

高速列车车顶受电弓气动噪声仿真研究

董继蕾, 沈火明

(西南交通大学力学与力学工程学院, 成都 610031)

摘要:随着我国高速动车组运行速度的不断提升,其产生的噪声对乘客舒适度及周边环境的影响也日益严重。列车运行时,其噪声源主要包括振动噪声、气动噪声和牵引电机等设备产生的噪声。利用 ANSYS 的 FLUENT 流体力学分析模块,建立了 350 km/h 下受电弓三维有限元仿真分析模型,求解了列车不同运行速度下受电弓表面脉动压力及环境中的噪音强度。研究成果为抑制列车高速运行时受电弓产生的噪音污染提供了一定的理论基础。

关键词:高速列车;受电弓;气动噪声;声压级;数值仿真

中图分类号:TB533+2

文献标志码:A

引言

随着列车运行速度的不断提升,列车在运行时所产生的气动噪声也越来越大,导致声源附近噪音过强,不仅影响列车车厢内乘客的舒适度,还可能对列车所经周边环境带来噪音污染^[1-3]。研究发现,当列车时速超过 300 km/h 时,列车与空气相互作用引起的气动噪声将超过轮轨振动噪声,成为列车主要噪声源,并成为制约列车运行速度提高的重要影响因素之一^[4-5]。列车气动噪声主要包括列车车头、车体转向架、受电弓等与空气相互作用产生的脉冲压力变化引起的噪声。

到目前为止,国内外对这方面的研究还很少。中国科学院力学研究所孙振旭等人对 CRH3 型高速列车在时速 300 km/h 下气动噪声进行了研究^[6],主要对列车车头、车厢连接处、车尾的流场特性进行求解分析。西南交通大学刘加利等人对高速列车车头气动噪声进行了数值分析^[7-8],通过标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和大涡模拟计算了瞬态流场,利用宽频带噪声源模型和 Lighthill 声学比拟理论分别计算了列车表面气动噪声源和远场

气动噪声强度。文献[9]对 350 km/h 高速列车气动噪声声源识别进行了研究,结果表明:头车转向架轮轨接触位置气动噪声强度最大,其次为受电弓位置。国内对列车受电弓气动噪声的仿真还较少,因此有必要对高速列车受电弓气动噪声进行深入的研究。

本文利用仿真软件建立了动车组车顶受电弓三维有限元计算模型,分析了车顶受电弓远端辐射场声压级强度,研究了弓网气动噪声强度与列车运行速度的关系,以期找到针对性的抑制策略。

1 气动噪声数值分析

目前,比较成熟的研究气动噪声主要是基于 Lighthill 声学比拟理论和 FW-H 方程的方法,首先通过 CFD (计算流体力学)方法可计算得高速运动列车受电弓表面的脉动压力分布情况,然后基于 FW-H 方程求解得远近辐射噪声场分布情况。

英国科学家 Lighthill 通过 N-S 方程和介质连续性方程推导出了声学理论基本方程^[10]:

收稿日期:2016-03-21

基金项目:牵引动力国家重点实验室开放课题资助(TB1305);四川省青年科技创新团队(2013TD0004)

作者简介:董继蕾(1990-),女,安徽池州人,硕士生,主要从事结构振动方面的研究,(E-mail)dongjilei0801@163.com;

沈火明(1968-),男,江苏苏州人,教授,博士,博士生导师,主要从事结构振动与控制、工程结构仿真等方面的研究,(E-mail)hmshen@126.com

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial \tau^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho' = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial y_i \partial y_j} \quad (1)$$

其中: $T_{ij} = \rho u_i u_j - e_{ij} + \delta_{ij}(p') - c_0^2 \delta_{ij}(\rho')$, 为 Lighthill 张量; $e_{ij} = \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (\frac{\partial u_x}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_x} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k})$, 为粘性应力张量; $\rho' = \rho - \rho_0$ 为流体密度的波动量, ρ_0 为未受扰动的流体密度; $p' = p - p_0$ 为流场中压力脉动量, p_0 为未受扰动的流场压力; δ_{ij} 为单位张量; c_0 为真空中声速。考虑运动固体边界的影响,得 FW-H 声学类比方程:

$$\rho' = \frac{\partial}{\partial t} \int_{S(t)} \frac{\rho_0 v'_n}{R |1 - M_a|} dS(\zeta) - \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \int_{S(t)} \frac{f_i}{R |1 - M_a|} dS(\zeta) + \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_{V(t)} \frac{T_{ij}}{R |1 - M_a|} dv(\zeta) \quad (2)$$

式中: $R = |x - y|$, x 为观测点的位置, y 为声源的位置; f_i 为静止固体边界的单元法向量; M_a 为运动马赫数在观测方向上的投影。

由式(2)可知,距离列车远场点 x 处声压强与列车表面的脉动压力梯度有关,因此,如果得到了列车表面脉动压力参数,就可以求解出列车远场气动噪声声压值。

2 动车组受电弓仿真模型

气动噪声是空气流过固体表面时相互作用的结果,利用 ANSYS 软件的 Fluent 模块,可以完成流体、热传递等流体动力学相关的仿真。我国动车组八辆一个编组,当运行需要时,可由两个短编组联挂成一个长编组运行,动车组受电弓位置如图 1 所示。仿真模型为 CRH3 型车受电弓,模型包括受电弓、3 个支撑绝缘子、3 个底座,列车在运行时,只升起一个受电弓,仿真模型如图 2 所示。

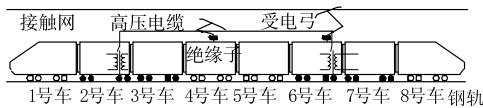


图 1 动车组受电弓位置

受电弓按实际车体模型建立,求解域尺寸分别为:长 40 m,宽 30 m,高 30 m。其中空气假设为理想气体。边界条件设置为:列车运行前方求解域端面为速度入口,后方为大气压力出口,车体表面为无穿透固定壁面。列车运行时速为 350 km/h。求解域如图 3 所示。

首先利用 CATIA 软件建立列车三维模型,导入 ANSYS CFD 对列车及仿真求解域进行网格划分,最后利用 Fluent 流体分析模块求解受电弓表面声功率级强度,进而求解远场噪声强度。

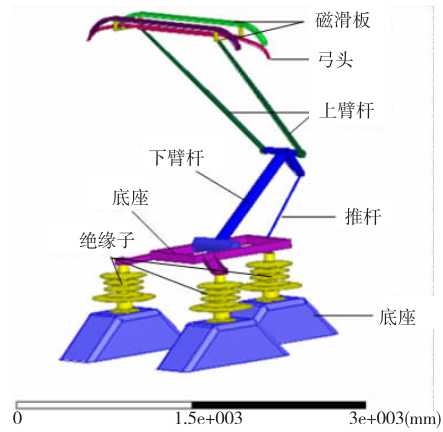


图 2 受电弓仿真模型

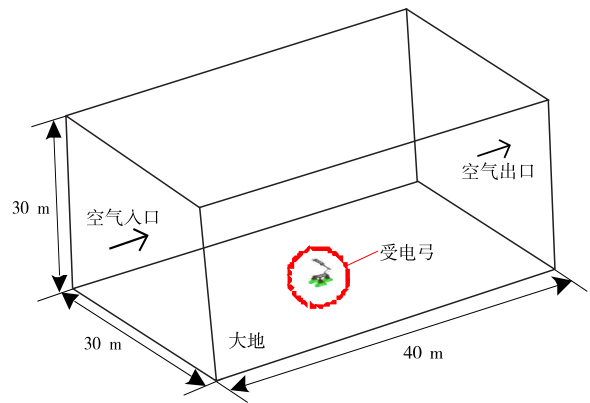


图 3 仿真模型求解区域

3 动车组弓网气动噪声结果分析

列车运行时速为 350 km/h 时,受电弓表面稳定压力图如图 4 所示。

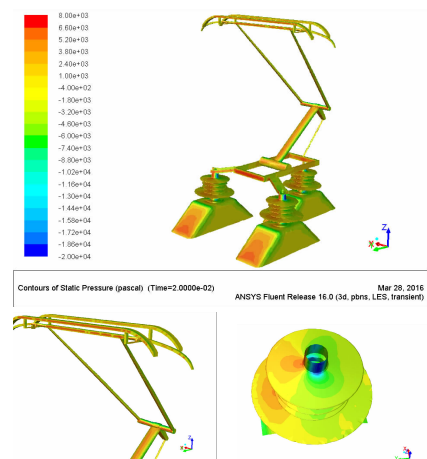


图 4 受电弓表面压力云图

由上图可知,列车受电弓表面气动噪声较强的区域主要集中在碳滑板迎风面和绝缘子表面,支杆连接处压力也较强。

在受电弓碳滑板表面分别选取8个观测点,分别位于为碳滑板表面、上连杆中点、下连杆中点、绝缘子表面(包括绝缘子迎风面、侧风面及背风面),如图5所示。图6为不同观测点脉动压力分布图。

通过分析图6可得,受电弓表面脉动压力是不断变化的,因而会产生脉动噪声,其产生的频谱与脉动压力频谱基本一致,机械不平顺处如支杆连接处、绝缘子与受电弓连接处也是声功率级较大的地方。因此,合理地设计受电弓的结构可以避免列车高速运行时由受电弓引起的气动噪声。受电弓滑板与绝缘子表面稳态压力随速度变化情况如图7所示。由于绝缘子后表面有较大的涡流,因此呈现负气压。

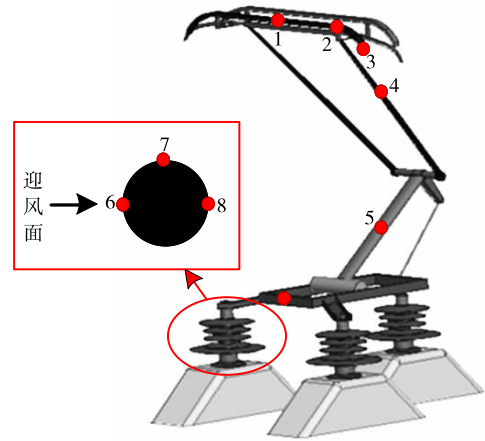


图5 受电弓表面噪声观测点

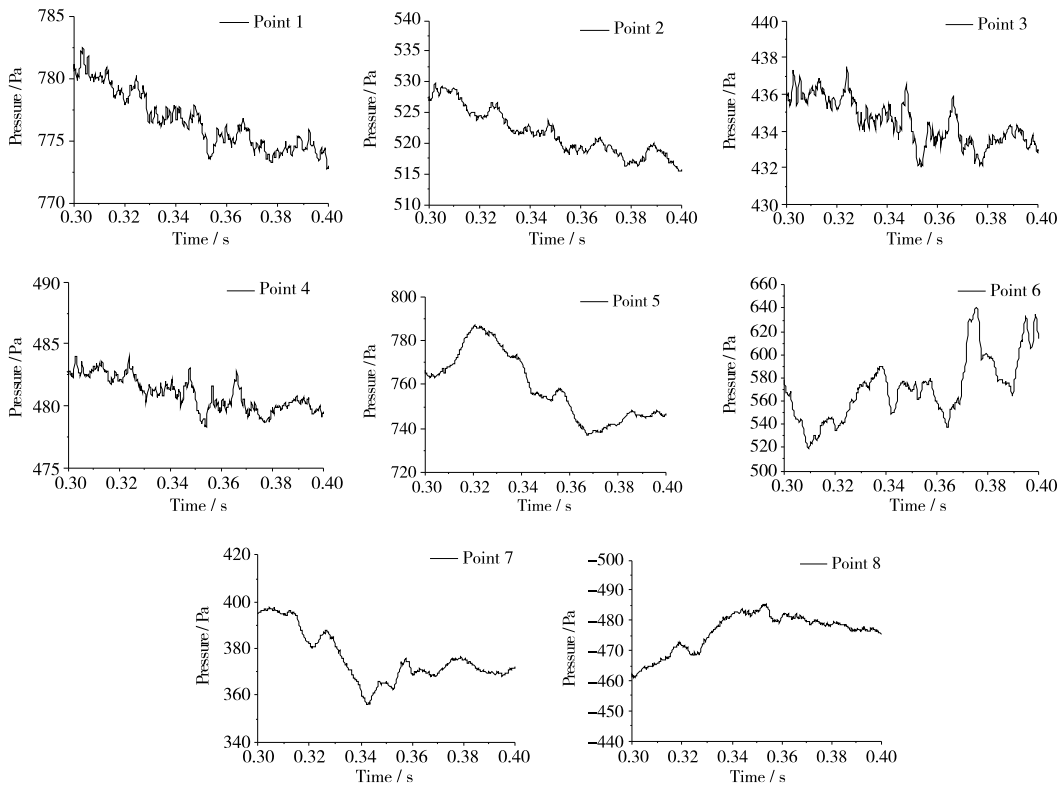


图6 350 km/h 下各观测点脉动压力图

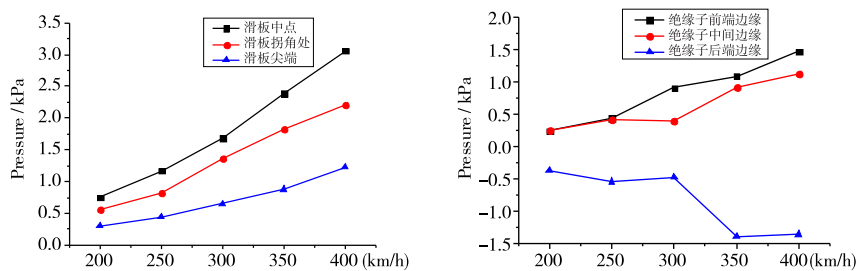


图7 受电弓表面稳态压力随速度变化情况

为分析远场噪声,选取距列车5 m、10 m、20 m处作为观测点,观测点高度分别为1.5 m、3 m、4 m和6 m,如

图8所示。

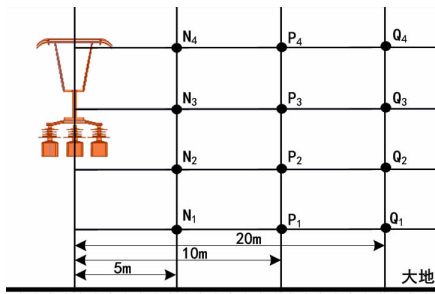


图 8 观测点分布

当列车运行速度为 350 km/h 时,各监测点在 5000 Hz 内近场频谱图如图 9 所示。可以看出,各监测点气动噪声频带很宽,没有明显的主频率,在低频时噪声幅值较大,随着频率的升高,各点幅值都在明显的下降,所以受电弓气动噪声能量主要集中在低频部分。

当列车运行速度为 350 km/h 时,随着距离列车的距离的继续增大,远场气动噪声幅值越来越小。各点气动噪声总压强见表 1,距离列车 5 m、10 m、20 m 处噪声最大噪声分别为 81.2 dB、76.6 dB、73.0 dB。

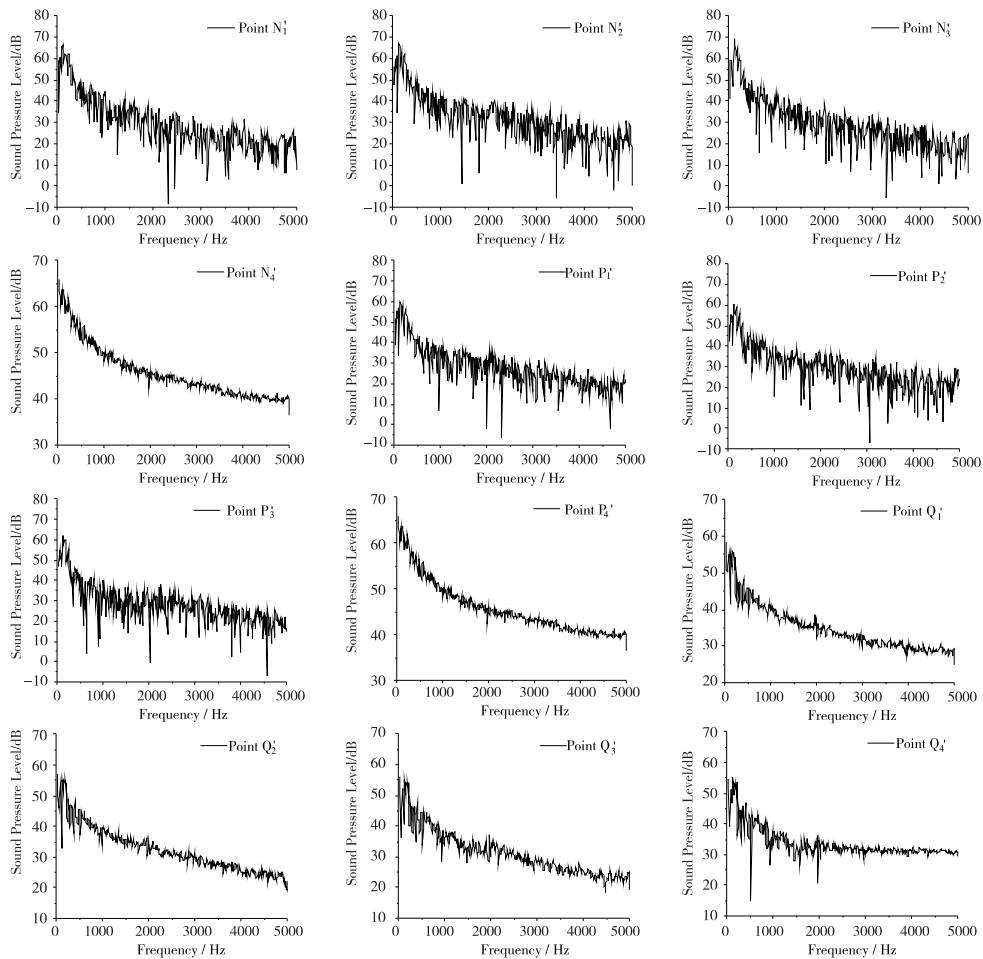


图 9 各观测点频谱图

表 1 受电弓表面不同车速下表面声压级

观测点	总压强/dB	观测点	总压强/dB
N1	80.8	P3	76.3
N2	81.1	P4	75.4
N3	81.2	Q1	72.5
N4	80.7	Q2	73.0
P1	75.7	Q3	72.8
P2	76.6	Q4	72.5

车组不同车速下受电弓表面气动噪声强度和周围空间气动噪声分布情况,得出以下结论:

(1) 列车运行时受电弓表面气动噪声的产生主要集中在滑板和绝缘子表面,因此合理的设计受电弓结构外形或绝缘子的结构能够有效地减少气动噪声。

(2) 动车组运行时可能会对途经区域居住的居民造成听力损伤,因此,有必要采取一定的屏蔽措施来削弱噪声,建议在高铁沿线人口密集区设置噪音屏蔽层。

4 结论

本文通过建立受电弓-绝缘子仿真模型,分析了动

参考文献:

- [1] 俞悟周,王晨,毛东兴,等.高速动车组列车的噪声特性[J].环境污染与防治,2009,31(1):74-77.
- [2] 黄欣,董孝卿,朱韶光,等.高速动车组车内噪声试验方法和限值的研究[J].铁道机车车辆,2013,33(2):30-33.
- [3] 马筠,翟婉明.无砟轨道噪声振动特性及其治理措施研究[J].中国铁路,2009,12(10):38-43.
- [4] 肖友刚,田红旗,张洪.高速列车司机室内气动噪声预测[J].交通运输工程学报,2008,8(3):10-14.
- [5] BLASCHO R.ICE3 电动车组用的高速受电弓[J].变流技术与电力牵引,2001,12(2):28-32.
- [6] 孙振旭,宋婧婧,安亦然.CRH3 型高速列车气动噪声数值模拟研究[J].北京大学学报:自然科学版,2012,48(5):701-711.
- [7] 刘加利,张继业,张卫华.高速列车车头的气动噪声数值分析[J].铁道学报,2011,33(9):19-26.
- [8] 袁磊,李人宪.高速列车气动噪声及影响[J].机械工程及自动化,2013(5):31-36.
- [9] 张曙光.350 km/h 高速列车噪声机理、声源识别及控制[J].中国铁道科学,2009,30(1):86-90.
- [10] 马大猷.现代声学理论基础[M].北京:科学出版社,2004.
- [11] 黄欣,董孝卿.高速铁路车辆噪声标准的研究[J].铁道机车车辆,2008,28(4):38-40.

Simulation Analysis of Aerodynamic Noise for Pantograph of High-speed Train

DONG Jilei, SHEN Huoming

(School of Mechanics & Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With the increasing speed of CRH (China Railway High-speed), the impact of the aerodynamic noise caused by pantograph on passenger comfort and the surrounding environment was also becoming ever more serious. Noise sources of CRH mainly including vibration noise, aerodynamic noise and the noise generated by equipment such as traction motor. a three-dimensional finite element simulation model was built to investigate its distribution character under 350 km/h by using annlysis of fluid mechanics FLUENT module of ANSYS. The spectral characteristic of the noise was studied, and the intensity distribution of the space around the pantograph was solved. The research conclusions provide a theoretical basis to inhibition of train aerodynamic noise pollution caused by the pantograph of the train at high speed.

Key words: high-speed train; pantograph; aerodynamic noise; sound pressure level; numerical simulation