DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.03.010
文章编号：1000-128X(2023)03-0084-06

中低速磁浮列车防冰雪技术研究及应用

吴志会，佟来生，罗华军，高　锋，王家恒
（中车株洲电力机车有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：中低速磁浮列车目前主要采用高架运行方式，由于车辆悬浮架、轨道结构型式与传统轮轨系统完全不同，当列车在高架线路运行时，冰雪天气对列车的影响较大。文章通过调研分析中低速磁浮列车实际冰雪运行情况，开展列车冰雪运行工况仿真的数值建模，分析了侧风、车速与轨道型式等因素对列车冰雪堆积的影响，针对现有车辆与轨道结构型式组合而成的4种应用场景，开展了对比分析，提出具体优化建议，最后根据实际应用情况与分析结果，提出了工程化应用方案和相关设计要点。分析所得结论对中低速磁浮列车防冰雪技术认知提升和工程化应用具有很好的指导意义。

关键词：中低速磁浮；防冰雪；侧风；数值模拟
中图分类号：U237；U216.41+2　　**文献标识码：**A

Research and application of anti-icing technology for medium and low speed maglev trains

WU Zhihui, TONG Laisheng, LUO Huajun, GAO Feng, WANG Jiaheng

(CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Medium-low speed maglev trains typically operate in elevated mode and have unique suspension systems and track structures that are different from traditional wheel-rail systems. As a result, these trains are more susceptible to the impacts of snowy and icy weather when running on elevated tracks. The article conducted research and analysis on the actual operation of medium-low speed maglev trains in icy and snowy conditions. A numerical model was developed to simulate the train's operating conditions in these weather conditions, and factors such as crosswind, speed, and track type were analyzed for their impact on ice and snow accumulation on the train. Four application scenarios based on existing vehicle and track structure combinations were compared and analyzed, and specific optimization suggestions were proposed. Finally, based on the actual application conditions and analysis results, engineering application plans and related design points were presented. The conclusions drawn from the analysis had significant guiding significance for improving understanding of anti-icing technology for medium-low speed maglev trains and its engineering application.

Keywords: medium-low speed maglev; anti-icing; crosswind; numerical simulation

0　引言

中低速磁浮列车具有绿色环保、安全舒适、振动小、噪声低等技术优势，目前已在北京、长沙和凤凰等地开通了运营线路。中低速磁浮作为地铁、轻轨或市域列车的补充形式，体现了轨道交通的制式多样性与技术先进性，已成为新型轨道交通的典型代表，同时其绿色、低噪、选线灵活等技术优势，还可以应用于旅游景区、科技园区等。目前，中低速磁浮线路采用地面路基或高架等形式，当磁浮列车在高架线路全天候运行时，对列车的设计要求更高，其中冰雪天气

基金项目：磁浮交通车辆系统集成湖南省重点实验室项目（2018TP1035）；中车株洲电力机车有限公司科技研发项目（2020KJ40）
通信作者：吴志会（1986—），男，硕士，高级工程师，目前从事磁浮车辆研发工作；E-mail: wzh2750@163.com
引用格式：吴志会, 佟来生, 罗华军, 等. 中低速磁浮列车防冰雪技术研究及应用[J]. 机车电传动, 2023(3): 84-89.
Citation：WU Zhihui, TONG Laisheng, LUO Huajun, et al. Research and application of anti-icing technology for medium and low speed maglev trains [J]. Electric Drive for Locomotives,2023(3): 84-89.

对列车运行的考验尤为严苛。

中低速磁浮列车在正常行驶过程中始终与轨道之间保持约 8 mm 的悬浮间隙和 13 mm 的直线电机间隙，从而实现无摩擦的抱轨运行[1]，但在冰雪天气，轨面上的积雪厚度会超过 200 mm，并且在列车运行过程中，车辆底架部分积雪也十分严重，严重时可能会导致悬浮间隙或直线电机间隙出现问题，引起机械卡滞、设备风机堵转等现象，使得列车无法正常运行，因此磁浮列车的防冰雪设计显得尤为重要。中低速磁浮列车的走行机构、线路轨道型式与传统轮轨车辆完全不同，当在冰雪天气运行时，磁浮车辆的底架积雪情况也不同于传统的轮轨车辆，积雪对行车安全的影响也有所不同。目前，国内对列车的防冰雪技术研究主要聚焦于轮轨车辆，尤其是高速列车转向架区域的积雪情况分析[2-6]，做了较多的数值仿真计算和实验室模拟，也包括关于高速列车在冰雪天气运行安全控制措施的研究分析[7]。

本文首先通过对中低速磁浮列车冰雪运行情况开展调研分析，再根据实际的应用工况，对列车的积雪情况进行数值仿真，分析在不同线路形式、不同梁型、不同风速与车速等条件下磁浮列车的积雪特征，结合车辆日常维护检修的工作需求，针对性地开展磁浮列车防冰雪工程化设计，提升磁浮列车冰雪天气运行的适应性能。

1　中低速磁浮列车积雪情况分析

中低速磁浮线路主要采用高架或地面路基的路线形式，冰雪天气对车辆运营的考验极大。列车在冰雪天气运行时，雪粒子在来流和侧风的作用下容易被气流卷入列车底部，从而在底架各部件和悬浮架表面形成黏附和堆积。同时，在电磁铁、直线电机等发热部件和气流的作用下，部分雪粒子或积雪融化后形成的细水流将重新运动，并在已有的积雪表面冻结成冰，由此形成严重的冰雪堆积效应。

1.1　车头及车端连接部积雪情况

图 1 为磁浮列车车头下部积雪照。由图 1 可见，车头的积雪情况严重，这是由于车头是迎风面，端部悬浮架扫石器承担了清扫轨面积雪的任务，整体被冰雪所包裹，同样电磁铁端部与悬浮架中部的积雪也十分严重。若冰雪导致电磁铁与“F”轨之间的悬浮间隙（8 mm）和直线电机间隙（13 mm）出现问题，将会导致机械卡滞，使得列车无法正常悬浮，情况严重甚至会影响列车的行车安全。因此，车头下部是磁浮列车防冰雪设计需重点考虑的区域。

磁浮列车车辆端部（2 节车连接处）的积雪情况通常也比较严重，如图 2 所示。但由于车端跨接线缆、半永久车钩、贯通道、车端减振器等部件积雪不影响列车的正常工作，只需考虑对车尾端部电磁铁做好防护即可。



图 1　车头下部积雪情况

Fig. 1　Snow accumulation under the front of the vehicle



图 2　车端连接处积雪情况

Fig. 2　Snow accumulation at the connection between vehicle ends

1.2　车辆侧面积雪情况

磁浮列车车辆底架侧面的悬浮架托臂、直线电机上表面、纵梁、牵引杆位置的积雪情况往往也很严重，同时底架边梁悬挂设备表面也容易积存大量冰雪，如图 3 所示。底架悬挂设备被积雪包裹，容易导致设备的散热风机出现堵转等现象，从而影响列车的正常工作。故需要考虑对列车底架侧面进行整体的防冰雪设计，防止积雪对底架设备、电磁铁和直线电机间隙造成影响。



图 3　车辆侧面悬浮架区域积雪情况

Fig. 3　Snow accumulation in the levitation area on the side of vehicle

2 积雪特性仿真数值模型

本文建立基于临界捕获角度和临界剪切风速的雪粒捕获模型，用于处理雪粒与壁面间的碰撞动力学行为及计算壁面积雪量，采用离散相模型（Discrete Phase Model, DPM）对中低速磁浮列车车底各区域的风雪两相流场进行数值模拟，分析悬浮架及相关车底部件的雪粒沉积特性，并基于此进行具有针对性的冰雪防护方案设计。

本文采用气固两相耦合模型对列车的积雪进行流体动力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）计算[2]。其中，雪粒子的运动轨迹采用DPM方法求解，该模型中流体的运动采用连续介质的Navier-Stokes方程进行描述；颗粒的运动则基于拉格朗日方法分析每个雪粒子的运动轨迹，并对其进行追踪描述；雪粒子速度和位移的更新决定于其与邻近颗粒的碰撞动力学及气动力学。

假设雪粒子为球体，不考虑雪粒间碰撞的影响，雪粒的力平衡方程为

$$\frac{\mathrm{d}u_\mathrm{P}}{\mathrm{d}t}=F_\mathrm{D}(u-u_\mathrm{P})+\frac{g(\rho_\mathrm{P}-\rho)}{\rho_\mathrm{P}}+F \tag{1}$$

式中：$F_\mathrm{D}(u-u_\mathrm{P})$为雪粒子受到的拖拽力；$F_\mathrm{D}$为雪粒子松弛时间的倒数；$u$为空气速度；$u_\mathrm{P}$为雪粒速度；$g$为重力加速度；$\rho_\mathrm{P}$为雪粒子的密度；$\rho$为空气密度；$F$为其他作用在雪粒子的力。

雪粒子松弛时间的倒数为：

$$F_\mathrm{D}=\frac{18\mu}{\rho_\mathrm{P}d_\mathrm{p}^2}\frac{C_\mathrm{D}Re}{24} \tag{2}$$

$$Re=\frac{\rho d_\mathrm{p}\left|u_\mathrm{p}-u\right|}{\mu} \tag{3}$$

$$C_\mathrm{D}=a_1+\frac{a_2}{Re}+\frac{a_3}{Re^2} \tag{4}$$

式中：μ为空气流体动力黏度；d_p为雪粒子的直径；C_D为阻力系数；Re为雪粒子雷诺数；a_1、a_2和a_3为与雪粒子雷诺数Re范围有关的常数。

本文主要研究雪粒子在列车底部悬浮架及其相关部件区域的悬移运动，以及雪粒子与各壁面的撞击动力学行为。由于数值模拟采用风洞方式，以列车为参照系，实际运行时离开积雪路面的雪粒速度相对于列车的运动速度较小，雪粒子相对于列车的运动速度接近车速，故在进行数值计算时，沿车底前方和车底侧方的垂向喷射面分别向列车底部区域喷射初始雪粒子，以此研究雪粒子在来流和侧风的作用在车底各部件表面经历碰撞、反弹和附着等动力学行为[2]。

图4所示为雪粒子喷射释放的平面示意图，其中雪粒子释放的流量主要参考我国的降雪标准：$\frac{4.9\ \mathrm{mm}}{24\ \mathrm{h}}$（中雪）和$\frac{9.9\ \mathrm{mm}}{24\ \mathrm{h}}$（大雪），雪粒子直径为480 μm，雪粒子密度为366 kg/m^3。

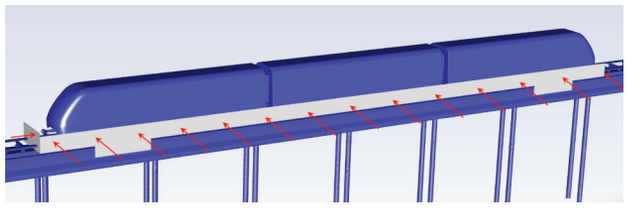
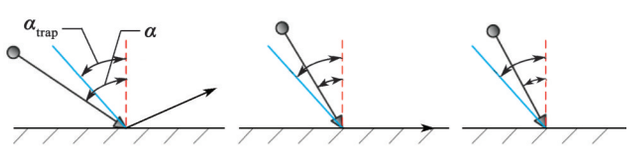


图4 雪粒子释放示意图

Fig. 4 Schematic diagram of snowflake release

雪粒子在壁面上是否黏附取决于雪粒子的反弹能力和壁面的吸附能力。参考国内外以往的列车积雪试验和计算研究成果，建立基于临界捕获角度和临界摩擦风速的雪粒子沉积模型[2, 8]，当雪粒子的碰撞角度α_p小于临界捕获角α_trap时，雪粒子粘附于表面，否则发生反弹；若雪粒子撞击面处的摩擦风速u_*大于临界摩擦风速u_{*_t}，则雪粒子不会发生稳定沉积，粒子会剥离，雪粒子与壁面碰撞示意如图5所示。参考国外的研究成果[8-9]，本文取临界捕获角α_trap为π/4 rad，壁面的摩擦风速u_*≤0.21 m/s，雪粒子将被壁面捕获，即雪粒子将沉积粘附于壁面；否则，雪粒子发生反弹。当雪粒子发生反弹时，其法向和切向的动量恢复系数分别取0.01和0.20。



(a)反弹 (b)粘附-剪切 (c)粘附

图5 雪粒子与壁面碰撞示意图

Fig. 5 Schematic diagram of contact between snowflake and wall surface

3 计算结果与分析

3.1 积雪分布典型特征

计算磁浮列车在20 m/s侧风条件下，以100 km/h的速度通过高度为10 m的桥梁。根据计算结果分析可知，列车悬浮架区域积雪较为严重，其积雪量占车底各部件积雪总量的65%以上；同时，悬浮架滑台支撑部位和受流器侧面也有明显的雪粒堆积现象，是典型的车底区域积雪，具体如图6所示。相比于侧风迎风侧，侧风背风侧车底各部件的积雪程度则明显减弱。比较各车悬浮架区域的积雪情况可以发现，中间车悬浮架区域积雪相对严重，这主要由于在来流和侧风的综合作用下，中间车底部区域的气流相对较强，车底气流如图7所示。

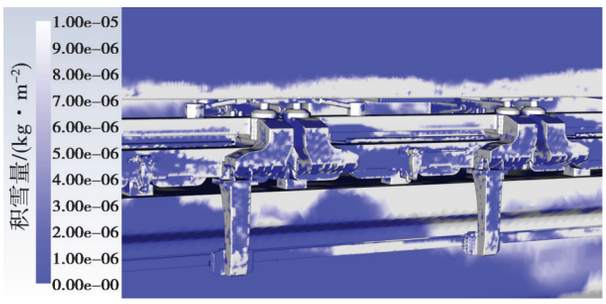


图6　悬浮架区域积雪典型图

Fig. 6　Typical diagram of snow accumulation in levitation area

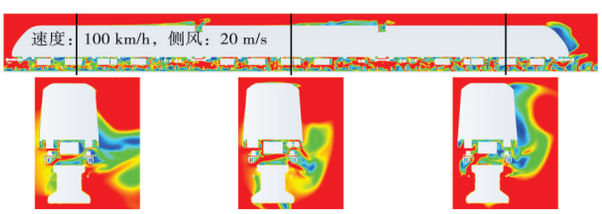


图7　车底气流横向切片图

Fig. 7　Cross sectional view of airflow under carbody

3.2　车速对列车积雪的影响

图8展示了不同降雪量[中雪（$\frac{4.9\ \text{mm}}{24\ \text{h}}$）与大雪（$\frac{9.9\ \text{mm}}{24\ \text{h}}$）]和不同侧风[10 m/s（s10）与20 m/s（s20）]条件下，列车悬浮架区域的积雪量随车速的变化趋势。由图8可知，当侧风较大时，列车悬浮架区域的积雪量随着车速的增加而增大，并且悬浮架区域总体积雪量偏多；当侧风较小时，积雪量则随着车速的增大而趋于缓慢减小，并且悬浮架区域总体积雪量偏小。综上所述，列车悬浮架区域的积雪量受车速和侧风交互耦合作用的影响，但侧风的影响占主导因素，车速对积雪量的影响相对偏小，并且在侧风较小时，车速对积雪量影响甚至呈现缓慢递减的趋势。

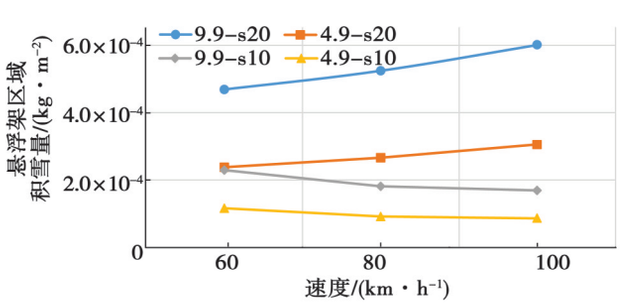


图8　悬浮架区域积雪量随车速的变化趋势

Fig. 8　Variation trend of snow accumulation in the levitation area with vehicle speed

3.3　侧风对列车积雪的影响

为了更加直观地分析侧风对列车悬浮架区域积雪的影响，图9以侧风风速为横坐标，描绘了在不同降雪量和车速条件下车底悬浮架区域的积雪量随侧风的变化趋势。由图9可知，列车悬浮架区域的积雪量随着侧风的增大而显著增加，同时随着车速和降雪量的增大，积雪量的斜率随着侧风增加也明显增大，这说明侧风、车速和降雪量三者间具有正向的交互作用，即侧风、车速和降雪量的增大将显著影响列车底部区域的积雪状况。此外，不同车速下积雪随侧风增长的曲线相交明显，由此进一步表明侧风与车速之间具有较强的交互耦合作用。

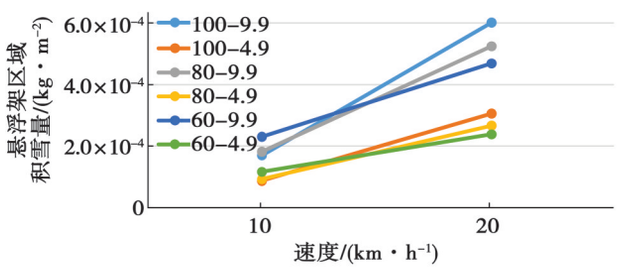


图9　悬浮架区域积雪量随侧风的变化趋势

Fig. 9　Variation trend of snow accumulation in the levitation area with crosswind

3.4　路基和桥梁对列车积雪的影响

中低速磁浮线路目前主要以路基段和桥梁为主，本节主要分析3 m高的路基和10 m高的桥梁对列车积雪特性的影响，图10为磁浮列车在大雪（$\frac{9.9\ \text{mm}}{24\ \text{h}}$）和侧风风速20 m/s的条件下，列车以60 km/h与100 km/h速度在不同路段运行时悬浮架区域的积雪量变化趋势。由图10可知，相对于路基段，列车在10 m高的桥梁上运行时积雪量普遍增大，这主要由于路基段对侧风产生的堵塞效应在一定程度上削弱了列车底部的气流强度，由此减弱了车底部件的积雪效应；同时，在10 m高的桥梁路况下，积雪量将随车速的增加而增大，而在路基段，不同车速对列车积雪量的影响相对较小。

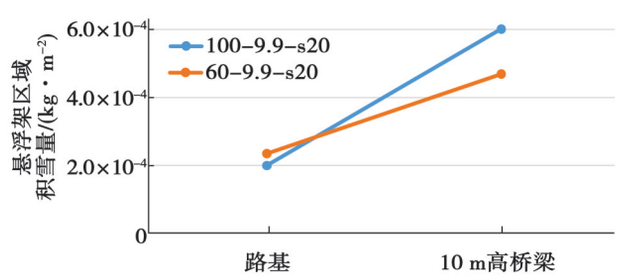


图10　悬浮架区域积雪量随路况的变化趋势

Fig. 10　Variation trend of snow accumulation in the levitation area with line condition

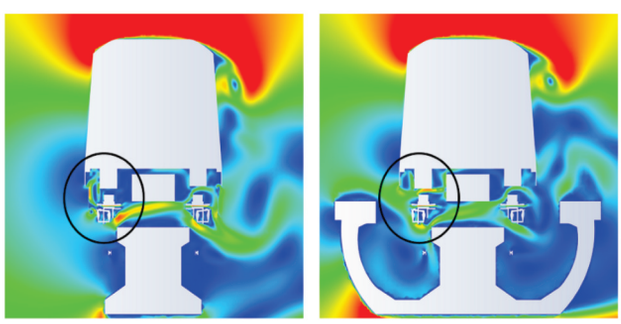
4　优化设计及应用

根据实际运行积雪情况和前文的仿真分析结果，列车积雪主要集中于车底悬浮架区域，防冰雪设计首先需考虑在冰雪天气时对车底侧向气流进行有效的扰流和阻隔，诱导侧向气流往车体上方和轨道路基方向流动，防止悬浮架电磁铁、直线电机与底架悬挂设备

等关键部位遭受严重的雪粒子冲击和堆积，进而在侧风大雪等恶劣气候条件下对悬浮架区域进行有效的冰雪防护。

4.1 优化设计对比分析

本节主要从现有车辆方案和优化设计后增加裙板的方案，并结合目前磁浮线路的简支梁与“U” 型梁2种典型轨道梁型结构，综合对比分析各方案的防冰雪效果，即现有方案（无裙板结构）、增加裙板方案、“U” 型梁无裙板方案与“裙板+‘U’型梁”方案这4种方案。图11为4种方案的车底（圈内区域）流速分布对比。通过分析可以发现：现有方案的车辆底部流场强度最高，冰雪对车底部件和悬浮架的冲击最大；“裙板+‘U’型梁”方案可充分诱导“U”型梁内测的下吸气流向悬浮架下方运动，全面减弱气流对于悬浮架与车体底部区域的冲击，弱化悬浮架及其车底各部件的整体积雪效应。



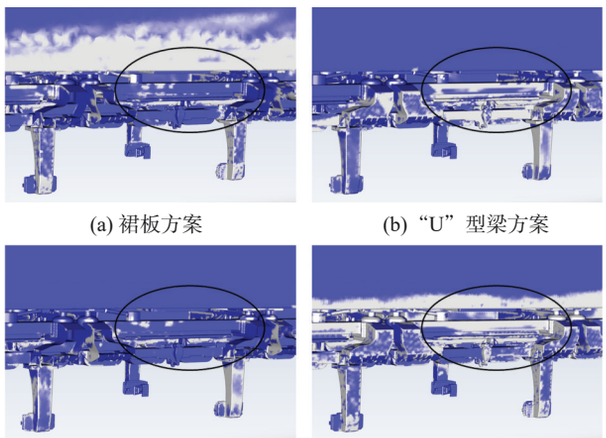
(a) 裙板方案 (b) “U” 型梁方案

(c) 裙板+“U” 型梁方案 (d) 现有方案

图11 四种方案车底流速分布对比

Fig. 11 Comparison of underbody flow velocity distribution in four scenarios

图12为4种方案的积雪分布云图。通过对比悬浮架区域（圈内区域）的积雪可以看出：现有方案积雪最严重；“U” 型梁方案对悬浮架上部区域积雪有改善，但总体效果改善不明显；现有方案增加裙板后，悬浮架区域积雪明显变少；“裙板+‘U’型梁”方案可充分集成裙板和“U” 型梁方案的积雪防护优势，使悬浮架及其上部区域的积雪状况得到全面的改善。因此，4种方案中的“裙板+‘U’型梁”方案的冰雪防护效果最佳。



(a) 裙板方案 (b) “U” 型梁方案

(c) 裙板+“U” 型梁方案 (d) 现有方案

图12 4种方案的积雪分布云图对比

Fig. 12 Comparison of nephogram of snow accumulation distribution for four scenarios

4.2 工程化应用

根据现有磁浮列车在冰雪天气运行的实际积雪情况与前文的仿真分析结果可知，最直接有效的方法是在悬浮架区域增加冰雪防护裙板结构，即使在不同梁型的线路上运行也均有较好的冰雪防护效果。中低速磁浮列车目前悬浮架通常有5个模块组成，每个悬浮架模块上集成了基础制动装置、悬浮传感器等诸多设备[1]，因此裙板工程化方案设计需考虑方便日常维护与快速拆卸的应用需求。

本方案设计的裙板主要包含每侧5块侧面裙板和悬浮架端部裙板，总体方案如图13所示。其中，侧面裙板主要用于防护悬浮架和车体底架侧面区域设备；端部裙板主要用于防护悬浮架端部与清扫轨面上的积雪。在磁浮列车运行中，悬浮架与车体之间会产生相对运动，因此每块裙板上部与车体之间应设置密封条；在通过曲线路段时，每个悬浮架模块之间也会产生相对运动，故每块裙板端部之间也应设置密封条。密封条设计宽度既不能影响列车的正常运动间隙，又应考虑防冰雪的密封要求，同时侧面裙板设计需兼顾日常检修维护的需求，应设计成可翻转式或带检修门式结构。

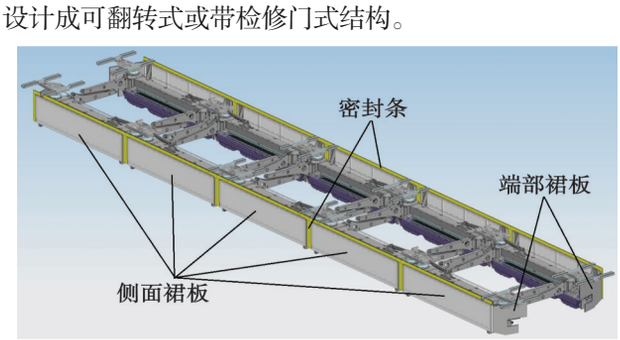


图13 防冰雪裙板工程化总体方案

Fig. 13 Overall engineering plan for anti-icing side skirt board

5 结语

本文通过对中低速磁浮列车实际在冰雪天气下运

行情况进行调研分析，并对列车开展了冰雪运行仿真的数值建模，分析了侧风、车速与轨道型式等因素对磁浮列车冰雪堆积的影响：侧风、车速和降雪量的增大将显著影响列车底部区域的积雪状况，不同车速下的积雪量随侧风的增长更为明显；相对于路基段，磁浮列车在高架桥梁上运行，积雪量约增加2~3倍。结合现有车辆与轨道结构型式组合而成的4种应用场景，对4种方案开展了对比分析，提出了具体优化建议，最终根据分析结果与实际应用情况，提出了工程化应用方案及相关设计要点，对后续列车的防冰雪设计及工程化应用具有较强的指导意义。

目前，磁浮列车的运营已积累了一定的冰雪天气应对措施和经验，但随着运营的时间累计和环境的持续变化，中低速磁浮列车在各种极端天气时出现的运营问题也在逐步暴露，列车的环境适应性和技术提升工作还需持续深入研究与进一步完善。

参考文献：

[1] 彭奇彪, 罗华军, 佟来生, 等. 中低速磁浮车辆悬浮架的技术特征[J]. 电力机车与城轨车辆, 2012, 35(6): 7-11.
PENG Qibiao, LUO Huajun, TONG Laisheng, et al. Characteristics of maglev bogie for mid-low speed maglev vehicle [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2012, 35 (6): 7-11.

[2] 蔡路, 李田, 张继业. 高速列车转向架雪粒沉积特性数值研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(4): 804-815.
CAI Lu, LI Tian, ZHANG Jiye. Numerical study on deposition characteristics of snow particle on bogie of high-speed train[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(4): 804-815.

[3] 蔡路, 张继业, 李田, 等. 高速列车底部空气流动特性对转向架区域积雪的影响[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(3): 109-121.
CAI Lu, ZHANG Jiye, LI Tian, et al. Impact of air flow characteristics underneath carbody on snow accumulation in bogie region of high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(3): 109-121.

[4] GAO Guangjun, ZHANG Yan, WANG Jiabin. Numerical and experimental investigation on snow accumulation on bogies of high-speed trains[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(4): 1039-1053.

[5] 冯永华, 黄照伟, 张琰, 等. 高寒动车组转向架区域积雪结冰数值仿真研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(3): 437-444.
FENG Yonghua, HUANG Zhaowei, ZHANG Yan, et al. Research of numerical simulation of the snow icy phenomenon of the high-speed train bogie area[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(3): 437-444.

[6] 郑强, 丁昊昊, 贺家豪, 等. 高速列车转向架防冰雪设计研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 64-74.
ZHENG Qiang, DING Haohao, HE Jiahao, et al. Research progress of ice/snow-proof design for high-speed train bogie [J]. Surface Technology, 2020, 49(12): 64-74.

[7] 李习桥, 刘涛, 刘兴民, 等. 动车组雪天运行安全控制措施[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(6): 83-86.
LI Xiqiao, LIU Tao, LIU Xingmin, et al. Safety control measure of EMU running in snow weather[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(6): 83-86.

[8] TRENKER M, PAYER W. Investigation of snow particle transportation and accretion on vehicles[C]//AIAA. 24th AIAA Applied Aerodynamics Conference. San Francisco, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.

[9] KIND R J. A critical examination of the requirements for model simulation of wind-induced erosion/deposition phenomena such as snow drifting[J]. Atmospheric Environment, 1976, 10(3): 219-227.

收稿日期：2023-03-10
修回日期：2023-04-20