

基于全生命周期成本的大跨度斜拉桥优化设计研究

樊海琳

国家林业和草原局西南调查规划院, 云南 昆明 650031

DOI:10.61369/ETQM.2026030025

摘 要 : 本研究将全生命周期成本理论应用于大跨度斜拉桥设计, 旨在构建一套兼顾经济性与结构性能的系统性优化方法。通过剖析桥梁全周期成本构成与关键影响因素, 建立了集成优化设计模型与求解策略, 并基于参数化分析流程实现多方案的自动寻优与综合比选。最终目标是寻求全周期总成本最低且技术性能均衡的设计方案, 从而为工程决策提供量化依据。

关 键 词 : 全生命周期; 斜拉桥; 优化设计; 成本控制

Research on Optimal Design of Long-Span Cable-stayed Bridges Based on Full Life Cycle Cost

Fan Hailin

Southwest Survey and Planning Institute, National Forestry and Grassland Administration, Kunming, Yunnan 650031

Abstract : This study applies the life cycle cost theory to the design of long-span cable-stayed Bridges, aiming to construct a systematic optimization method that takes into account both economic efficiency and structural performance. By analyzing the cost composition and key influencing factors of the entire cycle of the bridge, an integrated optimization design model and solution strategy were established, and the automatic optimization and comprehensive comparison of multiple schemes were realized based on the parametric analysis process. The ultimate goal is to seek a design solution with the lowest total cost throughout the entire cycle and balanced technical performance, thereby providing a quantitative basis for engineering decisions.

Keywords : full life cycle; cable-stayed bridge; optimized design; cost control

引言

大跨度斜拉桥作为在交通网络中起到关键支撑作用且需要投入大量资金、拥有漫长服役期限的重要基础设施, 传统的以控制初期建造成本为主要侧重点的设计方法, 常常会因为对后期从运营、维护到拆除的整个周期内的经济负担估计不足, 而可能造成项目在长期经济性方面表现不佳的情况, 有鉴于此, 为了突破这一传统设计方法存在的局限, 本研究决定将全生命周期成本理论引入到设计阶段, 其核心目的在于构建一套系统化的优化方法体系, 该体系需要通过深入分析斜拉桥全周期成本的具体构成要素以及对其产生关键影响的各种因素, 来建立一个能够将经济性和结构性能进行有效集成的优化模型, 同时制定相应的求解策略, 并且借助参数化的流程来实现对多个设计方案的自动寻优以及综合比选过程, 而这一系列研究工作的最终目标, 是希望能够为找到全周期总成本最低并且在技术性能方面达到均衡状态的设计方案, 提供坚实的理论依据以及可量化的决策工具支持。

一、全生命周期成本理论与大跨度斜拉桥的适用性分析

(一) 全生命周期成本的基本内涵与成本构成分解

全生命周期成本作为工程项目从决策、设计、建造、运营维护到最终拆除处置的完整周期内所产生的全部成本总和, 其基本内涵是突破传统设计仅将关注点放在初期建造成本的局限, 借助系统性的成本评估, 为实现项目长期经济性的最优状态提供决策

方面的依据, 而对于大跨度斜拉桥来讲, 其成本构成能够分解成初始建造成本、运营期成本以及最终的拆除清理与残值回收成本这几个关键部分, 其中初始建造成本主要包含着材料、设备、人力以及管理等方面的费用, 运营期成本涵盖了日常检查、常规养护、定期维修以及可能会出现结构加固, 并且资金的时间价值属于核心的考量因素, 需要通过合理的折现方法把未来各个时期的成本折算成现值, 进而在统一的时间基准之上进行量化的分析与比较, 这样的成本分解体系为在桥梁设计阶段开展全局性

的经济性评估奠定了量化的基础^[1]。

（二）大跨度斜拉桥的成本结构特性与关键影响因素识别

大跨度斜拉桥的成本结构所呈现出的鲜明全周期分布特性与高度关联特性，使得在初始建造成本里，作为核心部分占据主要地位的主梁、索塔、斜拉索体系等主要构件的材料费用与施工费用，其设计决策会对结构的耐久性及长期性能产生直接影响，而运营维护阶段长期存在的成本，则会受到桥梁结构细节、材料选用、构造设计以及所处环境条件的综合影响，其中关键影响因素涵盖结构体系与主要构件的设计参数、所选材料的性能与价格、施工方案的可行性与风险、风、腐蚀、疲劳等环境荷载作用的强度，以及运营期检测维修的便利性^[2]，不过准确识别这些因素及其相互作用，虽为量化评估全生命周期成本以及实施优化设计的前提，但在句子完整性方面需适当调整以符合要求。

（三）全生命周期成本分析在桥梁设计阶段的应用框架

全生命周期成本分析于设计阶段所进行的应用，其目的在于构建起一个具备系统性特征的决策框架，此框架的核心要点是在开展方案比选以及详细设计的过程当中，建立起一种评估模型，该模型需涵盖桥梁从建设、运营、维护一直到拆除的整个周期的长期经济性，而其应用首先会体现为将远期成本转化为显性成本，具体方式是通过针对不同的设计方案开展全周期成本模拟工作以及现值计算工作，进而揭示出仅仅关注初期投资这一情况所可能隐藏的长期经济风险，其次，该框架能够对设计参数的优化工作起到指导作用，促使设计者在满足安全规范以及功能规范的前提下，主动对初始材料投入、结构细节耐久性设计以及后期养护需求之间的经济关系进行权衡，最终，该框架借助提供量化的全周期经济指标这一方式，把成本管控的视角从单一的建造环节向前置移动并且贯穿于整个设计过程，从而为实现结构性能与全周期经济性达到最佳平衡状态的设计方案提供理性依据以及优化方向^[3]。

二、面向全生命周期成本的斜拉桥优化设计模型构建

（一）优化设计的目标体系与多目标权衡原则

在以全生命周期成本为基础展开的大跨度斜拉桥优化设计工作当中，其目标体系的核心被确定为在桥梁所经历的全寿命周期之内实现总经济成本的最优化处理，而这一目标并非单纯意义上的成本最小化追求，实际上是一个把多重约束条件以及多元目标都涵盖在内的综合性体系构造，首先需要达成的目标是在完全满足所有相关安全规范要求以及使用功能需求的前提下，将由建造成本、运营维护成本以及最终处置成本共同构成的净现值总和控制在最小范围^[4]，与此同时，该目标体系还必须与关键的结构性能目标形成协同关系，这些结构性能目标具体包含着确保桥梁在设计周期和基准周期之内具备承载安全特性、动力性能维持稳定状态、结构表现出耐久可靠的特质，并且能够对预期的环境作用和荷载作用做出适应性响应，而多目标权衡原则作为处理上述各目标之间潜在冲突的关键所在，对设计者提出了不进行目标简单取舍的要求，而是需要在可行的设计空间范围之内，借助量化

分析的手段，去探寻能够让全生命周期成本与主要结构性能指标实现最佳平衡状态的设计方案，进而在有效控制长期经济投入的同时，对结构的安全性以及服役寿命起到保障作用^[5]。

（二）设计变量选取、约束条件确立与数学模型表达

优化模型的建立往往会以那些对全生命周期成本以及结构性能都有着十分显著影响的参数作为设计变量的选取对象，像主梁截面尺寸、索塔几何形式、斜拉索布置间距与面积、主要构件材料等级这类参数便包含在内，而约束条件的确立则需要将结构安全性、使用功能性以及建造可行性要求全部涵盖其中，这不仅涉及规范所规定的强度、刚度和稳定性验算条件，还包括行车净空、动力特性、施工工艺限制等一系列边界条件，数学模型的表达其实就是把前面所提到的目标、变量以及约束进行整合并且形式化的一个过程，其核心在于构建一个以全生命周期成本净现值最小化为目标函数，同时以结构响应与设计限值关系作为约束方程的数学规划问题，通过这样的方式，该模型能够借助严密的数学关系将设计决策和长期经济性能连接起来，进而为系统化的自动优化求解提供一个明确的计算框架^[6]。

（三）集成成本评估与结构性能的优化求解策略

集成成本评估连同结构性能的优化求解这一策略，其目的在于凭借算法去开展多目标设计空间的系统探索工作以及最优解的搜寻任务，该策略首先要做的是把全生命周期成本模型和结构有限元分析模型进行耦合，如此一来，任何设计变量的调整都能够同步地反馈成为经济成本与力学性能方面的量化变化，而在面对多目标且多约束的复杂优化问题时，一般会采用像基于梯度的算法或者启发式全局搜索算法这类高效的优化算法，在满足全部约束条件的设计可行域之内，去驱动设计变量朝着让作为目标函数的全生命周期成本现值实现最小化的方向进行迭代更新，在求解过程当中，需要对成本与性能指标之间有可能存在的矛盾进行处理，通过算法策略在 Pareto 最优前沿之上寻找非劣解集，进而能够为决策者提供一系列在成本与性能之间具有不同权衡程度的高效设计方案，而并非是单一的结果，并且这一策略还是实现从理论模型向具体优化方案转化的关键技术环节。

三、优化方法的实践路径与效能评估

（一）基于实际工程背景的参数化分析流程

基于实际工程背景且作为将前述优化模型应用于具体桥梁设计之关键实施步骤的参数化分析流程，其始于对项目设计条件、技术标准以及边界约束进行全面梳理的基础之上，并据此确立优化的具体目标与范围，而后借助参数化建模技术把桥梁的主要几何形态、构件尺寸以及材料属性定义成可灵活驱动的设计变量，进而构建起参数化数字模型，该模型需要与结构分析软件及成本计算模块实现数据联通以形成一个自动化的分析循环，在每一次迭代过程中，对设计参数的修改能够自动更新结构模型，同时同步完成力学性能分析以及对应全生命周期成本的估算，通过预设的优化算法驱动这一循环反复进行，系统可以在满足所有约束的设计空间当中自动搜寻更优解，最终该流程所输出的是一个符合

特定工程实际、经过系统寻优且具备详细经济与性能数据支持的设计方案集合，从而为后续决策提供直接依据^[7]。

（二）不同设计方案的对比分析与综合效益评价

基于参数化分析流程所输出的若干候选方案来建立系统化比较体系，而不同设计方案的对比分析与综合效益评价作为验证与筛选优化成果的核心环节，此对比分析不仅要在全生命周期成本净现值这一核心经济指标纳入关注范畴，还需同步对各方案的关键结构性能参数加以考察，像主梁最大应力与位移、结构基频、关键构件疲劳寿命这类参数均在考察之列；综合效益评价则需在上述量化对比的根基之上，引入更为全面的评估维度，施工可行性、运营期维护便利性、对不确定风险的适应性以及技术先进性等维度均包含在内，通过建立多属性决策矩阵或者采用特定的综合评价方法，对各项指标实施归一化处理并进行权重分配，进而实现对各候选方案的排序，其最终目的是从 Pareto 最优解集中找出在长期经济性、结构安全可靠性与工程可实施性之间达成最佳平衡的设计方案，以便为工程决策提供明确依据^[8]。

（三）优化结果的敏感性讨论与技术经济性总结

作为对整个研究过程及成果进行闭环评估之关键步骤的优化结果的敏感性讨论与技术经济性总结，其中敏感性讨论系指对如材料单价、折现率、预期交通荷载增长、主要维护周期等关键输入参数的合理波动于最优设计方案及其全生命周期成本评价结果

的量化影响程度加以分析，通过对影响结果显著的高敏感性参数进行识别，既能够明确在后续工程实践中需重点控制与精确预测的因素，又可评估优化方案在不确定条件之下的鲁棒性，而技术经济性总结则是于前述分析与讨论的基础之上^[9]，对所提出的优化设计方法及其产出方案的实际价值进行综合评判，这其中涵盖该方法在降低全生命周期总成本、平衡初期投资与长期养护费用、于既定约束下提升结构经济性等方面的效能进行总结，同时明确其技术适用条件与局限性，进而形成关于研究成果的完整结论以及针对工程实践的指导性意见^[10]。

四、结论

综上所述，通过将以全生命周期成本作为核心的针对大跨度斜拉桥的系统化优化设计方法进行构建这一研究活动，并且凭借理论层面的深入剖析、模型的精心搭建以及实证方面的全面评估等一系列研究手段，进而对该方法所具备的能够在有效保障结构安全性能的基础前提之下，实现对初期投资与长期养护之间关系的良好协调，以及显著降低全周期总成本的作用和效果进行了充分证明，从而为工程设计工作的开展以及决策过程的推进提供科学合理的量化分析工具以及切实可行的优化路径。

参考文献

[1] 陈景越. 基于全生命周期成本分析的 10 kV 配电网高效设计策略 [J]. 低碳世界, 2023, 13(8):1-8.
[2] 刘军. 储能电站全生命周期成本接入电网规划设计 [J]. 能源新观察, 2022, 5(3):15-22.
[3] 肖爱. 基于全生命周期成本的机制高性能混凝土方案多属性决策研究 [D]. 广西大学, 2024: 57(46):1-80.
[4] 林坤锐. 面向全生命周期成本与能耗最优的高速公路立体线形设计方法 [D]. 佛山大学, 2023: 46(78):24-36.
[5] 许晓瑞, 张安然. 全生命周期成本理论在水利工程设计优化中的应用 [J]. 中国水运, 2024, 24(5):30-36.
[6] 胡丽华. 集采模式下设备全生命周期成本优化研究 [D]. 山东工商学院, 2023: 46(4):67-279.
[7] 陈维丽. 某住宅电气全生命周期成本的设计优化研究 [D]. 广东工业大学, 2024: 6(9):25-43.
[8] 黄淮. 基于全生命周期成本分析的建筑节能优化设计 [J]. 建筑与预算, 2022, 44(4):46-48.
[9] 赵孟. 绿色住宅全生命周期成本和碳排放优化研究 [D]. 北方工业大学, 2023: 8(2):56-158.
[10] 宣健强. 装配式建筑全生命周期成本影响因素研究 [D]. 安徽建筑大学, 2022: 8(14):27-159.