

双索面斜拉桥多点支撑转体系统承力支腿 布置形式试验研究*

钱俊峰¹, 柴克鸿¹, 张广潮²

(1. 中国铁路武汉局集团有限公司, 湖北 武汉 430071;

2. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430074)

[摘要] 为了研究大跨度转体施工双索面斜拉桥多点支撑转体支腿布置形式对转体系统受力状态及转动平稳性影响,以襄阳市内环线提速改造工程跨襄北编组站大桥为依托,开展 1:10 转体模型试验,通过改变试验模型中承力支腿布置形式,分别对转体球铰应力、转体牵引力及桥梁倾角等参数进行实时测试,分析承力支腿布置对上述参数影响。试验结果表明:承力支腿增加,球铰及支腿应力状态与变幅均有较大改善,转体平稳性大幅度提升。承力支腿由 4 个增加至 6 个,球铰应力变幅由 29.6% 减至 4.6%,支腿应力变幅由 27.5% 减至 15.9%,转体牵引力变幅由 21.0% 减至 10.6%,桥梁最大倾角由 0.11° 减至 0.03°。

[关键词] 桥梁;斜拉桥;转体施工;支撑;试验

[中图分类号] U448.27

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0149-05

Experimental Study on the Load-bearing Leg Layout of Multi-point Support Rotating System of the Cable-stayed Bridge with Double Cable Planes

QIAN Junfeng¹, CHAI Kehong¹, ZHANG Guangchao²

(1. China Railway Wuhan Bureau Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430071, China;

2. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd.,
Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In order to study the influence of multi-point support rotation legs layout of double-cable-stayed bridges with large spans on the stress state and rotational stability of the rotation system, based on the bridge crossing Xiangbei Marshalling Station as part of Xiangyang Inner Ring Road speed improvement and renovation project, a 1:10 rotation model test was carried out. In the rotation model test, real-time tests were carried out on parameters such as the hinge stress of the spherical hinge, the traction force of the rotary body and the angle of the bridge by changing the arrangement form of the load-bearing legs in the test model, and the influence of the arrangement of the load-bearing legs on the above parameters was analyzed. The test results show that with the increase of load-bearing legs, the stress state and stress amplitude of spherical hinge and load-bearing legs are greatly improved, and the stability of rotary body is greatly improved. When the number of load-bearing legs increases from 4 to 6, the stress amplitude of the spherical hinge decreases from 29.6% to 4.6%, the stress amplitude of the legs decreases from 27.5% to 15.9%, the traction force amplitude decreases from 21.0% to 10.6%, and the maximum inclination angle of the bridge decreases from 0.11° to 0.03°.

Keywords: bridges; cable stayed bridge; rotation construction; supports; testing

* 中国铁路武汉局集团有限公司科技研究开发计划(21G10)

[作者简介] 钱俊峰, 指挥长, 工程师, E-mail: 342073858@qq.com

[收稿日期] 2024-09-18

本文以襄阳内环线提速改造工程跨襄北编组站双独塔多点支撑转体施工斜拉桥为工程背景,基于相似原理,设计制作 1:10 试验桥模型,测试分析不同承力支腿布置对多点支撑转体系统受力状态

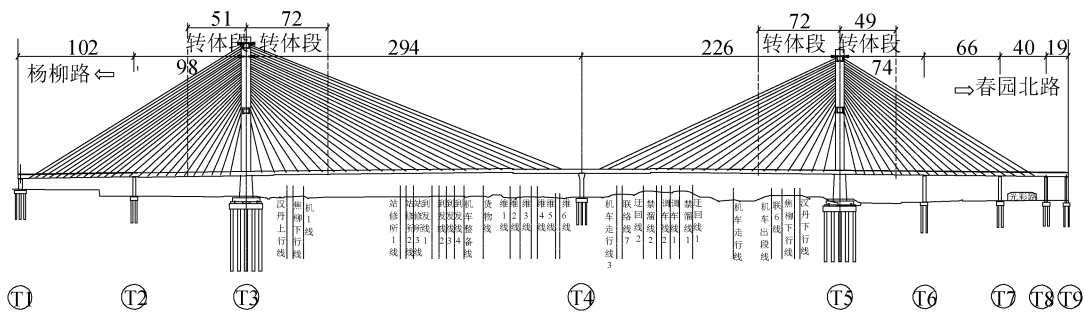


图 1 襄北大桥桥型布置(单位:m)
Fig. 1 Bridge type layout of Xiangbei Bridge(unit: m)

及转体平稳性的影响,给出撑腿数量的合理取值,为实桥建设提供依据,同时可为后续同类型转体桥梁设计提供参考。

1 工程概况

襄阳市内环线提速改造工程是构建城市骨干交通体系“两轴三环九放射”路网结构中的第一环,也是襄阳城建计划的省、市重点项目,其中跨襄北编组站大桥为该项目的控制性节点工程。

襄北编组站大桥(简称“襄北大桥”)跨越汉丹、焦柳铁路及各类站线等共计 32 股铁路线,站场总宽度 470m,桥跨布置为 (200+294)m+(226+200)m 双独塔双索面混合梁斜拉桥,采用转体施工,转体悬臂长度为 72m+52m,转体吨位 3.2 万 t,如图 1 所示。

本桥应用多点支撑转体系统,与传统的单球铰转体系统相比,本桥转体自重由中心球铰+周边环境承力支腿共同承受,承力支腿下方安装滚轮小车,通过电动机驱动,在分担中心球铰受力的同时兼作驱动系统,其平面布置如图 2 所示。

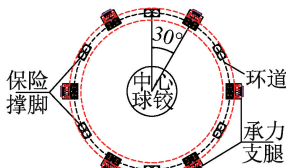


图 2 球铰与承力支腿平面布置
Fig. 2 Plan layout of spherical hinge and load-bearing legs

2 模型试验设计

2.1 试验目的

本试验以襄北大桥工程为依托,旨在研究大悬臂、大吨位、高耸桥梁多点支撑转体系统结构力学状态及转体平稳性等指标受周边承力支腿数量影响及敏感性,进而获取该类型桥梁多点支撑转体系统合理的承力支腿个数。

2.2 模型桥设计及制作

2.2.1 设计原则

设计以满足测试精度要求为基本前提,综合考虑试验规模、场地、可行性及经济合理性等因素,确定本试验模型缩尺比例为 1:10,依据应力等效原则对模型桥进行相似设计,桥梁体系、结构形状与实桥保持基本一致,满足几何相似条件,尺寸相似常数为 1/10。

2.2.2 上部结构设计

本试验关注转体系统的受力状态及桥梁转体过程中的稳定性,则模型设计时对于上部结构,主要需保证转体吨位、桥梁悬臂长度、桥塔高度及各结构部件的刚度与实桥满足相似规律,为了制作方便,必要时可对非主要构造及材料进行简化处理。以主梁结构设计为例,其结构刚度相似比理论值与实际值对比结果如表 1 所示。由表可知,主梁刚度相似精确度达 0.986,说明试验模型桥设计合理。

表 1 主梁刚度相似参数对比
Table 1 Comparison of similar parameters of main girder stiffness

物理量	实桥	模型	$\lambda_{实际}$	$\lambda_{理论}$	实际与理论比值
$EI_x/(N \cdot m^2)$	2.16×10^9	2.13×10^5	9.86×10^{-5}	1×10^{-4}	0.986
$GI/(N \cdot m^2)$	3.77×10^{11}	4.17×10^7	1.11×10^{-4}	1×10^{-4}	1.110
EA/N	8.35×10^{11}	8.71×10^9	1.04×10^{-2}	1×10^{-2}	1.040

注: EI_x 表示抗弯刚度, GI 表示抗扭刚度, EA 表示轴向刚度, $\lambda_{实际}$ 表示实际相似比, $\lambda_{理论}$ 表示理论相似比

2.2.3 转体系统设计

对于下部转体系统,各部件材料均与实桥保持一致,满足材料相似性,因此,仅需主要构造尺寸按缩尺比例进行设计,即能使转体系统各构件的轴向刚度及抗弯刚度满足相似比。球铰及承力支腿作为转体过程中的主要承载构件,在满足材料及刚度相似的基础上,其承载力根据缩尺比例按 1/100 进行控制。

2.3 试验测试内容

本试验以承力支腿的数量为变量,主要测试内容包括球铰、承力支腿等转体装置的应力状态及应力幅值变化规律,转动牵引力数值及转体过程中牵引力数值的变化规律,转体过程中桥梁倾角变化规律。

2.4 测点布置

根据测试内容综合考虑测试精度及经济合理性,选择合适的测试设备,球铰及承力支腿应力采用振弦式应变计测量,牵引力则通过读取驱动小车扭矩值获取,倾角变化选用角位移传感器测量。

承力支腿的振弦式应变计布置如图 3a 所示,在承力支腿上、下侧各布置 1 个竖向应力测点,同时每个承力支腿布置 1 个横向应力测点,形成应变花,以精确测试在转体过程中的应力值。球铰应力测点布置如图 3b 所示,在球铰中心及四周角点各布设 1 个应力传感器,以精确测量球铰结构在转体过程中的应力变化。

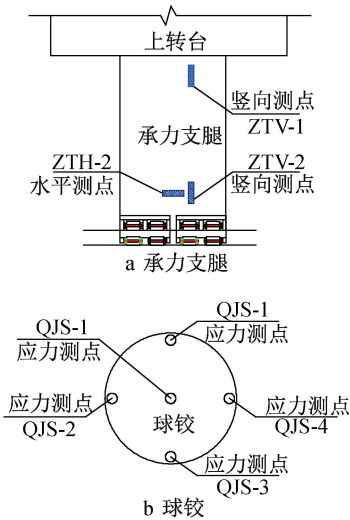


图 3 承力支腿与球铰应力测点布置

Fig. 3 Arrangement of stress measuring points of load-bearing legs and spherical hinge

转体过程中对驱动小车扭矩值进行实时测试记录,通过力臂换算获得驱动力变化规律。

桥梁倾角通过在转体桥梁两侧悬臂端部各布置 1 个双向倾角位移传感器进行实时测试,测点布置如图 4 所示。

2.5 模型桥制作

模型桥施工采用支架法一次成桥,为了给转体系统施工创造可行条件,上、下球铰间空隙由理论的 12cm 调整为 50cm,以满足施工工作空间。值得说明的是,模型桥制作场地选取在实桥附近,保证了转体场地环境的一致性,进而确保了转体工况下

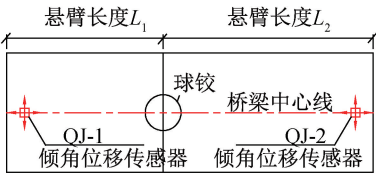


图 4 桥梁倾角测点布置

Fig. 4 Arrangement of the bridge inclination measuring points

风力等外部环境荷载的一致性。完成后的缩尺模型桥如图 5 所示。



图 5 缩尺模型桥

Fig. 5 Scaled model bridge

2.6 试验工况

结合本试验研究内容,以承力支腿数量为变化参数,分别采用 4 个和 6 个承力支腿 2 种工况进行桥梁转体试验,如图 6 所示。

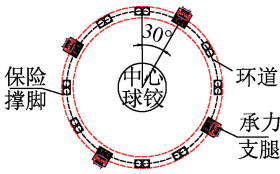


图 6 承力支腿布置方案

Fig. 6 Arrangement scheme of load-bearing legs

3 试验结果

3.1 承力支腿与球铰应力

承力支腿由 4 个增至 6 个,转体过程中球铰及承力支腿自身应力大幅度降低,为了进一步分析球铰及承力支腿应力幅变化规律,以转体初始状态下球铰与承力支腿应力为基准,获得其应力变化率随转体角度变化曲线,如图 7 所示。

由图 7 可知,4 个承力支腿工况下,球铰及支腿的最大应力变化率分别为 24.2%,20.5%;6 个承力支腿工况下,球铰及支腿的最大应力变化率分别为 17.4%,8.5%。承力支腿由 4 个增至 6 个,球铰及承力支腿的应力变化率均大幅度减小,说明增加承力支腿个数使得转体结构应力在转体过程中处于平稳状态有利于结构设计。

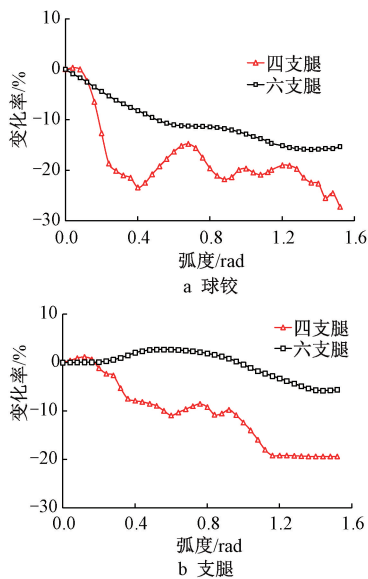


图 7 球铰与支腿应力变化率曲线

Fig. 7 The stress change rate curves of spherical hinge and load-bearing legs

3.2 牵引力

为了研究承力支腿数量对转体牵引力的影响,分别测试了采用 4 个和 6 个承力支腿 2 种工况下转体 90°过程中的牵引力变化曲线,如图 8 所示。由图可知,转体全过程中,上述 2 种工况下牵引反力分别为 10 503,10 770N,二者较接近,说明承力支腿数量基本不影响牵引力大小。

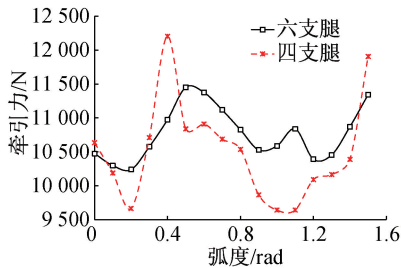


图 8 转体牵引力变化曲线

Fig. 8 Variation curves of rotation traction force

采用 4 个承力支腿转体时,最大、最小牵引力分别为 12 203,9 640N;采用 6 个承力支腿转体时,最大、最小牵引力分别为 11 450,10 237N,前者波动幅度远大于后者,分别为 21.0%,10.6%,说明采用 6 个承力支腿可有效提升转体平稳性。

3.3 主梁倾角

为探究承力支腿布置对转体平稳性的影响,在转体过程中对主梁纵、横向倾角进行实时测试。以转体前平衡状态为基准点,获得主梁纵、横向倾角随转体角度的变化曲线,如图 9 所示。

由图 9 可看出,设置 4 个承力支腿时,主梁纵、

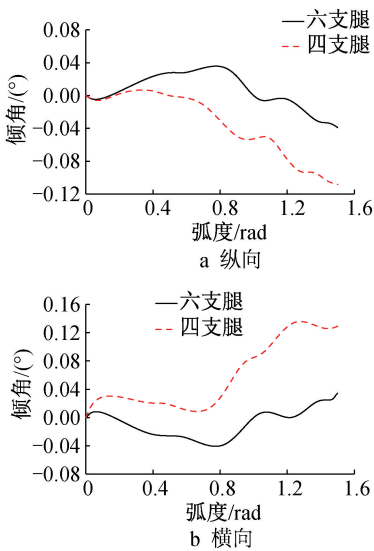


图 9 桥梁纵向与横向倾角位移变化曲线

Fig. 9 Variation curves of longitudinal and transverse inclination displacement of the bridge

横向最大倾角分别为 0.11°,0.13°;设置 6 个承力支腿时,主梁纵、横向最大倾角分别为 0.03°,0.10°,主梁纵、横向倾角随转体角度的变化呈现相似变化规律,6 个承力支腿工况下主梁倾角明显减小,进一步说明 6 个承力支腿下主梁转体稳定性大幅度提升。

4 结语

1)中心球铰+周边承力支腿的多点辅助支撑转体系统能极大地提高转体稳定性,对于大悬臂、大吨位、高耸结构桥梁转体极具竞争优势。

2)相比于 4 个承力支腿,采用 6 个承力支腿可大幅度降低转体系统结构应力状态,同时使得球铰及承力支腿自身应力更加平稳,有利于转体系统结构设计。

3)承力支腿数量对转体牵引力的大小基本无影响,但能极大地降低转体过程中牵引力的波动幅度。

4)随着承力支腿增加,主梁在转体过程中的纵、横向倾角均大幅度减小,承力支腿由 4 个增至 6 个,主梁倾角约为原来的 1/10。

由上述结论最终确定由中心球铰、6 个驱动承力支腿、齿轨式滑道组成的转体系统,通过每个驱动承力支腿的齿轮啮合齿轨实现桥梁转体,降低了中心球铰承受的竖向荷载,将转体抗倾覆稳定系数由 1.15 提高至 14.30,显著提高了抗倾覆稳定性。该桥于 2022 年 8 月完成全桥转体,实际转动速度为 0.03rad/min,单墩耗时 40min,转体过程平稳可靠,转体后桥梁精度满足设计与规范要求。

参考文献:

[1] 马行川. 跨线桥转体技术发展现状与展望[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(6): 92-97.
MA X C. Development status and prospect of swiveling technology for flyover[J]. Railway standard design, 2020, 64(6): 92-97.

[2] 谭芝文, 熊斌, 刘灿, 等. 跨铁路枢纽区五桥同步转体施工技术[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 2948-2952.
TAN Z W, XIONG B, LIU C, et al. Synchronous rotation construction technology of five bridges in the cross-railway hub area[J]. Building structure, 2022, 52(S2): 2948-2952.

[3] 左家强. 铁路小半径曲线转体施工矮塔斜拉桥设计研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(2): 62-67.
ZUO J Q. Research on the design of extradosed bridge using swivel construction method on small radius curve[J]. Journal of railway engineering society, 2022, 39(2): 62-67.

[4] 简方梁, 徐升桥, 高静青, 等. 超大吨位转体桥梁关键技术研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(11): 179-184.
JIAN F L, XU S Q, GAO J Q, et al. Research on key technologies of super large tonnage swivel bridge [J]. Railway standard design, 2021, 65(11): 179-184.

[5] 林骋, 许三平. 大吨位曲线斜拉桥大偏心转体结构优化技术[J]. 桥梁建设, 2022, 52(5): 122-127.
LIN C, XU S P. Optimization techniques for large-eccentric and large-tonnage structure rotated during construction of curved cable-stayed bridge [J]. Bridge construction, 2022, 52(5): 122-127.

[6] 汪志斌, 陈永宏, 张文学, 等. 保定市乐凯大街斜拉桥转体施工监控技术[J]. 铁道建筑, 2020, 60(9): 53-56.
WANG Z B, CHEN Y H, ZHANG W X, et al. Monitoring technology for rotation construction of cable stayed bridge in Baoding City Lekai Street [J]. Railway engineering, 2020, 60(9): 53-56.

[7] 梅慧浩. 基于齿轮齿轨传动的斜拉桥多点支撑转体系统设计与应用[J]. 世界桥梁, 2023, 51(3): 36-42.
MEI H H. Design and application of a multi-point-support swivel system based on rack-and-pinion steering to cable-stayed bridge [J]. World bridges, 2023, 51(3): 36-42.

[8] 李前名, 肖宇松. 襄阳内环线跨襄北铁路编组站大桥总体设计[J]. 桥梁建设, 2021, 51(3): 123-130.

LI Q M, XIAO Y S. Overall design of a Xiangyang inner ring road bridge crossing Xiangyang North Railway Marshalling Station[J]. Bridge construction, 2021, 51(3): 123-130.

[9] 杜军良. 多点支撑转体斜拉桥转动牵引力影响因素试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2023(2): 54-57, 66.
DU J L. Experimental study on influence factors of rotational traction force of multi-point supported rotating cable-stayed bridge [J]. Railway construction technology, 2023(2): 54-57, 66.

[10] 汪振国, 雷晓燕, 罗锴, 等. 桥梁结构振动试验相似模型的设计及校验[J]. 振动与冲击, 2018, 37(7): 220-226.
WANG Z G, LEI X Y, LUO K, et al. Design and validation of similarity model in bridge structural vibration tests[J]. Journal of vibration and shock, 2018, 37(7): 220-226.

[11] 吴刚. 多点支撑转体斜拉桥转动倾角影响因素试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2023(2): 138-143.
WU G. Experimental research on influencing factors of rotation inclination of multi-point supported swivel cable-stayed bridge [J]. Railway construction technology, 2023(2): 138-143.

[12] 刘喜红, 吴康雄. 桥梁模型试验振动测试系统的设计[J]. 工程与试验, 2010, 50(4): 62-64.
LIU X H, WU K X. Design on vibration measurement system used for bridge model test [J]. Engineering & test, 2010, 50(4): 62-64.

[13] 罗锴, 姜兴, 王鹏生, 等. 车-轨-桥耦合振动相似试验模型设计与校验[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(10): 3841-3850.
LUO K, JIANG X, WANG P S, et al. Design and verification of vehicle-rail-bridge coupling vibration similarity test model [J]. Journal of railway science and engineering, 2023, 20(10): 3841-3850.

[14] 吴坤铭. 应变片布置及组桥方法在工程中的应用研究[J]. 安徽建筑大学学报, 2019, 27(3): 1-6.
WU K M. Application research of strain gage layout and bridging method in engineering [J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2019, 27(3): 1-6.

[15] 高宗余. 桥梁多点支撑水平转体建造成套技术研究及应用[Z]. 武汉: 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 2021.
GAO Z Y. Research and application of multi-point support horizontal rotating construction technology for bridges [Z]. Wuhan: China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., 2021.

(上接第 148 页)

参考文献:

[1] 周静瑜. 国际化项目中 Specification (技术规格书) 的知识要点及应用[J]. 建筑施工, 2014, 36(5): 608-610.
ZHOU J Y. Main points and its application of technical specifications in the international projects [J]. Building construction, 2014, 36(5): 608-610.

[2] 王力尚, 余涛, 朱建潮, 等. 国际工程技术管理的思路及创新[J]. 施工技术, 2012, 41(16): 40-43.
WANG L S, YU T, ZHU J C, et al. Ideas and innovation on technical management for international projects [J]. Construction technology, 2012, 41(16): 40-43.

[3] 田伟. 北非地区 EPC 项目设计管理[J]. 施工技术, 2023,

52(6): 121-125.

TIAN W. Design management of EPC projects in North Africa [J]. Construction technology, 2023, 52(6): 121-125.

[4] 李俊. 探讨 SPEC 技术在项目管理中的应用[J]. 中国工程咨询, 2019(5): 69-72.
LI J. Discussion on the application of SPEC technology in project management [J]. China engineering consultants, 2019(5): 69-72.

[5] 赵光. 技术规格书在工程项目中的应用[J]. 绿色建筑, 2012, 4(1): 66-68.
ZHAO G. Application of technical specification in project [J]. Green building, 2012, 4(1): 66-68.

[6] TIAN W. Features and key points of EPC contracting management [J]. Construction technology, 2022, 51(12): 1-6.