

超导磁浮列车超导磁场及悬浮磁场谐波分析

李真 周燕 洛启 于青松 李凯

(中车长春轨道客车股份有限公司磁浮研究所, 130062, 长春)

摘要 [目的]在超导磁浮列车实际运行过程中,由于地面线圈排布高度不一致、电磁气隙较大等原因,磁场中往往含有大量的高次谐波。谐波会对列车的悬浮性能产生较大影响,应深入研究列车高速运行状态下超导磁场、悬浮磁场的电磁特性及磁场分布规律。[方法]以日本山梨试验磁浮线 MLX01 型列车为案例,介绍了超导磁浮列车的悬浮机理,对超导磁场和悬浮磁场的计算理论进行了阐述。建立了线圈沿列车运行方向、列车悬浮方向的磁动势分布模型,利用空间谐波法对“超导磁场—8 字线圈感应电流—悬浮磁场”这一能量转换过程进行了解耦计算,分析了超导磁场中高次谐波的占比情况。基于 8 字线圈的结构及参数,计算得到了 8 字线圈的感应电流,并对 8 字线圈的悬浮磁场进行了谐波分析。[结果及结论]在 8 字线圈表面处,超导磁场的电磁感应强度主要以基波和 3 次谐波为主,基波幅值为 1.113 T,3 次谐波占比约为基波的 19.40%。在悬浮磁场中,磁场的电磁感应强度主要以基波和 5 次谐波为主,基波幅值为 0.065 T,5 次谐波的占比约为基波的 46.70%。

关键词 超导磁浮列车; 超导磁场; 悬浮磁场; 空间谐波法
中图分类号 U266.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.006

Harmonic Analysis of Superconducting and Suspension Magnetic Fields in Superconducting Maglev Trains

LI Zhen, ZHOU Yan, LUO Qi, YU Qingsong, LI Kai

(Maglev Research Institute, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

Abstract [Objective] During the operation of superconducting maglev trains, factors such as inconsistencies in ground coil alignment and large electromagnetic air gaps often generate significant high-order higher harmonics in the magnetic field. These harmonics considerably affect the suspension performance of the train. It is essential to study the electromagnetic characteristics and the distribution of superconducting and suspension magnetic fields under high-speed operation conditions. [Method] Using the MLX01 train on Yamanashi Maglev Test Line as a case study, the suspension mechanism of superconducting maglev trains is introduced, and the theoretical founda-

tions for calculating superconducting and suspension magnetic fields are explained. The magnetomotive force distribution models of coil along the train operating and suspension directions are established. The space harmonic method is used to decouple the energy conversion process of 'superconducting magnetic field—8-shaped coil induced current—suspension magnetic field', and to analyze the proportion of high-order harmonics in the superconducting magnetic field. Based on the 8-shaped coil structure and parameters, the induced current in 8-shaped coils is calculated, and a harmonic analysis of the suspension magnetic field is performed. [Result & Conclusion] On the surface of 8-shaped coils, the fundamental wave and the third harmonic dominate the superconducting magnetic field magnetic flux density, with a fundamental wave amplitude of 1.113 T, and a third harmonic proportion of 19.40% of fundamental wave. In the suspension magnetic field magnetic flux density, the fundamental wave and the fifth harmonic dominate, with a fundamental wave amplitude of 0.065 T, and a fifth harmonic proportion of 46.70% of fundamental wave.

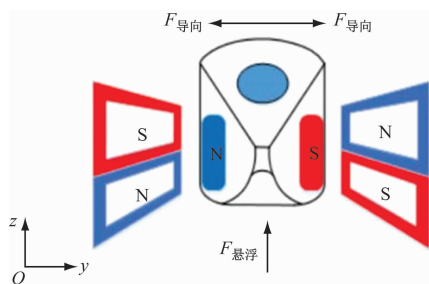
Key words superconducting maglev train; superconducting magnetic field; suspension magnetic field; spatial-harmonic method

目前,磁浮列车按悬浮原理可分为 EMS(电磁悬浮)、EDS(电动悬浮)与 SPL(钉扎悬浮)3 种类型,其中,超导磁浮列车是 EDS 列车的重要分支之一。超导磁浮列车凭借其悬浮的自稳定性,无须主动对悬浮进行控制,在高速运行工况下具有非常突出的优势^[1-2]。本文主要介绍超导磁浮列车在高速运行状态下超导磁场及悬浮磁场的谐波分析方法,并以日本山梨磁浮试验线 MLX01 型列车为例,分析该车磁场的电磁特性。

1 超导磁浮列车的悬浮机理

建立日本山梨磁浮试验线 MXL01 型列车的车体运动坐标系,定义 x 向为列车运行方向, y 向为列车一位端向二位端横向偏移方向, z 向为列车向上悬浮方向。

在低速(列车运行速度 $v < 150 \text{ km/h}$)工况下,超导磁浮列车依靠支撑轮在轨道上行驶,此时超导线圈的中线与 8 字线圈的中线重合。由于 8 字线圈上下绕组为串联反接,两部分绕组产生的电动势相互抵消,线圈内部不产生感应电流,也不存在电磁浮力^[3]。当列车高速运行($v \geq 150 \text{ km/h}$)时,列车收起支撑轮并向下偏移,此时超导线圈与 8 字线圈的结构中线偏移,8 字线圈上下绕组产生的感应电动势不相等,形成了极性相反的悬浮磁场。超导磁浮列车悬浮机理如图 1 所示,超导线圈在悬浮磁场中产生电磁力,进而实现列车的悬浮与导向^[4-5]。



注:S—南极(磁场方向指向地理北极的方向);N—北极(磁场方向指向地理南极的方向); $F_{\text{悬浮}}$ —悬浮磁场为超导线圈提供沿 z 向的悬浮力; $F_{\text{导向}}$ —悬浮磁场为超导线圈提供沿 y 向阻碍车体横向偏移的导向力。

图 1 超导磁浮列车悬浮机理

Fig. 1 Suspension mechanism of superconducting maglev train

2 超导磁场的理论分析

为便于计算磁场分布,需对超导磁浮列车的复合电磁场进行解耦,本文仅考虑超导线圈与 8 字线圈之间的相互作用。列车的悬浮磁场是基于“超导磁场—8 字线圈感应电流—悬浮磁场”这一物理过程而获得的,因此,应先对超导磁场进行建模,利用空间谐波法探究超导磁场的分布特性。

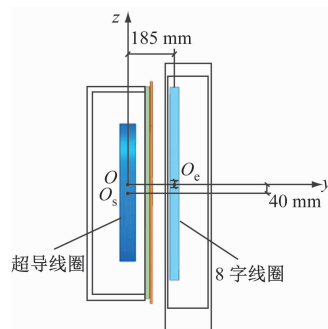
超导线圈和 8 字线圈在 yOz 平面上的相对位置如图 2 所示。超导线圈固定在列车上,8 字线圈固定在地面侧,两者距离为 185 mm。当列车高速运行时,超导线圈结构中线的中心点相较于坐标原点,向 z 轴负方向偏移了 40 mm。

超导线圈的结构参数如表 1 所示,结构尺寸示意图如图 3 所示。

2.1 模型假设

为了便于探究磁场的周期性规律,将数学模型简化,假设沿 x 向设置了无数个超导线圈,将超导线圈磁动势视为沿 x 向分布的周期性矩形波,如图 4

所示。图 4 中:超导线圈所在位置的磁动势为 $F_s(x)$,其余位置的磁动势为 0。超导线圈沿 z 向的磁动势分布同理。



注:O—坐标系原点; O_s —超导线圈结构的中心点; O_e —8 字线圈结构的中心点。

图 2 超导线圈和 8 字线圈在 yOz 平面上的相对位置

Fig. 2 Relative positions of superconducting and 8-shaped coils on the yOz plane

表 1 超导线圈结构参数

Tab. 1 Parameters for superconducting coil structure

参数名称	参数值
x 向的线圈极距 $\tau_{x,s}/\text{mm}$	1 350
z 向的线圈极距 $\tau_{z,s}/\text{mm}$	6 000
x 向的线圈长度 $l_{x,s}/\text{mm}$	1 070
z 向的线圈长度 $l_{z,s}/\text{mm}$	500
线圈匝数 N_s	1 400
经过单匝线圈的电流 I_s/A	500

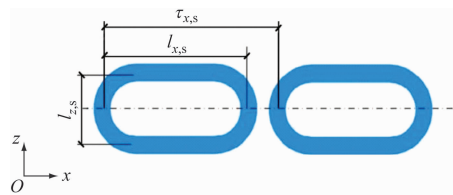


图 3 超导线圈结构尺寸示意图

Fig. 3 Diagram of superconducting coil structure dimensions

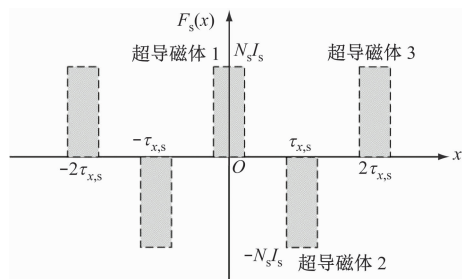


图 4 超导线圈沿 x 向的磁动势分布

Fig. 4 Distribution of superconducting coil magnetomotive force along the x -direction

2.2 超导磁场解析计算

已知 x 向和 z 向的磁动势分布,将其转化为 x

向、 z 向的二重傅里叶级数, 计算式为:

$$\begin{cases} F_s(x, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{16N_s I_s}{mn\pi^2} \sin\left(k_{xm,s} \frac{l_{x,s}}{2}\right) \cdot \right. \\ \left. \sin\left(k_{zn,s} \frac{l_{z,s}}{2}\right) \cos(k_{xm,s} x) \cos[k_{zn,s}(z - z_0)] \right\} \\ k_{xm,s} = m\pi/\tau_{x,s} \\ k_{zn,s} = n\pi/\tau_{z,s} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$F_s(x, z)$ ——超导线圈在 x 向和 z 向上的磁动势;

m —— x 向的谐波次数;

n —— z 向的谐波次数;

$k_{xm,s}$ ——超导磁场在 x 向上 m 次谐波的频率;

$k_{zn,s}$ ——超导磁场在 z 向上 n 次谐波的频率;

z_0 ——超导线圈结构中线圈中心点相较于坐标原点的偏移值。

设 y 在 $(-\infty, +\infty)$ 范围内, 超导线圈在 x 向和 z 向上的磁动势为 $F_s(x, z)$, 且在 $y = \infty$ 平面上的标量磁位为 0。 y 向的标量磁位应满足拉普拉斯方程及 2 个边界条件:

$$\begin{cases} \psi(x, 0, z) = F_s(x, z)/2 \\ \psi(x, \infty, z) = 0 \\ \nabla^2 \psi(x, y, z) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

ψ ——标量磁位;

∇^2 ——拉普拉斯算子。

设 μ_0 为真空磁导率, 则超导线圈在 y 向上磁感应强度 $B_{y,s}$ 的计算式为:

$$B_{y,s} = \frac{8\mu_0 N_s I_s}{\tau_{x,s} \tau_{z,s}} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sqrt{k_{xm,s}^2 + k_{zn,s}^2} \sin\left(k_{xm,s} \frac{l_{x,s}}{2}\right) \sin\left(k_{zn,s} \frac{l_{z,s}}{2}\right) \cos(k_{xm,s} x) \cos[k_{zn,s}(z - z_0)] e^{-\sqrt{k_{xm,s}^2 + k_{zn,s}^2} y}}{k_{xm,s} k_{zn,s}} \right\} \quad (3)$$

在 $z = -40$ mm 处, 选取 y 向的 3 个平面 ($y = 70$ mm、 $y = 90$ mm、 $y = 185$ mm), 可得到这 3 个平面处 $B_{y,s}$ 随 x 坐标分布图, 如图 5 所示。由图 5 可知: 磁场呈现周期性, 随着 y 增大, $B_{y,s}$ 逐渐减小。在 $y = 185$ mm 处 $B_{y,s}$ 的幅值为 0.954 T。

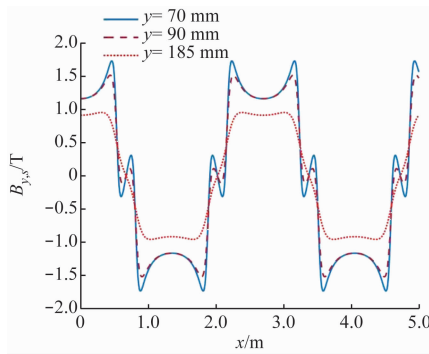
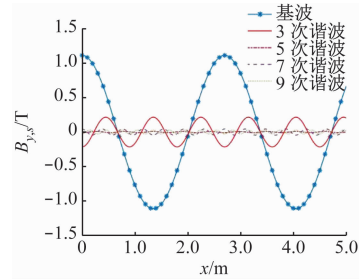


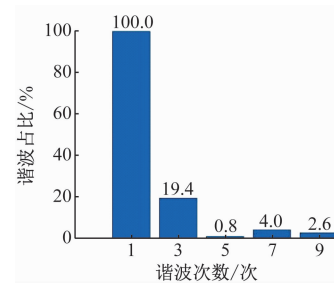
图 5 3 个平面处 $B_{y,s}$ 随 x 坐标分布图

Fig. 5 Diagram of $B_{y,s}$ distribution along the x -axis coordinate on three planes

超导磁场在 $y = 185$ mm 且 $z = -40$ mm 平面处 $B_{y,s}$ 随 x 轴坐标的谐波分布如图 6 所示, 其中: 基波含量最大 (含量 100.0%), 其幅值为 1.113 T; 3 次谐波含量次之 (含量为 19.40%), 其幅值为 0.216 T; 其余谐波含量较小。因此, 分析单个 8 字线圈的感应电压时, 可以只分析基波与 3 次谐波, 以简化计算。



a) 各次谐波的磁场波形



b) 各次谐波占比

图 6 超导磁场在 $y = 185$ mm 且 $z = -40$ mm 平面处 $B_{y,s}$ 随 x 坐标的谐波分布

Fig. 6 Harmonic distribution of $B_{y,s}$ along the x -axis coordinate in superconducting magnetic field on the plane $y = 185$ mm, $z = -40$ mm

3 8 字线圈感应电流及磁场分析

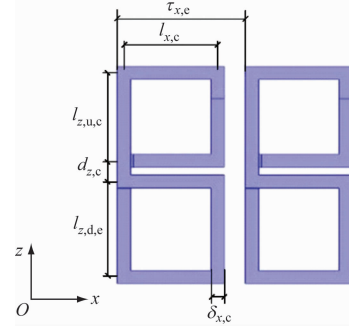
由上文可知, $B_{y,s}$ 主要由基波和 3 次谐波组成。

8 字线圈布置于地面侧,由于超导磁场在 y 向上的分量与其交链磁通发生周期性的变化,因此在线圈中产生感应电动势和感应电流,进而产生悬浮磁场。8 字线圈由上下两组线圈绕组串联反接构成,其材料为铝。8 字线圈的结构参数如表 2 所示,结构尺寸示意图如图 7 所示。

表 2 8 字线圈结构参数

Tab. 2 Parameters for the structure of the 8-shaped coil structure

参数名称	参数值
x 向的线圈极距 $\tau_{x,e}/\text{mm}$	450
x 向的线圈长度 $l_{x,e}/\text{mm}$	350
上线圈在 z 向的长度 $l_{z,u,e}/\text{mm}$	340
下线圈在 z 向的长度 $l_{z,d,e}/\text{mm}$	340
线圈匝数 N_e	24



注: $\delta_{x,e}$ —线圈在 x 轴方向的厚度; $d_{z,e}$ —上线圈绕组的间隙。

图 7 8 字线圈结构示意图

Fig. 7 Diagram of 8-shaped coil structure

3.1 8 字线圈感应电流计算

设列车运行速度为 v ,当列车沿着 x 轴正向移动时,以车体为参照物,则 8 字线圈相对于车体向 x 轴负方向移动。第 η 个 8 字线圈中的感应电动势 $u_{\eta,e}$ 主要来自于基波和 3 次谐波,其表达式为:

$$\begin{cases} u_{\eta,e} = N_e \omega \left[P_e(1) \sin\left(\omega t - \frac{\eta\pi}{3}\right) + 3P_e(3) \sin(3\omega t - \eta\pi) \right] \\ P_e(m) = \frac{64\mu_0 N_s I_s}{\tau_{x,s} \tau_{z,s}} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\sqrt{k_{xm,s}^2 + k_{zn,s}^2} \sin\left(k_{xm,s} \frac{l_{x,s}}{2}\right) \sin\left(k_{zn,s} \frac{l_{z,s}}{2}\right) \cdot \right. \right. \\ \left. \left. \sin\left(k_{xm,s} \frac{l_{x,e}}{2}\right) \sin\left(k_{zn,s} \frac{l_{z,e}}{2}\right) \sin(-k_{zn,s} z_0) \sin(k_{zn,s} z_{e,u}) e^{-\sqrt{k_{xm,s}^2 + k_{zn,s}^2} y_e} \right] / (k_{xm,s}^2 k_{zn,s}^2) \right\} \end{cases} \quad (4)$$

式中:

ω ——磁场角频率;

t ——列车运行时间;

$P_e(m)$ —— m 次谐波中超导线圈与悬浮线圈间耦合松紧程度函数;

y_e ——8 字线圈结构中线在 y 轴上的坐标;

$z_{e,u}$ ——8 字线圈结构中心点相较坐标原点的偏移值。

设 $g_e(\omega)$ 为 8 字线圈的阻抗,则第 η 个 8 字线圈感应电流 $I_{\eta,e}$ 由基波电流和 3 次谐波电流组成:

$$I_{\eta,e} = N_e |g_e(\omega)| P_e(1) \cos\left(\omega t - \frac{\eta\pi}{3}\right) + N_e |g_e(3\omega)| P_e(3) \cos(3\omega t - \eta\pi) \quad (5)$$

3.2 8 字线圈悬浮磁场分析

利用空间谐波法,分别对 8 字线圈的基波电流和 3 次谐波电流进行计算。设 q 为 8 字线圈上产生电流的谐波次数,可得第 q 次悬浮电流生成的悬浮磁场 m 次谐波随 x 坐标的磁感应强度 $B_{yqm,xf}$ 。当 $q=1$ 时,8 字线圈基波电流生成的悬浮磁场在 y 向上 m 次谐波磁感应强度 $B_{y1m,xf}$ 的计算式为:

$$\begin{cases} B_{y1m,xf} = \frac{24\mu_0 N_e^2}{\tau_{x,s} \tau_{z,s}} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sqrt{k_{xm,s}^2 + k_{zn,s}^2} \sin\left(k_{xm,s} \frac{l_{x,e}}{2}\right) \sin\left(k_{zn,s} \frac{l_{z,u,e}}{2}\right) \sin(k_{zn,s} z_{e,u}) \sin(-k_{zn,s} z)}{k_{xm,s} k_{zn,s}} \cdot \right. \\ \left. e^{-\sqrt{k_{xm,s}^2 + k_{zn,s}^2} (y-y_e)} |g_e(\omega)| P_e(1) \cos[k_{xm,z} x + (m+1)\omega t] \right\}, m = 5, 11, 17, \dots \\ B_{y1m,xf} = \frac{24\mu_0 N_e^2}{\tau_{x,s} \tau_{z,s}} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sqrt{k_{xm,s}^2 + k_{zn,s}^2} \sin\left(k_{xm,s} \frac{l_{x,e}}{2}\right) \sin\left(k_{zn,s} \frac{l_{z,u,e}}{2}\right) \sin(k_{zn,s} z_{e,u}) \sin(-k_{zn,s} z)}{k_{xm,s} k_{zn,s}} \cdot \right. \\ \left. e^{-\sqrt{k_{xm,s}^2 + k_{zn,s}^2} (y-y_e)} |g_e(\omega)| P_e(1) \cos[k_{xm,z} x - (m-1)\omega t] \right\}, m = 1, 7, 13, \dots \end{cases} \quad (6)$$

当 $q=3$ 、且 m 为 3 的基数倍 (即 $m=3, 6, 9, \dots$) 时, 计算 8 字线圈 3 次谐波电流生成的悬浮磁场在

y 向上 m 次谐波的磁感应强度 $B_{y3m,xf}$, 其计算式为:

$$B_{y3m,xf} = -\frac{24\mu_0 N_e^2}{\tau_{x,s}\tau_{z,s}} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sqrt{k_{xm,s}^2 + k_{zn,s}^2} \sin\left(k_{xm,s} \frac{l_{x,e}}{2}\right) \sin\left(k_{zn,s} \frac{l_{z,u,e}}{2}\right) \sin(k_{zn,s} z_{e,u}) \sin(-k_{zn,s} z)}{k_{xm,s} k_{zn,s}} \cdot e^{-\sqrt{k_{xm,s}^2 + k_{zn,s}^2}(y-y_e)} |g_e(3\omega)| P_e(3) \{ \cos[(m+3)\omega t + 3k_{xm}x] + \cos[(m-3)\omega t - 3k_{xm}x] \} \right\} \quad (7)$$

将 m 分别代入式(6)、式(7), 可获得线圈的各次谐波, 在 $y_e = 185 \text{ mm}$ 且 $z = 200 \text{ mm}$ 位置处, 悬浮磁场 $B_{yqm,xf}$ 随 x 坐标变化的结果如图 8 所示。由图 8 可知: 8 字线圈各次谐波磁场波形中, 感应电流激发的磁场以基波和 5 次谐波为主, 其中基波幅值为 0.065 T , 5 次谐波含量约为基波的 46.70% 。

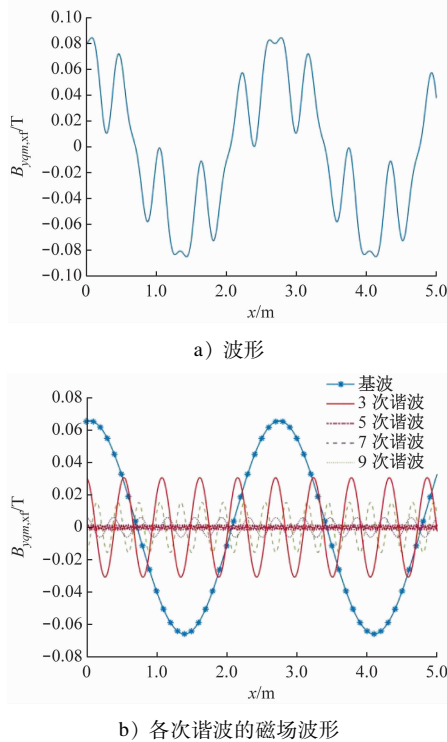


图 8 悬浮磁场 $B_{yqm,xf}$ 随 x 坐标变化的结果

Fig. 8 Results of $B_{yqm,xf}$ changing along the x -axis coordinate in suspension magnetic field

4 结语

与其他制式磁浮列车相比, 超导磁浮列车有更大的电磁气隙, 这导致其磁场中含有更多的高次谐波。本文主要研究了列车高速运行工况下超导磁场、悬浮磁场的形成机理及电磁特性, 采用空间谐波法得到超导磁场 $B_{y,s}$ 和悬浮磁场 $B_{yqm,xf}$ 的计算式。将线圈的电磁参数和结构参数代入计算式中, 进而计算得到空间任意一点的磁感应强度。

计算结果表明: 8 字线圈处超导磁场的基波幅值为 1.113 T , 3 次谐波占比较大 (约为基波的 19.40%); 悬浮磁场的基波幅值为 0.065 T , 5 次谐波含量较大 (约为基波的 46.70%)。研究结果可为后续超导磁浮列车的振动特性研究、集电系统设计、电磁防护及直线电机设计等奠定基础。

参考文献

- [1] 邓自刚, 李海涛. 高温超导磁悬浮车研究进展[J]. 中国材料进展, 2017, 36(5): 329.
DENG Zigang, LI Haitao. Recent development of high-temperature superconducting maglev [J]. Materials China, 2017, 36(5): 329.
- [2] 王家素, 王素玉. 高温超导磁悬浮列车研究综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(11): 1.
WANG Jiasu, WANG Suyu. High temperature superconducting maglev train [J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(11): 1.
- [3] 刘士菟, 王磊, 王路忠, 等. 电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(4): 734.
LIU Shixian, WANG Lei, WANG Luzhong, et al. Review on electrodynamic suspension trains and on-board superconducting magnets [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(4): 734.
- [4] 马光同, 杨文姣, 王志涛, 等. 超导磁浮交通研究进展[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 68.
MA Guangtong, YANG Wenjiao, WANG Zhitao, et al. Research development of superconducting maglev transportation [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(7): 68.
- [5] 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.
XIONG Jiayang, DENG Zigang. Research progress of high-speed maglev rail transit [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 177.

· 收稿日期: 2024-08-05 修回日期: 2024-09-05 出版日期: 2025-02-10

Received: 2024-08-05 Revised: 2024-09-05 Published: 2025-02-10

· 第一作者: 李真, 助理工程师, lizhen19960112@163.com

通信作者: 李凯, 正高级工程师, lk86@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license