第37卷 第1期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 37 No.1

2024年3月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Mar. 2024

钢板结合连续梁桥结构噪声分析

邢 占¹, 黄新博¹, 陈致远¹, 林玉森^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室,河北石家庄 050043) 摘要:为了探究钢板结合梁桥的振动噪声,建立车-轨-桥耦合动力分析模型,获得了列车与 桥梁的动力反应,后将此动力反应作为声学边界条件求解得到了钢板结合梁桥的结构噪声辐 射,并对噪声辐射影响参数进行了探究。研究表明,列车过桥时,桥梁的结构位移呈现出周期性 变化,各测点的竖向加速度均大于横向加速度;全桥结构噪声表现为全频段内均有衰减,高频区 段衰减速率较低频段快;当车速提高时,各场点的总体声压级逐渐变大,车速从 200 km/h 升至 260 km/h 时,各场点声压级的上升幅度更大;双向行车时总体声压级显著增加,但各板件在峰 值声压级时的贡献量比例无显著变化;有板肋时,顶板声压级贡献量较上翼缘板的更大,无板肋 时则相反。添加板肋能够对局部结构进行优化,但对于整体的降噪效果影响不大。本桥板肋布 置间距宜在 5.2 m 左右。

关键词:钢板结合连续梁桥;车轨桥耦合振动;结构噪声;降噪

中图分类号: U441.3 文献标志码: A 文章编号: 2095 - 0373 (2024) 01 - 0031 - 08

0 引言

钢板结合连续梁桥相比于其他桥梁有着跨度大、自重轻等优点,但因使用了钢结构其向空间环境中 辐射的噪声频带更宽、传播能力更强,这种噪声污染的环境会对人们生理和心理造成严重影响。因此,研 究钢板结合连续梁桥的结构噪声具有重要意义。RAYLEIGH^[1]提出了无限障板上计算平板辐射声场的 Rayleigh 积分法。HARDY^[2]基于大量试验,提出了车辆激励下桥梁的噪声表达式。CROCKETT et al^[3]采用有限元方法对混凝土简支梁桥的结构噪音辐射进行了数值模拟,但其结果存在着计算准确度 和效率不高等问题。BREBBIA^[4]导出了边界元计算方法,并对其进行了详细介绍。THOMPSON et al^[5-6]对钢桥的结构噪声进行了有限元方法(Finite Element Method,简称 FEM)和统计能量分析法 (Statistical Energy Analysis,简称 SEA)的研究,结果表明,在 40 Hz 频率范围内,SEA 法的计算精度较 高,效率较高。张迅^[7]提出了全频段噪声预测方法,验证了"强耦合"假设对子系统间耦合损耗因子求解 的简化作用。刘全民^[3]对铁路结合梁和钢桁梁的结构振动噪声辐射规律进行了探究,首次将约束阻尼层 应用于铁路结合梁桥的噪声控制中,经实地试验,证明其正确性。马广^[3]对客运专线钢板结合梁进行了 探究,结果表明,该桥结构噪声属于中高频,钢腹板的贡献量在 50%以上,对该类型桥梁的结构噪声研究 有重要的参考价值。杨得旺等^[10]以节点位移作边界条件分析了高铁简支箱梁的结构噪声,主要从板厚、 翼缘斜撑和横隔板 3 个方面来探究对桥梁结构噪声的影响,为桥梁减振降噪提供了理论依据。李小珍 等^[11]总结了近年来铁路桥梁结构噪声辐射的研究现状,并分析了未来该领域的发展方向。

1 桥梁动力响应与噪声计算理论

1.1 桥梁动力响应理论

车桥动力模型包括车辆模型、桥梁模型和轨道模型。通过车耦合模型求解扣件力,将扣件力作为求

收稿日期:2023-09-18 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20230240 作者简介:邢占(1998—),男,硕士研究生,研究方向为结构动力学。E-mail:571134791@qq.com 邢占,黄新博,陈致远,等.钢板结合连续梁桥结构噪声分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2024,37(1):31-38. 解结构噪声的外部激励。整个车桥动力响应运动方程为

$$\boldsymbol{M}_{B}\ddot{\boldsymbol{u}}_{B} + \boldsymbol{C}_{B}\dot{\boldsymbol{u}}_{B} + \boldsymbol{K}_{B}\boldsymbol{u}_{B} = \boldsymbol{P}_{B}$$

$$\tag{1}$$

式中, \ddot{u}_B 、 \dot{u}_B 和 u_B 分别为桥梁的加速度、速度、位移列向量; M_B 、 C_B 、 K_B 分别为桥梁结构的质量、阻尼、刚度矩阵。

1.2 桥梁声辐射理论

把钢板结合梁看成是多个长方形的板件,把每个长方形的板件看成一个子系统。设板件一条边的长为 *a*,另一条边长为 *b*,其辐射声功率为^[12]

$$W_{i} = \rho_{\rm air} c_{\rm air} \sigma_{i} S_{i}(\overline{v_{i}^{2}}) \tag{2}$$

式中, σ_i 为该子系统的辐射效率; ρ_{air} 为空气流体密度; c_{air} 为声速; S_i 为该子系统的表面积; \overline{v}_i^2 为均方速度。 设声压测点 *C* 到各子系统的中心垂向距离为 *r*。

当 $r \leq a/\pi$,即测点 C 距离声源较近,此时声源发射不衰减平面波,则

$$(\overline{p}_i^2)_C = \frac{\pi \rho_{\rm air} c_{\rm air} W_i}{4ab} \tag{3}$$

 $\exists a/\pi \leq r \leq b/\pi$,即测点 C 距离声源较远,此时辐射声波的声压级会随着距离的增加而线性减小,则

$$(\overline{p}_i^2)_C = \frac{\rho_{\rm air} c_{\rm air} W_i}{4br} \tag{4}$$

当 $r \ge b/\pi$,即测点 C 距离声源很远,此时测点 C 的均方声压为

$$(\overline{p}_i^2)_C = \frac{\rho_{\rm air} c_{\rm air} W_i}{4\pi r^2} \tag{5}$$

由式(3)~式(5)可知,桥梁外声场任一点的声压级可通过线性叠加求得。

2 桥梁动力响应分析

2.1 工程概况

桥模型为一座三跨连续钢板结合梁桥,该桥双 线间距 4.6 m。桥跨布置为(32+40+32) m,桥梁 高度 2.9 m,纵梁高度 2.5 m,桥面板宽 12.4 m,翼 缘宽 1.2 m,腹板厚 0.024 m,翼缘厚 0.05 m,4 m 设一道横联。桥梁截面尺寸详见图 1。

车辆模型选用 CRH2 型列车,列车车辆采用 8 编组(拖+动+动+动+动+动+动+抽)形式。 单节列车模型,见图 2。列车运行速度为 260 km/h,为使频率响应在 20~2 500 Hz,设置求解时 间步长为 0.000 2 s,此时最大频率可达到 1/(2× 0.000 2)=2 500 Hz,满足计算要求。

2.2 桥梁动力响应

采用 ANSYS 进行了桥梁的建模,采用 UM 进行了列车和轨道的建模。最终,将 ANSYS 中 桥梁模型导入 UM 后,展开车辆、轨道和桥梁模 左线中线 右线中线

图 1 钢板结合梁桥横截面图(单位:cm)



图 2 车辆模型

型的综合模拟与分析,振动噪声激励仅考虑竖向激励(使用的是 CRH2017 轨道不平顺谱,在此情况 下列车对轨道的竖向激励远大于横向激励,横向激励可以忽略不计,故仅考虑竖向激励)。钢轨为 R60 型号,轨底坡为 1/40 rad,模型使用 CRH2017 轨道不平顺谱来分析,拖车和动车轮对的竖向轮 轨力如图 3 所示。



3 桥梁结构噪声分析

3.1 模型建立

利用 VA-one 建立(32+40+32) m 钢板结合连续梁整体模型,板块都使用了板单元进行模拟。 桥梁简化处理后各尺寸为:桥面板 0.2~0.487 m,下翼缘板 50 mm,腹板 24 mm。在应用混合方法 (FE-SEA)与统计能量方法(SEA)前,在全频率范围内的结构噪声研究中,应该对照每个子系统所对 应的弯曲模态数(N)来划分求解频段: $N \le 1$ 时,定为低频;1 < N < 5时,定为中频; $N \ge 5$ 时,定为 高频。

(1)FE-SEA 混合模型。在 20 ~160 Hz 的频率下,利用混合法(FE-SEA),即建立桥梁顶板与上翼缘 板的有限元模型,在 VA-One 中设定顶板和上翼缘板为 FE 板,网格划分为 0.248 m,腹板和下翼缘板设 定为 SEA 板子系统。将频域下 1/3 倍频程的扣件力施加至车桥耦合模型中轨道扣件位置处,即按照轨道 扣件间距 0.6 m 施加到桥梁的桥面板上。

(2)SEA 统计能量模型。在 160 ~2 500 Hz 的 频率下,利用统计能量法(SEA),全桥子系统采用 SEA 板建立,荷载激励布置与混合模型相同,无需 划分声场网格。根据文献[13]确定了场点 *M*1 的位 置,同时考虑到居民住房在桥体的侧下方,*M*2、 *M*3、*M*4 场点设在高出地面 1.5 m 处,各场点都在 跨中横截面上。具体场点位置如图 4 所示。

3.2 桥梁结构噪声预测

3.2.1 场点声压级

车速为 260 km/h 时,各场点声压级测试结果 如图 5 所示。由图 5 可知,M1 与 M2 场点声压级 较大,M4 场点声压级最小,在 M2 和 M3 之间,噪 声平均的衰减速率为 0.31 dB(A)/m,M3 和 M4之间,噪声平均的衰减速率为 0.13 dB(A)/m, π 和 发现,近场声压级衰减较远场快;此外,桥梁结构的 噪声在全频段都有衰减,且高频段衰减速率较低频 段快;M1 的最大声压级达到了 85.8 dB(A)。由于 A 级计权主要对低频段的噪声辐射有所折减,所以 该桥的全频段结构噪声 A 计权声压级范围主要为 80~1000 Hz。



33

3.2.2 贡献量分析

辐射贡献见图 6。当列车经过该桥时,在小于 400 Hz 频段内,顶板、上翼缘板对噪声的贡献较大;在 500~2 500 Hz 频段,腹板的噪声辐射贡献量更大,在此频段内,下翼缘板的噪声辐射贡献量有所增加。 本桥总体噪声声压级贡献量对应的峰值频率为 100 Hz 和 630 Hz 左右;在 80~1 000 Hz 频段,噪声辐射 影响最集中。全频段下,各板件声压级有着相近的变化趋势。在中心频率超过 630 Hz 后,各个子系统的 声压级都会随其增大而迅速降低。



图 6 各场点噪声频谱图

列车以 260 km/h 速度通过该钢板结合梁桥时,在峰值频率下,各板块声压级贡献量见表 1。峰值频 率 630 Hz 处,各场点的总体声压级分别为:M1 处 88.1 dB(A)、M2 处 86.2 dB(A)、M3 处 79.6 dB(A)、 M4 处 68.1 dB(A)。可见该桥整体结构辐射噪声较大,有必要进行减振降噪研究;腹板、上翼缘板和顶板 3 部分结构辐射噪声贡献最大,噪声贡献量大小为腹板>上翼缘板>顶板>下翼缘板,应着重考虑对腹 板、上翼缘板或顶板进行减振降噪控制。

峰值频率下的市压级贡献景

对应部位	<i>M</i> 1		M2		<i>M</i> 3		M4	
	声压级贡献 量/(dB(A))	对总体的 贡献量/ %	声压级贡献 量/(dB(A))	对总体的 贡献量/ %	声压级贡献 量/(dB(A))	对总体的 贡献量/%	声压级贡献 量/(dB(A))	对总体的 贡献量/ %
顶板	80.6	14.59	78.7	13.60	71.4	13.22	60.5	12.36
上翼缘板	80.8	17.56	78.9	15.16	72.1	15.63	60.8	15.78
腹板	85.7	56.98	83.8	60.21	77.2	59.69	65.8	60.34
下翼缘板	78.5	10.87	76.6	11.33	70.0	11.46	58.5	11.52

34

耒 1

4 板肋对结构辐射噪声的影响

4.1 模型建立

为了探讨板肋对噪音的影响规律,建立了添加板肋的模型如图7所示,采用三角形状的板肋,单侧 布置27块板肋,每2块板肋间隔4m,板肋材料参数同腹板,板厚24mm,板肋添加后不改变桥梁其他 参数。



图 7 (有板肋)桥梁声学模型

4.2 场点声压级

2 种工况下,即列车驶过无板肋和有板肋的桥梁时,各场点的声压级如图 8 所示。无板肋时,各场点 的最大声压级为:M1 处 88.1 dB(A)、M2 处 86.2 dB(A)、M3 处 79.6 dB(A)、M4 处 68.1 dB(A);有板肋 时,各场点的最大声压级为:M1 处 86.7 dB(A)、M2 处 84.4 dB(A)、M3 处 77.8 dB(A)、M4 处 66.8 dB (A)。无板肋结合梁桥辐射的噪声较有板肋时略大,在 $20\sim2500$ Hz 全频段内,2 种工况下,各场点声压 级变化趋势基本一致,峰值声压均在 630 Hz 附近取得。



图 8 2 种工况下各场点声压级频谱图

4.3 声压级贡献量

计算了顶板、上翼缘板、腹板和下翼缘板各子系统在无板肋和有板肋 2 种工况下对场点 $M_1 \sim M_4$ 的 A 计权声压级频谱图,如图 9 所示(场点 M_2 、 M_3 和 M_4 的变化和规律和 M_1 一样)。



图 9 场点 M1 噪声频谱图

由图 9 可知,当列车通过无板肋钢板结合连续梁桥时,顶板在 500 Hz 处取得声压级贡献的最大值, 上翼缘的峰值频率在 500 Hz 与 630 Hz 之间波动。腹板和下翼缘板所产生的声压级有着明显的峰值,在 630 Hz 处取得最大值。顶板在 2 种工况下,全频段的声压级变化不大,腹板、上翼缘板和下翼缘板的全频 段声压贡献值仅在 500~2 500 Hz 内略有下降,2 种工况下各子系统对各场点的声压级贡献量变化较小, 添加板肋对钢板结合连续梁桥的总体声压级有降低。

场点 M1 处、M2 处有板肋和无板肋声压贡献量见表 2、表 3。M3、M4 的规律一样没有列出。

在2种工况下,中心频率 630 Hz时,腹板和下翼缘板的峰值声压贡献量比例无明显变化;有板肋时, 顶板的贡献量比例较无板肋时有所增大,而上翼缘板的声压贡献量比无板肋时有所减小,总体声压级有 降低。有板肋时贡献量:腹板>顶板>上翼缘板>下翼缘板;无板肋时贡献量:腹板>上翼缘板>顶板> 下翼缘板。

对应部位	无板肋	b			
	声压级贡献量 /(dB(A))	对总体的贡献量/%	声压级贡献量 /(dB(A))	对总体的贡献量/%	
顶板	80.6	14.59	80.5	19.62	
上翼缘板	80.8	17.56	78.9	13.88	
腹板	85.7	56.98	83.5	56.34	
下翼缘板	78.5	10.87	76.7	10.16	

表 2 场点 M1 峰值频率对应的声压级贡献量

表 3 场点 M2 峰值频率对应的声压级贡献量

对应部位	无板肋	5	有板肋		
	声压级贡献量 /(dB(A))	对总体的贡献量/%	声压级贡献量 /(dB(A))	对总体的贡献量/%	
顶板	78.7	13.30	78.6	17.75	
上翼缘板	78.9	15.16	77.1	12.22	
腹板	83.8	60.21	81.6	59.61	
下翼缘板	76.6	11.33	74.8	10.42	

4.4 板肋最佳布置间距

工程中要求在达到一定减振降噪效果的同时能够 最大限度的节约用材。本节以板肋间距分别为 2.0 m (单侧 53 块板肋)、4.0 m(单侧 27 块板肋)、5.2 m(单 侧 21 块板肋)、8.0 m(单侧 14 块板肋)来探究不同板 肋间距下的降噪效果,以寻求合理的板肋布置间距。 将各板肋间距下的 $M2 \sim M4$ 3 个场点的总体声压级进 行对比,边界条件与参数设置相同。各板肋间距下场 点 $M2 \sim M4$ 的峰值频率下总体声压级如图 10 所示。

由图 10 可知,添加板肋后各场点峰值频率下的总体声压级均有不同幅度的降低。板肋间距为 2.0 m时,相比无板肋时,总体声压级降低了 0.6 ~ 3.5



图 10 有无板肋总体声压级对比图

dB(A);板肋间距为 4.0 m,总体声压级降低了 $1.3 \sim 1.8$ dB(A):板肋间距为 5.2 m 时,总体声压级降低 了 $1.4 \sim 1.6$ dB(A);板肋间距布置为 8.0 m 时,总体声压级降低了 $0.2 \sim 0.7$ dB(A)。可以看出板肋间距 为 2.0 m 时,总体声压级降幅反而小于间距为 4.0 m 和 5.2 m 时,这是因为板肋间距越小所需布置的板 肋数增多,使得板肋面积增大,由板肋产生的结构噪声影响也会逐渐增大。板肋间距为 8.0 m 时其降噪 效果不及间距为 4.0 m(单侧 27 块板肋)和 5.2 m(单侧 21 块板肋),同时板肋布置间距为 4.0 m 和 5.2 m 时,2 种情况下结构噪声相近,且间距为 5.2 m 时所需布置的板肋数更少,本桥合理板肋布置间距应为 5.2 m 最优。

5 结论

(1)近场声压级衰减较远场快;桥梁结构的噪音在整个频率范围都有明显的衰减,高频区段衰减速率 较低频段快;每一个场点处都获得了一个在 630 Hz 的中心频率下的峰值声压级;该桥的全频段结构噪声 A 计权声压级范围主要为 80~1 000 Hz。

(2)无板肋时,噪声贡献量大小为腹板>上翼缘板>顶板>下翼缘板,应着重考虑对腹板、上翼缘板 或顶板进行减振降噪控制;有板肋时,顶板的贡献量比无板肋时有所增大,而上翼缘板的声压贡献量比无 板肋时有所减小。

(3)添加板肋能够降低钢板结合连续梁桥的总体声压级贡献量。峰值声压级下,2种工况中腹板的贡献量均最大,顶板和上翼缘板的贡献量大小有所变化。有板肋时,顶板声压级贡献量比上翼缘板更大;无板肋时,顶板声压级贡献量比上翼缘板小。

[1]RAYLEIGH L. The theory of sound, volume 1[M]. London: Macmillan and Co., 1877.

[2]HARDY A E J. Noise from railway bridges[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 1999, 213(3): 161-174.

[3]CROCKETT A R, PYKE J R. Viaduct design for minimization of direct and structure-radiated train noise[J]. Journal of

Sound and Vibration, 2000, 231(3): 883-897.

- [4]BREBBIA C A. The Boundary Element Method for Engineers [M]. London: Pentech Press, 1984.
- [5]THOMPSON D J, JONES C J C. Thameslink 2000 Metropolitan Junction to London Bridge noise and vibration studies [R]. Southampton; Institute of Sound and Vibration Research (ISVR), 1997.
- [6] THOMPSON D J, JONES C J C. Thameslink 2000 Metropolitan Junction to London Bridge noise and vibration studies: Investigation of the validity of using SEA to predict bridge noise at low frequencies [R]. Southampton: Institute of Sound and Vibration Research (ISVR), 1997.

[7]张迅. 轨道交通桥梁结构噪声预测与控制研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.

[8] 刘全民. 铁路结合梁桥结构噪声预测及约束阻尼层控制研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.

[9]马广. 客运专线钢板结合连续梁桥结构噪声分析[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(12): 72-76.

[10]杨得旺,李小珍,高慰. 高速铁路简支箱梁结构噪声优化措施[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(增刊 1): 193-198.

- [11]李小珍,郑净,毕然,等. 轨道交通桥梁减振降噪 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43 (增刊 1): 142-151.
- [12]张迅,张健强,李小珍. 混合 FE-SEA 模型预测箱梁低频噪声及试验验证 [J]. 振动工程学报, 2016, 29(2): 237-245.
- [13] International Organization for Standardization. Acoustics-railway applications-measurement of noise emitted by rail bound vehicles: ISO 3095-2013 [S]. Ireland: Institution B S, 2013.

Coupled Vibration and Structural Noise Analysis of Steel Plate Combined with Continuous Girder Axle

XING Zhan¹, HUANG Xinbo¹, CHEN Zhiyuan¹, LIN Yusen^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Road and Railway Engineering Safety Assurance,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to investigate the vibration noise of the steel plate bonded girder bridge, this paper establishes a vehicle-rail-bridge coupled dynamic analysis model to obtain the dynamic response of the train and the bridge, and then solves this dynamic response as the acoustic boundary conditions to obtain the structural noise radiation of the steel plate bonded girder bridge, and investigates the noise radiation impact parameters. The study shows that when the train crosses the bridge, the structural displacement of the bridge shows periodic changes, and the vertical acceleration of each measurement point is larger than the lateral acceleration. The structural noise of the whole bridge shows attenuation in the whole frequency band, and the attenuation rate of the high frequency band is faster than the low frequency band. When the speed increases, the overall sound pressure level of each field point gradually becomes larger, and when the speed increases from 200 km/h to 260 km/h. The rise of the sound pressure level of each field point is the overall sound pressure level increases significantly in two-way traffic, but there is no significant change in the ratio of the contribution of each plate to the peak sound pressure level; with plate ribs. The contribution of the top plate to the sound pressure level is greater than that of the upper flange plate, and the opposite is true when there are no plate ribs. The addition of plate ribs can optimize the local structure, but the overall noise reduction effect is general. The spacing between the plate ribs of this bridge should be about 5.2 m.

Key words: steel plate combined with continuous girder bridge; vehicle-rail bridge coupling vibration; structural noise; noise reduction