



Metro Trans Forum 2019

城市轨道交通桥梁振动噪声辐射理论与减振降噪技术

李小珍



微信关注西南交大桥梁
(扫一扫或长按)

微信: xnjdlx
邮箱: xnjdl@163.com
网站: bridge.swjtu.edu.cn
电话: 028-87600630

西南交通大学 土木工程学院 桥梁工程系
2019年07月



目录

一、 研究背景

二、 结构振动噪声预测方法及模型

三、 桥梁减振降噪控制措施

四、 结论与建议



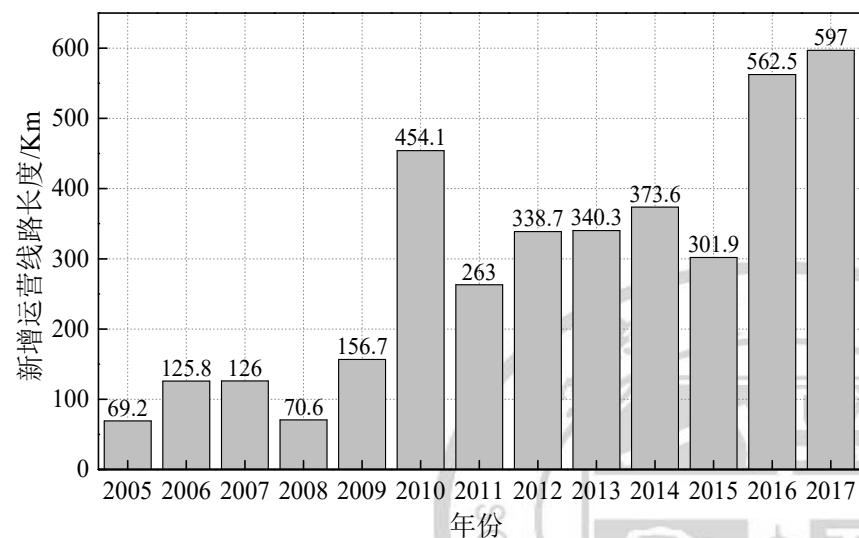


一、研究背景

□ **我国高速铁路的快速发展**：至2018年底，我国高速铁路运营里程达**2.9万公里**，**居世界第一**，高速铁路规划从之前的“**四纵四横**”升级为“**八纵八横**”。

■ **我国城市轨道交通发展迅猛**：据统计，截止2018年12月31日，中国共有**35个城市**开通运营城市轨道交通**181条**，累计总运营线路长达**5766.6km**。

中长期高速铁路网规划图



伴随着高铁和城市轨道交通的迅猛发展，轨道交通振动与噪声问题越来越突出！



一、研究背景

□ 城市轨道交通中高架桥所占比例越来越大，高架桥紧挨居民生活区而修建。



研究目的：揭示高铁/轨道交通桥梁车致振动与噪声的产生机理，提出高铁/轨道交通桥梁减振降噪技术与措施。



一、研究背景

各种城市轨道交通制式



地下铁道

轻轨交通

悬挂列车

城市轨道
交通

有轨电车

单轨交通

中低速磁浮



高温超导磁浮



未来超高速轨道交通





一、研究背景

- ❖ 1969~2000： 169 km
- ❖ 2000年以来，以**每5年翻一番**的速度发展
- ❖ 2016~2020： 6000~7000 km
- ❖ 2021~2030： 1万~1.5万 km（全世界一半）
- ❖ **2020年后200个城市**有潜力发展城市轨道交通
- ❖ 未来有**30年**的大发展





新中国成立以来开通地铁城市 及地铁里程变化情况

年份

1969

总长度 (公里)

54.1

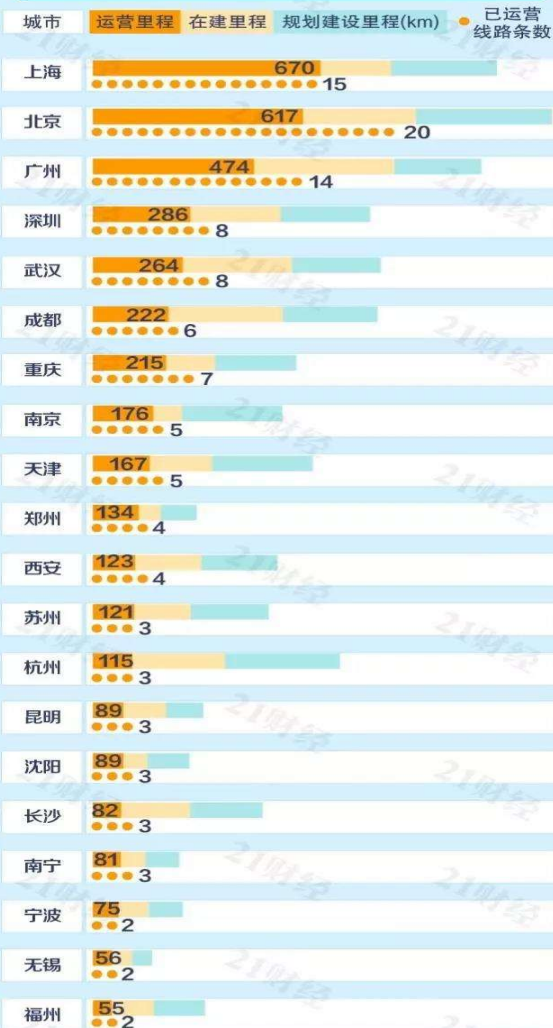


注：数据不含港澳台

21数据新闻实验室出品

数据来源：中国城市轨道交通协会、wind、公开资料整理

国内各城市地铁运营及在建里程及线路情况



2019中国内地城市地铁 4月日均客运量与客运强度情况

城市	日均客运量 (万人次)	每日每公里 客运量(万人次)
北京	1148.3	1.86
上海	1122.5	1.68
广州	899.5	1.90
深圳	599.1	2.10
成都	394.0	1.77
武汉	364.3	1.38
南京	340.5	1.93
重庆	290.8	1.35
西安	262.6	2.12
杭州	177.6	1.55
天津	146.2	0.88
苏州	106.6	0.88
郑州	92.3	0.99
沈阳	87.3	1.48
长沙	74.5	1.53
南宁	63.1	1.19
昆明	58.1	0.66
大连	56.9	1.05
青岛	51.9	1.16
合肥	50.7	0.97
南昌	43.7	0.90
宁波	37.6	0.50
哈尔滨	28.4	1.30
石家庄	25.7	0.90
福州	20.4	0.83
厦门	14.6	0.48
东莞	13.9	0.37
贵阳	13.3	0.39
乌鲁木齐	3.1	0.22

(注：个别城市数据不全，未统计在榜单中)

21数据新闻实验室出品
数据来源：中国城市轨道交通协会、公开资料整理



一、研究背景

轨道交通巨大投资市场

- 2019年的铁路建设投资达到史上最高水平的**8500亿元**;
- 2019年铁路新开工里程预计达到6800公里，比上一年增加45%，其中高铁开工里程控制在3200公里;
- 2018年，30多座城市共花了超过**6000亿元**修建包括地铁在内的城市轨道交通。





一、研究背景

■ 声屏障的综合降噪问题：

深茂高铁因为通过“小鸟天堂”（大榕树）规划区，不得不采用全封闭式声屏障来控制噪声。

铁路行业首次采用全封闭式声屏障！

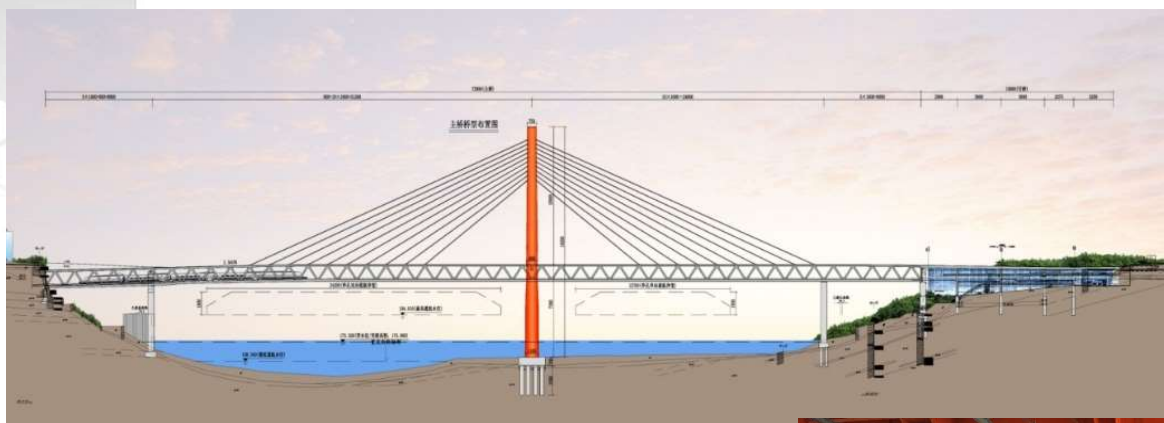
目前高铁只有：
直立式声屏障
半封闭式声屏障





一、研究背景

■ 重庆轨道交通6号线千厮门大桥（已通车）噪声较大问题



全桥铺设现浇轻型、减振垫、无砟轨道、无缝线路来控制轮轨噪声。

但：钢梁引起的结构噪声非常明显
运营开通以来一直遭受沿线居民的投诉。





一、研究背景

■ 重庆轨道交通10号线南纪门大桥：减振降噪问题已影响桥型选择！

桥型：

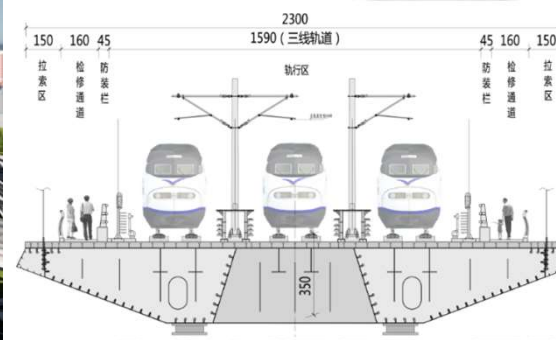
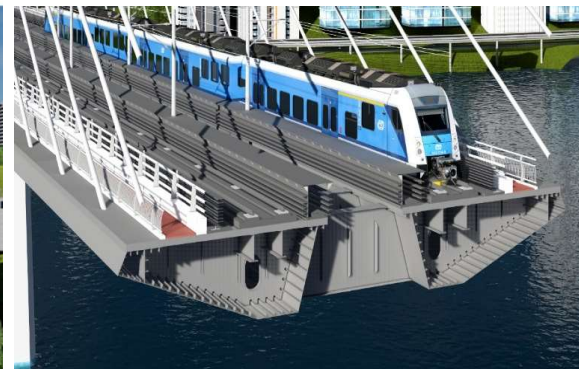
(混凝土梁、钢箱叠合梁)

不让用钢桁梁！

声屏障类型 (直立式、半封闭、全封闭)

轨道结构形式 (钢弹簧浮置板、梯形轨枕、普通轨道)

在此基础上，针对选定的声屏障类型、轨道结构形式和桥型，通过多工况参数分析，完成声屏障、轨道结构和桥梁设计参数的**振动噪声优化**，并配合甲方一完成相关设计工作。



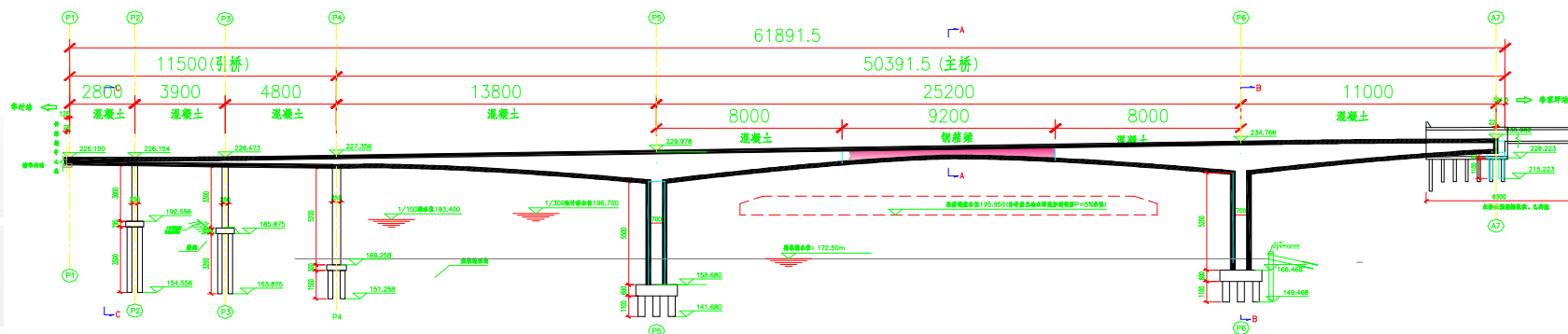


一、研究背景

■ 重庆轨道交通 9号线 嘉华大桥：减振降噪问题已影响桥型选择！



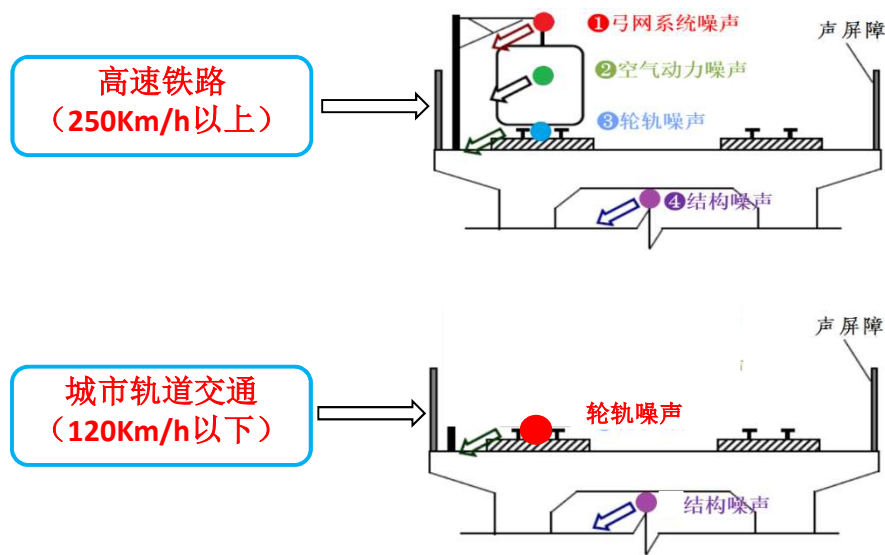
- 全桥长约650米，其中主桥为**连续刚构桥**，长528米，宽12.5米，跨径布置为138+252+138米。
- 中孔采用90m钢箱梁结构，为一座**钢-砼结合桥梁**。



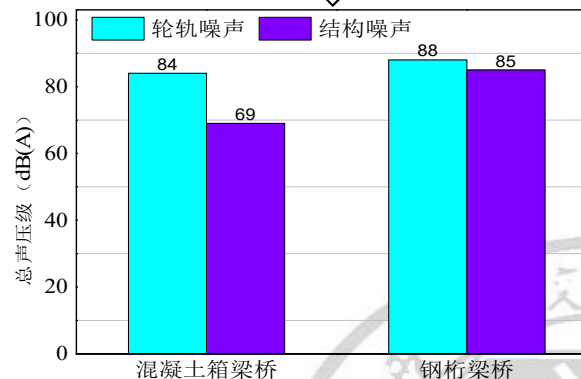


一、研究背景

轨道交通桥梁区段噪声主要由轮轨噪声、空气动力噪声、弓网系统噪声以及桥梁结构噪声四部分组成。在不同运行速度下主要噪声不同。



现场实测混凝土箱梁与钢桁梁桥噪声



城市轨道交通中的主要噪声源为轮轨噪声和桥梁结构噪声；
对混凝土桥，轮轨噪声占主要部分；对钢桥，两种噪声均较大，因此，对钢桥轮轨噪声与桥梁结构噪声都应进行控制。



一、研究背景

近10年来获得重要项目支持:

• 国家自然科学基金

数设阻尼层的轨道交通钢桁梁桥振动与噪声辐射机理与控制研究 (51878565)

轨道交通桥梁结构噪声的全频段预测、评价准则及控制策略研究 (51378429)

基于波动有限元和模态理论的轨道交通混凝土箱梁声辐射机理研究 (51308469)

基于振动带隙和能量传递的轨道-桥梁声辐射系统减振降噪机理研究 (51778534)

• 国家863计划项目子题

高速铁路减振降噪关键技术——高速铁路桥梁结构噪声与桥梁减振降噪装置机理研究

• 四川省教育厅科研项目

高架轨道交通U形梁的振动噪声行为研究 (16ZA0009)

• 四川省科技厅应用基础研究项目

高架轨道交通引起的环境振动及减振研究 (2010JY0026)

• 横向课题

中铁二院: 成灌铁路桥梁振动噪声预测理论与仿真分析研究

广州地铁院: 广州轨道交通桥梁结构噪声预测与控制研究

宁波轨道集团、中铁四院: 轨道交通高架线路减振降噪综合技术研究-以宁奉线为例

中铁四院: 深茂高铁箱梁全封闭式声屏障综合降噪效果及对策研究

重庆轨道集团: 重庆轨道交通十号线南纪门长江大桥轨道结构形式及桥梁噪声研究



➤ 振动与噪声现场测试



成灌铁路典型桥梁振动与噪声测试



成灌铁路
安德车站
振动与噪声
测试



津秦高铁 桥梁振动与噪声测试
2013





➤ 振动与噪声现场测试

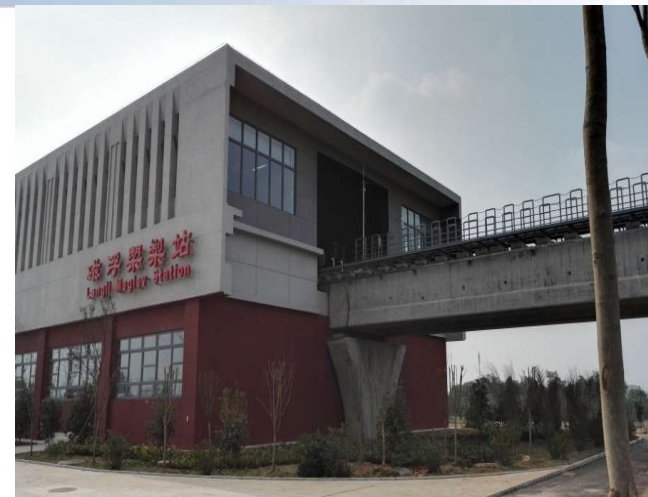


广州轨道交通4、6号线
振动与噪声现场试验（2015年）





➤ 振动与噪声现场测试



长沙中低速磁浮
桥梁与车站
振动与噪声测试
2016年





➤ 振动与噪声现场测试



沪昆高铁半封闭声屏障降噪
现场试验
2015



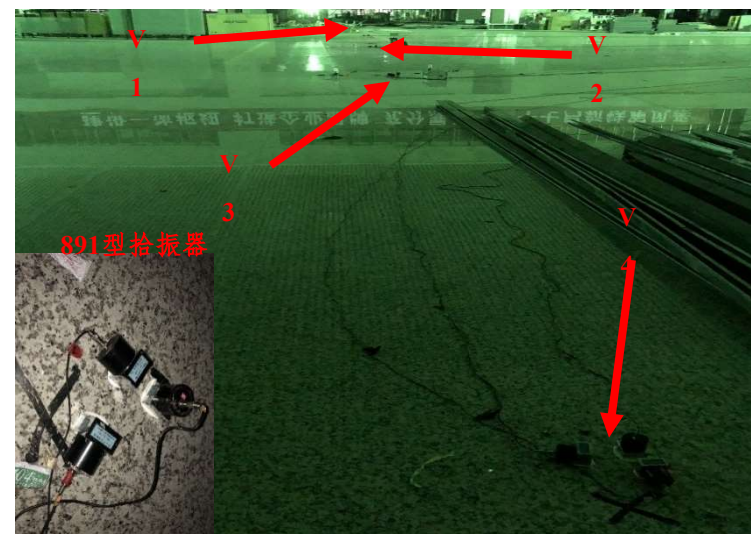
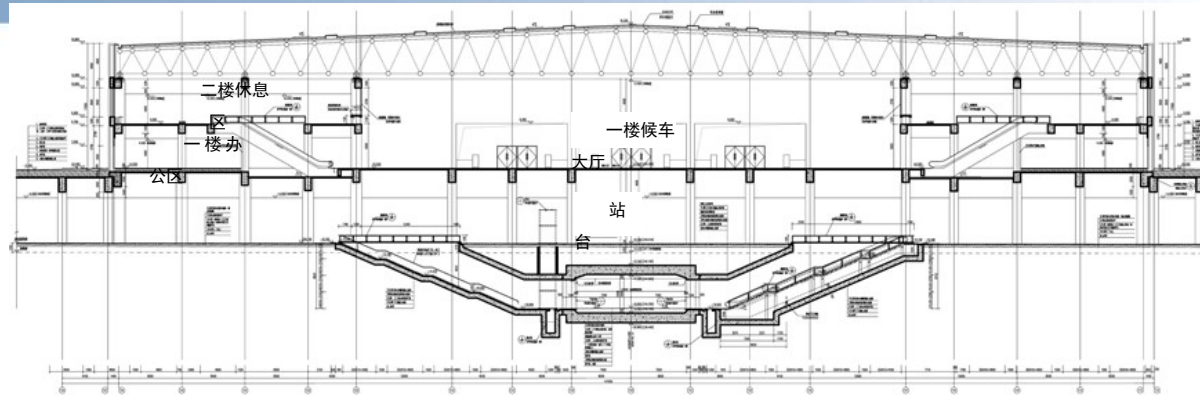
深茂高铁全封闭声屏障
振动与噪声
现场试验：传声器阵列
2015





➤ 振动与噪声现场测试

沙坪坝综合交通枢纽
振动与噪声试验
2018年





➤ 振动与噪声现场测试

深茂高铁全封闭式声屏障 振动与噪声试验 2019年



内部传声器



无声屏障断面



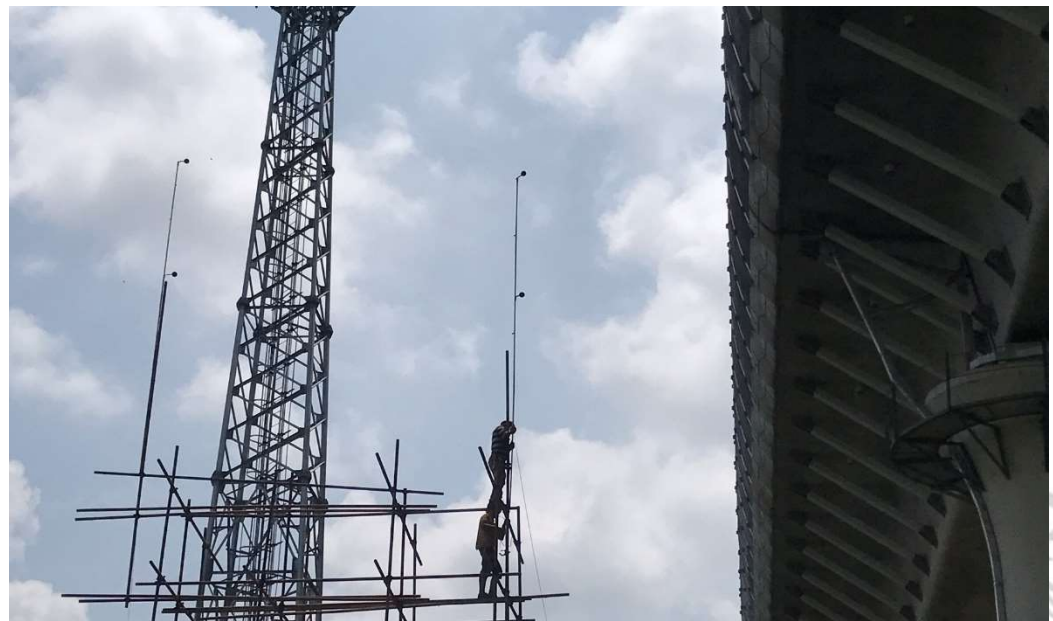


➤ 振动与噪声现场测试

深茂高铁全封闭式声屏障 振动与噪声试验 2019年



金属声屏障断面



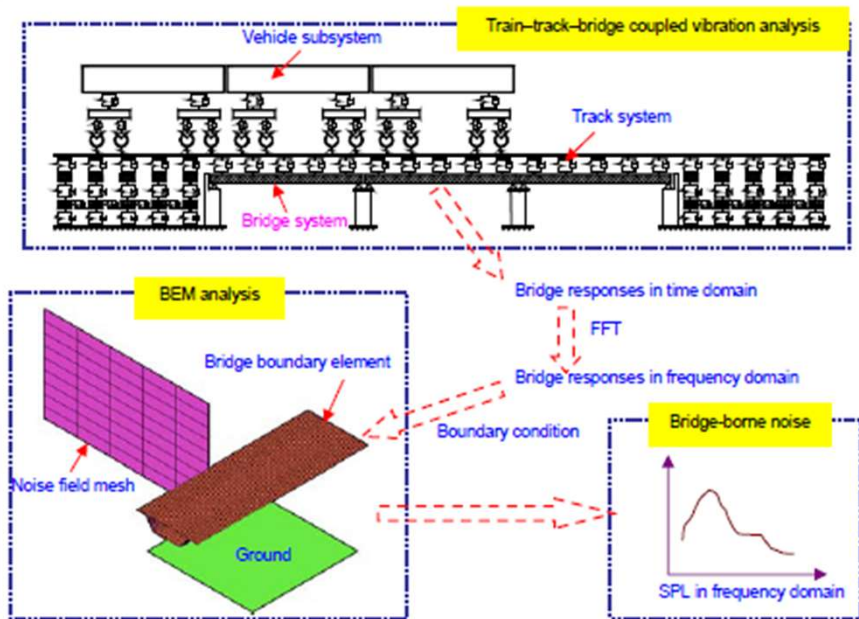
混凝土声屏障断面



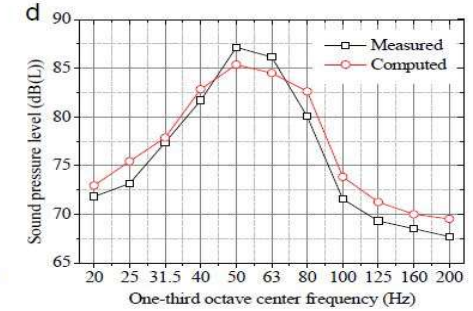
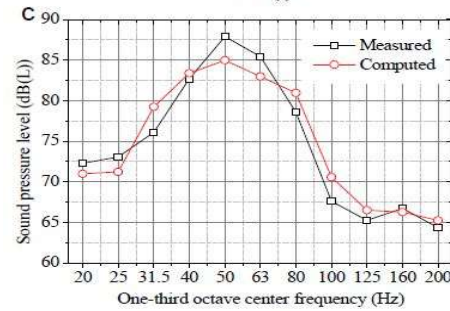
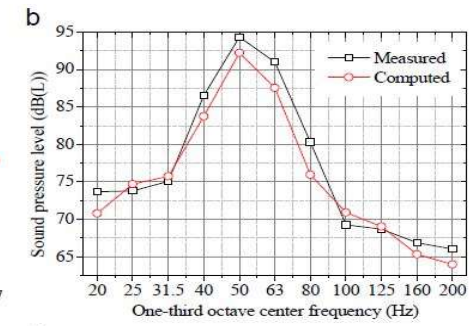
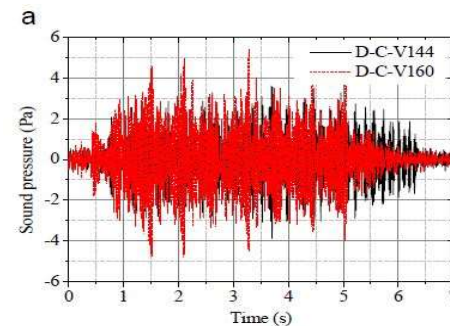
二、结构振动与噪声预测方法及模型——混凝土桥梁

基于列车-轨道-桥梁耦合动力学理论、边界元法和振动声辐射理论，提出了轨道交通混凝土桥梁结构噪声的混合有限元-边界元预测方法：

Hybrid FE-BEM Method



以成灌快铁32m简支箱梁结构噪声实测结果对该预测方法进行了验证



Zhang, Xun, Li, Xiaozhon, Li, Xadong, et al. Train-induced vibration and noise radiation of a prestressed concrete box-girder [J]. **Noise Control Engineering Journal**, 2013, 61(4): 425-435.



二、结构振动与噪声预测方法及模型——混凝土桥梁

基于车-轨-桥耦合振动理论、有限元法、统计能量分析和振动声辐射理论，提出了轨道交通混凝土桥梁结构噪声的混合有限元-统计能量分析预测方法：

Hybrid FE-SEA Method。

研究了混凝土箱梁各板件对结构噪声辐射的贡献量。

箱梁
各板件
对远场
噪声的
贡献量

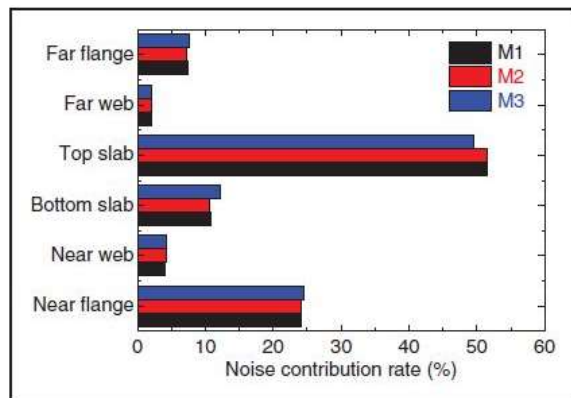
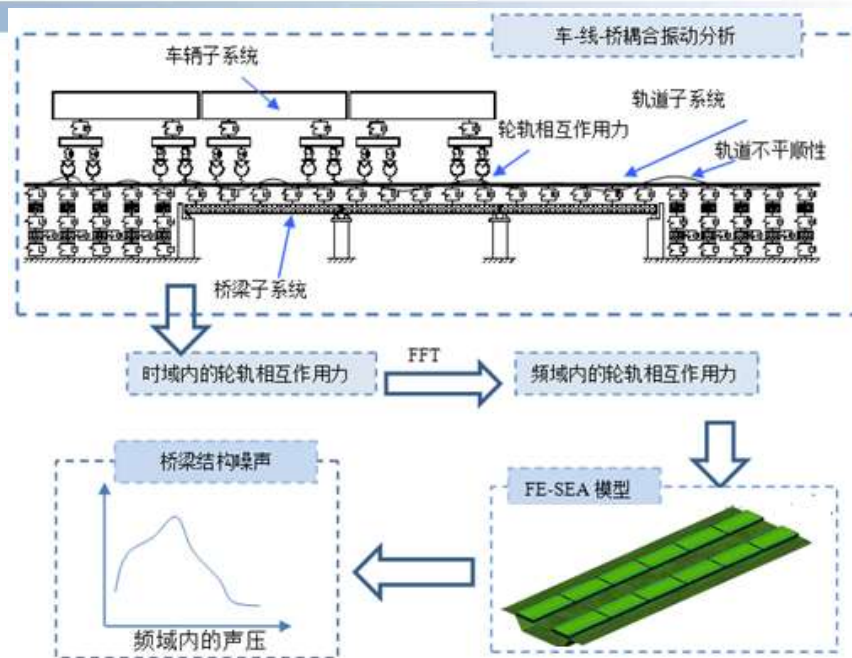


Figure 15. Noise contribution of each box-girder slab at three far-field points.



Original Article

Institution of MECHANICAL ENGINEERS

Journal of RAIL AND RAPID TRANSIT

Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit 2016, Vol. 230(4) 1242-1256 © IMechE 2015 Reprints and permissions: sagepub.co.uk/journalsPermissions.nav DOI: 10.1177/0954409715605127 pif.sagepub.com

A hybrid model for the prediction of low-frequency noise emanating from a concrete box-girder railway bridge

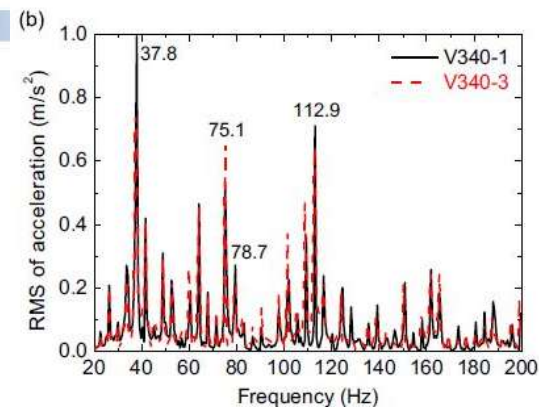
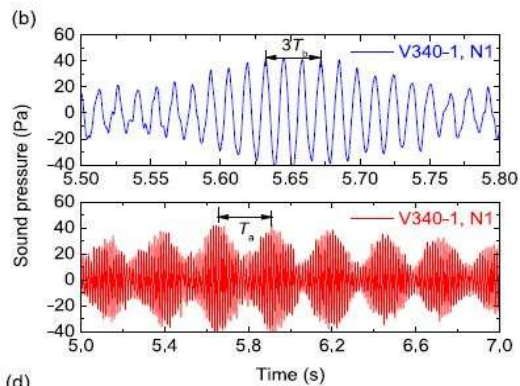
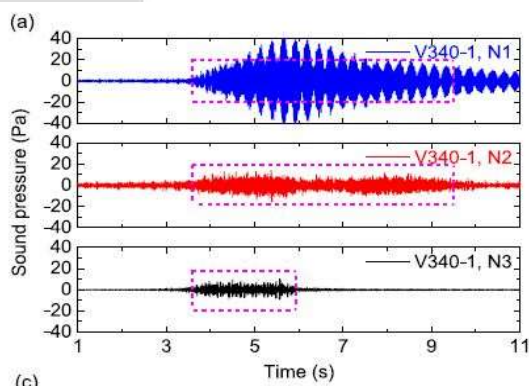
Xun Zhang, Xiaozhen Li, Jianqiang Zhang, Lizong Song and Yadong Li

SAGE



二、结构振动与噪声预测方法及模型——混凝土箱梁“空腔共鸣”

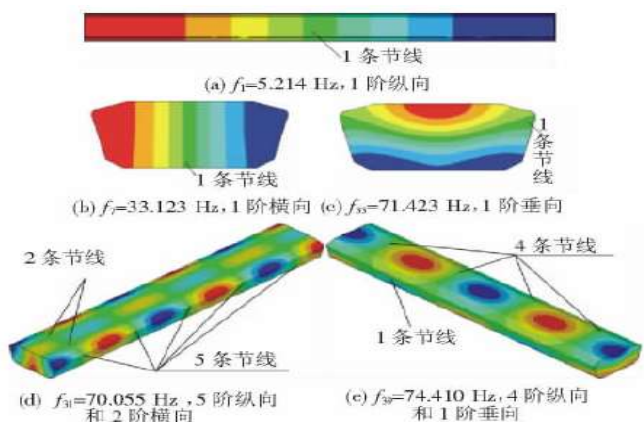
津秦高铁实测的混凝土筒支箱梁“空腔共鸣”现象 ($v=340\text{km/h}$)



顶板振动加速度频谱

2倍的列车车轴加载频率75.1Hz附近发生“超谐波共振”现象，与箱梁内1阶竖向空腔声模态频率基本吻合，从而导致了“空腔共鸣”现象。

箱梁空腔声模态



Journal of Sound and Vibration 367 (2016) 129–144

Contents lists available at ScienceDirect



Journal of Sound and Vibration

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jsvi



A case study of interior low-frequency noise from box-shaped bridge girders induced by running trains: Its mechanism, prediction and countermeasures

Xun Zhang^{a,b,*}, Xiaozhen Li^{a,b,*}, Hong Hao^c, Dangxiang Wang^a, Yadong Li^a



二、结构振动与噪声预测方法及模型——振动传递特性

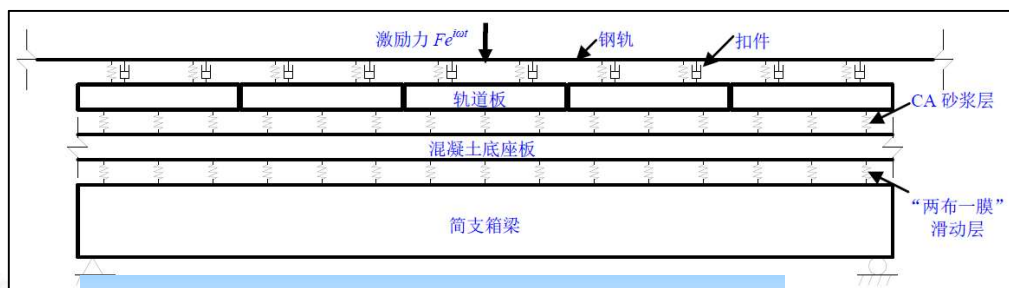
基于有限元法和锤击试验，提出了轨道交通混凝土箱梁振动传递特性分析方法。

分别计算轨道板、底座板和桥梁顶板在1~1000Hz之间的垂向速度导纳，试验验证模型的可靠性。

采用该方法研究轮轨力作用下，箱梁的振动传递特性，发现顶板振动速度最大，翼板次之，底板和腹板相对较小

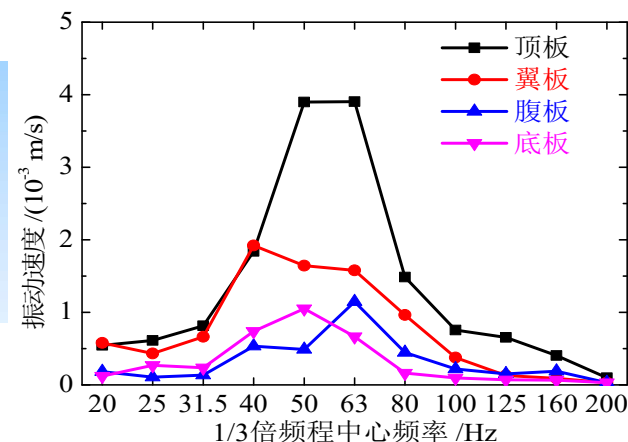


津秦高铁32m简支箱梁



桥梁振动传递特性分析模型

轮轨激励下的箱梁振动速度



第49卷第5期
2016年5月

土木工程学报
CHINA CIVIL ENGINEERING JOURNAL

Vol. 49 No. 5
May 2016

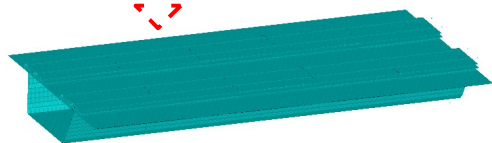
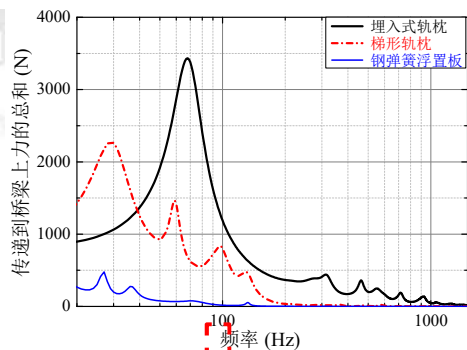
基于现场锤击试验的高铁简支箱梁振动传递特性研究

李小珍 宋立志 张迅
(西南交通大学, 四川成都 610031)

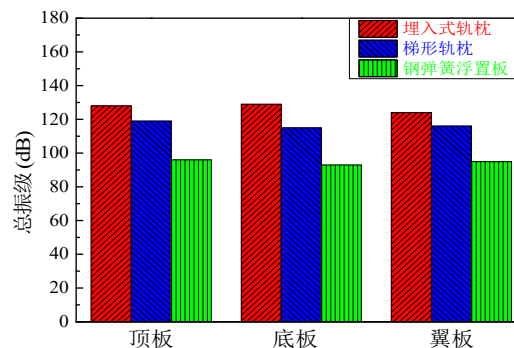
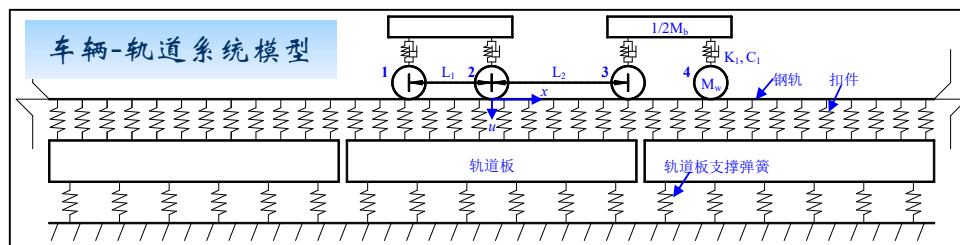


二、结构振动与噪声预测方法及模型——轨道结构对振动的影响

“车轮-轨道系统”的固有频率影响轮轨力的峰值频段；频率低于“钢轨-扣件系统”的固有频率时，钢轨的动柔度受到轨道结构形式的影响；



桥梁有限元模型



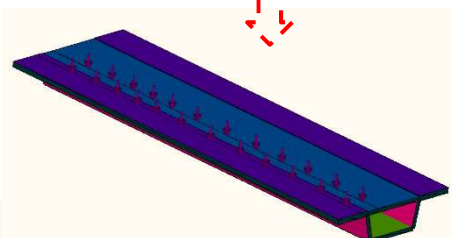
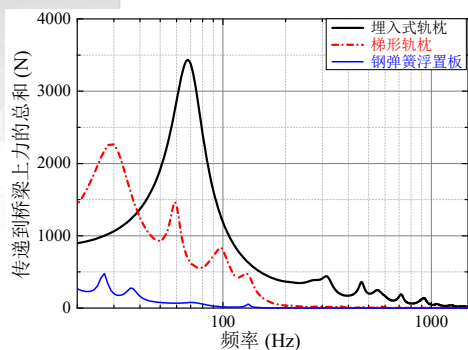
不同轨道结构形式下箱梁加速度振级对比

对于箱梁中高频振动的减振效果，钢弹簧浮置板最优，梯形轨枕次之，埋入式轨枕最差。

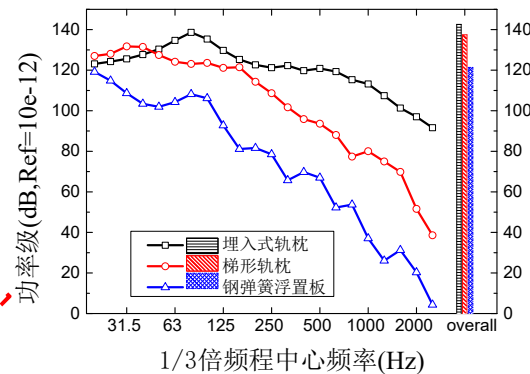
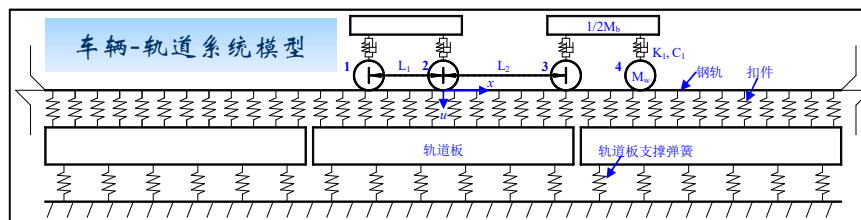


二、结构振动与噪声预测方法及模型——轨道结构对噪声的影响

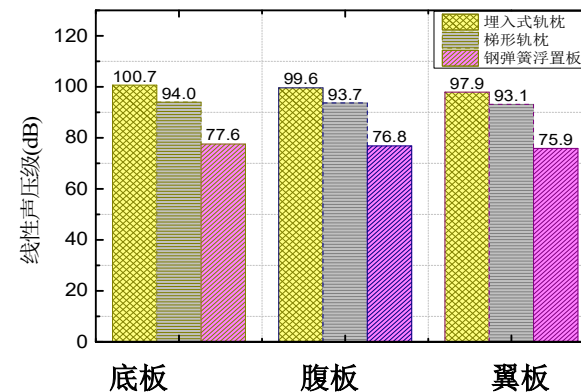
不同轨道结构下的动态轮轨力、力传递率、输入到箱梁的力和输入功率的频变规律



桥梁噪声统计能量分析模型



箱梁输入功率对比



箱梁结构噪声对比

钢弹簧浮置板轨道降噪效果最优，梯形轨枕次之，埋入式轨枕最差！



二、结构振动与噪声预测方法及模型——钢-混结合梁桥

●列车-轨道-桥梁系统耦合动力分析模型，求解桥梁动力响应

●桥梁结构噪声SEA模型，求解噪声辐射

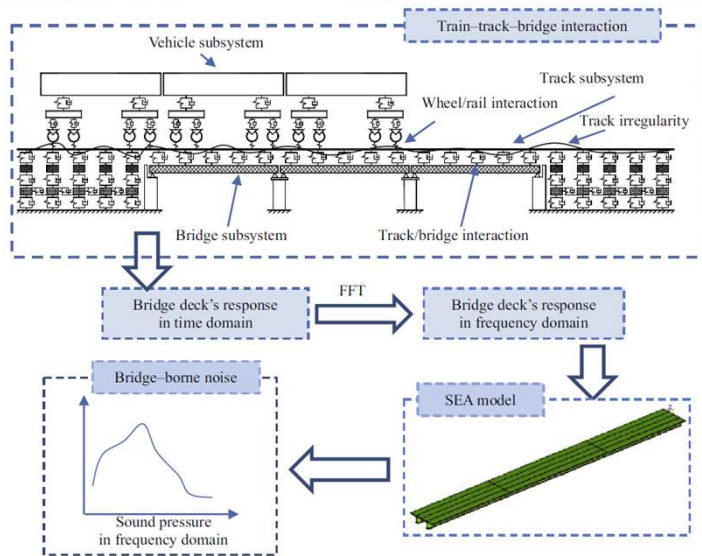
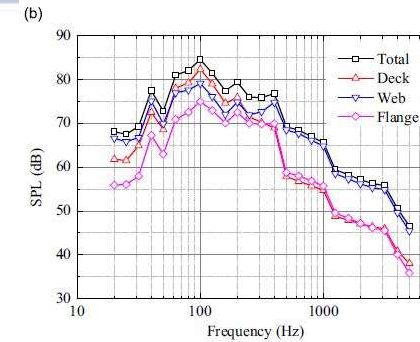
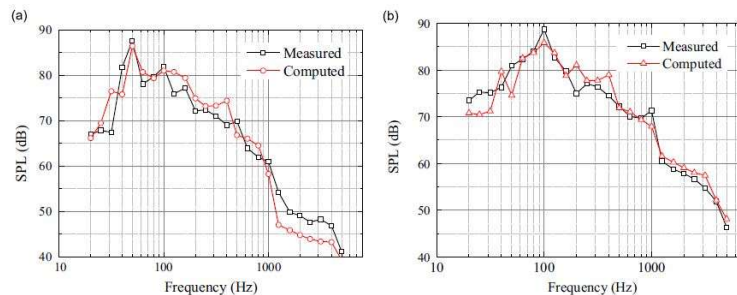


Fig. 1. The block diagram of noise prediction procedure.



钢-混结合梁桥各构件噪声辐射

优势频段：20~1000Hz
80~160 Hz范围内的噪声以桥面板贡献为主，315 Hz以上高频噪声以钢梁腹板的贡献为主。



Structure-borne noise of railway composite bridge: Numerical simulation and experimental validation

Xiaozhen Li^a, Quanmin Liu^a, Shiling Pei^b, Lihong Song^a, Xun Zhang^{a,*}

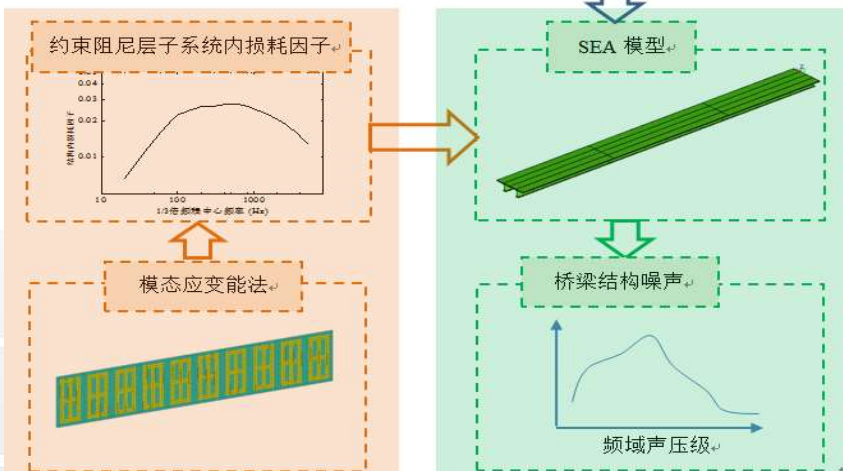
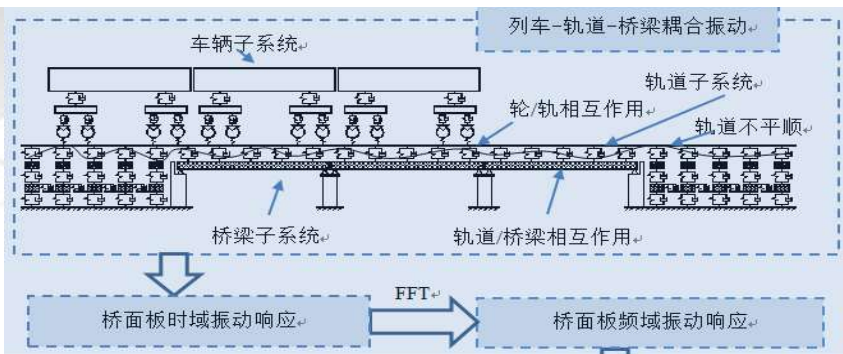
^a Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610071, China
^b Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado School of Mines, Golden, USA





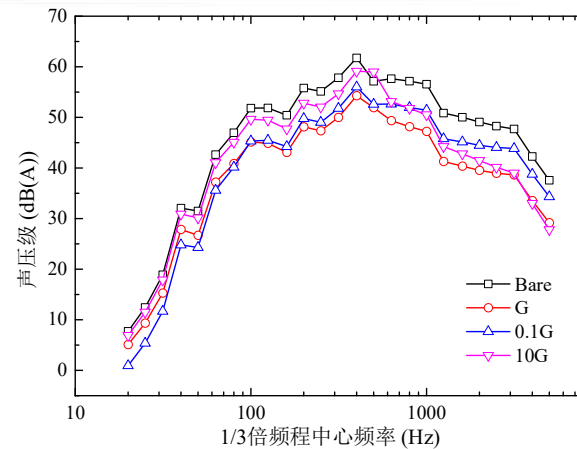
二、结构振动与噪声预测方法及模型——钢-混结合梁桥

铁路结合梁桥敷设约束阻尼层结构噪声控制

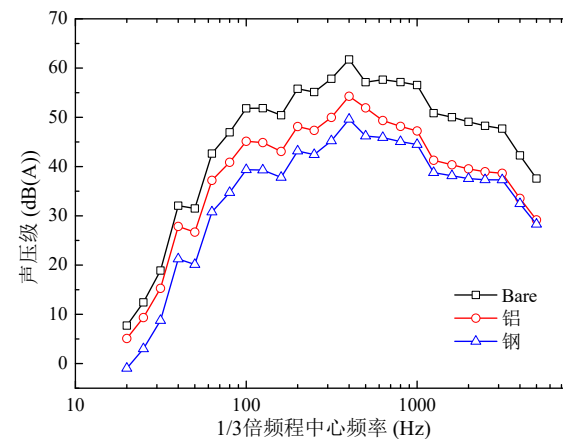


理论
分析

阻尼层
剪切
模量
对降噪
效果
的影响



约束层
材料
对降噪
效果
的影响





二、结构振动与噪声预测方法及模型——钢-混结合梁桥

试验研究:

敷设约束阻尼层后, 结构的振动降低明显

纵梁腹板振动速度级降低10.5dB, 纵梁下翼缘振动速度级降低6.1dB

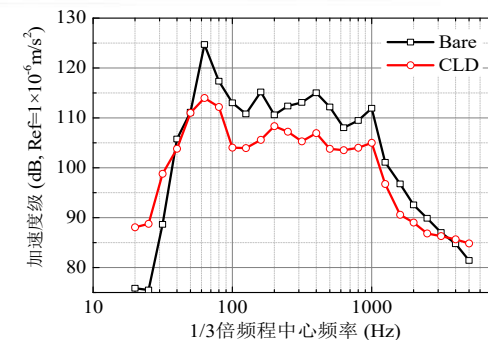
结构噪声在整个频段内得到了明显降低.
场点S1~S4噪声值分别降低3.9~4.3dB(A)
梁侧下方噪声降低较梁侧上方更明显。



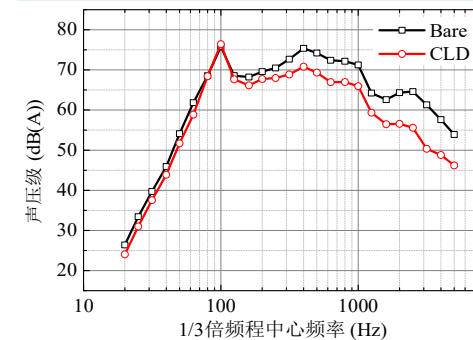
客专(32+40+32) m钢-混结合梁桥



钢腹板内侧敷设约束阻尼层照片



敷设CLD前后钢腹板加速度对比



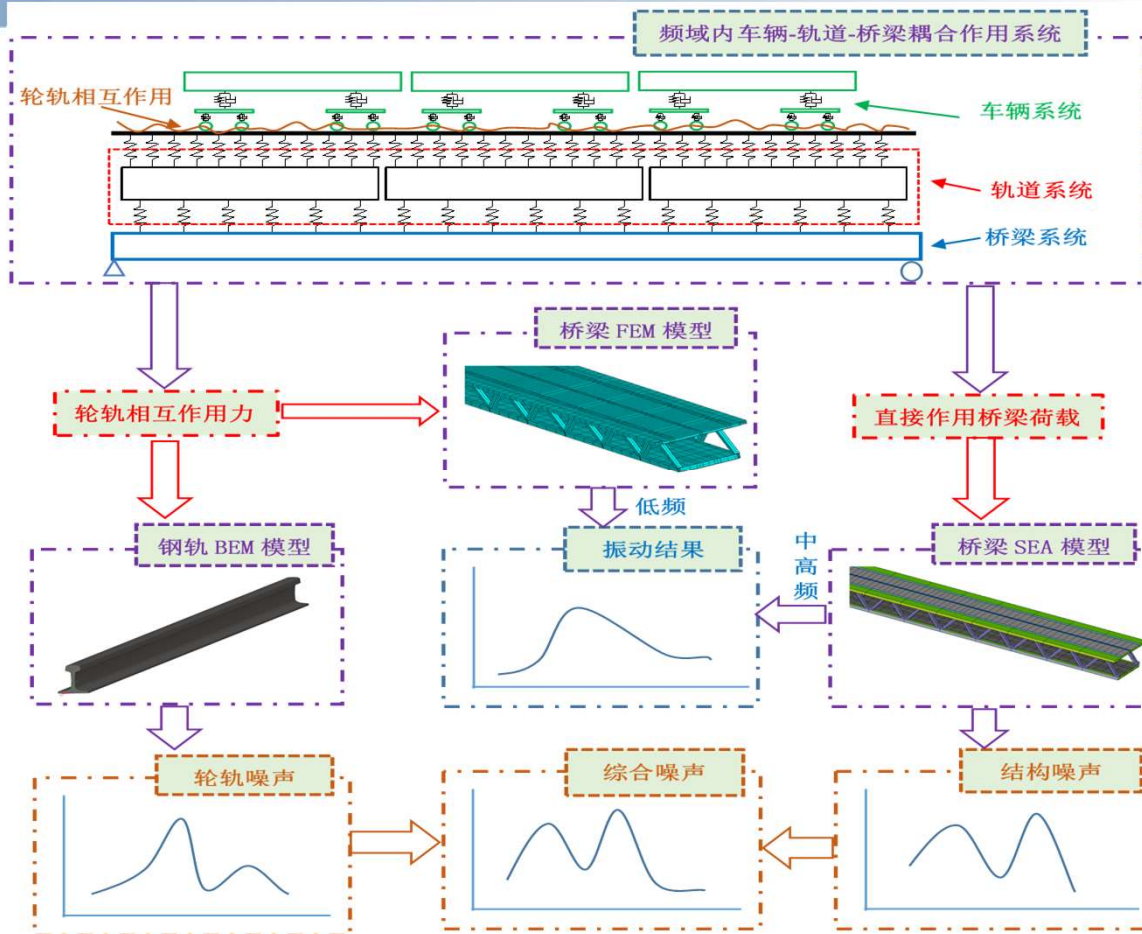
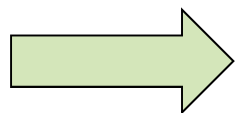
敷设CLD前后梁下测点噪声对比

Quanmin LIU, Xiaozhen LI, et al. Applying constrained layer damping to reduce vibration and noise from a steel-concrete composite bridge: an experimental and numerical investigation [J]. **Journal of Sandwich Structures and Materials**.



二、结构振动与噪声预测方法及模型——钢桁梁桥

- 建立频域内车辆-轨道-桥梁耦合理论模型
- 基于FEM建立桥梁低频振动预测模型
- 基于SEA建立桥梁高频振动及噪声预测模型
- 基于BEM建立轮轨噪声预测模型





二、结构振动与噪声预测方法及模型——钢桁梁桥

■ 钢桁梁：重庆轨道6号线千厮门长江大桥

全桥铺设现浇轻型、减振垫、无砟轨道、无缝线路来控制轮轨噪声。

但：钢梁引起的结构噪声非常明显。
运营开通以来一直遭受沿线居民的投诉。

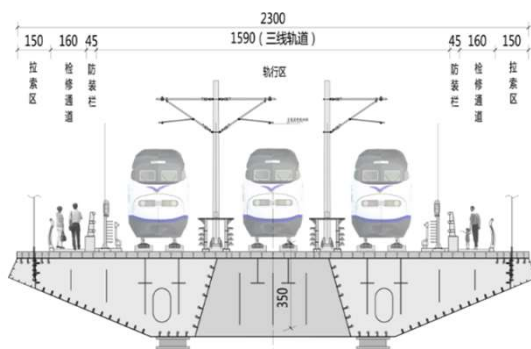
■ 钢箱梁：重庆轨道10号线南纪门长江大桥

声屏障类型（直立式、半封闭、全封闭）
轨道结构形式（钢弹簧浮置板、梯形轨枕、普通轨道）
桥型（混凝土梁、钢箱叠合梁）

■ 统计能量分析（SEA）方法：

关键计算参数（如：内损耗因子）的确定。

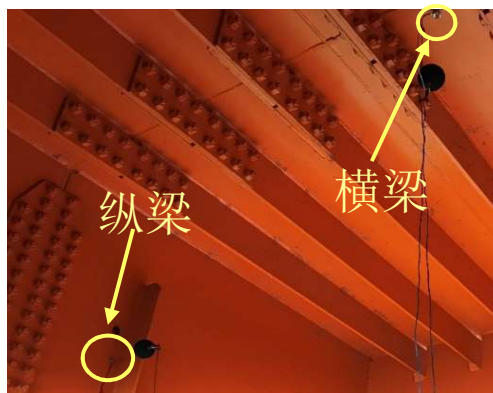
阻尼层材料与结构相互作用。对钢桥振动的影响机理。





二、结构振动与噪声预测方法及模型——钢桁梁桥

- 千厮门大桥开展振动及噪声现场测试。振动测点包括：钢轨、轨道板、桥面板、纵梁、横梁。基于现场实测对理论预测方法进行验证。





二、结构振动与噪声预测方法及模型——钢桁梁桥

□ 振动测点包括：轮轨噪声、钢梁噪声、远场综合噪声。



轮轨噪声



钢梁噪声



钢梁正下方
远场噪声



钢梁斜上方远
场噪声



钢梁斜上方
远场噪声



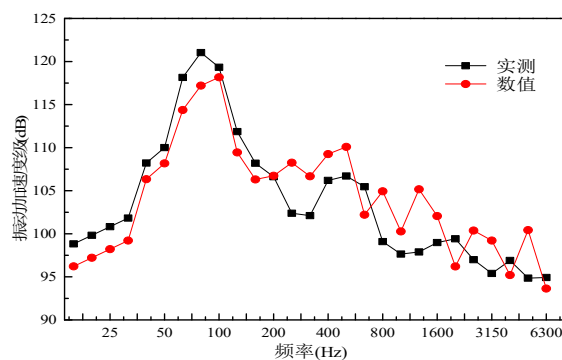
钢梁斜下方
远场噪声



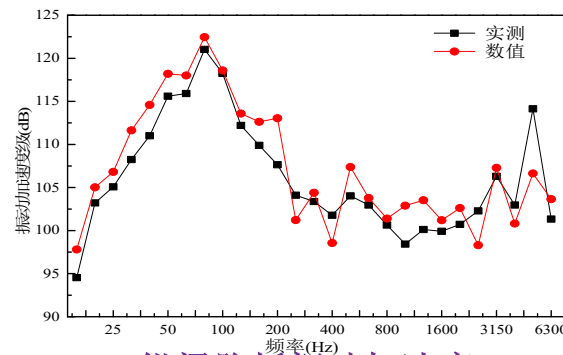
二、结构振动与噪声预测方法及模型——钢桁梁桥

□ 实测对仿真模型进行验证，选取纵、横梁处的振动及噪声进行验证。

□ 在横梁腹板、纵梁腹板处仿真与实测的振动加速度均吻合较好。

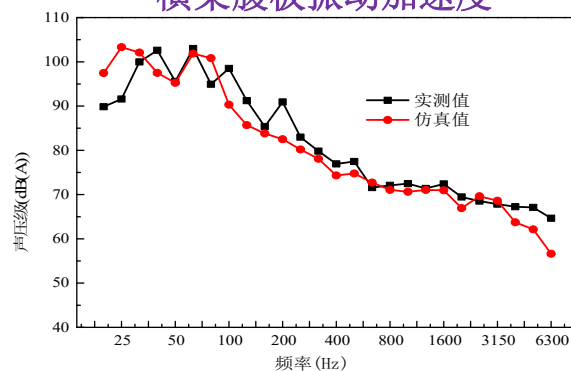
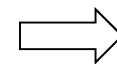


横梁腹板振动加速度

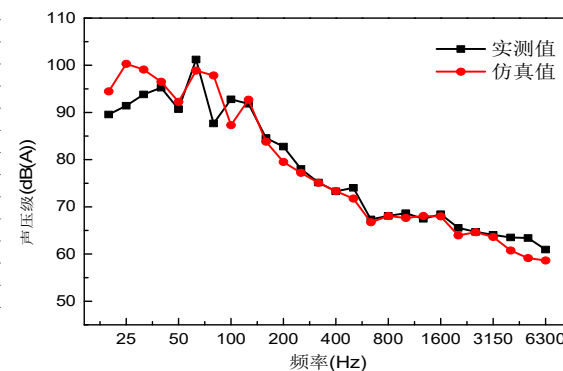


纵梁腹板振动加速度

□ 在横梁腹板、纵梁腹板处仿真与实测的声压级整体趋势一致，在低频段稍有偏差，这主要是统计能量法在低频段模态数较少而造成的。



横梁腹板噪声声压级



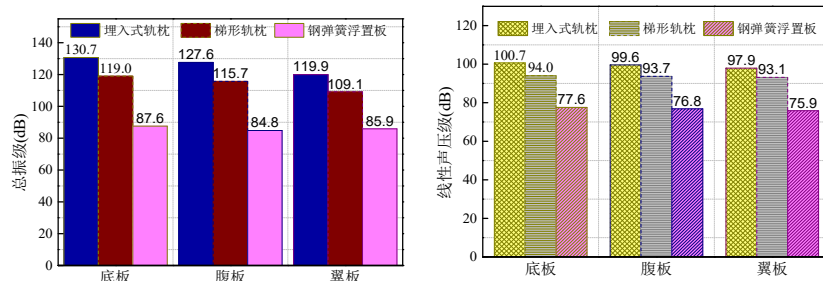
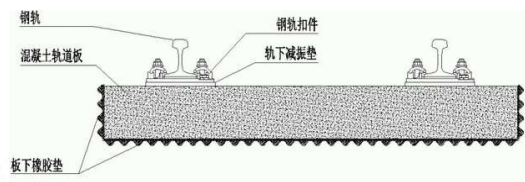
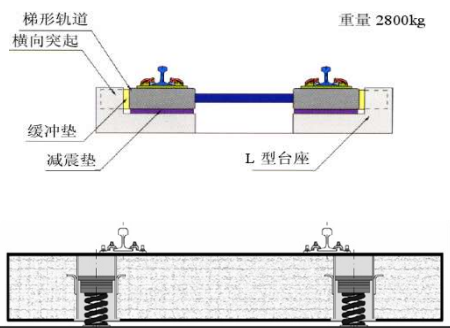
纵梁腹板噪声声压级



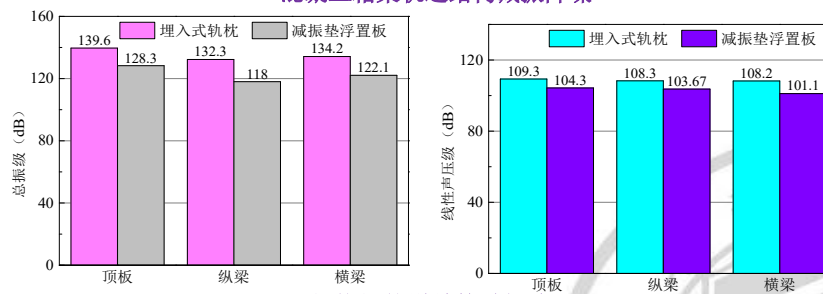
三、减振降噪措施

——减振轨道

常用的轨道减振轨道包括**梯形轨枕**、**钢弹簧浮置板**以及**减振垫浮置板**，相比于无任何减振降噪效果的埋入式轨枕，减振轨道均有较好的减振降噪效果。



混凝土箱梁轨道结构减振降噪



钢桁梁轨道结构减振降噪

对混凝土箱梁桥，钢弹簧浮置板的减振降噪效果非常显著，减振效果在35dB左右，降噪效果在25dB；梯形轨枕减振效果在11dB左右，降噪效果在6~7dB。



三、减振降噪措施

——减振轨道

千厮门大桥减振降噪：

对钢桁梁桥，减振垫浮置板可使钢梁振动降低13dB左右，结构噪声降低6~7dB左右

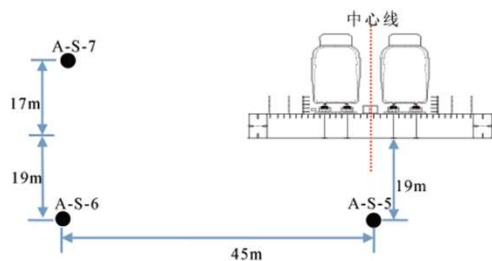


图 2-4 远场噪声测点布置

表 6-3 不同减振轨道结构下噪声对比表

减振降噪措施	梯形轨枕			减振垫浮置板			钢弹簧浮置板		
场点	SF1	SF2	SF3	SF1	SF2	SF3	SF1	SF2	SF3
A 声级钢梁噪声 (dB(A))	65.8	69.3	67.5	60.5	64.8	62.9	50.6	55.8	53.9
A 声级轮轨噪声 (dB(A))	84.6	80.8	78.6	86.5	81.4	78.8	87.7	81.7	78.9
等效 A 声级综合噪声 (dB(A))	70.2	73.3	71.1	70.1	73.2	70.3	68.2	71.1	65.5
降噪效果	0.4	0.5	1.1	0.5	0.6	1.9	2.4	2.7	6.7

南纪门大桥减振降噪：

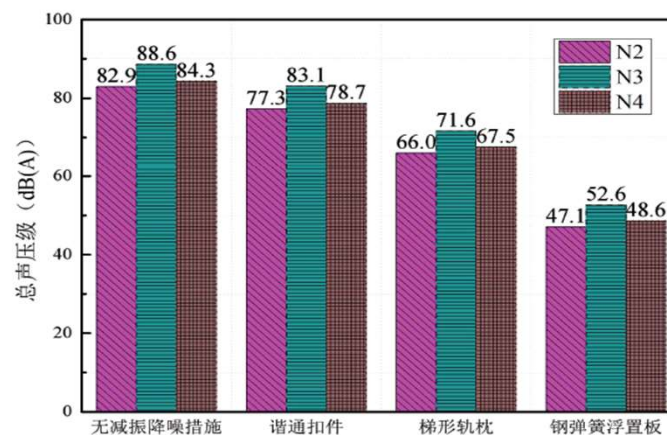
与普通轨道相比：

谐通扣件能使钢梁结构噪声降低5~6dB；

梯形轨枕能使钢梁结构噪声降低17~20dB

钢弹簧浮置板能降低30~36dB

相比梯形轨枕，钢弹簧浮置板能降低17~19dB





三、减振降噪措施

——声屏障



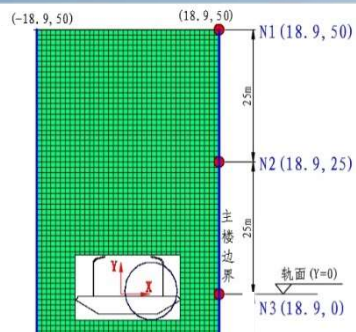
直立式



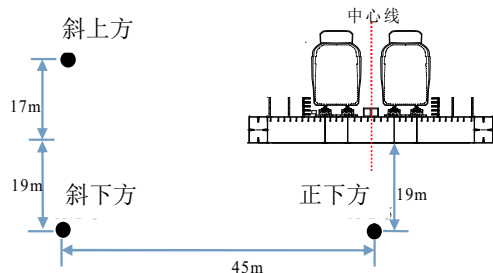
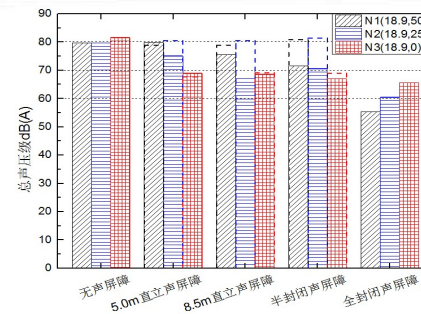
半封闭式



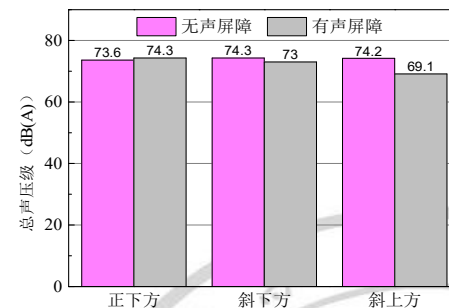
全封闭式



钢箱梁桥仿真对比



钢桁梁桥现场实测对比



- 基于钢箱梁桥仿真可看到：直立式声屏障随着高度的增加，对斜上方场点降噪效果增强；降噪效果：直立式5dB(A)左右、半封闭式10dB(A)左右、全封闭式20dB(A)左右。
- 实测：钢桁梁安装声屏障后对于斜上方的场点降噪效果最为显著，在5.1dB(A)左右；对于桥梁斜下方也有一定的降噪效果；但对于桥梁正下方无降噪效果。原因：桥正下方主要为钢梁结构噪声。



三、钢桥减振降噪措施

——声屏障

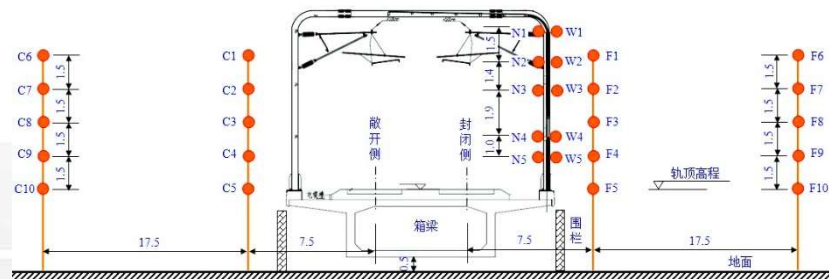
沪昆高速铁路杭长段：32m简支梁，半封闭声屏障，振动与噪声现场测试



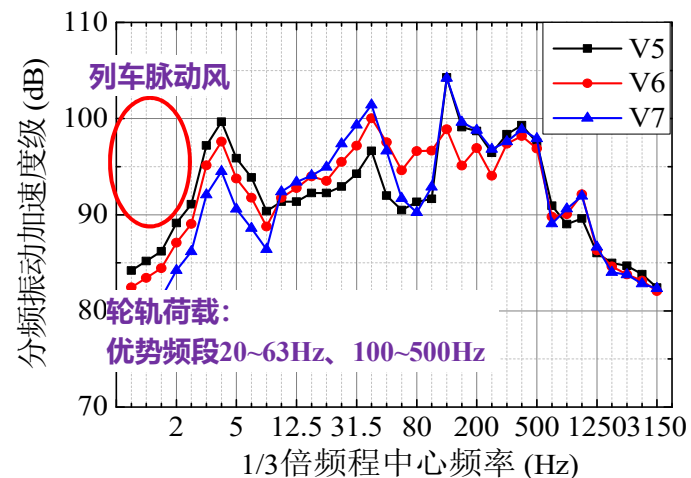
封闭侧



敞开侧



测点布置示意图



桥梁、轨道振动：

总振级，钢轨164dB > 轨道板135dB > 底座板127dB > 箱梁顶板120dB

分别衰减29 dB、8 dB和7 dB。

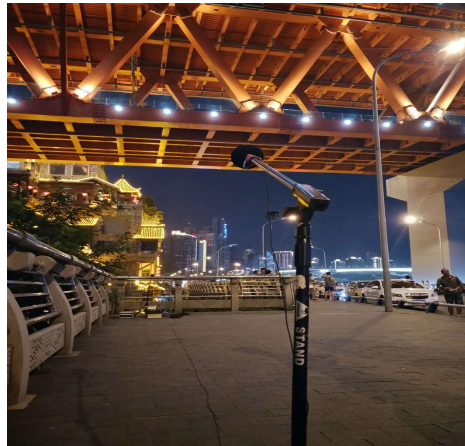
插入损失：封闭侧与敞开侧噪声插入损失约15 dB(A)



三、减振降噪措施

——声屏障

重庆千厮门大桥：全封闭式声屏障的安装：

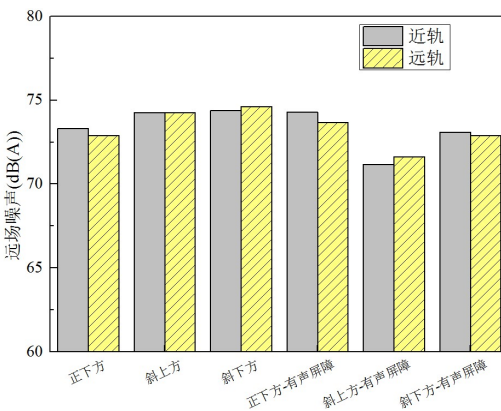
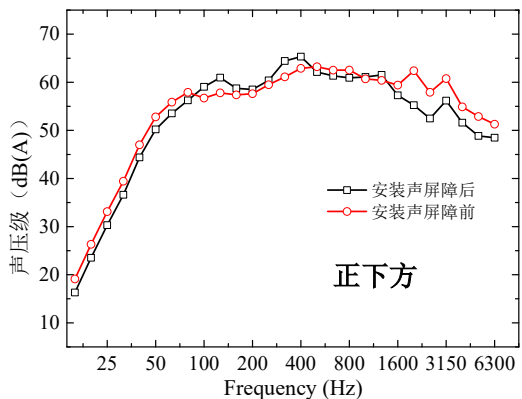
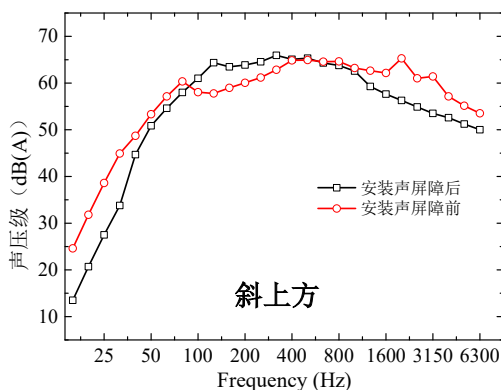
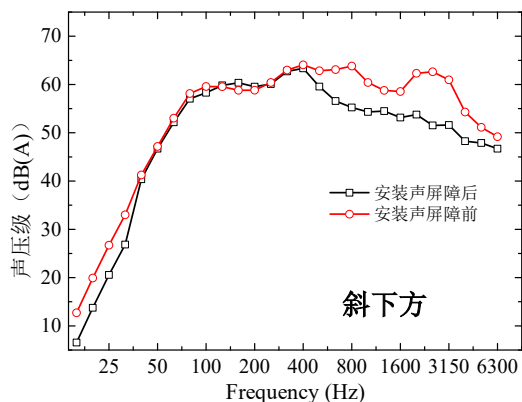




三、减振降噪措施

——声屏障

重庆千厮门大桥：安装全封闭式声屏障的降噪效果。



安装声屏障后:

1. 桥梁斜上方及斜下方的综合噪声降低 3-5 dB(A)左右;

2. 桥梁正下方噪声却反而增大;

原因分析:

桥梁正下方受桥梁结构噪声主导, 安装声屏障对于桥梁结构噪声基本没有影响;

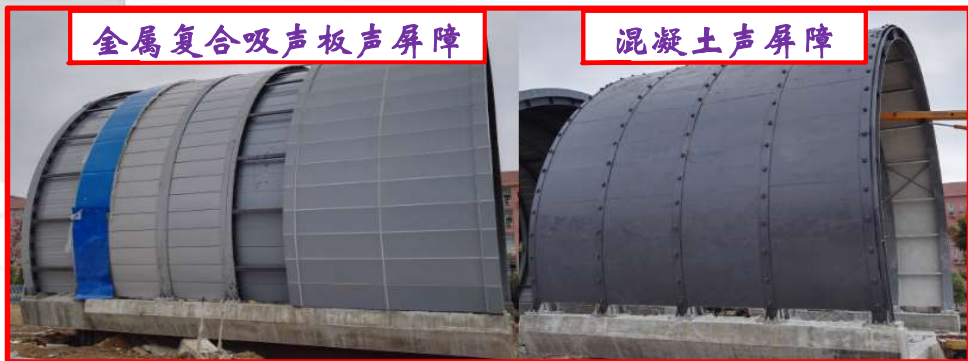
因为安装声屏障后, 列车的行车速度有所恢复:

50km/h~70km/h。

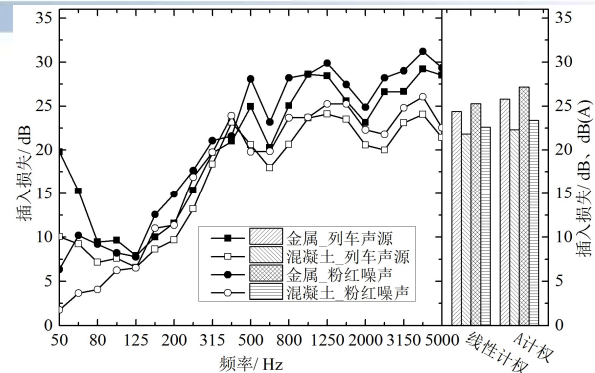
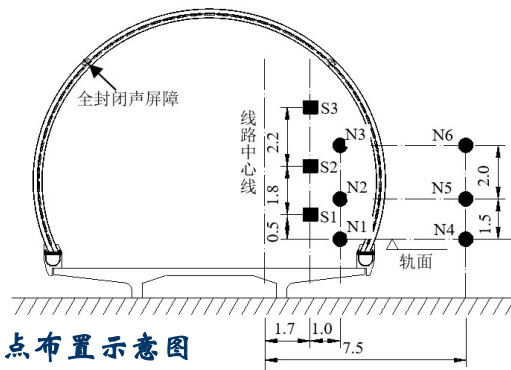


三、钢桥减振降噪措施

——声屏障



7.5 m处，全封闭金属复合吸声板声屏障、混凝土声屏障插入损失分别为：
25dB(A)、22dB(A)



距轨道中心线7.5m处的插入损失



深茂高铁首次采用全封闭声屏障

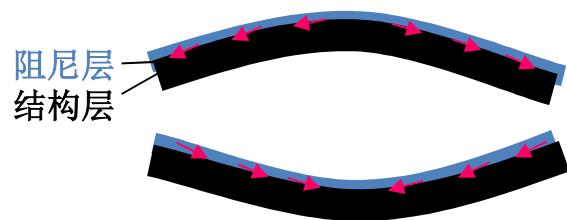
声屏障的“功”与“过”：被动降噪措施
声屏障自身振动与二次噪声；立柱疲劳与可靠性



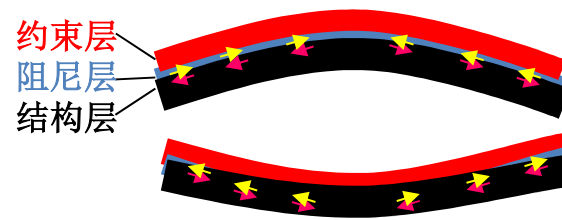
三、钢桥减振降噪措施

——阻尼层

黏弹性阻尼材料具有**高阻尼**特性，能在**相当宽的频带内**起到抑制振动和降低噪声的作用。



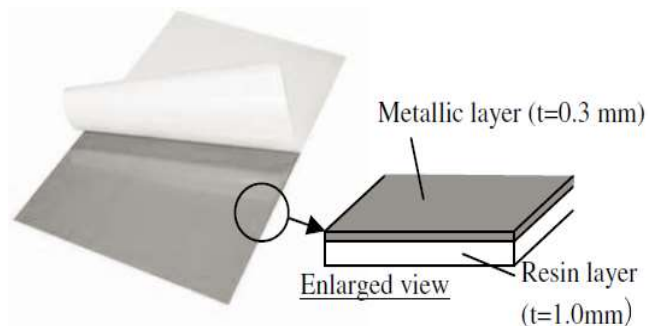
● **自由阻尼层(FLD):**
通过**拉压变形**耗散振动能量



● **约束阻尼层(CLD):**
通过**剪切变形**，能耗散更多振动能量

奥地利联邦铁路线: 对桥梁腹板引起噪声控制效果

现场试验: 桥梁腹板上约束阻尼材料能降噪 3.5 dB左右



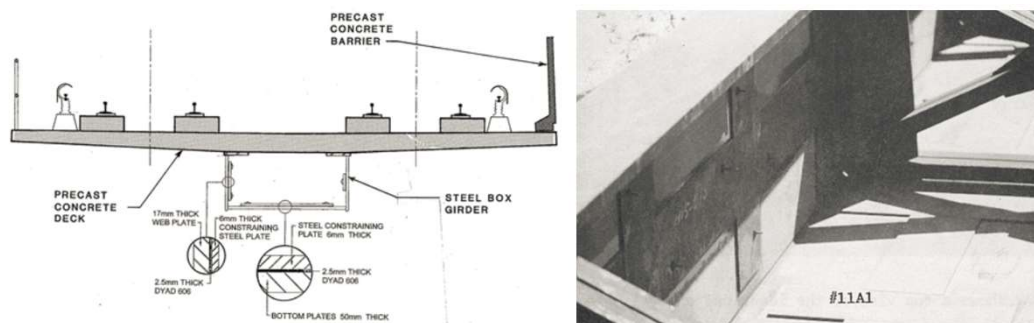


三、钢桥减振降噪措施

——阻尼层

美国亚特兰大高架桥：实测了钢-混组合结构部分粘贴约束阻尼层的降噪效果：

- 约束阻尼层能够降低50 Hz以上频段的腹板和底板的振级达 9~12 dB。
- 约束阻尼层可降低低频段噪声6~9 dB，虽对A计权声级影响不大；



德国J.J. Hanel和T. Seeger（1978）对两座高1 m的小型钢箱梁明桥面铁路桥敷设约束阻尼层后的结构噪声进行了足尺试验。

- 桥1的高阻尼层采用1mm厚的聚乙酸乙烯，桥2采用厚度相同的聚亚胺脂和约束钢片
- 列车40 km/h: 测桥1和桥2声压级的平均值分别降低: 13 dB、18 dB

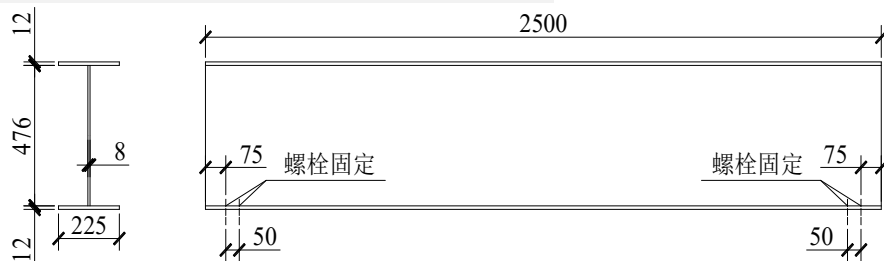


三、钢桥减振降噪措施

——阻尼层

约束阻尼层用于工字梁降噪机理的足尺试验研究

- 阻尼层密度 $1500 \pm 200 \text{ kg/m}^3$ 。阻尼层自带粘性，揭开保护纸即可粘贴在结构表面。
- 试验采用框架支承试验工字梁。
- 先进行腹板和翼缘分别敷设自由黏弹性阻尼层减振降噪能力的对比试验，再进行约束阻尼层厚度参数对比试验。



工况	位置	厚度
CASE 1	/	无阻尼
CASE 2	腹板	阻尼层=1.0 mm
CASE 3	翼缘	阻尼层=1.0 mm
CASE 4	腹板	阻尼层/约束层=1.0 mm/0.5 mm
CASE 5	腹板	阻尼层/约束层=1.0 mm/1.5 mm
CASE 6	腹板	阻尼层/约束层=2.0 mm/3.0 mm

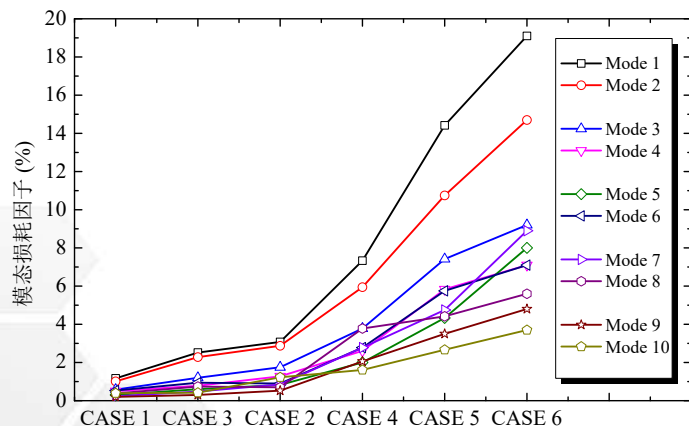


三、钢桥减振降噪措施

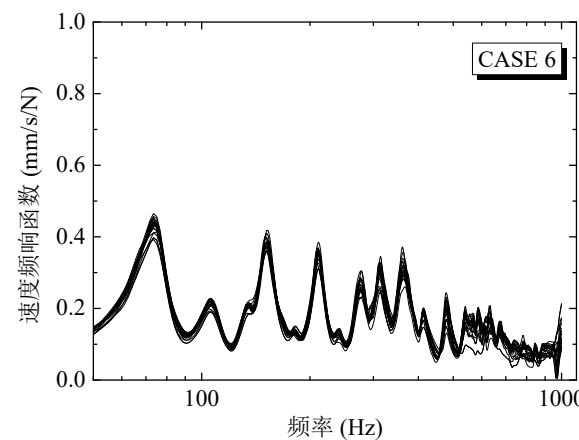
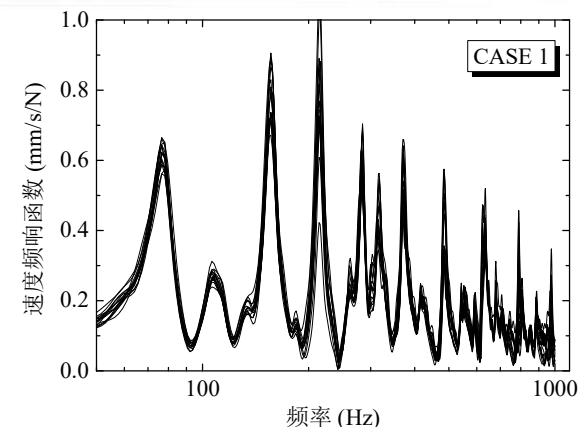
——阻尼层

约束阻尼层用于工字梁降噪机理的足尺试验研究

- 多次测试频响函数基本重合，说明测试稳定性较好。共振频率处相干系数均大于0.9，测试响应信号是由力锤激振引起
- 约束阻尼层使速度频响函数尖锐的共振峰明显降低



- 模态损耗因子由半功率带宽法计算得到
- 敷设约束阻尼层后，结构模态损耗因子显著增大，且前两阶模态损耗因子增加更明显。



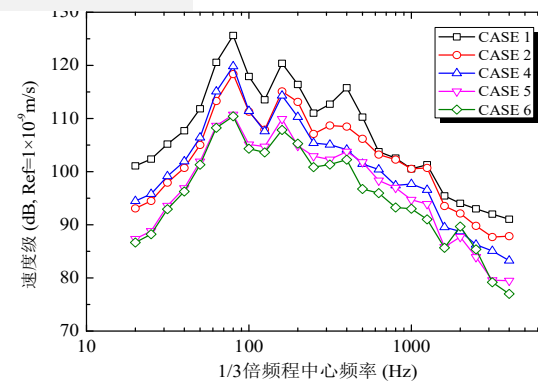
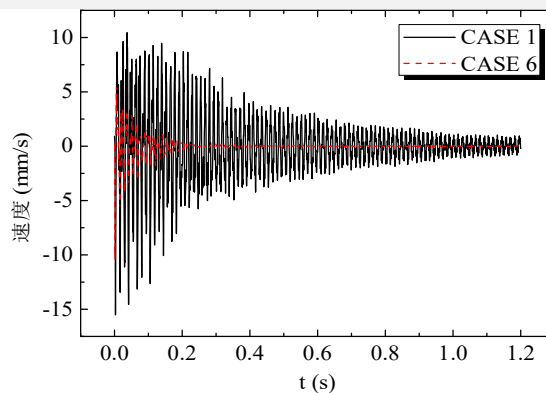


三、钢桥减振降噪措施

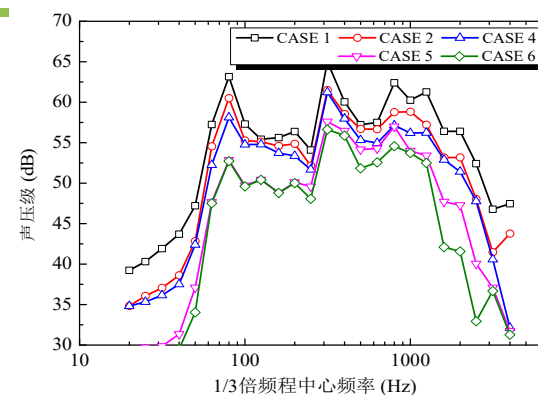
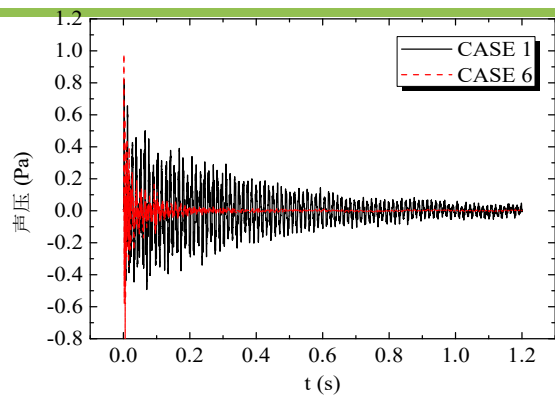
——阻尼层

约束阻尼层用于工字梁降噪机理的足尺试验研究

- CASE 1、CASE 6 振动速度有效值依次为 2.823 mm/s、0.633 mm/s。
- 约束阻尼层处理后结构的振动降低显著，CASE 6 的振动衰减非常迅速。



- CASE 1、CASE 6 总声级分别为 71.82 dB、64.16 dB。CASE 6 噪声降低 7.66 dB。



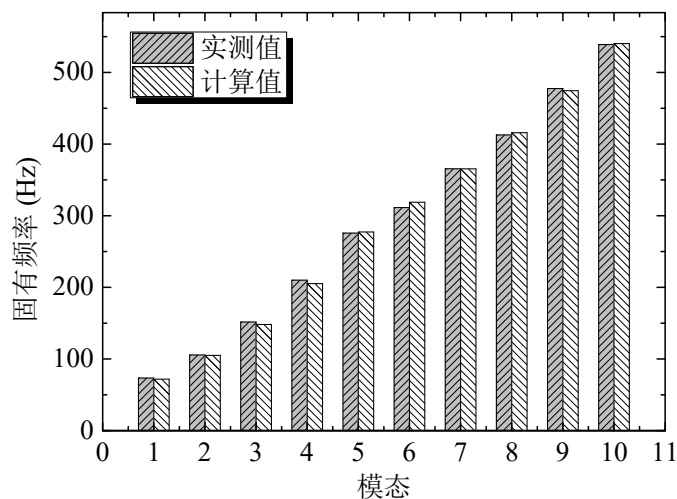


三、钢桥减振降噪措施

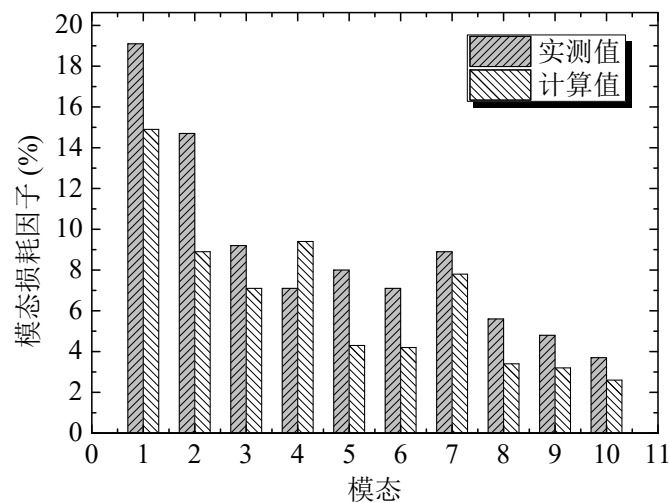
——阻尼层

约束阻尼层用于工字梁降噪机理的足尺试验研究

- 由模态应变能迭代计算结构的模态损耗因子，再根据统计能量法计算结构的振动和噪声
- 以CASE 6为例，通过试验结果与理论计算的对比，验证了模态应变能计算的损耗因子和工字梁的振动与噪声。



模态频率



模态损耗因子



三、钢桥减振降噪措施

——阻尼层

阻尼层用于铁路钢-混结合梁桥减振降噪试验验证：

- 在腹板内侧分块敷设约束阻尼层；
- 约束层为耐锈蚀镀锌钢板；
- 全桥共敷设约束阻尼层 328.23 m^2
- 约束阻尼层占恒载比重仅为 0.17%



钢腹板内侧敷设约束阻尼层照片



(32+40+32) m钢-混结合梁桥





三、钢桥减振降噪措施

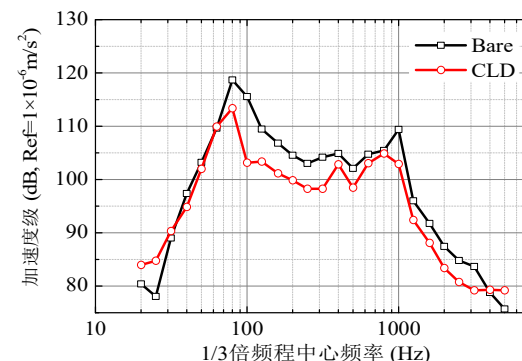
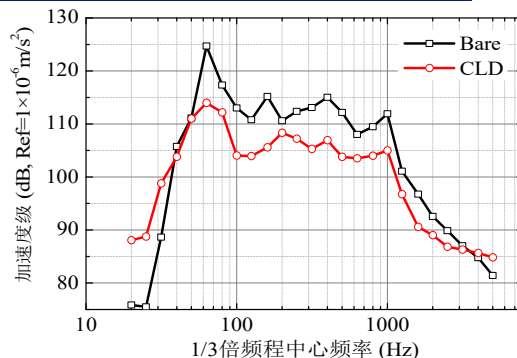
——阻尼层

阻尼层用于铁路钢-混结合梁桥减振降噪试验验证结果：

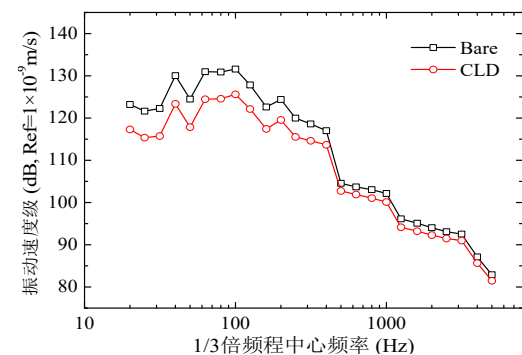
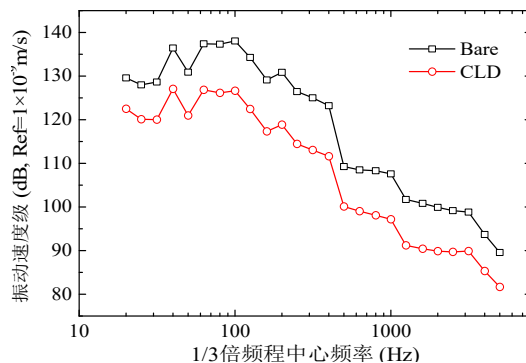
■ 振动加速度在主要频率范围内都有一定的降低，腹板的振动加速度降低更明显

■ 纵梁腹板振动速度级降低10.5dB，纵梁下翼缘振动速度级降低6.1dB；

约束阻尼层可有效降低钢梁的振动。



敷设CLD前后，腹板、翼缘振动加速度级对比



敷设CLD前后，腹板、翼缘振动速度级对比



三、钢桥减振降噪措施

——阻尼层

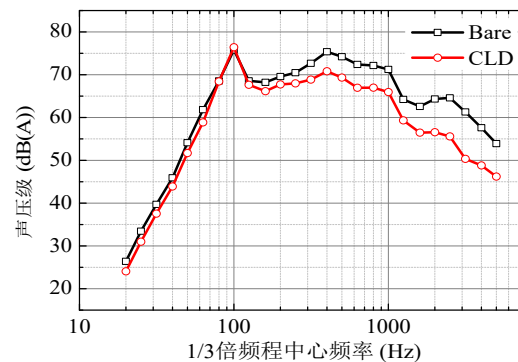
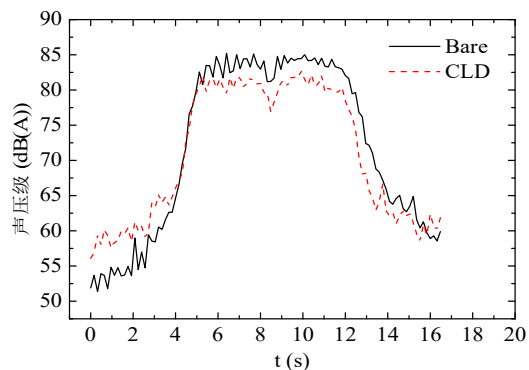
阻尼层用于铁路钢-混结合梁桥减振降噪试验验证结果：

敷设约束阻尼层后，结构辐射噪声在整个频段内得到了明显降低。

场点S1~S4噪声值分别降低
3.9dB(A)、4.2dB(A)、
4.3dB(A)、4.3dB(A)。

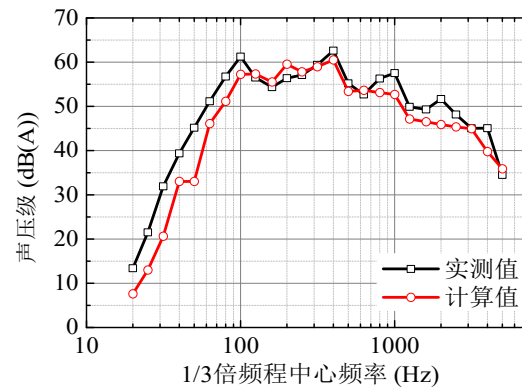
梁侧下方噪声降低较梁侧上方更明显；

在125 Hz以上的中高频段桥梁辐射结构噪声有明显的降低；



敷设CLD前后，桥正下方场点 S3 时域、频域声压级对比

场点 S3频域声压级
计算值与实测值对比





四、结论与建议

- 基于有限元法、边界元法以及统计能量法，建立了城轨桥梁振动噪声预测模型，计算理论值与实测值吻合。
- 对混凝土箱梁桥，钢弹簧浮置板减振效果在35dB左右，降噪效果在25dB左右；梯形轨枕减振效果在11dB左右，降噪效果在6dB左右。对钢桥，减振垫浮置板可减振13dB左右，降噪6dB左右。因此，减振垫浮置板道床能有效地对钢桥结构的振动进行控制。
- 声屏障降噪效果对比：直立式5dB(A)左右、半封闭式10dB(A)左右、全封闭式20dB(A)左右。全封闭声屏障可有效地控制钢桥的轮轨噪声，但对结构噪声作用不大。不能依赖全封闭式声屏障！
- 阻尼层对结构的减振降噪效果明显；可使钢-混组合梁桥纵梁腹板振动速度级降低10.5dB，使纵梁下翼缘振动速度级降低6.1 dB；降噪效果在4 dB(A)左右。因此，阻尼层能对钢桥的结构振动与噪声进行有效控制。



四、结论与建议



轨道交通综合 减振降噪 控制措施

轮轨系统

- 阻尼钢轨
- 减振扣件
- 减振道床

桥梁结构

- 结构形式
- 减振支座
- 桥墩桩基

吸声材料

- 声屏障
- 吸声材料
- 阻尼层

辅助系统

- 景观绿化带
- 公路噪声治理
- 背景噪声

减振降噪！改善环境！造福人类！



Thank for your attention!

感谢聆听！ 请多指正！

李小珍



微信关注西南交大桥梁
(扫一扫或长按)

微信：xnjdqlx
邮箱：xnjdql@163.com
网站：bridge.swjtu.edu.cn
电话：028-87600630