

# 钢箱拱双向倾斜吊杆锚固连接构造的弯拉疲劳特性及其构造优化

翟 锋

(中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北武汉 430063)

**摘 要:** 吊杆作为系杆拱桥的关键受力构件,为分析双向倾斜吊杆锚固连接构造在服役期间的车致振动弯拉疲劳特性,以某1-188 m跨空间网状吊杆钢箱系杆拱桥为依托,通过建立三维有限元全桥模型及双轴车辆简化模型,分别采用桁架、梁单元对吊杆进行模拟,求解桥面不平整度激励下的吊杆车-桥耦合振动。结果表明:该桥各吊杆中梁端短吊杆应力值较大,跨中长吊杆应力值达到最大,网状吊杆倾向梁端方向应力幅大于倾向桥跨方向;同一吊杆下锚固端面外、面内转角分别约为上锚固端的2.3、1.7倍。为适应面外转角变形,建议相应调整梁上耳板孔及吊杆下端叉耳孔直径。相比于桁架单元,梁单元模拟吊杆计算的损伤度更大,跨中区域吊杆更易出现疲劳损伤。

**关键词:** 双向倾斜吊杆;车致振动;应力分布;弯拉疲劳;构造优化

中图分类号: U441.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)09-0106-08

## 0 引 言

空间网状吊杆具有整体刚度大、拱肋系梁弯矩小,整体技术经济性和景观效果好等优点,因而广受工程师们的青睐。但与平面竖直吊杆拱桥相比,双向倾斜网状吊杆的锚固连接受力更为复杂,锚固端弯拉疲劳性能有所退化<sup>[1]</sup>,成为双向倾斜空间网状吊杆系杆拱桥的一大安全隐患,因此研究网状吊杆的车致振动响应对该类桥梁的服役安全尤为重要<sup>[2]</sup>。

由于车辆自身的特性和桥面的不平整,车辆通过桥梁时,会产生车桥耦合振动现象<sup>[3]</sup>,桥梁与车辆的耦合振动会放大车辆荷载的作用,进而也会加剧双向倾斜吊杆的弯拉疲劳性能的退化。顾超<sup>[4]</sup>在宿迁市北京路京杭运河网状吊杆拱桥设计中得出网状吊杆拱桥的疲劳应力幅相对较大,在吊杆的节点构造上也相对复杂。张开银等<sup>[5]</sup>通过建立吊杆的轴向振动模型,并利用MIDAS模拟车辆激励,分析表明长度越短的吊杆自振频率越高,在车辆冲击作用下振动越激烈。贺焱博<sup>[6]</sup>对拱桥吊杆上下锚固端进行研究,考虑吊杆弯拉刚度,得出相应的竖向吊杆变形与应力关系。

目前的研究已将车辆与桥梁间的相互激励进行了多因素耦合,能较为真实地计算桥梁的车致振动弯拉疲劳特性。由于桁架、梁单元的约束条件不同,必然使真实拱桥锚固端弯拉受力性能处于桁架、梁单元之间。本文以此为切入点,分别采用桁架单元、梁单元模拟吊杆,建立车、桥、桥面不平整度的耦合模型,详细研究了车致振动下网状吊杆锚固端转角变形、内力分布及其疲劳特性,进一步提出相应构造优化措施。

## 1 车桥耦合振动模型

### 1.1 下承式空间网状吊杆系杆拱桥有限元模型

以某1-188 m跨下承式空间网状钢箱系杆拱桥为依托工程,主拱计算跨径188 m,矢高31.5 m,矢跨比1/5.97。上部结构主要有拱肋、风撑、吊杆、系梁及其他连接件组成,拱肋横桥向内倾5°,采用箱型截面。全桥共设置28对网状钢绞线吊杆,吊杆梁上锚固点顺桥向间距为6 m,吊杆顺桥向倾角约为60°。系梁由2根主纵梁、5根小纵梁、横梁及桥面板组成。该桥立面图和标准横断面分别如图1和图2所示。

通过有限元软件ANSYS建立该桥的有限元模型,拱肋采用beam4单元模拟,根据纵梁位置分布将系梁纵向划分为9个小纵梁,纵横梁均采用beam4单元模拟,吊杆的桁架、梁单元分别采用link8和

收稿日期: 2023-09-05

作者简介: 翟锋(1991—),男,硕士,高级工程师,主要从事桥梁设计、咨询、科研方面的工作。

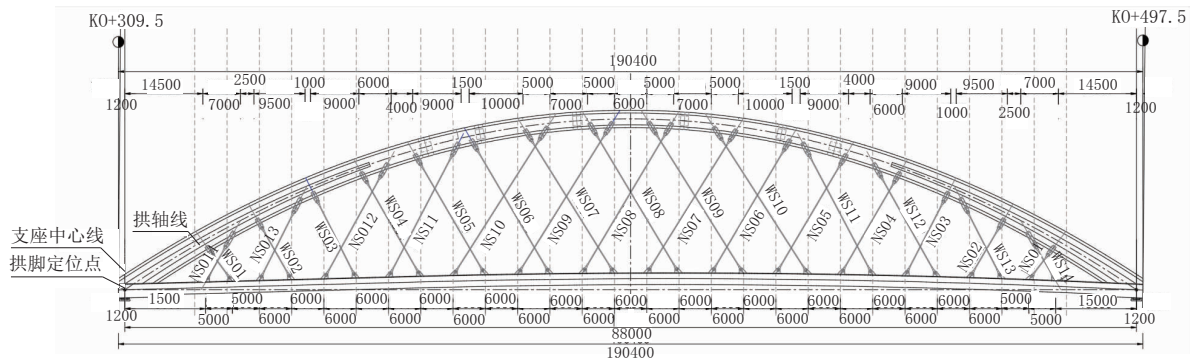


图 1 空间网状钢箱系杆拱桥立面图(单位:mm)

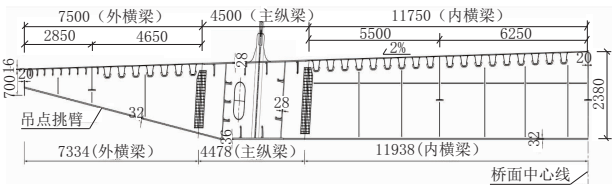


图 2 桥面系标准横断面(单位:mm)

beam4 单元模拟,吊杆上、下端与拱肋和主梁横梁采用共节点连接,桥面纵梁两端设置竖向固定约束,有限元模型如图 3 所示。

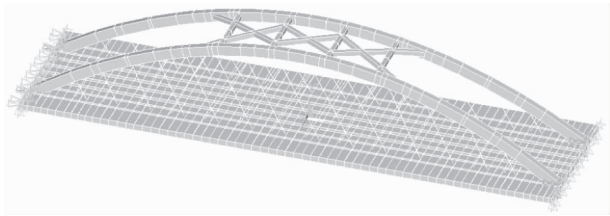


图 3 有限元模型

网状吊杆对称布置,依次编号为 WS01-14(左倾)、NS01-14(右倾),定义吊杆沿竖向向梁端方向倾斜为外倾,向跨中方向倾斜为内倾。

1.2 车辆模型及车桥耦合振动分析方法

车桥耦合振动分析的车辆模型采用 46 t 的五自由度双轴车辆<sup>[7]</sup>,模拟车辆行驶过程中的平动、沉浮以及点头振动。有限元模型中车辆质量系统采用 mass21 单元模拟,两级悬挂系统均采用 combin14 单元模拟,车体与悬架的连接采用 mpc184 单元进行模拟,车轮与桥面的连接则采用 conta175 与 targe169 单元形成接触对进行模拟,车辆的悬挂系统按文献[7]中的具体参数模拟。

车桥耦合振动分析时路面不平度序列按照路面平整度功率谱并使用随机序列生成方法生成。《车辆振动输入路面平整度表示方法》(GB7031—86)<sup>[8]</sup>使用式(1)表示路面不平度目标功率谱密度。

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left( \frac{n}{n_0} \right)^{-\omega} \tag{1}$$

式中: $G_d(n)$ 为不平度功率谱密度,A、B、C 级路面均

值分别取 16、64、128; $n$  为空间频率, $m^{-1}$ ; $n_0$  为参考空间频率,取  $0.1 m^{-1}$ ; $\omega$  为频率指数,取 2。

采用谐波叠加法生成 B 级路面不平度序列如图 4 所示,该随机序列的功率谱与目标谱的对比如图 5 所示,模拟功率谱和目标功率谱整体吻合度较好,证明了本文桥面不平度随机序列的合理性。

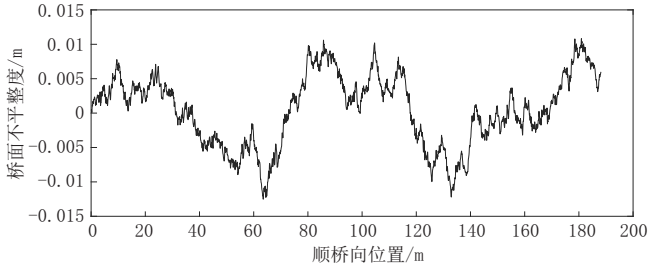


图 4 桥面不平度模型

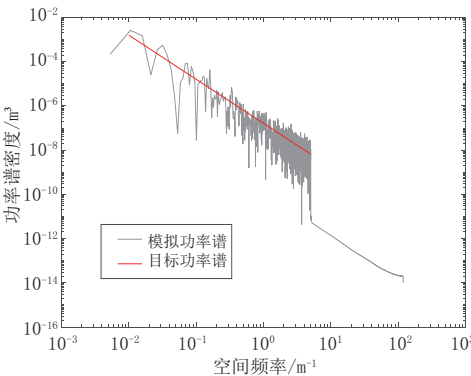


图 5 桥面不平度

假定车辆在行驶过程中车轮节点与桥面接触单元一直保持接触状态,且车辆沿顺桥向匀速行驶,由此可得车辆轮对与桥梁的位移协调关系式(2)和式(3)。

$$Y_{ii} - Y_{qi} = R_{bi} \tag{2}$$

$$X_{li} = X_{ii} + V_c T \tag{3}$$

式中: $Y_{ii}$  为车辆轮对行驶至任意位置时与桥面接触点竖向位移; $Y_{qi}$  为对应接触桥面位置处的竖向位移; $R_{bi}$  应为桥面不平度的样本值,若将桥面考虑为理想平顺桥面则取 0; $T$  为车辆行驶的时间; $V_c$  为车辆行驶速度; $X_{ii}$  为车辆第  $i$  轮对的初始位置; $X_{li}$  为

车辆行驶时间  $T$  后第  $i$  轮对所处位置。

### 1.3 双向倾斜吊杆锚固端的连接构造与车辆加载

考虑瞬态动力和疲劳分析模型不宜太过复杂,故本文采用空间杆系模型,吊杆端部与拱肋、主梁间的连接均简化为共节点,分布采用桁架单元和梁单元模拟吊杆。为研究吊杆应力及变形特性,主拱圈、吊杆均采用 beam4 单元模拟,这种模拟状态下其共节点未对锚固端空间自由度进行限制;主拱圈采用 beam4 单元模拟,吊杆采用 link8 单元进行模拟。由于桁架、梁单元的约束条件不同,必然使真实拱桥锚固端弯拉受力性能处于桁架、梁单元之间。

本文采用多车辆横向布置来模拟实际车辆行驶。车辆横桥向采用等间距布置,具体布置图如图 6 所示。

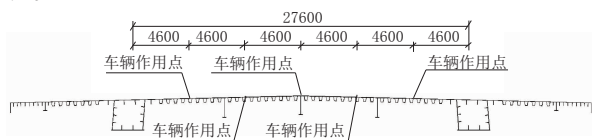


图 6 车辆作用点横向分布图(单位:mm)

在 ANSYS 网格模型中,5 辆车桥耦合的处理方式是将中间的纵梁同样分为 5 个小纵梁以保证车辆作用点与纵梁单位一致,将车辆作用在图 7 所示的作用点处,并分别将车辆与其所在处的纵梁单元进行耦合。此外,为了避免车辆早期启动的不平稳启动,本文在桥左右两端建立了长度为 14 m 的出入桥端延长道路,使车辆现在出入桥段达到平稳状态后再上桥,以达到模拟实际车桥状态的目的,在有限元模拟 5 辆车如图 7 所示。

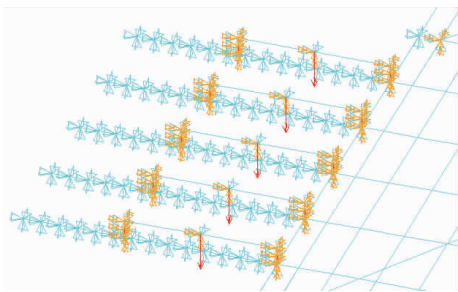


图 7 ANSYS 车辆分布图

### 1.4 吊杆等效应力的计算

吊杆索体由 27 根直径为 15.2 mm 的高强钢绞线组成,钢绞线在吊杆内呈六边形均匀排列,有效截面积  $0.004\ 31\text{ m}^2$ ,抗拉强度设计值  $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$ ,弹性模量  $E=1.95\times 10^5\text{ MPa}$ ,将钢绞线按面积相等的原则等效为图 8 所示的圆形截面。

为详细分析吊杆截面等效应力分布情况,根据吊杆体系所在桥梁结构中的实际位置,定义  $z$  轴为

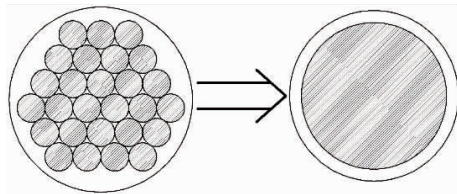


图 8 吊杆等效截面

两吊杆与横梁所处平面方向, $y$  轴为该平面的法向,吊杆的应力等效按梁单元进行模拟。

根据初等梁理论计算任意方向上吊杆等效应力  $\sigma_e$  的叠加通过式(4)进行。

$$\sigma_e = \frac{N}{A_e} \pm \frac{M_s + M_h}{I_y} y_{\max} \quad (4)$$

式中: $N$  为吊杆截面轴向应力; $A_e$  为吊杆截面面积; $M_s$  为吊杆截面  $y$  轴方向弯矩; $M_h$  为吊杆截面  $z$  轴方向弯矩; $I_y$  为吊杆等效后截面的截面惯性矩; $y_{\max}$  取吊杆等效截面半径。

## 2 不同模拟方式下吊杆杆端车致弯拉效应

### 2.1 不同吊杆锚固端应力对比

横桥向按前述的 5 辆 46 t 车辆进行加载,行车时速 60 km/h,桥面随机不平整度为 B 级,5 辆车同时沿 NS14 吊杆处驶入,WS14 吊杆处驶出。

计算发现,吊杆拉力沿桥梁跨中对称分布,轴力由梁端向跨中逐渐减小,但杆端弯矩由梁端向跨中逐渐增大,按式(4)合成各吊杆的弯曲应力和轴线应力如图 9 所示。

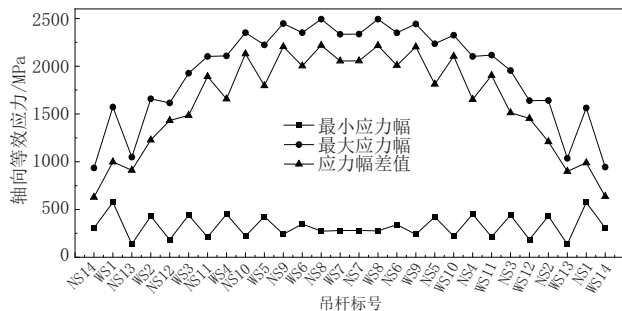


图 9 各吊杆等效应力

由图 9 可以看出,吊杆应力沿桥梁对称分布,其中梁端吊杆 WS01 与 NS01 应力较大,最大应力幅为 1 573.27、1 563.60 MPa,随着吊杆向跨中方向,应力峰值逐渐增大并逐渐达到最大值,跨中吊杆 WS07 与 NS07 应力趋于平稳,吊杆 NS08 与 WS08 为应力最大值吊杆,达到 2 492.61、2 492.90 MPa。吊杆应力峰值变化趋势为两端短吊杆较大,长吊杆向跨中逐渐变大,直至达到最大值且趋于平稳,且同区域等效应力外倾吊杆大于内倾吊杆。

为进一步研究吊杆杆端弯拉效应对吊杆应力的

影响,采用桁架单元(不考虑杆端弯拉效应)和梁单元(考虑杆端弯拉效应)不同方式进行模拟,按式

(4)短吊杆的弯曲应力和轴向应力进行合成,如图 10 所示。

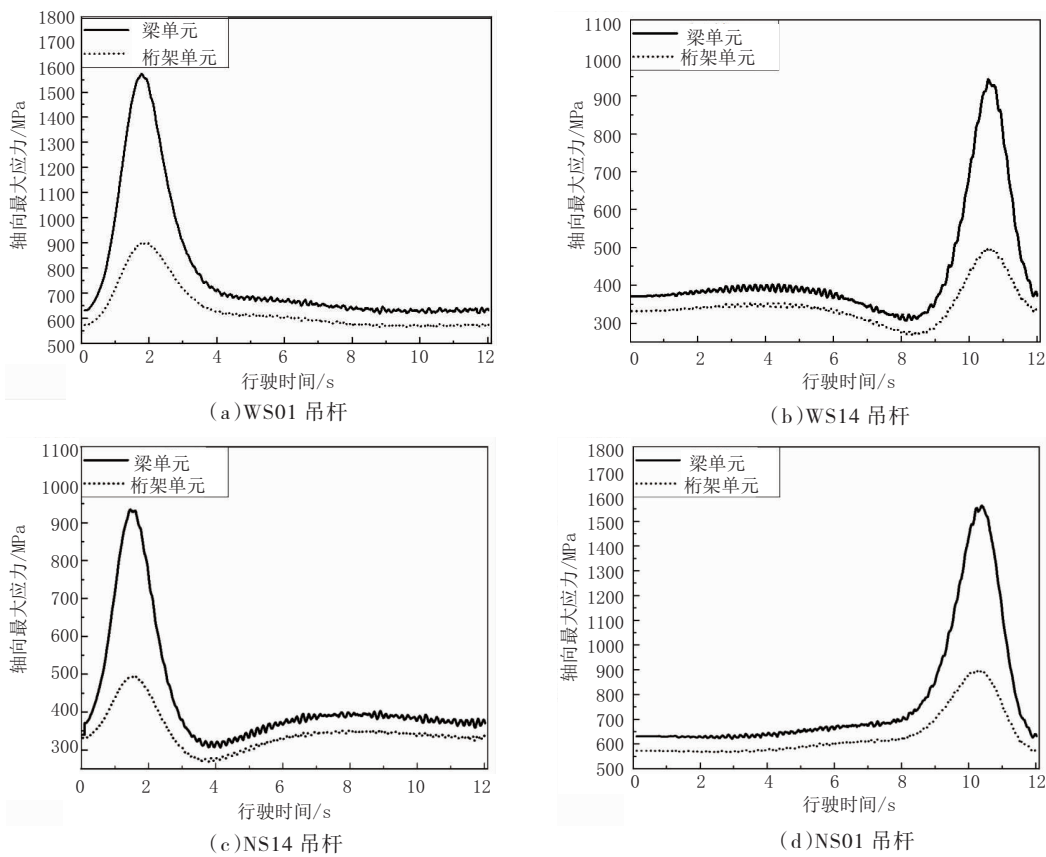


图 10 短吊杆锚固端等效应力 - 时间历程

考虑自重 + 二期、吊杆初始拉力。由表 1 可以看出,使用梁单元模拟,吊杆的弯 - 拉等效应力较桁架单元模拟显著增大。外倾吊杆整体等效应力高于内倾吊杆,主要因为吊杆与拱肋、主梁间构成三角空间分布,即同区域小角度三角形较大角度三角形空间分布更稳定。

| 表 1 不同模拟方式 吊杆杆端等效应力 |      |          |         | 单位:MPa      |
|---------------------|------|----------|---------|-------------|
| 倾向方向                | 吊杆名称 | 梁单元(1)   | 桁架单元(2) | 增大系数(1)/(2) |
| 外倾                  | WS01 | 1 573.27 | 672.94  | 2.34        |
|                     | NS01 | 1 563.6  | 666.05  | 2.35        |
| 内倾                  | NS14 | 934.79   | 439.93  | 2.12        |
|                     | WS14 | 943.68   | 446.69  | 2.11        |

2.2 吊杆锚固端转角位移分布

2.2.1 平面外转角位移需求

为研究双向倾斜吊杆锚固端转角变形在车辆荷载的影响,提取各吊杆锚固端在车辆激励下的平面外转角历程如图 11、图 12 所示。

对上图中各吊杆上下锚固端的平面外转角位移进行分析可知,桥梁在车辆荷载作用下,各吊杆的上、下锚固端均存在不同程度的转动。上、下锚

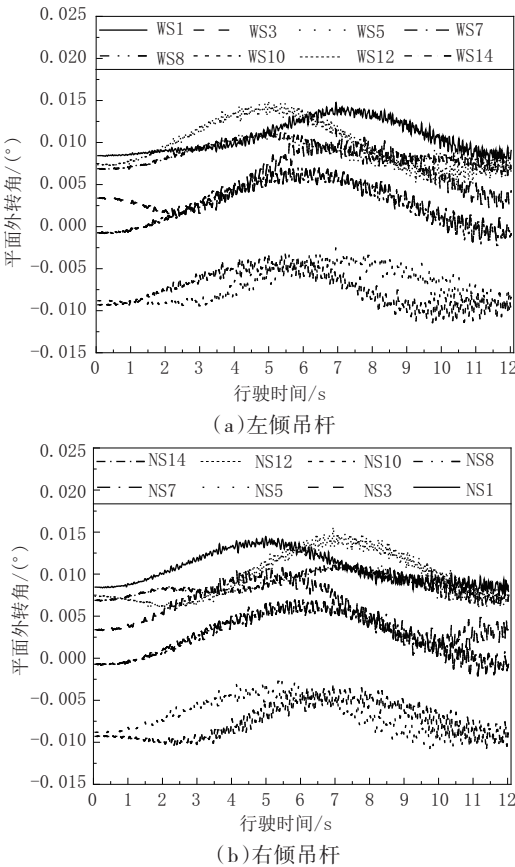


图 11 各吊杆上锚固端面外转角

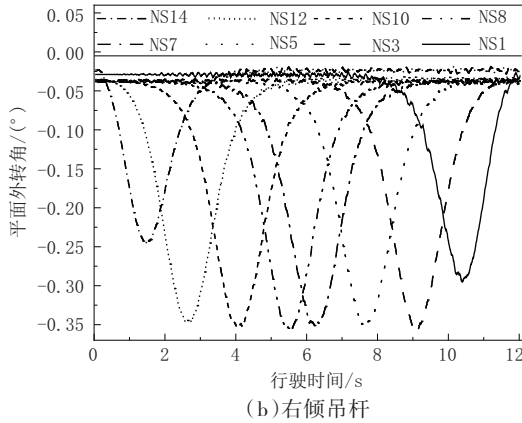
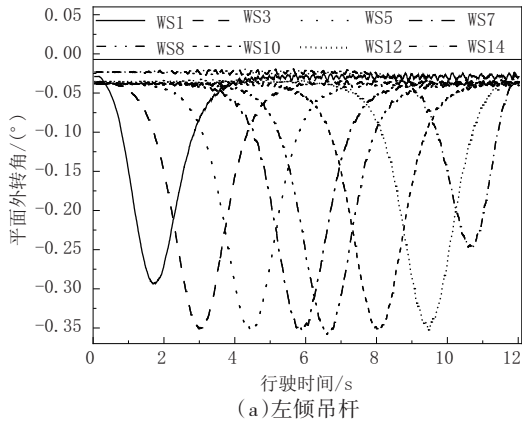


图 12 各吊杆下锚固端面外转角

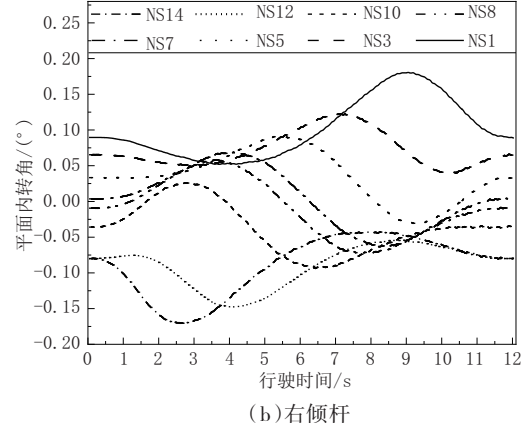
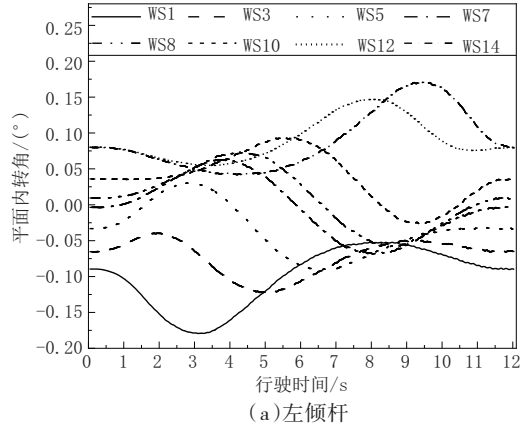


图 13 各吊杆上锚固端面内转角

固端转角沿桥梁对称分布,梁端区域吊杆上锚固端转角大于跨中区域,梁端区域吊杆下锚固端转角小于跨中区域。上锚固端面外转角变化区间为  $-1.14 \times 10^{-20} \sim 1.58 \times 10^{-20}$ ,明显小于下锚固端面外转角变化区间  $-3.62 \times 10^{-10} \sim -1.75 \times 10^{-20}$ 。

### 2.2.2 平面内转角位移需求

提取各吊杆锚固端在车辆激励下的平面内转角历程如图 13、图 14 所示。

对上图中各吊杆上下锚固端的转角位移进行分析可知,桥梁在车辆荷载作用下,各吊杆的上、下锚固端均存在不同程度的转动。各吊杆上、下锚固端面内转角受车辆荷载作用的影响均较大,且变化趋势相似,都是随着车辆入桥,转角变化先沿负方向增加,直到跨中,转角变化趋近于 0,而随车辆继续行驶,转角变化转向沿正方向增加。上锚固端最大转角为  $0.181^\circ$ ,下锚固端最大转角为  $0.308^\circ$ ,转角最大值均出现在梁端区域位置(NS14、WS01、NS01、WS14)。

## 3 吊杆锚固连接构造的弯拉疲劳特性分析

### 3.1 吊杆锚固连接构造应力最不利处累计损伤度

为研究不同长度斜吊杆的疲劳断裂易损性,找到最易发生疲劳断裂的吊杆,运用 MATLAB 编制雨

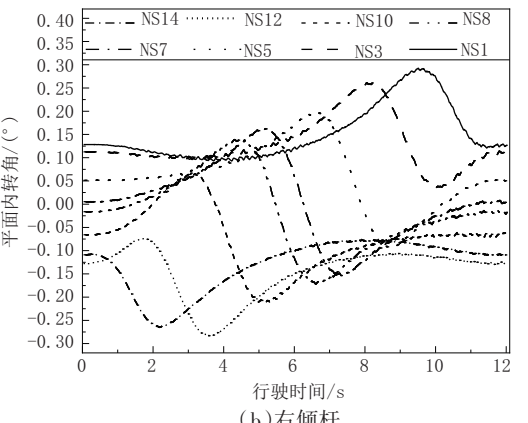
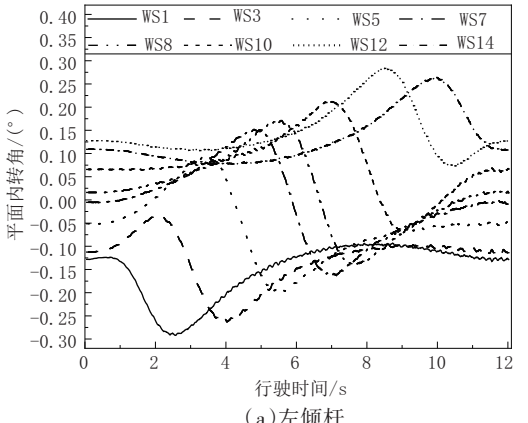
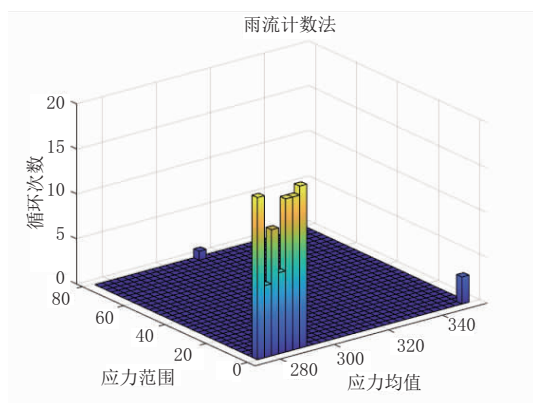


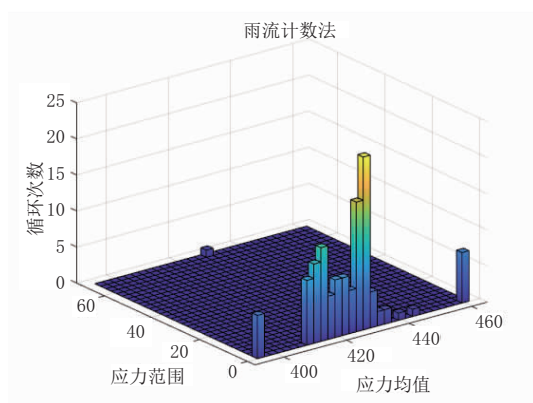
图 14 各吊杆下锚固端面内转角

流计数程序<sup>[9]</sup>,对单次车辆通过桥梁时各吊杆的应力-时程曲线进行处理,同时考虑各吊杆的恒载应力。选

取 5 辆布载时不同倾斜方向的典型吊杆(NS11、WS05)有效应力循环历程及应力平均水平,如图 15 和图 16 所示。

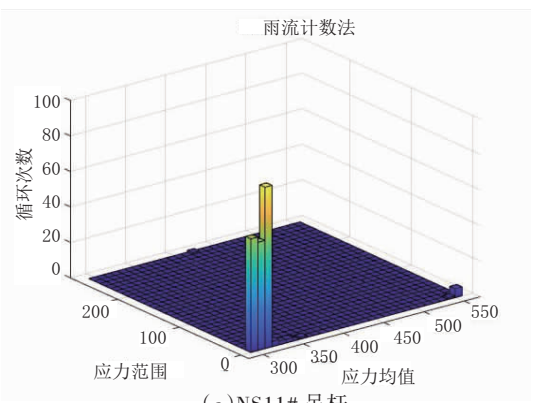


(a)NS11# 吊杆

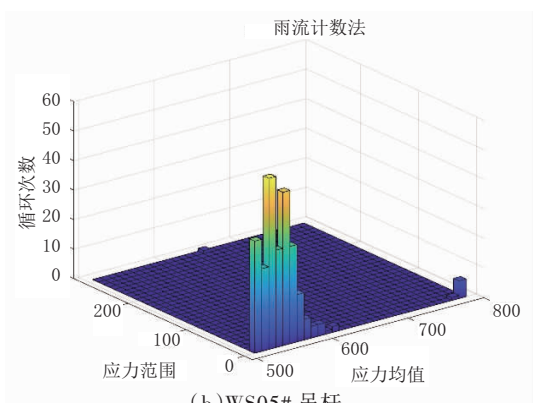


(b)WS05# 吊杆

图 15 桁架单元模拟吊杆应力循环雨流矩阵



(a)NS11# 吊杆



(b)WS05# 吊杆

图 16 梁单元模拟吊杆应力循环雨流矩阵

从图中可以看出,采用梁单元模拟吊杆时,在弯-拉效应的影响下,吊杆疲劳应力幅值和平均应力水平较桁架单元有所升高,并且吊杆的应力幅分布更为广泛,在高应力幅和平均应力较高的区间的分布增多,吊杆的疲劳应力幅范围越大,吊杆所处的平均应力水平越高,越容易致使其产生疲劳损伤。

根据 Palmgren-Miner 线性疲劳累计损伤理论<sup>[10]</sup>计算各斜吊杆的疲劳损伤度。根据文献修正后的等效应力幅计算公式(5)计算各吊杆的等效应力幅,得到的等效应力幅可以作为常幅循环荷载,继而采用马林等测量的国产低松弛 1 860 钢绞线<sup>[11]</sup>S-N 曲线计算吊杆疲劳破坏所需循环次数,如式(6)所示,最后由线性疲劳累计损伤理论公式(7),求出分别由桁架单元和梁单元模拟下各吊杆的疲劳损伤度,如图 17 所示。

$$\Delta\sigma_{eq} = \left[ \frac{\sum n_i \left( \frac{\sigma_b \sigma_{ai}}{\sigma_b - \sigma_{ci}} \right)^m}{n} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (5)$$

式中: $\Delta\sigma_{eq}$ 为考虑平均应力水平下的等效应力幅; $\sigma_b$ 为吊杆内部钢绞线强度极限; $\sigma_{ai}$ 为雨流矩阵中某一级应力幅; $\sigma_{ci}$ 为同级应力幅所对应的平均应力水平; $n_i$ 为某一应力幅的循环次数; $n$ 为吊杆应力谱中变幅荷载循环总次数  $\sigma_{eq}$

$$\log N_{eq} = \log C - m \log \sigma_{eq} \quad (6)$$

式中: $N_{eq}$ 为等效应力幅下吊杆疲劳破坏所需循环次数;参数  $m$  取 3.5,  $C$  取 13.84。

$$D = \frac{\sum n_i}{\sum N_i} = \frac{n}{N_{eq}} \quad (7)$$

式中: $n_i$ 为某一应力幅的循环次数; $N_i$ 为同级应力幅作用下吊杆疲劳破坏所需次数。

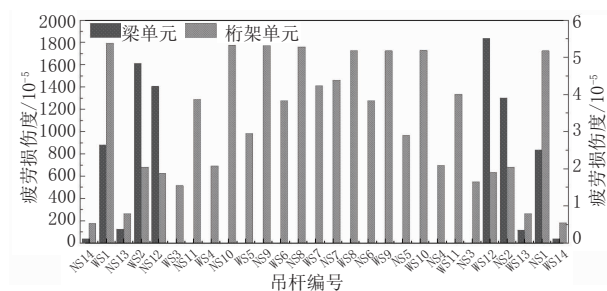


图 17 两种模拟下各吊杆疲劳损伤度

由图 17 可以看出,两种单元模拟下各吊杆的疲劳损伤度沿桥梁对称分布;采用桁架单元模拟时,在跨中区域内倾吊杆的疲劳损伤度较外倾吊杆更大。相比于桁架单元,采用梁单元模拟时,弯-拉效应作用对不同倾斜方向 and 不同长度吊杆的疲劳损伤度大幅上升,且向跨中方向,各吊杆的损伤度逐渐变大。

综合梁单元和桁架单元模拟结果,可以看出 NS10#~NS08# 和 WS08#~WS10# 吊杆的疲劳损伤度处于较高水平,在长期车桥耦合振动产生的交变应力下可能导致这些吊杆先于其他吊杆发生疲劳断裂,其中 WS08# 吊杆的疲劳损伤度最高,梁单元模拟下为  $3.03 \times 10^{-5}$ 。

### 3.2 倾斜吊杆锚固连接构造优化方案

由于吊杆销轴允许吊杆在平面内产生转动,故本文主要研究平面外转角的锚固构造优化。由第 2.2 节可知,平面外最大转角出现在吊杆下锚固端,最大转角为  $0.362^\circ$ 。

系杆拱桥梁上锚固端转角由梁上的耳板转动带动销轴转动产生,因此面外转角会引起吊杆下叉耳组件和梁端耳板间相互挤压,从而造成耳板或吊杆的损坏。为避免这种情况,计算平面外转角引起的吊杆下锚固端叉耳在梁上耳板顶部的横向移动距离  $x$ :

$$x = H \sin \theta \quad (8)$$

吊杆发生面外转动,锚固连接处将可能会有两种变形模式:一是梁上耳板转动,销轴和吊杆不产生转动;二是梁上耳板和销轴产生转动,吊杆不动。转动中心均为梁上耳板中心线与主梁顶板线交点,如图 18 所示。

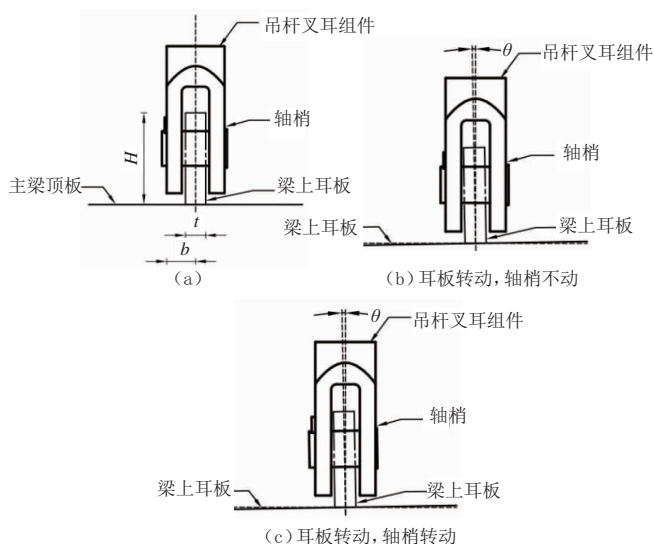


图 18 吊杆锚固端不同转角模式示意图

由第一种变形模式可得出梁上耳板孔直径的变化量为:

$$\Delta h_1 = t \times \sin \theta \quad (9)$$

由第二种变形模式可得出吊杆下锚固端叉耳组件孔直径的变化量为:

$$\Delta h_2 = t \times \sin \theta \quad (10)$$

则梁上耳板孔和吊杆下端叉耳组件孔的最小直

径分别为:

$$d_1 = d + \Delta h_1 \quad (11)$$

$$d_2 = d + \Delta h_2 \quad (12)$$

式中:  $H$  为主梁顶板至梁上耳板顶的距离;  $\theta$  为吊杆面外最大转角位移;  $t$  为梁上耳板宽度;  $b$  为吊杆下叉耳边缘到转动中心的距离;  $d$  为耳板孔的直径。

将 2.2 节计算的平面外转角带入上式可得到梁上耳板顶部横向位移及耳板孔、吊杆下端叉耳组件孔的最小直径。GJ15-27 拉索和 GJ15-31 拉索的梁上耳板顶部横向位移达到 6.76 mm, 超出常规叉耳与耳板间隙 5 mm。对于 GJ15-27 拉索,  $\Delta h_1 = 0.72$  mm,  $\Delta h_2 = 1.11$  mm, 对于 GJ15-31 拉索,  $\Delta h_1 = 0.79$  mm,  $\Delta h_2 = 1.26$  mm。因此建议吊杆下锚固端叉耳与耳板间隙不小于 7 mm, 梁上耳板孔的最小直径需增加 1.0 mm, 吊杆下端叉耳组件孔的最小直径需增加 1.5 mm。

## 4 结 论

以某 1-188 m 跨下承式空间网状钢箱系杆拱桥为依托工程, 分别采用桁架、梁单元模拟桥梁吊杆, 研究了车致振动对吊杆受力的影响, 重点分析了车致弯-拉效应下吊杆杆端的应力分布及上下锚固端转角变形, 进一步研究了各吊杆锚固连接构造的弯-拉疲劳损伤度, 得到结论如下。

(1) 各吊杆应力值沿桥梁跨中对称分布, 吊杆等效应力变化趋势: 梁端短吊杆等效应力较大, 跨中长吊杆等效应力达到最大, 且同区域向梁端方向倾斜的吊杆等效应力整体高于向跨中方向倾斜的吊杆, 主要因为吊杆与拱肋、主梁间构成三角形, 同区域小角度三角形较大角度三角形应力更为均匀。使用梁单元模拟, 吊杆的弯-拉等效应力较桁架单元模拟显著增大。因此在车辆荷载作用下, 梁端区域短吊杆及跨中长吊杆更易被破坏。

(2) 桥梁在车辆荷载作用下, 各吊杆的上、下锚固端均存在不同程度的平面外转动, 转角变形沿桥梁对称分布, 梁端区域吊杆上锚固端转角大于跨中区域, 梁端区域吊杆下锚固端转角小于跨中区域, 且吊杆下锚固端平面外转角明显大于吊杆上锚固端, 平均约为 2.3 倍。

(3) 吊杆下锚固端面外转角会引起吊杆下叉耳组件和梁端耳板间相互挤压, 从而造成耳板或吊杆的损坏。为适应面外转角变形, 对于 GJ15-27 和 GJ15-31 拉索, 建议吊杆下锚固端叉耳与耳板间隙不小于 7 mm, 梁上耳板孔的最小直径需增加 1.0 mm,

吊杆下端叉耳组件孔的最小直径需增加 1.5 mm。

(4)桥梁在车辆荷载作用下,各吊杆的上、下锚固端均存在不同程度的平面内转动,转角变形沿桥梁对称分布。各吊杆上、下锚固端面内转角受车辆荷载作用影响均较大,且变化趋势相似,都是随着车辆入桥,转角变化先沿负方向增加,直到跨中,转角变化趋近于 0,而随车辆继续行驶,转角变化转向沿正方向增加。上锚固端最大转角为  $0.181^{\circ}$ ,下锚固端最大转角为  $0.308^{\circ}$ ,转角最大值均出现在梁端区域位置,由于吊杆杆端连接销轴布置方向为横桥向,故平面内可以自由转动变形。

(5)各吊杆的疲劳损伤度沿桥梁对称分布;桁架单元模拟时,在跨中区域内倾吊杆的疲劳损伤度较外倾吊杆更大。相比于桁架单元,采用梁单元模拟时,弯-拉效应作用对不同倾斜方向和不同长度吊杆的疲劳损伤度大幅上升,且向跨中方向,各吊杆的损伤度逐渐变大。综合梁单元和桁架单元模拟结果,可以看出跨中区域吊杆的疲劳损伤度处于较高水平,在长期车桥耦合振动产生的交变应力下可能导致这些吊杆先于其他吊杆发生疲劳断裂,设计时需

特别注意。

#### 参考文献:

- [1] 阳发金.大跨度钢拱桥吊杆体系研究[J].建筑技术开发,2020,47(19):98-99.
- [2] 宋晓东,熊佳,杨超.主跨 160 m 铁路网状体系拱桥设计参数影响研究[J/OL].铁道标准设计:1-7.
- [3] 殷礼灿.基于递归量化分析的车桥耦合振动信号非平稳性研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.
- [4] 顾超.宿迁市北京路京杭运河网状吊杆拱桥设计[J].城市道桥与防洪,2022(11):74-76.
- [5] 张开银,杨杰.桥梁短吊杆动力响应分析与重设计[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2017,41(6):934-937.
- [6] 贺焯博.考虑车桥耦合振动的中承式拱桥短吊杆腐蚀疲劳特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.
- [7] 姚志强,阮小平,邓清.拱桥吊杆变形差异引发桥面断裂及类似事故的预防措施[J].公路,2002(7):73-75.
- [8] GB7031—86,车辆振动输入路面平度表示方法[S].
- [9] 赵亚敏.超载运输对钢筋混凝土桥梁疲劳性能的影响研究[D].武汉:中南大学,2007.
- [10] 范宇航.考虑湍流参数不确定性的桥梁抖振疲劳分析[D].成都:西南交通大学,2020.
- [11] 马林.国产 1860 级低松弛预应力钢绞线疲劳性能研究[J].铁道标准设计,2000,20(5):21-23.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: [cdq@smcdi.com](mailto:cdq@smcdi.com)