

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.12.007

基于遗传算法的大跨钢管混凝土桁式拱肋 多目标优化

涂 兵, 刘来辉, 邓年春, 江建文, 李颢旭
(广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 钢管混凝土拱桥因受力性能好、施工方便、稳定性好、美观等诸多优点, 成为了近年来发展最快的桥型之一。此外, 钢管混凝土拱桥相对梁桥跨度更大, 相对于悬索桥和斜拉桥经济性更好, 是目前主跨 300~500 m 的主要建设桥型。然而传统大跨钢管混凝土拱桥设计中拱肋截面参数确定存在效率低及现有以造价为单目标的结构优化方法所得到结构的性能偏低等问题, 基于此, 平均单位长度拱肋造价和截面面内抗弯刚度被选取作为优化目标, 建立了4管桁式钢管混凝土变截面拱肋的多目标优化模型, 并利用 NSGA-II 遗传算法进行了求解, 实现了大跨度钢管混凝土拱桥拱肋造价和稳定性 2 个方面的优化。实例计算结果表明: NSGA-II 遗传算法可快速、准确地求解出钢管混凝土变截面拱肋以造价和抗弯刚度表征的 Pareto 最优解集, 是该类组合结构多目标优化问题一种高效的求解手段; 所得到的 Pareto 最优解集可供工程决策者和设计者快速选择出同时满足造价较低和抗弯刚度较大的最优拱肋截面参数, 显著提高了设计效率和设计方案的合理性; 拱肋截面面内抗弯刚度与结构整体竖向刚度及面内稳定性的相关性强, 选择该参数作为表征结构性能的优化目标具有一定的合理性; 优化后结构的面内刚度和稳定性均满足规范要求, 同时造价大幅度降低, 优化效果良好。

关键词: 桥梁工程; 钢管混凝土拱桥; 多目标优化; 桁式拱肋; 截面抗弯刚度; 造价; NSGA-II 遗传算法

中图分类号: U442.5+4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2021)12-0056-08

Multi-objective Optimization of Long-span CFST Trussed Arch Rib Based on Genetic Algorithm

TU Bing, LIU Lai-hui, DENG Nian-chun, JIANG Jian-wen, LI Hao-xu

(School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China)

Abstract: CFST arch bridge has become one of the fastest-growing bridge types in recent years due to its many advantages, such as good mechanical performance, convenient construction, good stability and beautiful appearance. In addition, CFST arch bridge has longer span relative to the beam bridge and is more economical than suspension bridge and cable-stayed bridge. It is currently the main construction bridge type with a main span of about 300–500 m. However, there are some obvious deficiencies in traditional design methodology of CFST arch bridges, including low efficiency in determining parameters of rib section and low performance of the post-optimized structure under the basic optimization that adopts cost as the only objective. Based on this, selecting both the average unit length cost of the arch rib and in-plane sectional flexural stiffness as the optimize objectives, a multi-objective optimization model for the 4-tube trussed CFST arch ribs with variable cross-section is established, which is solved by using the NSGA-II genetic algorithm, thus, the

收稿日期: 2020-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51738004, 51868006); 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科AA18118029); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(桂教人〔2018〕35号); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA138067)

作者简介: 涂兵(1988-), 男, 湖北英山人, 博士。(tubing2018@gxu.edu.cn)

optimization of the cost and stability of the arch ribs of long-span CFST arch bridge has been realized. The calculation result of a real bridge example shows that (1) the NSGA-II genetic algorithm can acquire the Pareto optimal solution set of CFST arch ribs with variable cross-section in terms of cost and flexural stiffness quickly and accurately, indicating that NSGA-II is an effective means for this sort of multi-objective optimization problems associated with composite structures; (2) the obtained Pareto optimal solution set can provide the optimized parameters of the arch rib section for decision makers and designers that coordinates the conflict objectives of cost and structural performance, which significantly improve the design efficiency and rationality of the design scheme; (3) there is a strong correlation of in-plane flexural stiffness of arch rib section with overall vertical stiffness and in-plane stability of the bridge, thus it is reasonable to select the in-plane sectional flexural stiffness as the optimize object; (4) the in-plane stiffness and structure stability of the optimized bridge can meet the relevant specifications, while the cost of construction is greatly reduced, which indicates the optimization effect is significant.

Key words: bridge engineering; concrete-filled steel tubular (CFST) arch bridge; multi-objective optimization; trussed arch rib; sectional flexural stiffness; cost; NSGA-II genetic algorithm

0 引言

钢管混凝土拱桥具有受力合理、施工方便、刚度大等诸多优点,是近年来发展较快的桥型之一^[1-2]。随着钢管混凝土拱桥在我国公路和铁路工程中的不断推广应用,其经济性也日益受到人们的广泛关注。然而,现阶段钢管混凝土拱桥的设计主要参考已有同类工程的经验,拟定的结构尺寸通常并非最优尺寸,未能充分发挥钢管混凝土组合结构的优势,造价也往往偏高^[3]。特别是对于作为钢管混凝土拱桥最主要受力构件的拱肋,其截面由钢材和混凝土 2 种材料组成,且随着拱桥跨度的增大,拱肋截面的构型趋于复杂,由此导致设计变量众多,传统基于经验和试错的设计方法更是难以精确获取最合理的拱肋截面设计参数组合。因此,亟需将结构优化理论引入钢管混凝土拱桥的拱肋截面设计中,以提高设计效率以及设计方案的合理性。

目前,钢管混凝土组合结构截面优化的方法主要有数学规划法、优化准则法和智能优化方法 3 类^[4]。文献 [5-6] 以造价最低为目标,分别应用序列二次规划算法和约束非线性规划算法对简支钢-混凝土组合梁进行了截面参数优化。文献 [7-8] 基于满应力准则,建立了钢管混凝土拱桥拱肋截面的单目标优化模型,并借助有限元程序进行了求解。文献 [9] 则利用粒子群算法对满应力优化理论进行改进,用于钢管混凝土拱桥哑铃型拱肋的优化,得到了使得钢管总重量最小的拱肋截面参数。文献 [10-11] 将遗传算法引入钢管混凝土框架柱的截面优化,显著提高了结构的经济性。可以看出,当前

阶段钢-混凝土组合结构的截面优化绝大部分都是以造价(或材料用量)最低为目标的单目标优化,对于这类问题,以上 3 类优化方法均不难求出最优解,但相较而言,以遗传算法为代表的智能优化方法的适用性更强,计算效率更高。

值得注意的是,以造价为单目标的结构优化虽然能显著降低成本,但优化后的截面参数也通常使得结构各项性能指标偏低,对实际工程设计的参考价值受到限制。与之相比,多目标优化可以在数学上实现成本、结构性能等多个相互冲突目标的最优协调,获得一系列非劣解,进而为工程决策者和设计者提供更多的选择^[12]。在结构多目标优化领域,由于算法自身的并行性特点恰好与多目标优化问题的多解特征相吻合,遗传算法等进化算法占据主导地位^[13-14]。目前,遗传算法已被成功应用于复合材料结构^[15-19]、高层建筑^[20]、混凝土梁桥^[21-22]等工程结构的多目标优化,取得了良好的效果,但鲜见该方法在钢管混凝土拱桥多目标优化中的相关研究报道。

基于此,本研究选取当前应用最广泛的多目标优化遗传算法 NSGA-II^[23] (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, 带精英策略的非支配排序遗传算法),探究遗传算法在钢管混凝土拱肋截面多目标设计优化中的可行性。首先,以造价最低和面内抗弯刚度最大为双重优化目标,建立大跨钢管混凝土拱桥桁式拱肋截面的通用性优化模型;然后,利用 NSGA-II 算法对优化模型进行求解,得到造价与抗弯刚度的 Pareto 最优前沿 (Pareto-optimal front),以期 为结构设计提供参考。之所以选取面内抗弯刚度最

大作为另一个优化目标是考虑到随着钢管混凝土拱桥跨径的不断增大,面内稳定性逐渐成为控制结构设计的主要指标,而截面抗弯刚度是决定拱肋面内稳定性能的最主要因素之一。

1 NSGA-II 多目标优化遗传算法

1.1 NSGA-II 算法简述

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是一种通过模拟自然进化过程搜索数学模型最优解的方法。NSGA-II 是基于 Pareto 最优概念的遗传算法,该算法既继承了经典遗传算法在全局搜索方面的优点,同时也提出了精英策略、快速非支配排序、拥挤比较算子等策略来提高最优解的收敛性、精确性和均匀性,具体如下^[23]:

(1) 带精英机制的策略

提出将父代种群和子代种群合并,然后剔除被支配的子代个体之后继续进行迭代操作,防止优秀基因的流失,从而提高优化结果的准确性。

(2) 快速非支配排序

根据相互支配逻辑关系对种群进行支配等级分类。将所有的非支配解作为第 1 前沿面,等级为 1;然后将剩余个体中的非支配解作为第 2 前沿面,等级为 2,以此类推,加快了算法速度。

(3) 保留多样性

采用拥挤比较的方法替代共享函数方法,通过密度估计和利用拥挤比较算子计算拥挤距离,量化个体所在空间位置的拥挤程度,并将其作为该种群中个体之间的比较准则,解决了经典遗传算法容易局部收敛的问题,使解集能均匀地分散到整个目标空间。

NSGA-II 优化算法最终给出的解称为 Pareto 最优解,其定义为:

考察 2 个决策向量 $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in X$, $\mathbf{a}$ 帕累托占优 (Pareto Dominate), 记为 $\mathbf{a} > \mathbf{b}$, 当且仅当:

$$\{ \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} f_i(\mathbf{a}) \leq f_i(\mathbf{b}) \} \wedge \{ \exists j \in \{1, 2, \dots, n\} f_j(\mathbf{a}) < f_j(\mathbf{b}) \}.$$

如果在整个参数空间内不存在任何决策向量帕累托占优某个决策向量,则称该决策向量即是 Pareto 最优解。所有 Pareto 最优解组成了帕累托最优解集合 (Pareto Optimal Set), 也称为 Pareto 前沿 (Pareto Front)。

1.2 NSGA-II 算法流程

NSGA-II 算法的基本流程如图 1 所示^[23]。

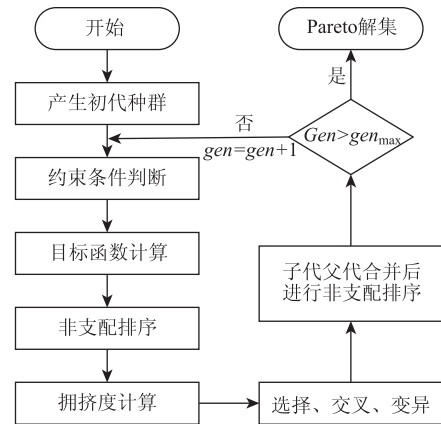


图 1 NSGA-II 算法流程^[23]

Fig. 1 Flowchart of NSGA-II algorithm^[23]

2 4 管桁式钢管混凝土拱肋截面优化数学模型

2.1 设计变量

本研究以图 2 所示的大跨钢管混凝土拱桥最常用 4 管桁式变截面拱肋作为优化对象,将其主管、平联和腹杆 3 种杆件的外径、壁厚以及拱顶和拱脚的桁高作为优化变量。此外,考虑到钢管混凝土拱肋平联长度的设置通常还受到桥面宽度、非机动车道、人行道等因素影响,暂不考虑将平联长度作为变量,用常量 l_0 表示。

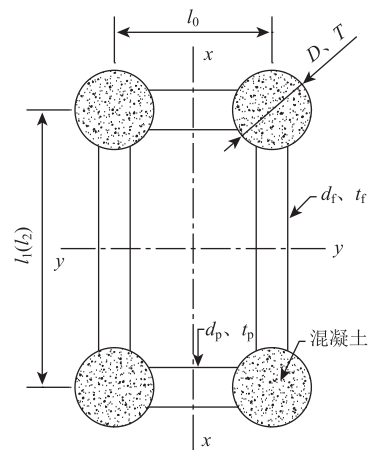


图 2 4 管桁式钢管混凝土拱肋截面参数设置

Fig. 2 Parameter setting for 4-tube trussed CFST arch rib section

2.2 目标函数

优化目标有:(1) 拱肋总体造价最低;(2) 拱肋截面面内抗弯刚度最大。

本研究选择以单侧拱肋单位长度的平均造价 W 为第一个目标函数, W 主要包括主管的钢管和混凝土的造价、平联的钢管造价以及腹杆的钢管造价。

其中,单位长度单根主管的钢管造价为:

$$W_1 = A\rho\left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi(D-2T)^2}{4}\right), \quad (1)$$

式中, A 为每吨钢管造价; ρ 为钢材的密度; D 和 T 分别为主管的外径和壁厚。

单位长度单根主管管内混凝土的造价为:

$$W_2 = B \frac{\pi(D-2T)^2}{4}, \quad (2)$$

式中 B 为每立方米混凝土造价。

单位长度拱肋腹杆 W_3 和平联的钢管平均造价 W_4 可表示为:

$$W_3 = \frac{2A\rho\left(\frac{\pi d_f^2}{4} - \frac{\pi(d_f-2t_f)^2}{4}\right)}{L_1} \times \frac{l_1 + l_2}{2}, \quad (3)$$

$$W_4 = \frac{2A\rho\left(\frac{\pi d_p^2}{4} - \frac{\pi(d_p-2t_p)^2}{4}\right) \times (l_0 - D)}{L_1} + \frac{2 \times B \times \frac{\pi(d_p-2t_p)^2}{4} \times (l_0 - D)}{L_1}, \quad (4)$$

式中, d_f 和 t_f 分别为腹杆的外径和壁厚; d_p 和 t_p 分别为平联的外径和壁厚; L_1 为柱肢间的节间距离; l_0 为平联长度; l_1 为拱脚腹杆长度, l_2 为拱顶腹杆长度。

总造价函数其表达式为:

$$W = 4(W_1 + W_2) + W_3 + W_4. \quad (5)$$

另一个目标函数截面抗弯刚度 F 的近似表达式为^[24]:

$$F = E_{sc} I_{eq}, \quad (6)$$

$$E_{sc} = 1.3k_E f_{sc}, \quad (7)$$

式中, E_{sc} 为钢管混凝土的弹性模量, k_E 为轴压弹性模量换算系数; f_{sc} 为钢管混凝土的抗压强度, k_E 和 f_{sc} 的取值见文献[24]; I_{eq} 为等效截面惯性矩, 可由式(8)~(9)计算得到。

$$I_{eq} = \frac{I_j}{3J}, \quad (8)$$

$$J = \frac{1}{\left(\sqrt[3]{\frac{I_k}{I_j}} - 1\right)^2} \left[\ln\left(\sqrt[3]{\frac{I_k}{I_j}}\right) - \frac{3\sqrt[3]{\frac{I_k}{I_j}} - 1}{2\left(\sqrt[3]{\frac{I_k}{I_j}}\right)^2} \right], \quad (9)$$

式中, J 为计算参数; I_j , I_k 分别为变截面组合主拱拱顶、拱脚组合截面惯性矩。

$$I_j = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\pi D_i^4}{64} + \frac{l_i^2}{4} \times A_i \right), \quad (10)$$

$$I_k = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\pi D_i^4}{64} + \frac{l_i^2}{4} \times A_i \right), \quad (11)$$

式中, D_i 为第 i 根主管的外径; A_i 为第 i 根钢管混凝土的截面面积。

2.3 约束条件

作为钢管混凝土拱桥最主要的受力构件, 拱肋需满足构造和强度等基本要求, 这些要求构成了优化模型的约束条件。

(1) 构造要求

①根据《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06-2015)^[25], 管节点及连接件抗疲劳构造应满足:

$$\frac{d}{D} \geq 0.4, \frac{D}{T} \geq 40, 0.25 \leq \frac{t}{T} \leq 1, \quad (12)$$

式中, d 和 t 分别为支管(包括横联和腹杆)的外径和壁厚。

②细长空管杆件长度与钢管直径之比不应大于40, 即^[25]:

$$\frac{l_0}{d_p} \leq 40, \frac{l_1}{d_f} \leq 40. \quad (13)$$

③钢管混凝土钢管的外径尺寸要求不宜小于300 mm, 也不宜大于1 500 mm, 且主拱主管壁厚不应小于10 mm, 即^[25]:

$$300 \leq D \leq 1\,500, T \geq 10, \quad (14)$$

④根据《钢结构设计标准》(GB 50017-2017)^[26], 压弯构件允许长细比 $[\lambda] \leq 150$, 有:

$$\lambda_{eq} \leq 150, \lambda_f \leq 150, \lambda_p \leq 150, \quad (15)$$

式中, λ_{eq} , λ_f , λ_p 分别主拱肋等效截面长细比、腹杆的长细比、平联的长细比; λ_{eq} 根据式(16)~(17)确定^[25]:

$$\lambda_{eq} = \frac{S_0}{i_{eq}}, \quad (16)$$

$$i_{eq} = \sqrt{\frac{I_{eq}}{\sum A_i}}, \quad (17)$$

式中, S_0 为主拱等效计算长度, 对于无铰拱取 $0.36S$, S 为拱轴线长度; i_{eq} 为主拱等效截面回转半径。

⑤对受压为主的钢管混凝土构件, 圆形截面的外径与壁厚之比应满足^[25]:

$$\frac{D}{T} \leq 135 \frac{235}{f_y}, \quad (18)$$

式中 f_y 为主管钢材屈服强度。

(2) 强度要求

桁式拱肋整体截面偏心受压承载力约束条件为^[25]:

$$\gamma N \leq \varphi'_i \varphi'_e \sum (K_p^i K_d f_{sc} A_{sc}), \quad (19)$$

式中, γ 为桥梁重要性系数; N 为 1/4 跨径处拱肋的轴力设计值; φ'_l 为长细比折减系数; φ'_e 为弯矩折减系数; K_p 为钢管初应力折减系数; K_d 为混凝土脱空折减系数, 具体计算公式参见文献 [25]; f_{sc} 为钢管混凝土组合轴心抗压强度设计值; A_{sc} 为钢管混凝土组合截面积。

拱肋单管压弯承载力约束条件为^[25]:

$$\gamma N_l \leq \varphi_l \varphi_e K_p K_d f_{sc} A_{sc}, \quad (20)$$

式中, N_l 为单管轴力设计值; φ_l 为组合构件长细比折减系数; φ_e 为组合构件弯矩折减系数; k_p 为钢管初应力折减系数。

腹杆受拉或受压强度要求^[25]:

$$\gamma \frac{N_f}{A_{sf}} \leq [\sigma_f], \quad (21)$$

式中, N_f 为腹杆的轴拉力或轴压力设计值; A_{sf} 为腹杆的钢截面积; $[\sigma_f]$ 为腹杆的钢材强度设计值。

2.4 管桁式变截面拱肋的优化设计模型为:

$$\text{find } X = (D, T, d_f, t_f, d_p, t_p, l_1, l_2), \quad (22)$$

$$\text{to minimize } \begin{cases} W \\ -F \end{cases}, \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} &0.4 - \frac{d}{D} \leq 0, 40 - \frac{D}{T} \leq 0, 0.25 \leq \frac{t}{T} \leq 1 \\ &\frac{l_0}{d_p} \leq 40, \frac{l_1}{d_f} \leq 40 \\ &\lambda_{eq} - 150 \leq 0, \lambda_f - 150 \leq 0, \lambda_p - 150 \leq 0 \\ \text{s. t. } &\frac{D}{T} \leq 135 \frac{235}{f_y} \\ &\gamma N \leq \varphi'_l \varphi'_e \sum (K_p K_d f_{sc} A_{sc}), \gamma N_l \leq \varphi_l \varphi_e K_p K_d f_{sc} A_{sc} \\ &\gamma \frac{N_f}{A_{sf}} \leq [\sigma_f] \\ &300 \leq D \leq 1\,500, T \geq 10 \end{aligned} \right\}. \quad (24)$$

3 工程实例分析

3.1 工程概况

某特大桥位于广西平南县西江上游, 其原设计情况如下:

主桥采用主跨 575 m (计算跨径 560 m) 的中承式钢管混凝土拱桥, 跨径居全世界拱桥之首, 主拱采用悬链线无铰拱, 计算矢跨比为 1/4, 拱轴系数为 1.5。单侧拱肋采用 4 管桁式截面, 弦杆直径为 1.4 m, 管内灌注 C70 自密实混凝土。弦杆之间通过

$\phi 850$ mm 横联钢管和两根 $\phi 700$ mm 竖向腹杆钢管连接, 单侧拱肋截面如图 3 所示。

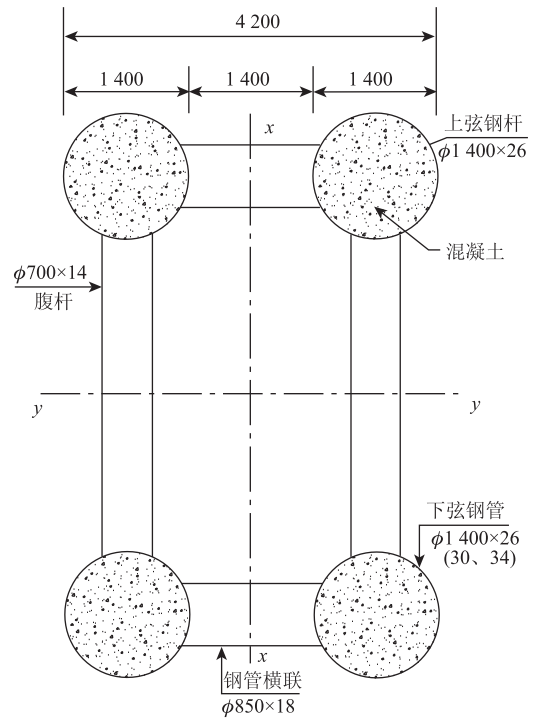


图3 原设计普通横隔处单侧拱肋截面示意图 (单位: mm)

Fig. 3 Schematic diagram of the single-sided arch rib cross-section at original designed common diaphragm (unit: mm)

主拱主管采用 Q420qD 高强度钢, 其余杆件均采用 Q345C 钢材。桥道梁为钢格子梁上设置厚 15 cm (含 8 mm 钢底板) C40 钢纤维混凝土的钢-混组合结构, 吊杆采用整束挤压成型的钢绞线成品索, 南北两岸桥台均为重力式抗推力结构。主拱桁和桥道梁节段均采用缆索吊运、斜拉扣挂安装。

3.2 拱肋截面尺寸多目标优化

首先, 根据第 2 节程序建立平南三桥拱肋截面尺寸的多目标优化模型, 其中, 钢材和核心 C70 混凝土单价分别按 4 500 元/t 和 600 元/m³ 计算。另外, 综合考虑结构安全性、施工水平和原设计的情况后, 确定各尺寸变量的取值范围, 设置各变量的约束条件, 具体见表 1。

利用 NSGA-II 算法对该优化模型进行求解。根据已有研究^[27], 算法的参数设置为: 种群大小为 100, 变异系数取 0.001, 交叉概率为 0.3。分别取进化代数 10 000 和 20 000 进行计算, 得到 10 000 代和 20 000 代的优化结果 Pareto 前沿, 如图 4 所示。可以看出, 10 000 代与 20 000 代的 Pareto 前沿基本一

表 1 拱肋各参数的优化范围

Tab. 1 Optimization range of parameters of arch rib

变量	名称	下限值/mm	上限值/mm
D	主管直径	1 000	1 400
T	主管壁厚	20	40
d_f	腹杆直径	500	800
t_f	腹杆壁厚	10	20
d_p	平联直径	500	900
t_p	平联壁厚	10	20
l_1	拱脚腹杆长度	10 000	17 000
l_2	拱顶腹杆长度	6 000	8 500

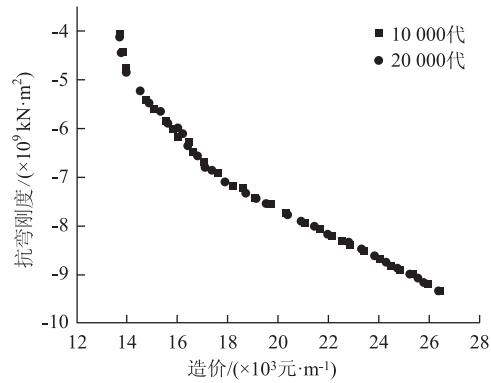


图 4 10 000 代与 20 000 代 Pareto 前沿对比

Fig. 4 Comparison of 10 000-generation and 20 000-generation Pareto fronts

致, 因此可认为就本研究算例而言, 10 000 代的 Pareto 解集已经是收敛的。

取 10 000 代的 Pareto 前沿作进一步分析, 如图 5 所示, 根据多目标优化理论, 该 Pareto 前沿上的每一点都代表了一个 Pareto 最优解。首先, 将原设计方案在图 5 中标识出来, 可以看出, 原设计方案点在 Pareto 前沿线的右上方, 表明就本研究的 2 个优化目标而言, 原设计方案并非最优化 (合理) 方案, 存在优化的空间。在 Pareto 解集中选择出 3 个代表性点即 3 个 Pareto 最优解进行分析, 见图 5 中的 1、2、3 点。这 3 个点分别代表了造价最低的方案 (方案 1)、刚度 (结构性能) 最大的方案 (方案 3) 和中间方案 (方案 2), 相应的主拱截面参数见表 2。可知, 与原方案相比, 方案 1 的单位长度造价降低 46.2%, 方案 3 的抗弯刚度增大 8.8%, 表明 2 个优化目标的改善幅度均较大, 优化效果较明显。

从多目标优化理论的角度来看, Pareto 前沿上的所有点都可以被认为是最优的方案, 实际设计时还应根据结构实际情况、业主需求和偏好等其他因素在 Pareto 最优解中进行选择, 最终确定设计方案。

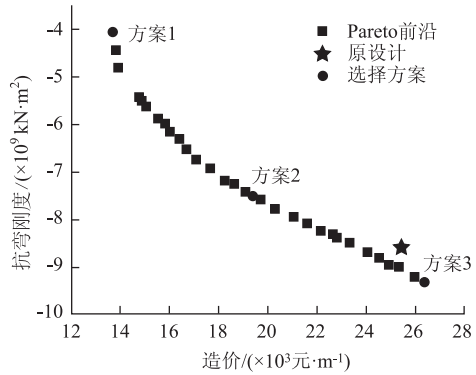


图 5 10 000 代 Pareto 前沿

Fig. 5 10 000-generation Pareto front

对于所分析的大桥跨径位居世界拱桥之首, 技术难度很大, 且位于重要的交通枢纽, 预测未来的交通流量会比较大, 因此其安全系数不宜太小, 同时兼顾到桥梁的经济性, 本研究推荐选择造价适中、刚度较大的优化组合, 即优化方案 2, 并对其进行后续的结构受力性能分析。方案 2 这种位于 Pareto 前沿中间位置的方案也是大部分多目标优化设计最终方案的主要选择。从表 2 可以看出, 相比于原设计方案, 优化方案 2 的拱肋截面面内抗弯刚度有所减小 (减小 12.1%), 同时, 其造价大幅度降低至原方案的 76.0%。

表 2 优化前后主拱参数对比

Tab. 2 Comparison of main parameters of arch rib before and after optimization

变量	名称	优化前/ mm	优化后/mm		
			方案 1	方案 2	方案 3
D	主管直径	1 400	1 200	1 400	1 400
T	主管壁厚	26, 30, 34	20	23	35
d_f	腹杆直径	700	500	500	500
t_f	腹杆壁厚	14	10	10	10
α_p	平联直径	850	500	530	500
t_p	平联壁厚	18	10	10	10
l_1	拱脚腹杆长度	17 000	13 340	17 000	17 000
l_2	拱顶腹杆长度	8 500	7 996	8 500	8 500
单位长度造价/千元		25.45	13.70	19.35	26.36
抗弯刚度/($\times 10^9$ kN·m ²)		8.56	4.06	7.52	9.31

3.3 优化前后结构性能对比

为说明选取拱肋截面面内抗弯刚度作为优化目标的合理性并验证优化结果的可行性, 利用 MIDAS/Civil 有限元软件建立全桥三维杆系计算模型, 以主拱竖向刚度和面内稳定性为评价标准, 对优化方案 2

和原设计方案进行对比分析。有限元模型中,拱肋的每根主管均选用钢管混凝土组合截面梁单元进行模拟,并利用施工阶段联合截面方法模拟拱肋的两阶段成型历程,用只受拉的桁架单元建立吊杆,桥面钢格子梁和行车道板分别采用梁单元和板单元。拱脚处设置固结约束,桥面端横梁中间采用双向支座,端横梁两边采用单向支座,桥面格子梁与拱肋肋间横梁和立柱横梁之间均采用弹性连接,桥面格子梁与行车道板为共节点连接。汽车荷载等级为公路-I级,按双向4车道布载,汽车荷载的横向和纵向折减系数分别取0.67和0.96^[28],人群荷载按设计要求取2.5 kN/m²。有限元模型见图6。

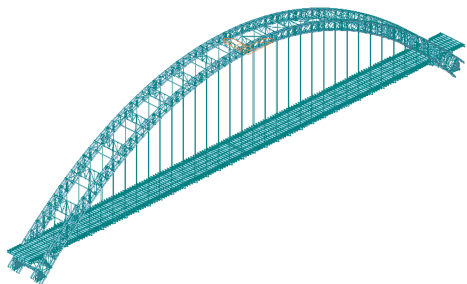


图6 平南三桥 MIDAS/Civil 全桥计算模型

Fig. 6 MIDAS/Civil calculation model of Pingnan Third Bridge

3.3.1 优化方案主拱承载能力验算

拱桥的设计荷载包括自重、汽车和人群活载、温度荷载、风荷载和混凝土收缩徐变等,根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015),取基本组合 $=1.2 \times \text{恒载} + 1.4 \times \text{汽车荷载} + 0.6 \times 1.4 \times [\text{人群荷载} + \text{升(降)温 } 30^\circ\text{C}] + 0.6 \times 1.1 \times \text{风荷载}$ 对拱肋整体和单管承载能力进行验算^[28]。在基本组合下,主拱整体桁式截面和单肢的最大轴力设计值分别为-154 445 kN和-51 605 kN,对应的弯矩设计值分别为-80 496 kN·m和-1 080 kN·m,代入式(19)、(20)进行验算,结果均满足承载能力要求。

3.3.2 优化前后成桥状态主拱竖向挠度对比

根据所建立的全桥计算模型,计算主拱在车道荷载(不及冲击力)作用下的最大竖向挠度(正负挠度绝对值之和)。选择拱肋0, 1/8, 1/4, 3/8, 1/2, 5/8, 3/4, 7/8, l共9个控制点绘制全桥竖向挠度曲线,如图7所示。可以看出,在车道荷载作用下,方案2的竖向挠度比原设计方案大,这是因为方案2的截面面内抗弯刚度相比原设计方案有所减小(减小约12.1%)。其中,在车道荷载作用下,方案2的拱肋最大竖向挠度(1/4截面)为134 mm,

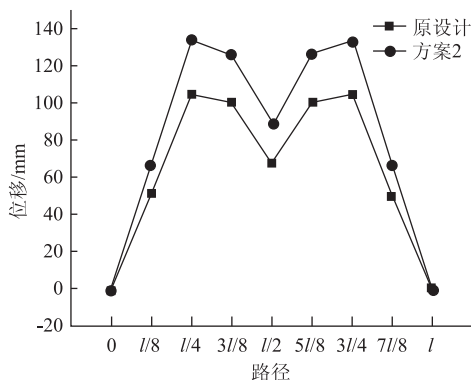


图7 车道荷载(不计冲击力)作用下拱肋正负竖向挠度之和

Fig. 7 Sum of positive and negative vertical deflections of arch rib under vehicle load (excluding impact force)

比原设计大29 mm(约增大27.6%),但仍远小于拱肋的最大容许位移 $l/1\ 000$ (560 mm),满足《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06—2015)^[25]的要求。

3.3.3 成桥状态稳定性分析

根据弹性稳定理论,结构考虑几何初始刚度矩阵下的弹性稳定平衡方程为^[3]:

$$(K + \lambda S)\delta = \lambda F, \quad (25)$$

式中, K 为结构整体弹性刚度矩阵; S 为几何刚度矩阵,与结构的应力水平相关; δ 为荷载 F 作用下的位移; λ 为弹性稳定特征值。

通过所建立的有限元模型分别对优化前后的结构在以下2种工况下进行使用阶段线弹性稳定性分析:工况1:恒载+风荷载+4车道荷载(集中力在跨中);工况2:恒载+风荷载+4车道荷载(集中力在1/4处)。分析时偏安全地将自重恒载和所有活荷载均视为可变荷载,即计算几何刚度时同时考虑恒载和活荷载引起的应力。分析结果表明,对于优化前、后的结构以及2种荷载工况,一阶整体弹性失稳模态均为面外反对称屈曲,且前12阶失稳模态均为面外失稳,第13阶首次出现面内失稳。得到成桥状态一阶屈曲对应的弹性稳定特征值和首次出现面内整体失稳模态对应的弹性稳定特征值见表3。可以看出,优化组合2的两类弹性稳定特征值(一阶失稳和首次出现面内失稳)相对优化前均略有下降,但均大于4.0,同样满足规范要求^[25]。

4 结论

(1) 提出同时以造价和截面面内抗弯刚度作为

表 3 优化前后成桥状态下弹性稳定特征值对比

Tab. 3 Comparison of elastic stability coefficients

before and after optimization of Pingnan Third Bridge

设计 方案	工况 1		工况 2	
	一阶失稳模态 (面外失稳)	首阶面内 失稳模态	一阶失稳模态 (面外失稳)	首阶面内 失稳模态
优化前	5.458	9.949	5.468	9.971
优化后	4.424	8.059	4.432	8.077

优化目标的 4 管桁式钢管混凝土拱肋多目标优化模型, 相较于传统以造价为单目标的优化模型更加科学、合理, 可得到一系列 Pareto 最优解供设计者和决策者选择。

(2) NSGA-II 遗传算法应用于 4 管桁式钢管混凝土拱肋的多目标优化时可快速、准确地得到优化解集, 是该类组合结构多目标优化问题的一种高效求解手段。

(3) 截面面内抗弯刚度与结构整体竖向刚度以及面内稳定性相关性强, 选择该参数作为表征桁式钢管混凝土拱肋结构性能的优化目标具有一定的合理性。

(4) 分析算例优化后结构的面内稳定性和刚度满足规范要求, 同时造价大幅度降低, 优化效果良好。

参考文献:

References:

- [1] 陈宝春, 刘君平. 世界拱桥建设与技术发展综述 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20 (1): 27-41.
CHEN Bao-chun, LIU Jun-ping. Review of Construction and Technology Development of Arch Bridges in the World [J]. Journal of Transportation Engineering, 2020, 20 (1): 27-41.
- [2] 郑皆连. 大跨径拱桥的发展及展望 [J]. 中国公路, 2017 (13): 40-42.
ZHENG Jie-lian. Development and Prospect of Long-span Arch Bridge [J]. China Highway, 2017 (13): 40-42.
- [3] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥 [M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2016.
CHEN Bao-chun. Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge [M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [4] 王石刚, 陈新度, 余俊. 组合结构优化设计及其应用 [J]. 中国机械工程, 1993, 21 (2): 18-20, 64.
WANG Shi-gang, CHEN Xin-du, YU Jun. Combined-structural Optimal Design and Application [J]. China Mechanical Engineering, 1993, 21 (2): 18-20, 64.
- [5] 刘齐茂, 李微, 李瞰, 等. 钢-混凝土组合梁的截面优化设计 [J]. 兰州理工大学学报, 2006 (3): 115-118.

- LIU Qi-mao, LI Wei, LI Tun, et al. Optimization Design of Cross-section of Steel-concrete Composite Beams [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2006 (3): 115-118.
- [6] 张静. 工字钢-混凝土组合梁桥截面设计参数优化研究 [D]. 西安: 长安大学, 2007.
ZHANG Jing. Optimization of Sectional Design Parameters of I-steel-concrete Composite Girder Bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [7] 黄泽权. 大跨度多肢钢管混凝土拱桥主拱构造优化研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
HUANG Ze-quan. Study on Structural Optimization of Main Arch of Long-span Multi-limb Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [8] 刘桂林. 大跨钢管混凝土刚架系杆拱桥主拱优化设计 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.
LIU Gui-lin. Optimization Design of Main Arch of Long-span Concrete-filled Steel Tubular Rigid Frame Tied Arch Bridge [D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [9] 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.
LI Jian-qiao. Optimization Analysis of Long-span Deck Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridge Based on Particle Swarm Optimization [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [10] 肖国涛. 基于遗传算法的钢管混凝土框架结构优化研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
XIAO Guo-tao. Research on Optimization of CFST Frame Structure Based on Genetic Algorithm [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [11] 袁朝阳, 吴成国, 张宇亮, 等. 基于加速遗传算法的方钢管混凝土柱优化模型 [J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2016, 37 (2): 57-61.
YUAN Chao-yang, WU Cheng-guo, ZHANG Yu-liang, et al. The Optimization Model of Concrete-filled Square Steel Tubular Columns Based on Accelerating Genetic Algorithm [J]. Journal of North China University of Water Resources and Hydropower: Natural Science Edition, 2016, 37 (2): 57-61.
- [12] MARLER R T, ARORA J S. Survey of Multi-objective Optimization Methods for Engineering [J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2004, 26 (6): 369-395.
- [13] LAGAROS N D, PAPADRAKAKIS M, KOKOSSALAKIS G. Structural Optimization Using Evolutionary Algorithms [J]. Computers & Structures, 2002, 80: 571-589.
- [14] COELLO C A. Evolutionary Multi-objective Optimization: a Historical View of the Field [J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006, 1 (1): 28-36.

(下转第 72 页)

- Construction [D]. Changsha: Hunan University, 1999.
- [12] 中交第二航务工程局有限公司. 公路桥梁施工系列手册. 斜拉桥 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd. Serial Handbooks of Highway-bridge Construction: Cable-stayed Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [13] 郑平伟, 陈金州, 于德伟. 独塔四索面空间异型斜拉桥的施工监控计算 [J]. 桥梁建设, 2011 (2): 66-70.
ZHENG Ping-wei, CHEN Jin-zhou, YU De-wei. Calculation of Construction Monitoring and Control of a Spatial Irregular Shape Cable-stayed Bridge with a Single Pylon and Four Cable Planes [J]. Bridge Construction, 2011 (2): 66-70.
- [14] 孟安鑫. π 型梁斜拉桥合理成桥状态与合理施工状态的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
MENG AN-xin. Study on Reasonable Completion State and Reasonable Construction State of π -girder Cable-stayed Bridge [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.
- [15] 辛克贵, 冯仲. 大跨度斜拉桥的施工非线性倒拆分析 [J]. 工程力学, 2004, 21 (5): 31-35.
XIN Ke-gui, FENG Zhong. Nonlinear Static Reverse Analysis of Long-span Cable-stayed Bridges during Construction [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21 (5): 31-35.
- [16] JTG/T D65-01—2007, 公路斜拉桥设计细则 [S].
JTG/T D65-01—2007, Guidelines for Design of Highway Cable-stayed Bridge [S].
- [17] 刘辉, 胡玉婷, 胡玉芬. 斜塔斜拉梁拱组合桥施工监控计算分析 [J]. 江西公路科技, 2014, 51 (4): 7-10.
LIU Hui, HU Yu-ting, HU Yu-fen. Construction Monitoring Calculation and Analysis on Inclined Pylon and Cable-stayed Beam Arch Composite Bridge [J]. Jiangxi Highway Science and Technology, 2014, 51 (4): 7-10.
- [18] 王俊. 独塔斜拉桥初始索力研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
WANG Jun. Research on Initial Cable Tension for Cable-stayed Bridge with Single Pylon [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [19] 刘辉, 曹秀英, 胡玉芬. 独塔四索面斜拉桥施工索力控制 [J]. 华东公路, 2016, 217 (1): 11-13.
LIU Hui, CAO Xiu-ying, HU Yu-fen. Control of Cable Force of Single-eylon Four-cable-plane Cable-stayed Bridge during Construction [J]. East China Highway, 2016, 217 (1): 11-13.
- (上接第63页)
- [15] WALKER M, SMITH R E. A Technique for the Multi-objective Optimization of Laminated Composite Structures Using Genetic Algorithms and Finite Element Analysis [J]. Composite Structures, 2003, 62 (1): 123-128.
- [16] PELLETIER J L, VEL S S. Multi-objective Optimization of Fiber Reinforced Composite Laminates for Strength, Stiffness and Minimal Mass [J]. Computers & Structures, 2006, 84: 2065-2080.
- [17] ALMEIDA F S, AWRUCH A M. Design Optimization of Composite Laminated Structures Using Genetic Algorithms and Finite Element Analysis [J]. Composite Structures, 2009, 88 (3): 443-454.
- [18] PARK C H, SAOUAB A, BREARD J, et al. An Integrated Optimization for the Weight, the Structural Performance and the Cost of Composite Structures [J]. Composites Science & Technology, 2009, 69 (7/8): 1101-1107.
- [19] DE MUNCK M, DE SUTTER S, VERBRUGGEN S, et al. Multi-objective Weight and Cost Optimization of Hybrid Composite-concrete Beams [J]. Composite Structures, 2015, 134: 369-377.
- [20] ASADI E, DA SILVA M G, ANTUNES C H, et al. Multi-objective Optimization for Building Retrofit: A Model Using Genetic Algorithm and Artificial Neural Network and an Application [J]. Energy and Buildings, 2014, 81: 444-456.
- [21] FURUTA H, KAMEDA T, NAKAHARA K, et al. Optimal Bridge Maintenance Planning Using Improved Multi-objective Genetic Algorithm [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2006, 2 (1): 33-41.
- [22] OKASHA N M, FRANGOPOL D M. Lifetime-oriented Multi-objective Optimization of Structural Maintenance Considering System Reliability, Redundancy and Life-cycle Cost Using GA [J]. Structural Safety, 2009, 31 (6): 460-474.
- [23] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6 (2): 182-197.
- [24] GB 50936—2014, 钢管混凝土结构技术规程 [S].
GB 50936—2014, Technical Code for Concrete Filled Steel Tubular Structures [S].
- [25] JTG/T D65-06—2015, 公路钢管混凝土拱桥设计规范 [S].
JTG/T D65-06—2015, Specifications for Design of Highway Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridges [S].
- [26] GB 50017—2017, 钢结构设计标准 [S].
GB 50017—2017, Standard for Design of Steel Structures [S].
- [27] 李琳, 聂臻, 沙林秀. 基于 NSGA2 的钻进参数多目标优化 [J]. 石油机械, 2013, 41 (3): 55-57, 71.
LI Lin, NIE Zhen, SHA Lin-xiu. NSGA2-based Multi-objective Optimization of Drilling Parameters [J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41 (3): 55-57, 71.
- [28] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范 [S].
JTG D60—2015, General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts [S].