

# 高速列车外流场气动噪声的特性研究

姜世杰<sup>1</sup>, 杨松<sup>1</sup>, 闻邦椿<sup>1</sup>, 战明<sup>2</sup>  
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对高速列车外流场气动噪声完成了在线实验测试研究,对列车模型进行了简化并确定了合理性;进行了列车模型湍流场模拟,完成了列车远场气动噪声的预测研究. 研究表明,合理缩短列车不会改变车身表面声功率分布规律;高速列车气动噪声属于宽频带噪声;在频率范围(0 ~ 5 000 Hz)内气动噪声仿真与实验结果吻合较好,说明仿真方法准确度高;列车转向架处湍流最为剧烈,其次为车头鼻锥处;车身表面的气流最为平缓,进一步说明缩短列车模型的合理性. 所提出的仿真方法能够为高速列车的结构优化设计提供依据,并能验证高速列车气动噪声控制方法的有效性.

**关 键 词:** 气动噪声;高速列车;在线实验;预测;噪声控制

**中图分类号:** U 270.16      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2020)01-0074-05

## Study on Characteristics of the External Aerodynamic Noise of High-Speed Trains

JIANG Shi-jie<sup>1</sup>, YANG Song<sup>1</sup>, WEN Bang-chun<sup>1</sup>, ZHAN Ming<sup>2</sup>  
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
2. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: JIANG Shi-jie, E-mail: jiangsj@me.neu.edu.cn)

**Abstract:** The on-line experiments were carried out to illustrate that it is reasonable to simplify the high-speed train model. The turbulent air flow of the train model was simulated, and the far-field aerodynamic noise generated by high-speed trains was predicted. It was found that reasonably shortening the car body will not influence the distribution of the sound power level generated by the train surface. The aerodynamic noise of high-speed trains is a typical broadband noise in a wide frequency scope (0 ~ 5 000 Hz), the simulated aerodynamic noise agrees well with the measurement, and the simulation method is reliable. The turbulence is most severe at the bogie, followed by the nose cone. The air flow on the body surface is most gentle, further confirming the rationality of shortening the train model. The simulation method proposed can provide a basis for structural optimization design of high-speed trains and verify the effectiveness of the aerodynamic noise control method for high-speed trains.

**Key words:** aerodynamic noise; high-speed train; on-line experiment; prediction; noise control

近年来,我国高速铁路全面发展,对物质资源流动、人民生活便捷以及经济发展起到了极大的促进作用. 然而,列车气动噪声随着运行速度的提高会急剧增大,造成车内舒适性和沿线民众身心健康的恶化,甚至导致周围环境(建筑物和设施等)的疲劳破坏,严重阻碍了高铁技术的进一步发展. 根据声压级与车速的对应关系<sup>[1-2]</sup>,在低速时(< 250 km/h),轮轨是最主要的声源;而当高速运行时(≥ 250 km/h),气动噪声将最为突出<sup>[3-5]</sup>. 因此,研究高速列车气动噪声的精确仿真模拟,从根本上提出切实可行的控制方法,意义重大,影响深远.

当前,针对高速铁路气动噪声的实验测试主要依托于风洞实验,即基于运动相对性和流动相

似性原理,通过分析风洞中列车模型与人为控制产生的气流间的相互作用,完成实际列车的空气动力学特性的模拟研究. 但风洞实验受到严格的尺度限制,还存在成本高昂、干扰因素多等明显的局限性<sup>[6]</sup>;在数值研究方面,刘凤华等<sup>[7-8]</sup>基于 Lighthill 声类比理论预测了高速列车气动噪声,发现该噪声的能量分布在很宽的频带内,无明显的主频,属于宽频噪声;在低频时能量较大,在高频时能量较小. 流体力学数值模拟技术的进步和发展,虽然为相关研究提供了更多的依据,但是普遍缺少可靠的实验结果的验证. 本文将 Lighthill – Curle理论应用于仿真计算<sup>[9-11]</sup>,完成了列车远场气动噪声的预测研究;同时,与在线实验(在高速铁路沿线进行列车气动噪声的实地实验)研究相结合,确定了数值分析方法的正确性以及列车表面气动噪声的分布规律和特点,为评估列车噪声水平、优化列车结构提供理论依据和支持.

## 1 实验研究

本文利用自主设计搭建的噪声测试平台(如图1所示),克服诸多困难(如环境复杂、识别难度大等),完成了列车外流场气动噪声的在线实验研究. 测试平台主要包括支架、BNC 线缆、传声器(BSWA – MP201)、NI USB – 4431 采集卡、测速仪(Bushnell 101921)以及计算机等设备. 其中,激光测距仪主要用于确定监测点的位置,测速仪用于获取列车的行驶速度. 本实验方法简单便捷且节约成本,测试结果真实、准确,可重复性强.

根据 ISO 3095:2005,两个传声器与铁路中心线的距离为 7.5 m,高度分别为 1.5 和 3.5 m,如图2所示. 在进行气动噪声分析时,需考虑环境背景噪声的影响,因此在无列车经过时,采集了多组环境背景噪声信号;当列车经过测试平台时,采集气动噪声和速度实时信号,完成高速列车外流场气动噪声的在线实验测试. 为了保证结果的准确性,本文共完成了 5 组背景噪声和 16 组列车气动噪声信号的采集.

列车气动噪声与环境背景噪声的时域信号图谱如图3所示. 可见,气动噪声要明显高于背景噪声,两者声压级相差 10 dB 以上,根据噪声叠加原理<sup>[1]</sup>,环境背景噪声对列车气动噪声的影响可忽略不计,因此本文高速列车的实验结果准确、可靠. 此外,气动噪声的峰值集中在头车和尾车位置,而由于车身表面平整,曲率几乎无变化,产生

的气动噪声对总体噪声的影响很小. 因此,适当缩短平整的车身或中间车厢的长度,不会影响车身表面声功率级的分布状况.

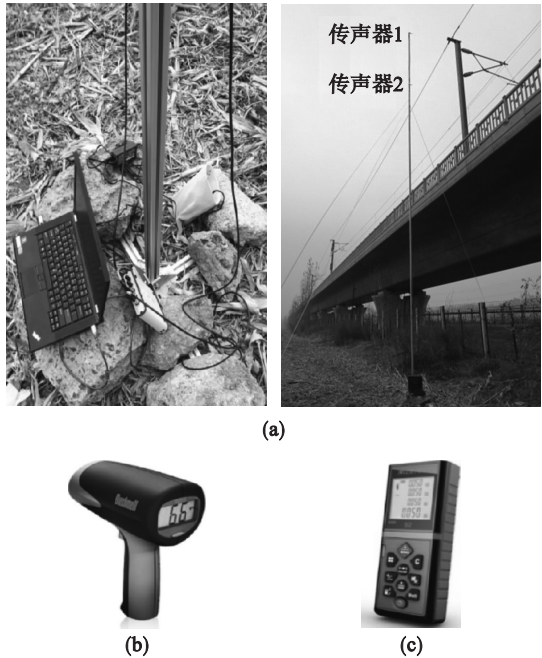


图1 气动噪声在线测试设备  
Fig. 1 On-line testing device for measuring aerodynamic noise  
(a)—噪声采集系统;(b)—测速仪;  
(c)—激光测距仪.

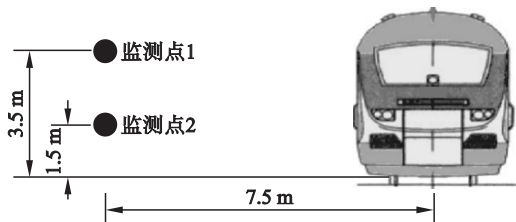


图2 在线实验监测点  
Fig. 2 Monitoring points of the on-line test

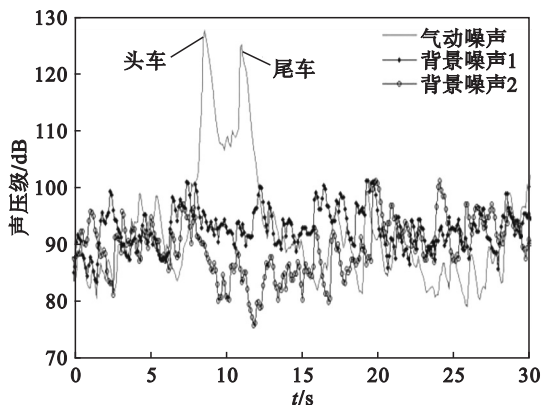


图3 列车气动噪声和环境背景噪声实时信号  
Fig. 3 Measured aerodynamic noise and background noise of high-speed trains in the time domain

## 2 仿真研究

### 2.1 模型准备

通过在线实验研究可知,车身长度对整体气动噪声影响较小,利用头车和尾车建立全尺寸三维简化模型代替整车进行分析不会影响列车声功率分布的基本规律,且能够简化计算,提高仿真速度.因此,本文针对 CRH380B 型高速列车的物理模型进行了简化,如图 4 所示,其长、宽、高尺寸分别为 51.4、3.4 和 3.7 m.

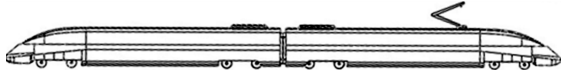


图 4 简化的整车模型

Fig. 4 Simplified whole train model

为保证列车周围流场域的真实性,模拟域范围较大,其入口边界与车头的距离为 20 m,出口边界距离车尾 40 m,侧面边界与车身中线的距离为 20 m.为进一步提高计算效率,基于列车模型的对称性,仅针对对称模型的一半进行分析.网格划分策略为混合网格法,即以面单元划分车身表面,而以体单元划分空间流场域.列车外表面共 3 层三棱柱形边界层,厚度分别为 1.25、1.5 和 1.8 mm,为更准确地模拟车身表面复杂的气体流动状态,网格数总计约为 600 万个(8 000 个/m<sup>2</sup>),如图 5 所示.

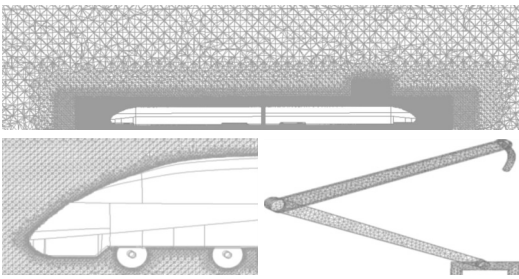


图 5 流域网格划分

Fig. 5 Model mesh structure of the flow field

### 2.2 仿真计算

本文利用 FLUENT 完成了高速列车外流场气动噪声的仿真计算<sup>[12]</sup>.首先,应用 Realizable - 湍流模型模拟列车外部的稳态流场情况<sup>[13]</sup>,其输送方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon -$$

$$\rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\gamma \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b. \quad (2)$$

式中: $x_i, x_j$  是节点位置坐标; $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别为湍流动能的普朗特数和耗散率普朗特数( $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.2$ ); $\rho$  是空气密度; $G_k$  和  $G_b$  分别表示由平均速度梯度和浮力产生的湍流动能; $C_1 = \max[0.43, \frac{\eta}{\eta+5}]$ ;  $C_2 = 1.9$ ;  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ;  $C_{3\varepsilon} = \tan\beta$ ,  $\beta$  为湍流速度方向与竖直方向的夹角,  $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$ ,  $S$  为应力变化率.

其次,提取稳态流场中各节点的湍流动能和湍流耗散率,确定各节点处的声功率<sup>[14-15]</sup>,其表达式为

$$W_A = \alpha \rho \left( \frac{u^3}{l} \right) \frac{u^5}{c_0^5}. \quad (3)$$

式中: $\alpha$  为常数; $l$  为湍流尺度; $u$  为湍流速度; $c_0$  为声速.

然后,利用大涡模拟方法(LES)结合稳态流场的计算结果完成瞬态流场的模拟,获取列车外表面的压力分布情况<sup>[2]</sup>;最后,利用 Lighthill - Curle 声类比理论<sup>[10-11]</sup>完成列车外流场气动噪声的预测,表达式为

$$\rho'(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x'_i} \int \frac{n_j P_{ij}(\mathbf{y}, t - \frac{R}{c_0})}{R} d\mathbf{y}, \quad (4)$$

$$P(\mathbf{x}, t) - P_0 = c_0^2 \rho'(\mathbf{x}, t). \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x}$  为测声点矢量; $t$  为时间; $\mathbf{y}$  为声源点矢量; $n_j$  为垂直列车外壁向外(指向外流场)的方向余弦; $P_{ij}$  为空气对车身外表面的脉动压力; $\mathbf{R} = \mathbf{x} - \mathbf{y}_j$ ;  $P$  和  $P_0$  是声压和参考声压( $P_0 = 2 \times 10^{-5}$  Pa).

为定量分析仿真结果的正确性,需与实验结果进行对比分析,因此,在流场域布置了 2 个监测点,用以采集气动噪声的仿真结果.监测点位置与前文实验中选取的测点位置一致.

## 3 结果分析

列车表面涡流的运动会产生脉动压力,进而辐射声压,但涡流难以直观显示,需通过分析外表面速度和压力分布情况间接地确定列车表面的空气流动状态.图 6a 为车头表面气流速度矢量图,可以看出在转向架、车头向车身过渡等形状突变较大处,气流分离明显,迫使气流速度加大;而由于车头鼻锥处正面接触气流,阻碍其继续流动,气流流速相对较低.



在图 6b 所示的列车尾部,气流重新合并,合并时上下两部分气流相互影响,速度降低,方向有所变化. 由于受到地面的影响,列车尾部下半部分速度较小.

图 7a 所示为车头表面静压力云图. 车头转向架形状极不规则,该处的流体流动最为剧烈复杂,正压力也最大,达到 4 940 Pa;气流因受到列车头部的压缩,在其附近形成正压区,且压力梯度大、变化剧烈,车头鼻锥处正压力较大,达到4 060 Pa;前车窗与车头的连接区域为非流线型结构,因而

出现了较大的正压力(2 310 Pa);由于头车车头向车身过渡处曲率变化明显,空气绕流速度加快且指向斜上方,该区域呈现真空状态,表面承受负压力的作用,最高达到 -1 200 Pa. 而两车厢车身表面平整,曲率几乎无变化,致使承受的压力较小,说明了缩短车身长度(简化模型)进行分析的合理性. 由于空气黏性的作用和尾部旋涡的影响,尾车车身到车尾的变截面处出现较大负压,车尾处压力变化剧烈,压力梯度较大,如图 7b 所示.

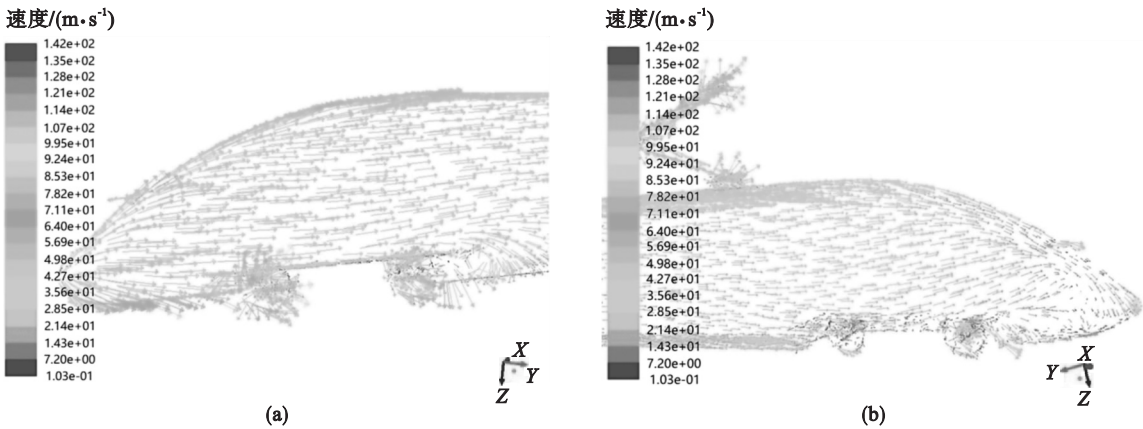


图 6 车体表面气流速度云图  
Fig. 6 Air velocity around the train  
(a)—车头;(b)—车尾.

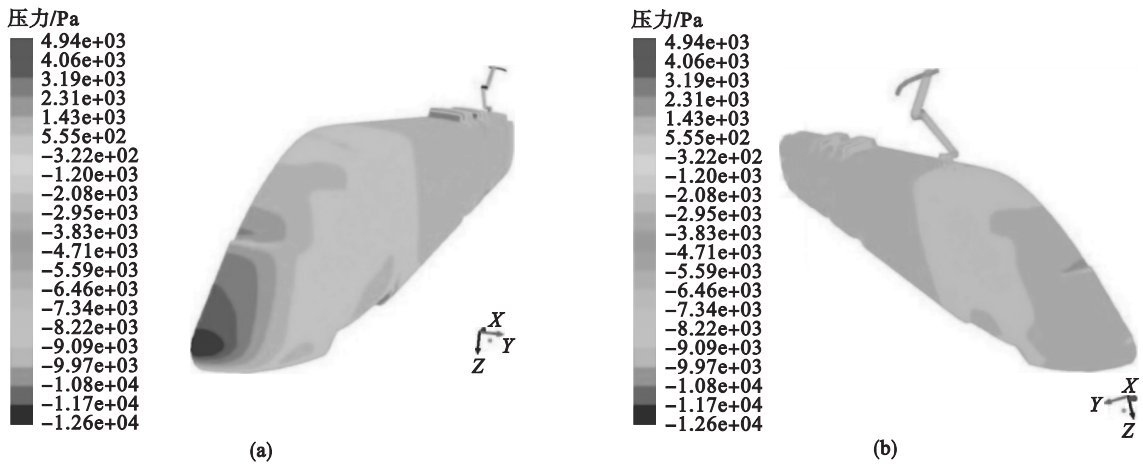


图 7 列车表面静压力云图  
Fig. 7 Static pressure of the train surface  
(a)—车头;(b)—车尾.

本文采用等效连续 A 计权声级对高速列车气动噪声进行评价. 图 8 对比分析了高速列车气动噪声信号的 1/3 倍频程 A 计权声压级的仿真和测试结果. 可以看出,高速列车气动噪声的频率范围较大,属于宽频带噪声<sup>[7-8]</sup>,验证了数值分析的结果.

在整个频率范围内(0 ~ 5 kHz),仿真结果和实验结果吻合度都较好,最大误差仅为 5%,如图 8a 中 2 kHz 处所示. 这是由于仿真模型在车门、车窗处做了简化处理,而实际结构会导致更为剧烈的湍流流动,增大气动噪声,因此仿真结果低于实验结果.

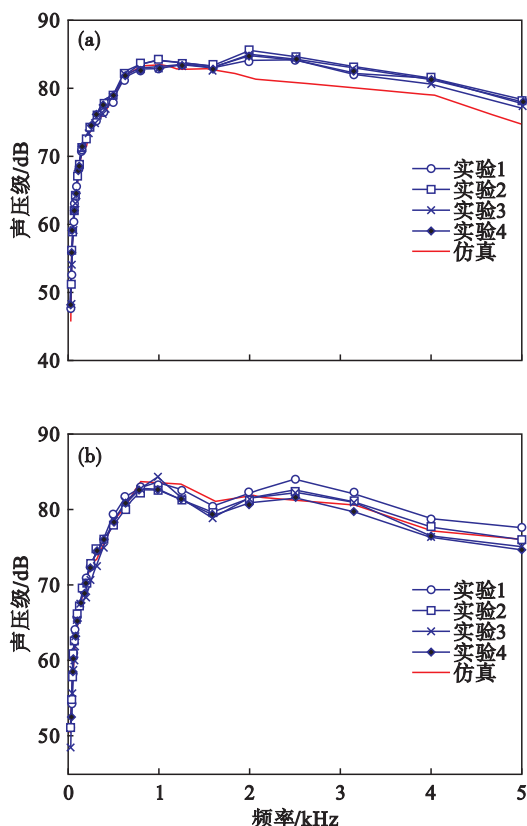


图 8 监测点处的气动噪声信号

Fig. 8 Aerodynamic noise signal obtained at the monitors

(a)—监测点 1; (b)—监测点 2.

通过对比分析确定了应用整车简化模型进行仿真研究的合理性和正确性,即缩短列车车身,不会改变列车表面声功率分布的基本规律. 综上分析可知,高速列车气动噪声的模拟仿真结果与在线实验结果基本一致,仿真模型正确、可靠.

## 4 结 论

1) 车身产生的气动噪声对总体噪声的影响小,合理地缩短列车模型不会改变列车车身表面声功率分布的基本规律.

2) 列车转向架处湍流最为剧烈,其次为车头鼻锥处;车身表面的气流最为平缓,进一步说明缩短列车模型的合理性.

3) 高速列车气动噪声没有明显的频率段,而是在较宽的频率范围内分布,属于宽频带噪声.

4) 在整个频率范围内(0 ~ 5 000 Hz),气动噪声的仿真与实验结果吻合较好,仿真模型正确、可靠.

5) 本文提出的仿真方法能够为高速列车的结构优化设计提供依据,并能验证高速列车气动噪声控制方法的有效性.

## 参考文献:

- [1] 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: 407–416.
- [2] 刘加利. 高速列车气动噪声的理论研究与数值模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.  
(Liu Jia-li. The theoretical research and numerical simulation of aerodynamic noise of high-speed train [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.)
- [3] Zhu J, Hu Z, Thompson D J. Analysis of aerodynamic and aeroacoustic behaviour of a simplified high-speed train bogie [C]//The 11th International Workshop on Railway Noise. Berlin: Springer, 2015: 489–496.
- [4] Yang W, Kim D, Park J, et al. Analysis on the aeroacoustic sound radiation from high-speed train using a simplified numerical model [C]//The 20th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2013. Bangkok, 2013: 397–399.
- [5] Lyu B, Dowling A P, Naqavi I. Prediction of installed jet noise[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 811: 234–268.
- [6] Ricco P, Baronb A, Molteni P. Nature of pressure waves induced by a high-speed train travelling through a tunnel[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95: 781–808.
- [7] 刘凤华, 李树民, 余以正. 采用声学比拟法计算高速列车气动噪声的研究[J]. 铁道技术监督, 2013, 41(11): 34–38.  
(Liu Feng-hua, Li Shu-min, Yu Yi-zheng. Study on the calculation of aerodynamic noise of high-speed train by acoustic analogy method[J]. *Railway Quality Control*, 2013, 41(11): 34–38.)
- [8] 张军, 黄艳艺, 兆文忠. 高速列车气动噪声数值仿真[J]. 大连交通大学学报, 2012, 33(4): 1–4.  
(Zhang Jun, Huang Yan-yi, Zhao Wen-zhong. Research on numerical simulation of aerodynamic noise for high-speed train [J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2012, 33(4): 1–4.)
- [9] Williams J E F, Hawkings D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1969, 264: 321–342.
- [10] Lighthill M J. On sound generated aerodynamically. part II: turbulence as a source of sound[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1954, 222: 1–32.
- [11] Lighthill M J. On sound generated aerodynamically: part I: general theory [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1952, 211: 564–587.
- [12] 姜世杰, 杨松, 吴丹, 等. 高速列车车头车外流场气动噪声的仿真与实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(8): 1137–1142.  
(Jiang Shi-jie, Yang Song, Wu Dan, et al. Simulating and experimental investigations on aerodynamic noise of high-speed train head [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2018, 39(8): 1137–1142.)
- [13] 郑拯宇. 高速车辆外部气动噪声场数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.  
(Zheng Zheng-yu. A study on the numerical simulation of high-speed vehicle's external aerodynamic acoustics field [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.)
- [14] Proudman I, Pearson J R A. Expansions at small Reynolds numbers for the flow past a sphere and a circular cylinder [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 2(3): 237–262.
- [15] Sarkar S, Erlebacher G, Hussaini M Y, et al. The analysis and modelling of dilatational terms in compressible turbulence [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 227(12): 473–493.