

# 高速列车车体长度对气动噪声影响的数值研究<sup>1)</sup>

莫晃锐\* 安翼\* 刘青泉<sup>†,2)</sup>

\* (中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

<sup>†</sup> (北京理工大学宇航学院力学系, 北京 100081)

**摘要** 高速列车具有细长形状, 数值评估气动噪声往往需要巨大的计算量. 目前对高速列车气动噪声的数值模拟大多基于对简化短编组列车的评估, 而实际列车通常具有较长的 8~16 节编组. 如何基于现有条件合理评价真实长度列车的气动噪声, 是一个急需探讨的问题. 本文应用非线性声学求解器 (NLAS) 和 FW-H 声学比拟法的混合算法, 先求解噪声积分面上的声场脉动, 再进行远场积分, 引入多噪声面积分技术, 通过对三种不同长度 (3 节、4 节、6 节) 列车模型的气动性能和噪声数值模拟, 分析了车体长度对列车气动噪声的影响. 结果表明, 同一列车模型的各节车厢具有相似的沿线噪声分布, 其噪声曲线在量值上十分接近, 只是主峰位置会随着车厢空间位置的不同而相应地发生偏移; 不同长度编组列车对应部位之间的远场噪声特性具有较强的关联性, 它们的远场噪声具有接近的总声压级和噪声频谱. 通过利用短编组计算数据进行分解、平移和叠加, 成功重构了 4 编组和 6 编组列车远场噪声特性, 与直接计算结果相比误差在可接受范围内. 由此发展了基于短编组列车噪声的数值结果, 重构长编组列车沿线噪声的近似评估方法.

**关键词** 高速列车, 气动噪声, 非线性声学求解器, FW-H 声比拟法, 长编组

**中图分类号**: O354.1, TB533+.2, U260.16, U266

**文献标识码**: A doi: 10.6052/0459-1879-19-079

## INFLUENCE OF THE LENGTH OF HIGH-SPEED TRAIN ON THE FAR-FIELD AEROACOUSTICS CHARACTERISTICS<sup>1)</sup>

Mo Huangrui\* An Yi\* Liu Qingquan<sup>†,2)</sup>

\* (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>†</sup> (School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** The estimation of the aeroacoustic characteristics of the high-speed train is of great importance in train design. Due to the extreme slender shape of the full marshaling of the train (generally 8 or 16 cars), the calculation of the far field acoustics involves massive consumption of the CPU time which even makes the optimization unpractical. This paper numerically studies the influence of train length on its aeroacoustics characteristics by considering the acoustic contribution car by car. The nonlinear acoustic solver (NLAS) is used to calculate the acoustic source at the acoustic surface, and the FW-H analogy method is used to integrate on the acoustic surface to obtain the far-field results. Three different marshaling of the trains, i.e. 3 cars, 4 cars, and 6 cars, are studied and compared. The far-field acoustic level and frequency profile along the train is obtained. The results show that for different middle cars, the far-field acoustic profile along the length is very similar in both quantity and shape, except the offset in position. For the cars in the same position of

2019-03-30 收稿, 2019-09-02 录用, 2019-09-02 网络版发表.

1) 中国科学院知识创新工程方向性资助项目 (KJ CX2-EW-L02-1).

2) 刘青泉, 教授, 主要研究方向: 环境力学. E-mail: liuqq@bit.edu.cn

**引用格式**: 莫晃锐, 安翼, 刘青泉. 高速列车车体长度对气动噪声影响的数值研究. 力学学报, 2019, 51(5): 1310-1320

Mo Huangrui, An Yi, Liu Qingquan. Influence of the length of high-speed train on the far-field aeroacoustics characteristics. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(5): 1310-1320

different marshaling, both the sound pressure level distribution and the frequency profile are also very close to each other. Thus the key aeroacoustics characteristics of a long marshaling train could be estimated with a much smaller marshaling such as 3 cars. With the superposition of the acoustic surface data from short marshaling simulation, the aeroacoustics characteristics of long marshaling could be obtained. The comparison of the superposed results and the results calculated directly from long marshaling simulation is close enough for engineering use. This demonstrates that the proposed novel approach for estimating aeroacoustics of long marshaling could not only reduce the computational cost significantly but also be as accurate as direct simulation. This paper might provide a handy tool for engineering practice in this region.

**Key words** high-speed train, aerodynamic noise, NLAS, FW-H acoustic analogy, long marshalling

## 引言

研究表明<sup>[1-6]</sup>, 当列车运行速度超过 300 km/h 时, 气动噪声将显著增强, 并主导列车的总体噪声. 随着我国高速铁路的迅速发展, 气动噪声污染已日益突出<sup>[7]</sup>, 如何合理地评价和降低高速列车的气动噪声, 成为高速列车发展中亟待解决的重要课题之一.

近年来, 国内外学者对高速列车的气动噪声开展了大量研究工作<sup>[8-9]</sup>, 目前对高速列车气动噪声的研究, 除了进行沿线实际观测外, 主要通过风洞试验和数值模拟计算. 但由于高速列车气动噪声问题的复杂性, 大多数研究强调了高速列车某一部位的气动噪声, 主要集中在车头<sup>[10-11]</sup>、车厢连接处<sup>[12]</sup>、转向架<sup>[13-14]</sup>和受电弓<sup>[14-17]</sup>等主要致声部件的噪声. 如刘加利等<sup>[18]</sup>数值研究了高速列车头车表面的气动噪声源, 肖友刚等<sup>[19]</sup>研究了头车曲面对头部气动噪声的影响, 孙振旭等<sup>[20]</sup>数值研究了列车头部、车厢连接处、尾部等的气动噪声分布及贡献, 喻华华等<sup>[21]</sup>数值研究了受电弓、以及不同头型的气动噪声, 安翼等<sup>[22]</sup>研究了头型长细比对气动噪声的影响, 等等. 而对于高速列车整车气动噪声的研究, 由于计算条件的限制, 大都将列车长度做了大幅简化. 如袁磊等<sup>[23]</sup>简化计算了仅包括一个头车和一个尾车构成的模型车的气动噪声源, 孙振旭等<sup>[20]</sup>, Yang 等<sup>[24]</sup>, 张军等<sup>[25-26]</sup>将高速列车简化为包括一个头车、一个中间车和一个尾车的计算模型, 数值研究了列车的近场和远场噪声. 由于气动噪声数值求解的巨大计算量<sup>[27]</sup>, 目前对长编组真实列车气动噪声的数值模拟仍存在着较大的困难.

然而, 我国实际运行的高速列车通常以 8 车或 16 车为编组, 目前数值评估过程中采用的三节车编组模型, 虽然可以避免高速列车过于细长的结构特

征给网格生成等过程带来的困难, 以及极大地降低气动噪声求解过程的计算量, 但无法准确评估列车中间车厢在列车周围流动与噪声产生过程中的作用和影响. 因此, 三节车编组模型能否合理评价真实长度列车的气动噪声, 如何基于现有条件合理评价真实长度列车的气动噪声, 是一个急需探讨的科学问题<sup>[28-29]</sup>.

为此, 本文基于 CRH380A 高速列车, 抽象简化出代表列车主体结构特征的细长结构体, 研究细长结构体长度对其气动噪声的影响, 探讨高速列车气动噪声与车体长度之间的关系, 分析当前噪声评估过程中广泛使用的三节车编组列车的合理性, 并由此探讨对真实长度列车气动噪声的快速评估的近似方法和途径, 以期对列车设计和优化提供理论参考和新方法.

## 1 数值模拟方法

针对高速列车气动噪声的复杂性, 本文数值模拟中, 将模拟计算区域分为非线性声源区(近场流动区)和线性声传播区, 采用计算流体力学/计算气动声学(hybrid CFD/CAA)的混合算法进行模拟求解. 对于近场流动区, 针对高速列车为细长流线体, 流动不稳定性较弱的特点, 选用 Batten 等<sup>[30-31]</sup>提出的计算量较低的非线性声学求解器(non-linear acoustics solver, NLAS). 即首先运用湍流(cubic  $k-\varepsilon$  RANS)模型求解 N-S 方程, 得到流动的统计定常解, 再采用非线性声学求解器(NLAS)求解流动的非定常时空演化和压力脉动, 由此得到近场流场和噪声源信息. 而对于远场噪声则采用声比拟法, 即采用 FW-H 方程<sup>[31]</sup>, 通过在控制面积分得到远场噪声. 该模拟方法及其验证已在我们的前期工作<sup>[22]</sup>有较详细论述, 本文不再赘述. 这里仅简要给出非线性声学解算器采用的控制方程和 FW-H 方程的时域积分解.

由 Batten 提出的非线性声学求解器是一种求解统计定常状态流动中声的产生与传播的数值算法,其控制方程为由 N-S 方程的扰动推导而来的非线性扰动方程 (NLDE)<sup>[30]</sup>

$$\frac{\partial \mathbf{q}'}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}'_i}{\partial x_i} - \frac{\partial (\mathbf{F}^v_i)'}{\partial x_i} = -\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} - \frac{\partial \bar{F}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{F}^v_i}{\partial x_i} \quad (1)$$

其中

$$\bar{q} = \begin{bmatrix} \bar{\rho} \\ \bar{\rho} \bar{u}_j \\ \bar{e} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \bar{\rho} \bar{u}_i \\ \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j + \bar{p} \delta_{ij} \\ \bar{u}_i (\bar{e} + \bar{p}) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}^v_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\tau}_{ij} \\ -\bar{\theta}'_i + \bar{u}'_k \bar{\tau}'_{ki} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{q}' = \begin{bmatrix} \rho \\ \bar{\rho} u'_j + \rho' \bar{u}_j + \rho' u'_j \\ e' \end{bmatrix}$$

$$(\mathbf{F}^v_i)'\prime = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau'_{ij} \\ -\theta'_i + u'_k \tau'_{ki} + \bar{u}_k \tau'_{ki} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}'_i = \begin{bmatrix} \bar{\rho} u'_i + \rho' \bar{u}_i \\ \rho' \bar{u}_i \bar{u}_j + \bar{\rho} \bar{u}'_i u'_j + \bar{\rho} u'_i \bar{u}_j + p' \delta_{ij} \\ u'_i (\bar{e} + \bar{p}) + \bar{u}_i (e' + p') \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \rho' u'_i \\ \bar{\rho} u'_i u'_j + \rho' \bar{u}'_i \bar{u}'_j + \rho' \bar{u}_i u'_j + \rho' u'_i \bar{u}_j \\ u'_i (e' + p') \end{bmatrix}$$

式中,  $\rho$  为流体密度,  $u$  为速度,  $e$  为能量,  $\tau$  为切应力,  $p$  为压强.

忽略密度扰动,对方程组取时间平均,可消去时间演化项和所有线性通量项,得到  $\overline{LHS} = \overline{RHS} = \partial \mathbf{R}_i / \partial x_i$

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\rho} u'_i u'_j \\ c_p \rho T' u'_i + \bar{\rho} u'_i u'_k \bar{u}_k + \frac{1}{2} \bar{\rho} u'_k u'_k u'_i + u'_k \tau'_{ki} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式 (2) 中的各物理量对应于雷诺应力张量和湍流热通量项,由 RANS 方法求解得出.

远场声压的模拟计算,采用 Farassat<sup>[33]</sup> 给出的基于 FW-H 方程的时域积分解

$$4\pi p'(\mathbf{x}, t) = \iint \left[ \frac{\dot{Q}_j \hat{n}_j}{r(1-M_r)^2} + \frac{Q_j \hat{n}_j (r \dot{M}_r + c_\infty (M_r - M^2))}{r^2 |1 - M_r|^3} \right]_{\text{ret}} ds +$$

$$\iint \left[ \frac{\dot{L}_j \hat{r}_j}{c_\infty r (1 - M_r)^2} + \frac{L_j \hat{r}_j - LM}{r^2 (1 - M_r)^2} \right]_{\text{ret}} ds + p'_Q \quad (3)$$

式中,  $L_i = p \hat{n}_i + \rho u_i (u_j - v_j) n_j$ ,  $Q_i = (\rho_\infty - \rho) v_i + \rho u_i$ ;  $\rho_\infty$  和  $c_\infty$  分别为远场流体的密度和声速,  $u_i$  和  $v_i$  分别为当地流速和物体表面速度;  $\hat{n}_i$  和  $\hat{r}_i$  分别为物面单位法向矢量  $\mathbf{n}$  和单位发射矢量  $(\mathbf{x} - \mathbf{y})/r$  的坐标分量,  $r$  为观测点与声源间距离. 符号 [ ]<sub>ret</sub> 代表在延迟时间  $\tau = t - r/c_\infty$  下取值,  $t$  和  $\tau$  分别为声源发出声波和声波到达观测点的时间;  $M_r = v_i \hat{r}_i / c_\infty$  为声源与观测点方向上的马赫数.

## 2 计算列车模型与设置

### 2.1 列车模型

基于我国自主研发的高速列车外形,抽象简化出代表列车主体结构特征的细长结构体,作为本文研究的列车模型. 模型列车由头车、中间车厢和尾车组成,且去掉了车间间隙、受电弓和转向架等非顺滑曲面结构. 为了研究细长体的气动噪声与其车体长度之间的关系,本文采用三种车体长度的细长结构体模型,分别用 A, B, C 进行标识,其中,模型 A 由一节头车、一节中间车厢和一节尾车组成,而模型 B 和 C 具有与模型 A 相同的头、尾车,但分别具有两节和四节中间车厢,如图 1 所示. 列车模型的单节车体长度  $L_s = 26$  m, 车体宽度  $W \approx 3$  m, 高度  $H \approx 3.5$  m, A, B, C 三种模型车的长度分别为 78 m, 104 m, 156 m.

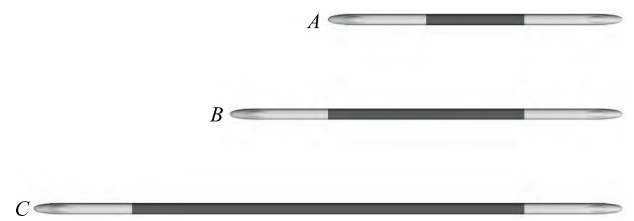


图 1 三种车体长度的细长结构体模型

Fig. 1 Simplified models of three trains with different lengths

### 2.2 计算条件

对于三种不同长度的列车模型,计算区域的原点均取在与尾车邻接车厢下底面的面心处,从而 A, B, C 三种模型车的车体在  $x$  轴上的坐标范围分别为  $[-39$  m, 39 m]、 $[-65$  m, 39 m] 和  $[-117$  m, 39 m]. 在长度方向上,三种列车模型的计算区域,前

段为从车头前端向外延伸  $3L_s$  后端为从尾车尾端向外延伸  $9L_s$ , 宽度方向取  $y \in [-4L_s, 4L_s]$ , 高度方向取  $z \in [-h, 4L_s]$ , 其中,  $h = 0.371$  m 为车体下底面距离地面的高度.

三种模型车的数值计算网格皆采用四面体非结构网格. 壁面附近区域的网格分辨率约为  $205 \text{ cells}/L_s$ ,

对车体尾流区域的网格加密, 分辨率约为  $500 \text{ cells}/L_s$ . 车体壁面边界层采用棱柱网格, 第一层网格高度对应的  $y^+ \approx 150$ , 网格沿壁面法向共生长了 5 层, 增长率为 1.6. 网格生成过程中, 三种模型车具有相似的网格拓扑, 其中, 三节车体模型 A 与六节车体模型 C 的网格如图 2 所示.

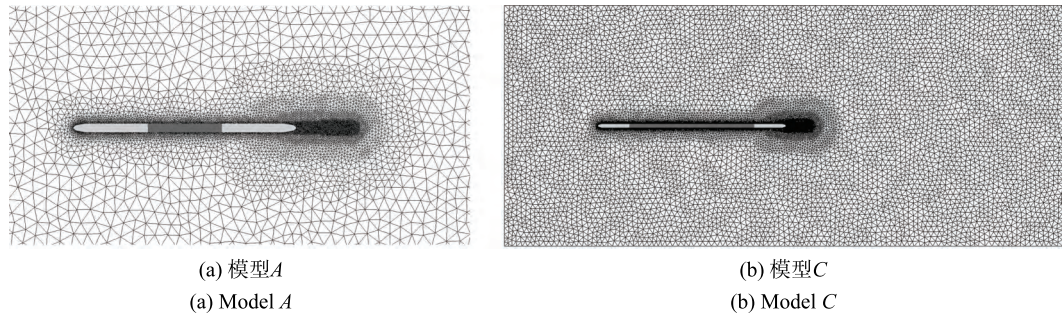


图 2 不同车体长度简化列车模型的计算网格

Fig. 2 Computational mesh grid for different trains

模拟计算时, 对列车车体边界条件采用绝热无滑移固壁条件, 而地面边界条件采用无滑移运动固壁条件, 其速度为来流速度  $350 \text{ km/h}$ . 其他外围边界条件均采用均匀来流的远场边界条件, 其温度和压力分别取为  $298.5 \text{ K}$  和  $101\,325 \text{ Pa}$ . 流场的非定常计算采用隐式双重时间步, 瞬态时间步长  $t = 5 \times 10^{-5} \text{ s}$ . 可解析的信号最高频率  $f_{\max} = 1/(2\Delta t) = 25\,000 \text{ Hz}$ .

### 3 计算结果

#### 3.1 近场流场

流动过程中产生的漩涡与势流以及漩涡之间的

相互作用是流动致声的根本原因和内在机制<sup>[34]</sup>. 一般可以通过  $Q$  判据 ( $Q = (\Omega_{ij}\Omega_{ij} - S_{ij}S_{ij})/2$ ,  $\Omega = (\partial u_i/\partial u_j - \partial u_j/\partial u_i)/2$ ,  $S = (\partial u_i/\partial u_j + \partial u_j/\partial u_i)/2$ ) 来表征流场中的涡湍流结构, 并由此判别噪声源的强弱信息. 为此, 我们基于  $Q$  判据分析了三种模型车的涡结构分布. 图 3 给出了三种长度列车周围流场的  $Q$  判据等值面,  $Q$  的取值为  $(U_\infty/H)^2$ , 其中,  $U_\infty$  为来流速度  $350 \text{ km/h}$ ,  $H$  为车体高度  $3.5 \text{ m}$ .  $Q$  判据等值面由当地压力  $p$  与来流压力  $p_\infty = 101\,325 \text{ Pa}$  的差值  $\Delta p$  渲染和着色, 为了能更清楚地对比压力的相对大小,  $\Delta p$  取值限制在区间  $[-100 \text{ Pa}, 100 \text{ Pa}]$  内.

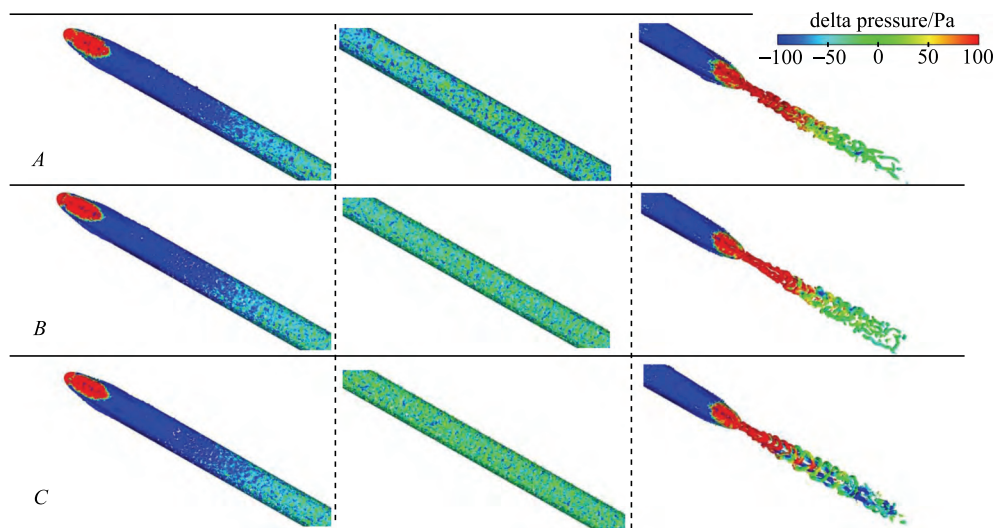


图 3 由  $\Delta p = p - p_\infty$  着色渲染的不同长度列车  $Q$  判据等值面  $Q = (U_\infty/H)^2$

Fig. 3 Isosurface of  $Q$  criterion of different trains colored by  $\Delta p = p - p_\infty, Q = (U_\infty/H)^2$

由图 3 的数值模拟结果可见, 不同车体长度的三种列车的周围流场, 其  $Q$  判据等值面具有相似的空间分布, 主要分布于车体表面附近和尾流区域. 中间车体的周围流动较为稳定, 流动状态与自由来流状态相近, 相互间没有明显区别. 车体长度的增加对头尾车附近的压力分布有明显影响, 仅对尾流区域的  $Q$  判据等值面上的压力分布有一定影响, 但也无太明显影响. 这总体上说明, 列车长度的增大并不会对头、尾车的流动和涡湍流结构产生明显影响, 而且各中间车体周围的流场结构无明显区别.

### 3.2 远场噪声

远场噪声基于近场声源面的 FW-H 积分进行求

解. 为获得远场噪声, 在近场流动的非定常计算中需要设定声源面, 用于收集近场的声源信息. 对于三种列车模型, 在长度方向上, 声源面都为从车体前端向外延拓 1 m 和从车体尾端向外延拓 21 m, 即 A, B, C 的声源面在长度方向上的取值范围分别为  $[-40 \text{ m}, 60 \text{ m}]$ 、 $[-66 \text{ m}, 60 \text{ m}]$  和  $[-118 \text{ m}, 60 \text{ m}]$ , 各声源面具有相同的宽度和高度, 宽度区间均为  $[-3 \text{ m}, 3 \text{ m}]$ , 高度区间均为  $[0, 5.5 \text{ m}]$ . 其中, 六节车体的模型 C 的声源面如图 4 所示. 各列车沿线噪声的总声压级及其分布特性通过图 5 所示的沿车体长度方向分布的声压探点获得, 探点位于距离车体中心平面 25 m, 高 3.5 m 的直线上, 沿车体长度方向等间距分布, 相邻探点间的距离为 10 m.

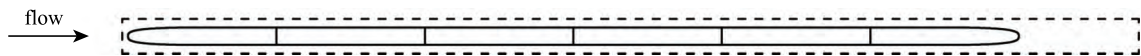


图 4 模型 C 的声源面的空间位置示意图

Fig. 4 Location of the acoustic surfaces for Model C

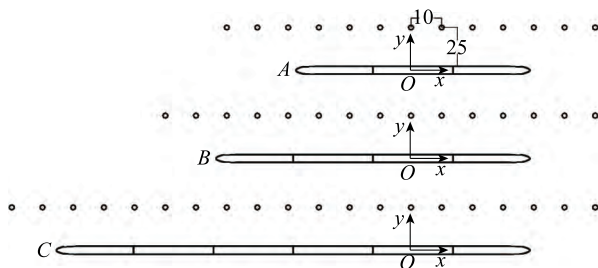


图 5 沿细长结构体长度方向分布的声压探点

Fig. 5 Location of sound pressure probes along with the trains

图 6 给出了三种列车模型在各沿线探点的总声压级的模拟计算结果. 结果表明, 沿线噪声在车体长度方向具有相似的空间分布特征, 即在头车及头车

前部, 沿线噪声近似于线性增长, 而在车体中部沿线噪声的变化趋于平缓, 当进入尾车及尾流附近区域时, 沿线噪声将再次明显上升. 由此可知, 车体长度的增加并不会明显改变沿线噪声的分布规律, 但从声压级量值上的对比可知, 会导致沿线噪声的声压级显著增大.

为了更好地比较列车长度对远场噪声声压级及方向性的影响, 我们在以列车中心点为圆心, 半径为 150 m 的圆周上, 等间隔 ( $\Delta\theta=15^\circ$ ) 设置了不同方位的多个远场压力探点, 如图 7 所示. 由此, 得到了沿列车周向分布的远场压力探点处的总声压级分布, 结

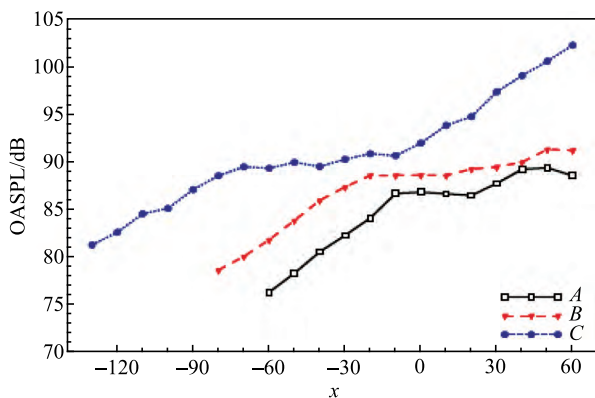


图 6 三种车体长度的列车的沿线噪声总声压级

Fig. 6 Overall sound pressure level profile along the trains of different lengths

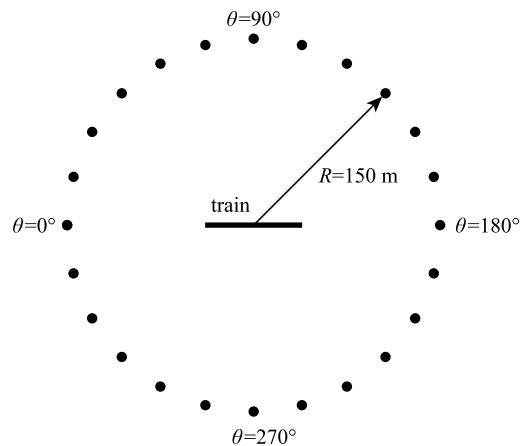


图 7 列车周向分布的声压探点示意图

Fig. 7 Location of sound pressure probes around the trains

果如图 8 所示. 可见, 随着车体长度的增大, 远场噪声的总声压级将显著增大, 且总声压级的增加在空间上具有方向性, 在列车车体的下游方向, 噪声的增加相对车体上游方向更加明显, 即车体长度增大对列车尾部及下游噪声的增加影响更为明显. 也就是说, 车体增加后, 尾车部分的噪声较原来的噪声有较明显增大.

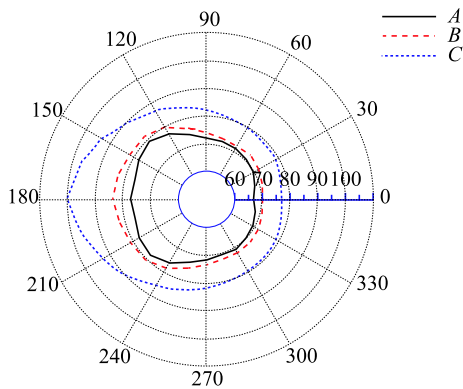


图 8 不同长度列车周围沿圆周分布的总声压级  
Fig. 8 OASPL around the trains with different lengths

#### 4 分析和讨论

从上述计算结果可知, 无论近场流动形态还是

远场噪声特性, 车体的长度都会影响特定物理量的数值, 致使用短编组列车模型计算的气动噪声, 与长编组列车的气动噪声之间存在着一定的差别. 但车体长度的增加并不会显著改变声和流动的原有规律与特性. 若能找寻和建立列车车体各组成部分噪声之间的联系, 以及不同编组的列车, 其对应部位噪声之间的关联, 则可通过对短编组列车的噪声求解结果, 为长编组列车噪声的快速评估提供可能.

#### 4.1 列车各组成部分的噪声特征及其关联

为探讨同一车体各部分之间的远场噪声关系, 以及对比不同车体的对应部位之间的噪声特性, 对 A, B, C 三种模型车的头车、各节中间车厢, 以及尾车和尾流区域, 分别设定相应的近场声源面, 以分析各组成部分的气动噪声特征. 以模型 C 为例, 其近场声源面的设定如图 9 所示. 列车各个部位的声源面为对整体声源面 surf. Ent 的分割, 详细设置为: 头车声源积分面 surf. H, 中部车厢的声源面 surf. C, 其中, 模型 B 具有两节车厢, 车厢积分面分别编号为 1 和 2, 而模型 C 具有四节车厢, 其编号为 1 ~ 4; surf. R 为尾车的对应的声源面, 而 surf. W 为包裹尾流区域的声源面.

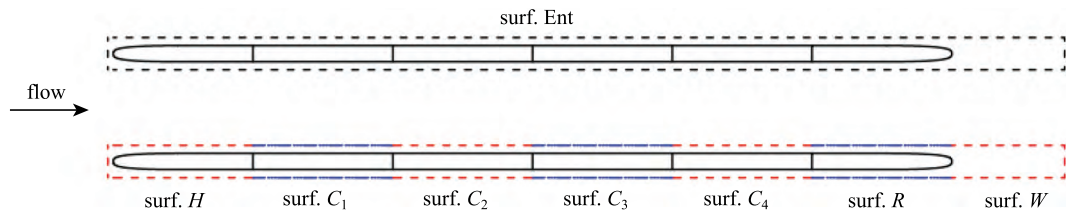


图 9 模型 C 近场声源面的设置示意图  
Fig. 9 Acoustic surface setup for model C

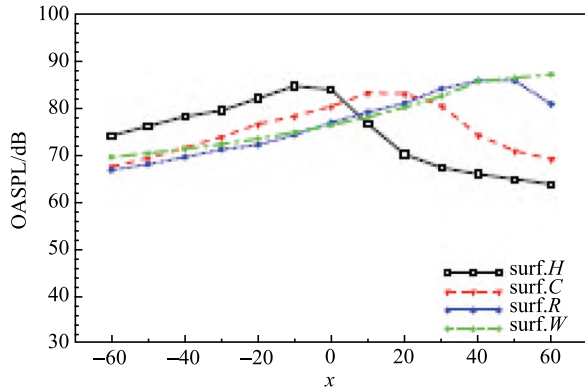
由此, 可得到三种列车模型各部位的沿线噪声声压级的分布特征 (图 10). 结果显示, 各声压级曲线的峰值出现在对应部位的下游端, 除了尾流区域, 各车体部位具有近似的声压级分布曲线, 以及声压级峰值  $(86 \pm 1)$  dB.

进一步分析不同列车模型对应部位之间噪声特性的关联性, 图 11 给出了模型 B 与模型 C 的头车、尾车、尾流区以及两节下游车厢沿线噪声的比较结果. 其中, 以更加直观地对比, 图 11(a) 同时还给出了模型 B 头车的沿线噪声曲线的偏移曲线. 从图可知, 不同车体长度的模型 B 和模型 C, 其头车沿线噪声的空间分布特征以及沿线噪声声压级十分相近, 这

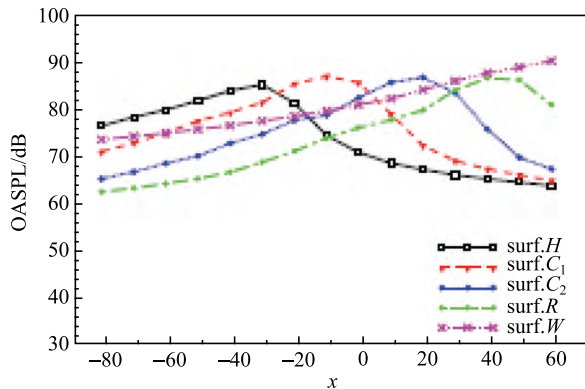
可能与头车位于最上游端, 受下游车体影响较小有关. 同时, 两声压级曲线的偏移距离近似等于两节车长, 与模型 B 和模型 C 的头车在空间上相差的距离一致. 对比模型 B 和模型 C 具有相同空间位置的两节下游车厢的沿线噪声, 由于上游车体长度存在差异, 导致边界层沿车体有着不同的发展距离, 从而噪声声压级间存在小的差异, 但两两对应的峰值和总体声压级分布具有很好的一致性. 而模型 B 和模型 C 的尾车和尾流区对应的声压级曲线, 虽然分布规律相近, 但量值上存在较大差异, 最大相差约 6 dB, 这一方面如前所述, 是由于车身加长后, 导致尾流存在一定的差异而形成的; 另一方面, 由于计算量限制,

噪声面不能取的离车体过远, 进而导致边界层与噪声面有切割而产生了虚假的声源信息, 也是产生较大差异的另一原因. 这提示我们在应用本文原理和方法时, 应当注意在计算量和噪声面选取之前取得平衡.

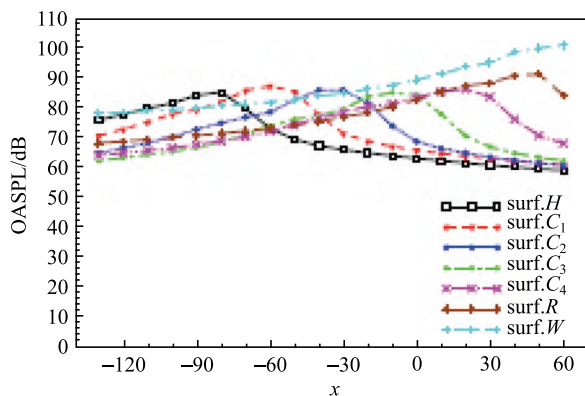
图 12 给出了图 11(b) 中四条沿线噪声声压级曲线的峰值所对应探点的声压级频谱, 可以发现, 不



(a) 模型A  
(a) Model A



(b) 模型B  
(b) Model B

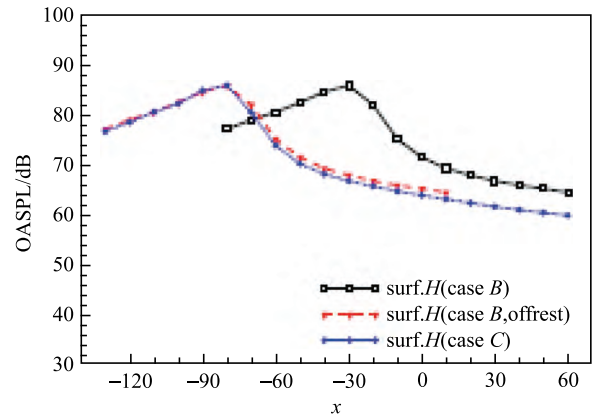


(c) 模型C  
(c) Model C

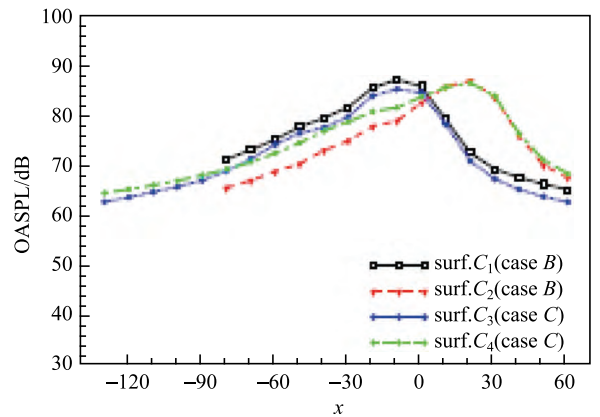
图 10 三种模型各部位的沿线噪声

Fig. 10 OASPL profile along the train of different lengths

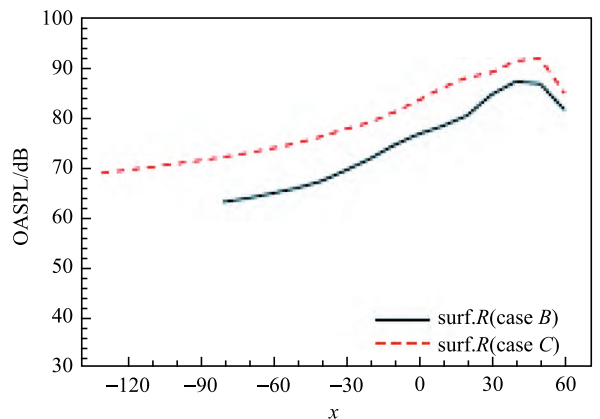
同车体长度的列车模型, 其对应车厢间的远场噪声不仅具有相近的总声压级, 同时, 它们的远场噪声频谱亦十分吻合, 且声压级在 50 dB 以上的噪声主要集中在 500 Hz 以内的中低频段内.



(a) 头车的沿线噪声声压级曲线  
(a) Head car



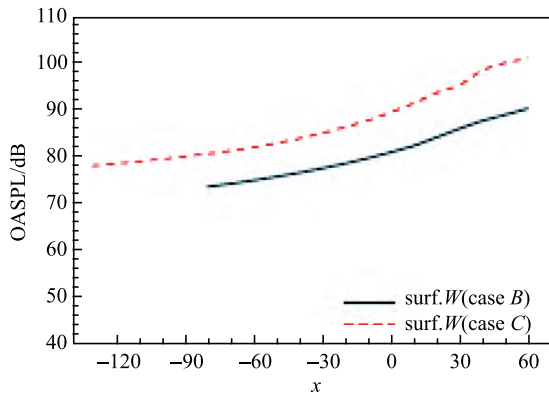
(b) 两节下游车厢的沿线噪声曲线  
(b) Middle cars



(c) 尾车的声压级曲线  
(c) Rear car

图 11 模型 B 与模型 C 各部位的沿线噪声的对比

Fig. 11 OASPL profile comparison car by car for model B & C



(d) 尾流区对应的声压级曲线  
(d) Wake zone

图 11 模型 B 与模型 C 各部位的沿线噪声的对比 (续)  
Fig. 11 OASPL profile comparison car by car for model B & C(continued)

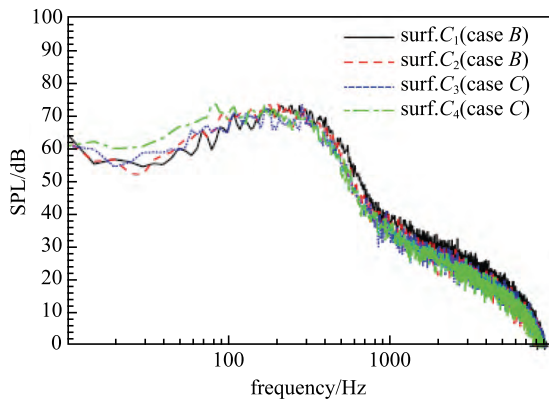
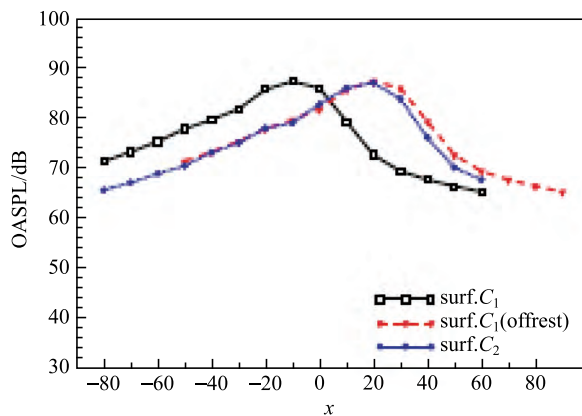
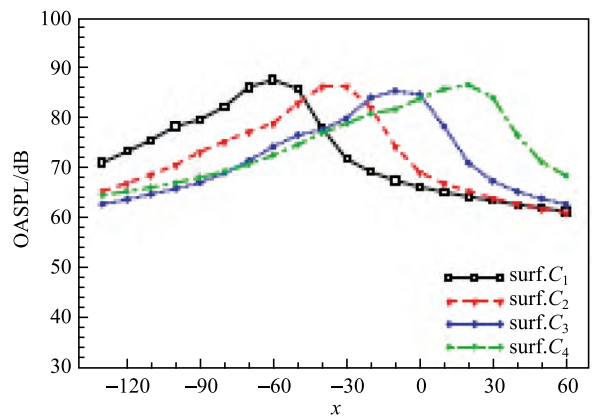


图 12 两节下游车厢的沿线噪声曲线峰值探点的声压级频谱  
Fig. 12 Spectrum of SPL for middle cars at the given location



(a) 模型B的两节车厢  
(a) 2 middle cars of Model B



(b) 模型C的四节车厢  
(b) 4 middle cars of Model C

图 13 模型 B 与模型 C 各车厢沿线噪声的声压级对比

Fig. 13 OASPL profile along the train for different cars of model B & C

### 4.2 近似评估长编组列车噪声的简化方法

由前文分析可知, 不仅同一车体模型各部位具有近似的声压级分布曲线, 以及声压级峰值, 而且对于不同车体长度的三种模型, 各自对应的车体部位之间的声压级亦具有相一致的规律. 这就使得基于短编组列车的噪声计算结果, 对长编组列车噪声进行近似评估成为可能. 不同车体长度的列车, 其差异往往主要体现在车厢的数量上, 要实现更长列车的噪声评估, 如何获得待评估列车的各车厢部位的声压级分布, 是最主要的问题之一.

图 13 给出了四节车模型 B 与六节车模型 C 各自车厢之间的沿线噪声声压级的分布特征, 其中, 为更加清晰地对比, 在模型 B 的噪声计算结果中 (图 13a), 对其中一节车厢的沿线噪声曲线进行了偏移. 从各车厢的沿线噪声结果可知, 同一列车模型各节车厢, 它们的沿线噪声有着相似的空间分布, 同时, 在量值上亦十分接近, 只是主峰位置会随着车厢的空间位置的不同而相应地发生偏移, 且偏移距

离与相应车厢间的空间距离一致, 如相邻车厢的沿线噪声曲线的偏移距离近似等于单节车厢的长度. 而前面已说明了不同车体长度列车, 其对应车厢间噪声的近似性. 从而, 当得到待评估列车的某单节车厢的远场噪声曲线时, 则其他车厢的沿线噪声特性可由已知车厢的远场噪声曲线通过合适的空间偏移而得到.



当通过对短编组列车的噪声求解以及合适的空间偏移处理, 获得长编组列车对应的头车、中部车厢、尾车及尾流区的噪声特性, 以及通过已得到的车厢噪声重构出长编组列车其他车厢的噪声分布后, 最终长编组列车整体噪声的获得还需基于如下条件: 各车体部位的远场噪声应满足线性叠加原理. 从远场噪声求解的 FW-H 方程可知, 由于 FW-H 方程是线性波动方程, 从而各列车部位的远场噪声是可线性叠加的, 列车的整体噪声可通过各车体部位的远场噪声叠加得到.

由上述分析讨论可知, 同一列车模型的车厢的远场噪声具有相似的空间分布特性, 某一车厢的远场噪声可由已知车厢的远场噪声曲线通过合适的空间偏移得到. 同时, 不同列车模型的对应部位之间的远场噪声特性具有很强的关联性, 它们的远场噪声具有接近的总声压级和吻合的噪声频谱. 从而可以推知, 通过对短编组列车远场噪声的求解, 获取其各重要组成部分的远场噪声特性, 随后, 借助已有噪声结果及其合适的处理, 如空间偏移等, 可以重构出长编组列车 (如真实车体长度的高速列车) 的远场噪声结果, 从而极大地降低列车气动噪声问题的求解难

度, 实现真实车长列车模型的气动噪声的快速评估.

需要指出的是, 由于空间偏移操作将导致对应测点位置移动, 因此对于拟偏移噪声面的积分测点, 应当在常规设置的远场噪声测点基础上, 补充更远场的积分测点, 以便在偏移后的叠加过程中, 每个叠加测点处均有各车厢噪声贡献的数据. 在本文中, 考虑到重构模型偏移后测点声压远小于当地车厢贡献的声压 (如图 13(a) 显示, 本例中该差异接近 10 dB), 因此, 在本例的叠加过程中, 为了简化计算, 忽略了偏移后远端噪声测点的贡献. 在实际应用中, 对于拟偏移声源还是应当尽可能获得更远的积分测点数据, 以便得到更加合理和准确的结果. 或者可以通过直接偏移噪声源面的方式进行远场积分, 由于远场积分的线性特性, 上述两种处理结果是等价的.

运用上述原理和方法, 通过对三节车模型 A 各车体部位的沿线噪声计算结果进行适当偏移, 重构出模型 B 与 C 的各相应车体部位的远场沿线噪声, 进而通过线性叠加, 分别获得了四节车 B 与六节车 C 总的沿线噪声结果, 与直接计算结果进行对比, 如图 14 所示.

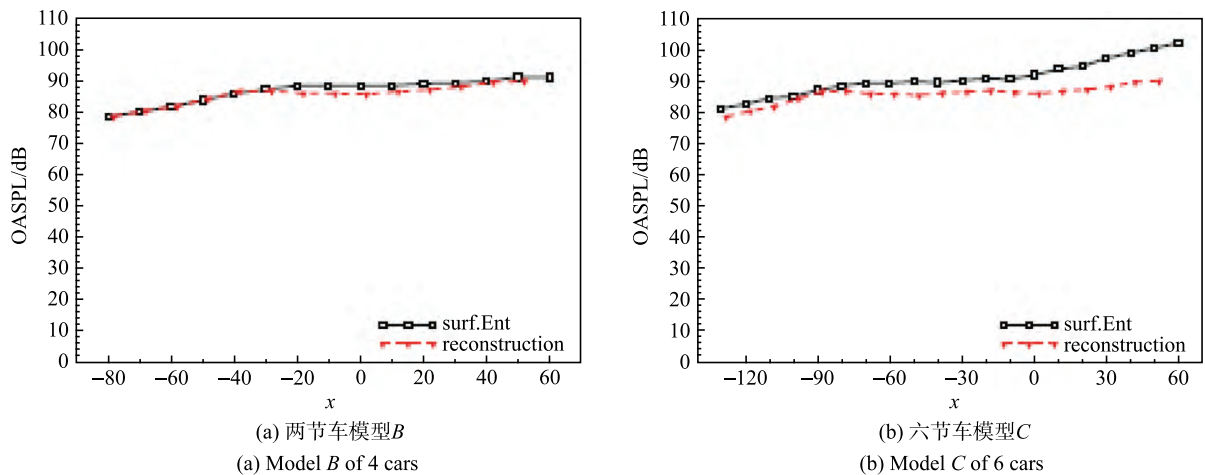


图 14 基于三节车模型 A 的计算结果重构出的模型 B 与 C 的远场沿线噪声

从对比结果可知, 基于三节车计算结果, 重构得到的四节车与六节车的沿线噪声, 可以较好地反映其实际噪声特性. 其中, 重构得到的四节车结果与模型 B 的直接计算结果吻合很好, 最大差异出现在列车中部附近, 约为 3 dB. 而重构得到的六节车结果与模型 C 的直接计算结果在列车中后部差异较大. 可见, 采用该方法可以利用短编组列车的噪声模拟结果重构

长编组列车的噪声, 对列车前段噪声的模拟结果要好于对后段. 其原因, 主要是长编组列车的尾流部分与短编组列车的尾流部分有一定的差异, 使得利用短编组尾车的噪声模拟结果, 来重构长编组列车的尾车噪声, 存在的较明显的差异. 但总体上, 可以利用该方法基于短编组列车噪声模拟结果, 对长编组列车沿线噪声进行快速的近似评估.

## 5 结论

本文通过对三种不同长度列车模型的气动性能和噪声数值模拟, 分析了车体长度对列车气动噪声的影响, 得到如下主要结论:

(1) 车体长度的增大基本不会改变列车远场噪声的分布规律, 但将显著增加远场噪声的声压级, 说明用短编组模型计算得到的噪声明显低估了长编组列车的气动噪声。

(2) 同一列车模型的各节车厢具有相似的沿线噪声, 其噪声曲线在量值上十分接近, 只是主峰位置会随着车厢空间位置的不同而相应地发生偏移, 且偏移距离与相应车厢间的空间距离一致。当得到模型的某单节车厢的远场噪声曲线时, 则其他车厢的远场噪声特性可由已知车厢的远场噪声曲线通过合适的空间偏移得到。

(3) 不同长度编组列车对应部位之间的远场噪声特性具有较强的关联性, 它们的远场噪声具有接近的总声压级和相吻合的噪声频谱, 为基于短编组列车远场噪声结果重构长编组列车的远场噪声提供了可能性。

(4) 基于三节车编组列车噪声的数值计算结果, 重构得到的四节车与六节车的沿线噪声, 与直接数值计算的结果吻合较好, 由此说明, 基于短编组列车噪声结果, 通过重构和叠加, 可以实现对更长编组列车

噪声的近似评估。但需注意应在计算量和噪声面选取之前取得平衡, 以改善对列车后段, 特别是尾流区的噪声模拟, 并进一步探讨车身加长对尾车流及噪声的影响规律, 更好地改进该文提出的近似评估方法。

## 参 考 文 献

- 1 Talotte C. Aerodynamic noise: A critical survey. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 231(3): 549-562
- 2 Mellet C, Létourneaux F, Poisson F, et al. High speed train noise emission: Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution. *Journal of sound and vibration*, 2006, 293(3): 535-546
- 3 杨国伟, 魏宇杰, 赵桂林等. 高速列车的关键力学问题. 力学进展, 2015, 45: 201507 (Yang Guowei, Wei Yujie, Zhao Guilin, et al. Research progress on the mechanics of high speed rails. *Advances in Mechanics*, 2015, 45: 201507(in Chinese))
- 4 孙振旭, 姚永芳, 杨焱等. 国内高速列车气动噪声研究进展概述. 空气动力学学报, 2018, 36(3): 29-41 (Sun Zhenxu, Yao Yongfang, Yang Yan, et al. Overview of the research progress on aerodynamic noise of high speed trains in China. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2018, 36(3): 29-41(in Chinese))
- 5 晋永荣, 陈晓丽. 日本新干线列车噪声声源分布及主动降噪实车试验研究综述. 现代信息科技, 2019, 3(3):176-177, 179 (Jin Yongrong, Chen Xiaoli. Overview of research on noise source distribution and active noise reduction of Shinkansen Trains in Japan. *Modern Information Technology*, 2019, 3(3): 176-177, 179(in Chinese))
- 6 谭晓明, 杨志刚, 吴晓龙等. CIT500 车外噪声源频谱分解模型的试验研究. 铁道学报, 2017, 39(7): 32-37 (Tan Xiaoming, Yang Zhigang, Wu Xiaolong, et al. Experimental study on frequency spectrum component model of noise source outside CIT500 train. *Journal of the China Railway Society*, 2017, 39(7): 32-37(in Chinese))
- 7 Yokoshima S, Morihara T, Sato T, et al. Combined effects of high-speed railway noise and ground vibrations on annoyance. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2017, 14(8): 845
- 8 Kitagawa T, Nagakura K. Aerodynamic noise generated by shinkansen cars. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 231(3): 913-924
- 9 Suzuki M, Ikeda M, Yoshida K. Study on numerical optimization of cross-sectional panhead shape for high-speed train. *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 2008, 1: 100-110
- 10 高阳, 李启良, 陈羽等. 高速列车头型近场与远场噪声预测. 同济大学学报: 自然科学版, 2019, 47(1): 124-129 (Gao Yang, Li Qiliang, Chen Yu, et al. Prediction of near field and far field noise for high-speed train head shape. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2019, 47(1): 124-129(in Chinese))
- 11 刘晓日, 罗江泽, 赵哲等. 车头长度对高速列车气动特性与声场特性影响的数值分析及降噪研究. 中国铁道科学, 2018, 39(5): 88-96 (Liu Xiaori, Luo Jiangze, Zhao Zhe, et al. Numerical analysis of influence of head length on aerodynamic and sound field characteristics of g-series high-speed train and research on noise reduction. *China Railway Science*, 2018, 39(5): 88-96(in Chinese))
- 12 刘国庆, 杜健, 刘加利等. 车端风挡类型对高速列车气动噪声影响规律的研究. 噪声与振动控制, 2018, 38(2): 87-90 (Liu Guoqing, Du Jian, Liu Jiali, et al. Investigation on the influence of inter-car windshield types on the aerodynamic noise of high speed trains. *Noise and Vibration Control*, 2018, 38(2): 87-90(in Chinese))
- 13 Zhu JY, Hu ZW, Thompson DJ. The effect of a moving ground on the flow and aerodynamic noise behaviour of a simplified high-speed train bogie. *International Journal of Rail Transportation*, 2017, 5(2):110-125
- 14 Zhang YD, Zhang JY, Tian LI, et al. Investigation of the aeroacoustic behavior and aerodynamic noise of a high-speed train pantograph. *Science China Technological Sciences*, 2017, 60(4): 75-89
- 15 Sun X, Han X. Numerical modeling and investigation on aerodynamic noise characteristics of pantographs in high-speed trains. *Complexity*, 2018(6): 1-12
- 16 刘加利, 于梦阁, 田爱琴等. 高速列车受电弓气动噪声特性研究. 机械工程学报, 2018, 54(4): 231-237 (Liu Jiali, Yu Mengge, Tian Aiqin, et al. Study on the aerodynamic noise characteristics of the pantograph of the high-speed train. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(4): 231-237(in Chinese))

- 17 董继蕾. 高速动车组受电弓气动噪声数值仿真分析. 噪声与振动控制, 2018, 38(s1): 46-50 (Dong Jilei. Numerical simulation analysis of aerodynamic noise for pantographs of high-speed trains. *Noise and Vibration Control*, 2018, 38(s1): 46-50(in Chinese))
- 18 刘加利, 张继业, 张卫华. 高速列车车头的气动噪声数值分析. 铁道学报, 2011, 33(9): 19-26 (Liu Jiali, Zhang Jiye, Zhang Weihua. Numerical analysis on aerodynamics noise of the high-speed train head. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(9): 19-26(in Chinese))
- 19 肖友刚, 康志成. 高速列车车头曲面气动噪声的数值预测. 中南大学学报, 2008, 39(6): 1267-1272 (Xiao Yougang, Kang Zhicheng. Numerical prediction of aerodynamics noise radiated from high-speed train head surface. *Journal of Central South University*. 2008, 39(6): 1267-1272(in Chinese))
- 20 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. 北京大学学报, 2012, 48(5): 701-711 (Sun Zhenxu, Song Jingjing, An Yiran, Numerical simulation of aerodynamics noise generated by CRH3 high-speed train. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(5): 701-711(in Chinese))
- 21 Yu HH, Li JC, Zhang HQ. On aerodynamic noises radiated by the pantograph system of high-speed trains. *Acta Mechanica Sinica*, 2013, 29(3): 399-410
- 22 安翼, 莫晃锐, 刘青泉. 高速列车头型长细比对气动噪声的影响. 力学学报, 2017, 49(5): 985-996 (An Yi, Mo Huangrui, Liu Qingquan. Study on the influence of the nose slenderness ratio of high-speed train on the aerodynamic noise. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(5): 985-996(in Chinese))
- 23 袁磊, 李人宪. 高速列车气动噪声及影响. 机械工程与自动化, 2013, 180(5): 31-35 (Yuan Lei, Li Renxian, Aerodynamics noise of high-speed train and its impact. *Mechanical Engineering & Automation*, 2013, 180(5): 31-35(in Chinese))
- 24 Yang Y, Yang GW. A numerical study on aerodynamics noise sources of high-speed train. *Proceedings of the 1st IWHIR*, 2012(2): 107-116
- 25 张军, 黄艳艺, 兆文忠. 高速列车气动噪声数值仿真. 大连交通大学学报, 2012, 33(4): 1-5 (Zhang Jun, Huang Yanyi, Zhao Wenzhong. Research on numerical simulation of aerodynamics noise for high-speed train. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2012, 33(4): 1-5(in Chinese))
- 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. 铁道学报, 2015, 37(2): 10-17 (Zhang Jun, Sun Bangcheng, Guo Tao, et al. Research on aerodynamics noise radiated from whole body surface of high-speed train and its distribution. *Journal of the China Railway Society*, 2015, 37(2): 10-17(in Chinese))
- 27 余培汛, 杨海, 潘凯等. 结合并行策略与距离减缩法的搜索算法及其在 CAA 中的应用. 计算力学学报, 2018, 35(2): 255-260 (Yu Peixun, Yang Hai, Pan Kai, et al. A search algorithm coupling parallel strategy and distance decreasing method applied to CAA. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2018, 35(2): 255-260(in Chinese))
- 28 Pascioni KA, Cattafesta LN. An aeroacoustic study of a leading-edge slat: Beamforming and far field estimation using near field quantities. *Journal of Sound & Vibration*, 2018, 429: 224-244
- 29 Zhang Y, Zhang J, Tian Li. Contribution analysis of aerodynamic noise of high-speed train. *Journal of Traffic & Transportation Engineering*, 2017(4): 78-88
- 30 Batten P, Ribaldone E, Casella M, et al. Towards a generalized non-linear acoustics solver. AIAA-2004-3001, Proceeding of 10<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2004, May 10-12, Manchester, UK
- 31 Batten P, Goldberg U, Chakravarthy S. Reconstructed sub-grid methods for acoustics predictions at all Reynolds numbers. AIAA Paper 2002-2511, 2002
- 32 Ffowcs Williams JE, Hawkings DL. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 1969, 264: 321-342
- 33 Farassat F. Discontinuities in aerodynamics and aeroacoustics: The concept and applications of generalized derivatives. *Journal of Sound and Vibration*, 1977, 55(2): 165-193
- 34 Powell A. Theory of vortex sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 36(1): 177-195