

# 悬挂式单轨轨道梁桥在列车制动力作用下的动力响应

王江浩

(中铁第六勘察设计院集团有限公司,300308,天津//工程师)

**摘要** 以中唐悬挂式单轨试验线为依托,采用有限元软件建立结构模型,分别计算了3种列车制动力作用下轨道梁桥的动力响应。结果表明:在列车制动力作用下,轨道梁梁端纵向位移和墩底剪力呈波浪式增大;列车在轨道梁上制动完成时,轨道梁在纵向呈衰减振动;列车制动力越大,轨道梁梁端纵向位移、速度、加速度和墩底剪力也越大,并且列车制动完成后的振幅也越大。

**关键词** 悬挂式单轨;轨道梁桥;列车制动力;动力响应;有限元分析

**中图分类号** U441<sup>+</sup>.7;U234

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2021.06.009

## Dynamic Responses of Suspended Monorail Beam Bridge under Train Braking Forces

WANG Jianghao

**Abstract** Taking the Zhongtang suspended monorail test line as the background, finite element software is adopted to build structure model, the dynamic responses under three kinds of train braking forces are calculated respectively. The results show that, under train braking forces, the longitudinal displacement of the track beam and the bottom shear of bridge pier increase in wave form; attenuation vibration appears in longitudinal direction on track beam when train braking completes on it; with the increase of braking force, the longitudinal displacement, velocity, acceleration of the track beam and bottom shear of bridge increase, and the amplitude of the track beam increases after the train braking is completed.

**Key words** suspended monorail; rail beam bridge; train braking force; dynamic response; finite element analysis

**Author's address** China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., 300308, Tianjin, China

悬挂式单轨是一种新颖的轨道交通方式。与地铁和轻轨等传统城市轨道交通相比,悬挂式单轨具有建设周期短、投入小、占地少、复杂地形适应性强、噪声低等优点。悬挂式单轨适用于中小运量客流运输,可以作为中小城市或大城市非主要轨道交

通的补充,也可以作为旅游景点观光线路<sup>[1]</sup>。

悬挂式单轨交通系统采用“梁轨合一”的建设方式。轨道梁桥既作为列车的承载结构,又作为列车的走行通道,因此,轨道梁桥结构的安全和稳定是确保列车平稳、安全运行的关键。列车在悬挂式单轨上运行时,经常会出现制动、起动的情况,会对轨道梁桥产生纵向作用力。目前,针对悬挂式单轨的研究多数集中于静力研究<sup>[2-3]</sup>和列车匀速过桥情况下的动力研究<sup>[4-5]</sup>,对悬挂式单轨轨道梁桥在纵向力作用下的动力响应的研究非常少。

本文以中唐悬挂式单轨试验线为背景,采用有限元软件建立全桥模型,分别计算3种制动力作用下轨道梁桥的动力响应。通过分析轨道梁桥结构在3种列车制动力作用下的动力响应,总结了不同制动力作用对轨道梁桥的影响,其分析结果可为该类结构的设计提供参考。

## 1 列车制动力计算

### 1.1 制动力率

列车在轨道梁桥上制动时,轨面制动力直接通过车轮与轨道梁走行面间的摩擦传递给轨道梁。国内外研究基本采用制动力率 $\theta$ 对列车制动力 $T$ 进行定义<sup>[6]</sup>。 $\theta$ 和列车减速度 $a$ 的对应关系为:

$$\theta = T/W = a/g \quad (1)$$

式中:

$W$ ——所考虑范围中的列车轴重;

$g$ ——重力加速度。

根据式(1)得知,当 $a$ 已知时,便能获得列车制动过程中的 $\theta$ ,进而求得 $T$ 。

本文以一跨25 m的直线轨道梁作为目标轨道梁,根据 $T$ 在城市轨道交通中的取值及传递规律<sup>[6]</sup>,分别使列车以0.05、0.10、0.15的制动力率进行制动,使列车在减速状态下进入目标轨道梁,并确保列车停止在目标轨道梁上。应注意,当列车制动完成时, $T$ 迅速下降到0。列车制动力加载曲线

如图 1 所示。

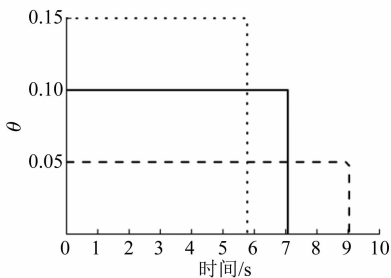


图 1 列车制动力加载曲线

1.2 列车制动力作用

本文参考中唐悬挂式单轨试验线的列车活载，按两节列车进行编组，车辆轴重为 4 t，能源小车轴重为 1.5 t，加载长度为 16.57 m。列车活载图式见图 2。

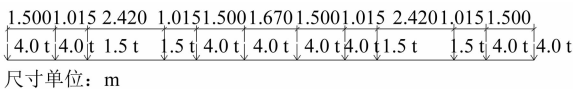


图 2 列车活载图式

由式(1)和图 1、图 2 可以得到，从列车入桥至列车停止时不同时刻下列车制动力的大小。随着列车驶入轨道梁，进入轨道梁的轴重逐渐增大，制动力也相应增大；列车全部进入轨道梁后，列车在所有轴重产生的制动力作用下继续减速，直至停止，制动力迅速降为 0。

2 计算模型的建立

中唐悬挂式单轨试验线由四川大唐新能源公司投资兴建，位于成都市双流县黄甲镇大唐新能源公司生产基地内。新能源空铁是以大容量动力蓄电池为动力的悬挂式单轨列车。沿试验线可依次进行加减速、爬坡能力及防灾救援试验，并可简单地模拟运营试验。

试验线正线及出入库线均为高架结构，轨道梁和桥墩均采用钢结构，基础采用钻孔灌注桩。轨道梁采用开口钢箱梁，箱梁内腔净高 1 100 mm，净宽 780 mm，腹板厚 24 mm，顶板厚 24 mm，底板厚 32 mm；轨道梁横向布置有环形的加强筋，加强筋纵向间距为 1.6 m，厚度为 30 mm；单线桥墩为矩形截面“L”形钢结构，双线桥墩为“Y”形钢结构。直线段轨道梁主要采用 25 m 跨度，曲线段轨道梁主要采用 12 m、20 m 两种跨度。

结合中唐悬挂式单轨试验线，并通过多条空

铁线路调研，发现悬挂式单轨交通系统大多采用 25 m 跨度作为简支梁标准跨度。因此，本文选取跨度为 25 m 的轨道梁作为研究的目标梁型。采用高 10.5 m 的单线桥墩支撑目标轨道梁，桥墩与轨道梁共同组成轨道梁桥体系。悬挂式单轨轨道梁桥及列车结构示意如图 3 所示。

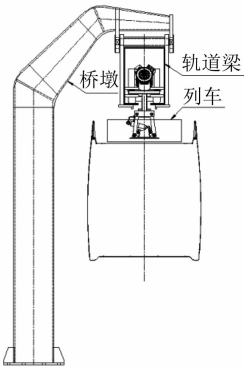


图 3 轨道梁桥及列车结构示意图

根据轨道梁桥结构的材料及截面参数，采用有限元软件建立结构模型，利用瞬态动力分析法模拟制动力的加载-卸载过程，得到了不同制动力作用下轨道梁桥的动力响应。轨道梁桥结构体系的约束参数见表 1。表 1 中， $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向的平移自由度； $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$  分别表示绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向的旋转自由度；0 表示放松，1 表示约束。

表 1 轨道梁桥结构体系的约束参数

位置	$D_x$	$D_y$	$D_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$
轨道梁梁端(左)	1	1	1	1	0	0
轨道梁梁端(右)	0	1	1	1	0	0
桥墩墩底(左)	1	1	1	1	1	1
桥墩墩底(右)	1	1	1	1	1	1

3 动力响应计算结果

列车在制动状态下以不同的减速度进入目标轨道梁，当速度降至 0 时列车停止在目标轨道梁上。将列车轴重及 3 种类型制动力加载到轨道梁桥结构体系上，计算得到制动过程中轨道梁梁端位移、梁端速度、梁端加速度和墩底剪力。在 3 种制动力作用下，轨道梁桥结构的动力响应最大值见表 2。

表 2 3 种制动力率作用下轨道梁桥的动力响应最大值

$\theta$	梁端位移/m	梁端速度/(m/s)	梁端加速度/(m/s <sup>2</sup> )	墩底剪力/kN
0.05	0.006	-0.018	0.205	-16.0
0.10	0.016	-0.128	1.458	-43.6
0.15	0.021	-0.148	1.611	-59.7

由表2可知,当 $\theta$ 为0.05时,轨道梁桥的梁端位移、速度、加速度及墩底剪力值均不大;当 $\theta$ 由0.05上升至0.10时,轨道梁桥的动力响应值出现大幅度提升;当 $\theta$ 由0.10上升至0.15时,轨道梁桥的动力响应值增速逐渐放缓,梁端位移及墩底剪力增幅在35%左右,梁端速度及加速度增幅在16%以内。

当列车制动完成时,作用在轨道梁上的制动力迅速减小到0,对轨道梁桥产生冲击并引起结构的纵向振动。轨道梁桥的动力响应随时间变化的规律能够反映出冲击作用对结构的影响。3种类型列车制动力作用过程中及制动完成之后的轨道梁的梁端位移、梁端速度、梁端加速度以及轨道梁桥墩底剪力随时间的变化曲线见图4~7。

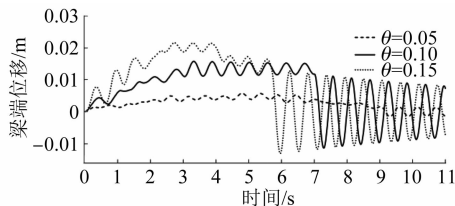


图4 轨道梁的梁端位移

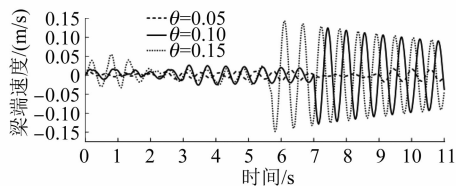


图5 轨道梁的梁端速度

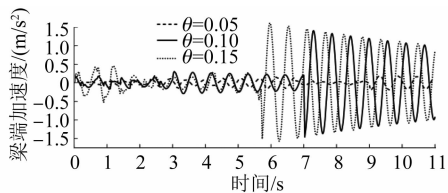


图6 轨道梁的梁端加速度

由图4~7可知,列车在轨道梁桥上制动时,梁端位移值和墩底剪力值呈波浪式上升,梁端速度、加速度在0值附近呈正弦式变化;列车制动完成时制动力迅速降为0,对轨道梁造成冲击,使轨道梁在纵向进行衰减振动,轨道梁桥的梁端位移、速度、加速度及墩底剪力呈规律性的衰减;随着制动力率

的增加,轨道梁梁端纵向位移、速度、加速度和轨道梁桥墩底剪力随之增大,列车制动完成后的振幅也随之增大;制动力率的大小对轨道梁桥的衰减周期不产生影响。

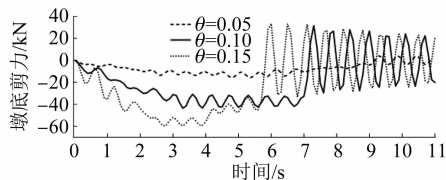


图7 轨道梁桥墩底剪力

## 4 结语

1) 列车在轨道梁上制动会对轨道梁桥结构产生冲击,使其产生纵向振动,且制动力越大,振幅亦越大,这对轨道梁桥的疲劳设计、伸缩缝等附属设施的设计以及列车乘坐舒适性等提出了较高的要求。

2) 目前我国的悬挂式单轨交通列车型号并不统一,且列车编组与轴重均有增大的趋势,那么随之而来的则是列车制动力的增大,以及轨道梁振幅的增加。为了减少轨道梁大幅振动带来的不利影响,可以考虑在轨道梁桥系统中适当增加耗能型阻尼器。目前已建成和正在设计中的悬挂式单轨普遍采用轨道梁简支、桥墩墩底固结的方式,还未采用过任何耗能设备,因此,耗能型阻尼器的具体构造及相关参数有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 胡步毛,潘妍,鲁昭,等.我国首条悬挂式单轨试验线建设实践[J].都市轨道交通,2019(1):38.
- [2] 谢倩,王月明,蒋咏志,等.考虑加劲肋的悬挂式单轨轨道梁挠度研究[J].城市轨道交通研究,2017(8):11.
- [3] 卫军,陈涛,黄敦文,等.悬挂式单轨交通系统墩-梁整体分析[J].桥梁建设,2019(1):36.
- [4] 何庆烈,蔡成标,翟婉明,等.悬挂式单轨列车与轨道梁桥系统动力性能试验研究[J].铁道学报,2018(10):61.
- [5] 鲍玉龙.悬挂式单轨交通系统车桥耦合振动仿真研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [6] 吴亮秦,吴定俊,李奇.城市轨道交通桥梁列车制动力试验研究[J].铁道学报,2012(3):88.

(收稿日期:2019-05-30)