文章编号:1674-2974(2025)06-0001-13 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025171

城际动车组永磁直驱转向架区域积雪仿真研究

姜琛[1,2,3,4†],何龙凤[1,2,3,4],李岩松[1,2,3,4],龙金兰[1,2,3,4],王家斌[1,2,3,4],刘明杨[5]
(1. 中南大学 重载快捷大功率电力机车全国重点实验室,湖南 长沙 410075;
2. 中南大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410075;
3. 中南大学 轨道交通列车安全保障技术国家地方联合工程研究中心,湖南 长沙 410075;
4. 中南大学 空气动力学铁路行业重点实验室,湖南 长沙 410075;
5. 重庆大学 高端装备机械传动全国重点实验室,重庆 400044)

摘 要:为了探究城际动车组永磁直驱转向架区域的积雪结冰问题,基于某城际动车组全尺寸三车模型,采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型的非定常雷诺时均方法(unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes, URANS)和离散相模型(discrete phase model, DPM),在环境温度-30 ℃及动车运营速度160 km/h的仿真条件下,分别研究了永磁直驱转向架区域与普通转向架区域的风雪运动特性.研究结果表明:永磁直驱转向架与普通转向架相比,转向架区域流场结构复杂度低,气流流动较为顺畅,虽然转向架积雪较多,但去除电机部分积雪后,总的积雪质量减少了23.83%,制动夹钳总的积雪质量比普通转向架模型减少了78.368%.可见,在永磁直驱转向架中,大部分积雪附着在永磁直驱电机的表面,而其他部位,尤其是制动夹钳表面的积雪较少.考虑到电机在运行过程中会发热,这种热效应能够融化表面积雪,使得电机表面的积雪量减少.基于这些特点,采用直驱形式的城际动车组转向架在解决积雪和结冰问题上展现出明显的优势.

关键词:城际动车组;永磁直驱;转向架;积雪;数值模拟
中图分类号:U271.91 **文献标志码**:A

Simulation Study of Snow Accumulation on Permanent Magnet Direct-drive Bogies Region for Intercity EMU

JIANG Chen[1,2,3,4†], HE Longfeng[1,2,3,4], LI Yansong[1,2,3,4], LONG Jinlan[1,2,3,4],
WANG Jiabin[1,2,3,4], LIU Mingyang[5]
(1. The State Key Laboratory of Heavy-duty and Express High-power Electric Locomotive, Central South University, Changsha 410075, China;
2. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
3. National & Local Joint Engineering Research Center of Safety Technology for Rail Vehicle, Central South University, Changsha 410075, China;
4. Key Laboratory of Aerodynamics Railway Industry, Central South University, Changsha 410075, China;

* **收稿日期**:2024-06-26
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFA0710901), National Key Research and Development Program of China (2020YFA0710901);国家自然科学基金资助项目(12372204), National Natural Science Foundation of China(12372204);湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30643), Natural Science Foundation of Hunan Province (2023JJ30643)
作者简介:姜琛(1989—),男,湖南张家界人,中南大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: jiangchen@csu.edu.cn

5. State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To investigate the issue of snow accumulation and icing in the region of the permanent magnet direct-drive (PMD) bogie of an intercity EMU (electric multiple unit), this study employs a full-scale three-car model of a specific intercity EMU. Using the Realizable k-ε turbulence model with the unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) method and the discrete phase model (DPM), the snow and wind movement characteristics in the PMD bogie region and the conventional bogie region were simulated under conditions of -30 ℃ ambient temperature and an operating speed of 160 km/h. The research results show that, compared to the conventional bogie, the PMD bogie exhibits a less complex flow field structure with smoother airflow. Although the total snow accumulation in the PMD bogie region is higher, after accounting for the snow adhered to the motor, the overall snow accumulation is reduced by 23.83%, and the snow accumulation on the brake calipers is reduced by 78.368%. Thus, it can be concluded that a significant portion of the snow in the PMD bogie area adheres to the surface of the permanent magnet direct-drive motor, with relatively little snow accumulation on other components, especially the brake calipers. Considering that the heat generated by the motor during operation can melt the snow on its surface, the snow accumulations on the motor surface. Based on these properties, the direct-drive configuration of the intercity EMU bogie offers a notable advantage in mitigating snow accumulation and icing issues.

Key words: intercity EMU; permanent magnet direct-drive; bogie; snow accumulation; numerical simulation

---

当列车在高寒丰雪地区运行时,轨道上的积雪会被列车气流吸至列车底部,并进入转向架内部,从而引发显著的积雪与结冰问题[1].车轴与轮对表面的大量积雪结冰会使得轮轨间的磨损增加[2].在制动过程中,温度的升高和振动可能会导致转向架表面的冰块脱落.由于列车运行速度过快,这些脱落的冰块极有可能损坏列车底部的设备,并且会提升列车脱轨的风险[3].制动夹钳表面的积雪和冰层会导致列车的制动系统无法正常工作,进而引发重大安全隐患[4].列车的减振系统会因空气弹簧表面的积雪结冰而受到影响,进而导致列车运行稳定性显著降低[5].转向架区域的积雪结冰现象可能会妨碍转向架部件的正常运作,进而导致列车运行品质显著降低,并严重威胁列车的运行安全[6-8].

为了克服列车转向架区域积雪结冰的难题,进而提升列车的运行安全性和效率,铁路科研人员对列车转向架区域的积雪结冰问题进行了深入研究[9-13].韩运动等[14]设计了一种高速列车转向架舱内流场状态测试装置,并对转向架舱内流场进行了数值模拟,研究了高速列车转向架区域流场特点,发现气流由列车底部以及两侧裙板灌入转向架舱内,流经端板时产生流动分离现象,大部分气流由端板底部及两侧裙板后部流出.Xie 等[15]用三维 URANS 方程结合 RNG 双方程湍流模型和 DPM 研究了高速列车单向架区域携带雪相的流场,并监测了雪相的运动.Wang 等[16-17]利用 URANS 与 DPM 耦合的方法研究了三节组高速列车转向架上的积雪,发现斜板转向架安装区域的防雪性能优于直板转向架安装区域,这对转向架区域上部空间的流动结构和雪浓度分布有很大影响.Gao 等[18-19]研究了侧风作用下高速列车转向架区域周围的风雪流,讨论了转向架区域周围的流动特征,分析了转向架整流罩高度对转向架上积雪的影响,并且设计了两种减少积雪的导流板,一种安装在转向架前端,另一种安装在转向架后端,最后通过风洞试验验证了 CFD 方法的准确性.Liu 等[20]通过分析转向架表面的积雪结冰情况,研究了风雪对于城轨列车的转向架区域的影响,并给出了转向架区域积雪结冰的原因与导流防积雪装置的防治方案.Kwon 等[21]研究了雪量和雪密度对积雪现象的影响,提出了与积雪现象相关的降雪条件.Ding 等[22]提出了一种基于不连续变形分析(DDA)方法的数值模型,用于研究高速铁路中雪/冰块掉落引起的道砟飞行,分析道砟颗粒与雪/冰块碰撞时的动力学行为.蔡路等[23-24]通过拉格朗日方法模拟雪相的流动,研究了高速列车转向架区域的雪相运动特性与沉积特性,发现转向架中部横梁区域积雪较

多. Kim 等[25]提出了一种安装在前车的非接触式除雪装置,以防止冬季在降雪路段行驶的高速列车底部积雪的问题. Bae 等[26]通过模拟积雪从地面漂移的初始运动,即雪跃现象来研究火车上的积雪堆积问题,将半经验雪跃模型应用于积雪地面的边界条件,求解雪相流的欧拉控制方程. Lan 等[27]研究发现,雪颗粒形态的改变会影响其在转向架区域的运动阻力,从而影响其在转向架区域的流动性. Wang 等[28]采用滑动网格技术再现静止地面上移动的火车的实际场景,并结合 DPM 提出了一种新的积雪模拟方法,对比了静止列车和静止列车的流场、积雪分布和堆积特征.Zhao 等[29]提出了一种高速气流中固体三维粒子轨迹跟踪、积雪积冰建模的仿真框架 HADICE, 该框架将气动流场求解为雷诺平均纳维-斯托克斯(RANS), 并可选择混合 RANS/LES 功能来模拟复杂的湍流.

近年来,永磁直驱转向架因其小型化、轻量化以及绿色高效的特点,赢得了铁路相关企业的青睐,在轨道交通领域展现出了广阔的应用前景.考虑到永磁直驱转向架同样面临高寒丰雪地区的积雪结冰困扰,本文基于风雪两相流的数值模拟方法,对比分析了永磁直驱转向架区域与普通转向架区域的积雪结冰规律,为风雪环境下的永磁直驱转向架区域的防冰雪设计提供理论依据.

1　数值方法

1.1　数学模型

本研究采用基于 Realizable k-ε 湍流模型的非定常雷诺时均方法(URANS)和离散相模型(DPM)模拟转向架区域内的风雪运动特性[30-31]. Realizable k-ε 湍流模型能准确模拟流线弯曲程度较大的流动现象,故选用此湍流模型模拟转向架区域的复杂流场.雷诺时均方法在保证计算精度的同时还可极大减少计算资源,因而广泛应用于列车空气动力学数值模拟研究[32].文献[33]准确给出了非定常雷诺时均方法的连续性方程、动量方程和雷诺应力方程以及 Realizable k-ε 湍流模型的 k 方程和 ε 方程.由于雪相密度与空气密度的比值远大于 1,雪相在空气中所受的虚假质量力、压力梯度力、Basset 力均可忽略[34],故本文只考虑曳力和重力对雪相的影响,即雪相只受到气流对它的曳力作用以及自身的重力作用,雪相受力平衡微分方程[35-36]为:

$$\frac{\mathrm{d}u_\mathrm{p}}{\mathrm{d}t}=\frac{18\mu}{\rho_\mathrm{p}d_\mathrm{p}^2}\frac{C_\mathrm{D}Re_\mathrm{p}}{24}\left(u-u_\mathrm{p}\right)+\frac{g\left(\rho_\mathrm{p}-\rho\right)}{\rho_\mathrm{p}} \tag{1}$$

$$Re_\mathrm{p}=\frac{\rho d_\mathrm{p}\left|u_\mathrm{p}-u\right|}{\mu} \tag{2}$$

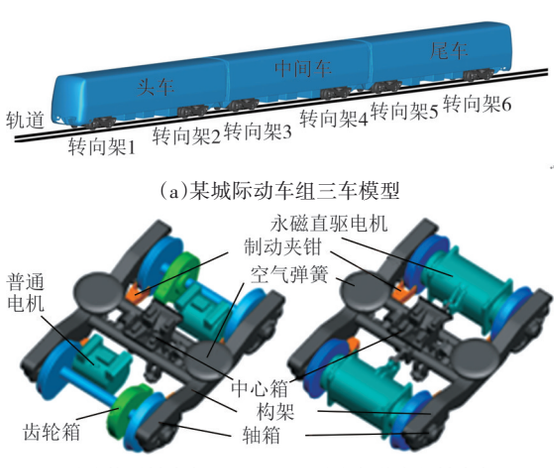
$$C_\mathrm{D}=\alpha_1+\frac{\alpha_2}{Re_\mathrm{p}}+\frac{\alpha_3}{Re_\mathrm{p}^2} \tag{3}$$

式中:u 为空气流动速度;u_p 为雪相速度;ρ 为空气密度,ρ=1.453 kg/m^3;μ 为动力粘度, μ=1.57×10^{-5} Pa·s; d_p 为粒子直径, d_p=0.15 mm;ρ_p 为粒子密度, ρ_p=250 kg/m^3;g 为重力加速度;C_D 为曳力系数;Re_p 为相对雷诺数; α_1, α_2, α_3 为常数, α_1=0.519 1, α_2=−1 662.5, α_3=5.146 7×10^6.

1.2　几何模型

本文采用的几何模型是某型城际动车组三车全尺寸模型,头车、中间车和尾车的行走部都使用动力转向架,完整的模型如图 1(a)所示.研究对象使用相同的车体,只有底部的转向架不同,一个模型的底部装载普通列车转向架,记为普通转向架模型;另一个模型的底部装载永磁直驱转向架,记为永磁直驱转向架模型.

鉴于研究重点在于两种动力转向架表面的积雪结冰现象,因此对车体模型和转向架模型进行了适度简化.尽管如此,列车转向架的所有关键部件均得到了完整保留.简化后的两种动力转向架模型分别展示在图 1(b)和图 1(c)中.从图中可以看到,普通转向架比永磁直驱转向架多了齿轮箱,此外两者的电机有所不同, 其他的部件均一致.本研究以轨道上顶面至车体顶部的高度 H=4.0 m 作为特征长度,城际动车组模型的总长为 14.8H,宽度为 0.7H.



(a)某城际动车组三车模型

(b)普通转向架　　(c)永磁直驱转向架

图 1　几何模型

Fig.1　Geometric model

1.3 计算域和边界条件

本文重点研究两种不同转向架的积雪结冰情况.两种模型均采用相同的计算域尺寸、相对位置和边界条件,如图2所示.

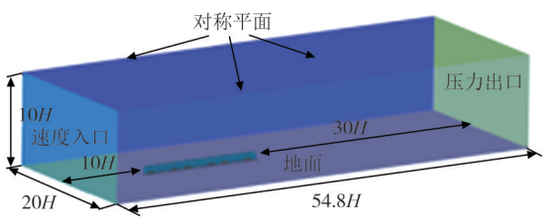


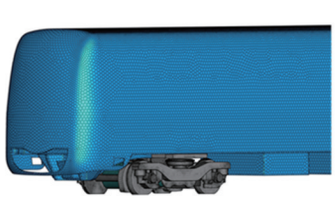
图2 计算域

Fig.2 Computational domain

研究所采用的城际动车组模型位于长方体计算域中.计算域无量纲尺寸为54.8H×20H×10H,入口距离头车前端10H,出口距离尾车末端30H,以保证动车组尾流区域内的风雪运动得以充分发展.此外,数值仿真计算域的阻塞比为3.76%,满足列车空气动力学数值模拟计算域阻塞比低于5%的要求[37].计算域入口的空气流动速度U与列车运营时速160 km一致,出口的静压P设置为0.计算域的两侧面和上顶面的边界条件设置为对称边界.列车在运行过程中,列车与地面是相对运动的,所以在模拟时为了实现这种相对运动,将地面与轨道设置为运动壁面,将列车和转向架设置为静止壁面.其中,地面与轨道的运动速度与速度入口的风速相同.此外,保持计算域中的环境温度为-30 ℃.在离散相边界条件设置中,将计算域的入口与出口的边界都设置为逃逸,即当雪相运动至这两个边界时,雪相运动的计算便会终止.将转向架表面的边界设置为捕捉,即当雪相撞击转向架表面时,便附着在转向架表面.由于本文重点研究转向架表面的积雪分布特性,需要有充足的雪相运动至列车转向架区域,所以将车体表面、轨道表面、路面的边界条件都设置为反弹,即当雪相撞击到这些表面时,并不会附着在其表面,而是反弹后继续跟随气流运动.雪相的发射平面设置在头车前方底部区域,高度为从轨道至列车底部,宽度设置为3 m.雪相的质量流率设置为8×10^{-8} kg/s,粒径设置为0.15 mm,密度设为250 kg/m^3.

1.4 网格策略

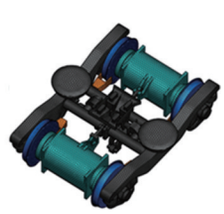
本文在商用CFD软件Ansys Fluent中对两相风、雪流进行网格划分以及数值模拟.采用以六面体为主的笛卡儿混合网格对普通转向架模型与永磁直驱转向架模型进行网格划分,如图3所示.转向架最小表面网格尺寸为20 mm,车体及轨道最小表面尺寸为40 mm.为了准确捕捉列车底部特别是转向架区域流场边界层内的空气流动规律,在转向架表面及车体表面设置14层棱柱层网格,并保证棱柱层网格与六面体网格良好的过渡,其中棱柱层网格的法向增



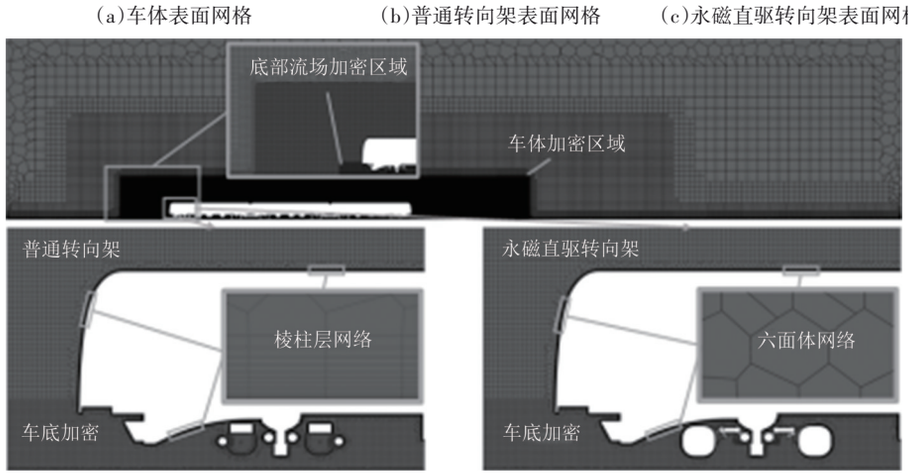
(a)车体表面网格



(b)普通转向架表面网格



(c)永磁直驱转向架表面网格



(d)纵向中间截面网格

图3 计算网格

Fig.3 Computational mesh

长率设置为1.2.采用3层网格对计算区域进行加密,而且重点对列车底部进行加密,保证列车底部流场的准确模拟.整个计算域的网格数量约为1.1×10^8,棱柱层网格数量约为6.5×10^7.

为了确保计算结果的准确性,同时兼顾计算资源的有效利用,对模型进行了网格无关性验证.由于普通转向架模型与永磁直驱转向架模型的区别仅在于列车底部转向架,只需对普通转向架模型进行网格无关性验证.在计算区域的列车底部中心位置(y=0)设置一条压力系数监测线,分别对粗糙网格、中等网格以及精细网格的稳态计算进行监测,得到如图4所示的压力系数分布图.中等网格的压力系数曲线与精细网格的压力系数曲线基本吻合,故采用中等网格的网格划分策略对普通转向架模型与永磁直驱转向架模型进行网格划分.

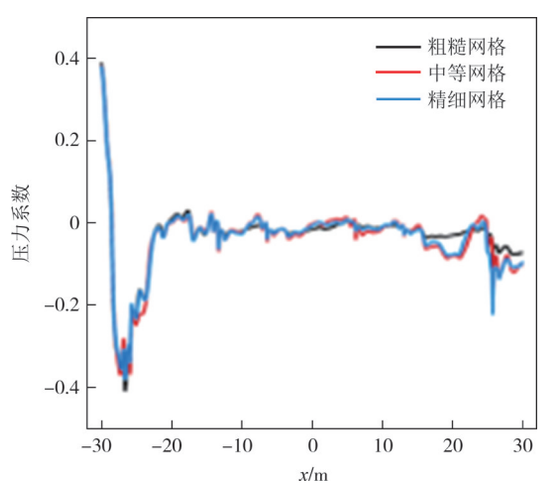


图4　压力系数分布

Fig.4　Pressure coefficient distribution

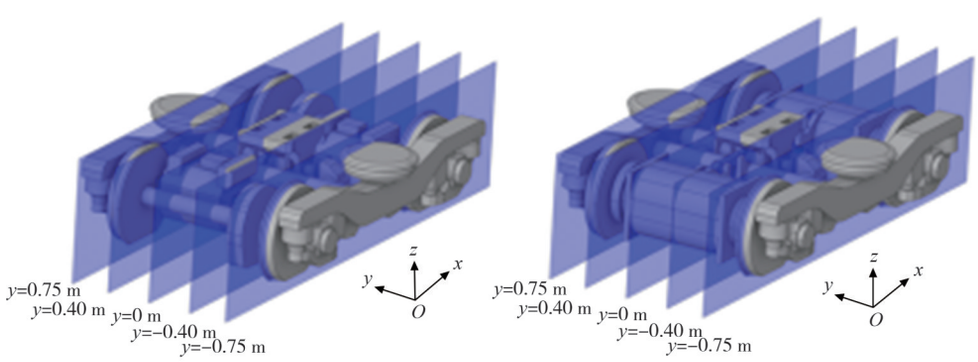
1.5　数值计算方法及其验证

Ansys Fluent采用有限体积法将偏微分方程组在网格节点处划分为代数方程组.在数值模拟中将对流项划分为二阶迎风格式,利用压力求解器和SIMPLEC算法对压力-速度场进行耦合.为了提高两相风雪流的模拟精度,采用双向耦合算法求解空气相和雪粒子相.计算过程中,雪相之间互不影响,雪相的物理参数始终保持不变.本文所采用的数值计算方法和相关参数设置与文献[35-36]一致,模型构造高度相似,仅几何模型存在差异,因而参考文献中所采用参数与计算方法完全适用于本文模型.文献[35-36]为验证所用数值模拟方法的正确性,完成了高速列车转向架区域两相流风洞试验研究以及转向架区域两相流试验细节及数值方法验证,其中转向架区域两相流风洞试验开展于中南大学高速列车研究中心开口环境风洞的高速试验段[4].

在数值模拟的过程中,首先执行了稳态流场的仿真计算,进而获得了城际动车组周围已经充分发展的流场.然后,通过粒子发射面将雪相子注入流场稳定的计算域中,进行了物理持续时间为3 s的非定常计算,以求解非定常流场.在非定常计算中,可以得到雪相子的运动轨迹,不同转向架区域的雪相浓度以及转向架表面的积雪分布结果.非定常计算的时间步长设置为0.1 ms,以确保在整个模拟过程中库朗数在1以内.

2　结果和讨论

为了更好地分析转向架关键部件附近的空气流动特性与积雪分布特性,考虑到普通转向架以及永磁直驱转向架的轮对、电机及齿轮箱的分布特点,在普通转向架以及永磁直驱转向架的相同特殊位置做了5个垂直于y轴的切片,分别是y=0 m,y=0.4 m,y=−0.4 m,y=0.75 m以及y=−0.75 m的位置,如图5所示.



(a) 普通转向架切片位置　　(b) 永磁直驱转向架切片位置

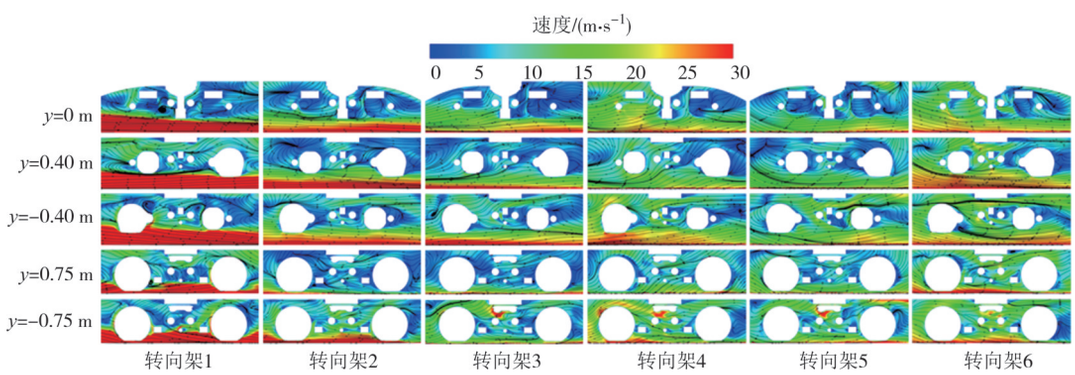
图5　切片位置图

Fig.5　Slice positions

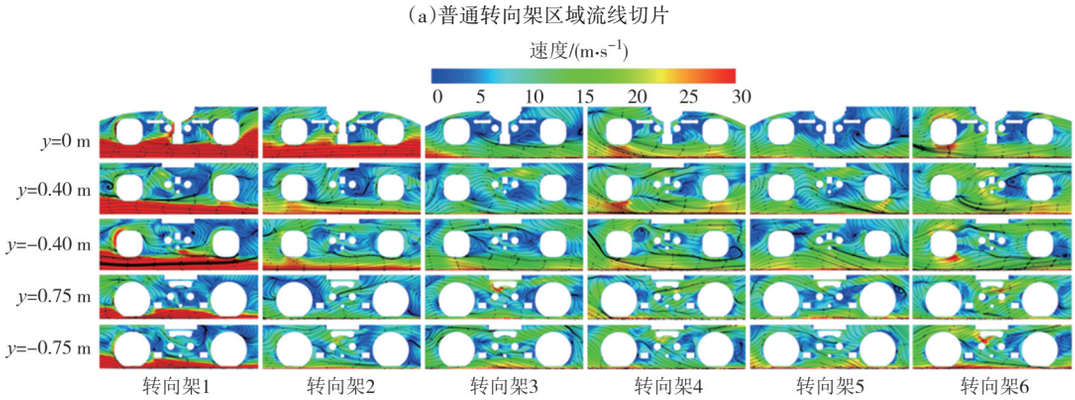
2.1 转向架区域流场分析

由图6(a)普通转向架区域流线切片可见:从转向架1到转向架6,随着转向架与车头的距离逐渐增加,普通转向架模型底部气流速度逐渐减小,转向架1区域底部气流速度最大.转向架1区域的前端空间较为宽敞,使得气流能够更充分地上升,从而导致了较大的气流流速差异.这种差异在电机、齿轮箱以及轮对的前方形成了显著的低速涡流.此外,转向架底部的少量气流会上升至转向架内部的空旷区域,由于气流速度的差异,在前端的中心销与制动夹钳前方形成了低速涡流.此外,普通转向架模型的转向架1区域后端区域也出现了涡流,部分气流上扬逆向流动,经过转向架内部,从转向架前端区域穿出.转向架2、转向架3、转向架4、转向架5以及转向架6的前端区域均出现与转向架1区域相同的低速涡流,部分气流会上升至转向架中间区域,转向架底部区域的部分气流会上升至转向架内部区域,并从转向架后端穿出.与转向架1不同的是,转向架2~6区域整体的气流速度降低,没有出现气流从转向架前端区域穿出的现象.

由图6(b)永磁直驱转向架区域流线切片可见:与普通转向架类似,永磁直驱转向架模型中每个转向架的底部气流也逐渐减小,转向架1区域的永磁直驱电机前端气流出现上扬,由于速度差形成低速涡流,底部气流部分上扬至转向架内部区域,并在永磁直驱转向架区域以及后方形成大小不一的涡流.但与普通转向架模型不同的是,由于大体积的永磁直驱电机阻挡了气流,底部上扬的气流极少从转向架前端区域穿出,大部分从转向架后端区域穿出.转向架2、转向架3、转向架4、转向架5以及转向架6气流同转向架1区域类似,不同的是气流流速明显降低.



(a)普通转向架区域流线切片



(b)永磁直驱转向架区域流线切片

图6 转向架区域流场

Fig.6 Flow field in bogie region

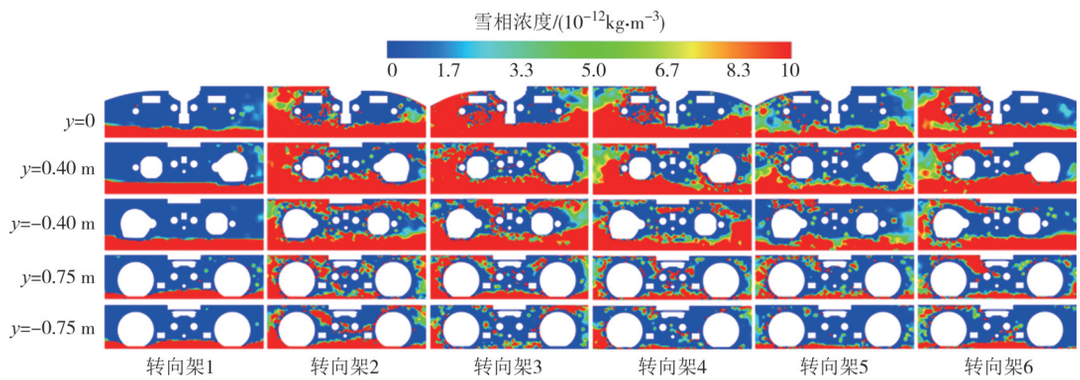
2.2 转向架区域积雪分析

2.2.1 转向架区域雪相浓度分析

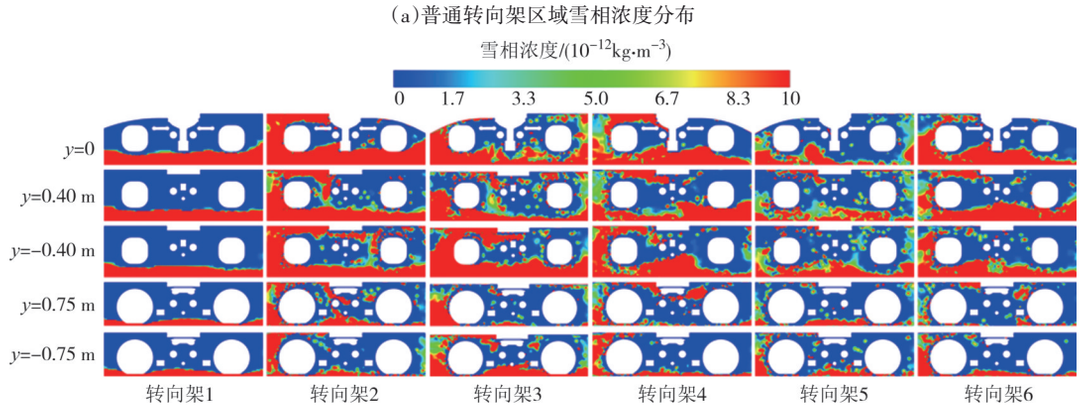
雪相运动具有较强的气流跟随性,转向架区域存在的上扬气流会把轨面上的雪相卷入转向架内部区域,部分雪相会撞击转向架各个部件.此外,由于低速涡流的影响,进入转向架内部区域的雪粒不易被吹出,最终,在重力的作用下部分雪粒在转向架内部沉积.从图7(a)雪相浓度切片可见:由于距离头车最近,普通转向架模型转向架1区域的气流速度较大,雪相主要分布在转向架底部区域,少许雪相分布在转向架后端区域,其中转向架后端的齿轮箱及轮对后方分布较多.普通转向架模型转向架2区域的

整体气流速度减小,雪相更容易发生沉积,因此雪相浓度较高,雪相主要分布在转向架的前端区域以及底部区域.普通转向架模型转向架2的电机与齿轮箱前方出现大量雪相,电机与齿轮箱后方的雪相浓度较前方少.但是由于转向架后端空旷区域可进入的雪相较前端区域多,普通转向架模型转向架2后端区域制动夹钳附近的雪相浓度明显高于前端区域.由于部分雪相在前方附着,普通转向架模型转向架3、转向架4、转向架5、转向架6区域的雪相浓度较转向架2区域低,主要分布在转向架前端区域以及底部区域,雪相分布规律与转向架2类似.

从图7(b)可见,永磁直驱转向架模型转向架1区域的雪相分布与普通转向架模型类似,主要分布在转向架的底部区域,但是在永磁直驱转向架模型转向架1后端区域基本没有雪相分布.与普通转向架模型相同的是,永磁直驱转向架模型转向架2区域的雪相浓度最高,主要分布在永磁直驱电机与轮对的前方.由于永磁直驱电机阻碍了气流的运动,永磁直驱转向架模型转向架后端区域雪相分布明显比普通转向架模型少.与普通转向架模型不同的是,由于永磁直驱电机阻碍了气流,部分气流通向制动夹钳,转向架2区域的制动夹钳附近的雪相浓度明显减少.转向架3、转向架4、转向架5、转向架6区域的雪相浓度均比转向架2区域低,分布规律与转向架2区域相似,即雪相主要分布在转向架区域前端的永磁电机和轮对的前方.



(a)普通转向架区域雪相浓度分布



(b)永磁直驱转向架区域雪相浓度分布

图7　转向架区域雪相浓度分布

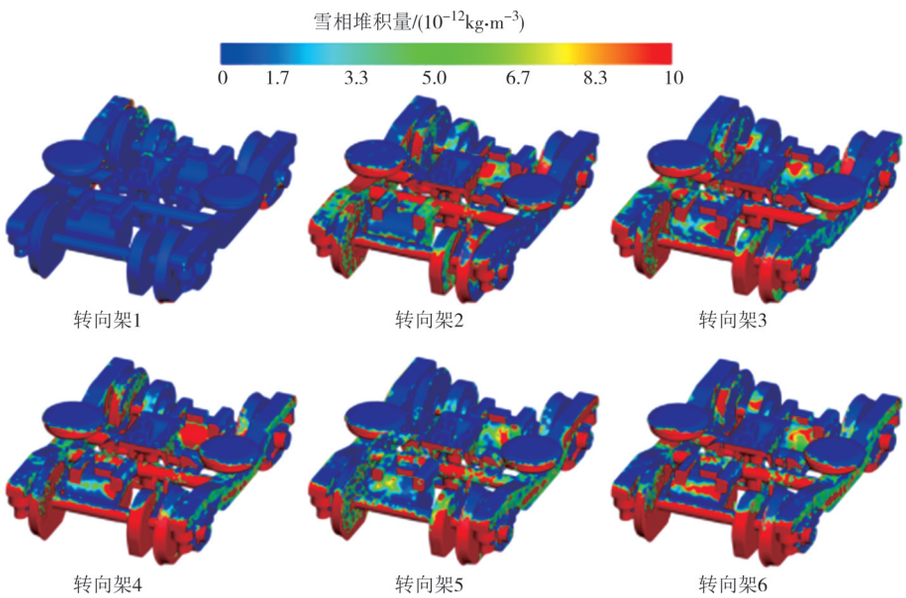
Fig.7　Snow concentration in different regions

2.2.2　转向架表面雪相堆积分析

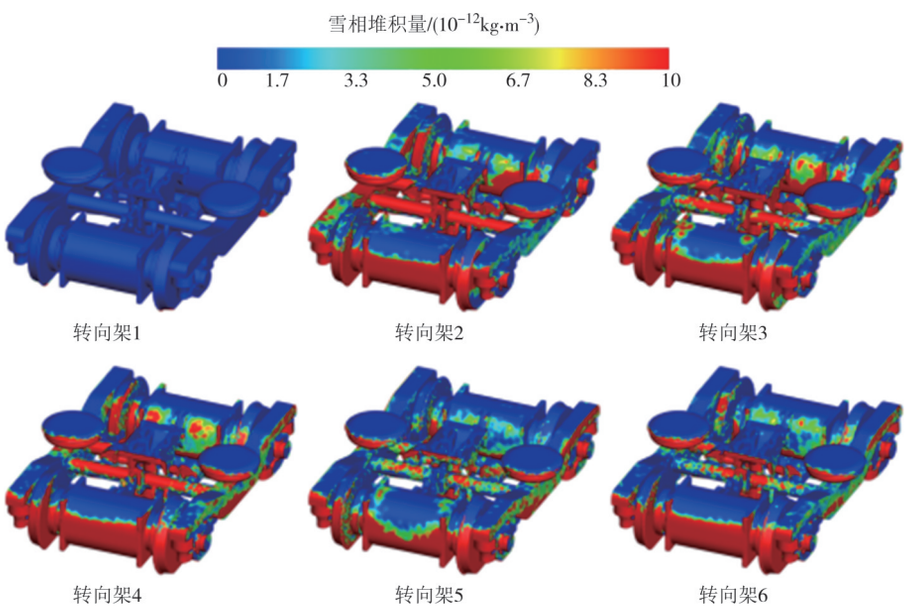
转向架表面雪相堆积如图8所示.图8(a)为普通转向架模型中转向架1~6表面雪相堆积对比图.普通转向架模型转向架1区域由于速度较大的气流带走了大部分雪相,只有极少积雪分布在转向架后端区域的轴箱、电机、齿轮箱以及轮对表面.普通转向架模型的转向架2~6表面积雪较多,大部分积雪分布在转向架前中端区域的轴箱、电机、齿轮箱、构架、空气弹簧、中心销以及轮对表面,少部分积雪分布在转向架后端区域的电机、齿轮箱、轮对以及轴箱表面.

图8(b)为永磁直驱转向架模型不同转向架表面雪相堆积对比.同样地从中可以看到永磁直驱转向架模型转向架1表面基本上没有积雪分布,只有极少的积雪分布在转向架后端区域的轴箱表面.永磁

直驱转向架模型转向架2、转向架3、转向架4、转向架5、转向架6的表面积雪分布与普通转向架模型相似,集中分布在转向架的前中端区域的各个部件表面,其中尤以转向架前端区域的电机表面分布较多.此外,永磁直驱转向架模型与普通转向架模型最大的不同是,永磁直驱转向架由于没有齿轮箱,所以永磁直驱转向架没有齿轮箱表面的积雪分布.但是由于永磁直驱电机本身的体积比普通电机大,所以永磁直驱转向架模型的电机表面积雪比普通转向架模型的积雪明显更多.



(a)普通转向架表面雪相堆积



(b)永磁直驱转向架表面雪相堆积

图8 转向架表面雪相堆积

Fig.8 Snow accumulation on different bogies

2.2.3 转向架表面积雪定量分析

为了进一步明确永磁直驱转向架模型表面的积雪规律,表1给出了普通转向架模型各部件的积雪质量,表2给出了永磁直驱转向架模型各部件积雪质量,可以看出:永磁直驱转向架模型转向架1各部件的积雪质量均低于普通转向架模型转向架1,其中永磁直驱转向架模型转向架1的制动夹钳表面、枕梁表面、中心销表面积雪质量远低于普通转向架模型转向架1.此外,永磁直驱转向架模型的制动夹钳积雪质量均低于普通转向架模型.除了永

磁直驱转向架模型转向架1的积雪质量远低于普通转向架模型转向架1,永磁直驱转向架模型的转向架2~5的积雪质量均高于普通转向架模型;对于转向架6的积雪质量,永磁直驱转向架模型与普通转向架模型相差较小;永磁直驱转向架模型中所有转向架总的积雪质量比普通转向架模型多23.176%.

普通转向架模型与永磁直驱转向架模型的主要区别在于,普通转向架模型采用的是传统的牵引电机,而永磁直驱转向架模型则配备了永磁直驱电机.除此之外,普通转向架模型相较于永磁直驱转向架模型,还包含了一个齿轮箱.为了深入研究两种转向架表面的积雪规律,对普通转向架模型与永磁直驱转向架模型的电机积雪质量进行对比分析,表3为电机表面积雪质量与转向架表面积雪总质量之比.研究发现普通转向架模型电机的积雪质量占总的转向架积雪质量的比重较小,而永磁直驱转向架模型的永磁直驱电机的积雪质量占总的转向架积雪质量较高,其中最高占比是转向架2,达到57.037%.对于所有转向架电机积雪质量占所有转向架积雪质量,永磁直驱转向架模型占比为46.803%,而普通转向架模型只有13.970%.

表1　普通转向架模型不同转向架的重要部件表面的积雪质量

Tab.1　Mass of accumulated snow on different components of ordinary bogie model　　kg

部件	转向架1	转向架2	转向架3	转向架4	转向架5	转向架6	S
电机	6.151×10^{-13}	9.202×10^{-11}	4.304×10^{-11}	5.953×10^{-11}	1.165×10^{-11}	9.506×10^{-12}	2.164×10^{-10}
制动夹钳	1.181×10^{-11}	3.402×10^{-11}	9.022×10^{-12}	1.641×10^{-11}	3.672×10^{-12}	1.221×10^{-11}	8.714×10^{-11}
构架	9.201×10^{-12}	1.045×10^{-10}	4.623×10^{-11}	4.173×10^{-11}	2.009×10^{-11}	2.697×10^{-11}	2.487×10^{-10}
空气弹簧	1.763×10^{-13}	9.327×10^{-12}	1.101×10^{-11}	9.309×10^{-12}	1.022×10^{-11}	1.291×10^{-11}	5.295×10^{-11}
枕梁	7.338×10^{-13}	2.385×10^{-11}	1.658×10^{-11}	2.140×10^{-11}	6.694×10^{-12}	2.527×10^{-11}	9.453×10^{-11}
轴箱	9.528×10^{-11}	1.165×10^{-10}	4.025×10^{-11}	7.841×10^{-11}	6.795×10^{-11}	7.299×10^{-11}	4.714×10^{-10}
中心销	3.237×10^{-13}	4.286×10^{-11}	5.235×10^{-11}	3.402×10^{-11}	8.795×10^{-12}	2.192×10^{-11}	1.603×10^{-10}
齿轮箱	1.403×10^{-12}	6.937×10^{-11}	5.007×10^{-11}	4.402×10^{-11}	1.537×10^{-11}	3.726×10^{-11}	2.175×10^{-10}
总计	1.195×10^{-10}	4.924×10^{-10}	2.686×10^{-10}	3.048×10^{-10}	1.444×10^{-10}	2.190×10^{-10}	1.549×10^{-9}

注:S为普通转向架模型中转向架1~6的各部件表面的积雪质量之和.

表2　永磁直驱转向架模型不同转向架的重要部件表面的积雪质量

Tab.2　Mass of accumulated snow on different components of PMD bogie model　　kg

部件	转向架1	转向架2	转向架3	转向架4	转向架5	转向架6	S'
电机	8.633×10^{-14}	4.835×10^{-10}	1.566×10^{-10}	1.324×10^{-10}	3.788×10^{-11}	8.249×10^{-11}	8.930×10^{-10}
制动夹钳	8.273×10^{-14}	6.145×10^{-12}	1.751×10^{-12}	5.641×10^{-12}	2.604×10^{-12}	2.626×10^{-12}	1.885×10^{-11}
构架	1.187×10^{-13}	5.432×10^{-11}	4.988×10^{-11}	3.170×10^{-11}	2.463×10^{-11}	1.564×10^{-11}	1.763×10^{-10}
空气弹簧	1.079×10^{-14}	2.162×10^{-11}	1.161×10^{-11}	1.464×10^{-11}	1.222×10^{-11}	9.953×10^{-12}	7.005×10^{-11}
枕梁	3.597×10^{-15}	7.481×10^{-11}	3.895×10^{-11}	3.181×10^{-11}	8.924×10^{-12}	1.734×10^{-11}	1.718×10^{-10}
轴箱	4.914×10^{-12}	1.087×10^{-10}	4.539×10^{-11}	8.327×10^{-11}	6.266×10^{-11}	5.040×10^{-11}	3.553×10^{-10}
中心销	3.597×10^{-15}	9.862×10^{-11}	4.806×10^{-11}	3.710×10^{-11}	1.212×10^{-11}	2.672×10^{-11}	2.226×10^{-10}
齿轮箱	—	—	—	—	—	—	—
总计	5.220×10^{-12}	8.477×10^{-10}	3.522×10^{-10}	3.366×10^{-10}	1.610×10^{-10}	2.052×10^{-10}	1.908×10^{-9}

注:S'为永磁直驱转向架模型中转向架1~6的各部件表面的积雪质量之和.

表3　电机表面积雪质量与转向架表面积雪总质量之比

Tab.3　The ratio of mass of accumulated snow on motor surface to the total mass of accumulated snow on bogie surface　%

模型	转向架1	转向架2	转向架3	转向架4	转向架5	转向架6
普通转向架模型	0.515	18.688	16.024	19.531	8.068	4.341
永磁直驱转向架模型	1.654	57.037	44.463	39.335	23.528	40.200

上述仿真结果并未考虑电机温度对积雪分布的影响.实际上,电机工作时的温升会产生大量的热量,导致电机表面温度急剧升高[38].通常情况下,运行中的电机表面温度可达到几十摄氏度甚至超过一百摄氏度.而永磁直驱电机的转矩密度高、转速低,电机定子绕组铜耗大,铁耗相对较小,且永磁电机一

般采用全封闭结构,故永磁直驱电机温升问题就更加突出,电机表面温度更高[39-41].电机表面的积雪因温升导致融化而大量减少,使得转向架区域有大量积雪,而电机表面积雪很少的情况出现,图9为某动车转向架区域积雪堆积图.



图9 某动车转向架区域积雪堆积

Fig.9 Snow accumulation in the bogie area

因此,本文分别对比分析了普通转向架模型与永磁直驱转向架模型转向架总的积雪质量与去除电机积雪后的积雪质量,如图10所示.普通转向架模型与永磁直驱转向架模型中转向架1总的积雪质量都是最少的,转向架2总的积雪质量都是最多的;相比于普通转向架模型,永磁直驱转向架模型转向架1基本没有积雪;对于转向架总的积雪质量,永磁直驱转向架模型的转向架2、转向架3与转向架4均比普通转向架模型的对应转向架要多,而永磁直驱转向架模型的转向架5与转向架6与普通转向架模型的转向架5与转向架6总的积雪质量基本相同;但是去除电机的积雪质量后,永磁直驱转向架模型每个转向架的积雪质量均比普通转向架模型每个转向架的积雪质量要少,从转向架1到转向架6,永磁直驱转向架模型比普通转向架模型分别少95.68%、9.04%、13.25%、16.77%、7.25%、41.45%,对于去除电机积雪后所有转向架总的积雪质量,永磁直驱转向架模型比普通转向架模型少23.83%.

图11展示了永磁直驱转向架模型与普通转向架模型在不同情况下的积雪质量对比:包括电机表面积雪总质量、转向架表面积雪总质量,以及去除电机积雪后转向架表面积雪总质量,可以发现永磁直驱转向架模型的永磁直驱电机的积雪质量远高于普通转向架模型的普通电机.虽然永磁直驱转向架模型总的积雪质量高于普通转向架模型,但去除电机表面的积雪后的永磁直驱转向架模型的转向架总的积雪质量会明显少于普通转向架模型.此外,在深入

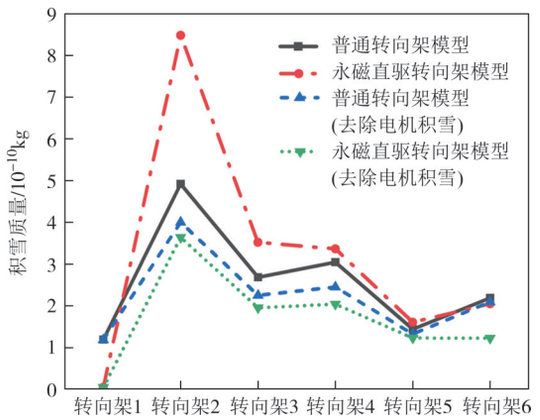


图10 不同转向架表面雪相堆积质量

Fig.10 Mass of accumulated snow on different bogies

分析两个模型的转向架各部件积雪规律时,发现普通转向架模型与永磁直驱转向架模型在制动夹钳表面积雪质量方面存在显著差异,如图12所示.

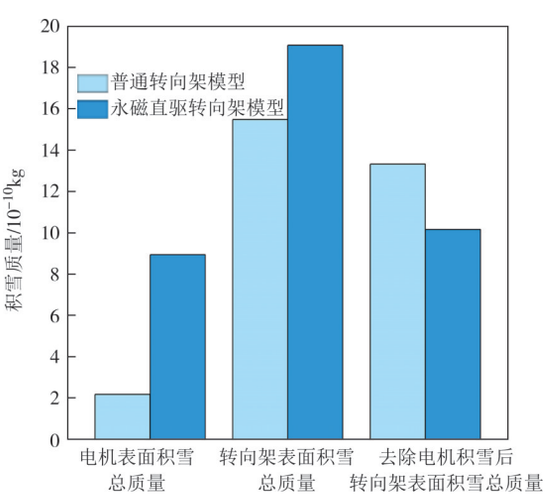


图11 转向架表面雪相堆积总质量

Fig.11 Total mass of accumulated snow on bogie surface

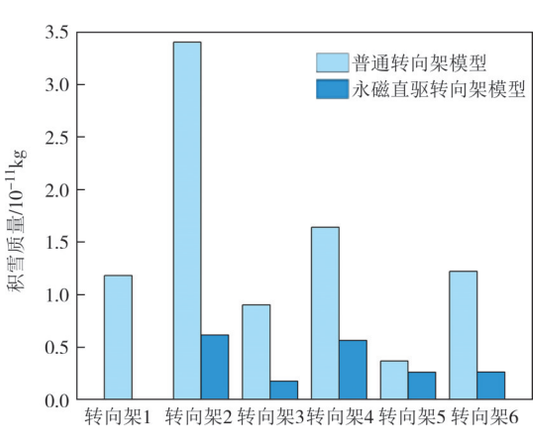


图12 各转向架制动夹钳表面雪相堆积

Fig.12 Mass of accumulated snow on different brake calipers

永磁直驱转向架模型每个转向架的制动夹钳的积雪质量均低于普通转向架模型.在永磁直驱转向

架模型中,大部分气流运动受阻于永磁直驱电机,只有少部分气流能够运动至制动夹钳附近;而在普通转向架模型中,由于电机体积较小,其阻碍气流的能力较弱,有更多的雪相撞击在制动夹钳表面.永磁直驱电机阻碍气流从而保护制动夹钳的作用在转向架1区域表现明显.永磁直驱转向架模型转向架1的制动夹钳的积雪很少,远少于普通转向架模型的制动夹钳的积雪质量,此外,转向架2、转向架3、转向架4、转向架6,永磁直驱转向架模型制动夹钳的积雪质量均远少于普通转向架模型.对于总的制动夹钳的积雪质量,永磁直驱转向架模型比普通转向架模型少78.368%.

3 结 论

本文运用风雪两相流数值模拟技术,深入研究了城际动车组转向架区域的风雪流动特性.通过对比分析,揭示了普通列车转向架区域与永磁直驱转向架区域在风雪运动规律及积雪分布特性方面的差异.研究得出的主要结论如下:

1)由于永磁直驱转向架的结构比普通转向架的结构更为简单,转向架区域内的涡流较少,而普通转向架区域内部的涡流较多,流场结构较为复杂,因而永磁直驱转向架区域的流场结构复杂度低,气流流动较为顺畅.

2)由于永磁直驱电机结构对于风雪运动的影响,永磁直驱转向架模型转向架1的积雪质量远低于普通转向架模型;对于转向架2~5的积雪,永磁直驱转向架模型均比普通转向架模型多,但是永磁直驱转向架模型转向架的积雪大量分布在永磁直驱电机上,去除电机上的积雪之后,永磁直驱转向架模型每个转向架的积雪均少于普通转向架的积雪.

3)在永磁直驱转向架模型中,制动夹钳附近的流场相较于普通转向架模型更为简化,导致雪相浓度显著降低.因此,永磁直驱转向架模型的制动夹钳积雪量远低于普通转向架模型,其制动夹钳的总积雪质量比普通转向架模型减少了78.368%.

由于永磁直驱转向架的大部分积雪积聚在永磁直驱电机上,而永磁直驱电机产生的热量可以融化积雪,所以永磁直驱转向架区域的积雪会大量减少.此外,永磁直驱转向架的制动夹钳积雪明显较少.因此,相较于使用普通转向架的城际列车,采用永磁直驱转向架的城际列车展现出更优越的抗雪性能.为了进一步提升永磁直驱转向架的抗雪能力,未来将探索设计更为精细的导流减雪装置.

参考文献

[1] WANG J B, ZHANG Y, ZHANG J, et al. A numerical investigation on the improvement of anti-snow performance of the bogies of a high-speed train[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2020, 234(10): 1319-1334.

[2] TAO G Q, WEN Z F, ZHAO X, et al. Effects of wheel–rail contact modelling on wheel wear simulation[J]. Wear, 2016, 366: 146-156.

[3] QUINN A D, HAYWARD M, BAKER C J, et al. A full-scale experimental and modelling study of ballast flight under high-speed trains[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, 224(2): 61-74.

[4] WANG J B, GAO G J, ZHANG Y, et al. Anti-snow performance of snow shields designed for brake calipers of a high-speed train[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2019, 233(2): 121-140.

[5] 苗秀娟, 何侃. 高速列车转向架区域积雪形成原因及防积雪研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(3): 756-763.
MIAO X J, HE K. Cause analysis of snow packing in high-speed train's bogie regions and anti-snow packing design[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(3): 756-763.(in Chinese)

[6] JI W G, SHON S, SEO S H, et al. Snow accretion on a model train: climate wind tunnel experiments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 242: 105572.

[7] KIM B, AHN J, KWON H. A study on a partially-open bogie fairing to improve anti-snow performance of a high-speed train[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(4): 1859-1869.

[8] DU Z, YU M, LIU J, et al. Analysis of snow distribution and displacement in the bogie region of a high-speed train[J]. Fluid Dynamics & Materials Processing, 2024, 20(7): 103560.

[9] ZHANG Y, WANG J, JIANG C, et al. Investigation of ice and snow accumulations on the bogie areas of high-speed trains using ice wind tunnel experiments[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 199: 103560.

[10] DU Z H, YU M G, LIU J L, et al. Analysis of snow distribution and displacement in the bogie region of a high-speed train[J]. Fluid Dynamics & Materials Processing, 2024, 20(7): 1687-1701.

[11] WANG J B, LIU H Y, ZHANG Y, et al. Influence of the

contraction section configuration and deflector layout density on the wind-snow flow characteristics inside the ice snow wind tunnel for railway vehicles [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2024, 18(1).

[12] ZHAO C L, WANG T T, SHI F S, et al. Numerical study of snow accumulation on bogies for long marshalling high-speed trains[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2024, 52(11):8685-8705.

[13] LAN H, CAI L, ZHANG J Y, et al. Research on snow prevention in the bogie region based on active blowing method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2024, 238(12): 5597-5609.

[14] 韩运动, 姚松, 陈大伟, 等. 高速列车转向架舱内流场实车测试与数值模拟[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(6):51-60.
HAN Y D, YAO S, CHEN D W, et al. Real vehicle test and numerical simulation of flow field in high-speed train bogie cabin[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(6):51-60.(in Chinese)

[15] XIE F, ZHANG J, GAO G, et al. Study of snow accumulation on a high-speed train's bogies based on the Discrete phase model [J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2017, 10(6):1729-1745.

[16] WANG J B, GAO G J, LIU M Y, et al. Numerical study of snow accumulation on the bogies of a high-speed train using URANS coupled with discrete phase model [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 183:295-314.

[17] WANG J B, ZHANG J, ZHANG Y, et al. Impact of bogie cavity shapes and operational environment on snow accumulating on the bogies of high-speed trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 176:211-224.

[18] GAO G, ZHANG Y, ZHANG J, et al. Effect of bogie fairings on the snow reduction of a high-speed train bogie under crosswinds using a discrete phase method[J]. Wind & Structures, 2018, 27(4): 255-267.

[19] GAO G J, ZHANG Y, XIE F, et al. Numerical study on the anti-snow performance of deflectors in the bogie region of a high-speed train using the discrete phase model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2019, 233(2):141-159.

[20] LIU M Y, WANG J B, ZHU H F, et al. A numerical study of snow accumulation on the bogies of high-speed trains based on coupling improved delayed detached eddy simulation and discrete phase model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2019, 233(7): 715-730.

[21] KWON H, KIM B, YEE K, et al. Study on relationship between weather condition and window glass damage by accreted snow for high-speed trains[J]. Journal of the Korean Society for Railway, 2020, 23(2): 135-142.

[22] DING D, OUAHSINE A, XIAO W, et al. Numerical study of ballast-flight caused by dropping snow/ice blocks in high-speed railways using discontinuous deformation analysis (DDA)[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 22:100314-100314.

[23] 蔡路, 张继业, 李田. 高速列车转向架区域雪粒运动特性分析[J]. 中国科学(技术科学), 2019, 49(12):1593-1602.
CAI L, ZHANG J Y, LI T. Analysis of the motion characteristics of snow particles in the bogie region of a high-speed train[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(12):1593-1602.(in Chinese)

[24] 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 L, LI T, ZHANG J Y. 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.(in Chinese)

[25] KIM B, KWON H. Study on snow saltation effect of non-contact snow removal device applicable to high-speed trains for anti-icing [J]. Journal of the Korean Society for Railway, 2021, 24(12): 1101-1109.

[26] BAE J, SHON S, KWON H, et al. Numerical investigation of snow accumulation on a high-speed train by snow saltation[J]. International Journal of Rail Transportation, 2023, 11(4): 465-489.

[27] LAN H, CAI L, ZHANG J, et al. Research on movement and deposition of snow particles with different shapes in the bogie region[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2023, 237(5): 669-679.

[28] WANG Y, WANG T T, JIANG C, et al. Numerical study on slipstream-induced snow drifting and accumulation in the bogie region of a high-speed train passing the snowy ballast bed[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 232:105269.

[29] ZHAO F Z, CHEN D W, LIU J L, et al. A framework for simulating snow accumulation and ice accretion on high-speed trains[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2024, 238(1):73-88.

[30] CAI L, LOU Z, LI T, et al. Numerical study of dry snow accretion characteristics on the bogie surfaces of a high-speed train based on the snow deposition model[J]. International Journal of Rail Transportation, 2022, 10(3): 393-411.

[31] GAO G J, ZHANG Y, MIAO X J, et al. Influence of bogie fairing configurations on the snow accretion around bogie regions of a high-speed train under crosswind conditions[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2023, 51(10):5452-5469.

[32] WANG J B, ZHANG J, XIE F, et al. A study of snow accumulating on the bogie and the effects of deflectors on the de-icing performance in the bogie region of a high-speed train[J].

Cold Regions Science and Technology, 2018, 148:121-130.

[33] LABORDE-BOUTET C, LARACHI F, DROMARD N, et al. CFD simulation of bubble column flows: investigations on turbulence models in RANS approach[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(21): 4399-4413.

[34] 谢菲, 高广军, 何侃, 等. 基于DPM模型的高速列车转向架区域风雪流数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(8): 2814-2823.
XIE F, GAO G J, HE K, et al. Numerical simulation of the flow and snow particles in the bogie area of a high-speed train based on DPM model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(8):2814-2823.(in Chinese)

[35] 王家斌, 张琰, 张洁, 等.一位端转向架位置对高速列车底部风雪运动特性的影响[J].中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(1): 352-364.
WANG J B, ZHANG Y, ZHANG J, et al. Impact of the first bogie position on flow characteristics of wind and snow beneath high-speed train[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(1): 352-364.

[36] 王家斌, 刘浩源, 刘操, 等.下斜导流防积雪结构对高寒高速列车转向架区域积雪的影响[J].铁道学报, 2023, 45(9): 46-55.
WANG J B, LIU H Y, LIU C, et al. Impact of downward-inclined anti-snow deflectors on snow accumulation on bogies of alpine high-speed trains [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(9): 46-55.

[37] 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 J L, ZHANG J Y, ZHANG W H. Analysis of aerodynamic characteristics of high-speed trains in the evacuated tube[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22):137-143.(in Chinese)

[38] DONG H, MA H, WANG Z, et al. An online health monitoring framework for traction motors in high-speed trains using temperature signals [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 19(2): 1389-1400.

[39] 王健, 符敏利, 陈致初, 等. 地铁车辆用永磁直驱同步牵引电动机冷却结构设计[J]. 机车电传动, 2016(4): 6-10.
WANG J, FU M L, CHEN Z C, et al. Cooling structure design of direct-driven permanent magnet synchronous traction motor for metro vehicle[J]. Electric Drive for Locomotives, 2016(4): 6-10.(in Chinese)

[40] 孙德强, 吴楠. 机车大功率直驱永磁牵引电机新型通风散热结构设计[J]. 铁道机车与动车, 2019(10): 8-11.
SUN D Q, WU N. Design of a new type ventilation and heat dissipation structure for the high-power direct drive permanent magnet traction motors in locomotives[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2019(10):8-11.(in Chinese)

[41] 李会兰, 周立安, 晏才松, 等. 某永磁直驱电机温度场仿真分析及其优化[J]. 时代农机, 2020, 47(3):102-105.
LI H L, ZHOU L A, YAN C S, et al. Simulation analysis and optimization of temperature field of a permanent magnet direct driver[J]. Times Agricultural Machinery, 2020, 47(3): 102-105.(in Chinese)