

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.008



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



空间缆悬索桥缆鞍系统的力学行为

谭正军¹, 王路¹, 古松¹, 沈锐利², 白伦华³

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031;
3. 佛山大学 土木与交通学院, 广东 佛山 528225)

摘要:为明确空间缆悬索桥缆鞍系统的力学行为,根据两类空间索鞍的结构特征,推导了侧向力合成理论,论证了两种空间索鞍的受力模式,以某空间缆悬索桥为例,利用ABAQUS建立切片数值模型,研究了两种空间索鞍内部钢丝传力特征、侧向压力分布模式以及摩擦阻力组成。结果表明:斜平面索鞍的受力模式与平面索鞍相同,缆鞍间的侧向力均由指向圆心的径向力引起;对于空间曲线索鞍,径向力约等于由竖弯和横弯产生的径向力的矢量和,空间曲线索鞍中,外侧压力大于内侧压力;鞍槽内部应力主要集中在局部接触区域,分布符合经典赫兹理论;上下层钢丝间的力链呈菱形,力值随深度逐渐增加,但在底层存在陡降;斜平面索鞍中,索鞍基座提供了摩擦阻力的86.4%,鞍侧仅占13.6%;相比之下,空间曲线索鞍的基座提供了摩擦阻力的86.62%,鞍侧提供了13.38%,在两种空间索鞍中,索鞍底面对摩擦阻力的贡献均远大于侧面。

关键词:空间缆悬索桥;缆鞍系统;力学行为;侧向力;理论推导;数值模拟

中图分类号:U443.38 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-09

Mechanical behavior of the cable-saddle system of the spatial main cable suspension bridge

TAN Zhengjun¹, WANG Lu¹, GU Song¹, SHEN Ruili², BAI Lunhua³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China;
3. School of Civil Engineering and Transportation, Foshan University, Foshan 528225, Guangdong, P. R. China)

Abstract: To clarify the mechanical behavior of the cable saddle system in spatial cable-stayed suspension bridges, based on the structural characteristics of two types of spatial cable saddles, a theory of lateral force synthesis was derived, and the force patterns of the two types of spatial cable saddles were demonstrated. Taking a certain spatial cable-stayed suspension bridge as an example, a slice numerical model was established using ABAQUS to study the internal wire force characteristics, lateral pressure distribution patterns, and friction resistance composition of the two types of spatial cable saddles. The results show that the force pattern

收稿日期:2024-11-25

基金项目:国家自然科学基金(52208209);四川省科技计划项目(2023NSFSC0891);广东省基础与应用基础研究基金(2020A1515110240)

作者简介:谭正军(1998-),男,主要从事悬索桥缆索系统研究,E-mail:tanzj_bridge@163.com。

王路(通信作者),男,副教授,E-mail:wanglu_bridge@163.com。

Received: 2024-11-25

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52208209); Sichuan Science and Technology Program (No. 2023NSFSC0891); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2020A1515110240)

Author brief: TAN Zhengjun (1998-), main research interest: bridge cable system, E-mail: tanzj_bridge@163.com.

WANG Lu (corresponding author), associate professor, E-mail: wanglu_bridge@163.com.

of the inclined plane saddle is the same as that of the plane saddle, and the lateral forces between the saddles are all caused by radial forces pointing to the center of the circle; for the spatial curved cable saddle, the radial force is approximately equal to the vector sum of the radial forces produced by vertical and horizontal bending, and in the spatial curved cable saddle, the outer pressure is greater than the inner pressure; the internal stress of the saddle groove is mainly concentrated in the local contact area, which is consistent with the classical Hertz theory; the force chain between the upper and lower layers of wires forms a diamond shape, with the force value gradually increasing with depth, but there is a sharp drop at the bottom layer; in the inclined plane saddle, the saddle base provides 86.4% of the friction resistance, and the saddle side only accounts for 13.6%; in contrast, the base of the spatial curved cable saddle provides 86.62%, and the saddle side provides 13.38%. In both types of spatial cable saddles, the contribution of the saddle base to friction resistance is much greater than that of the side.

Keywords: spatial cable suspension bridge; cable-saddle system; mechanical behavior; lateral force; theoretical derivation; numerical simulation

空间缆悬索桥是基于平面缆索体系悬索桥演变而来,其主缆呈三维空间形态,体现独特的结构设计和美学特征。但为适应主缆在桥塔处的多向线形变化,索鞍的鞍槽需设计为三维曲线形式,使得缆鞍系统受力更加复杂^[1]。目前,空间缆悬索桥的索鞍主要有斜平面索鞍和空间曲线索鞍两类^[2]。其中,斜平面索鞍是将平面索鞍绕轴线旋转一定角度,鞍槽中心面为平面,线形相对简单;空间曲线索鞍的鞍槽中心线在竖向和平面上的投影均为圆曲线,具有较好的线形适应性。

许多学者针对主缆与索鞍位置关系进行了研究。邓小康等^[3]提出了一种考虑主、散索鞍耦合效应的悬索桥索鞍预偏量改进算法,通过建立十元非线性方程组并采用 Newton-Raphson 法求解;沈锐利等^[4]设计了一种自适应空间缆索鞍,并通过有限元分析与试验研究验证了其在悬索桥施工过程中的自适应运动性能;齐东春^[5]基于分段悬链线理论,讨论了空间曲线索鞍的索鞍位置计算方法。以上代表性研究将主缆与索鞍间几何关系的求解应用到桥梁整体分析中,形成了相对成熟的计算方法,但类似研究并未深入到缆鞍系统内部受力行为,直至多塔悬索桥的创新性实践。

由于多塔悬索桥具有超长跨越的显著优势^[6-9]以及存在突出的主缆与索鞍间抗滑问题^[10-12],学者们对于缆鞍系统的研究不断深化。Cheng 等^[13]将处于完全受压状态的主缆作为一个整体,基于索股微元体的受力平衡建立了摩擦抗力分析模型;季申增^[14]基于 ABAQUS 平台对缆-鞍体系进行了精细建模,但由于计算量巨大,在将钢丝截面简化为矩形的前提下,模型仅达到 42 根钢丝的量级;王路等^[15]反推出了规范中相似公式的理论来源,并提出了分析缆鞍侧向受力的离散化分析模型;甘祥^[16]给出了

两种空间索鞍设计位置的确定方法,并从构造上对两种索鞍进行对比,计算了主缆对鞍座底部的作用力。以上研究的视角已从宏观主缆转变到细观钢丝维度,对于缆鞍力学行为的理解也更加深刻。然而,既有研究主要围绕传统的平面缆悬索桥,对于空间缆悬索桥缆鞍系统的认知还非常有限,特别是在侧向受力方面。因此,借鉴最新研究方法分析空间索鞍,并将其与平面索鞍进行受力区分,是当前悬索桥超大跨度、创新型发展的背景下值得推进的研究工作。

基于此,笔者首先较全面地阐述既有相关研究基础,形成切片式数值研究方法,并利用模型试验进行验证;根据两类空间索鞍结构特征,推导侧向力合成理论,据此应用到数值模型进行实桥案例研究,分析缆鞍系统内部接触传力及摩擦阻力等关键问题。

1 既有研究基础

1.1 规范公式

《公路悬索桥设计规范》^[17]给出了设计索鞍的侧向力计算公式

$$f_{y(h)} = \frac{f_v b}{2\mu} \left(1 - e^{-\frac{2\mu h}{3b}} \right) \quad (1)$$

式中: $f_{y(h)}$ 为深度 h 处的侧向压力; f_v 为单位体积力; b 为槽路宽度; h 为槽内钢丝排列高度; μ 为缆鞍间的摩擦系数。

规范并未说明式(1)的理论依据和适用边界。王路等^[15]发现该公式源于散体力学领域的 Janssen 理论。但对于主缆钢丝而言,它们在鞍槽内受力大,排列规则,这与散体贮料的物理及受力特征有本质区别,因此规范公式的适用性有待论证。

1.2 模型试验

沈锐利等^[18]开展了索鞍侧向力的模型试验,如图1所示。制造了一种组拼式索鞍,索鞍半径为1.5 m。试验采用5根索股,每股由37丝直径为5.2 mm的平行钢丝组成。在鞍槽中间区域的两侧安装了多个小型传感器,形成传感阵列监测侧向力。通过调整钢丝的排列,考虑了3种试验工况,如图2所示,图中 d 为钢丝直径。采用全局对称的渐进式加载方案,将每根索股张拉至初始状态150 kN,然后以50 kN的增量增加每根索股的张力,直到达到700 kN。模型试验虽是揭示摩擦滑移机理的直接方法,但该类试验成本高,且因负载能力的限制难以考虑足量钢丝。

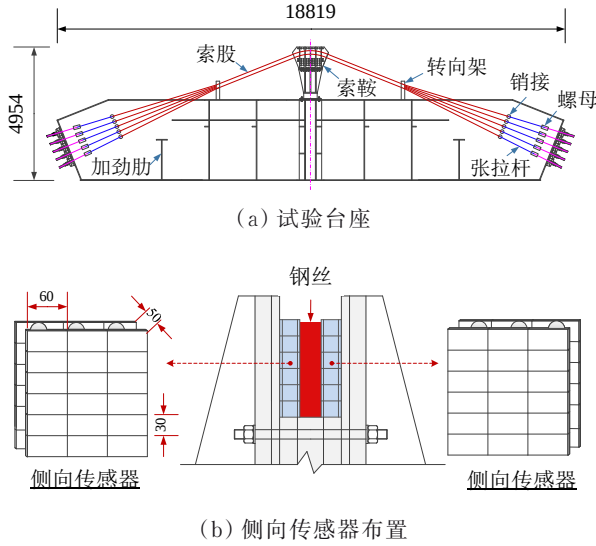


图1 试验整体布置(单位:mm)

Fig. 1 Overall arrangement of the test (unit: mm)

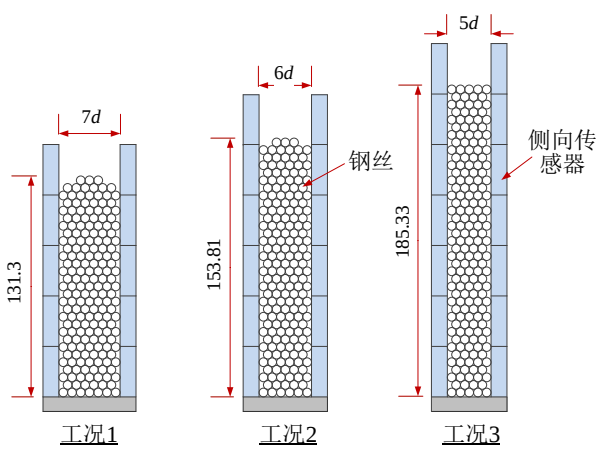


图2 试验工况

Fig. 2 Test cases

1.3 切片模型

如图3所示,主缆穿过弯曲半径为 R 、圆心角为 α 的索鞍。主缆在索鞍紧边侧和松边侧的拉力分别

为 T_{ct} 和 T_{cl} 。取微段 $d\alpha$ 分析,根据力学平衡条件可建立主缆微段拉力 T 与竖向压力 f_z 间的关系

$$f_z \cdot R \cdot d\alpha = (T + dT) \sin \frac{d\alpha}{2} + T \sin \frac{d\alpha}{2} \quad (2)$$

忽略二阶微小量可得到

$$f_z = \frac{T}{R} \quad (3)$$

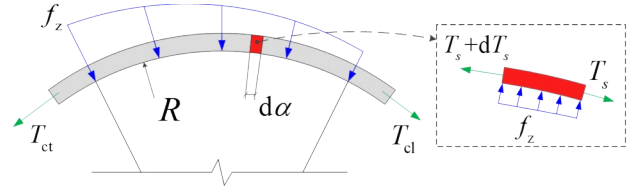


图3 索鞍中主缆的平衡关系

Fig. 3 The equilibrium of the main cable in the saddle

由式(2)、式(3)可看出,缆索产生的径向压力与缆索张力直接相关,而缆索产生的侧向压力又与径向压力相关。因此,Wang等^[19]通过对缆鞍系统切片提出了一种新型数值模型,选择缆鞍系统的任何径向横截面作为焦点,创建切片模型,从而将全尺寸模拟的复杂性大大降低,为足量的钢丝离散化分析提供了机会。通过切片模型对整个缆鞍系统沿纵向积分进而可反映整个三维缆鞍系统。

为此,借鉴该切片数值模拟方法进行研究。首先对模型试验进行仿真重演,索股张力分别取200、450、700 kN进行分析,结果如图4所示。各种工况下试验与有限元的侧向压力分布基本一致,最大误差约为14%,考虑到摩擦接触问题的实际复杂性,这种差异可以接受。因此,可利用切片数值模型进行后续空间缆悬索桥缆鞍间侧向力研究。

2 空间缆与索鞍间侧向力理论推导

2.1 斜平面索鞍

如图5所示,斜平面索鞍通过将平面索鞍旋转一定角度得到,索股也随之发生相应的旋转。以下通过对索鞍表面进行二维曲面参数化表示,结合坐标变换推导斜平面索鞍缆鞍间的受力模式。

首先,考虑索鞍表面是一段嵌入三维空间的二维曲面,表示为 $r(u, v)$,其中 u 和 v 是曲面上的局部坐标。

由曲面上的第1基本形式给出曲面上弧长的度量

$$ds^2 = Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2 \quad (4)$$

式中: $E = r_u \cdot r_u$; $F = r_u \cdot r_v$; $G = r_v \cdot r_v$; r_u 和 r_v 分别为 r 对 u 和 v 的偏导数。

对于斜平面索鞍,其第一基本形式可简化为

$$ds^2 = Rd\theta^2 + dz^2 \quad (5)$$

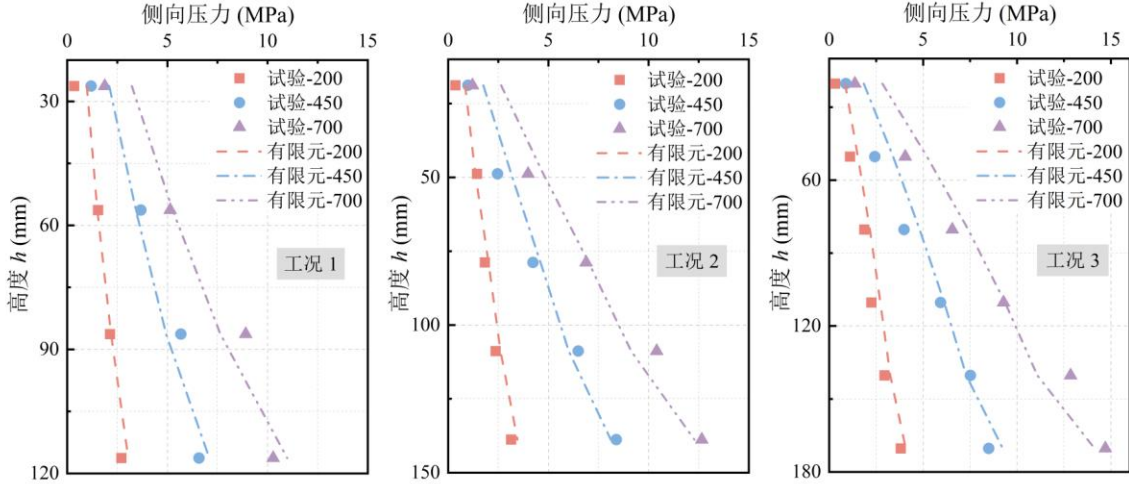


图4 试验与有限元的侧向压力对比

Fig.4 Experiment and finite element comparison of lateral pressure

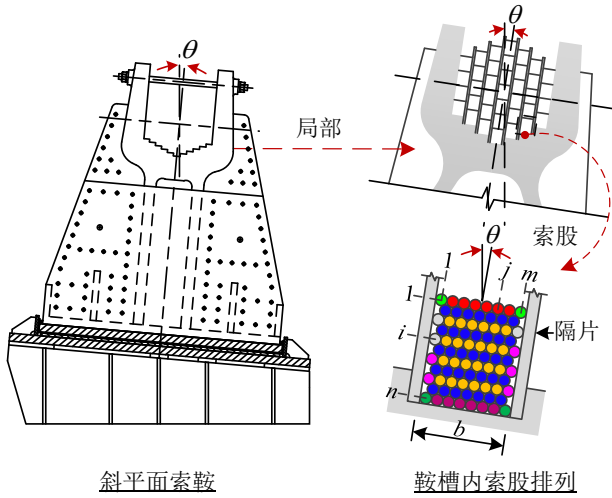


图5 斜平面索鞍构造及索股排列

Fig.5 Inclined plane saddle structure and strand arrangement

式中: θ 为圆弧角度, R 为鞍槽半径, z 为垂直于圆弧平面的坐标。

曲面的第2基本形式用于描述曲面的曲率, 定义为

$$dn = Ldu^2 + 2Mdudv + Ndvd^2 \quad (6)$$

式中: $L = \mathbf{r}_{uu} \cdot \mathbf{n}$, $M = \mathbf{r}_{uv} \cdot \mathbf{n}$, $N = \mathbf{r}_{vv} \cdot \mathbf{n}$, $\mathbf{n}$ 为曲面的法向量。

对索鞍上的圆弧曲面, 法向量可表示为

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v}{|\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v|} \quad (7)$$

假设从一个竖直平面变换到一个斜平面, 可以通过旋转矩阵 $\mathbf{R}(\alpha)$ 实现^[16], 该矩阵绕 x 轴旋转一个角度 α

$$\mathbf{R}(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

经变换后, 新的曲面参数化表示为

$$\mathbf{r}'(u, v) = \mathbf{R}(\alpha) \mathbf{r}(u, v) \quad (9)$$

新的第1基本形式和第2基本形式可以从旋转后的曲面导出, 但因旋转矩阵保持曲面的内积结构不变, 故第1和第2基本形式的系数 E, F, G 和 L, M, N 仅在坐标系中进行线性变换, 而不会改变它们的本质几何性质。

在索股沿鞍槽排列时, 其势能 U 可表示为索股在鞍槽上移动的路径上的总能量^[20]

$$U[\mathbf{r}] = \int_{\mathbf{r}} \left(\frac{1}{2} T(ds)^2 + V(\mathbf{r}) \right) ds \quad (10)$$

式中: $V(\mathbf{r})$ 为势能密度函数; T 为主缆张力。

在斜平面索鞍中, 能量泛函在旋转后变为

$$U[\mathbf{r}'] = \int_{\mathbf{r}'} \left(\frac{1}{2} T(ds')^2 + V(\mathbf{r}') \right) ds' \quad (11)$$

由于第1基本形式的内积保持不变, 弧长元素 ds 在旋转后仍然相同, 即 $ds' = ds$ 。由于弧长保持不变, 旋转后并不改变这些几何量和物理量的关系。因此, 能量泛函的形式保持不变

$$U[\mathbf{r}'] = U[\mathbf{r}] \quad (12)$$

索鞍的受力可通过平衡方程表示。对于沿鞍槽排列的索股, 力的平衡方程在张量形式下为

$$\frac{d}{ds} T(s) \mathbf{t} + \kappa(s) T(s) \mathbf{n} = 0 \quad (13)$$

式中: $\mathbf{t}$ 为切向单位向量; $\mathbf{n}$ 为法向单位向量; $\kappa(s)$ 为曲率。旋转后的广义平衡方程可通过旋转矩阵 $\mathbf{R}(\alpha)$ 进行变换

$$\frac{d}{ds} T(s) \mathbf{R}(\alpha) \mathbf{t} + \kappa(s) T(s) \mathbf{R}(\alpha) \mathbf{n} = 0 \quad (14)$$

由于旋转矩阵 $\mathbf{R}(\alpha)$ 为正交矩阵, 故平衡方程的形式在斜平面索鞍和平面索鞍上保持不变。因此, 斜平面索鞍径向力表示为

$$f = \frac{T}{R} \quad (15)$$

式(4)~(15)表明斜平面索鞍缆鞍间受力模式与平面索鞍相同。

2.2 空间曲线索鞍

如图6所示,空间曲线索鞍的鞍槽中心线是由横向弯曲和纵向弯曲的圆曲线组合而成。由于索股线形存在水平弯曲,钢丝会受到横向的径向力,因此需要对钢丝的排列进行相应调整。空间曲线索鞍的横向和竖向投影均为圆曲线^[17],主缆拉力将产生指向相应圆心的横向和竖向径向力。

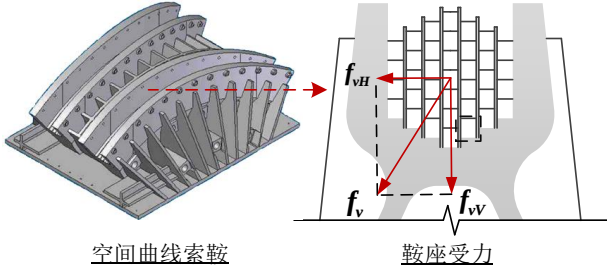


图6 空间曲线索鞍中索股受力示意

Fig.6 Schematic diagram of force on strands in spatial curve saddle

通过张量的方式描述曲线的几何特征。设定空间曲线的参数化形式为

$$\mathbf{r}(s) = [x(s), y(s), z(s)] \quad (16)$$

式中: s 为曲线的弧长参数; $\mathbf{r}(s)$ 为空间曲线在弧长 s 处的坐标向量。

曲线的切向量 $T(s)$ 为

$$\mathbf{T}(s) = \frac{d\mathbf{r}(s)}{ds} = \left(\frac{dx}{ds}, \frac{dy}{ds}, \frac{dz}{ds} \right) \quad (17)$$

曲率向量 $\kappa(s)$ 为切向量的弧长导数

$$\kappa(s) = \frac{d\mathbf{T}(s)}{ds} \quad (18)$$

在三维空间中,曲率可分解为竖弯、横弯两个方向,竖弯曲率描述竖直方向的弯曲,近似表示为

$$\kappa_v = \frac{1}{R_v} \quad (19)$$

式中: R_v 为竖弯半径。

同理,横弯曲率可以表示为

$$\kappa_h = \frac{1}{R_h} \quad (20)$$

式中: R_h 为横弯半径。

曲率的总张量可表示为

$$\kappa(s)^2 = \kappa_v^2 + \kappa_h^2 \quad (21)$$

利用能量泛函的思想,可通过最小化总势能推导缆鞍系统的力平衡状态。

设主缆沿曲线承受张力 T ,它在空间中弯曲时具有一定的势能^[21]。该势能与曲线的曲率相关,可以表示为一个能量泛函

$$E[\mathbf{r}] = \frac{1}{2} \int T \cdot \kappa(s)^2 ds \quad (22)$$

式中: T 为主缆沿曲线的张力; $\kappa(s)^2$ 为空间曲线在弧长 s 处的曲率平方。

可以通过最小化能量泛函来找到索股的平衡形状。在最小化的条件下,曲线满足欧拉-拉格朗日方程

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{r}}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{r}} = 0 \quad (23)$$

式中:拉格朗日量 $\mathcal{L}$ 是能量泛函的积分被积函数,可表示为

$$\mathcal{L} = T \cdot \kappa(s)^2 \quad (24)$$

通过求解欧拉-拉格朗日方程,可以得到系统在力平衡下的曲线形状,并由此推导出索股所产生的径向力。

在虚功原理中,当曲线发生微小的虚位移 $\delta \mathbf{r}$ 时,张力 T 所做的虚功可以表示为

$$\delta W = T \cdot \delta \kappa(s) \quad (25)$$

根据曲线的弯曲程度,主缆的张力会在曲线弯曲处产生径向力,其广义表达式为

$$f_v = T \cdot \kappa(s) \quad (26)$$

曲率可以分解为竖弯曲率 κ_v 和横弯曲率 κ_h ,因此,总的径向力可以表示为

$$f_v = T \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{R_v} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_h} \right)^2} \quad (27)$$

式(16)~(27)表明,在整个空间曲线索鞍中,径向力大小约等于竖弯半径为 R_v 所产生的竖向径向力和横弯半径为 R_h 所产生的横向径向力的矢量和。

3 实例切片数值模型

3.1 工程案例

如图7所示,某空间缆悬索桥主缆分跨为185 m+716 m+142 m,单跨悬吊,矢跨比为1/10。成桥状态下初始缆力为140 741 kN,左边跨及主跨主缆采用91股127丝直径为5.2 mm的钢丝,索鞍设计为11个槽路,边鞍槽排6根索股,中央列排11根索股,列间相差1根索股。鞍槽底部竖弯半径为6 m,横弯半径为43.323 m。

3.2 模型构建

采用已被验证的切片数值模型进行建模计算,如图8所示。通过二维平面实体有限元模型来模拟索股内部钢丝-钢丝间以及钢丝-索鞍间的接触行为,考虑几何非线性的影响。采用有限滑移理论以及面-面接触模式来进行仿真分析。摩擦系数根据规范^[17]设置为0.15。在有限元模型中,根据钢丝位置的不同,通过脚本化循环设置钢丝间、钢丝-索鞍

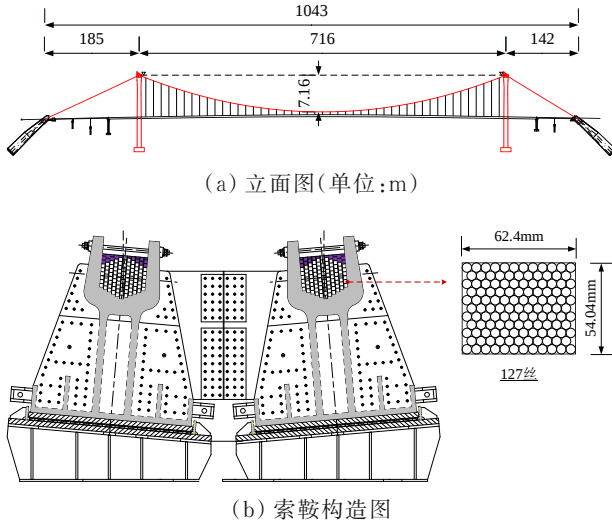


图7 实桥结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of actual bridge structure

间接触对,分别采用对应的摩擦系数。

斜平面索鞍中索股受到的张力产生的竖向径向力由式(15)计算,空间曲线索鞍则分别计算竖弯圆曲线和横弯圆曲线所产生的径向力,如图8所示。在巨大的张力作用下钢丝间的摩擦已充分调动,故约束钢丝转动。在空间曲线索鞍模型中,将有横向体积力的一侧称为外侧,另一侧则为内侧。钢丝表面与索鞍接触区域采用了细化的网格来确保计算结果的精确性和稳定性,其他区域则使用了相对粗糙的网格,为了实现计算精度和效率之间的最佳平衡,进行了网格尺寸收敛性分析。结果表明,当非接触区域网格尺寸为0.3,接触区域网格为0.05时,能在保证计算精度的同时大幅节省计算时间(单列计算时长为17.8 h)。所用计算机的主要配置是CPU Core i7-13620H-2.40 GHz和RAM-16 GB。

4 主要结果与分析

4.1 内部传力特征

如图9所示,两种空间索鞍中钢丝应力总体处于较低水准,主要集中在局部的接触区域,特别是下部索股处。为展示细节,将下部索股进行放大,选择边列钢丝、内部钢丝、底层边列钢丝和底层内部钢丝进行放大观察,观察到不同钢丝的应力差异明显。随着钢丝自上而下的增加,压力逐层累积,导致下部的内部钢丝间表现出更大的接触应力。在接触点处,应力分布符合经典的赫兹接触理论。位于底层与鞍槽侧壁接触的钢丝,其产生的侧向应力明显比上层钢丝小,存在陡降。这是由于内侧钢丝由下方的钢丝斜向支撑,从而产生了向鞍侧的力分量,增加了侧向压力。而底层钢丝主要由垂直支

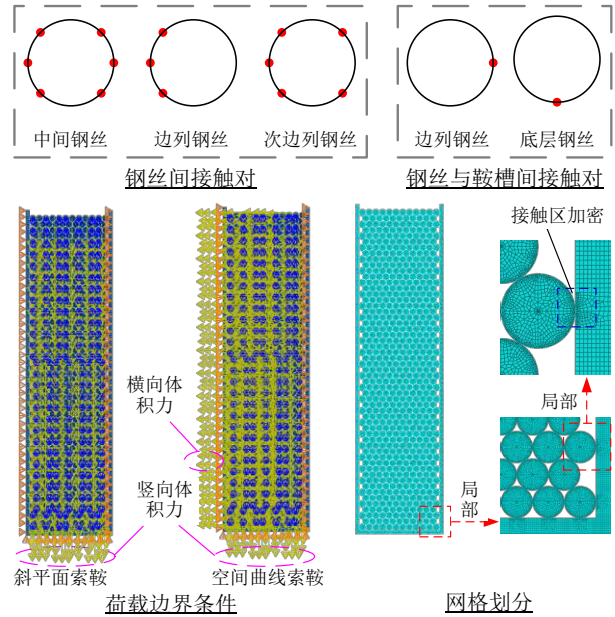


图8 空间缆-鞍的切片数值模型

Fig.8 Numerical model of slicing spatial cable-saddle

撑,缺乏额外分力,使得侧向力陡降。

如图10所示,可以清晰观察到内部接触力的分布。由于横向力的存在,空间曲线索鞍外侧的法向力值明显大于内侧,而斜平面索鞍两侧的法向力相同,这与图9中所反映的规律一致。上层钢丝在自身竖向力作用下产生的接触力微小,但随着竖向力的逐层累积,逐渐形成清晰的传力路径。上下层间的力链基本呈菱形网格,随着深度力值逐渐增加,但底层钢丝处的法向力均存在陡降。

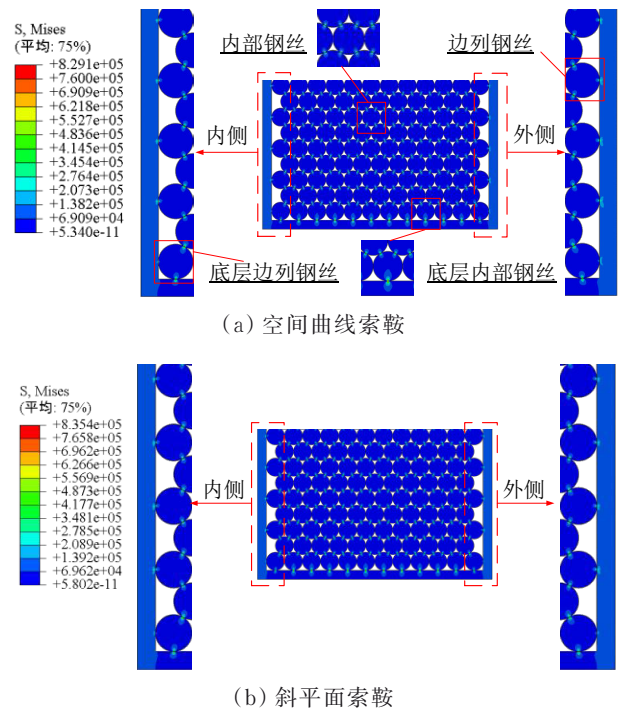


图9 内部接触间的Mises应力(单位:kPa)

Fig.9 Mises stress between internal contacts (unit: kPa)

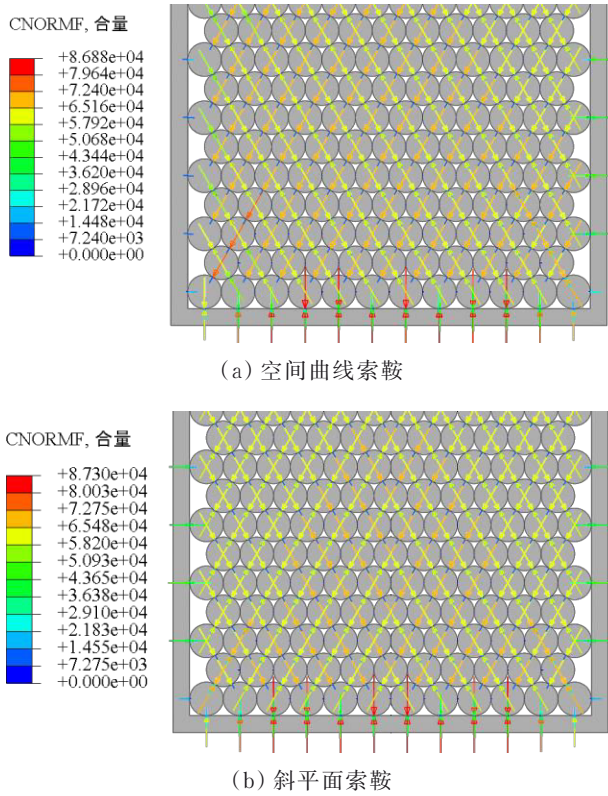


图 10 内部传力特征

Fig.10 Internal transmission characteristics

4.2 侧向压力分布模式

由图 11 可知,两种空间索鞍的侧向压力均呈现负指数收敛型分布,底层钢丝仅由槽底支撑,于是就表现出底层侧向力骤小的现象。斜平面索鞍鞍槽侧壁的侧向压力介于空间曲线索鞍内侧和外侧的侧向压力之间。斜平面索鞍的侧向压力小于空间曲线索鞍外侧的压力,但大于内侧的压力。这是由于空间曲线索鞍径向力的横向分力主要作用于外侧壁,横向分力引起的两侧向压力差迅速增大,表明横向分力显著改变了鞍槽两侧压力分布。

4.3 摩擦阻力组成

两种空间索鞍下各槽路的侧向力和竖向力如图 12 和图 13 所示。考虑到常规索鞍内的列间隔片刚度小,可由中央索股列为基准,根据横向力平衡条件计算其他各列受力。可以看出,两种空间索鞍构造下,对于钢丝较少的列,竖向力大于侧向力,随着列内钢丝数量的增加,侧向力与竖向力均增加,但前者的增幅明显更大。这说明在增加钢丝排列高宽比的同时,后续增加的深度会更加高效地积聚侧向压力,从而产生更大的增幅。另一方面,由于横向力的存在,空间曲线索鞍存在明显的内外侧侧向力差,而斜平面索鞍的侧向力位于空间曲线索鞍内侧与外侧之间,与图 11 所反映的规律一致。

表 1 总结了斜平面索鞍与空间曲线索鞍的摩擦

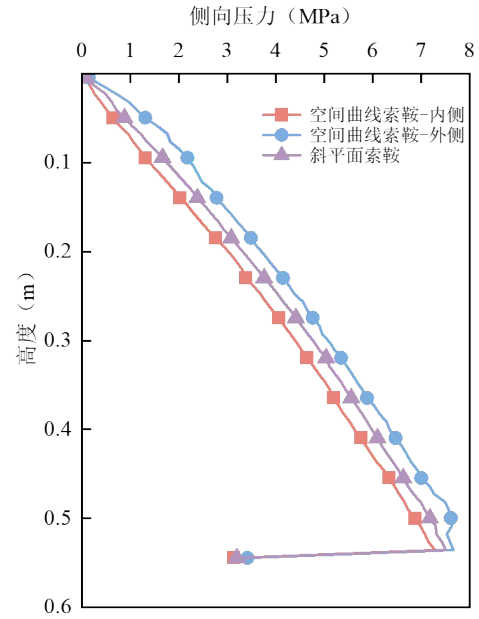


图 11 侧向压力分布

Fig.11 Distribution of lateral pressure

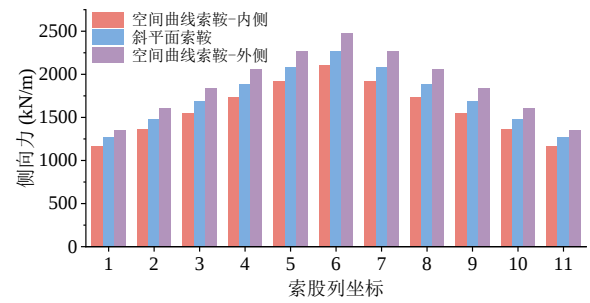


图 12 两种空间索鞍各列侧向力

Fig.12 Lateral forces on each column of two types of spatial cable saddles

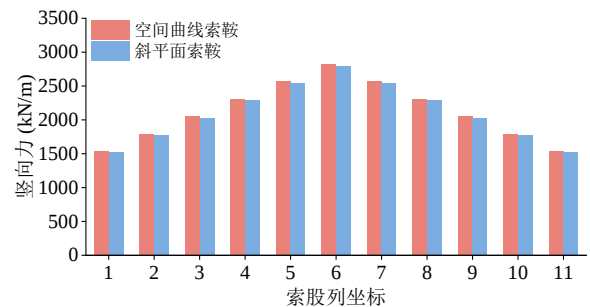


图 13 两种空间索鞍各列竖向力

Fig.13 Vertical forces on each column of two types of spatial cable saddles

阻力及其各组成部分。规范公式计算的摩擦阻力结果与有限元结果相比偏大。在斜平面索鞍中,索鞍基座提供了摩擦阻力的 86.4%,鞍侧仅占 13.6%。相比之下,空间曲线索鞍的索鞍基座提供了 86.62%,鞍侧提供 13.38%。这一数据表明在两种空间索鞍中,索鞍底面对摩擦阻力的贡献均远大于侧面。需要注意的是,在两种空间索鞍中,侧面摩擦阻仅由有限的索鞍侧壁提供,因此其抗滑贡献较

小。但当采取在索鞍内增设竖向摩擦板等抗滑措施时,侧面摩阻将极大发挥,成为不可忽略的抗滑组成。而此时,规范公式的计算误差将更加显著而无法适用于抗滑评估。

表 1 抗滑摩阻力及其组成
Table 1 Resistance to sliding friction and its components

索鞍类型	计算方法	摩擦阻力/(kN/m)			占比/%		偏差率/%
		索鞍底面	索鞍侧面	总和	索鞍底面	索鞍侧面	
斜平面索鞍	有限元	3 464.40	381.84	3 846.24	90.07	9.93	4.1
	规范公式	3 464.40	545.46	4 009.86	86.4	13.6	
空间曲线索鞍	有限元	3 501.77	378.74	3 880.51	90.24	9.76	4.0
	规范公式	3 501.77	541.06	4 042.83	86.62	13.38	

5 结论

为明确空间缆悬索桥缆鞍系统的力学行为,根据两类空间索鞍的结构特征,推导了侧向力合成理论,论证了两种空间索鞍的受力模式,以某空间缆悬索桥为例建立了切片数值模型,研究了两种空间索鞍内部传力特征、侧向压力分布模式以及摩擦阻力组成,得到以下结论:

1)斜平面索鞍的受力模式与平面索鞍相同,缆鞍间的侧向力均由指向圆心的径向力引起,对于空间曲线索鞍,径向力大小约等于由竖弯半径和横弯半径产生的径向力的矢量和。

2)空间曲线索鞍中,外侧压力大于内侧压力,故在设计中应重点关注外侧应力集中问题。

3)鞍槽内部应力主要集中在局部接触区域,分布符合经典赫兹理论;上下层钢丝间的力链呈菱形,力值随深度逐渐增加,但在底层存在陡降。

4)斜平面索鞍中,索鞍基座提供了摩擦阻力的86.4%,鞍侧仅占13.6%;相比之下,空间曲线索鞍的基座提供了86.62%,鞍侧提供13.38%,两种空间索鞍中,索鞍底面对摩擦阻力的贡献均远大于侧面。

对于未来建造大跨度空间缆多塔悬索桥可能面对的抗滑问题,可根据缆鞍系统内部力学行为考虑在索鞍各槽路间增设竖向摩擦板等充分利用侧向力的构造措施加以应对。此外,通过进一步忽略微小因素以精简模型,依靠更高性能计算平台以加大模型规模,都是未来值得期待的工作。

参考文献

[1] 万田保,王东绪,霍学晋,等.空间索面地锚式悬索桥结构行为研究[J].桥梁建设,2023,53(Sup 2):50-57.
WAN T B, WANG D X, HUO X J, et al. Research on structural behavior of ground-anchored suspension bridge with spatial cable planes [J]. Bridge Construction, 2023, 53(Sup 2): 50-57. (in Chinese)

[2] ZHONG C J, SHEN R L, WANG H. Research on ultimate bearing capacity state and structure optimization of main cable saddle [J]. Structures, 2021, 33: 28-40.
[3] 邓小康,李小贝.空间缆索悬索桥倾斜母线鞍座设计位置计算的改进方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(2):8-12,36.
DENG X K, LI X B. Improved calculation method of lean busbar saddle's design position of suspension bridge with spatial cables [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2023, 42(2): 8-12, 36. (in Chinese)
[4] 沈锐利,薛松领,陈龙,等.自适应空间缆鞍座性能分析[J].桥梁建设,2022,52(1):26-32.
SHEN R L, XUE S L, CHEN L, et al. Performance analysis of self-adaptive spatial cable saddle [J]. Bridge Construction, 2022, 52(1): 26-32. (in Chinese)
[5] 齐东春.大跨径悬索桥主缆精细化计算研究[D].成都:西南交通大学,2012.
QI D C. A refined analysis method of main cable for long-span suspension bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
[6] CHONG H L, WANG B, WANG D G, et al. Tribo-corrosion-fatigue behaviors of the parallel wires of main cable in the suspension bridge [J]. Wear, 2024, 548: 205363.
[7] ZHANG W M, YANG C Y, WANG Z W, et al. An analytical algorithm for reasonable central tower stiffness in the three-tower suspension bridge with unequal-length main spans [J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109595.
[8] 白伦华,沈锐利,苗如松,等.箱梁与缆索承重桥梁理论2020年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(Sup 1):43-52.
BAI L H, SHEN R L, MIAO R S, et al. State-of-the-art review of box girder and cable-supported bridge analysis theories in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(Sup 1): 43-52. (in Chinese)
[9] WANG L, SHEN R L, ZHANG S H, et al. Strand element analysis method for interaction between cable

- and saddle in suspension bridges [J]. Engineering Structures, 2021, 242: 112283.
- [10] CAO H Y, CHEN Y P, LI J, et al. Static characteristics analysis of three-tower suspension bridges with central buckle using a simplified model [J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112916.
- [11] WANG L, SHEN R L, WANG T, et al. A methodology for nonuniform slip analysis and evaluation of cable strands within saddle [J]. Engineering Structures, 2024, 303: 117551.
- [12] 武守信, 李小刚, 冯君. 悬索桥大直径嵌桩式重力锚碇摩擦/嵌固联合抗滑机制和设计方法 [J/OL]. 土木与环境工程学报 (中英文). <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20241008.0846.002>. WU S X, LI X G, FENG J. Anti-slide mechanisms of combined friction/embedment actions and design approach of the large-diameter-pile-enhanced gravity anchorage for suspension bridges [J/OL] Journal of Civil and Environmental Engineering. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20241008.0846.002>. (in Chinese)
- [13] CHENG Z Y, ZHANG Q H, BAO Y, 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.
- [14] 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.
- JI S Z. Character analysis of lateral force and slip friction between main cable and saddle in suspension bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [15] 王路, 沈锐利, 王昌将, 等. 悬索桥主缆与索鞍间侧向力理论计算方法与公式研究 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 87-96.
- WANG L, SHEN R L, WANG C J, et al. Theoretical calculation method and formula for lateral force between main cable and cable saddle for suspension bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(12): 87-96. (in Chinese)
- [16] 甘祥. 空间缆索悬索桥主索鞍构型与力学特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- GAN X. Research on configuration and mechanical characteristics of main cable saddle of suspension bridge with spatial cables [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [17] 公路悬索桥设计规范: JTG/T D65-05—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- Specifications for Design of Highway Suspension Bridge: JTG/T D65-05—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2016. (in Chinese)
- [18] 沈锐利, 王路, 王昌将, 等. 悬索桥主缆与索鞍间侧向力分布模式的模型试验研究 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(10): 75-81.
- SHEN R L, WANG L, WANG C J, et al. Experimental study on distribution pattern of lateral force between main cable and cable saddle for suspension bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(10): 75-81. (in Chinese)
- [19] WANG L, TAN Z J, BAI L H, et al. Sliced numerical model for lateral interaction of cable-saddle system considering sufficient wire-discretization [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 219: 108761.
- [20] 董皓, 单德山, 于伟栋, 等. 基于散索鞍转动位移的悬索桥主缆力长期监测 [J/OL]. 工程科学与技术. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.tb.20240523.2121.003>. DONG H, SHAN D S, YU W D, et al. Long-term Monitoring method of main cable force of suspension bridge based on rotation displacement of splay saddle [J/OL] Advanced Engineering Sciences. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.tb.20240523.2121.003>. (in Chinese)
- [21] 白伦华, 王路, 沈锐利. 悬索桥缆鞍系统侧向挤压作用的接触元法与计算公式 [J/OL]. 工程力学. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20241108.1430.024>. BAI L H, WANG L, SHEN R L. Contact element method and formulas for calculations of lateral squeezing interaction between main cable and saddle in suspension bridges [J/OL] Engineering Mechanics. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20241108.1430.024>. (in Chinese)

(编辑 XXX)