

# 摩擦学学报

TRIBOLOGY



## 主缆索股与鞍座间动态接触与微滑移机理研究

孙远, 王大刚, 徐伟, 张德坤

### Dynamic Contact and Microslip Mechanism between Main Cable Strand and Saddle

SUN Yuan, WANG Dagang, XU Wei, ZHANG Dekun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2023113>

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 考虑股线接触与摩擦行为的710 mm<sup>2</sup>碳纤维复合芯导线(ACCC)股线损伤分析

Damage Analysis of 710 mm<sup>2</sup> ACCC Strands Considering the Contact and Friction Behavior between Strands

摩擦学学报. 2017, 37(5): 565 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.001>

##### 微液滴在PDMS软基体表面的动态摩擦行为研究

Dynamic Frictional Behavior of Microdroplets on PDMS Soft Substrate

摩擦学学报. 2021, 41(5): 619 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020137>

##### 考虑界面粗糙度动态变化的点接触弹流润滑特性研究

Surface Roughness Effect on Elastohydrodynamic Lubrication Point Contact Considering Dynamic Change of Interface Roughness

摩擦学学报. 2021, 41(1): 47 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019138>

##### 微凸体碰撞对接触应力应变的影响

Influence of Asperity Collision on Contact Stress and Strain

摩擦学学报. 2017, 37(1): 11 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.01.002>

##### 基于Circular模型的大剪应变率点接触弹流界面滑移数值分析

Numerical Analysis of EHL Boundary Slip Effect Applying Circular Model under Big Shear Strain Rate

摩擦学学报. 2018, 38(2): 129 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018.02.002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2023113

# 主缆索股与鞍座间动态接触与微滑移机理研究

孙远, 王大刚\*, 徐伟, 张德坤

(中国矿业大学机电工程学院, 江苏徐州 221116)

**摘要:** 在悬索桥的服役过程中, 由于桥梁恒载、风载以及车流量变化导致的动态载荷, 使得鞍座两侧的主缆受到的力不平衡, 从而引起主缆与鞍座间的动态接触和微滑移。当不平衡力超过主缆与鞍座间的静摩擦力, 主缆与鞍座间将发生滑动, 将导致悬索桥结构失稳, 甚至可能造成桥梁坍塌。因此, 揭示主缆和鞍座之间的动态接触和微滑移特性对增强主缆的抗滑性和确保大跨度悬索桥的稳定性至关重要。本文作者运用自制试验平台, 模拟悬索桥实际服役环境中动载工况下的主缆索股与鞍座间动态接触与微滑移行为, 通过开展接触摩擦试验并对接触界面进行实时监测来研究接触摩擦机理揭示了典型工况下主缆索股与鞍座间的动态接触与微滑移机理(接触状态、微滑移幅值、摩擦系数以及接触压力等)。结果表明: 主缆索股承受动态载荷时各个索股个体与鞍座间的接触状态存在差异, 外层索股与鞍座间的接触面均为完全滑动状态, 内层索股与鞍座间的接触状态为接近完全滑动状态的部分滑动状态, 主缆索股整体承受较大动载时外层索股与鞍座间更容易发生完全滑动, 索股间产生分层滑移现象, 不同索股的微滑移幅值由内层到外层依次增大; 随着加载力的增大, 从内层索股至外层索股, 滑移距离增长速率依次增大, 从固定端到加载端索股不同接触位置的微滑移幅值逐渐增大; 索股整体与鞍座间的摩擦系数呈快速增大-小幅波动并逐渐稳定的变化趋势, 多根索股平均名义摩擦系数的平均值与索股整体与鞍座间的平均摩擦系数一致。鞍座固定端接触压力呈缓慢增大-快速增大-缓慢减小-快速减小的变化趋势, 加载端接触压力与交变载荷的变化趋势基本一致。随着加载力增量的增大, 固定端接触压力初始基本不变, 然后缓慢增大, 加载端接触压力增量呈线性增大趋势。

**关键词:** 典型工况; 主缆索股; 鞍座; 动态接触; 微滑移

**中图分类号:** TH117.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2023)10-1165-10

## Dynamic Contact and Microslip Mechanism between Main Cable Strand and Saddle

SUN Yuan, WANG Dagang\*, XU Wei, ZHANG Dekun

(School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** During the service of the suspension bridge, the time-varying load caused by the coupling of dead load, wind load and live load caused by vehicle passage causes the unbalanced force on both sides of the saddle of the main cable, resulting in dynamic contact and microslip between the main cable strand and the saddle. When the unbalanced force exceeds the limit friction force between the main cable and the saddle, the main cable and the saddle will slip. Then the suspension bridge structure instability and even collapse accidents. Therefore, it is of great significance to study the dynamic contact and microslip mechanism between the main cable strands and the saddle of the suspension bridge to

Received 19 June 2023, revised 30 August 2023, accepted 1 September 2023, available online 28 October 2023.

\*Corresponding author. E-mail: wangdg@cumt.edu.cn, Tel: +86-15162110590.

This project was supported by the National Natural Science Foundation of China (52175205, 51875565), the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD) and Top-notch Academic Programs Project of Jiangsu Higher Education Institutions (TAPP).

国家自然科学基金(52175205, 51875565)、江苏高校优势学科建设工程(PAPD)和江苏高校品牌专业建设工程(TAPP)资助。

improve the anti-sliding safety of the main cable and ensure the structural safety of the long-span multi-tower suspension bridge. In this study, a self-made test platform was used to simulate the dynamic contact and microslip behavior between the main cable strand and the saddle under dynamic load conditions in the actual service environment of the suspension bridge, and the dynamic contact and microslip mechanism (contact state, microslip amplitude, friction coefficient, contact pressure, etc.) between the main cable strand and the saddle under typical working condition were revealed, it was of great significance to ensure the service safety of suspension bridge. The results showed that there were differences in the contact states between each individual cable and saddle when the main cable was under dynamic load. The contact surface between the outer cable and the saddle was in a completely sliding state, while the contact between the inner cable and the saddle was in a partially sliding state close to the completely sliding state. when the main cable was subjected to a large dynamic load, it was easier for the outer cable and the saddle to slip completely, and the stratified slip phenomenon occurred between the cable strands, and the microslip amplitudes of different cable strands increased from the inner to the outer layer. With the increase of loading force, from the inner cable to the outer cable, the growth rate of slip distance increased successively, and the microslip amplitude increased gradually from the fixed end to the loading end at different contact positions. The friction coefficient between the whole strand and the saddle increased rapidly, fluctuated slightly and became stable gradually. The average nominal friction coefficient of the cable strands was consistent with the average friction coefficient between the whole cable strand and the saddle. The contact pressure at the fixed end of the saddle showed a trend of slow increasing-rapid increasing-slow decreasing-rapid decrease, and the contact pressure at the loading end was basically the same as the alternating load. With the increase of the loading force increment, the contact pressure at the fixed end was basically unchanged at the beginning, and then increased slowly, while the contact pressure increment at the loading end increased linearly.

**Key words:** typical working condition; main cable strand; saddle; dynamic contact; microslip

大跨度多塔悬索桥由于具有跨越能力大、受力性能好及对地形适应能力强等优点,成为跨越千米以上障碍物最理想的桥型<sup>[1-3]</sup>。作为悬索桥的主要承力构件,主缆以索塔、散索鞍支墩为支撑,锚固于两端锚碇<sup>[4-5]</sup>。悬索桥服役期间,其自身恒载、风载和车辆通行引起的活载等多种载荷的耦合作用<sup>[6-8]</sup>产生的时变动载荷导致主缆索股与鞍座之间发生动态接触与微滑移,当主缆两侧的不平衡力超过主缆与鞍座间的极限摩擦力时主缆与鞍座之间将发生打滑现象<sup>[9-11]</sup>,进而造成悬索桥结构失稳甚至垮塌事故<sup>[12]</sup>,因此,针对主缆索股承受较大动载荷的典型工况开展悬索桥主缆索股与鞍座间的动态接触与微滑移机理研究,对保障大跨度多塔悬索桥的服役安全性具有重要意义。

国内外研究学者围绕悬索桥主缆与鞍座间的摩擦滑移问题已开展了大量的研究,学者们以Tokyo Port Link桥<sup>[13]</sup>、泰州长江大桥<sup>[14-16]</sup>、武汉鹦鹉洲长江大桥<sup>[17]</sup>和阳宝山特大桥<sup>[18]</sup>等多座服役中的悬索桥为工程背景,针对其主缆与鞍座间的摩擦滑移特性进行模型试验,全面模拟了各索股与索股之间、钢丝之间、索股与鞍槽间的真实接触特性,探究了主缆与鞍座间的摩擦系数的合理取值、抗滑移安全性评估以及滑移时刻判定等问题;高文丽等<sup>[19-21]</sup>针对主缆钢丝的动态接触与滑移行为开展了试验研究,运用原位观测手段揭示了主缆钢丝的动态接触与滑移特性及其受到接触

滑移参数的影响规律;Wang等<sup>[22-23]</sup>和季申增等<sup>[24-26]</sup>基于ABAQUS、ANSYS等平台运用有限元仿真分析方法,采用简化的有限元模型研究了主缆索股、主缆钢丝的滑移特性。然而,目前已有的针对主缆索股与鞍座间摩擦滑移行为的仿真及试验研究均采用静态分级加载模式,模拟悬索桥实际服役环境中动载工况下的主缆索股与鞍座间动态接触与微滑移试验研究尚未见报道。本文作者以泰州长江大桥为工程实例设计试验平台并开展试验研究,揭示典型工况下悬索桥主缆索股与鞍座间动态接触与微滑移机理。

## 1 试验平台及试验参数

### 1.1 试验平台

泰州长江大桥采用PPWS法主缆,每根主缆包含的索股数量为169,每根索股由91根镀锌的高强度钢丝编制而成,钢丝半径为2.6 mm,索股钢丝与鞍槽之间的摩擦系数为0.2。主缆索股的截面为六边形,其在鞍座内的排列形式如图1所示。

为模拟动态载荷工况下主缆索股与鞍座间的接触,依据实桥模型结构设计搭建主缆索股与鞍座动态接触与微滑移试验平台(图2),该试验平台由基架单元、加载单元、鞍座、索股以及信号采集单元等组成。鞍座包角为48°,半径为1 m。试验索股采用37根直径为1.4 mm、抗拉强度为1 670 MPa的热镀锌钢丝进行

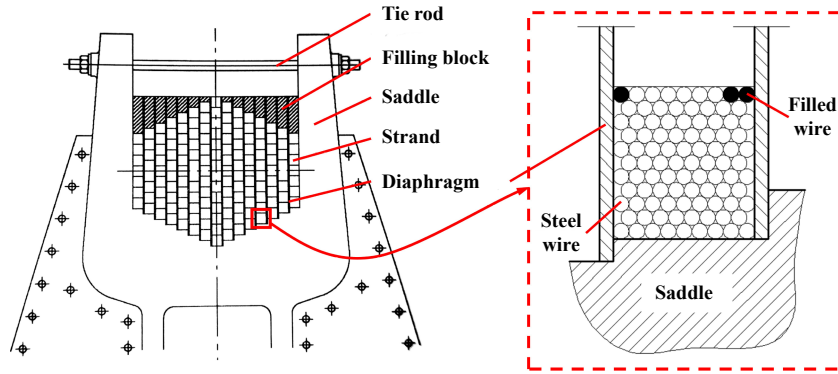
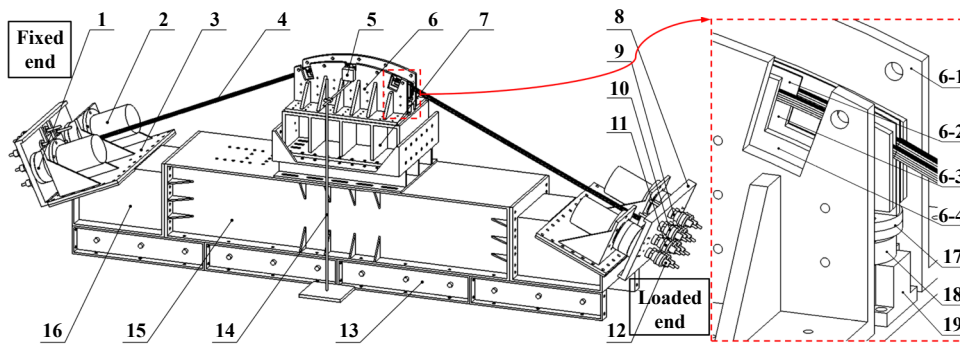


Fig. 1 Arrangement of the main cable strands in the saddle  
图 1 主缆索股在鞍座内的排列形式

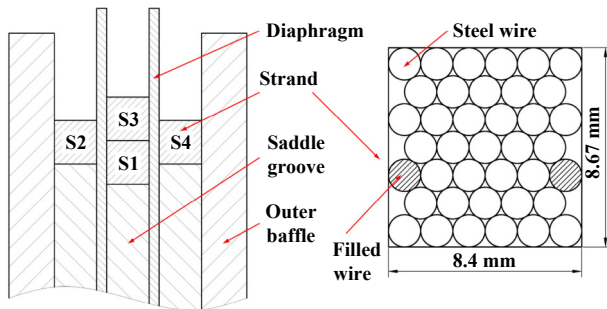


1. spoke type pressure sensor; 2. hydraulic cylinder; 3. fixing frame for hydraulic cylinder; 4. strands; 5. high speed industrial camera; 6. saddle; 7. saddle bracket; 8. push plate; 9. adjusting bolt; 10. gasket; 11. cable force sensor; 12. anchorage; 13. base bracket; 14. camera mount; 15. test platform base; 16. hydraulic cylinder base; 17. bearing block; 18. contact pressure sensor; 19. sensor base; 6-1. saddle side plate; 6-2. diaphragm; 6-3. saddle groove; 6-4. outer baffle

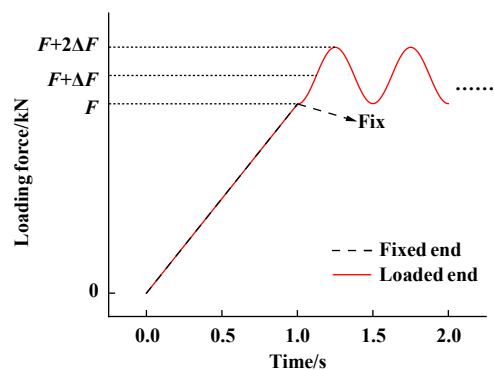
(a) Structural diagram



(b) Physical drawing



(c) Structure of test strands



(d) Loading procedure

Fig. 2 Test platform for dynamic contact and microslip between main cable strand and saddle

图 2 主缆索股与鞍座动态接触与微滑移试验平台

编排,通过增加2根填充丝将鞍座内索股的断面整理为与鞍槽对应的矩形截面[图2(c)],其截面尺寸为8.4 mm×8.67 mm.索股的中间区段放置在鞍座内的鞍槽上,两端分别穿过推板、调节螺栓、索力传感器和垫片,通过锚具进行固定,运用调节螺栓和穿心式索力传感器使各索股初始受力状态一致.试验时依据“索股两端同步张拉至恒载后一端固定,一端施加动态载荷”的加载模式,控制液压缸对索股施加预紧力及交变载荷[图2(d)];运用接触压力传感器检测鞍座端部的接触压力;运用轮辐式压力传感器检测索股两端的张力;运用高速工业相机和相应的追踪程序通过鞍座上的缺口对索股与鞍座的接触界面进行视频拍摄并获得所标记参考点的位移信息.

## 1.2 试验参数

由于试验模型为缩比模型,故需要依据试验模型与实桥的主缆索股对鞍座的平均挤压接触应力基本一致的原则确定试验中对索股施加的预紧力值.图3所示为对索股两端施加预紧力后鞍座的受力示意图,沿鞍座的圆弧取一长度为 $d$ 、包角为 $d\alpha$ 的微段,则该微段上索股对鞍座的平均挤压接触应力为

$$\sigma = \frac{2F \sin \frac{d\alpha}{2}}{nbrd\alpha} = \frac{F}{nbr} \quad (1)$$

式中: $F$ 为对索股施加的预紧力, $n$ 为索股数, $b$ 为索股与鞍座底面(鞍槽)接触面宽度; $r$ 为鞍座半径.

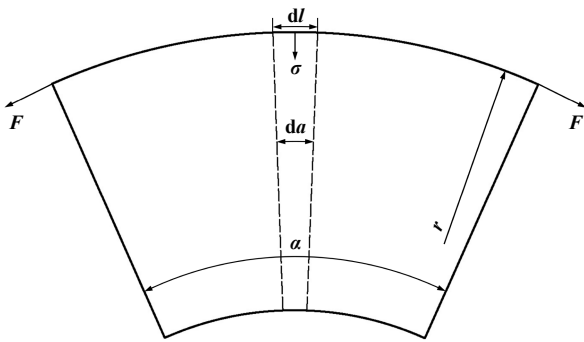


Fig. 3 Saddle force diagram  
图3 鞍座受力示意图

基于已有的模拟实桥主缆索股的仿真研究采用的模型数据进行计算,单根索股对应的仿真参数为 $F=460$  kN, $n=1$ , $b=46.8$  mm, $r=1.5$  m,则索股对鞍座的平均挤压接触应力为

$$\sigma = \frac{460 \text{ kN}}{1 \times 46.8 \text{ mm} \times 1.5 \text{ m}} = 6.55 \text{ MPa}$$

试验模型中索股截面长度为8.4 mm,即索股与鞍

槽接触面宽度为8.4 mm,鞍座半径为1 m,综合考虑试验可操作性、试验装置加载能力等因素,采用4根索股进行试验[索股排列见图2(c)],则施加的预紧力应为

$$F = 6.55 \text{ MPa} \times 4 \times 8.4 \text{ mm} \times 1 \text{ m} = 220.08 \text{ kN}$$

为了模拟实际服役过程中的悬索桥主缆承受较大动载时发生完全滑动的极端工况,试验中施加的动态交变载荷应能够使主缆索股发生明显滑移,因此基于以上已确定的预紧力值,参考已有的加载方式为静态分级加载的主缆索股与鞍座摩擦滑移试验研究成果,确定交变载荷幅值为60 kN.

结合试验装置的加载能力,确定典型工况条件下的试验参数列于表1中.

表1 试验参数  
Table 1 Test parameters

Test parameters	Specifications
Number of strand	4
Alternating load amplitude/kN	60
Alternating load frequency/Hz	0.5
Preload force/kN	220
Cycles	600

## 2 索股滑移

根据鞍座上缺口位置的不同将3个缺口分别称作固定端缺口、中部缺口和加载端缺口(图4).通过3个缺口对主缆索股的滑移特性进行探究.

### 2.1 同一接触位置下不同索股的滑移特性

控制高速工业相机通过加载端缺口对主缆索股与鞍座的接触界面进行视频拍摄,获得索股S1、S2和S3的滑移信息[如图2(c)所示,由于索股S2与S4对称布置在鞍座内,且边界条件相同,故只需选择其中1根索股作为研究对象],探究主缆索股与鞍座同一接触位置处不同索股的滑移特性.

图5所示为循环周次为600次时单个加载周期内高速工业相机拍摄的视频中0.0、0.5、1.0、1.5和2.0 s等5个时刻的截图,黄线为索股S1、S2和S3上所标记红点相应时刻的运动轨迹.

运用追踪程序获得各标记点的滑移信息.由图6不同索股滑移曲线可知,3根索股滑移曲线的变化趋势总体上一致,初始阶段3根索股的滑移距离的增长速率基本一致.随着加载力的增大,各个索股滑移距离的增长速率大小关系为索股S3>索股S2>索股S1,且索股S1滑移距离的增长速率明显低于索股S2和S3.当加载力达到峰值即1 s时,3根索股的滑移距离均达

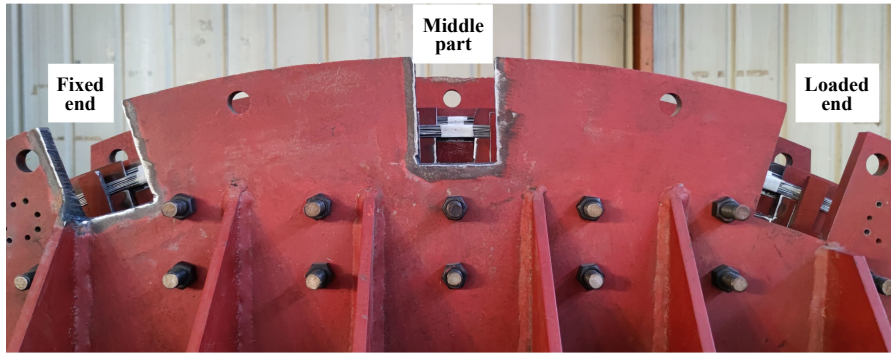


Fig. 4 Gaps of the saddle

图 4 鞍座缺口

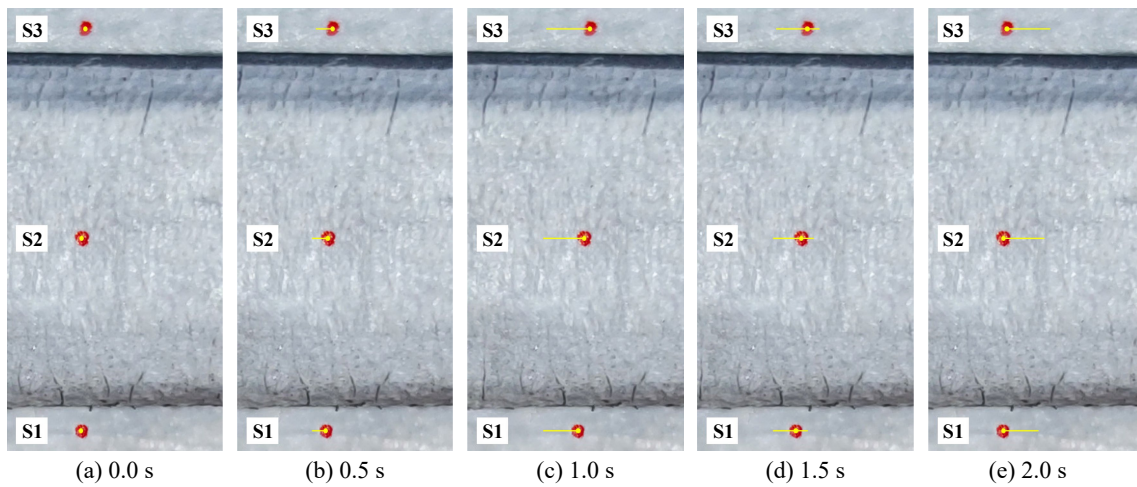


Fig. 5 Video capture taken by the high-speed industrial camera

图 5 高速工业相机拍摄视频截图

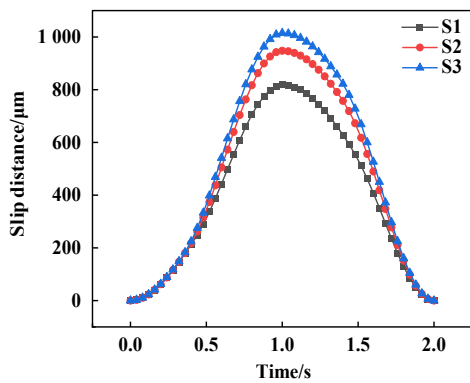


Fig. 6 Slip curves of cable strands

图 6 索股滑移曲线

到最大值, 大小关系为索股 $S_3 > S_2 > S_1$ , 且索股 $S_1$ 的最大滑移距离明显小于索股 $S_2$ 、 $S_3$ . 这是由于在鞍座内3根索股所处的位置不同, 其接触关系也不同. 如图7所示, 索股 $S_1$ 底部与鞍槽接触, 两侧与隔板接触, 顶部与索股 $S_2$ 接触, 与索股 $S_2$ 、 $S_3$ 相比, 处于内层的索股 $S_1$ 受到了索股 $S_3$ 施加的外侧径向力的作用, 其承受的总径向力明显大于处于外层的索股 $S_2$ 、 $S_3$ ,

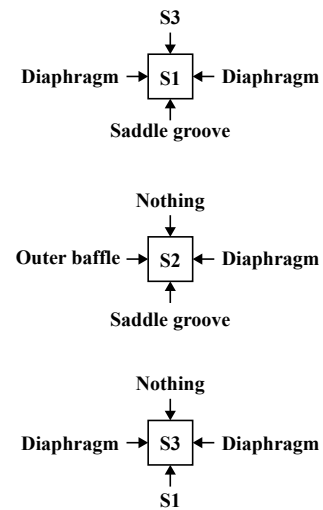


Fig. 7 Contact relationship of cable strands

图 7 索股接触关系

因此索股 $S_1$ 受到的抗滑摩擦力更大, 导致其最大滑移距离最小. 索股 $S_2$ 、 $S_3$ 顶部均不与其他物体接触, 不承受外侧径向力的作用, 与索股 $S_1$ 相比在受到加载力作用时更易发生滑移, 索股 $S_2$ 两侧分别与外侧挡板和隔

板接触, 索股S3两侧与隔板接触, 由于试验平台中隔板和外侧挡板的材料相同, 故可认为索股S2、S3两侧的接触关系相同, 但索股S2的底部与鞍槽接触, 而索股S3的底部与索股S1接触, 已有的研究成果表明, 索股与索股间的摩擦系数小于索股与鞍槽之间的摩擦系数, 因此索股S3受到的抗滑摩擦力小于索股S2, 导致索股S3的最大滑移距离最大。

进一步运用摩擦力-滑移距离滞后回线探究不同索股与鞍座间的接触状态, 滞后回线的形状与接触状态的对应关系为直线-黏着状态、椭圆形-部分滑动状态以及平行四边形-完全滑动状态<sup>[27]</sup>。通过计算测得的索股两端的拉力之差从而得到循环周次为600次时单个加载周期中索股不同时刻承受的摩擦力, 同时结合各个索股的滑移距离数据得到不同索股的摩擦力-滑

移距离滞后回线、索股与鞍座接触过程中的耗散能和索股的微滑移幅值(图8)。由图8(a)可知, 索股S2、S3的摩擦力-滑移距离滞后回线形状均为平行四边形, 索股与鞍座间的接触面均为完全滑动状态, 索股S3滞后回线呈现出的平行四边形的底边与索股S2相比更接近水平状态, 这表明索股S3与鞍座间完全滑动状态的程度更高; 与索股S2、S3相比, 索股S1的摩擦力-滑移距离滞后回线呈接近平行四边形的椭圆形, 索股与鞍座间的接触状态为接近完全滑动状态的部分滑动状态。以上研究结果表明, 主缆索股承受动态载荷时各个索股个体与鞍座间的接触状态存在差异, 当主缆索股整体承受较大动载时, 与内层索股相比, 外层索股与鞍座之间更容易发生完全滑动, 索股间产生了分层滑移现象。

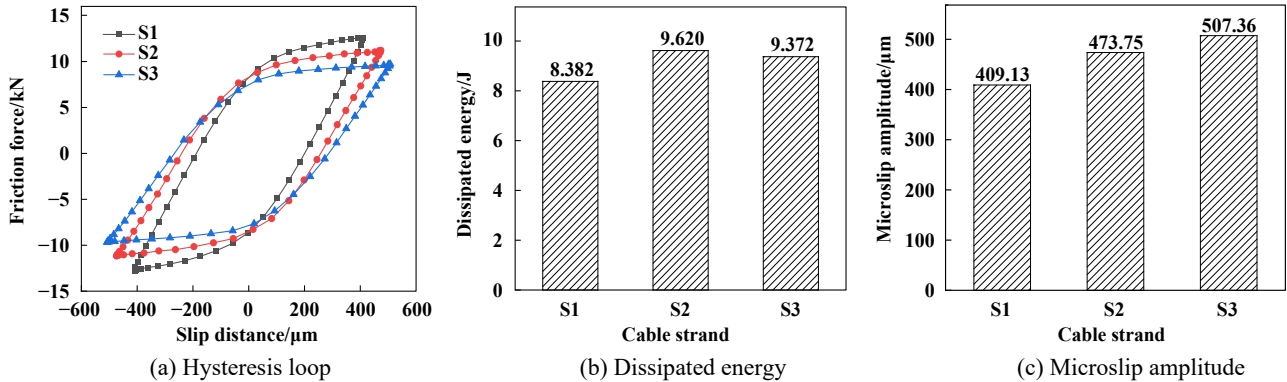


Fig. 8 Hysteresis loops, dissipated energies and microslip amplitudes of different cable strands at the same contact position

图8 同一接触位置下不同索股的滞后回线、接触过程耗散能及微滑移幅值

摩擦力-滑移距离滞后回线的面积可用于表征索股与鞍座接触过程中接触面材料损耗所需的耗散能<sup>[28]</sup>。由图8(b)可知, 索股S1、S2和S3与鞍座接触过程中材料损耗所需的耗散能分别为8.382、9.620和9.372 J, 这表明索股S2与鞍座间接触材料的损伤程度最高, 索股S3次之, 索股S1最小; 由图8(c)可知, 索股S1、S2和S3的滑移幅度依次增大。

## 2.2 不同接触位置下索股的滑移特性

控制高速工业相机分别通过固定端、中部和加载端3个缺口对索股S2与鞍座的接触界面进行视频拍摄, 获得索股S2的滑移信息, 探究单一索股与鞍座不同接触位置下的滑移特性。

图9所示为不同接触位置下的索股摩擦力-滑移距离滞后回线、索股与鞍座接触过程中的耗散能和索股的微滑移幅值。由图9(a)可知, 不同接触位置处索股S2的摩擦力-滑移距离滞后回线形状均为平行四

形, 固定端、中部和加载端等3个接触位置的索股S2与鞍座间的接触面均为完全滑动状态, 说明索股S2与鞍座间的接触面整体均处于完全滑动状态。由图9(b)可知, 索股S2在固定端、中部、加载端等接触位置与鞍座接触过程中材料损耗所需的耗散能分别为4.873、7.203和9.620 J, 说明从固定端到加载端不同接触位置的耗散能逐渐增大, 索股与鞍座间不同接触位置材料的损伤程度从固定端到加载端逐渐增大。由图9(c)可知, 索股不同接触位置的滑移幅度从固定端到加载端逐渐增大, 且增长速率呈逐渐增大的变化趋势。

## 3 摩擦系数

由于主缆索股与鞍座的接触面为圆弧面, 故可以基于弧面法, 根据挠性体摩擦的欧拉公式(2)计算主缆索股与鞍座间的摩擦系数<sup>[29-31]</sup>。

$$F_1 = F_2 e^{\mu\alpha} \quad (2)$$

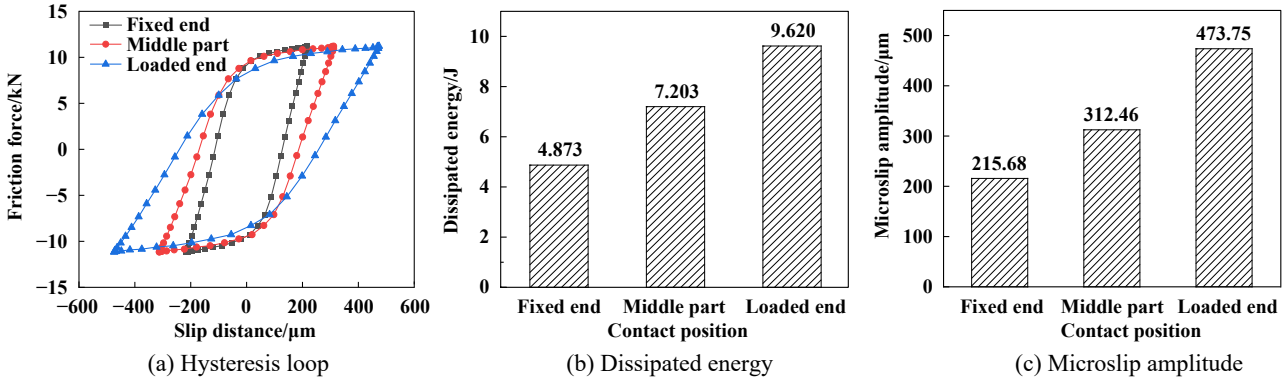


Fig. 9 Hysteresis loops, dissipated energies and microslip amplitudes of cable strand at different contact positions

图 9 不同接触位置下索股的滞后回线、接触过程耗散能及微滑移幅值

式中:  $F_1$  为重载端张力;  $F_2$  为轻载端张力 ( $F_1 > F_2$ );  $e$  为自然对数的底;  $\mu$  为摩擦系数;  $\alpha$  为索股与鞍座间包角, 单位为 rad.

对式(2)进行变换可得

$$\mu = \frac{\ln(F_1/F_2)}{\alpha} \quad (3)$$

取索股加载端张力为  $T_1$ , 固定端张力为  $T_2$ , 由于  $T_1$  和  $T_2$  的大小关系不一定, 故代入式(3)后可得到索股与鞍座间摩擦系数的计算表达式

$$\mu = \left| \frac{\ln(T_1/T_2)}{\alpha} \right| \quad (4)$$

依据式(4)计算得到各个时刻的摩擦系数(包角  $\alpha$  按  $48^\circ$  换算, 即  $0.8378 \text{ rad}$ ), 将单个周期中大于 0.85 倍峰值的数据取平均值作为该周期的摩擦系数, 根据各个周期的摩擦系数获得的摩擦系数的演化曲线, 当演化曲线趋于稳定时取该阶段各周期摩擦系数的平均值作为索股与鞍座间接触稳定阶段的平均摩擦系数. 基于以上计算理论及方法对测得的索股两端张力数据进行处理获取摩擦系数.

将 4 根索股作为整体, 获得索股整体与鞍座间的摩擦系数演化曲线, 如图 10 所示. 由图 10 可知, 试验初期摩擦系数由较小值快速增大, 之后小幅波动并基本保持稳定, 这是由于索股钢丝表面附着了油污和氧化膜, 在摩擦过程中产生了一定的减磨作用, 使得试验初期的摩擦系数较小. 随后索股与鞍座间的持续动态接触导致索股钢丝表面的油污被磨掉、氧化膜破裂, 索股钢丝材料基体与鞍座之间直接发生接触, 索股与鞍座表面较大的微观凸峰被磨掉, 更多较小的微观凸峰加入到摩擦过程中, 索股与鞍座接触面的粗糙度增大, 导致摩擦系数快速增大. 随着循环周次的继续增大, 索股与鞍座接触面材料剥落形成的磨屑也参与到

摩擦过程中, 摩擦系数处于小幅波动状态, 随着摩擦过程的进行产生的磨屑被持续挤压而发生碎化和氧化并不断溢出, 当索股与鞍座接触面磨屑的产生和溢出速率基本相同时, 摩擦系数基本保持稳定. 索股整体与鞍座接触稳定阶段的平均摩擦系数为 0.310.

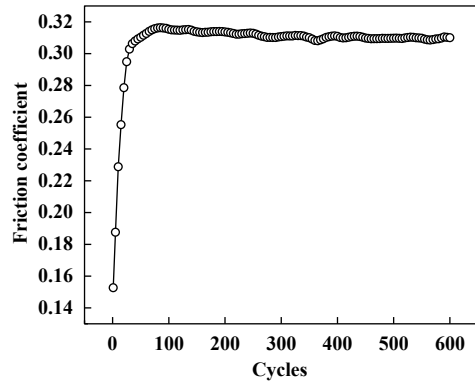


Fig. 10 Evolution curve of friction coefficient

图 10 摩擦系数演化曲线

进一步对索股 S1、S2 和 S3 个体的摩擦系数进行探究. 由于索股 S1、S2 和 S3 的接触关系不同, 如图 2(c) 所示, 鞍槽与隔板均为鞍座的一部分, 则索股 S1、S3 的摩擦副包括索股-索股、索股-鞍座, 索股 S2 的摩擦副为索股-鞍座, 为避免与摩擦系数的定义产生歧义并便于表征, 将根据式(4)获得的各索股的摩擦系数称作名义摩擦系数.

图 11 所示为不同索股的名义摩擦系数演化曲线及稳定阶段的平均名义摩擦系数, 由图 11(a) 可知, 不同索股的名义摩擦系数的变化趋势相似, 与索股整体与鞍座间的摩擦系数演化曲线一致, 均为试验初期由较低值快速增大, 之后基本保持稳定. 由图 11(b) 可知, 索股 S1、S2、S3 稳定阶段的平均名义摩擦系数分别为 0.336、0.311、0.279, 即索股 S1 > 索股 S2 > 索股 S3.



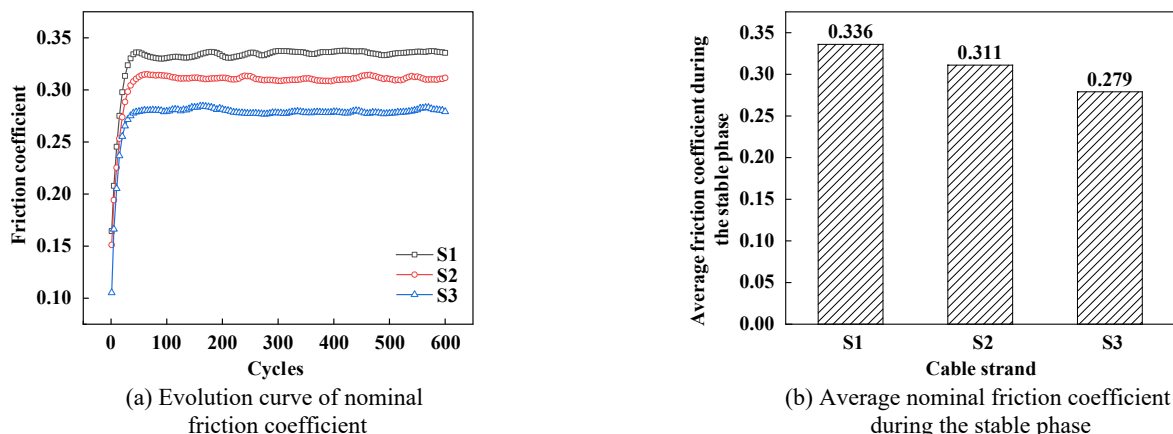


Fig. 11 Nominal friction coefficient of different cable strands

图11 不同索股的名义摩擦系数

依据对称结构关系可认为索股S4的名义摩擦系数与索股S2相同,则4根索股的稳定阶段平均名义摩擦系数的平均值为

$$\frac{0.336 + 2 \times 0.311 + 0.279}{4} = 0.309$$

可知索股个体稳定阶段平均摩擦系数的平均值与4根索股整体与鞍座间接触稳定阶段的平均摩擦系数一致,说明以名义摩擦系数表征索股个体的摩擦水平具备可靠性.

#### 4 端部接触压力

图12所示为循环周次为600次时单个加载周期中鞍座固定端与加载端接触压力的变化曲线,由图12可知,加载端接触压力的变化趋势与加载施加的交变载荷[图2(d)]基本一致,变化范围为11.21~17.23 kN,而固定端接触压力的变化呈现出滞后性,初始阶段缓慢增大,随后曲线斜率陡增,快速增大到峰值后缓慢减小,之后又快速降低至谷值,其变化范围为12.69~

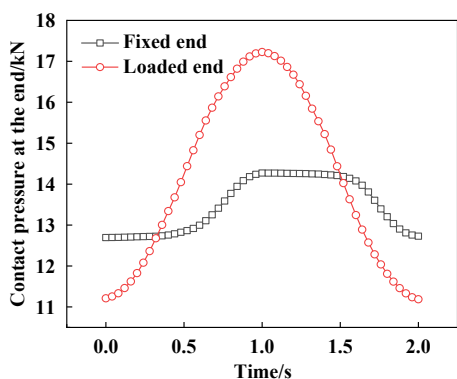


Fig. 12 Contact pressure at the saddle end

图12 鞍座端部接触压力

14.27 kN,这是由于鞍座接触压力来源于索股施加的径向力,而索股产生的径向力的大小是由索股的张力大小决定的,鞍座两端的接触压力受到鞍座两侧索股张力的影响,试验中加载端一侧索股的张力变化趋势与试验中施加的加载力的变化趋势基本一致,因此加载端接触压力呈上述变化规律;由于索股与鞍座间摩擦力的平衡作用,固定端一侧索股的最大张力小于加载端一侧索股,索股与鞍座接触稳定后固定端一侧索股张力的变化范围在加载端一侧索股张力的变化范围之内,因此固定端接触压力的变化范围在加载端接触压力的变化范围之内.

为进一步探究加载力对鞍座端部接触压力的影响并便于对比固定端与加载端接触压力受加载力影响的差异,将固定端与加载端0~1 s各个时刻的接触压力减去各自0 s时的接触压力得到接触压力增量,将0~1 s各个时刻的加载力减去0 s时的加载力即预紧力得到加载力增量,获得加载力由谷值增至峰值区段中鞍座端部接触压力增量与加载力增量间的关系图,如图13所示.由图13可知,随着加载力增量的增大,加载端接触压力增量呈线性增大趋势,而固定端接触压力增量呈先几乎不变,然后缓慢增大的变化趋势,这是由于加载力增量较小时,加载力增量几乎被索股与鞍座间的摩擦力完全抵消,固定端一侧索股的张力基本不变,随着加载力增量的增大,摩擦力逐渐不足以平衡加载力增量,固定端一侧索股的张力逐渐增大,固定端接触压力也随之增大.固定端与加载端的最大接触压力增量分别为1.58 kN、6.02 kN.

#### 5 结论

a. 主缆各索股承受动态载荷时不同索股个体与

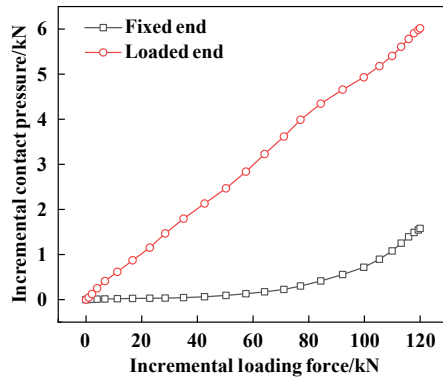


Fig. 13 Relationship between incremental contact pressure and incremental loading force at saddle end

图 13 鞍座端部接触压力增量与加载力增量间的关系

鞍座间的接触状态存在差异性. 当主缆索股整体承受较大动载时, 主缆索股与鞍座同一接触位置处, 外层索股与鞍座间更容易发生完全滑动, 索股间产生分层滑移, 不同索股的微滑移幅值由内层到外层依次增大.

b. 索股整体与鞍座间的摩擦系数呈快速增大-小幅波动并逐渐稳定的变化趋势, 且接触稳定阶段的平均摩擦系数为0.310. 索股S1、S2、S3稳定阶段的平均名义摩擦系数的大小关系为索股S1>索股S2>索股S3, 且4根索股稳定阶段平均名义摩擦系数的平均值与索股整体与鞍座间接触稳定阶段的平均摩擦系数一致, 名义摩擦系数表明索股个体的摩擦水平具备一定的可靠性.

c. 随着加载端力增大, 固定端接触压力呈现小幅波动(或稳定不变)-缓慢增大的变化趋势, 加载端接触压力增量呈线性增大趋势. 鞍座固定端和加载端接触压力的变化范围分别为12.69~14.27 kN和11.21~17.23 kN, 固定端接触压力呈缓慢增大-快速增大-缓慢减小-快速减小的变化趋势, 加载端接触压力与交变载荷的变化趋势基本一致.

## 参考文献

- [ 1 ] Xue Guangxiong. Serial handbooks of highway-bridge construction: suspension bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2014 (in Chinese) [薛光雄. 公路桥梁施工系列手册: 悬索桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014].
- [ 2 ] Wang Dagang, Ye Jihong, Wang Bo, et al. Review on the service safety assessment of main cable of long span multi-tower suspension bridge[J]. Applied Sciences, 2021, 11(13): 5920. doi: 10.3390/app11135920.
- [ 3 ] Xian Rong, Tang Maolin, Wu Lingzheng, et al. Research on main cable erection influential parameters of suspension bridge with span length over 2 000 M[J]. World Bridges, 2023, 51(3): 74–80 (in Chinese) [鲜荣, 唐茂林, 吴玲正, 等. 2 000 m级超大跨度悬索桥主缆架设影响参数研究[J]. 世界桥梁, 2023, 51(3): 74–80]. doi: 10.20052/j.issn.1671-7767.2023.03.011.
- [ 4 ] Wang Rengui, Shen Ruili, Wei Leyong, et al. Research on self-balanced system and mechanical characteristics of suspension bridge with main span of 2300 m[J]. Highway, 2023, 68(6): 14–20 (in Chinese) [王仁贵, 沈锐利, 魏乐永, 等. 主跨2300 m悬索桥自平衡体系及其力学特性研究[J]. 公路, 2023, 68(6): 14–20].
- [ 5 ] Meng Fanchao, Wang Rengui, Xu Guoping. Suspension bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2016 (in Chinese) [孟凡超, 王仁贵, 徐国平. 悬索桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016].
- [ 6 ] Fu Chunxiao, Lei Junqing. Detection and research on the current situation of main cables of existing suspension bridges[J]. World Bridges, 2002, 30(4): 70–74 (in Chinese) [付春晓, 雷俊卿. 既有悬索桥主缆现状的检测与研究[J]. 世界桥梁, 2002, 30(4): 70–74]. doi: 10.3969/j.issn.1671-7767.2002.04.018.
- [ 7 ] Yan Kun, Shen Ruili, Wang Tao, et al. Study on bending stiffness of main cable of long-span suspension bridge based on original curvature beam element[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(3): 89–95 (in Chinese) [严琨, 沈锐利, 王涛, 等. 基于初弯曲梁单元的大跨度悬索桥主缆弯曲刚度分析[J]. 公路交通科技, 2015, 32(3): 89–95]. doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2015.03.015.
- [ 8 ] Yau J D. Dynamic response analysis of suspended beams subjected to moving vehicles and multiple support excitations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 325(4-5): 907–922. doi: 10.1016/j.jsv.2009.04.013.
- [ 9 ] Cheng Zhenyu, Zhang Qinghua, Bao Yi, et al. Analytical models of frictional resistance between cable and saddle equipped with friction plates for multispan suspension bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(1): 04017118. doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001176.
- [ 10 ] Zhang Nan, Xia He, Guo Weiwei. Vehicle-bridge interaction analysis under high-speed trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 309(3-5): 407–425. doi: 10.1016/j.jsv.2007.07.064.
- [ 11 ] Xia He, Guo Weiwei. Lateral dynamic interaction analysis of a train-girder-pier system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 318(4-5): 927–942. doi: 10.1016/j.jsv.2008.05.002.
- [ 12 ] Hong K J, Yi Chongku, Lee Y K. Geometry and friction of helically wrapped wires in a cable subjected to tension and bending[J]. International Journal of Steel Structures, 2012, 12(2): 233–242. doi: 10.1007/s13296-012-2007-9.
- [ 13 ] Takena K, Sasaki M, Hata K, et al. Slip behavior of cable against saddle in suspension bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(2): 377–391. doi: 10.1061/(asce)0733-9445(1992)118:2(377).
- [ 14 ] Ji Lin, Chen Ce, Feng Zhaoxiang. A study on slip resistance between main cable and saddle on middle tower of three-tower suspension bridge[J]. Highway, 2007, 52(6): 1–6 (in Chinese) [吉林, 陈策, 冯

- 兆祥. 三塔悬索桥中塔主缆与鞍座间抗滑移试验研究[J]. 公路, 2007, 52(6): 1-6. doi: 10.3969/j.issn.0451-0712.2007.06.001.
- [15] Chen Ce, Ji Lin, Feng Zhaoxiang. Determination of friction coefficient between main cable and saddle of suspension bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(1): 120-123 (in Chinese) [陈策, 吉林, 冯兆祥. 悬索桥主缆与鞍座间摩擦系数的测定[J]. 中外公路, 2008, 28(1): 120-123]. doi: 10.14048/j.issn.1671-2579.2008.01.028.
- [16] Zhou Lingyuan, Li Qiao. Characteristics of friction between cable and saddle[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2011, 37(2): 117-121 (in Chinese) [周凌云, 李乔. 缆索与鞍座间的摩擦特性[J]. 兰州理工大学学报, 2011, 37(2): 117-121]. doi: 10.3969/j.issn.1673-5196.2011.02.027.
- [17] Zhang Qinghua, Li Qiao. Study on cable-saddle frictional characteristics of long-span suspension bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(4): 85-92 (in Chinese) [张清华, 李乔. 悬索桥主缆与鞍座间摩擦特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(4): 85-92]. doi: 10.15951/j.tmgcx.2013.04.006.
- [18] Su Yang, Fu Yafeng, Xie Jun, et al. Cable-saddle anti-slipping test of AS method suspension bridges[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(5): 66-73 (in Chinese) [苏洋, 伏亚锋, 谢俊, 等. 悬索桥AS法主缆索鞍抗滑移试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 66-73]. doi: 10.3969/j.issn.1674-0696.2022.05.10.
- [19] Gao Wenli. Study on dynamic contact and sliding behavior of main cable steel wire of suspension bridge[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020 (in Chinese) [高文丽. 悬索桥主缆钢丝动态接触与滑移行为研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020].
- [20] Wang Dagang, Zhu Huilong, Gao Wenli, et al. Study on dynamic contact and sliding mechanism of parallel steel wires of main cable of suspension bridge[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(11): 228-242 (in Chinese) [王大刚, 朱辉龙, 高文丽, 等. 悬索桥主缆平行钢丝动态接触与滑移机理研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(11): 228-242]. doi: 10.3901/JME.2021.11.228.
- [21] Wang Dagang, Wang Bo, Gao Wenli, et al. Dynamic contact behaviors of saddle materials for suspension bridge[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 134: 106031. doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106031.
- [22] Wang Dagang, Zhu Huilong, Xu Wei, et al. Contact and slip behaviors of main cable of the long-span suspension bridge[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 136: 106232. doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106232.
- [23] Zhu Huilong. Study on mechanical behavior and slip characteristics of main cable of long-span suspension bridge[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021 (in Chinese) [朱辉龙. 大跨度悬索桥主缆力学行为及滑移特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021].
- [24] Ji Shenzeng. Analysis of lateral force and friction-slip characteristics between main cable and saddle of suspension bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 (in Chinese) [季申增. 悬索桥主缆与索鞍间侧向力及摩擦滑移特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017].
- [25] Xiao Gang. Study on anti-sliding design of main cable and saddle of three-tower suspension bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015 (in Chinese) [肖刚. 三塔悬索桥主缆与鞍座抗滑移设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015].
- [26] Xiao Wei, Wang Zhiqiang, Wei Hongyi. Detailed saddle model considering stick-slip of the cable[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2016, 29(2): 22-27 (in Chinese) [肖伟, 王志强, 魏红一. 考虑缆索滑移的精细化索鞍模型[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2016, 29(2): 22-27]. doi: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2016.02.05.
- [27] Wang Xiangru. Study on fatigue damage mechanism of multi-axial fretting corrosion of steel wire[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018 (in Chinese) [王祥如. 钢丝多轴微动腐蚀疲劳损伤机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018].
- [28] Wang Dagang. Fretting damage behavior of steel wire and its fretting fatigue life prediction[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012 (in Chinese) [王大刚. 钢丝的微动损伤行为及其微动疲劳寿命预测研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012].
- [29] Feng Cun'ao, Zhang Dekun, Guo Yongbo, et al. A measurement to study on the frictional properties of friction hoist's liner based on arc method[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1899-1905 (in Chinese) [冯存傲, 张德坤, 郭永波, 等. 基于弧面法的摩擦式提升机衬垫摩擦性能测定[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1899-1905]. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.1407.
- [30] Wang Lu, Shen Ruili, Bai Lunhua, et al. Test for slip behavior and mechanical characteristics between main cable and saddle in suspension bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(9): 75-83,103 (in Chinese) [王路, 沈锐利, 白伦华, 等. 悬索桥主缆与索鞍间滑移行为及力学特征试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 75-83,103]. doi: 10.3969/j.issn.1001-7372.2018.09.009.
- [31] Wang Bo, Wang Dagang, Tang Liang, et al. Bending tribo-corrosion-fatigue behaviors between cable wire and saddle material in the suspension bridge[J]. Tribology International, 2023, 187: 108711. doi: 10.1016/j.triboint.2023.108711.