

## 非对称独塔斜拉桥的换索敏感性研究

王 贤, 余钱华, 石桦睿

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410000)

**摘要:** 为确保结构的安全并维持斜拉桥的正常运营,在其服役过程中不可避免地需要进行换索操作。然而,斜拉索的拆除会导致结构发生变化,而不同的换索方案又会直接影响换索施工过程的安全性。文章基于分区优化的理念,综合考虑拉索长度和拉索力对斜拉桥进行分区,并根据各换索方案在不同区域的敏感性表现,选取敏感性较高的指标作为评价依据,并结合施工效率,在各区域内进行方案比选。结果表明:1)在换索施工过程中,塔偏、主梁挠度以及索力变化表现得较为敏感,而主塔和主梁的应力则表现出较低的敏感性;2)长索区和中长索区索力较大,换索对结构的影响显著,施工风险较高;短索区的索力较小,换索对结构影响相对较低。本文成果可为换索方案的确定以及换索施工提供一定的借鉴与参考。

**关键词:** 非对称独塔斜拉桥; 换索; 敏感性分析; 有限元分析

中图分类号: U448. 27

文献标志码: A

文章编号: 1673 - 8993(2025)03 - 0012 - 06

doi:10. 13402/j. gcjs. 2025. 03. 030

## Sensitivity research on cable replacement for asymmetric single-pylon cable-stayed bridge

WANG Xian, YU Qianhua, SHI Huarui

(College of Civil Engineering, Changsha University of Science&Technology, Changsha 410000, Hunan, China)

**Abstract:** In order to ensure the structure safety and maintain the normal operation of the cable-stayed bridge, it is inevitable to replace the cable during its service. However, the removal of the cable-stayed cable will lead to structural changes, and different cable replacement schemes will directly affect the safety of the cable replacement construction process. Based on the concept of zoning optimization, considering the cable length and the cable force, the cable-stayed bridge is partitioned, and according to the sensitivity performance of each cable replacement scheme in different areas, the index with higher sensitivity is selected as the evaluation basis, and the scheme is compared and selected in each area in combination with the construction efficiency. The results show that: 1) In the process of cable replacement, the deviation of the tower, the deflection of the main beam and the replacement of cable force are more sensitive, while the stress of the main tower and the main beam shows a lower sensitivity. 2) The cable force in the long cable area and the medium long cable area is large, and the impact of cable replacement on the structure is significant, and the construction risk is high. The cable force in the short cable area is small, and the impact of the cable replacement on the structure is relatively low. The results can provide certain references for the determination of the cable replacement scheme and the construction of the cable replacement.

**Key words:** asymmetric single-pylon cable-stayed bridge; cable replacement; sensitivity analysis; finite element analysis

收稿日期: 2024 - 05 - 21

作者简介: 王 贤(2001—),男,硕士研究生,从事桥梁与隧道施工监控与检测的研究。

通信作者: 余钱华(1969—),男,博士,教授,从事桥梁结构分析与工程控制研究。

斜拉桥是一种具有较强跨越能力的桥梁结构形式, 因其桥型简洁、造型优美、布置形式灵活等优点, 受到许多桥梁设计者的青睐, 并在国内外得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。斜拉索作为斜拉桥的关键组成构件, 对斜拉桥的受力性能起着至关重要的作用。然而, 与斜拉桥 100 a 的设计使用年限不同, 斜拉索的设计使用年限仅为 20 a<sup>[4]</sup>。此外, 由于其工作受力状态不合理以及养护运营不善等原因, 斜拉索的实际使用寿命往往达不到设计使用年限<sup>[5]</sup>。因此, 为了保证斜拉桥的正常运营并消除安全隐患, 换索成为不可避免的措施。目前, 针对换索方案的研究已取得一定进展。史国刚等<sup>[6]</sup>从拆单索弯曲应变能变化的角度出发, 得出拆短索时桥梁弯曲应变能变化最小, 从而确保桥梁具有更大的安全储备; 叶锦辉等<sup>[7]</sup>提出了全桥按长索区、中长索区和短索区分类优化的思路, 通过选取典型拉索采用增量法进行分析, 确定了组合式换索方案, 显著缩短了工期; 齐东春等<sup>[8]</sup>基于联合静动力实测数据, 构造多目标优化函数, 并利用非支配排序遗传算法求解, 修正有限元模型以更准确地反映实际受力状态, 并通过换索敏感性分析, 拟定斜拉索更换方案; 张鸿等<sup>[9]</sup>对某双塔双索面斜拉桥进行有限元建模分析, 研究不同换索工况下的索力增量及主梁线形敏感性, 并采用交通荷载控制法验证, 确定换索顺序。本文以某非对称独塔斜拉桥为工程背景, 进行有限元建模分析。通过对不同换索方案下的塔偏、主梁挠度、索力和应力等因素进行敏感性分析, 选取敏感性较高的指标作为评价参数。在此基础上, 根据斜拉索的长度及成桥索力对其进行分区, 并综合评价参数和施工效率, 在不同区域对各换索方案进行比选, 以期换索方案的确定以及换索施工提供一定的借鉴。

## 1 工程概况及有限元建模

### 1.1 工程概况

某独塔双索面斜拉桥全长为 359 m, 主跨长度为 196 m, 边跨长度为 163 m, 桥面宽度为 29.5 m。主塔采用钻石型结构, 混凝土强度为 C50; 主梁采用预应力混凝土箱梁结构, 混凝土强度为 C55, 截

面形式为单箱三室截面, 主梁断面如图 1 所示, 且主塔与主梁固结。斜拉索采用扇形布置, 主、边跨各设置 26 对拉索, 斜拉索设计参数如表 1 所示。拉索编号从主塔向两边依次增大, 主跨为 M1 ~ M26, 边跨为 S1 ~ S26。主梁在边跨密索区的索距为 4.5 m, 其余区域索距均为 7.0 m, 而主塔上的索距为 2.0 m。

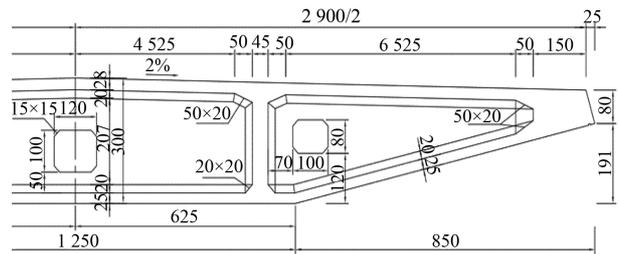


图 1 主跨主梁断面

表 1 斜拉索设计参数

索号	拉索根数/根	截面积/mm <sup>2</sup>
S1、M1	4	4 887.5
S2、M2	4	5 349.3
S3 ~ S4、M4	6	5 811.2
S5 ~ S6、M4	6	6 273.0
S7 ~ S12、M5 ~ M6	16	7 196.6
S13 ~ S14、M7 ~ M8	8	7 658.4
S15 ~ S19、M9 ~ M14	22	8 120.2
S20 ~ S22、M15 ~ M26	30	8 582.0
S23 ~ S26	8	9 274.8

### 1.2 有限元建模

采用有限元软件 Midas Civil 2022 建立有限元模型, 如图 2 所示。全桥共 778 个节点和 671 个单元, 其中主梁和主塔采用空间梁单元模拟, 斜拉索采用桁架单元模拟。主塔与主梁的固结采用刚性连接进行模拟, 斜拉索与主梁、主塔之间的连接采用弹性连接中的刚性连接进行模拟, 边界条件如表 2 所示。其中:  $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  分别为整体坐标系  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴方向的平移自由度;  $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$  分别为绕整体坐标系  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴方向的转动自由度。二期铺装及护栏荷载合计按 100 kN/m 输入。边跨压重在距离塔中心线 80.225 ~ 100.000 m 处施加 68.6 kN/m 的均布力, 102.000 ~ 127.700 m 处施加 519.9 kN/m 的均布力, 128.300 ~ 161.680 m 处施加 319.0 kN/m 的均布力。

表 2 结构边界条件

节点编号	X 坐标轴位置	$D_x$	$D_y$	$D_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$
最左边支座	0.3	0	1	1	0	0	0
辅助墩	297.0	0	1	1	0	0	0
最右边支座	358.7	0	1	1	0	0	0
塔脚(上游侧)	196.0	1	1	1	1	1	1
塔脚(下游侧)	196.0	1	1	1	1	1	1

注: 1 表示约束, 0 表示未约束。

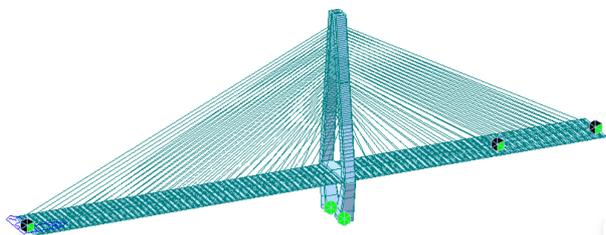


图 2 有限元模型

## 2 不同换索方案的敏感性分析

在换索方案的设计和比选过程中, 既要确保换索过程中结构内力变化不过于剧烈, 以保证结构的安全性, 也要兼顾施工效率。主塔偏位、主梁挠度、索力变化以及主塔应力和主梁应力是换索施工中较为重要的控制指标。因此, 本文主要围绕这几个控制指标对换索过程进行分析研究。通过最小弯曲能量法调索并微调, 最终得到成桥索力。同时, 计算得出成桥状态下的各控制指标, 如表 3 所示。

表 3 成桥状态下各控制指标的有限元计算结果

塔偏/mm	主梁下 挠/mm	主梁最大 应力/MPa	主塔最大 应力/MPa
-4.7	6.5	13.46	10.98

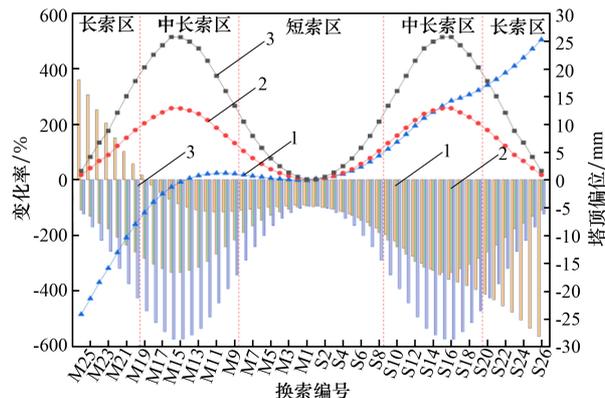
注: 桥塔发生沿边跨方向位移为正, 挠度向下为正, 压应力为正。

目前, 独塔双索面斜拉桥经典的换索方案有 3 种: 1) 单次单根, 即每次仅更换 1 根拉索, 多用于病害损伤拉索或稀索体系的更换。2) 单次两根, 即每次更换主塔两边同侧面相同索号的两根拉索。相较于单次单根方案, 该方案可有效避免桥塔两侧产生较大的不平衡水平分力, 从而提升换索过程的安全性。3) 单次 4 根, 即每次更换相同索号的 4 根拉索。该方案能够显著提高施工效率、缩短工期, 适用于换索数量较大且工期紧

张的项目。参考叶锦辉等<sup>[7]</sup>分区优化的思路, 根据斜拉索的长度及索力值, 大致将斜拉索划分为 3 个区域: 短索区 (M1 ~ M8、S1 ~ S8)、中长索区 (M9 ~ M19、S9 ~ S19) 和长索区 (M20 ~ M26、S20 ~ S26)。

### 2.1 塔偏敏感性分析

由于方案 1、2 的索面关于桥面中心线对称, 只需研究一侧索面换索时的变化即可。根据有限元模型计算得出不同方案下换索时塔顶偏位值, 其结果如图 3 所示, 其中柱状图对应塔顶偏位值, 折线图对应其变化率。



1—方案一; 2—方案二; 3—方案三。

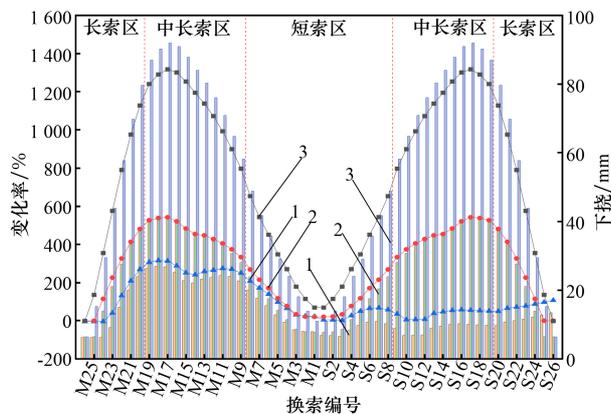
图 3 塔顶偏位值及其变化率

由图 3 可知: 方案 1 在长索区更换拉索时, 塔顶会产生较大的水平偏位。这是因为在长索区, 拉索在塔上的锚固位置距塔顶较近, 对塔顶偏位的影响较大; 同时, 长索的索力本身比较大, 单根拉索的更换会导致塔上存在较大的不平衡力, 从而使塔顶朝未卸索的一侧偏移。然而, 随着换索进入中长索区和短索区, 拉索在塔上的锚固位置距离塔顶越来越远, 不平衡力对塔顶偏位的影响逐渐减小, 加之拉索的索力也逐渐变小, 塔顶偏位逐渐减小。

图3还显示,方案1在中长索区位置主跨塔顶偏位及其变化率明显小于边跨。这是由于辅助墩的支承作用,当主跨相应位置卸索时,边跨辅助墩附近的主梁重量大部分由辅助墩承担,传递到拉索上的力大大减少,意味着传递到桥塔上的不平衡力也显著降低,从而导致塔顶偏位减少。对于方案2、3,塔顶偏位呈现中间大、两边小的变化规律。在中长索区,由于拉索的索力较大,塔顶偏位的变化率较高,对结构的影响较大,施工风险也随之增加;而在短索区,由于拉索的索力较小,塔顶偏位较低,对结构影响较小,施工风险相对较低。具体来看,方案1的最大塔顶偏位为 $-28.3\text{ mm}$ ,较成桥状态下增幅为 $502.1\%$ ;方案2的最大塔顶偏位为 $-16.7\text{ mm}$ ,较成桥状态下增幅为 $255.3\%$ ;方案3的最大塔顶偏位为 $-28.8\text{ mm}$ ,较成桥状态下增幅为 $512.8\%$ 。由此可见,各方案下的塔顶偏位值及其变化率均较大,在换索过程中表现较为敏感,应作为方案比选中的重要指标加以考虑。

## 2.2 主梁挠度敏感性分析

斜拉桥属于高次超静定结构,在换索过程中,由于结构需要满足变形协调条件,主梁线形会发生变化。此外,斜拉索在斜拉桥中相当于为主梁提供了弹性支承,而卸索则相当于撤去该支承,这会导致主梁产生下挠现象。根据有限元分析结果,各换索方案下的最大主梁下挠值及其变化率如图4所示,其中柱状图对应挠度值,折线图对应其变化率。



1—方案一; 2—方案二; 3—方案三。

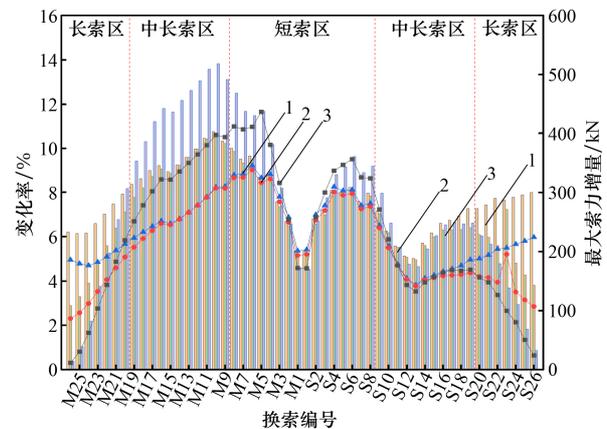
图4 换索时的最大主梁挠度及其变化率

由图4可知:3个方案在中长索区及其附近索

力较大的区域均出现明显的下挠。其中:方案1的最大下挠为 $26.9\text{ mm}$ ,变化率为 $313.8\%$ ;方案2的最大下挠为 $40.2\text{ mm}$ ,变化率为 $518.5\%$ ;方案3的最大下挠为 $91.9\text{ mm}$ ,变化率为 $1313.8\%$ 。方案1、2的挠度曲线在主跨处的变化较为相似,但由于方案1的主、边跨不对称,并且边跨处设有辅助墩,在相同索区,边跨的下挠值通常小于主跨。而方案3的变化率曲线斜率较大,表明其在换索过程的下挠变化更为剧烈,且其主梁最大下挠值远高于其他两个方案。相较于方案1,方案2、3的卸索数量增加,导致最大下挠增幅分别为 $54.5\%$ 、 $241.1\%$ 。由此可见,各方案下的主梁最大下挠值及其变化率均较大,在换索施工过程中表现敏感,应作为施工控制中不可忽略的重要指标,同时也是影响方案比选的关键因素之一。

## 2.3 索力敏感性分析

在换索过程中,由于斜拉桥是高次超静定结构,结构内力必然重新分布<sup>[10]</sup>,导致相邻索的索力增加。有限元计算结果表明,中索索力的最大增幅主要出现在相邻的两根索上,并且除支座附近的部分索外,索力最大增幅通常出现在相邻两索之间角度较大的索上。边索索力的最大增幅则出现在相邻最近的索上。根据各换索方案下换索时的最大索力增量变化,计算其变化率并绘制成图,结果如图5所示,其中柱状图对应索力增量值,折线图对应其变化率。



1—方案一; 2—方案二; 3—方案三。

图5 换索时的索力最大增量及变化率

由图5可知:3个方案的索力最大增量较大的区域主要集中在中长索区及其附近,但在支座和主塔附近的区域,索力最大增量及变化率明显减

少。此外,由于主、边跨的不对称性,边跨长度小于主跨,索力最大增量在中长索区和短索区的变化边跨均小于主跨,尤其是在辅助墩附近的区域现象更为显著。然而,在长索区,边跨的索力最大增量略大于主跨。

图 5 还显示,方案 1 的索力最大增量在更换不同索时变化较为均匀,最大索力增量为 400.2 kN;方案 2 在长索区的索力最大增量略小于方案 1,在中长索区和短索区的索力最大增量接近,最大索力增量为 400.8 kN,与方案 1 相差不大;方案 3 的最大索力增量为 518.3 kN,较方案 1 增加了 29.5%。就变化率而言,在短索区靠近中长索区的部分,3 个方案的最大索力增量变化率最大,分别为 9.2% (方案 1), 9.0% (方案 2), 11.6% (方案 3);在中长索区及短索区,方案 1、2 的最大索力增量变化率相差不大,方案 1 略大;在长索区,方案 1 的变化率最大,方案 2 次之,方案 3 最小。考虑到在索更换过程中,相邻索可能存在缺陷或损伤,因此应避免索力变化率过大,以防止拉索产生较大的应力波动而导致破坏。同样,拉索的索力增量也不宜过大,应确保拉索有一定的内力储备,以保障结构安全。

#### 2.4 应力敏感性分析

在施工控制理论中,应力控制是非常重要的环节。因此,在换索过程中,有必要对各部分的应力进行研究和控制。建模分析表明,由于主梁上配置了大量的预应力筋及斜拉索提供的轴向压力,在换索过程中,主梁的最大压应力变化不大,而拉应力仅在主跨靠近过渡墩位置的无索区存在,约为 0.6 MPa,并且在换索施工过程中基本保持不变。主塔承担着从斜拉索传来的巨大压力,局部换索对主塔的压应力影响较小。各方案下的主梁、主塔压最大应力如表 4 所示。

表 4 各方案下的主梁、主塔最大压应力 MPa

方案编号	主梁	主塔
1	13.85	11.48
2	13.66	11.16
3	14.66	11.56

由表 4 可知:主梁最大压应力在各方案中的变化量均不大,其中方案 3 的最大变化量为 1.2 MPa,

其余两个方案的变化量均小于 1.0 MPa; 3 个换索方案下主塔的最大压应力变化均小于 1.0 MPa,且主梁和主塔的最大压应力值均未超过使结构处于弹性状态的压应力范围。综上所述,在换索过程中,拉应力和压应力表现较为不敏感,局部少量换索对整体应力变化的影响不大,因此应力变化不是影响方案选择的主要因素。

将各控制指标的变化率汇总,结果如表 5 所示。由表 5 可知:塔偏和主梁挠度的最大变化率远大于其他指标,表现出较高的敏感性,而主梁和主塔的最大压应力变化率相对较小,表现不敏感。此外,索力的最大变化率较主梁和主塔的最大压应力变化率略大,表现较为敏感。

表 5 各方案下的各项控制指标最大变化率 %

方案编号	塔偏	主梁挠度	索力	最大压应力	
				主梁	主塔
1	502.1	313.8	9.2	2.9	4.6
2	255.3	518.5	9.0	1.5	1.6
3	512.8	1 313.8	11.6	8.9	5.3

### 3 换索方案比选

从塔偏、主梁挠度、索力变化以及施工效率这几个方面进行方案比选。

(1) 在长索区,方案 1、3 的桥塔水平偏位过大,出于安全考虑,不宜采用。而方案 2 在塔偏、主梁挠度及索力变化方面均表现较为稳定,因此在长索区选择方案 2。

(2) 在中长索区,方案 3 在塔偏、主梁挠度和索力变化方面的数值远大于其他两个方案,不宜采用;方案 1、2 在索力变化方面相差不大,且方案 2 相较于方案 1 卸索数增加,但最大下挠增幅变化并不明显。此外,方案 2 的施工效率较方案 1 更高,因此在中长索区选择方案 2。

(3) 在短索区,3 方案之间的塔偏、主梁挠度和索力变化差距较小,表现较为接近。然而,方案 3 的施工效率最高,因此在短索区选择方案 3。

### 4 结 论

(1) 在换索施工过程中,塔偏、主梁挠度和索力变化表现敏感,应作为换索施工监控中的主

要控制指标;而主塔和主梁的应力变化表现不敏感,局部少量换索对整体应力变化影响较小。

(2)长索区斜拉索对塔偏的影响较大,在换索方案选择时应避免桥塔上产生过大的不平衡力,以防止出现较大的塔偏;同时,长索区的索力较大,换索对结构的影响显著,对施工安全性要求较高,因此在方案比选中应着重考虑这一区域。中长索区的斜拉索索力较大,各方案的参数变化量和变化率通常会在这一区域达到峰值,施工风险较高,需加以重视。短索区各方案的参数变化量较小而且变化率接近,在这种情况下,选择施工效率更高的方案可以兼顾安全性的同时显著提高施工效率。

(3)由于主跨与边跨存在不对称性,加上辅助墩对边跨的支撑作用,方案1的最大下挠值和索力最大增量在边跨一般小于主跨,而塔顶偏位在主跨一般小于边跨。

## 参考文献:

- [1] 李斯奇. 独塔钢斜拉桥体系设计理论研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [2] 袁和旭. 混凝土斜拉桥换索设计方法研究[J]. 工程

(上接第11页)

- [3] 张业盛,金立兵,段杰,等. 再生混凝土的配合比设计研究综述[J]. 工程建设,2024,56(3):1-5.
- [4] 冯亮,郑茂营. RAP掺量与新旧沥青融合程度对热再生混合料性能的影响[J]. 路基工程,2023(2):107-113.
- [5] 赵彩,马鲁宽. 高RAP掺量厂拌热再生沥青混合料路用性能研究[J]. 交通科技,2022(6):127-130.
- [6] 王智超,胡槟,沈明燕,等. 基于路用性能的热再生沥青混合料RAP掺量研究[J]. 公路交通科技,2024,41(1):10-17.
- [7] 王雪松. 再生骨料混凝土增强处理方法和耐久性研究综述[J]. 工程建设,2023,55(2):23-28.

技术研究,2024,9(2):202-204.

- [3] 张伟山,王俊刚. 独塔单索面斜拉桥地震弹性与弹塑性响应分析[J]. 工程建设,2016,48(1):13-18.
- [4] 公路斜拉桥设计规范:JTG/T3365-01-2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020.
- [5] 高志朋. 郧县汉江公路大桥全桥换索计算分析[J]. 工业建筑,2023,53(增刊2):376-378.
- [6] 史国刚,孙洪滨,吉伯海,等. 基于灵敏度分析的斜拉桥拉索更换顺序研究[J]. 防灾减灾工程学报,2011,31(5):590-594.
- [7] 叶锦辉,李军兵,郑恒斌,等. 大跨径混合梁斜拉桥全桥更换斜拉索顺序的研究[J]. 公路,2024,69(3):90-97.
- [8] 齐东春,王宇飞,李琦,等. 基于联合静动力修正模型的斜拉桥换索方案[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(11):1-8.
- [9] 张鸿,翁方文,黄灿. 基于敏感性分析与交通荷载控制法的斜拉桥拉索更换顺序研究[J]. 中外公路,2015,35(1):187-190.
- [10] 杨起,普毅,曹正,等. 独塔斜拉桥拉索更换顺序研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2014,10(6):333-336.

- [8] 杨耀辉,汲平,李立平,等. 大掺量RAP温再生沥青混合料设计及路用性能研究[J]. 石油沥青,2022,36(3):24-29.
- [9] 万丽霞. RAP掺量对AC-13再生沥青混合料性能影响研究[J]. 交通节能与环保,2024,20(1):160-163.
- [10] 左锋,叶奋,宋卿卿. RAP掺量对再生沥青混合料路用性能影响[J]. 吉林大学学报(工学版),2020,50(4):1403-1410.
- [11] 曹阳,张东长. RAP的性能评价及再生利用[J]. 工程建设,2010,42(5):22-25.

## 本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。