

文章编号: 1005-0523(2020)04-0088-08

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.04.014

凸包非光滑表面高速列车气动阻力及噪声研究

朱海燕, 胡华涛, 尹必超

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为减少高速列车在运行中的气动阻力及噪声,提高列车运行效率、节约能耗,提升旅客乘坐舒适度,提出凸包非光滑表面减阻技术应用于高速列车领域。以CRH3型高速列车为研究对象,通过在车体的头部和尾部加设凸包来控制湍流特性,以达到减阻、降噪效果。首先,利用PRO/Engineer建立非光滑表面CRH3高速列车简化模型,采用ICEM CFD软件对模型划分非结构网格;其次,应用Fluent流体仿真软件基于标准模型对稳态运行速度为300 km/h时的列车进行仿真计算空气阻力;最后,利用宽频带噪声模拟气动性能良好的列车外表面噪声。结果显示:将间距为460 mm、半径为40 mm、高度为10 mm的凸包阵列结构布设在前挡风玻璃周围对减小气动阻力有积极作用,阻力值为3 715 N,减阻率为1.77%,而此参数凸包非光滑对列车裙板上缘有普遍降噪效果,最大降噪率为1.72%,而对车鼻处及车顶部则会增加噪声。研究表明,通过在头车加设凸包可以改变边界层湍流特性达到减小列车气动阻力及降低部分位置气动噪声的效果。

关键词:车辆工程;高速列车;边界层控制;非光滑表面;凸包;减阻;降噪

中图分类号:U270

文献标志码:A

本文引用格式:朱海燕,胡华涛,尹必超,等.凸包非光滑表面高速列车气动阻力及噪声研究[J].华东交通大学学报,2020,37(4):88-95.

Citation format:ZHU H Y, HU H T, YIN B C. Research on aerodynamic resistance and noise of high-speed train with convex non-smooth surface[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(4): 88-95.

节能环保是现代高速列车主要设计方向之一,其中低阻力及降噪是两大必不可少的设计主题^[1]。气动阻力与速度的平方成正比。列车速度越高,气动阻力对高速列车的作用越明显。因此,降低高速列车的气动阻力和能量消耗是开发理想列车系统的基本要求之一。行驶中的列车上的气动阻力分为压力阻力和摩擦力。相关风洞实验表明,头车空气阻力与其流线型头部长度线性相关,而尾车阻力与这一指标呈二次幂关系^[2-4]。

由于通过改变列车造型改善空气阻力值的方法已经非常成熟,且一味通过加大细长改善列车气动性能会增加列车头、尾部许多不可利用的空间,这与节能、减排的宗旨背道而驰。而非光滑表面减阻的探究已经在旋成体、面板等的研究对象上做了大量数值仿真、水槽实验以及风洞试验^[5-7]。

非光滑表面减阻技术运用于高速列车领域,对节能减排有重大意义。同时,虽然国、内外学者对高速列车减阻技术做了大量的研究,但是大多数学者仅单纯研究列车直线行驶时的减阻性能,很少人会对优化设计后的列车模型进行场景分析以及安全评估,气动噪声伴随列车从启动到停止整个运行过程,是列车乘坐舒适度评价中不可忽视的环节,值得在考虑列车减阻效果的同时列入减阻效果验证范围。

受自然界中蜚螂体表结构启发,基于现有线路服役工况列车,设计凸包非光滑表面应用于高速列车表面,结合标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和宽频带噪声模型,对凸包非光滑表面湍流动能特性进行研究,得到气动阻力及气动噪声变化规律。

收稿日期:2019-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51665015);江西省自然科学基金项目(20181BAB206025);江西省教育厅科技项目(GJJ170368)

作者简介:朱海燕(1975—),男,博士,副教授,研究方向为车辆系统动力学与疲劳强度。

1 气动阻力与声学理论

1.1 基本控制方程

按照《列车空气动力学概念》中的速度区段的划分,列车运行速度属于低速流(马赫数 $Ma < 3$),除去研究两列车会车和列车过隧道两种情况,对列车进行研究时,外部流场采用不可压缩黏性流,认为密度为常数^[8]。连续方程如(1)所示

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

3 个方向的运动方程为(2)

$$\frac{\partial}{\partial t}(u_i) + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2)$$

式中: u_i 或 u_j 为流场速度; x_i 或 x_j 为坐标; p 为流场压力; ρ 为空气密度,此处视为常量。

本文研究基于稳态流场,故采用标准 $k-\varepsilon$ 模型

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho k v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho k w)}{\partial z} = \rho \varepsilon + G_k + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] \quad (3)$$

式中: ε 为湍流耗散率。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: μ_t 为湍流黏性系数; k 为湍流动能; μ 为层流黏性系数; $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 是通过参考已发表的文献得出的经验常数,取值如下: $C_1=1.47, C_2=1.92, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.33$ 。

1.2 宽频带噪声模型

宽频带噪声模型计算的优势是消耗资源较小,缺陷是计算结果不够准确,更多用于定性分析,能够快速分析气动噪声大小,本文侧重探究非光滑表面是否能够降低气动噪声,仅对噪声相对大小做比较。宽频带噪声模型声功率公式如式(3)所示^[9]

$$P_A = a \rho_0 \left(\frac{\mu}{L} \right) \frac{\mu^5}{c_\infty^5} \quad (5)$$

式中: μ 为湍流速度; L 为湍流尺度; c_∞ 为声速; a 为模型常量。采用湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 可表示为

$$P_A = a_\varepsilon \rho_0 \varepsilon M_t^5 \quad (6)$$

式中: $M_t = \sqrt{2k} / a_0$, 设置 $a_\varepsilon = 0.1$ 。

气动噪声声功率级如式(5)所示

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_A}{P_{ref}} \right) \quad (7)$$

式中: P_{ref} 参考声压,取 10^{-12} W/m^3 。

2 数值模型

以匀速 300 km/h 行驶的 CRH3 型高速列车为研究对象,为突出研究内容,排除其他干扰因素,作以下假设:

- 1) 车体外部绝对光滑,忽略列车本身材料粗糙度的影响;
- 2) 空气流体介质均匀,且不受重力影响;
- 3) 计算忽略车体外部复杂结构的细节,受电弓、转向架及车辆连接部位等均未细致模拟,认为车体具有光滑外形的几何体。

2.1 列车与凸包非光滑结构物理模型

以 CRH3 高速列车光滑表面模型为参考对象,如图 1 所示,重点分析非光滑结构表面对列车阻力及噪声的影响,不考虑受电弓、转向架等在实际运行过程中的干扰因素。模型尺寸设置与原车比例为 1:1,考虑头、中、尾 3 节车厢编组,列车编组长 75 m,头、尾车长 25.6 m,车辆高度为 3.89 m,车辆宽度为 3.265 m,高

速列车整体模型如图 1-a 所示。

凸包结构采用凸包线性阵列而成,凸包采用球型凸包,凸包单元之间采取等距阵列的方式分布,研究中涉及三个参数的变化,分别是凸包高度 H 、凸包半径 R 以及凸包之间的阵列距离 D ,参数表示如图 1-b 所示,凸包结构形态如图 1-c 所示。

2.2 计算域模型

考虑计算效率问题,采用半列车模型,计算域采用长方体,长度设置为 450 m,宽度为 24 m,高度为 36 m。列车头部距离计算域出口 75 m,列车底部距离地面 0.5 m,列车与计算域关系模型如图 2-a 所示。

2.3 网格划分及其独立性验证

采用 ICFM CFD 软件对计算模型进行网格划分,车体与计算域均采用四面体网格,为减少列车周围的湍流影响,对列车采用网格加密处理,由于非结构性网格划分存在一定的不确定性,为尽量排除网格质量对数值计算的影响,考虑首先对光滑车体模型设置 4 种不同尺寸的网格划分方案,在 FLUENT 中采用同条件进行数值模拟,将结果进行对比,网格参数及结果见表 1。

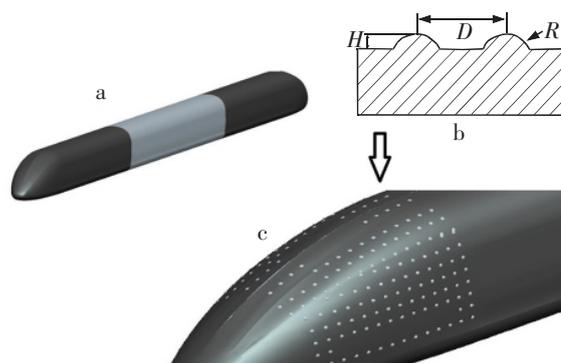


图 1 列车模型

Fig.1 Train model

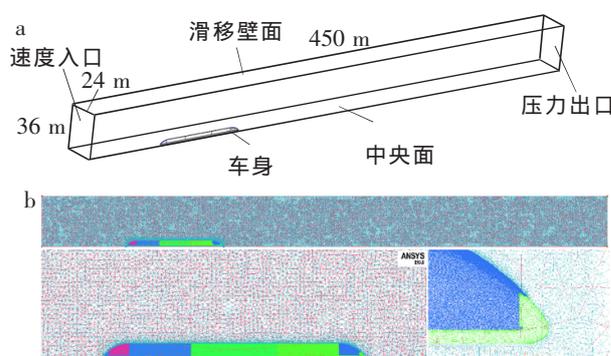


图 2 计算模型

Fig.2 Computation model

表 1 网格划分方案
Tab.1 Meshing scheme

| 模型代号 | A | B | C | D |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 计算域/mm | 180 | 200 | 220 | 240 |
| 车身/mm | 8 | 10 | 12 | 12 |
| 非光滑表面结构/mm | 2 | 2 | 2.2 | 2.4 |
| 网格数量 | 9 237 267 | 9 237 090 | 7 302 134 | 3 414 908 |
| 阻力值/N | 3 783.55 | 3 782.48 | 3 871.12 | 4 021.33 |
| 变化率/% | - | -0.028 | 2.314 | 6.284 |

由表 1 可知:方案 A 与方案 B 划分出的网格更精细,质量更好,网格数量相近,计算结果变化量为 -0.028%,表明网格在此范围内网格参数对流场数值计算影响可忽略不计,所以车辆模型的网格划分采用方案 B 进行;计算域除列车外参数为 200 mm;列车中部、底面、车头、尾未布置非光滑结构处为 10 mm;车头、尾布置非光滑结构处为 2 mm,网格数量维持 920 万至 930 万之间,计算域及列车局部网格模型如图 2-b 所示。

2.4 边界条件设置

在对无横向风、明线工况下高速列车运行的研究中,根据相对运动原理,假定列车静止,让空气相对高速流动的方法来模拟。列车运行速度为 300 km/h,故将速度入口速度设置为 83.33 m/s,车身视为刚体,设为固定壁面;列车在明线工况下匀速运行,将滑移壁面模拟运行时的底面、侧面和顶面,分别模拟列车在运行过程中的轨道和无穷远处的空气,采用这种移动壁面技术能够有效地避免空气附面层问题^[10],实现比较真实模拟列车运行流场,同时将中央面设为对称面以减少仿真计算量,边界条件的具体设置见表 2 及图 2-a 所示。

表 2 边界条件
Tab.2 Boundary conditions

| 边界名称 | 条件 |
|----------|------------------------------|
| 速度入口 | 速度为 83.33 m/s |
| 压力出口 | 无压力 |
| 车身 | 固定壁面 |
| 底面、侧面和顶面 | 滑移壁面,速度为 83.33 m/s,方向与速度入口一致 |
| 中央面 | 对称面 |

3 计算结果分析

对比对象是全光滑表面 CRH3 高速列车简化车身,由数值仿真结果可知:光滑表面列车阻力 3 782.48 N,其中压差阻力为 305.1 N,黏性阻力为 3 477.4 N。

3.1 凸包不同位置对列车阻力的影响

首先探究了凸包非光滑结构设置于 3 个不同位置对气动阻力的影响,分别是列车头部挡风玻璃周围流线型区域图 3(a)、车头流线型区段后方图 3(b)以及流线型区段车底区域图 3(c)。在运行过程中,头车和尾车是空气流速最大的区域,因此更多考虑将凸包非光滑结构布置于列车头部与尾部的各个区域。对三个位置布置同一参数的凸包非光滑结构,对其进行计算后发现凸包结构布置于车头流线型区段后方时列车气动阻力为 4 212.56 N,凸包结构布置于流线型区段车底区域时列车气动阻力为 4 075.43 N,均有比较明显的增阻效果,而在列车头部车鼻以上流线型区域布置凸包结构虽然使空气阻力有所增加,但是增量很小,因此对此位置凸包参数做进一步探究。

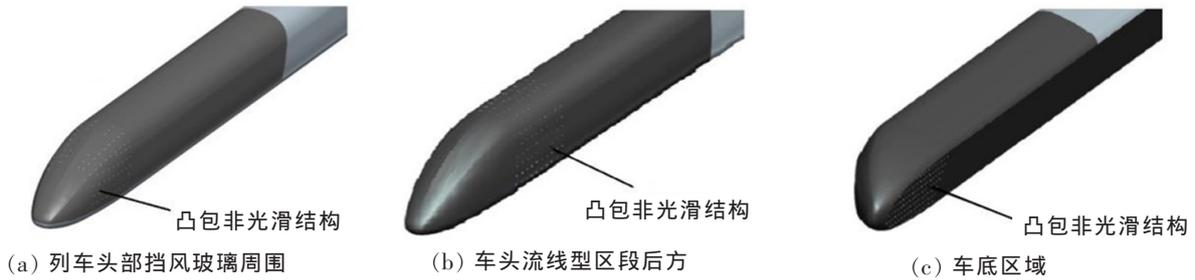


图 3 非光滑区域布置位置

Fig.3 Location of non-smooth areas

3.2 凸包各参数对列车阻力的影响

首先,将凸包半径和阵列距离作为不变参数,将凸包高度作为变量,探究凸包最佳高度。以高度 5 mm 为起点,以 5 mm 步长进行递增计算,得出气动阻力随凸包高度呈现先减少后递增的规律,在高度为 10 mm 时,列车阻力达到最小值;其中所有凸包非光滑模型的黏性阻力均小于光滑列车模型,而压差阻力则大体呈现随凸包高度递增而递增的规律。

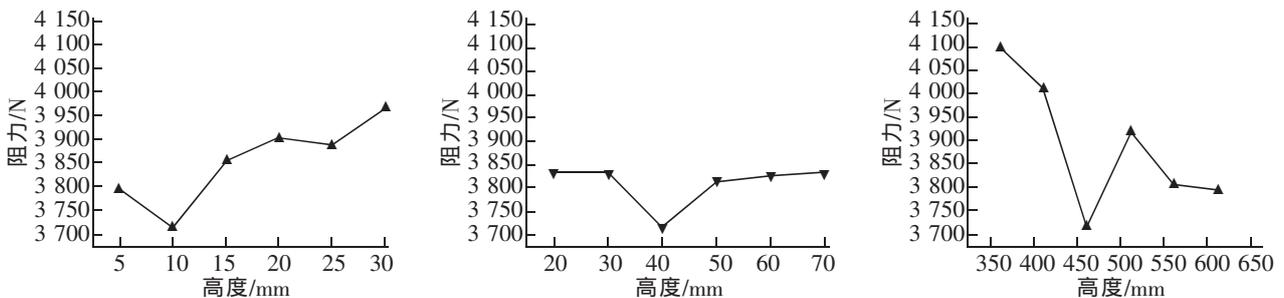


图 4 凸包各参数对气动阻力影响

Fig.4 Influence of parameters for convex hull on aerodynamic drag of train

其次,设定阵列距离为 460 mm、半径为 40 mm,以 20 mm 为起点,10 mm 步长递增设置凸包半径。发现结构中凸包半径分别为 30,40,60 mm 和 70 mm 时,对比光滑列车,黏性阻力均有不同程度减小,其中在半径为 40 mm 时,列车受到的黏性阻力最小,而压差阻力则均有所增加。总阻力随凸包半径变大呈现先减小后变大的趋势,在凸包半径为 40 mm 时阻力最小,约为 3 715 N。

最后,设定凸包高度为 10 mm,半径为 40 mm,整车黏性阻力均小于光滑平面列车,但压差阻力有不同程度的增加。整体趋势阻力随阵列距离增大而减少,在阵列距离为 460 mm 时,出现最小阻力值,在距离为 510 mm 时,阻力稍有增大,但随着阵列距离的持续增加,阻力值又开始下降向光滑表面列车阻力值接近,此时,非光滑结构亦开始接近光滑结构,但不会小于光滑面列车气动阻力。

凸包非光滑表面对高速行驶列车的黏性阻力有减少的效果,而会增加列车压差阻力。其中,对比光滑面列车空气阻力各项指标,当凸包高度、半径、距离分别为 10,40,460 mm 时,列车的黏性阻力减少 189.6 N,降幅达到 5.45%,压差阻力增加 122.6 N,合计总阻力下降 67 N,降幅为 1.77%。

3.3 凸包结构对列车噪声的影响

仿真对列车 8 个近壁位置设置监测点,分布如图 5 所示,测点 1,8 分布于车鼻处,测点 2,3,6,7 分布于凸包结构区域边缘,测点 4,5 位于列车中部,其中,测点 2,4,6 位于列车顶部中线处,测点 3,5,7 位于裙板上缘。列车各位置处噪声对比如表 3 所示,测点 3,5,7 检测到的噪声值对比光滑列车同位置噪声值有不同程度的下降,列车头部非光滑结构边缘测点减噪效果最好,降噪率为 1.7%。而分布在其他位置的噪声值有不同幅度的增加,增幅达 10%,但增量控制在 5 dB 以内,且位置均远离车内乘坐位置,对乘客舒适度影响较小。

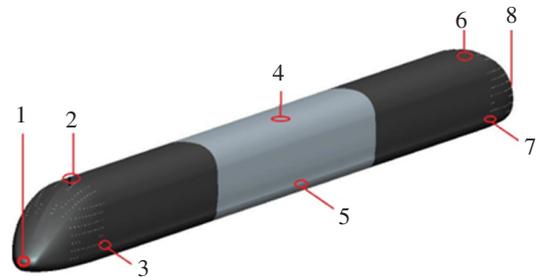


图 5 测点分布位置

Fig.5 Measuring point distribution

表 3 不同位置处噪声
Tab.3 Noise value at different positions

| 测点位置 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 光滑表面列车噪声/dB | 41.52 | 54.27 | 42.31 | 49.98 | 45.63 | 45.64 | 57.61 | 48.64 |
| 凸包非光滑表面列车噪声/dB | 43.20 | 56.63 | 41.58 | 54.43 | 45.26 | 46.37 | 57.33 | 49.26 |

由计算结果可知,头车噪声峰值在列车流线型区域端部,而尾车噪声峰值出现在裙板上边缘处。尾车鼻处噪声值大于头车车鼻处噪声,尾车裙板上边缘与非光滑结构交界处噪声则显著大于头车同位置处噪声,而尾车顶部非光滑结构边界处噪声值较大幅度小于头车同位置处噪声值。

凸包非光滑表面改变使高速列车边界层结构发生变化,使得高湍流动能区域转移至车身上部,相对的,车身下部湍流低湍流动能区域。

4 机理分析

从宏观角度来看:凸包非光滑结构存在使表面边界层厚度增加,改变边界层附近的流体特征,使底层流向涡与壁面之间产生一定距离,进而改变近壁区的湍流强度,一定参数的凸包非光滑表面的湍流强度会降低,相对的,传输能量损耗亦将减少,非光滑结构使得流场湍流耗散率区域位置及面积发生变化,相对高耗能区域面积变小,湍流耗散率降低,减少边界层流的能量损失,产生减阻降噪效果。列车表面湍流动能对比如图 6 所示,凸包非光滑表面列车湍流动能上限降低,凸包结构使得部分高湍流动能区域转变为低湍流动能区域。

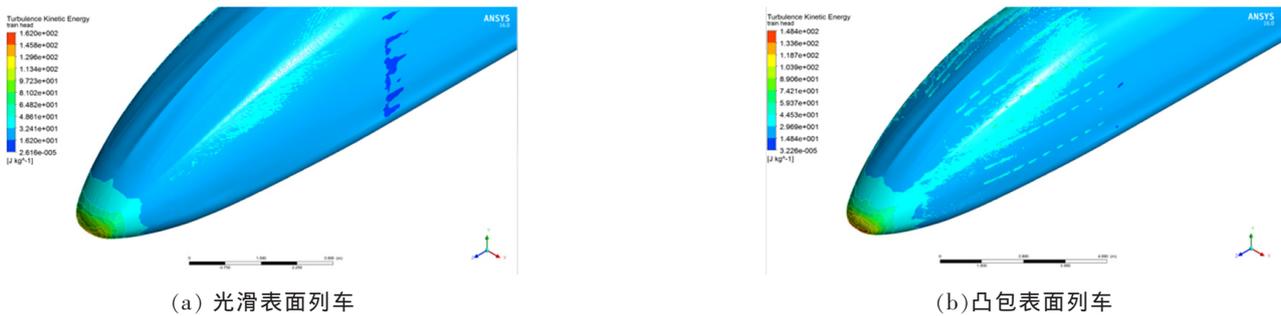


图 6 列车表面湍流动能

Fig.6 Turbulent flow energy on the train surface

列车运行的过程中,气体扰流使得每个凸包迎风面压力增大,背风面压力增量更小,如图 7 所示,故形成额外压力差,增加列车压差阻力,这是每组凸包非光滑表面列车压差阻力上升的主要原因。但是非光滑结构的存在会改变光滑列车表面形成稳定的边界层,使边界层厚度有所增加,降低了列车表面近壁区的速度梯度,减少了能量的损耗,有利于降低表面的黏性阻力。

从微观角度出发:当高速运动的空气粒子通过凸包区域时,大致分为两种情况:一种部分粒子以高速流经凸包顶端,另一部分则以次高速环绕凸包周围经过,而空气粒子在凸包纵向前后速度明显降低。凸包高度影响高速粒子数量,而凸包半径的变化则影响流经凸包周围的次高速空气粒子数量,粒子流速大小和数量决定列车表面能量的消耗,流经表面的高速及次高速流动粒子数量增多会增加列车气动阻力。

通过单个凸包周围空气粒子流动矢量图,如图 8(a)所示,可以看出在凸包纵向前后区域的空气粒子速度明显低于光滑处流速,结构中凸包间区域内粒子流速更慢,如图 8(b)所示,能量流失更小,合适的凸包距离能够保证这一区域的面积,实现各阶耗能之间的最佳比例,从而最大程度的减少高耗能区域,过小距离不能达到最大低耗能区域面积,而过大距离则使得凸包之间相互作用失效,非光滑结构中凸包变成单独的个体,失去结构的整体性。而阵列距离的增加,相对应的,凸包数量会减少,气动阻力大小向光滑表面列车逼近,但由于凸出物的存在,阻力不会再次小于光滑表面列车。因此,过大或者过小的阵列距离都会破坏各阶耗能区域面积比例的平衡。

事实上,凸包三个参数共同作用,影响凸包区域的空气流场,合适的凸包参数能够使非光滑表面对减少气动阻力产生积极影响。而合理的凸包结构位置能够改变空气流场分布,实现对空气粒子与列车表面摩擦产生的机械能转移,以此达到降低关键位置的噪声强度。通过分析列车中部的声功率分布以及噪声测点,可知布置于车头和车尾的非光滑结构不仅改变结构附近空气流场,对一定范围内的远场也存在影响。

综上所述,非光滑结构中的凸包可以降低部分凸包结构区域的空气流速,气流流经车身流线型区域时消耗的能量有所减小,流经车头、尾气流的粘性力与表面相互作用减小。

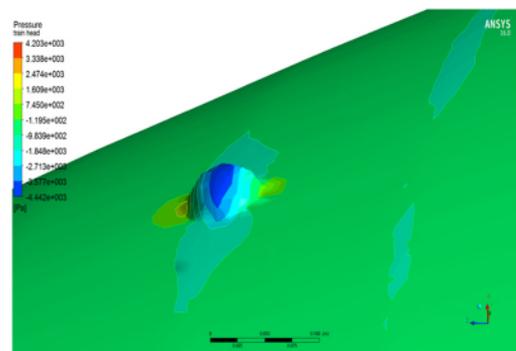
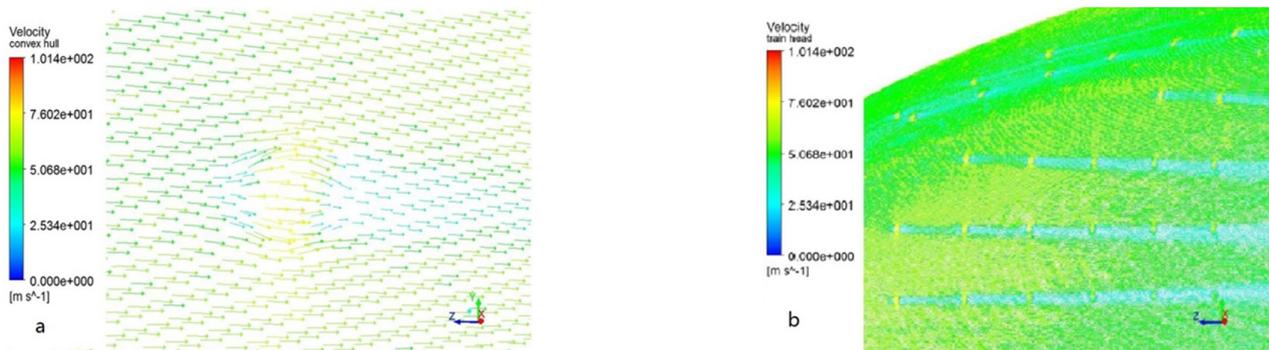


图 7 凸包压力分布

Fig.7 Convex pressure distribution



(a) 凸包周围空气粒子流动矢量图

(b) 凸包阵列空气粒子流动矢量图

图8 空气粒子运动矢量图

Fig.8 Air particle motion vector

5 结论

本研究通过建立 CRH3 简化高速列车的三维流场仿真模型, 利用标准模型计算 CRH3 列车 300 km/h 速度工况下的外部稳态流场。基于稳态流场计算列车气动阻力, 并采用宽频带噪声模型计算列车表面气动噪声。结合凸包非光滑结构, 设计 13 种不同参数的凸包非光滑结构布置于列车头、尾流线型区域, 得出以下结论:

- 1) 车头非流线区域及车底区域的凸包非光滑表面不能降低高速列车的气动阻力, 车头流线型区域适当尺寸的凸包结构能够有效降低列车气动阻力, 将间距为 460 mm, 半径为 40 mm, 高度为 10 mm 的凸包阵列结构布置于列车头部流线型区域会增加压差阻力, 但是对减少黏性阻力有更明显的效果。总体来说, 此结构附着于列车车鼻处具有最为良好的减阻效果, 减阻率可达 1.77%。
- 2) 凸包非光滑表面能够改变高速运行列车表面边界层厚度, 对于流线体的尾部负压区抑制作用有限, 但是可以一定程度减少其头部空气流场的高端流动能区域面积及湍流动能上限。
- 3) 对比于光滑车身高速度列车气动噪声, 凸包非光滑表面列车在列车裙板上方接近乘客位置处有一定的降噪效果, 但是会增加车鼻以及车顶处噪声。

参考文献:

- [1] 张曙光. 高速列车设计方法研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [2] 邵微. 高速列车车头空气动力学结构优化研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2014.
- [3] HEMIDA H, KRAJNOVIC S. LES study of the influence of the nose shape and yaw angles on flow structures around trains[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2010, 98(1): 34-46.
- [4] 张在中, 周丹. 不同头部外形高速列车气动性能风洞实验研究[J]. 中南大学学报, 2013, 44(6): 2603-2608.
- [5] WALSH M J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets[C]//20th aerospace sciences meeting. 1982: 169.
- [6] WALSH M J. Riblets as a viscous drag reduction technique[J]. AIAA journal, 1983, 21(4): 485-486.
- [7] BUSHNELL D M, HEFNER J N. Viscous drag reduction in boundary layers[J]. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1990, 123: 203-261.
- [8] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [9] LILLEY G M. The radiated noise from isotropic turbulence[J]. Theoretical and Computation Fluid Dynamics, 1994, (6): 1993: 93-74.
- [10] 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): 547-563.

Research on Aerodynamic Resistance and Noise of High-Speed Train with Convex Non-Smooth Surface

Zhu Haiyan, Hu Huatao, Yin Bichao

(School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to reduce the aerodynamic drag and noise of high-speed trains in operation, improve the train operation efficiency, save energy consumption and improve the comfort of passengers, the convex hull non-smooth surface drag reduction technology is applied to the field of high-speed trains in this paper. Taking the CRH3 high-speed train as the research object, the turbulence characteristics are controlled by adding convex hulls at the head and tail of the car body to achieve the effects of drag reduction and noise reduction. Firstly, the simplified model of non-smooth surface CRH3 high-speed train was built by PRO/Engineer. The model was divided into unstructured grids by ICEM CFD software. Then the fluent fluid simulation was used to simulate the train with steady-state running speed of 300 km/h based on the standard model to calculate the air resistance. Finally, the train with good aerodynamic performance is simulated by using broad band noise. The results show that the convex hull array structure with a pitch of 460 mm, a radius of 40mm and a height of 10 mm around the wind screen has a positive effect on reducing the aerodynamic drag. The resistance value is 3 715 N, and the drag reduction rate is 1.77%. The parameter convex hull is non-smooth and has a general noise reduction effect on the upper edge of the train skirt, with the maximum noise reduction rate of 1.72%, and noise is added to the nose and the top of the car. It can be seen that by adding a convex hull in the head car, the turbulence characteristics of the boundary layer can be changed to reduce the aerodynamic drag of the train and reduce the aerodynamic noise at some positions.

Key words: vehicle engineering; high-speed train; aerodynamics; non-smooth surface of convex hull; drag reduction; noise reduction

(上接第 81 页)

Study on the Lengths of Upstream Transition Area in Freeway Reconstruction Guidance Section

Liu Xueqiang¹, Lv Lu², Fan Xiangxi^{3,4}, Meng Lingxiao^{3,4}, Liu Xuanzhi¹, Bao Qingwei¹, Xu Haidong¹

(1. China State Construction Port Engineering Group Corp., Ltd, Qingdao 266033, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. China State Construction Engineering Investment Corporation Shandong Branch, Jinan 250002, Shandong, China; 4. China State Construction Engineering Infrastructure Corporation, Beijing 10089, China)

Abstract: During the reconstruction and expansion of the expressway, the upstream transition zone was set up to ensure the smooth transition of vehicles from the closed lane to the open lane. In this paper, traffic flow operation data of 7 construction schemes of Binlai expressway were collected on the spot, including road widening, bridge widening, interchange reconstruction, lane passage by using the road of opposite side, roadbed elevation, flyover and road to bridge. Single factor analysis of variance showed that there was no significant difference in headway and running speed between interchange reconstruction area and lane passage guide zone. Through the UC-win/Road driving simulation experiment, it is verified that the theoretical calculation results of the length of the upstream transition zone of the three construction schemes of road widening, bridge width and interchange reconstruction meet the requirements of the simulation experiment. In the actual setting, the length of the upstream transition zone of the leading road can be calculated according to the acceptable gap theory.

Key words: freeway reconstruction; road guidance area; single factor analysis of variance; lengths of upstream transition area