DOI: 10.3901/JME.2020.22.219

横风作用下跨线运行动车组转向架气动力变化规律研究*

黄尊地¹ 池茂儒² 冯永华³ 常宁¹ 王前选¹

(1. 五邑大学轨道交通学院 江门 529020;

2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;

3. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 青岛 266111)

摘要: 为跨线运行动车组自适应转向架的设计提供理论依据,开展不同横风风速下高-低速动车组转向架气动力变化规律研究。建立三维模型,生成混合网格,采用 k-epsilon 双方程湍流模型进行稳态计算以及 Large Eddy Simulation 进行非稳态计算,并通过风洞试验验证其准确性。耦合车速和风速,基于上述仿真算法得出结论:各个转向架的阻力和侧向力变化规律基本一致;动车组运行速度对转向架阻力的影响敏感度大于横风风速,中间车转向架受到的阻力较大;横风风速对转向架侧向力的影响敏感度大于动车组运行速度,尾车转向架的侧向力明显较大,横向运行稳定性最差;转向架1和转向架6的垂向力变化规律类似,转向架2至转向架5的垂向力变化规律类似。

关键词: 横风;跨线运行;动车组转向架;气动力;风洞试验;数值计算

中图分类号: U270

Study on the Aerodynamic Change Law of EMU Bogies of Running-across-lines under Cross-wind Effect

HUANG Zundi¹ CHI Maoru² FENG Yonghua³ CHANG Ning¹ WANG Qianxuan¹

(1. School of Rail Transportation, Wuyi University, Jiangmen 529020;

2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

3. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111)

Abstract: Research on the aerodynamic change law of high-low speed EMU bogies under different cross wind speed are carried out. Research results provide theoretical basis for the design of EMU adaptive bogies of running across lines. A three-dimensional model is established, and a hybrid mesh is generated. The k-epsilon double-equation turbulence model is used for steady-state calculations and Large Eddy Simulation is used for unsteady-state calculations. The accuracy is verified by wind tunnel test. Coupling vehicle speed and wind speed, based on the above simulation algorithm, it is concluded that change law of drag and the lateral force of each bogie is basically consistent; the effect of EMU speed on the drag of bogies is greater than that of cross wind speed; the drag of bogies of the intermediate vehicle are relatively large; the effect of cross wind speed on the lateral force of the bogie is greater than that of EMU speed; the lateral force of the tail car bogies are significantly larger, and the lateral running stability are the worst; the vertical force law of bogies 1 and 6 are similar, and law of bogies 2 to 5 are similar.

Key words: cross wind; running across lines; EMU bogies; aerodynamic; wind tunnel test; numerical calculation

0 前言

转向架位于车体与轨道之间,引导车辆沿钢轨

行驶,承受来自车体及线路的各种载荷并缓和力的作用,是保证车辆运行品质的关键部件。列车运行速度的不断提高,伴随很多力学问题^[1],尤其是轨道交通空气动力学问题^[2],包括空气阻力激增、气动噪声污染和横风运行稳定等问题。列车高速近地面运行,加上环境风荷载的作用,导致转向架不仅影响轮轨关系及地面效应,还影响列车的气动性能

* 国家重点研发计划“先进轨道交通”重点专项(2018YFB1201701-07)和广东省基础与应用基础研究基金青年基金(2019A1515111052)资助项目。20191223 收到初稿,20200306 收到修改稿

及行车安全。目前因侧风效应所引起的列车安全性问题分析较多^[3-7],引起的转向架气动特性的研究较少^[8-11]。

DONG 等^[12]研究了转向架的简化效果对列车和转向架周围流场和气动性能的影响,WANG 等^[13]结合转向架结构形状和运行环境开展了高速列车转向架周围流场及积雪的影响研究。除了研究转向架周围流场外,文献[14]采用数值计算方法,开展了横风作用下转向架非定常空气动力特性研究,分析了转向架气动载荷的时域特性和频域特性。蔡华闽等^[15]建立列车空气动力学模型,开展了不同车速无横风风速的数值模拟,分析了动车和拖车转向架的气动性能,其中头车一位端转向架的阻力最大。苑玉展等^[16]基于空气动力学数值模拟方法,针对列车不同部位的转向架和转向架结构表面的气动阻力分布进行分析,对高速动车组列车整车气动效应进行数值仿真,结果表明列车头车转向架受到的阻力最高。郑循皓等^[17]采用数值计算方法开展了高速列车转向架空气阻力的数值模拟研究,在无侧风条件下,头车一位端转向架阻力最大;当有一定横风风速时,转向架 4 的阻力最大。以上文献中,仅见文献[17]开展了横风风速为 10 m/s、车速为 400 km/h 一个工况转向架阻力的研究,风-车速耦合作用下转向架气动力的变化规律未见系统分析。

本文结合以上内容,采用研究常用的数值方法分析计算,并用风洞试验验证其准确性;基于准确的网格模型和数值算法,计算不同横风风速下高低速动车组转向架的气动载荷,进而分析其阻力、横向力和垂向力的变化规律,为跨线运行动车组自适应转向架的设计提供理论依据。

1 算法验证

1.1 数值算法

根据流体力学计算公式,马赫数小于 0.3,气体按照不可压缩属性设置;气体密度恒为 1.225 kg/m^3 ,特征长度取车体高度 3.7 m,雷诺数达到 1.5×10^7 ,列车周围流场处于强湍流状态。为了保证湍流的充分发展,首先进行定常、黏性和不可压缩流的稳态计算。稳态计算采用 N-S 方程和 k-epsilon 两方程湍流模型描述,其中壁面采用 Standard Wall Functions 处理;速度、压力耦合方式采用 SIMPLE 算法,方程采用二阶迎风格式离散。迭代次数为 4 000 次,保证稳态计算的充分收敛,在 16 核 CPU 上计算的时间为 24 h。

以稳态计算的结果作为初始条件,开始大涡模拟的计算。大涡模拟采用 Large Eddy Simulation 里面的 Smagorinsky-Lilly 模型,速度、压力耦合方式采用 PISO 算法,方程采用中心差分格式离散。大涡模拟对网格和计算资源的要求很高,这也是网格模型生成高质量的结构网格和附面层网格的原因;时间步长的设置也会对计算结果影响很大,所以要求 CFL Number 设置为 1,根据 Courant Number 的计算公式,时间步长设置为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}$,也可以很好地保证频域 2 000 Hz 的要求;同时,大涡模拟对计算平台也有较高的要求,为了使计算较快收敛和保证结果精度等,本文选择国家超算广州中心的天河 2 号超级计算机,采用 128 个 CPU 进行并行计算,计算 1 s 的时间长度需要 72 h。

1.2 风洞试验

本文选择风洞试验进行验证数值模拟中网格划分和算法设置的正确性。风洞试验在中南大学轨道交通安全教育重点实验室的风洞基地进行。风洞基地为回字形结构,有低速和高速两个试验段,低速试验段尺寸为 $3.2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$,高速试验段尺寸为 $3.4 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$,具体布局如图 1 所示。本次试验在高速段进行,横断面尺寸为 $1 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$,最高风速可达 60 m/s;动车组模型为原车 1:100 的缩比模型,具体模型如图 2 所示,其中迎风侧 1~8 测点位于图片中车体中部。

图 1 风洞试验模型(m)

图 2 风洞试验静压及车体表面测点

为了更加有效地进行验证分析,数值计算模型缩小 100 倍,与风洞试验同时采用 1:100 的模型记录下相同测点的数据。风洞试验具体内容详见论文[18],经结果对比,数值计算和风洞试验的均值误差在 5% 以内,满足工程精度要求。通过风洞试验验证,得出数值计算结果可信,算法可行。

2 计算模型

2.1 车辆模型

动车组拥有比较多复杂的车上及车下设备, 本次研究的内容主要是动车组转向架的气动载荷, 所以对 CRH₂ 车体表面的突出部件进行简化, 忽略掉车门窗结构、去掉受电弓和雨刮等, 把车体进行光滑处理。

列车中部截面不变, 缩短的模型不改变列车流场结构的基本特征, 为了节省成本, 减小计算量, 所以缩短 CRH₂ 动车组的计算长度。简化后的 CRH₂ 动车组模型由头车+中间车+尾车三节车组成。车体全长 77.4 m, 车体最大宽度 3.4 m, 最大高度 3.7 m, 头车和尾车长度均为 25.7 m, 中间车长度为 25 m, 风挡长度为 0.5 m。整车结构如图 3 所示, 由头车一位端转向架依次往后到尾车二位端转向架, 分别标记为转向架 1、2、3、4、5 和 6。

图3 动车组计算模型(m)

2.2 网格模型

将计算模型导入到 ANSYS ICEM 中, 根据整体的计算域来创建整体的块, 计算域具体尺寸详见图 4。按照动车组和转向架的外轮廓对刚生成的整体块进行切分; 划分完毕后, 还要注意一些点、线、面的映射关系; 把转向架区域单独分割出来。为了更好地保证车体附面层网格质量, 网格模型中生成车体的外 O-block 结构, 其中附面层第一层网格的厚度设置要满足 Yplus 的要求; 沿着车体表面向外均匀过渡地生成结构网格, 网格都往车身方向加密, 避免网格过于突兀, 保证网格质量; 转向架区域结构较为复杂, 生成非结构网格。整个计算域体网格数量达到 1 500 万左右, 具体网格模型如图 5 所示。

图4 计算域及边界条件设置

图5 网格模型

2.3 边界条件

边界条件的设置如图 4 所示, 沿着 X 正向和 Y 正向分别为车速和风速的速度入口, X 负向和 Y 负向为压力出口; 地面为滑移壁面边界条件。我国兰新高铁以及东部沿海高铁受横风影响较为严重, 其最大风力可达 17 级, 所以最高风速为 60 m/s。计算风速分别为 10 m/s、20 m/s、30 m/s、40 m/s、50 m/s 和 60 m/s; 计算车速分别为 120 km/h、160 km/h、200 km/h、250 km/h、300 km/h、350 km/h 和 400 km/h。

3 结果分析

3.1 云图分析

CRH₂ 动车组运行速度为 0, 横风风速为 60 m/s 时, 各个转向架的压力云图如图 6 所示。

图6 转向架压力云图(Pa)

如图6所示,转向架在轨道和车体中间,流场情况较为复杂。当有风速无车速时,每一个转向架所受到的压力情况几乎是相同的,转向架迎风面受到正压,其余部分都是处于负压区,其中车轮表面受到的负压力最大。

CRH₂动车组运行速度为200 km/h,横风风速为60 m/s时,各个转向架的压力云图如图7所示。

图7 转向架压力云图(Pa)

图7所示,当车速和风速耦合作用时,转向架区域的流场更加复杂,其压力波动剧烈。转向架的正压力分布在列车运行方向和环境风的迎风面,其他的部位几乎都处于负压区。从头车开始,负压区范围越来越大。各个转向架的压力分布比车速为0 km/h有着明显的区别,头车、中间车和尾车转向

架的压力波动明显增大,车轮、车轴、构架、制动装置、中央悬挂以及牵引装置等受力较大。

CRH₂动车组运行速度为400 km/h,横风风速为60 m/s时,各个转向架的压力云图如图8所示。转向架区域的流场更加复杂,压力波动更加剧烈,转向架各组成部件的受力更大。

图8 转向架压力云图(Pa)

3.2 阻力分析

横风风速分别为10 m/s、20 m/s、30 m/s、40 m/s、50 m/s和60 m/s,动车组运行速度分别为120 km/h、160 km/h、200 km/h、250 km/h、300 km/h、350 km/h和400 km/h时,动车组各个转向架阻力随横风风速和列车运行速度耦合影响的变化规律云图如图9所示。

图 9 转向架阻力变化规律(N)

由图 9 可知, 动车组各个转向架阻力随横风风速和列车运行速度耦合影响的变化规律基本一致, 随横风风速的增大而增大, 随列车运行速度的增大而增大。动车组运行速度对转向架阻力的影响敏感度大于横风风速。当动车组运行速度低于 200 km/h(非高速运行时), 不同横风风速环境下转向架的阻力变化不大; 当动车组运行速度高于 200 km/h(高速运行时), 横风风速越高, 转向架阻力明显增大。

当横风风速为 60 m/s, 动车组运行速度为 400 km/h 时, 所有转向架中, 中间车转向架 4 的阻力最大, 其余转向架中的最小阻力为转向架 4 最大阻力的 60%。转向架 4 的阻力随横风风速和动车组运行速度的关系如图 10 所示。

由图 10 可知, 当动车组运行速度为 400 km/h 时, 转向架 4 的阻力与横风风速的 0.5 次方成正比; 当横风风速为 60 m/s 时, 转向架 4 的阻力与动车组运行速度的 1.6 次方成正比。

3.3 侧向力分析

横风风速分别为 10 m/s、20 m/s、30 m/s、40 m/s、50 m/s 和 60 m/s, 动车组运行速度分别为 120 km/h、160 km/h、200 km/h、250 km/h、

300 km/h、350 km/h 和 400 km/h 时, 动车组各个转向架侧向力随横风风速和列车运行速度耦合影响的变化规律云图如图 11 所示。

图 10 转向架 4 阻力变化规律

图 11 转向架侧向力变化规律

由图 11 可知,动车组各个转向架侧向力随横风风速和列车运行速度耦合影响的变化规律基本一致,随横风风速的增大而增大,随列车运行速度的增大而增大。横风风速对转向架侧向力的影响敏感度大于动车组运行速度。当横风风速低于 15 m/s(非大风以上风力等级),不同动车组运行速度下转向架的侧向力变化不大;当横风风速高于 15 m/s(大风以上风力等级),动车组运行速度越高,转向架侧向力明显增大。

当横风风速为 60 m/s,动车组运行速度为 400 km/h 时,动车组转向架位置越靠后,侧向力越大,横向运行稳定性越差。所有转向架中,尾车转向架 6 的侧向力最大,其余转向架中的最小侧向力为转向架 6 最大侧向力的 27%。转向架 6 的侧向力随横风风速和动车组运行速度的关系如图 12 所示。

由图 12 可知,当动车组运行速度为 400 km/h 时,转向架 6 的侧向力与横风风速的 1.5 次方成正比;当横风风速为 60 m/s 时,转向架 6 的侧向力与动车组运行速度的 0.68 次方成正比。

3.4 垂向力分析

横风风速分别为 10 m/s、20 m/s、30 m/s、40 m/s、50 m/s 和 60 m/s,动车组运行速度分别为 120 km/h、160 km/h、200 km/h、250 km/h、300 km/h、350 km/h 和 400 km/h 时,动车组各个

(a) 侧向力随风速变化规律

(b) 侧向力随车速变化规律

图 12 转向架 6 侧向力变化规律

转向架垂向力随横风风速和列车运行速度耦合影响的变化规律云图如图 13 所示。垂向力定义在 Z 轴上,方向为正时为升力,方向为负时为压力。

图 13 转向架垂向力变化规律

由图 13 可知,在横风风速和列车运行速度耦合影响下,转向架 1 和转向架 6 的垂向力变化规律类似,转向架 2 至转向架 5 的垂向力变化规律类似。

当横风风速为 60 m/s,动车组运行速度为 400 km/h 时,所有转向架中,尾车转向架 6 的压力最大。转向架 6 的压力随横风风速和动车组运行速度的关系如图 14 所示。

图 14 转向架 6 垂向力变化规律

由图 14 可知,当动车组运行速度为 400 km/h 时,转向架 6 的压力随横风风速的增大而增大;当横风风速为 60 km/h 时,转向架 6 的压力随动车组运行速度的增大而增大。

4 结论

(1) 动车组各个转向架阻力随横风风速和列车运行速度耦合影响的变化规律基本一致,随横风风速的增大而增大,随列车运行速度的增大而增大。动车组运行速度对转向架阻力的影响敏感度大于横风风速。当动车组运行速度低于 200 km/h(非高速运行时),不同横风风速环境下转向架的阻力变化不大;当动车组运行速度高于 200 km/h(高速运行时),横风风速越高,转向架阻力明显增大。

(2) 当横风风速为 60 m/s,动车组运行速度为 400 km/h 时,所有转向架中,中间车转向架 4 的阻力最大。当动车组运行速度为 400 km/h 时,转向架 4 的阻力与横风风速的 0.5 次方成正比;当横风风速为 60 m/s 时,转向架 4 的阻力与动车组运行速度的

1.6 次方成正比。

(3) 动车组各个转向架侧向力随横风风速和列车运行速度耦合影响的变化规律基本一致,随横风风速的增大而增大,随列车运行速度的增大而增大。横风风速对转向架侧向力的影响敏感度大于动车组运行速度。当横风风速低于 15 m/s(非大风以上风力等级),不同动车组运行速度下转向架的侧向力变化不大;当横风风速高于 15 m/s(大风以上风力等级),动车组运行速度越高,转向架侧向力明显增大。

(4) 当横风风速为 60 m/s,动车组运行速度为 400 km/h 时,动车组转向架位置越靠后,侧向力越大,横向运行稳定性越差。所有转向架中,尾车转向架 6 的侧向力最大。当动车组运行速度为 400 km/h 时,转向架 6 的侧向力与横风风速的 1.5 次方成正比;当横风风速为 60 m/s 时,转向架 6 的侧向力与动车组运行速度的 0.68 次方成正比。

(5) 在横风风速和列车运行速度耦合影响下,转向架 1 和转向架 6 的垂向力变化规律类似,转向架 2 至转向架 5 的垂向力变化规律类似。当横风风速为 60 m/s,动车组运行速度为 400 km/h 时,所有转向架中,尾车转向架 6 的压力最大。

参 考 文 献

- [1] 杨国伟,魏宇杰,赵桂林,等. 高速列车的关键力学问题[J]. 力学进展, 2015, 45(7): 217-460.
YANG Guowei, WEI Yujie, ZHAO Guilin, et al. Research progress on the mechanics of high speed rails[J]. Advances in Mechanics, 2015, 45(7): 217-460.
- [2] 田红旗. 中国高速轨道交通空气动力学研究进展及发展思考[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 30-41.
TIAN Hongqi. Development of research on aerodynamics of high-speed rails in China[J]. Chinese Engineering Science, 2015, 17(4): 30-41.
- [3] 刘加利,于梦阁,张继业,等. 基于大涡模拟的高速列车横风运行安全性研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(4): 13-21.
LIU Jiali, YU Mengge, ZHANG Jiye, et al. Study on running safety of high-speed train under crosswind by large eddy simulation[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(4): 13-21.
- [4] 刘加利,张继业,张卫华. 基于大涡模拟的横风下高速列车非定常气动载荷特性[J]. 铁道学报, 2013, 35(6): 13-21.
LIU Jiali, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Study on characteristics of unsteady aerodynamic loads of a high-speed train under crosswinds by large eddy

- simulation[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(6): 13-21.
- [5] 郗艳红, 毛军, 高亮, 等. 基于分离涡方法的高速列车横风非定常气动特性[J]. 中南大学学报, 2015, 46(3): 1129-1139.
- XI Yanhong, MAO Jun, GAO Liang, et al. Aerodynamic force/moment for high-speed train in crosswind field based on DES[J]. Journal of Central South University, 2015, 46(3): 1129-1139.
- [6] 张亮, 张继业, 李田, 等. 横风下高速列车的非定常气动特性及安全性[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 124-135.
- ZHANG Liang, ZHANG Jiye, LI Tian, et al. Unsteady aerodynamic characteristics and safety of high-speed trains under crosswinds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 124-135.
- [7] 常宁, 梁习锋, 黄尊地, 等. 基于横风非定常的 CRH6 横截面优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2730-2737.
- CHANG Ning, LIANG Xifeng, HUANG Zundi, et al. Optimization research on cross-section of CRH6 by unsteady aerodynamic characteristics under crosswind[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(11): 2730-2737.
- [8] GUO Zijian, LIU Tanghong, CHEN Zhengwei, et al. Aerodynamic influences of bogie's geometric complexity on high-speed trains under crosswind[J]. Journal of Wind Engineering&Industrial Aerodynamics, 2020(196): 1-12.
- [9] ZHANG Jie, WANG Jiabin, WANG Qianxuan, et al. A study of the influence of bogie cut outs' angles on the aerodynamic performance of a high-speed train[J]. Journal of Wind Engineering&Industrial Aerodynamics, 2018(175): 153-168.
- [10] WANG Shibo, DAVID B, ASTRID H, et al. The effect of bogies on high-speed train slipstream and wake[J]. Journal of Fluids and Structures, 2018(83): 471-489.
- [11] ZHU J Y, HU Z W. Flow between the train underbody and trackbed around the bogie area and its impact on ballast flight[J]. Journal of Wind Engineering&Industrial Aerodynamics, 2017(166): 20-28.
- [12] DONG Tianyun, LIANG Xifeng, SINISA K, et al. Effects of simplifying train bogies on surrounding flow and aerodynamic forces[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2019(191): 170-182.
- [13] WANG Jiabin, ZHANG Jie, ZHANG Yan, 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&Industrial Aerodynamics, 2018(176): 211-224.
- [14] 郗艳红, 毛军, 高亮, 等. 横风作用下高速列车转向架非定常空气动力特性[J]. 中南大学学报, 2014, 45(5): 1705-1714.
- XI Yanhong, MAO Jun, GAO Liang, et al. Aerodynamic force/moment for high-speed train bogie in crosswind field[J]. Journal of Central South University, 2014, 45(5): 1705-1714.
- [15] 蔡华闽, 张继业, 李田. 高速列车转向架区域气动特性及流场规律研究[J]. 机械工程学报, 2018, 52(12): 49-57.
- CAI Huamin, ZHANG Jiye, LI Tian. Research on aerodynamic performance and flow field of high speed train bogie region[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 52(12): 49-57.
- [16] 苑玉展, 尚克明, 杜健, 等. 可变编组高速列车转向架气动阻力特征研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(12): 2921-2927.
- YUAN Yuzhan, SHANG Keming, DU Jian, et al. Aerodynamic characteristic of train bogie under different marshalling formats[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(12): 2921-2927.
- [17] 郑循皓, 张继业, 张卫华. 高速列车转向架空气阻力的数值模拟[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(2): 45-51.
- ZHENG Xunhao, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Numerical simulation of aerodynamic drag for high-speed train bogie[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(2): 45-51.
- [18] 黄尊地, 梁习锋, 常宁, 等. 基于 LES 的城际动车组车体横断面优化设计[J]. 华南理工大学学报, 2018, 46(9): 109-115.
- HUANG Zundi, LIANG Xifeng, CHANG Ning, et al. Optimization research on cross-section of intercity electric multiple units (EMU) body based on large eddy simulation (LES)[J]. Journal of South China University of Technology, 2018, 46(9): 109-115.

作者简介: 黄尊地, 男, 1987 年出生, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为轨道交通空气动力学。

E-mail: wyuhzd@163.com

池茂儒(通信作者), 男, 1973 年出生, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆系统动力学。

E-mail: cmr2000@163.com