DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.207

低真空管道电动悬浮地面推进绕组磁-热特性分析

张　鹏[1]，李明明[2]，李志平[3]，郑　珺[3]
（1.中铁工程设计咨询集团有限公司，北京 100055；
2.西南交通大学 电气工程学院，四川 成都 611756；
3.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）

摘　要：低真空管道磁浮系统具有运行速度高、运行环境封闭、无污染的特点，我国在电动制式低真空管道磁浮系统的绕组方案研究方面，仍处于基础理论和试验研究阶段。文章结合管道磁浮系统特有的低真空运行环境，针对超导电动悬浮制式，综合分析评估3种推进绕组方案的电磁特性与温升特性。鉴于管道磁浮特定的稀薄空气及不良热场环境对其电气系统的挑战，文章针对3种不同的超导电动悬浮地面推进绕组方案，建立了三维电磁耦合数值计算模型、三维电磁有限元模型及三维全域流固耦合热模型，对比分析电磁性能并进行瞬态磁热联合仿真。具体模拟分析了0.005 atm(506.625 Pa)、0.01 atm(1 013.25 Pa)、0.05 atm(5 066.25 Pa)、0.1 atm(10 132.5 Pa)、0.5 atm(50 662.5 Pa)不同管道压力的低真空运行环境对绕组表面对流换热的影响，以及3种推进绕组的温度场分布规律。综合评估上述因素后，文章建议在未来工程化应用中采用单层短距和双层整距组合的推进线圈形式。研究成果不仅为电动制式低真空磁浮系统绕组方案设计提供了参考，而且为低真空环境下直线电机多物理场建模提供了可行的构建方法。

关键词：管道磁浮；超导电动悬浮；推进绕组；电磁特性；流固耦合；温升特性

中图分类号：U237；U266.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2026)02-0126-11

0　引言

随着运行速度的提升，地面轨道交通工具所受空气阻力占列车运行总阻力的比例将超过90%，成为制约陆地交通最高经济速度的重要因素之一[1]。将磁悬浮技术和真空管道技术相结合有望解决这一问题，其理论速度可达到相同真空度下航天器的水平[2]，国内外科研机构与企业已围绕管轨磁浮开展了多方位探索和研究。1904年，“现代火箭之父”罗伯特·戈达德首次提出真空管道飞行器概念；1919年，Ballard[3]申请真空管道运输系统专利；2013年，埃隆·马斯克提出真空管道超级高铁构想；2016—2017年，Deng等[4-5]建成首个真空管道高温超导磁悬浮车环形试验系统“Super-Maglev”，同期中国工程院先后启动“低真空管道高速磁浮铁路战略研究”等多个管（隧）磁浮、高速磁浮主题项目；自2016年起，韩国铁路研究院开始研制超音速胶囊列车；2024年，中国航天科工集团第三研究院在山西省大同市阳高县高速飞车试验基地，完成超高速低真空管道磁浮交通系统全尺寸试验线低真空环境下系统集成演示验证试验，并通过了山西省科技厅组织的现场测试检查[6]。为实现更高速度的试验能力，在四川省支持下，西南交通大学主持建设了四川省重大科技基础设施“多态耦合轨道交通动模试验平台”项目[7]。

真空管道磁浮系统作为一种新型前沿的交通技术，

基金项目：四川省国（境）外高端人才引进资助项目（2024JDHJ0002）
通信作者：张　鹏，男，高级工程师，主要从事铁路电气化方面的研究；E-mail: 397226720@qq.com
引用格式：张鹏，李明明，李志平，等. 低真空管道电动悬浮地面推进绕组磁-热特性分析[J]. 机车电传动，2026(2): 126-136.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.207.
Citation：ZHANG Peng, LI Mingming, LI Zhiping, et al. Analysis of magneto-thermal characteristics for ground propulsion windings in low evacuated-tube electrodynamic suspension systems[J]. Electric drive for locomotives,2026(2): 126-136.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.207.

具有高速、便捷、环保、高效等优势。与传统高速列车的开敞运行环境不同，真空管道特有的壅塞现象会带来严峻的气动挑战[8]。近年来，国内外学者对管道列车阻力特性[9-10]、气动壅塞机制与激波现象[11]、动态气动行为[12-14]、气动热[15-17]等问题开展了大量研究。此外，张卫华等[18]针对低真空管道交通系统的低气压环境，详细探讨了磁浮列车悬浮技术的适应性及面临的主要技术挑战。列车在管道内高速运行时，气动压缩会导致管道内气流温度迅速升高，使管道内热问题愈发突出；而低真空环境下空气对流传热能力下降，进一步增大了管道内发热设备周围的温度梯度，温升更加显著。因此，如何应对管道磁浮特有的稀薄空气及不良热场环境所带来的技术挑战，已成为当前亟需深入研究与解决的关键问题。

高速运行的实现，除需低真空运行环境，还需配备高速磁浮制式[19]。目前，国内外已投入或计划投入商业运营的两种磁浮制式分别为常导电磁悬浮[20-21]与超导电动悬浮[22-23]，其中德国和日本的高速磁浮列车最高速度均处于500 km/h等级。对于设计速度为600~1 000 km/h等级的真空管道高速磁浮系统，超导电动磁浮制式曾创造603 km/h的载人运行世界纪录，且具有悬浮间隙大、浮阻比高、对轨道平顺度要求低等优势，因此可作为该系统的关键技术选择之一。

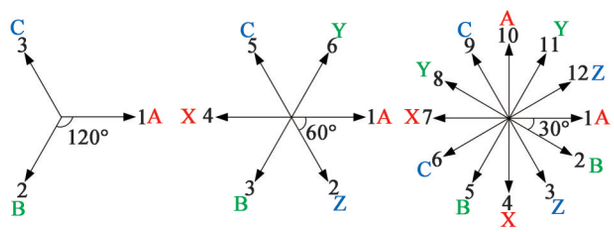
日本开展超导电动悬浮技术研究的时间较早。日本超导电动悬浮系统地面轨道墙为U形，零磁通线圈与推进线圈依次离散排布于轨道墙壁内部；当车载超导磁体跟随地面推进线圈产生的行波磁场沿纵向同步前进时，轨道零磁通线圈中会产生感应电流，感应电流激发的磁场与超导磁体磁场相互作用，发挥悬浮导向的作用。据报道，日本山梨试验线轨道墙中的推进线圈在试验线建设初期采用双层整距推进绕组结构，后期为降低成本，部分区间采用了单层短距推进绕组结构。

近年来，针对超导电动悬浮系统的研究多集中于开域运行环境，从物理场角度可分为电磁场分析[24-28]、热场分析[29]、力学场分析[30]及多物理场耦合分析[31-32]，从子系统角度可分为悬浮/导向系统、推进系统、阻尼系统，且现有研究多集中于悬浮/导向系统，对推进系统的研究相对较少。地面长定子推进绕组是超导电动悬浮推进系统的关键部件，其结构设计直接影响系统效率与功率因数。真空管道内推进绕组的运行会产生大量热量，低真空环境下热管理更为复杂，设计高效冷却系统保障绕组高温稳定运行，已是当前亟待突破的技术[33]。同时，推进线圈作为电能的承载载体，其温升引起的可靠性问题，不仅影响列车运行效率与安全性，而且给工程设计带来挑战。在低真空管道气动效应的客观条件和超导电动磁悬浮列车高速运行的需求下，超导电动磁悬浮系统地面长定子推进线圈的热损耗与温升特性仍不明确，亟待开展深入研究[34]。

综上，本文以低真空运行环境下的超导电动悬浮单个悬浮架系统为对象开展研究：首先，确定适用于超导电动磁浮系统强磁场环境的3种无铁芯地面推进绕组方案，并初步分析其结构特点；其次，建立超导同步直线电机电-磁-力耦合数值模型，采用自编程方法求解，对比分析3种推进绕组方案的电磁特性；接着，通过建立三维全域流固耦合热模型，完成典型管道气压环境下的瞬态电磁-热联合仿真计算，求解地面绕组热损耗并进行温升分析；最后，综合对比3种绕组结构方案，得出适用于管道磁浮系统的最优推进绕组方案。

1　推进绕组结构设计与建模

当直线同步电机采用不同极槽配合、不同绕组方式时，其绕组分相与连接方式存在差异，通常借助电动势星形图确定。超导磁浮列车推进系统采用无铁芯超导直线同步电机驱动，地面长定子推进绕组为无铁芯结构，无实际定子槽。根据电机的槽距角计算公式 $\alpha=360p/Z$（p为极对数，Z为电机槽数；对于集中式绕组，槽数以“虚槽”计数，即线圈边数量），绘制2极3槽、2极6槽、2极12槽的槽电动势星形图，如图1所示。



(a) 2极3槽　　(b) 2极6槽　　(c) 2极12槽

图1　3种极槽配合下槽电动势星形图

Fig. 1　Star diagram of slot electromotive forces for three pole-slot combinations

基于无铁芯扁平绕组的设计要点，结合图1槽电动势星形图和绕组分相形式，确定单层整距集中绕组（single-layer short-pitch stator, SSS）、双层整距集中绕组（double-layer full-pitch stator, DFS）和双层短距集中绕组（double-layer short-pitch stator, DSS）3种结构方案，主要结构参数如表1所示。为精确求解各推进绕组方案的系统电磁特性，考虑线圈三维几何特征，建立如图2所示的推进绕组三维数值模型。由图2可知，以一对极内线圈边的空间排布离散度为指标分析该模型，DSS方案线圈边排布的几何对称性最高。

2　电磁性能仿真与特性分析

2.1　电-磁-力耦合模型建立

为高效、准确对比各推进绕组方案的电磁性能，

表1　3种推进绕组主要结构参数

Table 1　Main structural parameters of three propulsion winding options

参数	SSS	DFS	DSS
中心长度/m	0.65	1.35	0.65
中心高度/m	0.59	0.53	0.59
定子间距/m	0.90	0.90	0.45
极距τ/m	1.35	1.35	1.35
线圈边高度/m	0.07	0.07	0.07
线圈边厚度/m	0.04	0.04	0.02
内外间距/m	0	0.06	0.04
匝数	10	10/8（外/内）	5/4（外/内）
电流幅值/A	1 000	1 000	1 000

首先基于离散方法思想，建立考虑推进线圈三维几何结构特征的精确互感计算模型；其次，基于等效电路理论建立等效电路模型，进一步求解绕组反电动势（back electromotive force, Back-EMF）；最后，采用能量法求解系统电磁力。具体流程如图3所示，更多建模方法和细节参见文献[35-38]。电磁耦合回路如图4。

互感计算是数值计算流程的关键步骤之一，其结果与线圈形状、尺寸、材料磁导率及线圈间的空间相对位置有关。图4中C_1与C_2为2个电磁耦合电流回路，将电流等效为沿C_1与C_2几何轴线流动，通过磁矢位计算2个回路之间的互感。实际工程中的超导磁体为跑道形结构，对应的推进线圈也包含了圆弧边，为精确计算推进线圈与超导线圈之间的互感，将环路积分等效为离散求和，最终得到离散纽曼公式，如式(1)所示。

$$M_{\mathrm{d}\boldsymbol{L}_{i_1}\mathrm{d}\boldsymbol{L}_{i_2}}=\frac{\mu_0 N_1 N_2}{4\pi}\int_{C_1}\int_{C_2}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{L}_{i_1}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{L}_{i_1}}{R_{12}}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{N_1}{y_1 z_1}\frac{N_2}{y_2 z_2}\sum_{i_1=1}^{n_1}\sum_{i_2=1}^{n_2}\frac{\left|\mathrm{d}\boldsymbol{L}_{i_1}\right|\left|\mathrm{d}\boldsymbol{L}_{i_2}\right|\cos\theta_{i_1 i_2}}{\sqrt{(x_{i_1}-x_{i_2})^2+(y_{i_1}-y_{i_2})^2+(z_{i_1}-z_{i_2})^2}} \tag{1}$$

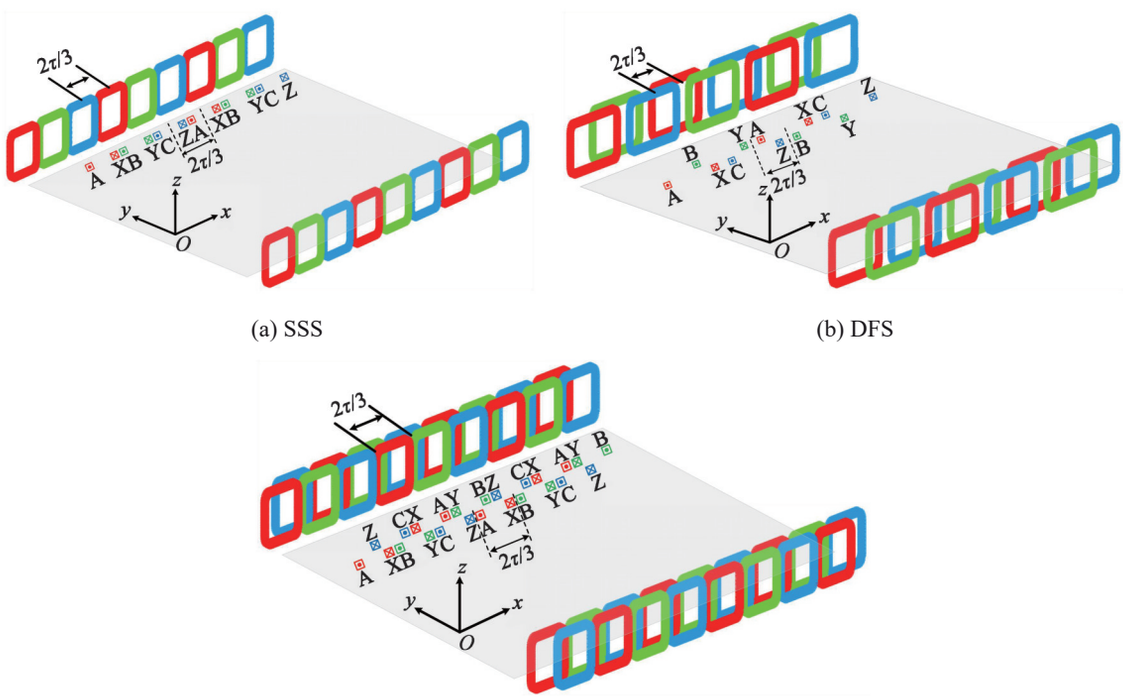
式中：N_1、N_2分别为2个电流回路C_1、C_2的匝数；μ_0为真空磁导率；y_1、z_1为电流回路C_1在y方向和z方向的分层数；y_2、z_2为电流回路C_2在y方向和z方向的分层数；$\mathrm{d}\boldsymbol{L}_{i_1}$、$\mathrm{d}\boldsymbol{L}_{i_2}$为分段电流矢量；$(x_{i_1},y_{i_1},z_{i_1})$、$(x_{i_2},y_{i_2},z_{i_2})$为$\mathrm{d}\boldsymbol{L}_{i_1}$、$\mathrm{d}\boldsymbol{L}_{i_2}$的中心点坐标；$R_{12}$为$\mathrm{d}\boldsymbol{L}_{i_1}$、$\mathrm{d}\boldsymbol{L}_{i_2}$中心点的距离；$\theta_{i_1 i_2}$为分段电流矢量夹角。

图5所示为无铁芯超导同步直线电机的电磁耦合等效电路模型。图5(a)为单个推进线圈与超导线圈构成的耦合单元等效电路。其中，I_s为超导线圈电流，i_p为推进线圈电流，e_x为超导线圈运动磁场在推进线圈中感应产生的Back-EMF，R_{pc}、L_{pc}分别为其等效电阻与自感。图5(b)为地面侧单相绕组的等效电路。将定子区域按空间位置划分为若干子区，共含m个推进线圈单元；其中，与悬浮磁体阵列发生磁耦合的线圈单元有p个，其余$m-p$个位于非耦合区。各线圈单元的电阻与电感按比例分配，并联接入电压源U_{ph}。该模型基于磁矢位法计算所得互感参数构建，为电磁力求解提供输入。

采用能量法求解电磁力，表达式为

$$F_x=I_s i_p\frac{\partial M_{sp}}{\partial x} \tag{2}$$

式中：F_x为超导线圈所受推进力；I_s为超导线圈的电



(a) SSS　　(b) DFS

(c) DSS

图2　推进绕组三维数值模型

Fig. 2　Three-dimensional numerical model of propulsion winding

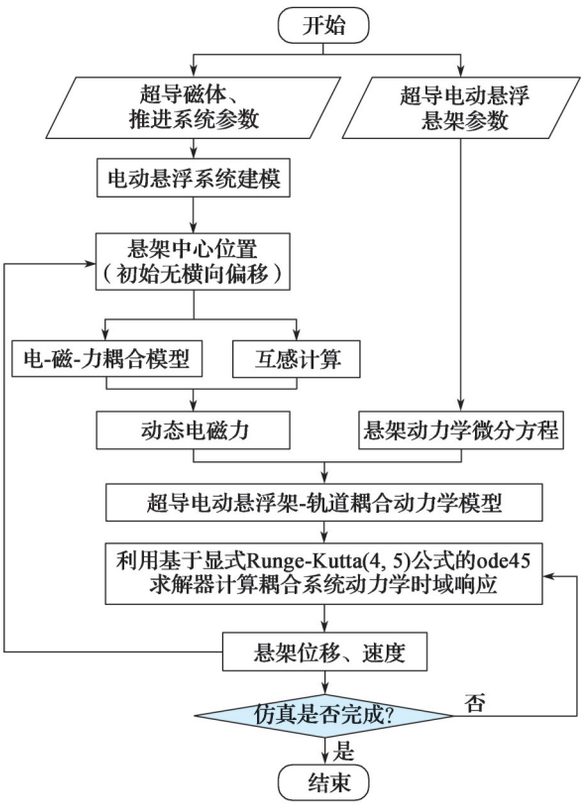


图3　数值计算流程

Fig. 3　Flowchart of numerical calculation

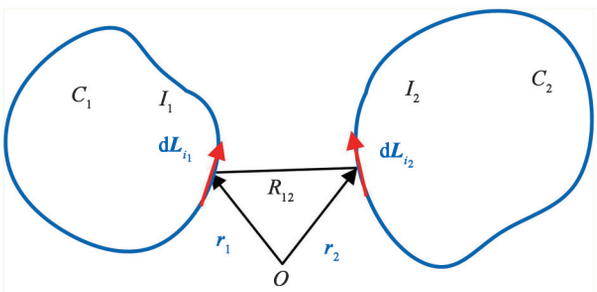


图4　2个电磁耦合电流回路

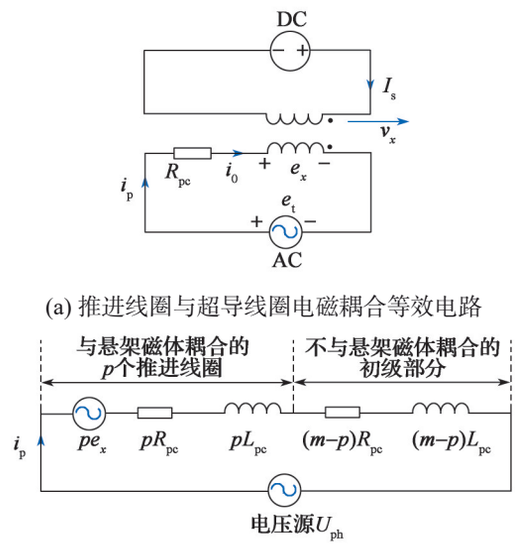
Fig. 4　Two electromagnetically coupled current loops

流；i_p为推进线圈的瞬时电流；M_{sp}为超导线圈与推进线圈的互感。

2.2　电磁特性对比

基于上述流程与公式编写数值计算程序，求解各推进绕组方案的电磁性能。考虑长定子直线同步电机特有的纵向边端效应，以轨道单侧为例，分别计算得到悬浮架单侧4个超导磁体与SSS、DFS、DSS的9个、9个、18个推进线圈发生电磁相互作用时的感应电动势波形。同时，为进一步分析Back-EMF中的谐波含量，以各推进绕组的A相为例进行傅里叶分析，得到其频谱图。推进绕组Back-EMF波形及频谱如图6所示。

由图6可知，DFS的电动势波形为平顶波，表明双层整距布置提升了基波成分占比，削弱了高次谐波；SSS和DSS的电动势波形为尖顶波，表明谐波成分相对更丰富。结合频谱分析可知，当绕组短距值设为极



(a) 推进线圈与超导线圈电磁耦合等效电路

(b) 地面单相绕组等效电路

图5　无铁芯超导同步直线电机等效电路

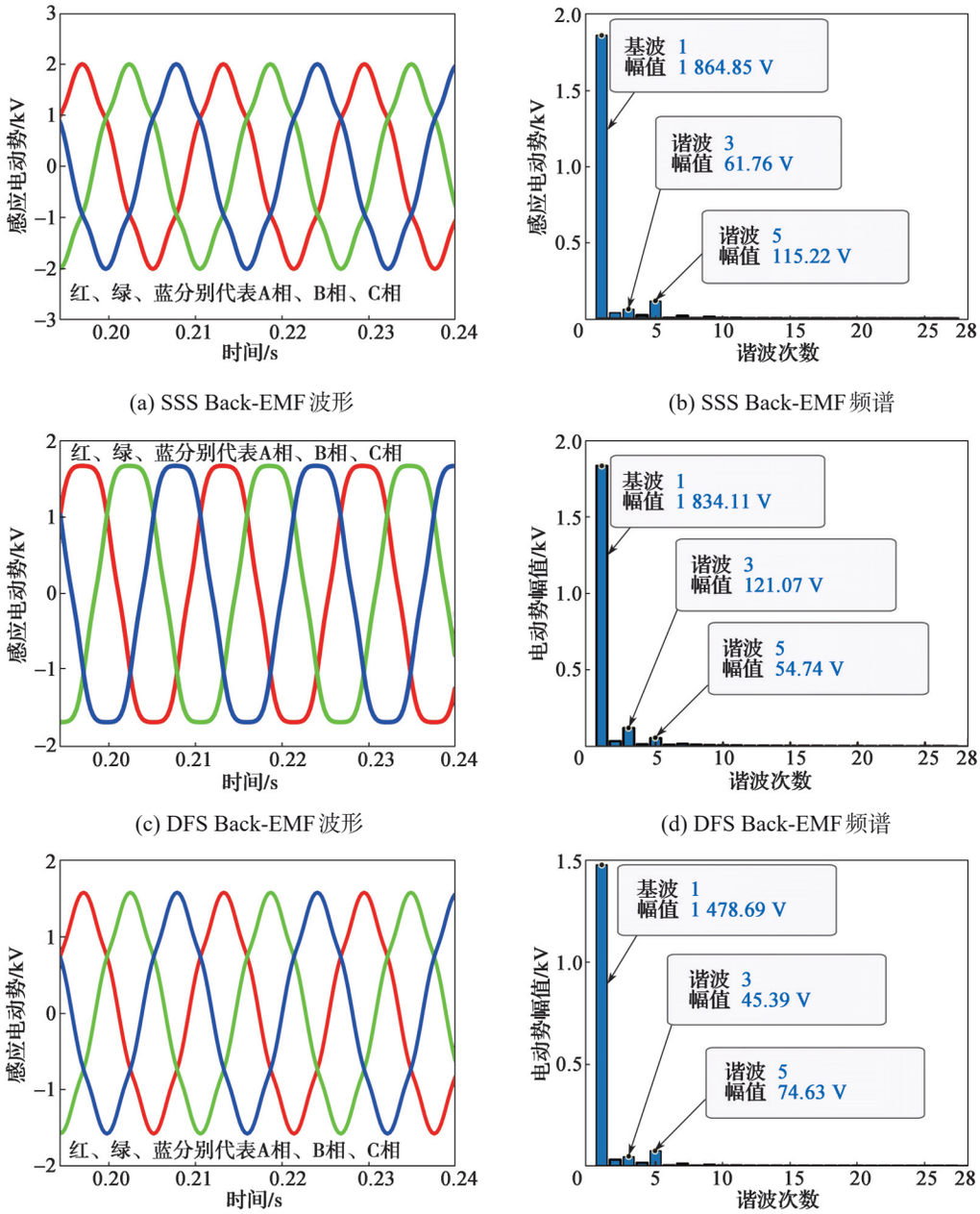
Fig. 5　Equivalent circuit of a coreless superconducting synchronous linear motor

距的2/3时，3次谐波的绕组系数被有效削弱，Back-EMF中的3次谐波幅值显著降低，这与电机工程中常用的短距绕组抑制低次谐波的设计规律一致。短距设计可改善电动势波形质量，减少电流谐波与推力的波动，提升电机运行的平稳性，但同时会使基波电动势幅值降低，推力下降。因此，绕组结构选择需在谐波抑制与基波电动势幅值保持之间权衡，以兼顾电机的运行性能与工程适用性。

对3种推进绕组方案的电磁力进行三维解析求解，得到如图7所示的推力曲线。由图7可知，在相同的电流幅值下，3种结构均能实现较为稳定的推力输出，推力波动幅度均控制在10%以内。其中，SSS为单层结构，线圈排布几何不对称，导致推力曲线存在一定波动，最大波动率约为9.39%；相比之下，DFS和DSS采用双层交错布置，几何对称性更优，推力波动得到明显抑制，分别为3.12%和6.95%。在平均推力水平上，DFS的输出最高，达到26.97 kN；SSS次之，为24.53 kN；DSS最低，仅为18.74 kN。由此可见，DFS方案在推力性能和运行平稳性方面均优于其他两种方案，更适用于高加速或启停区段；SSS虽推力波动较大，但具备结构简单和成本低的优势，适合匀速运行区段；DSS存在推力偏低的问题，需结合其他设计优化或冷却措施方能满足工程应用需求。

结合表1所示推进绕组的主要结构参数，本文选择铜导线绕制推进线圈，通过计算轨道两侧各铺设1 km所需铜导线质量，评估轨道建设成本。在不考虑边端效应的前提下，定义单位面积地面推进线圈产生的推力为推力密度，具体分析指标如表2所示。

由表2可知，3种推进绕组在电磁特性和工程适用性方面各具优势：SSS方案的铜线用量最少，仅为



(a) SSS Back-EMF 波形　(b) SSS Back-EMF 频谱

(c) DFS Back-EMF 波形　(d) DFS Back-EMF 频谱

(e) DSS Back-EMF 波形　(f) DSS Back-EMF 频谱

图 6　推进绕组 Back-EMF 波形及频谱

Fig. 6　Back-EMF waveform and spectrum of propulsion winding

表 2　3 种推进绕组主要性能指标对比

Table 2　Comparison of main performance indicators among three propulsion winding options

对比指标	SSS	DFS	DSS
绕组线材	铜线	铜线	铜线
铜线用量/(t·km^{-1})	161.1	184.3	322.2
绕组结构	单层	双层	双层
绕组形状	矩形	跑道形	矩形
Back-EMF 基波幅值/V	1 864.85	1 834.11	1 478.69
Back-EMF 3 次谐波幅值/V	61.76	121.07	45.39
Back-EMF 5 次谐波幅值/V	115.22	54.74	74.63
推力/kN	24.53	26.97	18.74
推力密度/(kN·m^{-2})	6.05	5.98	4.37
推力波动/%	9.39	3.12	6.95

161.1 t/km，显著低于 DFS 和 DSS，材料利用率高、造价低，且矩形单层结构便于加工安装，适合大规模铺设，但推力波动较大，稳定性相对不足；DFS 方案电磁性能最优，平均推力达到 26.97 kN，推力波动仅为 3.12%，运行平稳性突出，但铜耗较大（184.3 t/km），且双层跑道形结构增加了加工与装配复杂度；DSS 方案的推力密度最低，仅为 4.37 kN/m²，且铜线用量最高（322.2 t/km），在成本和性能上均不占优势，但其短距设计有效削弱了 3 次谐波成分，对改善波形质量具有一定价值。

需要指出的是，推进绕组的工程适用性不仅取决于电磁性能与成本，还受其热特性（尤其是温升行为）的制约。过大或不均匀的温升可能导致线圈局部过热、

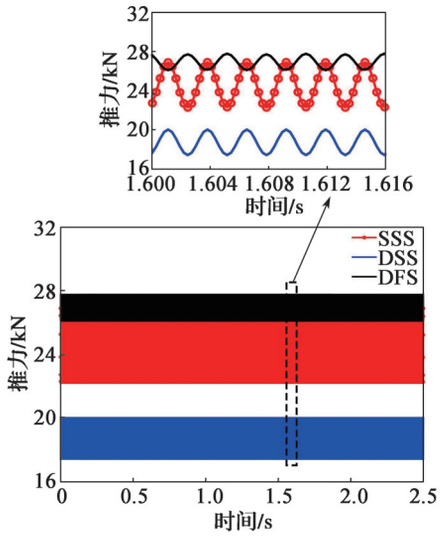


图 7　推力对比

Fig. 7　Thrust comparison

绝缘老化，进而降低运行可靠性。因此，在明确超导电动悬浮系统可选绕组方案的基础上，有必要进一步开展瞬态温升与热场分布研究。

3　热场建模与温升特性研究

本文考虑到低真空管道超导电动悬浮系统运行过程中特有的气动与散热问题，建立了三维全域流固耦合热模型，模拟不同气压（0.005 atm，0.01 atm，0.05 atm，0.1 atm，0.5 atm）对绕组表面对流换热性能的影响；采用有限元仿真技术，结合电机电磁场和热场开展联合仿真，模拟超导电动磁悬浮单个悬浮架系统以1 000 km/h通过3种定子绕组轨道时，绕组的温度分布与温升情况。

3.1　推进绕组涡流损耗

与传统直线同步电机不同，真空管道超导电动悬浮系统地面推进绕组采用无铁芯集中绕组形式，运行中影响地面长定子绕组温升的主要因素为推进绕组通电后产生的铜耗。在开敞环境下，通过三维有限元仿真得到3种绕组在1 000 km/h运行条件下铜耗随时间变化的曲线，如图8所示。

由图8可知，3种绕组的铜耗曲线在电周期内均呈现周期性波动，这与交流电流的交变规律及线圈的几何布置直接相关。DFS线圈尺寸最大、匝数最多，平均铜耗最高，约为25.47 kW；SSS铜耗居中，波动幅值较稳定；DSS因内外层匝数最少，平均铜耗最低。需要注意，DFS与DSS曲线的波动幅值相对更明显，说明绕组层间分布对铜耗瞬态特性影响显著。综合比较可见，铜耗水平与线圈匝数及截面积密切相关，匝数多、尺寸大的绕组虽推力性能更优，但发热更为严重。因此，绕组方案选择需结合推力需求与散热能力

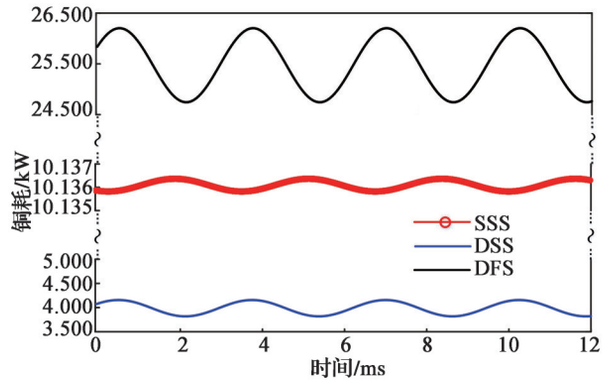


图 8　3种推进绕组铜耗随时间变化曲线

Fig. 8　Time history of copper loss for three propulsion winding options

进行权衡，避免铜耗过大导致温升失控。

3.2　推进绕组温升特性

长定子轨道区段在磁悬浮列车通过时交替接通，分段长度一般为300～2 000 m。低真空管道磁悬浮列车速度等级主要集中于600 km/h及以上，正常运行过程中通过长定子轨道区段的时间不超过12 s，即每次列车通过时相应区段的通电时间不超过12 s。考虑三维有限元仿真效率受网格剖分精度与时间步长影响，本文主要探讨2个电周期内的推进绕组温升特性，且单悬浮架系统仅在一个定子轨道区段内运行，不涉及跨越2个定子区段的过程。绕组与外层环氧树脂之间的传热主要通过热传导实现，模组整体与周围环境之间为对流换热，其余假设条件如下：

①材料的导热系数和对流系数恒定，不受外界温度影响；

②不计热辐射对热传导的影响；

③地面推进绕组初始温度与环境温度一致。

目前，关于真空管道内流场模型的研究表明，管道内的流体状态为连续流。本文的仿真速度设定为1 000 km/h，借助式(3)所示的边界流速与介质音速之比判断管道内空气的可压缩性[39]。

$$Ma = v/c \tag{3}$$

式中：Ma为马赫数；v为流体速度；c为介质中的音速。

通过计算可得，列车以1 000 km/h运行时，Ma=0.817。当$Ma > 0.3$时，管道内空气被视为可压缩气体，满足理想气体的状态方程，如式(4)所示。

$$P = \rho RT \tag{4}$$

式中：P为管道内气压；ρ为气体密度；R为理想气体常数；T为空气温度。

将管道内空气流动确定为三维定常可压缩流动，得出控制方程如式(5)所示。通过求解不同气压和不同温度下的外部流场，可得到绕组表面的对流换热系数。

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{v})=0\\&\rho\frac{\partial\boldsymbol{v}}{\partial t}=-\nabla P-\rho\boldsymbol{v}\cdot\nabla\boldsymbol{v}+\mu\nabla^2\boldsymbol{v}+\boldsymbol{F}\\&\rho c_{\mathrm{p}}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\boldsymbol{v}\cdot\nabla T\right)=k\nabla^2T+q\end{aligned}\right\}\tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{v}$为三维笛卡儿坐标系下的速度矢量；$\boldsymbol{F}$为力矢量；μ为流体的动态黏度；c_{p}为流体的比热容；k为流体的热导率；q为热源单位体积内的热生成率。

本文模拟了管道气体压力分别为0.005 atm、0.01 atm、0.05 atm、0.1 atm、0.5 atm时的管道气体速度场、温度场和压力场，计算得到推进线圈表面对流换热量随温度变化的曲线，具体如图9所示。

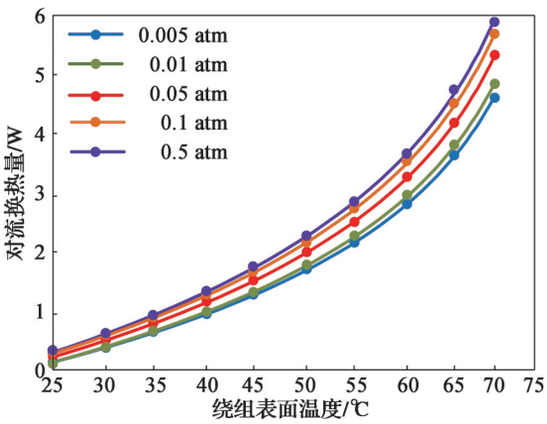


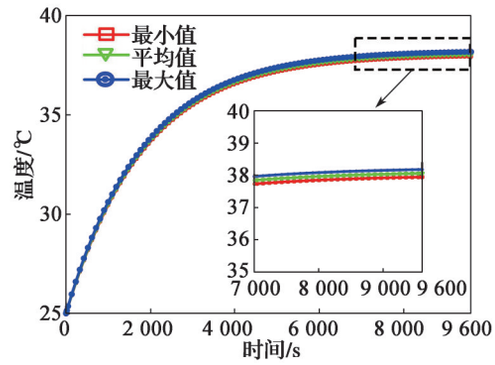
图9　推进绕组表面对流换热量随温度变化曲线

Fig. 9　Convective heat transfer at propulsion winding surface versus temperature

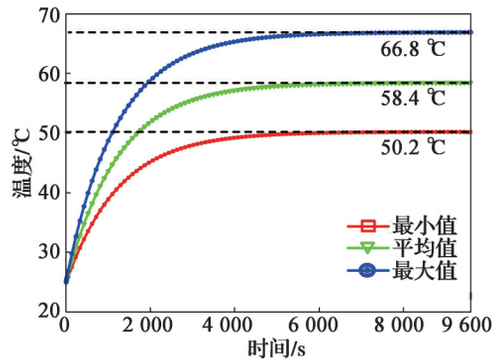
由图9可知，在相同气压下，随着线圈表面温度的升高，温度差驱动的热交换增强，对流换热量逐渐增大；在相同温度下，气压越低，空气分子数密度越小，传热能力越弱，对流换热量显著减小。对比两者的作用程度可见，在低真空区间（0.005 ~ 0.5 atm），温度升高对换热能力的提升更为显著，气压变化的影响次之。这说明在低真空管道环境中，温度主导了换热强度的变化趋势，气压则主要决定换热水平的基准值。工程应用需重点关注绕组运行温度的控制，防止局部温升导致换热能力急剧变化；同时，设计冷却系统时仍需综合考虑管道气压对整体换热环境的约束作用。

在低真空环境中，绕组的散热能力会随自身温度变化动态调整。为进一步揭示该热交换规律对实际运行的影响，本文在典型运行条件下开展绕组温升特性分析，评估不同结构在低真空管道中的热稳定性与可靠性。基于建立的电磁-热耦合仿真数值模型，将初始时刻的管内气体温度与推进线圈表面温度均设为25 ℃，管道气压设为0.05 atm，通过瞬态磁热联合仿真得到悬浮架系统在1 000 km/h运行速度下地面推进绕组瞬态温升变化曲线，具体如图10所示。

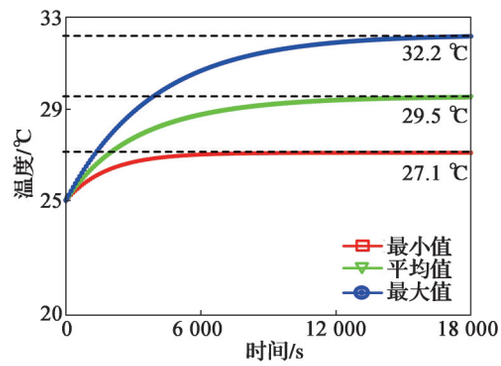
图10(a)中SSS的温升特性曲线（最大值、平均值



(a) SSS



(b) DFS



(c) DSS

图10　推进绕组温度随时间变化曲线

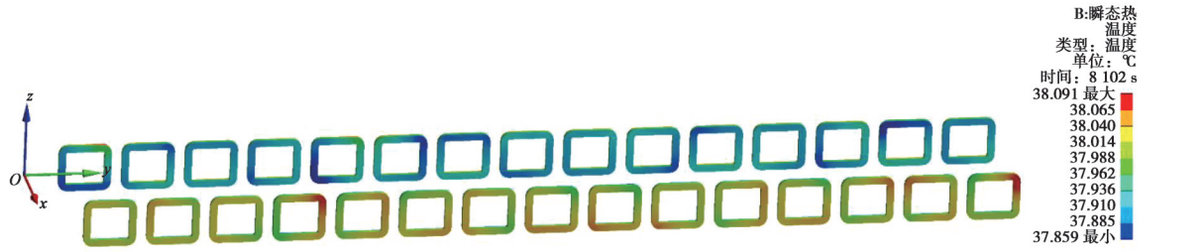
Fig. 10　Time history of propulsion winding temperature

和最小值）基本重合，达到热平衡的时间最短，这是由于单层绕组结构内部温度分布均匀，热传导路径短，无明显热点区，温升曲线陡峭，能快速达到热平衡，适用于长距离匀速运行区段；图10(b)中DFS温升特性曲线在稳定状态下的均值温度最高，主要原因是双层整距结构中，外层线圈靠近轨道板壁面，散热条件受限，导致整体温升曲线上移，且内外层线圈温度差异较大，进一步提高了平均温度；图10(c)中DSS温升特性曲线达到稳定状态所需时间最长，表明该绕组的散热过程存在较强的热惯性，且其内外层匝数较少，单匝电流密度高，局部发热集中，绕组双层短距布置导致局部散热条件不均匀，延缓了热传导过程。综上所述，在相同气压环境下，不同推进绕组结构的散热过程存在显著差异。

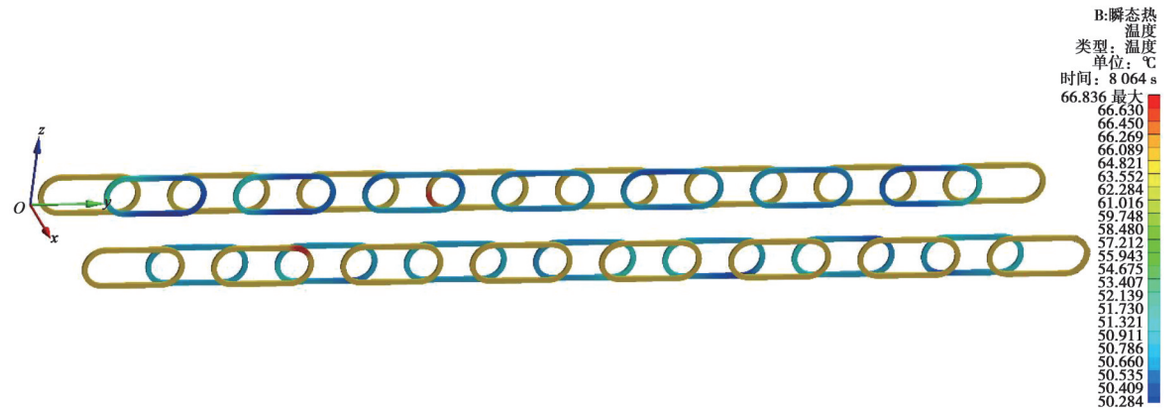
3.3　推进绕组温度分布与均匀性分析

为进一步分析绕组各位置的温度分布情况，求解得到图 11 所示的温度云图。

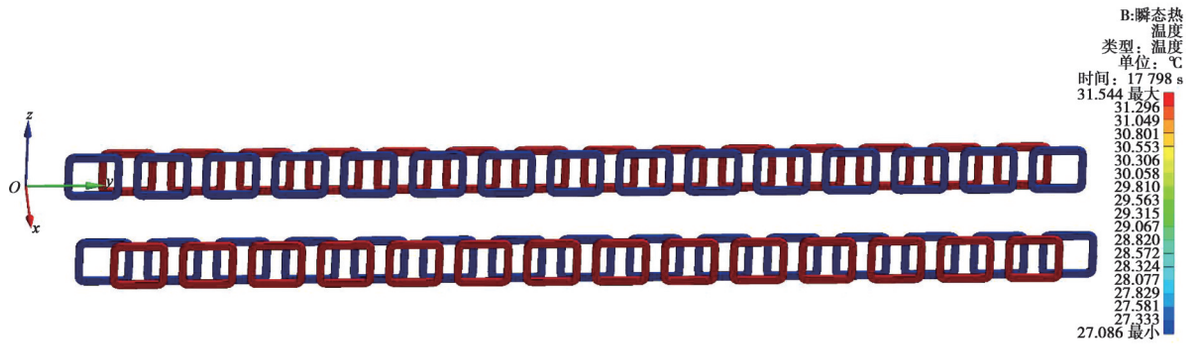
由图 11 可知，SSS 绕组整体温度分布均匀，表明单层结构下导体发热与散热路径简单，局部热点不明显，这一特性不仅降低了线圈材料的热应力风险，而且使其在高频通断工况下具有更好的热稳定性；相比之下，DFS 和 DSS 的线圈分为内外两层，仿真时为贴近真实安装情景，设定靠近轨道侧壁的外层线圈表面无对流换热，但需直接承受电流产生的焦耳热，因此外层线圈成为温度分布的“热点区”，表现为靠近悬浮架的内层线圈温度普遍较低，靠近轨道侧壁的外层线圈温度较高，内外层线圈温差显著。这种温度不均匀性不仅可能引起绕组热膨胀差异，还可能对绝缘层和浸渍材料产生附加载荷，进而影响绕组使用寿命。



(a) SSS



(b) DFS



(c) DSS

图 11　推进绕组温度云图

Fig. 11　Contour plot of propulsion winding temperature

此外，温度云图与图 10 的瞬态温升曲线结果一致，进一步验证了模型的正确性。从工程角度看，温度分布不均匀意味着存在局部过热风险，尤其在连续运行和长时间载流场景下。对于 DFS 与 DSS 绕组，可考虑以下优化措施：在靠近轨道壁的外层线圈增设冷却通道或导热填充材料，提高局部散热能力；优化绕组布局中的内外层匝比，降低外层电流密度；采用高导热树脂或金属基复合材料改善热传导路径，缓解内外层温差。

综上所述，研究团队通过温度云图分析不仅揭示了 3 种绕组结构在热分布上的显著差异，也为后续推进绕组结构改进与冷却系统设计提供了直接参考。

4　结论

为探究适用于管道磁浮系统的超导电动悬浮系统

地面长定子推进绕组结构形式，本文针对低真空管道高速磁浮系统，建立了3种地面长定子推进绕组（SSS，DFS，DSS）的电磁-热联合模型，系统分析了其电磁性能与瞬态温升特性，并结合工程应用因素进行对比评估，得出以下结论：

①SSS方案相比DFS方案线圈端部更短，制造与装配简便，铜耗较低，整体温度分布均匀，适合布置于列车启动后的匀速运行区段，可在无额外冷却条件下长期工作，但其推力波动相对较大。

②DFS方案的推力性能优于SSS方案和DSS方案，运行平稳，但温度分布不均匀，外层线圈易出现热点，适用于启停区段，同时需配合强制冷却或定点冷却措施，以保障热稳定性。

当前研究尚处于初步阶段，本文旨在探讨电动制式低真空磁浮系统绕组方案的可行性。为推动低真空管道磁浮系统工程化应用，后续研究将以超导电动悬浮3车4架编组为研究对象，借助自编程实现连续仿真，开展相邻2次通流间隔时间下推进绕组的温升特性分析；同时，开展特定推进绕组结构下的电磁-热-力多物理场耦合计算，深入分析推进绕组特性，设计高效的冷却系统以确保绕组在高温下的运行稳定性，优化动力系统的效率与可靠性。

参考文献：

[1] 沈志云. 关于我国发展真空管道高速交通的思考[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(2): 133-137.
SHEN Zhiyun. On developing high-speed evacuated tube transportation in China[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2005, 40(2): 133-137.

[2] 邓自刚, 张勇, 王博, 等. 真空管道运输系统发展现状及展望[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 1063-1072.
DENG Zigang, ZHANG Yong, WANG Bo, et al. Present situation and prospect of evacuated tube transportation system [J]. Journal of southwest jiaotong university, 2019, 54(5): 1063-1072.

[3] GODDARD R H. Apparatus for vacuum tube transportation: US2488287[P]. 1945-10-06.

[4] DENG Z G, ZHANG W H, ZHENG J, et al. A high-temperature superconducting maglev ring test line developed in Chengdu, China[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2016, 26(6): 3602408.

[5] DENG Z G, ZHANG W H, ZHENG J, et al. A high-temperature superconducting maglev-evacuated tube transport (HTS Maglev-ETT) test system[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2017, 27(6): 3602008.

[6] 贾晓龙. 全尺寸超导电动悬浮试验成功[EB/OL]. (2024-11-14) [2025-12-17]. http://dt. wenming. cn/zthd/202402/t20240202_8418973.shtml.
JIA Xiaolong. Full-scale superconducting electrodynamic-suspension successfully tested[EB/OL]. (2024-11-14) [2025-12-17]. http://dt. wenming. cn/zthd/202402/t20240202_8418973.shtml.

[7] 中铁二十三局轨道交通工程公司. 多态耦合轨道交通动模试验平台项目封顶[EB/OL]. (2024-01-30) [2025-12-17]. http://maglev-pt. org. cn/index. php? m=home&c=View&a=index&aid=378.
China Railway 23rd Bureau Group Rail Transit Engineering Company. The topping-out ceremony of the multi-state coupled rail transit dynamic model test platform project has been held[EB/OL]. (2024-01-30) [2025-12-17]. http://maglev-pt. org. cn/index. php? m=home&c=View&a=index&aid=378.

[8] 侯自豪, 毛凯, 朱雨建, 等. 低真空管道列车关键气动问题研究进展[J]. 空气动力学学报, 2024, 42(2): 1-20.
HOU Zihao, MAO Kai, ZHU Yujian, et al. Progresses in key aerodynamic problems of low-vacuum tube trains[J]. Acta aerodynamica sinica, 2024, 42(2): 1-20.

[9] 刘加利, 张继业, 张卫华. 真空管道高速列车气动特性分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 137-143.
LIU Jiali, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Analysis of aerodynamic characteristics of high-speed trains in the evacuated tube[J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49 (22): 137-143.

[10] 黄尊地, 梁习锋, 常宁. 真空管道交通列车气动阻力数值分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 165-172.
HUANG Zundi, LIANG Xifeng, CHANG Ning. Numerical analysis of train aerodynamic drag of vacuum tube traffic [J]. Journal of mechanical engineering, 2019, 55(8): 165-172.

[11] 张晓涵, 李田, 张继业, 等. 亚音速真空管道列车气动壅塞及激波现象[J]. 机械工程学报, 2021, 57(4): 182-190.
ZHANG Xiaohan, LI Tian, ZHANG Jiye, et al. Aerodynamic choked flow and shock wave phenomena of subsonic evacuated tube train[J]. Journal of mechanical engineering, 2021, 57(4): 182-190.

[12] 胡啸, 邓自刚, 张银龙, 等. 真空管道磁浮交通管内波系时空分布特征[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(6): 146-154.
HU Xiao, DENG Zigang, ZHANG Yinlong, et al. Characteristics of spatial and temporal distribution of wave system in evacuated tube maglev transportation[J]. Acta aerodynamica sinica, 2022, 40(6): 146-154.

[13] 陈雨成, 秦斌, 梁习锋. 真空管道磁悬浮列车气动特性及激波效应三维研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 412-422.
CHEN Yucheng, QIN Bin, LIANG Xifeng. Three-dimensional study on aerodynamics characteristics and shock wave effects of the vacuum tube train[J]. Journal of railway science and engineering, 2023, 20(2): 412-422.

[14] 宋嘉源, 李田, 张继业. 真空管道列车动态运行气动特性研究[J]. 实验流体力学, 2023, 37(1): 64-71.
SONG Jiayuan, LI Tian, ZHANG Jiye. Research on aerody-

namic characteristics of evacuated tube train in dynamic operation[J]. Journal of experiments in fluid mechanics, 2023, 37(1): 64-71.

[15] 周鹏, 李田, 张继业, 等. 真空管道超级列车气动热效应[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 190-199.
ZHOU Peng, LI Tian, ZHANG Jiye, et al. Aerothermal effect generated by hyper train in the evacuated tube[J]. Journal of mechanical engineering, 2020, 56(8): 190-199.

[16] 张俊博, 李红梅, 王俊彪, 等. 低真空管道磁悬浮列车温度场数值计算[J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(5): 450-458.
ZHANG Junbo, LI Hongmei, WANG Junbiao, et al. Numerical analysis of the temperature field of vacuum tube maglev train[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2021, 41(5): 450-458.

[17] 宋嘉源, 李田, 张晓涵, 等. 亚声速真空管道磁浮系统气动热特性研究[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(2): 115-121.
SONG Jiayuan, LI Tian, ZHANG Xiaohan, et al. Research on aerodynamic and thermal characteristics of subsonic evacuated tube maglev system[J]. Acta aerodynamica sinica, 2022, 40(2): 115-121.

[18] 张卫华, 邓自刚, 毕海权, 等. 低真空超高速轨道交通研究进展与思考[J]. 机车电传动, 2025(1): 1-13.
ZHANG Weihua, DENG Zigang, BI Haiquan, et al. Research review and reflections on ultra-high-speed rail transit in low-vacuum environments[J]. Electric drive for locomotives, 2025(1): 1-13.

[19] 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.

[20] 郑清华, 倪菲. 高速磁浮交通: 从德国到中国[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 31-39.
ZHENG Qinghua, NI Fei. High-speed maglev transportation: from Germany to China[J]. Science and technology foresight, 2023, 2(4): 31-39.

[21] 龙志强, 窦峰山, 王志强, 等. 高速磁浮悬浮导向控制技术现状及展望[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 78-88.
LONG Zhiqiang, DOU Fengshan, WANG Zhiqiang, et al. Current status and prospects of high-speed maglev suspension and guidance control technology[J]. Science and technology foresight, 2023, 2(4): 78-88.

[22] 于青松, 李凯, 胡浩, 等. 超导电动悬浮应用研究与技术展望[J]. 机车电传动, 2023(4): 1-8.
YU Qingsong, LI Kai, HU Hao, et al. Research and technological prospects of applications for superconducting electrodynamic suspension[J]. Electric drive for locomotives, 2023(4): 1-8.

[23] 林琳. 日本磁悬浮铁路地面线圈[J]. 国外铁道车辆, 2019, 56(4): 27-30.
LIN Lin. Ground coil for maglev railway in Japan[J]. Foreign rolling stock, 2019, 56(4): 27-30.

[24] FUJIWARA S, FUJIMOTO T. Characteristics of combined levitation and guidance EDS maglev system[J]. Electrical engineering in Japan, 1993, 113(3): 123-134.

[25] HE J L, ROTE D M, COFFEY H T. Applications of the dynamic circuit theory to maglev suspension systems[J]. IEEE transactions on magnetics, 1993, 29(6): 4153-4164.

[26] LYU G, LIU Y Q, ZHOU T, et al. Analysis of suspension and guidance system of EDS maglev based on a novel magnetomotive force model[J]. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 2022, 10(3): 2923-2933.

[27] SONG M X, ZHOU D F, YU P C, et al. Analytical calculation and experimental verification of superconducting electrodynamic suspension system using null-flux ground coils [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(9): 14978-14989.

[28] SU Z H, LUO J, MA G T, et al. Fast and precise calculation of mutual inductance for electrodynamic suspension: methodology and validation[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2022, 69(6): 6046-6057.

[29] 龚天勇, 马光同, 罗俊, 等. 行波磁场中高温超导电动悬浮磁体的热性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 415-424.
GONG Tianyong, MA Guangtong, LUO Jun, et al. Study on the thermal performance of high-temperature superconducting electrodynamic suspension magnet subjected to travelling magnetic fields[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43 (1): 415-424.

[30] ROTE D M, CAI Y G. Review of dynamic stability of repulsive-force maglev suspension systems[J]. IEEE transactions on magnetics, 2002, 38(2): 1383-1390.

[31] 胡道宇, 冯馨月, 马逊, 等. 基于场-路-运动耦合模型的超导电动悬浮系统垂向振动抑制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3972-3985.
HU Daoyu, FENG Xinyue, MA Xun, et al. Vertical vibration suppression methods of superconducting electrodynamic suspension system with a field-circuit-motion model[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3972-3985.

[32] HUANG H, DENG Z G, LI H T, et al. Numerical simulation of dynamic electromagnetic characteristics of superconducting electrodynamic suspension (EDS) train[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2021, 31(5): 3601105.

[33] 陈文庆, 毕海权, 周远龙. 真空管道内直线电机定子温度分布与散热特性研究[J]. 制冷与空调(四川), 2024, 38(3): 293-298.
CHEN Wenqing, BI Haiquan, ZHOU Yuanlong. Study on temperature distribution and heat dissipation characteristics of stator of the linear motor in vacuum tube[J]. Refrigeration & air conditioning, 2024, 38(3): 293-298.

[34] 秦伟, 马育华, 吕刚, 等. 一种可用于低真空管道的高温超导无铁心直线感应磁悬浮电机[J]. 电工技术学报, 2022, 37(16): 4038-4046.
QIN Wei, MA Yuhua, LYU Gang, et al. Analyzing and designing a novel coreless linear induction maglev motor for low vacuum pipeline[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2022, 37(16): 4038-4046.

[35] LI H D, ZHU H L, HUANG H, et al. A new suppression strategy of pitching vibration based on the magnetic-electric-mechanical coupling dynamic model for superconducting EDS transport system[J]. Mechanical systems and signal processing, 2023, 188: 110039.

[36] LI H D, ZHENG J, HUANG H, et al. A partition-computing mechatronics dynamics modeling for superconducting electrodynamic suspension and the analysis on the discrete-track irregularity[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2025, 11(1): 1901-1914.

[37] ZHU H L, ZHENG J, FU S Q, et al. Numerical mutual inductance model based on spatial Fourier decomposition for racetrack coils in EDS system[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2024, 39(4): 2387-2400.

[38] HUANG H, LI H T, COOMBS T, et al. Advancements in dynamic characteristics analysis of superconducting electrodynamic suspension systems: modeling, experiment, and optimization[J]. Superconductivity, 2024, 11: 100114.

[39] KUNDN P K, COHEN I M, DOWLING D R. Fluid mechanics[M]. Waltham, MA: Academic Press, 2012.

Analysis of magneto-thermal characteristics for ground propulsion windings in low evacuated-tube electrodynamic suspension systems

ZHANG Peng[1], LI Mingming[2], LI Zhiping[3], ZHENG Jun[3]

(1. China Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China;
2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China;
3. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The low evacuated-tube maglev systems feature high operating speeds, enclosed operating environments, and zero pollution emissions. In China, research on winding solutions for low evacuated-tube electrodynamic suspension (EDS) systems remains at the fundamental theory and experimental stages. This paper comprehensively analyzes and evaluates electromagnetic and temperature rise characteristics of three propulsion winding designs for superconducting EDS (SC-EDS), taking into account low vacuum operating environments unique to tube maglev systems. To address challenges faced by the electrical systems in tube maglev environments characterized by thin air and poor thermal fields, three-dimensional electromagnetic coupling numerical calculation models, three-dimensional electromagnetic finite element models, and three-dimensional global fluid-structure coupling thermal models were established for these ground propulsion winding options. These models were then used for comparative electromagnetic performance analysis and for transient magneto-thermal co-simulations. Specifically, the influence of low vacuum operating environments on convective heat transfer at the winding surface were analyzed through simulations for in-tube pressures of 0.005 atm (506.625 Pa), 0.01 atm (1 013.25 Pa), 0.05 atm (5 066.25 Pa), 0.1 atm (10 132.5 Pa), and 0.5 atm (50 662.5 Pa), and temperature field distribution patterns were analyzed for the three propulsion winding options. After a comprehensive assessment of the above factors, a propulsion coil configuration is recommended for future engineering applications, which combines single-layer short-pitch and double-layer full-pitch arrangements. The research results not only provide a design reference for windings in low evacuated-tube EDS systems but also offer a feasible multi-physics modeling method for linear motors in low vacuum environments.

Keywords: tube maglev; superconducting electrodynamic suspension; propulsion winding; electromagnetic characteristics; fluid-structure coupling; temperature rise characteristics

收稿日期：2025-03-17；修回日期：2026-02-01
责任编辑：白　云