

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.10.059

揭惠铁路 72 m+72 m 槽箱组合梁桥车-线-桥耦合振动研究

杨忠良

(广东省铁路规划设计研究院有限公司, 广东 广州 510000)

摘要:为研究温度荷载引起的附加变形对桥上列车行车走行性的影响,基于车-线-桥耦合振动分析方法,分析了在温度荷载作用下 72 m+72 m 槽箱组合连续梁桥和桥上列车的动力响应,探明了结构在成桥运营阶段的变形对桥上轨道平顺性及列车安全性、舒适性的影响规律。结果表明:考虑温度荷载作用时,主梁竖向动力响应略有增大,其中主梁的跨中竖向位移受温度荷载作用影响较大;桥上列车的动力响应随着车速的增加而增大,考虑温度荷载作用时会放大车速对列车动力响应的影响;相较于 CRH6F 型动车组, C70 货车运行时,桥梁的动力响应随着车速的变化不明显,尤其是桥梁的位移,但车辆动力响应对车速较为敏感。

关键词:槽箱组合梁;曲线转体桥;车-线-桥系统;动力响应;行车安全

中图分类号: U441.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)10-0260-07

1 概述

新建揭阳—惠来铁路跨梅汕高铁特大桥,在 DK2+211.100—DK2+283.800 处跨越既有梅汕高铁。本桥跨越梅汕高铁处为路堑段,线位与梅汕高铁夹角 45°。受线站方案和既有铁路条件控制,需尽量降低上跨结构的建筑高度;同时考虑跨越点位于小曲线半径($R=600$ m)范围,为满足结构受力要求,采用转体施工 72 m+72 m 槽箱组合连续梁桥。

新建揭阳至惠来铁路跨梅汕高铁 72 m+72 m 槽箱组合连续梁桥的上部结构为大跨度小曲线预应力混凝土槽箱组合梁,线路曲线半径小,采用两端开口槽型结构与中间闭合箱结合形式,结构受力复杂,尤其是在温度荷载作用下,桥梁及其轨道的变形对列车行车的影响亟待探明。因此,本文基于全桥空间有限元模型,分析了成桥运营阶段结构在温度荷载等作用下的变形行为,并将主梁各种附加变形作为空间轨道不平顺施加于车-线-桥耦合分析模型中,开展温度、收缩徐变等附加变形对桥上列车行车走行性的影响研究,以探明结构在成桥运营阶段的变形对桥上轨道平顺性及列车安全性、舒适性的影响规律。

桥梁为 72 m+72 m 槽箱组合连续梁桥,主桥平面布置图见图 1,桥墩断面图见图 2。桥梁上部结构为槽箱组合梁,桥面净宽 7.0 m。桥梁下部结构为圆端形实体墩,群桩基础。施工方案拟采用支架现浇+墩底转体法施工。

该槽箱组合连续梁桥的结构受力复杂,列车和温度荷载作用易导致其发生明显变形,对桥梁结构产生影响^[1-3],进而对桥上列车行车造成不利影响。目前,有大量学者对温度荷载等附加荷载作用下桥上列车行车安全控制问题进行了研究。朱志辉等^[4]研究了温度荷载作用下拱桥上行车平稳性和安全性控制问题。Wang 等^[5]通过分析轨道几何不平顺检测数据,确定了外界荷载对桥梁长期变形的贡献。一般情况下,考虑到桥梁变形的复杂性以及桥梁与列车的动力耦合,通常采用动力数值技术^[6-8]或高速综合检测列车^[9]来评价或检测桥梁上列车的运行稳定性。杨飞等^[10]以成灌铁路城际桥为研究对象,对轨道的平顺性进行了专门研究。

大量分析表明:列车在桥上通行时,温度荷载会对桥梁和列车动力特性产生较大影响。本桥采用转体施工,结构受力更加复杂,桥上轨道平顺性较差。为确保温度荷载作用下桥上列车安全通行,有必要对该 72 m+72 m 槽箱组合连续梁桥开展温度荷载作用下的车-线-桥耦合振动仿真分析。

收稿日期: 2023-10-28

作者简介: 杨忠良(1972—),男,学士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

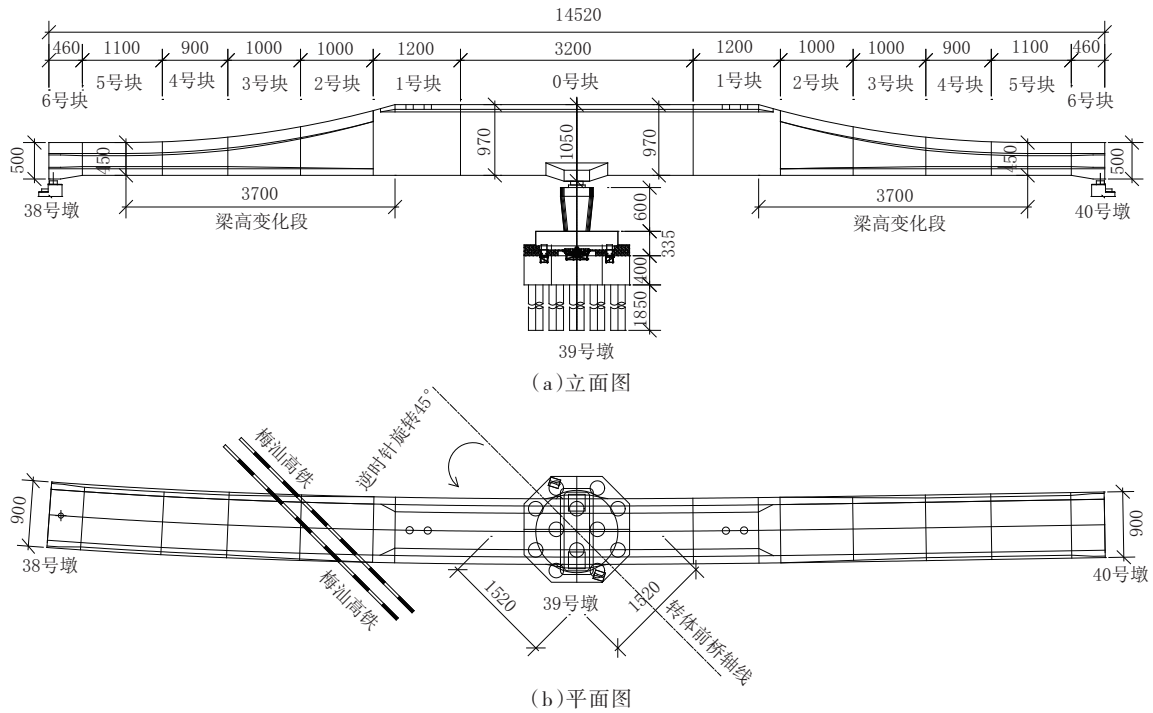


图1 主桥平立面布置图(单位:cm)

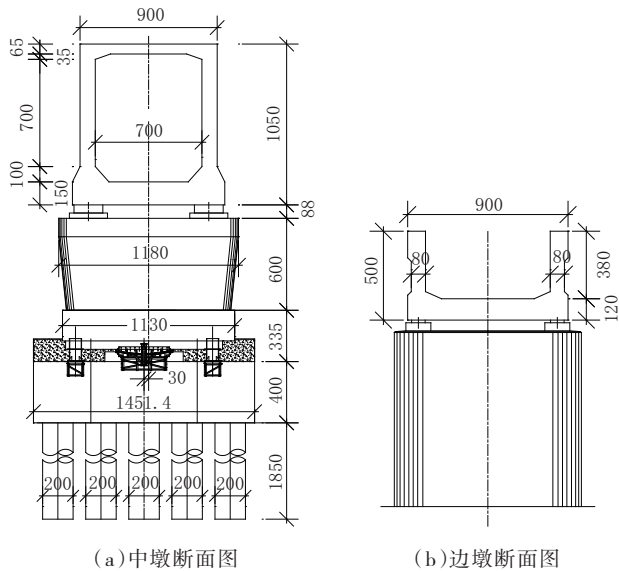


图2 桥墩断面图(单位:cm)

2 车-线-桥耦合振动系统

研究发现,以往的桥梁结构动力研究中未考虑轨道结构对系统动力响应的影响,也因此导致对高速列车与桥梁结构的动态相互作用研究不够精确。本文考虑了桥上轨道结构参振,将其与桥梁结构耦合成一个整体大系统。这种方法能够更加准确地研究高速列车与桥梁结构的相互作用。另外,高速列车的运行会导致轨道结构变形和振动,这些变形和振动会传递到桥梁结构中,对其产生影响。因此,在进行桥梁结构的设计和评估时,必须考虑到轨道结构

的影响。同时,在高速列车的运行过程中,也需要对轨道结构进行定期检查和维修,以确保其稳定性和安全性,从而保证高速列车的行车安全,并延长桥梁结构的使用寿命。

2.1 车-线-桥模型

列车模型采用CRH6F型动车组和C70货车,在计算时均可以简化为具有2级悬挂系统的铁路四轴车辆,共7个刚体、35个自由度模型。

新建揭阳至惠来铁路跨梅汕高铁72 m+72 m槽箱组合连续梁桥采用有砟轨道,由钢轨、扣件、钢筋混凝土轨枕和道床等部分构成。钢轨可看作无限长度 Euler 柱,而轨枕视为刚体;钢轨和轨枕均考虑垂向、横向和扭转(转动)自由度。这种考虑能够更加准确地描述铁路运营中的实际情况,各个构件之间均采用线形弹簧和黏性阻尼连接。有砟轨道动力学模型示意图见图3。

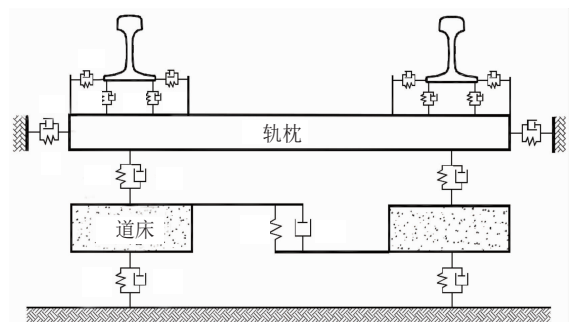


图3 有砟轨道动力学模型示意图

基于有限元方法,建立了72 m+72 m槽箱组合连续梁桥分析模型,见图4。

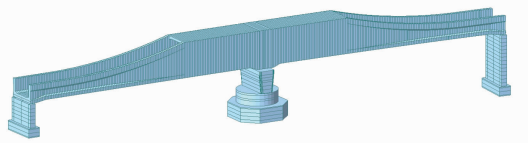


图4 全桥有限元模型

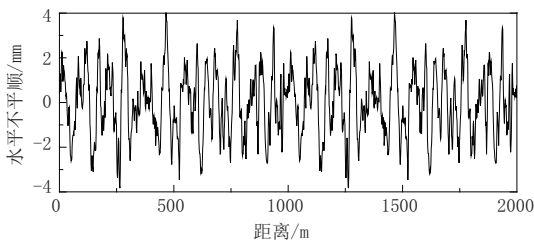
根据本桥的结构形式,梁体、桥墩、承台等均为混凝土结构,圆端形实体墩上横梁为钢材;为方便模拟和计算,横梁与墩顶采用刚臂连接。本桥边墩为滑动支座,中墩为固定支座;在模型中采用弹性连接模拟支座,边支座刚度取极小值来模拟滑动支座,中支座刚度取0.1倍竖向刚度来模拟固定支座。承台底部采用等效刚度模拟桩基础。本桥采用子空间迭代法进行模态分析,桥梁典型自振频率和对应振型特点见表1。

表1 桥梁典型自振频率和对应振型特点

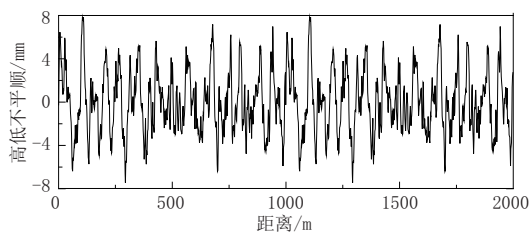
阶次	频率/Hz	周期/s	振型特点
1	0.216	4.616	右侧桥墩纵弯
3	0.726	1.377	主梁1阶反对称横弯
4	0.867	1.153	主梁2阶横弯
5	0.934	1.071	主梁纵漂
6	1.916	0.522	主梁1阶反对称竖弯
7	2.312	0.433	主梁3阶正对称横弯
9	3.544	0.282	主梁2阶正对称竖弯

2.2 系统激励源

轨道平顺性对于列车通行的安全性和舒适性非常重要。当轨道存在不平顺时,车辆会产生振动响应,从而对行车的安全性和舒适性产生不利影响^[11],因此,轨道的不平顺问题需要引起重视。基于目前的研究和工程实际情况,本文采用德国高干扰谱^[12]来模拟轨道不平顺。轨道不平顺模拟样本见图5。



(a)水平不平顺



(b)高低不平顺

图5 轨道不平顺模拟样本

2.3 系统运动方程及求解

车辆运动方程为:

$$M_v \ddot{u}_v + C_v \dot{u}_v + K_v u_v = P_v \quad (1)$$

式中: P_v 为振动过程中作用于车辆各自由度的荷载列向量,一般是轨道不平顺和桥梁各自由度振动状态的函数; M_v 、 C_v 、 K_v 分别为车辆的质量、阻尼和刚度矩阵; \ddot{u}_v 、 \dot{u}_v 、 u_v 分别为车辆自由度的位移、速度和加速度列向量。

轨道的运动方程为:

$$M_t \ddot{u}_t + C_t \dot{u}_t + K_t u_t = P_t \quad (2)$$

式中: P_t 表示轨道系统的广义荷载列向量; M_t 、 C_t 、 K_t 分别为轨道的质量、阻尼、刚度矩阵; \ddot{u}_t 、 \dot{u}_t 、 u_t 分别为轨道自由度的位移、速度和加速度列向量。

桥梁的运动方程为:

$$M_b \ddot{u}_b + C_b \dot{u}_b + K_b u_b = P_b \quad (3)$$

式中: P_b 表示过桥车辆作用于桥梁各自由度的荷载; M_b 、 C_b 、 K_b 分别为桥梁的质量、阻尼和刚度矩阵; \ddot{u}_b 、 \dot{u}_b 、 u_b 分别为桥梁结构自由度的位移、速度和加速度列向量。

根据结构动力学理论,方程(1)~(3)最终可以构成一个大型复杂非线性动力学系统。其中,可采用新型快速显式积分方法来求解列车和轨道系统的动力学响应,采用Newmark- β 法来求解桥梁结构的动力学响应,显式积分与隐式积分相结合。

3 车-线-桥耦合响应分析

对于新建揭阳至惠来铁路跨梅汕高铁72 m+72 m槽箱组合连续梁桥,根据以上计算模型和计算理论,利用桥梁动力分析软件WTTBDAS V2.0,分析了CRH6F型动车组和C70货车在不同车速、不同温度荷载作用下桥梁和车辆的动力响应。具体车-线-桥耦合响应仿真分析工况见表2;车-线-桥耦合系统仿真计算模型见图6。

表2 车-线-桥耦合响应仿真分析工况

车型	温度荷载/℃	车速/(km·h ⁻¹)
CRH6F	无	120、140、160、180、200
	+25	160、180、200
	-25	160、180、200
C70	无	80、90、100、110、120
	+25	100、110、120
	-25	100、110、120

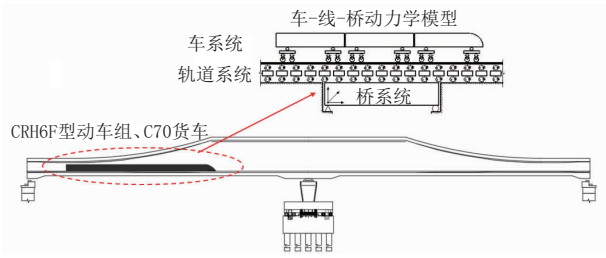
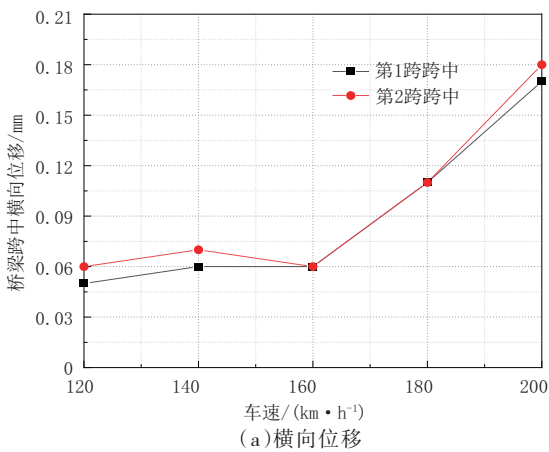


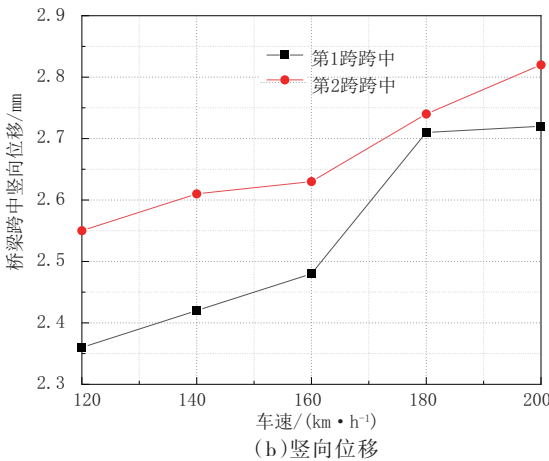
图6 车-线-桥耦合系统仿真计算模型

3.1 不同车型车-线-桥耦合分析

单线 CRH6F 型动车组分别以车速 120、140、160、180、200 km/h 通过桥梁时,桥梁各跨跨中的动位移、加速度响应见图 7、图 8。



(a) 横向位移



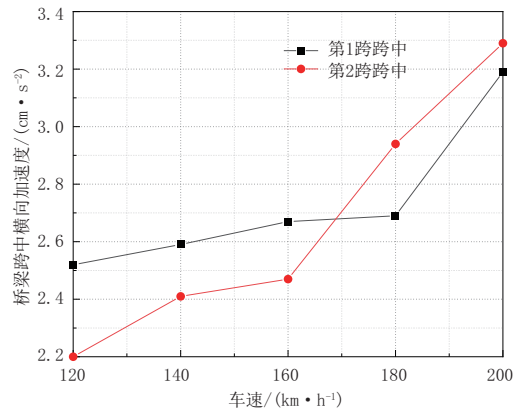
(b) 竖向位移

图7 跨中位移汇总(CRH6F)

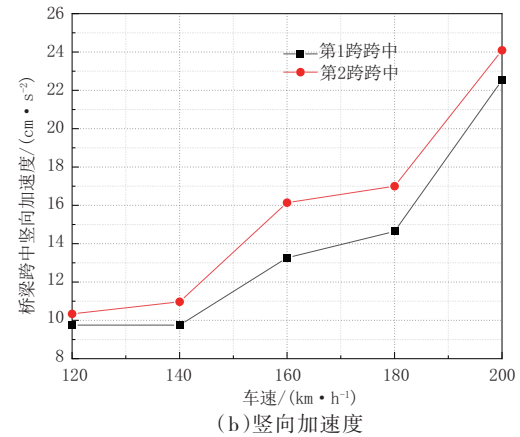
由图 7、图 8 可见:随着车速的逐渐增加,桥梁的动力响应也随之增大,尤其是在速度达到 160 km/h 之后,桥梁动力响应的增加速率明显加快。

单线 C70 货车分别以车速 80、90、100、110、120 km/h 通过桥梁时,桥梁各跨跨中的动位移、加速度响应见图 9、图 10。

由图 9、图 10 可见:随着车速的逐渐增加,桥梁的动力响应略有增大,但是相较于 CRH6F 型动车组,C70 货车运行时的桥梁动力响应随着车速的变化不明显,尤其是桥梁的位移变化较小。

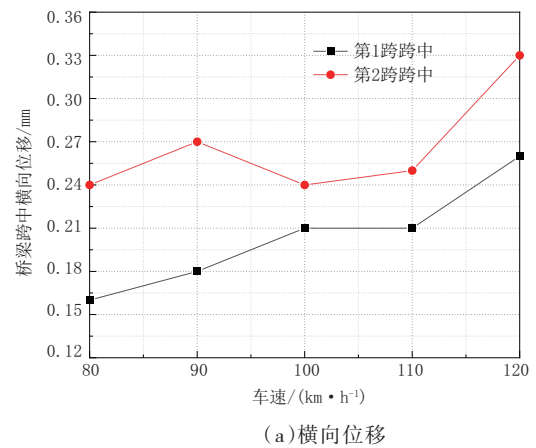


(a) 横向加速度

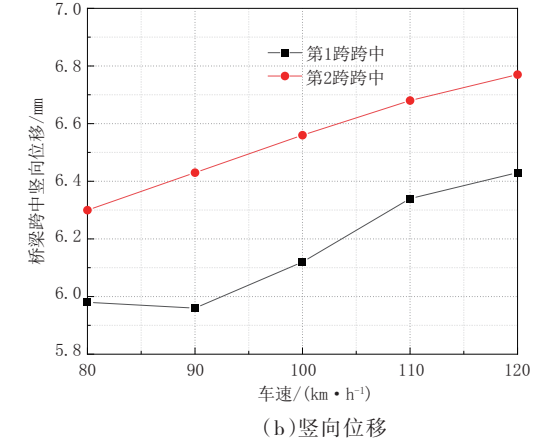


(b) 竖向加速度

图8 跨中加速度汇总(CRH6F)



(a) 横向位移



(b) 竖向位移

图9 跨中位移汇总(C70)

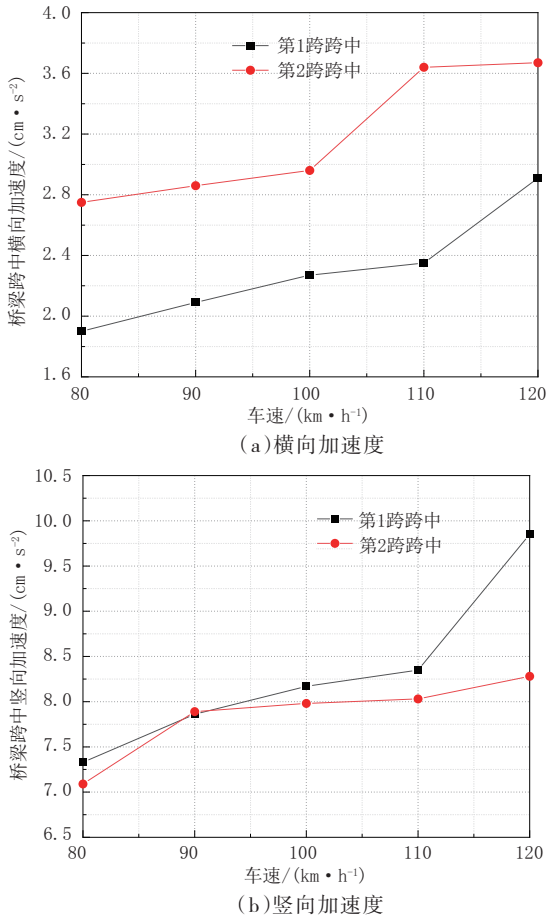


图 10 跨中加速度汇总(C70)

不同车速下车辆动力响应最大值见表 3。

表 3 不同车速下车辆动力响应最大值

车型	速度 / (km·h ⁻¹)	车辆响应指标			
		脱轨系数	轮重减载率	横向加速度 / (m·s ⁻²)	竖向加速度 / (m·s ⁻²)
CRH6F	120	0.07	0.07	0.26	0.34
	140	0.07	0.08	0.32	0.42
	160	0.07	0.10	0.34	0.48
	180	0.07	0.11	0.33	0.53
	200	0.08	0.12	0.38	0.59
C70	80	0.06	0.32	0.97	0.85
	90	0.09	0.38	0.98	0.85
	100	0.09	0.41	1.05	0.86
	110	0.08	0.43	1.15	0.91
	120	0.10	0.45	1.48	0.94

由表 3 可知:CRH6F 型动车组的车体脱轨系数受车速的影响很小,而 C70 货车的车体脱轨系数受车速的影响较大;CRH6F 型动车组和 C70 货车的轮重减载率和车体加速度均随着车速的增大而增大。同时,以上所有指标均远小于限值,说明列车行车的安全性和舒适性是有保障的。总体来说,相较于 CRH6F 型动车组,C70 货车的车辆动力响应对车速

更加敏感。

3.2 考虑温度荷载作用的车-线-桥耦合分析

考虑本桥桥址处环境温度变化较大,加之该桥结构受力复杂,温度荷载作用会引起桥面线形的变化并直接带动轨道板发生位移。温度荷载作用下的桥梁线形见图 11。该位移通过扣件传递至钢轨,直接影响轮轨接触几何关系,改变轮轨接触力,从而可能会对车辆的动力响应产生不利影响。因此,将随机不平顺与桥梁因温度荷载作用而产生的附加变形线性叠加后,即可得到桥上的轨道线形,然后将该线形作为轨道不平顺激励计算桥梁和车辆的动力响应。

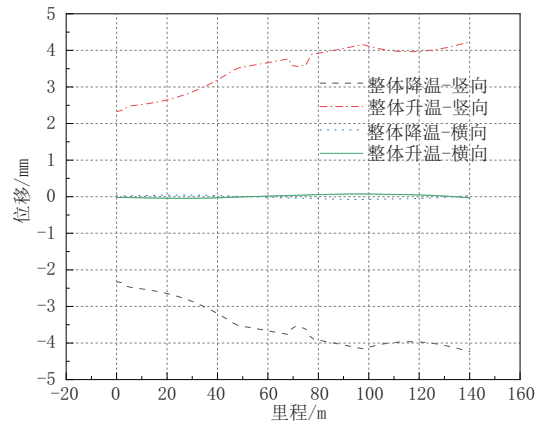


图 11 温度荷载作用下的桥梁线形

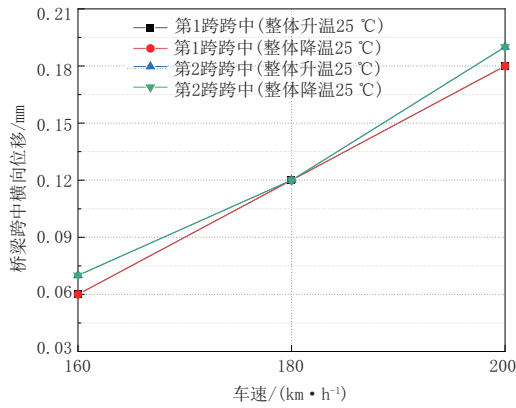
图 12~15 给出了 CRH6F 型动车组、C70 货车以不同车速通过桥梁时,考虑温度荷载作用的桥梁动力响应。与图 7~10 比较后可以发现,温度荷载作用对桥梁的动力响应影响较大,其中,第 1、第 2 跨跨中竖向位移指标变化最为明显。

表 4 给出了不同车速下车辆动力响应的最大值,并开展了是否考虑温度荷载作用的对比。可以看出:对于车辆动力响应,温度荷载作用带来的变化很小,也即车辆动力响应对桥梁因温度荷载作用而产生的附加变形不敏感。这是由于温度荷载作用引起的桥梁附加变形主要集中在大波长段,而车辆的敏感波长较小,因此,考虑温度荷载作用后的车辆动力响应指标变化很小。

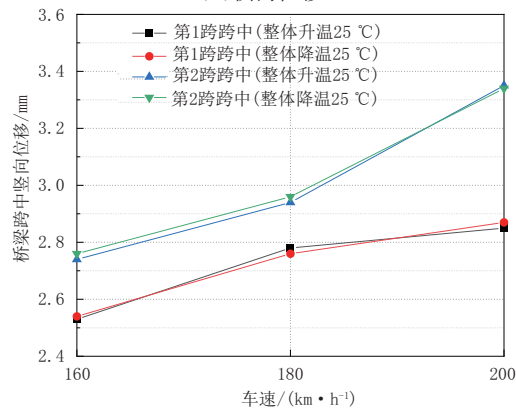
4 结 语

(1)考虑温度荷载作用的桥梁动力响应变化明显,CRH6F 型动车组通行时桥梁跨中竖向位移由 2.82 mm 增大至 3.35 mm;C70 货车通行时桥梁跨中竖向位移由 6.77 mm 增大至 7.11 mm。但温度荷载作用对车辆动力响应的影响较小。

(2)桥梁的竖向动力响应和车辆动力响应均随

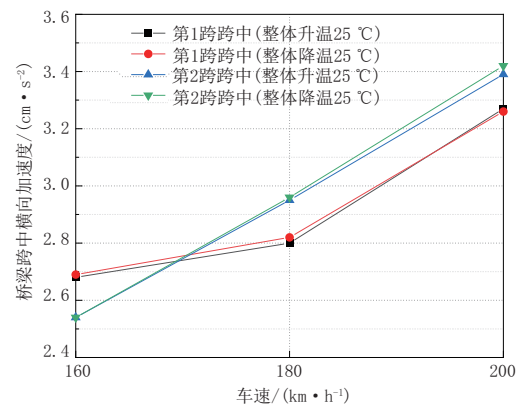


(a) 横向位移

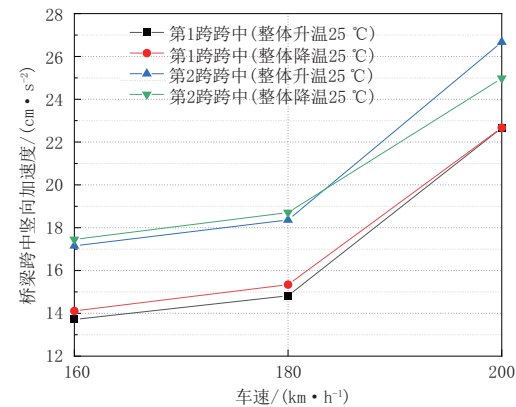


(b) 竖向位移

图 12 考虑温度荷载作用的跨中位移汇总(CRH6F)

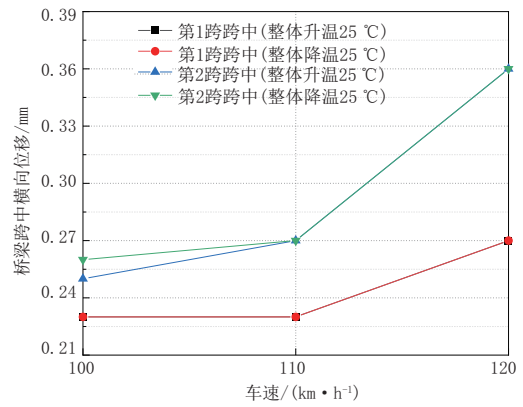


(a) 横向加速度

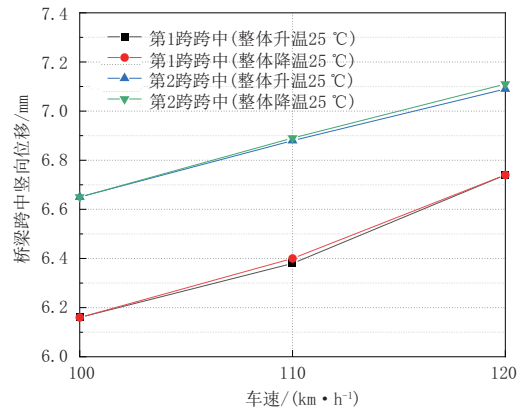


(b) 竖向加速度

图 13 考虑温度荷载作用的跨中加速度汇总(CRH6F)

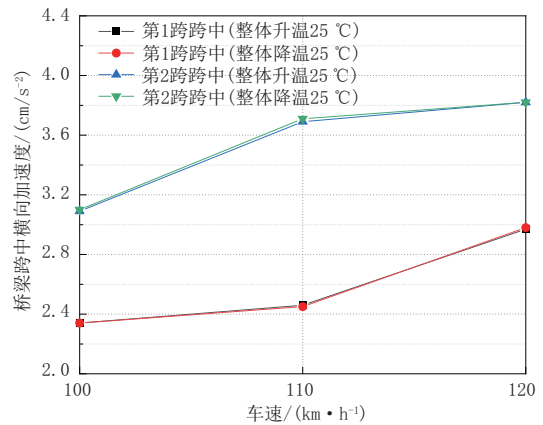


(a) 横向位移

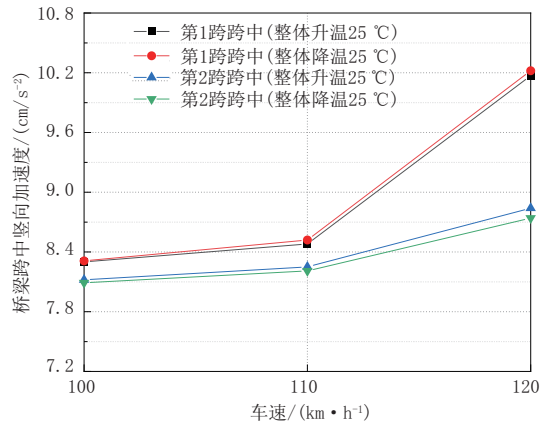


(b) 竖向位移

图 14 考虑温度荷载作用的跨中位移汇总(C70)



(a) 横向加速度



(b) 竖向加速度

图 15 考虑温度荷载作用的跨中加速度汇总(C70)

表4 考虑温度荷载作用时不同车速下的车辆动力响应最大值

车型	温度荷载 /℃	速度 / (km·h ⁻¹)	车辆响应指标				
			脱轨系数	轮重减载率	横向加速度 / (m·s ⁻²)	竖向加速度 / (m·s ⁻²)	
CRH6F	无	160	0.07	0.10	0.34	0.48	
		160	0.07	0.10	0.33	0.49	
	+25	180	0.07	0.11	0.35	0.55	
		200	0.08	0.13	0.38	0.58	
	125	160	0.07	0.10	0.34	0.49	
		180	0.07	0.12	0.36	0.52	
			200	0.08	0.13	0.40	0.58
C70	无	120	0.10	0.45	1.48	0.94	
		100	0.09	0.42	1.10	0.84	
	+25	110	0.09	0.44	1.20	0.93	
		120	0.10	0.45	1.57	0.98	
	-25	100	0.09	0.40	1.05	0.86	
		110	0.09	0.46	1.22	0.98	
			120	0.10	0.47	1.53	1.01

着车速的增加而增大;考虑温度荷载作用时,桥梁的竖向动力响应对车速变化较为敏感。

(3)相较于 CRH6F 型动车组,C70 货车运行时,桥梁的动力响应随着车速的变化不明显,尤其是桥梁的位移;但车辆动力响应对车速较为敏感。

(4)由新建揭阳至惠来铁路跨梅汕高铁72 m+72 m 槽箱组合梁桥的车-线-桥耦合分析可知,本桥能满足正常运营阶段的行车要求。计算结果可为同类型桥梁行车安全控制提供一定参考。

参考文献:

[1] 勾红叶,苏震乾,王君明,等.极端温度下高速铁路钢管混凝土拱桥行车安全[J].铁道工程学报,2023,40(3):50-56.
 [2] 朱志辉,刘杰,周智辉,等.考虑温度变形的大跨度拱桥行车动力响应分析[J].铁道工程学报,2019,36(3):26-31.
 [3] 李小珍,肖军,刘德军,等.附加变形对沪通长江大桥行车性能影响[J].铁道工程学报,2016,33(11):63-68.
 [4] 朱志辉,闫铭铭,李晓光,等.大跨度斜拉桥-无砟轨道结构变形适应性研究[J].中国铁道科学,2019,40(2):16-24.
 [5] WANG Y,WANG P,TANG H,et al. Assessment and prediction of high speed railway bridge long-term deformation based on track geometry inspection big data [J]. Mechanical Systems and Signal Pro-

cessing, 2021, 158:107749.
 [6] WANG M,LI X,CHEN X. A simplified analysis framework for assessing overturning risk of high-speed trains over bridges under crosswind[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(3):1037-1047.
 [7] SHAMSI M, ZAKERINEJAD M, VAKILI A H. Seismic analysis of soil-pile-bridge-train interaction for isolated monorail and railway bridges under coupled lateral-vertical ground motions [J]. Engineering Structures, 2021,248:113258.
 [8] ZHANG Z, LI X, ZHANG X,et al. Semi-analytical simulation for ground-borne vibration caused by rail traffic on viaducts: Vibration-isolating effects of multi-layered elastic supports [J]. Journal of Sound and Vibration, 2022, 516:116540.
 [9] NAGANUMA Y, KOBAYASHI M, OKUMURA T. Inertial measurement processing techniques for track condition monitoring on shinkansen commercial trains [J]. Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, 2010, 3(1):315-325.
 [10] 杨飞,宋国华,黎国清.成灌城际铁路桥上周期性高低不平顺分析[J].铁道工程学报,2011,28(5):51-55.
 [11] 罗林.轮轨系统轨道平顺状态的控制[M].北京:中国铁道出版社,2006.
 [12] 魏冲锋.轨道不平顺功率谱时域转换及其应用研究[D].成都:西南交通大学,2011.

(上接第 251 页)

aging characterization of asphalt binders using gel permeation chromatography and selected Superpave binder tests[J].construction and Building Materials, 2008, 22(11):220-2227.
 [7] Lexington K Y.Back ground of SHRP asphalt brinder test methods[R]. Lexington, Chicago:Asphalt Institute Research Centers, 1993.

[8] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
 [9] 沈爱琴.道路工程材料[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
 [10] 石占斌,尹秀杰,张文华,等.沥青老化方式对沥青性能的影响[J].建材世界,2012,33(5):45-47.