DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.112
开放科学(资源服务)标识码OSID:

# 滑动支座磨损对斜拉桥静动力性能的影响

周鸿[1],李冲[2],杨东辉[1],苑洁艺[2],伊廷华[1],郭冲圆[3]
(1. 大连理工大学 建设工程学院,辽宁 大连 116024; 2. 中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司,北京 100120; 3. 广州高速运营管理有限公司,广州 510220)

**摘　要:**滑动支座是斜拉桥常用的支座类型,也是桥梁重要的传力构件之一。滑动支座在运营过程中经常产生磨损,导致载荷传递和变形受到影响,对桥梁的安全运营造成隐患,因此,分析滑动支座性能变化对斜拉桥整体力学性能的影响具有重要意义。基于考虑支座磨损的斜拉桥有限元模型,分析滑动支座不同磨损程度对斜拉桥静动力性能的影响。以某斜拉桥为算例,建立考虑滑动支座磨损与其他边界条件的斜拉桥空间三维有限元模型,模拟滑动支座在逐渐磨损过程中的位移-摩擦力关系变化,对比分析滑动支座发生不同程度磨损时斜拉桥的模态性能、静力性能与动力响应的变化,获得了滑动支座受损时斜拉桥整体力学性能的退化规律。结果表明,滑动支座磨损使桥梁刚度增加,导致斜拉桥频率增加,尤其是纵飘与竖弯振型,显著增加了梁端轴力,降低了支座累计位移;支座不能适应主梁的变形需求,造成主梁与支座内力积聚,受损风险增加,影响桥梁的安全运营。

**关键词:**斜拉桥;力学性能;滑动支座;支座磨损;有限元;性能演变
**中图分类号:**U448.27　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-6717(2026)04-0170-09

# Effects of sliding bearing wear on the static and dynamic performance of cable-stayed bridges

*ZHOU Hong*[1], *LI Chong*[2], *YANG Donghui*[1], *YUAN Jieyi*[2], *YI Tinghua*[1], *GUO Chongyuan*[3]
(1. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China; 2. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100120, P. R. China; 3. Guangzhou Expressway Operation Management Co., Ltd., Guangzhou 510220, P. R. China)

**Abstract:** Sliding bearings represent a prevalent type of bearing in cable-stayed bridges, and are also one of the important force-transmitting components of bridges. Sliding bearings are often worn during operation, resulting in the load transfer function and the displacement and rotation deformation function being affected, and there are certain hidden dangers to the safe operation of bridges. Therefore, it is of great significance to analyze the

**收稿日期:**2024-09-10
**基金项目:**深圳市科技计划(CJGJZD20210408092601005);国家自然科学基金(52322807、52478303、52438003)
**作者简介:**周鸿(1998- ),男,博士生,主要从事桥梁健康监测研究,E-mail:22006082@mail.dlut.edu.cn。
杨东辉(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:dhyang@dlut.edu.cn。

**Received:** 2024-09-10
**Foundation items:** Shenzhen Science and Technology Program (No. CJGJZD20210408092601005); National Natural Science Foundation of China (Nos. 52322807, 52478303, 52438003)
**Author brief:** ZHOU Hong (1998- ), PhD candidate, main research interest: bridge health monitoring, E-mail: 22006082@mail.dlut.edu.cn.
YANG Donghui (corresponding author), professor, doctorial supervisor, E-mail: dhyang@dlut.edu.cn.

influence of sliding bearing performance changes on the overall mechanical properties of cable-stayed bridges. Based on the finite element model of cable-stayed bridges considering bearing wear, this paper analyzes the influence of sliding bearings on the static and dynamic performance of cable-stayed bridges in different degrees of wear. Taking a cable-stayed bridge as an example, a spatial three-dimensional finite element model of a cable-stayed bridge considering sliding bearing wear and other boundary conditions is established. The displacement-friction relationship of sliding bearings during progressive wear is simulated. The modal performance, static performance and dynamic response of the cable-stayed bridge are comparatively analyzed when the sliding bearings are worn to different degrees, and the degradation law of the overall mechanical properties of the cable-stayed bridge is obtained when the sliding bearing is damaged. The findings of the study demonstrate that the occurrence of sliding bearing wear leads to an augmentation in bridge stiffness. This, in turn, results in an escalation in the frequencies of the cable-stayed bridge, especially for longitudinal drift and vertical bending modes, increases the girder end axial force significantly and reduces the cumulative bearing displacement. The bearing cannot adapt to the deformation needs of the girder, resulting in a buildup of internal forces in the girder and bearings.

**Keywords:** cable-stayed bridge; mechanical properties; sliding bearing; bearing wear; finite element model; performance evolution

近年来,中国的桥梁建设突飞猛进,相继建成了一大批大跨径桥梁。大跨径桥梁是重要的交通枢纽,须确保其安全运营[1-3]。作为桥梁的重要构件,支座连接上部结构与下部结构,能有效传递桥梁上部结构的竖向荷载、水平荷载,并适应主梁自由变形和转动[4-7]。为适应主梁的变形要求,滑动支座一直处于运动中,长时间往复运动不可避免地发生损伤或出现病害,影响支座的使用寿命,最终影响桥梁的安全运营[8-10]。

在使用过程中,支座会产生性能变化,如何评判这些性能变化对结构本身安全的影响一直是工程界关心的问题。Ates等[11]通过一个带球形支座的斜拉桥数值算例分析了地震作用对桥面与桥塔响应的影响。陈彦铭等[12]通过现场试验对斜拉桥进行模型修正,发现考虑支座摩阻效应能获得更好的模型修正结果。Aloupis等[13]发现支座性能劣化会导致斜拉桥主梁的中性轴上移。Kim等[14]提出了一种基于摩擦系数变化的损伤支座模型,模拟分析了支座损伤前后桥梁的实际抗震行为。罗乐根等[15]研究了盆式支座不同性能下的滑动摩擦系数,分析了滑动摩擦系数对多塔斜拉桥抗震性能的影响。Soneji等[16]探究了支座类型及支座参数对斜拉桥抗震性能的影响,确定了减小桥梁反应的支座性能参数的最佳取值。赵桂峰等[17]研究了支座在腐蚀环境中的摩擦系数变化曲线,验证了该性能劣化对港珠澳大桥全寿命周期内的抗震性能存在不利影响。Wu等[18]基于时变温度-位移非线性模型提出了支座异常位移和超限位移的预警方法,针对桥梁滑动支座在运行环境条件下的滑动摩擦,提出了一种基于温度-位移滞后模型的支座滑动摩擦异常预警方法[19]。当前研究多针对支座性能参数变化,着重分析支座劣化对桥梁抗震性能的影响,但对支座劣化影响斜拉桥静动力性能的研究较少。

笔者以某斜拉桥为例,建立能模拟滑动支座磨损的斜拉桥有限元模型,分析滑动支座磨损对斜拉桥静动力性能的影响。

## 1　桥梁介绍

### 1.1　主体结构概况

某斜拉桥为独塔双索面钢箱梁斜拉桥,跨径383 m+322 m,为提高结构的刚度和改善斜拉桥的内力分布,在右侧跨布置2个辅助墩,将右侧跨分成197 m+63 m+62 m三跨。桥型布置如图1所示。主梁为扁平钢箱梁,索塔为钢筋混凝土结构,斜拉索采用平行钢丝拉索。

该斜拉桥结构体系为半飘浮支承体系:在塔墩、辅助墩、过渡墩分别安装了竖向支座,塔墩位置额外安装了横向抗风支座,辅助墩、过渡墩处的竖向支座一侧为单向活动支座,另一侧为双向活动支座。上述边界条件均在有限元模型中考虑。

### 1.2　支座概况

作为桥梁重要的传力构件,支座将上部结构的内力与变形传递至下部结构,并允许主梁在一定范围内自由变形和转动。该斜拉桥采用的支座为球形钢支座,示意图如图2所示。作为滑动支座的一种,该支座传力可靠,容许支座位移大,转动灵活,并允许支座在较大转角范围内自由转动。球形钢支座通过球面聚四氟乙烯板的滑动来实现桥梁上

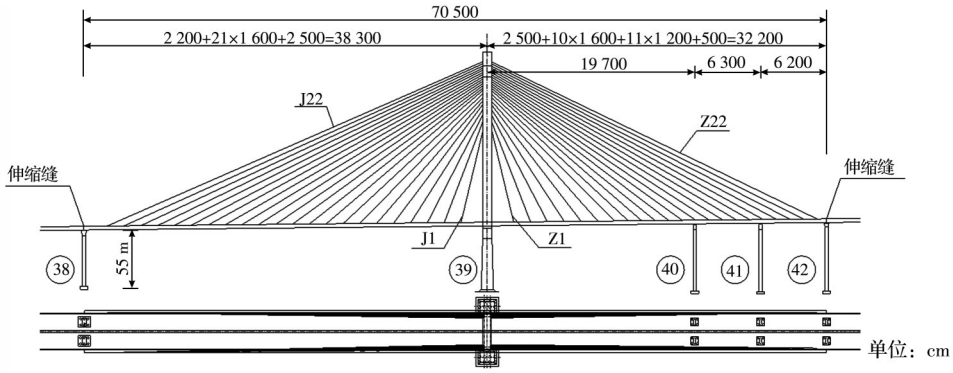



**图1 斜拉桥桥型布置图**

**Fig. 1 Arrangement of cable-stayed bridge**

下部结构间的相对平动与转动。转动力矩小,只与支座球面半径及聚四氟乙烯板的摩擦系数有关,支座各向转动性能一致。该支座类型被广泛应用于宽桥、曲线桥及大跨径桥梁。

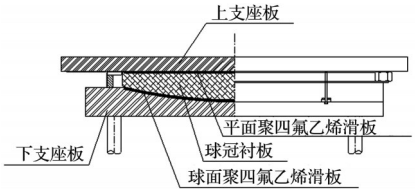



**图2 支座示意图**

**Fig. 2 Schematic diagram of bearing**

作为滑动支座的核心构件,聚四氟乙烯滑板能有效减小支座在滑动、转动等运动过程中的摩阻力,能避免支座主要承力构件的直接接触与磨损。根据滑板磨损程度,运营过程中滑动支座的工作状态分为4个阶段:1)正常状态(硅脂充足)→2)硅脂耗尽(干磨初期)→3)外露滑板磨损殆尽(不锈钢镜面与支座球冠钢件对磨初期)→4)不锈钢镜面磨损。各阶段对应的滑动摩擦系数$\mu$分别为:0.01、0.03、0.08、0.15[15]。

## 2 斜拉桥建模

### 2.1 主体结构建模

利用ANSYS软件建立斜拉桥计算模型。主梁单元长度根据吊杆的实际间距进行离散,采用三维梁单元(Beam4)进行模拟,截面与实际钢箱梁截面属性一致。主梁采用鱼骨形式进行建模,主梁质量与刚度都集中到轴线上,主梁单元通过两边伸出的刚臂与斜拉索相连。斜拉索采用空间杆单元(Link10)。全桥共由347节点、442个单元组成,分别为主梁46个单元,斜拉索88个单元,鱼骨刚臂94个单元,桥塔122个单元,辅助墩与过度墩72个单元,其余附属单元20个。桥梁模型如图3所示。

### 2.2 支座建模

在ANSYS中采用COMBIN39单元模拟滑动

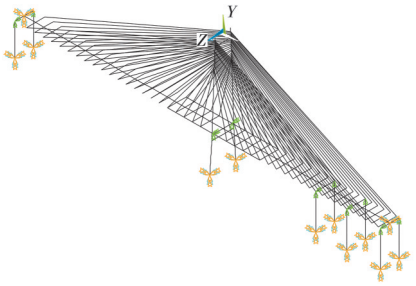



**图3 斜拉桥有限元模型**

**Fig. 3 Finite element model of cable-stayed bridge**

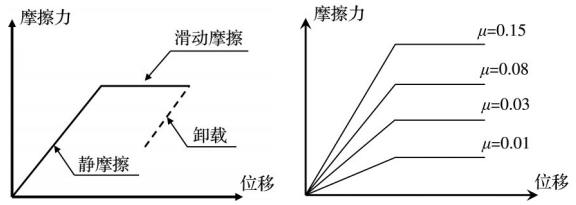
支座的静摩擦与滑动摩擦阶段。COMBIN39是一种非线性弹簧单元,该单元通过自行设置广义力-变形曲线来模拟结构构件所需的性能。此外,通过KEYOPT选项使该曲线具有滞回效应,对模拟支座的摩擦有重要意义,适用于模拟滑动支座的力学行为。

滑动支座单元的变形与滑动力关系如图4(a)所示。在静摩擦阶段,支座位移与摩擦力呈线性关系,此时的位移可认为是剪切位移;在滑动摩擦阶段,摩擦力达到极限滑动力,支座开始产生滑动,且随着荷载的增大,支座位移不断增大,摩擦力仍维持滑动摩擦力不变。当外力减小时,产生的摩擦力小于极限滑动摩擦力后,停止滑动并回到剪切位移阶段,且剪切位移随摩擦力的减小而减小。随着滑动摩擦系数的增加,支座产生的摩擦力不断增大,反映了桥梁支座性能不断劣化的过程。其位移-摩擦力关系如图4(b)所示。

为了准确模拟桥梁的各项性能,同样将伸缩缝与阻尼器作为边界条件进行考虑。伸缩缝使用COMBIN14弹簧-阻尼单元模拟,弹簧刚度设置为$10^6$ N·m。阻尼器使用COMBIN37非线性弹簧-阻尼单元模拟,阻尼参数$C=2\,000$ kN/m,速度指数$\alpha=0.4$。

### 2.3 模型参数确定

在斜拉桥建模时,各构件按照实际几何尺寸与质量建模,但需要额外输入斜拉桥的成桥索力和阻




(a) 单元行为　　(b) 位移-摩擦力关系

**图 4　COMBIN39 单元模拟支座磨损**

**Fig. 4　Bearing wear simulated with COMBIN39 element**

尼比。由于大跨斜拉桥具有显著非线性结构,斜拉索的索力直接影响拉索刚度,也影响桥梁的整体刚度,因此,斜拉桥建模时索力必须与成桥索力一致,才能保证桥梁整体刚度一致。此外,阻尼是抑制桥梁振动的重要因素,在动力响应分析中,合理的阻尼比能保证可靠的动力响应数据。

2.3.1　斜拉索索力调整

斜拉索单元需要输入初应变作为斜拉索的初始张拉索力,错误的初应变输入会导致斜拉索力与成桥索力不一致,产生严重的内力误差。斜拉桥具有较大的几何非线性,在索力作用下,桥面系发生位移,索长变短,索应变减小,索力减小。此时直接施加成桥索力计算得到的初应变显然得不到正确的目标索力,成桥索力必然会小于输入索力,因此必须对索力进行调整。通过设计的自动迭代程序[20]对斜拉桥中44组斜拉索索力进行调整,最终误差小于1%,结果如表1所示。

**表 1　斜拉索索力迭代结果**

**Table 1　Iterative results of cable forces**

| 斜拉索编号 | 成桥索力/kN | 迭代索力/kN | 误差/% | 斜拉索编号 | 成桥索力/kN | 迭代索力/kN | 误差/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| J1 | 2 288.68 | 2 280.83 | −0.34 | Z1 | 2 293.32 | 2 295.97 | 0.12 |
| J2 | 2 257.10 | 2 244.21 | −0.57 | Z2 | 2 261.96 | 2 262.99 | 0.05 |
| J3 | 2 415.75 | 2 398.85 | −0.70 | Z3 | 2 418.30 | 2 416.95 | −0.06 |
| J4 | 2 503.16 | 2 481.24 | −0.88 | Z4 | 2 500.43 | 2 496.30 | −0.17 |
| J5 | 2 631.52 | 2 607.77 | −0.90 | Z5 | 2 620.82 | 2 614.64 | −0.24 |
| J6 | 2 648.43 | 2 624.02 | −0.92 | Z6 | 2 627.36 | 2 619.43 | −0.30 |
| J7 | 2 758.29 | 2 730.92 | −0.99 | Z7 | 2 724.86 | 2 715.62 | −0.34 |
| J8 | 3 015.28 | 2 988.51 | −0.89 | Z8 | 2 964.31 | 2 953.02 | −0.38 |
| J9 | 3 267.82 | 3 238.42 | −0.90 | Z9 | 3 197.05 | 3 185.09 | −0.37 |
| J10 | 3 418.57 | 3 391.77 | −0.78 | Z10 | 3 337.00 | 3 324.66 | −0.37 |
| J11 | 3 522.65 | 3 499.12 | −0.67 | Z11 | 3 431.92 | 3 419.23 | −0.37 |
| J12 | 3 771.05 | 3 751.08 | −0.53 | Z12 | 3 682.89 | 3 667.70 | −0.41 |
| J13 | 3 767.58 | 3 751.75 | −0.42 | Z13 | 4 171.53 | 4 154.04 | −0.42 |
| J14 | 4 012.11 | 3 999.27 | −0.32 | Z14 | 4 431.21 | 4 412.62 | −0.42 |
| J15 | 4 253.91 | 4 245.96 | −0.19 | Z15 | 4 542.15 | 4 522.62 | −0.43 |
| J16 | 4 392.55 | 4 389.60 | −0.07 | Z16 | 4 552.75 | 4 532.54 | −0.44 |
| J17 | 4 577.74 | 4 579.79 | 0.04 | Z17 | 4 562.06 | 4 541.49 | −0.45 |
| J18 | 5 055.32 | 5 063.13 | 0.15 | Z18 | 4 769.94 | 4 749.20 | −0.43 |
| J19 | 5 181.63 | 5 194.79 | 0.25 | Z19 | 5 074.11 | 5 051.48 | −0.45 |
| J20 | 5 163.36 | 5 179.62 | 0.32 | Z20 | 5 229.83 | 5 207.35 | −0.43 |
| J21 | 5 287.19 | 5 307.75 | 0.39 | Z21 | 5 484.41 | 5 461.93 | −0.41 |
| J22 | 5 260.99 | 5 285.52 | 0.47 | Z22 | 5 488.33 | 5 466.13 | −0.40 |

2.3.2　阻尼比设置

大跨桥梁模型在振动分析时需要设置正确的阻尼比,否则无阻尼体系会导致较大的振动响应,产生不切实际的结果。阻尼比按照Rayleigh阻尼方法[21]设置,即

$$\begin{pmatrix}\xi_m\\ \xi_n\end{pmatrix}=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}1/\omega_m & \omega_m\\ 1/\omega_n & \omega_n\end{pmatrix}\begin{pmatrix}a_0\\ a_1\end{pmatrix} \tag{1}$$

式中:$\xi$为阻尼比;$\omega$为频率;$m$、$n$为阶次;$a_0$、$a_1$为Rayleigh阻尼系数。斜拉桥阻尼比一般为0.3%[22],即$\xi_m=\xi_n=0.003$。$\omega_m$通常取多自由度体系的基频,$\omega_n$则在动力反应有显著贡献的高阶振型中选取。斜拉桥的频率结果如表2所示。$\omega_m=0.206\,84\times 2\pi$,$\omega_n$选择第4阶竖弯对应的频率,即$\omega_n=0.327\,39\times 2\pi$,因为竖弯在桥梁动力反应中有显著贡献,而其他振型贡献较小[23]。由此可计算出$a_0$与$a_1$,输入ANSYS中,实现阻尼比的添加。

表2 斜拉桥频率与振型结果

Table 2 Frequencies and modes of cable-stayed bridge

| 阶次 | 频率/Hz | 振型 |
|---|---|---|
| 1 | 0.21 | 索塔横弯 |
| 2 | 0.21 | 纵漂 |
| 3 | 0.32 | 主梁横弯 |
| 4 | 0.33 | 竖弯 |
| 5 | 0.48 | 主梁横弯 |
| 6 | 0.51 | 41#辅助墩纵弯 |
| 7 | 0.51 | 41#辅助墩纵弯 |
| 8 | 0.51 | 40#辅助墩纵弯 |
| 9 | 0.51 | 40#辅助墩纵弯 |
| 10 | 0.57 | 竖弯 |
| 11 | 0.68 | 42#辅助墩纵弯 |
| 12 | 0.68 | 42#辅助墩纵弯 |
| 13 | 0.70 | 扭转 |
| 14 | 0.70 | 41#辅助墩横弯 |
| 15 | 0.71 | 40#辅助墩横弯 |
| 16 | 0.72 | 竖弯 |
| 17 | 0.81 | 38#辅助墩纵弯 |
| 18 | 0.81 | 38#辅助墩纵弯 |
| 19 | 0.85 | 主梁横弯 |
| 20 | 0.87 | 竖弯 |

## 3 滑动支座磨损对结构的影响分析

### 3.1 模态参数分析

改变滑动摩擦系数,模拟滑动支座发生磨损的情况。摩擦系数考虑支座的不同状态进行设置,即摩擦系数$\mu$设置为0.01、0.03、0.08、0.15。在ANSYS中计算求解斜拉桥模型频率,计算时考虑大变形效应、应力刚化效应,使用兰索斯方法求解结构的模态,提取桥梁前20阶频率结果,如表3所示。

支座发生磨损时,随着滑动摩擦系数的增大,频率逐渐增大。频率增大意味着桥梁的整体刚度增加,支座发生磨损时,提供的摩阻力大于设计状态,增加了轴向阻力,间接增加了整体刚度。其中基频基本未发生变化,自第2阶频率开始,随着滑动摩擦系数的增大,频率开始增加,最多增加了38.91%。受影响较大的频率是竖弯与纵飘对应的频率,而对其他振型对应的频率影响较小。

### 3.2 静力响应分析

改变滑动摩擦系数,模拟滑动支座发生磨损的情况,计算斜拉桥在自重与设计汽车荷载作用下的静力响应。该桥梁设计汽车荷载为汽车-超20级,按照荷载分布形式,将该荷载加载到主梁节点。计算时考虑大变形效应、应力刚化效应,改变滑动摩擦系数,计算并提取其响应。提取的响应有塔顶偏

表3 支座磨损下频率变化

Table 3 Frequency changes under bearing wear

| 阶次 | $\mu=0.01$的频率/Hz | $\mu=0.03$的频率/Hz | 变化/% | $\mu=0.08$的频率/Hz | 变化/% | $\mu=0.15$的频率/Hz | 变化/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.21 | 0.21 | 0.01 | 0.21 | 0.01 | 0.21 | 0.01 |
| 2 | 0.21 | 0.29 | 37.49 | 0.29 | 38.46 | 0.29 | 38.91 |
| 3 | 0.32 | 0.33 | 3.01 | 0.34 | 4.09 | 0.34 | 4.54 |
| 4 | 0.33 | 0.43 | 30.36 | 0.44 | 33.25 | 0.44 | 34.22 |
| 5 | 0.48 | 0.48 | 0.68 | 0.48 | 0.92 | 0.48 | 1.03 |
| 6 | 0.51 | 0.51 | 0.00 | 0.51 | 1.29 | 0.63 | 24.27 |
| 7 | 0.51 | 0.51 | 0.00 | 0.51 | 1.29 | 0.68 | 33.67 |
| 8 | 0.51 | 0.51 | 0.00 | 0.63 | 22.46 | 0.68 | 31.98 |
| 9 | 0.51 | 0.51 | 0.00 | 0.68 | 31.98 | 0.70 | 36.82 |
| 10 | 0.57 | 0.62 | 8.92 | 0.68 | 18.18 | 0.71 | 24.38 |
| 11 | 0.68 | 0.68 | 0.00 | 0.70 | 3.66 | 0.75 | 10.20 |
| 12 | 0.68 | 0.68 | 0.00 | 0.71 | 5.24 | 0.80 | 17.42 |
| 13 | 0.70 | 0.70 | 0.34 | 0.74 | 6.06 | 0.81 | 15.64 |
| 14 | 0.70 | 0.71 | 1.52 | 0.80 | 13.16 | 0.81 | 15.25 |
| 15 | 0.71 | 0.73 | 2.61 | 0.81 | 13.52 | 0.87 | 22.56 |
| 16 | 0.72 | 0.79 | 9.22 | 0.81 | 11.82 | 0.88 | 21.34 |
| 17 | 0.81 | 0.81 | 0.00 | 0.87 | 7.95 | 0.89 | 9.90 |
| 18 | 0.81 | 0.81 | 0.00 | 0.88 | 8.12 | 0.94 | 15.59 |
| 19 | 0.85 | 0.87 | 1.86 | 0.89 | 4.39 | 0.98 | 14.53 |
| 20 | 0.87 | 0.87 | 0.67 | 0.94 | 7.82 | 1.04 | 19.42 |

位、斜拉索力、主梁挠度、主梁轴力、主梁剪力、主梁弯矩。支座磨损下静力响应结果如表4所示。

**表4　支座磨损下静力响应结果**

**Table 4　Static response results under bearing wear**

| $\mu$ | 位移/mm | | | | 主梁轴力/kN | | | | | 主梁剪力/kN | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 塔顶偏位 | 主跨跨中挠度 | 边跨跨中挠度 | 梁端纵向位移 | 38#墩顶 | 索塔处 | 40#墩顶 | 41#墩顶 | 42#墩顶 | 38#墩顶 | 索塔处 | 40#墩顶 | 41#墩顶 | 42#墩顶 |
| 0.01 | 31.86 | 137.02 | 19.68 | 87.3 | 132.30 | 150 666 | 93 927 | 51 199 | 84.05 | 6 359.31 | 4 892.21 | 192.70 | 2 322.35 | 3 282.30 |
| 0.03 | 31.51 | 136.45 | 19.92 | 81.4 | 268.53 | 150 339 | 93 680 | 51 136 | 147.76 | 6 357.18 | 4 893.14 | 189.14 | 2 322.47 | 3 282.04 |
| | (1.10%) | (0.42%) | (1.22%) | (6.81%) | (102%) | (0.22%) | (0.26%) | (0.12%) | (75.80%) | (0.03%) | (0.02%) | (1.85%) | (0.01%) | (0.01%) |
| 0.08 | 30.14 | 135.02 | 20.55 | 66.1 | 608.67 | 149 535 | 93 086 | 50 984 | 300.80 | 6 352.08 | 4 895.72 | 179.25 | 2 323.28 | 3 282.31 |
| | (5.40%) | (1.46%) | (4.42%) | (18.79%) | (360%) | (0.75%) | (0.90%) | (0.42%) | (258%) | (0.11%) | (0.07%) | (6.98%) | (0.04%) | (0.00%) |
| 0.15 | 30.03 | 134.42 | 20.57 | 46.7 | 1 086.95 | 149 137 | 92 866 | 50 760 | 529.50 | 6 347.06 | 4 895.67 | 180.35 | 2 324.46 | 3 282.01 |
| | (5.74%) | (1.90%) | (4.52%) | (29.36%) | (721%) | (1.01%) | (1.13%) | (0.86%) | (529%) | (0.19%) | (0.07%) | (6.41%) | (0.09%) | (0.01%) |

| 主梁弯矩/(kN·m) | | 斜拉索力/kN | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 主跨跨中 | 边跨跨中 | J22 | J10 | J1 | Z1 | Z10 | Z22 |
| 6 747.28 | 2 589.27 | 5 056.54 | 4 185.05 | 2 366.36 | 2 396.46 | 3 802.37 | 6 023.05 |
| 6 758.07 | 2 529.75 | 5 057.43 | 4 184.96 | 2 366.46 | 2 396.39 | 3 801.66 | 6 023.21 |
| (0.16%) | (2.30%) | (0.02%) | (0.00%) | (0.00%) | (0.00%) | (0.02%) | (0.00%) |
| 6 786.68 | 2 369.09 | 5 059.55 | 4 184.75 | 2 366.77 | 2 396.19 | 3 799.73 | 6 023.72 |
| (0.58%) | (8.50%) | (0.06%) | (0.01%) | (0.02%) | (0.01%) | (0.07%) | (0.01%) |
| 6 780.41 | 2 371.51 | 5 061.43 | 4 184.65 | 2 366.79 | 2 396.17 | 3 799.97 | 6 024.35 |
| (0.49%) | (8.41%) | (0.10%) | (0.01%) | (0.02%) | (0.01%) | (0.06%) | (0.02%) |

注:括号内为不同支座磨损程度下响应与初始值的差异百分比。

由表4可知,位移方面,塔顶偏位随着支座磨损的增加而略微减小,主跨跨中挠度减小,边跨跨中挠度略微增加,受支座磨损程度增加的影响,梁端位移最大降低了29.36%。支座磨损时自由滑动能力减弱,阻碍桥梁主梁与桥墩间的正常滑动。随着支座磨损的加剧,滑动摩擦系数增大,梁端纵向位移受到的阻力也逐渐增大,梁端纵向位移随着滑动摩擦系数的增大而逐渐减小。位移数据反映了桥梁整体刚度的增加,与模态参数分析结果一致。轴力方面,斜拉桥主梁两端位置的轴力发生了较大变化,从支座未发生磨损到完全磨损,主梁两端位置的轴力增加较大,轴力增加了约7.2倍。而索塔与辅助墩位置处的主梁轴力有少许减小,主梁轴力在中间位置变小,而在梁端位置增加。主梁剪力仅在38#墩与40#墩位置少许降低,其余位置基本不变。主跨跨中弯矩随着支座磨损的加深而少许增大,同时,边跨跨中的弯矩发生少量减小。支座磨损对斜拉索力的影响较小,影响最大的是J22与Z22最外侧两根斜拉索,这是主梁两端轴力变化较大造成的。由此可见,支座磨损影响最大的是梁端纵向位移与主梁轴力,不同位置的轴力受到的影响不同,梁端受到的影响最大,因为支座磨损直接增大了提供给主梁梁端的纵向摩擦力,抑制了梁端纵向位移,进而导致梁端轴力增大。由于轴力变化被分散到全桥,远离梁端的位置受影响较小。支座不能适应主梁的变形需求,造成主梁与支座内力积聚,受损风险增加,影响到桥梁的安全运营。

### 3.3　动力响应分析

使用移动力通过斜拉桥全桥的方式模拟运营状态下车辆过桥工况,验证滑动支座磨损对桥梁动力响应的影响。移动力设置为300 t,模拟重车车队过桥的情形,如图5所示。提取车辆过桥时桥梁的动力响应,分析支座磨损对桥梁动力响应的影响,响应提取位置如图5所示。车辆以60 km/h的速度驶过斜拉桥全桥,设置的积分步长为1 m,通过全桥共42.3 s。采用的瞬态分析方法为完全瞬态分析法,提取的响应有主梁挠度最大位置的挠度时程,左侧梁端位置的纵桥向位移,提取的纵桥向位移包含主梁梁端的绝对位移及38#墩的墩顶位移,以此计算出支座的滑动位移及支座发生的累计位移。支座滑动位移与累计位移的数据中增加了$\mu$=0.015、0.02、0.025的情况,以更好地反映支座磨损对桥梁性能的影响规律。挠度时程反映了桥梁行车的安全性与舒适性,纵桥向位移与支座累计位移反映了其对支座的磨损状况。支座磨损下车辆过桥时的动力响应时程曲线如图6所示。

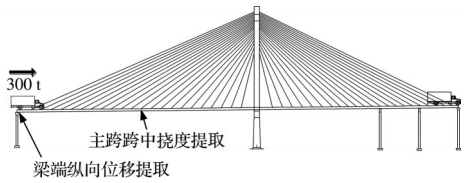
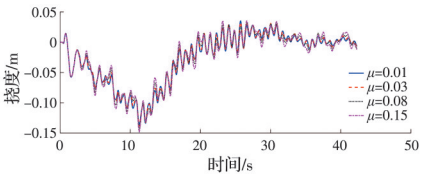
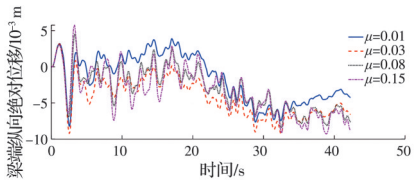



**图5 行车示意**

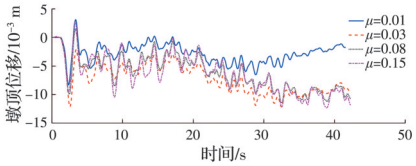
**Fig. 5 Driving schematic**



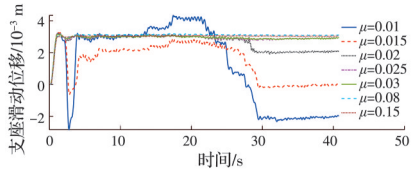

(a) 主梁主跨跨中挠度时程



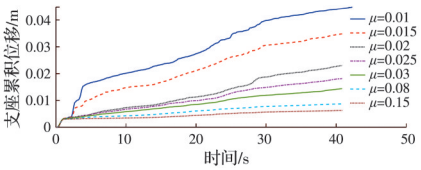

(b) 梁端纵向绝对位移时程




(c) 墩顶位移时程




(d) 支座滑动位移时程




(e) 支座累积位移

**图6 支座磨损下的动力响应时程**

**Fig. 6 Time course of dynamic response under bearing wear**

由图6可以看出,滑动支座磨损对挠度的影响很小,仅对时程曲线的波动程度有轻微影响。支座磨损对梁端的纵桥向位移影响较大,随着支座磨损的加剧,梁端纵向绝对位移与墩顶位移在行车结束后均有偏离初始点的趋势,表明支座磨损加剧后支座不能自由滑动,位移后很难返回原位。由图6(d)可以看出,随着支座磨损程度的增加,其自由滑动能力大幅减弱。在$\mu>0.02$后,支座仅能在车辆刚上桥时发生位移(刚好从该支座上方经过),车辆远离该支座后,支座仅产生微幅滑动,不能自由滑动并复位。由图6(e)可以看出,随着支座磨损程度的增加,其累积位移显著降低,支座完全磨损时较支座完好状态时累积位移约降低85%。从上述现象可以看出,支座磨损会阻碍桥梁主梁与桥墩之间的正常滑动。随着磨损的增加,支座丧失了大部分自由滑动能力,导致支座在大部分时候不能滑动,累计位移受支座磨损影响显著降低,丧失绝大部分的自由变形能力。

## 4 结论

斜拉桥滑动支座在运营过程中承受上部结构带来的竖向荷载与水平荷载,并保证主梁的自由变形能力。滑动支座磨损导致桥梁静动力性能变化。基于非对称单塔斜拉桥建立有限元模型,考虑斜拉桥的边界条件,利用COMBIN39单元模拟桥梁支座发生磨损,探究支座磨损对非对称单塔斜拉桥各项性能的影响。

1)滑动支座磨损导致各阶频率不同程度增大,最大增幅达38.9%,说明支座磨损导致桥梁的整体刚度增加。支座磨损对纵漂、竖弯等振型影响较大,而对横弯等振型影响较小。

2)滑动支座磨损直接增大了提供给主梁的纵向摩擦力,导致主梁梁端轴力显著增大。主梁与支座内力积聚,受损风险增加,影响桥梁的安全运营。其他间接构件或者内力受到的影响较小,可以忽略不计。

3)支座磨损对主梁竖向振动影响不大,主要影响主梁的纵桥向振动与支座位移。随着磨损加剧,支座的自由滑动能力明显减弱,累计位移显著降低,最大约降低85%,表明支座磨损严重时会丧失绝大部分自由变形能力。

## 参考文献

[1] 肖发平, 汪大洋, 张永山, 等. 基于盆式支座与黏滞阻尼器的某大跨度斜拉桥减震研究[J]. 公路, 2017, 62(8): 89-95.
Xiao F P, Wang D Y, Zhang Y S, et al. Research on damping of a long span cable-stayed bridge based on pot bearing and viscous damper[J]. Highway, 2017, 62(8): 89-95. (in Chinese)

[2] 单德山, 罗凌峰, 李乔. 桥梁健康监测2019年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 115-125.

Shan D S, Luo L F, Li Q. State-of-the-art review of the bridge health monitoring in 2019[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 115-125. (in Chinese)

[3] 张宁, 余凯, 崔闯, 等. 大跨度桥梁钢桥面板跨尺度疲劳损伤评估方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(3): 161-170.
Zhang N, Yu K, Cui C, et al. Multiscale fatigue damage assessment method for orthotropic steel deck of long-span bridges[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(3): 161-170. (in Chinese)

[4] Zheng X, Yi T H, Zhong J W, et al. Rapid evaluation of load-carrying capacity of long-span bridges using limited testing vehicles[J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(4): 04022008.

[5] Lin S W, Du Y L, Yi T H, et al. Model updating using bridge influence lines based on an adaptive metamodel global optimization method[J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(3): 04022003.

[6] Yang D H, Zhou H, Yi T H, et al. Joint deterioration detection based on field-identified lateral deflection influence lines for adjacent box girder bridges[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(10): e3053.

[7] Lin S W, Du Y L, Yi T H, et al. Influence lines-based model updating of suspension bridges considering boundary conditions[J]. Advances in Structural Engineering, 2023, 26(2): 316-328.

[8] 罗吉庆, 张鑫敏, 梅波, 等. 悬索桥关键约束装置监检测融合分析与评估[J]. 公路, 2023, 68(5): 94-102.
Luo J Q, Zhang X M, Mei B, et al. Fusion analysis and evaluation of monitoring and testing of key restraint devices of suspension bridge[J]. Highway, 2023, 68(5): 94-102. (in Chinese)

[9] 周鑫. 基于温致位移监测的钢桁梁桥支座纵向滑移性能评估[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
Zhou X. Evaluation of longitudinal sliding performance of steel truss bridge bearings based on temperature-induced displacement monitoring[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022. (in Chinese)

[10] 杨东辉, 管泽鑫, 伊廷华, 等. 考虑区分车辆运行状态的桥梁车载统计分析及模拟[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(6): 85-93.
Yang D H, Guan Z X, Yi T H, et al. Statistical analysis and simulation of vehicle load considering traffic states division[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 85-93. (in Chinese)

[11] Ates S, Soyluk K, Dumanoglu A A, et al. Earthquake response of isolated cable-stayed bridges under spatially varying ground motions[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2009, 31(6): 639-662.

[12] 陈彦铭, 朱利明, 邢世玲, 等. 考虑支座摩阻的半漂浮体系斜拉桥模型修正[J]. 现代交通技术, 2021, 18(4): 57-60.
Chen Y M, Zhu L M, Xing S L, et al. Model updating of semi-floating system cable-stayed bridge considering friction effect[J]. Modern Transportation Technology, 2021, 18(4): 57-60. (in Chinese)

[13] Aloupis C, Shenton Ⅲ H W, Chajes M J. Damage identification in cable-stayed bridges based on the behavior of neutral axis under traffic loading[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2024, 20(12): 2070-2081.

[14] Kim S H, Mha H S, Lee S W. Effects of bearing damage upon seismic behaviors of a multi-span girder bridge [J]. Engineering Structures, 2006, 28(7): 1071-1080.

[15] 罗乐根, 张迅, 张精岳. 支座滑板磨损对多塔斜拉桥抗震性能影响研究[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 104-109.
Luo Y G, Zhang X, Zhang J Y. Research on influence of bearing sliding plate wear on seismic performance of multi tower cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 104-109. (in Chinese)

[16] Soneji B B, Jangid R S. Effectiveness of seismic isolation for cable-stayed bridges[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2006, 6(1): 77-96.

[17] 赵桂峰, 马玉宏, 简涛, 等. 摩擦摆支座性能劣化对港珠澳隔震桥梁全寿命期抗震性能的影响[J]. 中国公路学报, 2016, 29(12): 10-16.
Zhao G F, Ma Y H, Jian T, et al. Effects of performance deterioration of friction pendulum bearings on seismic behavior of Hong Kong-Zhuhai-Macao isolated bridges in life-cycle period[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(12): 10-16. (in Chinese)

[18] Wu G M, Yi T H, Yang D H, et al. Early warning method for bearing displacement of long-span bridges using a proposed time-varying temperature-displacement model[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(9): 04021068.

[19] Wu G M, Yi T H, Yang D H, et al. Friction anomaly alarm for bridge sliding bearings under operating environmental conditions[J]. Engineering Structures, 2023, 278: 115481.

[20] 李义强, 张彦兵, 杨丽. ANSYS中准确施加斜拉桥索力方法的研究[J]. 国防交通工程与技术, 2006, 4(1): 23-25.
Li Y Q, Zhang Y B, Yang L. A study of the accurate exertion of cable forces of cable-stayed bridges by ANSYS[J]. Traffic Engineering and Technology for

National Defence, 2006, 4(1): 23-25. (in Chinese)

[21] R. 克拉夫(Ray Clough), J. 彭津(Joseph Penzien). 结构动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Clough R, Penzien J. Dynamics of structures[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)

[22] 陈雷, 杨永斌, 王志鲁, 等. 弹性支承边界条件对桥梁共振与消振的影响机理分析[J]. 土木工程学报, 2024, 57(6): 13-25.
Chen L, Yang Y B, Wang Z L, et al. Mechanism analysis of influence of elastic support boundary conditions on bridge resonance and cancellation[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(6): 13-25. (in Chinese)

[23] 李光玲, 韩万水, 张路, 等. 极端制动车载下悬索桥伸缩缝服役状态评估[J]. 振动与冲击, 2022, 41(15): 186-195, 251.
Li G L, Han W S, Zhang L, et al. Service state evaluation for expansion joints of suspension bridge under extreme vehicle braking load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(15): 186-195, 251. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)