

# 基于瞬时边界元的轨道交通高架槽形梁桥 声辐射特性及影响分析

张 燕 彭思源

(华东交通大学土木建筑学院, 330013, 南昌//第一作者, 副教授)

**摘 要** 为了精准预测列车通过轨道交通高架槽形梁桥时诱发的结构噪声, 分析梁底板厚度对声辐射的影响, 结合有限元-瞬时边界元法, 采用多体动力学软件 SIMPACK 和有限元软件 ANSYS 协同联合仿真分析法, 建立了车桥耦合系统振动分析模型以及槽形梁结构声辐射有限元/边界元模型。分析了列车荷载作用下槽形梁桥的声辐射特性, 探讨了底板厚度对槽形梁结构噪声的影响。研究表明: 地铁列车以 80 km/h 的时速通过槽形梁桥时, 桥面板的振动及桥梁结构噪声主要集中在底板附近; 随着底板厚度的增加, 槽形梁桥结构辐射噪声近声场处降低较为显著, 对结构远声场有一定程度的影响。分析结果可为轨道交通槽形梁结构减振降噪提供一定的参考。

**关键词** 轨道交通; 槽形梁; 声辐射; 联合仿真

**中图分类号** U441<sup>+</sup>.3; U448.28

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.08.013

## Sonic Radiation Characteristics and Influence Analysis of the Trough Girder Beam Bridge Based on Transient Boundary Element Method

ZHANG Yan, PENG Siyuan

**Abstract** In order to predict accurately the structure noise on the elevated rail transit trough beam induced by passing trains, analyze the influence of plate thickness on the sonic radiation, combined with the finite element transient boundary element method, a vibration analysis model of vehicle bridge coupling system and a finite element/boundary element model of the trough girder structural acoustic radiation are established by adopting the collaborative joint simulation analysis method of multi-body dynamics software SIMPACK and finite element software ANSYS. Through analyzing the vibration and acoustic radiation characteristics of beam bridge under train load slot, the influences of the plate thickness on the bottom beam structural noise are discussed. The result shows that when the subway train passing through the trough girder bridge at the speed of 80 km/h, the bridge deck vibration and the structural noise

are mainly concentrated on the near bottom; with the increase of plate thickness, the trough bridge structure radiation noise is reduced significantly in the near sound field, which has some influence on the far sound field to a certain extent. This research provides a theoretical basis for the noise reduction of rail transit trough beam structural vibration.

**Key words** rail transit; trough girder; sonic radiation; joint simulation

**Author's address** School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China

列车过桥时引起的声辐射问题一直是国内外学者关注的热点, 人们对这个问题进行了较为系统的研究, 取得了一定的成果。文献[1]采用有限元-边界元法对高速铁路 U 型梁进行了数值模拟和试验分析。文献[2]采用时域边界元法对轨道交通荷载作用下的钢连续梁振动产生的瞬态噪声场进行了试验分析和数值模拟。文献[3-4]结合边界元与统计能量分析法对 32 m 长混凝土简支梁的结构噪声进行理论与试验研究。文献[5]通过车桥耦合动力学理论结合间接边界元法研究了高速铁路 32 m 长简支槽形梁结构噪声的声辐射特性。

文献[6]采用模态叠加法分析了桥梁的结构噪声, 研究表明: 增加底板的厚度可以降低梁底的结构噪声。但是, 文献[7]研究发现: 桥梁底板厚度的变化对桥梁各个板件的振动、噪声无明显影响。因此, 板厚对槽形梁结构噪声的影响有待进一步分析研究。

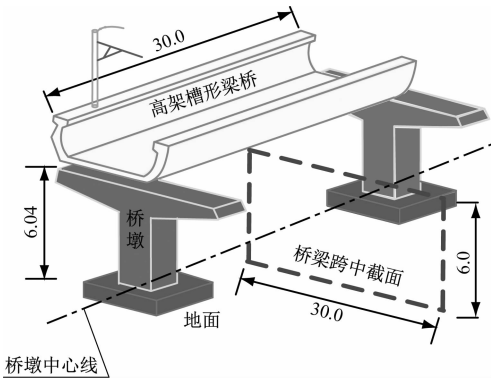
本文以某拟建高架线路 30 m 的混凝土槽形梁为研究对象, 基于 SIMPACK 软件和 ANSYS 软件联合协同仿真分析方法, 建立了车桥耦合系统振动分析模型以及槽形梁结构声辐射有限元/边界元模型; 在计算列车负载时槽形梁结构振动响应的基础

上,采用瞬时边界元法,探讨了底板厚度对槽形梁结构噪声的影响。

# 1 轨道交通高架槽形梁声振分析模型

## 1.1 轨道交通高架槽形梁桥模型

某拟建槽形梁桥处于高架平坡线路段,下部结构采用 T 型桥墩,梁下净空大于 4.5 m,为双线分离式槽形梁桥如图 1 所示。梁体两侧的腹板结构采用非对称形式,即其中一侧为弯弧形不等壁折腹式腹板(中、上段面隆鼓,平滑加厚),连接该侧腹板顶部的翼缘板选用 T 形翼缘板,即拥有内、外侧两个可兼做疏散平台的凸缘;梁体另外一侧腹板结构为弯弧形腹板(等壁腹板结构),该侧腹板的顶部采用 7 形翼缘板连接,即仅存在向内侧的凸缘。槽形梁桥的标准跨径为 29.94 m,梁宽为 5 m,高为 1.8 m,底板厚度为 0.28 m,腹板厚度为 0.24 m,支座设在距梁端 0.57 m 处。



尺寸单位:m

图 1 拟建高架槽形梁桥

## 1.2 轨道交通高架槽形梁有限元模型

基于有限元理论,建立轨道交通高架槽形梁模型。假设钢轨为能承受拉、压作用的纵向连续梁,其拉压刚度处处相等,且为常量;轨道板、底座板、CA 砂浆层(砂浆层不开裂)都为“纵连”轨道结构,轨道板、底座、CA 砂浆固结为一体能够承受外界拉、压作用;主要探讨槽形梁桥的结构噪声,故忽略桥墩的影响,在数值分析模型中桥墩的模拟采用线性弹簧模拟。

在分析模型中,将钢轨视为 Euler 梁,用梁单元模拟;槽形梁梁体、轨道板、CA 砂浆层均用实体单元模拟,为避免病态网格的出现,采用体扫掠法划分将其划分为大小合适的六面体单元;连接钢轨与轨道板的扣件采用间距为 0.625 m 的离散弹簧阻尼

单元模拟。主要结构参数见表 1。

表 1 槽形梁模型主要结构参数表

结构	弹性模量/MPa	泊松比	体积质量/(kg/m³)
桥梁	$3.45 \times 10^4$	0.20	$2.6 \times 10^3$
钢轨	$2.10 \times 10^5$	0.30	$7.83 \times 10^3$
轨道板	$3.90 \times 10^4$	0.15	$2.50 \times 10^3$
CA 砂浆	$3.60 \times 10^3$	0.20	$1.30 \times 10^3$

槽形梁的截面形式参照某拟建高架轨道交通选用的简支槽形梁设计图纸,其有限元模型如图 2 所示。各项模型参数经过多次调试,能满足 GB 50157—2013《地铁设计规范》的要求。

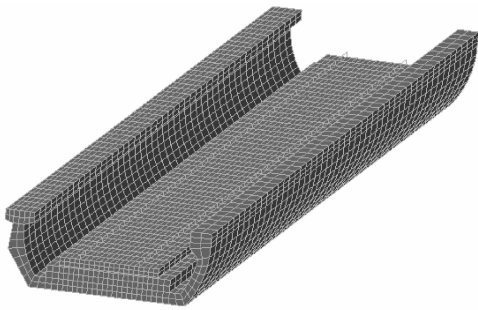


图 2 轨道交通槽形梁有限元模型

## 1.3 轨道交通槽形梁边界元模型

瞬时边界元法是基于有限元法求解的桥梁瞬态动力响应结构通过插值的方法分配到桥梁结构声学边界元网格上作为边界条件,然后求解出槽形梁的瞬态声辐射特性。

槽形梁的表面为封闭的边界表面,通过对其离散,可以得到边界元求解方程:

$$Ap(r_a) = Bv_n(r_a) \tag{1}$$

式中:

$A$ 、 $B$ ——系数矩阵;

$p(r_a)$ ——封闭边界表面  $\Omega_a$  的声压;

$v_n(r_a)$ ——封闭边界表面  $\Omega_a$  的速度。

槽形梁表面外部无限域  $V$  内任意一点的声压  $p_0(r)$  可以通过 Helmholtz 积分方程求得。

瞬时边界元法用于计算桥梁结构振动声辐射问题时,不仅能够反映声压在时间域的分布,并且能够合理反映列车荷载作用下桥梁辐射噪声情况,同时避免了采用模态叠加法时出现的模态截断误差,与稳态边界元相比,避免了对边界条件进行稳态简化,计算精度更有保障。

因此,基于瞬态边界元理论建立了槽形梁结构

声辐射边界元模型如图 3 所示。在进行瞬态边界元分析计算时,边界元网格必须是三角形网格,故采用自由网格划分。

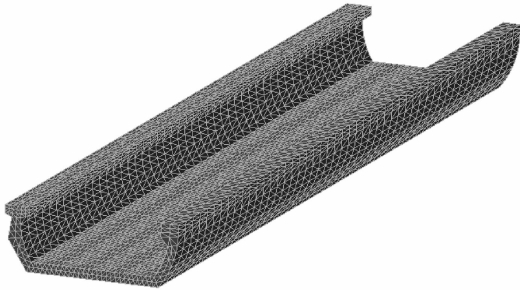


图 3 轨道交通高架槽形梁边界元模型

1.4 车桥耦合模型

为了避免车桥耦合振动分析交叉迭代计算量较大的弊端,基于多体动力学理论,建立了精细化车桥耦合的空间动力学分析模型。地铁列车模型是在参照了国内地铁 B 型车的结构参数及动力学参数的基础上,做了一些合理简化,通过 SIMPACK 软件建立的。车辆模型的基本参数,见表 2。每节地铁 B 型车一共考虑了 34 个自由度,其中,假定每节地铁 B 型车数值分析模型由 1 个车体、2 个转向架、4 个轮对等刚体组成。车辆刚体、转向架刚体考虑了伸缩、横摆、浮沉、点头、侧滚、摇头 6 个自由度,轮对考虑了 4 个自由度。轮对和转向架以及转向架和车体之间分别通过一系、二系弹簧连接,轮轨接触采用单点非线性弹性接触。

表 2 地铁列车基本参数

车型	轴数	平均轴重/ t	车辆定距/ m	轨距/m	固定轴距/ m
B 型	4	13	12.6	1.435	2.2

通过多体动力学软件 SIMPACK 和有限元软件 ANSYS 分别建立了钢轨、扣件、轨道结构等的槽形梁桥有限元模型和包含了轮对、转向架、车体等部(构)件的多刚体系统列车车辆模型。将槽形梁桥有限元模型作为柔性体导入多体动力学软件 SIMPACK 中,同时,导入槽形梁桥模态分析和子结构分析的结果文件,利用 SIMPACK 软件中柔性轨道模块,实现列车模型和桥梁模型的共同求解。

其中,列车模型和槽形梁桥有限元模型作为两个系统,分别求解轮流迭代。通过轮轨接触之间的离散点实现车桥耦合模型之间位移、速度以及相互作用力的数据交换。此外,为了控制列车车辆系统

和桥梁系统所有自由度的计算结果相对于前一迭代步的误差都不超过系统迭代控制误差精度的要求,文中控制精度取  $10^{-4}$ 。

2 轮轨激振力的获取和加载

基于车桥耦合模型,采用联合仿真法,获取轮轨激振力。采用地铁 B 型车 6 节编组模拟加载,计算速度为 80 km/h,将列车实际运行过程简化为一系列随时间移动的集中力荷载,采用节点加载方式分析高架桥槽形梁桥的结构噪声辐射特性,每节车辆按轮对左右对称分布共 8 个集中力荷载,加载时间步长为 0.005 s,加载方式如图 4 所示。

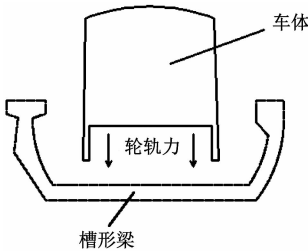


图 4 轮轨激振力加载方式

3 结构噪声的影响参数分析

3.1 轨道交通高架槽形梁桥声辐射特性分析

将基于车桥耦合模型计算出来的轮轨激振力加载到轨道—槽形梁有限元模型上,进行槽形梁的瞬态动力响应分析,从而求得槽形梁桥的振动响应;随后在 LMS 平台的 Virtual. lab 声学软件中建立边界元模型,并将槽形梁桥有限元模型各节点的振动响应通过插值的方法导入到槽形梁桥声学边界元网格上作为边界条件,采用瞬时边界元法对轨道交通槽形梁结构噪声瞬时辐射特性进行预测分析。

图 5、图 6 分别给出了列车以 80 km/h 的时速通过桥梁时的整个桥梁振动变化情况以及声场、声压的变化情况。其中图 5 为第一节列车刚上桥时槽形梁桥的振动情况,图 6 为第一节车第一个转向架

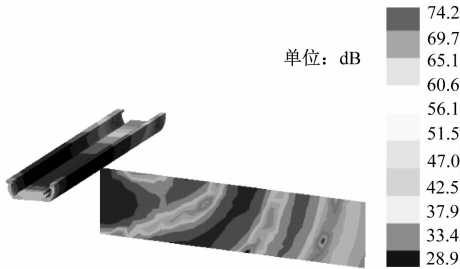


图 5 0.65 s 时刻桥梁振动变化云图

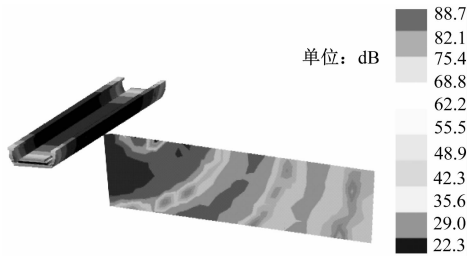


图6 2.7 s时刻桥梁振动变化云图

位于桥梁跨中附近时刻槽形梁桥的振动与瞬时辐射噪声情况。

从图5、图6可知:列车以80 km/h的速度通过槽形梁的整个过程中,在任何位置、任何时刻的声压级都是一个迅速变化的量;跨中截面各个场点的瞬时声压级变化较大,但主要集中在槽形梁底板正下方;从总体上来看,距离线路中线越远,声压级越小,但也越发复杂,局部会出现声压级突变的区域。这一分析结果为槽形梁结构振动与辐射噪声问题的深入研究,提供了非常直观的可视化过程。

### 3.2 轨道交通槽形梁桥结构噪声影响分析

为了研究底板厚度对槽形梁桥结构辐射噪声的影响,分别选取梁体正下方距离地面1 m的声学场点1作为近声场考察点,距离线路中心线25 m,且距地面1 m的声学场点2作为远声场考察点进行分析,如图7所示。

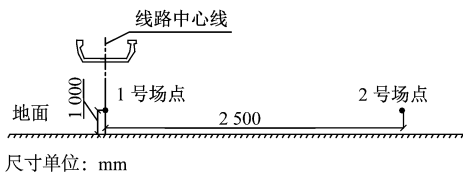


图7 声学场点分布

以跨径30 m槽形梁为标准模型,通过改变底板厚度,得到其他模型。槽形梁结构如图8。其板件厚度和高度满足《混凝土结构构造手册》的要求<sup>[8]</sup>。

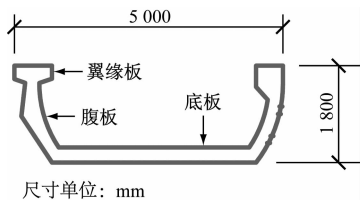


图8 槽形梁结构截面示意图

图9、图10分别给出了近声场、远声场考察点的瞬时声压辐射情况。对比分析图9、图10可知,编组列车在最后一节车到达桥梁跨中时,结构瞬时

辐射噪声出现最大值;高架槽形梁桥底板厚度的增加对梁体正下方的近声场具有较好的降噪效果,最大瞬时声压降低约5 dB,但并非越厚越好,据表3可以发现,当底板厚度从0.32 m增大到0.34 m时,出现瞬时辐射噪声放大现象;增加底板厚度对结构远声场有一定程度的影响,但不明显。

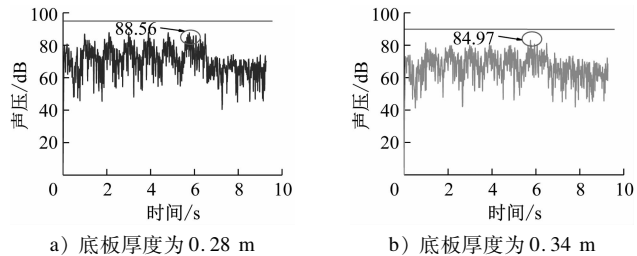


图9 声学1号场点瞬时声压辐射情况

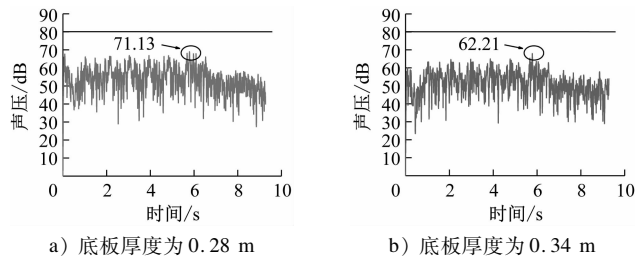


图10 声学2号场点瞬时声压辐射情况

表3 列车以80 km/h过桥时不同底板厚度下的声压最大值

底板厚度/m	近声场1号场点 最大声压/dB	远声场2号场点 最大声压/dB
0.28(原模型)	88.56	71.13
0.30	86.15	70.57
0.32	84.52	69.84
0.34	84.97	69.21

## 4 结论

1) 列车以80 km/h的速度通过槽形梁的整个过程中,在任何位置、任何时刻的声压级都是一个迅速变化的量。

2) 轨道交通槽形梁结构噪声主要集中在底板附近,针对槽形梁桥采取减振降噪措施时,可优先考虑桥梁底板结构。

3) 距离线路中线越远,声压级越小,但也越复杂,局部会出现声压级突变的区域。

4) 高架槽形梁桥底板厚度的增加对梁体正下方的近声场具有较好的降噪效果;对结构远声场,

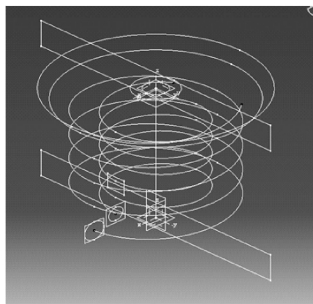
(下转第81页)

驱动生成轴箱弹簧的子骨架和零部件的参数化模型;最后再进行轴箱弹簧的装配。轴箱弹簧的装配包括两个方面:一个方面是组成轴箱弹簧的零部件与轴箱弹簧子骨架的装配,通过这个装配来生成完整的轴箱弹簧;另外一个方面是轴箱弹簧与转向架的顶层基本骨架的装配,通过这个装配来确定轴箱

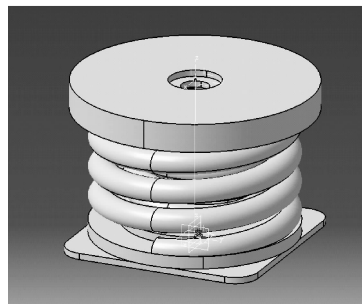
弹簧在整个转向架中的具体位置。如果是修改模型,就只需要读取设计界面上的参数,使用这些参数重新驱动生成模型即可。输出项为轴箱弹簧子骨架和轴箱弹簧,如图10所示,结果表明转向架三维骨架设计方法是可行的,骨架模型是正确的。



a) 弹簧参数



b) 弹簧子骨架



c) 轴箱弹簧

图10 轴箱弹簧参数化设计与验证

## 4 结语

高速列车转向架涉及零部件数量多,结构复杂,并且多数零部件重用度高,对一些结构外形大致相同的零部件采用基于CATIA CAA软件平台的三维骨架设计方式,可以大大减轻设计工作量,设计出一族产品。以顶层基本骨架(TBS)为设计核心的三维骨架设计方法,建立了转向架三维骨架模型。随着需求的改变,三维骨架设计对实现转向架设计参数变更在各个模块零件之间的有效的传递具有重要的意义。

## 参考文献

- [1] 柯常忠,谢少波. 基于参数化技术的自顶向下设计[J]. 中国制造业信息化, 2007, 36(3): 50.

- [2] 水俊峰,吴宗佳,陈树晓等. 基于SolidWorks的自顶向下装配与参数化技术[J]. 机械工程与自动化, 2007(5): 9.
- [3] 齐从谦. TBS模型及其在模具设计制造中的应用[C] // 中国机械工程学会. 2007年中国机械工程学会年会论文汇编. 北京: 中国机械工程学会, 2007.
- [4] 张长. 基于CATIA软件平台的自顶向下参数化装配设计[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2007, 25(1): 83.
- [5] 邓平. 基于三维的机械系统Top-Down设计关键技术[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
- [6] 张卫华. 动车组总体与转向架[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- [7] 朱朋飞. 基于TBS的高速列车转向架变型设计系统开发[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [8] 崔琼瑶, 齐从谦. 基于参数化技术的自顶向下设计及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(9): 1087.

(收稿日期: 2018-01-23)

(上接第62页)

有一定程度的影响,但并非越厚越好,其最佳值有待进一步确定。

## 参考文献

- [1] Li Q, XU Y L, WU D J. Concrete bridge-borne low-frequency simulation based on train track bridge dynamic interaction[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 331(10): 2457.
- [2] 张鹤,谢旭,山下幹夫. 交通荷载下的钢箱梁桥梁振动辐射瞬态噪声评估[J]. 振动工程学报, 2011, 24(3): 221.
- [3] 张迅,李小珍,刘全民,等. 混凝土箱梁的结构噪声及其影响因素[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(3): 409.

- [4] 张迅,李小珍,刘全民,等. 高速铁路桥梁结构噪声的全频段预测研究(II): 试验验证[J]. 铁道学报, 2013, 35(2): 87.
- [5] 李克冰,张楠,夏禾,等. 高速铁路32 m简支槽形梁桥结构噪声分析[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(4): 52.
- [6] 韩江龙,吴定俊,李奇. 板厚和加肋对槽型梁结构噪声的影响[J]. 振动工程学报, 2012, 25(5): 589.
- [7] 方小华,谷爱军,吴建峰. 轨道交通简支箱梁桥振动传递特性分析[J]. 都市快轨交通, 2013, 26(3): 84.
- [8] 王文栋. 混凝土结构构造手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

(收稿日期: 2018-03-29)