

文章编号:1671-1637(2026)04-0276-10

## 低真空管道磁悬浮列车推进线圈接地系统设计

李秋君<sup>1,2</sup>, 胡道宇<sup>\*1,2</sup>, 高天宇<sup>1,2</sup>, 张志华<sup>2</sup>

(1. 高速飞车山西省实验室, 山西 大同 038103; 2. 中国航天科工集团有限公司  
磁悬浮与电磁推进技术总体部, 北京 100143)

**摘要:**为研究超高速低真空管道磁悬浮列车推进线圈接地系统及过电压分布特性,建立了包含地面推进线圈、金属低真空管道及分布式接地装置的双端口等值电路模型,结合已发表文献的数据对等值电路模型进行准确性验证,基于该模型分析雷电过电压下推进线圈的电压响应分布特性,从推进线圈接地点数量和纵向接地线与金属低真空管道间绝缘电阻2个维度优化了接地系统设计。分析结果表明:雷击位于推进线圈上时,会引起局部过电压的产生,但是其他位置线圈的过电压会通过接地得到抑制;在2个接地点之间,因与接地点距离变化引起的电压呈现先上升再下降的趋势;金属低真空管道起到避雷带的作用,保证雷击不会直接作用到推进线圈上,同时与推进线圈连接地的纵向接地线和金属低真空管道之间存在绝缘电阻,可以有效保证过电压被抑制到小于1.0;纵向接地线和金属低真空管道间绝缘电阻的阻值显著影响推进线圈的过电压程度,当阻值大于10 k $\Omega$ 时,可以保证沿线所有的推进线圈过电压小于1.0。因此,可通过对接地点数量以及纵向接地线与金属低真空管道间电阻双参数进行优化配置,实现在保证系统安全性的前提下,降低工程实施成本,为超高速低真空管道磁悬浮列车的工程化应用提供了理论依据与技术支持。

**关键词:**轨道交通;低真空管道磁悬浮列车;优化设计;推进线圈;接地系统;雷击过电压

**中图分类号:**U223.6 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.019

### Design of grounding system of propulsion coils for low-vacuum tube maglev train

LI Qiu-jun<sup>1,2</sup>, HU Dao-yu<sup>\*1,2</sup>, GAO Tian-yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-hua<sup>2</sup>

(1. Shanxi Laboratory on T-Flight, Datong 038103, Shanxi, China; 2. Institute of Magnetic Levitation and Electromagnetic Propulsion, China Aerospace Science and Industry Corporation Limited, Beijing 100143, China)

**Abstract:** To study the grounding system of propulsion coils and the distribution of overvoltage characteristics for low-vacuum tube maglev train, a dual-port equivalent circuit model including ground propulsion coils, a metal low-vacuum tube, and distributed grounded devices was established. The accuracy of the equivalent circuit model was verified with data from published literature. Based on this model, the voltage response distribution characteristics of propulsion coils under lightning overvoltage were analyzed. The grounding system design was optimized from two dimensions: the number of ground points of propulsion coils as well as the insulation

出版历程:2025-04-30 收稿,2025-07-07 修回,2025-08-22 录用

基金项目:山西省基础研究计划项目(202403021221351);国家重点研发计划(2024YFF0508004)

作者简介:李秋君(1993-),男,河北唐山人,中国航天科工集团有限公司工程师,E-mail:mars.li@xingwei.edu.cn.

\*通信作者:胡道宇(1989-),男,安徽滁州人,中国航天科工集团有限公司研究员,工学博士,E-mail:daoq\_b@163.com.

引用格式:李秋君,胡道宇,高天宇,等.低真空管道磁悬浮列车推进线圈接地系统设计[J].交通运输工程学报,2026,26(4):276-285.

**Citation:** LI Qiu-jun, HU Dao-yu, GAO Tian-yu, et al. Design of grounding system of propulsion coils for low-vacuum tube maglev train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(4): 276-285.

resistance between longitudinal grounded lines and the metal low-vacuum tube. Analysis results show that when lightning strikes the propulsion coils, local overvoltage is induced, but the overvoltage of other propulsion coils is suppressed by grounding. Between two ground points, the voltage changes with the distance from the ground points. The voltage shows a trend of first rising and then falling. The metal low-vacuum tube acts as a lightning protection strip to ensure that lightning cannot strike the propulsion coils directly. Meanwhile, insulation resistance exists between the longitudinal grounded lines (connected to the propulsion coils) and the metal low-vacuum tube, which effectively ensures that the overvoltage is suppressed to less than 1.0. The insulation resistance value between longitudinal grounded lines and the metal low-vacuum tube significantly affects the overvoltage level in propulsion coils. When the resistance value is greater than 10 k $\Omega$ , the overvoltage of all propulsion coils along the line can be guaranteed to be less than 1.0. Therefore, the configuration can be optimized with two parameters, namely, the number of ground points and the resistance between longitudinal grounded lines and the metal low-vacuum tube. Thus, the engineering implementation cost can be reduced while ensuring system safety. A theoretical basis and technical support is provided for the engineering application of ultra-high-speed low-vacuum tube maglev trains.

**Keywords:** rail transit; low-vacuum tube maglev train; optimization design; propulsion coil; grounding system; lightning overvoltage

**Publication history:** Received 2025-04-30; Received in revised form 2025-07-07; Accepted 2025-08-22

**Funding:** Shanxi Provincial Basic Research Plan Program (202403021221351); National Key R&D Program of China (2024YFF0508004)

\* **Corresponding author:** HU Dao-yu, research fellow, PhD, E-mail: daoq\_b@163.com.

## 0 引言

交通运输作为社会发展与民众日常生活的关键基石及支撑性条件,亦是文明进步的主要支柱之一。当前,高速铁路列车运行速度处于 288~350 km $\cdot$ h<sup>-1</sup> 范围<sup>[1]</sup>,已难以满足人们对于更高速度的需求。磁悬浮列车运用直线电机技术,能够实现车辆悬浮并以更高速( $>360$  km $\cdot$ h<sup>-1</sup>)运行。例如,德国的 Transrapid 09 型磁悬浮列车于 2009 年在埃姆斯兰试验线达到了 550 km $\cdot$ h<sup>-1</sup> 的速度<sup>[2]</sup>。日本采用低温超导电动悬浮技术的 L0 系列磁悬浮列车,于 2015 年在山梨试验线保持着 603 km $\cdot$ h<sup>-1</sup> 的速度记录<sup>[3]</sup>。美国长期重视高速磁悬浮列车的发展并提出多个技术方案,尤其是 2013 年埃隆·马斯克的“超级高铁”(Hyperloop)概念,将低真空管道与磁悬浮相结合的技术构想引起世界的广泛关注<sup>[4]</sup>。近年来,超高速低真空管道磁浮交通系统已经成为全球交通领域的研发热点,该系统结合真空管道和磁悬浮技术进一步提高了列车运行速度,可以达到甚至超过 1 000 km $\cdot$ h<sup>-1</sup>。随着交通方式的进化发展,随之而来的各种新型问题喷涌而出,其中接地问题

对于系统的稳定安全运行至关重要。对此,本文首先介绍中低速磁浮和高铁的接地方式及研究现状,然后介绍超高速低真空管道磁悬浮列车及其接地系统,对超高速低真空管道磁悬浮列车的接地进行等值电路建模,并根据仿真模型分析雷电过电压下推进线圈的电压响应,最后对其接地系统进行优化。

中低速磁浮列车系统中,列车运行时车体与走行轨间无直接接触,与普通轨道交通利用走行轨回流的方式不同,因此增设回流轨进行回流。同时在车站范围内架设接地轨,当车辆进入车站范围内,车体上接地电刷与接地轨连接,将运行过程中的电荷泄放。对于长定子线圈的接地则是通过定子电缆最外层的半导体层与嵌在定子铁芯内的接地套管相连而实现的<sup>[5]</sup>。中低速磁浮列车的相关接地研究主要包括接地电流特性以及对应的电磁干扰分析<sup>[6-7]</sup>等内容。

高速铁路列车一般采用综合接地系统,各个国家的高速铁路的综合接地系统主要包括钢轨、保护线、接地线、扼流圈、金属栅栏、避雷器等<sup>[8-9]</sup>。针对高速铁路综合接地系统的研究一般聚焦于接地回流、钢轨电位抬升、车体电位影响等方面,并据此进行优化抑制接地电流<sup>[10-12]</sup>。

目前超高速低真空管道磁浮列车地面推进线圈的研究内容主要包括悬浮制式及低成本研究设计<sup>[13-14]</sup>、金属真空管道引起的磁阻力对悬浮推进系统的影响<sup>[15-18]</sup>等。Dong 等<sup>[19]</sup>设计了 1 台 7.55 kW 高温超导直线同步电机样机开展高速磁悬浮推进系统的试验研究,并提出了对初级和次级部件的专门设计流程,对比了相同电磁气隙条件下永磁同步电机的性能,结果表明高温超导同步电机的推力、磁场等性能均优于永磁同步电机。Sadeghi 等<sup>[20]</sup>建立超高速低真空管道推进与悬浮系统的动态模型,分析不同轮组收放时间和不同定子段长度下的系统动态响应,首次将有限元悬浮模型与直线同步电机推进模型耦合,构建了覆盖磁悬浮、推进控制、车辆动力学的全系统仿真框架,为 Hyperloop 技术提供了跨物理场的分析工具,但缺乏成本与可靠性分析,工程实用性需进一步研究。大多数研究聚焦在超高速低真空管道磁浮列车直线电机的悬浮推进性能<sup>[21-23]</sup>。Lim 等<sup>[24]</sup>针对超高速低真空管道磁浮列车零磁通线圈提出一种基于二维矩形线圈和傅里叶分析的快速设计模型,达到快速迭代分析的效果,但是有效电感耦合系数  $k$ 。未形成普适条件,复杂工况下误差可能扩大;该团队首次采用静态试验替代高速动态测试,测量超导磁体磁通密度与悬浮力等参数,并结合数值分析间接评估超高速低真空磁浮管道列车的高速性能,将试验周期缩短至传统方法的 1/5,但因静态的原因无法模拟空气动力学干扰,高速下的阻力波动规律仍需要动态验证<sup>[25]</sup>。

综上所述,针对超高速低真空管道磁浮列车的接地系统和过电压研究鲜有报道。不同于中低速磁浮列车和高铁的接地方式,金属低真空管道的引入使该系统的接地系统变得尤为特殊。关于超高速低真空管道磁浮列车系统的管道结构方面,目前,管道梁按材料分类主要包括厚有机玻璃缩尺结构、钢结构、组合结构和预应力混凝土结构截面,但因低真空磁悬浮管道梁结构承受与常规梁诸多不同特性如大气压、气动载荷、复杂的有效温度和温度梯度取值以及特殊的密封及防磁措施,故钢结构和预应力混凝土结构以及组合管道结构成为了低真空磁悬浮的首选。如美国 Virgin Hyperloop One 低真空试验线位于美国内华达州拉斯维加斯附近沙漠中,全线采用圆形筒状钢结构作为结构承载的主要结构,位于荷兰的 Hardt 测试线总长 150 m,由每节 30 m 的圆形钢管道组成。本文的低真空管道在圆形管道的基础上优化,确认了 UN 管梁结构,即上部为 N 形半

圆钢管盖结构,下部为 U 形的“钢结构+预应力混凝土”叠合结构。

对此,本文将对超高速低真空管道磁浮交通系统的接地系统进行等值电路建模,并通过与已发表的数据比对进行模型验证,基于已验证模型分析计算接地特性,并从地面线圈接地点数量和金属真空管道与纵向接地线之间绝缘电阻 2 个维度优化接地系统,为后续工程建设提供理论指导。

## 1 模型建立与验证

超高速低真空管道磁浮交通系统组成如图 1 所示,其特征描述如下:地面线圈安装在 U 形轨道双边侧壁,镜像对称;靠近车体侧为悬浮线圈,悬浮线圈为“8”字形零磁通线圈,轨道同侧悬浮线圈之间无电气连接,轨道两侧镜像对称悬浮线圈通过铰链线连接以提高系统刚度;远离车体侧为推进线圈,推进线圈为三相单层集中式线圈,轨道同侧同相推进线圈串联连接,轨道两侧推进线圈独立供电;超导线圈安装在悬浮架两侧,通直流电时在空间上产生稳定强磁场;当地面供电系统为推进线圈施加交流电流时,推进线圈在空间产生行波磁场,超导线圈直流磁场与其相互作用产生牵引力,使列车加速运行;运动的超导线圈掠过悬浮线圈时,悬浮线圈会产生感应磁场,超导线圈的直流磁场与其相互作用产生悬浮导向力,使列车悬浮稳定运行;采用金属低真空管道降低超高速运行下的空气阻力,提升系统运行效率。本文研究对象为超高速低真空磁浮交通系统全尺寸试验线(一期)项目的磁悬浮列车。试验线全长 2 km,设计运行速度为  $1\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,推进线圈的额定电压为 35 kV。

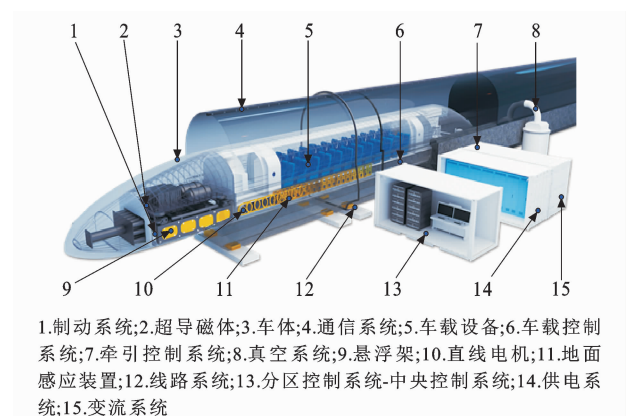


图 1 低真空管道磁悬浮列车系统组成

Fig. 1 Composition of the low-vacuum tube maglev train system

### 1.1 接地系统介绍

在超高速低真空管道磁浮交通系统中,地面推

进线圈面临如下严峻的绝缘考验。

(1) 工作电压高:当列车运行速度高于  $1\ 000\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,推进线圈工作电压大于  $30\ \text{kV}$ , 远超常规直线电机绝缘等级。

(2) 工作环境恶劣:推进线圈运行于低真空环境,增加了绝缘设计难度。

(3) 雷击概率大:金属真空管道暴露于户外且距离长,在雷击作用下存在绝缘击穿风险。为了提高推进线圈的绝缘可靠性,可从 2 个方面入手,一是采用云母绕包或环氧真空压力浇注等工艺,提高推进线圈本身绝缘强度,二是设计合理的综合接地系统,抑制雷击工况下推进线圈局部过电压,消除雷电击穿风险。

图 2(a)为超高速低真空管道磁浮交通系统地面推进线圈接地系统三维示意,其由管道内和管道外接地系统两部分组成。管道内接地系统包括预埋于轨道两侧的纵向接地线、纵向接地线引出接地极及将两侧纵向接地线连接的横向接地线,管道外接地系统为管外地下接地网。管道内和管道外接地系统通过绝缘穿仓接地电缆连接。因此整个接地系统与金属低真空管道是绝缘的。

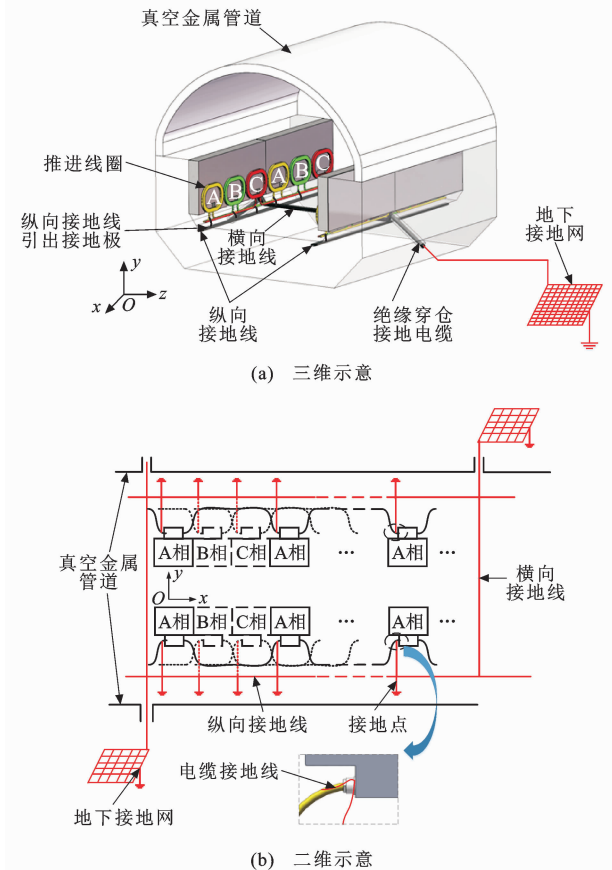


图 2 低真空管道磁悬浮列车推进线圈供电和接地系统  
Fig. 2 Propulsion coil and grounding system of the low-vacuum tube maglev train

图 2(b)为超高速低真空管道磁浮交通系统地面推进线圈接地系统二维示意,在图 2(a)的基础上可以看到推进线圈的接地方式。具体特征为推进线圈经环氧浇注成型后的推进模组表面喷涂半导体层,半导体层通过铜编织线与推进线圈串接电缆的接地线相连后再与纵向接地线引出接地极相连,进而实现推进线圈的接地。

### 1.2 等值电路模型建立

基于推进线圈 LCR 等效电路模型<sup>[26]</sup>,结合图 2 所示接地系统结构,构建了如图 3 所示的单推进线圈接地的等值电路模型。因金属低真空管道与纵向接地线为大尺寸结构,故图中以单推进线圈尺度为单元长度进行电气参数建模。图 3 中: $L_i$  为金属低真空管道单元长度自身电感; $R_i$  为金属低真空管道单元冲击电阻; $C_{ig}$  为金属低真空管道与纵向接地线之间的单元互电容; $R_{ig}$  为金属低真空管道与纵向接地线之间的单元绝缘电阻; $L_g$  为纵向接地线的单元自感; $R_g$  为纵向接地线的单元冲击电阻; $C_{gc}$  为推进线圈和纵向接地线之间的单元互电容; $L_c$  为推进线圈自身电感; $R_c$  为推进线圈的冲击电阻; $C_c$  为推进线圈自身分布电容; $C_g$  为推进线圈的对地电容。因推进线圈间无空间耦合故不考虑互感参数。以上电气参数可通过实测、理论公式计算或有限元仿真计算得到。

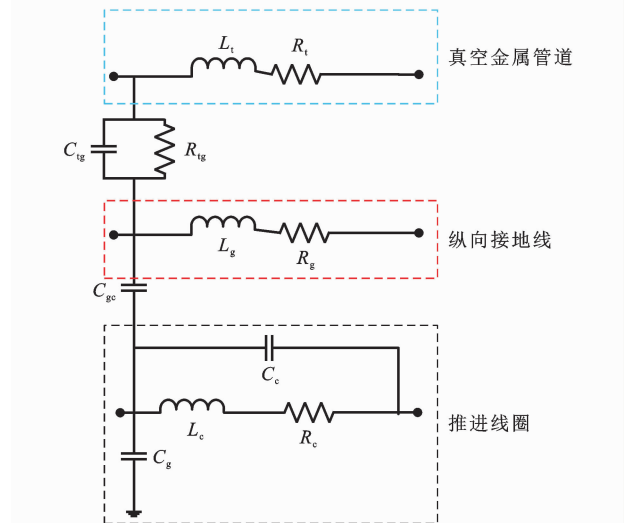


图 3 单元等值电路模型

Fig. 3 Unit equivalent circuit model

推进线圈的电感  $L_c$  可通过仿真或实测得到,然后对推进线圈施加冲击电流,测量推进线圈上感应出的冲击电压,根据冲击电压的衰减率和共振周期得到线圈自身固有周期,可以计算得到线圈的分布电容与冲击电阻

$$f_r = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_c}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{R_c}{2L_c} \quad (2)$$

式中:  $f_r$  为感应冲击电压共振频率;  $T$  为感应冲击电压共振周期;  $\alpha$  为感应冲击电压包络线的衰减率。

环氧树脂浇注成型的推进模组可以等效成平板电容结构,即将模组内部的推进线圈导体和表面接地作为 2 个电极,浇注的环氧树脂为电介质,根据平板电容的计算公式,得到推进线圈的对地电容  $C_g$

$$C_g = \frac{8.85\epsilon\pi dh}{a} \times 10^{-2} \quad (3)$$

式中:  $\epsilon$  为环氧树脂相对介电常数;  $d$  为推进线圈横截面平均直径;  $h$  为推进线圈导线厚度;  $a$  为绝缘厚度。

纵向接地线可以简化成 1 根通长的圆形柱体,可以在仿真软件中计算出其电感  $L_g$  和冲击下的电阻  $R_g$ 。在有限元软件中构建推进线圈与纵向接地线之间的尺寸关系并赋值环氧树脂和混凝土介电常数计算二者之间的电容  $C_{gc}$ 。

金属低真空管道自身的电感  $L_t$  和冲击电阻  $R_t$  可以通过有限元仿真计算得到,金属低真空管道与纵向接地线之间的绝缘电阻  $R_{tg}$  可以通过实际测量获得。金属低真空管道与纵向接地线间电容  $C_{tg}$  的计算可以将二者等效成无限长导体与无限大导体平面间的电容器计算,理论计算公式为

$$C_{tg} = 2\pi\epsilon_r\epsilon_0 \left[ \ln\left(\frac{b}{a} + \sqrt{\frac{b^2}{r^2} - 1}\right) \right]^{-1} \quad (4)$$

式中:  $\epsilon_r$  为混凝土的相对介电常数;  $\epsilon_0$  为真空的介电常数,数值等于  $8.854 \times 10^{12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $b$  为圆柱导体与平面的距离;  $r$  为圆柱导体的半径。

结合接地系统示意图 2(b) 和单元等效电路模型图 3,超高速低真空管道磁浮交通系统推进线圈的接地可被简化成如图 4 所示的分布参数等效电路模型。图 4 中推进模组、纵向接地线、金属低真空管道用 LCR 电路图表示,从图 4 可知,在发生雷击时,雷电的放电路径可分为 2 条:从金属低真空管道直接流向大地;从金属真空管道开始经过  $R_{tg}$  和  $C_{tg}$  流向预埋其中的纵向接地线。第 1 条路径的等效电路可简化为“金属管道-接地网”直接连接,其电气特性表现为低阻抗通路,金属低真空管道本身导电率高,且直接接地,雷电冲击可通过该路径快速泄放入地。第 2 条路径包含了  $R_{tg}$  和  $C_{tg}$ ,在雷电冲击的高频作用下,电容容抗降低形成通路,连接至纵向接地线从而影响到推进线圈的过电压。故后续的研究内容忽

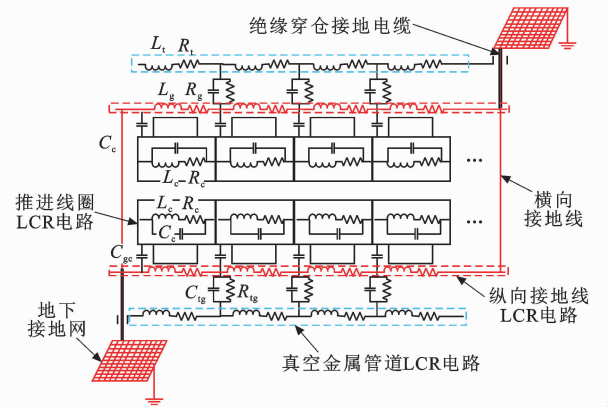


图 4 等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit

略第 1 条路径,对金属低真空管道和纵向接地线均建立等效电路模型开展后续分析研究。

### 1.3 模型验证

为研究磁悬浮系统地面推进线圈的雷电冲击特性,日本学者搭建了由 10 个缩比推进线圈组成的试验平台<sup>[27]</sup>,表 1 所示为缩比推进线圈电气参数和施加雷电波形参数。其中线圈电感的计算频率为 1 kHz,对地电容的计算频率为 100 kHz,分布电容和冲击电阻的计算频率均为 420 kHz。

表 1 缩比推进线圈和雷电波形的电气参数

Table 1 Electrical parameters of the scaled propulsion coil and the lightning wave

参数	符号	数值
线圈电感/mH	$L_c$	0.67
分布电容/pF	$C_c$	215
冲击电阻/ $\Omega$	$R_c$	50
对地电容/pF	$C_g$	50
雷电波形/ $\mu\text{s}$	$T_i/T_r$	0.4/50
雷电幅值/V	$V_m$	50

基于表 1 参数,搭建如图 5 所示仿真电路模型,图中  $V_i$  为第  $i$  个推进线圈的对地电压,  $V_{i,j}$  为第  $i$  个和第  $j$  个推进线圈之间的电压差。需要说明的是,由于在缩比试验平台研究中不涉及金属真空管道及纵向接地线的影响,故仿真电路模型中未添加 2 者的等效电路而只有推进线圈 LCR 等效电路。因试验平台中推进线圈两侧并联供电,故电感和电阻为本身数值的一半,而电容为本体的 2 倍。仿真电路模型中电源器件选择电压冲击电源,雷电冲击波形按照式(5)加载,设置雷击时刻在  $t=0$  s,仿真时间为 15  $\mu\text{s}$ ,具体为

$$V(t) = 50.3(e^{-14.040t} - e^{-17.680000t}) \quad (5)$$

基于图 5 的仿真结果如图 6 所示。其中每个线

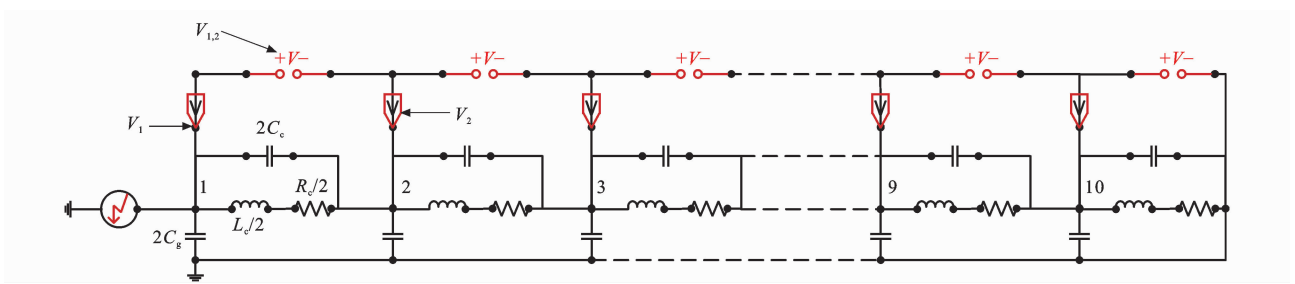
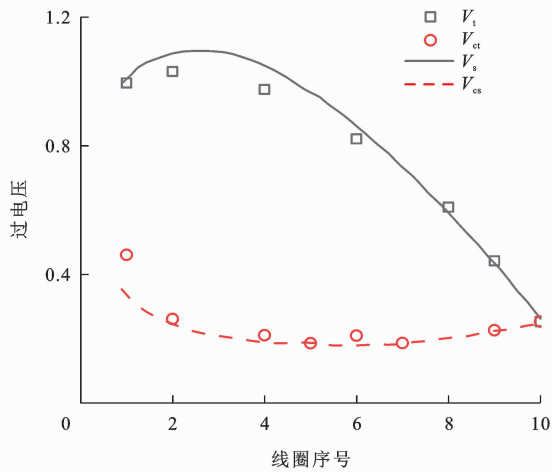
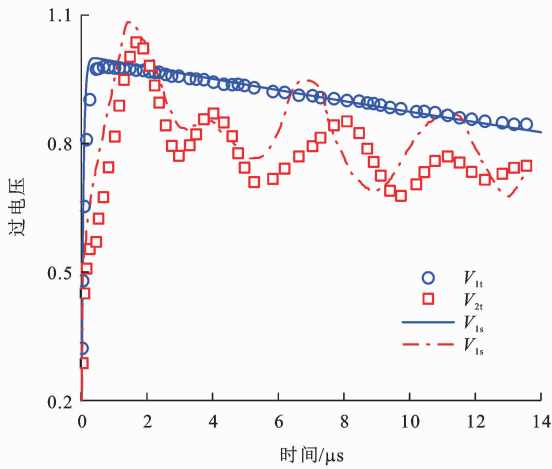


图 5 EMTP 仿真电路

Fig. 5 EMTP simulation circuit



(a) 各线圈对地过电压以及相邻线圈间电压差



(b) 第1、2线圈的对地过电压波形

图 6 仿真结果与试验结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation results and test results

圈的对地最大过电压和相邻线圈之间的电压差如图 6(a)所示,图中: $V_s$  曲线为各个推进线圈的对地最大过电压的仿真结果; $V_t$  为各个推进线圈对地最大过电压的试验结果; $V_{cs}$  为相邻线圈之间的电压差仿真结果; $V_{ct}$  为相邻线圈之间的电压差的试验结果。雷击电压源和第 2 个线圈的对地电压波形如图 6(b)所示,图中: $V_{1s}$  和  $V_{2s}$  分别为雷击电压源(即第 1 个线圈对地电压)和第 2 个线圈的对地电压;

$V_{1t}$  和  $V_{2t}$  分别为试验施加的电压源和第 2 个线圈的对地电压波形。由图 6 可得到以下结论。

(1)对地过电压方面:各推进线圈过电压的波形和幅值的仿真结果与试验结果良好吻合;当雷击过电压发生在第 1 个线圈上时,在第 2 个推进线圈上会感应出 1.1 倍的过电压;经过第 2 个推进线圈后,随着线路的延长,推进线圈过电压开始下降。

(2)相邻线圈之间电压差方面:推进线圈之间电压差的仿真结果与试验结果良好吻合;整条线路的电压差变化趋势为先下降后上升;第 1、2 个推进线圈之间电压差最大且为 0.4(标么值计算方式为实际过电压数值与施加的雷击过电压数值之比,无特殊说明外下同),位于后方推进线圈之间的电压差水平平均较低且小于 0.25。

根据对仿真结果和试验结果的对比分析可知,图 5 所示仿真模型能够准确计算推进线圈的雷击过电压分布。

本文研究的对象为低真空环境下的接地设计,故需考虑低真空环境对接地系统设计和相关电气参数的影响。根据图 3 所示的等值电路模型,电气参数包含金属低真空管道、纵向接地线以及推进线圈的电阻、电感和电容参数,在以上参数中因真空度会影响绝缘材料的介电常数<sup>[28]</sup>从而引起分布电容的变化,因温度引起的电阻的变化在本次研究中不予考虑,电感参数不会因真空度的变化而发生改变。根据文献[28],环氧树脂材料的介电常数在不同老化温度下经过热老化后变化率小于 5%,不会造成较大影响,故本文未修正相对介电常数。因此,基于该仿真模型并耦合金属低真空管道及纵向接地线的影响,进一步对超高速低真空管道磁浮列车的接地进行研究设计。

为了验证图 3 的合理性,在图 5 的基础上增加纵向接地线和金属低真空管道的等值电路,形成带有纵向接地线和金属低真空管道的电路模型,如图 7 所示。通过计算对比图 5、7 的计算结果来验证模型延

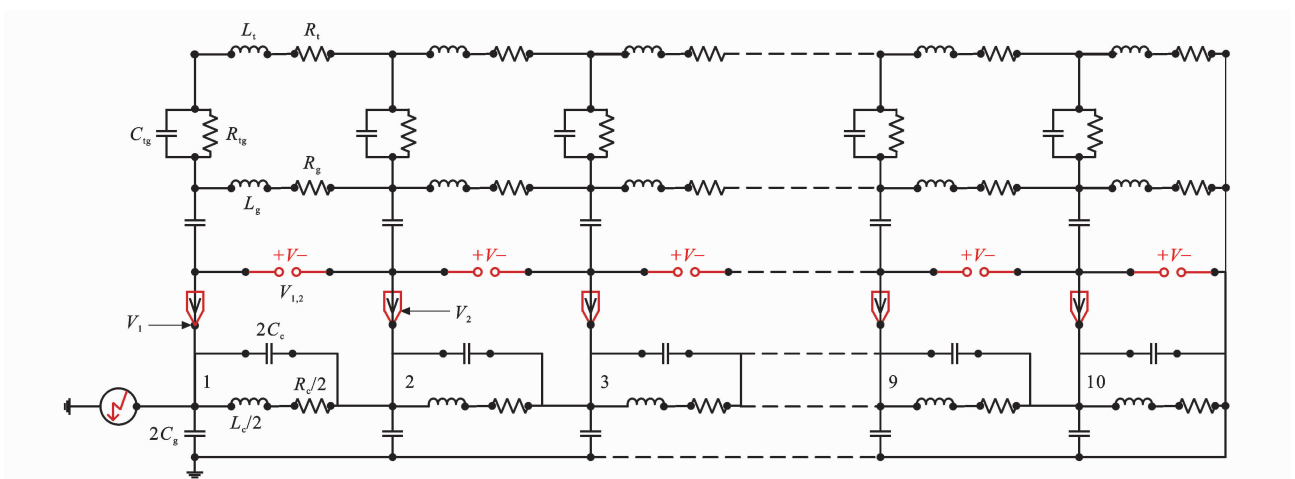


图7 由缩比样机延伸到低真空管道的等值电路

Fig. 7 Extension equivalent circuit of low-vacuum tube from the scaled prototype

伸的准确性。计算结果如图8所示。根据图8所示结果,  $V_1$  和  $V_2$  的波形相似, 只因纵向接地线和金属低真空管道的引入导致振荡幅度增加, 但可以确认整体趋势和波形具有显著相似性, 故可以基于图5所示模型建立包含金属低真空管道的等值电路模型。

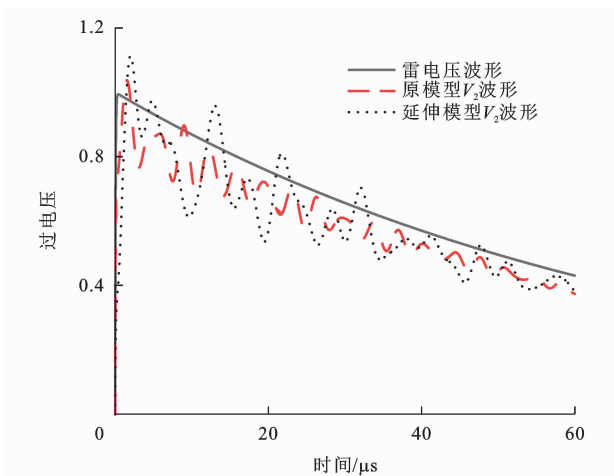


图8 延伸电路模型与原模型结果对比

Fig. 8 Comparison of results of the extended circuit model and the original model

## 2 接地优化设计

### 2.1 金属低真空管道的影响

为了分析金属低真空管道给接地带来的影响, 开展了有无金属低真空管道的雷电冲击特性对比分析, 并以雷击线路首端工况为例进行分析。

假设整条线路同相串联的推进线圈个数为81个, 在第1、21、41、61、81个线圈进行接地处理, 不考虑金属低真空管道, 则雷击线路首端的位置为第1个线圈。该工况与图5所示电路类似, 计算结果如图9所示, 其中图9(a)为已接地推进线圈的过

电压波形, 图9(b)为典型位置处未接地推进线圈的过电压波形。由图9(a)可知, 当雷击第1个线圈时, 因第21、41、61、81个线圈进行了接地, 所以过电

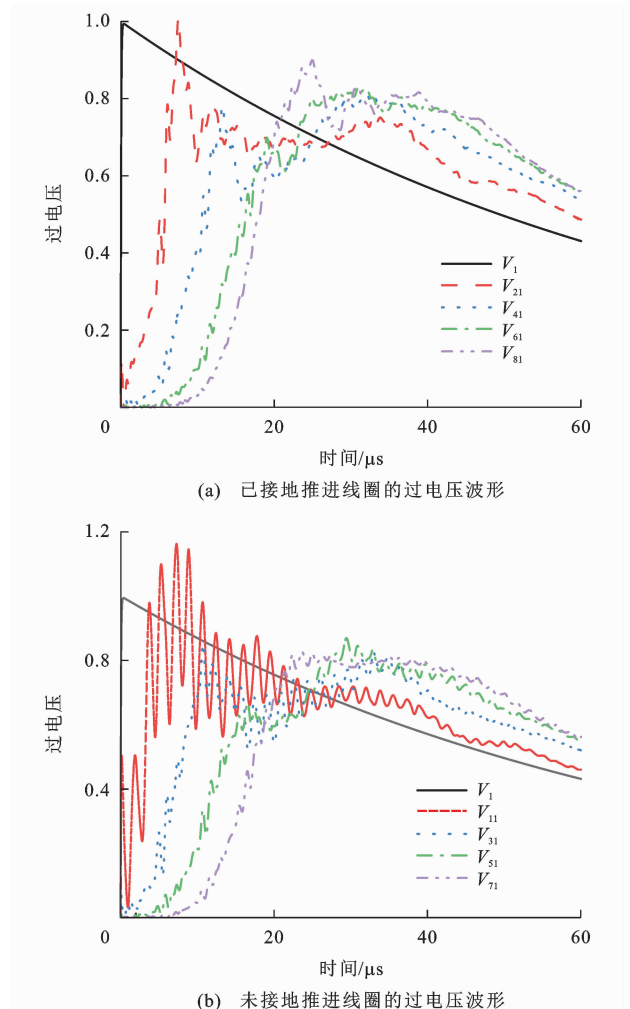


图9 无金属低真空管道时各线圈电压波形

Fig. 9 Voltage waveform of the coils in the absence of the metal low-vacuum tube

压均小于 1.0,证明过电压受到抑制;由图 9(b)可知,未进行接地处理的线圈的过电压最大值为 1.2,出现在第 11 个线圈位置。结合图 9(a)、(b)可知,当雷击点位于第 1 个线圈时,且在第 1、21 个线圈接地时,其间的过电压先上升后下降,证明了线圈接地可以有效抑制线圈过电压。

当存在金属低真空管道,且金属低真空管道与预埋的纵向接地线之间的绝缘电阻是 100 kΩ 时,分析各线圈的过电压情况。鉴于金属低真空管道对全线的连续包覆,雷电无法直接作用于线圈本体,而是落于与线圈空间位置对应的金属低真空管道表面。当雷电作用在第 1 个推进线圈空间位置对应的金属低真空管道上时,计算结果如图 10 所示,其中图 10(a)是接地的推进线圈的过电压波形,图 10(b)是未接地推进线圈的过电压波形。从图 10(a)中可知,已经接地的线圈所受到的过电压水平为 0.018。从图 10(b)可知,未进行接地的线圈所受到的最大

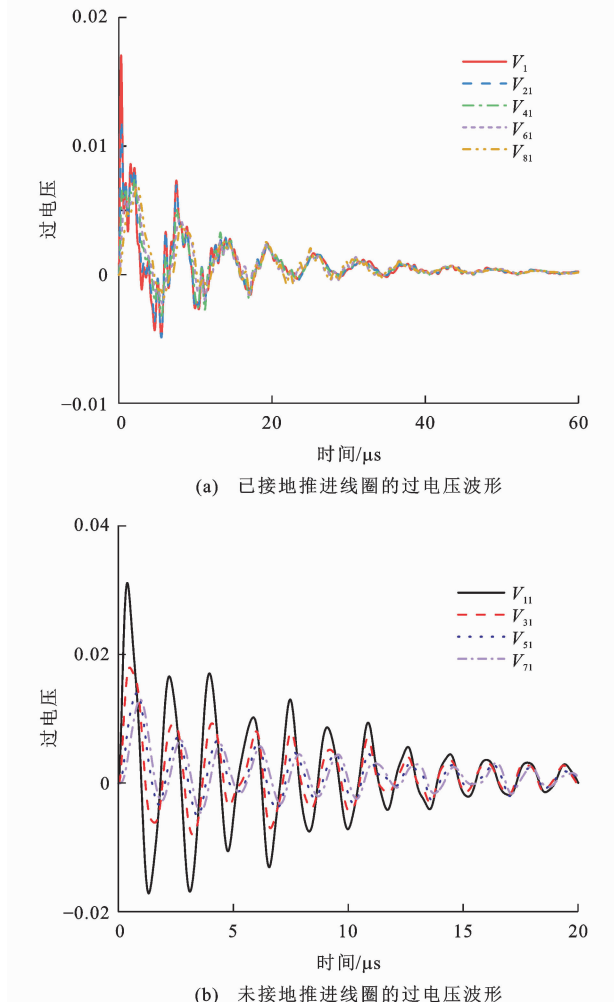


图 10 有金属低真空管道时各线圈电压波形  
Fig. 10 Voltage waveform of the coils in the presence of the metal low-vacuum tube

过电压为 0.034,且出现在第 11 号线圈位置。

为了研究过电压沿线分布特性,将以上线圈的对地最大过电压进行分析,如图 11 所示。从图 11 可知,已接地的推进线圈的最大过电压小于相邻未接地推进线圈的过电压,且在 2 个相邻接地点之间,推进线圈的过电压先上升再下降;随着线路的延长,推进线圈的过电压随之下降。

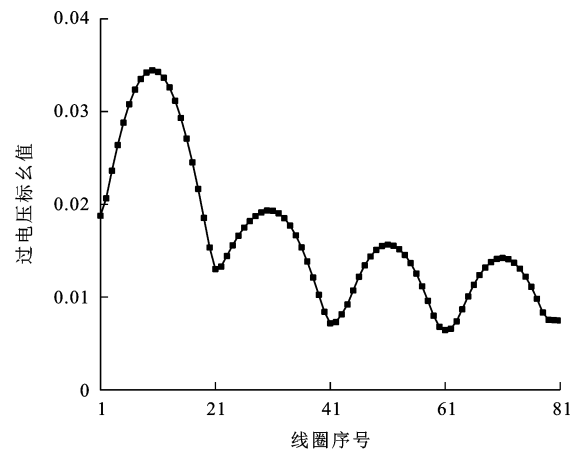


图 11 过电压分布曲线  
Fig. 11 Overvoltage distribution curve

通过与无金属低真空管道时的情况,即图 9 所示结果对比分析可知,因金属低真空管道与纵向接地线之间存在 100 kΩ 的绝缘电阻,雷击过电压很难侵入到纵向接地线上,大部分能量通过金属低真空管道向大地释放,因此金属低真空管道保护内部地面线圈防止受到雷电过电压直接侵入的危害,而金属低真空管道与纵向接地线之间的绝缘电阻起到了隔离的作用。

### 2.2 金属低真空管道与纵向接地线之间绝缘电阻的影响

为了进一步分析金属低真空管道与纵向接地线之间绝缘电阻对直线电机雷电过电压响应的影响,更改两者之间的绝缘电阻值,计算分析线圈的过电压情况。根据图 11 可知,当雷击点位于第 1 个推进线圈空间位置对应的金属低真空管道上时,最大过电压出现的地方位于第 11 个线圈位置,即  $V_{11}$  为所有推进线圈的过电压最大值,因此只比较不同绝缘电阻时  $V_{11}$  的变化情况。

图 12 为不同绝缘电阻下的  $V_{11}$ ,从图 12 可知:两者之间的绝缘电阻越小则线圈所受的过电压越大;随着绝缘电阻的增大,过电压数值随之下降,且达到一定程度后下降趋势越来越平缓,证明抑制过电压的效果越来越不明显;当绝缘电阻大于等于 10 kΩ 时,过电压最大值小于等于 1.0。

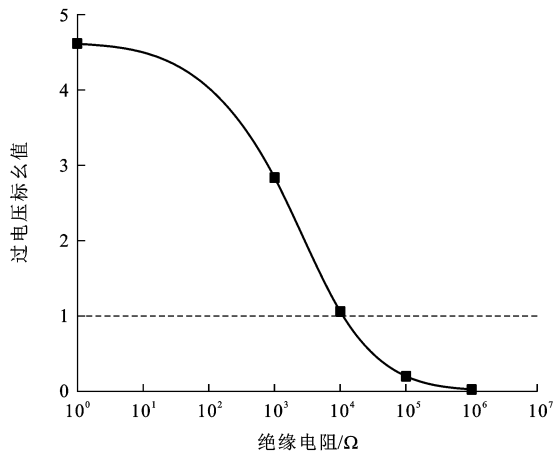


图 12 不同绝缘电阻下  $V_{11}$

Fig. 12  $V_{11}$  at different insulation resistances

### 2.3 接地点数量的影响

以金属低真空管道与纵向接地线之间绝缘电阻为 10 kΩ 且雷击位于线路首端为例,分析接地点数量的影响。接地点位情况如下:每个线圈均接地;每 10 个线圈进行一次接地;每 20 个线圈进行一次接地;每 40 个线圈进行一次接地;只有首尾线圈接地。仿真结果如图 13 所示。因每个线圈接地的工况过电压数值很小,因此通过放大局部坐标方式用右侧纵坐标表示,而其他工况的结果可以通过观察左侧的纵坐标数值得到。从图 13 可知,当所有线圈均接地时,则线圈过电压最大值不超过 0.002,如右侧纵轴所示;随着接地点数量的递减和接地点间距的增加,线圈过电压呈现出显著的上升趋势。因此,接地点数量与线圈过电压水平成显著负相关,即增加接地点数量可有效抑制线圈过电压,而减少接地点数量将很难抑制线圈过电压。

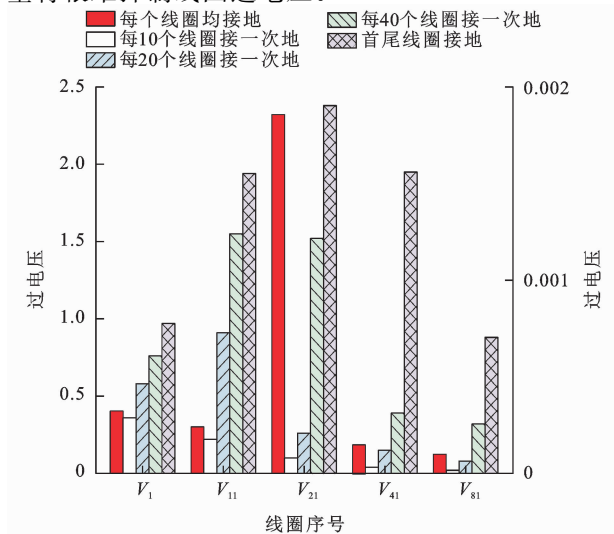


图 13 接地点数量对过电压的影响

Fig. 13 Effect of the number of ground points on overvoltage

### 3 结语

(1)本文针对超高速低真空管道磁浮列车的接地系统,构建了包含“地面推进线圈-金属低真空管道-分布式接地装置”的双端口等效电路模型,并通过与已发表的数据对模型正确性进行验证,然后依据该模型开展雷击过电压工况下推进线圈的过电压响应分析。

(2)通过本文研究内容得出如下主要结论:金属低真空管道可起到避雷带的作用,能隔离内部电气设备,保护其免受雷电过电压侵入;金属低真空管道与纵向接地线之间的绝缘电阻可吸收、阻断雷电能量,进一步抑制雷电过电压,保护内部设备;直线电机就近接地能抑制局部过电压,且接地数量越多抑制效果越显著;因此可结合金属低真空管道与纵向接地线间的绝缘电阻数值,合理配置接地点数量,以降低工程量、节约成本。

(3)本文聚焦低真空管道磁悬浮列车接地系统,从 3 个维度分析了雷击工况下直线电机的过电压特性。后续可开展大型雷电冲击试验,通过仿真结果与试验结果的对比,系统研究不同接地方式对推进线圈雷电冲击响应的影响,为低真空管道磁悬浮系统的工程化应用提供更充分的理论依据与技术支持。

### 参考文献:

### References:

[1] PIERREJEAN L, RAMETTI S, HODDER A, et al. A review of modeling, design and performance assessment of linear electromagnetic motors for high-speed transportation systems[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(1): 2146-2159.

[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):455-474,530. DENG Zi-gang, LIU Zong-xin, LI Hai-tao, et al. Development status and prospect of maglev train[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(3): 455-474, 530.

[3] SHI Y, MA W H, LI M, et al. Research on dynamics of a new high speed maglev vehicle[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(3): 721-742.

[4] 熊嘉阳,沈志云,池茂儒,等.高速磁悬浮列车技术综述[J].交通运输工程学报,2025,25(2):1-23. XIONG Jia-yang, SHEN Zhi-yun, CHI Mao-ru, et al. Review on high-speed maglev train technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(2): 1-23.

[5] 马文忠,李耀华.新型绕组电缆及其接地系统的研究[J].电线电缆,2004,47(3):32-33,35. MA Wen-zhong, LI Yao-hua. Study on the new winding cable and its grounding system[J]. Wire & Cable, 2004, 47(3):

- 32-33, 35.
- [6] 邓江明,陈特放,彭奇彪.中低速磁浮列车车体接地回流特性研究[J].机车电传动,2017,5:88-92.  
DENG Jiang-ming, CHEN Te-fang, PENG Qi-biao. Study of grounding current characteristics of power supply main loop in the medium-low speed maglev system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2017, 5: 88-92.
- [7] 宋丽伟,李林,邓江明.磁浮列车牵引系统电磁干扰分析研究[J].电气传动自动化,2019,41(6):9-12.  
SONG Li-wei, LI Lin, DENG Jiang-ming. Analysis and research on electromagnetic interference of maglev train traction system [J]. Electrical Drive Automation, 2019, 41(6): 9-12.
- [8] 苏鹏程.客运专线电气化铁道的综合接地技术[C]//电气化铁道.中国电气化铁路两万公里学术会议论文集.北京:电气化铁道,2005:39-42.  
SU Peng-cheng. Integrated grounding technology for electrified passenger dedicated lines[C]// Electric Railway. Proceedings of the 20000 Miles Academic Conference on China's Electrified Railway. Beijing: Electric Railway, 2005: 39-42.
- [9] 杨岗,刘立峰,余颜丽.铁路综合接地和信号设备防雷系统设计指南[M].北京:中国铁道出版社,2009.  
YANG Gang, LIU Li-feng, YU Yan-li. Guidelines for the engineering design of lightning protection systems for integrated grounding and signaling equipment for railways[M]. Beijing: China Railway Press, 2009.
- [10] 李响.运营动车组车轨回流耦合特性研究[D].成都:西南交通大学,2018.  
LI Xiang. Study on the coupling characteristics of high-speed EMU's car-rail reflux coupling system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [11] 刘东来.高速动车组接地技术研究[D].成都:西南交通大学,2013.  
LIU Dong-lai. Study on grounding technology of high-speed trains[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [12] 刁超健.高速动车组保护接地性能分析及优化方法研究[D].成都:西南交通大学,2019.  
DIAO Chao-jian. Research on performance analysis and optimization method of protective grounding of high speed EMU[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [13] DENG Z G, SHI H F, CHEN Y H, et al. A cost-effective linear propulsion system featuring PMEDW for HTS maglev vehicle: Design, implementation, and dynamic test[J]. Measurement, 2025, 240: 115618.
- [14] SHI H F, DENG Z G, KE Z H, et al. Linear permanent magnet electrodynamic suspension system: Dynamic characteristics, magnetic-mechanical coupling and filed test[J]. Measurement, 2024, 225: 113960.
- [15] KIM S H, LEE J, KIM C S, et al. Drag force analysis of superconducting EDS type Hyperloop system according to changes in tube material properties[C]// IEEE. 2024 IEEE International Magnetic Conference. New York: IEEE, 2024: 1-2.
- [16] CHOI S Y, CHO M K, LIM J Y. Electromagnetic drag forces between HTS magnet and tube infrastructure for Hyperloop[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 12626.
- [17] CHOI S Y, LEE C Y, LIM J Y. Analysis of guidance and levitation forces between HTS magnets and conductive tubes for Hyperloop[J]. AIP Advances, 2024, 14(3): 1-13.
- [18] CHOI S Y, LEE C Y, JO J M, et al. Sub-sonic linear synchronous motors using superconducting magnets for the Hyperloop[J]. Energies, 2019, 12(24): 1-18.
- [19] DONG F L, HUANG Z, QIU D R, et al. Design and analysis of a small-scale linear propulsion system for maglev applications (1)— the overall design process[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1-5.
- [20] SADEGHI S, SAEEDIFARD M, BOBKOC. Dynamic modeling and simulation of propulsion and levitation systems for Hyperloop[C]// IEEE. 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA). New York: IEEE, 2021: 1-5.
- [21] SADEGHI S, FENET F X, HASSANPOUR A, et al. An optimized electric propulsion system for Hyperloop applications[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 2723-2733.
- [22] KUPTSOV V, FAJRI P, RASHEDUZZAMAN M, et al. Combined propulsion and levitation control for maglev/hyperloop systems utilizing asymmetric double-sided linear induction motors[J]. Machines, 2022, 10(131): 1-15.
- [23] JI W Y, JEONG G, PARK C B, et al. A study of non-symmetric double-sided linear induction motor for Hyperloop all-in-one system (propulsion, levitation and guidance) [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 1-4.
- [24] LIM J Y, LEE C Y, LEE J H, et al. Design model of null-flux coil electrodynamic suspension for the Hyperloop[J]. Energies, 2020, 13(19): 5075-1-21.
- [25] LIM J Y, LEE C Y, OH Y J, et al. Performance evaluation of superconducting electrodynamic suspension for Hyperloop using static experiments[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, 34(5): 1-6.
- [26] AMETANI A, NISHINAGA H, KATO R, et al. A study of transient induced voltages on a maglev train coil system[C]// IEEE. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Stockholm. New York: IEEE, 1994: 1374-1378.
- [27] EMA S. Surge analysis of the MAGLEV coil for propulsion and guidance[J]. Electrical Engineering in Japan, 1997, 118(1): 71-82.
- [28] LI Q J, HU D Y, CHENG L, et al. Stability study of epoxy resin in low-vacuum environment applied in ground coil module of high-speed flying train[C]// Springer. The Proceedings of the 18th Annual Conference of China Electrotechnical Society (ACCES 2023). Munich: Springer, 2023: 41-58.