DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.007

高速列车转向架区域远场气动噪声计算方法探究

张洪军[1]，王钟辉[2]，徐育敏[3]，高　阳[1]，王毅刚[4,5]，朱朗贤[4,5]
（1.中车长春轨道客车股份有限公司，吉林 长春 130062；
2.中国铁路沈阳局集团有限公司 物资部，辽宁 沈阳 110001；
3.中国铁路上海局集团有限公司 机务部，上海 200071；
4.同济大学 上海地面交通工具风洞中心，上海 201804；
5.上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室，上海 201804）

摘　要：快速计算高速列车转向架区域远场辐射噪声是一个难点问题。首先，文章根据高速列车气动噪声以偶极子声源为主的特征，假设车辆表面声源由无数个偶极子声源组成，建立识别方法，并结合流体仿真计算对转向架区域进行声源识别。研究表明，转向架区域的主要偶极子气动声源分布在排障器、前轮等11个部件的近壁面上。其次，建立每个部件声源强度及其远场噪声计算方法，利用3个不同车速下的仿真计算结果拟合出每个部件的远场声压级与频率、车速、特征尺寸、传播距离的关系式，并对11个部件远场辐射噪声求和，得到转向架区域远场噪声计算的经验公式。结果表明，该拟合公式有一定的准确性，可快速推算该类高速列车不同缩比尺寸模型的转向架区域远场气动噪声。该方法可供其他车辆气动噪声辐射计算方法参考。

关键词：高速列车；转向架；偶极子声源；数值仿真；风洞试验

中图分类号：U292.91+4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2024)03-0053-08

0　引言

高速列车气动噪声源众多，转向架、受电弓和风挡等区域气动噪声极为强烈。从认识和控制的角度出发，能独立获取每个噪声源信息具有重要价值。然而，试验和仿真计算手段均难以实现快速、简捷和低成本的信息获取，也就难以适应实际工程的需求。本文聚焦头车转向架区域，探索气动噪声远场辐射的简捷计算方法，为快速获取噪声信息提供借鉴。

高速列车气动噪声源向远场的声辐射信息可以通过实车测试、风洞试验和计算气动声学方法等手段获取。自上世纪90年代以来，德、法、日等国采用车体上安装传声器、轨道侧安装声源识别阵列的方法[1-3]，实车测量高速列车行驶时产生的噪声，对气动噪声有一定的认识，但其缺陷是气动噪声和轮轨噪声无法分离，难以真实获取所需噪声特征。风洞试验作为获取高速列车气动噪声的有效测量手段，得到了广泛应用。在早期，德、日等高速列车发展较早的国家利用“气动–声学”风洞以及各种测量技术，对不同缩比尺寸的高速列车模型、部件模型开展了大量的试验研究[4-5]；在2009年，我国第一个汽车整车“气动–声学”风洞建成，后续也用于我国高速列车模型的气动噪声研究[6]。风洞试验面临的显著问题包括：一是模型测试结果的准确度，难以获取真实的实车结果；二是难以准确获取独立声源的特性。近年，计算气动声学在高速列车气动噪声预测中发挥了重要的作用，在一定程度上能获取更多的噪声信息[7-11]。基于FW-H方程可以获取远场声辐射信息，但近场、绕流场和传播的声信息难以准确获取。同时，由于计算资源的限制，仿真计算也多以

基金项目：国家自然科学基金项目（52002283）
通信作者：张洪军，高级工程师，从事轨道车辆可靠性与舒适性研究；E-mail: 013200020808@crrcgc.cc
引用格式：张洪军, 王钟辉, 徐育敏, 等. 高速列车转向架区域远场气动噪声计算方法探究[J]. 机车电传动, 2024(3): 53-60.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.007.
Citation：ZHANG Hongjun, WANG Zhonghui, XU Yumin, et al. Exploration of computational method for far-field aerodynamic noise from bogie zone of high-speed train[J]. Electric drive for locomotives,2024(3): 53-60.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.007.

小比例模型为对象，计算时间和准确度也随之受影响。

上述各种研究方法均难以获取大尺寸模型或全尺寸实车气动噪声特性，也难以准确获取独立部件气动噪声特性，而且获取相关噪声信息花费时间长、成本高。为此，本文根据高速列车高速行驶时其主要气动噪声源呈现以偶极子声源为主的特征，聚焦头车转向架区域，结合数值仿真方法，建立偶极子气动声源识别方法，对识别出的转向架区域主要噪声源进行等效，建立远场辐射噪声计算拟合公式，以此探索简便、快速的气动噪声源远场声辐射计算方法，也为其他噪声源声辐射计算提供借鉴。

1 偶极子气动声源识别方法

当高速列车高速行驶时，其外壁面上流体存在偶极子气动声源，空间湍流区域存在四极子气动声源。假设这些气动声源由无数个微小声源组成，每一个微小声源为球形，列车壁面上的每个偶极子声源对应 1 个力点源，则该力点源的声压波动方程为[12-13]

$$\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}-\nabla^2 p=-\nabla f \tag{1}$$

式中：p 为声压；c_0 为声速；t 为时间；f 为单位体积脉动力。

由文献[12]可知，描述偶极子声源的涡声方程为

$$\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}-\nabla^2 p=\rho\nabla(\omega\times u) \tag{2}$$

将式(2)和式(1)对比，可得

$$f=-\rho(\omega\times u) \tag{3}$$

式中：ω 为涡量；u 为速度。

对方程(1)进行求解，可得偶极子声源辐射的声压为

$$p(x,t)=-\frac{1}{4\pi|x-y|}\frac{\partial f(y,t-\frac{|x-y|}{c_0})}{\partial y} \tag{4}$$

式中：x,y 分别为观测点和声源的位置坐标。

对于具有宽频辐射特性的声源，式(4)可改写为

$$p(x,t)=-\frac{1}{4\pi}\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{f(y,t-\frac{|x-y|}{c_0})}{|x-y|}\right] \tag{5}$$

对式(5)进行链式求导，可以获得单个偶极子声源辐射声压为

$$p(x,t)=\frac{1}{4\pi r}\left[\frac{\partial f\left(y,t-\frac{r}{c_0}\right)}{\partial t}+\frac{f\left(y,t-\frac{r}{c_0}\right)}{r}\right] \tag{6}$$

式中：r 为观测点到声源的距离。

显然，随着距离 r 的增加，式(6)右端第 2 项快速衰减，当 r 成为声学上的远场距离时，式(6)右端第 2 项趋向于 0。这样，偶极子声源的远场辐射能力可由式(7)表示。

$$p(x,t)=\frac{1}{4\pi r}\frac{\partial f\left(y,t-\frac{r}{c_0}\right)}{\partial t} \tag{7}$$

根据式(3)，式(7)可变换为

$$p(x,t)=\frac{1}{4\pi r}\left[\frac{1}{c_0}\frac{\partial(\omega\times u)}{\partial t}\right] \tag{8}$$

式(8)给出了偶极子气动声源辐射声压的另一种表达式。当 r 趋向于声源半径时，就得到了反应偶极子声源辐射声压的能力。该式反映了每个偶极子声源强度与流场中每个微元物理量 $(\omega\times u)$ 的关系，由此建立识别高速列车偶极子气动声源的方法。

2 列车模型仿真计算及其验证

本研究建立的高速列车偶极子声源识别方法和转向架区域远场辐射噪声计算方法，均基于计算气动声学方法对高速列车进行数值模拟。本研究采用高速列车 1:8 的 3 车编组模型[13]，并使用文献[13]风洞试验结果和本文仿真计算结果进行对比验证数值仿真计算结果的可靠性。

2.1 数值计算

数值计算的目的一是为利用式(8)进行声源识别计算提供流场数据；二是与通过风洞试验获得的模型结果进行对比，验证数值计算方法的可靠性；三是计算转向架区域远场辐射噪声，为后续经验公式的形成提供数据。数值计算采用了与文献[13]相同的列车模型和计算方法。为获得转向架区域远场辐射噪声结果，需要更多的非定常数据结果，因此仿真计算过程与文献[13]有一定的不同。

数值仿真模型和风洞试验模型完全相同。模型外形尺寸为 9.50 m（长）×0.42 m（宽）×0.50 mm（高）；计算域尺寸为 29.00 m（长）×5.50 m（宽）×4.95 m（高）；头车鼻尖距离入口边界 6.50 m，尾车鼻尖距离出口边界 13.00 m，如图 1 所示。为保证有足够的计算精度，将头车前段和所有转向架的面网格设置为 2 mm，其余部分为了节省计算资源，面网格大小设置为 5 mm；体网格类型为切割体网格，体网格最大值设置为 48 mm，并设置 2 个体网格加密区。其中，头车加密区的体网格大小为 2 mm，另一加密区的体网格大小为 12 mm。列车表面和轨道表面的边界层设置为 10 层，边界层增长率为 1.2，边界层总厚度为 0.33 mm。为了兼顾计算精度和计算速度，第一部分地面的边界层设置与车身表面相同，其余地面边界层设置为 3 层，增长率为 1.5，厚度同样为 0.33 mm。整车面网格数约为 350 万，体网格数约为 1.7 亿。远场噪声测点布置与风洞试

验相同。流场入口边界条件为速度入口，来流速度为250 km/h，出口边界条件为压力出口，静压为1个大气压。列车和地面为无滑移网格壁面，计算域的顶面和侧面设置为对称性边界条件。

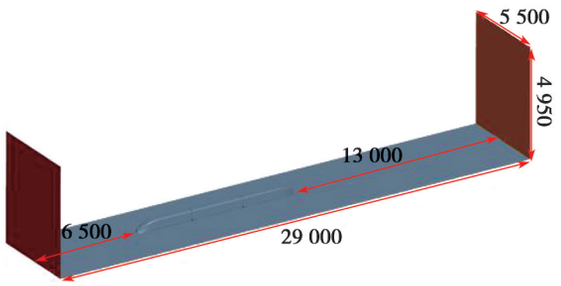


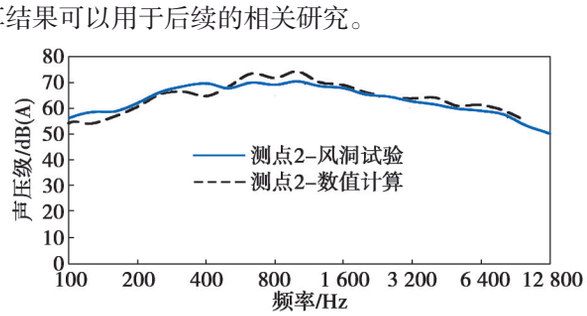
图1　高速列车仿真计算模型及计算域

Fig. 1　Simulation model and computational domain of high-speed train

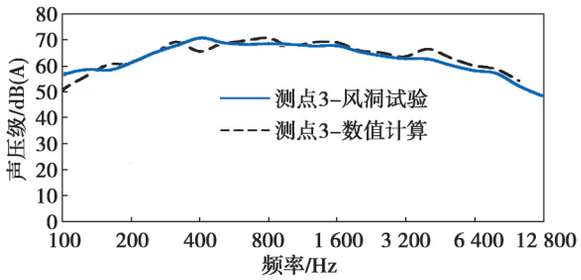
计算采用仿真软件STAR-CCM+，湍流模型选用LES模型，亚格子尺度模型选用WALE Subgrid Scale。首先，用K-Omega模型进行流场定常计算，其结果作为非定常计算的初始条件；其次，进行大时间步长的非定常计算，时间步长为5×10^{-4} s，共有1 000时间步；最后，进行小时间步长的非定常仿真计算，时间步长为5×10^{-5} s，在2 000时间步后，流场稳定，这时开始采用FW-H方程计算远场噪声数据，共采集2 000个时间步的数据，计算过程中其他流场数据在进行存储。为了保证计算的准确性，对网格无关性进行了计算分析。分别开展了3 800万、4 000万、4 500万、7 000万网格量的远场噪声计算，计算结果与风洞试验测量结果差值分别为2.3 dB(A)、2.7 dB(A)、1.1 dB(A)、0.9 dB(A)。由此可以看出，当网格量为4 500万时，计算结果已具有一定可接受的精度；当网格量为7 000万时，精度进一步提高，此时网格具备了独立性。为了确保整个声源识别区域的网格大小一致，将该区域的网格加密成相同的大小，使得网格增加到1.7亿，这样的网格总量会使计算结果更好。

2.2　仿真与试验结果对比

图2为文献[13]中测点2和测点3分别在风洞试验和数值仿真计算的1/3倍频程声压级频谱对比，以此判断仿真计算的可靠性。由图2可知，在整个频段内试验和仿真计算结果的偏差小于3 dB(A)，一致性较好，这表明计算结果具有一定的可靠性，其非定常流动的计算结果可以用于后续的相关研究。



(a) 测点2



(b) 测点3

图2　测点2和测点3声压级对比(风洞试验和仿真计算)

Fig. 2　Comparison of sound pressure level between wind tunnel experiment and simulations at No. 2 and No. 3 measuring points

2.3　转向架区域远场气动噪声辐射计算方法

为了构造转向架区域远场气动噪声计算公式，研究对象为头车转向架区域，需要提供转向架区域相关参数作为气动声源向远场辐射的噪声数据，包括每个测点的大小、频谱等。为此设计了如图3所示的噪声测点。以转向架2个轮轴几何中心为球心，测点布置在半径为7.5 m的球面上（与风洞试验的几个测点对应）。在球面的同一水平截圆上，“测点–截圆圆心”连线与列车前进方向的夹角在0°~180°内每10°布置1个测点。在每个截圆上，“测点–球心”连线与水平面的夹角依次在0°~50°内以5°递增，共计298个测点。采用可穿透声源面法，计算域如图4所示，外形尺寸为1 540 mm（长）×570 mm（宽）×180 mm（高）的长方体，底面和地面重合，内部包含了排障器、转向架、转向架舱以及少部分其余的车身表面。

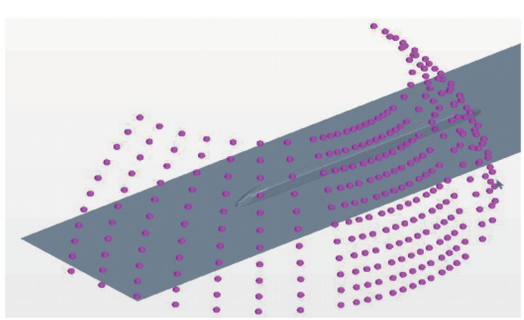


图3　远场噪声测点布置

Fig. 3　Layout of far-field noise measuring points

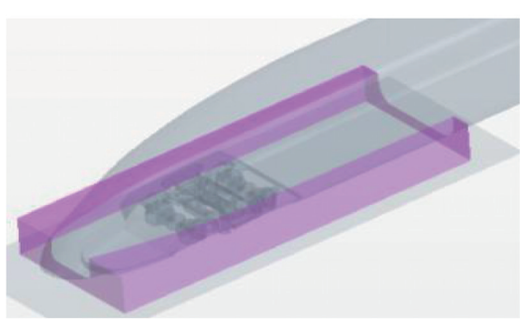
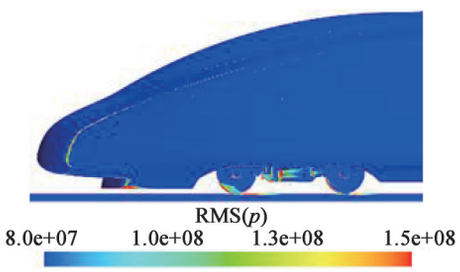


图4　转向架区域计算域

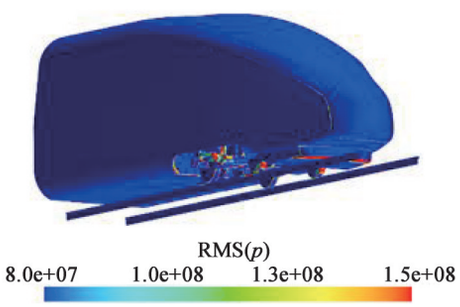
Fig. 4　Computational domain of bogie zone

3 头车及转向架区域气动噪声源特征

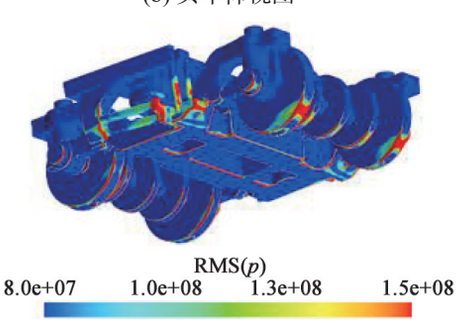
利用上述仿真计算可以获得列车固体表面上所有微元点关于式(8)所需的物理量，并根据式(8)进行计算，利用图形显示方式就能得到描述列车表面的声源强度和特征。图 5 为转向架区域不同部件表面分布的偶极子声源状况。从图 5 可清晰看出，列车车身大面积平顺，表面偶极子声源较小，只在型线上有较明显的声源分布，但相比列车下部声源，其量值小，可以忽略。



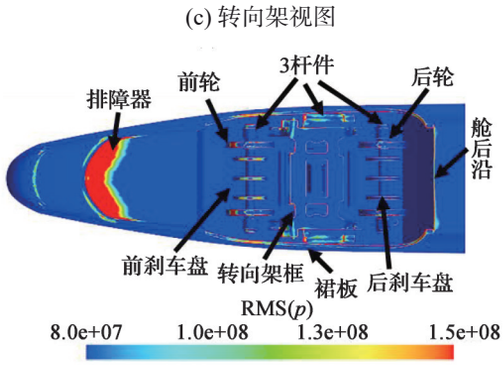
(a) 垂直于车长方向视图



(b) 头车仰视图



(c) 转向架视图



(d) 头车底面视图

图 5 近头车表面的偶极子声源分布

Fig. 5 Distribution of dipole sound sources near the surface of the lead coach

由图 5 可知，偶极子声源主要出现在排障器前沿、前后车轮下方边沿[见图 5(a)和图 5(c)]、轮轴两端迎风棱边、流体与转向架撞击的棱边位置，尤其是两侧被气流冲击的杆件、转向架舱后沿、两侧裙板下边沿[见图 5(b)~图 5(d)]、车轮与轮轨相接触位置[见图 5(a)]。进一步分析可以看出，气流的直接撞击和分离现象是这些部位的主要流动特征，也是产生偶极子声源的主要原因。量值大的偶极子源主要分布在排障器、前轮、后轮、前刹车盘、后刹车盘、转向架框架、突出杆件（3 个）、裙板、转向架舱后沿等 11 个声源部件。因此，转向架区域的噪声就是由这些噪声源决定的，后续将以此为依据构造转向架区域的气动噪声计算公式。

4 转向架区域远场气动噪声拟合公式

4.1 拟合公式形成方法

式(8)能计算单一偶极子声源向远场辐射时的声压，结合仿真计算，将每一个网格作为 1 个声源微元，对每一个主要声源部件上的所有声源微元的声压求方均根值，再乘以声源面积即为该部件的总声源强度。对于远场而言，将该部件近似为紧致声源，可求得远场辐射声压，再对其他所有声源部件按照同样方法处理，最后计算所有声源部件的远场辐射声压和，即为转向架区域的远场总声压。为了进行拟合，并考虑计算量大的情况，仿真计算针对上述 1:8 模型选取的车速为 250 km/h、300 km/h、350 km/h、275 km/h，其中前 3 个车速下的仿真结果用于拟合计算，最后 1 个车速用于对拟合结果的验证。在 0.60 ~ 0.75 s 内对每一个网格计算 $\frac{\partial(\omega\times u)}{\partial t}$，考虑到同一个部件上每个网格的声源强度分布不均匀，采用求其方均根值 $\tilde{p}\left(x,f_i\right)=\frac{1}{4\pi r}\frac{1}{c}\tilde{p}_{\mathrm{rms}}\left(\frac{\partial(\omega\times u)}{\partial t},f_i\right)$ 来表征该部件的声源强度，再对其时间序列进行傅里叶变换，得到频域下的幅值 $\tilde{p}\left(x,f_i\right)=\frac{1}{4\pi r}\frac{1}{c_0}\tilde{p}_{\mathrm{rms}}\left(\frac{\partial(\omega\times u)}{\partial t},f_i\right)$，则频域下的单位体积声源的远场声压为

$$\tilde{p}\left(x,f_i\right)=\frac{1}{4\pi r}\frac{1}{c_0}\tilde{p}_{\mathrm{rms}}\left(\frac{\partial(\omega\times u)}{\partial t},f_i\right) \tag{9}$$

对于转向架区域远场辐射的噪声频谱，其曲线有一定的波动，在进行曲线拟合时难以拟合这种波动。本研究采用取倍频程带宽内声压级平均值（带宽有重叠），作为其中心频率对应的声压级，对频谱曲线进行光滑处理，因此本文拟合方法反映了噪声源的频谱趋势，和线谱有一定的差异。

从声源识别云图上可以看出，实际单个声源体积并非 1 个网格大小，在壁面上有一定的厚度分布。为此，取单个声源的等效体积为 0.0015^3（比 1 个网格略大），则式(9)变化为

$$\tilde{p}(x,f_i)=\frac{1}{4\pi r}\frac{1}{c_0}\left[0.0015^3\times\tilde{p}_{\mathrm{rms}}\left(\frac{\partial(\omega\times u)}{\partial t},f_i\right)\right] \quad (10)$$

定义L为部件声源的特征尺寸系数，其与平均声压乘积代表部件的总声压，则每个部件产生的远场声压级为

$$L_{\mathrm{SPL}f_i}=20\lg\left[L\frac{\tilde{p}(x,f_i)}{p_0}\right]=$$

$$20\lg\left(0.0015^3\times\frac{\tilde{p}_{\mathrm{rms}}\left(\frac{\partial(\omega\times u)}{\partial t},f_i\right)}{p_0}\right)\times 20\lg L-20\lg(4\pi rc_0) \quad (11)$$

显然，式(11)右侧第一项代表1:8模型主要声源部件辐射声压的能力，第二项(20 lg L)反映了部件大小对声源辐射能力的影响，第三项[20 lg($4\pi rc_0$)]为声压级随距离的衰减。对11个部件远场声压级求和，就可以得到转向架区域对外界辐射的气动噪声。

4.2　主要噪声源部件的远场气动噪声计算拟合

为了初步判断式(11)计算的有效性，先针对车速为250 km/h时11个部件产生的远场7.5 m远处声压级进行计算，并与上述仿真计算的转向架区域同位置的声压级比较，如图6所示。从图6可以看出，在1 000 Hz以下的频段两者吻合差异的最大值小于3 dB(A)，而在高频段差异最大值约为5 dB(A)。通常认为两者差异小于3 dB(A)可以接受，因此需要对高频段进行修正。修正方法为将两者之间差值平均分配到11个部件，即将式(11)减去差值；同时，通过该修正方法确定了单个声源的等效体积为0.0015^3，并制定了11个部件特征尺寸系数确定原则，即声源部位的线性长度的确定，如排障器特征尺寸取前端弧长，前后轮和叉车盘的特征尺寸取1/3轮周长，杆件、转向架框架和舱后沿的特征尺寸取迎风侧棱边长度，裙板特征尺寸取1/2边沿长度。

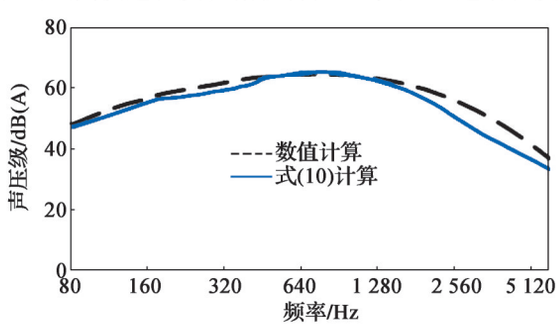


图6　仿真计算和式(10)计算的转向架区域声压级

Fig. 6　Sound pressure levels in bogie zone from numerical simulations and calculations using equation (10)

以排障器为例，下文描述该部件远场声压的拟合过程，其余10个部件拟合方法相同，在此仅给出拟合结果。在式(11)中，后2项可根据部件特征尺寸和测点距离即可计算，下面主要针对第一项进行拟合。图7为当车速分别为250 km/h、300 km/h和350 km/h车速时，根据式(11)计算的排障器辐射的A计权声压级频谱图，频率范围为80 ~ 6 000 Hz。

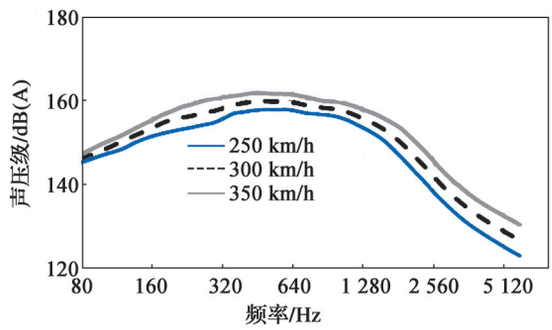


图7　不同速度等级的声压级

Fig. 7　Sound pressure levels at different speed

从图7可以看出，随着车速的增加，声压级曲线按照相近的规律增加。为了较为准确拟合声压级随频率的变化，将频率分成3段：80~600 Hz、600~2 000 Hz和2 000~6 000 Hz。进一步研究发现，将横坐标的频率以10为底的对数形式表示会使拟合公式较为简单，下面分别对3个频段采用多项式进行拟合。图8为在频率范围80 ~ 600 Hz根据式(11)第一项计算所得到的结果及其拟合公式，其中x=lg f, y=L_{SPL}。

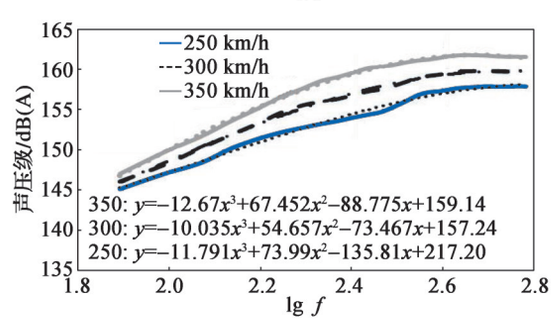


图8　80~600 Hz的声压级拟合结果

Fig. 8　Fitting results of sound pressure levels at 80~600 Hz

同理，可得到频率范围分别为600~2 000 Hz和2 000~6 000 Hz不同车速下的拟合方程，如图9和图10所示。

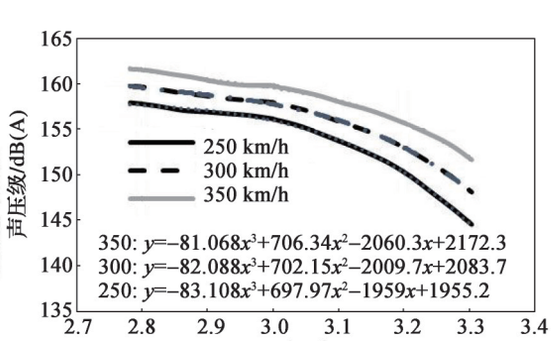


图9　600~2 000 Hz的声压级拟合结果

Fig. 9　Fitting results of sound pressure levels at 600~2 000 Hz

将频谱分成了3个频段分别进行拟合，拟合方程会在连接点位置数值不一致，需对拟合式的常数项进行

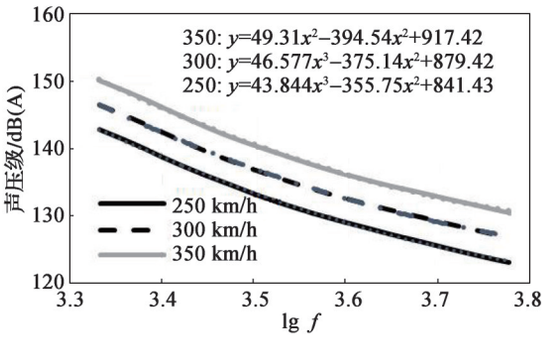


图10 2 000~6 000 Hz的声压级拟合结果

Fig. 10 Fitting results of sound pressure levels at 2 000~6 000 Hz

调整，即80~600 Hz拟合公式的常数项加上前后2段600 Hz处的声压级差值，2 000~6 000 Hz拟合公式的常数项加上前后2段2 000 Hz处的声压级差值。调整后的80~6 000 Hz的拟合公式的系数如表1~表3所示。

表1 80~600 Hz拟合公式中的系数

Table 1 Coefficient in 80~600 Hz fitting formula

系数	速度等级/(km·h^{-1})		
	250	300	350
$(\lg f)^3$ 系数A	−11.791	−10.035	−12.670
$(\lg f)^2$ 系数B	73.990	54.657	67.452
$(\lg f)$ 系数C	−135.810	−73.467	−88.775
常数项D	216.8	157.0	159.5
R^2	0.991 8	0.997 3	0.998 7

表2 600~2 000 Hz拟合公式中的系数

Table 2 Coefficient in 600~2 000 Hz fitting formula

系数	速度等级/(km·h^{-1})		
	250	300	350
$(\lg f)^3$ 系数A	−83.108	−82.088	−81.068
$(\lg f)^2$ 系数B	697.97	702.15	706.34
$(\lg f)$ 系数C	−1 959.0	−2 009.7	−2 060.3
常数项D	1 995.2	2 083.7	2 172.3
R^2	0.999 4	0.999 4	0.998 9

表3 2 000~6 000 Hz拟合公式中的系数

Table 3 Coefficient in 2 000~6 000 Hz fitting formula

系数	速度等级/(km·h^{-1})		
	250	300	350
$(\lg f)^2$ 系数B	43.394	45.375	47.355
$(\lg f)$ 系数C	−352.51	−366.47	−380.43
常数项D	835.5	863.4	891.8
R^2	0.999 7	0.999 6	0.999 5

上述拟合公式仅反映了声压级和频率的关系，而声压级也随车速的变化而变化，其变化反映在多项式的系数上。根据3个不同车速下系数值，用二次多项式拟合A、B、C、D这4个系数随速度V的变化，可得：

①80~600 Hz：

$$A_{80-600}=-0.011381472V^2-1.865268V-86.436$$

$$B_{80-600}=0.083275776V^2-14.114664V+652.575$$

$$C_{80-600}=-0.201271392V^2+35.238492V-1612.29$$

$$D_{80-600}=0.1614816V^2-28.9764V+1450.3$$

②600~2 000 Hz：

$$A_{600-2\,000}=0V^2+0.07344V-88.208$$

$$B_{600-2\,000}=0.00002592V^2+0.297V+677.22$$

$$C_{600-2\,000}=0.0002592V^2-3.69V-1704$$

$$D_{600-2\,000}=0.0002592V^2+6.3324V+1554.2$$

③2 000~6 000 Hz：

$$A_{2\,000-6\,000}=0$$

$$B_{2\,000-6\,000}=-0.000002592V^2+0.143028V+33.474$$

$$C_{2\,000-6\,000}=0V^2-1.00512V-282.71$$

$$D_{2\,000-6\,000}=0.001296V^2+1.8108V+703.5$$

综上所述，排障器3个频段的声压级频谱曲线的拟合表达式为：

①80~600 Hz：

$$L_{\mathrm{SPL}}=20\lg 0.28-20\lg(4\pi rc_0)+(-0.011381472V^2-1.865268V-86.436)(\lg f)^3+(0.083275776V^2-14.114664V+652.575)(\lg f)^2+(-0.201271392V^2+35.238482V-1612.29)(\lg f)+(0.1614816V^2-28.9764V+1450.3)$$

②600~2 000 Hz：

$$L_{\mathrm{SPL}}=20\ \lg\ 0.28-20\lg(4\pi rc_0)+(0V^2+0.07344V-88.208)(\lg f)^3+(0.00002592V^2+0.297V+677.22)\times(\lg f)^2+(0.0002592V^2-3.69V-1704)(\lg f)+(0.0002592V^2+6.3324V+1554.2)$$

③2 000~6 000 Hz：

$$L_{\mathrm{SPL}}=20\ \lg 0.28-20\lg(4\pi rc_0)+(-0.000002592V^2+0.143028V+33.474)(\lg f)^2+(0V^2-1.00512V-282.71)(\lg f)+(0.001296V^2+1.8108V+703.5)$$

按照同样的方法，可以获得其他10个部件的远场辐射声压级，3个频段的声压级公式可表达为：

①80~600 Hz：

$$L_{\mathrm{SPL1}}=20\lg L-20\lg\left(4\pi rc_0\right)+\left(A_{11}V^2+B_{11}V+C_{11}\right)\times\left(\lg f\right)^3+\left(A_{12}V^2+B_{12}V+C_{12}\right)\left(\lg f\right)^2+\left(A_{13}V^2+B_{13}V+C_{13}\right)\left(\lg f\right)+\left(A_{14}V^2+B_{14}V+C_{14}\right)$$

②600~2 000 Hz：

$$L_{\mathrm{SPL2}}=20\lg L-20\lg\left(4\pi rc_0\right)+\left(A_{21}V^2+B_{21}V+C_{21}\right)\times\left(\lg f\right)^3+\left(A_{22}V^2+B_{22}V+C_{22}\right)\left(\lg f\right)^2+\left(A_{23}V^2+B_{23}V+C_{23}\right)\left(\lg f\right)+\left(A_{24}V^2+B_{24}V+C_{24}\right)$$

③2 000~6 000 Hz：

$$L_{\mathrm{SPL3}}=20\lg L-20\lg\left(4\pi rc_0\right)+\left(A_{32}V^2+B_{32}V+C_{32}\right)\times\left(\lg f\right)^2+\left(A_{33}V^2+B_{33}V+C_{33}\right)\left(\lg f\right)+\left(A_{34}V^2+B_{34}V+C_{34}\right)$$

鉴于篇幅限制，相关11个声源部件的上述通式中的系数A_{ij}、B_{ij}、C_{ij}、D_{ij}不详细列出。

4.3 转向架区域远场总噪声级计算

远场声压测点到转向架的距离远大于转向架几何

尺寸，因此转向架的每个声源部件均可看作紧致声源，对其远场的辐射声压级求和可得到转向架区域辐射的噪声大小。声源部件共 11 个，频率分段均为 80~600 Hz、600~2 000 Hz 和 2 000 ~ 6 000 Hz，其声压级求和公式为

$$L_{\mathrm{SPL\ SUM}}=10\left\{\sum_{i=1}^{n}10^{0.1\left[20\lg L_i-20\lg\left(4\pi rc_0\right)+A_i\left(\lg f\right)^3+B_i\left(\lg f\right)^2+C_i\left(\lg f\right)+D_i\right]}\right\} \tag{12}$$

式中：L_i 为每个声源部件的特征尺寸；A_i、B_i、C_i、D_i 为关于速度 V 的三次多项式和二次多项式的系数。

对于不同缩尺比例的同类列车，将特征尺寸输入式(12)中，频率按照 1:8 的比例缩放即可以计算转向架区域向远场辐射的噪声。

为了验证计算的可靠性，利用 FW-H 方程计算了 275 km/h 车速时的转向架区域远场噪声，并与本拟合公式的计算结果进行对比，如图 11 所示。由图 11 可以看出，最大误差在 3 dB(A)以内，这表明拟合公式具有一定的准确性。

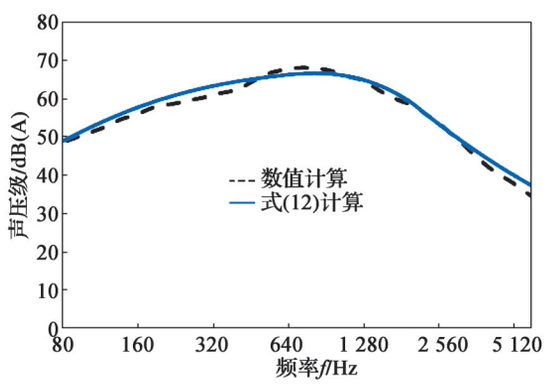


图 11　275 km/h 时仿真计算和式(12)计算结果对比

Fig. 11　Comparison between results from numerical simulations and calculations using equation (12) at 275 km/h

5　结论

为探索高速列车转向架区域向远场辐射噪声计算的经验公式，以高速列车气动噪声呈现偶极子声源为主的特征，首先建立了转向架区域偶极子声源识别方法，并结合流体仿真计算进行声源识别。研究表明，转向架区域的主要偶极子气动声源分布在排障器、前轮等 11 个部件的近壁面上。其次，对每个部件声源强度进行计算，并利用 3 个不同车速下的仿真计算结果拟合出每个部件远场声压级与频率、车速、特征尺寸、传播距离的关系式。最后，对 11 个部件在远场的辐射噪声进行求和，得到了转向架区域向远场辐射气动噪声的计算公式。研究结果表明，该拟合公式预测转向架区域向远场的噪声辐射有一定的准确性，而且可以快速推算该类高速列车不同缩比尺寸与 1:1 实车的转向架区域远场气动噪声。本研究方法可以用于高速列车其他区域噪声的声辐射计算方法参考。

参考文献：

[1] TALOTTE C. Aerodynamic noise: a critical survey[J]. 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[J]. Journal of sound and vibration, 2006, 293(3/5): 535-546.

[3] KITAGAWA T, NAGAKURA K. Aerodynamic noise generated by Shinkansen cars[J]. Journal of sound and vibration, 2000, 231(3): 913-924.

[4] NAGAKURA K. Localization of aerodynamic noise sources of Shinkansen trains[J]. Journal of sound and vibration, 2006, 293(3/5): 547-556.

[5] LATORRE IGLESIAS E, THOMPSON D J, SMITH M, et al. Anechoic wind tunnel tests on high-speed train bogie aerodynamic noise[J]. International journal of rail transportation, 2017, 5(2): 87-109.

[6] 高阳, 王毅刚, 王金田, 等. 声学风洞中的高速列车模型气动噪声试验研究[J]. 声学技术, 2013, 32(6): 506-510.
GAO Yang, WANG Yigang, WANG Jintian, et al. Testing study of aerodynamic noise for high speed train model in aero-acoustic wind tunnel[J]. Technical acoustics, 2013, 32 (6): 506-510.

[7] YAMAZAKI N, IDO A. Evaluation methods for aerodynamic noise from a high-speed train bogie in a wind tunnel test[C]//Institute of Noise Control Engineering. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Osaka: Institute of Noise Control Engineering, 2011: 1543-1553.

[8] 张亚东, 张继业, 张亮, 等. 高速列车动车转向架气动噪声数值分析[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 870-877.
ZHANG Yadong, ZHANG Jiye, ZHANG Liang, et al. Numerical analysis of aerodynamic noise of motor car bogie for high-speed trains[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2016, 51(5): 870-877.

[9] 朱剑月, 王毅刚, 杨志刚, 等. 高速列车转向架区域裙板对流场与气动噪声的影响[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2017, 45(10): 1512-1521.
ZHU Jianyue, WANG Yigang, YANG Zhigang, et al. Effect of bogie fairing on flow and aerodynamic noise behaviour around bogie of high-speed train[J]. Journal of Tongji university(natural science), 2017, 45(10): 1512-1521.

[10] LAN J, HAN J. Research on the radiation characteristics of aerodynamic noises of a simplified bogie of the high-speed train[J]. Journal of vibroengineering, 2017, 19(3): 2280-2293.

[11] 高阳, 李启良, 陈羽, 等. 高速列车头型近场与远场噪声预测[J]. 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[J]. Journal of Tongji university (natural science), 2019, 47(1):

124-129.

[12] 张强. 气动声学基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
ZHANG Qiang. Fundamentals of aeroacoustics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.

[13] 王毅刚, 朱朗贤, 王玉鹏, 等. 高速列车转向架区域气动噪声源的特征识别[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(2): 261-271.
WANG Yigang, ZHU Langxian, WANG Yupeng, et al. Characteristic identification of aerodynamic noise sources in high-speed train bogie area[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2023, 58(2): 261-271.

Exploration of computational method for far-field aerodynamic noise from bogie zone of high-speed train

ZHANG Hongjun[1], WANG Zhonghui[1], XU Yumin[3], GAO Yang[1], WANG Yigang[4,5], ZHU Langxian[4,5]

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China;
2. Materials Management Department, China Railway Shenyang Group Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110001, China;
3. Locomotive Management Department, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China;
4. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China;
5. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper addresses the challenges associated with quickly computing far-field radiated noise originating from the bogie zone of high-speed trains. Initially, an assumption was given that countless dipole sound sources are distributed on the train surface, reflecting the predominant nature of dipole sound sources in the aerodynamic noise of high-speed trains. This assumption led to the establishment of an identification method, which was then used to identify sound sources in the bogie zone, with the support of Computational Fluid Dynamics (CFD). Through this identification process, the main dipole aerodynamic sources were found to be located near the walls of 11 components within the bogie zone, including cow catchers and front wheels. Subsequently, computational methods were established to determine the sound source intensity and far-field noise respectively for these components. The simulation results at three different speeds were utilized to establish a relational expression of the far-field sound pressure level of each component concerning frequencies, train speeds, characteristic sizes, and propagation distances through fitting. The far-field radiated noise from the 11 components was aggregated to create an empirical formula for calculating far-field noise from the bogie zone. These findings demonstrate the satisfactory accuracy of the fitted formula in quickly computing the far-field aerodynamic noise of the bogie zone, based on models of varying scales for high-speed trains. This methodology also offers a reference for establishing computational methods for aerodynamic noise radiation of other types of vehicles.

Keywords: high-speed train; bogie; dipole sound source; numerical simulation; wind tunnel experiment

收稿日期：2023-12-25；修回日期：2024-05-01