

文章编号:1671-1637(2021)01-0059-22

中国高速列车气动减阻优化综述

李 田¹,戴志远¹,刘加利²,吴 娜³,张卫华¹

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031; 2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111; 3. 中车长春轨道客车股份有限公司,吉林 长春 130062)

摘 要:研究了中国高速列车气动减阻优化进展,总结了典型部件的压力分布特性与各部件在列车气动阻力中的贡献占比,评析了风洞试验、风洞试验与数值模拟 3 种列车气动阻力研究方法,论述了和谐号、复兴号等系列列车头型气动性能的差异,阐述了高速列车头型气动减阻优化方法与技术,梳理了转向架区域、车端连接处、受电弓及导流罩等局部不平顺区域的气动减阻措施,归纳了适用于高速列车的前沿减阻技术。研究表明:数值模拟和风洞试验各有优缺点,经过风洞试验有效验证的数值模拟是准确计算列车气动阻力的有效途径;列车气动阻力中贡献占比的主要部件为头车、尾车、转向架、受电弓与车端连接处;由于现有高速列车的高度流线化,头型优化较难实现大幅度的减阻,改善转向架区域裙板、设计全包外风挡与优化受电弓和导流罩外形是进一步减阻的有效措施;减阻降噪、提升运行平稳性和舒适性等多目标优化是列车头型设计的发展趋势,通过直接寻优计算或者代理模型寻优计算能够提高优化效率与降低优化设计成本;未来应重点研究高速列车的仿生表面微结构、吹吸气流动控制、等离子体减阻与涡流发生器减阻技术,实现中国高速列车的绿色、节能、高速化发展。

关键词:高速列车;减阻优化;空气动力学;气动阻力;数值模拟

中图分类号:U271.91 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.01.003

Review on aerodynamic drag reduction optimization of high-speed trains in China

LI Tian¹, DAI Zhi-yuan¹, LIU Jia-li², WU Na³, ZHANG Wei-hua¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, Shandong, China; 3. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, Jilin, China)

Abstract: The progress on aerodynamic drag reduction optimization of high-speed trains in China was studied. The pressure distribution characteristics of typical components and the contribution of each component to the train's aerodynamic drag were summarized. Three research methods for obtaining train aerodynamic drag, including full-scale experiments, wind tunnel tests, and numerical simulations, were evaluated. The differences in aerodynamic performances of train heads of Hexie and Fuxing were discussed. The optimization methods and technologies of aerodynamic drag reduction for high-speed train heads were expounded. The aerodynamic drag

收稿日期:2020-09-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFA0710902);四川省科技计划项目(2019YJ0227);中国博士后科学基金项目(2019M663550);牵引动力国家重点实验室自主课题(2019TPL_T02)

作者简介:李 田(1984-),男,湖南醴陵人,西南交通大学副研究员,工学博士,从事列车空气动力学研究。

引用格式:李 田,戴志远,刘加利,等.中国高速列车气动减阻优化综述[J].交通运输工程学报,2021,21(1):59-80.

Citation:LI Tian, DAI Zhi-yuan, LIU Jia-li, et al. Review on aerodynamic drag reduction optimization of high-speed trains in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 59-80.

reduction measures of bogies, inter-car connections, pantographs, and deflectors were analyzed, and the potential technologies suitable for high-speed train drag reduction were summarized. Analysis results show that there are both advantages and disadvantages of numerical simulation and wind tunnel test, the numerical simulation as validated by the wind tunnel test is an effective means of accurately calculating the aerodynamic drag of the train. The main components contributing to the aerodynamic drag of the train are leading car, trailing car, bogie, pantograph, and inter-car connection. As existing high-speed trains are highly streamlined, achieving further drag reduction by optimizing the head shape is difficult. Optimizing the skirts of the bogie area, incorporating an all-inclusive outer windshield, and optimizing the pantograph and deflector shape are effective measures for further reducing drag. The optimization of multiple objectives including drag and noise reduction and improvements to operational stability and riding comfort are the developmental trends of train head shape design. Through direct optimization calculation or surrogate model optimization calculation, the optimization efficiency can be improved, and the optimization cost can be reduced. In the future, bionic surface microstructure, blowing and suction flow control, plasma drag reduction, and vortex generator technologies should be further studied to achieve green, energy-saving, and rapid development of high-speed trains in China. 1 tab, 20 figs, 109 refs.

Key words: high-speed train; drag reduction and optimization; aerodynamics; aerodynamic drag; numerical simulation

Author resume: LI Tian(1984-), male, associate professor, PhD, litian2008@home.swjtu.edu.cn.

Foundation items: National Key Research and Development Program of China(2020YFA0710902); Sichuan Science and Technology Program(2019YJ0227); China Postdoctoral Science Foundation(2019M663550); Independent Subject of State Key Laboratory of Traction Power(2019TPL_T02)

0 引 言

中国高速列车的发展经历了“自主研发-引进-消化-吸收-再创新”阶段。“自主研发”阶段自“八五”国家科技攻关计划正式开始,“九五”期间完成了“先锋号”、“中华之星”等第一代高速列车核心零部件研制及总体技术研究,包括高速转向架、网络系统、制动系统研制和列车气动外形优化设计等,“中华之星”列车最高试验速度达到 $321.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。自 2004 年起,中国开始从日本、法国、德国等国家引进先进的高速列车技术,打造了“和谐号”CRH1、CRH2、CRH3 与 CRH5 系列高速列车,运营速度为 $200 \sim 350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。随着京津、武广等线路的开通运营,中国高速铁路进入快速发展时期,“十一五”期间“两部联合行动”计划推动了中国高速列车的再创新,CRH380 系列高速列车研发成功,其目标运行速度为 $380 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,最高试验速度达到 $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上^[1-3]。“十三五”期间,拥有完全自主知识产权的“复兴号”CR400 系列高速列车下线运营,标志着中国高速列车标准体系的形成。高速列车是创新型国

家建设的重大突破和自主创新的标志性成果,已成为中国新的“形象代表”和“外交名片”。《中国制造 2025》提出“大力推动先进轨道交通装备领域的突破发展,研发新一代绿色智能、高速重载轨道交通装备系统”;《交通强国建设纲要》中提出“强化节能减排和污染防治,合理统筹安排时速 400 公里级高速轮轨客运列车系统等技术储备研发”。中国高速列车正朝着绿色、节能、高速化方向蓬勃发展。

列车空气动力学性能是高速列车设计的关键,包括列车基本气动特性、横风气动特性、明线交会气动效应、隧道空气动力学效应和气动噪声等。截止目前,国内外有多篇综述性论文介绍列车空气动力学的进展:Baker^[4-5]介绍了列车空气动力学中建模和计算技术,对明线运行、有侧风运行、明线交会、隧道通过等工况下列车的流场进行了分析,概述了列车周围的主要流动特征,探讨了现代列车设计和运行中需要关注的一些问题;Hajipour 等^[6-8]综述了高速列车气动性能及气动声学问题研究现状,包括试验技术、理论分析与数值计算方法,重点介绍了高速列车空气动力学存在问题的合理控制策略和解决方



图1 中国典型高速列车

Fig. 1 Typical high-speed trains in China

法;肖京平等^[9]论述了中国列车空气动力学的研究现状与进展;田红旗^[10-11]总结了我国高速轨道交通空气动力学的6个发展阶段,论述了以列车空气动力学、隧道空气动力学、弓网空气动力学等为主要内容的轨道交通空气动力学研究进展,并对列车空气动力学进行了展望。为规范列车空气动力学的术语、试验和仿真方法等,中国制定了《铁路应用 空气动力学》系列标准,2018年4月颁布了前4个部分,包括第1部分符号与单位(TB/T 3503.1—2018)、第2部分隧道空气动力学效应(TB/T 3503.2—2018)、第3部分隧道空气动力学要求与试验方法(TB/T 3503.3—2018)与第4部分列车空气动力学性能仿真规范(TB/T 3503.4—2018),剩余2部分内容仍在制定中,其内容分别为明线空气动力学要求与试验方法、横风评估和试验方法。

气动阻力是列车空气动力学中最关键的影响因素,随着运行速度越来越快,列车气动阻力在运行阻力中逐渐占主导地位。当列车运行速度为200~300 km·h⁻¹时,气动阻力约占列车运行总阻力的70%~75%;当列车运行速度超过300 km·h⁻¹,气动阻力占比超过列车运行总阻力的85%^[12-16]。气动阻力引起的能耗与列车运行速度平方呈线性关系,当列车运行速度超过300 km·h⁻¹时,列车气动阻力能耗超过牵引系统总能耗的80%^[17-18]。高速列车气动阻力引起的能耗损失显著,严重影响列车

运行经济性,并制约列车进一步提速,因此,中国众多学者对高速列车气动减阻开展了广泛而深入的研究。本文旨在归纳总结列车气动阻力的研究方法,阐述高速列车头型气动减阻优化进展,汇总并对比中国高速列车气动减阻主要措施及技术,对前沿高速列车减阻技术进行讨论与展望,为中国高速列车进一步气动减阻研究提供借鉴与参考。

1 列车气动阻力组成

根据标准 *Railway applications—Aerodynamics—Part 4: Requirements and Test Procedures for Aerodynamics on Open Track* (CSN EN 14067-4+A1—2010)中规定,列车运行阻力 F 与列车运行速度 v 的数学关系为

$$F = C_0 + C_1 v + C_2 v^2$$

式中: C_0 为常数项; C_1 为线性系数; C_2 为气动阻力系数; $C_0 + C_1 v$ 为列车的机械阻力以及动力设备冷却空气和车辆空调引起的气动阻力; $C_2 v^2$ 为气动阻力,包括压差阻力和黏性阻力。

列车头车、尾车与各中间车的阻力分布规律各异,并且在受电弓、转向架、空调整流罩、车端连接处等部位的阻力分布更加复杂。姚栓宝等^[15]对整车阻力分布规律的研究表明:8节编组的高速列车压差阻力约占列车气动阻力的75%,黏性阻力约占25%;头车、尾车、16个转向架、2个受电弓与7个车

端连接处分别占列车气动阻力的 16.1%、15.4%、26.2%、12%与 19.3%。

列车头车流线型部位正压、尾车流线型部位负压、转向架前后压力差、受电弓前后压力差、空调前后压差等是压差阻力的重要来源,列车头车、尾车表面压力分布如图 2 所示^[19],列车纵向中心截面压力分布及车体表面黏性阻力系数如图 3 所示。排障器处的正压最大,头车鼻尖处的正压次之;排障器后方的负压幅值最大,司机室玻璃后部及车身两侧有部分负压,转向架区域附近也出现较大的负压。对于尾车,车体大部分区域为负压,由于流动分离,流线型局部区域出现正压。高速列车的黏性阻力随着边界层的发展整体趋势由车头向车尾递减,但是在头

尾车流线型区域及列车的风挡区域出现了波动,头尾车黏性阻力的波动是因为出现了流动分离和流动再附着现象,风挡处黏性阻力系数的突变主要是车体出现间隙,截面突变导致的。

转向架压力分布如图 4 所示。动车转向架与拖车转向架的结构有较大差异,动车转向架有较突出的牵引电机和齿轮箱,拖车转向架在对应位置是前后制动盘,此外,动车转向架上方有冷却电机用的通风管道,因此,2 种转向架的压力分布明显不同。动车转向架的正压区域主要是轮对、轴箱与构架等部件底部迎风面,牵引电机、齿轮箱与枕梁上部也有较大的正压,而拖车转向架的正压区域主要集中在轮对、轴箱、构架、制动装置等部件底部迎风面。

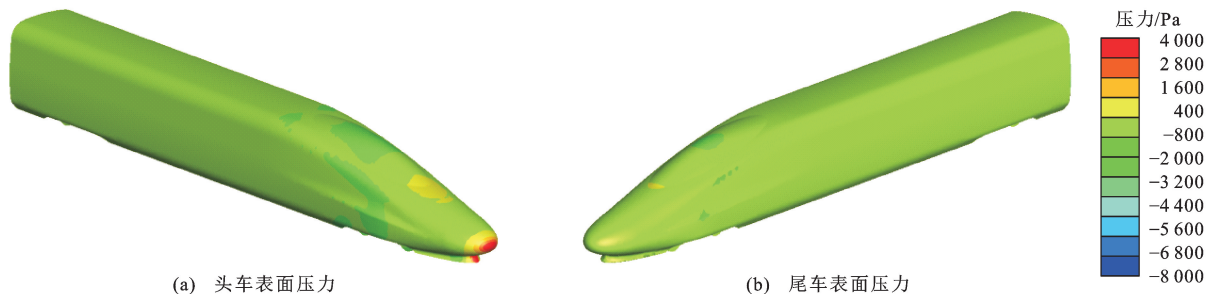


图 2 CRH380A 列车表面压力分布

Fig. 2 Surface pressure distributions of CRH380A train

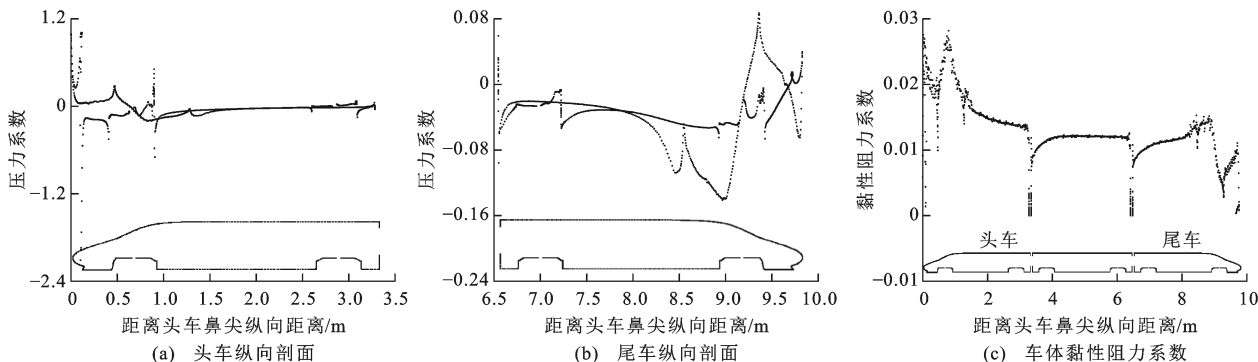


图 3 CRH380A 列车车体压力与黏性阻力系数

Fig. 3 Coefficients of pressure and friction for CRH380A train body

受电弓一般安装在 2 车和 7 车车顶,其阻力贡献较大。受电弓表面压力分布如图 5 所示:开口运行工况下,大部分的正压都集中在滑板、导风板、弓头转轴与上下臂杆连接处的迎风侧,因此,这些部件的阻力也较大;闭口运行工况下,正压主要集中在滑板、导风板和弓头转轴的迎风侧;无论开闭口运行,底座和绝缘子迎风侧的正压都比较大,阻力也较大。李田等^[20]对某高速受电弓进行了数值模拟,研究表明列车运行速度分别为 400 和 500 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,其阻力分别约为 3 950 N 和 5 000 N。

2 列车气动阻力研究方法

针对高速列车受到的气动阻力,目前研究方法主要是试验与数值模拟 2 大类,试验包括惰行试验和风洞试验,数值模拟主要是通过商用或自主开发的软件并借助于高性能计算机开展数值计算。

2.1 惰行试验

惰行试验是实车试验中专门用于测量列车运行阻力的有效手段,理想情况是在切除动力情况下,列车运行速度从最大允许运行速度降到零,测得列车

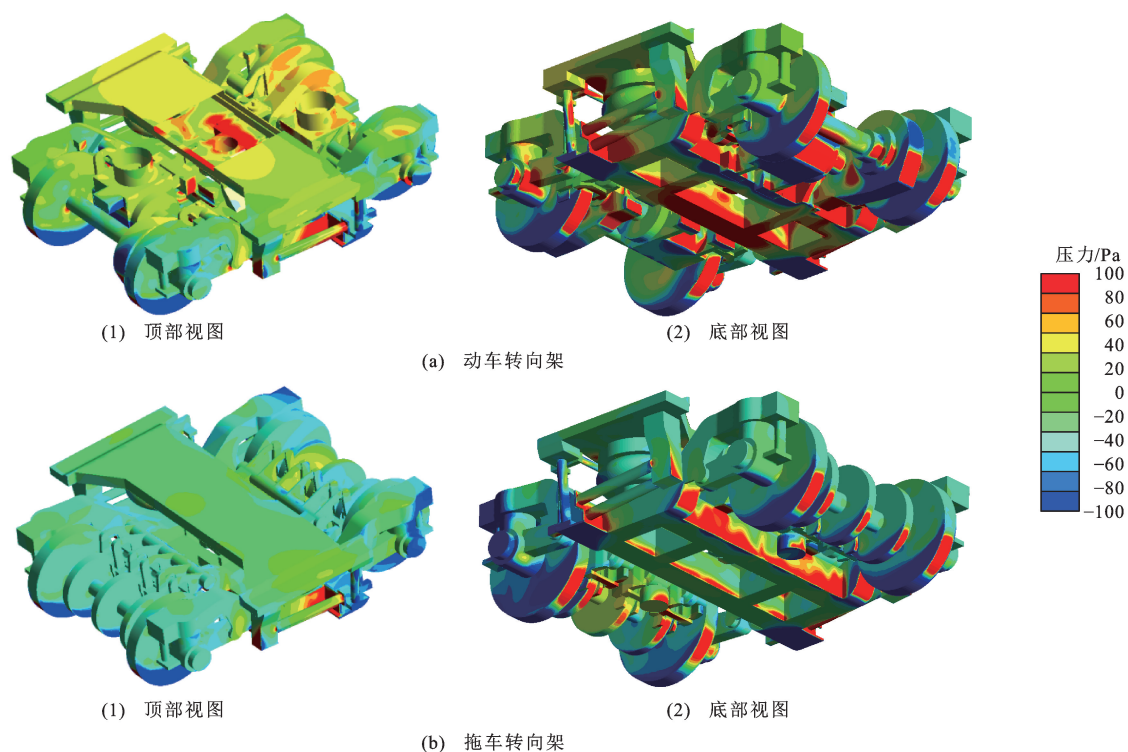


图 4 高速列车转向架压力分布

Fig. 4 Bogie pressure distributions of high-speed train

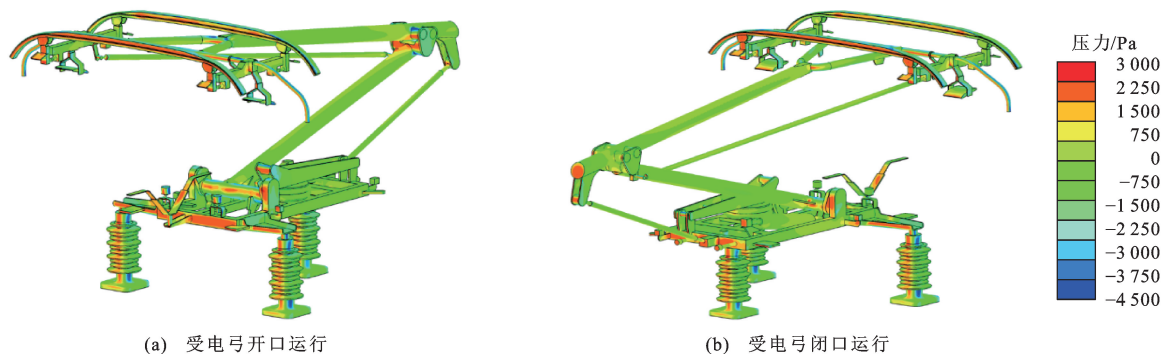


图 5 受电弓表面压力分布

Fig. 5 Surface pressure distributions of pantograph

运行阻力 F 为^[21]

$$F = km\gamma$$

式中: k 为旋转能量系数,通过让列车以较低的初始速度上坡滑行直到列车停止的方法可以确定; m 为列车质量; γ 为列车在惰行试验中测得的加速度,可在惰行试验期间直接测量或通过计算 2 次时间间隔的速度导数得到。

根据标准《列车牵引计算规程》(TB/T 1407—1998)中的要求,试验段轨面黏着条件良好且轨道尽可能平直,试验区间段环境风风力小于 2 级且无雨雪天气。利用惰行试验得到列车运动阻力的试验数据处理方法主要为回归分析法和速度时程确认法。

CRH2、CRH3 与 CRH380B 这 3 种典型高速列

车的惰行试验阻力曲线如图 6 所示; CRH380B 高速列车运行阻力的确定是在 CRH3 高速列车降阻优化方案的基础上提出的,其阻力性能优于 CRH3 高速列车; CRH2 与 CRH3 高速列车在运行速度小于 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的情况下运行阻力差别不大,运行速度大于 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以后,2 种型号列车的运行阻力差异越来越大,差异主要是空气阻力引起的; CRH2 与 CRH3 高速列车相比,CRH2 高速列车阻力系数较小,主要是因为头部长细比较大,且横截面较小,CRH2 的横截面积为 11.22 m^2 ,CRH3 横截面积为 11.77 m^2 ,另外,CRH2 高速列车采用半外包风挡设计,空调设置在车下设备舱,都起到降低气动阻力系数的作用。

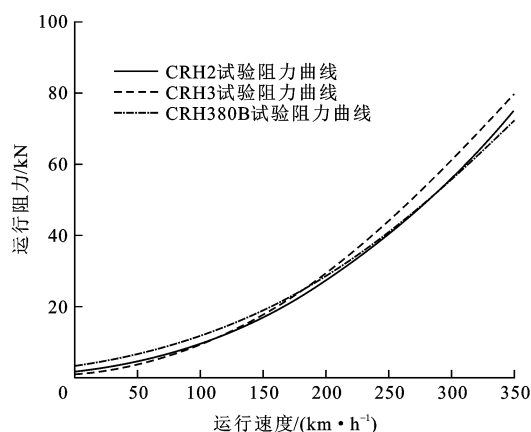


图6 CRH2、CRH3与CRH380B高速列车惰行试验阻力曲线

Fig. 6 Idle running test resistance curves of CRH2, CRH3 and CRH380B high-speed trains

惰行试验是列车型式试验的一项关键内容,不过该试验往往是在列车设计完成后^[22],所以导致惰行试验更多的是校核列车设计阻力曲线的准确性,而非指导列车气动外形减阻优化设计。

2.2 风洞试验

高速列车风洞试验主要是利用相对运动原理以及流动相似原理研究列车与空气之间的相互作用并测量的列车气动特性,如图7所示^[23-24]。在风洞试验过程中,列车静止不动,吹风气流速度与列车速度大小相同,方向相反,按照相对运动原理,列车受到的气动力与列车在静止空气中运动受到的气动力近似相同。

根据试验目的及研究内容,列车风洞试验可以分为部件试验与整车试验,其中部件试验主要是研究列车头型、受电弓、空调导流罩、裙板、风挡等对列车气动性能的影响,尤其是研究各部位气动减阻措施。目前,中国开展列车风洞试验的主要单位包括中国空气动力研究中心和中航工业空气动力研究院等。张在中等^[25-27]通过风洞试验对比不同头型的列车在明线单车运行、横风工况运行的气动阻力,研究流线型部位与气动阻力的关系,并得到气动阻力较小的高速列车头型;蔡国华^[28]通过对2种高速列车受电弓进行风洞试验,对比优化受电弓的框架结构以减小整弓阻力,试验结果表明2种受电弓的框架气动阻力差异很大,弓架还有较大的优化空间;孙健等^[29]通过风洞试验研究不同类型裙板对列车气动阻力的影响,发现无论有无侧风,全裙板都是减阻效果最优的方案,无裙板方案的气动阻力最大。整车试验主要研究空气动力学性能是否满足设计要求,列车运行的极限工况以及列车对周围运行环境

的影响等^[30]。

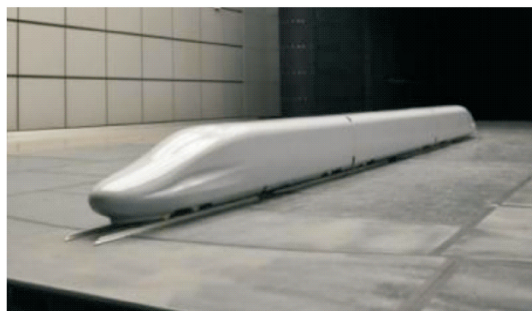
一般情况下,风洞试验与高速列车运行的环境介质都是常压空气,因此,列车风洞试验满足比热比、普朗特数和弗劳特数等相似准则,但列车风洞试验仍存在以下不足之处。

(1) 缩比尺度效应。风洞试验目前无法进行1:1整车试验,选择的列车模型缩比尺度一般为1:8或1:16,导致风洞试验列车雷诺数与实际运行列车有所差异。虽然部分研究表明高速列车风洞试验也存在自模拟区,若保证雷诺数接近 10^6 ,模型试验的气动力随雷诺数的变化就很小,试验结果可以反映实际运营列车受到的气动特性^[31-32],但是这始终是影响试验精确性的因素。韩运动等^[33]研究了不同运行工况下高速列车缩比尺度对气动力的影响规律,模型缩比尺度减小,头车和整车的气动阻力系数增大,升力系数减小。此外,模型缩比尺度对列车通过隧道和交会运行时的压力波也有一定的影响。

(2) 地面效应。在风洞试验气动力测量过程中,地面环境的模拟将直接影响到试验结果,尤其对气动阻力的影响更大^[34-35]。夏超等^[36]研究了不同地面效应对列车气动性能的影响,研究结果表明地面效应会严重影响风洞试验测量结果,并且采用抬高模型的方法并不能完全消除地面效应,但是采用移动地面的方法可以较好地消除地面效应。此外,还可在通过地面加装吹吸气装置、开槽等方法消除地面边界层效应,但是上述方法的成本都比较高。为了减缓地面效应,风洞试验列车模型底部往往增加一个简化的路基模型。黄志祥等^[37]研究了路基模型尺寸等对列车气动性能的影响,发现无路基情况下头车、中间车和尾车的气动阻力都大于有路基情况,不过路基存在边界层效应,可能会影响试验结果的准确性。Zhang等^[38]利用数值模拟方法研究了地面效应以及轮对旋转对列车气动性能的影响,结果表明旋转轮对会增加转向架的气动阻力,采用滑移地面且轮对旋转时,转向架阻力增大了15%。

(3) 缺乏高速列车风洞标准模型。中国高速列车风洞试验技术和测量技术缺乏国内标准,在汽车风洞试验领域,通过标准汽车模型可以验证风洞试验水平,并进行测试结果修正^[39]。然而,高速列车风洞试验缺乏相应的列车标准模型,因此,风洞试验的测试结果仍需要进一步对比研究及校核。

(4) 模型简化。相比实际运营列车,风洞试验列车转向架模型往往仅由轮对及构架组成,缺乏电机/制动盘、空气弹簧等较大尺寸部件。此外,为了测力



(a) CRH380A高速列车风洞试验



(b) 某型号高速列车风洞试验

图 7 高速列车风洞试验

Fig. 7 Wind tunnel tests of high-speed train

天平能够测得每节车厢的气动力,列车模型车辆间风挡存在一定的间隙,一般为 5 mm。转向架模型的简化及风挡间隙可能会对气动测量结果存在一定得影响。Li 等^[40]利用数值模拟方法研究了风洞试验中列车模型风挡间隙对整车气动阻力的影响,为风洞试验列车模型风挡间隙设置提供了参考。

列车风洞试验方法及标准模型等将在制定中的《铁路应用 空气动力学》系列标准的“横风评估和试验方法”部分补充完善。

2.3 数值模拟

风洞试验存在一定的局限性,而且试验成本较高。相比之下,数值模拟计算在处理地面边界效应、缩比尺度问题以及成本上具有明显优势,理论上列车空气动力学的所有问题都可利用数值模拟计算解决。

目前,中国主要采用自主研发软件或商用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件进行数值模拟计算。对于高速列车气动阻力的数值模拟计算,中国自主研发计算软件主要包括空气动力研究与发展中心和中南大学的三维流场数值计算软件^[9];商用 CFD 软件主要包括 ANSYS、FLUENT、STAR-CCM+ 与 XFLOW 等,利用 ANSYS、FLUENT 软件数值模拟计算得到列车头尾车速度分布与周围流场如图 8 所示。

高速列车周围流场处于三维湍流状态,目前处理湍流问题的数值模拟方法主要分为 4 类:直接模拟(Direct Numerical Simulation, DNS),采用三维非稳态 N-S 方程对湍流直接计算,由于网格要求极高,直接模拟暂时无法应用于列车空气动力学;大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES),利用滤波函数将大尺度涡与小尺度涡分离开,对大尺度涡采用三维非稳态 N-S 方程直接计算,小尺度涡采用模型封闭计算;雷诺平均法(Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS),将湍流流场视为时均值与脉动量的叠加,计算平均运动而忽略各尺度的湍流脉动,从而大幅度减小计算量,相比前 2 种方法,雷诺平均法计算量小,计算速度相对较快,是列车空气动力学计算尤其是气动阻力模拟应用最广泛的一种数值计算方法^[41-44];分离涡模拟(Detached Eddy Simulation, DES),该方法结合了大涡模拟与雷诺平均法的优点,在列车近壁面采用雷诺平均法求解,距离列车壁面较远区域采用大涡模拟求解,以更好地捕捉流场信息。在 DES 模型基础上改进发展的还有 DDES 模型^[45]和 IDDES 模型^[46],都能更准确地求解流场及列车气动力。由于 DES 等模型能够较好地得到气动力的瞬态信息,DES 系列模型越来越广泛地应用于列车空气动力学数值模拟。

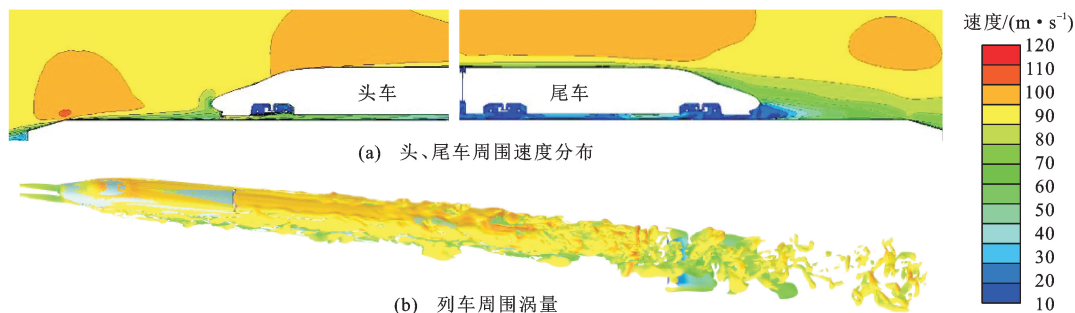


图 8 高速列车气动数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation results of aerodynamics for high-speed train

利用数值模拟方法研究高速列车气动阻力及其他气动特性也存在一定的局限性,例如计算网格^[47]、RANS 湍流模型^[48]、DES 湍流模型^[49]、计算区域^[50]等因素都能对计算结果产生较大的影响,虽然列车气动阻力数值模拟可以参考《铁路应用 空气动力学》系列标准中第 4 部分列车空气动力学性能仿真规范(TB/T 3503.4—2018),包括了基准检验、模型要求、计算区域、网格划分、湍流模型、计算方法、边界条件、监测点布置、计算时间、收敛准则等内容,但是数值模拟计算无法量化结果的精确度,还需将计算结果与风洞试验测试结果进行对比验证。

惰行试验、风洞试验与数值仿真 3 种列车气动阻力研究方法的优缺点如表 1 所示。惰行试验的局限性很大,虽能测试得到列车运行阻力曲线,但是对气候环境敏感且不能有效指导减阻设计;在高速列车空气动力学研究中,数值模拟和风洞试验各有优缺点,无法相互替代,需要各取所长,相互弥补,利用数值模拟的计算结果弥补并修正风洞试验地面效应、缩比效应、模型简化等方面的不足^[33,40];同样,利用风洞试验的测试结果指导并验证数值模拟计算结果,使其更加精准、可靠。

表 1 列车气动阻力研究方法的优缺点

Tab. 1 Advantages and disadvantages of research methods for train aerodynamic drag

方法	列车要求	平台要求	优点	缺点
惰行试验	实际编组 实车	线路、气候 环境	测试结果可信度最高;获得列车运行阻力曲线	受气候环境影响较大;不能有效指导减阻设计;试验次数较少
风洞试验	缩比模型 列车	高品质 风洞	测试结果可信度高	存在缩比尺度和地面效应;暂无标准模型;成本较高
数值仿真	计算机辅助设计 模型	高性能 计算机	计算结果可信度较高;获取空间流场信息;成本较低	依赖于试验结果验证;计算网格及方法等不确定性;较难准确模拟长大编组列车;受限于软件版权

3 列车气动减阻措施

高速列车气动减阻优化研究主要包括列车头型、转向架区域、车端连接处、受电弓与导流罩等优化。通过对以上部位进行优化,CR400AF 高速列车以 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行时总阻力比 CRH380A 降低了 12.3%;CR400BF 高速列车以 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行时总阻力比 CRH380B 降低了 7.5%^[51];在 CRH3 基础上,通过优化前端车钩、设备舱、导流罩以及外风

挡等部件和调整侧门车窗,CRH380B 列车车头气动阻力降低了 10%。

3.1 头型优化

列车头型对气动阻力的影响较大,无论是采用数值模拟还是风洞试验,中国对于高速列车气动减阻优化主要都是集中在头型优化,主要考虑流线型长度、单双拱与纵向最大外轮廓线等几个方面。

在高速列车头部流线型长度方面:张健^[26]以 1:10 的模型缩比尺寸在试验段为 $8 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 的风洞中对 6 种不同的高速列车头型进行试验,得到头车流线型长细比越大,列车气动阻力越小,但是头车流线型部位外形对中间车气动阻力的影响较小,此外,尾车流线型部位的外形对尾车阻力,尤其是压差阻力影响较大;舒信伟等^[52]采用数值模拟研究了不同流线型长度列车的气动力特性,得到了在其他条件相同时,头部流线型长度增加,列车的气动阻力和气动升力都降低;黄志祥等^[53]对某型号高速列车的原始头型与优化头型的 3 节编组列车进行风洞试验,试验结果表明头部流线型较长的优化头型的整车气动阻力比原始模型减小了 3.7%;张在中等^[25]对 CRH2 高速列车包括原始头型在内的 4 种不同长细比的头型进行风洞试验,发现头车流线型部位越长,流线型越光滑,鼻尖附近越尖锐减阻效果越好,当流线型长度接近时,头型长细比越大,列车气动阻力越小,因此,结合列车头部流线型长度方面的研究结果表明列车头部流线型长度越大,气动阻力越小。

缪新乐等^[27]对多种高速列车头型进行了风洞试验,这些头型是在 CRH380A 原始头型基础上经过优化计算得到的,试验结果表明:头型最长的列车具有最好的气动阻力特性,侧偏角为 0 时,在 $35 \sim 70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区间内改变风速,其阻力系数改变很小;当保证侧偏角不变时,该头型的头车、中间车和尾车与其他 3 种头型相比阻力系数均最小。CRH380A 高速列车是在 CRH2 列车的基础上研发的,其头部流线型长度约为 12 m,而 CRH2 列车的流线型长度仅为 9.4 m,CRH380A 列车也因此有较好的气动阻力特性。CR400AF 高速列车的流线型长度约为 12 m,虽然列车气动阻力会随着流线型长度的增加而减小,但是还应考虑头车高速列车载客量以及流线型长度过度增加带来的列车气动阻力减小幅值有限,因此,并不能无限制地拉伸列车流线型头部长度的。

对于单双拱头型:田红旗等^[17]对“中华之星”列车单拱和双拱 2 种头型进行了风洞试验,单拱模型

为列车头部流线型的最大纵向轮廓线呈外凸形状,双拱模型最大纵向轮廓线呈外凸与内凹结合的形状,试验结果表明,单拱头车与双拱尾车组合的气动阻力最小,头、尾车皆为双拱头型的气动阻力最大,说明单拱头型的气动阻力优于双拱头型;陈秉智等^[54]对 4 种不同头型的高速列车进行数值模拟,计算结果表明头车的单双拱头型对其运行阻力具有显著影响,并且单拱头型头车比双拱头型头车具有更好的气动性能,与风洞试验结论^[17]一致。CRH2 和 CRH380A 高速列车为双拱模型,CRH3、CRH380B 高速列车与标准动车组 CR400AF 和 CR400BF 高速列车都采用单拱模型。

在列车头部纵向最大外轮廓线和头型尖扁方面:舒信伟等^[52]对具有不同纵剖面轮廓线的列车头

型研究表明,在流线型长度一致的情况下,头部纵向最大外轮廓线上凸的头型头车气动阻力比最大外轮廓线下凹的小,中间车几乎没有差别,但是尾车气动阻力大;冯志鹏^[55]分析了由锥形水平轮廓 A、过渡水平轮廓 B、方形水平轮廓 C 与平直纵向剖面线①、平缓纵向外轮廓线②、外鼓形纵向剖面线③组合生成的多种列车头型如图 9 所示,结果表明变化较平缓的弧形外轮廓线②具有最好的气动阻力特性,平直纵向剖面线①的头型对应的列车的气动阻力居中,外鼓形纵向剖面线③的头型对应列车的气动阻力最大;头型尖扁的计算结果表明,头型鼻尖位置比较尖时,列车的气动阻力较小,随着鼻尖宽度增大,鼻尖由锥形逐渐改变为方形,列车气动阻力显著地逐渐增大。

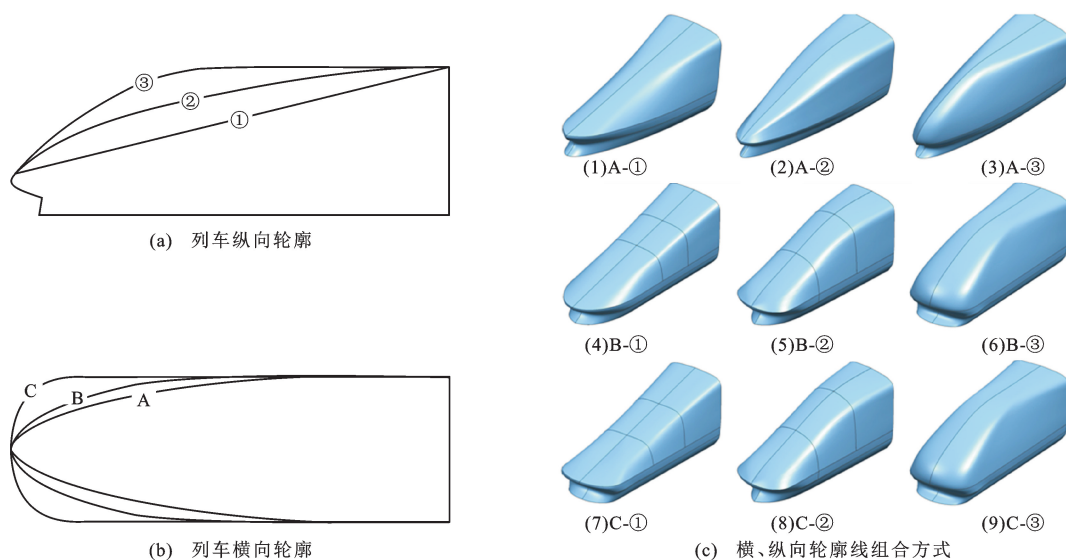


图 9 高速列车头型

Fig. 9 Head models of high-speed train

在头型优化的其他方面:朱卫^[56]研究了不同倾斜角度的简化列车头型的气动阻力特性,试验结果表明较小的倾角及小半径的鼻尖能够减小气动阻力,从整节车厢角度分析发现,头车头型部位后段的气动阻力明显大于头型部位,且头型的改变对后段的气动阻力影响较大;冯志鹏^[55]研究表明增大鼻尖高度,高速列车头车和尾车的阻力会逐渐增大,中间车阻力变化不大,此外尾车阻力的增长率大于头车,列车横截面积也是影响列车气动阻力的重要因素,其他条件相同的情况下,横截面积越大列车的气动阻力就越大。

对高速列车头型的优化研究表明:列车头部流线型区域越长,头车流线型长细比越大,列车气动阻力越小,但是流线型长度增加带来的气动阻力减幅

有限,同时考虑到头车载客量的问题,流线型部位也不可过长;头部最大纵向轮廓线为单拱时气动阻力性能优于双拱模型,单拱头车与双拱尾车组合的气动阻力最小,并且头部纵向最大外轮廓线上凸的头型头车气动阻力比最大外轮廓线下凹的小;对于头车横向轮廓线外形,锥形的气动阻力小于方形。

由以往的研究可以发现:风洞试验优化高速列车头型主要是通过优选的方式进行,对多个头型进行试验,根据试验结果选择气动阻力最小,或气动阻力较小,同时其他气动性能也较优的头型;优选的方式只能在有限的样本选择性能相对较好的头型,或研究关键参数与列车气动性能之间的规律后继续进行改进设计,这种优化成本巨大,且设计周期较长。后续第 4 部分将介绍列车多目标

气动减阻的优化技术。

3.2 转向架区域优化

转向架是列车底部的重要结构,但是高速列车的转向架结构较为复杂,运行时转向架区域会产生复杂的涡流,对列车的气动性能有很大影响,尤其是侧风作用下转向架对列车周围流场更有着不容忽视的影响^[57],因此,开展转向架区域的减阻优化有重要意义。杨志刚等^[58]对比分析了转向架区域加装裙板与否对列车气动阻力的影响,研究结果表明头车一位端转向架区域的气动阻力最大,向尾车方向转向架区域阻力递减,但是尾车车头的转向架阻力又有所增大,各转向架加装裙板后可明显降低列车的气动阻力,且头尾车车头转向架加装裙板后气动阻力的减小量约占总减小量的 50%;郑循皓等^[59]通过对有无横风 2 种运行工况下的高速列车进行数值模拟,发现无横风环境下转向架区域气动阻力占列车总气动阻力的 23%,有横风环境下列车气动阻力急剧增大,主要是转向架区域阻力增大导致的,此时转向架区域气动阻力占列车总气动阻力的 55%,改进裙板及加装导流罩后与原始模型计算结果对比发现,在 2 种运行条件下转向架区域的气动阻力均有所改善,整车气动阻力也随之减小;Zhang 等^[60]对转向架区域的隔墙倾角进行研究,对比了不同倾角隔墙布置方式对列车气动性能的影响,研究结果表明隔墙倾角对周围流场的影响较大,由此引起的气动阻力差别也较大,其中减阻效果最好的方案使 3 节编组的高速列车整车气动阻力减小了 2.92%;游守庆等^[61]对高速列车转向架进行了数值模拟,发现转向架的气动阻力主要由枕梁、轮对、构架和动车转向架电机、变速器等部件的阻力组成,转向架在中间

车一位端比二位端气动阻力大 3~4 倍,同一位置上动车转向架比拖车转向架气动阻力大,转向架横梁之间及中间车转向架后轮对有较多漩涡,研究结论对流线型转向架的设计有重要指导意义。

转向架区域的气动优化研究结果表明:该区域的气动阻力中压差阻力占比较大,横风状态下转向架区域的气动阻力比无横风环境大;转向架区域的减阻措施主要是加装裙板和导流罩,头车一位端的转向架气动阻力最大,加装裙板后气动阻力的减小量约占总减小量的 50%;对转向架舱隔墙倾角进行优化也有较好的减阻效果。流线型转向架是另一种新的减阻思路,在不增加附属装置的前提下减小自身的气动阻力,但是目前流线型转向架的相关研究还相对较少。

3.3 车端连接处优化

风挡是高速列车 2 节车厢之间的结构,包括内风挡和外风挡,前者主要是作为旅客通道,同时保证列车的气密性,后者主要是保证列车的平顺性,以降低空气阻力^[62]。中国第一代高速列车 CRH1、CRH3 几乎没有外风挡,只有内风挡,如图 10(a)所示;半包型外风挡主要在 CRH2、CRH380A 等车型上使用,如图 10(b)所示。单魏等^[63]在 CRH3 型列车的基础上对比分析了高速列车车厢连接处有无外风挡的情况,无外风挡时在风挡区域出现了空腔效应,阻力较大,增加半包型外风挡后与无外风挡的原始模型相比整车气动阻力减小了 11.4%;唐明赞等^[64]对半包型外风挡安装的内嵌距离进行了研究,内嵌距离为 0 表示风挡与列车表面为同一光滑曲面,研究结果表明,内嵌距离为 0 时风挡区域的气动阻力最小,但是内嵌距离对风挡区域的气动阻力影响较

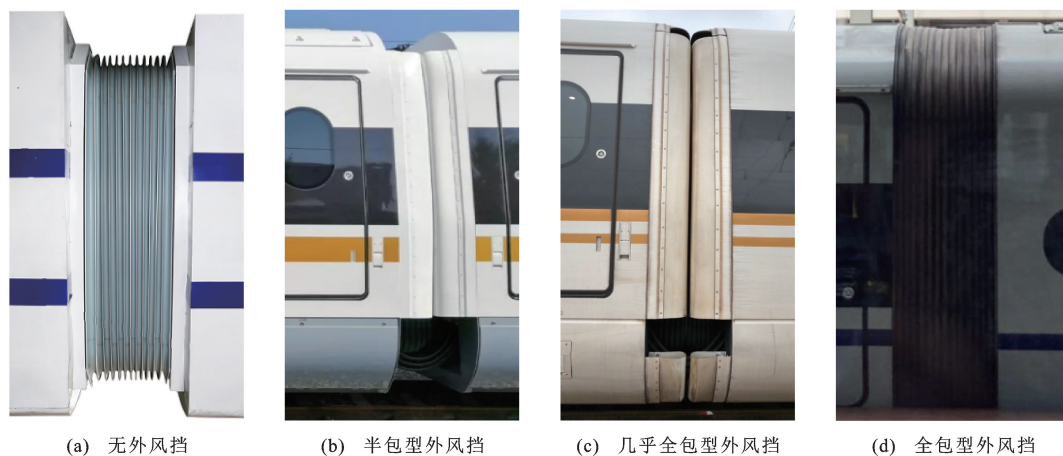


图 10 高速列车风挡

Fig. 10 Wind-shields of high-speed train

小,在进一步优化半包型外风挡的基础上,CR400BF 等高速列车采用了几乎全包的外风挡,如图 10(c)所示;张业等^[65]对比了 3 种不同缝宽的几乎全包外风挡和无外风挡列车的气动阻力,结果表明几乎全包外风挡列车的整车气动阻力明显小于无外风挡列车,风挡之间的缝宽在 5~9 mm 之间时对整车气动阻力的影响不大,除半包型、几乎全包型风挡外,还有 CRH380D 高速列车采用的全包型列车风挡,如图 10(d)所示;梁习锋等^[66]对不同的风挡形式进行研究,结果表明全包型风挡列车的气动阻力最小,与较小的内风挡相比全封闭列车能够减阻 30.9%,与较大的内风挡相比能够减阻 18.9%;张森等^[67]利用数值模拟研究了全包型风挡列车与只有内风挡列车的气动性能的差异,结果表明无外风挡车体与全包型风挡车体相比整车气动阻力增大了 12%,气动阻力主要是风挡区域前后压差形成的压差阻力;王东屏等^[68]的研究结果也表明,与原始仅有内风挡相比,通过添加全包型外风挡后可实现整车气动阻力降低 8.3%,因此,添加外风挡后的高速列车气动阻力特性优于只有内风挡的高速列车。

车端连接处的气动阻力主要是列车截面外形突变而引起的压差阻力,因此,加装风挡是减小车端连接处气动阻力的有效措施。对风挡的研究结果表明:减阻效果按照无外风挡、半包型外风挡、几乎全包型外风挡、全包型外风挡依次递增。

3.4 受电弓与导流罩优化

CRH1、CRH2 高速列车的受电弓直接安装在高速列车车顶,如图 11(a)所示,作为安装在高速列车车顶的突出物,会产生较大的空气阻力,约占列车气动总阻力的 12%^[15]。为降低受电弓的气动阻力,可以使受电弓整体下沉,减小其迎风面积,从而达到减阻的目的。CRH3、CRH5 与 CRH380D 高速列车的受电弓为沉降式安装,如图 11(b)所示,CR400 系列高速列车受电弓也采用了沉降式安装。受电弓

沉降后在左右两侧加装导流板,尽可能减小车体截面突变,保证车体表面的平顺。孔学舟等^[69]分析了受电弓安装平台不同下沉高度和不同轮廓外形对高速列车气动阻力的影响,发现受电弓适当下沉后,受电弓下部底座、绝缘子迎风面正压降低,背风面负压减小,使得受电弓前后压力差减小,受电弓的气动阻力降低,当下沉高度为 450 mm 时,受电弓气动阻力减小 52.92%,整车阻力也下降 6.19%;林鹏^[70]等对无沉降式安装与不同沉降式凹坑对受电弓区域气动阻力特性的研究表明,无下沉结构的受电弓平台使整个受电弓系统的气动力增大,在下沉高度确定的条件下,下沉式平台的凹坑形式对于气动力的影响很小,如图 12 所示。

此外还可以引入受电弓导流罩结构,通过增设合适外形的导流罩可以很大程度上减小受电弓区域的气动阻力,并提升受电弓系统的性能。CRH380D 与 CR400 系列高速列车受电弓在受电弓下沉的基础上优化了导流罩,以减小受电弓及其附属物的气动阻力,如图 11(c)所示。传统的导流罩可以较大程度地降低受电弓自身的气动阻力,但同时也引入了导流罩自身的气动阻力,因此,导流罩也是受电弓区域减阻的关键。张雷等^[71]通过风洞试验对受电弓导流罩进行研究,结果表明“浴盆”式的受电弓导流罩的气动阻力系数大于“挡板”式导流罩;樊光建^[72]采用数值模拟分析了受电弓导流罩的外形对列车气动阻力的影响,发现侧前部做圆滑过渡处理、前部为抛物线拉伸曲面的受电弓导流罩具有较小的气动阻力。

受电弓气动优化减阻的另一个途径是通过优化受电弓的结构外形达到主动减阻。受电弓由多个类圆柱杆件组成,尽量减少受电弓杆件的数量(国内高速列车采用的受电弓逐渐由双臂受电弓向单臂受电弓转化),并通过优化受电弓各部件间的组合形式、采用合适的截面外形、在杆件表面布置合理的减阻材料等以减小受电弓尾涡脱落的强度来减小气动阻

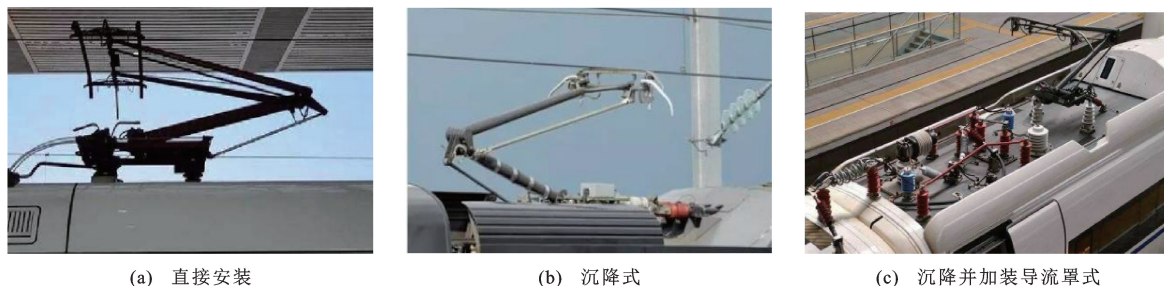


图 11 受电弓安装形式

Fig. 11 Installation forms of pantograph

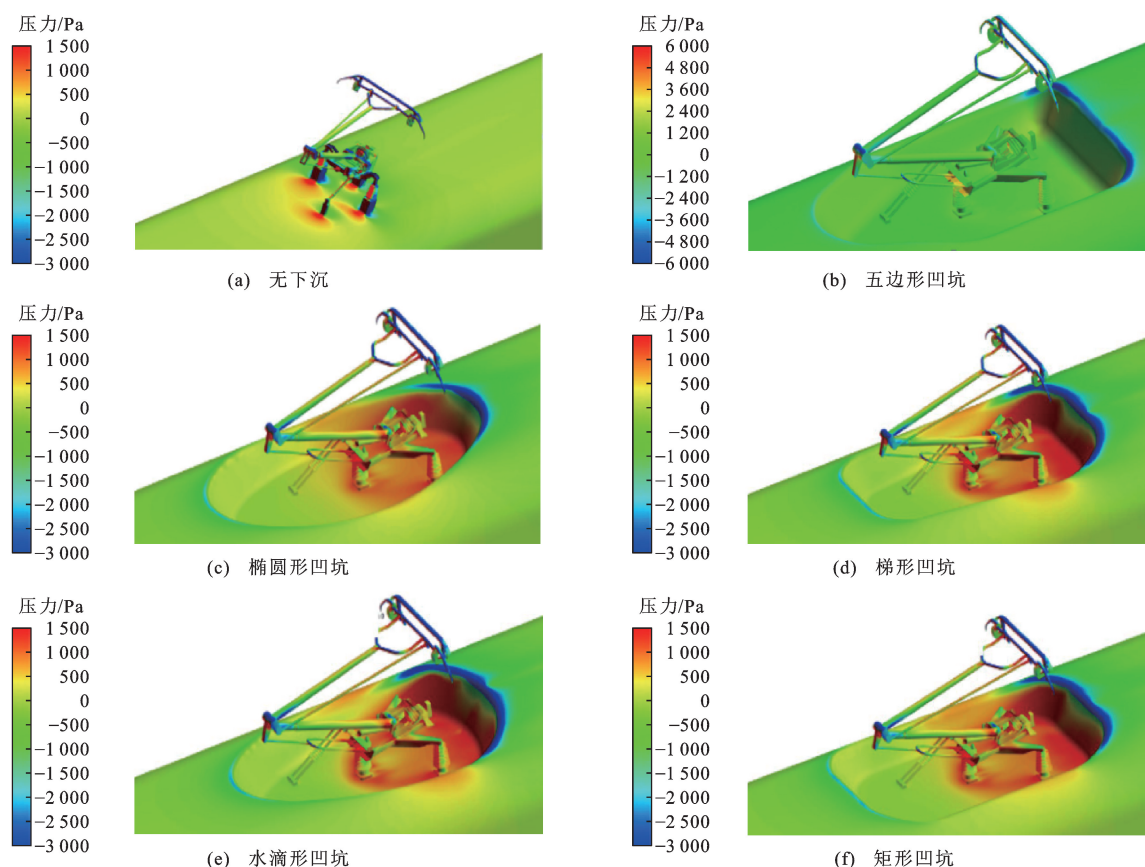


图 12 受电弓下沉凹坑模型

Fig. 12 Pit models of sinking pantograph

力^[73]。King 等^[74]对不同截面形状的受电弓杆件进行了气动减阻降噪测试,包括圆形、正方形、矩形和椭圆形,得出椭圆截面杆件较其他截面杆件的气动阻力和噪声更低;石磊^[75]利用仿生学原理设计出了锯齿形、V形凹环形与波浪形 3 种表面结构的圆柱杆件,如图 13 所示,与光滑的圆柱杆件相比,3 种非光滑结构的杆件表面的脉动压力均有明显的减弱;针对双滑板受电弓,Li 等^[76]利用分离涡模拟计算了受电弓不同滑板间距下的气动阻力和气动噪声特性,结果表明滑板间距对受电弓的气动特性影响较大,当前后滑板

间距分别为 540 与 0 mm 时,相较于其他滑板间距下最大阻力分别降低 7.7% 和 14.3%。

受电弓的气动阻力约占列车总气动阻力的 12%,通过改善受电弓周围区域环境可以有效地减小受电弓的气动阻力,如将受电弓沉降式安装与加装导流罩等。除以上减阻措施外,可通过优化杆件的外形、数量,以及布置合适的减阻材料实现受电弓自身气动阻力的降低。

3.5 其他部位优化

列车表面突出或凹陷导致的列车表面不平顺会

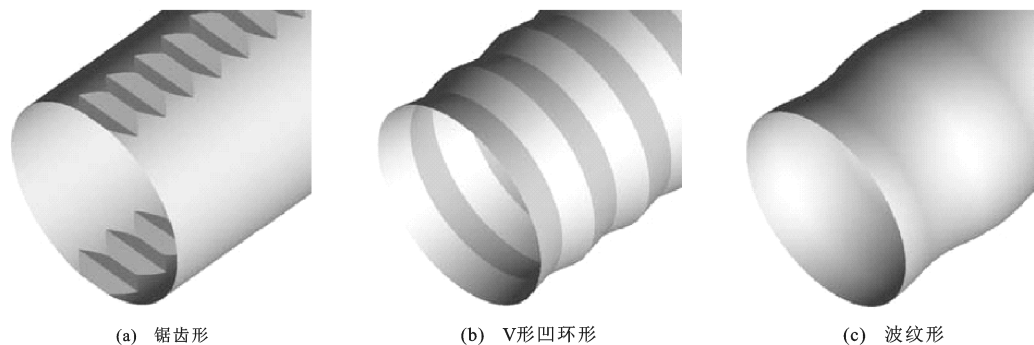


图 13 仿生结构单元体模型

Fig. 13 Bionic structural unit models

增大列车的压差阻力,如车端连接处、车门和空调等,车端连接处可通过加装外风挡以保证车体曲面的平顺性。对于列车车门,如图 14(a)所示,CRH1、CRH2 高速列车车门是凹陷或存在凹槽的,凹陷的车门类

似于风挡区域结构使列车截面突变,会增大列车的压差阻力^[77],影响列车的气动性能,因此,后续车型优化了车门的凹槽或凹陷区域,保证了车体的平顺性,如图 14(b)所示。



(a) 凹陷型车门



(b) 平滑型车门

图 14 高速列车车门

Fig. 14 High-speed train doors

高速列车空调导流罩是安装在车顶的突出物,其气动阻力不容忽视,是列车车身局部优化设计的关键环节之一。马梦林等^[78]对头车空调导流罩进行了流线型设计,通过数值计算发现,优化后的空调导流罩使头车气动阻力降低了 2.6%;洪琪琛等^[79]研究了空调导流罩安装位置与高度,如图 15 所示,头尾车空调位置远离鼻尖时总气动阻力最大,比其他方案大 2.7%,空调导流罩阻力随着车高的增大而逐渐减小,车高增大 350 mm 时,3 节编组列车的总气动阻力约降低 7.6%;于森等^[77]通过风洞试验发现,将受电弓导流罩与空调导流罩设为一体结构有助于降低中间车的阻力,但对头尾车气动阻力影响较小。目前空调导流罩的气动减阻主要是外形优化和位置优化,还可通过下沉式安装或将空调封装在车体内部,保证车顶的平顺性,但是相关的研究还较少。

4 列车气动多目标优化

传统头型优化方法主要通过优选的方式开展,通过对风挡、转向架区域、导流罩等建立多个模型,再利

用数值模拟或风洞试验进行对比分析,这种方法不仅成本巨大,且设计周期较长,过于依靠工程经验。此外,高速列车设计时需要综合考虑气动阻力、升力、侧风安全性、隧道通过性能、交会性能等多个指标,这些指标之间有可能会相互冲突,因此,采用传统的优选方法很难提高列车综合气动性能。随着优化算法的进步,结合数值模拟与优化技术的列车多目标优化方法逐渐发展起来,设计时能够同时兼顾多个气动性能参数,缩短了设计周期,提高了优化效率。

高速列车多目标优化设计主要分为 2 类,第 1 类是对列车模型进行参数化建模,通过改变设计变量生成不同的高速列车模型,对列车模型划分网格后进行数值模拟计算,输出列车的气动阻力、气动升力、噪声等计算结果,利用多目标气动寻优算法进行优化计算,得到性能较优的设计变量生成列车模型,以此迭代循环直至收敛,优化流程如图 16 所示。刘加利等^[80]通过搭建多目标优化设计系统,在保证流线型长度不变的情况下,选择 5 条头车流线型部位的控制线作为优化设计变量,以整车气动

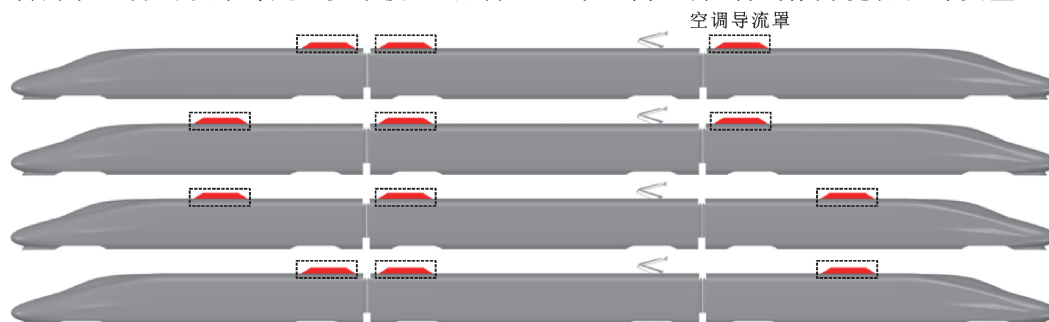


图 15 空调导流罩安装位置

Fig. 15 Installation locations of air conditioning deflector

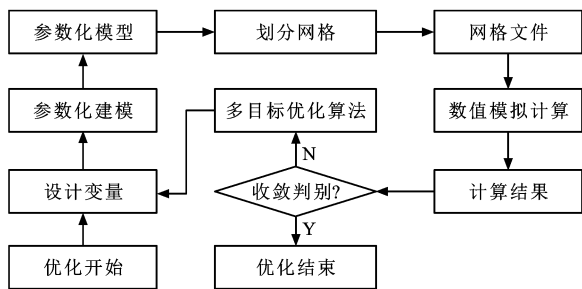
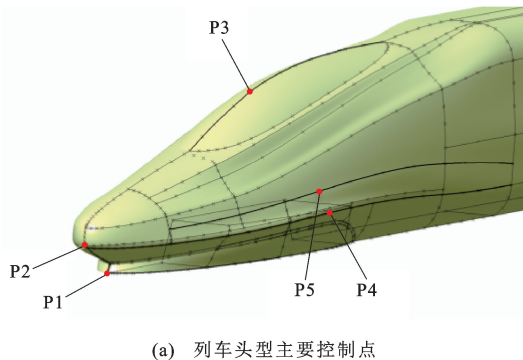


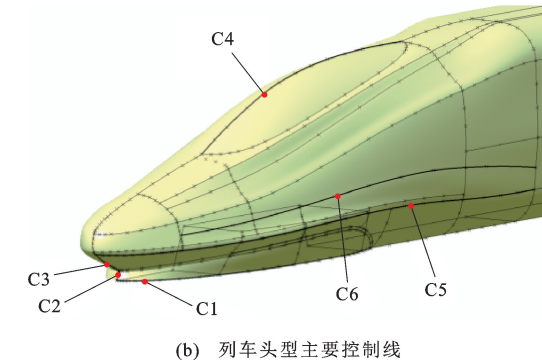
图 16 高速列车多目标气动优化流程

Fig. 16 Multi-objective aerodynamic optimization process of high-speed train

阻力及偶极子噪声源最小作为优化目标,利用遗传算法对高速列车头型进行优化设计;张亮等^[81]也采用类似的方法对超高速列车的头型进行多目标优化,包括鼻尖、司机室玻璃、排障器等区域,以期减小列车超高速运行时的气动阻力,并提高列车横风运行时的安全性,如图 17 所示,列车头型主要控制点



(a) 列车头型主要控制点



(b) 列车头型主要控制线

图 17 列车头部流线型控制参数

Fig. 17 Control parameters of train head streamline

另一类多目标优化方法也是对列车模型进行参数化建模、划分网格、数值模拟计算、输出计算结果,与第 1 种方法不同的是在利用优化算法进行多目标气动寻优计算之前,先建立设计变量与优化目标之间的近似模型,如代理模型、响应面模型等。与第 1 类优化计算方法相比需要更少的样本点,优化效率更高效。Yao 等^[84-85]利用局部型函数对 CRH380A 列车头型的长度、纵剖面、水平剖面型线,排障器、司机室玻璃和车体横截面形状进行参数化,生成 3 节编组的列车模型,进行数值模拟计算后基于神经网络响应面方法建立设计变量与优化目标之间的近似模型,采用遗传算法或蚁群算法对高速列车头型进行气动减阻优化设计,同时兼顾优化尾车气动升力、隧道通过的微气压波等气动特性;Li 等^[86]基于自由变形方法建立高速列车头型参数化模型,生成列车模型后进行数值计算,建立了与 Kriging 近似的模型,并利用遗传算法对列车头型进行多目标优

P1~P5 分别为排障器纵向长度控制点、鼻尖高度控制点、司机室视窗高度控制点、横向最大外轮廓线控制点与横向外轮廓辅助控制线控制点,控制线 C1~C6 分别为车底控制线、排障器纵向长度控制线、鼻尖高度控制线、司机室视窗高度控制线、横向最大外轮廓控制线与横向外轮廓辅助控制线;李明等^[82]基于多学科优化软件集成了 CATIA、ICEM 和 FLUNET 搭建了高速列车头型多目标优化平台对列车头型的鼻尖高度、长细比、纵向最大外轮廓线等进行优化,以整车气动阻力最小和整车升力绝对值最小为优化目标,采用第 2 代非劣排序多目标遗传算法进行优化设计计算,得到了综合性能较佳的头型气动外形;黄烈威等^[83]建立了受电弓导流罩的多目标优化平台,采用遗传算法进行优化计算,得到了气动性能与结构强度综合性能最佳的导流罩,能够实现整车气动阻力减小 5%。

化设计,以减小高速列车的整车气动阻力及尾车升力;Sun 等^[87-88]基于 Kriging 方法建立列车多目标优化平台,对列车头型及转向架区域进行优化,利用第 2 代非劣排序多目标遗传算法 NSGA-II 得到了整车气动阻力较小,其他气动性能指标也较优的高速列车头型;龚明等^[89-90]在有横风运行条件下,以减小列车气动阻力及尾车气动升力为优化目标进行高速列车优化设计,建立了 Kriging 代理模型,并结合遗传算法对优化目标进行寻优计算。

在数值计算技术发展的推动下,多目标优化技术已成为目前列车气动性能优化的趋势,无论是通过直接寻优计算还是通过建立代理模型再进行寻优计算,都能够极大地提高优化效率,降低优化设计成本,并能够得到综合性能较好的优化结果。

5 前沿减阻技术

目前,高速列车传统的气动减阻优化主要分为

两大类:一类是对列车及其部件进行流线型设计,优化外形;另一类是通过加装导流装置等方式使列车表面平顺化,减小截面突变引起的气动阻力。但是列车提供的优化可变空间一定,且这 2 类优化技术也都日益成熟,因此,传统方法的气动减阻优化空间变得越来越小。为进一步减小高速列车的气动阻力,可通过借鉴其他行业较为成熟的减阻方法为高速列车的减阻优化开辟新方向,如仿生表面微结构减阻与流动控制方法减阻。

5.1 仿生表面微结构减阻

通过借鉴生物界的非光滑表面形态,做成非光滑结构,把非光滑单元体分布在高速列车关键区域以达到减阻效果,主要是列车鼻尖、头部流线型位置、风挡端墙、转向架舱等^[91-92]。王政等^[93]对仿生表面微结构减阻优化及机理进行了综述性研究,分析了表面微结构的类型、研究实例、减阻应用等内容,提出了沟槽扩展类型,并指出表面微结构研究应拓展至复杂形状结构;孙朋朋^[94]在 CRH2 高速列车的车头位置布置了不同间距、不同直径尺寸的球型凹坑和凸包,通过正交试验研究了不同非光滑结构形式的凹坑和凸包对高速列车气动减阻的效率,结果表明球型凹坑的间距为 90 mm,直径为 60 mm,深度为 10 mm 时,高速列车的减阻效果最好,可减阻 8.16%;朱海燕等^[95]选择 CRH3 高速列车为研究对象,模拟非光滑表面微结构对高速列车的减阻效果表明,当球型凹坑的阵列距离为 350 mm,半径为 80 mm,深度为 10 mm 时,减阻效率最高可达 25.19%;Li 等^[43]在高速列车头尾车鼻尖部位布置了球形凹坑微结构,如图 18 所示,数值模拟计算研究表面微结构的减阻特性,列车气动阻力的减小主要是压差阻力减小引起的,鼻尖部分的微结构使整车阻力减小了 2%;李明等^[96]在高速列车模型的流线型区域、风挡端墙、转向架裙板隔墙等位置布置了随行微结构表面,研究结果表明在列车头部流线型

区域布置微结构表面不能达到减阻效果,而在风挡端墙区域、转向架裙板隔墙部位采用该微结构表面,均有较好的减阻效果;张渊等^[97]将非光滑的表面单元体布置于高速列车中间车的转向架区域端墙处,应用计算流体动力学对列车进行数值模拟,比较了非光滑凹坑表面单元体对列车的气动减阻效果,与光滑列车的气动阻力相比,由于凹坑的存在,气流流经凹坑上方时,凹坑内部将形成旋转的涡流,将会起到“空气轴承”的作用,从而减小列车气动阻力,中间车减阻率可达 1.05%;杜健等^[98]对仿生非光滑沟槽减阻效果的研究表明,仿生非光滑沟槽的存在可以阻碍由湍流运动引起的瞬时横向流动的发生,降低湍流与壁面之间的摩擦阻力,沟槽顶端区域的摩擦阻力因数接近于光滑壁面的摩擦阻力因数,而其余大部分区域内的摩擦阻力因数则小于光滑壁面的摩擦阻力因数,在不同的气流速度($60 \sim 160 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)下,沟槽壁面的阻力系数均小于光滑壁面的阻力系数,仿生非光滑沟槽的减阻率可达 6% 以上。

对仿生表面微结构减阻的现有研究表明:将生物界的非光滑表面合理简化,做成凹坑的形式,选择一定的几何结构的非光滑单元体分布在关键部位,通过对边界层的控制来减少湍流强度,减小湍流动能的损失可以达到一定的减阻效果。

5.2 吹、吸气流动控制

吹、吸气减阻技术属于边界层流动控制方法,该减阻技术已经在航空航天行业广泛应用^[99]。吹、吸气减阻技术通过延缓边界层的分离来实现减阻,通过吹气的方式给边界层中阻滞的流体提供动能,防止边界层的过早分离,通过吸气把边界层中快要分离的部分流体从边界层中吸除,在缝口后面的区域可以形成一个新的能重新克服逆压梯度的边界层。采用适当的缝口结构和在适当条件下,能使边界层转捩点向下游移动,由于层流阻力远小于湍流阻力,从而使阻力系数减小^[100-101]。该技术可应用于高速

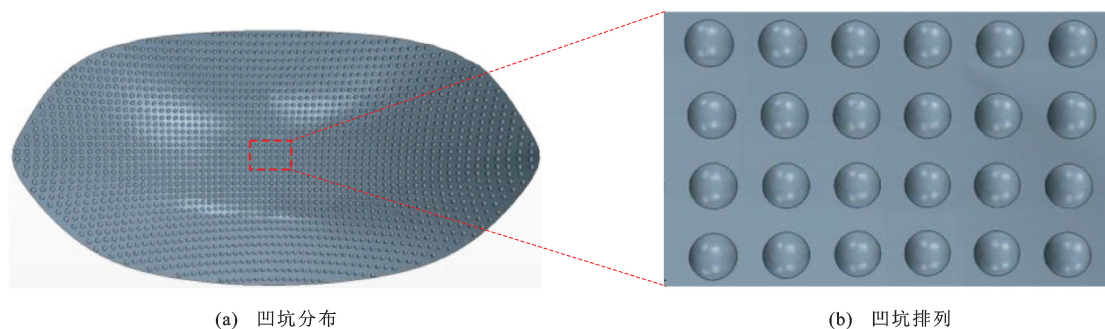


图 18 流线型鼻尖凹坑表面

Fig. 18 Surface with round pits in streamline nose

列车的尾车,防止边界层的过早分离,从而减小列车运行过程中的压差阻力。但是由于高速列车具有很大的长细比,列车尾流复杂,且吹、吸气装置的布置较为困难,目前还没有将吹、吸气流动控制技术完全运用于高速列车的气动减阻。

5.3 等离子体减阻

根据等离子体的发生机制,可将等离子体减阻分为逆向喷流减阻、局部能量点源减阻和边界层控制减阻^[102],该方法也属于流动控制方法范畴。等离子体边界层控制减阻是通过激励器表面电离产生离子和电子,电子在离子的驱动下运动并与中性气体分子碰撞传递能量,诱导近壁面气流加速产生离子风。激励器作为微型致动器在流场局部输入能量,改变流场结构,从而实现流动控制^[103]。目前,主要将等离子减阻装置安装在汽车^[103-104]或者列车^[105]的尾部,能够较好地控制尾流的流动,减小尾部分离区,从而减小整车的压差阻力,如图 19 所示。逆向喷流减阻和局部能量点源减阻主要是适用于高速飞行器的激波减阻,逆向喷流减阻通过飞行器头部的等离子体发生器向来流方向喷射等离子体,等离子体与弓形脱体激波相互作用,减弱激波或将激波推离飞行器,从而减小飞行器的波阻。局部能量点源减阻通过扩散释放能量点源改变飞行器的流场结构及物面的压力分布,使来流的总压损失较大,因此,飞行器侧面的静压可能会超过临界点的压力,从而在飞行器前方形成一个分离区,将使飞行器的波阻减小^[102,106]。随着真空管道列车的发展,这 2 种等离子体减阻技术将会有广阔的应用前景。

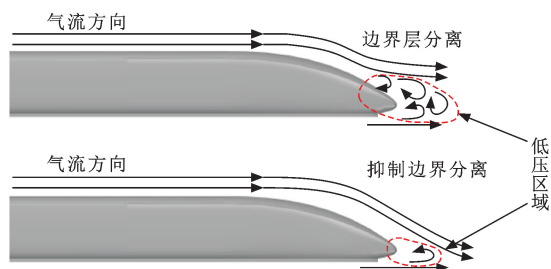


图 19 压差阻力形成与抑制原理

Fig. 19 Principle of pressure drag formation and suppression

5.4 涡流发生器

涡流发生器是以某一安装角安装在机体表面上的小平板或小展弦比小机翼,是目前在航空领域应用较为广泛的流动控制减阻方法,主要分为常规尺寸涡流发生器和微型涡流发生器,如图 20 所示。常规尺寸涡流发生器高度与边界层厚度相当,微型涡流发生器高度约为 0.4δ 以下, δ 为名义边界层厚度^[107]。由

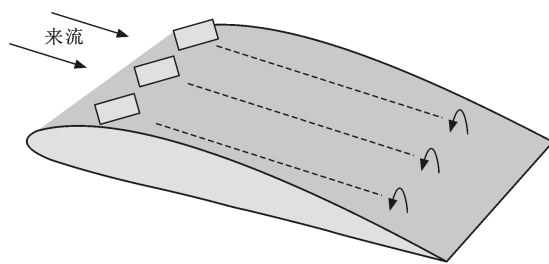


图 20 涡流发生器

Fig. 20 Vortex generator

于涡流发生器展弦比小,翼尖涡强度较大,高能量的翼尖涡与下游低能量的边界层气体混合后,把能量传递给边界层,使其获得附加能量后能够继续贴附在机体表面,从而抑制边界层分离^[108]。涡流发生器主要应用于大型飞机的机翼设计,张进等^[107]研究了微型涡流发生器对超临近机翼气动特性的影响,结果表明同向安装微型涡流发生器能够减小翼型阻力,对升力和失速迎角影响很小,且大尺寸的微型涡流发生器减阻效果不如小尺寸微型发生器;在汽车领域也有涡流发生器相关研究应用,李斌斌^[109]等对 30° 倾角的 Ahmed 汽车模型进行了研究,对比在尾部安装涡流发生器与否对汽车阻力特性的影响,结果表明涡流发生器使尾流相对压差恢复系数增加了 6.94% ,尾流区长度减小了 40% ,能在一定程度上降低汽车的压差阻力。目前,关于高速列车上安装涡流发生器的研究几乎没有,但是根据涡流发生器在机翼及汽车领域的应用经验可以将其拓展应用于高速列车气动减阻,安装于高速列车尾车,控制并延缓边界层的分离。

6 结 语

对近年来中国高速列车气动减阻优化研究的现状以及研究成果进行了总结,整体而言,高速列车气动减阻研究方法多样,减阻途径较多,减阻效果较显著。基于以上的研究概况,针对高速列车气动减阻研究在以下几个方面仍值得开展进一步的研究。

(1)研究方法与技术需要进一步完善。高速列车风洞试验不存在标准模型,也就无法验证风洞试验的精度与准确性,因此,高速列车标模是亟待解决的问题。此外,由于风洞试验存在地面效应、缩比效应与无法准确模拟列车和地面之间的相对运动,试验结果可能存在一定的误差。虽然动模型试验能够模拟列车高速运行,但是无法准确测量列车的气动力,急需新的测量方法或技术配合高速列车动模型试验以得到列车气动特性。在数值模拟方面,网格的不确定性是影响数值计算结果的重要因素,对同

一模型划分不同尺寸,生成不同数量的网格一般会得到不同的计算结果,因此,需进行网格独立性验证或与风洞试验进行对比验证。充分发挥风洞试验和数值模拟的优势,利用数值模拟的计算结果弥补并修正风洞试验地面效应、缩比效应、模型简化等方面的不足,同样,利用风洞试验的测试结果指导并验证数值模拟计算,使其更加精准并可信。

(2)对高速列车部件的气动减阻研究较多,如单独针对列车头型、受电弓、风挡等,而整车气动计算研究较少,而且对局部复杂结构外形进行了简化,如视窗雨刮器、转向架线缆等。由于高速列车部件多且结构复杂,高速列车精细化建模及高质量网格划分是气动减阻研究的重要挑战。未来气动减阻的研究部件应该集中在转向架及其裙板、车端连接处和受电弓及其周围附属设施。设计流线型转向架及转向架区域底部裙板是降低转向架气动阻力的潜在有效途径,兼顾曲线通过性能设计平滑外风挡、受电弓及其周围附属设施与车体一体化设计是进一步降低列车气动阻力的有效措施。

(3)目前列车仿生表面微结构减阻技术研究较多,且仿真结果能够实现一定的减阻效果,等离子体减阻技术研究较少,表面吹吸气控制技术以及涡流发生器在列车气动减阻方面的研究几乎没有,因此,前沿减阻技术应用于高速列车亟待解决减阻效果及其实际应用潜在的问题。

(4)高速列车设计需要综合考虑气动阻力、升力、侧风安全性、隧道通过性、交会性、噪声等多因素,兼顾车体轻量化设计和车体强度疲劳等问题。未来高速列车气动外形设计应充分结合工业设计,以提升运营安全、减阻降噪等为主要目标,开展高速列车气动减阻多目标优化设计,实现中国高速列车的绿色、节能、高速化蓬勃发展。

参考文献:

References:

- [1] 张卫华,王伯铭. 中国高速列车的创新发展[J]. 机车电传动, 2010, 50(1): 8-12.
ZHANG Wei-hua, WANG Bo-ming. Innovation and development of high-speed railway in China[J]. Electric Drive for Locomotives, 2010, 50(1): 8-12. (in Chinese)
- [2] TIAN Hong-qi. Review of research on high-speed railway aerodynamics in China[J]. Transportation Safety and Environment, 2019, 1(1): 1-21.
- [3] 张卫华,张曙光. 高速列车耦合大系统动力学及服役模拟[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(2): 147-152.
ZHANG Wei-hua, ZHANG Shu-guang. Dynamics and service simulation for general coupling system of high-speed trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(2): 147-152. (in Chinese)
- [4] BAKER C J. A review of train aerodynamics, Part 1—Fundamentals[J]. Aeronautical Journal, 2014, 118(1201): 201-228.
- [5] BAKER C J. A review of train aerodynamics, Part 2—Applications[J]. Aeronautical Journal, 2014, 118(1202): 345-382.
- [6] HAJIPOUR A, RASHIDI M M, LI T, et al. A review of recent studies on simulations for flow around high-speed trains[J]. Journal of Applied and Computational Mechanics, 2018, 5(2): 311-333.
- [7] RAGHUNATHAN R S, KIM H D, SETOGUCHI T. Aerodynamics of high-speed railway train[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6/7): 469-514.
- [8] SCHETZ, JOSEPH A. Aerodynamics of high-speed trains[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2001, 33(1): 371-414.
- [9] 肖京平,黄志祥,陈立. 高速列车空气动力学研究技术综述[J]. 力学与实践, 2013, 35(2): 1-12.
XIAO Jing-ping, HUNAG Zhi-xiang, CHEN Li. Review of aerodynamic investigations for high-speed train[J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(2): 1-12. (in Chinese)
- [10] 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 1-9.
TIAN Hong-qi. Study evolvement of train aerodynamics in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 1-9. (in Chinese)
- [11] 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 Hong-qi. Development of research on aerodynamics of high-speed rails in China[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(4): 30-41. (in Chinese)
- [12] 梁习锋,田红旗,邹建军. 动力车纵向气动力风洞试验及数值模拟[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(6): 101-105.
LIANG Xi-feng, TIAN Hong-qi, ZOU Jian-jun. The wind tunnel test and numerical simulation of longitudinal aerodynamic force of the traction car[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(6): 101-105. (in Chinese)
- [13] DAI Zhi-yuan, LI Tian, ZHANG Wei-hua, et al. Numerical study on aerodynamic performance of high-speed pantograph with double strips[J]. Fluid Dynamics and Materials Processing, 2019, 15(4): 31-40.
- [14] 蔡国华. 高速客车模型气动特性实验研究[J]. 实验流体力学, 2007, 21(4): 27-31.
CAI Guo-hua. An experimental research of aerodynamic characteristics of the high-speed passenger train model[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2007, 21(4): 27-31. (in Chinese)
- [15] 姚拴宝,郭迪龙,杨国伟,等. 高速列车气动阻力分布特性研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 18-23.

- YAO Shuan-bao, GUO Di-long, YANG Guo-wei, et al. Distribution of high-speed train aerodynamic drag[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7): 18-23. (in Chinese)
- [16] 孙帮成,李明高,安超,等. 高速列车节能降耗关键技术研究[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 69-82.
- SUN Bang-cheng, LI Ming-Gao, AN Chao, et al. Research on key technology of high-speed train energy consumption [J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(4): 69-82. (in Chinese)
- [17] 田红旗,高广军. $270 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 高速列车气动性能研究[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(2): 17-21.
- TIAN Hong-qi, GAO Guang-jun. The analysis and evaluation on the aerodynamic behavior of $270 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ high-speed train[J]. China Railway Science, 2003, 24(2): 17-21. (in Chinese)
- [18] ZHANG Xiao-han, JIANG Yao, LI Tian. Effect of streamlined nose length on the aerodynamic performance of an $800 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ evacuated tube train [J]. Fluid Dynamics and Materials Processing, 2020, 16(1): 67-76.
- [19] 张胜,戴志远,李田,明线运行列车气动地面效应数值模拟[J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18(1): 120-125, 132.
- ZHANG Sheng, DAI Zhi-yuan, LI Tian. Numerical simulation of aerodynamic ground effect of a train running in the open air[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2020, 18(1): 120-125, 132. (in Chinese)
- [20] 李田,秦登,邹栋,等. 高速受电弓开闭口运行气动特性及对比研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(4): 177-184.
- LI Tian, QIN Deng, ZOU Dong, et al. Study on aerodynamic characteristics and comparisons of high-speed pantograph in knuckle-downstream or knuckle-upstream direction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(4): 177-184. (in Chinese)
- [21] 黄问盈,杨宁清,黄民. 列车基本阻力的思考[J]. 中国铁道科学, 2000, 21(3): 44-57.
- HUANG Wen-ying, YANG Ning-qing, HUANG Min. Ponderation on railway train basic resistance [J]. China Railway Science, 2000, 21(3): 44-57. (in Chinese)
- [22] 张帅,魏伟. HXD1 组合列车牵引与电制动模型的验证[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(5): 45-50.
- ZHANG Shuai, WEI Wei. Verification of traction and dynamic braking models for HXD1 combined train[J]. Railway Locomotive and Car, 2018, 38(5): 45-50. (in Chinese)
- [23] 姚拴宝. 高速列车气动优化设计研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- YAO Shuan-bao. Aerodynamical optimization and design of high-speed trains[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [24] 张业. 高速列车参数化方法研究及整车气动外形优化设计[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- ZHANG Ye. The Study on parameterization methods of the high-speed train and optimization design for the whole train[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [25] 张在中,周丹. 不同头部外形高速列车气动性能风洞试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(6): 2603-2608.
- ZHANG Zai-zhong, ZHOU Dan. Wind tunnel experiment on aerodynamic characteristic of streamline head of high-speed train with different head shapes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(6): 2603-2608. (in Chinese)
- [26] 张健. 高速列车车头形风洞试验研究[J]. 流体力学实验与测量, 1997, 14(2): 85-89.
- ZHANG Jian. The research on nose shapes of high-speed train's power car with the wind tunnel test[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 1997, 14(2): 85-89. (in Chinese)
- [27] 缪新乐,李明,姚勇,等. 高速列车车头外形结构优化风洞试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(2): 94-98.
- MIAO Xin-le, LI Ming, YAO Yong, et al. Wind tunnel test investigation on the shape optimization of head car of the high-speed train [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(2): 94-98 (in Chinese)
- [28] 蔡国华. 高速列车受电弓低速风洞试验技术[J]. 铁道工程学报, 2006, 23(4): 67-70.
- CAI Guo-hua. The experimental technique of pantograph of super express train in low speed wind tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 23(4): 67-70. (in Chinese)
- [29] 孙健,余以正,姜旭东,等. 裙板对列车空气阻力及侧风稳定性影响的风洞试验研究[J]. 企业技术开发, 2016, 35(24): 39-41.
- SUN Jian, YU Yi-zheng, JIANG Xu-dong, et al. The wind tunnel test on the influence of skirt plates on air-drag and crosswind stability of high-speed trains [J]. Technological Development of Enterprise, 2016, 35(24): 39-41. (in Chinese)
- [30] 刘风华. 高速列车气动性能低温风洞试验[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(6): 93-100.
- LIU Feng-hua. Test on aerodynamic performance of high-speed train in cryogenic wind tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(6): 93-100. (in Chinese)
- [31] 王英学,骆建军,李伦贵,等. 高速列车模型试验装置及相似特征分析[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(1): 20-24.
- WANG Ying-xue, LUO Jian-jun, LI Lun-gui, et al. Model experiment system for high-speed trains and analysis of its similarity[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(1): 20-24. (in Chinese)
- [32] 王英学,高波. 高速列车进出隧道空气动力学研究的新进展[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(2): 83-88.
- WANG Ying-xue, GAO Bo. New development of the aerodynamics of high-speed trains passing in and out tunnels[J]. China Railway Science, 2003, 24(2): 83-88. (in Chinese)
- [33] 韩运动,姚松. 高速列车气动性能的尺度效应分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(12): 2383-2391.
- HAN Yun-dong, YAO Song. Scale effect analysis in aerodynamic performance of high-speed train[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(12): 2383-2391. (in Chinese)

- [34] BAKER C J, JONES J, LOPEZ-CALLEJA F, et al. Measurements of the cross wind forces on trains[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004, 92(7/8): 547-563.
- [35] SUZUKI M, TANEMOTO K, MAEDA T. Aerodynamic characteristics of train vehicles under cross winds[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(1/2): 209-218.
- [36] 夏超,单希壮,杨志刚,等.风洞地面效应对高速列车空气动力学特性的影响[J].*铁道学报*,2015,37(4):8-16.
XIA Chao, SHAN Xi-zhuang, YANG Zhi-gang, et al. Influence of ground effect in wind tunnel on aerodynamics of high-speed train[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015, 37(4): 8-16. (in Chinese)
- [37] 黄志祥,陈立,蒋科林.高速列车模型风洞试验数据的影响因素分析[J].*铁道学报*,2016,38(7):34-39.
HUANG Zhi-xiang, CHEN Li, JIANG Ke-lin. The analysis of effect factors on wind tunnel testing data of high-speed train model[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(7): 34-39. (in Chinese)
- [38] ZHANG Jie, LI Jing-juan, TIAN Hong-qi, et al. Impact of ground and wheel boundary conditions on numerical simulation of the high-speed train aerodynamic performance[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2016, 61: 249-261.
- [39] 庞加斌,林志兴,余卓平,等.TJ-2风洞汽车模型试验的修正方法[J].*汽车工程*,2002,24(5):371-375.
PANG Jia-bin, LIN Zhi-xing, YU Zhuo-ping, et al. Correction methods for automotive model tests in TJ-2 wind tunnel[J]. *Automotive Engineering*, 2002, 24(5): 371-375. (in Chinese)
- [40] LI Tian, LI Ming, WANG Zheng, et al. Effect of the inter-car gap length on the aerodynamic characteristics of a high-speed train[J]. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2018, 233(4): 1-18.
- [41] 侯硕,曹义华.基于雷诺平均 Navier-Stokes 方程的表面传热系数计算[J].*航空动力学报*,2015,30(6):1319-1327.
HOU Shuo, CAO Yi-hua. Calculation of surface heat transfer coefficient based on Reynolds-averaged Navier-Stokes equations[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(6): 1319-1327. (in Chinese)
- [42] LI Tian, ZHANG Ji-ye, RASHIDI M M, et al. On the Reynolds-averaged Navier-Stokes modelling of the flow around a simplified train in crosswinds[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2019, 12(2): 551-563.
- [43] LI Tian, QIN Deng, ZHANG Ji-ye. Aerodynamic drag reduction of a high-speed train nose with bionic round pits[J]. *Computing in Science and Engineering*, 2019, 21(3): 31-41.
- [44] LI Tian, QIN Deng, ZHANG Ji-ye. Effect of RANS turbulence model on aerodynamic behavior of trains in crosswind[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, DOI: org/10.1186/s10033-019-0402-2.
- [45] FLYNN D, HEMIDA H, SOPER D, et al. Detached-eddy simulation of the slipstream of an operational freight train[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 132: 1-12.
- [46] XIA Chao, WANG Han-feng, SHAN Xi-zhuang, et al. Effects of ground configurations on the slipstream and near wake of a high-speed train[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 168: 177-189.
- [47] 李田,秦登,安超,等.计算网格对列车空气动力学不确定性的影响[J].*西南交通大学学报*,2019,54(4):816-822.
LI Tian, QIN Deng, AN Chao, et al. Effect of computational grid on uncertain in train aerodynamic[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(4): 816-822. (in Chinese)
- [48] WANG Shi-bo, BELL J R, BURTON D, et al. The performance of different turbulence models (URANS, SAS and DES) for predicting high-speed train slipstream[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 165: 46-57.
- [49] LI Tian, DAI Zhi-yuan, ZHANG Wei-hua. Effect of RANS model on aerodynamic characteristics of trains in crosswind using DDES[J]. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2020, 122(1): 555-570.
- [50] 戴志远,潘锋,于梦阁,等.计算区域尺寸对列车绕流数值模拟的影响[J].*现代交通技术*,2019,16(5):88-92.
DAI Zhi-yuan, PAN Feng, YU Meng-ge, et al. Influence of calculation area on numerical simulation of train flow[J]. *Modern Transportation Technology*, 2019, 16(5): 88-92. (in Chinese)
- [51] ZHAO Hong-wei, LIANG Jian-ying, LIU Chang-qi. High-speed EMUs: characteristics of technological development and trends[J]. *Engineering*, 2020, 6(3): 234-244.
- [52] 舒信伟,谷传纲,梁习锋,等.具有流线型头部的高速磁浮列车气动性能数值模拟[J].*上海交通大学学报*,2006,40(6):1034-1037.
SHU Xin-wei, GU Chuan-gang, LIANG Xi-feng, et al. The numerical simulation on the aerodynamic performance of high-speed maglev train with streamlined nose[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(6): 1034-1037. (in Chinese)
- [53] 黄志祥,陈立,蒋科林.高速列车空气动力学特性的风洞试验研究[J].*铁道车辆*,2011,49(12):1-5.
HUANG Zhi-xiang, CHEN Li, JIANG Ke-lin. The wind tunnel test and research on aerodynamics characteristics of high-speed trains[J]. *Rolling Stock*, 2011, 49(12): 1-5. (in Chinese)
- [54] 陈秉智,翟景娟.高速列车车头外形优化[J].*大连交通大学学报*,2012,33(4):16-20.
CHEN Bing-zhi, ZHAI Jing-juan. Shape optimization of high-speed train head[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2012, 33(4): 16-20. (in Chinese)
- [55] 冯志鹏.高速列车气动性能与外形设计[D].成都:西南交通大学,2008.
FENG Zhi-peng. Aerodynamic performance of high-speed train with the train shape design[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [56] 朱卫.高速列车气动外形风洞试验研究[J].*流体力学实验*

- 与测量,1997,11(2):105-107,25.
- ZHU Wei. Wind tunnel test investigation of aerodynamic contour of high-speed train[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 1997, 11(2): 105-107, 25. (in Chinese)
- [57] 郗艳红,毛 军,李明高,等. 高速列车侧风效应的数值模拟[J]. 北京交通大学学报,2010,34(1):14-19.
- XI Yan-hong, MAO Jun, LI Ming-gao, et al. Numerical study on the crosswind effects of high-speed train[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(1): 14-19. (in Chinese)
- [58] 杨志刚,高 喆,陈 羽,等. 裙板安装对高速列车气动性能影响的数值分析[J]. 计算机辅助工程,2010,19(3):16-21.
- YANG Zhi-gang, GAO Zhe, CHEN Yu, et al. Numerical analysis on influence on aerodynamic performance of high-speed train caused by installation of skirt plates[J]. Computer Aided Engineering, 2010, 19(3): 16-21. (in Chinese)
- [59] 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 Xun-hao, ZHANG Ji-ye, ZHANG Wei-hua. Numerical simulation of aerodynamic drag for high-speed train bogie[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(2): 45-51 (in Chinese)
- [60] ZHANG Jie, WANG Jia-bin, WANG Qian-xuan, 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 and Industrial Aerodynamics, 2018, 175: 153-168.
- [61] 游守庆,张继业,张亚东,等. 高速列车转向架气动性能分析[C]//中国力学学会. 第十五届全国非线性振动暨第十二届全国非线性动力学和运动稳定性学术会议. 北京:中国力学学会,2015:64-65.
- YOU Shou-qing, ZHANG Ji-ye, ZHANG Ya-dong, et al. Analysis of aerodynamic performance of high-speed train bogies[C] // Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. The 15th National Nonlinear Vibration and the 12th National Academic Conference on Nonlinear Dynamics and Motion Stability. Beijing: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2015: 64-65. (in Chinese)
- [62] 刘 珍. 高速列车风挡气动特性及气动疲劳强度研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
- LIU Zhen. Research on windshield aerodynamic characteristic and pneumatic fatigue strength of high-speed train [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [63] 单 魏,邓 海,王金田,等. CRH3 型高速动车组空气动力学阻力特性优化设计[J]. 铁道车辆,2012,50(2):1-3.
- SHAN Wei, DENG Hai, WANG Jin-tian, et al. The optimization design of aerodynamic resistance characteristics of CRH3 high-speed multiple units[J]. Rolling Stock, 2012, 50(2): 1-3. (in Chinese)
- [64] 唐明赞,熊小慧,钟 睦,等. 高速列车外风挡安装间距对风挡气动特性的影响[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(4):850-859.
- TANG Ming-zan, XIONG Xiao-hui, ZHONG Mu, et al. Influence of installation spacing of external vestibule diaphragm of high-speed train on aerodynamic characteristics of the vestibule diaphragm[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(4): 850-859. (in Chinese)
- [65] 张 业,孙振旭,郭迪龙,等. 风挡缝宽对高速列车气动性能的影响[J]. 铁道学报,2017,39(3):19-24.
- ZHANG Ye, SUN Zhen-xu, GUO Di-long, et al. Effects of windshield slot width on aerodynamics of high-speed trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(3): 19-24. (in Chinese)
- [66] 梁习锋,舒信伟. 列车风挡对空气阻力影响的数值模拟研究[J]. 铁道学报,2003,25(1):34-37.
- LIANG Xi-feng, SHU Xin-wei. Numerical simulation research on train aerodynamic drag affected by the train windshield[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1): 34-37. (in Chinese)
- [67] 张 森,熊红兵. 高速列车部件对整车气动力的影响分析[J]. 制造业自动化,2011,33(4):202-204,217.
- ZHANG Miao, XIONG Hong-bing. Effects of different components on the aerodynamics of high-speed train [J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(4): 202-204, 217. (in Chinese)
- [68] 王东屏,何正凯,李明高,等. 动车组气动阻力降阻优化数值研究[J]. 铁道学报,2011,33(10):15-18.
- WANG Dong-ping, HE Zheng-kai, LI Ming-gao, et al. Numerical research on aerodynamic drag reduction optimization of EMU[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(10): 15-18. (in Chinese)
- [69] 孔学舟,杨明智. 受电弓下沉对高速列车气动阻力的影响[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(9):1805-1813.
- KONG Xue-zhou, YANG Ming-zhi. Influence of pantograph subsidence on high-speed train aerodynamic drag[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(9): 1805-1813. (in Chinese)
- [70] 林 鹏,张 业,郭迪龙. 高速列车受电弓平台的优化设计[J]. 力学研究,2018,7(2):27-35.
- LIN Peng, ZHANG Ye, GUO Di-long. Optimal design of pantograph platform for high-speed trains[J]. International Journal of Mechanics Research, 2018, 7(2): 27-35. (in Chinese)
- [71] 张 雷,杨明智. 受电弓设备对列车气动特性影响的风洞试验[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(12):3894-3898.
- ZHANG Lei, YANG Ming-zhi. Wind tunnel experimental of impact on aerodynamic characteristics for vehicle by pantograph equipment[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(12): 3894-3898. (in Chinese)
- [72] 樊光建. 高速动车组受电弓导流罩优化设计[J]. 科技与企业,2013,5(8):337.
- FAN Guang-jian. Optimal design of pantograph shroud for high-speed EMUs[J]. Technology and Enterprise, 2013, 5(8): 337. (in Chinese)
- [73] 刘海涛,徐志龙. 基于仿生非光滑结构的高速列车受电弓杆件减阻降噪研究[J]. 噪声与振动控制,2018,38(增 1):269-272.
- LIU Hai-tao, XU Zhi-long. Study on drag and noise reduction of pantograph rods based on bionic non-smooth structures[J]. Noise

- and Vibration Control, 2018, 38(S1): 269-272. (in Chinese)
- [74] KING W F, PFIZENMAIER E. An experimental study of sound generated by flows around cylinders of different cross-section[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 328(3): 318-337.
- [75] 石 磊. 圆柱杆件气动噪声仿生控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- SHI Lei. Research on control of aerodynamic noise of circular cylinder using bio-inspired method [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [76] LI Tian, QIN Deng, ZHANG Wei-hua, et al. Study on the aerodynamic noise characteristics of high-speed pantographs with different strip spacings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 202: 104191.
- [77] 于 森, 石俊杰, 耿亚彬. 列车气动阻力风洞试验研究[J]. 铁道机车车辆, 2017, 37(2): 50-52.
- YU Miao, SHI Jun-jie, GENG Ya-bin. Train aerodynamic performance of wind tunnel test research[J]. Railway Locomotive and Car, 2017, 37(2): 50-52. (in Chinese)
- [78] 马梦林, 邓 海, 王东屏, 等. 空调导流罩对列车气动阻力影响的研究[J]. 铁道车辆, 2011, 49(3): 5-6.
- MA Meng-lin, DENG Hai, WANG Dong-ping, et al. Research on effect of air-conditioning domes on aerodynamic resistance of trains[J]. Rolling Stock, 2011, 49(3): 5-6. (in Chinese)
- [79] 洪琪琛, 杨明智, 丁 畅. 空调安装方式优化对列车气动特性影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(10): 183-190.
- HONG Qi-chen, YANG Ming-zhi, DING Chang. Study of the optimization of air conditioner installation mode's effect on aerodynamic performance of high speed train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(10): 183-190.
- [80] 刘加利, 李明高, 张继业, 等. 高速列车流线型头部多目标气动优化设计[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(6): 689-698.
- LIU Jia-li, LI Ming-gao, ZHANG Ji-ye, et al. Multi-objective aerodynamic optimization design of high-speed train streamline head[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2013, 43(6): 689-698. (in Chinese)
- [81] 张 亮, 张继业, 李 田, 等. 超高速列车流线型头型多目标优化设计[J]. 机械工程学报, 2017, 53(2): 106-114.
- ZHANG Liang, ZHANG Ji-ye, LI Tian, et al. Multi-objective optimization design of the streamlined head shape of super high-speed trains[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 106-114. (in Chinese)
- [82] 李 明, 李明高, 李国清, 等. 参数化驱动的高速列车头型气动外形优化设计[J]. 铁道学报, 2013, 35(11): 18-24.
- LI Ming, LI Ming-gao, LI Guo-qing, et al. Optimized design of parametric-driven aerodynamic shape of high-speed EMU head-type[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(11): 18-24. (in Chinese)
- [83] 黄烈威, 李 明, 李国清, 等. 高速动车组受电弓导流罩多学科优化设计[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(6): 53-57.
- HUANG Lie-wei, LI Ming, LI Guo-qing, et al. Optimum multidisciplinary design of the pantograph flow guide mantle for high-speed EMUs[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(6): 53-57. (in Chinese)
- [84] YAO Shuan-bao, GUO Di-long, SUN Zhen-xu, et al. Parametric design and optimization of high-speed train nose[J]. Optimization and Engineering, 2015, 17(3): 1-26.
- [85] 姚拴宝, 郭迪龙, 杨国伟. 基于 GA-GRNN 的高速列车头型三维优化设计[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(11): 1283-1294.
- YAO Shuan-bao, GUO Di-long, YANG Guo-wei. Three-dimensional aerodynamic optimization design of high-speed train nose based on GA-GRNN[J]. Scientia Sinica Technologica, 2012, 42(11): 1283-1294. (in Chinese)
- [86] LI Rui, PING Xu, PENG Yong, et al. Multi-objective optimization of a high-speed train head based on the FFD method[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 152: 41-49.
- [87] SUN Zhen-xu, SONG Jing-jing, AN Yi-ran. Optimization of the head shape of the CRH3 high speed train[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(12): 3356-3364.
- [88] ZHANG Liang, ZHANG Ji-ye, LI Tian, et al. Multi-objective aerodynamic optimization design of high-speed train head shape[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics and Engineering), 2017, 18(11): 841-854.
- [89] 龚 明, 孙守光, 李 强. 横风环境下高速列车头型的多目标优化设计[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(2): 97-106.
- GONG Ming, SUN Shou-guang, LI Qiang. Multi-objective optimization design for nose shape of high-speed train in cross wind conditions[J]. China Railway Science, 2019, 40(2): 97-106. (in Chinese)
- [90] ZHANG Liang, ZHANG Ji-ye, LI Tian, et al. A multi-objective aerodynamic optimization design of a high-speed train head under crosswinds[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(3): 895-912.
- [91] 李春曦, 薛全喜, 张 硕, 等. 微结构表面防微生物粘附机理研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(10): 3903-3913.
- LI Chun-xi, XUE Quan-xi, ZHANG Shuo, et al. Mechanism of biofouling control on micro-structured surface[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 3903-3913. (in Chinese)
- [92] 霍志浩. 高速列车微结构减阻功能表面设计分析与加工实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- HUO Zhi-hao. Design analysis and processing experimental research on microstructure surface of high-speed train with drag reduction function [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [93] 王 政, 李 田, 李 明, 等. 仿生表面微结构减阻优化及机理研究综述[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(4): 325-334.
- WANG Zheng, LI Tian, LI Ming, et al. Review of mechanical research and aerodynamic drag reduction of bionic surface micro-structures[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(4): 325-334. (in Chinese)
- [94] 孙朋朋. 高速列车非光滑车身气动减阻特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- SUN Peng-peng. Research on aerodynamic drag reduction of

- High-speed train with Non-smooth surface[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [95] 朱海燕, 张 翼, 赵怀瑞, 等. 基于边界层控制的高速列车减阻技术[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(2): 64-72.
- ZHU Hai-yan, ZHANG Yi, ZHAO Huai-rui, et al. Drag reduction technology of high-speed train based on boundary layer control [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(2): 64-72. (in Chinese)
- [96] 李 明, 李明高, 李国清. 高速列车表面随行波微细结构减阻技术研究[J]. 铁道车辆, 2017, 55(2): 12-16.
- LI Ming, LI Ming-gao, LI Guo-qing. Research on drag reduction technology of traveling wave microstructure on the surface of high-speed train[J]. Railway Vehicle, 2017, 55(2): 12-16. (in Chinese)
- [97] 张 渊, 张继业, 李 田. 基于非光滑表面的高速列车转向架区域气动减阻性能[J]. 机械, 2016, 43(9): 12-15.
- ZHANG Yuan, ZHANG Ji-ye, LI Tian. Research on the drag reduction characteristics of high-speed train with non-smooth surface[J]. Machinery, 2016, 43(9): 12-15. (in Chinese)
- [98] 杜 健, 龚 明, 田爱琴, 等. 基于仿生非光滑沟槽的高速列车减阻研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(5): 70-76.
- DU Jian, GONG Ming, TIAN Ai-qin, et al. Study on the drag reduction of the high-speed train based on the bionic non-smooth riblets [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(5): 70-76. (in Chinese)
- [99] 王 昊, 牛中国, 蒋甲利. 二维翼型吹/吸气流动控制试验研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(5): 56-63.
- WANG Hao, NIU Zhong-guo, JIANG Jia-li. Experimental study on 2D airfoil blowing and suction flow control [J]. Aeronautical Science and Technology, 2020, 31(5): 56-63. (in Chinese)
- [100] 黄宝佳. 一种新型吹吸气相结合的方法控制流动分离[J]. 科技创新与应用, 2017, 7(2): 56.
- BEN Bao-jia. A new method of combined blowing and suction to control flow separation [J]. Technology Innovation and Application, 2017, 7(2): 56. (in Chinese)
- [101] 刘沛清, 马利川, 屈秋林, 等. 低雷诺数下翼型层流分离泡及吹气控制数值研究[J]. 空气动力学学报, 2013, 31(4): 518-524, 540.
- LIU Pei-qing, MA Li-chuan, QU Qiu-lin, et al. Numerical investigation of the laminar separation bubble control by blowing suction on an airfoil at low Re number [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2013, 31(4): 518-524, 540. (in Chinese)
- [102] 孙宗祥. 等离子体减阻技术的研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(1): 87-94.
- SUN Zong-xiang. Progress in plasma assisted drag reduction technology [J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(1): 87-94. (in Chinese)
- [103] 胡兴军, 惠 政, 郭 鹏, 等. 基于等离子体流动控制的车辆减阻试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 10-15.
- HU Xing-jun, HUI Zheng, GUO Peng, et al. Experimental investigation into vehicle drag deduction based on plasma flow control [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(11): 10-15. (in Chinese)
- [104] 王靖宇, 耿亚林, 惠 政, 等. 基于等离子体流动控制的方背式汽车模型减阻研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(6): 753-758, 770.
- WANG Jing-yu, GENG Ya-lin, HUI Zheng, et al. Study on drag reduction of square-back ahmed model based on plasma flow control [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(6): 753-758, 770. (in Chinese)
- [105] 高国强, 颜 馨, 彭开晟, 等. 等离子体流动技术在列车减阻应用上的初步研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 855-862.
- GAO Guo-qiang, YAN Xin, PENG Kai-sheng, et al. Primary research on drag reduction of train based on plasma flow [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 855-862. (in Chinese)
- [106] 洪延姬, 李 倩, 方 娟, 等. 激光等离子体减阻技术研究进展[J]. 航空学报, 2010, 31(1): 93-101.
- HONG Yan-ji, LI Qian, FANG Juan, et al. Advances in study of laser plasma drag reduction technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(1): 93-101. (in Chinese)
- [107] 张 进, 余春锦, 张彬乾. 微型涡流发生器对超临界翼型升阻特性影响实验研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(9): 1461-1465.
- ZHANG Jin, YU Chun-jin, ZHANG Bin-qian. Experimental study of micro vortex generator effects on lift-drag characteristics of a supercritical airfoil [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(9): 1461-1465. (in Chinese)
- [108] 刘小民, 党 群, 张 炜, 等. 涡流发生器在流体机械流动控制中应用研究进展[J]. 流体机械, 2007, 35(3): 33-40.
- LIU Xiao-min, DANG Qun, ZHANG Wei, et al. Study development of applying vortex generator jet to flow control in fluid machinery [J]. Fluid Machinery, 2007, 35(3): 33-40. (in Chinese)
- [109] 李斌斌, 姚 勇, 印 帅, 等. 基于涡流发生器的 Ahmed 模型分离流被动控制实验[J]. 西南科技大学学报, 2016, 31(3): 95-101.
- LI Bin-bin, YAO Yong, YIN Shuai, et al. Experimental investigation on passive control of Ahmed model separation flow based on vortex generator [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2016, 31(3): 95-101. (in Chinese)