

空中轨道结构车-轨耦合模型试验研究

李方元¹, 张宇¹, 刘栋杰²

(1. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092; 2. 广东省公路勘察规划设计院有限公司, 广东 广州 510507)

摘要: 介绍了新型预张弦索空中轨道结构的原理与受力特点, 设计了 63 m 结构的 1:15 模型并进行了试验. 通过不同弦索张力、不同移动荷载和不同行车速度三个因素的近 90 种组合, 对空中轨道结构的部分静力与动力性能进行了研究, 对移动荷载和行车速度影响下的弦索应力响应、结构动态挠度变化进行了测试. 通过对动力放大系数的分析, 提出特定张力、荷载与速度间的关系, 为空中轨道真实结构的研究和应用提供理论依据.

关键词: 空中轨道; 预张弦索; 移动荷载; 耦合作用; 动力响应; 动力放大系数

中图分类号: U441+.7

文献标识码: A

Model Test on Vehicle-bridge Coupling Behavior of New AERORail Structure

LI Fangyuan¹, ZHANG Yu¹, LIU Dongjie²

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Guangdong Highway Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510507, China)

Abstract: Principles and force characteristics of new pretension string AERORail structure were introduced, and corresponding 1:15 test model was designed for a 63 m long real structure. Through about 90 combinations of different tension forces for rail string, different moving loads and different vehicle velocities, partial static and dynamic characteristics of AERORail structure were researched, the string stress response and structural dynamic deflection alteration under the influence of moving load and vehicle velocity were tested. After analyzing the dynamic amplification coefficient, the special moving loads and vehicle velocities with special tension forces were put forward for real structure as a theory basis and the structure application.

Key words: AERORail; pretensioned string; moving load; coupling behaviors; dynamic response; dynamic amplification factor

常规轨道交通运输平台通常需要桥梁等大型结构平台的支撑, 这将大大降低结构材料的利用效率, 因为目前桥梁结构自身重量需要借助材料自身 60% 左右承载能力, 其根本原因是采用的混凝土材料自重比较大, 这一点对于大跨度桥梁更加明显. 如果能减少混凝土用量, 对于环境保护和低碳等要求是十分有利的, 而减少混凝土自重的影响通常采用钢结构, 但大量的钢结构桥梁同样存在材料用量大和造价高的问题.

预张弦索空中轨道(简称空轨)结构是一种利用索和轨道组合而成的新型交通运输平台结构, 图 1 为其结构与车辆概念图. 其与常规轨道交通运输平台不同的是, 空轨结构抛除混凝土桥梁结构, 仅利用索和轨道, 在辅助连接基础上, 实际车辆高速运行. 如果说高强预应力材料促使预应力混凝土技术的成功和发展, 空轨结构得以存在需要有以下两点支撑: 一是高强预应力索的应用; 二是高速行车的应用^[1]. 前者保证系统的稳定性和安全性, 后者保证系统的运输效率. 因为该系统是利用索结构作支撑平台, 借助索的张力支撑上部轨道, 空间索的受力特性可保证运输的安全; 而相对于桥梁多车道或重载运输能力, 空轨结构必须利用轻载加高速, 实现高效率的运输.

预张弦索空轨结构轻, 受使用荷载(车辆及载重)较大的影响, 结构自身的静力和动力特性与车辆移动荷载的共同作用, 必然导致结构使用性能受到质疑, 这也是目前这一结构并没有实际应用的原因所在. 由于结构轻巧, 其动力特性将是影响其应用的关键. 在克服 CFRP 材料锚固问题后, 考虑采用更轻更耐久的 CFRP 作为弦索结构将会更轻^[2], 同时在车行驶过程中与结构产生的耦合作用是需要在前解决的问题. 为了认识预张弦索轨道结构的车桥耦合动力性能, 本文进行了模型试验研究, 主要介绍相关的试验方法、内容和基本试验结果.

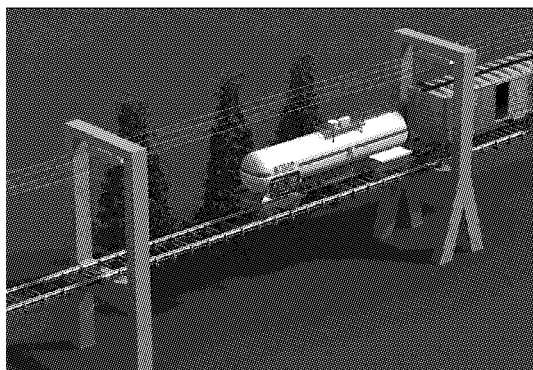


图1 空轨结构与电驱动货运列车概念图

Fig.1 Concept drawing of AERORail structure and electrically driven freight train

1 试验方案

由于整个预张弦索轨道桥结构的刚性主要依赖于弦索的弹性刚度,而弦索的弹性刚度又几乎完全依赖于索端张拉力所产生的应力刚化效应,所以试验中由低到高施加了多级索端张拉力,并对各级索端张拉力下的结构在不同移动荷载作用下的静力和动力性能进行了测试.模型只是近似模拟实际结构,所以试验的测试数据主要是以定性和部分定量分析相结合.

试验测试并记录了以下内容:

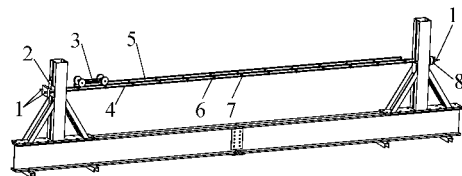
- (1) 不同级别张拉力时不同静载下的挠度;
- (2) 不同级别张拉力多种车速下结构的动挠度响应;
- (3) 不同级别张拉力多种车速下的索端张力变化.

2 试验模型

2.1 模型结构

模型以模拟 63 m 跨度的假想实际结构为原型^[3],采用 1:15 的几何缩尺比制作了如图 2 所示的模型,弦索结构锚固在由槽钢和工字钢焊接的试验

底座支架上,试验底座有足够的刚度.弦索共两根,每根由单根 $\Phi 5$ 的 1860 级高强钢丝构成,一端为固定端,装有静力和动力传感器,可以实时测出弦索的稳态张力和行车过程中的张力变化量,另一端装有手动式小型千斤顶,依靠垫板将顶推力传递到弦索上.弦索上每隔 30 cm 设置一对竖向支撑,在支撑对之间用横撑连接,将两根 $\Phi 5$ 的钢丝放置于两侧支撑上,作为小车行驶的导轨.整个模型都采用钢材加工制作.



1—锚固垫板;2—手摇式千斤顶;3—小车;4—弦索;
5—导轨;6—横撑;7—竖向支撑;8—静力和动力传感器

图2 试验模型基本构造图

Fig.2 Basic construction of testing model

2.2 模型参数取值

由于目前并没有实际的弦索轨道桥梁结构,模型试验拟采用 1:15 的几何缩尺比来模拟一座假想的总长为 63 m 的预张弦索轨道桥,依据中国公路桥梁抗风设计规范来确定模型与假想原型的相似系数^[4],见表 1.

按照以上缩尺比,可以得到表 2 所示的模型与假象原型的对应关系,这个模型只能在动载上近似模拟假想原型.在模型转换到假想原型的过程中,结构的自重将无法按照 15^2 的缩尺比放大,而是以 15^3 的比例放大.

表1 模型试验相关相似比参数

Tab.1 Relative similitude ratio for model test

参数名称	相似系数	缩尺比
长度	C_L	1/15
车速	C_V	$1/\sqrt{15}$
密度	C_ρ	1
单位长度质量	C_M	$1/15^2$
索端张拉力	C_H	$1/15^2$
索应力	C_σ	1

表2 模型与原型参数对比

Tab.2 Factors for model and prototype

参数名称	索钢丝数量/根	跨度/m	张拉力/kN	弦索自重/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	轨道间距/cm	小车轴距/m	移动载荷/kg	车速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
模型	1	4.2	2.5~15.0	0.15	9.6	0.25	3.8	8.0
原型	225	63.0	562.5~3 375.0	34.45	143.5	3.75	855.0	2 025.0

注:索钢丝规格为 $\Phi 5$,弦索质量不含附属结构

3 试验测试及加载方案

3.1 试验测点布置及试验设备

如图 3 所示,在弦轨模型中 A、B、C、D 四点布置了不同类型的传感器,用于实时获得相应的试验数据,传感器通过电线与信号采集箱的各个通道连接,信号采集箱将各通道接收的电信号转换成可以读取的数据,再将数据通过 USB 接口传送至装有 DASP 信号采集软件的电脑,在显示屏上实时读取并记录下各传感器采集到的数据,见图 4。

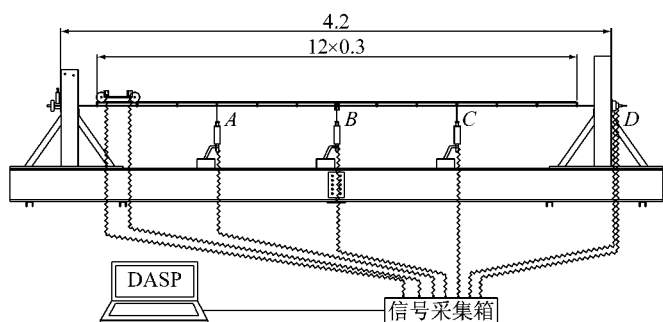


图 3 试验测点布置图(单位:m)

Fig.3 Gauging plan for model test (Unit: m)

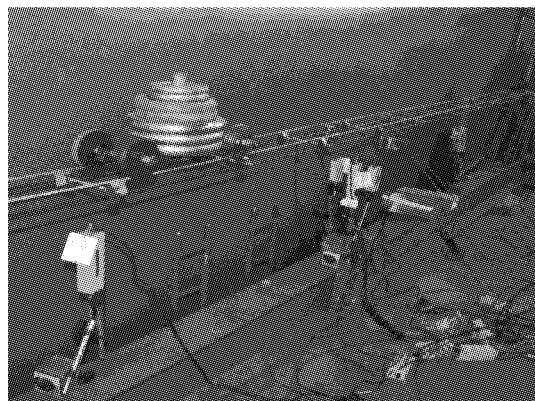


图 4 试验现场照片

Fig.4 Testing site picture

传感器分布说明:车头、车尾为竖向加速度传感器;A、C 点两轨道间中央为竖向位移传感器;B 点轨道两侧为三向加速度传感器和竖向位移传感器,B 点中央为竖向位移传感器;D 点为动力和静力传感器。

3.2 试验加载方案

试验中通过控制索端张力、移动载荷重量以及移动载荷速度三个指标来完成整个结构的动静力性能测试。

索端张力分为 2.5、5、7.5、10、12.5 和 15.0

kN 六个级别,通过手动式千斤顶施加,从通过索端锚下压力传感器读数实时控制张力。

移动载荷的重量分为空车(重量 3.8 kg)、一级载荷(重量 8 kg)和二级载荷(重量 14.3 kg)三个级别,通过加减小车上的砝码来实现,对应原型结构中的 855 kg、2 025 kg 和 3 218 kg。

小车的移动通过试验人员利用滑轮控制小车速度,让小车自由滑行至另一端来实现,移动载荷的速度均匀性存在一定偏差,但是可以通过读取试验数据的时程曲线来得到实际的运行时间,近似假设整个过程中小车是匀速行驶,而计算出小车的行驶速度。

具体加载步骤:① 用手动千斤顶给索端施加顶推力,并实时读取 DASP 数据处理软件中索端静力传感器的数值,当达到预定的索端张力时停止顶推;② 各传感器读数初始化;③ 分别将空车、一级载荷和二级载荷的小车放置在跨中,记录三种载荷情况下结构的静挠度。同样在上述索力条件下,分别用不同速度移动小车,记录不同速度时结构全过程中的响应。

4 试验结果

试验记录了不同索端张力,不同移动载荷和不同车速下模型的动响应数据共 90 组。

4.1 弦索的应力增长动力响应

当矢跨比很小时,可以认为整个跨度上弦索的张力是相同的,所以可以通过测量弦索的索端张力来得到弦索的张力和应力变化情况。车辆行驶过程中索端张力的变化情况通过布置在索端 D 点的动力传感器来采集,图 5 所示为其中一组试验的索端张力变化时程曲线。该组试验的索端张力为 2 500 N,动荷载为空车,最大索力变化量为 19 N,其占索端张力的百分比为 0.8%。结果表明,索端张力的波动幅值跟移动载荷和索端张拉力的大小都有关系,既随移动载荷的增大而增大,但又随索端张拉力的增大而减少。当索端张拉力达到 7.5 kN 时,张力变化量小于 1%,当索端张拉力达到 15 kN 时,张力变化量低于 0.5%,最大也只有 0.27%,所以当张力达到特定值时,索中的张力变化可以忽略掉,弦索结构可以简化为轮与轨道一体式模型。

4.2 结构挠度的理论值与实测值对比

由于实际结构中可以用调整预拱度的方式抵消结构自重产生的挠度^[1],所以预张弦索轨道桥结构

的实际挠度只需计算移动载荷引起的挠度.下面用 了对照,见表 3.
古典弦理论计算的跨中挠度同实测的跨中挠度进行

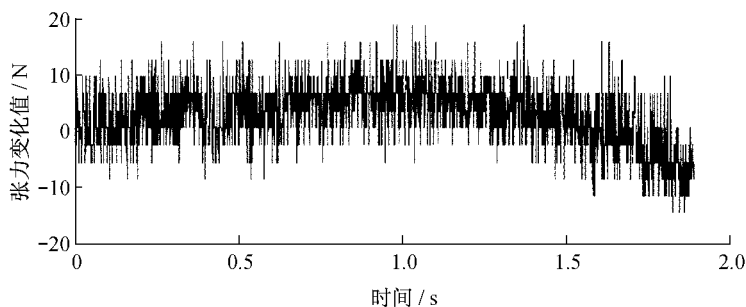


图5 移动载荷下索张力变化时程曲线

Fig.5 Time-history curve of string force with moving load

表3 理论挠度值与实测挠度值对比

Tab.3 Comparison of theory deflection and the measured value

张拉力/ kN	移动载荷	静挠度 理论值/ mm	静挠度 实测值/ mm	实测值与 理论值差 值/%
5.0	空车	3.91	3.41	-12.79
	二级载荷	14.71	11.88	-19.24
7.5	空车	2.61	2.45	-6.13
	一级载荷	5.49	5.45	-0.73
10.0	二级载荷	9.81	9.32	-4.99
	空车	1.96	1.79	-8.67
10.0	一级载荷	4.11	3.68	-10.46
	二级载荷	7.35	6.89	-6.26

从表3可以看出,索端张拉力较小时,实测值同理论值之间的误差较大,而索端张拉力增大后,误差变小,这是因为随着索端张拉力的增大,根据参考文献[5-6]可知,索的特征系数 λ^2 在变小,结构的挠度计算也更接近于拉紧弦的古典线性理论.另外,理论值普遍大于实测值,这是因为理论计算中并未考虑弦索上附设导轨的刚度,而实际结构中附设轨道的刚度对减小结构的挠度可以起到一定的作用.综合以上因素,可以看出在张拉力达到一定程度时,用古典弦理论计算弦索轨道结构的静挠度是简单可行的算法,这一结论有利于在实际结构的设计中确定合理的张拉力与相应的承载力大小.

4.3 结构跨中挠度的动力放大系数

研究人员常借助经验“冲击系数”公式来近似地考虑车辆动力效应,各种规范都有关于车辆荷载的冲击系数的条款,但名称、含义及适用范围却不尽相同.“冲击系数”通常被定义为桥梁最大动力响应与最大静力响应之比,即

$$f_{\text{DAF}} = \frac{R_D}{R_S} = 1 + \mu \quad (1)$$

或动态增量

$$\mu = \frac{R_D - R_S}{R_S} = f_{\text{DAF}} - 1 \quad (2)$$

式中, R_D 和 R_S 分别表示车辆荷载过桥时桥梁的最大动力响应和最大静力响应,可以由位移、应力、应变和反力等响应量计算得到,但由不同响应量得到的数值不完全相同.许多学者也将 f_{DAF} 称为“动力放大系数”(Dynamic Amplification Factor).为避免混淆,本文将 f_{DAF} 称为“动力放大系数”,而将 μ 称为“动态增量”,以“冲击系数”一词作为二者的统称.

相对于图6跨中竖向位移时程曲线,其动力放大系数为跨中最大动挠度与静挠度比值.而动态增量即是对应跨中处的竖向位移单侧波动量与静挠度的比值.

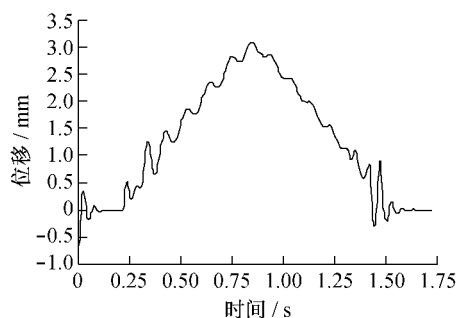


图6 结构跨中中点竖向位移时程曲线

Fig.6 Vertical displacement-time history curve at midspan

为了研究预张弦索轨道桥结构的动力效应,取索端张拉力分别为5 kN、7.5 kN和10 kN三种情况下不同车速的所有试验数据,统计其跨中最大挠度的平均值(平均动挠度)和跨中最大挠度的最大值(最大动挠度),并与试验测得的跨中最大静挠度相除,考察该结构挠度的动力效应(见表4).

表4 动力放大系数
Tab.4 Dynamic amplification factor

张拉力/ kN	移动 载荷	最大动 挠度/ mm	平均动 挠度/ mm	静挠 度/ mm	最大动 力放大 系数	平均动 力放大 系数
5.0	空车	3.87	3.47	3.41	1.13	1.02
	二级载荷	14.28	12.75	11.88	1.20	1.07
7.5	空车	2.73	2.47	2.45	1.12	1.01
	一级载荷	6.17	5.58	5.45	1.13	1.02
	二级载荷	11.33	11.01	9.32	1.22	1.18
10.0	空车	2.18	1.85	1.79	1.22	1.03
	一级载荷	4.45	3.88	3.68	1.21	1.05
	二级载荷	8.47	7.81	6.89	1.23	1.13

从表4可以看到,跨中平均 f_{DAT} 非常小,大部分都不超过1.1,但是在某些速度时,则出现动挠度明显增大的情况,最大 f_{DAT} 可以达到1.3,平均 f_{DAT} 达到1.18和1.13.另外,从表中还可以看到,动载荷越大, f_{DAT} 也越大,这是因为载荷越大,在振动过程中激发的振幅也越大.通过多组试验测试可知,平均动力放大系数相对于荷载而言,是随着载重的增加而增大,而相对于索的张力增大,并没有十分明确的趋势.但整体的平均动力放大系数并不大,从同一级索张力条件下,不同动载平均动力放大系数来看,载荷的大小对其影响十分明显.要避免实际应用过程中,动挠度对行车平顺性影响,确定适合的载重量是必要的.

5 结论

(1) 空轨结构虽然理论上具有较好承载特点,受其自重较轻的特点影响,其动力效应是其应用需要解决的关键问题之一.

(2) 空轨弦索的应力动态增量跟移动载荷和索初始张拉力的大小都有直接关系,随移动载荷的增大而增大,也随索端张拉力的增大而减小.因而,合理的载重荷载与最佳初张拉力将是结构稳定性的关键.

(3) 当初张力达到合理大小时,索应力动态变化可以忽略,结构的变形可按弦索古典理论求得,弦索结构可以简化成索结构计算模型进行设计.

(4) 张拉力达到一定程度时,用古典弦理论计算弦索轨道结构的静挠度是简单可行的算法,这一结论有利于在实际结构的设计中确定合理的张拉力与相应的承载力大小.

(5) 当动载增加时,空轨的动力响应明显,动挠度明显增加,相应的动力放大系数将增大.但平均动力放大系数相对于荷载而言是随着载重的增加而增大,而相对于索的张力增大,并没有十分明确的趋势.

(6) 在同一级索张力条件下,载荷的大小对动力放大系数的影响十分明显.因而要避免实际应用过程中,动挠度对行车平顺性影响,确定适合的载重量是必要的.

参考文献:

- [1] LI Fangyuan, LIU Dongjie, HAN Jinbao, et al. Structure form of pretension string rail structure and application prospect[C] // Structures and Architecture, London: CRC Press, 2010: 427-428.
- [2] LI Fangyuan, CHEN Xingbo, ZHANG Yu. Technical requirements and development of FRP prestress tendons anchorage [C] // Workshop on Architecture, Civil & Environmental Engineering, International Conference on Electric Technology and Civil Engineering, [S. l.]: IEEE Press, 2010: 5579-5582.
- [3] 刘栋杰. 预张弦索轨道桥结构的虚拟样机仿真分析[D]. 上海: 同济大学, 2010.
LIU Dongjie. Research on dynamic behavior of pretension string rail bridge with virtual prototype technology [D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [4] 中华人民共和国交通部. JTG/T D60-01-2004 中国公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Ministry of Communications of P R China. JTG/T D60-01-2004 Wind-resistant design specification for highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [5] 肖恩源. 索的特性[J]. 公路, 1997(5): 1.
XIAO Enyuan. Behaviours of cables [J]. Highway, 1997(5): 1.
- [6] 肖恩源. 索的特性(续)[J]. 公路, 1997(6): 2.
XIAO Enyuan. Behaviours of cables (continuous) [J]. Highway, 1997(6): 2.