

列车荷载作用下中低速磁浮轨道动力响应试验研究*

钟虞全¹ 胡连军² 张威风²

(1. 湖南磁浮技术研究中心有限公司, 410021, 长沙;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘要 参考高铁及城市轨道交通的相关试验方法,测试了中低速磁浮轨道结构在列车荷载作用下的动力响应,获得了轨排结构在列车以不同速度通过时的位移、加速度和应变。结果表明:轨排结构各测点的动力响应值随运行速度的增加呈增长趋势;由于F型导轨的悬臂结构,F型导轨的动力响应值最大,H型钢轨枕次之,承轨梁顶面处最小;列车荷载对轨排结构的动力特性有着明显影响,定员荷载作用下的轨排响应值大于空车;桥梁与轨排构成一个振动体,受梁体振动的影响,简支梁的响应值大于连续梁。

关键词 中低速磁浮线;轨道结构;动力响应

中图分类号 U213.2⁺12:U237

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.028

Experimental Study on Dynamics Response of Medium-low Speed Maglev Track under Train Load

ZHONG Yuquan, HU Lianjun, ZHANG Weifeng

Abstract By referring to the relevant test methods of high-speed railway and urban rail transit, the dynamics response of medium-low speed maglev track structure under train load is tested. The displacement, acceleration and strain of the rail row structure when the train passes at different speeds are obtained. The results show that the dynamics response value at each measuring point of the rail row structure increases with the increase of running speed. Due to the cantilever structure of F-shape rail, the dynamic response of F-shape rail is the largest, followed by the H-shape steel sleeper as second and the minimum response is at the top of the bearing rail beam. The train load has a significant impact on the dynamics characteristics of the rail row structure, the track response value under rated passenger load is greater than that of empty vehicle. The beam and rail row constitute a vibration body, and the response of simply supported beam is greater than that of continuous beam due to the influence of beam vibration.

Key words medium-low speed maglev line; track structure; dynamics response

First-author's address Hunan Maglev Technology Research Center Co., Ltd., 410021, Changsha, China

中低速磁浮交通系统作为一种新兴的轨道交通制式,以其噪声低、振动小、线路适应性强、安全舒适和无污染等特点,受到人们的青睐,并得到了迅速发展^[1-2]。目前,中低速磁浮交通已进入较为成熟的工程化应用阶段,已开通的有长沙磁浮快线和北京磁浮S1线两条商业运营线,建设中的凤凰磁浮文化项目和清远磁浮旅游专线也即将投入运营。

作为城市轨道交通及旅游观光的一种交通制式,国内外的中低速磁浮列车设计时速均为100 km/h。随着城市轨道交通对于速度提升的需求,同时为进一步将中低速磁浮交通系统扩大到城际交通,亟须开展更高速度的中速磁浮交通系统的试验研究^[3]。

轨道是磁浮交通的关键技术装备之一,承受磁浮车辆的悬浮力、导向力和牵引力的功能。轨排结构的结构形式、强度和刚度等静力学性能,加速度、位移和变形等动力学性能是影响中低速磁浮列车运行平稳性、安全性的重要因素^[4-5]。为此,在既有商业运营线上进行中低速磁浮轨排系统动态试验,可为轨道结构参数的优化设计提供理论依据与试验支撑。

1 中低速磁浮轨道测试方案研究

1.1 中低速磁浮轨道结构测试概况

中低速磁浮线的轨排测试段为高架线路,处于直线平坡地段,试验列车以80~160 km/h的速度通

* 湖南省战略性新兴产业与新型工业化专项资金项目(湘财企指[2016]95号);中铁二院工程集团有限责任公司科技发展计划项目(KSNQ213003,KSNQ213004)

过。结合试验内容和现场环境,选取四跨连续梁(30 m+45 m+45 m+30 m)和一跨标准25 m简支梁分别布置测点。

根据 CJ/T 413—2012《中低速磁浮交通轨排通用技术条件》,F 型钢的参数表中得到 F 型钢内外磁极面垂向位移差为 ± 0.5 mm,轨道接缝允许偏差(竖向/横向)均为 ± 1 mm^[6]。参照城市轨道交通相关规范,根据理论分析计算及相关测试经验,F 型钢振动加速度应不大于 100 m/s^2 ,承轨梁及承轨台振动加速度不大于 50 m/s^2 。

1.2 测点布置

中低速磁浮轨道结构理论分析表明^[7-8],由于轨道结构下部支承结构的约束,轨排的两端(靠近承轨梁的中部或端部)受力大于轨排中间部位。因此,本次监测主要将测点布置在轨排两端,现场试验中根据实际情况,在轨排结构的中部适当增设部分测点。

在简支梁跨中轨排端部布置位移和加速度传感器,在连续梁最大跨跨中轨排端部布置位移和加速度传感器、应变片,具体的测点布置断面如图1及图2所示。位移测点分别在左侧 F 型钢导轨翼板、H 型钢枕底面;加速度测点分别布置在 F 型钢导轨翼板、H 型钢枕底面和轨道梁顶面。

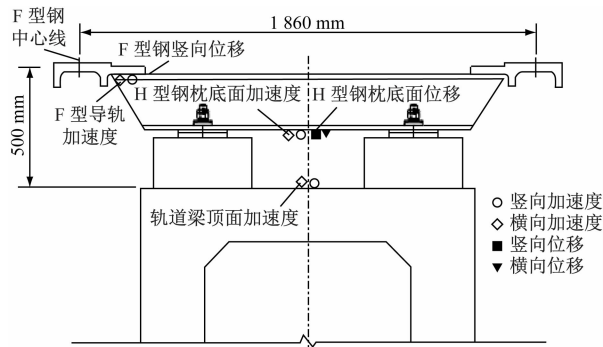


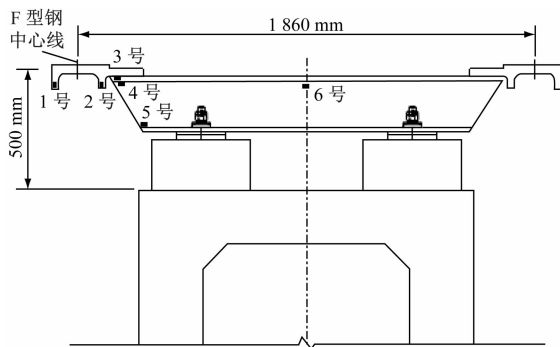
图1 位移与加速度传感器布置示意图

Fig.1 Layout diagram of displacement and acceleration sensors

F 型钢轨上下表面都是功能面,不允许布置应变片,为深入了解 F 型钢轨的应力分布情况,在轨排端部 F 型钢轨内、外腿布置应变片;考虑到 H 型钢枕靠近 F 型钢轨两侧的受力和变形大于中间部位,在轨枕腹板和盖板的端部布置更多的应变测点。

1.3 测试工况

测试速度范围为 80~160 km/h,以 80 km/h 为一级速度测试,而后每增加 10 km/h 则加一个等级



注:图中的1号—6号为应变测点位置。

图2 应变片布置示意图

Fig.2 Layout diagram of strain gauges

来划分,按逐级提速、实时监控以及当前监控数据状态决定是否开展下一级速度测试的原则控制。每一个速度等级测试在试验段进行来回多次测试,去除异常数据之后取平均值作为稳定运行的响应值。

2 不同列车运行速度下的动力响应分析

2.1 轨排位移响应分析

不同列车运行速度下的轨排结构振动位移如图3所示。试验表明:轨排结构各测点位移与试验列车的速度变化呈现线性正相关关系,当列车速度达到 160 km/h,测点最大位移为 F 型钢轨翼板处竖向位移,达到 0.37 mm;所有测点的最大位移与最小位移差值不超过 0.20 mm,则表明列车运行保持平稳的态势;F 型钢轨翼板处的位移明显大于 H 型钢枕底板处的位移,反映了轨枕的受力特点。

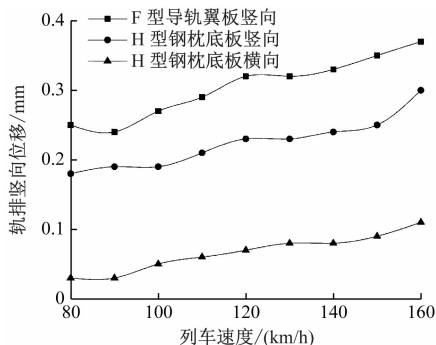


图3 不同列车运行速度下轨排竖向位移

Fig.3 Vertical displacement of rail row at different train running speeds

2.2 轨排加速度响应分析

不同列车运行速度下的轨排结构振动竖向、横向加速度如图4所示。试验表明:轨排结构各测点

加速度与试验列车的速度变化呈现正变化关系,各测点处在同样的列车速度下,竖向加速度均大于横向加速度;当列车速度达到 160 km/h,测点最大加速度均在 F 型导轨翼板处,其竖向加速度为 24.00 m/s²,横向加速度为 17.65 m/s²;F 型导轨翼板加速度>H 型钢枕底板加速度>承轨梁顶面加速度;F 型导轨翼板与 H 型钢枕底板的加速度变化趋势明显大于承轨梁顶面。

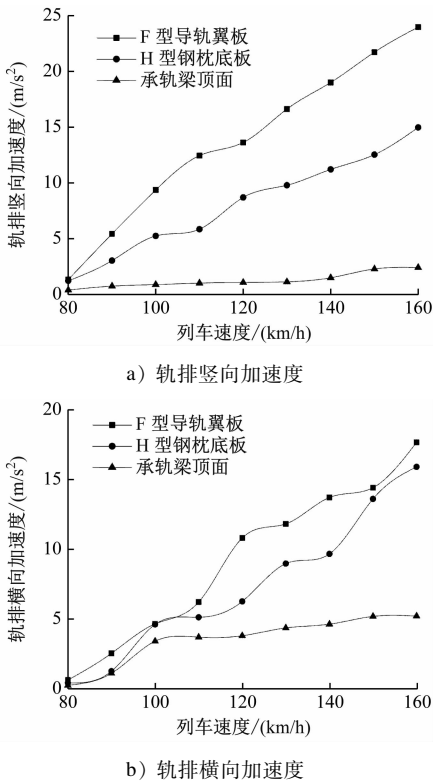


图4 不同列车运行速度下轨排加速度

Fig.4 Acceleration diagram of rail row at different train running speeds

2.3 轨排应变响应分析

不同列车运行速度下的轨排结构应变响应如图 5 所示。试验表明:轨排结构各测点应变值与试验列车的速度变化呈现正相关关系,当列车速度达到 160 km/h,测点最大应变在 F 型导轨外腿,达到 $1\,169.93 \times 10^{-6}$;F 型导轨外腿应变>F 型导轨内腿应变>H 型钢枕盖板端部应变>H 型钢枕底板端部应变>H 型钢枕盖板中部应变>F 型导轨翼板应变,其中,F 型导轨轨缝处内腿、外腿及 H 型钢枕盖板端部的应变明显大于其他测点处的应变;列车速度为 110~140 km/h 时,H 型钢枕底板端部的应变增大较为明显;列车速度为 140~160 km/h 时,H

型钢枕底板端部的应变接近 H 型钢枕盖板端部的应变,并保持稳定。

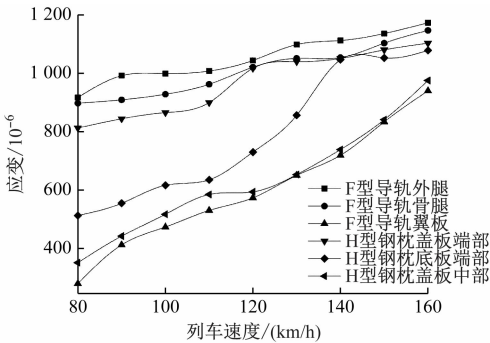


图5 不同列车运行速度下轨排应变

Fig.5 Rail row strain at different train running speeds

计算所得各测量点的应力(仅计算列车速度为 160 km/h 时的应力)如表 1 所示。列车运行速度达到 160 km/h,各测点的应力值均小于屈服强度 235 MPa(F 型钢与 H 型钢枕均为 Q235D 钢)。

表 1 车速 160 km/h 时轨道的应力监控数据

Tab.1 Track strain monitoring data with train speed of 160 km/h	
测点位置	应力值/MPa
F 型钢轨外腿	228.69
F 型钢轨内腿	226.27
F 型钢轨翼板	197.08
H 型钢枕盖板端部	224.10
H 型钢枕底板端部	220.97
H 型钢枕盖板中部	204.47

3 列车荷载对轨排结构的动力响应分析

分别研究了 AW0(空车)和 AW2(定员)两种列车荷载工况,对轨排结构动力的影响(见图 6)。以对轨排加速度的影响为例,不同列车运行速度下,

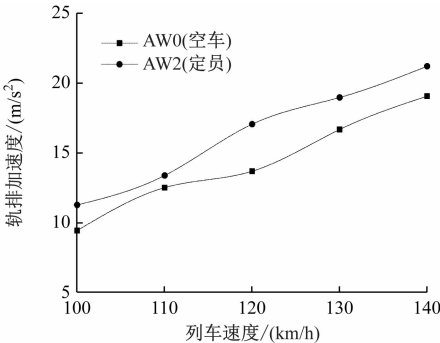


图6 不同列车荷载对轨排加速度的影响

Fig.6 Influence of different train loads on rail row acceleration

AW2 下轨排的加速度响应值明显大于 AW0; 当列车速度为 140 km/h 时, AW0 下轨排加速度为 19.05 m/s^2 , AW2 下轨排加速度为 21.19 m/s^2 , 但均远小于评价值的 100 m/s^2 。

4 不同桥梁梁型对轨排结构的动力响应分析

考虑不同桥梁梁型对轨排结构的动力响应, 分别对简支梁和连续梁处轨排结构的振动位移和加速度进行分析。不同桥梁梁型对轨排结构的动力响应如图 7 所示。不同列车速度下, 简支梁处轨排的位移和加速度均大于连续梁轨排的位移和加速度, 试验列车以 160 km/h 通过时, 简支梁轨排的最大振动位移为 0.37 mm, 最大振动加速度为 24.00 m/s^2 ; 连续梁轨排的最大振动位移为 0.27 mm, 最大振动加速度为 20.54 m/s^2 。其主要原因在于连续梁的刚度和质量大于简支梁的刚度和质量, 列车荷载作用下连续梁振动小于简支梁振动, 轨道-桥梁的耦合振动也更小。

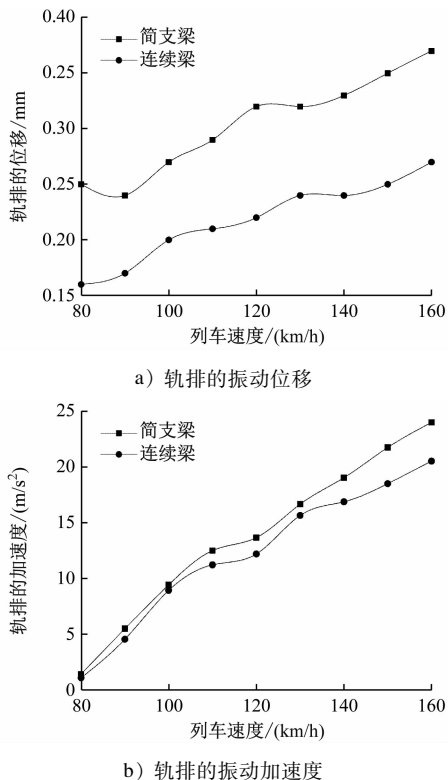


图7 不同桥梁梁型对轨排结构的动力响应

Fig. 7 Dynamics response of different bridge types to rail row structure

5 结语

选取既有中低速磁浮商业运营线的直线平坡

地段, 分别在简支梁和连续梁跨中轨排端部布置测点, 测试列车以不同的速度运行时轨排结构的动态响应, 得到如下结论:

1) 轨排结构各测点的动力响应值(位移、加速度、应变)随列车运行速度的增加呈增长趋势; 由于轨排结构特殊的悬臂构造, F型导轨的动力响应值最大, H型钢枕次之, 承轨梁顶面处最小。

2) 试验列车以最大 160 km/h 速度通过时, F型导轨的最大振动位移是 0.37 mm, 最大振动加速度为 24.00 m/s^2 ; H型钢枕的最大振动位移为 0.30 mm, 最大振动加速度为 15.89 m/s^2 ; 承轨梁顶面的最大振动加速度为 5.21 m/s^2 。试验结果表明, 各测点的动力响应满足评价指标, 各测点的应力值也在材料屈服强度范围内, 列车运行平稳。

3) 列车荷载对轨排结构的动力特性有着明显影响, 定员荷载作用下的轨排响应值大于空车的轨排响应值, 但均满足评价指标。

4) 简支梁的轨排结构动力响应大于连续梁的轨排结构的动力学响应, 主要原因在于连续梁的刚度和质量大于简支梁的刚度和质量, 桥梁与轨道结构耦合作用引发的振动小于简支梁的振动。因此针对更高速度的中低速磁浮交通系统, 应考虑增大承轨结构的刚度和质量。

参考文献

- [1] 杨其振, 刘道通, 于春华. 中低速磁浮交通轨道工程研究与设计[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(10): 35.
YANG Qizhen, LIU Daotong, YU Chunhua. Research and design of medium and low speed maglev traffic track engineering[J]. Railway Standard Design, 2010, 54(10): 35.
- [2] 蔡文锋, 颜华, 杨平. 中低速磁浮轨道系统特点及工程适应性分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(2): 54.
CAI Wenfeng, YAN Hua, YANG Ping. Analysis of the characteristics and engineering adaptability of track system for medium and low speed maglev transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(2): 54.
- [3] 张学山. 中低速磁浮交通轨排连接性能对轨道动力响应的影响[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(2): 115.
ZHANG Xueshan. Influence of connection performance of medium-low-speed maglev traffic rails on track dynamic response[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(2): 115.
- [4] 李爱丽, 倪燕平, 高日. 中低速磁浮轨排结构动力性能试验研究[J]. 铁道建筑, 2013, 53(10): 106.
LI Aili, NI Yanping, GAO Ri. Experimental study on dynamic performance of track panel used in medium-low speed maglev system[J]. Railway Engineering, 2013, 53(10): 106.

(下转第 159 页)