

# 多点支撑转体系统球铰受力特性模型试验研究

曾理飞

(中铁十一局集团第一工程有限公司,湖北 襄阳 441000)

**摘要:**球铰作为桥梁转体系统的关键承力构件,其受力特性对桥梁转体安全至关重要。该文以跨襄阳北编组站大桥为对象,开展多点支撑转体系统球铰受力特性模型试验,详细分析承力支腿数量、桥梁转动速度、轨道平顺性和风荷载对球铰应力的影响,探讨不同工况下球铰应力的变化规律。试验结果表明:增加承力支腿数量可以使上、下球铰受力更为均匀;在转动加速阶段,球铰受加速度效应影响显著,在匀速转动阶段,上球铰的应力变化随着转体角度的增大逐渐增大,而下球铰受力较为均匀,建议转速控制为 $0.02\sim 0.04\text{ rad/min}$ ;轨道不平顺会增大球铰应力变化,随着不平顺度的增大,球铰应力变化也随之增大;在风荷载作用下,下球铰受力较为均匀,而上球铰应力变化随着转动角度的增大而增大,应避免在高风速下进行转体。

**关键词:**桥梁工程;多点支撑转体;球铰应力;承力支腿数量;转动速度;轨道平顺度;风荷载

**中图分类号:**U445

**文献标志码:**A

## 0 引言

转体施工具有施工质量好且方便的优点,广泛应用于跨既有线路的桥梁工程<sup>[1-7]</sup>。桥梁转体过程中的主要承力装置是中心球铰,由上球铰、下球铰、销轴以及下球铰骨架等组成,其应力分布与转体施工的安全性和稳定性紧密相关<sup>[8-9]</sup>。因此,研究桥梁转体过程中球铰应力变化规律、探索不同因素对球铰应力的影响具有重要的现实意义<sup>[10-11]</sup>。

目前,国内外学者针对转体系统的球铰进行了大量研究,车晓军等<sup>[12]</sup>利用半空间相关理论推导了球铰接触面竖向压应力分布公式,发现球铰压应力呈现出中间小、两端大的分布规律;范剑锋等<sup>[13]</sup>运用非赫兹接触理论研究了静止状态下转体桥球铰应力的变化规律,为类似工程球铰应力的分析提供参考;郝增奎<sup>[14]</sup>对石家庄某铁路特大桥在施工阶段下球铰应力进行监测,为该桥转体安全施工提供了数据保障;王坤等<sup>[15]</sup>研究了桥梁平转施工时,风荷载对球铰应力变化的影响,结果表明:在9级风荷载作用下球铰最大应力超过混凝土应力设计强度值,使转体桥

梁发生破坏。上述文献研究对象均为传统的单点支撑转体系统,且主要是对静止条件下的球铰应力分布特性及球铰应力监测进行了相关研究,关于多点支撑转体系统球铰应力变化规律及影响因素的研究尚未见报道。

本文以跨襄阳北编组站大桥为工程背景,依据相似准则,设计并制作缩尺比为1:10的多点支撑转体模型,研究承力支腿数量、桥梁转动速度、轨道平顺度和风荷载对球铰应力的影响,探讨不同影响因素下球铰应力的变化规律,相关结论可为多点支撑转体桥梁设计及施工提供参考。

## 1 工程概况

跨襄阳北编组站大桥(简称“襄北大桥”)采用双独塔混合梁斜拉桥,塔梁固结体系,全长920 m,双向六车道,桥面宽度为37.50 m,桥梁立面如图1所示。桥梁主跨为钢-混组合梁,双边主梁与横梁格构体系,梁高为3.53 m,边跨为混凝土梁。桥梁跨越32股铁路线,为降低主桥施工对铁路运营的影响,采用先转体后悬拼的施工工艺,T3号主塔侧转体部分梁长

收稿日期:2021-08-29

基金项目:中国铁建股份有限公司科技研发计划项目(编号:2020-B02);中铁十一局集团有限公司科技创新项目(编号:20-AI-02)

作者简介:曾理飞,男,大学本科,高级工程师.E-mail:121079102@qq.com

为122.75 m,转体角度为顺时针旋转77°,转体质量为30 600 t;T5号转体部分梁长为120.75 m,转体角度为顺时针旋转84°,转体质量为32 000 t。

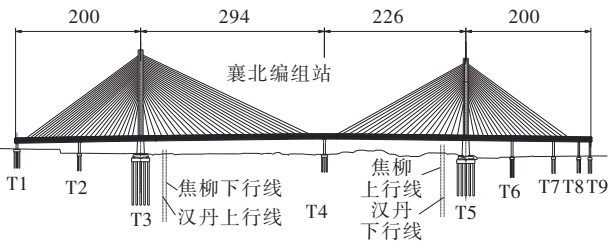


图1 襄北大桥立面布置图(单位:m)

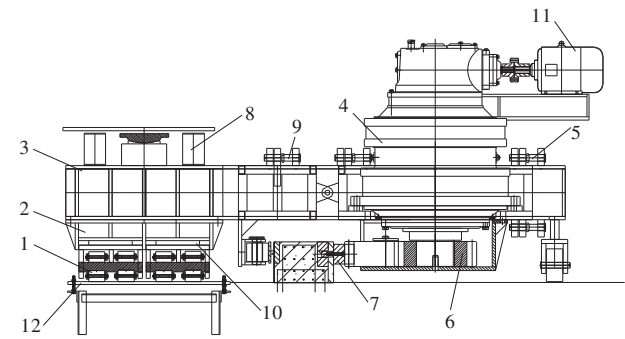
本桥转体具有结构重心高、重量大等特点,为提高转体稳定性,采用齿轮齿轨式多点支撑转体系统,该转体系统由转盘、球铰、6个常规撑脚、6个驱动承力支腿以及齿轨式滑道组成。该系统用“驱动承力支腿”替代传统的钢绞线作为动力系统,牵引力通过驱动承力支腿的齿轮与滑道齿轨啮合提供,每个驱动承力支腿下部有4组滚轮,滚轮在滑道上滚动传递竖向荷载,转体时启动变频电机及减速机,带动齿轮沿齿条滚动,进而实现驱动承力支腿及梁体沿滑道滚动。常规撑脚和驱动承力支腿均匀间隔布置,滑道采用钢板+骨架拼装的结构形式,转体系统结构示意图如图2所示<sup>[16-19]</sup>。

2 试验模型和工况设置

2.1 试验布置

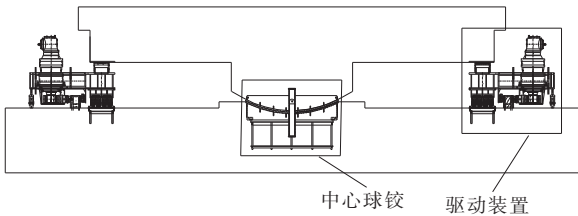
为了研究转动过程中承力支腿数量、桥梁转动速度、轨道平顺度和风荷载等因素对球铰应力的影响,本文开展大比例转体模型试验,综合考虑模型制作、加载能力、场地条件等因素,按“刚度相似法”设计制作了缩尺比为1:10的桥梁转体模型,模型主梁长(5.5+7.17) m,主塔高9.63 m,主梁为钢结构边箱梁形式,采用塔梁固结体系,基础为100 cm厚混凝土扩大基础,斜拉索采用与实桥斜拉索相同材质的平行钢丝,面积按照刚度等效原则设计,模型转体系统与实桥均为齿轮齿轨式多点支撑转体系统,模型与实桥相似关系如表1所示,转体桥梁模型见图3。

为了获得转体过程中球铰应力的变化规律,在转体模型上、下球铰与转台的接触位置分别均匀布置4个弦式应变计(图4),图中A-A截面为上球铰与

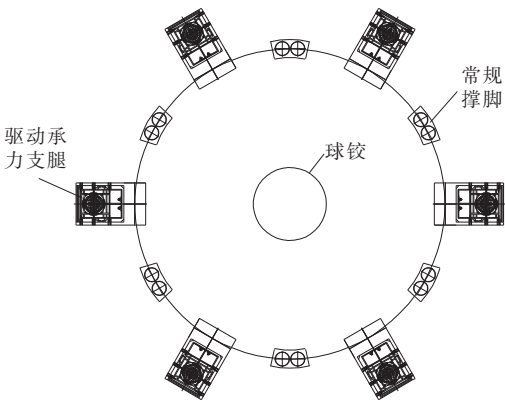


注:1为滚轮小车;2为限位架;3为台车架;4为减速机组件;5为减速机架组件;6为齿轮组;7为齿条组件;8为加载结构;9为销轴;10为橡胶垫;11为电机;12为滑道。

(a) 驱动承力支腿示意图



(b) 立面图



(c) 平面图

图2 转体系统结构示意图

表1 试验模型与实桥参数比

物理性能	物理参数	相似比
几何性能	长度	1:10
	线位移	1:10
	角位移	1:1
	面积	1:100
	集中力	1:100
荷载性能	线荷载	1:10
	面荷载	1:100

上转台接触面,B-B截面为下球铰与下转台接触面。选取SZP-1和SZP-3的应力平均值作为上球铰1号应力数据,XZP-1和XZP-3的应力平均值作为下球铰

1号应力数据,以分析球铰纵桥向的应力变化;选取SZP-2和SZP-4的应力平均值作为上球铰2号应力数据,XZP-2和XZP-4的应力平均值作为下球铰2号应力数据,分析球铰横桥向的应力变化。在转体过程中,采集频率为0.025 rad/次。



图3 桥梁转体模型

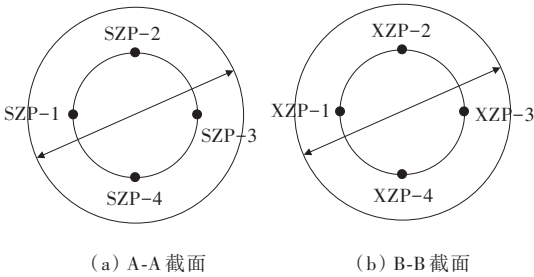


图4 测点布置图

2.2 试验工况

多点支撑齿轮齿轨转体系统由球铰和承力支腿共同承受竖向荷载,承力支腿数量的改变会影响荷载的分配,从而导致球铰受力状态发生变化,试验设计了4支腿和6支腿两种方案,以研究支腿数量对球铰应力变化的影响,支腿布置方式如图5所示。

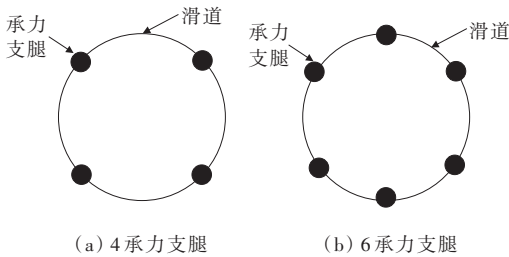


图5 承力支腿布置图

桥梁转体过程可分为3个阶段(加速阶段、匀速阶段和制动阶段),当转体系统处于加速和制动阶段时,主梁在惯性力作用下,会产生一定程度的变形和倾斜,改变竖向力的分配模式,影响转体平稳性和球铰受力,试验设计了4种转动速度工况(0.02 rad/min、

0.03 rad/min、0.04 rad/min、0.06 rad/min),以研究转动速度对球铰应力的影响。

轨道不平顺对球铰应力变化有较大影响,会改变桥梁转体稳定性和竖向力的分配模式,为分析轨道平顺度对球铰应力的影响规律,试验分别在滚轮小车轨道上设置0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm厚度的钢板模拟转体过程中的3种不平顺工况。

风荷载对桥梁转体稳定性有较大影响,也是影响球铰受力的关键因素,试验参照《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2008)选取基准风速为25.6 m/s,通过风洞试验获得施工阶段主梁的三分力系数。依据基准风速和升力、扭矩系数计算出模型气动力大小,通过等效荷载原则在主梁上加载配重实现风荷载的扭矩和升力效应,模拟风荷载造成的偏载,试验分别测试了3种风荷载工况(无风、6级风、8级风)。

试验分别对承力支腿数量、桥梁转动速度、轨道平顺度和风荷载对球铰应力的影响规律开展了研究,具体工况如表2所示。

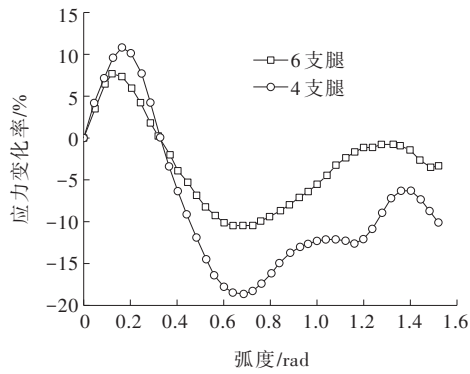
表2 试验工况

影响因素	试验工况描述	其他试验条件描述
承力支腿数量	4个承力支腿	0.03 rad/min,局部凸起
	6个承力支腿	高度0.5 mm,无风
转动速度	0.02 rad/min	
	0.03 rad/min	6个承力支腿,局部凸起
	0.04 rad/min	高度0.5 mm,无风
	0.06 rad/min	
轨道平顺度	钢板厚度0.5 mm	0.03 rad/min,
	钢板厚度1.0 mm	6个承力支腿,无风
	钢板厚度1.5 mm	
风荷载大小	无风	0.03 rad/min,6个承力支腿,局部凸起高度0.5 mm
	6级风	
	8级风	

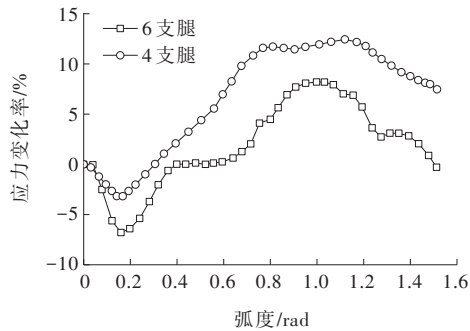
3 试验结果

3.1 承力支腿数量的影响

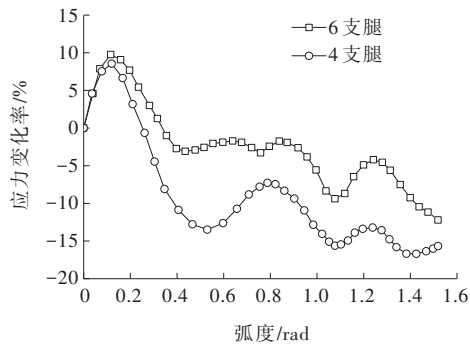
图6为承力支腿数量对球铰应力变化的影响图,图中纵坐标应力变化率为球铰转动过程中应力变化与初始应力的比值,正值表示压应力增大,负值表示压应力减小,横坐标为桥梁转动角度。



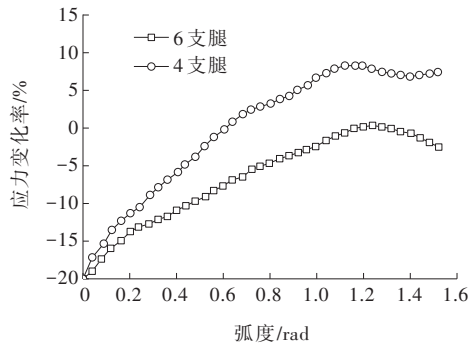
(a) 下球铰纵桥向



(b) 下球铰横桥向



(c) 上球铰纵桥向



(d) 上球铰横桥向

图6 不同支腿数量下球铰应力变化曲线

从图6可以发现:在模型转动过程中,4支腿与6支腿工况的球铰应力变化规律基本保持一致,其中4支腿工况的球铰应力波动范围稍大,上球铰横桥向

应力变化率最大可达到28.6%,此时对应桥梁转动角度为1.18 rad,而在同转动角度位置,6支腿最大压应力变化率为20.3%。对球铰极值应力进行分析,4支腿下球铰压应力变化率最大值均大于6支腿,说明桥梁转动时采用4支腿的稳定性要小于6支腿,增加承力支腿数量可使球铰受力更为均匀。同时可以发现,承力支腿数量对上球铰横桥向的应力变化影响更为明显,在4个承力支腿和6个承力支腿工况下,上球铰横桥向的最大应力变化率分别为28.6%和20.3%,表明上球铰横桥向的应力变化受支腿数量影响更显著,这主要是由于转体过程中桥梁的横向不平稳造成的。对于实际桥梁转体,建议尽量增加支腿数量,以保证桥梁转动时的稳定性,使球铰受力更为均匀、合理。

### 3.2 转动速度的影响

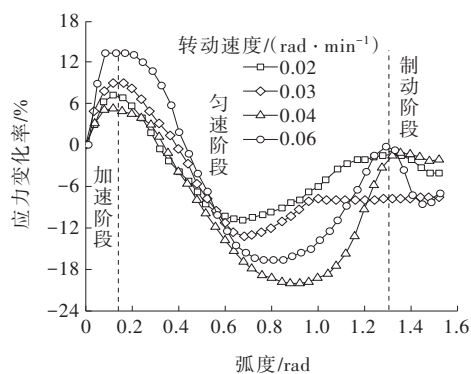
图7为不同转动速度下球铰应力的变化曲线。

从图7可以发现:① 球铰应力变化分为匀速转动和加速转动两个阶段,球铰应力变化率基本随着转动速度的增大而增大。在加速阶段,球铰的应力变化明显增大,当转动角度达到约0.1 rad时,上球铰纵桥向的应力变化率达到极值点,随着转动角度增大,应力变化率曲线斜率逐渐降低,而上球铰的应力变化随着转动速度的增大而增大;② 在匀速阶段,上球铰在两个方向的应力变化随着转动速度的增大逐渐增大,当转动速度为0.06 rad/min时,上球铰在横桥向的最大应力变化率达31.2%,这主要是由于随着转动速度的增大,桥梁转体过程中上、下球铰接触面发生偏移,球铰局部应力增大造成的;③ 在匀速阶段,下球铰的应力变化随着转动角度的变化呈现上下波动的正弦形式,可能是由于轨道不平顺以及承力支腿受力不均导致的,其应力变化率相对上球铰较小,受力较为均匀;④ 在制动阶段,随转动速度降低,下球铰在两个方向的应力变化率以及上球铰横桥向应变率逐渐降低,而上球铰纵桥向应力变化出现了一定程度增大。综上分析,在实际桥梁转体中,需要对转动速度引起重视,应控制转体速度使球铰不发生偏移,建议实桥转体时转速控制为0.02~0.04 rad/min。

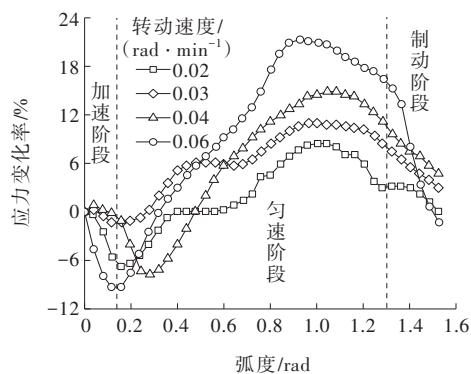
### 3.3 轨道平顺度的影响

为方便对比分析,本文引入平顺度的概念量化轨道不平顺的影响,定义为轨道平面高差值。不同轨道平顺度下球铰应力变化曲线如图8所示。

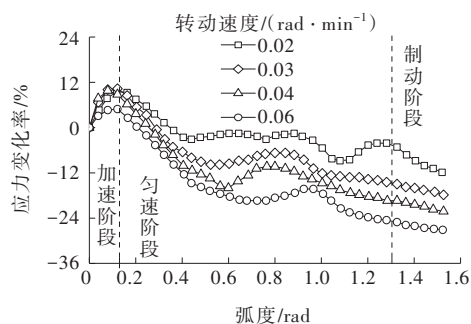




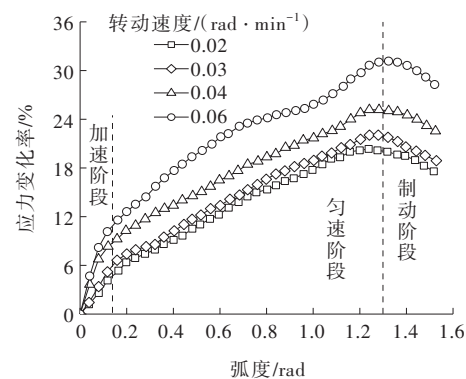
(a) 下球铰纵桥向



(b) 下球铰横桥向

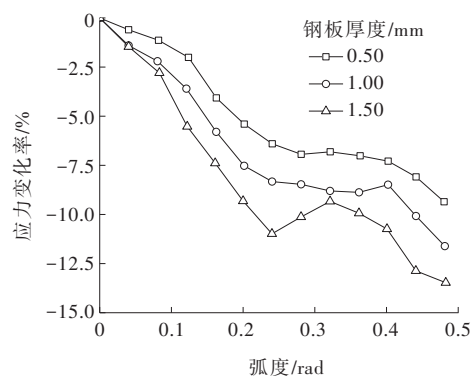


(c) 上球铰纵桥向

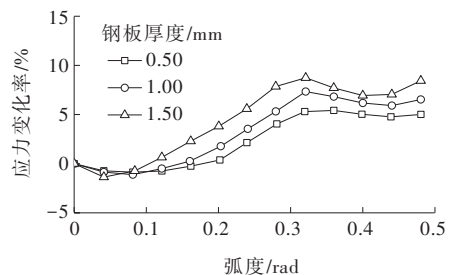


(d) 上球铰横桥向

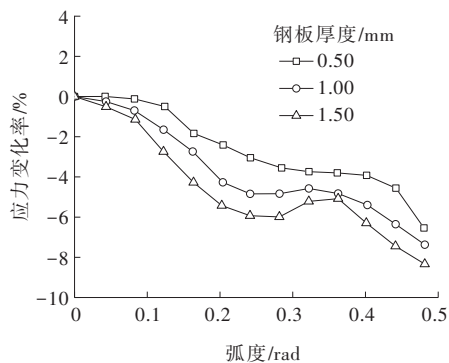
图 7 不同转动速度下球铰应力变化曲线



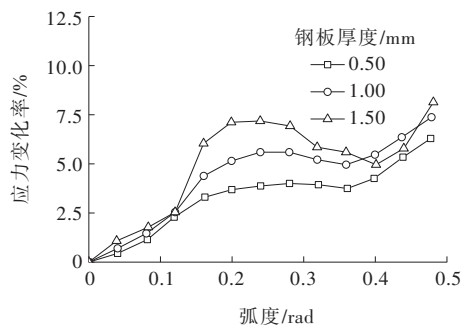
(a) 下球铰纵桥向



(b) 下球铰横桥向



(c) 上球铰纵桥向



(d) 上球铰横桥向

图 8 球铰应力与轨道顺滑性变化曲线

从图 8 可以发现:球铰应力变化基本随着钢板厚度的增大而增大,以下球铰纵桥向应力变化为例,钢板厚度为 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm 时,球铰应

力最大变化率分别为9.35%、11.6%和13.5%,表明轨道不平顺将增大球铰应力的波动,随着钢板厚度的增大,应力变化也随之增大。同时可以看到,下球铰在两个方向的应力变化明显大于上球铰,说明下球铰受轨道不平顺影响更明显。对于实际桥梁转体,建议在转体过程中将滑道不平顺度(钢板厚

度)控制在0.5 mm以下,以保证实桥转动过程中的稳定性。

### 3.4 风荷载的影响

试验对无风、6级风、8级风3种风速工况的球铰应力进行了分析,图9为球铰应力变化率与3种风速关系曲线图。

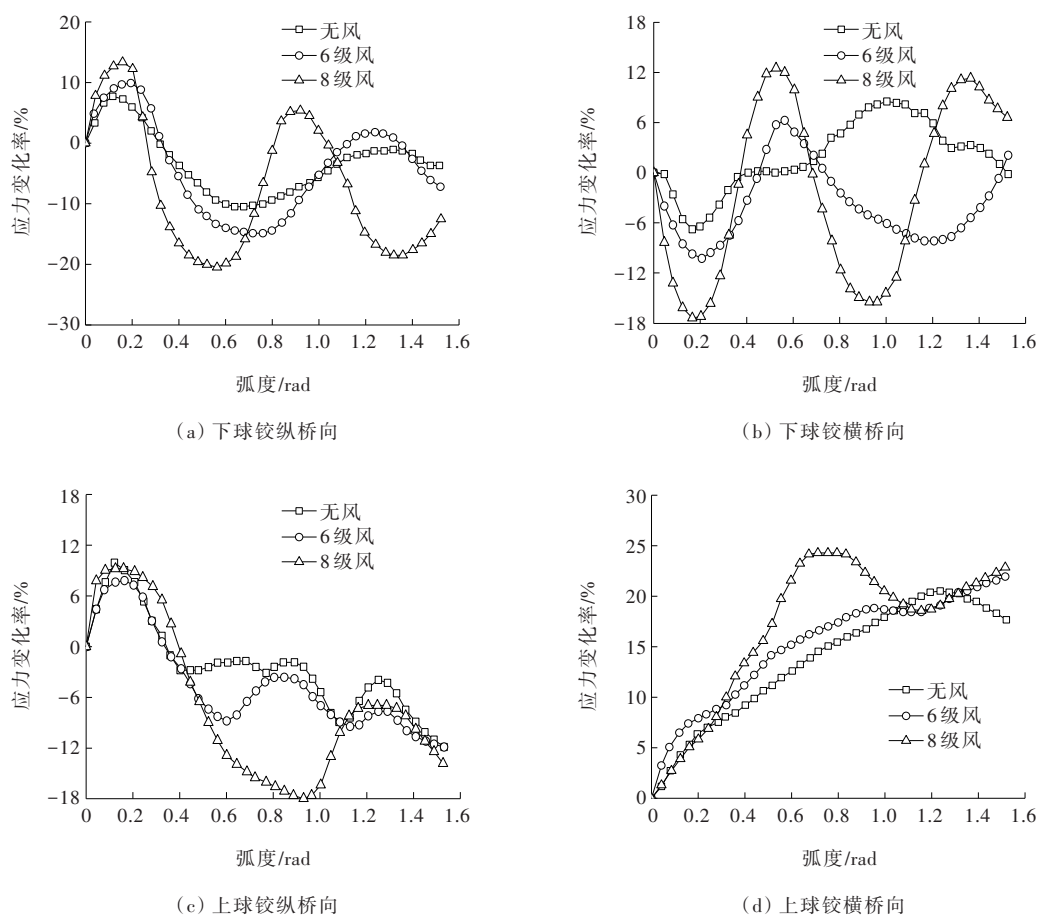


图9 球铰应力变化率与风速关系曲线

从图9可以发现:在风荷载作用下,下球铰的应力变化随转动角度的增大呈现上下波动的现象,受力较为均匀;上球铰在两个方向上的应力变化率整体上随着转动角度的增大而增大,稳定性逐渐降低,这是由于随着转动角度的增大,球铰发生了一定的偏移,使球铰受力不均匀;最大球铰应力变化出现在上球铰的横向位置,6级风工况的应力变化率与无风工况较为接近,无风时最大应力变化率为18.3%,6级风下最大应力变化率为21.5%,当风荷载达到8级时,最大应力变化率为24.6%,建议实桥转体时应选择风速较小时时间段进行转体施工。

## 4 结论

本文以襄北大桥为研究背景,研究承力支腿数量、桥梁转动速度、轨道平顺度和风荷载对多点支撑转体系统球铰应力变化规律的影响,得到主要结论如下:

(1) 增加承力支腿数量可以使上、下球铰受力更为均匀,上球铰横桥向的应力变化受支腿数量的影响更显著,在4个承力支腿和6个承力支腿工况下,其最大应力变化分别达到28.6%和20.3%,建议增加支腿数量,以保证桥梁转动时的稳定性。

(2) 在转动加速阶段,球铰受加速度效应影响显著,转动速度越快,球铰应力受影响越明显。在匀速转动阶段,上球铰在两个方向的应力变化率随着转体角度的增大逐渐增大,而下球铰的应力随着转动角度的变化呈现上下波动,受力较为均匀,实桥转体时建议转速控制为  $0.02\sim 0.04\text{ rad/min}$ 。

(3) 轨道不平顺会增大球铰应力变化,随着不平顺度的增大,球铰应力变化随之增大,其中下球铰受轨道不平顺的影响更明显,建议在转体过程中将滑道不平顺度(钢板厚度)控制在  $0.5\text{ mm}$  以下,以保证桥梁转动过程中的稳定性。

(4) 在风荷载作用下,下球铰受力较为均匀,上球铰在两个方向的应力变化率整体上随着转动角度的增大而增大,最大球铰应力变化出现在上球铰的横向位置,建议实桥转体时避免在 8 级风速下进行转体施工。

#### 参考文献:

- [1] 程飞,张琪峰,王景全.我国桥梁转体施工技术的发展现状与前景[J].铁道标准设计,2011,55(6):67-71.
- [2] SU M, WANG J, PENG H, et al. State-of-the-art review of the development and application of bridge rotation construction methods in China[J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(6): 1137-1152.
- [3] CHE X J, ZHANG X D. Stability impact analysis of random dead load distribution to T-rigid frame bridge swivel construction[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 361-363: 1348-1352.
- [4] 丁仕洪. 96 m 钢-混组合桁架梁桥异位成型及转体施工技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(1): 116-120.
- [5] 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.
- [6] 贾宝红. 郑万铁路上跨郑西客专联络线特大桥主桥转体结构分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(5): 65-69.
- [7] 李克银. 双幅近距离同步转体刚构桥设计与施工研究[J]. 中外公路, 2014, 34(2): 157-160.
- [8] 罗洪成, 孙艳鹏, 杨清印, 等. T 形刚构桥平转施工球铰体系安装技术[J]. 中外公路, 2018, 38(4): 156-159.
- [9] 张聪聪. 转体桥球铰稳定与施工模拟分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- [10] 王家伟, 孙全胜. 脉动风效应对转体结构的稳定性影响研究[J]. 中外公路, 2020, 40(6): 98-103.
- [11] GUO Y J, LI H Z, CAI H B. Analysis of ground settlement induced by pipe-jacking construction considering of soil inner diseases[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 139-143.
- [12] 车晓军, 张谢东. 大吨位 T 形刚构桥转体过程抗倾覆性能[J]. 中国公路学报, 2014, 27(8): 66-72.
- [13] 范剑锋, 刘涛, 彭自强, 等. 基于非赫兹接触理论下转体桥球铰磨心应力分布分析[J]. 武汉理工大学学报, 2018, 40(1): 48-52.
- [14] 郝增奎. 铁路连续梁桥水平转体监控技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.
- [15] 王坤, 韩庆华. 平转施工球铰节点的受力性能研究[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(11): 26-28.
- [16] 曾理飞. 转速对桥梁水平转体结构受力及稳定性影响的模型试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(3): 27-31, 50.
- [17] 李前名, 肖宇松. 襄阳内环线跨襄阳北铁路编组站大桥总体设计[J]. 桥梁建设, 2021, 51(3): 123-130.
- [18] 郭昭赢. 桥梁两支点转体施工技术的可行性研究[J]. 铁道建筑技术, 2019(2): 64-68.
- [19] 李合理. 小曲线半径转体桥转体系统施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2018(S1): 97-100.