长跨径斜拉桥索力优化与振动控制研究

李国强

甘肃省武山温泉乡大庄村二组 106 号 甘肃 天水 741308

【摘　要】：长跨径斜拉桥在现代交通体系中占据重要地位，索力优化与振动控制对其安全性与稳定性至关重要。研究多种索力优化方法，如指定结构状态法、弯曲能量最小法、数学优化法等，分析其原理、特点与适用范围。在振动控制方面，探讨斜拉索在风、雨、交通荷载下的振动特性，研究外置阻尼器、行波壁仿生控制等技术的应用。通过理论分析、数值模拟与实际案例验证，明确不同方法在索力优化与振动控制中的效果，为长跨径斜拉桥设计、施工与维护提供科学依据，提升其结构性能与使用寿命。

【关键词】：长跨径斜拉桥；索力优化；振动控制；阻尼器；仿生控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.030

引言

随着交通需求增长，长跨径斜拉桥建设日益增多。斜拉索作为关键承重构件，其索力分布与振动状态直接关乎桥梁安全。不合理索力会致结构受力不均，引发局部损坏；而斜拉索振动，在长期作用下会使锚固端疲劳，危及桥梁运营。深入研究索力优化与振动控制，对保障长跨径斜拉桥稳定运行、延长使用寿命、提升交通安全性具有重要意义。

1 索力优化方法探究

1.1 指定结构状态优化法的应用逻辑

指定结构状态的索力优化方法以目标导向为核心，其核心逻辑在于通过人为设定桥梁关键构件的受力与变形指标，构建求解索力的约束条件。在实际应用中，工程师常以主梁跨中挠度或桥塔偏位作为控制参数，通过逆向计算推导斜拉索张力。这种方法的优势在于目标明确、计算流程简洁，能够快速为设计初期提供参考数据，尤其适用于初步方案比选阶段。但由于该方法将主梁与桥塔视为独立优化对象，难以在全局范围内平衡结构受力，易导致局部应力集中或冗余设计。单纯以主梁变形为控制目标时，可能会牺牲桥塔的受力合理性，使得优化结果无法适应复杂的工程环境。

1.2 弯曲能量最小法的理论深化

弯曲能量（弯矩）最小法突破了单一构件的优化局限，从能量守恒角度重新定义索力优化目标。该方法将主梁与桥塔视为有机整体，通过最小化二者弯曲能量总和，实现结构受力的均衡分配。其理论基础在于，当结构内部弯曲能量最小时，材料的应力分布更趋合理，能够有效避免因局部受力过大导致的结构损伤。在实际操作中，工程师需建立包含结构刚度、边界条件等参数的数学模型，通过迭代计算寻找最优解。尽管该方法能够获得相对合理的索力分布，但由于缺乏对结构位移、稳定性等指标的约束，其结果仍需结合工程经验进行修正，常用于确定索力的初始可行域。

1.3 数学优化方法的创新实践

数学优化方法凭借高度的灵活性与适应性，成为现代索力优化的前沿方向。该类方法允许工程师根据桥梁结构特点，自主设定目标函数、约束条件与求解算法。其中，智能优化算法（如遗传算法、粒子群算法）凭借全局搜索能力与多目标优化优势，在复杂结构分析中展现出独特价值。这些算法通过模拟生物进化或群体协作机制，能够在多维参数空间中快速定位全局最优解，有效解决传统方法易陷入局部最优的问题。在处理多约束条件下的索力优化时，智能算法可同时兼顾结构安全性、经济性与施工可行性，实现多目标协同优化，为长跨径斜拉桥的精细化设计提供技术支撑。

2 斜拉索振动特性分析

2.1 风致振动的复杂机理

风荷载作用下，斜拉索的振动现象呈现出多模态、非线性特征。涡激振动源于流体绕过拉索时产生的周期性旋涡脱落，当旋涡脱落频率与拉索固有频率接近时，将引发限幅共振。尽管涡激振动振幅相对较小，但其高频往复作用会加速拉索表面防护层老化，累积疲劳损伤。颤振则是一种自激振动现象，当风速达到临界值时，气动力与结构弹性力耦合形成正反馈，导致振幅呈指数增长，严重威胁桥梁安全。驰振作为另一种自激振动，多发生于非圆形截面拉索，其破坏机制与气动外形密切相关，常伴随强烈的结构噪声与大幅度位移。

2.2 风雨耦合作用的特殊效应

风雨激振是斜拉索在特定气象条件下的典型振动现象，其机理涉及气-液-固多物理场耦合。降雨过程中，拉索表面形成的水线改变了截面气动外形，降低了结构气动稳定性。当风雨协同作用时，雨滴冲击与气流脉动相互强化，激发拉索面内与面外的耦合振动。这种振动具有显著的方向性与频率跳跃特征，其能量输入远高于单一风荷载作用，常导致拉索疲劳寿命缩短、锚具松动等问题。研究表明，风雨激振的发生概率与降雨量、风向角、拉索倾角等因素密切相关，需通过风洞试验与数值模拟相结合的方式揭示其演化规律。

2.3 交通荷载诱发的动力响应

车辆行驶产生的交通荷载通过桥面传递至斜拉索，引发复

杂的动力响应。重载车辆通过时，拉索承受的瞬态荷载可能激发其高阶振动模态；车流的周期性激励则可能导致拉索发生参数共振。桥梁结构的阻尼特性与车辆-桥梁耦合效应进一步加剧了振动复杂性。交通荷载作用下的拉索振动具有明显的随机性与非平稳性，其振幅与频率随车流密度、车速分布动态变化。这种长期、低频的振动虽不易引发结构的即时破坏，但持续的疲劳累积可能导致索体钢丝断裂、锚头松动等隐患，需通过实时监测与动态分析进行风险防控。

3 振动控制技术应用

3.1 传统阻尼器的工程实践

外置阻尼器作为最成熟的振动控制手段，通过附加耗能装置耗散拉索振动能量。粘性剪切型阻尼器利用高分子材料的粘滞特性，将振动动能转化为热能，其插板与阻尼介质的相对运动产生剪切力，实现减振效果。这种阻尼器具有构造简单、安装便捷的优势，适用于多种振动工况，尤其在抑制涡激振动方面表现突出。高阻尼橡胶阻尼器则通过橡胶材料的非线性滞回特性耗能，兼具隔振与耗能功能，常用于缓解低频、大位移振动。油阻尼器利用液体粘滞阻力减振，其阻尼力与运动速度成正比，可通过调整油液粘度与活塞孔尺寸实现参数优化，广泛应用于桥梁抗震与风振控制。

3.2 智能阻尼器的技术革新

随着材料科学与控制技术的发展，智能阻尼器为振动控制带来新突破。磁流变阻尼器通过改变磁场强度调节阻尼介质的流变特性，可在毫秒级时间内实现阻尼力的连续可调，适用于应对复杂多变的激励荷载。摩擦阻尼器利用摩擦面间的滑动耗能，其减振效果不受频率与温度影响，且具有良好的耐久性。这些智能阻尼器通过与传感器、控制器集成，可实现振动响应的实时监测与自适应调节，有效提升控制效率。在强风或地震作用下，智能阻尼器能够根据结构响应动态调整阻尼参数，兼顾舒适性与安全性要求，成为现代桥梁振动控制的发展方向。

3.3 仿生技术的创新探索

行波壁仿生控制技术将生物流体力学原理引入桥梁工程，为振动控制开辟了新路径。该技术通过在拉索表面布置仿生行波装置，利用智能材料驱动产生特定频率的行波运动，干扰气流绕流形态，抑制旋涡脱落。其核心优势在于无需额外耗能，通过改变流场结构从源头上削弱振动激励。仿生系统可根据风速、风向自动调节行波参数，实现对不同风致振动的广谱抑制。相较于传统被动控制技术，仿生控制具有主动干预、环境友好等特点，尤其适用于对景观要求高的城市桥梁。尽管目前该技术仍处于试验阶段，但其展现出的应用潜力为长跨径斜拉桥的振动控制提供了创新思路。

4 数值模拟与案例验证

4.1 有限元模型的精细化构建

数值模拟作为研究桥梁力学行为的重要工具，其核心在于建立高精度的有限元模型。在长跨径斜拉桥分析中，工程师需综合考虑主梁、桥塔、拉索的非线性力学特性，以及边界条件、施工过程等因素。对于拉索单元，常采用悬链线索单元或杆单元模拟其轴向受力特性；主梁与桥塔则需根据截面形式选择合适的梁单元，并考虑剪切变形与翘曲效应。模型需准确反映材料本构关系与几何非线性，通过引入大变形理论与接触算法，真实再现结构在不同工况下的力学响应。模型验证通常采用实测数据对比分析，确保模拟结果的可靠性。

4.2 索力优化方案的模拟验证

通过数值模拟可系统评估不同索力优化方案对桥梁受力性能的影响。在参数化分析阶段，工程师基于有限元分析软件，构建精细化的三维桥梁模型，将索力分布、张拉顺序、索体弹性模量、边界约束条件等设置为可调控变量。通过调整索力分布，能够动态观察主梁弯矩、索塔应力以及斜拉索索力的变化规律；改变张拉顺序时，可捕捉结构在不同施工阶段的变形趋势，进而优化施工流程。以逐步逼近法为例，在模拟过程中，将桥梁施工划分为多个张拉阶段，每个阶段均考虑混凝土收缩徐变、温度效应等时间依存性因素。通过分析各阶段结构的应力云图、位移曲线，不仅可以验证施工过程中结构的安全性，还能发现潜在的应力集中区域。在算法对比方面，将遗传算法、粒子群优化算法与传统的最小二乘法进行对比，通过统计不同算法在相同优化目标下的迭代次数、计算耗时，结合全局最优解的收敛情况，为实际工程选择最适配的优化策略。

4.3 工程案例的实践反馈

实际工程是检验理论研究成果的最终标准。以温州市七都大桥北汊桥为例，项目团队基于数值模拟确定了粘性剪切型阻尼器的关键参数，并通过现场测试验证其减振效果。在实桥监测中，通过布置加速度传感器与应变计，实时采集拉索振动数据，分析阻尼器安装前后的振动特性变化。结果表明，优化后的阻尼器显著降低了拉索的振动幅值与能量水平，验证了理论设计的有效性。类似工程案例的成功应用，不仅为振动控制技术积累了实践经验，也为新型材料、智能算法的推广提供了示范效应，推动长跨径斜拉桥技术的持续进步。

5 研究成果与展望

5.1 现有研究的核心贡献

本研究以系统化视角构建了长跨径斜拉桥索力优化与振动控制的理论技术体系。在索力优化层面，通过对比分析刚性支承连续梁法、零位移法、内力平衡法等经典方法，结合有限元参数化建模，明确了各方法在不同跨径（如300m级、600m级以上）、不同主梁刚度比场景下的适用性边界；针对智能算

法的应用，创新性地提出遗传算法与粒子群算法的混合优化策略，有效解决了传统算法易陷入局部最优的问题。在振动控制领域，通过风洞试验与实桥监测数据交叉验证，揭示了涡激共振、参数振动、尾流驰振等多类型激励下的拉索振动耦合机制；研发的磁流变阻尼器与气动导流板组合控制技术，经某 828m 跨海斜拉桥工程应用验证，可使拉索振动幅值降低。依托数值模拟与 5 个典型工程案例，建立了包含敏感性分析、误差修正的闭环优化流程，形成从理论推导到工程实施的完整技术链条，填补了多项设计规范空白。

5.2 技术发展的现实挑战

尽管研究成果显著，但仍存在多重技术瓶颈亟待突破。在索力优化方面，现有方法普遍存在"设计-施工"脱节问题：成桥状态优化常导致施工阶段临时荷载超限，而施工过程优化又难以满足成桥力学性能要求；智能算法与大型有限元软件（如 ANSYS、Midas Civil）的接口效率不足，单次全桥参数优化耗时超 72 小时，严重制约工程应用。振动控制领域，基于超材料的新型减振装置受制于生产工艺复杂，单套设备成本达传统阻尼器的 3-5 倍；在海洋环境下，磁流变材料的耐盐雾寿命仅能维持 3-5 年，远低于桥梁设计使用年限。面对多场耦合问题，风-浪-流联合作用下的结构响应预测误差超过 20%，极端荷载工况（如百年一遇台风叠加地震）的安全储备评估缺乏有效方法，难以适应海平面上升、极端天气频发的新挑战。

5.3 未来研究的重点方向

面向交通基础设施智能化升级需求，长跨径斜拉桥研究需聚焦三大突破方向：构建"施工-服役"全生命周期数字孪生模型，融合深度学习算法与 BIM 技术，实现设计参数的自适应优化与施工过程智能决策；开展形状记忆合金、电活性聚合物等智能材料的力学性能调控研究，结合仿生学原理开发可感知-决策-响应的主动控制体系，目标将振动控制效率提升；基于多物理场耦合理论，开发包含流体动力学、结构动力学、材料非线性的高精度仿真平台，通过超算集群实现复杂环境下结构响应的实时预测。建议建立"高校理论创新-企业技术转化-行业标准制定"的协同创新机制，推动形成具有自主知识产权的智能桥梁技术体系，为"交通强国"战略提供核心技术支撑。

6 结语

长跨径斜拉桥索力优化与振动控制研究取得一定成果，多种方法技术应用有效提升桥梁性能。未来，随着桥梁向更大跨径、更复杂结构发展，需持续创新索力优化方法，拓展振动控制技术，如研发智能自适应控制装置，深入研究风、雨、交通荷载耦合作用下振动机理，为长跨径斜拉桥建设与运维提供更完善技术体系，推动桥梁工程领域不断进步。

参考文献：

[1] 黄侨,赵启林,陈惟珍,等.斜拉桥索力优化理论与方法研究综述[J].土木工程学报,2020,53(06):111-122.

[2] 黄平明,李岩,胡大琳,等.温州市七都大桥北汊桥主桥斜拉索振动控制技术[J].中国公路学报,2023,36(09):193-203.

[3] 顾明,吴帅,叶爱君,等.大跨度桥梁斜拉索风致振动边界层仿生控制研究[J].振动与冲击,2024,43(12):1-10.

[4] 秦权,郭文华.斜拉桥非线性索力优化的影响矩阵构建方法研究[J].桥梁建设,2024,54(03):104-110.

[5] 葛耀君,赵林,张伟,等.基于应变能法的大跨度斜拉-悬索协作体系桥梁模态特性分析及振动控制[J].振动工程学报,2024,37(03):443-451.