

基于列车-桥梁耦合振动模型的高温超导磁浮车辆悬挂参数优化^{*}

何 燕¹ 吴兴文^{1**} 杨浚纲² 池茂儒²

(1. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都;

2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 为提高高温超导磁浮车辆在高速运行下的品质,建立了高温超导磁浮列车-桥梁耦合振动模型,分析了桥梁刚度和车辆悬挂参数匹配对车辆系统动力学性能的影响。并通过叠加轨道不平顺谱实现桥梁预拱,分析车辆系统的动力学响应。结果表明:高温超导磁浮车辆在高速运行下,其平稳性对减振器阻尼和桥梁挠跨比的取值较敏感;桥梁挠跨比取 $1/7\ 752$ 、桥梁挠度取 4.1 mm 、桥梁预拱量取 4 mm 时能抵消车辆高速运行过程中桥梁下挠带来的线路不平顺,使车辆动力学性能达到最优。

关键词 高温超导磁浮车辆; 悬挂参数; 列车-桥梁耦合振动模型

中图分类号 U270.33:U237

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.005

Optimization of High-temperature Superconducting Maglev Vehicle Suspension Parameters Based on Train-Bridge Coupling Vibration

HE Yan, WU Xingwen, YANG Jungang, CHI Mao-ru

Abstract In order to improve the quality of HTS (high-temperature superconducting) maglev vehicle under high-speed operation condition, the HTS maglev train-bridge coupling vibration model is established, and the influence of bridge stiffness and vehicle suspension parameter matching on vehicle system dynamics performance is analyzed. Bridge pre-cambering is realized through superimposing spectrum of track irregularities and vehicle system dynamic response is analyzed. The results suggest that during the high-speed operation of HTS maglev vehicle, the stability is more sensitive to the damping of the vibration reduction device and the value of bridge deflection-span ratio; when the above ratio is $1/7\ 752$, bridge deflection is 4.1

mm and bridge pre-cambering is 4 mm , the line irregularity caused by bridge deflection in vehicle high-speed operation can be eliminated and the vehicle dynamics performance is optimal.

Key words HTS maglev vehicle; suspension parameter; vehicle-bridge coupling vibration

First-author's address School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

0 引言

在“后高铁时代”的今天,如何突破轮轨黏着带来的速度限制实现更高速度运营,是当今城市轨道交通行业研究的重点。磁浮技术依靠电磁吸力或者斥力实现悬浮,规避了轮轨接触带来的滚动噪声;采用直线电机进行驱动,突破了轮轨黏着带来的速度限制。因此,磁浮技术成为更高速度列车的首选制式。磁浮技术主要分为永磁电动悬浮、常导电磁浮和超导钉扎悬浮(高温超导磁浮)等制式:永磁电动悬浮利用铝感应板切割磁力线产生磁场实现车体悬浮,车辆在静止或低速时不能悬浮,且需设专门的导向机构。常导电磁浮采用电磁吸力悬浮,通过调节电磁铁中的电流大小来实现稳定悬浮,需要外部供电和精确的主动控制系统,且车辆速度的提升受列车-轨道耦合振动的影响和限制。高温超导磁浮为我国自主研发技术,该制式相比其他制式具有自稳定、自悬浮和自导向的优点;车辆的悬浮与导向均通过“钉扎”现象实现,无需主动控制,适用于全速度域。因此,高温超导磁浮技术成为高速磁浮列车的首选技术之一。

^{*} 中国科协青年托举工程项目(2019QNRC001);四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0469)

^{**} 通信作者

磁浮列车在高速运行时,除了受到外部气动载荷的影响,磁轨不平顺带来的磁轨关系扰动是影响列车运行平稳性的关键因素。为了减小地面空间的使用量以及控制轨道不平顺度,现有高速磁浮和中低速磁浮车辆大多行驶在高架桥上。然而,当车辆运行在桥梁上时,桥梁挠度的波动会使磁轨不平顺发生突变,从而为车辆的运行平稳性带来巨大影响。文献[1]研究了考虑列车-桥梁垂向耦合作用下的车辆系统动力响应。结果表明,车辆运行速度处于 400 km/h 以下对车辆系统的动力响应影响不大;但当车辆运行速度超过 400 km/h 后,车辆的运行平稳性急剧恶化。因此,需对车辆和线路参数重新进行优化匹配才能取得较好的性能。文献[2]基于 ANSYS 软件平台,建立了考虑 F 轨和柔性桥梁的中低速磁浮列车-轨道-桥梁垂向耦合动力学模型,研究了列车-桥梁系统在 80 km/h 时的振动响应。文献[3]采用移动荷载模拟磁浮车辆作用,建立并求解桥梁动力方程,分析不同行车速度、不同桥梁阻尼比等工况下的桥梁动力响应。结果显示,桥梁动力系数随列车运行速度的增加逐渐增加。文献[4]采用数值分析方法分析了超高速磁浮车辆通过简支桥梁时列车-桥梁耦合系统的动力响应。结果表明,桥梁竖向振动加速度是磁浮车辆行车安全的控制性指标之一。文献[5]采用 Euler-Bernoulli 桥梁模型,对控制参数导致的车轨耦合振动失稳进行了分析,研究不同轨道梁结构参数对中低速磁浮车轨耦合振动的影响。结果表明,调整轨道梁刚度、改变轨道梁固有频率,以及增大系统阻尼比,可以抑制控制参数引起的车轨高频耦合振动。文献[6]结合上海磁浮轨道梁,根据磁浮列车通过桥梁的有限元仿真,分析过桥时列车-桥梁动力响应规律,并指出轨道梁刚度对车辆动力响应有显著影响,需要对轨道梁刚度进行优化设计。

以上文献表明,列车-桥梁耦合振动对车辆动力响应的影响不可忽略。在列车高速运行工况下,列车-桥梁耦合振动会急剧恶化列车的运行平稳性。因此,在进行车辆悬挂参数优化设计时,非常有必要考虑车辆悬挂参数与桥梁刚度的优化匹配关系。本文的研究对象为高温超导磁浮列车,由于其自稳定、自悬浮和自导向的特性,在车辆设计中不考虑悬浮控制系统。因此,在外部激励作用下,整个系统可以简单考虑为仅有一个悬挂系统的车辆系统。高温超导体能量损耗的主要形式为磁滞损耗,即磁

滞效应。而在一次循环运动内,磁滞损耗只与外磁场变化的幅值有关,和外磁场变化的频率无关。外磁场激励振幅具有临界值,当外磁场激励振幅大于该值时,其能量损耗随外加激励振幅的增加而增加;而当激励振幅小于该值时,外磁场激励振幅的变化对能量损耗几乎无影响^[7]。因此,在建立动力学模型时忽略磁滞效应具有一定的合理性。由于磁滞损耗的忽略不计,外部的激励会直接传递到悬浮架,可以预料在列车高速运行工况下列车-桥梁耦合振动必将为列车的运行平稳性带来严重影响。因此,非常有必要在车辆悬挂参数优化设计时,考虑列车-桥梁耦合振动带来的影响。为此,本文建立了完善的高温超导磁浮列车-桥梁耦合振动模型,在考虑桥梁柔性的情况下研究了车辆悬挂参数与桥梁刚度之间的优化匹配关系;同时提出了基于车辆运行平稳性的桥梁预拱量建议值。

1 高温超导磁浮列车-桥梁耦合振动模型

本文研究的高温超导磁浮列车采用西南交通大学提出的悬浮制式^[8]。该列车主要有车载超导材料、低温系统、地面永磁轨道系统和直线驱动系统等关键部分组成,如图 1 所示^[9]。悬浮架作为车辆的核心系统,上部通过空气弹簧和减振器与车体连接,下部通过杜瓦与磁轨直接作用。其中,杜瓦作为盛装超导块材的容器均匀布置在杜瓦梁下部。

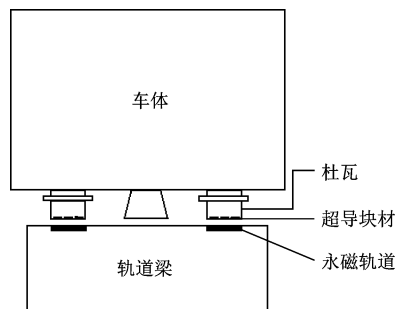


图1 高温超导磁浮列车的关键组成部分

Fig.1 Key components of HTS maglev train

图2给出了本文建立的高温超导磁浮列车-桥梁耦合振动模型。考虑到列车长度全覆盖桥梁长度,因此模型中考虑了2节车辆。每节车辆下方设置6个悬浮架,每个悬浮架安装12个杜瓦;悬浮架与车体之间安装空气弹簧、垂向减振器、横向减振器和牵引拉杆等悬挂装置。采用 Timoshenko 梁对

高速磁浮筒支桥梁进行建模,模型中共计考虑了 32 跨,每跨跨度为 32 m。

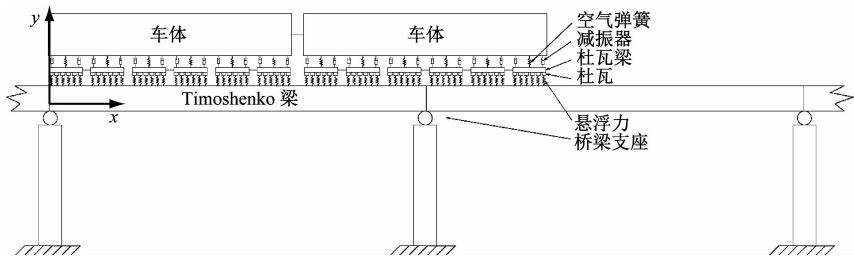


图 2 高温超导磁浮列车-桥梁耦合振动模型

Fig. 2 Train-bridge coupling vibration model of HTS maglev train

1.1 高温超导磁浮列车模型

高温超导磁浮列车模型将每节车辆简化为 1 个车体和 6 个悬浮架,其中每个悬浮架中部布置 1 个电机,两侧各有 6 个杜瓦对称固接在杜瓦梁上。将车辆系统各部件均视为刚体,经计算高温超导磁浮列车每节车辆共计 115 个自由度。其中,每节车辆的 22 个主要自由度,如表 1 所示。

表 1 高温超导磁浮车辆系统的主要自由度
Tab.1 Freedom degres for HTS maglev vehicle systems

名称	自由度数量	伸缩	横移	浮沉	侧滚	点头	摇头
车体	1	✓	✓	✓	✓	✓	✓
杜瓦梁	12	✓	✓	✓	✓	✓	✓
牵引拉杆	6	✓	✓	✓	✓	✓	✓
中心销	3	-	-	-	-	-	✓

注: - 表示部件不存在该方向上的自由度; ✓ 表示部件有该方向上的自由度。

车体与每个悬浮架各有 2 个空气弹簧和 4 个垂向减振器左右对称分布,以对轨道不平顺激励传递给车体的振动进行衰减。在模型中,空气弹簧采用弹簧阻尼并联模型进行简化,而减振器采用 Maxwell 弹簧阻尼串联。每个杜瓦的悬浮力和导向力均采用试验获得的杜瓦特性曲线获得,即选取 1 个杜瓦以名义悬浮高度固定,力传感器通过夹具连接在杜瓦盖板上,通过伺服电机连接杜瓦控制其偏移量,从杜瓦偏移量为 0 的起始位置以 1 mm 的偏移量横向移动至极限横移量(本文取 10 mm),然后再回到平衡位置,如此往复 3 次导向力趋于稳定,再依照上述方法开始测量。垂向悬浮力测量方法同上。由此可得到杜瓦悬浮力和导向力特性曲线,如图 3 和图 4 所示。

1.2 桥梁模型

由于目前尚无高温超导磁浮车辆下桥梁截面

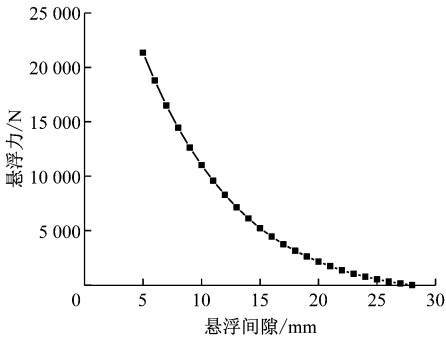


图 3 杜瓦悬浮力特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of Dewar suspension force

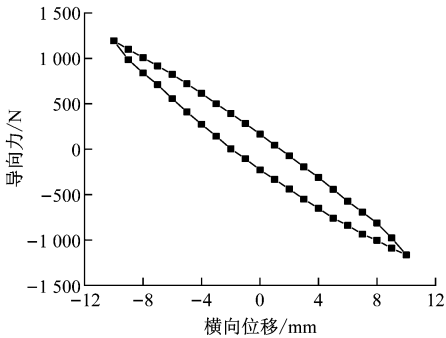


图 4 杜瓦导向力特性曲线

Fig. 4 Characteristic curve of Dewar guiding force

的设计,因此采用 Timoshenko 梁模型对桥梁进行简化。式(1)给出了 Timoshenko 梁模型关于垂向和横向位移及截面转角的振动微分方程^[10],采用模态叠加法对桥梁的动态响应进行求解。Timoshenko 梁关于桥梁的垂向振动微分方程如下:

$$m_r \frac{\partial^2 Z_r(x,t)}{\partial t^2} + \kappa A_r G_r \left[\frac{\partial \psi(x,t)}{\partial x} - \frac{\partial^2 Z_r(x,t)}{\partial x^2} \right] = - \sum_{i=1}^N F_{rsi}(t) \delta(x-x_i) + \sum_{j=1}^4 Q_j(t) \delta(x-x_{wj}) \quad (1)$$

式中:

F_{rsi} ——桥梁支点反力;

$\delta(\cdot)$ ——狄拉克函数;

κ ——桥梁剪切因子;

A_r ——桥梁截面面积;
 G_r ——桥梁剪切模量;
 Q_j ——车体垂向作用力;
 x ——桥梁横向坐标;
 x_i ——桥梁支点横向坐标;
 x_{wj} ——杜瓦横向运动坐标;
 t ——时间;
 ψ ——弯矩作用下的截面转角。

1.3 磁浮轨道谱

目前尚没有高温超导磁浮轨道不平顺谱,本文的计算分析采用了文献[11]中的高速磁浮轨道谱

作为列车-桥梁耦合振动模型的输入。其采用七参数拟合函数描述磁浮线路不平顺,功率谱密度函数拟合公式见式(2)。磁浮轨道谱的主要拟合参数如表2所示。采用三角级数方法可以得到轨道不平顺激励,如图5所示。

$$S(\Omega) = \frac{A(\Omega^2 + B\Omega^3 + C)}{\Omega^4 + D\Omega^3 + E\Omega^2 + F\Omega + G}$$
 (2)

式中:
 $S(\Omega)$ ——功率谱密度;
 $A、B、C、D、E、F$ 和 G ——功率谱特性参数。

表2 磁浮轨道不平顺谱的主要参数

Tab.2 Main parameters of maglev track irregularity spectrum

项目	A	B	C	D	E	F	G
垂向	0.109 85	-2.249 78	0.542 37	-100.786 99	30.531 82	-0.897 44	0.008 690 000 0
横向	0.033 91	35.513 35	-0.428 13	32.463 66	1.902 77	-0.032 11	0.000 034 954 9

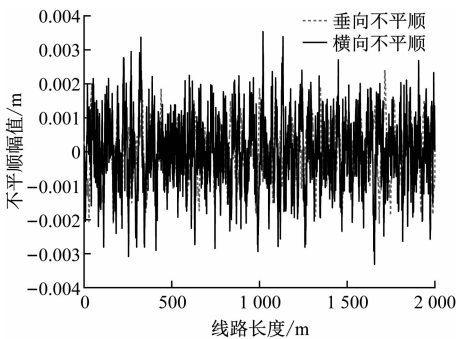


图5 磁浮轨道不平顺激励

Fig.5 Irregularity excitation of maglev track

图5给出了本文计算分析中使用的磁浮轨道不平顺。轨道不平顺在横向和垂向的幅值均在[-4, 4] mm内。

2 高温超导磁浮列车-桥梁耦合振动响应

基于高温超导磁浮列车-桥梁耦合振动模型,本文研究了列车在100~600 km/h速度下的列车-桥梁动力响应。图6为列车以不同速度通过桥梁跨中时的桥梁竖向挠度时程曲线。由图6可见:在列车动态载荷作用下,桥梁挠度表现为先上翘、后下挠的特征;同时,列车运行速度对桥梁的动态挠度有显著影响,随着列车运行速度的增加,桥梁动态挠度呈减小趋势。

图7给出了不同速度情况下列车行驶在刚性桥梁和柔性桥梁下的垂向平稳性指标。由于目前尚无高速磁浮列车动力学性能评定规范,本文列车平

稳性及舒适度指标的计算方法参考GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验规范》^[12]。

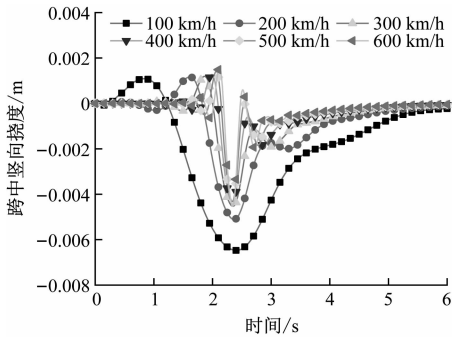


图6 桥梁跨中竖向挠度时程曲线

Fig.6 Time-history curve of bridge mid-span vertical deflection

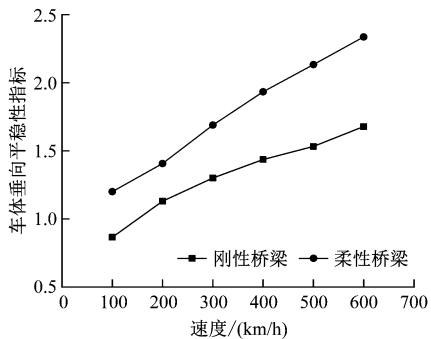


图7 刚、柔性桥梁下车体垂向平稳性指标-列车运行速度关系曲线

Fig.7 Relation curve of vertical stability index and vehicle operating speed under rigid and flexible bridge conditions

其中,平稳性指标 W 具体计算公式见式(3)。

$$W = 3.57^{10} \sqrt{\frac{a^3}{f} F(f)}$$

(3)

式中:

- a ——振动加速度,单位 m/s^2 ;
- f ——振动频率,单位 Hz ;
- $F(f)$ ——频率修正系数,见表 3。

表 3 频率修正系数

Tab. 3 Frequency correction factor

项目	f/Hz	$F(f)$
垂向振动	$0.5 \sim >5.9$	$0.325 f^2$
	$5.9 \sim >20$	$400/f^2$
	≥ 20	1
横向振动	$0.5 \sim >5.4$	$0.8 f^2$
	$5.4 \sim >26$	$650/f^2$
	≥ 26	1

车体平稳性、舒适度等级参考客车平稳性指标等级,如表 4 和表 5 所示。

表 4 客车平稳性等级

Tab. 4 Stability level of passenger carriage

平稳性等级	平稳性指标	评定结果
1 级	$0 \sim 2.50$	优
2 级	$>2.50 \sim 2.75$	良好
3 级	$>2.75 \sim 3.00$	合格

表 5 客车舒适度等级

Tab. 5 Comfort level of passenger carriage

舒适度等级	平稳性指标	评定结果
1 级	$0 \sim <1.5$	非常舒适
2 级	$1.5 \sim <2.5$	舒适
3 级	$2.5 \sim <3.5$	一般
4 级	$3.5 \sim <4.5$	不舒适
5 级	≥ 4.5	非常不舒适

由表 4 和表 5 可见:车辆垂向平稳性指标随着行车速度增大而增大,同时考虑到柔性桥梁的车辆垂向平稳性指标明显大于未考虑桥梁柔性的车辆垂向平稳性指标。由此说明,列车-桥梁的耦合振动会显著影响车辆运行平稳性。

为了进一步说明列车-桥梁耦合振动对车辆动力响应的影响,图 8 给出了列车-桥梁耦合振动对车体垂向振动加速度的影响。考虑桥梁柔性得到的车体垂向振动加速度明显大于桥梁刚性情况下的

结果;同时考虑桥梁柔性的车体垂向振动加速度频域存在明显的主频 5.2 Hz,该主频为车辆以 600 km/h 通过跨距为 32 m 桥梁的通过频率。由此可见,由于车辆动态作用导致的桥梁动态挠度会显著影响车辆动力学性能。因此,在对车辆系统悬挂参数优化时应充分考虑列车-桥梁耦合振动带来的影响。

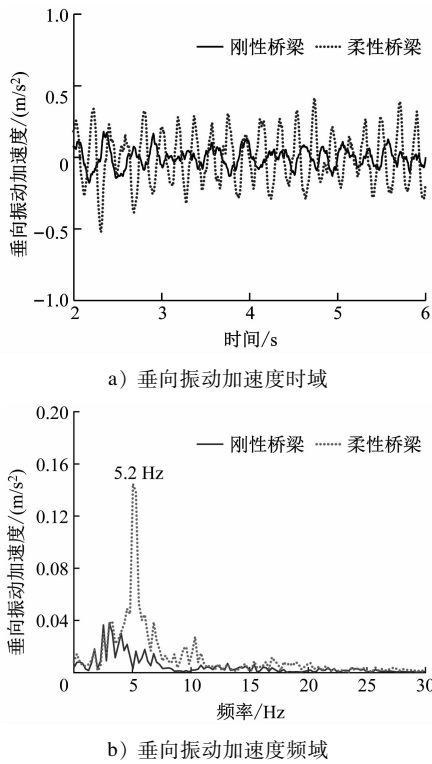


图 8 刚、柔性桥梁下车体垂向振动加速度时域与频域曲线
Fig. 8 Time-domain and frequency-domain of carbody vertical vibration acceleration under rigid and flexible bridge conditions

3 高温超导磁浮列车-桥梁参数优化匹配

3.1 桥梁刚度与车辆悬挂参数的优化匹配

利用本文建立的高温超导磁浮列车-桥梁耦合振动模型,针对列车-桥梁耦合振动对车辆平稳性的影响,对桥梁刚度和车辆悬挂参数之间的优化匹配开展详细研究。

3.1.1 列车-桥梁参数优化工况定义

桥梁的竖向刚度一般采用其挠跨比来表征。桥梁的挠跨比可以表示为桥梁竖向挠度 δ_0 与桥梁跨距 L 的比值。当 δ_0 较大时,支座转角也会增大,导致线路在支座处形成突变,影响线路的连续性和平顺性,进而影响列车安全平稳运行。CJJ/T 310—

2021《高速磁悬浮交通设计标准》对桥梁梁体挠度限值的规定:由列车引起桥梁变形的竖向挠度限值为 $L/4\ 800$,跨比为 $1/4\ 800$ 。本文采用 Timoshenko 梁对桥梁进行简化,通过改变桥梁的弹性模量,得到不同桥梁挠跨比并将其作为改变桥梁竖向刚度的输入。本文共计考虑了 5 种挠跨比,分别是 $1/6\ 315$ 、 $1/7\ 752$ 、 $1/9\ 346$ 、 $1/10\ 753$ 和 $1/12\ 048$,如表 6 所示。

针对车辆悬挂参数,本文主要考虑车辆的垂向动力学性能,即空气弹簧刚度和垂向减振器阻尼两个悬挂参数,其取值范围如表 6 所示。基于列车-桥梁耦合振动的车辆和桥梁参数优化匹配研究时,车辆运行速度取 600 km/h ,分别取 5 组桥梁挠跨比、5 组空气弹簧垂向刚度、4 组减振器垂向阻尼,共计 100 个工况。主要关注车体垂向振动加速度、车体垂向平稳性及车体舒适度等指标。

表 6 桥梁挠跨比和车辆悬挂参数取值
Tab.6 Values of bridge deflection-span ratio and vehicle suspension parameters

桥梁挠跨比	车辆悬挂参数		
	挠度/mm	$K_z/(MN/m)$	$C_{sz}/(kNs/m)$
1/6 315	5.2	0.03	1
1/7 752	4.1	0.05	3
1/9 346	3.4	0.07	5
1/10 753	3.0	0.10	7
1/12 048	2.7	0.20	

注: K_z 为空气弹簧垂向刚度; C_{sz} 为垂向减振器阻尼。

3.1.2 结果分析

图 9 为车辆在不同 K_z 和 C_{sz} 取值下,车体垂向平稳性指标随桥梁挠跨比的变化情况。从图 9 中可以看出:

1) 不同空气弹簧垂向刚度和垂向减振器阻尼参数下车体垂向平稳性指标随桥梁挠跨比的变化趋势大体一致;垂向减振器阻尼较空气弹簧刚度对车辆动力学性能更为敏感。

2) 垂向减振器阻尼一定时,车体垂向平稳性指标和舒适度指标受空气弹簧垂向刚度的影响较小,较小的空气弹簧垂向刚度可以获得更优的垂向性能,但过小的空气弹簧垂向刚度会导致空气弹簧挠度过大。

3) 空气弹簧垂向刚度一定时,车体垂向平稳性指标和舒适度指标随着垂向减振器阻尼增大呈恶

化趋势。这主要由于随着垂向减振器阻尼的增加,磁轨的高频振动更容易传递到车体,因此过大的阻尼反而会恶化车辆动力学性能。

4) 空气弹簧垂向刚度和垂向减振器阻尼一定时,车体垂向平稳性指标和舒适度指标随着桥梁挠跨比增大呈增大趋势。究其原因是桥梁的挠跨比较大时,对车辆的扰动较大。因此,在考虑桥梁建造成本的基础上,采用较大的桥梁刚度(较小的挠跨比)更有利于车辆的动力学性能的提升。

5) 当垂向减振器阻尼取 3 kNs/m 时,高温超导磁浮车辆在各个桥梁挠跨比工况下都能取得较好的平稳性。

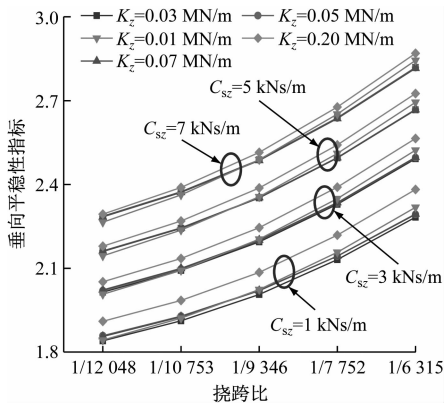


图 9 车体垂向平稳性指标-桥梁挠跨比关系曲线
Fig.9 Relation curve of carbody vertical stability index and bridge deflection-span ratio

垂向减振器阻尼为 3 kNs/m 的工况下,空气弹簧垂向刚度对车辆动力学性能的影响,如图 10—图 12 所示。

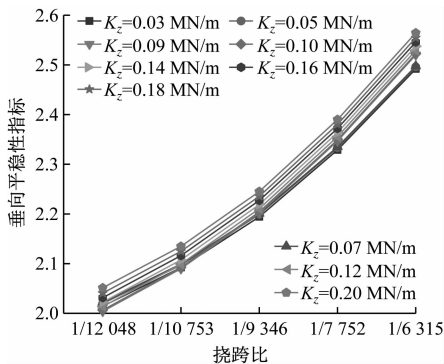


图 10 C_{sz} 为 3 kNs/m 时车体垂向平稳性指标
Fig.10 Vertical stability index with C_{sz} of 3 kNs/m

图 10—图 12 给出了不同挠跨比情况下,空气弹簧垂向刚度对车体垂向平稳性指标、舒适度指标和垂向振动加速度的影响。结果表明:随着空气弹

簧垂向刚度增大,车体垂向平稳性指标呈缓慢均匀增大趋势;而随着桥梁挠跨比的增大,车体垂向平稳性指标呈显著恶化趋势。由图 10—图 12 可以看出,垂向减振器阻尼取 3 kNs/m 时,车体舒适度指标和车体垂向振动加速度在空气弹簧垂向刚度为 0.03 ~ 0.07 MN/m 的范围内变化不明显,且过小的空气弹簧垂向刚度导致车体振动位移较大,使得车体的动力学指标反而较大;当空气弹簧垂向刚度取 0.09 MN/m 时,车辆动力学性能达到最优,随后随着空气弹簧垂向刚度的增大,车体舒适度指标和车体垂向振动加速度缓慢增大。由此可见,空气弹簧垂向刚度取值不宜过小,本文建议其取值在 0.1 MN/m 左右。对于桥梁挠跨比,考虑到桥梁的建造成本,其挠跨比不宜大于 1/7 752。

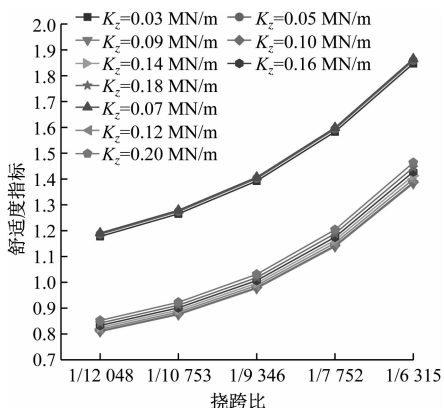


图 11 C_z 为 3 kNs/m 时车体舒适度指标

Fig. 11 Comfort index with C_z of 3 kNs/m

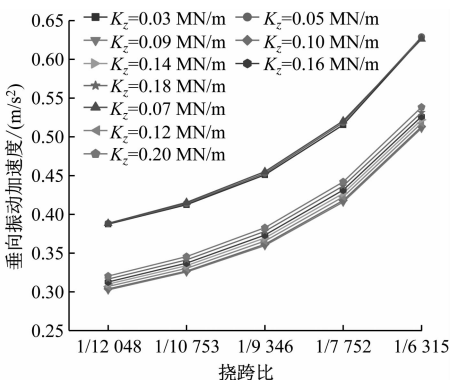


图 12 C_z 为 3 kNs/m 时车体垂向振动加速度

Fig. 12 Carbody vertical vibration acceleration with C_z of 3 kNs/m

3.2 桥梁预拱对车辆动力学性能的影响

为进一步提升高温超导磁浮车辆的运行平稳性,规避磁浮车辆高速行驶所导致的桥梁动态挠度的影响,本文对桥梁预拱量对车辆系统动力学性能

的影响进行了研究。通过预先对每跨桥梁施加 1 个上拱量,以抵消磁浮车辆高速行驶引起的桥梁下挠,并给出高温超导磁浮车辆的桥梁预拱量建议值。

桥梁预拱可以通过叠加上拱曲线到轨道谱中或在梁体跨中施加 1 个向上的集中力实现。考虑到将桥梁施加的集中力转换为桥梁预拱量较为复杂,故本文采用前者。将桥梁预拱量转换为上拱曲线幅值与轨道垂向不平顺幅值的叠加量,其具体方法是:将不同上拱幅值的正弦曲线叠加到轨道垂向不平顺谱中来模拟桥梁的不同预拱量。本文采用的具体曲线方程如下:

$$y = A_0 \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right), 0 \leq x \leq L \quad (4)$$

式中:

A_0 ——上拱幅值(或称预拱量);

y ——桥梁预拱量。

将 A 分别为 2 mm、4 mm、6 mm、8 mm 时的正弦曲线叠加到磁浮轨道垂向不平顺谱中得到叠加预拱量的垂向不平顺曲线,并进行计算分析。图 13 给出了桥梁预拱量为 6 mm 的垂向不平顺曲线。

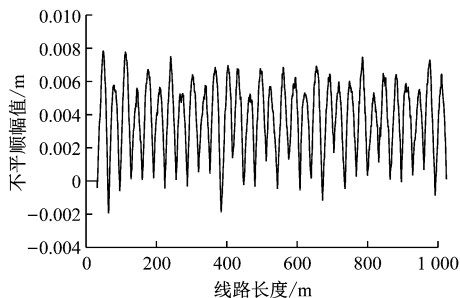


图 13 桥梁预拱量为 6 mm 时的垂向不平顺曲线

Fig. 13 Curve of vertical irregularities with bridge pre-cambering amount of 6 mm

图 14—图 16 给出了桥梁预拱量分别在 2 mm、4 mm、6 mm 和 8 mm 的情况下,列车运行速度为 600 km/h 时,高温超导磁浮车辆车体垂向平稳性指标、舒适度指标和车体垂向振动加速度动力学性能指标随桥梁预拱量大小的变化情况。

结果表明:高温超导磁浮车辆动力学性能指标均随着桥梁预拱量的增大而呈现先减小后增大的趋势;其车体垂向平稳性指标、舒适度指标和车体垂向振动加速度均在桥梁预拱量为 4 mm 时有最小值,即车辆动力学性能最优。这是由于在车辆运行速度 600 km/h 下,未考虑桥梁预拱时桥梁跨中竖向挠度为 4.1 mm,而桥梁预拱量 4.0 mm 能抵消车辆

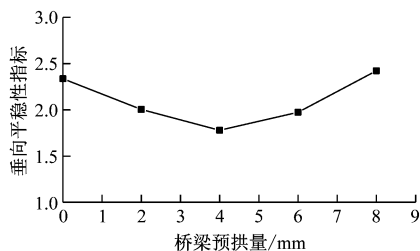


图14 车体垂向平稳性指标-桥梁预拱量关系曲线

Fig. 14 Relation curve of carbody vertical stability index and bridge pre-cambering amount

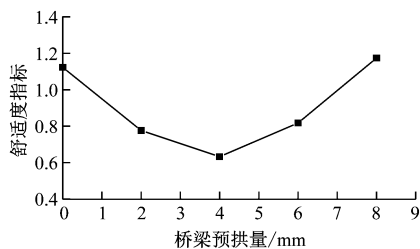


图15 车体舒适度指标-桥梁预拱量关系曲线

Fig. 15 Relation curve of carbody comfort index and bridge pre-cambering amount

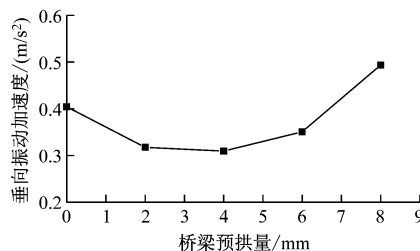


图16 车体垂向振动加速度-桥梁预拱量关系曲线

Fig. 16 Relation curve of carbody vertical vibration acceleration and bridge pre-cambering amount

行驶过程中带来的桥梁动态挠度,从而提高了车辆运行平稳性;而当桥梁预拱量超过 4.1 mm 且继续增大时会引起桥梁上挠,导致车辆动力学性能下降。由此可见,合适的预拱量可以抵消桥梁动态挠度的影响,从而改善车辆的运行平稳性。

4 结论

1) 在所考虑的参数分析范围内,高温超导磁浮车辆运行平稳性对桥梁刚度和垂向减振器较为敏感,空气弹簧垂向刚度次之。随着桥梁挠跨比的增加,列车运行平稳性指标呈现明显恶化趋势。在考虑土木建造成本的基础上,建议桥梁挠跨比小于 1/7 752。随着垂向减振器阻尼的增加,磁轨高频振动容易传递到车体,从而影响车体垂向动力学性能。由于磁轨关系阻尼很小,因此在考虑车辆运行平稳

性的基础上建议单个垂向减振器阻尼取 3 kNs/m 左右,单个悬浮架垂向减振器总阻尼取 12 kNs/m 左右,空气弹簧垂向刚度取 0.1 MN/m 左右。

2) 随着桥梁预拱量的增加,高温超导磁浮车辆动力学性能指标呈现先减小后增加的趋势。当桥梁的预拱量 4 mm 为桥梁的名义挠度时,车辆的动力学性能达到最优。由此可见,选取合适的桥梁预拱量,可以改善车辆动力学性能。

参考文献

- [1] 赵春发, 翟婉明, 蔡成标. 磁浮车辆/高架桥垂向耦合动力学研究[J]. 铁道学报, 2001, 23(5): 27.
ZHAO Chunfa, ZHAI Wanming, CAI Chengbiao. Maglev vehicle/elevated-beam guideway vertical coupling dynamics [J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(5): 27.
- [2] 任晓博, 赵春发, 冯洋, 等. 中低速磁浮车辆-轨道-桥梁垂向耦合振动仿真分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(2): 70.
REN Xiaobo, ZHAO Chunfa, FENG Yang, et al. Numerical analysis on vertical coupled vibration of medium-low speed maglev vehicle-track-viaduct system [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(2): 70.
- [3] 朱志辉, 胡明勋, 冯典瑾, 等. 移动车辆荷载作用下中低速磁浮大跨度连续梁桥动力响应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(7): 1695.
ZHU Zhihui, HU Mingxun, FENG Dianjin, et al. Dynamic response analysis of low and medium speed maglev long-span continuous beam bridge traversed by moving train load [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(7): 1695.
- [4] 汪斌, 张焱焱, 于和路, 等. 超高速磁浮车辆-简支梁桥的耦合动力响应[J]. 铁道建筑, 2019, 59(8): 5.
WANG Bin, ZHANG Yankun, YU Helu, et al. Coupling dynamic response of ultra-high speed magnetic levitation vehicle and simply-supported girder bridge [J]. Railway Engineering, 2019, 59(8): 5.
- [5] 韩霄翰, 李忠继, 池茂儒. 轨道梁结构对中低速磁浮车轨耦合振动的影响[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(5): 36.
HAN Xiaohan, LI Zhongji, CHI Maoru. Influence of track beam structure on the mid-low maglev vehicle-rail coupling vibration [J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(5): 36.
- [6] 余华. 磁悬浮轨道梁刚度对列车走行性影响研究[J]. 铁道标准设计, 2005, 49(1): 65.
YU Hua. Impact of rigidity of maglev track beam on running of train [J]. Railway Standard Design, 2005, 49(1): 65.
- [7] 王洪帝. 基于悬浮力特性的高温超导磁悬浮车-桥系统垂向振动响应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
WANG Hongdi. Vertical vibration response of vehicle-bridge coupled systems based on suspension force characteristic [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [8] 邓自刚, 雷武阳, 郑欣欣, 等. 一种高温超导磁悬浮车:

- 201910436411.8 [P]. 2019-08-06.
- DENG Zigang, LEI Wuyang, ZHENG Xinxin, et al. High-temperature superconducting magnetic levitation vehicle; 201910436411.8 [P]. 2019-08-06.
- [9] 王家素, 王素玉. 高温超导磁悬浮列车研究综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(11): 1.
- WANG Jiasu, WANG Suyu. High temperature superconducting maglev train [J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10 (11): 1.
- [10] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2015.
- ZHAI Wanming. Vehicle-track coupled dynamics [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.
- [11] SHI J, FANG W S, WANG Y J, et al. Measurements and analysis of track irregularities on high speed maglev lines[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2014, 15(6): 385.
- [12] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—2019 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2019: 18-22.
- State Administration of Market Regulation, National Standardization Administration. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [13] 倪萍, 许超超, 何军, 等. 超高速磁浮车-轨道梁竖向耦合振动分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1361.
- NI Ping, XU Chaochao, HE Jun, et al. Vertical coupling vibration analysis of ultra high-speed maglev vehicle guideway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16 (6): 1361.
- [14] 李海涛. 高温超导磁悬浮试验车振动特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- LI Haitao. Study on vibration characteristics of high temperature superconducting maglev test vehicle [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [15] WANG H, DENG Z, MA S, et al. Dynamic simulation of the HTS maglev vehicle-bridge coupled system based on levitation force experiment [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 1.
- [16] 周爽. 徐变上拱和温度旁弯对高速铁路桥梁动力性能的影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- ZHOU Shuang. Study on effect of creep camber and thermal side bending on dynamic behavior of high-speed railway bridge [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [17] 黎国清, 刘秀波, 杨飞, 等. 高速铁路简支梁徐变上拱引起的高低不平顺变化规律及其对行车动力性能的影响[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(7): 786.
- LI Guoqing, LIU Xiubo, YANG Fei, et al. Variation law and impact on dynamic performance of profile irregularity caused by creep of simply-supported beam on high-speed railway [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(7): 786.

(收稿日期: 2021-01-04)

全国城市轨道交通资本运作和产业发展联盟揭牌

由青岛地铁集团有限公司发起倡议的轨道交通行业资本运作板块首个全国性联盟组织——“全国城市轨道交通资本运作和产业发展联盟”日前在青岛揭牌。

“全国城市轨道交通资本运作和产业发展联盟”创立大会以“共建共享, 共创共赢”为主题, 各理事单位就搭建行业资源整合平台、建立行业协作生态圈, 以及金融服务产业、资产资本化运营等发展思路展开了积极研讨, 达成广泛共识。随着安全、便捷、绿色、经济的现代交通体系日益成熟, 城市轨道交通行业技术、设备国产化水平不断提升, 城市轨道交通资本运作及产业发展蕴藏着巨大发展机遇与合作空间。城市轨道交通高质量发展对各地轨道交通企业提出了新目标和新要求, 利他共赢、打造良性的产业生态圈将是历史趋势与时代潮流。该联盟通过搭建平台, 凝聚行业发展合力, 促进产业资源共享, 互相补位协同发展, 开创了城市轨道交通产业高质量发展新模式。

(摘编自 20230509《中国经济时报》)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com