引用格式: 纪伟, 曹艳梅, 高速铁路气动噪声的数值分析及分布特征研究[J], 声学技术, 2021, 40(5): 694-701. [JI Wei, CAO Yanmei. Numerical analysis of aerodynamic noise of high-speed railway and its distribution characteristics[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(5): 694-701.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.05.016

高速铁路气动噪声的数值分析及分布特征研究

纪 伟^{1,2}, 曹艳梅² (1. 中铁桥隧技术有限公司, 江苏南京 210061; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要:以京沪线为研究背景,建立用于数值计算的简化的车辆-桥梁模型,基于宽频带噪声源法和声类比理论,利用 Fluent 软件分别研究了列车在高架桥上高速行驶时的近场气动噪声的声源强度特性和远场气动噪声的空间分布特性。 研究结果表明:沿桥梁纵向气动噪声强度在车尾变截面处最大,车头变截面处次之;沿桥梁横向气动噪声强度随着离桥 梁横向距离的增加而减小,且减小的幅度越来越小;沿桥梁垂向气动噪声在距离轨道顶面高度1.2m处的强度最大。 关键词: 高速铁路; 高架桥梁; 气动噪声; 空间分布

中图分类号: U270.1+6 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2021)-05-0694-08

Numerical analysis of aerodynamic noise of high-speed railway and its distribution characteristics

JI Wei^{1,2}, CAO Yanmei²

(1. China Railway Bridge & Tunnel Technologies Co., LTD, Nanjing 210061, Jiangsu, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the Beijing-Shanghai Railway Line, the simplified train-viaduct model for computation is established. According to broadband noise source method and acoustic analogy theory, the intensity characteristics of near-field aerodynamic noise sources and the spatial distribution characteristics of far-field aerodynamic noise of the train running on the viaduct at high speed are studied by using Fluent software. The results show that along the longitudinal direction of the viaduct, the intensity of aerodynamic noise is maximum at the junction of train tail and body, followed at the junction of train head and body; along the transverse direction of the viaduct, the intensity of aerodynamic noise decreases continuously at a slower rate with the increase of transverse distance from the viaduct; along the vertical direction, the aerodynamic noise energy is the strongest at the location of 1.2 m above the top surface of the rail. Key words: high-speed railway; viaduct; aerodynamic noise; spatial distribution

引言 0

高速铁路噪声主要包括集电系统噪声、结构二 次噪声、轮轨噪声和气动噪声^[1]。当车速低于 250 km·h⁻¹ 时,噪声成分主要为轮轨噪声,然而当 车速超过 300 km·h⁻¹的时候, 气动噪声将超过其他 噪声而成为最主要的噪声成分[2]。另一方面,在我 国高速铁路的建设中桥梁占到了很大的比例,截止 到 2017 年底, 高速铁路线路总长中桥梁占比高达 45.2%^[3],其中京沪线中桥梁总长占线路总长的 80%。因此,本文以京沪线为研究背景,对沿线高

通信作者: 曹艳梅, E-mail: ymcao@bjtu.edu.cn

架桥周边的高速铁路气动噪声的空间分布特征进 行研究,具有重要的工程意义。

目前,气动噪声的研究方法主要有理论分析、 试验研究和数值模拟三种^[4]。理论研究方面,影响 较为深远的是Lighthill 声类比理论的提出和发展^[5-7], 大量气动噪声的研究都基于该理论^[8]。在试验研究 方面,人们多次对高速列车进行了实车线路试验和 风洞试验,得出列车受电弓处的气动噪声对整车气 动噪声的贡献量较大且提出了相应的降噪措施[9-11]。 在数值分析方面, Sassa 等利用大涡模拟方法和声 学分析相结合的方法,将空气看作不可压缩流体, 对高速列车的气动噪声特性进行了研究^[12]; Takaishi 等针对列车重要部位(如:受电弓和转向架)的气动 噪声分布特性进行了研究^[13]; Kato 等将圆柱绕流所 产生气动噪声的实测值与理论计算值进行比较,结 果表明误差在允许范围之内[14]。

我国虽然在气动噪声研究领域起步较晚,但是 讲步迅速,陆森林基于时间序列采样法研究了流场

收稿日期: 2020-08-21; 修回日期: 2020-11-29

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(8202040)、江苏省科技厅重 点研发计划(BE2018049)。

作者简介:纪伟(1992-),男,安徽池州人,硕士,研究方向为交通环境 振动与噪声。

中车辆后视镜的脉动压力频谱特征^[15];铁道部采用 噪声采集设备对某铁路段上高速行驶的列车进行 实车线路试验,研究其引起的气动噪声分布特征^[16]; 刘加利等通过声类比理论对高速列车车头的气动 噪声分布特性进行了研究^[17];朱远征等利用虚拟激 励法对车辆内部的气动噪声分布特征进行研究^[18]; 蒋树杰等在对机翼气动噪声进行研究时,考虑了流 固耦合振动对气动噪声的影响^[19]。

本文将列车和高架桥梁结合起来分析,利用宽 频带噪声源法、大涡模拟方法和声类比法,分别对 列车近场气动噪声声源强度、列车表面脉动压力和 高架桥周边远场气动噪声进行了研究,对新建铁路 线的设计和规划、对既有铁路沿线噪声水平的降低 和人们生活水平的改善提供一定的理论参考。

1 气动噪声数值计算模型的建立

1.1 车辆-桥梁数值模型的几何参数

列车计算模型按照京沪线上常见的 CR400-BF 型复兴号高速列车近似建立(如图 1 所示),由头车、 中间车和尾车三节车厢组成,整个列车模型尺寸 为:长 74.6 m、宽 3.36 m、高 4.05 m。



图 1 高速列车几何模型 Fig.1 Geometric model of high-speed train

桥梁计算模型按照双线 32 m 跨预应力混凝土 简支箱梁的外形近似建立,共计 350 m(11 跨)。在 保证计算结果准确性的前提下,考虑到计算效率和 建模难度,本文不考虑桥墩的影响,将桥体简化成 实心、桥面简化成光滑平面。桥梁模型的尺寸和计 算几何模型如图 2 和图 3 所示。

1.2 计算域尺寸拟定

本文计算域与高架桥梁等长,列车靠着桥梁左 侧行驶,计算域尺寸为350m(长)、53m(宽)、38m







图 3 桥梁计算几何模型 Fig.3 The geometric model of viaduct for computation

(高)。其中,列车车身地面离桥面的距离为 0.35 m, 车身纵向中心线离桥梁左侧距离为 4 m、离桥梁右 侧距离为 9 m。列车离计算域入口和出口的距离分 别为 65.4 m 和 210 m;桥面中心离计算域两个侧面 的距离均为 26.5 m,离计算域顶面为 25 m。桥梁底 面离计算域底面的垂直距离为 10 m(即桥墩高度为 10 m)。计算域尺寸如图 4 所示。



C

1.3 网格生成

网格生成作为数值计算的前处理阶段,其生成 网格质量的高低对最终计算结果的准确性有着不 可忽视的影响。

本文采用混合网格方法对计算域进行网格划 分,如图5所示。考虑车身表面形状不规则,故其 附近空间区域采用尺寸为0.2m的非结构网格进行 划分,且车身表面设置5层,尺寸为0.02m的边界 层;距离车身表面一定距离后,采用结构网格并按 照一定的增大因子过渡的方法对剩下的计算域进 行网格划分。整个计算域约划分1200万个网格。

1.4 边界条件和求解参数的设定

本文将高架桥上高速列车周围的空气看作不可压缩流体,空气属性按照 Fluent 软件中的默认值 设定。利用相对运动的思想,假定列车静止不动,



图 5 计算域网格划分 Fig.5 Mesh partition in computational domain

高架桥梁与计算域的底面以速度 v=300 km·h⁻¹向列 车行驶的反方向移动。相关边界条件的设定详见表 1。

表1 边界条件设定

Table 1 Boundary condition setting		dition setting
边界	分类	设置
计算域入口	速度入口	$v=83.33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (\mathbb{H} 300 km·h ⁻¹) $k=3.8948 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ $\varepsilon=4.6987 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-3}$
计算域出口	压力出口	<i>p</i> =0 Ра <i>I</i> =1.93% D _н =3.84 m
计算域壁面	列车 桥梁和底面 侧面和顶面	固定壁面 移动壁面 自然流动

注:其中, k 为湍流动能; ε 为湍流耗散率; p 为压强; I 为湍流强度;
 D_µ为水力直径。

计算列车在高架桥梁上高速行驶时所引起的 气动噪声需先进行流场的计算,再以流场计算结果 为基础进行声场计算。其中,流场计算分为稳态计 算和瞬态计算。本文流场的稳态和瞬态计算均设置 为基于压力的求解方法,压力与速度耦合设置为隐 式连接压力方程算法,并采用标准格式的连续方程。

稳态计算采用标准 *k*-ε 湍流模型,其动量方程、湍流能量方程和湍流耗散率方程的离散格式均为二阶迎风格式;瞬态计算采用大涡模拟方法,亚格子尺度模型采用斯马格林斯基-丽莉模型,动量方程采用有界中心差分格式,时间差分采用有界二阶隐式格式。

考虑到高速列车气动噪声的噪声能量主要集 中在低频区^[20],所以本文最高分析频率设定为 2000 Hz。再根据奈奎斯特采样定理,为使原波形 不产生"半波损失",采样频率至少为最高采样频 率的 2 倍,即本文采样频率确定为 4000 Hz。采样 频率的倒数即为时间步长,所以瞬态计算的时间步 长取 Δ*t*=2.5×10⁻⁴ s, 计算步数设置为 3 000 步。另 外,需要说明的是声场计算的时间步长与瞬态计算 的时间步长一致, 声场的时间步数取 2 000 步。

2 气动噪声的计算方法

2.1 列车近场气动噪声声源的计算方法

高速铁路的气动噪声是没有明显主频的,而是 在一个宽频段的范围内连续分布的^[20],本文采用 Proudman 方程对其进行计算分析。

Proudman^[21]采用等效同步协方差来替代延迟时间的微分,通过Lighthill 声类比理论推导了适用于单位体积的低马赫数和高雷诺数各向同性流体的辐射声功率的表达式:

$$P_{\rm A} = \alpha \rho_0 \left(\frac{u^3}{l}\right) \frac{u^5}{c_0^5} \tag{1}$$

其中, P_{A} 表示单位体积的湍流辐射声功率,单位为 W·m⁻³; u 表示湍流流速;l为湍流长度; α 和 c_0 分 别为模型常数和声速。

当式(1)用 k 和 ε 来表示时, 表达式为

$$P_{\rm A} = \alpha_{\varepsilon} \rho_0 \varepsilon M_t^5 \tag{2}$$

其中, α_{e} 为常数,通常取 0.1; ρ_{0} 为流场静止时的 密度; M_{e} 的表达式为

$$M_t = \frac{\sqrt{2k}}{a_0} \tag{3}$$

声功率级的定义为[22]

$$L_{\rm p} = 10 \, \log \left(P_{\rm A} / P_{\rm r} \right) \tag{4}$$

其中, $P_r = 10^{-12}$ W·m⁻³, 为参考声功率; L_p 为声功 率级(单位为 dB)。

数值计算时,首先采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对整 个流场进行稳态计算,得到计算域各网格节点处的 $k \, n \varepsilon$,再利用 Proudman 方程计算得到列车车身周 围气动噪声声功率级,进而对高架桥上高速列车的 气动噪声声源能量分布特征进行研究。

2.2 高架桥周边远场气动噪声的计算方法

考虑高架桥上列车的实际运行条件,利用格林 (Green)函数对 FW-H 方程进行积分求解,得到远场 气动噪声的理论预测公式为^[23]

$$p'(x,t) = \frac{1}{2\pi c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_{\nu} \frac{T_{ij}}{R |l - Ma_r|} dy - \frac{1}{2\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{s} \frac{p_i}{R |l - Ma_r|} dS(y) + \frac{1}{2\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_{s} \frac{\rho_0 v_n}{R |l - Ma_r|} dS(y)$$
(5)

式中, $x=(x_1, x_2, x_3)$ 和 $y=(y_1, y_2, y_3)$ 分别为远场监测

点及车身表面声源点的空间坐标; t 表示声音从声源点传到接收点所花的时间; c_0 表示声速; Ma_r 表示车速的马赫数在接收点方向的投影; R 表示声源 点到接收点的距离; T_{ij} 表示 Lighthill 应力张量; p_i 表示列车表面作用在流体的力; ρ_0 表示流体未发生 运动时的密度; v_n 表示车速在列车表面法线方向上的投影。

从远场气动噪声的理论预测公式可以看出,高速列车的气动噪声由三部分组成:单极子声源引起的噪声(公式第三项)、偶极子声源引起的噪声(公式 第二项)、四极子声源引起的噪声(公式第一项)。

单极子声源对气动噪声的贡献值与列车表面的体积变形有关^[24],由于列车车身表面可看作是刚体,车身表面无体积变形,所以可不考虑单极子声源对气动噪声的影响;又因为四极子声源与偶极子声源的辐射声功率之比为马赫数的平方^[25]。虽然经过大提速后的中国高铁速度很快,但还是远远不及声速,当列车运行速度为350 km·h⁻¹(即97.22m·s⁻¹)时,马赫数约为0.29,而其平方仅为0.08。所以四极子声源对气动噪声的贡献量相对于偶极子声源而言很小,可忽略其对气动噪声的影响。

故而,式(5)可进一步简化为

$$p'(x,t) \approx -\frac{1}{2\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int_s \frac{p_i}{R \left| 1 - Ma_r \right|} \mathrm{d}S(y) \tag{6}$$

由简化后的远场气动噪声理论预测公式(6)可 以得出,列车表面脉动压力所引起的偶极子声源噪 声在高速铁路气动噪声的贡献量中占有主导地位, 所以研究列车表面的脉动压力对于了解气动噪声 的分布特征具有重要的意义。

3 列车周围近场气动噪声分析

3.1 近场气动噪声声源强度分布特征及验证

首先利用宽频带噪声源法对整个流场进行稳态计算,得到列车纵向上半部分外轮廓线的表面声功率级散点图(如图 6 所示),可以看出:列车车头鼻尖处的声功率级最大,随后沿着列车纵向迅速降低,在车头变截面处有小幅度上升;车身表面的声功率级波动不大,在车尾变截面处同样有小幅度上升,之后迅速降低,在车尾鼻尖处达到最小值。

为了验证计算结果的正确性,将图6的计算结 果与文献[26]中列车纵向上半部分外轮廓线的表面 声功率级散点图(见图7)进行比较。

文献[26]以 CHR3 型动车组列车为原型进行建模(见图 8),共有车头、车尾以及带有受电弓的中间



图 6 列车表面纵向外轮廓线处声功率级散点图(v=300 km·h⁻¹) Fig.6 The scatter diagram of acoustic power level at longitudinal outline of train surface







图 8 参考文献[26]高速列车几何模型 Fig.8 The Geometric model of high-speed train in reference[26]

车三节车厢组成,每节车厢含有前后两个转向架并 在车厢连接处考虑外包风挡的作用,列车模型尺寸 为长 75.5 m、宽 3.2 m、高 3.8 m;同样通过相对运 动的思想,列车模型在计算域中静止,计算域底面 设为滑动壁面,以 300 km·h⁻¹的速度向列车前进的 反方向运动。

文献[26]和本文均对声功率级随列车车身纵向 长度的变化规律进行了分析,通过对比可以发现, 图 7 中的声功率级在车头和受电弓处较大,在车顶 外包风挡有小幅度上升,车厢连接处以及车尾处较 小;图 6 中的声功率级在车头部位较大、车尾部位 较小、车身处中等且变化幅度不大。

文献[26]与本文列车模型运行状态相同,出现 计算结果有差异的主要原因是列车模型的差别。本 文中的列车模型车身表面光滑,无受电弓、外包风 挡、转向架,从图7的计算结果可以看出,若不考 虑受电弓、转向架、外包风挡的影响,两篇文章的 列车表面声功率级分布特征规律相同,都是车头鼻 尖处声功率级最大、车身次之且变化幅度较小、车 尾鼻尖处声功率级最小,另外在车头和车尾变截面 处声功率级均有小幅度波动。文献[26]的计算结果 和列车表面声功率级随车身纵向长度的变化规律 在一定程度上验证了本文计算结果的合理性。

以上为高架桥上高速列车表面的声功率级分 布特征,为了进一步研究列车车身附近空间区域的 声功率级分布特征,我们取整个流场纵向对称面声 功率级云图,如图9所示。



图 9 高速列车不同部位的流场声功率级云图 Fig.9 The cloud charts of acoustic power level of the flow fields at different sections of high speed train

从图 9 中可以看出:

(1) 对于在高架桥上高速行驶的列车,其车身 附近空间区域的声源能量比车头和车尾附近低;

(2) 虽然列车车头表面的声源能量比车尾表面 的声源能量高,但是车头存在高声源能量的空间区 域很小,而车尾存在较大空间区域的尾流,整个尾 流空间区域的声源能量不容忽视。所以,并不能进 一步判断车头和车尾声源能量的高低。

3.2 列车表面脉动压力分布特征

基于稳态计算结果,本文利用大涡模拟方法对 整个流场继续进行瞬态计算。为从气动噪声的产生 机理上对高架桥周边的高速列车气动噪声进行分 析,掌握其分布规律,在进行流场瞬态计算的同时 也对列车表面的脉动压力进行监测。图 10 为列车 车身表面的脉动压力监测点布置图。计算得到各监 测点的脉动压力级随着车速的关系如图 11 所示。





从图 11 中可以看出,车身部分气动噪声声源 强度最小;车尾和车头部分气动噪声声源强度较 大,且车尾比车头大。





上述研究内容从气动噪声的产生机理上验证 了宽频带噪声源法计算结果的合理性的同时,也进 一步判断了车头和车尾声源能量的高低。

4 高架桥周边远场气动噪声的空间 分布特征

以瞬态计算结果为基础,通过基于声类比理论的 FW-H 声波波动方程,对高速铁路远场气动噪声进行计算并分析其空间分布特征。根据《声学一轨道机车车辆发射噪声测量》^[27]的标准布置高架桥周边远场气动噪声空间监测点,如图 12 和图 13 所示。

计算得到沿桥梁垂向不同高度处的垂面上,远 场气动噪声的空间分布特征如图 14 所示。







图 13 监测截面空间测点布置图 Fig.13 The layout of spatial monitoring points on the monitoring surfaces

从图 14 中可以看出,沿桥梁纵向气动噪声声 压级在车头及车尾部分较大;沿桥梁横向,除 z=14.5 m 外,其他 4 个高度垂面上的测点在离桥梁 横向距离较远处均有小幅度上升,但其整体趋势还 是下降的;沿桥梁垂向,气动噪声声压级在 z=14.5 m 垂面处最大,随着与该垂面距离的增加,声压级逐 渐减小。

接下来本文将从沿桥梁纵向、横向和垂向三个 方向对列车在高架桥上高速行驶时所引起的远场







气动噪声的空间分布特征进行详细分析。

4.1 沿桥梁纵向的分布特征

在距离地面 14.5 m(z=14.5 m)的垂面上且离线路中心线不同的横向距离处,沿着桥梁纵向(x 轴)选取监测点(见图 12 和图 13),计算各监测点处气动噪声总声压级,如图 15 所示。



Fig.15 The noise intensities at monitoring points along the longitudinal direction of the viaduct

从图 15 中我们可以看出:

(1) 当测点离列车较近时,列车在高架桥上高速行驶时所引起的远场气动噪声,在车尾变截面处的远场气动噪声强度最大,车头变截面处的远场气动噪声强度次之。

(2)随着与列车横向距离的加大,相应测点处 的远场气动噪声总声压级逐渐减小。当与列车的横 向距离超过一定值后,除车头和车尾曲率变化较大 的流线型部位,正对车身各测点处的远场气动噪声 总声压级都相差不大。

(3) 由于列车车身长细比大且曲率变化小,列 车在高架桥上高速行驶时,其车身周围的气流并没 有发生激烈的流动,所以当离列车的横向距离相同 时(即 y 不变),正对车身各测点处的远场气动噪声

2021年

总声压级都相差不大。

4.2 沿桥梁横向的分布特征

在中心横截面(x=0)上且离地面不同高度处,沿着桥梁横向(y 轴)选取监测点(见图 12 和图 13),计 算各监测点处气动噪声总声压级,如图 16 所示。



Fig.16 The noise intensities at monitoring points along the transverse direction of the viaduct

从图 16 中可以得出:

(1) 当离地面高度为 14.5 m 时,沿桥梁横向各 测点的远场气动噪声总声压级较大;随着与离列车 横向距离的加大,各测点处的气动噪声总声压级以 越来越小的幅度减小。

(2) 当距离地面高度为 3.5、9、20、25 m 时, 高架桥周边高速铁路的远场气动噪声的总声压级 虽然在离桥梁横向距离较远处有约 1~2 dB 的小幅 度上升,但是,其沿桥梁横向变化的整体趋势是下 降的。

4.3 沿桥梁垂向的分布特征

在中心横截面上(x=0)上且离线路中心线不同 横向距离处,沿着桥梁垂向(z 轴)选取监测点(见图 12 和图 13),计算各监测点处气动噪声总声压级, 如图 17 所示。

从图 17 中可以得出:

(1)随着离地面高度的增加,沿桥梁垂向各测 点处的高速铁路远场气动噪声总声压级逐渐增大,





Fig.17 The noise intensiies at monitoring points along the vertical direction of the viaduct

当离地面高度为14.5m时,气动噪声总声压级达到 最大值,随后又逐渐降低。

(2) 值得说明的是,在本文所研究的模型中, z=14.5 m 即距离轨道顶面高度为 1.2 m,该空间位 置是国家标准中注明的重要监测位置,而我们的计 算结果也表明了该监测位置的敏感性。

5 结论

本文首先利用 k-ε 湍流模型对整个流场进行 稳态计算,基于稳态计算结果,再利用宽频带噪声 源法计算列车车身附近的声功率级;再以稳态计算 结果为基础,利用大涡模拟方法继续对整个流场进 行瞬态计算,同时监测列车表面脉动压力随着车速 的变化关系;最后基于瞬态计算结果,利用声类比 法计算高架桥周边远场气动噪声。得出结论如下:

(1) 对于在高架桥上行驶的高速列车,空气与 列车外表面相互作用所产生的脉动压力对气动噪 声的贡献量最大;

(2) 沿桥梁纵向: ⓐ 对于在高架桥上高速行驶的列车,远场气动噪声强度在车尾变截面处最大, 车头变截面处的噪声强度次之; ⑥ 当离桥梁的横向 距离较远时,远场气动噪声强度在正对列车车身曲 率变化较小处相差不大;

701

(3) 沿桥梁横向: ② 当离地面高度为 14.5 m(即 距离轨道顶面高度为 1.2 m)时,随着与桥梁横向距 离的增大,远场气动噪声强度以越来越小的幅度降 低; ⑥ 在离地面其他垂向高度处,虽然噪声强度在 距离列车横向距离较远处有小幅度提升,但是其整 体趋势还是下降的;

(4) 沿桥梁垂向: 当离列车横向距离一定时, 远场气动噪声在距离地面高度为 14.5 m(即距离轨 道顶面高度为 1.2 m)处的强度最大。

参考文献

- [1] 张瑞丽,汤志勇. 轨道车辆轮轨噪声研究综述[J]. 河南科技, 2011(9): 88-89.
- [2] TALOTTE C. Aerodynamic noise: a critical survey[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 549-562.
- [3] 刘瑶,戴公连.中国高速铁路预应力连续梁拱组合桥调查与研究 [C]//第二十一届全国桥梁学术会议论文集.大连,2014:209-215.
- [4] 刘悦卫. 基于 Fluent 的高速列车车外气动噪声特性的研究[D]. 镇 江: 江苏大学, 2014.
- [5] LIGHTHILL M J. On sound generated aerodynamically. I. General theory[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1952, 211(1107): 564-587.
- [6] CURLE N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1955, 231(1187): 505-514.
- [7] FFOWCS WILLIAMS J E, HAWKINGS D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 1969, 264(1151): 321-342.
- [8] KING III W F. A précis of developments in the aeroacoustics of fast trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 349-358.
- [9] KITAGAWA T, NAGAKURA K. Aerodynamic noise generated by shinkansen cars[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 913-924.
- [10] IWAMOTO K, HIGASHI A. Some consideration toward reducing aerodynamic noise on pantograph[EB/OL]. 1993.
- [11] NOGER C, PATRAT J C, PEUBE J, et al. Aeroacoustical study of the tgv pantograph recess[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 563-575.
- [12] SASSA T, SATO T, YATSUI S. Numerical analysis of aerodynamic noise radiation from a high-speed train surface[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 247(3): 407-416.
- [13] TAKAISHI T, KATO C. Method of evaluating dipole sound in a finite computational domain[J]. Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers Series B, 2004, 70(698): 2523-2530.
- [14] KATO C, IIDA A, TAKANO Y, et al. Numerical prediction of aerodynamic noise radiated from low Mach number turbulent wake[C]//31st Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV. Reston, Virginia: AIAA, 1993.

- [15] 陆森林.用时序采样法进行轿车后视镜脉动压力场频谱分析[J]. 江苏理工大学学报:自然科学版,1998(3):53-57.
 LU Senlin. Spectrum analysis of pressure fluctuation for the side mirror of a sedan car using time sequence[J]. Journal of Jiangsu University of Technology, 1998(3):53-57.
- [16] 张曙光. 350 km·h⁻¹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. ZHANG Shuguang. Noise mechanism, sound source localization and noise control of 350 km·h⁻¹ high-speed train[J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 86-90.
- [17] 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.
 LIU Jiali, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Numerical analysis on aerodynamic noise of the high-speed train head[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(9): 19-26.
- [18] 朱远征,左言言,华敏相,等. 虚拟激励法的汽车气动噪声研究
 [J]. 机械科学与技术,2017,36(4):626-631.
 ZHU Yuanzheng, ZUO Yanyan, HUA Minxiang, et al. Study on automobile aerodynamic noise based on pseudo-excitation method[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(4): 626-631.
- [19] 蒋树杰,刘菲菲,陈刚.流固耦合振动效应对机翼气动噪声辐射的 影响研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(19): 7-13. JIANG Shujie, LIU Feifei, CHEN Gang. Influences of fluid-structure coupled vibration effect on airfoil aerodynamic noise radiation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(19): 7-13.
- [20] 黄莎. 高速列车车外气动噪声数值模拟研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [21] PROUDMAN I. The generation of noise by isotropic turbulence[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 1952, 214(1116): 119-132.
- [22] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 57-59.
- [23] 刘红光, 陆森林. 高速车辆气流噪声计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(2): 41-44.
 LIU Hongguang, LU Senlin. Calculation method of the aerodynamic noise around high speed vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(2): 41-44.
- [24] 沈钰贵, 陆森林, 孟新. 高速汽车侧窗气流噪声模拟[J]. 机械设计 与制造, 2012(7): 125-127. SHEN Yugui, LU Senlin, MENG Xin. Simulation on aerodynamic noise of automobile's side window at high speed[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(7): 125-127.
- [25] 纪伟.高速铁路高架桥周边气动噪声理论分析和数值研究[D]. 北 京:北京交通大学, 2019.
- [26] 张军,孙帮成,郭涛,等.高速列车整车气动噪声及分布规律研究
 [J]. 铁道学报, 2015, 37(2): 10-17.
 ZHANG Jun, SUN Bangcheng, GUO Tao, et al. Research on aerodynamic noise radiated from whole body surface of high-speed train and its distribution[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(2): 10-17.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.声学轨道机车车辆发射噪声测量:GB/T 5111-2011[S].北京:中国标准出版社,2012.