

基于改进 NSGA - II 算法的钢管混凝土拱桥优化研究

汤杰豪, 余钱华

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 为了有效解决大跨径钢管混凝土拱桥多目标优化设计中解集收敛性不足、工程实用性受限的难题, 以涂乍河特大桥为工程背景, 通过提出一种融合自适应交叉变异算子与动态约束处理机制的改进 NSGA - II 算法, 以实现承载力、轻量化与经济性的协同优化。优化结果表明: 主拱圈重量降低 12.2%, 承载力安全系数提升至 1.83; 主梁跨中正弯矩减少 14.5%, 活载挠度降幅达 17.8%; 综合造价较原方案节约 8%。进一步分析算法性能可知, 改进 NSGA - II 的 Pareto 解集收敛性与分布性显著提升(超体积指标 HV 较传统算法提高 22%), 且所有优化方案均严格满足规范要求。本文成果可为复杂拱桥结构的多目标优化设计提供理论支撑与工程实践参考。

关键词: 钢管混凝土拱桥; 多目标优化设计; 承载力; 轻量化; 经济性; 改进 NSGA - II 算法

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 1673 - 8993(2026)01 - 0039 - 07

doi:10.13402/j.gcjs.2026.01.006

Study on optimization of concrete-filled steel tubular arch bridges based on improved NSGA-II algorithm

TANG Jiehao, YU Qianhua

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

Abstract: In order to effectively solve the problems of insufficient convergence of the solution set and limited engineering practicality in the multi-objective optimization design of long-span concrete-filled steel tubular (CFST) arch bridges, in this study, the Tuzha river super large bridge is taken as an engineering case and an improved NSGA-II algorithm, integrating an adaptive crossover and mutation operator and a dynamic constraint-handling mechanism is proposed to achieve the collaborative optimization of bearing capacity, lightweight design, and economic efficiency. The optimization results show a 12.2% reduction in the weight of the main arch ring, an increase in the bearing capacity safety factor to 1.83, a 14.5% decrease in the positive bending moment at the midspan of the main girder, and a 17.8% reduction in live load deflection. The overall cost is reduced by 8% compared to the original design. Further analysis of algorithm performance indicates that the convergence and distribution of Pareto solution sets of the improved NSGA-II significantly increased (the hypervolume indicator HV increases by 22% compared to the traditional algorithm), and all optimized schemes strictly meet the requirements of design specifications. The findings of this study can provide theoretical support and practical references for the multi-objective optimization design of complex arch bridge structures.

Key words: concrete-filled steel tubular arch bridge; multi-objective optimization design; bearing capacity; lightweight; economic efficiency; improved NSGA-II algorithm

钢管混凝土拱桥作为拱桥结构发展的重要突破, 凭借其造型美观、受力特性明确、材料性能

高效发挥等优势, 在我国得到了快速发展。近 30 年来, 尤其自 1993 年起, 钢拱桥数量大幅增长,

收稿日期: 2025 - 05 - 13

作者简介: 汤杰豪(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。

1998 年后已超过混凝土拱桥的修建规模^[1-2]。然而,随着交通网络的升级改造与重载运输的普及,道路运输系统呈现两大显著特征:1) 动态交通荷载谱发结构性演变,重载货车在车流中的占比持续攀升;2) 既有桥梁在长期服役中,材料性能退化与设计荷载标准的历史局限性产生叠加效应。在此双重挑战下,准确掌握桥梁力学响应特征并实施服役可靠性诊断,已成为保障路网畅通与运营安全的核心技术问题。该过程涉及拱肋截面参数、材料配比、施工工艺等多变量耦合作用,而传统设计方法依赖“试算-验证”的经验循环,存在效率低、难以量化权衡经济性与安全性的缺陷。因此,探索一种高效、省力且评估可靠的优化方法,成为桥梁工作者的重要任务^[3]。

为满足桥梁服役可靠性精准诊断的需求,工程技术领域已发展出多维度评估体系。各类检测手段在理论基础和操作路径上既具有技术关联,又呈现差异化特征,共同服务于桥梁状态评估的核心目标。经工程验证和技术迭代,这些方法逐步形成具有显著区分度的技术谱系,可归纳为以下几类:1) 基于实桥调查的经验方法;2) 基于专家系统的诊断方法;3) 荷载试验法;4) 基于桥梁非线性理论的分析方法;5) 基于可靠度理论的评估方法^[4]。近年来,多目标优化算法在桥梁设计中的应用逐渐成为研究热点。赖嘉洲等^[5]针对斜拉桥索力优化问题,提出动态优化方法:在标准遗传算法基础上引入改进型多种群遗传算法,构建索力动态优化流程并应用于实际桥梁施工监控;李剑桥^[6]结合桥梁结构优化算法,对某桥拱肋、立柱和横撑的钢管壁厚、直径进行参数调整,通过 Midas Civil 软件对比分析优化前后的最大应力、挠度及自振频率等力学特性;丁伟光^[7]针对大跨度钢管混凝土拱桥拱肋参数优化,建立多目标优化模型,采用改进惯性权重的多目标粒子群算法求解,实现了拱肋参数的优化设计;涂兵等^[8]以单位长度造价和抗弯刚度为优化指标,构建四管桁式变截面钢管混凝土拱肋多目标优化模型,应用 NSGA-II 算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II,非支配排序遗传算法 II)求解,达成工程造价与结构稳定性的协同优化。

综上,多目标优化算法在大型桥梁结构优化与稳定性研究中的应用已成为近年来的热点。本文针对大跨度钢管混凝土拱桥优化问题,以实际工程为背景,系统分析拱肋直径、钢管壁厚与混凝土强度的多目标协同优化规律,结合 Sobol 敏感性分析量化各设计参数对目标函数的影响,以期同类桥梁的优化设计提供理论支撑与技术参考。

1 考虑多目标的优化模型

钢管混凝土拱桥多目标优化问题属于典型的多目标约束优化问题,其数学描述通常包含决策变量、目标函数和约束条件 3 个核心要素。在工程实践中,需同时考虑结构安全性(承载力最大化)、经济性(材料成本最小化)和轻量化(几何参数合理化)等多重目标。本模型通过建立包含非线性目标函数与复杂约束条件的数学表达式,系统描述各目标间的耦合关系与竞争机制。

1.1 决策变量定义

设钢管混凝土拱桥的设计参数为决策变量,各参数取值范围:

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbf{R}^n \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}$ 为决策变量向量; $\mathbf{R}^n$ 为 n 维度向量空间集合; T 为向量维度; n 为优化变量总数; x_i 为第 i 个设计变量,具体包括:1) 拱肋截面参数:钢管直径 D (mm),壁厚 t (mm),混凝土强度等级 f_{ck} ,钢管屈服强度 f_y (MPa);2) 拱轴几何参数:矢跨比 λ 、拱轴线形参数 m ;3) 材料分布参数:钢管与混凝土面积比 α 。

各变量需满足工程约束^[9]:

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: x_i^L 、 x_i^U 分别为变量第 i 个决策变量的下限和上限。

1.2 目标函数构建

建立归一化多目标函数向量:

$$\min F(\mathbf{X}) = [f_1(\mathbf{X}), f_2(\mathbf{X}), \dots, f_m(\mathbf{X})]^T \quad (3)$$

式中: $F(\mathbf{X})$ 为多目标函数向量; $f_m(\mathbf{X})$ 为各目标函数。

其中主要包含目标如下。

(1) 结构轻量化目标^[9]:

$$f_1(\mathbf{X}) = \frac{W(\mathbf{X})}{W_0} = \frac{\sum_{k=1}^N \rho_s A_{s,k} L_k + \rho_c A_{c,k} L_k}{W_0} \quad (4)$$

式中: $f_1(X)$ 为结构轻量化目标函数; $W(X)$ 为特定设计变量组合 X 对应的钢管混凝土拱桥主拱圈结构计算总重量; W_0 为初始设计重量基准值; ρ_s 为钢材密度, kg/m^3 , 本文取 $7\,850\text{ kg/m}^3$; ρ_c 为混凝土密度, kg/m^3 , 本文取 $2\,500\text{ kg/m}^3$; $A_{s,k}$ 为第 k 单元中钢管总截面积, m^2 ; $A_{c,k}$ 为第 k 单元中混凝土净截面积, m^2 ; L_k 为单元长度, m 。

(2) 承载力安全储备目标(仅考虑拱圈内轴力)^[10]:

$$f_2(X) = -\frac{N_u(X)}{N_{\text{Ed}}} \quad (5)$$

$$N_u = \eta_s f_y A_s + \eta_c f_{ck} A_c \quad (6)$$

$$\eta_s = 1.0 + 0.12D/t \quad (7)$$

$$\eta_c = 1.0 + 1.5 \sqrt{f_{ck} t/D} \quad (8)$$

式中: $f_2(X)$ 为承载力安全储备目标函数; $N_u(X)$ 为特定设计变量组合 X 对应的钢管混凝土拱桥主拱圈控制截面的极限轴压承载力; N_u 为极限承载力, kN , 采用组合强度理论计算; N_{Ed} 为设计轴力, kN ; η_s 、 η_c 分别为钢管、混凝土约束系数^[10]; f_{ck} 为混凝土强度, MPa ; f_y 为钢管屈服强度, MPa ; A_s 为单根钢管的横截面积, m^2 , 考虑拱肋中所有钢管(弦管、腹杆、缀管)的截面积之和; A_c 为钢管内填充的混凝土净截面积(扣除钢管壁厚占据的空间), m^2 。

(3) 经济性目标^[9]:

$$f_3(X) = \frac{C(X)}{C_0} = \frac{c_s \sum A_s L + c_c \sum A_c L}{C_0} \quad (9)$$

式中: $f_3(X)$ 为经济性目标函数; $C(X)$ 为钢材和混凝土总造价计算函数; C_0 为基准造价, 元; C_s 为钢材单价, 元/t, 本文取 $5\,200\text{ 元/t}$; C_c 为混凝土单价, 元/ m^3 , 本文取 800 元/m^3 ; L 为钢管或混凝土构件的分段单元长度, m 。

1.3 约束条件体系

建立约束函数集合:

$$g_j(X) \leq 0, j = 1, 2, \dots, p \quad (10)$$

式中: $g_j(X)$ 为约束函数; p 为各约束函数的编号。

(1) 强度约束:

$$g_1 = \frac{\sigma_{\max}}{f_d} - 1 \leq 0 \quad (11)$$

$$f_d = \min(f_y/\gamma_s, 0.85f_{ck}/\gamma_c) \quad (12)$$

式中: g_1 为强度约束函数; $\sigma_{\max}$ 为最大组合应力, MPa ; f_d 为强度设计值, MPa ; γ_s 为钢材分项系数, 根据《混凝土结构设计规范(2015 版)》(GB 50010—2010), 分别取普通钢筋为 1.1、预应力钢筋为 1.2; γ_c 为混凝土分项系数, 本文取 1.4。

(2) 稳定约束^[9-10]:

$$g_2(X) = \frac{N_{\text{Ed}}}{\varphi N_u} - 1 \leq 0 \quad (13)$$

$$\varphi = f(\lambda) \quad (14)$$

式中: $g_2(X)$ 为稳定约束函数; φ 为稳定系数; λ 为长细比, 取值规则: 当 $\lambda \leq 50$ 时, $\varphi = 1.0$; 当 $\lambda = 100$ 时, $\varphi = 0.8$; 当 $50 < \lambda < 100$ 时, φ 按线性插值法确定。

(3) 变形约束^[9]:

$$g_3 = \frac{u_{\max}}{L/800} - 1 \leq 0 \quad (15)$$

式中: g_3 为变形约束函数; $u_{\max}$ 为活载作用下最大竖向位移。

(4) 构造约束^[10]:

$$0.04 \leq \alpha = \frac{A_s}{A_c} \leq 0.2 \quad (16)$$

式中: α 为钢管与混凝土面积比, 下限取 0.04 ^[10], 上限取 0.2 ^[11]。

1.4 多目标优化数学模型

综合上述要素, 建立完整数学模型:

Find X

Minimize $F(X) = [f_1, f_2, f_3]^T$

Subject to $g_j(X) \leq 0 (j = 1, \dots, 6)$

$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U (i = 1, \dots, n)$

1.5 非劣解集定义

设解空间 Ω 满足所有约束, Pareto 最优解集定义^[12]为

$$P^* = \{X \in \Omega \mid \exists Y \in \Omega, F(Y) < F(X)\} \quad (17)$$

式中: P^* 为优化算法最终输出的所有 Pareto 最优桥梁设计方案集合, 每个解代表轻量化、承载力、经济性的不同权衡结果; X 、 Y 为两个不同的设计向量(包含不同具体设计参数值); $F(X)$ 为方案 X 在所有优化目标上的性能向量; $F(Y)$ 为方案 Y 在所有优化目标上的性能向量; $<$ 为 Pareto 支配关系, 即 $\forall i \in \{1, \dots, m\}, f_i(Y) \leq f_i(X)$ 且 $\exists j$,

$f_j(Y) < f_j(X)$, 其中 i, j 为优化目标, $f_i(X)$ 、 $f_i(Y)$ 和 $f_j(X)$ 、 $f_j(Y)$ 分别为方案 X 、 Y 在第 i 、 j 个目标上的数值。

2 基于改进的 NSGA - II 算法的钢管混凝土拱桥优化

2.1 改进的 NSGA - II 算法

NSGA - II 算法是一种基于遗传算法理论, 在原始 NSGA 算法基础上提出的第二代非支配排序多目标遗传算法。该算法在保留原始 NSGA 算法优势的基础上, 通过快速非支配排序策略显著降低了计算复杂度^[13]。本文针对 NSGA - II 算法进行改进: 1) 优化交叉变异算子, 以增强全局搜索能力并强化局部精细搜索效果, 加速收敛进程; 2) 引入动态约束处理机制, 提升算法对约束条件的适应性, 从而提高整体搜索效率。

2.1.1 自适应交叉变异算子

交叉率和变异率直接调节 NSGA - II 算法的种群进化方向。其中, 较高的交叉率会显著提高迭代过程中个体间基因交换的概率。本文提出一种自适应策略, 通过动态调整交叉概率与变异概率。初期设置较高的交叉率以促进全局探索, 同时保持较低的变异率以维持种群稳定性; 后期降低交叉率以保留优秀个体, 并提高变异率以增强跳出局部最优的能力。相关表达式如下。

$$P_c(t) = P_{c0} \cdot e^{-\beta_c t / T_{\max}} \quad (18)$$

$$P_m(t) = P_{m0} \cdot (1 - e^{-\beta_m t / T_{\max}}) \quad (19)$$

式中: $P_c(t)$ 为交叉概率; $P_m(t)$ 为变异概率; t 为当前迭代次数; $T_{\max}$ 为最大迭代次数; P_{c0} 、 P_{m0} 分别为初始交叉概率和初始变异概率; β_c 、 β_m 为衰减系数, 分别控制交叉概率和变异概率随迭代进程的变化速率, 其值通过灵敏度分析确定。

2.1.2 动态约束处理机制

NSGA - II 算法中, 传统静态惩罚因子难以平衡“可行域探索”与“约束违反惩罚”的矛盾。本文引入基于 Pareto 支配的约束违反度评价函数, 以精确衡量解的可行性, 并提出动态惩罚因子调整策略。初期允许轻度约束违反以拓展探索空间, 后期强化惩罚以确保最终解的可行性。相关表达式分别如式(20)、(21)所示, 总适应度函数表达式

如式(22)所示。

$$\Psi(X) = \sum_{j=1}^p \max(0, g_j(X)) + \sum_{k=1}^q |h_k(X)| \quad (20)$$

$$\lambda(t) = \lambda_{\max} \cdot \left(\frac{t}{T_{\max}}\right)^{\gamma} \quad (21)$$

$$F_{\text{total}} = F(X) + \lambda(t) \cdot \Psi(X) \quad (22)$$

式中: $\Psi(X)$ 为约束违反度评价函数; q 为等式约束的数量; $h_k(X)$ 为第 k 个等式约束函数; $\lambda(t)$ 为随时间变化的动态惩罚因子; $\lambda_{\max}$ 为最大动态惩罚因子, 本文取 104; t 为当前迭代次数; $T_{\max}$ 为最大迭代次数; γ 为惩罚因子的增长速率指数, 本文取 2; F_{total} 为修正后的总适应度值。

2.2 改进的 NSGA - II 算法求解流程

采用改进后的 NSGA - II 算法, 对钢管混凝土拱桥吊杆系统可靠性约束下的承载能力多目标优化问题展开求解分析。基于 MATLAB 数值计算环境开发该算法的实现程序, 其技术路线如图 1 所示, 主要计算步骤归纳如下。

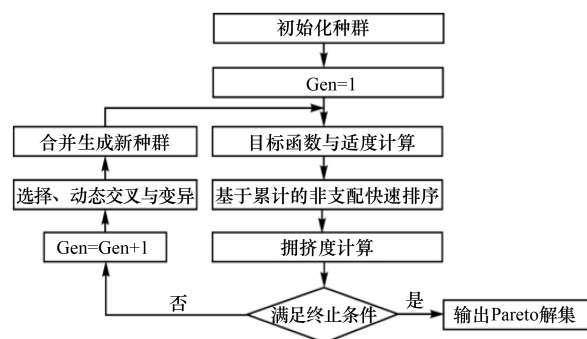


图 1 基于改进 NSGA - II 算法的钢管混凝土优化流程

(1) 算法初始化。采用拉丁超立方采样 (latin hypercube sampling, LHS) 在变量空间内生成初始种群, 确保变量均匀覆盖设计空间, 避免局部聚集。设置算法基本参数 (根据《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB 50923—2013) 设定变量上下限), 并将约束条件加载至算法约束库。

(2) 适应度指标计算。建立 Matlab 与有限元分析软件的协同通信机制, 依托有限元仿真模型求解目标函数数值解。将仿真结果实时反馈至改进的 NSGA - II 算法, 作为种群适应度评价依据, 通过量化比较实现个体适应能力的多维度评估。

(3) 非支配排序与拥挤度计算。利用代理模型预测结果对种群进行快速非支配排序, 实现 Pareto 前沿层级的动态划分。采用改进的 k (核心

超参数)近邻密度估计($k=5$)计算拥挤度,避免传统方法在高维目标空间中的分布性退化问题。通过种群内个体分布密度特征实现父本群体的迭代更新。

(4) 交叉与变异操作。根据当前迭代次数 t 动态调整交叉概率,采用模拟二进制交叉(simulated binary crossover, SBX)生成子代种群,保留优质基因片段。通过多项式变异算子引入多样性,变异概率随迭代次数递增,增强局部搜索能力。

(5) 动态约束处理。计算个体的约束惩罚因子,修正适应度值以引导种群向可行域迁移;对严重违反工程规范的个体实施淘汰机制。每 5 代基于期望改进(expected improvement, EI)准则选择信息量最大的新样本点,更新混合代理模型权重,保持预测精度。

(6) 终止条件与结果输出。当同时满足最大迭代次数为 500 和解集超体积变化率 $\Delta\Phi < 1\%$ [计算公式如式(23)所示]时,判定算法充分收敛。提取非支配解集,生成 Pareto 前沿三维可视化图谱,导出满足规范要求的最优设计方案(如最小重量-最大承载力权衡解)。

$$\Phi(X, P) = \bigcup_{x \in X}^X v(x, P) \quad (23)$$

式中: $\Phi(X, P)$ 为超体积函数; X 为算法求解得到的非占优解集; P 为真实 Pareto 对应的参考点; $v(x, P)$ 为解集 X 中所有解与参考点共同构成的超体积,即解集中每个解 x 与参考点 P 连线作为对角线所形成的超立方体体积之和。该指标通过计算各解与参考点在各目标维度上的差值(以连线为对角线)所围成的超立方体体积之和,实现对多维目标空间覆盖范围的度量^[14]。

3 工程背景及结构有限元模型

3.1 工程概况

涂乍河特大桥为上承式钢管混凝土拱桥,桥跨

布置为 $2 \times 35 \text{ m} + 252 \text{ m} + 2 \times 35 \text{ m}$ 。上部结构主要由 $13 \times 20 \text{ mT}$ 梁组成,采用“先简支后桥面连续”的施工技术方案。主拱体系设计参数:净跨径为 252 m,计算矢高为 45.82 m,矢跨比为 1:5.5;拱轴线型选用悬链线,其拱轴参数确定为 1.167。拱肋采用 4 根钢管组成的等截面桁架构造,主承力钢管外径统一为 1 100 mm,按受力差异设置 3 种渐变壁厚(26、22、18 mm)设计,管腔内部灌注 C55 级微膨胀混凝土。构件连接体系包含两类空间管件:纵向传力构件采用外径为 508 mm、壁厚为 16 mm 的钢管作为垂直腹杆和斜向腹杆;横向连接系统配置外径为 700 mm、壁厚为 16 mm 的环形缀管,共同形成空间桁架体系。桥型布置如图 2 所示。

3.2 有限元建模

基于有限元软件 Abaqus 建立全桥有限元模型,采用三维线性插值梁单元;钢管采用管形截面,混凝土采用圆形截面;主拱圈拱肋采用双单元法建模,边界条件设为拱脚固结约束,以模拟实际工程中嵌岩桩的刚性约束。大桥有限元模型如图 3 所示。

4 结果分析与讨论

4.1 设计参数优化对比

在 Matlab 计算平台上构建优化计算模块,改进的 NSGA-II 的相关参数设置:种群规模数设为 200,最大迭代次数设为 500,交叉概率 P_{c0} 为 0.9,变异概率 P_{m0} 为 0.1,交叉分布指数 β_c 为 2.5,变异分布指数 β_m 为 3.0,交叉指数 η_c 为 20,变异指数 η_m 为 15。优化前后关键设计参数对比结果如表 1 所示。混凝土强度提高至 C60,充分发挥钢管对核心混凝土的套箍效应;钢管与混凝土面积比 α 设为 0.15,平衡了钢管的约束作用与混凝土的承压能力。通过参数优化,验证了轻量化设计与承载力提升的协同可行性,体现了“材料高效分布”与“几何形态适配”的工程逻辑。

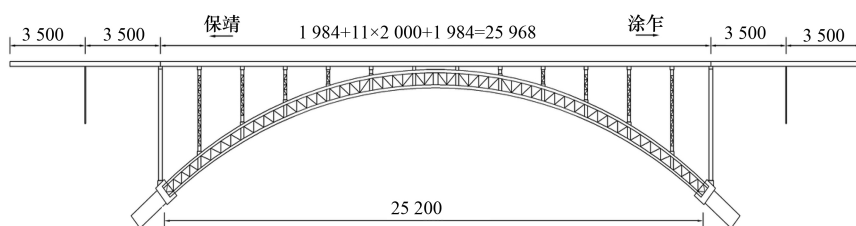


图 2 桥型布置

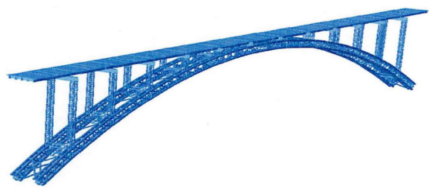


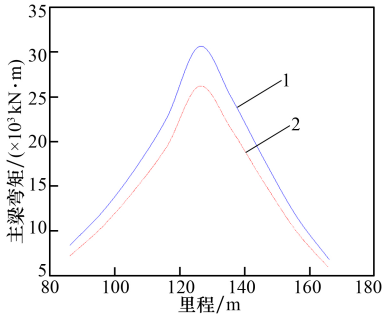
图 3 涂乍特大桥 ABAQUS 有限元模型

表 1 优化前后设计参数对比

参数	初始设计	优化设计
矢跨比	1/5.5	1/5.2
钢管壁厚/mm	18~26 (线性变化)	20~22 (梯度变化)
混凝土强度	C55	C60
钢管与混凝土面积比	0.12	0.15
拱轴系数	1.167	1.143

4.2 结构力学性能对比

图4为桥梁主梁跨中关键位置在荷载作用下的弯矩分布。由图 4 可知：优化前该位置的最大正向弯矩值为 30 650 kN·m,优化后计算的弯矩峰值显著下降至 26 210 kN·m。对比表明，优化后的弯矩最大值较原设计减少了 4 440 kN·m,降幅达 14.5%，充分体现了结构优化措施的有效性。进一步分析表明，优化桥梁拱肋截面参数和拱轴几何参数后，拱结构刚度分布更趋合理，主拱对桥面系的弹性支承效应增强；随着钢管混凝土拱肋承载力的提升,荷载传递路径得以优化,促进主

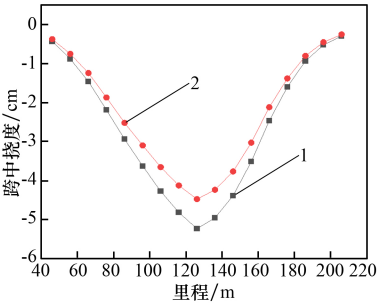


1—优化前；2—优化后。

图 4 主梁跨中正弯矩曲线

梁跨中弯矩重新分布。这在一定程度上抑制了恒载作用下主梁的弯矩水平，进而增强了其承受活荷载效应的性能。

图 5 为主梁控制截面挠度分布曲线的对比结果。由图 5 可知：优化调整后主梁在多个控制点处的竖向位移较优化前均有减小。值得关注的是，主梁跨中挠度峰值从初始状态的 5.23 cm 显著降至 4.47 cm,降幅达 14.5%，表明优化后拱轴系数的调整有效优化了荷载分布，同时拱肋刚度的提升进一步增强了整体结构的协同工作性能，从而显著减少了主梁的挠曲变形。



1—优化前；2—优化后。

图 5 主梁控制截面挠度变化曲线

4.3 经济性与施工可行性对比

经计算，弦管壁厚梯度优化使钢材用量减少 12.5%，结构总重降低 12.2%，桥面系总重减少 9%。通过模态分析验证表明，桥面振动频率仍满足规范要求。优化后总材料成本较原成本降低 15.6%，体现了“材料高效分布”与“几何形态适配”的工程逻辑。

4.4 敏感性分析

基于 Sobol 全局敏感性分析法,量化各设计参数对目标函数(承载力 Nu 和成本 C)的影响。一阶敏感度指数 S_i 用于衡量参数独立贡献度,总效应指数用于衡量包含参数交互作用的综合贡献度,具体计算公式如式(24)、(25)所示,计算结果如表 2 所示。

表 2 敏感性分析结果

参数	承载力			成本	
	一阶敏感度	总效应指数	交互效应占比/%	一阶敏感度	总效应指数
钢管壁厚/mm	0.412	0.538	18.5	0.503	0.621
混凝土强度	0.195	0.324	15.3	0.412	0.538
钢管屈服强度	0.118	0.218	9.8	0.105	0.187
矢跨比	0.287	0.401	12.2	—	—

$$S_i = \frac{V[E(Y|X_i)]}{V(Y)} \quad (24)$$

$$S_{Ti} = \frac{E[V(Y|X_i)]}{V(Y)} \quad (25)$$

式中: S_i 为一阶敏感度; S_{Ti} 为总效应指数; V 为方差; E 为期望; Y 为输出变量; X_i 为第 i 个输入变量。

由表 2 可知:钢管壁厚为对承载力敏感性最高的参数,混凝土强度为对成本敏感性最高的参数;二者交互效应占总敏感性的 18.5%,表明应协同优化。矢跨比对结构整体稳定性影响显著,且其敏感性随跨径增大呈增强趋势。

5 结 论

(1) 优化后,主拱圈极限承载力安全系数由 1.532 增至 1.830;结构主梁跨中弯矩峰值由 30 650 kN·m 降至 26 210 kN·m(降幅约为 14.5%);主梁跨中挠度峰值由 5.23 cm 减小至 4.47 cm(降幅约为 17.9%)。

(2) 弦管壁厚梯度优化使钢材用量减少 12.5%,结构总重降低 12.2%,桥面系总重减少 9%;优化后总材料成本较原成本降低 15.6%。

(3) 钢管壁厚与矢跨比对承载力影响最大(总效应指数大于 0.5),混凝土强度主导成本变化。参数间交互效应(如壁厚-混凝土强度协同作用)对性能提升贡献显著。建议优先优化钢管壁厚与矢跨比参数,并控制混凝土强度等级以平衡经济性。

参考文献:

- [1] 王静思. 钢管混凝土拱桥的发展概述[J]. 交通世界(建养·机械),2012(4):252-253.
- [2] 邓耀春,孙华. 大跨径钢管混凝土拱桥大体积混凝土拱

座施工温度分布与控制[J]. 西部交通科技,2019(7):72-75;95.

- [3] 寇恒伟. 基于支持向量机的下承式系杆拱桥评估分析[D]. 南京:南京理工大学,2013.
- [4] 李福如,姜福香,刘晓南,等. 在役混凝土桥梁承载力评定方法研究进展[J]. 工程建设,2010,42(6):5-9;57.
- [5] 赖嘉洲,张子健. 考虑施工过程的斜拉桥索力动态优化方法研究[J]. 工程建设,2022,54(6):42-48.
- [6] 李剑桥. 基于粒子群算法大跨径上承式钢管混凝土拱桥优化分析[D]. 西安:长安大学,2017.
- [7] 丁伟光. 考虑多目标的钢管混凝土拱桥拱肋参数设计优化[J]. 黑龙江交通科技,2024,47(8):125-129.
- [8] 涂兵,刘来辉,邓年春,等. 基于遗传算法的大跨钢管混凝土桁式拱肋多目标优化[J]. 公路交通科技,2021,38(12):56-63;72.
- [9] 钢管混凝土拱桥技术规范:GB 50923—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [10] 钟善桐. 钢管混凝土结构(第三版)[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [11] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥施工问题研究[J]. 桥梁建设,2002(3):55-59.
- [12] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.
- [13] 尚雄,王玲,姚铮. 基于 NSGA-II 算法的地基伪卫星定位系统布站方法研究[J]. 计算机应用研究,2020,37(6):1839-1843.
- [14] ZITZLER E, LAUMANN S M, THIELE L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization [EB/OL]. 2001-09-11]. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/145609>.