

文章编号:1006-2106(2015)01-0061-05

30 t 轴重荷载作用下桥上曲线动力响应影响范围^{*}

时 瑾^{1**} 倪家浩² 路宏遥¹

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142)

摘要:研究目的:结合我国近年来重载铁路设计情况,针对大轴重条件下桥上曲线设置实际,通过建立钢轨、轨枕、道床及桥梁多层体系有限元模型,理论上探讨 800 m 半径曲线地段 30 t 轴重列车荷载作用下线路结构动力性能,分析列车荷载作用下线桥动力响应影响范围问题,以供我国重载铁路线路设计参考。

研究结论:(1)800 m 半径曲线地段 30 t 轴重列车荷载作用下桥上曲线线路结构动力性能指标满足规范要求,桥梁及线路设计方案合理;(2)重载列车行经桥上曲线地段时,离心力及轴重作用引起的线路结构动力响应影响到列车运行位置相邻桥梁一跨范围(32 m);(3)列车编组大于 4 节后,编组数增加仅影响线路结构动力响应持续时间,不会对动力响应峰值产生影响;(4)本研究成果对重载铁路桥上曲线设计具有参考意义。

关键词:重载铁路;曲线;桥梁;动力响应

中图分类号:U213 **文献标识码:**A

Effect 30 t Axle Load of Freight Train on Dynamic Response of Curve Bridge

SHI Jin¹, NI Jia-hao², LU Hong-yao¹

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China)

Abstract: **Research purposes:** Combined with the practical design of heavy haul railway and the curve design of the railway bridge under the condition of heavy axle load in recent years, the dynamic responses of railway with the radius of 800 meters of the railway bridge which was sustained 30 t axle load of the heavy-haul train were generated in this paper using a multi-layer finite element model includes the rail, sleeper, ballast bed and bridge. The effect of 30 t axle load of freight train on dynamic response of curve bridge is analyzed. It makes a reference for the design of heavy haul railway.

Research conclusions: (1) The dynamic indexes caused by 30 t axle load meet the relevant specifications of railway on curve bridge with the radius of 800 m, the design of bridge and the railway line is reasonable. (2) The dynamic responses caused by centrifugal force and axle load have an impact on the adjacent bridge span with a train passing through the curve section. (3) The number of train marshaling has no effect on the peak value of dynamic response, but it affects the duration of the structure dynamic responses when it exceeds 4. (4) The research results have reference significances in curve designing of heavy haul railway on bridge.

Key words: heavy haul railway; curve; bridge; dynamic response

^{*} 收稿日期:2014-05-30

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014JBZ012)

^{**} 作者简介:时瑾,1980 年出生,男,副教授。

1 引言

近年来相继建设或规划的山西中南部、蒙西至华中煤运通道,在开通初期就要满足 30 t 轴重万吨列车运营水平^[1]。重载线路在穿越地形复杂地段时,为满足线位控制要求,大量曲线设置在高架桥上。大轴重长编组列车作用对桥上曲线的影响问题对结构和线路设计至关重要。

国内外学者对曲线地段车桥相互作用开展了大量研究。单德山、吴定俊、夏禾等^[2-5]采用各具特色的车桥动力分析模型研究了列车在桥上曲线运行的安全性和舒适性问题。值得指出的是,由于研究对象不同,目前研究中忽略了梁与梁之间的连接作用,对列车作用造成的桥上线路的动力响应影响范围问题并未涉及。本文通过建立钢轨、轨枕、道床及桥梁多层体系有限元模型,分析曲线地段大轴重列车荷载作用下线路的动力性能,以为重载铁路设计提供参考。

2 桥上曲线地段分析模型

2.1 有限元模型

重载铁路桥上线路一般由钢轨、轨枕、扣件、道砟、梁体等组成。我国正在建设和论证的重载铁路常采用 24 m 和 32 m 跨度桥梁^[6],本论文选取 32 m 跨度标准双 T 型桥梁作为分析对象,32 m 跨度桥梁结构断面和曲线地段桥上轨道结构布置如图 1 所示。

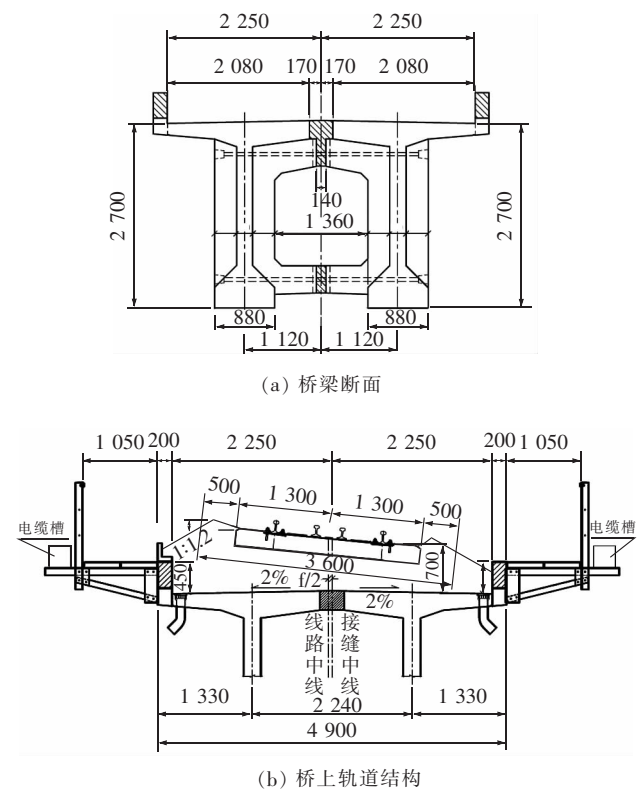


图1 曲线地段桥梁断面结构(单位:mm)

有限元建模时应充分考虑结构细部。钢轨采用重载铁路采用的 75 kg/m 轨,采用 beam4 梁单元模拟。扣件连接钢轨与轨枕,采用弹簧阻尼单元 combin14 模拟。轨枕采用型枕断面参数,按 1 840 根/km 间隔设置。道床考虑为弹性体,连续通长设置。桥梁按实际结构尺寸建立。轨枕、道床及桥梁均采用实体单元 solid45 模拟,各部分材料参数如表 1 所示。

表1 桥上线路结构参数

钢轨	每米质量/kg	74.414
	断面积/cm ²	95.04
	弹性模量/(N/m ²)	2.1e11
	泊松比	0.3
	密度/(kg/m ³)	7830
	垂向刚度/(kN/mm)	90
扣件	横向刚度/(kN·mm)	45
	垂向阻尼/(kN·s/m)	75
	横向阻尼/(kN·s/m)	60
轨枕	轨枕质量/kg	250
	尺寸(长宽高)/m	2.5×0.25×0.16
	弹性模量/(N/m ²)	3.5e10
	泊松比	0.22
道床	密度/(kg/m ³)	2 600
	弹性模量/(N/m ²)	1.8e8
	泊松比	0.16
桥梁	密度/(kg/m ³)	1 650
	弹性模量/(N/m ²)	3.5e10
	泊松比	0.167
	密度/(kg/m ³)	2 500

根据桥上曲线设置实际尺寸,建立计算模型,如图 2 所示。

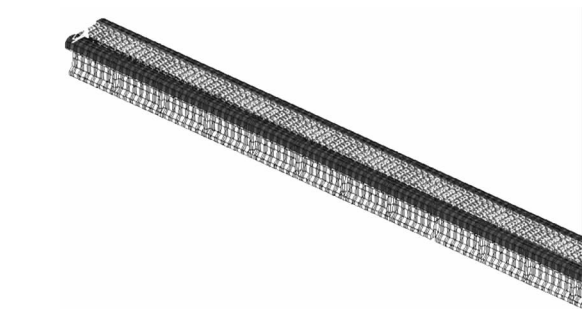


图2 线路结构有限元模型(单位:mm)

2.2 曲线地段受力计算

采用车辆与线路间的准静态作用关系分析确定曲线地段作用于钢轨上的轮轨力。车辆受力情况如图 3 所示,根据力和力矩平衡可推导出钢轨所受力^[7]。

钢轨左右侧所受竖向反力为:

$$Q_1 = \frac{mg\cos\alpha}{2} + \frac{mv^2\sin\alpha}{2R} + \frac{mh_c}{s} \times \left(\frac{v^2\cos\alpha}{R} - g\sin\alpha \right) \quad (1)$$

$$Q_r = \frac{mg \cos \alpha}{2} + \frac{mv^2 \sin \alpha}{2R} - \frac{mh_c}{s} \times \left(\frac{v^2 \cos \alpha}{R} - g \sin \alpha \right) \quad (2)$$

式中 m ——车体质量;
 g ——重力加速度;
 α ——超高角;
 h ——超高;
 s ——轨宽;
 h_c ——轨顶到车辆重心的距离;
 R ——曲线半径。

离心力造成的横向附加力为:

$$Y = Y_l + Y_r$$

$$Y = \frac{mv^2 \cos \alpha}{R} - g \sin \alpha \quad (3)$$

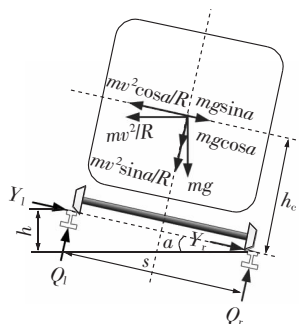


图3 车辆和线路准静态作用关系

结合重载铁路实际,选取800 m曲线半径,列车速度考虑60~120 km/h,轨宽取1 500 mm,车体重心高度取2 400 mm。根据《铁路线路设计规范》(GB 50090—2006),最大超高取150 mm。大轴重货车质量总重120 t,则质量选取120 000 kg,实设超高按低于均衡超高20%考虑^[8],使列车处于欠超高状态以降低磨损。假设轮轨力平均分配到四个轮对上,根据上述计算可得到不同速度下轮对作用于钢轨上左右侧垂向力和横向力,如图4、图5所示。

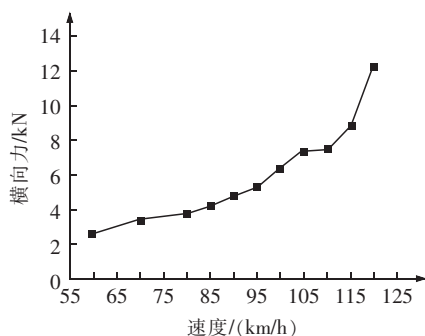


图4 速度与横向力之间关系

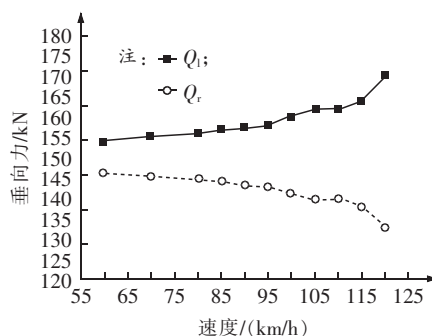


图5 速度与左右侧垂向力之间关系

2.3 模态分析

对所建立的有限元进行模态分析,分析了考虑轨道和不考虑轨道情况下线路结构自振特性。表2为前8阶自振频率,由表2可见,考虑轨道结构后各阶自振频率均有所降低,一阶横向自振频率降低约14%,二阶竖向自振频率降低约22%。桥上轨道结构增加了线路结构体系质量,由于结构自振频率与质量成反比关系,因而桥梁与轨道结构组成的线路结构体系自振频率有所降低。

表2 重载桥梁结构自振频率

振型	不考虑轨道		考虑轨道	
	频率	说明	频率	说明
1	3.717 9	横向弯曲	3.181 7	横向弯曲
2	4.929 2	竖向弯曲	3.817 2	竖向弯曲
3	8.155 4	扭转	5.618 1	扭转
4	8.858 5	横向弯曲	6.700 7	横向弯曲
5	15.930	扭转	12.379	横弯加扭转
6	16.118	竖向弯曲	12.388	竖向弯曲
7	18.491	竖弯加扭转	13.804	竖弯加扭转
8	22.456	竖弯加扭转	17.121	横弯加扭转

3 列车荷载作用下动力响应分析

3.1 计算条件

本文计算中将800 m半径曲线设置在16跨32 m简支梁上,以模拟我国重载铁路桥上曲线设置实际情况。荷载列排列选用我国正在试验的C96型30 t大轴重货车轴距设置方式,如图6所示。列车运行速度选取100 km/h,桥上列车运行位置情况如图7所示。

3.2 横向力作用下动力响应影响范围分析

分析不同编组长度列车第一轮对运行到图7位置1情况下轨枕及桥梁横向位移在相邻桥梁上分布情况,如图8所示。由图8可见,由于钢轨和道床的连接作用,使得轨枕和梁体横向位移在运行位置相邻简支梁范围内线性降低,列车离心力引起的线路横向动力响应影响到列车运行位置相邻桥梁一跨范围(32 m)。

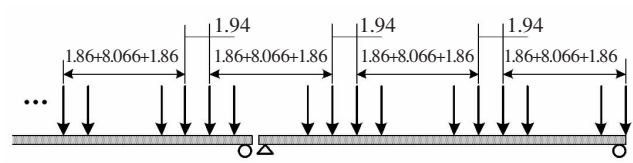


图 6 轴距间隔排列方式(单位:m)

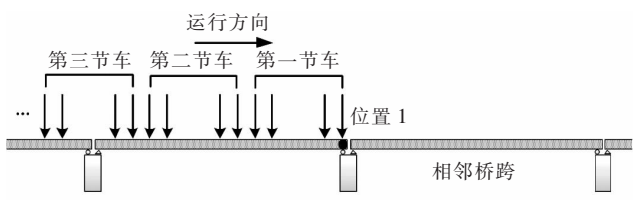
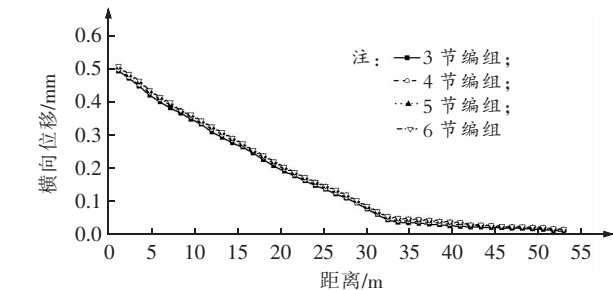
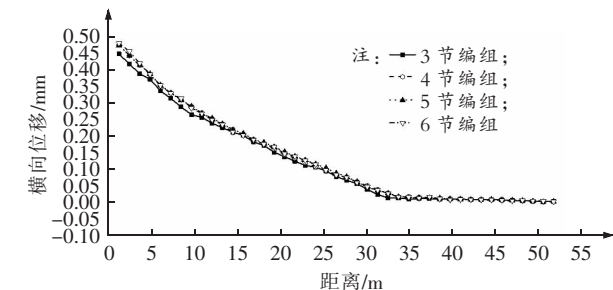


图 7 列车运行位置示意图

编组长度对横向动力响应范围影响很小。



(a) 轨枕横向位移随距离分布



(b) 桥梁横向位移随距离分布

图 8 横向位移随距离分布

分析不同编组长度列车横向力作用下桥梁横向动力响应规律,图 9 给出了不同编组情况下桥梁跨中横向位移。由图 9 可见,随着列车编组的增加,梁体变形持时增加,由于力群连续激振作用,变形最大值略有提高。图 10 为编组数和跨中轨枕及桥梁横向位移和加速度最大值变化规律,由图 10 可见,当列车的编组大于 4 节后动力响应增加量很小,编组提高不会对线

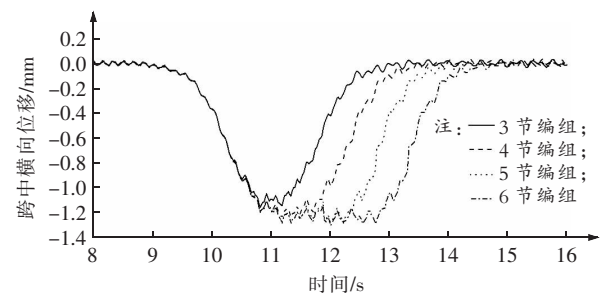
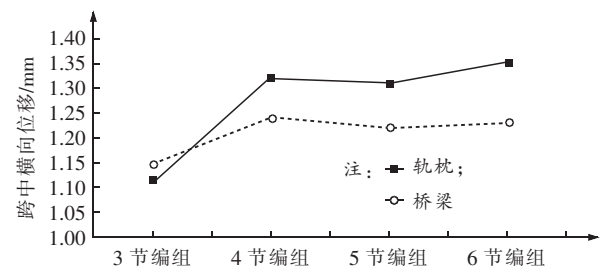
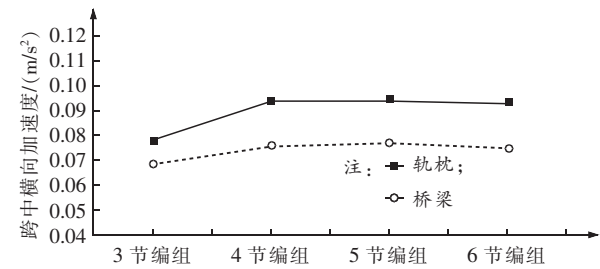


图 9 梁跨中横向位移



(a) 跨中横向位移与编组数关系



(b) 跨中横向加速度与编组数关系

图 10 跨中横向动力响应与编组数关系

路结构动力响应峰值产生影响。表 3 为 4 节编组列车通过时轨枕、梁体在各主要分析位置的最大横向位移和最大横向加速度,桥梁横向振幅最大值 1.24 mm,小于我国《铁路桥梁检定规范》3.56 mm 的安全值;桥梁横向振动加速度最大值 0.075 m/s²,未超过 1.4 m/s² 的限值^[4]。

表 3 不同截面处轨枕和梁体的动力响应

项目	截面		
	1/4L	1/2L	3/4L
轨枕横向加速度/(m·s ⁻²)	0.074	0.06	0.08
轨枕横向位移/mm	1.08	1.32	1.14
桥梁横向加速度/(m·s ⁻²)	0.075	0.072	0.065
桥梁横向位移/mm	1.08	1.24	1.13

3.3 轴重荷载作用下动力响应影响范围分析

分析不同编组长度列车第一轮对运行到图 7 位置 1 情况下轨枕及桥梁竖向位移在相邻桥梁上分布情

况,如图 11 所示。由图 11 可见,由于钢轨和道床的连接作用,使得轨枕和梁体横向位移在运行位置相邻简支梁范围内呈现先升高后降低的变化趋势,在梁跨约 12 m 处达到最大值。列车轴重荷载引起的线路竖向动力响应影响到列车运行位置相邻桥梁一跨范围(32 m)。编组长度对线路结构竖向动力响应范围影响很小。

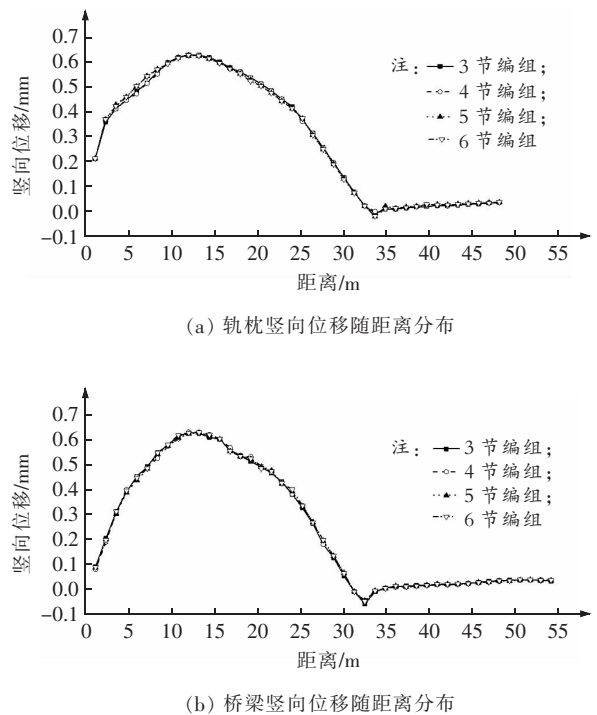


图 11 竖向位移随距离分布

分析不同编组长度列车轴重作用下桥梁竖向动力响应规律,图 12 给出了不同编组情况下桥梁跨中竖向位移。由图 12 可见,随着列车编组的增加,梁体变形持时增加,由于力群连续激振作用,变形最大值略有提高。图 13 为编组数和跨中轨枕及桥梁竖向位移和加速度最大值变化规律,由图 13 可见,当列车的编组大于 3 节后动力响应增加量很小,编组提高不会对线路结构动力响应峰值产生影响。

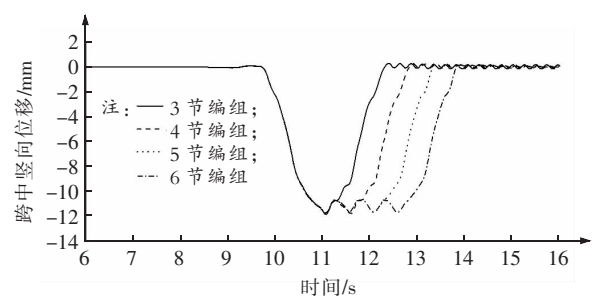


图 12 桥梁跨中竖向位移

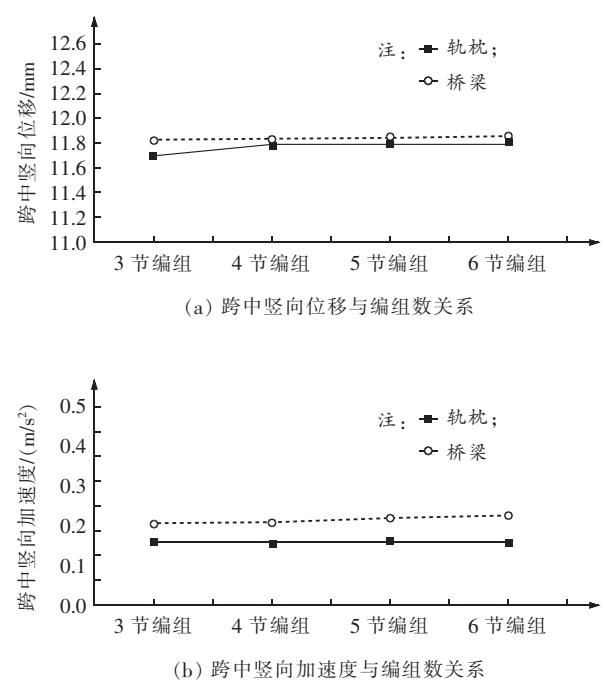


图 13 跨中竖向动力响应与编组数关系

表 4 为 4 节编组列车通过时轨枕、梁体在各主要分析位置的最大竖向位移和最大竖向加速度,桥梁竖向加速度最大值 0.13 m/s^2 , 低于 $0.35g$ 的限值^[4];动力系数最大值 1.03, 小于规范值 1.19^[9]。

表 4 不同截面处轨枕和梁体的振动响应				
项目	截面	1/4L	1/2L	3/4L
轨枕横向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		0.16	0.15	0.14
轨枕竖向位移/mm		8.91	11.84	8.32
桥梁竖向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		0.13	0.11	0.12
桥梁竖向位移/mm		8.40	11.85 (动力系数 1.03)	8.39

4 结论

本文通过建立钢轨、轨枕、道床及桥梁多层体系有限元模型,分析了 800 m 半径曲线地段 30 t 轴重列车荷载作用下线路的动力性能,研究得到:

- (1)30 t 轴重荷载作用下桥上曲线线路各项动力学指标满足规范标准要求,桥梁及线路设计方案合理。
- (2)列车行经桥上曲线地段时,离心力及轴重作用引起的线路结构动力响应影响到列车运行位置相邻桥梁一跨范围。
- (3)列车编组大于 4 节后,编组数增加仅影响线路结构动力响应持续时间,不会对动力响应峰值产生影响。