DOI:10.11918/202505017

大跨度悬索桥吊索连接件叉形耳板磨损对其疲劳寿命的影响

王小鹏[1,2],周勇军[1],侯培源[1],李 毅[1,3],刘一力[4],王 博[4]

(1.长安大学 公路学院,西安 710064;2.陕西铁路工程职业技术学院,陕西 渭南 714000;
3.广东省公路建设有限公司湾区特大桥养护技术中心,广州 510635;
4.长安大学 工程机械学院,西安 710064)

摘 要:为探索吊索连接件磨损产生机理,量化叉形耳板的磨损深度,评估磨损对其疲劳寿命的影响,首先,通过现场调研与磨屑检测,确定磨损损伤部位,明确磨损产生机理;然后,基于实际车流数据与GNSS监测数据分析吊索索力和吊索连接件的纵向相对角度;最后,应用Archard模型量化叉形耳板的磨损深度,并对其进行疲劳寿命评估。结果表明:吊索连接件褐红色磨屑的主要成分是Fe_2O_3,主要来源于叉形耳板与箱梁耳板之间的磨损,未检测到关节轴承的磨屑,吊索退扭和缆梁相对运动是造成耳板磨损的根本原因;吊索连接件纵桥向相对转角主要位于-3°~3°之间,且符合高斯分布;该桥运营5 a后,叉形耳板磨损深度约为0.207 mm,磨损深度随着时间的增长不断增大,但增长速度不断减小;运营5、10、15、20、25、30 a后,吊索连接件叉形耳板疲劳寿命分别损失了7.59%、13.08%、18.89%、23.75%、28.54%、33.23%。吊索钢丝的退扭和耳板间的磨损都会降低叉形耳板的疲劳寿命,在设计吊索连接件时应予以充分考虑。

关键词:桥梁工程;悬索桥;吊索连接件;疲劳寿命;退扭效应;磨损深度

中图分类号:U448 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)07-0109-11

Effect of wear on fatigue life of fork-ear plate in hanger connectors of long-span suspension bridges

Wang Xiaopeng[1,2], Zhou Yongjun[1], Hou Peiyuan[1], Li Yi[1,3], Liu Yili[4], Wang Bo[4]

(1. School of Highway, Chang′an University, Xi′an 710064, China; 2. Shaanxi Railway institute, Weinan 714000, Shaanxi, China; 3. Bay Area Super Major Bridge Maintenance Technology Center of Guangdong Highway Construction Co., Ltd., Guangzhou 510635, China;
4. School of Construction Machinery, Chang′an University, Xi′an 710064, China)

Abstract: To investigate the wear mechanism of hanger connectors, quantify the wear depth of the fork-ear plate, and evaluate its impact on fatigue life, this study first identified wear damage locations and clarified the wear mechanism through field investigations and wear debris analysis. Based on actual traffic data and GNSS monitoring data, the hanger cable force and the longitudinal relative angle of the connectors were analyzed. The Archard model was then applied to quantify the wear depth of the fork-ear plate, followed by fatigue life assessment. The results indicate that the brown-red wear debris from hanger connectors primarily consists of Fe_2O_3, originating from wear between the fork-ear plate and the box-girder ear plate, with no wear debris from the spherical bearing detected. Hanger back-twist and cable-girder relative motion are the root causes of plate wear. The relative longitudinal rotation angle of hanger connectors predominantly ranges between -3° and 3°, following a Gaussian distribution. After 5 years of service, the wear depth of the fork-ear plates reaches approximately 0.207 mm, exhibiting progressive growth over time but with a decelerating rate. The fatigue life loss of the fork-ear plate after 5, 10, 15, 20, 25, and 30 years of operation is 7.59%, 13.08%, 18.89%, 23.75%, 28.54%, and 33.23%, respectively. Both hanger back-twist and wear between plates significantly reduce the fatigue life of the fork-ear plate, necessitating comprehensive consideration in the design of hanger connectors.

Keywords: bridge engineering; suspension bridge; hanger connector; fatigue life; back-twist effect; wear depth

收稿日期:2025-05-09;**录用日期**:2025-07-25;**网络首发日期**:2025-08-11
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250811.1412.014
基金项目:广东省交通集团科技项目(JT2021YB15)
作者简介:王小鹏(1989—),男,博士研究生;周勇军(1978—),男,教授,博士生导师
通信作者:周勇军,zyj@chd.edu.cn

在大跨度悬索桥中,吊索连接件是连接吊索与加劲梁的关键部件,其安全可靠性对桥梁的运营至关重要。为了减小吊索的弯折应力,江阴大桥等大跨度悬索桥吊索连接件采用了普通销轴式连接件,这种连接件在运营中容易引起销轴和销轴衬垫的磨损[1-2]。鉴于此,规范[3]建议在大跨度悬索桥短吊索区多采用带关节轴承的销轴式连接件。改进后的吊索连接件用自润滑关节轴承代替了销轴衬垫,使滑动磨损只能发生在关节轴承内圈与 PTFE 编织物之间,防止了销轴磨损。同时关节轴承具有球铰的功能,不仅可以适应箱梁纵向摆动时吊索与箱梁之间的转角,还可以适应箱梁横向摆动时吊索与箱梁之间的转角,更好的适应桥梁的变形。但在运营中发现了叉形耳板与箱梁耳板间的磨损现象。

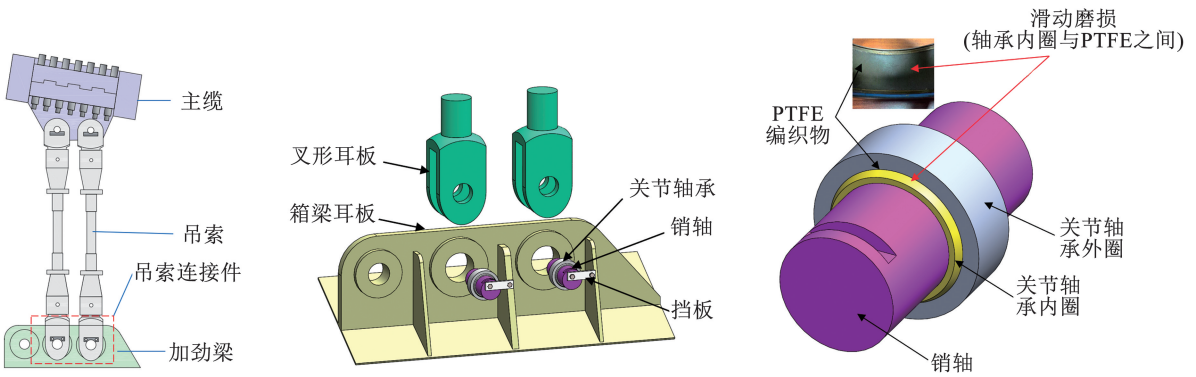
针对大跨度桥梁学者们对斜拉桥[4]、拱桥[5]和悬索桥[6-7]的索梁连接件节点进行了传力机理和足尺模型试验研究,验证了连接件结构的安全可靠性,获得了较为理想的索梁连接结构。颜东煌等[8]结合有限元模拟与实桥实测结果确定了销轴式连接件耳板上接触应力大小和分布。为了探究销轴式连接件的破坏形式,陈志华等[9]和王仲衡等[10]对其进行了破坏性试验,研究了耳板关键尺寸对耳板破坏形式和承载力的影响。由于桥梁索梁连接件结构存在应力集中,学者们分别以斜拉桥[11]、拱桥[12]和悬索桥[13-14]索梁连接件为研究对象,系统开展了试验模型设计、疲劳荷载幅值确定及力学特性分析,验证了其在设计寿命期和极限寿命期的疲劳安全性。以上研究主要聚焦于连接件的传力机理、接触状态以及疲劳性能,没有考虑磨损对其疲劳寿命的影响。

目前大跨度桥梁的磨损研究主要聚焦于吊索钢丝间的微动磨损[15-16],而对吊索连接件之间的磨损以及磨损对其疲劳性能的影响的相关研究很少见。本文以某大跨度悬索桥吊索连接件为研究对象,首先调查分析吊索连接件磨损产生的机理,基于实际车流数据计算吊索索力时程,然后利用 Archard 模型分析吊索连接件耳板磨损深度,最后研究连接件耳板磨损对其疲劳寿命的影响。其研究方法可以适用于其他带关节轴承吊索连接件的桥梁,研究结论可为其他桥梁的前期设计与后期养护提供参考。

1 吊索连接件病害产生机理

1.1 病害调查分析

下面基于某大跨悬索桥定期检查结果,结合现场调研情况,着重分析吊索连接件病害,该桥采用吊索连接件构造如图 1 所示。该桥跨径布置为 360 m + 1 200 m + 480 m,矢跨比为 1∶9.5,如图 2 所示。主缆由 169 股组成,横桥向中心间距为 42.1 m;加劲梁采用钢箱梁,全宽 44.7 m,梁高为 4.0 m;吊索顺桥向标准间距为 12.8 m,短吊索连接件采用带关节轴承的销轴式连接件;索塔采用门式索塔,共设上下两道横梁。



(a) 连接件位置 (b) 连接件组成 (c) 磨损位置

图 1 吊索连接件构造

Fig. 1 Structure of the hanger connector

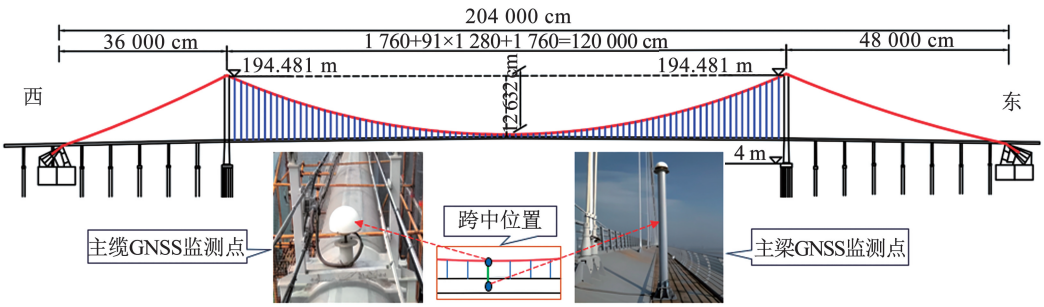


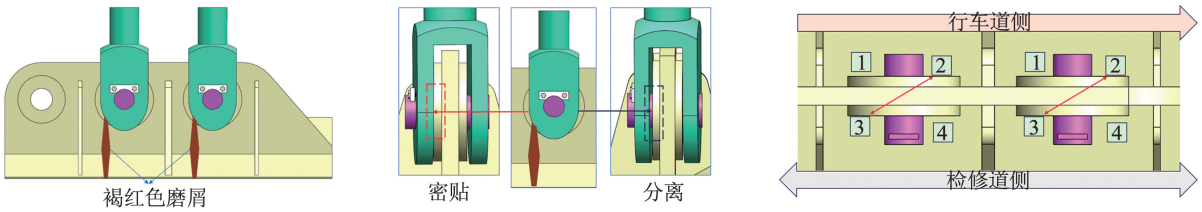
图 2 桥梁总体布置

Fig. 2 General layout of the suspension bridge

1.1.1　病害类型与外观检查分析

通过现场调研，发现吊索连接件叉形耳板与箱梁耳板之间发生了磨损腐蚀病害，伴随有褐红色磨屑流出，如图 3 所示。整个病害发生在短吊索区域，长吊索区域无此病害。长吊索采用普通销轴式连接件，即不带关节轴承的销轴式连接件，而短吊索采用带关节轴承的销轴式连接件，初步推断这种病害的形成与关节轴承有关。

通过观察损伤情况，发现所有短吊索连接件病害情况相似，具有以下特点：1）靠近行车道侧，不管是向东还是向西行车，都是 1 号点处叉形耳板与箱梁耳板分离、无磨损；2 号点处两者密贴、磨损。2）靠近检修道侧，3 号点处两者密贴、磨损，4 号点处两者分离、无磨损；3）吊索下端连接件接触情况正好与吊索上端叉形耳板与索夹耳板接触情况相反。根据以上病害特征，初步推断吊索连接件受到了一个扭转力矩作用，使吊索下端叉形耳板向左旋转，吊索上端叉形耳板向右旋转。



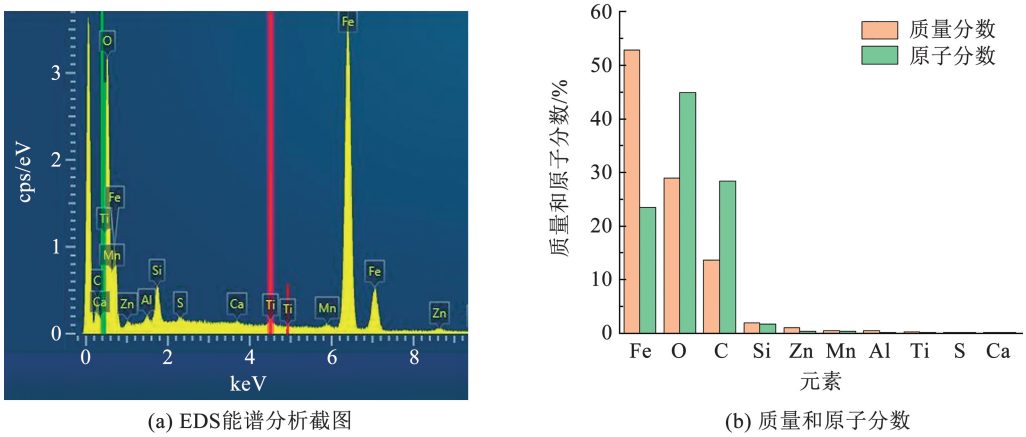
(a) 磨损立面　　(b) 磨损侧面　　(c) 磨损平面

图 3　病害特征

Fig. 3　Disease features

1.1.2　磨屑成分检测分析

在吊索连接件中叉形耳板采用 45 号钢，箱梁耳板采用 Q345qD，关节轴承内外圈采用 4Cr13。关节轴承 PTFE 编织物衬垫主要由 PTFE 纤维、增强纤维和树脂组成，PTFE 主要由 C 和 F 两种元素组成，树脂材料主要由 C、H、O 等元素组成，部分树脂还含有 N 或 Si。为了获得磨屑的主要组成成分，在实桥上采集了褐红色磨屑，采用钨灯丝扫描电子显微镜对其进行成分检测，结果如图 4 所示。



(a) EDS能谱分析截图　　(b) 质量和原子分数

图 4　磨屑化验

Fig. 4　Wear debris analysis

将磨损部位元素组成与磨屑化验结果进行对比，可以得到以下结论：1）元素质量分数中 Fe 含量最高，元素原子分数中 O 含量最高，初步判定该磨屑主要成分是铁的氧化物。在常温下铁的氧化物主要是红棕色 Fe_2O_3 和黑色 Fe_3O_4。根据磨屑颜色及元素含量占比，初步推断该磨屑主要成分为 Fe_2O_3。2）在化验结果中含有 Al、Ti、S 元素，其 Al 与 Ti 元素最大可能来源于 Q345qD，而 S 元素最大可能来源于 45 号钢，初步判定 Q345qD 与 45 号钢在磨损中都会发生损伤。3）在化验结果中未检测到 F 元素，即未检测到 PTFE，初步判定关节轴承衬垫的磨损很小。

1.2　病害产生机理

通过上述病害调查分析发现：该病害的形成与关节轴承有关，并且吊索连接件受到扭转力矩作用。该扭矩可能来源外部荷载作用，也可能来源于吊索钢丝退扭。为了确定属于那种情况，调研了一座具有相同吊索连接件构造的悬索桥，发现在施工期间已经存在耳板的密贴情况，故推断这种密贴情况由吊索钢丝退扭造成。针对耳板间的磨损现象，现役桥梁由于耳板间空间狭小，很难安装其他装置，建议

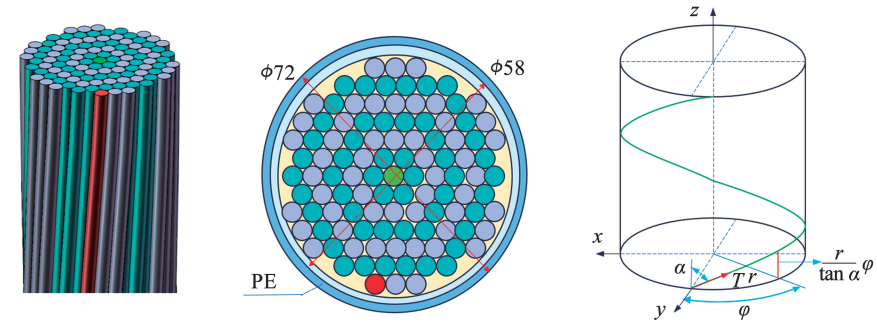
在后续设计吊索连接件时,在叉形耳板侧增设可更换、防磨损的聚四氟乙烯保护层装置。

1.2.1　吊索钢丝退扭扭矩

该桥吊索采用平行钢丝索股,外包 7 mm 厚双层 PE,吊索采用直径为 5.0 mm 的高强钢丝,每根吊索含 109 根钢丝,如图 5 所示。在制造悬索桥吊索时,需将排列好的平行钢丝同心向左扭绞,最外层钢丝的扭绞角为 3° ±0.5°。由于吊索扭绞工艺,在张拉吊索时会产生较大的退扭扭矩,扭绞后的钢丝呈螺旋状,螺旋线参数方程[17]为

$$x = -r\sin\varphi, y = r\cos\varphi, z = r\cdot\varphi/\tan\alpha \quad (1)$$

式中:r 为缠卷半径,φ 为螺旋线旋转角度,α 为该钢丝的扭绞角。



(a) 钢丝的立面组成　(b) 钢丝的平面组成　(c) 螺旋钢丝的几何关系

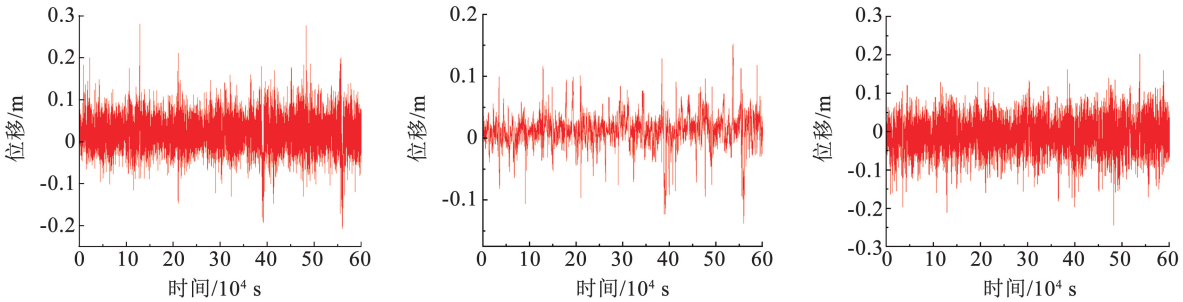
图 5　钢丝的组成与几何关系

Fig. 5　Steel wire composition and geometric relationship

根据螺旋钢丝几何关系,每根钢丝拉力 T 会在拉索横截面上会产生切向分力 $T\sin\alpha$。每根钢丝的切向分力乘以距吊索截面中心的距离可以合成退扭扭矩。本文选取最外层钢丝扭绞角为 3.5°,分别计算每层钢丝扭绞角大小。同时选取跨中短吊索在实际交通荷载作用下的最大索力值(1 069.1 kN),具体计算见 2.2 节,计算所得吊索连接件承受的退扭扭矩为 993.5 kN · mm。

1.2.2　缆-梁相对运动

该桥在跨中主缆和主梁上均设置了 GNSS (global navigation satellite system)数据采集点,用于监测主缆和主梁的位移,其动态测量水平精度为 $(10\ \text{mm} + 1\times10^{-6}D)$ RMS,其中 D 为测量距离。选取了 7 d 有效监测数据,统计了主缆和主梁的纵向位移,并计算了两者之间的相对位移,如图 6 所示。从图 6 中可以看到,主缆的纵向位移在 -208 ~ 280 mm之间,平均 21.9 mm;主梁的纵向位移在 -134 ~ 152 mm 之间,平均 12.6 mm;缆-梁相对位移在 -24 ~ 20 mm 之间,平均 9 mm。两者之间的相对位移必然引起吊索连接件的相对转动,这种相对转动是造成吊索连接件磨损的必要条件。



(a) 主缆纵向位移　(b) 主梁纵向位移　(c) 缆-梁纵向相对位移

图 6　缆-梁纵向相对位移

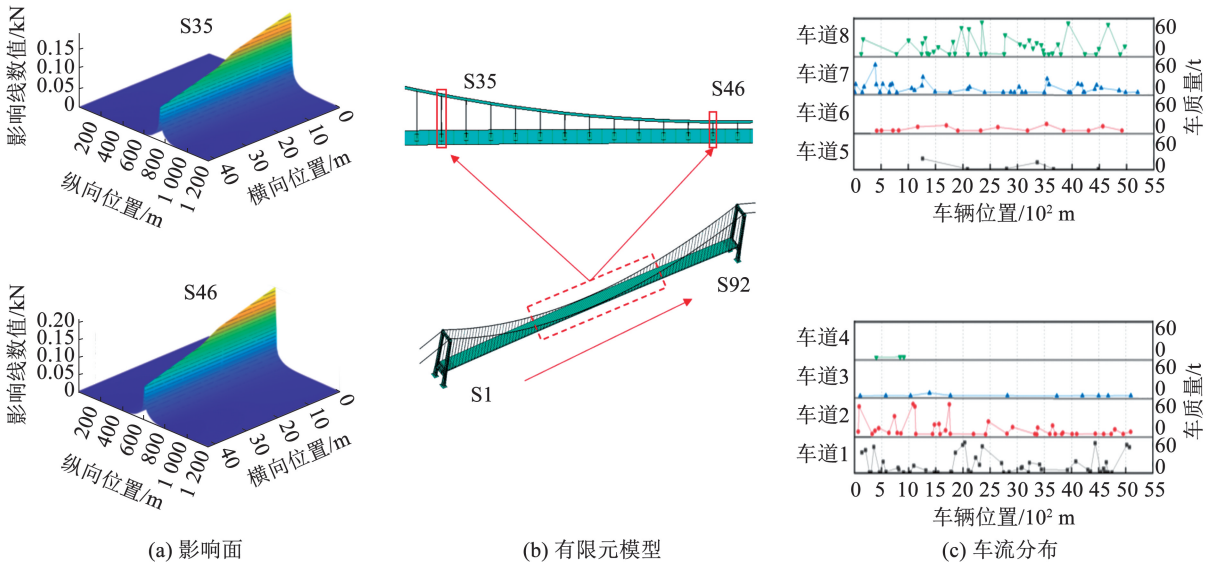
Fig. 6　Longitudinal relative displacement between cable and girder

2　基于实际交通荷载的吊索索力分析

2.1　车流统计与模型建立

基于该桥安装的动态称重系统,选取一周车流作为实际交通荷载,共计 799 229 辆车。图 7 仅列出了 5 min 形成的大小为 8 × 5 253 m 的车队。由于吊索索力影响线长度较长,车辆加载时可忽略车轴布局的影响,仅考虑车重和总轴距。为了获得吊索

索力，利用 ANSYS 对该桥进行有限元模拟，主梁采用鱼刺梁模拟，吊索和主缆均采用索单元模拟，主塔采用梁单元模拟，主梁与主塔之间采用弹性连接，主塔与主缆之间采用刚性连接。为了验证有限元模型的正确性，对其进行模态分析，如表 1 所示。由表可知相对误差均在 5% 以内，验证了有限元模型的有效性。按照实际车道提取 S35 号长吊索和跨中 S46 号短吊索的索力影响面，为计算索力奠定基础。



(a) 影响面　　(b) 有限元模型　　(c) 车流分布

图 7　车桥计算模型

Fig. 7　Vehicle-bridge analysis model

表 1　桥梁频率对比

Tab. 1　Comparison of bridge frequencies

阶次	桥梁频率/Hz		相对误差/%	振型特征
	有限元	现场测试		
1	0.068	0.070	2.86	主梁一阶对称横弯
2	0.138	0.136	1.47	主梁一阶对称竖弯
3	0.186	0.185	0.54	主梁二阶对称竖弯
4	0.218	0.217	0.46	主梁二阶反对称竖弯

2.2　吊索索力计算

为了获得实际车流作用下吊索索力，采用 MATLAB 编写了实际交通荷载作用下吊索索力计算程序，其计算流程如图 8 所示。车队每前进 1 m 计算一次吊索索力，选用 7 d 的实际交通荷载计算吊索索力历程，计算结果如图 9 所示。S46 号短吊索最大索力为 1 069.1 kN，S35 号长吊索最大索力为 1 053.6 kN，S46 号短吊索最大索力大于 S35 号长吊索最大索力，这与影响线峰值的结果相一致。由于跨中短吊索所受索力及相对运动均较大，故本文选取 S46 号跨中短吊索连接件作为研究对象对其进行后续研究。

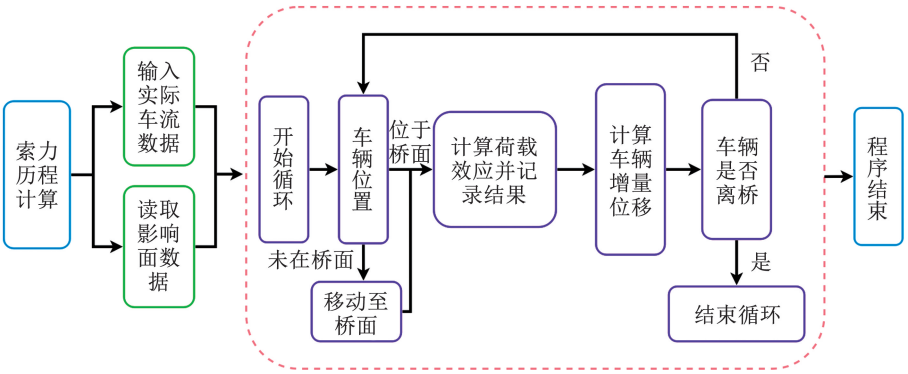
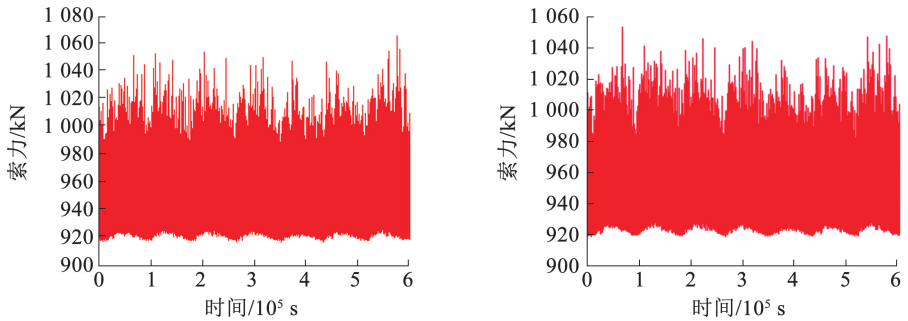


图 8　索力历程计算流程

Fig. 8　Calculation process of cable force history



(a) S46号短吊索　　(b) S35号长吊索

图 9　吊索索力历程

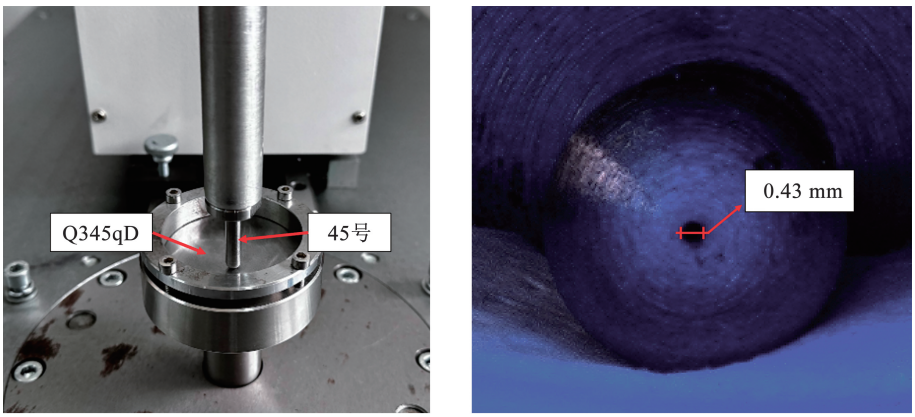
Fig. 9　Hanger cable force history

3　吊索连接件叉形耳板磨损分析

该桥箱梁耳板钢材采用 Q345qD，叉形耳板采用45 号钢，为了获得叉形耳板的磨损系数，采用 MPT-500B 实验机对 Q345qD/45 号钢摩擦副进行销盘滑动摩擦磨损实验，如图 10 所示，计算得到叉形耳板磨损系数为 6.6×10^{-7}。基于 Archard 模型计算叉形耳板磨损量，其计算公式为

$$V=\frac{k}{H}Fs \tag{2}$$

式中：V 为磨损体积量，k 为磨损系数，H 为布氏硬度，F 为法向荷载，s 滑动总距离。



(a) 试验前的装配　　(b) 磨损后的形貌

图 10　摩擦磨损试验

Fig. 10　Friction and wear test

3.1　滑移距离与等效法向荷载

基于上述缆-梁纵桥向相对位移，由于跨中短吊索上、下端连接件都安装有自润滑关节轴承，其具有球铰的功能。在计算纵向相对转角时，假定吊索为小变形，且两端为铰接连接，可近似计算纵向相对转角 $\alpha=\arctan(d/l)$，d 为相对位移，l 为跨中短吊索索长。该桥跨中短吊索长 $l=3.63$ m，纵向相对转角计算结果如图 11 所示。由图 11 可得，纵向相对转角主要在 $-3°\sim3°$之间。为了得到相对转角的分布，将相对转角度时程曲线转换为相对角度频率直方图，并进行高斯拟合，如 12 所示。从由图 12 可得，$-1°\sim1°$的相对角度所占比例高达 91.5%，且相对角度符合高斯分布，其均值为 -0.127，标准差为0.504。将图 11 所示的纵向转角历程曲线进行转换，得出纵向总转角度数为 31 588.67°。根据弧长公式计算得到 7 d 总滑移距离为 71 672.42 mm。假设每周的磨损量相对均匀，则每月的总滑移距离为 307 167.51 mm。为了满足计算叉形耳板磨损体积量的要求，需将退扭扭矩等效成 2 个法向荷载 F，如图 13 所示。吊索连接件所受 993.5 kN · mm 的退扭扭矩根据叉形耳板几何尺寸可等效为一对 3.821 kN的法向荷载。

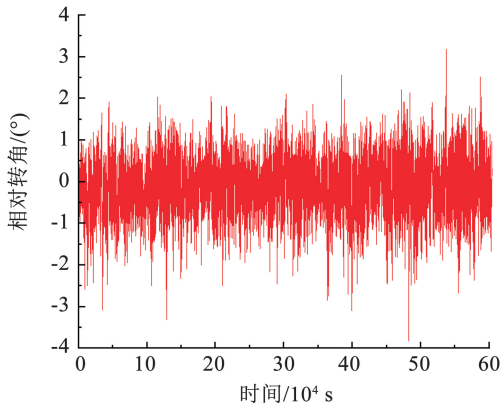


图 11　纵向转角历程曲线

Fig. 11　Relative angle time history

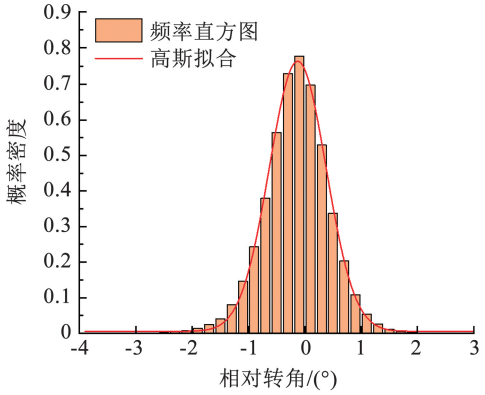


图 12　纵向转角分布

Fig. 12　Relative angle distribution

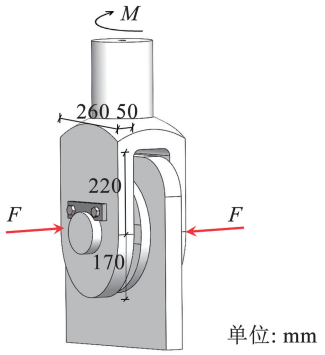


图 13　等效法向力

Fig. 13　The equivalent normal load

3.2　磨损量分析

根据吊索连接件几何尺寸，箱梁耳板与叉形耳板刚好密贴时的横向偏转角 θ 为 0.881 5°，将其作为初始值，在 SolidWorks 软件中建立偏转削减模型，以叉形耳板横向偏转角 θ 为自变量，叉形耳板磨损体积为因变量，以 0.001° 为增量，确定不同 θ 下叉形耳板的磨损体积量 V，作散点图并将其拟合，结果为

$$V = -94.457\ 3 + 7.980\ 1 \times 10^{-4} \cdot e^{13.109\ 3\theta} \quad (3)$$

工程上常用磨损深度作为衡量磨损量的重要指标，为了获得磨损深度 h 与磨损体积 V 之间的关系，以叉形耳板横向偏转角 θ 为自变量，叉形耳板磨损深度 h 为因变量，以 0.001° 为增量，确定不同 θ 下叉形耳板磨损深度 h，作散点图并将其拟合，结果为

$$h = -2.000\ 4 + 2.269\ 6 \times \theta \quad (4)$$

联立式(3)和式(4)消去角度 θ，得到叉形耳板磨损深度与磨损体积转化为式(5)：

$$h = 0.173\ 1 \cdot \ln(V + 94.457\ 3) - 0.765\ 6 \quad (5)$$

联立式(2)和式(5)，可以确定该桥在不同运营时间下叉形耳板磨损深度 h。代入该桥月总滑移距离(307 167.51 mm)、等效的法向荷载(3.821 kN)、布氏硬度 H(260 HB)，计算叉形耳板运营 5 ~ 30 a 的磨损体积与磨损深度见图 14，由图 14 可知磨损深度随着时间不断增大，但增长速度不断减小。

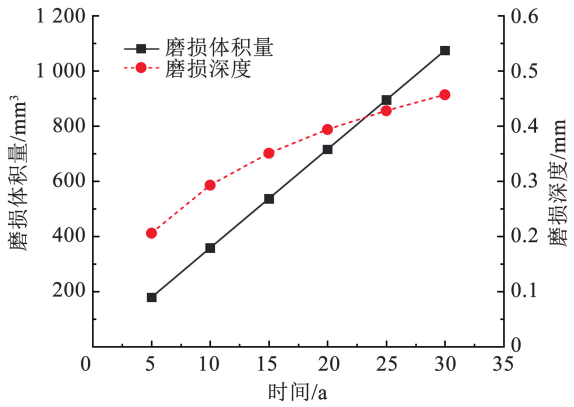


图 14　叉形耳板磨损体积量与磨损深度

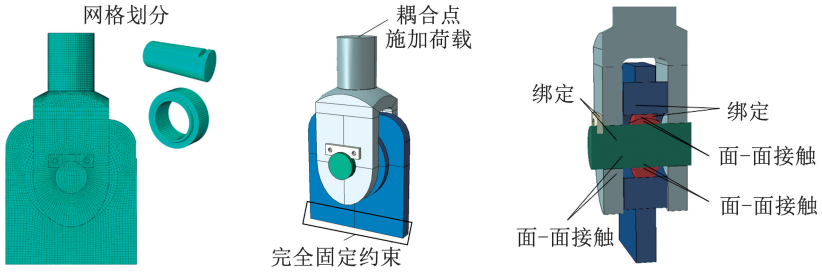
Fig. 14　Wear volume and wear depth of the fork-ear plate

4　吊索连接件耳板磨损对其疲劳寿命的影响分析

4.1　有限元模型与足尺试验装置的建立

为研究磨损对叉形耳板受力的影响，利用 ABAQUS 建立了连接件有限元模型，所有单元均采用三维实体单元 C3D8R，接触关系如图 15 所示，面-面接触切向行为定义为罚接触，法向行为定义为硬接触，轴承内外圈摩擦系数为 0.05，其他接触位置摩擦系数设置为 0.15。叉形耳板和箱梁耳板材料分别为 45 号钢和 Q345qD，采用四折线本构模型；其中 45 号钢拐点应变应力依次为：$\varepsilon_1 = 0.001\ 69$，$\sigma_1 = 355$ MPa；$\varepsilon_2 = 0.011$，$\sigma_2 = 355$ MPa；$\varepsilon_3 = 0.125$，$\sigma_3 = 600$ MPa；弹性模量取 209 GPa。Q345qD 拐点应变应力依次为：$\varepsilon_1 = 0.001\ 73$，$\sigma_1 = 348$ MPa；$\varepsilon_2 = 0.019$，$\sigma_2 = 348$ MPa；$\varepsilon_3 = 0.185$，$\sigma_3 = 522$ MPa；弹性模量取 206 GPa。销轴与关节轴承本构模型为理想弹塑性，屈服强度为 850 MPa，泊松比均取 0.3。

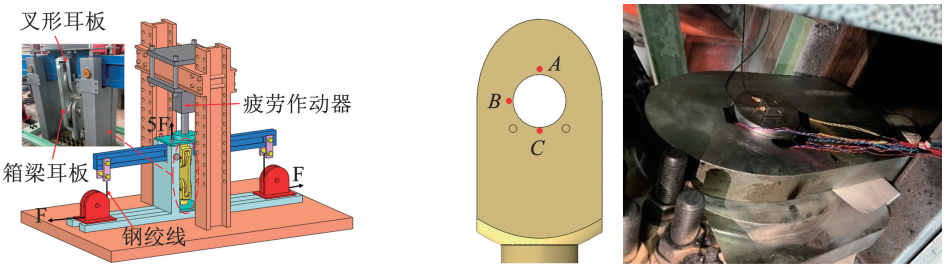
为了验证该桥吊索连接件无磨损条件下叉形耳板的疲劳性能，设计了吊索连接件足尺试验装置，如图 16 所示。利用杠杆原理施加大吨位的静载，采用疲劳试验机分级施加动载。在两侧钢绞线处设置压力传感器，实时监测钢绞线拉力大小。在叉形耳板销轴孔周围关键节点处布设应变片，首先加载至 900 kN，随后将荷载分为 4 级，每级 80 kN，最终达到 1 100 kN。记录各测点的应变数值见表 2 所示。由于应变片是在杠杆加载 887.8 kN 后贴至叉形耳板外侧，此时应变值为 0，后续所测应变皆为应变差值。由表可知，有限元仿真结果均大于实测数据，这是由于应变片测得的值为测点区域的平均应变，导致应力数据存在偏差，但相对误差均在 10% 左右，证明有限元仿真的可靠性。



(a) 网格划分　(b) 荷载与约束　(c) 接触设置

图 15　有限元模型

Fig. 15　Finite element model



(a) 试验装置　(b) 应变片布置

图 16　试验装置与应变片布置

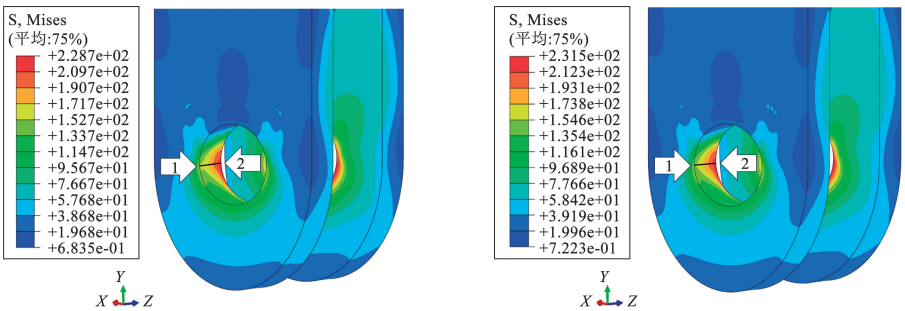
Fig. 16　Experimental apparatus and strain gauge layout

表 2　竖向应变对比

Tab. 2　Vertical microstrain comparison

拉力/kN	*A* 点竖向应变			*B* 点竖向应变			*C* 点竖向应变		
	实测值	仿真值	相对误差/%	实测值	仿真值	相对误差/%	实测值	仿真值	相对误差/%
900	2.82	4.75	68.44	6.45	7.69	19.22	3.03	2.32	-23.43
980	32.91	35.87	8.99	52.97	58.16	9.80	14.89	17.54	17.80
1 060	62.01	66.94	7.95	101.86	108.59	6.61	30.18	32.75	8.52
1 100	77.48	82.46	6.43	125.71	133.79	6.43	37.52	40.36	7.57

在上述有限元分析基础之上,考虑吊索退扭扭矩对连接件叉形耳板受力的影响,在叉形耳板有限元模型上施加 1 069.1 kN 索力及 993.5 kN · mm 的退扭扭矩。结合图 17 可得,最大应力位于叉形耳板内侧与销轴接触的位置,向叉形耳板外侧逐渐减小。无退扭扭矩作用时叉形耳板最大 Mises 应力为 228.7 MPa,有退扭扭矩作用时最大 Mises 应力为 231.5 MPa,这表明吊索退扭会导致销轴孔处应力的有所增加。



(a) 无退扭扭矩　(b) 有退扭扭矩

图 17　叉形耳板应力云图

Fig. 17　Stress contour plot of fork-ear plate

4.2　疲劳载荷谱的编制与疲劳试验分析

将吊索索力历程应用雨流计数法处理计算，结果如图 18 所示。在工程应用中，通常采用 8 级疲劳载荷谱，将均值按等间距划分为 8 个等级，采用 Conover 比值系数将幅值按照对应极值的 1、0.95、0.85、0.725、0.575、0.425、0.275、0.125 倍划分为 8 级[18-19]，将雨流循环计数结果转化为 8 级均幅值二维载荷谱，然后采用变均值法将该均幅值二维载荷谱转换为变均值一维载荷谱[20]，得到的变均值一维载荷谱见表 3。

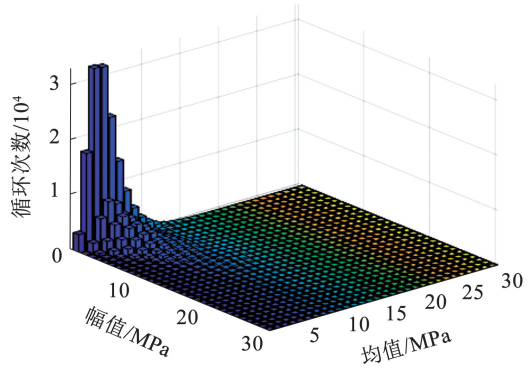


图 18　雨流计数结果

Fig. 18　Rainflow cycle counting results

表 3　变均值一维载荷谱

Tab. 3　1D load spectrum with varying means

级数	拉力幅值/kN	拉力均值/kN	频次	拉力最大值/kN	拉力最小值/kN
1	19.4	939.1	262 760	958.5	919.7
2	42.7	950.5	29 722	993.2	907.8
3	66.0	958.4	12 830	1 024.4	892.4
4	89.3	963.1	3 631	1 052.4	873.8
5	112.6	967.4	69	1 079.9	854.8
6	132.0	982.8	112	1 114.8	850.8
7	147.5	983.5	14	1 131.0	836.0
8	155.3	983.5	2	1 138.8	828.2

在进行疲劳试验时，将载荷谱作为一个载荷块施加，其中每个载荷块对应的实际寿命为 N_t，编制载荷谱时所用的吊索索力历程曲线时间为 7 d，则 N_t 为 168 h。当结构在经历 n 个载荷块加载后发生疲劳破坏时，该结构的疲劳寿命可以表示为 nN_t。将所编制的疲劳载荷谱输入疲劳试验机，对叉形耳板加载 200 万次后，观察叉形耳板的宏观、微观形貌，未发现疲劳裂纹，如图 19 所示，说明叉形耳板在无磨损情况下具有足够的疲劳性能。

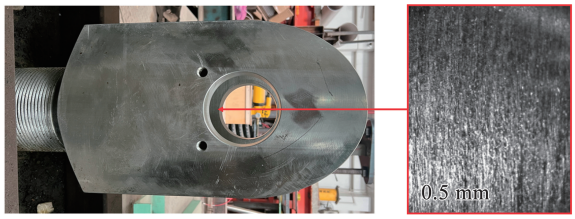


图 19　叉形耳板表面形貌

Fig. 19　Surface morphology of fork-ear plate

4.3　连接件叉形耳板 S-N 曲线折减分析

通过查阅文献[21-23]，国产机械材料中 45 号钢的 S-N 曲线为

$$\lg N = 35.477\,9 - 12.080\,4\lg \sigma \tag{6}$$

上述曲线为 45 号钢在未考虑缺口、尺寸及表面加工等影响因素下的 S-N 曲线。为了得到连接件耳板的 S-N 曲线，需将材料的对数 S-N 曲线向下平移 $\lg K_{\sigma D}$，$\lg K_{\sigma D}$ 为疲劳强度降低系数，其表达式为

$$K_{\sigma D} = (K_\sigma + 1/\beta_1 - 1)/\varepsilon \tag{7}$$

其中：K_σ 为正应力下的疲劳缺口系数，β_1 为表面加工系数，ε 为尺寸系数。

根据《抗疲劳设计手册》，查得 45 号钢叉形耳板疲劳缺口系数 $K_\sigma = 1.63$，表面加工系数 $\beta_1 = 0.92$，尺寸系数 $\varepsilon = 0.9$。通过计算，得到疲劳强度降低系数 $K_{\sigma D} = 1.91$。因此，考虑缺口、尺寸及表面加工等影响因素后的 45 号钢 S-N 曲线可表示为

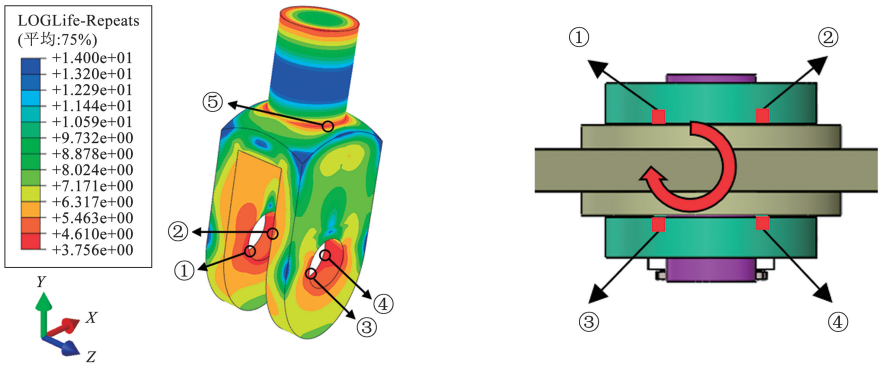
$$\lg N = 35.196\,8 - 12.080\,4\lg \sigma \tag{8}$$

4.4　连接件叉形耳板疲劳寿命评估

本文应用 Fe-safe 软件对叉形耳板疲劳寿命进行评估，首先利用 Abaqus 建立吊索连接件有限元模型，根据分析工况将有限元计算结果导入 Fe-safe。设置材料参数时输入折减后的 45 号钢 S-N 曲线，其表面粗糙度为 3 ~ 6 μm[24]。选用 Normal Stress 准则进行疲劳计算，在加载窗口输入 8 级载荷谱，完成计算后可得叉形耳板疲劳寿命云图。本文计算了叉形耳板运营 0 ~ 30 a 后的疲劳寿命云图。限于篇幅图 20 只给出了其中一种疲劳仿真结果，图中的 Life-Repeats 表示载荷谱块的加载次数，每施加一次载荷谱块 N_t 代表载荷作用于吊索连接件 168 h。将叉形耳板寿命云图中 Life-Repeats 最小值代入到式(9)可得到其疲劳寿命 T，结果见表 4。

$$T = n \cdot N_t/(24 \times 365) \tag{9}$$

式中：n 为载荷谱加载次数，N_t 为每个载荷块对应的实际寿命。



(a) 疲劳寿命云图 (b) 区域位置

图 20 磨损 30 a 后叉形耳板疲劳寿命云图

Fig. 20 Fatigue Life contour plot of fork-ear plate after 30 years of wear

表 4 不同磨损时间下叉形耳板局部区域疲劳寿命

Tab. 4 Fatigue life of local zones in fork-ear plate under different wear durations

区域	不同运营时间下的疲劳寿命/a						
	0 a	5 a	10 a	15 a	20 a	25 a	30 a
①	125.23	117.38	110.71	103.67	97.71	92.05	86.41
②	118.81	109.79	103.27	96.37	90.59	84.90	79.33
③	127.76	115.64	108.51	103.10	97.10	90.95	85.28
④	127.56	116.17	109.03	103.58	97.65	91.48	85.80
⑤	244.88	230.14	222.36	218.24	212.70	207.60	197.17

从表 4 可知,叉形耳板疲劳寿命较低区域主要位于叉形耳板的销轴孔和锚固连接处,但锚固连接处的疲劳寿命远大于销轴孔处的疲劳寿命,表明销轴孔处是叉形耳板疲劳寿命的控制部位。该桥运营时间为 0、5、10、15、20、25、30 a 时,叉形耳板疲劳寿命分别为 118.81、109.79、103.27、96.37、90.59、84.90、79.33 a。以未损伤的疲劳寿命为基准,根据疲劳仿真结果可知该桥运营 5、10、15、20、25、30 a 后吊索连接件叉形耳板疲劳寿命分别损失了 7.59%、13.08%、18.89%、23.75%、28.54%、33.23%。

5 结 论

1)通过现场调研与磨屑检测分析,吊索连接件褐红色磨屑的主要成分是 Fe_2O_3,主要来源于叉形耳板与箱梁耳板之间的磨损,没有检测到关节轴承的磨屑。褐红色磨屑产生的原因是运营期的吊索存在退扭现象,同时吊索连接件在纵桥向存在 -3° ~ 3°之间的相对转动,在关节轴承作用下叉形耳板与箱梁耳板发生紧密接触,最终导致两耳板之间发生磨损。

2)通过销盘滑动磨损实验,获得了叉形耳板的磨损系数,基于 Archard 模型计算了吊索连接件叉形耳板磨损深度,该桥运营 5 a 后叉形耳板磨损深度约为 0.207 mm,磨损深度随着时间的增长不断增大,但增长速度不断减小。

3)设计了吊索连接件叉形耳板足尺试验装置,施加了与实桥一致的大吨位荷载,验证了叉形耳板在无磨损状况下的疲劳性能。吊索钢丝的退扭和耳板间的磨损都会降低叉形耳板的疲劳寿命,吊索连接件叉形耳板易发生疲劳破坏的位置是销轴孔,该桥运营 5、10、15、20、25、30 a 后叉形耳板疲劳寿命分别损失了 7.59%、13.08%、18.89%、23.75%、28.54%、33.23%。

参考文献

[1] Wang Shiyuan, Guo Tong, Zhang Zhaolei, et al. Investigation of multiple damage mechanisms in pin rods of short suspenders on a long-span suspension bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(5): 04022027

[2] Wang Feng, Ning Shiwei, Sun Zhen. Experimental investigation on wear resistance of bushing in bridge suspenders[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(3): 06020001

[3] JTG/TD 65-05—2015 公路悬索桥设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015
JTG/TD 65-05—2015 Specifications for design of highway suspension bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2015

[4] 朱劲松, 肖汝诚, 曹一山. 杭州湾跨海大桥索梁锚固节点模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2007(1): 49
Zhu Jinsong, Xiao Rucheng, Cao Yishan. Model test on the cable anchorage of the main girder of the Hangzhou Bay Bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2007(1): 49

[5] 桂水荣, 陈水生, 万水. 系杆拱桥吊杆节点足尺模型承载性能

试验研究[J]. 桥梁建设, 2013, 43(2): 58
Gui Shuirong, Chen Shuisheng, Wan Shui. Full-scale model test study of load-carrying behavior of hanger joint of tied arch bridge [J]. Bridge Construction, 2013, 43(2): 58

[6]陶晓燕, 余振生, 刘晓光, 等. 西堠门大桥索梁锚固部位的受力分析及模型试验[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 49
Tao Xiaoyan, Yu Zhensheng, Liu Xiaoguang, et al. Mechanical analysis and model test on the cable-girder anchorage zone of xihoumen bridge[J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 49

[7]李刚, 何东升, 刘宇辰, 等. 西堠门公铁两用大桥索梁锚固区域受力分析及传力机理研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53(3): 40
Li Gang, He Dongsheng, Liu Yuchen, et al. Load bearing capacity analysis and load transfer mechanism study of cable girder anchorage zone of Xihoumen Rail-cum-Road Bridge[J]. Bridge Construction, 2023, 53(3): 40

[8]颜东煌, 刘雪锋, 田仲初, 等. 销轴连接结构的接触应力分析[J]. 工程力学, 2008(1): 229
Yan Donghuang, Liu Xuefeng, Tian Zhongchu, et al. Contact stress analysis of pinned connection[J]. Engineering Mechanics, 2008(1): 229

[9]陈志华, 刘琦, 刘红波, 等. 索结构中销轴耳板连接破坏形式及承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(10): 295
Chen Zhihua, Liu Qi, Liu Hongbo, et al. Study on failure pattern and bearing capacity of pin-plate connection in cable structures[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(10): 295

[10]王仲衡, 罗斌, 张旻权, 等. 建筑索结构销轴耳板连接节点承载力试验研究和有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(11): 150
Wang Zhongheng, Luo Bin, Zhang Minquan, et al. Experimental study and finite element analysis on bearing capacity of pin-connected plate joints[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(11): 150

[11]Zhang Qinghua, Cui Chuang, Li Qiao, et al. Study on fatigue features of box-shaped cable-girder anchorage for cable-stayed bridges with steel box girders by model test[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 423: 1259

[12]Liu Yangqing, Xin Haohui, Liu Yuqing. Load transfer mechanism and fatigue performance evaluation of suspender-girder composite anchorage joints at serviceability stage[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 145: 82

[13]Sun Huahuai, Tang Xiatong, Cai Shunyao, et al. Fatigue of suspender anchorages under axial and bending loads of suspension bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 212: 108252

[14]卫星, 李俊, 强士中. 钢桁加劲梁悬索桥耳板节点抗疲劳性能研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(4): 54
Wei Xing, Li Jun, Qiang Shizhong. Fatigue performance of ear plate Joints in steel truss stiffened suspension bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(4): 54

[15]Wang Tianpeng, Zhou Xinying, Chen Yiguang. A study of the fretting wear of parallel wire bundle stay cable[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2023, 17(4): 7

[16]Guo Tong, Liu Zhongxiang, Correia J, et al. Experimental study on fretting-fatigue of bridge cable wires[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 131: 105321

[17]Wu Juan. The finite element modeling of spiral ropes[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1: 346

[18]Stephens R I, Fatemi A, Stephens R R, et al. Metal fatigue in engineering[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000

[19]Lu Hao, Zhang Yimin, Zhang Xufang, et al. Fatigue reliability sensitivity analysis of complex mechanical components under random excitation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2011, 22(6): 58

[20]高云凯, 徐成民, 方剑光. 车身台架疲劳试验程序载荷谱研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(4): 92
Gao Yunkai, Xu Chengmin, Fang Jianguang. Study on the programed load spectrum of the body fatigue bench test[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(4): 92

[21]张莉, 赵兵, 郭宝科. 缺口件疲劳损伤累积规律的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(11): 1703
Zhang Li, Zhao Bing, Guo Baoke. Fatigue damage accumulation rule of notched specimen[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(11): 1703

[22]赵少汴. 有限寿命疲劳设计法的基础曲线[J]. 机械设计, 1999, 16(11): 5
Zhao Shaobian. Fundamental curves for finite-life fatigue design methodology[J]. Journal of Machine Design, 1999, 16(11): 5

[23]徐善华, 秦广冲, 姬立星, 等. 考虑表面形貌的腐蚀钢板疲劳缺口系数[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 153
Xu Shanhua, Qin Guangchong, Ji Lixing, et al. Fatigue notch factor of corrosion steel plate considering surface topography[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 153

[24]郝少祥, 曲全鹏, 李林峻. 45 钢热处理工艺对其零件表面粗糙度的影响[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2019, 31(2): 32
Hao Shaoxiang, Qu Quanpeng, Li Linjun. Effect of heat treatment process of steel 45 on surface roughness of mechanical parts[J]. Journal of Henan University of Engineering (Natural Science Edition), 2019, 31(2): 32