

中低速磁浮快线车-轨耦合振动源强特性试验^{*}

李秋义^{1,2} 罗 伟^{1,2} 魏高恒^{1,2}

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉;

2. 铁路轨道安全服役湖北省重点实验室, 430063, 武汉//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 中低速磁浮快线作为一种新兴的城市轨道交通型式, 其车-轨耦合作用实测资料很少。通过对长沙中低速磁浮快线提速试验中的轨道-桥梁系统车致振动实测数据进行分析, 结果表明: 轨道-桥梁系统的振动随传播距离增加而逐渐衰减, 以从钢枕端部到承轨台的衰减最为显著; 轨排接头对振动从钢枕到承轨台的传播具有“路径阻断”效应, 主要出现在 20 Hz 以下的频率范围; 钢枕测点 2~200 Hz 的振动分量Ⅲ型接头断面较轨排中部断面大, 承轨台测点振动的优势频段为 63~125 Hz; 在以设计速度 100 km/h 运行工况下Ⅲ型接头断面、轨排中部断面的环境振动源强 $L_{v1,z,max}$ 分别为 81.4 dB 和 81.1 dB, 提速至 150 km/h 时均为 84.2 dB; 两个断面的环境振动源强均与行车速度表现出比较显著的线性关系, 可按本研究给出的 $L_{v1,z,max}-v$ 表达式进行源强计算。

关键词 中低速磁浮线; 环境振动源强; 振源特性

中图分类号 U270.1⁺1:U266.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.01.002

Vibration Source Intensity Characteristic Experiment of Low-medium Speed Maglev Vehicle-Rail Coupling

LI Qiuyi, LUO Wei, WEI Gaocheng

Abstract As a new type of urban rail transit, the low-medium speed maglev has little documentation on field measured results of vehicle-rail coupling interaction. By analyzing the field measured vibration data of track-bridge system of Changsha Maglev Express in speed-raising test, the results show that the vibration of track-bridge system gradually attenuates with the increase of propagation distance, and the attenuation from sleeper end to rail support is the most significant. There is a 'path blocking' effect of rail row joint on the vibration propagation from sleeper to rail support, which is mainly reflected in the frequency range below 20 Hz. Type III joint section with sleeper measuring point of 2~200 Hz vibration component is larger than rail row middle section. The dominant frequency

band of measuring point vibration at rail support is 63~125 Hz. Under the operating condition of design speed of 100 km/h, the environmental vibration source intensity $L_{v1,z,max}$ of type III joint section and rail row middle section become 81.4 dB and 81.1 dB respectively, and both are 84.2 dB when the speed is raised to 150 km/h. The environmental vibration source intensity shows a significant linear relationship with the running speed, and the source intensity can be calculated according to the $L_{v1,z,max}-v$ expression given in this study.

Key words low-medium speed maglev line; environmental vibration source intensity; vibration source characteristics

Author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group, 430063, Wuhan, China

中低速磁浮快线具有安全性高、爬坡能力强、转弯半径小、建设成本低等优点, 且具有完全自主知识产权, 是一种极具竞争力的轨道交通型式^[1-2]。

由于世界范围内已建成通车的中低速磁浮线路十分稀少, 因此目前有关中低速磁浮线的研究大多偏重于理论方面, 而基于实际运营线路的现场试验资料相对匮乏。文献[3-4]采用仿真的方法研究了长沙磁浮快线提速后低置结构和桥梁的动应力分布及动力特性; 文献[5]对中速磁浮的轨道梁选型及温度对车桥耦合振动的影响进行了研究; 文献[6]以长沙磁浮快线为对象, 研究了磁浮列车速度及荷载对轨道梁动力响应的影响; 文献[7-8]对长沙磁浮快线轨道梁的振动响应进行了测试, 但测试速度较低, 小于 80 km/h。

中低速磁浮快线由于车-轨耦合作用实测资料的匮乏, 一方面制约了其轨道结构的进一步优化和完善, 另一方面其车致环境振动预测无可靠的源强取值参考, 不利于准确评价磁浮列车运行对沿线环境的振动影响。本文基于长沙中低速磁浮快线, 选

^{*} 中国铁建股份公司重大专项(2021-A03); 湖北省技术创新重大专项(2019AAA059)

取桥梁地段Ⅲ型井字型接头(以下简称“Ⅲ型接头”)和轨排中部断面,进行轨道-桥梁系统车致振动的线上试验研究,以期为后续同类型轨道交通的轨道结构设计和环境影响评价工作提供技术参考。

1 现场测试

1.1 测试断面概况

以轨排中部为基本工况,选取该处 1 个断面作为测试断面。同时,考虑到轨排接头部位为中低速磁浮轨道结构最薄弱的部位之一,而Ⅲ型接头处的轨缝最大,因此,再选择Ⅲ型接头的 1 个断面作为一种不利的工况作对比。两个测试断面概况如表 1 所示。

表 1 测试断面概况
Tab. 1 Overview of test section

区间位置	测点里程	测点所处位置	平面线型	最高运行速度/(km/h)	断面类型	轨道梁编号
长沙南站—榔梨站	DK 5+271	150 m 连续梁	直线	150	Ⅲ型接头	YBK173
长沙南站—榔梨站	DK 5+286	150 m 连续梁	直线	150	轨排中部	YBK173

1.2 测点布置

中低速磁浮快线轨道由轨排单元整体拼装而成,自上而下主要由感应板、F 轨、H 型钢枕、扣件、承轨台等部分组成,如图 1 所示。本研究分别在承轨台中部、H 型钢枕螺栓连接处腹板(以下简称“钢枕端部”)、H 型钢枕枕中腹板(以下简称“钢枕中部”)安装振动加速度传感器,每个断面各布置 3 个竖向测点,如图 1 所示。

在 HJ 453—2018《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》中,城市轨道交通高架线振动源强测点要求布于地面距线路中心线 7.5 m 处。然而,考虑到中低速磁浮快线桥梁结构较其他城市轨道交通存在一定的差异,且车致振动自桥梁到地面的传播模式尚不清楚,同时,文献[9]的研究显示,车致振动的地面测量结果离散性较大,桥上测量结果更具稳定性。因此,在桥上布置(承轨台)环境振动源强测点,更加有利于中低速磁浮快线高架地段振动源强测试结果的推广应用。

1.3 测试仪器

两个断面均安装 INV 9828 型中低频加速度传感器,其频响范围为 0.2~2 500.0 Hz,量程为 10 g(g 为重力加速度)。

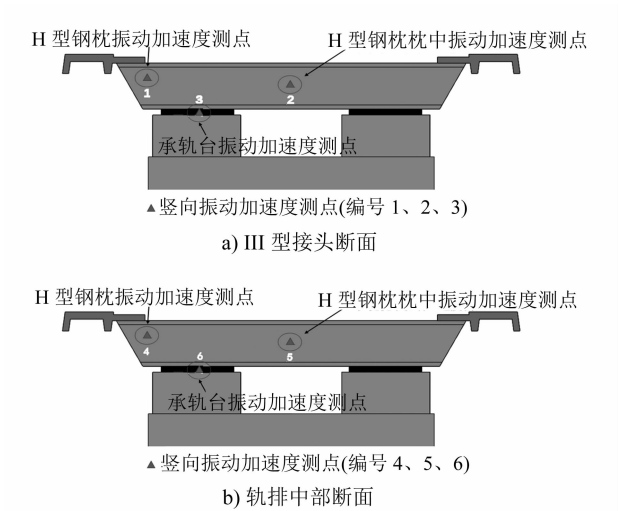


图 1 两个断面测点布置示意图

Fig. 1 Measuring points layout diagram of two sections

1.4 数据采集概况

借助长沙中低速磁浮列车提速试验的机会,进行了时速 100 km、110 km、120 km、130 km、140 km、150 km 等 6 种列车运行速度的工况测试,其数据采集情况如表 2 所示。

表 2 各断面数据样本数
Tab. 2 Number of data samples of each section

行车速度/(km/h)	经过Ⅲ型接头断面数/组	经过轨排中部断面数/组
100	5	5
110	5	5
120	5	5
130	5	5
140	5	5
150	5	5

1.5 环境振动源强评价指标

根据 HJ 453—2018《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》和 GB 10071—1988《城市区域环境振动测量方法》的标准,评价指标采用列车通过过程中铅垂向 Z 振级 $L_{v1,z}$ 的最大值,即 $L_{v1,z,max}$,分析的频率范围为 1~80 Hz。计权标准采用现行 GB 10070—1988《城市区域环境振动标准》仍沿用的 ISO 2631-1:1985 计权曲线。

2 测试结果分析

2.1 振动传播的时域特征

现场获取的振动数据典型曲线如图 2 所示。不同行车速度工况下的各测点加速度幅值如表 3 和

表 4 所示。

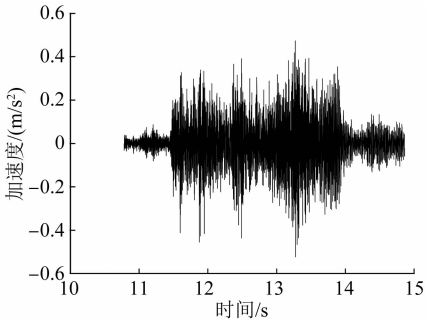


图 2 III型接头断面承轨台竖向加速度
Fig. 2 Vertical acceleration of rail support in type III joint section

表 3 III型接头断面加速度幅值的样本均值
Tab. 3 Sample mean value of acceleration amplitude of type III joint section

行车速度/ (km/h)	测点位置加速度幅值/(m/s ²)		
	钢枕端部	钢枕中部	承轨台
100	0.8	0.7	0.3
110	1.1	0.8	0.4
120	2.3	1.7	0.6
130	1.4	1.4	0.4
140	1.3	1.3	0.4
150	1.7	1.4	0.6

表 4 轨排中部断面加速度幅值的样本均值
Tab. 4 Sample mean value of acceleration amplitude in rail row middle section

行车速度/ (km/h)	测点位置加速度幅值/(m/s ²)		
	钢枕端部	钢枕中部	承轨台
100	0.7	0.7	0.3
110	1.0	1.0	0.3
120	1.3	1.2	0.3
130	1.3	1.3	0.3
140	1.2	1.1	0.4
150	1.5	1.4	0.4

由表 3 和表 4 可知,Ⅲ型接头断面各测点的加速度幅值总体上较轨排中部断面的大,两个断面钢枕端部的加速度幅值分别位于 0.8~2.3 m/s² 和 0.7~1.5 m/s²,钢枕中部均位于 0.7~1.4 m/s²,承轨台分别位于 0.3~0.6 m/s² 和 0.3~0.4 m/s²。

2.2 振动传播的频域规律

对比钢枕端部、钢枕中部、承轨台测点的振动加速度级,如图 3 和图 4 所示。从钢枕端部(较钢枕中部更靠近 F 轨)到钢枕中部,以及从钢枕端部到承轨台,车致振动均有所衰减。其中从钢枕端部到承轨台这一过程的衰减明显,在其衰减幅度方面,Ⅲ型接头断面较轨排中部断面的大,其中 20 Hz 以

下低频范围两断面减幅的差别最为显著,可见接头对低频振动从钢枕到承轨台的传播具有“路径阻断”效应。

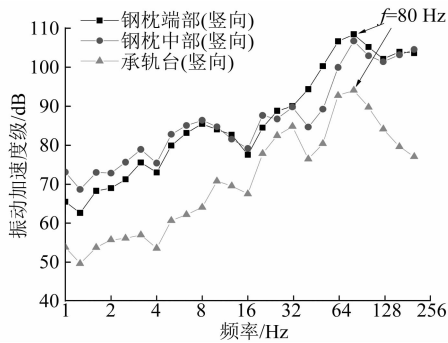


图 3 III型接头断面竖向振动 1/3 倍频程谱(时速 100 km)
Fig. 3 1/3 octave spectrum of vertical vibration in type III joint section (100 km/h)

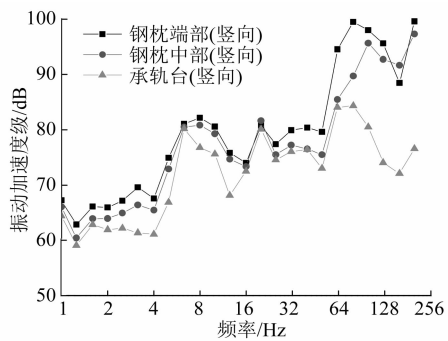


图 4 轨排中部断面竖向振动 1/3 倍频程谱(时速 100 km)
Fig. 4 1/3 octave spectrum of vertical vibration in rail row middle section (100 km/h)

2.3 Ⅲ型接头影响振动的频域规律

对比Ⅲ型接头断面、轨排中部断面的振动加速度级,如图 5—图 7 所示。钢枕端部、钢枕中部两个测点,2~200 Hz 范围Ⅲ型接头断面的全部振动加速度级均较轨排中部断面的大,两个测点振动加速度级的最大差值分别为 20.6 dB 和 17.0 dB;承轨台测点,20 Hz 以下的低频范围轨排中部断面的振动加速度级较Ⅲ型接头断面的大,但 20 Hz 以上的频率范围轨排中部断面的振动加速度级较Ⅲ型接头断面的小(最大差值为 10.0 dB)。这进一步表明对接头对振动从钢枕到承轨台传播的“路径阻断”效应主要表现在 20 Hz 以下的频率范围。

2.4 行车速度影响振动的频域规律

对比不同行车速度工况下承轨台的振动加速度级,如图 8 和图 9 所示。承轨台振动的优势频段为 63~125 Hz。大约以 63 Hz 为界,低于 63 Hz 的频率范围承轨台振动受行车速度的影响不明显,

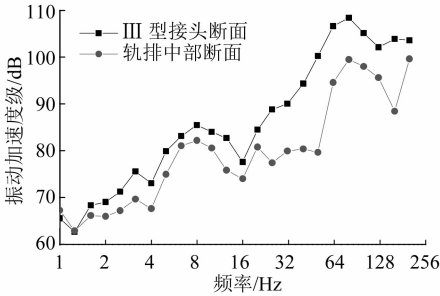


图 5 钢枕端部竖向振动加速度级对比(时速 100 km)
Fig. 5 Comparison of vertical acceleration grades at steel sleeper end (100 km/h)

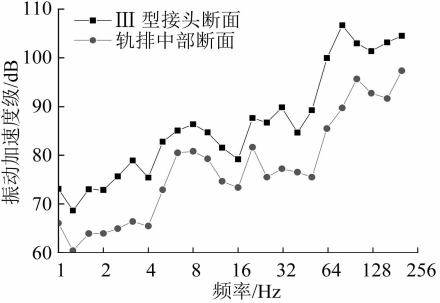


图 6 钢枕中部竖向振动加速度级对比(时速 100 km)
Fig. 6 Comparison of vertical acceleration grades in the middle of steel sleeper (100 km/h)

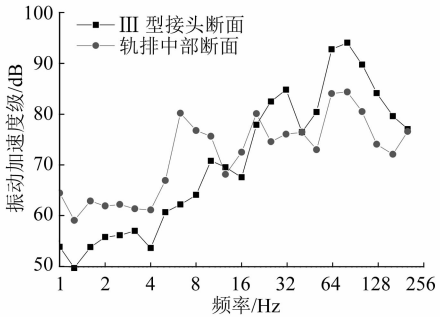


图 7 承轨台竖向振动加速度级对比(时速 100 km)
Fig. 7 Comparison of vertical acceleration grades of rail support (100 km/h)

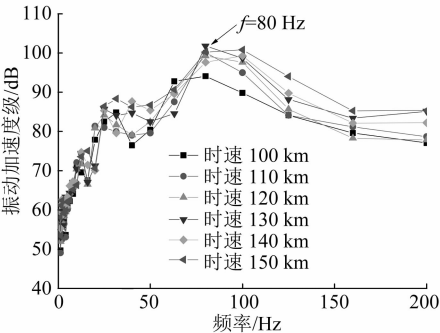


图 8 III型接头断面承轨台竖向振动加速度级
Fig. 8 Vertical vibration acceleration grades in rail support of type III joint section

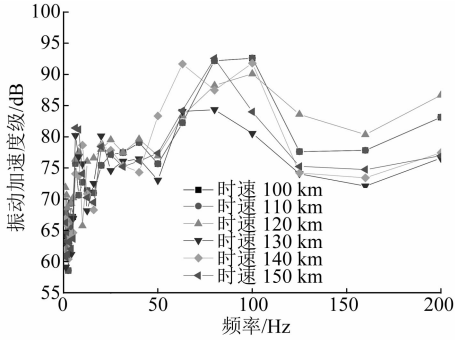


图 9 轨排中部断面承轨台竖向振动加速度级
Fig. 9 Vertical vibration acceleration grade of rail support in rail row middle section

高于 63 Hz 的频率范围受行车速度的影响显著,随行车速度增加而逐渐增大。

2.5 振动源强的传播衰减规律

振动源强 $L_{v1,z,max}$ 从钢枕端部到钢枕中部再到承轨台的衰减情况如图 10 和图 11 所示。III型接头断面 6 种行车速度工况的振动传播衰减曲线近乎平行, $L_{v1,z,max}$ 从钢枕端部到钢枕中部的衰减量约为 1.0 dB,从钢枕中部到承轨台的衰减量约为 13.0 dB;

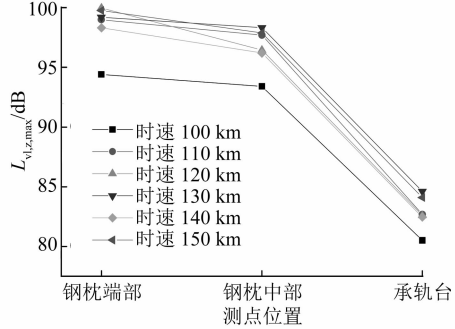


图 10 III型接头断面承轨台 $L_{v1,z,max}$ 传播衰减曲线
Fig. 10 $L_{v1,z,max}$ propagation attenuation curve of rail support in type III joint section

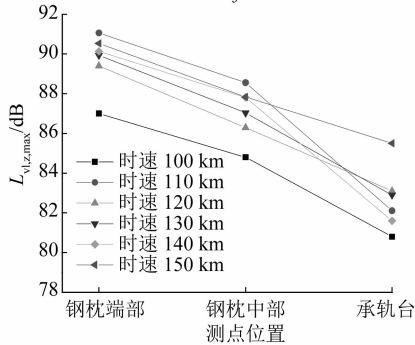


图 11 轨排中部断面承轨台 $L_{v1,z,max}$ 传播衰减曲线
Fig. 11 $L_{v1,z,max}$ propagation attenuation curve of rail support in rail row middle section

轨排中部断面 6 种行车速度工况振动传播衰减曲线的平行形态较Ⅲ型接头断面的差,时速 110 km、140 km 两种工况 $L_{v1,z,max}$ 从钢枕端部到钢枕中部的衰减量约为 2.0 dB,从钢枕中部到承轨台的衰减量约为 6.5 dB,时速 100 km、120 km、130 km、150 km 4 种工况 $L_{v1,z,max}$ 从钢枕端部到钢枕中部的振动衰减量约为 2.0 dB,从钢枕中部到承轨台的振动衰减量约为 3.2 dB。

2.6 行车速度影响振动源强的规律

振动源强 $L_{v1,z,max}$ 随行车速度的变化规律如图 12 和图 13 所示。由图 12 和图 13 可知,两个断面上的 3 个测点 $L_{v1,z,max}-v$ 曲线均近乎于平行。其拟合公式为 $L_{v1,z,max}=A_0+B_0(v-v_0)$ (A_0 、 B_0 为拟合相关变量)。其中:Ⅲ型接头断面中,钢枕端部、钢枕中部、承轨台的 A_0 分别取为 96.7 dB、95.2 dB、81.5 dB, B_0 取为 0.056 7 dB/(km/h);轨排中部断面中,钢枕端部、钢枕中部、承轨台的 A_0 分别取为 88.6 dB、86.1 dB、81.1 dB, B_0 取为 0.039 2 dB/(km/h),试验初始行车速度 v_0 取为 100 km/h。

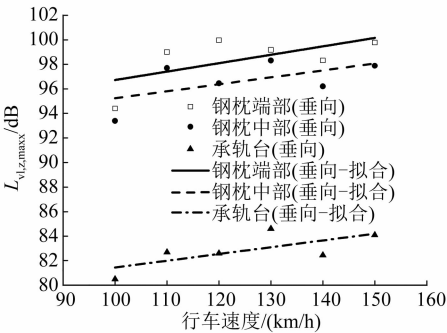


图 12 Ⅲ型接头断面承轨台 $L_{v1,z,max}-v$ 曲线
Fig. 12 $L_{v1,z,max}-v$ curve of rail support in type Ⅲ joint section

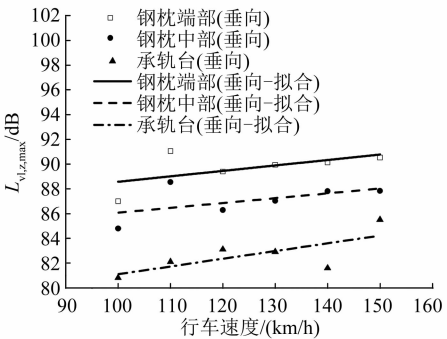


图 13 轨排中部断面承轨台 $L_{v1,z,max}-v$ 曲线
Fig. 13 $L_{v1,z,max}-v$ curve of rail support in rail row middle section

2.7 环境振动源强取值

以承轨台测点的 $L_{v1,z,max}$ 为环境振动源强,可使用上述拟合公式对不同行车速度工况下的环境振动源强进行计算,表 5 列举了时速 100 km、110 km、120 km、130 km、140 km、150 km 条件下Ⅲ型接头断面、轨排中部断面的环境振动源强计算结果。

表 5 两个断面环境振动源强取值
Tab. 5 Values of environmental vibration source intensity of two sections

行车速度/ (km/h)	环境振动源强取值/dB	
	Ⅲ型接头断面	轨排中部断面
100	81.4	81.1
110	82.0	81.7
120	82.5	82.4
130	83.1	83.0
140	83.6	83.6
150	84.2	84.2

3 结语

本文借助长沙中低速磁浮列车提速试验的机会,开展了中低速磁浮快线车致振动传播规律、源强取值研究,主要结论如下:

- 1) 轨道-桥梁系统的振动随传播距离增加而逐渐衰减,以从钢枕端部到承轨台这一过程的衰减最为显著。轨排接头对 20 Hz 以下的低频振动从钢枕到承轨台的传播具有“路径阻断”效应。
- 2) 钢枕上两个测点 2~200 Hz 的振动分量Ⅲ型接头断面较轨排中部的断面大。
- 3) 承轨台振动的优势频段为 63~125 Hz,低于 63 Hz 的频段受行车速度的影响不明显,高于 63 Hz 的频段受行车速度的影响显著,并随行车速度增加而逐渐增大。
- 4) $L_{v1,z,max}$ 的衰减幅度:时速为 100~150 km 时Ⅲ型接头断面从钢枕端部到钢枕中部约为 1.0 dB,从钢枕中部到承轨台约为 13.0 dB;时速 110 km、140 km 两种工况轨排中部断面从钢枕端部到钢枕中部约为 2.0 dB,从钢枕中部到承轨台约为 6.5 dB;时速 100 km、120 km、130 km、150 km 4 种工况从钢枕端部到钢枕中部约为 2.0 dB,从钢枕中部到承轨台约为 3.2 dB。
- 5) 时速 100 km 工况下Ⅲ型接头断面、轨排中部断面的环境振动源强 $L_{v1,z,max}$ 分别为 81.4 dB 和 81.1 dB;当提速至时速 150 km 时,两个断面的环境振动源强均为 84.2 dB。

(下转第 21 页)