

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.055

引用格式: 石旷, 杨吉新, 吴爱平. 变截面波形钢腹板双目标优化设计及方案决策[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(11): 76-91.



变截面波形钢腹板双目标优化设计及方案决策

石 旷¹, 杨吉新¹, 吴爱平²

(1. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 武汉 430063;

2. 深圳市综合交通与市政工程设计研究总院有限公司, 深圳 518003)

摘要: 为提高变截面波形钢腹板弹性剪切屈曲强度 τ , 控制工程造价 θ , 对某变截面波形钢腹板连续刚构桥的腹板尺寸进行优化设计。首先, 建立不同尺寸波形钢腹板模型, 通过响应面拟合得到尺寸参数与 τ 关系式, 使用条分方法计算尺寸参数与 θ 关系式; 其次, 利用 NSGA-II 算法优化得到 Pareto 最优解集, 提出专家打分法-熵权法-离差最小法, 得到指标权重, 利用逼近理想解排序法 (TOPSIS) 决策得到最佳方案; 最后, 分析参数改变对方案的影响。结果表明, 通过屈曲模态及响应面显著性验证, 建立的有限元模型及拟合公式准确有效; 与原设计比较, 最佳方案 τ 提高 93.5%, θ 增大 37.1%, Pareto 解集中存在 τ 大于原设计且 θ 小于原设计的解, 表明原设计尺寸可进一步改进; 分析尺寸改变下 τ 的变化趋势, 最佳方案通过增加波高、板厚、短边高, 以及减小平板条宽度和、长边高来提高 τ ; 主观权重直接影响最佳方案的选择, 随着 τ 主观权重的增大, 最佳方案中波形钢腹板 τ 提高, 同时 θ 增大。

关键词: 波形钢腹板; 双目标优化; 剪切屈曲; NSGA-II 算法; 熵权法; TOPSIS

中图分类号: U448.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)11-076-16

Bi-objective optimization design and scheme decision-making of corrugated steel webs with variable cross-section

SHI Kuang¹, YANG Jixin¹, WU Aiping²

(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, P. R. China; 2. Shenzhen Comprehensive Transportation and Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518003, P. R. China)

Abstract: To improve the elastic shear buckling strength (ESBS) of variable cross-section corrugated steel webs (CSWs) while controlling engineering cost (EC), this study optimizes the web geometry of a continuous rigid frame bridge with CSWs of variable cross-section. First, finite element analysis (FEA) models of CSWs with different geometric parameters were established. The relationships between web dimensions and ESBS were obtained through response surface fitting, while the relationships between geometric parameters and EC were calculated using the slicing method. Second, the Pareto optimal solution set was derived using the NSGA-II

收稿日期: 2024-06-25 网络出版日期: 2024-07-17

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1502503)。

Supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFC1502503).

作者简介: 石旷(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事结构优化研究,(E-mail)whutsk123@163.com。

通信作者: 杨吉新, 男, 教授, 博士生导师,(E-mail)whutvses@163.com。

algorithm. The combined weight of the optimization objectives was determined by integrating the expert scoring method, the entropy weight method, and the minimum deviation principle, and the optimal scheme was selected using the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). Finally, the impact of parameter variations on the optimization results was analyzed. The results verify that the established FEA model and fitting formula are accurate and effective through buckling mode validation and response surface significance tests. Compared with the original design, the optimal scheme increases the ESBS by 93.5% and the EC by 37.1%. Some Pareto solutions outperform the original design in both indicators, indicating potential for improvement in the original dimensions. According to the response surface fitting formula, ESBS increases with larger wave height, plate thickness, and short-side height, but decreases with larger flat strip width and long-side height. The subjective weighting significantly affects the final scheme selection: as the subjective weight of ESBS increases, both ESBS and EC in the optimal scheme rise accordingly.

Keywords: corrugated steel webs; bi-objective optimization; shear buckling; NSGA-II algorithm; entropy weight method; TOPSIS

预应力混凝土波形钢腹板箱梁桥是一种组合桥梁结构,采用高强波形钢板代替传统混凝土腹板,具有一定实用性和经济性^[1-2]。波形钢腹板属于薄壳结构,其轴向刚度很小,钢腹板几乎只承受剪切力,而轴力和弯矩由混凝土板承受,在实际工程中,钢腹板的剪切屈曲稳定性至关重要^[3-4]。在结构设计中,不仅要考虑结构承载能力,也要对工程造价进行控制,结构的尺寸、材料等参数的变动都直接影响承载能力和造价,设计出合理的结构形式,提高承载能力的同时降低造价成本,是研究者们关注的重点。卜康正等^[5]对影响基坑下覆地铁隧道位移的5个变量进行设计优化,减小基坑竖向位移的同时减小了基坑造价;齐超^[6]为平衡造价与结构抗震的协调性,对造价管理系统的设计方案进行优化,探究相同造价下如何建造出抗震及抗倒坍能力更优的框架结构;王淑桃^[7]基于神经网络模型,预估铁路桥梁混凝土工程造价,训练得到的模型误差率较小,可以根据得到的神经网络模型对造价进行控制;Mahmoodzadeh等^[8]采用6种基于高斯过程回归的元启发优化算法,对隧道结构的建设工期和成本进行优化,比较不同算法的准确性。

考虑承载能力和造价的双目标优化设计通常可得到多个可行方案,需要结合工程实际,采用合理方法选出最佳方案。TOPSIS法是一种综合评价方法,适用于工程建设方案的筛选。Liang等^[9]将TOPSIS法应用于珠海大桥CB01合同段的方案决策;Issa等^[10]结合层次分析法(AHP)与TOPSIS法,对沙特阿拉伯某太阳能发电厂建设项目进行方案筛选;陈仁朋等^[11]改进了TOPSIS法,对盾构隧道下穿建筑物的施工方案风险性进行评估;蒋浩鹏等^[12]将TOPSIS法应用于高速公路施工方案的评估。基于TOPSIS法,以剪切屈曲强度和造价为双评价指标,可以对双目标优化的多个方案进行排序,得到最佳方案。

国内外常用的标准波形钢腹板型号有1600、1200、1000型等,工程实践中,通常根据桥跨、场地条件等直接选用相关标准型号,很少对其稳定性和经济性进行详细论证。特别对于变截面波形钢腹板,考虑其剪切屈曲强度和造价双目标优化的研究较为少见。文中以某变截面波形钢腹板连续刚构桥为例,采用响应面法拟合得到钢腹板弹性剪切屈曲强度公式,对钢腹板进行条分求和得到面积和造价公式,采用NSGA-II算法进行双目标优化得到1组满足要求的Pareto最优解,提出专家打分法-熵权法-离差最小法,得到不同指标权重,采用TOPSIS法从多个方案中筛选出最优方案,分析了影响最优方案的相关因素。

1 工程实例

某95+180+95 m三跨波形钢腹板连续刚构桥,桥跨详细布置如图1所示。其中,波形钢腹板箱梁总长为250 m,混凝土箱梁总长为120 m,建立该桥杆系模型,计算成桥状态下剪应力如图1所示。模型中成桥状态下所施加的荷载包括自重、桥面铺装、预应力、支座沉降。由于波形钢腹板箱梁截面面积较小,波形钢腹板梁段剪应力明显大于混凝土梁段,波形钢腹板长细比较大,在剪力作用下容易发生屈曲失稳,且钢结构易腐蚀

生锈,在长期运营下其承载能力将有所下降,需要有足够的强度储备,因此,剪切屈曲强度是波形钢腹板桥梁设计中需重点考虑的问题,该桥波形钢腹板箱梁一般截面如图2所示。在满足结构强度的情况下,需考虑尽量降低造价,以波形钢腹板弹性剪切屈曲强度及总造价为双目标变量,对波形钢腹板尺寸进行优化设计。

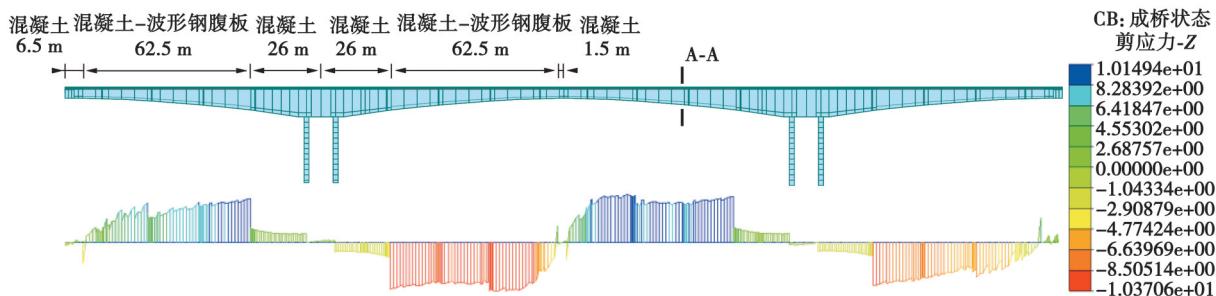


图1 桥跨布置及成桥状态剪应力 (MPa)

Fig. 1 Bridge span layout and shear stress in bridge completion states (MPa)

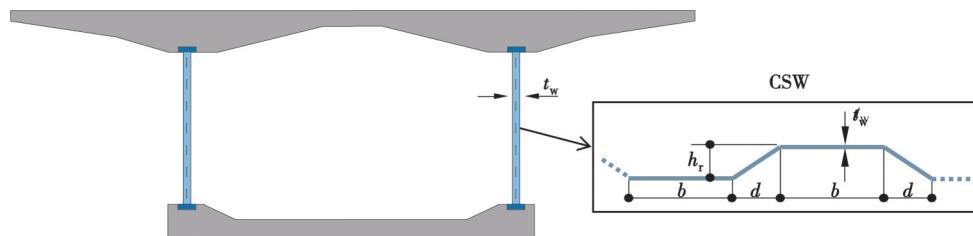


图2 波形钢腹板箱梁一般截面A-A (m)

Fig. 2 Cross-section A-A of box girder with corrugated steel web (m)

2 建立目标函数

2.1 有限元模型及可靠性验证

通过ANSYS建立波形钢腹板模型,由于板厚相比板长尺度极小,采用壳单元进行模拟。在波形钢腹板有限元建模中,混凝土顶底板与钢腹板之间需设置接触,导致计算时间和收敛难度增大,同时,建立钢腹板弹性剪切屈曲强度公式需要大量模型进行回归分析。因此,为简化计算,模型采用文献[13-14]的简化边界条件,约束钢腹板边界的切向自由度及平动自由度代替上下混凝土翼板对波形钢腹板的约束。为验证文中建模方法可靠性,分别对文献[15-17]中的A12-410-45、S1、S2-2试件进行模拟,以S1试件为例,文中有限元模型与文献有限模型对比结果,如图3所示。

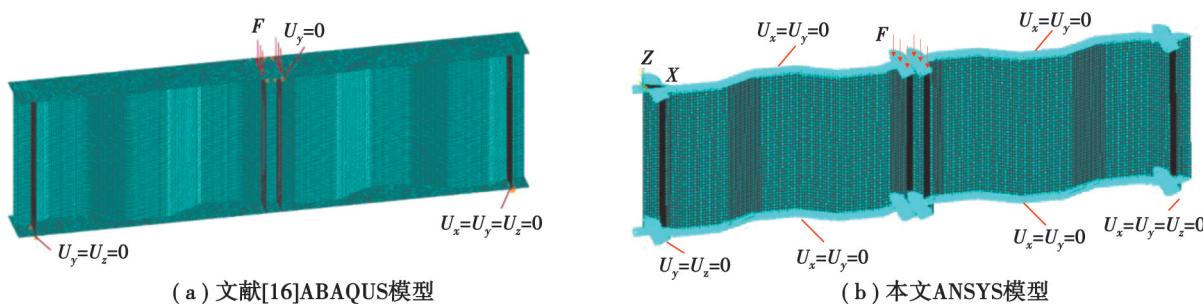


图3 有限元模型对比

Fig. 3 Comparison of FEA models

通过特征值屈曲分析得到模型的一阶屈曲模态,将一阶模态做为初始缺陷引入模型,各模型均采用位移控制加载,得到试件的破坏形态及荷载-位移曲线如图4和图5所示。由图4可知,文中建模方法所得各试件最终破坏形态与试验结果相近,能够有效模拟试件破坏形态。由图5可知,文中建模方法所得荷载-位移曲

线与试验结果和文献限元结果有相同的变化趋势, 其中 A12-410-45 试件在达到承载极限后, 承载力开始下降, S1 试件和 S2-2 试件承载力达到极限后开始下降, 之后又出现一定程度增长, 试验所得 3 个试件极限承载力分别为 147、4 485、65 kN, 有限元所得极限承载力分别为 142、4 488、70 kN, 与试验相比误差分别为 3%、0.1%、8%, 表明文中建模方法可以有效模拟试件的承载能力。经过破坏形态及荷载位移曲线的对比, 验证了文中的有限元建模方法的可靠性。

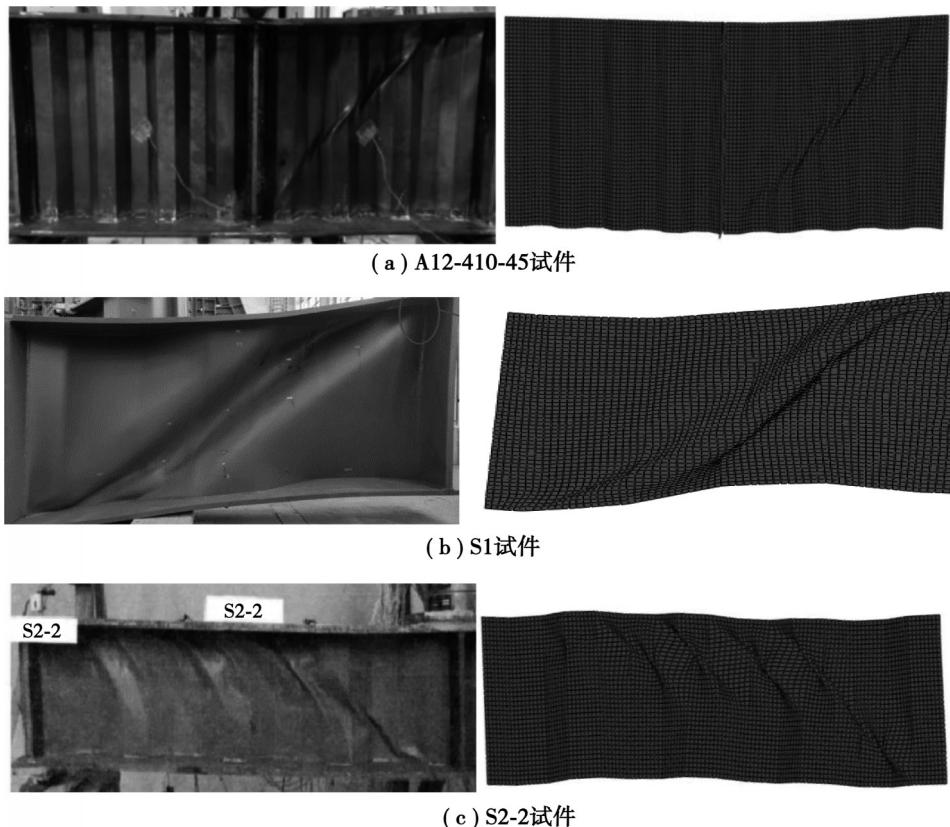


图 4 试件破坏形态与有限元结果对比

Fig. 4 Comparison of the failure modes between test and FEA

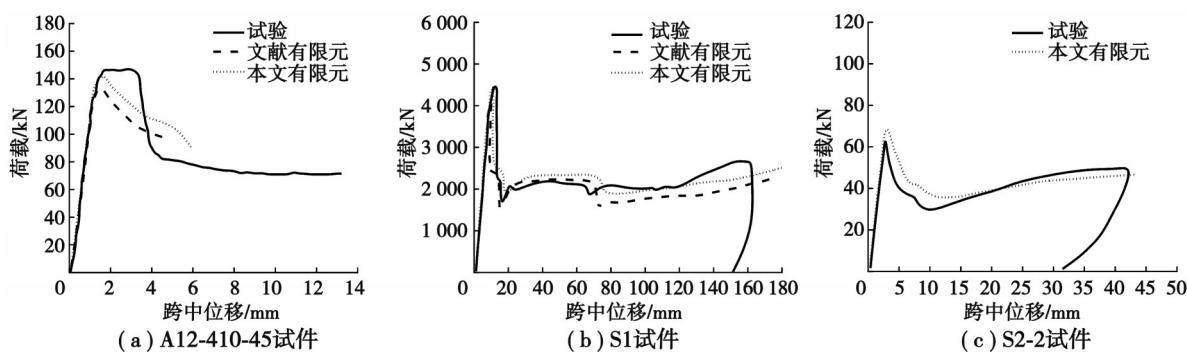


图 5 试件荷载-位移曲线与有限元结果对比

Fig. 5 Comparison of load-deformation curves between test and FEA

2.2 弹性剪切屈曲强度公式

常见波形钢腹板型号及参数如表 1 所示, 设定波形钢腹板平板条尺寸 b 取值范围 0.1~0.7 m, 平板条尺寸 d 范围 0.1~0.6 m, 波高 h_r 范围 0.05~0.4 m, 板厚 t_w 范围 0.009~0.04 m, 长边板高 h_{w1} 范围 5~8 m, 短边板高 h_{w2} 范围 2~4 m, 波形钢腹板底面按二次抛物线变化, 按照已验证的建模方法, 建立模型如图 6 所示。波形钢腹板弹

性模量为 $2.06e5$ MPa,泊松比为0.3,AD边约束板的切向自由度及平动自由度,AB、DC边约束板的切向自由度,将模型视为四边简支板,BC边施加单位剪切荷载。每个设计变量取最大、最小、中间值3种水平进行相互组合,建立729个不同尺寸的有限元模型。根据规范^[18],波形钢腹板屈曲模式分为3类,分别为整体屈曲、局部屈曲、合成屈曲,文中不同参数下有限元模拟可以得到规范^[18]的3种屈曲模式,如图7所示。整体屈曲下波形钢腹板在连续2个以上的平板条间发生屈曲,局部屈曲在1个平板条内发生屈曲,合成屈曲是介于整体屈曲和局部屈曲之间的一种屈曲模式,得到不同的屈曲模式进一步验证了有限元模型的准确性。

表1 常见波形钢腹板型号及参数

Table 1 Models and parameters of common corrugated steel webs mm

型号	b	d	h_r	t_w
700	175	175	100	9~40
900	250	200	150	9~40
1100	340	160	160	9~40
1120	300	260	150	9~40
1200	330	270	200	9~40
1260	350	280	210	9~40
1500	400	350	200	9~40
1600	430	370	220	9~40
2000	512	488	150	9~40
2400	645	555	330	9~40

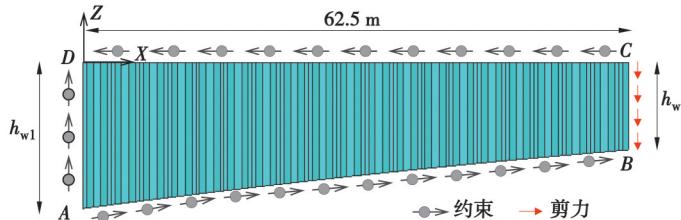
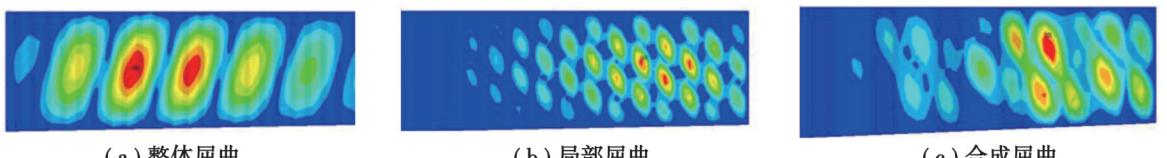


图6 模型边界条件及加载

Fig. 6 Boundary conditions and loading of the model



(a) 整体屈曲
(b) 局部屈曲
(c) 合成屈曲
($b=0.4, d=0.35, h_r=0.225, t_w=0.04, h_{w1}=5, h_{w2}=4$) ($b=0.1, d=0.6, h_r=0.225, t_w=0.009, h_{w1}=6.5, h_{w2}=3$) ($b=0.7, d=0.6, h_r=0.4, t_w=0.0245, h_{w1}=6.5, h_{w2}=2$)

图7 波形钢腹板屈曲模式

Fig. 7 Buckling mode of corrugated steel webs

弹性剪切屈曲强度与结构几何刚度有关,结构尺寸变化会改变弹性剪切屈曲强度,等截面波形钢腹板弹性剪切屈曲强度已有具体计算式,而变截面波形钢腹板弹性剪切屈曲强度不仅与波形钢腹板尺寸有关,还与梁高变化形式、波形钢腹板长边及短边高有关,目前尚无统一计算式。因此,对于文中工程实例,梁高变化形式为二次抛物线且波形钢腹板跨度确定的情况下,对729个不同尺寸波形钢腹板的特征值屈曲分析结果进行响应面拟合,得到弹性剪切屈曲强度与尺寸的回归模型如式(1)所示。该回归模型的显著性检验 P 值小于0.0001,极显著,表明模型可靠度较高;相关系数 R^2 等于0.9099,接近于1,表明变量间高度相关。选取用于

拟合式(1)的算例, 得到预测值与实际值比较如图 8(a)所示, 在参数范围内, 选取 b 分别为 0.25、0.55 m; d 为 0.2、0.5 m; h_r 为 0.1、0.3 m; t_w 为 0.01、0.03 m; h_{w1} 为 6、7 m; h_{w2} 为 2、4 m, 进行组合, 得到 64 个其他算例的预测值与实际值比较如图 8(b)所示。由图 8 可知, 散点分布在对角线附近, 公式预测值与 ANSYS 所求值吻合度较高, 表明该模型准确有效。

$$\begin{aligned} \tau(b, d, h_r, t_w, h_{w1}, h_{w2}) = & -0.00068 \times E + (0.181 \times b - 0.026 \times d - 0.813 \times h_r - 8.12 \times t_w - 0.031 \times h_{w1} - \\ & 0.03 \times h_{w2}) \times E \times L^{-1} + (-16.777 \times b \times h_r + 1.181 \times b \times h_{w1} - 54.14 \times d \times h_r - 394.66 \times d \times t_w + \\ & 2.481 \times d \times h_{w1} + 2249.779 \times h_r \times t_w - 6.012 \times h_r \times h_{w1} + 9.749 \times h_r \times h_{w2} - 95.998 \times t_w \times h_{w1} + \\ & 58.537 \times t_w \times h_{w2} - 0.401 \times h_{w1} \times h_{w2} - 25.723 \times b \times b - 71.058 \times h_r \times h_r + 0.281 \times h_{w1} \times h_{w1}) \times E \times L^{-2}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: E 为钢腹板弹性模量, $E=2.06e5$ MPa; L 为钢腹板跨度, $L=62.5$ m。

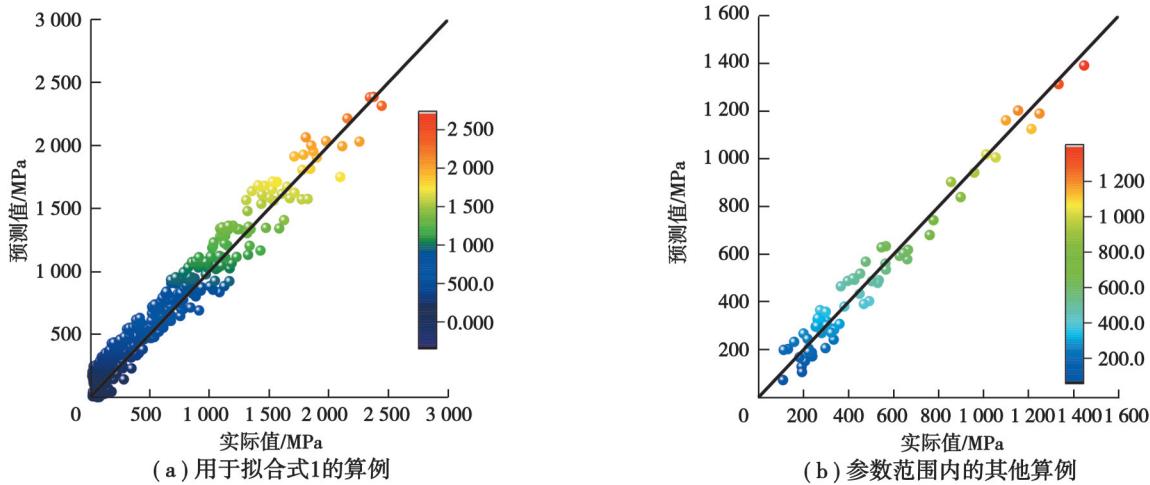


图 8 弹性剪切屈曲强度实际值与预测值对比

Fig. 8 Comparison of actual and predicted values of elastic shear buckling strength

2.3 造价公式

变截面采用二次抛物线形式, 为确保变截面波形钢腹板面积的计算准确性, 采用条分方法如图 9 所示, 以一块波形钢腹板为单位计算各平板条面积之和为

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \sum_{i=1}^N ((y_1 + y_2) \times b \times 0.5 + (y_2 + y_3) \times (d^2 + h_r^2)^{0.5} \times 0.5 + \\ (y_3 + y_4) \times b \times 0.5 + (y_4 + y_5) \times (d^2 + h_r^2)^{0.5} \times 0.5), \\ y_1 = |a_1 \times (2(i-1) \times b + 2(i-1) \times d)^2 + a_2 \times (2(i-1) \times b + 2(i-1) \times d) + a_3|, \\ y_2 = |a_1 \times ((2i-1) \times b + (2i-2) \times d)^2 + a_2 \times ((2i-1) \times b + (2i-2) \times d) + a_3|, \\ y_3 = |a_1 \times ((2i-1) \times b + (2i-1) \times d)^2 + a_2 \times ((2i-1) \times b + (2i-1) \times d) + a_3|, \\ y_4 = |a_1 \times (2i \times b + (2i-1) \times d)^2 + a_2 \times (2i \times b + (2i-1) \times d) + a_3|, \\ y_5 = |a_1 \times (2i \times b + 2i \times d)^2 + a_2 \times (2i \times b + 2i \times d) + a_3|, \\ a_1 = (h_{w2} - h_{w1}) / 62.5^2, \\ a_2 = 2 \times (h_{w1} - h_{w2}) / 62.5, \\ a_3 = -h_{w1}, \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: i 为第 i 块波形钢腹板; N 为波形钢腹板总块数; $a_1 \sim a_3$ 为二次抛物线系数; $y_1 \sim y_5$ 为第 i 块波形钢腹板 4 个梯形平板条上下底长度。

钢材价格按照经验值取 5 500 元/t, Q345 钢密度取 7 850 kg·m⁻³, 全桥波形钢腹板造价为

$$\theta(b, d, h_r, t_w, h_{w1}, h_{w2}) = 8 \times A \times t_w \times 7850 \times 5500 / 1000 / 10000, \quad (3)$$

工程优化的目标是通过对波形钢腹板平板条长 b 、 d ，波高 h_r ，板厚 t_w ，长边板高 h_{w1} ，短边板高 h_{w2} 共 6 个尺寸变量进行设计，使得波形钢腹板弹性屈曲强度 τ 尽可能大，同时全桥波形钢腹板造价 θ 尽可能小，优化问题目标函数为

$$\begin{aligned} & \min \begin{cases} -\tau(b, d, h_r, t_w, h_{w1}, h_{w2}) \\ \theta(b, d, h_r, t_w, h_{w1}, h_{w2}) \end{cases} \\ & 0.1 \leq b \leq 0.7, 0.1 \leq d \leq 0.6, 0.05 \leq h_r \leq 0.4, \\ & 0.009 \leq t_w \leq 0.04, 5 \leq h_{w1} \leq 8, 2 \leq h_{w2} \leq 4. \end{aligned} \quad (4)$$

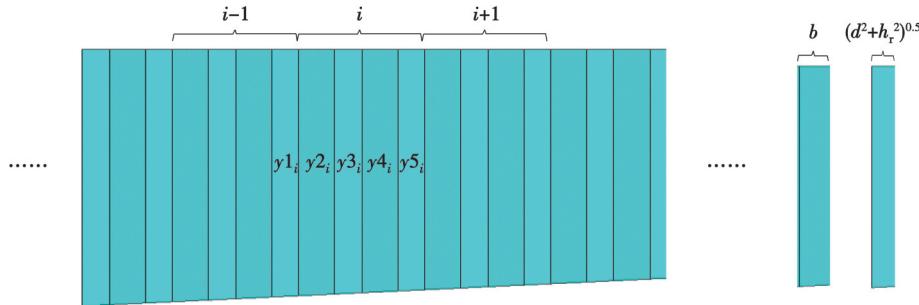


图 9 变截面波形钢腹板面积计算

Fig. 9 Calculation of area of corrugated steel web with variable section

3 变截面波形钢腹板的双目标优化及决策过程

双目标优化问题可求得 Pareto 最优解集，Pareto 解集的特点是在没有任何目标变差的情况下使得至少一个目标改善，直到没有更多可以改善的情况。针对所求 Pareto 最优解集，需要结合工程实际对 Pareto 最优解集再次评估决策，因此，变截面波形钢腹板尺寸优化设计可分为 2 步：1) 采用合适的优化算法求得 Pareto 解集；2) 采用合适的评价指标，从 Pareto 解集中筛选出最优方案。

3.1 双目标优化算法 NSGA-II

采用 NSGA-II 遗传算法进行目标优化，与 NSGA 算法相比，NSGA-II 在遗传算法的基础上，提出快速非支配排序，降低了算法复杂度，提出拥挤度比较算子，使 Pareto 域中的个体均匀分布，保持了种群多样性，同时引入精英策略，将父代种群与子代种群结合，共同竞争产生下一代，迅速提高种群水平^[19]。传统多目标方法如线性规划法、约束法、加权法等实质上是将多目标问题转换为单目标问题，NSGA-II 遗传算法与传统方法相比更加精确，适用于全局空间下搜索最优解，可有效解决工程中非线性函数的多目标优化问题。基于 MATLAB 编程实现 NSGA-II 遗传算法，该算法对文中双目标优化的步骤为：

1) 初始化。随机生成初始种群，每个个体为 1 个数组，数组中的元素为 6 个尺寸参数，每个个体均计算出相应的弹性剪切屈曲强度及造价。

2) 快速非支配排序。对于不同个体得到的目标值，假设 p 个体 2 个目标值都大于 q 个体，或一个目标相等，另一个目标值大于 q ，则称 p 支配 q ， q 被 p 支配。遍历所有个体，计算每个个体被支配个数 n_p 和该个体支配解的集合 S_p ，将 $n_p=0$ 的个体放入集合 F_1 ，则 F_1 为等级最高的个体集合，最高等级设为 rank=1。对于 F_1 中所有个体 p ，对其支配解集中每个个体被支配个数依次减 1，若减完 1 后其被支配个数等于 0，则表明其只受 p 的支配，其等级为 rank=2，依此类推，完成所有的 rank 等级划分。

3) 拥挤度计算。根据目标函数对该等级的个体进行排序，边界的 2 个个体拥挤度设为无穷大，对于第 i 个个体计算其拥挤度 d_i 为

$$d_i = |\tau_{i+1} - \tau_{i-1}| + |\theta_{i+1} - \theta_{i-1}|, \quad (5)$$

式中: $\tau_{i+1}, \tau_{i-1}, \theta_{i+1}, \theta_{i-1}$ 分别为第 i 个个体前后个体的弹性剪切屈曲强度及造价。经过步骤 2 及步骤 3 生成第 1 代种群。

4) 选择、交叉、变异。对第 1 代种群采用遗传算法中的选择、交叉、变异操作, 生成的子代种群与父代合并。

5) 对合并后的种群进行快速非支配排序及计算拥挤度, 采用精英策略, 保留适应度优的个体并移除适应度差的个体, 产生新一代种群。

6) 判断是否满足收敛条件, 满足, 则结束迭代; 若不满足, 则重复步骤 4 及步骤 5。算法在解空间中向 Pareto 前沿迈进的示意图如图 10 所示, 优化流程如图 11 所示。

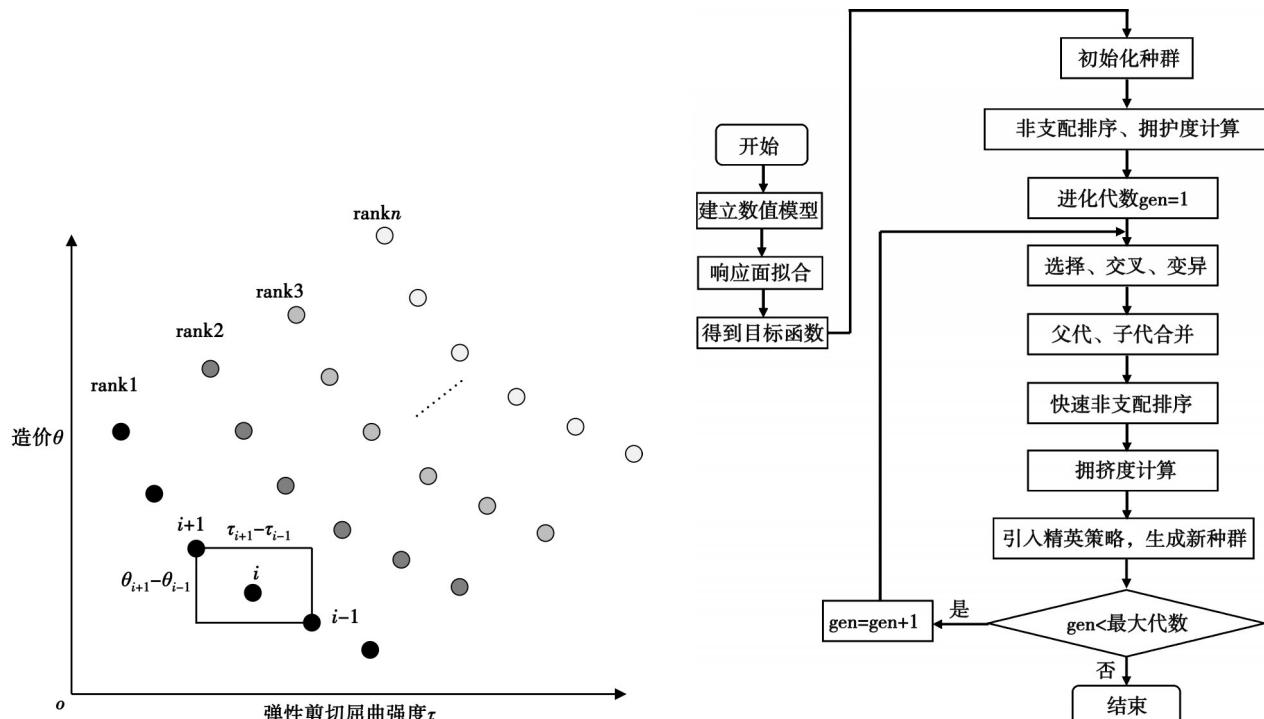


图 10 NSGA-II 遗传算法示意图

Fig. 10 NSGA-II Genetic Algorithm schematic diagram

图 11 NSGA-II 遗传算法流程图

Fig. 11 NSGA-II Genetic Algorithm Flowchart

3.2 双目标决策方法

实际工程中方案选定有人的参与, 需考虑人主观因素的影响, 以剪切屈曲强度及造价 2 个优化目标为评价指标, 邀请专家对 2 个指标重要性进行打分, 并计算 2 个指标的主观权重。采用熵权法^[20]计算 2 个指标的客观权重, 指标离散程度越大, 所反映信息越多, 其权重越大, 因此, 熵权法可有效减弱 Pareto 解集中离散程度较小指标的比重。主观赋权依赖人的主观判断, 易受主观因素和专家素质的影响, 没有充分考虑客观历史数据的重要性, 造成一定误差, 客观赋权法避免了人为因素, 但容易忽视主观偏好和实际情况, 因此, 采用离差最小化原则集成主观权重及客观权重, 得到综合权重。最后, 使用综合权重得到新的指标数据, 利用 TOPSIS 法进行排序, 双目标决策的具体过程如下。

1) 专家打分计算主观权重 β_n 为

$$\beta_n = \frac{\sum_{g=1}^G S_{gn}}{\sum_{g=1}^G \sum_{n=1}^2 S_{gn}}, \quad (6)$$

式中: G 表示共有 G 位专家参与打分; S_{gn} 为第 g 位专家对第 n 项指标的打分值。

2)以2个目标函数为列,所有Pareto解集为行组成指标矩阵 \mathbf{U} 为

$$\mathbf{U}=(u_{mn})_{c \times 2} \quad (m=1, 2, 3, \dots, c; n=1, 2), \quad (7)$$

式中: c 为Pareto解的数量; m, n 为矩阵行数及列数。

3)对指标矩阵进行无量纲的正向化及逆向化处理,得到处理后的指标矩阵 \mathbf{U}' 。屈曲强度越大越好,进行正向化无量纲处理,造价越小越好,进行逆向化无量纲处理:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}' &= (u'_{mn})_{c \times 2} \quad (m=1, 2, 3, \dots, c; n=1, 2), \\ u'_{m1} &= \frac{u_{m1} - u_{m1\min}}{u_{m1\max} - u_{m1\min}}, \\ u'_{m2} &= \frac{u_{m2\max} - u_{m2}}{u_{m2\max} - u_{m2\min}}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $u_{m1\max}, u_{m1\min}, u_{m2\max}, u_{m2\min}$ 分别为每列元素的最大、最小值。 u'_{m1}, u'_{m2} 为无量纲处理后的值。

4)利用熵权法计算2个指标的客观权重,首先计算第 n 项指标下第 m 个样本所占比例 p_{mn} ,再计算第 n 项指标的熵值 e_n 及信息熵冗余度 r_n ,最后计算各项指标客观权重 w_n :

$$p_{mn} = \frac{u'_{mn}}{\sum_{m=1}^c u'_{mn}} \quad (m=1, 2, 3, \dots, c; n=1, 2), \quad (9)$$

$$e_n = -k \sum_{m=1}^c p_{mn} \ln(p_{mn}) \quad (n=1, 2), \quad (10)$$

$$r_n = 1 - e_n \quad (n=1, 2), \quad (11)$$

$$w_n = \frac{r_n}{\sum_{n=1}^2 r_n} \quad (n=1, 2), \quad (12)$$

式中: $k = 1/\ln(c) > 0$,满足 $e_n \geq 0$ 。

5)根据文献[21]方法,基于离差最小化原则,得到综合权重 ψ_n :

$$\min \alpha_1 \sum_m^c \sum_n^2 [u'_{mn}(\psi_n - \beta_n)]^2 + \alpha_2 \sum_m^c \sum_n^2 [u'_{mn}(\psi_n - w_n)]^2, \quad (13)$$

式中: α_1, α_2 为离差函数的偏好因子, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, α_1, α_2 取值与专家对指标的熟悉程度有关。若 $0.5 < \alpha_1 < 1$,表明专家打分的主观权重更重要;若 $0 < \alpha_1 < 0.5$,表明客观权重更重要; $\alpha_1 = 0.5$,则表明主观权重和客观权重同等重要。文中算例取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 。

6)对无量纲指标矩阵 \mathbf{U}' 加权,得到加权后的矩阵 \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = (r_{mn})_{c \times 2} \quad (m=1, 2, 3, \dots, c; n=1, 2), \quad (14)$$

式中: $r_{mn} = u'_{mn} * \psi_n$ 。

7)利用TOPSIS法进行决策,以加权矩阵中每列最大值为正理想解 r_n^+ ,最小值为负理想解 r_n^- 。

$$\begin{aligned} r_n^+ &= \max(r_{1n}, r_{2n}, \dots, r_{cn}), \\ r_n^- &= \min(r_{1n}, r_{2n}, \dots, r_{cn}). \end{aligned} \quad (15)$$

8)计算各Pareto解到正、负理想解的距离。

$$\begin{aligned} d_m^+ &= \sqrt{\sum_{n=1}^2 (r_n^+ - r_{mn})^2}, \\ d_m^- &= \sqrt{\sum_{n=1}^2 (r_n^- - r_{mn})^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

9)计算综合评价值 S_m 。按照综合评价值大小,对Pareto解排序, S_m 值越大,越接近理想水平:

$$S_m = \frac{d_m^-}{d_m^+ + d_m^-} \circ \quad (17)$$

4 优化及决策结果

4.1 优化结果

设置初始种群大小为 200, 最大迭代次数为 10 000, 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.1, 迭代求解, 得到造价与弹性剪切屈曲强度的 Pareto 前沿最优解如图 12 所示。最优解中解的个数为 70 个, 造价分布在 50~700 万元, 弹性剪切屈曲强度分布在 100~2 700 MPa, 在最优解集中筛选出更加符合实际的方案, 需对目标进一步决策。

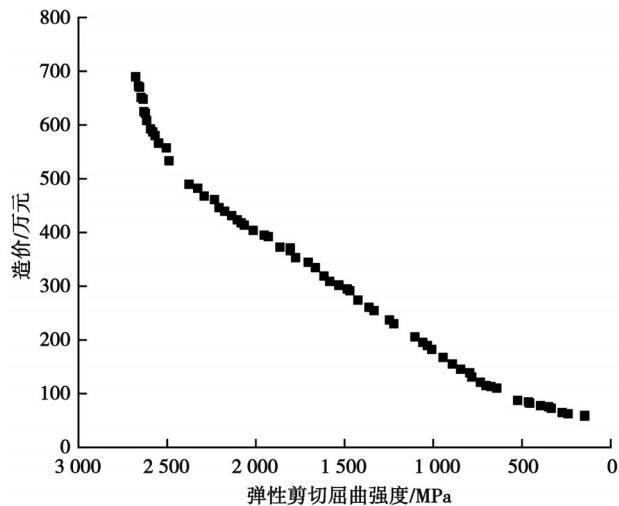


图 12 造价-弹性剪切屈曲强度 Pareto 最优解集

Fig. 12 Cost-elastic shear buckling strength Pareto optimal solution set

4.2 决策结果

以 5 分为满分设计五分量表, 20 位专家对该工程中 2 个指标重要性的打分情况, 如表 2 所示。根据式(6)得到弹性剪切屈曲强度及造价的主观权重分别为 0.574 2、0.425 8, 根据式(12)得到弹性剪切屈曲强度及造价的客观权重分别为 0.514 0、0.486 0, 根据式(13)得到综合权重分别为 0.544 1、0.455 9。

表 2 专家对 2 个指标重要性打分情况

Table 2 Experts' scores on the importance of the two indicators

专家序号	弹性剪切屈曲强度	造价	专家序号	弹性剪切屈曲强度	造价
1	4	3	11	4	2
2	3	3	12	4	3
3	5	3	13	5	3
4	4	5	14	4	3
5	5	3	15	5	4
6	4	5	16	5	2
7	5	3	17	5	3
8	4	3	18	4	5
9	4	4	19	5	5
10	5	2	20	5	2

注: 1 分为不重要; 2 分为一般重要; 3 分为较重要; 4 分为重要; 5 分为非常重要

利用TOPSIS法计算综合评价值,得到排序前10位的Pareto解,如表3所示。序号为1的解综合评价值 S_m 最大,为最佳方案。将原设计方案与最佳方案对比,结果如表4所示,70个Pareto解中2项指标均优于原设计的解有29个,将部分两项指标均优于原设计的解也列于表4。最佳方案及两项指标均优于原设计的解在Pareto解集中的位置,如图13所示。由表4可知,最佳方案中弹性剪切屈曲强度 τ 较原设计增大93.5%,造价 θ 比原设计多37.1%,由于决策者的偏向使得剪切屈曲强度占据较大权重,因此,排序后所得到的最佳方案趋向于增加一定造价,波形钢腹板弹性剪切屈曲强度大幅提高,使结构更加安全。由表4及图13可知,Pareto解集中存在多个方案2项指标均优于原设计,以36、37、39、43、44号方案为例,弹性剪切屈曲强度 τ 分别提高89.9%、89.4%、89.2%、88.4%、88.2%,造价 θ 分别降低2.4%、7.1%、9.3%、15.5%、18.1%。原设计采用标准1600型钢腹板,根据优化结果表明,1600型波形钢腹板并非满足弹性剪切屈曲强度 τ 及造价 θ 同时最优,可以改进尺寸进一步提高钢腹板的剪切屈曲强度同时节省造价。

表3 Pareto解集中排序前10的解
Table 3 Top 10 solutions in the Pareto solution set

排序	尺寸变量						目标值		S_m
	b/m	d/m	h_r/m	t_w/m	h_{w1}/m	h_{w2}/m	τ/MPa	$\theta/\text{万元}$	
1	0.320	0.313	0.397	0.038	5.027	3.723	2207	446	0.615 4
2	0.316	0.319	0.397	0.038	5.018	3.710	2176	439	0.614 9
3	0.326	0.293	0.397	0.036	5.027	3.809	2136	431	0.613 9
4	0.340	0.306	0.397	0.035	5.029	3.869	2083	418	0.613 8
5	0.321	0.312	0.397	0.036	5.024	3.854	2104	423	0.613 8
6	0.325	0.271	0.399	0.039	5.027	3.753	2291	468	0.613 7
7	0.340	0.305	0.397	0.035	5.029	3.869	2065	413	0.613 7
8	0.330	0.266	0.398	0.039	5.041	3.908	2377	490	0.611 5
9	0.340	0.308	0.397	0.034	5.026	3.864	2015	404	0.611 2
10	0.306	0.282	0.395	0.039	5.030	3.899	2328	482	0.609 6

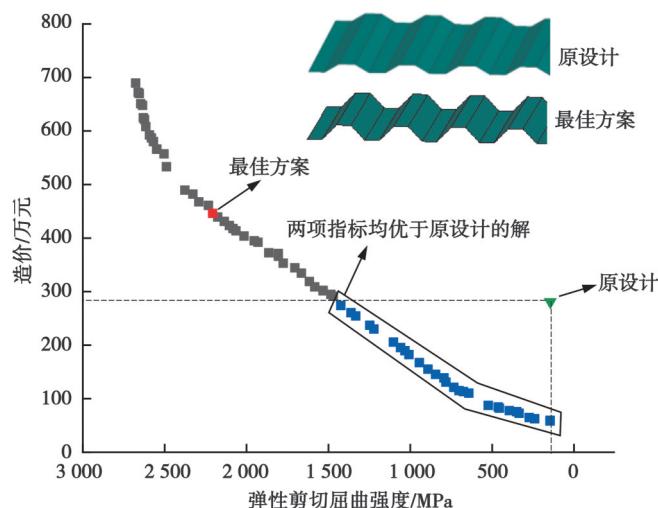


图13 最佳方案及两项指标均优于原设计的解在Pareto解集中的位置

Fig. 13 The position of the best solution and the solution whose two indicators are better than the original design in the Pareto solution set

表 4 原设计与最佳方案及部分两项指标均优于原设计的方案对比

Table 4 Comparison between the original design and the best scheme and some schemes whose two indicators are better than the original design

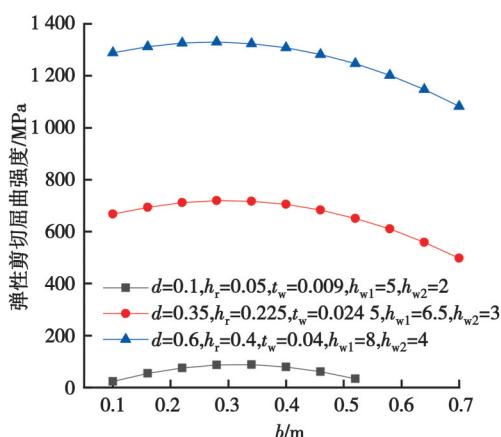
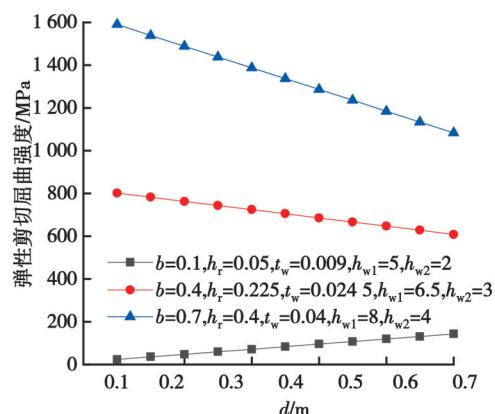
方案	b/m	d/m	h_r/m	t_w/m	h_{w1}/m	h_{w2}/m	τ/MPa	$\theta/\text{万元}$	S_m
原设计	0.430	0.370	0.220	0.028	6.662	3.153	145	281	—
最佳方案	0.320	0.313	0.397	0.038	5.027	3.723	2 207	446	0.615 4
36	0.342	0.306	0.395	0.023	5.031	3.861	1 424	274	0.566 5
37	0.321	0.276	0.391	0.021	5.033	3.888	1 362	261	0.560 0
39	0.329	0.281	0.392	0.021	5.032	3.876	1 333	254	0.557 1
43	0.308	0.269	0.386	0.019	5.043	3.864	1 247	237	0.547 3
44	0.330	0.281	0.386	0.019	5.032	3.877	1 222	230	0.545 8

注: 方案列的数字为两项指标均优于原设计的方案排序号

5 各因素对方案的影响分析

5.1 波形钢腹板尺寸对弹性剪切屈曲强度影响分析

通过响应面拟合公式判断尺寸改变下弹性剪切屈曲强度的变化趋势, 可用正相关或负相关描述尺寸与剪切屈曲强度关系, 不同尺寸参数波形钢腹板弹性剪切屈曲强度 τ , 如图 14 所示。在尺寸参数的取值范围内, 由图 14(a)可知, 平板条长度 b 取较小值时, b 与剪切屈曲强度正相关; b 取较大值时, b 与剪切屈曲强度负相关。由图 14(b)可知, 在其余 5 个参数取较小值时, 平板条长度 d 与剪切屈曲强度正相关; 其余 5 个参数取较大值时, d 与剪切屈曲强度负相关。由图 14(c)可知, 波高 h_r 与剪切屈曲强度正相关。由图 14(d)可知, 板厚 t_w 与剪切屈曲强度正相关。由图 14(e)可知, 其余 5 个参数取较小值时且长边板高 h_{w1} 取较小值时, h_{w1} 与剪切屈曲强度负相关; 其余 5 个参数取较小值时, 且 h_{w1} 取较大值时, h_{w1} 与剪切屈曲强度正相关; 其余 5 个参数取较大值时, h_{w1} 与剪切屈曲强度负相关。由图 14(f)可知, 短边板高 h_{w2} 与剪切屈曲强度正相关。由尺寸影响分析可知, 最佳方案通过增加 h_r 、 t_w 、 h_{w2} , 以及减小 b 、 d 、 h_{w1} 来实现剪切屈曲强度的提高。

(a) b 对弹性剪切屈曲强度的影响(b) d 对弹性剪切屈曲强度的影响

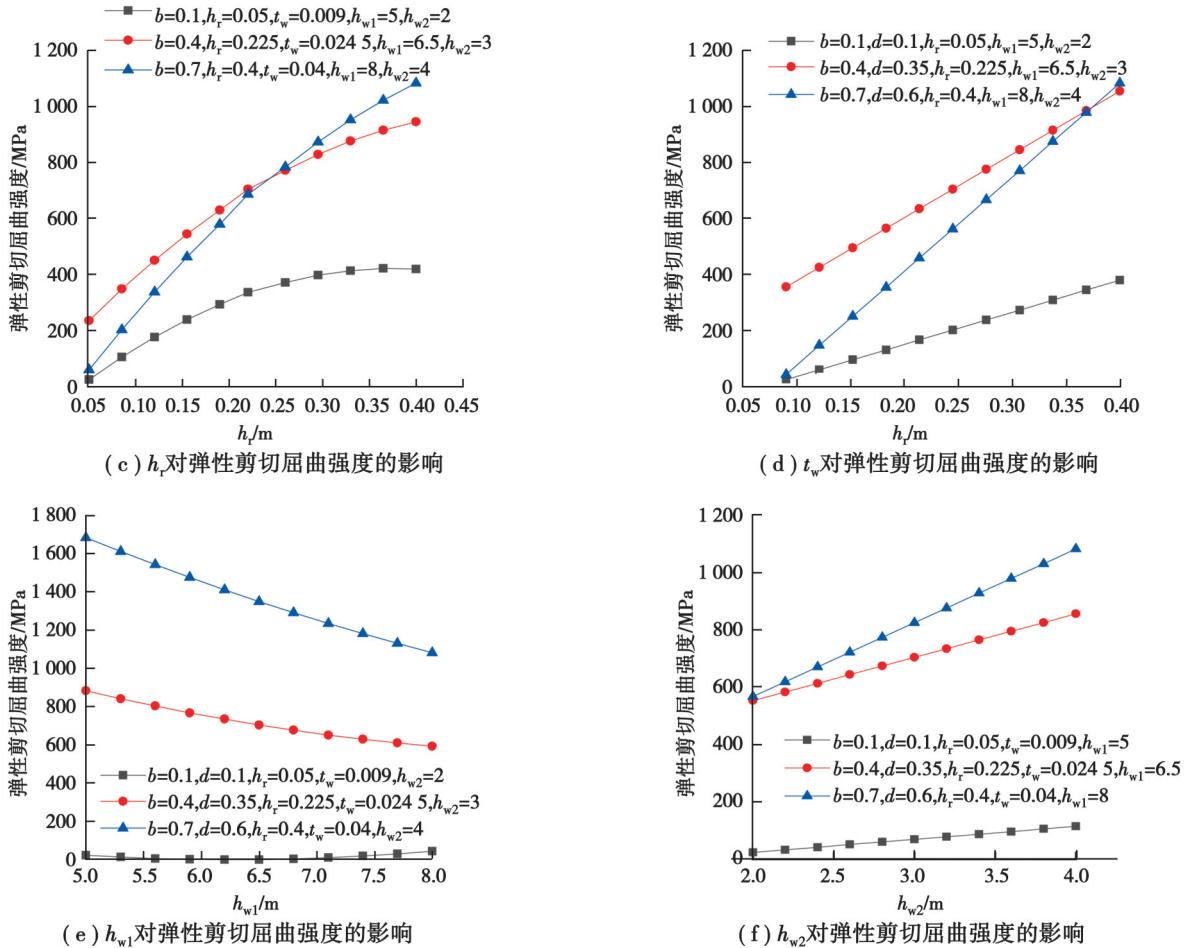
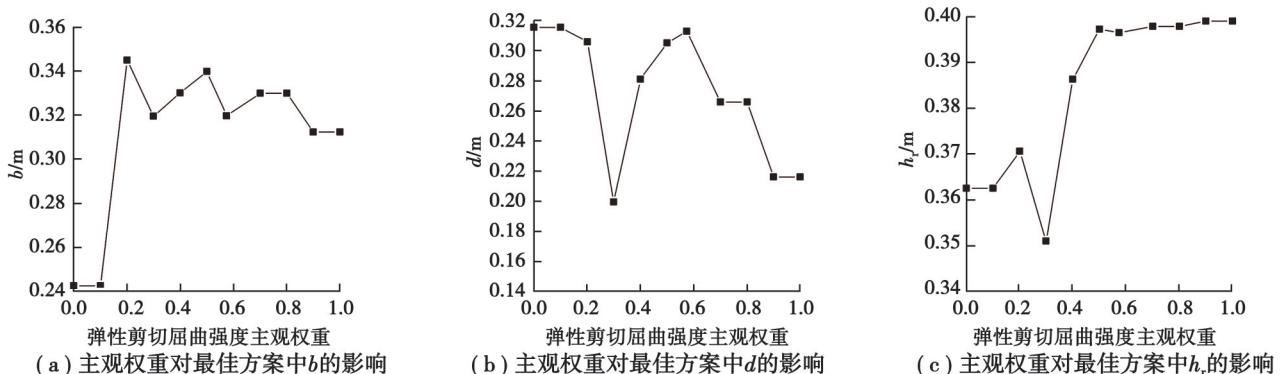


图 14 不同尺寸参数波形钢腹板弹性剪切屈曲强度变化

Fig. 14 Variation of elastic shear buckling strength of corrugated steel web with different geometric parameters

5.2 主观权重对最佳方案影响分析

客观权重采用熵权法计算指标信息熵,结果和数据本身有关,不受外界影响,而专家打分的主观权重则会影响决策结果。改变波形钢腹板弹性剪切屈曲强度 τ 主观权重分别为 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.574 2(本文算例),0.7、0.8、0.9、1,不同弹性剪切屈曲强度主观权重下得到的最佳方案各参数变化情况如图 15 所示。由图 15(a)可知,主观权重在超过 0.2 后, b 值为 0.31~0.35 m;由图 15(b)可知,最佳方案中 d 取值在 0.19~0.32 m 之间;由图 15(c)可知,主观权重在超过 0.3 后,最佳方案中 h_r 逐渐增大;由图 15(d)可知, t_w 随主观权重增大而增大,表明工程实际中,相比造价,决策者若更偏向于剪切屈曲强度,则 h_r 及 t_w 应选择取值范围内的较大值;由图 15(e)可知, h_{w1} 保持不变,其值稍大于 5 m,表明最佳方案中 h_{w1} 不随决策者的偏向而改变, h_{w1} 应选择取值范围内的较小值;由图 15(f)可知,最佳方案中 h_{w2} 取值在 3.7~4 m 之间;由图 15(g)及图 15(h)可知,随着主观



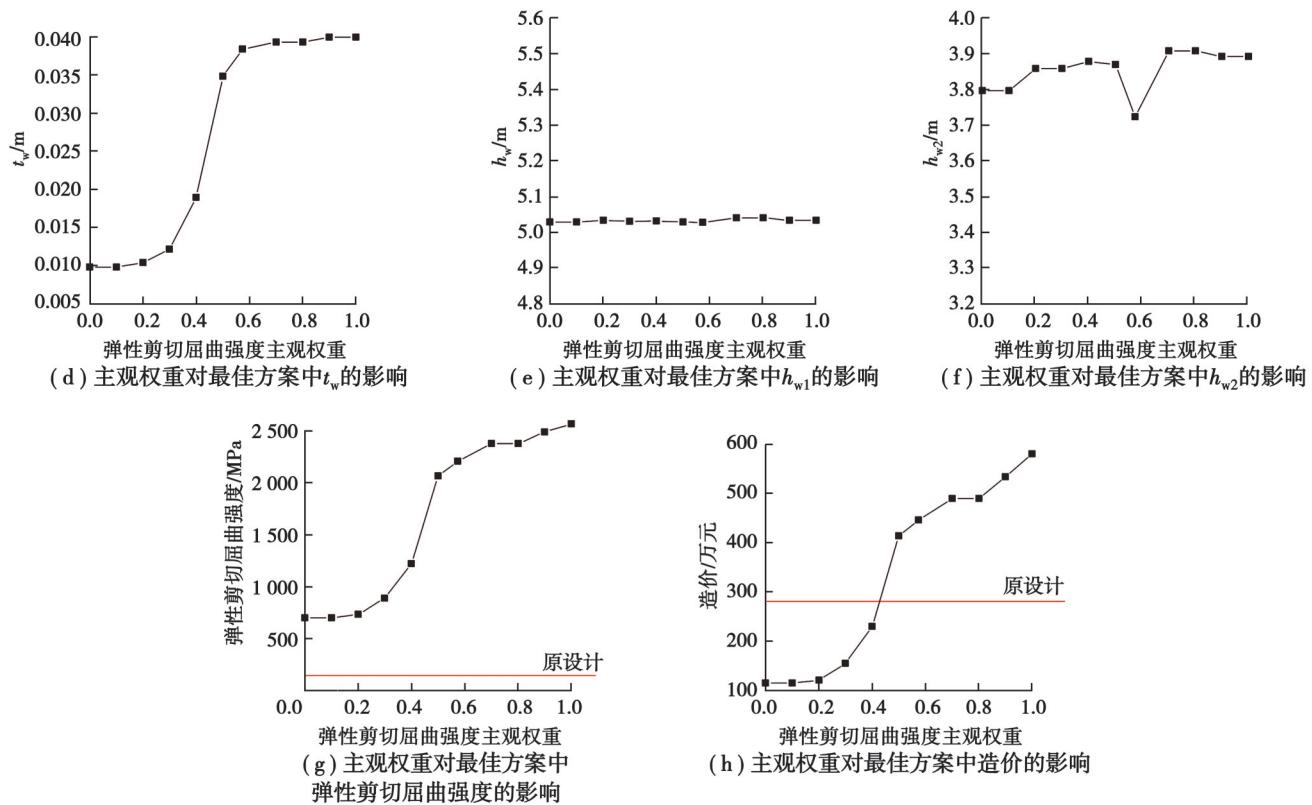


图 15 主观权重对最佳方案中各参数的影响

Fig. 15 The influence of subjective weight on each parameter in the optimal scheme

权重的增加,最佳方案中弹性剪切屈曲强度及造价同时增大,证明主观偏向直接影响了最佳方案,当弹性剪切屈曲强度主观权重小于 0.43 时,即当决策者在工程中,相比于屈曲强度,更倾向于减少造价时,最佳方案中两项指标可同时优于原设计。

6 结 论

通过响应面法及条分方法得到变截面波形钢腹板弹性剪切屈曲强度 τ 及造价 θ 公式,采用 NSGA-II 算法优化得到 Pareto 解。提出专家打分法-熵权法-离差最小化方法,计算得到 2 个目标的综合权重,利用 TOPSIS 法排序得到最佳方案,同时分析各参数对结果的影响,得到以下结论。

1) 采用文中建模方法得到试件的破坏形态及荷载位移曲线,与 A12-410-45、S1、S2-2 试件进行对比,验证了有限元模型准确性。通过响应面法拟合得到波形钢腹板尺寸与弹性剪切屈曲强度 τ 回归模型,分析显著性检验 P 值、相关系数 R^2 、所得预测值与实际值对比,表明回归模型准确有效。

2) 与原设计相比,最佳方案增加 37.1% 的造价 θ ,使得波形钢腹板弹性剪切屈曲强度 τ 增大 93.5%,由于决策者更倾向于弹性剪切屈曲强度 τ ,使得最佳方案增加一定的造价 θ ,从而大幅提高强度。Pareto 解集中有 29 个两项指标均优于原设计的方案,即弹性剪切屈曲强度 τ 大于原设计且造价 θ 小于原设计,表明原设计所采用的标准 1600 型钢腹板并非满足强度和造价的同时最优,波形钢腹板尺寸可进一步改进。

3) 6 个设计参数在取值范围内均对弹性剪切屈曲强度 τ 有一定影响,其中,波高 h_r 、板厚 t_w 及短边板高 h_{w2} 与弹性剪切屈曲强度 τ 呈正相关。主观权重直接影响最佳方案的选择,随着弹性剪切屈曲强度 τ 主观权重增加,最佳方案中弹性剪切屈曲强度 τ 及造价 θ 都增大,弹性剪切屈曲强度 τ 主观权重小于 0.43 时,弹性剪切屈曲强度 τ 及造价 θ 可同时优于原设计。

4) 适用于线性屈曲分析,通过改变钢腹板尺寸,提高弹性剪切屈曲强度 τ ,从而提高结构整体稳定性,对于钢腹板因剪切发生大变形或需要考虑材料屈服强度的情况,应采用非线性理论进行具体分析。

参考文献

- [1] 刘素梅. 波形钢腹板组合曲线箱梁力学性能理论及试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
Liu S M. Theoretical and experimental study on the mechanical properties of curved composite box girders with corrugated steel webs[D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [2] 曹洪亮, 李淑琴, 刘洪成, 等. 波形钢腹板工字双主梁组合梁桥设计与计算分析[J]. 公路, 2019, 64(8): 83-88.
Cao H L, Li S Q, Liu H C, et al. Design and calculation analysis of I-shaped double girder composite beam bridge with corrugated steel webs[J]. Highway, 2019, 64(8): 83-88. (in Chinese)
- [3] Kristijanto H, Piscesa B, Faimun F, et al. Shear buckling analysis of corrugated web steel plate girder with random material properties[J]. The Open Civil Engineering Journal, 2022, 16.
- [4] 郑尚敏, 沈强, 程海根, 等. 新型组合波形钢腹板的弹性剪切屈曲强度[J]. 公路交通科技, 2023, 40(1): 92-97, 151.
Zheng S M, Shen Q, Cheng H G, et al. Elastic shear buckling strength of new composite corrugated steel webs[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(1): 92-97, 151. (in Chinese)
- [5] 卜康正, 赵勇, 郑先昌. 基于NSGA2遗传算法的地铁隧道上方基坑工程优化设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(2): 459-467.
Bu K Z, Zhao Y, Zheng X C. Optimization design for foundation pit above metro tunnel based on NSGA2 genetic algorithm[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(2): 459-467. (in Chinese)
- [6] 齐超. 钢筋混凝土框架建筑造价管理及设计方案优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019: 67-127.
Qi C. Research on cost management and design scheme optimization for reinforced concrete frame buildings[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019: 67-127. (in Chinese)
- [7] 王淑桃. 铁路桥粱混凝土工程造价大数据计算模型优化设计[J]. 混凝土, 2020(2): 175-178.
Wang S T. Optimization of railway bridge concrete engineering cost calculation model based on big data analysis[J]. Concrete, 2020(2): 175-178. (in Chinese)
- [8] Mahmoodzadeh A, Nejati H R, Mohammadi M, et al. Developing six hybrid machine learning models based on Gaussian process regression and meta-heuristic optimization algorithms for prediction of duration and cost of road tunnels construction [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 130: 104759.
- [9] Liang R, Li R, Yan X, et al. Evaluating and selecting the supplier in prefabricated megaprojects using extended fuzzy TOPSIS under hesitant environment: a case study from China[J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2023, 30 (5): 1902-1931.
- [10] Issa U H, Miky Y H, Abdel-Malak F F. A decision support model for civil engineering projects based on multi-criteria and various data[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 25(2): 100-113.
- [11] 陈仁朋, 王志腾, 吴怀娜, 等. 基于FAHP法和区间数改进TOPSIS法的盾构隧道下穿建筑物风险评估[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(12): 1710-1719.
Chen R P, Wang Z T, Wu H N, et al. Risk assessment for shield tunneling beneath buildings based on interval improved TOPSIS method and FAHP method[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(12): 1710-1719. (in Chinese)
- [12] 蒋浩鹏, 孙建诚, 杨文伟, 等. 基于AHP与改进TOPSIS权值算法的高速公路施工方案风险评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(8): 698-703.
Jiang H P, Sun J C, Yang W W, et al. Risk evaluation of highway construction plan based on AHP and improved TOPSIS weight algorithm[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(8): 698-703. (in Chinese)
- [13] 冀伟, 马建红. 变截面波形钢腹板弹性整体屈曲计算及几何参数分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(11): 132-141.
Ji W, Ma J H. Elastic global buckling calculation and geometric parameter analysis of corrugated steel webs with variable section[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(11): 132-141. (in Chinese)
- [14] Hassanein M F, Kharoob O F. Behavior of bridge girders with corrugated webs: (I) Real boundary condition at the juncture of the web and flanges[J]. Engineering Structures, 2013, 57: 554-564.
- [15] Leblouba M, Junaid M T, Barakat S, et al. Shear buckling and stress distribution in trapezoidal web corrugated steel beams[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 113: 13-26.

- [16] Wang S H, Zhang K Q, Zhang Y, et al. Shear failure mechanism of local buckling-dominated large-scale corrugated steel web [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 182: 110279.
- [17] 聂建国, 朱力, 唐亮. 波形钢腹板的抗剪强度[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 97-109.
Nie J G, Zhu L, Tang L. Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 97-109. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 波形钢腹板组合梁桥技术标准: CJJ/T 272—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for corrugated steel web composite girder bridges: CJJ/T 272—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [19] Li H, Yu Y, Li J C, et al. Multi-objective optimisation for improving the seismic protection performance of a multi-storey adaptive negative stiffness system based on modified NSGA-II with DCD[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 103145.
- [20] Qin Y, Guan K, Kou J L, et al. Durability evaluation and life prediction of fiber concrete with fly ash based on entropy weight method and grey theory[J]. Construction and Building Materials, 2022, 327: 126918.
- [21] 王剑波, 王晓霖, 周立国, 等. 管道风险因素的主客观集成权重赋权方法[J]. 油气储运, 2019, 38(7): 745-750.
Wang J B, Wang X L, Zhou L G, et al. Pipeline risk factor weighting method based on subjective-objective integrated weight [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(7): 745-750. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)