

DOI: 10.3969/j.issn.1000-4874.2010.05.012

## 高速列车气动噪声的计算研究\*

孙振旭<sup>1</sup>, 王一伟<sup>2</sup>, 安亦然<sup>1</sup>

(1. 北京大学工学院 北京大学湍流与复杂系统研究国家重点实验室, 北京 100871,  
Email:sunzhenxu@gmail.com;  
2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 通过对高速列车气动噪声产生的关键部位进行简化抽象, 对其产生的噪声进行了数值分析。该文着重讨论了两个主要的简化模型, 即二维后台阶问题以及三维圆柱绕流问题。对后台阶问题进行数值模拟时采用了 NLAS 和 LES 两种不同的方法, 并同实验值进行了比较。对三维圆柱绕流问题则直接采用 NLAS 方法耦合 FW-H 声音传播方程进行了数值模拟。以此对高速列车气动噪声的机理进行了分析, 并对适合于高速列车气动噪声计算的方法进行了选择。

**关键词:** 气动噪声; 计算气动声学; 非线性声学求解器; 大涡模拟

**中图分类号:** U260.16; U270.16

**文献标识符:** A

## Computational study on aerodynamic sound from high-speed trains

SUN Zhen-xu<sup>1</sup>, WANG Yi-wei<sup>2</sup>, AN Yi-ran<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Turbulence and Complex Systems, College of Engineering,  
Peking University, Beijing 100871, China;  
(2. Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Key components of high-speed trains generating aerodynamic sound were simplified and abstracted, and numerical simulations on two simplified models were performed, with a two-dimensional backward step model and a flow around a three-dimensional cylinder model included. For the former two kinds of numerical approaches-NLAS and LES-have been utilized and the numerical results were compared with experimental results. For the latter only the NLAS approach coupled with FW-H sound propagation equation was used for simulations. Based on these simulations the mechanism of the

\* 收稿日期: 2010-03-01(2010-06-24 修改稿)

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划课题基金资助项目(2009BAG1201)

作者简介: 孙振旭(1983—), 男, 山东高密人, 博士研究生.

通信作者: 安亦然, Email: anyr@pku.edu.cn

generation of aerodynamic sound from high-speed trains has been analyzed and suitable numerical approaches for high-speed train aerodynamic sound calculations have also been studied.

**Key words:** aerodynamic sound; computational aero-acoustics; Non-Linear Acoustic Solver (NLAS); Large Eddy Simulation (LES)

## 1 引言

按照国内外铁路噪声理论和实验的综合研究, 列车运行时产生的噪声主要由牵引噪声, 轮轨噪声和气动噪声<sup>[1]</sup>组成。气动噪声, 是指流体运动而产生的噪声, 是一个在近几十年来颇受关注的研究领域。以前的研究多集中于高马赫数流动, 射流、高超声速航天飞机等产生的气动噪声都是一些典型的研究对象。最近几年以来随着地面运输系统运输能力的提高, 高速火车运行速度得到了极大提高, 其最大运行速度已经超越了二战时期最快的飞机, 其机械噪声开始退居次要位置, 而气动力和气动噪声则变得越来越重要。这是因为机械声源散射的能量平均按列车速度的 3% 比率增长, 而气动噪声声源散射的能量则按列车速度的 5%~6% 比率增长。如何预测高速列车的气动噪声, 并进而确定噪声源和设法降低气动噪声将是一个非常现实而有意义的事情。

高速列车气动噪声按其产生机理的不同, 大致可以分为以下两种类型: 由气体流经结构部件表面产生的噪声和湍流脉动产生的噪声<sup>[2,3]</sup>。前者主要在受电弓、车厢连接处、转向架等部位产生, 后者则在车身表面、头车、尾车等部位产生。

当前对高速列车气动噪声的研究主要依赖于实验。随着声阵列理论和测试技术的发展, 多通道阵列式噪声数据采集分析系统开始被广泛用来确定噪声声源的分布及强度特性<sup>[4]</sup>。我国京津城际铁路段系选定现场测试点, 根据 ISO-3095-2005 规定的列车和线标准安装了该系统进行噪声测试<sup>[5]</sup>。这种实车测试通常耗时较长, 投入人力、物力较多, 且易受当地实际条件的制约而困难较大。与此相比, 数值模拟是比较简捷的方法。采用数值方法进行噪声预测, 其优点主要是可控性比较强, 计算周期较实测明显缩短, 且能够在各种条件下进行模拟, 许多在实测中不能实现的工况也能够使用数值计算进行预测, 这使得计算气动声学(CAA)越来越受到人们的关注。

对高速列车气动噪声的数值模拟也因采用的气动声学计算方法不同而有很大差别。当前计算气动声学主要存在以下两类研究方法: 第一类是直接模拟, 包括直接数值模拟(DNS), 大涡模拟(LES)或者雷诺平均方法(RANS), 用以计算瞬时噪声声源

分布以及噪声辐射。但因噪声模拟中的困难, 直接数值模拟和大涡模拟在实际工程应用中可操作性不强, 这是因为要得到准确的模拟结果, 这两者对网格的要求将会非常苛刻: DNS 要求的大致网格量是  $Re^{9/4}$ , 其最小网格尚需捕捉到高频声源的波长。实际工程中模型的几何外形往往比较复杂, 采用此类方法的难度更高, 进行准确的噪声模拟几乎是不现实的。而非定常 RANS 方法虽然降低了网格量要求, 但网格量的降低会使得对亚格子尺度上的声源捕捉不够完善。第二类是声学类比方法。Lighthill 首先开创了声学类比方法<sup>[6,7]</sup>, 并发展出一套完善的 Lighthill 方程。Curle 在刚性边界内求解了 Lighthill 方程<sup>[8]</sup>, Ffowcs-Williams 和 Hawkings 将 Curle 的解拓展到了运动边界<sup>[9]</sup>。FW-H 方法是一种表面积分方法, 由于无需体积分而更具诱惑力。表面积分方法中假定声音传播遵循简单的波动方程, 可以通过给定的围绕在非线性声源附近的控制面的表面积分来精确预测气动噪声。Casper 和 Farassat 对 FW-H 方程进行了细致研究, 并推导出了许多行之有效的公式<sup>[10,11]</sup>。这类方法在计算远场气动噪声时存在很大的优势, 即无需顾及远场区域的网格精度, 而是直接通过公式求积分即可求解远场噪声。

在高速列车气动噪声的研究中也存在近场气动噪声与远场气动噪声两类需求。这就要求数值模拟能够兼顾求取近场与远场气动噪声。网格需要显然制约了上述第一类方法的应用。高速列车气动噪声的数值模拟方法应该寻求新的方法。Paul Batten 提出的 NLAS 方法基于非线性考虑, 从 NS 方程出发推导出流体脉动量的 NLDE 方程。该方法对近壁面网格要求不高, 但能够计及亚格子尺度上噪声声源的影响, 可以在减少网格量的同时保持计算精度, 是一种比较理想的噪声计算方法<sup>[12,13]</sup>。

出于对列车气动噪声计算分析的要求, 本文对高速列车气动噪声产生的关键部位进行了抽象。以往的研究表明车厢连接处的气动噪声主要是由于声波和剪切边界层震荡的耦合而导致的自持震荡, 一定程度上可以用一个后台阶来近似, 且当列车在强侧风条件下背风侧亦可以近似为一个后台阶; 受电弓气动噪声主要是由受电弓的各种杆件引起的非稳态气流产生, 从杆件周期性脱落的涡对杆件产生了周期性作用力, 该作用力即可以产生偶极子噪声。因而受电弓引起的噪声机理分析可以从圆柱绕流的噪声分析开始。本文通过对后台阶问题和圆柱绕流远场噪声进行气动噪声数值模拟, 并同实验值

进行了对比, 以此验证 NLAS 方法在高速列车气动噪声计算中的可行性, 为以后求解实际工程问题建立了基础。

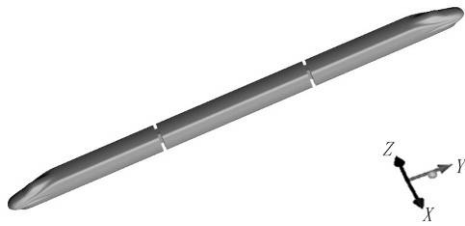


图 1 CRH2 型高速列车

## 2 物理模型及其简化

本文计划分析的模型原型主要包括两个, 即 CRH2 高速列车简化模型以及受电弓。其中 CRH2 型高速列车包括头车、尾车以及一个中间车厢, 如图 1 所示。受电弓则包括三个底座以及在其上的一系列圆柱状结构综合而成, 如图 2 所示。

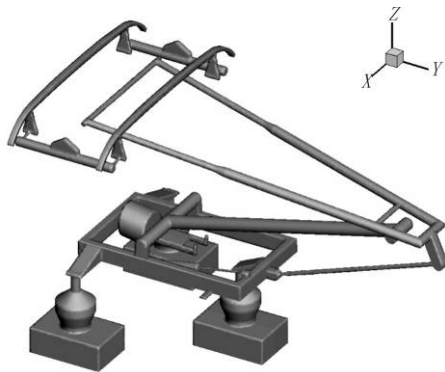


图 2 受电弓

高速列车气动噪声可以分为远场噪声和近场噪声两种情况, 对这两类气动噪声的数值模拟研究均需要消耗大量的计算时间和资源。因此, 为了能够概括出高速列车气动噪声的产生机理, 总结出一套合理的计算高速列车气动噪声的方法, 本文不失一般性, 对高速列车和受电弓都进行了不同程度的简化。在这种简化下, 模型可以容纳进一些高速列车的基本特性以及高速列车两类噪声的一般特性。

当高速列车受强横向风作用时, 列车顶部及下游地面之间形成一个类似于后台阶的结构, 无风环境下的高速列车行驶时, 车厢连接处亦可近似为一个后台阶模型。本文即采用后台阶模型进行近场噪声计算。高速列车受电弓可视为由一系列圆柱按照不同角度组合而成, 故将之简化为一圆柱模型并以此计算远场噪声。

## 3 计算方法

针对近场噪声和远场噪声, 本文分别采用了两种不同的方法: 对近场噪声, 直接通过 NLAS 非线性求解器求解近场噪声; 针对远场噪声, 利用表面积分方法, 通过设置噪声面围住噪声源, 用 NLAS 方法记录噪声面上的脉动数据随时间的变化, 进而通过 FW-H 方程将噪声面上的脉动数据传播至远场点求解噪声。这两种方法求解流程如图 3 所示。

### 3.1 NLAS 方法

由 Batten 提出的非线性声学求解器(NLAS)基本思想是: 由细小尺度的湍流运动造成的气动声源必须被建模求解。然而, 包含相干结构或者共振的流动需要求解这些大尺度结构相互影响的辐射噪声。

NLAS 是一个数值声学求解器, 被设计来模拟由初始的统计平均湍流造成的噪声的产生和传播。初始湍流统计平均解可以通过一个合适的 RANS 求解来获得。这个统计解提供了平均流场的基本特征, 也给出了强制设定的湍流脉动的统计描述。NLAS 在这些统计结果上重建噪声源并高精度模拟压力脉动的传播。非线性求解器可以在原来的 RANS 计算网格上模拟压力脉动的传播, 也可以在一个独立的噪声计算网格上插值噪声数据求解。

非线性求解器拥有低耗散特性, 能够在亚格子尺度上计算噪声的产生, 它主要基于如下思想: 通过统计模式获得的平均流场可以获得亚格子尺度的噪声源, 也可以通过平均流场计算扰动。NLAS 假定对 NS 方程添加一个扰动, 即假定 NS 方程中每一项表达为平均项与脉动项, 代入到 NS 方程中, 重新整理 NS 方程可以获得非线性的扰动方程 (NLDE):

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

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

$$\bar{F}_i^v = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\tau}_{ij} \\ -\bar{\theta}_i + \bar{u}_k \bar{\tau}_{ki} \end{bmatrix} \quad (2)$$

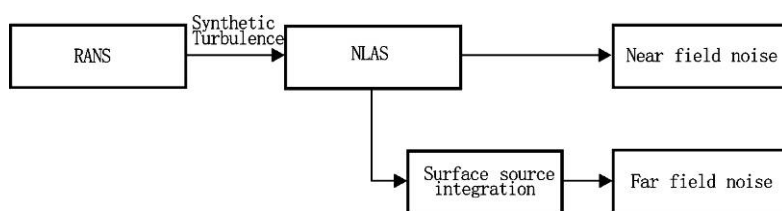


图 3 远场噪声及近场噪声求解流程图

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

$$(F_i^v)' = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau'_{ij} \\ -\theta'_i + u'_k \bar{\tau}_{ki} + \bar{u}_k \tau'_{ki} \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

$$\begin{bmatrix} \rho'u'_i \\ \bar{\rho}u'_i u'_j + \rho'u'_i \bar{u}_j + \rho'\bar{u}_i u'_j + \rho'u'_i u'_j \\ u'_i(e' + p') \end{bmatrix} \quad (4)$$

忽略压力脉动项并对上述方程取时间平均, 可得

$$\overline{LHS} = \overline{RHS} = \frac{\partial R_i}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$R_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\rho}u'_i u'_j \\ c_p \overline{\rho T' u'_i} + \bar{\rho}u'_i u'_k \bar{u}_k + \frac{1}{2} \overline{\bar{\rho} u'_k u'_k u'_i} + \overline{u'_k \tau'_{ki}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中  $R_i$  为标准雷诺应力张量和湍流热通量相关项。NLAS 的关键一步是要提前通过标准的 RANS 方法求得这些未知项, 而那些不能求解的小尺度量可以根据 RANS 结果重构出来, 并用来生成亚格子源项。当平均值和亚格子源项都准备好以后, 通过求解扰动方程就可以计算出随时间变化的扰动波的传输。

NLAS 提供了更加复杂的亚格子处理方式, 允许从亚格子结构中重构声源。NLAS 在计算时对近

壁面网格要求很低, 并避免了亚格子涡粘模式的耗散性, 因而在较稀疏的网格上, NLAS 的耗散性比 LES 更低。

### 3.2 FW-H 方法

在通过 NLAS 方法获得了噪声面上随时间变化的数据后, 可以利用这些数据求解 Ffowcs-Williams/Hawking 方程。利用这种方法可以求解任意观测点的噪声, 即使这些观测点并没有位于计算域内。Ffowcs-Williams/Hawking 方程的基本形式是

$$4\pi p'(x_i, t) = \iint \left[ \frac{\dot{Q}_j \hat{n}_j}{r(1-M_r)^2} + \frac{Q_j \hat{n}_j (r\dot{M}_r + c_\infty (M_r - M^2))}{r^2 |1-M_r|^3} \right]_{ret} ds + \iint \left[ \frac{\dot{L}_j \hat{r}_j}{c_\infty r (1-M_r)^2} + \frac{L_j \hat{r}_j - L_j M_r}{r^2 (1-M_r)^2} \right]_{ret} ds + \iint \left[ \frac{L_j \hat{r}_j (r\dot{M}_r \hat{r}_k + c_\infty (M_r \hat{r}_k - M^2))}{c_\infty r^2 |1-M_r|^3} \right]_{ret} ds + p'_Q \quad (7)$$

其中

$$Q_i = (\rho_\infty - \rho)v_i + \rho u_i$$

$$L_i = p \hat{n}_i + \rho u_i (u_j - v_j) n_j \quad (8)$$

### 3.3 RANS 计算

在采用 NLAS 求解噪声之前, 需要先进行稳态的 RANS 计算。RANS 计算主要是为了给后续噪声计算提供一个稳定的流场, 其中包含了湍流脉动的统计平均结果。为了更好地模拟该统计场, 在 RANS 计算中应该采用非线性的各向异性湍流模式。本文选取 cubic k-epsilon 模式<sup>[14]</sup>, 该模式通过矩阵方近

似了各个位置对涡粘系数的影响，更加符合物理本质。

### 4 数值模拟

#### 4.1 二维后台阶近场噪声计算

二维后台阶近场气动噪声计算可以用来给高速列车近场噪声计算提供参考，因为高速列车的车厢连接处流动以及强横风吹过列车侧面的流动，其简化模型都在一定程度上类似于后台阶流动。有关后台阶流动的实验有很多(如文献<sup>[15]</sup>)，从流场的成像到流场变量的测量均有细致描述。而本文后台阶噪声计算源于文献<sup>[16]</sup>的实验数据，计算条件亦与实验保持最大程度上相似。实验是由 Lee 和 Sung 在亚声速风洞中进行的。在实验中，后台阶展向长度是高度的 12.5 倍，这样可以忽略中心截面流场的三维效应，即在展向中心线位置的平面上的数据具有准二维特征，可以用二维计算来近似模拟。计算时，选取后台阶后缘中心线上几个测点进行压力脉动数据采集，并对此进行 FFT 分析，进而与实验数据以及 LES 等的数值计算结果进行了比较。比较时着重于各个测点的主频以及对应的最大声压级。

##### 4.1.1 几何模型及计算条件

后台阶高度为 0.05 m，上侧台阶长度为 1 m，以此确保在台阶位置的来流为湍流。台阶后缘长度为 2.5 m，实验进行时在台阶上侧存在高度为 0.15 m 的壁面，数值计算时计算域完全按照实验配置设定。

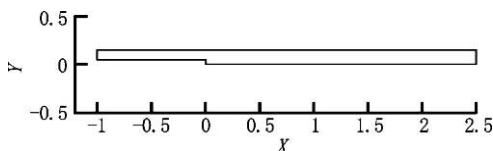


图 4 整体计算域

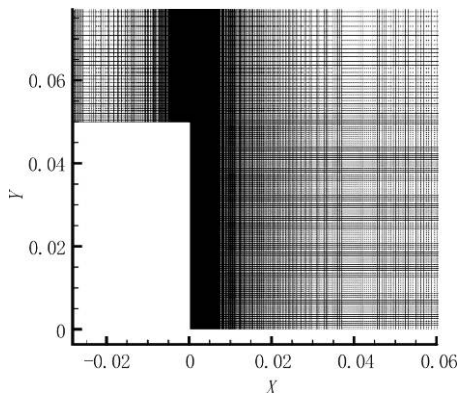


图 5 后台阶局部加密网格

图 4 所示为流场计算采用的几何图形。计算网格量约 14 万。为了捕捉流动在近壁面位置的细微

结构，在台阶处进行了局部加密，近壁面第一层网格宽度为 0.000 05 m，如图 5 所示。

计算时在入口段规定来流的速度为 9.83 m/s，湍流度为 0.006，湍流特征长度为 0.005 m。出口处采用压力出口条件。上壁面和整个台阶均采用无滑移壁面条件。来流密度为 1.225 kg/m<sup>3</sup>，来流温度为 296 K，粘性与温度满足 Sutherland 定律。以后台阶高度 H 定义的雷诺数  $Re=33000$ 。实验时测点采样时间间隔为 0.000 512 s，在气动噪声计算时取时间间隔为 0.0005 s。在每个时间步内最大迭代次数为 4 次。模拟流动的物理时间总长约为 3.75 s。

##### 4.1.2 后台阶计算结果及分析

通过对测点压力脉动数据的研究可以发现，在最初的一段时间内，压力脉动从零开始慢慢展开，不具有周期性，而在该段时间之后压力脉动呈现出一定的周期特性并一直保持下去，而这正是我们需要的压力脉动数据，也是噪声传播对应的数据。同样的情形也出现在大涡模拟 (LES) 中。为了防止起始时间的不规则压力脉动影响噪声求解，一般的做法是将该起始段的压力脉动截掉，只保存之后的脉动数据。

为了与实验值保持一致，本文取声压级表达式中基准压为  $\rho^2 \cdot U^3 \cdot H$ 。图 6~图 11 分别给出五个测点的声压频率曲线以及实验值。

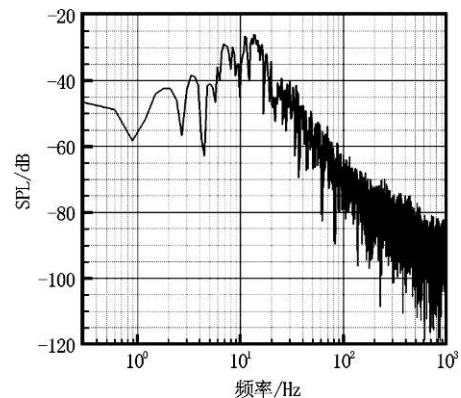


图 6 x/H=2

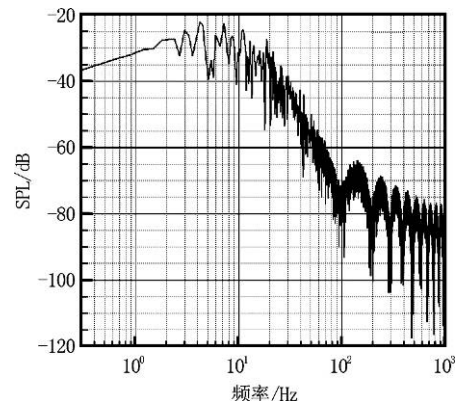
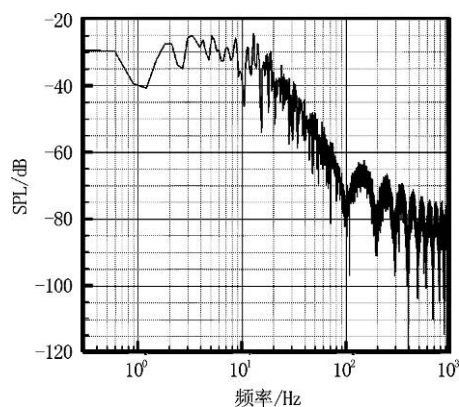
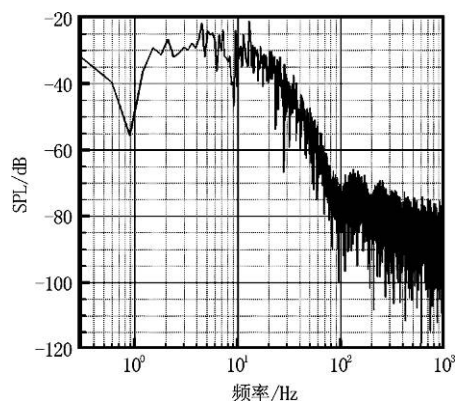
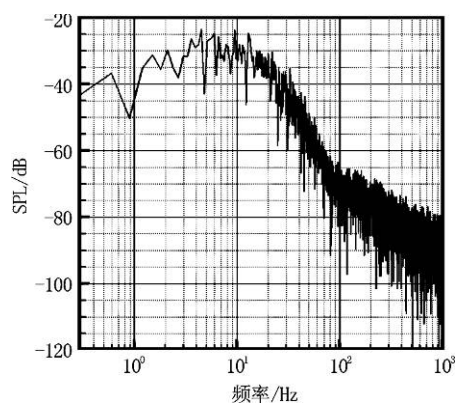


图 7 x/H=4

图 8  $x/H=6$ 图 9  $x/H=8$ 图 10  $x/H=10$ 

将不同位置的数值结果与实验结果中的最高声压级列于同一个表格中, 同时将 LES 计算结果也列在一起, 其中 LES 计算是由 FLUENT 软件在同样网格同样时间步长下进行的, 如表 1 所示。

将不同位置的数值结果与实验结果中的主频列于同一个表格中, 同时将其他数值计算结果也列在一起, 如表 2 所示。

后台阶气动噪声属于宽频噪声, 频率分布于 5~500 Hz 之间。本文预测的宽频范围与实验值有所区别, 主要体现在较低频率与较高频率上, 这主要受计算时所用的时间步长与总的计算时间的限制。

但是在气动噪声预测中最重要的特征是主频位置及其对应的最高声压级。在本文气动噪声计算中, 由于采用的最小时间间隔  $T$  为 0.0005 s, 因而计算结果中可以分辨的最大频率为

$$f_{\max} = \frac{1}{2T} = 10^3 \text{ Hz}$$

这是按照内奎斯特最大采样频率获得的。一个周期内采样频率至少为 2。如果采样频率稍微大点的话可以获得更加准确的频谱。这说明, 频率位于  $f_{\max}/2$  以内的声压级结果更具有可信性。同理, 可以按照计算时间总长度获得可以分辨的最小频率 (对应最大周期)。通过图 6~图 10 中 5 个测点的数值计算数据和图 10 实验数据比较可以发现, 本文计算的主频位置与实验值符合得比较好, 只有在位置  $x/H=10$  处主频位置相差较大。在最大声压级强度比较上可以发现, NLAS 计算可以精确地计算出最大声压级, 5 个测点中除了测点  $x/H=4$  之外都基本与实验值完美符合。然而 LES 的模拟结果与实验值有较大差别, 虽然在实验主频位置处也有波峰出现, 但是计算主频和最大声压级却出现在其他地方。

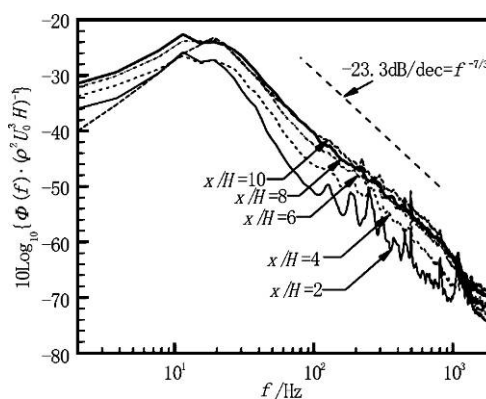


图 11 实验数据

后台阶气动噪声主要是由于台阶后部产生的涡脱落及涡与边界层的相互作用形成。从后台阶脱落的涡进入流动再附区后, 因为流动减速并迅速地变形, 由此产生的气动噪声主频较低, 而在台阶后距离台阶面较远流动区域, 因为壁面边界层变厚而导致当地的气动噪声主频也较低。如图 12 和图 13 所示, 涡量值最强位置出现在  $x/H=2\sim6$  之间, 在这几个位置应该有比较高的气动噪声。以上结果表明, NLAS 能够在近场区非常精确地捕捉到最大声压级及相应主频, 其计算结果是比较可信的。

#### 4.2 三维圆柱绕流远场噪声计算

圆柱绕流作为钝体绕流的一种基本形态, 在气动噪声机理上也与高速列车中某些关键部位的气动噪声非常相似。例如列车受电弓在列车运行时就

表1 最高声压级比较 (单位: dB)

数据来源	x/H=2	x/H=4	x/H=6	x/H=8	x/H=10
实验值	-26	-27	-24.2	-22.6	-24
NLAS	-26	-23	-24.35	-21.7	-23.2
LES	-26.27	-25.2	-23.04	-18.6	-19.54

表2 主频位置比较 (单位: Hz)

数据来源	x/H=2	x/H=4	x/H=6	x/H=8	x/H=10
实验值	11.5	10.5	18	12	18
NLAS	14	7.1	13	13	9.1
LES	13.9	14.5	28.5	28.5	43

是一种圆柱绕流, 而列车车尾的尾涡与圆柱绕流的尾涡也比较接近。作为气动噪声声源, 除了一般的在圆柱表面的压力脉动外, 还包括尾流中绕钝体脱落的涡。因而, 对圆柱绕流远场噪声的研究将有助于帮助掌握高速列车气动噪声的机理。文献[17]采用大涡模拟耦合 FW-H 方程的方法对三维圆柱绕流进行了系统研究。本节数值模拟源于日本的 Mitsui Miike Machinery Co. LTD 公司做的圆柱绕流实验<sup>[18]</sup>。该实验在一静风洞中进行, 背景噪声低于 55dB(A)。实验主要考察细长圆柱在来流方向不同偏角下的气动噪声的变化。风洞开口端截面大小为 0.3 m×0.3 m, 在来流速度为 40 m/s 时的湍流度低于 0.2%。为了减小开口端面与圆柱之间大尺度湍动造成的干扰, 实验时在开口端上下增加了两个壁面。实验时固定圆柱下端面, 上端面则在来流向移动以形成不同的偏角。在整个实验中圆柱可以采用不同直径 10 mm、20 mm 和 30 mm, 以此可以考察圆柱长细比对远场噪声的影响。远场测点位于圆柱中心平行朝外 1 m 位置, 通过记录该位置的压力脉动来测量气动噪声。实验装置如图 12 所示。本节所做模拟取原实验中的一个工况, 即圆柱攻角为 0, 圆柱直径为 0.02 m。

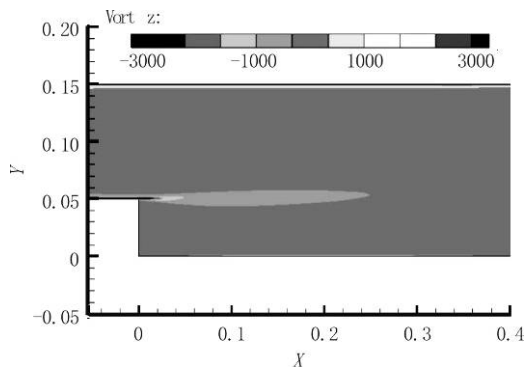


图 12 涡量云图

#### 4.2.1 几何模型及计算条件

计算域如图 15 所示。圆柱直径  $d=20$  mm, 高  $h=0.3$  m, 计算时取圆柱下游计算域长度为圆柱直径的 40 倍, 以减小出口条件对圆柱近壁面的扰动。

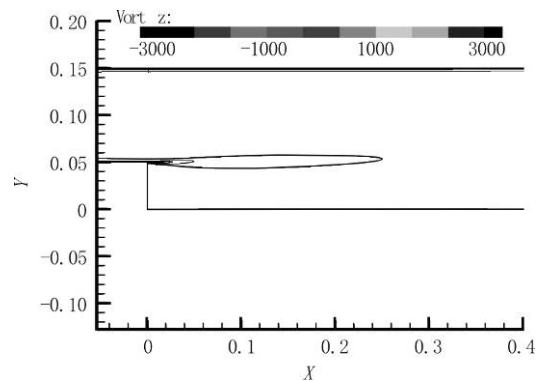


图 13 涡量等值线图

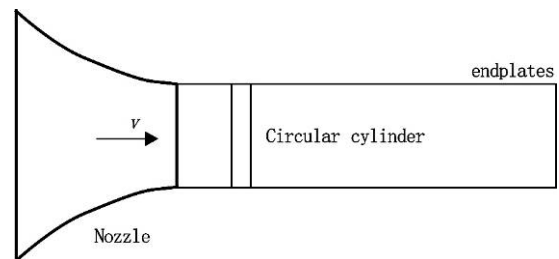


图 14 实验装置

同时如图 14 所示, 在圆柱壁面附近进行了局部加密。选定圆柱的偏角为零, 即圆柱轴向与来流方向垂直。来流速度为 34.6 m/s, 温度为 293.15 K, 环境压力为 1 atm。在来流入口固定来流速度和温度, 来流湍流度设为 0.15%。出口端为自由出流, 限定压强为 1 atm。上下壁面和圆柱壁面为无滑移壁面。在两个侧面则采用特征线条件。远场测点位于圆柱中心平行朝外 1 m 位置, 该测点在进行气动噪声求解时可以自由设定, 不必位于计算域之内。

#### 4.2.2 圆柱绕流计算结果及分析

在远场  $y=1$  m 位置测点计算得到的声压频率曲线如图 17 所示。从图 17 可以看出, 计算所得的最大声压级为 80.19 dB, 而与该声压级对应的主频为 253.7 Hz。实验中最大声压级为 81.6 dB, 主频约为 334 Hz。因此计算所得的最大声压级跟实验值接近, 而主频与实验值有较大差距(约为 80 Hz)。分析圆柱所受  $x$  向阻力可以发现, 圆柱阻力的震荡频

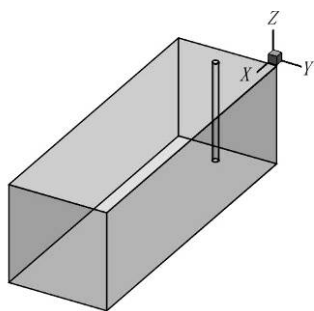
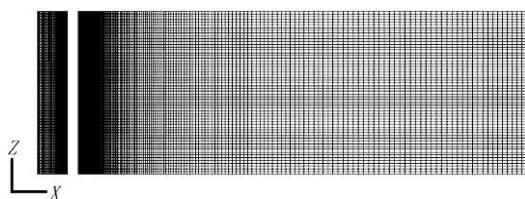
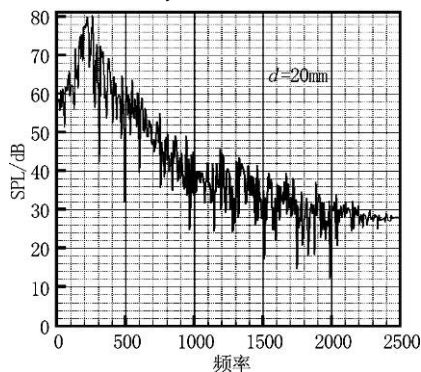


图 15 计算圆柱域

图 16  $y=0$  截面网格图 17  $y=1$  m 处声压频谱图

率与计算所得主频非常接近(该主频对应于圆柱的尾涡脱落频率), 由该主频求得的斯托哈尔数(Str)约为0.145左右, 与本节工况下雷诺数对应的斯托哈尔数(0.18)有较大差别。然而, 因为工程应用中比较注重最大声压级的影响, 故该结果仍然可以给实际工程应用作参考。

## 5 结论

本文对高速列车气动噪声产生的关键部位进行了简化抽象: 车厢连接处及列车强侧风工况可以简化为后台阶问题, 而受电弓是高速列车气动噪声的一个主要来源, 其暴露部件以圆柱作代表来进行绕流远场噪声计算。为此选用 NLAS 方法对二维后台阶和三维圆柱绕流问题进行了气动噪声的近场和远场计算, 并分别同实验测试值进行了对比, 肯定了 NLAS 方法可以作为几何复杂车辆的噪声计算的基本方法。两个典型问题的气动噪声计算研究结

果可以为列车布局设计时估算气动噪声强度提供参考。

本文按 NLAS 方法对雷诺统计平均结果进行重构, 求得亚格子尺度上的噪声声源。计算实践表明, NLAS 能够比较精确地预测远场噪声以及近场噪声的最大声压级, 而且在近场区域内可以较好地模拟出主频位置; 通过与 FW-H 方程联合求解, 可以求解出远场噪声, 但在预测远场噪声主频上略有不足。通过与大涡模拟的计算结果比较可以发现, NLAS 在最大声压级的预测中保持了更高的精度。以上结论表明这一噪声分析方法将有比较广泛的应用价值。

## 参 考 文 献:

- [1] TALOTTE C, GAUTIER P E, THOMPSON D J, et al. Identification, modeling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 267(2): 447-468.
- [2] TALOTTE C. Aerodynamic noise: a critical survey[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 231(3): 549-562.
- [3] NAGAKURA K. Localization of aerodynamic noise sources of shinkansen trains[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293(3): 547-556.
- [4] BARSIKOW B. Experiences with various configurations of microphone arrays used to locate sound sources on railway trains operated by the DBAG[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 193(1): 283-293.
- [5] 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.  
ZHANG Shu-guang. Noise mechanism, sound source localization and noise control of 350 km/h high-speed train[J]. *China Railway Science*, 2009, 30(1): 86-90.
- [6] LIGHTHILL M J. On sound generated aerodynamically. I. general theory[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1952, 211(1107): 564-587.
- [7] LIGHTHILL M J. On sound generated aerodynamically. II. Turbulence as a source of sound[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1954, 222(1148): 1-32.
- [8] CURLE N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1955, 231(1187): 505-525.
- [9] WILLIAMS J E F, HAWKINGS D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[J].



- Philosophical Transactions for the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1969, 264(1151): 321-342.
- [10] CASPER J, FARASSAT F. A new time domain formulation for broadband noise predictions[J]. International Journal of Aeroacoustics, 2002, 1(3): 207-240.
- [11] CASPER J, FARASSAT F. Broadband noise predictions based on a new aeroacoustic formulation [R]. 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2002.
- [12] BATTEN P, GOLDBERG U, CHAKRAVARTHY S. Reconstructed sub-grid methods for acoustics predictions at all Reynolds numbers[R]. 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit, 2002.
- [13] BATTEN P, RIBALDONE E, CASELLA M, et al. Towards a generalized non-linear acoustics solver[R]. 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conferences, 2004.
- [14] MERCI B, VIERENDEELS J, LANGHE C D, et al. Development and application of a new cubic low-Reynolds eddy-viscosity turbulence model[R]. 31st AIAA Fluid Dynamics Conference & Exhibit, 2001.
- [15] KE Feng, LIU Ying-zheng, CHEN Han-ping, et al. Simultaneous flow visualization and wall-pressure measurement of the turbulent separated and reattaching flow over a backward-facing step[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2007, 19(2): 180-187
- [16] LEE I, SUNG H J. Characteristics of wall pressure fluctuations in separated and reattaching flows over a backward-facing step: Part 1. Time-mean statistics and cross-spectral analyses[J]. Experiments in Fluids, 2001, 30(3): 262-272.
- [17] 唐科范, Frank J. 用解NS方程和FW-H积分的混合方法计算圆柱绕流噪声[J]. 水动力学研究与进展, A辑, 2009, 24(2): 190-199.  
TANG Ke-fan, FRANKE J. Numerical simulation of noise induced by flow around cylinder using the hybrid method with the solutions of NS equation and FW-H integration[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2009, 24(2): 190-199.
- [18] HARAMOTO Y, YSUDA S, MATSUZAKI K, et al. Effect of aspect ratio on aerodynamic sound generated from inclined circular cylinder[R]. 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2001.