characteristics of electromagnetic levitation systems[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(4): 464-468(in Chinese).
- [3] 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(in Chinese).
- [4] Dai Huiguang. Dynamic behavior of maglev vehicle guideway system with control[D]. Cleveland: Case Western Reserve University, 2005.
- [5] 吴剑锋, 张钢, 杨新洲. 机床磁悬浮导轨的动力学分析[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(9): 1099-1102.  
Wu Jianfeng, Zhang Gang, Yang Xinzhou. Analysis of the dynamic performance of the linear active magnetic guide in a machine tool [J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(9): 1099-1102(in Chinese).
- [6] 连级三. 磁浮列车原理及技术特征[J]. 电力机车技术, 2001, 24(3): 23-26.  
Lian Jisan. Principle and technology characteristic of maglev vehicle[J]. Technology for Electric Locomotives, 2001, 24(3): 23-26(in Chinese).
- [7] Johansen T H, Riise A B, Bratsberg H, et al. Magnetic levitation with high- $T_c$  superconducting thin films[J]. Journal of Superconductivity, 1998, 11(5): 519-524.
- [8] Chen I G, Hsu J C, Jamn G. Magnetic levitation/suspension system by high-temperature superconducting materials[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81(8): 4272-4274.
- [9] Ma K B, Postrekhin Y V, Chu W K. Superconductor and magnet levitation devices[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(12): 4989-5017.
- [10] Thompson M T. High temperature superconducting magnetic suspension for maglev[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [11] 杨文将, 温正, 丘明, 等. 航天发射超导磁浮平台设计的初步实验研究[J]. 低温物理学报, 2005, 27(5): 1040-1044.  
Yang Wenjiang, Wen Zheng, Qiu Ming, et al. Primary experimental study of superconducting maglev test vehicle design for space launch [J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2005, 27(5): 1040-1044(in Chinese).
- [12] 田录林, 李言, 王山石, 等. 双筒永磁向心轴承磁力工程化解析算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 57-61.  
Tian Lulin, Li Yan, Wang Shanshi, et al. Research on magnetism engineering analytical calculation method for bi-barrel-shaped radial permanent magnetic bearings[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 57-61(in Chinese).
- [13] Muzhitskii V F, Kudryavtsev D A. Some problems in determining the optimum sizes of magnetizing systems based on permanent magnets [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2004, 40(2): 124-129.
- [14] 朱焜秋, 邓智泉, 袁寿其, 等. 永磁偏置径向-轴向磁悬浮轴承工作原理和参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 54-58.  
Zhu Huangqiu, Deng Zhiquan, Yuan Shouqi, et al. The working principle and parameter design for permanent magnet biased radial-axial direction magnetic bearing[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 54-58(in Chinese).
- [15] 杨静, 虞烈, 谢敬. 永磁偏置磁轴承动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 122-125.  
Yang Jing, Yu Lie, Xie Jing. Study on dynamics of permanent magnet biased magnetic bearing[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 122-125(in Chinese).
- [16] 任仲友, 王家素. 基于有限元的永磁导轨磁场数值计算[J]. 电工电能新技术, 2003, 22(4): 36-39.  
Ren Zhongyou, Wang Jiasu. Numerical investigation of magnetic field of a permanent magnetic guideway based on finite element method [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(4): 36-39(in Chinese).
- [17] 王莉, 熊剑, 张昆仑, 等. 永磁和电磁构成的混合式悬浮系统研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(3): 50-54.  
Wang Li, Xiong Jian, Zhang Kunlun, et al. Research of hybrid suspension system made of permanent-and electromagnets[J]. Journal of the Railway Society, 2005, 27(3): 50-54(in Chinese).
- [18] Oka K, Toshiro H, Takuya S. Hanging-type maglev system with permanent magnet motion control[J]. Electrical Engineering in Japan, 2000, 133(3): 63-70.
- [19] Han Qinghua. Analysis and modeling of the EDS maglev system based on the Halbach permanent magnet array[D]. Orlando: University of Central Florida, 2004.
- [20] 唐辉. 被动磁悬浮轴承及电涡流传感器的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.  
Tang Hui. Research on passive magnetic bearing and electrical eddy sensor[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003(in Chinese).
- [21] 冯慈璋. 电磁场[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.



田录林

收稿日期: 2007-12-18。

作者简介:

田录林(1959—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为磁浮轴承动力学、机电故障检测, Lulintian@sohu.com。

(编辑 刘浩芳)