

文章编号: 0258-1825(2018)03-385-13

国内高速列车气动噪声研究进展概述

孙振旭^{1,*}, 姚永芳¹, 杨焱², 杨国伟¹, 郭迪龙¹

(1. 中国科学院力学研究所 流固耦合与系统力学重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要:随着运行速度的提升,气动噪声逐渐成为高速列车最主要的噪声源,并极有可能成为新设计高速列车的一个技术瓶颈。开展高速列车气动噪声研究,明晰高速列车气动噪声机理与规律,发展低噪声高速列车外形设计对更速度级的高速列车研发具有重要意义。本文主要对自2010年以来国内进行的高速列车气动噪声研究进行梳理总结。首先详细介绍了高速列车气动噪声研究采用的一系列方法,主要从实车试验、风洞实验以及数值模拟方法三个方面展开。在掌握高速列车气动噪声研究方法的基础上,进而探讨了当前高速列车气动噪声研究的现状,重点就高速列车气动噪声源识别、主要噪声源机理与特性、噪声源优化等方向进行了阐述,并明确了当前研究获得的一些主要结论。最后简要探讨了高速列车气动噪声未来可能的研究方向。

关键词:高速列车;气动噪声;噪声源;声辐射;气动噪声优化;计算气动声学

中图分类号:U260.16; O437.4 **文献标识码:**A **doi:** 10.7638/kqdlxxb-2018.0003

Overview of the research progress on aerodynamic noise of high speed trains in China

SUN Zhenxu^{1,*}, YAO Yongfang¹, YANG Yan², YANG Guowei¹, GUO Dilong¹

(1. *Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*
2. *State Key Laboratory of High-Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: As the running speed increases, aerodynamic noise gradually becomes the main noise source for high speed trains, and may act as a bottleneck for the design of new-designed high speed trains. It is very crucial to perform the study on aerodynamic noise of high speed trains, to uncover the mechanism of the aerodynamic noise and to develop high speed trains with lower aerodynamic noise. In the present paper, research results on the aerodynamic noise of high speed trains from 2010 in China have been overviewed. Firstly, the investigation methods adopted for the study of aerodynamic noise of high speed trains are introduced in detail. Real vehicle tests, wind tunnel test, and numerical simulations are the three main approaches adopted by the researchers and industry. Consequently, these three approaches and some key procedures are discussed. Secondly, based on the research results, the research status on the aerodynamic noise of high speed trains are discussed, and the following aspects are summarized: the identification of the aerodynamic noise sources, the mechanism and characteristics of the main noise sources, and the optimization of the aerodynamic noise sources. Some clear conclusions among these results are also introduced. In the end, the possible trends for the study on the aerodynamic noise of high speed trains in the future are discussed.

Keywords: high speed train; aerodynamic noise; noise sources; noise propagation; aerodynamic noise optimization; computational aero-acoustics

收稿日期:2018-01-09; 修订日期:2018-03-22

基金项目:国家重点研发计划先进轨道交通专项(2016YFB1200601-B13)

作者简介:孙振旭*(1983-),山东高密人,副研究员,研究方向:高速列车空气动力学、气动噪声、气动外形优化。E-mail: sunzhenxu@imech.ac.cn

引用格式: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[J].空气动力学学报,2018,36(3):385-397.

doi: 10.7638/kqdlxxb-2018.0003 SUN Z X, YAO Y F, YANG Y, et al. Overview of the research progress on aerodynamic noise of high speed trains in China[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2018, 36(3): 385-397.

0 引言

当前我国高速铁路和高速列车正处于蓬勃发展的阶段。截至2017年,我国高速铁路里程达到2.5万km,占世界高铁总量的66.3%。按照十三五规划,新研发的高速列车将要达到400 km/h,而高速磁浮列车运行速度则达到600 km/h。

研究表明,如图1所示,牵引噪声和轮轨噪声分别与列车运行速度的一次方和三次方成正比,而气动噪声则与列车运行速度的六次方成正比^[1]。由图1可见,当列车运行速度超过250 km/h时,气动噪声超越轮轨噪声成为主导。因而,可以预见,新设计高速列车在噪声方面遇到的一个突出的问题是气动噪声问题。环境友好性要求高速列车必须满足一定的噪声规范标准,因而高速轨道交通必须要解决好气动噪声问题。低噪声设计成为更高速度级列车外形设计的一个关键指标,针对高速列车气动噪声的研究将直接影响到高速轨道交通的实用性和可持续发展。

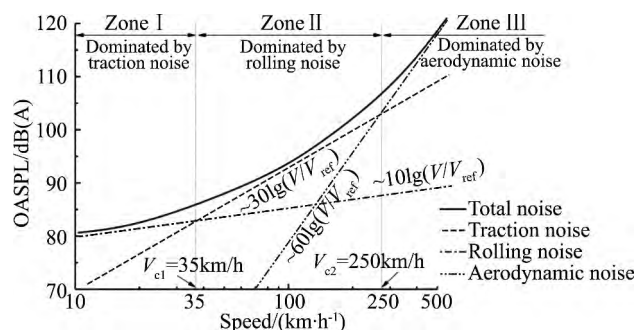


图1 列车主要噪声源及速度分区

Fig.1 Main noise sources and their relationships with the running speed

尽管自20世纪90年代开始中国就开始研发“中华之星”等自主品牌的高速列车,但是高速列车在中国真正蓬勃发展始自10年前引进的各类动车组。受益于国家高铁发展战略,针对高速列车气动特性、气动噪声特性的研究也同时快速增长起来。鉴于近年来我国在高铁领域的快速发展,本文主要梳理自2010年以来国内学者在高速列车气动噪声方面的相关研究,而国外进行的高速列车气动噪声研究则不在讨论之列。本文试图将当前国内气动噪声研究的现状、存在的问题以及未来可能的研究方向进行描述和讨论。在内容上主要包括以下四个部分:

(1) 高速列车气动噪声的研究方法。重点对实车试验、风洞实验、数值模拟三类研究方法进行概述,并对当前国内学者采用的主流数值模拟方法进行详细介绍。

(2) 高速列车气动噪声源识别。主要介绍国内

学者在高速列车气动噪声源定位以及强弱排序等方面开展的相关工作。

(3) 气动噪声源特性与优化。针对每一个噪声源,重点介绍国内学者在噪声源产生机理、频谱特性以及针对相关噪声源进行的降噪优化工作。

(4) 高速列车远场声辐射特性。重点介绍整车以及部件级的气动噪声远场辐射特性、指向性等相关工作。

1 高速列车气动噪声研究方法

当前针对高速列车气动噪声的研究主要包括实验法和数值模拟两大类,其中前者主要包括实车试验和风洞实验,后者则是指利用计算气动声学(CAA)的方法,针对高速列车进行数值模拟,获得高速列车近场和远场的气动噪声特性。接下来本文将针对这些方法进行一一介绍。

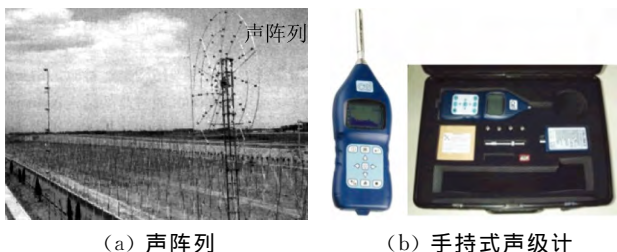
1.1 实验分析方法

高速列车气动噪声的实验研究,按照是否对列车模型进行缩比,可以分为实车试验和风洞实验两大类。

1.1.1 实车试验

实车试验即实际列车车型在某一固定线路上运行,而在该线路周边采用声阵列、实时分析声级计和测量列车运行速度的辅助设备等进行实际测试。声阵列可以识别噪声源方向和位置,实时分析声级计无指向性,但是可以获得列车在通过时该测点位置的声压级实时变化特性。一般是在距离列车轨道中心一定距离的某一位置布置传声器阵列,声信号经传声器接收并放大和转换,输入计算机进行后期处理。其优点在于能够获得真实条件下的噪声值,无车体模型简化、物理模型近似等问题,其缺点在于资源上,实验耗时较长,投入人力、物力较多;物理上,实车试验测量得到的噪声为整体噪声,获取噪声值是轮轨噪声、气动噪声等的综合值。现阶段实车试验仍然是工业部门严格要求必须要进行的。图2(a)为在京津城际铁路现场测试时布置的多通道阵列式噪声数据采集分析系统^[1],该阵列共78通道,直径40 m,阵列中心距钢轨顶面2.1 m高,距轨道中心线12.0 m远,能够满足400~8000 Hz频率分析范围内的要求。该实车试验的列车和线路状况均满足了ISO 3095-2005标准。基于波束成形声源识别原理,测量获得CRH3型车以394 km/h速度运行下的车外辐射噪声声强云图。图2(b)给出了手持式Casella CEL-490型声级计外形和标准配置,喻华华等^[2]利用该设备在京津城际线上进行了远场点的单点测量,获取了当地线路条件下

特定速度下测点具体的 A 计权声压级,以用于校验物理模型和计算预测的准确性。



(a) 声阵列 (b) 手持式声级计

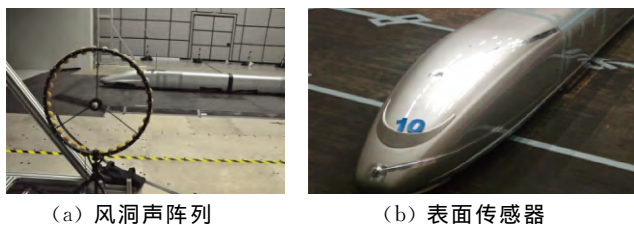
图 2 高速列车实车试验测量设备

Fig.2 Measuring devices for high speed train real vehicle tests

董孝卿等^[3]在中国铁道科学研究院东郊分院环行线和胶济线高密到即墨段两个线路段上进行了高速列车气动噪声的实车试验。该测量采用了多通道声学分析仪器一台,型号为 PAK MK II, BSWA801 型声级计 3 台,同时还有 16 支传声器以及 1 支校准器。气动噪声测量方式仍为单点测量。

1.1.2 风洞实验

基于目前已经发表的文献,当前国内可以进行高速列车气动噪声风洞实验的单位主要有两家,即同济大学的气动-声学风洞实验平台^[4-5]以及中国空气动力研究与发展中心低速空气动力学研究所的航空声学风洞^[6-8]。前者实验段尺寸 27 m×17 m×12 m,喷口面积为 27 m²,实验段沿射流方向有效长度 15 m。实验段按照半消声室设计,来自于风机的噪声及流道内的气动噪声主要通过多级消声处理得到控制。该中心的多功能风洞能进行 1:8 缩比、3 车编组的高速列车模型整车及头型、转向架、受电弓、受电弓导流罩、转向架裙板、风挡等部件的气动声学实验,包括列车模型在不同公开条件下的自由场传声器测试、麦克风阵列测试、表面传声器测试等。典型麦克风阵列及表面传声器请见图 3。



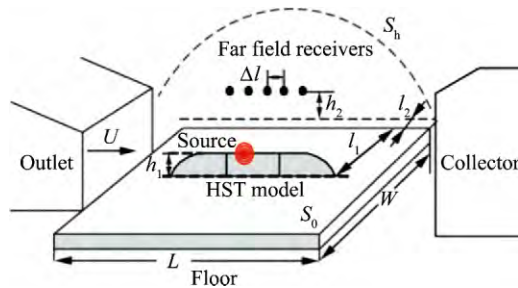
(a) 风洞声阵列 (b) 表面传感器

图 3 风洞用气动噪声测量设备

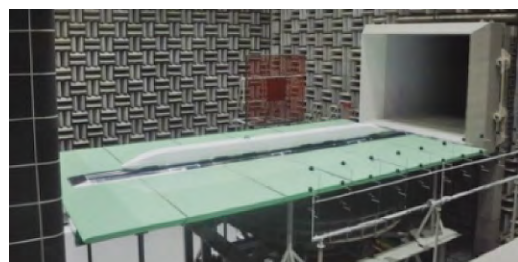
Fig.3 Aerodynamic noise measuring devices in wind tunnel

中国空气动力研究与发展中心在 2013 年建成了国内首座大型航空声学风洞。该风洞的喷口尺寸为 5.5 m×4 m,实验段由全消声室包围,截至频率约为 100 Hz。为满足地面交通工具气动噪声实验的需要,该风洞配套了 3/4 开口的实验平台,测试模型在实验过程中可通过支撑地板固定,如图 4 所示。从实验结

果来看,平台地板的存在会对远场噪声测量产生影响。5.5 m×4 m 声学风洞具有两个可更换的实验段。闭口实验段风速范围 8~130 m/s,湍流度为 0.05%,主要用于气动力实验。开口实验段风速范围 8~100 m/s,主要用于气动噪声实验。开口实验段由一个净空间尺寸为 27 m×22 m×18 m(长×宽×高)的全消声室包围,消声室截止频率为 100 Hz。



(a) 风洞实验示意图



(b) 测试实景图

图 4 高速列车风洞气动噪声测量

Fig.4 Wind tunnel test for aerodynamic noise of high speed trains

麦克风阵列架用来定位噪声源,基于麦克风阵列的静态噪声源识别定位算法是基于延迟求和的“波束成形”算法。但是在声学风洞中使用麦克风阵列时,适合于声学风洞的噪声源识别定位算法应该考虑风洞流场对声波传播的干扰修正和开口风洞射流剪切层修正。在开口射流风洞进行气动声学实验时,由于剪切层的折射效应会改变声波传播方向和声波声压大小。因此在射流外部采用传声器进行气动声学实验时,必须对剪切层效应进行修正^[7]。

1.2 计算气动声学分析方法

计算气动声学分析方法可分为两大类,第一类是直接噪声模拟(Direct Noise Computation, DNC),即在统一的包含近场声源及远场声场的区域,采用统一的高精度数值方法求解非定常可压缩 Navier-Stokes 方程,直接求解流场和声场物理量。直接法由于湍流模型处理的不同,可分为直接数值模拟(DNS)、大涡模拟(LES)、混合模拟或脱体涡模拟(DES),以及非定常雷诺平均模拟(URANS)等。由于声场量与流场量存在尺度和能量上的巨大差异,比如声压约为宏观压力的 1×10⁻⁴ 量级,需采用高阶精度、低耗散、低

色散的离散格式来提高求解精度,这给直接求解带来极大的应用难度,在高速列车这类外形及其复杂的应用对象面前束手无策。因而当前针对高速列车气动噪声的数值模拟,均采用下述的混合求解方法。

混合求解方法(Hybrid Method)将气动噪声的求解分为至少两个步骤,即声源模拟和声传播求解,在各自的区域(近场和远场),采用不同的控制方程和数值方法。近场区域求解描述流动的非线性方程,即流体动力学方程,可以是可压或不可压流动方程,可以是非定常流动,也可以是定常流动,方法即一般的 CFD 方法,湍流的处理同样包括 DNS、LES、RANS 等,为了准确模拟声源,要求网格比较精细,数值模拟精度较高。流场求解后,需利用流体声源模型获得声源,如 Lighthill 公式及其衍生公式,还有从定常流动构造声源的随机模型方法,如 SNGR 方法、RPM 方法。声传播的模拟又分为声传播的偏微分方程,如线性化欧拉方程(LEE)、声学扰动方程(APE)和非线性扰动方程(NLDE)等,和声比拟积分方法两类,另外还有声学计算中常用的频域的边界元方法。其求解过程是将上一步(声源模拟)获得的声源作为后者(声传播模拟)的源项,计算声波传播过程,并预测远场噪声。常见的声比拟积分方法是 FW-H 方法以及 Kirchhoff 方法,是工程中普遍采用的预测远场噪声的方法。

按照近场和远场气动噪声求解方法的不同,本节将简要介绍一下当前国内高速列车气动噪声求解中应用的方法。

1.2.1 近场求解方法

1.2.1.1 LES

大涡模拟,是近几十年才发展起来的一个流体力学中重要的数值模拟研究方法,它区别于直接数值模拟(DNS)和雷诺平均(RANS)方法。其基本思想是通过精确求解某个尺度以上所有湍流尺度的运动,从而捕捉到 RANS 方法所无能为力的许多非稳态、非平衡过程中出现的大尺度效应和拟序结构;同时,又克服了直接数值模拟由于需要求解所有湍流尺度而带来的巨大计算开销问题,因而被认为是最具有潜力的湍流数值模拟发展方向。

大涡模拟已经被许多学者采用来进行高速列车近场气动噪声源求解^[5, 9-21],这其中有一些是研究的简化外形,或仅分析首尾车头,或进行二维截面分析,另外也有不少分析了三编组精细模型,但是从网格量上来看很难满足大涡模拟方法本身对网格尺寸的要求,例如针对三编组带转向架外形进行大涡模拟分析时采用纯四面体网格,总体网格量仅 450 万,这是远

远不够的。

由于计算耗费依然很大,目前大涡模拟还无法在工程上广泛应用,但是大涡模拟技术对于研究许多流动机理问题提供了更为可靠的手段,可为研究噪声机理提供理论基础。随着计算能力的提升,大涡模拟在未来高速列车气动噪声模拟中应该会大有用武之地。

1.2.1.2 DES

RANS/LES 混合计算方法是期望利用 RANS 和 LES 方法的各自特点,谋求达到两种方法互补的目的。LES 方法一般需要在边界层内布置很密的网格,而 RANS 方法在近壁区域可以布置较稀的网格且能保证一定的准度。因此,在边界层内使用 RANS 方法,在其余区域使用 LES 方法,既可显著降低计算量,又能保持较高的计算准度。

DES 方法属于 RANS/LES 混合算法中的界面混合类方法,RANS 与 LES 计算区域之间的分界面通常是动态变化的。从大量的相关文献报导来看,DES 类方法是现阶段复杂工程应用中较为成功的湍流数值模拟方法,而根据 Spalart 对不同湍流模拟方法应用于非定常工程湍流问题(对于雷诺数为 $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$ 量级)的时间预测,在今后一段时间里,DES 类方法仍是一种较好的选择。

在降低了计算代价的前提下,DES 类方法也被许多学者^[22-27]成功应用在高速列车近场气动噪声源分析上。

1.2.1.3 NLAS

非线性声学求解器被设计来模拟近场声波的产生和传播。其所需的初始湍流统计平均解通过各向异性 $k-\epsilon$ 模型的 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其湍流脉动的统计描述。NLAS 在这些统计结果上利用 SNGR 随机模型方法重建噪声源。非线性声学求解器有低耗散性质,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 Navier-Stokes 方程添加一个扰动,即假定 Navier-Stokes 方程中每一项表达为平均项与脉动项,代入到 Navier-Stokes 方程中,重新整理 Navier-Stokes 方程可以获得非线性的扰动方程(NLDE)。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。从而,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,这样就可以显著地减少近壁面网格的

数目。图 5 给出了它与其它三种传统的求解器 (DNS、LES、RANS/LES) 所需要的网格比较。

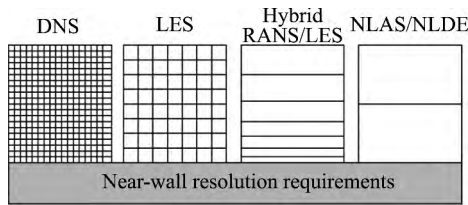


图 5 四种求解器近壁面网格示意图

Fig.5 Near-wall resolution requirements for four different approaches

利用 NLAS 计算噪声面压力脉动,可以在网格较粗糙、计算量远低于 LES 的情况下,对近场气动噪声给出较高精度的模拟,因此 NLAS 也被许多学者^[28-34]用来进行高速列车近场气动噪声源分析。

1.2.2 远场求解方法

如前所述,远场噪声的求解,即是求解声波传播到远场的过程。在高速列车远场声辐射求解时常用的有两种方法,即声比拟方法和声学边界元方法。在声比拟方法中应用最广泛的是 FW-H 积分法,因而在本节主要介绍 FW-H 积分方法和声学边界元法。

1.2.2.1 FW-H 积分法

FW-H 方程积分方法是工程中计算远场噪声最广泛的一类方法,其积分控制面所需初始脉动量信息由上一步计算得到。Ffowcs-Williams/Hawking 方程的基本形式是:

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

其中,

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

$$L_i = \hat{p}n_i + \rho u_i(u_j - v_j)n_j$$

该方程的特点是需要对声源向接受点做延迟时间积分。延迟时间 $\tau = t - r/c_\infty$,指的是声源发出的声波传到声接收点的时间,声源位置不同,延迟时间也就不同。

1.2.2.2 声学边界元法

声学边界元法是在有限元的离散技术基础上,通过转化 Helmholtz 方程(频域的声波方程)边值问题为边界积分方程发展而来的。边界元方法只需在固

体边界上划分面网格,就可获得流体(声传播)空间点的声场,相比有限元方法大大减小了计算量。有限元法的基本思想是在连续体域内划分单元,边界元法只在定义域的边界上划分单元,只在求解域的边界上进行离散,使积分方程成为只含有边界节点未知量的代数方程组,在域内是采用了物理问题或弹性力学的基本解和一些积分运算,不要求未知量,从而大大减少了划分单元模型的工作量和求解方程的个数,减少了数据量和计算时间,适合求解带无穷边界条件的开放域问题。

总的说来,这种通过求解获得边界节点的参数,并进一步求得分析域内部的参数的边界元方法,与有限元相比,具有使分析问题降维、适用于复杂结构、单元个数少、数据准备简单等优点,特别便于处理无限域以及半无限域问题。也可与有限元法相结合解决较复杂的三维流体结构耦合的声辐射问题。

采用声学边界元法可以方便地得到整体或者局部的声压云图、频率特性及噪声指向性等,当前也有不少学者^[16,21,35-37]采用了这种方法处理高速列车。

近场噪声源以及远场声辐射问题。声学边界元方法的优点是可以考虑声波传播过程中的散射、绕射过程,还可以分析某一频率的声场响应,而 FW-H 方法是时域方法,且无法考虑有障碍物的情形。

2 高速列车气动噪声源识别

当前针对高速列车气动噪声的研究,相当大的一部分工作集中在高速列车气动噪声源的定位与识别上,这是针对高速列车进行进一步降噪的前提,是气动噪声研究的基础。

声学中将基本声源分为单极子、偶极子和四极子声源。单极子声源又是脉动质量引起的,又称厚度噪声,通常产生于有厚度的螺旋桨叶片体积空间置换对空气的扰动。在高速列车中,车体及其部件基本可以认为是相对固定的刚性体,因此可以不考虑单极子噪声。偶极子声源来自于流体与固体相互作用产生的振荡力,凡是存在流体与固体的干扰,就会出现。对于高速列车,受电弓及车顶装置有很多杆件结构,尾流中产生横向振动和交替的涡脱落,就是典型的偶极子噪声,其声强正比于速度的 6 次方,其指向性为“8”字形。四极子噪声是应力声源,是在流体在高速下产生的(没有固体的相互作用),来自于黏性应力,一般在高速喷流中常见,声强与流速成 8 次方关系,且辐射效率相比偶极子噪声低马赫数的二次方。当前高速列车最高车速不超过 400 km/h(马赫数约为 0.3),故高速列车气动噪声的主要的声源性质是偶极子。

而实际的声源与当地的流动密切相关,除了前面提到的受电弓噪声,还有转向架复杂结构、车间风挡、车尾等引起的空腔噪声、涡脱落和流动分离噪声,以及车体边界层噪声等较突出的声源,它们都是由不同相位、幅值的声源分布组成,多为宽频噪声和湍流噪声,这就为其远场噪声预测带来了复杂度。通常,人们通过研究高速列车车体周围的流动和近场压力脉动来理解其气动噪声声源,下文将扼要介绍这方面的研究。除此之外,基于信号处理和机器学习,也可能对噪声源进行识别与分离^[38],为高速列车气动声源识别提供了另一种思路。

图 6 给出了某高速列车车体周围的湍动能分布云图。湍动能表达了当地气流的湍流应力大小,根据 Lighthill 公式,可以近似表征当地的气动噪声强度。可以看出,高速列车气动噪声源主要来源于高速列车表面的特殊部位和结构,在高速条件下对来流扰动形成重要气动噪声源。作为在地面高速运行的长细体,高速列车主要的扰流结构包括受电弓、空调整流罩、车间风挡、转向架舱等;主要的特征部位有高速列车首尾的流线头型,这是典型的钝体扰流,也是高速列车不可忽略的气动噪声源,合理优化首尾流线型也能有效降低高速列车的气动噪声。

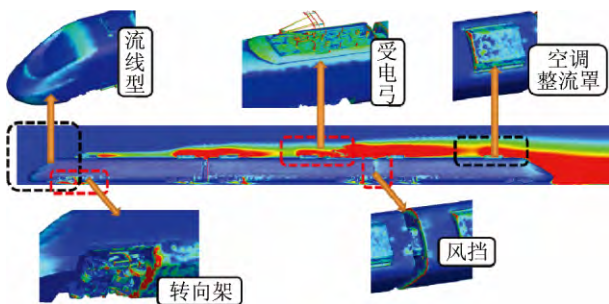


图 6 某高速列车车体周围主要噪声源示意

Fig.6 Main noise sources for a certain high speed train

为了有效进行高速列车气动噪声源识别,最直接的方法是进行线路试验,通过波束成形来进行声源识别。京津城际铁路的现场试验^[1]发现,当列车以 394 km/h 运行时,车外辐射噪声的主要噪声源是转向架、轮轨接触位置、受电弓以及车间风挡。轮轨接触位置为轮轨噪声声源,属于机械噪声源,其他均为气动噪声源。现场试验表明,头车迎风第一个转向架的噪声远大于其他转向架,是转向架中最主要的声源部位。同样的结论也在数值模拟中得到,这是由于气流绕经高速列车排障器下方后受到加速,高速气流瞬间冲击第一个转向架上,扰流破碎形成多尺度的碎涡,形成强声源。当气流继续向下游发展流经其它转向架时,气流的流速大幅降低,远小于第一转向架区域。

为了研究各主要气动噪声源的强度,高阳等^[4]通过风洞实验,针对头车鼻锥、转向架、车间风挡、受电弓和尾车鼻锥等几个主要部位的噪声源设计了四类不同的声源影响研究方案。风洞实验结果表明,该模型受电弓是最主要噪声源,其次是车间风挡,然后是头车鼻锥和转向架,最后是尾车。然后高阳等^[23]在另外的文献中对实验结果数据进行引用时提到,列车高速行驶时气动噪声在车头、车尾、受电弓以及转向架表面的噪声排序为:受电弓最大,第一转向架次之,车尾第三,车头最小。

在 CAA 分析高速列车气动噪声源识别时,一个最关键的问题是模型的复杂度,即数值模型与真实列车外形的差异到底有多大。众所周知,实际列车外形长度尺度差异巨大,部件繁多,编组较长,而受限于 CAA 分析的网格要求,数值模型必然要进行不同程度的简化,这最终将会造成的声源识别结果上存在较大区别。数值模拟高速列车气动噪声源时,必须在真实物理外形与简化数值模型上取得平衡。当然,在针对性地进行某一类噪声源的研究时,可以有目的地进行数值建模,忽略掉其他噪声源,以提升计算效率。正是由于 CAA 计算分析的复杂计算代价,为了针对某个分析工况尽可能多地获得气动噪声特性,也有部分学者采用代理模型的方式,建立车外噪声与位置之间的对应关系,在本质上是建立了一个满足精度要求的映射。如李辉等^[39]就利用神经网络模型进行高速列车车外气动噪声预测。利用 Levenberg-Marquardt (LM) 算法建立车外气动噪声的神经网络预测模型,选取车外气动噪声样本点对预测模型进行训练,用训练好的神经网络模型预测车外气动噪声。

当前研究中,最复杂的气动噪声模型为三编组模型,包含了头车、中间车和尾车三节车厢,以及转向架、受电弓、风挡等部件。张军等^[37]针对 CRH3 型高速列车建立的模型即包含了以上所有部件,通过瞬态分析获得了各个部件上的瞬态压力脉动时间历程。进而通过分块建立声学网格,将瞬态压力数据加载至声学网格表面上,研究各个不同部位的噪声源分布特性和辐射特性。其研究对高速列车主要噪声源进行了定量排序,声压级从高到低顺序为受电弓滑板、受电弓底座、车尾鼻锥、头车第一转向架、车头鼻锥和尾车最后转向架。其噪声源排序结果与风洞实验结果大致一致,但是对首尾车鼻锥的排序与风洞实验结果相反。但是该研究存在一个问题,即分块建模加载瞬态压力数据的做法相当于仅考虑了局部部件表面的湍流脉动噪声,忽略了其它部件气动噪声辐射对该局部部件的影响。王成强等^[30]针对 CRH3A 型高速列

车建立了三编组详细气动噪声分析模型,研究结果表明受电弓区域是高速列车的一个重要噪声源,受电弓区域噪声集中在滑板位置,而受电弓底部等位置噪声强度略低,这主要是因为受到受电弓导流罩的导流影响造成的。令人遗憾的是,该研究并没有系统给出列车车体周围其他噪声源的分析。

在高速列车整体气动噪声源定位时,无论是实验研究还是计算研究,达成共识的确认了以下几个主要噪声源:受电弓、转向架、车间风挡、首尾车流线型等。表现为这些区域或者部件表面曲率变化大,气流在流经该位置时易发生流动分离。在流速较高的位置气流受到扰动较大,湍动能增强,脉动剧烈,易形成气动噪声源。然而在对这些主要噪声源进行定量比较时,一个比较确认的结论是受电弓区域是最强的噪声源,其他噪声源强弱排序并无统一结论。究其原因,这可能是由列车实际外形以及模型简化时的差异造成的。对于一个流线型较差的列车外形来讲,头车流线型对于均匀来流的扰动是极大的,不同的排障器形式和司机室车窗形式对首尾车流线型噪声源的强弱也有影响。整体而言,流线型外形极好、简化程度较高的前提下,尾车流线型噪声强度要强于头车流线型,因为尾车主要受鼻锥脱落涡的影响,简化与否对其影响不大。同样的,对转向架区域或者车间风挡采用了不同程度的优化设计,由此也会导致噪声源强度的区别,因此较难给出高速列车近场不同气动噪声源的定量排序。

3 高速列车气动噪声源特性与优化

由于高速列车噪声源众多,部件复杂,采用系统集成方法统一研究所有噪声源比较适用于实车试验分析研究,但是对于数值分析而言难度较大。即便系统集成了所有气动噪声源,也会因网格精度等问题对计算结果精度造成影响。

本质上来讲,高速列车不同气动噪声源之间是相互干扰的,即改变一个噪声源的特性可能会在一定程度上影响其他噪声源的强度分布。例如,当针对高速列车流线型外形进行气动噪声优化时,优化前后从流线型表面流过的气流特性可能会产生一定改变,车体表面湍流边界层特性发生变化,因而近场和远场噪声特性均会产生相应变化。解决这个问题,在数值分析上必须将高速列车作为一个整体进行分析,甚至需要引入信号分析和信号剥离等辅助手段采用对噪声源机理进行更深入的理解。

另一方面,从气动噪声降噪优化的角度讲,更为实用的方法是,在确立了高速列车主要的气动噪声源

之后,分而治之,确立重点分析噪声源,忽略掉其他噪声源,以此更易于研究关注噪声源的声源发生机理,也更容易针对具体噪声源进行优化降噪。当前国内也有许多学者有针对性地对列车主要噪声源进行定量分析,本节将针对各主要噪声源进行详细分析。

3.1 受电弓区域

受电弓是高速列车最主要的一个气动噪声源。受电弓存在的杆件结构在列车运行时引发周期性的涡脱落,其发声原理类似于柱体绕流的卡门涡街的风吹声机理^[40],且杆件结构较多。图7给出了受电弓纵剖面瞬态速度分布云图^[33],可以看见在杆件下游存在着非常明显的涡系。涡脱落在杆件上产生周期性的作用力,形成较强的偶极子声源,产生以涡脱落频率为峰值主频的气动噪声。数值模拟表明,受电弓远场气动噪声具有非常明显的主频,频谱曲线以主频及其高阶谐波为主。杜健等^[6]对高速列车受电弓的气动噪声进行了研究,研究发现高速列车受电弓碳滑板和弓头是引起受电弓气动噪声主要的因素。张亚东等^[19]也得到类似的结论。受电弓顶部的气动噪声源强度要大于底部区域的气动噪声源强度。由偶极子噪声与速度的关系可知,随着运行速度的增加,远场气动噪声声压级也升高;风吹声的频率即是远场噪声的主频,与涡脱落频率一致,随其运行速度增加,主频升高。受电弓作为气动激励源也可以作用在车身上形成气动噪声,罗乐等^[16]对此进行了研究。受电弓气动激励作用在车体上时并无明显的主频,低频段激励幅值较大,集中分布在车厢端部,而中高频段激励幅值则明显降低,但扩散区域更大。

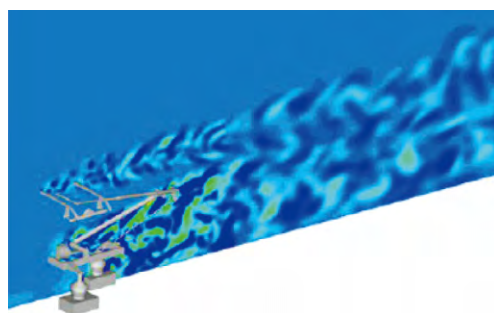


图7 高速列车受电弓纵剖面瞬态速度分布云图

Fig.7 Instantaneous velocity contour along the longitudinal section

作为高速列车最重要的气动噪声源,对受电弓区域进行合理优化,降低该部位产生的噪声,对整车降噪而言非常有必要。针对受电弓区域降噪,可以从两个方向展开:(1)受电弓本身,尽量减少受电弓杆件的数量(例如国内高速列车采用的受电弓逐渐由双臂受电弓向单臂受电弓转化);针对受电弓上面的部件,采

用合适的截面外形以减少尾涡脱落的强度。受电弓杆件产生气动噪声的根源在于涡致振动,减弱涡的强度将有利于降低受电弓噪声。肖友刚等^[13]针对受电弓底部绝缘子的截面外形进行了详细分析,探讨了截面为矩形、圆形和椭圆形的气动噪声差异,研究表明,从降低气动噪声的角度出发,最优截面外形为椭圆形,且其长轴应跟气流流向一致。日本也有不少研究人员进行了相关截面的研究,相关研究结论不在此提及。(2)在受电弓外形确定的前提下,优化受电弓区域环境进行被动降噪。为了降低受电弓区域的远场辐射噪声,一个比较直观的想法是引入受电弓导流罩,在受电弓周围引入导流罩,一定程度上屏蔽掉某些频率范围内辐射的噪声。这种控制方法应用在CRH380A上,具体外形如图8所示。

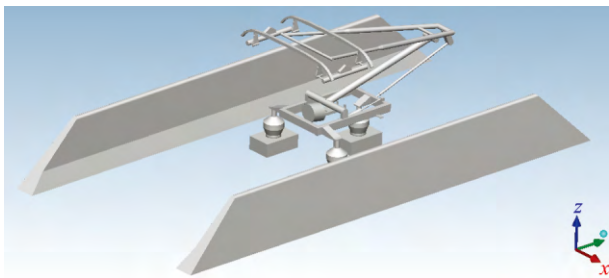


图8 受电弓导流罩

Fig.8 Noise barrier for pantograph

喻华华等^[33]考察了不同受电弓导流罩对远场噪声辐射的影响,最终确认图8所示导流罩为最优方案。杨帆等^[41]考察了在受电弓区域增加导流罩对远场噪声的影响,研究结果表明引入导流罩后远场气动噪声得到一定优化。张亚东等^[27]也研究了针对受电弓的优化,包括受电弓开口还是闭口、受电弓导流罩的形式以及受电弓的安装位置等,在包含了其它部位最优低噪声外形的前提下,新设计的列车构型相当于原型车噪声降低了约3.2dB。然而,这种方法也存在缺陷,即仅屏蔽一定频率内的噪声,对降低受电弓远场声辐射并无多大作用,导流罩本身也会成为比较严重的气动阻力源和噪声源。为了解决这个问题,在中国标准动车组研发时考察了一种新的控制受电弓噪声的方案——受电弓舱。在保证不影响室内空间的前提下,对受电弓进行一定程度的下沉,使得受电弓绝缘子完全下沉到舱内,而受电弓底部很大一部分也位于舱内,有效降低了受电弓的迎风面积。在受电弓舱研发时,通过研究不同受电弓舱外形、不同的下沉高度,最终确立受电弓舱外形方案(如图9所示)。

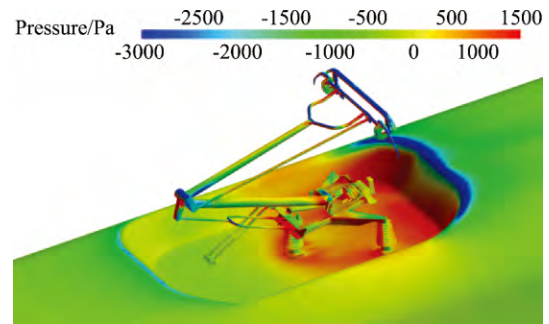


图9 受电弓舱

Fig.9 Cabin for pantograph

3.2 车间风挡

高速列车车间风挡是另外一个重要的气动噪声源,尤其是在早期时两车厢之间仅存在内风挡时。因此风挡的气动噪声研究主要集中在早期的内风挡外形上。不同车厢间仅存在内风挡时,风挡与相邻车体形成环形空腔。高速气流从上游流经该空腔时,在空腔上游拐角形成速度剪切层,剪切层连接风挡区域上下游壁面,在空腔内形成环绕内风挡的强三维旋涡,此旋涡周围也存在尺度小一些的小涡,不同尺度的旋涡会在风挡周围区域形成强噪声。一个更重要的声源是风挡下游壁面。速度剪切层与下游壁面速度边界层相互作用,使得下游壁面的噪声强度远高于上游壁面。孙振旭等^[28]基于CRH3型车对此进行了详细分析,给出了内风挡区域上下游壁面的定量噪声比较。

对车间风挡部位而言,优化该区域的气动噪声与优化气动阻力的方向是一致的,即在不影响列车转弯半径的前提下,尽量设计平顺化足够好的外风挡,使气流在流经车间风挡部位时受到的扰动最低。

黄莎等^[9]针对内风挡的长高比进行了研究,发现当高度不变时,风挡区域噪声水平随长度增加而增大;当长度不变时,风挡区域噪声水平随高度增加而增大。黄莎还对内风挡进行了改进分析,增加了不同外形的外风挡,外风挡存在的情况下,各测点声压级平均降幅约9.4%。而肖友刚等^[15]针对二维列车截面的风挡区域进行了平顺化处理,由原来的矩形凹槽修正为开口向左右两侧发散的凹槽,采用平滑的Nurbs曲线过渡,研究发现通过改进结构之后,声压波动幅值减少,气流受到扰动变小,噪声水平得到了有效改善。Wu^[42]针对半包外风挡和全包外风挡的噪声辐射进行了研究,发现相同位置测点全包外风挡会比半包外风挡最大能降低23.6dB,非常可观。

随着性能更优的高速列车的设计,车间风挡的设计也发生了较多变化,由最开始的仅设计内风挡逐渐

演化为增加半包的外风挡，一直到全封闭风挡。如图 10 所示，自 2007 年引进 CRH2 型车开始，到 2011 年研发 CRH380A 新一代高速列车，再到 2015 年中国标准动车组，高速列车车间风挡的设计也在不断改进。

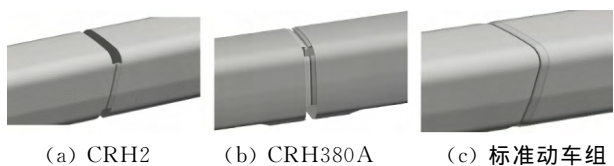


图 10 不同列车采用风挡示意

Fig.10 Different windshields for different high speed trains

风挡的改进，大大优化了列车整车的气动阻力特性，同时也有效降低了风挡区域的气动噪声强度。新的标准动车组由于采用了全封闭外风挡，由风挡带来的气动噪声已经不明显，因此风挡已经不再是高速列车近场主要的噪声源。

3.3 转向架区域

转向架区域结构复杂，气流高速流经转向架舱时，一方面会直接撞击到转向架上在舱内散射，另一方面高速旋转的车轮也会进一步扰动这些散射气流。不同尺寸的旋涡遍布整个舱内，而所有转向架舱中又以第一转向架舱内的气流湍化程度最高。整体来看，头车第一个转向架区域是所有转向架中气动噪声最大的，该部位受到来流的直接冲击，流速极高，高速气流流入转向架区域内时，由于复杂部件较多，小尺度脉动极其剧烈。一方面这种高频脉动会形成气动噪声向远场辐射，另一方面也会对转向架部件的结构疲劳等形成损害。考察所有的转向架时，靠近受电弓升弓部位的转向架区域噪声强度也很高，这主要是由于受电弓作为气动激励源向外辐射噪声造成的，尽管此时底部流经转向架的气流流速已经远小于头车第一转向架。另外，尾车最后一个转向架也是一个比较重要的噪声源，这是因为该转向架距离尾流区较近，受到尾流区反向旋涡的影响较大，气流湍化度较附近其它转向架略高。张军等^[43]通过三编组列车系统建模比较分析了六个转向架噪声源的强度，并对其进行了排序，如图 11 所示。

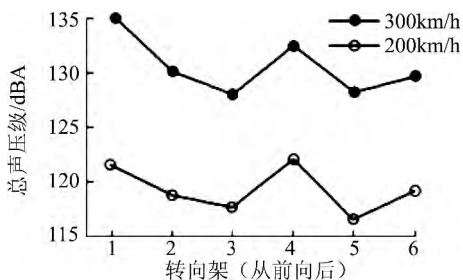


图 11 转向架区域噪声源强度比较

Fig.11 Comparison of noise level for different bogies

从频谱特性上来讲，转向架部位气动噪声主要是宽频噪声，低频含能较高，高频含能逐渐降低。

对转向架区域进行气动声学降噪的首选是设置恰当的裙板，裙板可以将转向架声辐射的线路有效堵住，将转向架的影响控制在一个较小的范围内。裙板的设置对远场噪声的影响最为可观。黄莎等^[14]即针对裙板控制转向架噪声的辐射进行了数值分析，通过合理设置裙板，测点总声压级平均降幅约 2.08 dBA，降噪效果明显。在最新的中国标准动车组上，也对转向架裙板的合理设置进行了一系列研究。车体定型阶段，通过了 7 类不同的裙板方案，具体外形如图 12 所示。通过比较这 7 类裙板的阻力特性和声辐射特性，确定了最优方案为方案 6 和方案 3。

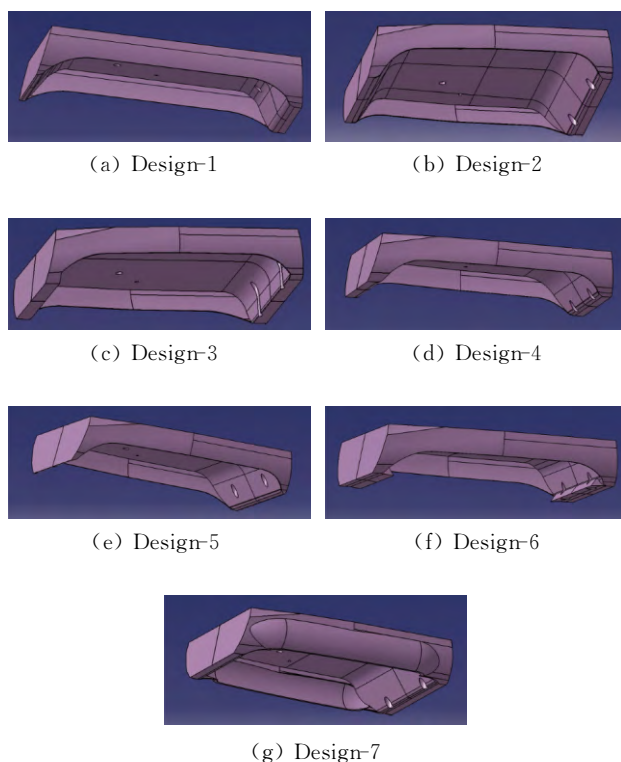


图 12 不同的转向架舱

Fig.12 Different designs of bogie cabins

为了有效降低转向架区域的噪声，另一种比较好的办法是有效减少转向架舱的体积，尽量引导气流向转向架轮对侧下方流过，此举最大的作用是降低流入舱内气体的流速。为了实现这个目的，可以在转向架舱上游和下游增设导流板，而导流板的倾角则可以通过精确的计算寻找最优解。由于减少了气流撞击转向架轮对的作用面积和垂直速度，转向架舱导流板也可以有效降低该区域的气动阻力。

3.4 首尾流线型

高速气流在流经流线型头部时，首先在鼻锥位置滞止，进而流动加速，气流受到较大扰动，列车壁面附

近边界层内气流湍化程度较高,车头表面脉动压力较大,且头车各个部位湍化程度存在较大差异,易在当地形成高噪声区域。另外,流线型区域高噪声还有一个重要成因:即流线型部位发生的强流动分离、再附等现象,主要发生在排障器附近、司机室车窗附近等。在流线型车尾附近,尽管包裹车尾的速度边界层已经非常厚,列车表面流速较低,但是尾车流线型表面上存在着比流线型头部更为复杂的流动分离再附等现象。尾车流线型最主要的特点位于非定常尾流区域,尾车鼻锥区域是高速列车尾流区反向旋转拖曳涡的源头,即“wake pumping”现象的源。这些流动现象更加增大了该区域的噪声水平,在高速列车所有气动噪声源中占有非常重要的比重。刘加利等^[10]的研究发现,流线型头部的声功率级较大,而流线型车尾部位较小。但是该文献采用的模型仅包含头车流线型和尾车流线型,无中间车体,与实际列车车型差距较大,研究结论不具备普遍性。孙振旭等^[28]的数值模拟结果表明,流线型头部和尾部鼻锥区域噪声强度都较高,且相同位置噪声水平尾部要大于头部。肖友刚等^[11]仅针对头车进行气动噪声分析,研究了列车速度变化以及测点距离车头远近变化时声压级的变化特性,由于模型过于简单,文章的意义更体现在方法上,在声源特性上参考意义并不大。

流线型是新设计高速列车的名片,外观美好、性能优异是流线型设计永恒的追求,而低噪声头型设计又是制约更高速级高速列车的关键技术之一。针对流线型降噪,可以从两个方面展开:(1)在流线外形基本保持不变的前提下,进一步优化流线型表面上的车窗玻璃结构以及排障器。这两个部件是流线型区域的关键部件,往往表面曲率变化大,甚至相邻面不平顺连接,这是导致流线型成为重要噪声源的一个重要原因。孙振旭等^[31]针对车窗玻璃和排障器给出了几类不同的外形结构,并进行了相应的组合建模,通过数值分析,确立了最优的低噪声头型设计。相关研究表明这种局部部件最优组合的研究方式是合理的,更易于工程设计所采用。(2)针对首尾车流线型的气动噪声特性,更深入地研究参数化流线型外形,获得流线型的关键控制参数,进一步分析控制参数对流线型气动噪声源的影响。刘加利等^[44]基于对流线型拓扑分析,确立了流线型上三条纵向剖面线和三种水平剖面线,进而组合形成九种高速列车头型,然后对比分析了高速列车头部纵向剖面形状和水平剖面形状对远场气动噪声的影响。这种研究对高速列车头型设计是积极的,获得了这些影响规律将会有效辅助于高速列车低噪声头型设计。孙振旭等^[34]采

用局部形函数法对某高速列车头型进行了参数化建模,提取了鼻锥高度、司机室车窗高度、司机室宽度以及流线型底部宽度等四个关键设计变量,以整车阻力和远场噪声为优化目标进行了多学科多目标优化,发现影响远场噪声的关键变量在于流线型底部宽度以及车窗高度。低噪声设计外形应着重考虑这两个设计变量。

4 高速列车远场声辐射特性

针对远场声辐射噪声研究,按照主要分析对象的差异,主要分为两大类:(1)工程分析类,即针对具体的高速列车外形,按照 ISO-2005-3095 标准,进行远场测点气动噪声评估,获取远场气动噪声沿距离轨道中心线 25 m 远、3.5 m 高的测点线上的空间分布特性;(2)系统分析远场气动噪声辐射特性,获得远场空间内不同频率下声压级的空间分布特性以及相关指向性等。两类分析对象均有不同的侧重点,前者侧重于对列车外形的评估,是新设计列车能否在线路运行的重点考察对象;后者则侧重于特性分析,全面获得高速列车远场声场的辐射规律。

王成强等^[30]按照第一类方法对 CRH3A 型高速列车远场噪声的空间分布特性进行了研究,发现远场噪声极值出现在列车中部偏上游位置,从头车鼻锥开始到中间车受电弓区域,远场噪声水平较高,越向下游发展,噪声强度逐渐降低。孙振旭等^[28]对 CRH3 型高速列车(无受电弓)进行了相似处理,研究发现,高速列车远场噪声沿轴向分布比较均匀,在 300 km/h 速度下,远场噪声控制在 80 dBA 左右。从笔者参与的各类高速列车远场气动噪声评估经验来看,这种空间分布受具体车型以及模型简化的影响极大,未发现明显的规律。

董孝卿等^[3]对高速列车声辐射特性进行了线路试验研究,发现了声辐射随距离增加逐渐衰减的规律,水平横向距离加倍,远场噪声值衰减约 2.7~3.0 dBA,这是典型的线声源衰减规律。同时,在横向距离一定的情况下,距离地面高度在 2.5 m~3.5 m 内变化时噪声强度变化不大,但是在 0~1.5 m 垂直距离变化时噪声差异较大。

当前也有不少学者对噪声源部件进行了声辐射研究。杜健等^[6]对受电弓进行了远场声辐射研究,重点就其指向性进行了详细分析。通过在距离 7 m 位置每隔 10°布置远场测点(图 13a 给出了受电弓远场气动噪声测点的布置以及相关指向性示意图),可以发现不同车速下受电弓远场气动噪声指向性比较一致,总声压级均在 10°~20°附近达到最大。

喻华华等^[33]也针对受电弓的远场辐射研究发现,受电弓作为声源向外辐射时类似于球声源,在距离超过 25 m 以后,随着距离的加倍,衰减量接近 6 dB。

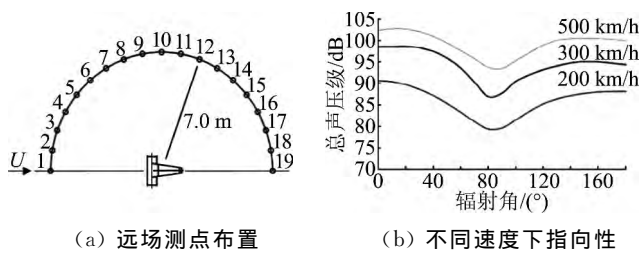


图 13 受电弓声辐射测点布置及指向性

Fig.13 Probe location for far field noise measurement and directivity

现代高速列车研发必须具备环境友好性,在列车外形都已确定的情况下,降低远场噪声最有效的方式是设置声屏障。声屏障平行于轨道中心线,为了达到最优的降噪效果,声屏障的高度和横向距离均需要满足一定的要求。从声场控制来讲,声屏障的存在会隔断高频噪声,高频噪声波长较短,不易发生折射。对于低频噪声,由于其波长较长,更容易绕过声屏障。袁磊等^[35]针对声屏障的隔音效果进行了分析,发现声屏障对 100 Hz 以内的频段隔音效果不好,对 100~2000 Hz 频率范围均有一定的隔声效果,平均声压降低约 3~12 dB。在 1000 Hz 声压降低最多,最高声压级降低约 11 dB。另一方面,声屏障的存在会导致屏障和列车之间的区域内噪声加强,这可能会导致室内噪声增加,应该予以考虑。

5 结论和展望

本文对自 2010 年以来国内高速列车气动噪声研究的现状以及获得一些成果进行了总结。基于这些研究概况,作者认为当下针对高速列车气动噪声的研究在以下几个方面值得开展更进一步和更深入的研究。

(1) 整体而言,当前针对高速列车气动噪声的研究偏工程应用的较多,而针对噪声源机理和特性的研究略少,且机理性研究还没有深入到足够细致的层次。这主要是因为作为整体的高速列车长度尺度超大,作为气动噪声声源的部件结构众多,这给高速列车气动噪声研究带来了巨大的挑战。另一方面,国内高速列车气动噪声研究与车辆研发部门的合作比较紧密,面向实际外形研究较多,数值模拟采用的网格量远未达到精确模拟湍流的网格尺度要求,难以给出高仿真度的流场涡结构和声场。为了更好地从基础出发辅助于工程设计,进一步提升分析精度,针对气动噪声的研究应该更多地集中于部件级研究,主机厂部门引领更多的针对部件的实验研究,发展工程化和

经验化的评估方法,而科研院所则着重更深入地理解典型结构的噪声源产生机理和提高噪声预测精度。

(2) 高速列车编组长度较多,当前线路运行的列车包括八编组或者十六编组两类,但采用 CAA 分析八编组或十六编组在目前来看都是很难做到的。因而一个实用的方法是建立编组长度与远场噪声的对应关系。将高速列车视为一个线声源,而每节车厢可以视为组成线声源的一个单元,编组长度的变化表现为线声源单元个数的增加,从而导致远场噪声的改变。该研究的难点在于作为噪声源的每节车厢声功率级并不一致,这需要实验或者数值模拟提供数据支持,这给叠加每节线声源单元带来了较大难度。作者曾针对该问题做过一些初步研究,假定每节车厢声功率级一致,在此前提下获得了编组长度与远场噪声的关系,但同样是因为该假定导致研究仍偏离实际工程应用。尽管该问题困难重重,但是类似的工程化方法对于实际工程而言仍具有积极意义。

(3) 当前针对高速列车气动力优化的研究工作已经获得了较大进展,发展了一系列用于提升气动优化效率的优化算法和策略。另一方面,针对高速列车气动噪声的外形优化工作刚刚开始,是另一个值得深入研究的方向。气动噪声优化完全可以从气动力优化研究中寻求支撑,利用后者发展的优化策略,应用于气动噪声多学科优化。针对高速列车的气动噪声优化,可以更多地从部件级出发,重点在更优部件外形上获得突破。

(4) 更高速度列车的研制使得高速列车的气动噪声环境更为严峻,受室外气动噪声的影响,列车室内噪声环境也会更为苛刻。那么,室外的气动噪声激励是如何影响室内噪声的?常规意义下的室外气动噪声源有哪些会传播至室内并在室内噪声环境下起重要作用?将气动噪声的研究拓展到高速列车室内,并探讨气动噪声源对室内噪声的影响规律,涉及流固耦合,以及声波在流体和固体中的传播,为耦合问题的数值模拟方法提出了新的课题。

参 考 文 献:

- [1] Zhang S G. Noise mechanism, sound source localization and noise control of 350 km/h high-speed train[J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 86-90. (in Chinese)
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.
- [2] Yu H H, Li J C. Field acoustic measurements of high-speed train sound along BTIR[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2013, 56(2): 474-482.
- [3] Dong X Q, Huang X, Wu N. Research of emission noise property of high-speed railway cars[J]. Railway Locomotive & Car, 2009, 29(4): 1-4. (in Chinese)

- 董孝卿, 黄欣, 吴宁. 高速铁道车辆辐射噪声特性初步研究[J]. 铁道机车车辆, 2009, 29(4): 1-4.
- [4] Gao Y, Wang Y G, Wang J T, 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. (in Chinese)
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.
- [5] Yang G Z, Li B T, Wang Y G. Influence of supporting plate on aero-acoustic wind tunnel test for high speed train[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(6): 500-505. (in Chinese)
杨志刚, 李保林, 王毅刚. 支撑地板对高速列车模型风洞气动噪声试验影响[J]. 声学技术, 2013, 32(6): 500-505.
- [6] Du J, Liang J Y, Tian A Q. Analysis of aeroacoustics characteristics for pantograph of high-speed trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(5): 935-941. (in Chinese)
杜健, 梁建英, 田爱琴. 高速列车受电弓气动噪声特性分析[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(5): 935-941.
- [7] Chen P, Ma R X, Zhang J L, et al. Mechanism analysis of low frequency pressure pulsation in 5.5 m×4 m aero acoustic wind tunnel[C]//Summary of the 2016 National Symposium on Aero acoustics. (in Chinese)
陈鹏, 马瑞轩, 张俊龙, 等. 5.5 m×4 m 航空声学风洞低频压力脉动机理分析[C]//2016 年度全国气动声学学术会议论文摘要集.
- [8] Hao N S. Research on high speed train aerodynamic noise wind tunnel test technology[C]//Summary of the 2016 National Symposium on Aero acoustics. (in Chinese)
郝南松. 高速列车气动噪声风洞试验技术研究[C]//2016 年度全国气动声学学术会议论文摘要集.
- [9] Huang S, Liang X F, Yang M Z. Numerical simulation of aerodynamic noise and noise reduction of high-speed train connection section[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2012, 30(2): 254-259. (in Chinese)
黄莎, 梁习锋, 杨明智. 高速列车车辆连接部位气动噪声数值模拟及降噪研究[J]. 空气动力学学报, 2012, 30(2): 254-259.
- [10] Liu J L, Zhang J Y, Zhang W H. Numerical analysis on aerodynamic noise of the high-speed train head[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(9): 19-26. (in Chinese)
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.
- [11] Xiao Y G, Kang Z C. Numerical prediction of aerodynamic noise radiated from high speed train head surface[J]. J. Cent South University (Science and Technology), 2008, 39(6): 1267-1272. (in Chinese)
肖友刚, 康志成. 高速列车车头曲面气动噪声的数值预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(6): 1267-1272.
- [12] Zhang J, Huang Y Y, Zhao W Z. Research on numerical simulation of aerodynamic noise for high-speed train[J]. Journal of Dalian jiaotong university, 2012, 33(4): 1-4. (in Chinese)
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.
- [13] Xiao Y G, Shi Y. Aerodynamic noise calculation and shape optimization of high-speed train pantograph insulators [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(6): 72-76. (in Chinese)
肖友刚, 时颖. 高速列车受电弓绝缘子的气动噪声计算及外形优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(6): 72-76.
- [14] Huang S, Yang M Z, Li Z W, et al. Aerodynamic noise numerical simulation and noise reduction of high-speed train bogie section [J]. J Cent South University (Science and Technology), 2011, 42(12): 3899-3904. (in Chinese)
黄莎, 杨明智, 李志伟, 等. 高速列车转向架部位气动噪声数值模拟及降噪研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(12): 3899-3904.
- [15] Xiao Y G, Zhang P. Numerical prediction of aerodynamic noise radiated from longitudinal symmetric plane of high-speed train and shape optimization[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(4): 1583-1588. (in Chinese)
肖友刚, 张平. 高速列车纵向对称面气动噪声计算及外形优化[J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 1583-1588.
- [16] 罗乐, 郑旭, 吕义, 等. 考虑受电弓系统的高速列车气动噪声分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(11): 2179-2185.
- [17] Yuan C Y, Li M Q. Multi-objective optimization for the aerodynamic noise of the high-speed train in the near and far field based on the improved NSGA-II algorithm[J]. Journal of Vibro-Engineering, 2017, 19(6): 4759-4782.
- [18] Lu W T, Wang Y, Zhang C Q. Numerical simulation of aerodynamic noises in the far field of the high-speed train with considering bogies and connection windshields[J]. Journal of Vibro-Engineering, 2017, 19(3): 2262-2279.
- [19] Zhang Y D, Zhang J Y, Li T. Investigation of the aeroacoustic behavior and aerodynamic noise of a high-speed train pantograph[J]. Science China-Technological Sciences, 2017, 60(4): 561-575.
- [20] Lu W T, Wang Y, Zhang C Q. Research on the distribution of aerodynamic noises of high-speed trains[J]. Journal of Vibro-Engineering, 2017, 19(2): 1438-1452.
- [21] Wang Y H, Wang J T, Fu L Q. Numerical computation of aerodynamic noises of the high speed train with considering pantographs[J]. Journal of Vibro-Engineering, 2016, 18(8): 5588-5604.
- [22] Yang X Y, Gao Y, Cheng Y J. Finite Elements analysis of high-speed train wind noise in Lighthill's acoustic analogy[J]. Noise and Vibration Control, 2011, (4): 80-85. (in Chinese)
杨晓宇, 高阳, 程亚军. 高速列车气动噪声 Lighthill 声类比的有限元分析[J]. 噪声与振动控制, 2011, (4): 80-85.
- [23] Ma XL, Gao Y. Contrastive analysis of simulation and test of high-speed train aerodynamic noise [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2015, 36(2): 39-42. (in Chinese)
马晓龙, 高阳. 高速列车气动噪声方针与试验对比分析[J]. 大连交通大学学报, 2015, 36(2): 39-42.
- [24] Yang H X, Liu D M. Numerical study on the aerodynamic noise characteristics of CRH2 high-speed trains[J]. Journal of Vibro-Engineering, 2017, 19(5): 3953-3967.
- [25] Zhu C L, Hemida H, Flynn D, et al. Numerical simulation of the slipstream and aeroacoustic field around a high-speed train [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part F-journal of rail and rapid transit, 2017, 231(6): 740-756.
- [26] Cui Y F, Tian C, Zhao Z Y. Research on the radiation characteristics of aerodynamic noises in the connection position of high-speed trains[J]. Journal of Vibro-Engineering, 2017, 19(4): 3099-3112.
- [27] Zhang Y D, Zhang J Y, Li T, et al. Research on aerodynamic noise reduction for high-speed trains[J]. Shock and Vibration, 2016.
DOI: 10.1155/2016/6031893
- [28] Sun Z X, Song J J, An Y R. Numerical simulation of aerodynamic noise generated by CRH3 high speed trains[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(5): 701-711. (in Chinese)
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[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(5): 701-711.

- [29] Sun Z X, Wang Y W, An Y R. Computational study on aerodynamic sound from high-speed trains[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(5): 660-668.(in Chinese)
孙振旭, 王一伟, 安亦然. 高速列车气动噪声的计算研究[J]. 水动力学研究与进展, 2010, 25(5): 660-668.
- [30] Wang C Q, Xing H Y, Zheng J F. Simulation study on aerodynamic noise of the high speed trains based on CAA[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2015, 32(1): 9-15. (in Chinese)
王成强, 邢海英, 郑继峰. 基于CAA的高速动车组气动噪声仿真研究[J]. 华东交通大学学报, 2015, 32(1): 9-15.
- [31] Sun Z X, Guo D L, Yao S B, et al. Identification and suppression of noise sources around high speed trains [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2013, 7(1): 131-143.
- [32] Sun Z X, Song J J, An Y R. Numerical simulation of aerodynamic noise generated by high speed trains [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2012, 6(2): 173-185.
- [33] Yu H H, Li J C, Zhang H Q. On aerodynamic noises radiated by the pantograph system of high-speed trains [J]. Acta Mechanica Sinica, 2013, 29(3): 399-410.
- [34] Sun Z X, Zhang Y, Yang G W. Surrogate based optimization of aerodynamic noise for streamlined shape of high speed trains [J]. Applied Sciences Basel, 2017, (7): 196.
DOI: 10.3390/app7020196
- [35] Yuan L, Li R X. Aerodynamic noise of high-speed train and its impact[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2013, (5): 31-34.(in Chinese)
袁磊, 李人宪. 高速列车气动噪声及影响[J]. 机械工程与自动化, 2013, (5): 31-34.
- [36] Zheng Z Y, Li R X. Numerical analysis of aerodynamic dipole source on high-speed train surface[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(6): 996-1002.(in Chinese)
郑拯宇, 李人宪. 高速列车表面气动噪声偶极子声源分布数值分析[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(6): 996-1002.
- [37] Zhang J, Guo T, Sun B C, et al. Research on characteristics of aerodynamic noise source for high-speed train[J]. Journal of China Railway Society, 2015, 37(6): 10-18. (in Chinese)
张军, 郭涛, 孙帮成, 等. 高速列车气动噪声声源特性研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(6): 10-18.
- [38] Na Y Y. Frequency domain blind source separation algorithms and application in high speed train noise components separation [D]. Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
纳跃跃. 频域盲源分离算法研究及其在高速列车噪声成分分离中的应用[D]. 北京交通大学, 2014.
- [39] Li H, Xiao X B, Jin X S. Research on exterior aerodynamic noise prediction of high-speed trains based on neural network [J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(3): 56-60. (in Chinese)
李辉, 肖新标, 金学松. 基于神经网络方法的高速列车车外气动噪声预测[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(3): 56-60.
- [40] Yang Y, Yang G W. A numerical study on aerodynamic noise sources of high-speed train [C]//Proceedings of the 1st IWHIR, 2011.
- [41] Yang F, Niu W D. The reserch of aerodynamic noise produced by the power collection equipment of high-speed trains [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2012, 25(4): 13-15.(in Chinese)
杨帆, 牛文达. 高速列车集电部的气动噪声研究[J]. 机电产品开发与创新, 2012, 25(4): 13-15.
- [42] Wu J M. Research on numerical simulation and noise reduction of aerodynamic noise in connection section of the high-speed train[J]. Journal of Vibro Engineering, 2016, 18(8): 5553-5571.
- [43] Zhang J, Sun B C, Guo T, 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.(in Chinese)
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.
- [44] Liu J L, Tian A Q, Du J, et al. Influence of key profiles of the streamlined shape on aerodynamic noise of high speed train[J]. Chinese Railways, 2014, (11): 58-62. (in Chinese)
刘加利, 田爱琴, 杜健, 等. 头部控制线形状对高速列车气动噪声的影响[J]. 中国铁路, 2014, (11): 58-62.