

地铁 A 型车荷载作用下双塔单索面斜拉桥静动载试验与性能评估

周军

上海同济检测技术有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8814

[摘要] 为准确评价城市轨道交通专用双塔单索面部分斜拉桥在地铁 A 型车荷载作用下的实际受力状态、结构刚度和动力性能，以某轨道交通高架工程主桥为研究对象，开展成桥外观检查、恒载线形与索力测定、静载试验及动载试验。试验选取主梁正负弯矩控制截面、主塔根部与塔顶作为关键测试部位，采用配重列车等效模拟设计荷载，实测结构应力、位移、索力增量、自振特性及动力响应。结果表明：桥梁整体外观完好，恒载索力与设计值偏差控制在 -9.9% ~ 8.9% 以内，满足精度要求；静载试验荷载效率为 $0.87\sim 0.93$ ，主要测点校验系数均小于 1.0 ，卸载后最大相对残余变形 7.2% 、最大相对残余应变 11.9% ，均满足规范限值；实测一阶竖弯频率 0.759Hz ，动力放大系数处于正常范围，主梁横向加速度最大值 0.431m/s^2 ，远低于规范限值。综合评估表明，该桥强度、刚度、稳定性及动力性能均满足地铁 A 型车 6 辆编组的设计与运营安全要求，研究可为同类型轨道交通斜拉桥荷载试验与性能评定提供参考。

[关键词] 地铁 A 型车；双塔单索面斜拉桥；静载试验；动载试验；结构性能评估

Static and Dynamic Load Testing and Performance Evaluation of Double-Tower Single-Cable-Span
Cable-Stayed Bridge under Metro Type A Train Loads

Zhou Jun

Shanghai Tongji Testing Technology Co., Ltd.

[Abstract] To accurately assess the actual stress state, structural stiffness, and dynamic performance of urban rail transit-specific double-tower single-cable-span partial cable-stayed bridges under Metro Type A train loads, a study was conducted on the main bridge of a rail transit elevated project. The research included bridge appearance inspection, dead load alignment measurement and cable force determination, static load tests, and dynamic load tests. Key testing locations included the positive/negative moment control sections of the main girder, as well as the base and top of the main towers. Equivalent simulation design loads were applied using counterweight trains, with measurements of structural stresses, displacements, cable force increments, natural vibration characteristics, and dynamic responses. Results demonstrated: The bridge maintained overall structural integrity, with dead load cable forces deviating within -9.9% to 8.9% of design values, meeting precision requirements; static load test load efficiency ranged from 0.87 to 0.93 , with all primary measurement points exhibiting calibration coefficients below 1.0 . Post-unloading maximum relative residual deformation was 7.2% , and maximum relative residual strain was 11.9% , both within regulatory limits. First-order vertical bending frequency measured at 0.759Hz , with dynamic amplification coefficients within normal ranges. Maximum lateral acceleration of the main girder reached 0.431 m/s^2 , significantly below regulatory thresholds. Comprehensive

evaluation confirmed that the bridge's strength, stiffness, stability, and dynamic performance meet design and operational safety requirements for six-car Metro Type A train formations. This study provides valuable references for load testing and performance evaluation of similar rail transit cable-stayed bridges.

[Key words] Metro Type A vehicle; Double-tower single-cable-plane cable-stayed bridge; Static load test; Dynamic load test; Structural performance evaluation

引言

城市轨道交通高架桥梁长期承受列车静荷载、动荷载及外界环境影响,其承载能力、变形控制水平与动力特性直接决定线路运行安全与乘坐舒适度。双塔单索面部分斜拉桥兼具连续桥梁与斜拉桥的受力优势,具有跨越能力强、主梁刚度大、线形平顺、具有经济性等特点,在城市轨道交通高架线路中应用越来越广泛。与公路桥梁相比,地铁列车荷载具有轴重集中、行车速度稳定、作用频率高、动力效应明显等特征,对桥梁静力承载、变形控制及动态响应有更严格的要求。

荷载试验是直接反映桥梁真实受力状态、验证设计合理性、评定承载性能最可靠的技术手段,也是轨道交通桥梁竣工验收、投入运营前的关键环节。目前,相关研究多集中于公轨两用斜拉桥或公路斜拉桥,针对地铁A型车专用、双塔单索面部分斜拉桥的系统静动载试验与综合性能评估成果相对较少。

本文以某轨道交通高架工程双塔单索面斜拉桥为依托,结合地铁A型车6辆编组荷载特点,制定可行完整的静动载试验方案,通过实测数据与理论计算对比分析,系统评价结构静力性能、动力性能及整体安全水平,为同类型轨道交通斜拉桥的设计优化、施工验收及运营监测提供依据。

1 工程概况与试验依据

1.1 工程概况

该桥为某轨道交通高架线路关键控制节点,跨越内河三级航道,桥梁与航道呈斜交布置。主桥采用塔梁固结体系双塔单索面部分斜拉桥,跨径布置为100m+180m+100m,主桥全长380m,桥面全宽13.24m,双线轨道中心线间距7.4m。

主梁采用C60预应力混凝土单箱双室直腹板箱梁,中支点梁高7.6m,中跨跨中及边支点梁高4.2m,梁底按二次抛物线变化。索塔为独柱式混凝土结构,桥面以上塔高26.0m,高跨比为1/6.9。斜拉索采用单丝涂覆环氧涂层钢绞线索,外设HDPE防护套管,全桥共设2×8对斜拉索,塔上索距1.0m,梁上索距8.0m。主墩为独柱矩形墩,采用大体积承台与钻孔灌注桩基础,支座采用摩擦摆式减震球形钢支座。荷载等级:地铁A型车6辆编组,最高运行速度100km/h;

1.2 试验依据

本次试验严格遵循国家及行业现行规范、设计文件及工程技术要求,主要依据包括:《城市轨道交通设施运营监测技术规范第2部分:桥梁》(GB/T 39559.2-2020);《城市桥梁工程施工与质量验收规范》(CJJ2-2008);《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01-2015);《铁路桥梁检定规范》(铁运函(2004)120号);桥梁施工图设计及相关技术资料。

2 试验内容与测试方法

2.1 试验总体内容

本次试验围绕成桥结构实际状态与受力性能开展全面检测,主要内容包括四项:

外观检查:对桥面系、上部结构、下部结构进行全面普查,记录表观缺陷与病害情况;

成桥状态参数测定:包括桥面恒载线形测量、斜拉索恒载索力测试;

静载试验:测试控制截面应力、主梁竖向位移、塔顶水平位移、斜拉索索力增量;

动载试验:测试结构自振特性(频率、振型、阻尼比)及列车荷载作用下的动力响应。

2.2 测试仪器与测点布置

试验所用仪器均经计量检定合格,主要设备包括静态应变采集系统、动态应变采集系统、高精度全站仪、网络分布式同步采集系统、测振传感器、位移传感器等。静载测试断面与测点布置如图1所示:(1)S1、S6截面:边跨最大正弯矩截面;(2)S2截面:主梁最大负弯矩截面;(3)S3截面:中跨最大正弯矩截面;(4)S4截面:主塔根部弯矩截面;(5)S5截面:塔顶纵桥向位移截面^[5]。

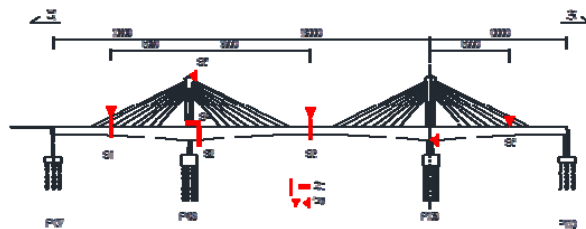


图1 静载试验位移、应力测试断面位置图(单位:cm)

动载试验在主梁四分点、六分点及跨中位置布设竖向与横向振动测点,同时布置动应力、动位移、加速度及支座动位移测点,采用环境随机振动法进行测试。

自振特性测点布置:主梁边跨测点按跨径的四分点进行布设,中跨按跨径的六分点进行布设。各断面在横向距两侧栏杆20cm处布设竖向和横桥向振动测点。主梁共布设42个竖向振动测点和21个横向振动测点^[5]。

2.3 静载试验加载方案

采用2列6节编组试验列车进行加载,车厢内采用砂袋配重,使单节车重达到640kN,轴重160kN,等效模拟地铁A型车设计荷载。根据内力影响线确定列车纵向加载位置,横桥向采用双线对称布置,确保荷载作用与设计最不利工况一致,部分影响线如图2所示。

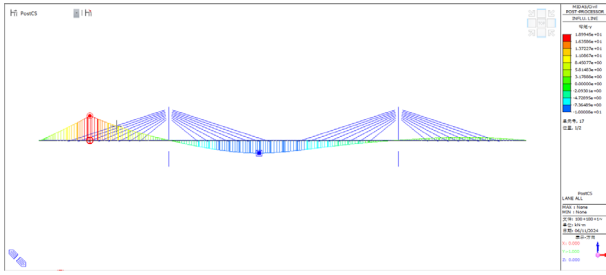


图2 S1断面弯矩影响线

静载试验设置读零、边跨加载、中跨与塔根加载、卸载四个工况，通过分级读数获取结构在各级荷载下的响应数据。荷载效率按规范公式计算：

$$\eta_q = \frac{S_s}{S(1+\mu)}$$

式中： η_q 为静载试验荷载效率； S_s 静载试验荷载作用下控制截面内力（或变形）计算值； S 控制荷载作用下控制截面最不利内力（或变形）计算值（不计冲击系数）； μ 按规范采用的冲击系数^[5]。

2.4 动载试验方案

自振特性测试采用环境随机振动法，不施加人工激振，利用环境微振动采集结构自由振动信号，识别前几阶频率、振型与阻尼比。动力响应测试采用行车激振，试验列车分别以40km/h、60km/h、80km/h匀速通过桥面，并以15km/h速度在测试截面附近制动，实测动应力、动位移、振动加速度及支座动位移，计算动力放大系数。



图2 试验列车内配重照片



图3 主桥荷载试验照片

3 有限元数值模拟

采用Midas/Civil建立全桥精细化模型，主梁、索塔、桥墩用梁单元，斜拉索用索单元，边界条件贴合实际受力：墩底固结，主梁与支座刚性连接，拉索与主梁、索塔铰接，塔梁固结段按实际构造模拟。将A型车等效荷载施加于模型，按试验工况分步加载，计算各截面理论应力、挠度、索力、塔顶变位及自振频率，以计算结果为评定基准，与实测数据对比，验证

结构受力合理性。经计算，结构理论指标均满足规范限值，理论工作状态良好，图3为本桥Midas有限元模型。



图3 本桥Midas/Civil有限元模型

4 试验结果与分析

4.1 外观检查结果

经全面检查，外观质量满足交工验收要求。

4.2 成桥状态参数测试结果

4.2.1 恒载线形

采用全站仪对桥面线形进行测量，边跨每12.5m、中跨每11.25m布设测点。主桥恒载线形实测结果如图2所示，主桥桥面整体线形平顺，南北两侧轨道附近测点相对标高基本对称，无明显异常起伏，线形状态符合设计要求，纵向线形图如图4所示。

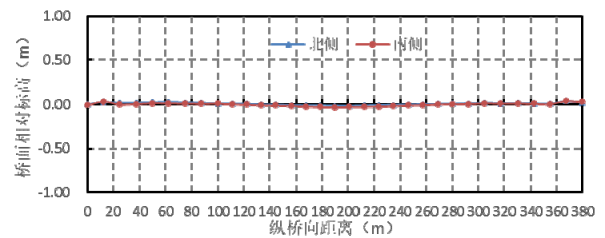


图4 桥面纵向线形图

4.2.2 恒载索力

采用振动法对全桥所有斜拉索进行恒载索力测试，通过测量拉索振动频率反算索力。西塔恒载索力实测与设计对比如图3所示，恒载索力与设计值偏差范围为-9.9%~8.9%，所有拉索偏差均控制在±10%以内，索力分布均匀，结构内力状态与设计预期基本一致，部分实测索力与设计成桥索力对比图如图5所示。

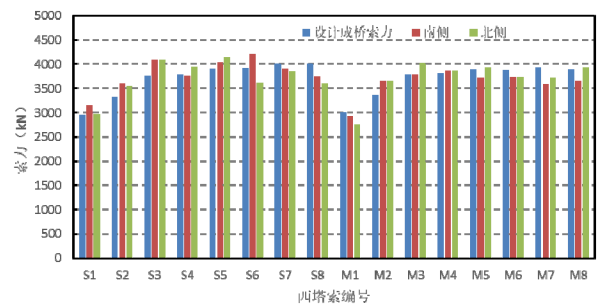


图5 西塔实测索力与设计成桥索力对比图

4.3 静载试验结果与分析

4.3.1 荷载效率

各控制截面静载试验荷载效率为0.87~0.93，整体接近规范建议的0.90~1.00区间，试验荷载设置合理，能够有效等效设计荷载作用效应，荷载效率如表1所示。

表1 静载试验加载效率系数表(双线2列车)

测试断面	控制荷载效应	试验荷载效应	荷载效率 η
S1 断面最大正弯矩	53265kN·m	49526N·m	0.93
S2 断面负弯矩	-94443N·m	-87860N·m	0.93
S3 断面最大正弯矩	63939N·m	59138N·m	0.92
S3 断面最大挠度	向下 113.0mm	向下 104.9mm	0.93
S4 断面最大弯矩	-18739N·m	-16307N·m	0.87
S5 断面最大位移	向中跨侧 29.3mm	向中跨侧 27.2mm	0.93

4.3.2 应力与位移校验系数

校验系数为实测值与理论计算值的比值,是判断结构实际性能与理论模型差异的重要指标。主梁应力校验系数 0.40~0.95,主梁竖向位移校验系数 0.28~0.66,塔顶水平位移校验系数 0.71~0.74,斜拉索索力增量校验系数 0.42~0.88,所有测点校验系数均小于 1.0,说明结构实际刚度与强度均满足设计要求,安全储备充足。

4.3.3 残余变形与残余应变

卸载后对主要测点进行读数,结果显示,主梁竖向位移最大相对残余变形 3.8%,塔顶水平位移最大相对残余变形 7.2%,主梁应力最大相对残余应变 11.9%,均满足规范不大于 20%的限值要求,表明结构在试验荷载作用下处于弹性工作阶段,无塑性变形与不可逆损伤。

4.3.4 支座位移

试验过程中,主墩支座纵向最大位移 1.45mm,横向位移几乎可以忽略,支座工作状态正常,变形满足受力与使用要求。

4.4 动载试验结果与分析

4.4.1 自振特性

通过环境随机振动测试,得到桥梁前几阶自振参数。桥梁前 4 阶自振频率实测与计算对比如表 2 所示,实测一阶对称竖弯频率 0.759Hz,高于理论计算值 0.506Hz,表明结构实际整体刚度优于计算模型,结构阻尼比为 1.279%,耗能能力正常,实测振型与理论振型一致,结构整体刚度分布均匀,部分计算竖向振型图如图 6 所示。

表2 桥梁振动模态参数表

阶次	计算频率	实测频率	实测阻尼比	振型描述
1	0.506	0.759	1.279	主梁一阶对称竖弯
3	1.000	1.329	0.847	主梁二阶反对称竖弯
5	1.673	2.136	0.510	主梁二阶反对称横弯
10	2.168	3.806	0.122	主梁五阶对称竖弯

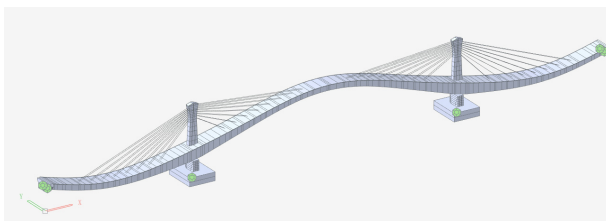


图6 计算1阶竖向振型

4.3.2 动力响应

在不同车速匀速行驶及制动工况下,主梁动应力、动位移均处于正常范围,动力放大系数 1.10~1.32,符合轨道交通桥梁动力响应规律。主墩支座纵向最大动位移 1.57mm,横向位移极小。主梁竖向振动加速度最大值 3.125m/s^2 ,横向振动加速度最大值 0.431m/s^2 ,远低于《铁路桥梁检定规范》规定的

1.4m/s² 限值,行车安全性与舒适度均能得到保障。

5 结构综合性能评估

5.1 静力性能评估

从静力工作状态来看,桥梁控制截面实测应力均未超出计算值,校验系数合理,结构强度满足地铁 A 型车荷载要求;主梁挠度、塔顶位移均小于理论计算值,残余变形符合规范要求,结构刚度充足,线形平顺、无突变点;斜拉索索力实测值与设计值偏差低于规范限值,主梁、索塔、斜拉索协同受力明确,塔梁固结体系受力可靠,整体静力性能满足规范、设计与使用要求。

5.2 动力性能评估

动力测试结果表明,桥梁自振频率合理,实测频率高于计算值,整体刚度偏大,动力稳定性好;列车通行及制动过程中,动应力、动位移、振动加速度响应正常,无异常振动与共振现象;横向加速度低于规范限值,动力性能良好,能够适应地铁列车高频次、稳定速度的运行条件。

5.3 整体安全评定

综合外观检查、成桥参数、静载及动载试验结果,该桥结构整体完整、受力状态合理、处于弹性工作范围、强度与刚度储备充足、动力性能良好,能够完全满足地铁 A 型车 6 辆编组荷载下的设计标准与运营安全要求,具备开通运营条件。

6 结论

1、桥梁外观整体良好,局部表层缺陷不影响结构安全,成桥线形平顺,恒载索力偏差在规范限值内,施工质量与成桥状态达到规范设计要求。

2、静载试验荷载效率满足规范要求,主要测点校验系数均小于 1.0,残余变形与残余应变均在规范限值以内,结构弹性工作特征明显,强度、刚度符合规范设计标准。

3、动载试验实测自振特性合理,动力响应平稳,主梁横向加速度低于规范限值,桥梁动力性能良好,行车安全舒适。

4、双塔单索面部分斜拉桥用于城市轨道交通专用桥梁具有良好的适用性,本次试验方案与评估方法可为同类型桥梁提供直接参考。

[参考文献]

- [1]GB/T 39559.2-2020,城市轨道交通设施运营监测技术规范 第2部分:桥梁[S].
- [2]CJJ2-2008,城市桥梁工程施工与质量验收规范[S].
- [3]JTG/T J21-01-2015,公路桥梁荷载试验规程[S].
- [4]铁运涵〔2004〕120号,铁路桥梁检定规范[S].
- [5]杨奕,季云峰,王晓宇,马明雷.基于动静载试验的斜拉桥初始状态研究[J].城市道桥与防洪,2023,(5):177-181.