文章编号:1674-2974(2025)09-0080-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025089

铸钢相贯节点多工况形状优化方法

郭小农,李政宁,李根,唐子琳†
(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘 要:铸钢相贯节点整体性好、应力集中水平低,在空间结构中得到广泛应用.然而,现行规范缺少此类节点的承载力计算公式,工程师需要进行有限元分析完成节点的安全校核,并通过试错寻找合理的设计方案.为提高铸钢相贯节点的设计效率与设计质量,本文首先提出了一种新的形状优化方法,基于细分曲面实现了节点参数化几何模型的构建,通过ABAQUS二次开发实现了节点的自动化有限元分析,并采用遗传算法对节点的几何形状进行调整.其次,分别采用线性加权法、折中规划法、ε-约束法和最大值最小化法4种目标合并方法构造了多工况优化问题的目标函数,将多工况优化问题转化为单目标优化问题.最后,将上述方法应用于某柱面网壳中的铸钢相贯节点.结果表明,所提出的方法能够在不显著增加节点体积的前提下,使节点峰值Mises应力下降44%~60%,有效降低了节点的应力水平.同时,4种目标合并方法中,最大值最小化法能够对各工况的受力需求做出最有效的兼顾,使节点在不同的荷载工况下具有相近的峰值Mises应力,从而使材料得到最充分的利用.

关键词:形状优化;多目标优化;铸钢相贯节点;细分曲面;遗传算法
中图分类号:TU391 **文献标志码**:A

Shape Optimization Method of Cast Steel Tubular Joints under Multiple Load Cases

GUO Xiaonong, LI Zhengning, LI Gen, TANG Zilin†
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Cast steel tubular joints have the advantages of excellent integrity and low stress concentration levels, making them widely used in spatial structures. However, current design codes do not provide verification formulas for such joints, which forces engineers to rely on finite element analysis for safety validation. This often leads them to search for reasonable design schemes through a trial-and-error approach. To improve the design efficiency and quality, this paper first proposes a novel shape optimization method, which develops the parametric modeling of joints based on subdivision surface, realizes the automatic finite element analysis of joints through secondary development in ABAQUS, and adjusts the shape of the joints with the genetic algorithm. Secondly, the objective function of the shape optimization problem under multiple load cases is constructed using four objective merging methods, namely linear weighted method, compromise programming method, ε-constraint method, and

* **收稿日期**:2024-09-16
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178152), National Natural Science Foundation of China(52178152)
作者简介:郭小农(1977—),男,四川金堂人,同济大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: zilintang@tongji.edu.cn

minimax method, respectively, and the shape optimization problem under multiple load cases is transformed into a single-objective optimization problem. Finally, the above methods are applied to a cast steel tubular joint in a cylinder shell, and the results demonstrated that the proposed method can reduce the peak Mises stress of the joint by 44%~60%, effectively reducing the stress level of the joints without increasing the joint volume significantly. At the same time, among the objective merging methods, the maximum minimization method can balance different load cases most effectively and exhibit similar peak Mises stress under different load cases, making the most use of the material.

Key words: shape optimization; multi-objective optimization; cast steel tubular joints; subdivision surface; genetic algorithms

铸钢相贯节点是钢结构中一种常见的节点形式,在网壳与空间管桁架等结构中具有广泛应用.铸钢相贯节点由铸钢材料一体浇筑成型,与焊接节点相比,铸钢相贯节点具有更好的整体性,并且可以避免由焊接引起的材料收缩与应力集中[1].尽管铸钢相贯节点具有诸多优良特性,但现行规范中缺少相关承载力计算公式,工程师需要进行反复的有限元分析和方案调整,以完成节点的设计与校核.这种基于试错的设计方法极大地增加了节点设计的时间与人力成本.

目前,左文康等[2-3]和Chen等[4-5]、杜文风研究团队[6-9]、Huang等[10-11]和Seifi等[12]学者已将拓扑优化方法应用于铸钢相贯节点的设计流程中.拓扑优化虽能有效减轻节点重量并提升结构性能,但也存在明显不足.首先,拓扑优化节点通常具有不规则的形状与复杂的拓扑结构,无法通过铸造等常规工艺生产,只能通过3D打印技术进行制造[13].目前,金属3D打印的成本远高于铸造等常规工艺,并且大尺度3D打印技术尚未成熟[9].其次,拓扑优化结构往往需要经过烦琐的后处理才能成为合理、可用的设计方案[14].后处理过程虽然降低了节点的优化效果,但是增加了节点设计的时间和人力成本.最后,结构应力是工程师最为关注的力学指标,然而现有拓扑优化方法却通常将应变能取为目标函数,而面向应力的拓扑优化方法仍存在一定挑战[15-16].

形状优化是仅对结构的几何边界进行调整的结构优化技术[17].与拓扑优化相比,形状优化具有一些突出的优点.首先,形状优化仅会修改结构的表面形状,而不会更改结构的拓扑.因此,形状优化不会产生拓扑复杂、难以生产的设计方案.其次,借助恰当的几何表达方法,形状优化可直接获得表面光滑的设计方案.研究面向铸钢相贯节点的形状优化方法,将有效弥补拓扑优化方法的不足.

节点设计过程中通常需要考虑节点在多个荷载工况下的应力水平,因此,有必要研究节点的多工况优化问题.多工况优化问题的本质是多目标优化问题.目前,在结构优化领域,研究人员通常采用目标合并方法,将多个优化目标合并为一个优化目标,从而将多目标优化问题转化为单目标优化问题.然而,现有研究主要关注多工况拓扑优化问题[18-22],多工况形状优化方面的研究还很少.

本文面向铸钢相贯节点,首先提出了一种新的形状优化方法,该方法基于细分曲面技术完成节点几何模型的构造,基于Abaqus二次开发完成节点的自动化有限元分析,并基于遗传算法对节点的形状进行调整和优化.其次,分别采用线性加权法、折中规划法、ε-约束法和最大值最小化法构造了多工况形状优化问题的目标函数,并将多工况优化问题转化为单目标优化问题.最后,使用本文提出的方法对某柱面网壳中的铸钢相贯节点进行了形状优化.

1　铸钢相贯节点形状优化方法

1.1　总体介绍

本文所提出的形状优化方法的整体框架如图1所示,该框架主要由3个模块组成:几何建模、结构分析和优化算法.几何建模模块负责铸钢相贯节点的参数化几何建模,该模块可根据节点尺寸与形状控制参数生成节点几何模型;结构分析模块负责完成铸钢相贯节点的有限元分析;优化算法模块负责控制形状优化的总体流程,并基于遗传算法对铸钢相贯节点的形状进行调整.

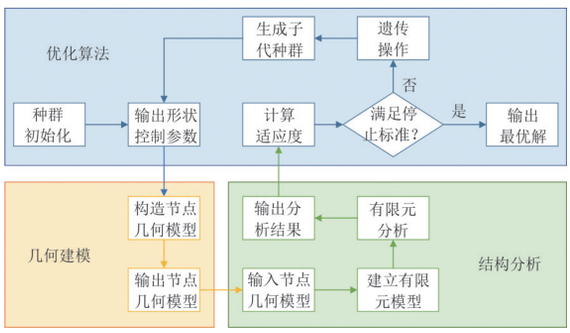


图 1 形状优化方法总体框架

Fig.1 General framework of the shape optimization method

在铸钢相贯节点的形状优化任务中,优化算法模块首先生成初始种群,并输出种群所有个体的形状控制参数.几何建模模块读入形状控制参数,并生成相应的节点几何模型.结构分析模块读入节点几何模型、进行有限元分析,并输出分析结果.优化算法模块读入分析结果、计算适应度、执行遗传操作并生成子代种群.这一过程将重复进行直至达到预定的终止条件.

1.2 几何建模

1.2.1 几何表达方式的选择

进行形状优化首先需要确定结构形状的几何表达方式.过往研究中,有限元网格和NURBS(non-uniform rational B-splines,非均匀有理B样条)曲面是两种最为主要的几何表达方法.使用有限元网格表达结构形状,并通过移动网格节点调整结构形状,虽简便易行,但会造成锯齿状的结构几何边界[23].使用NURBS曲面表达结构的几何形状,并通过移动控制点调整曲面形状,虽能获得光滑的几何形状,但NURBS曲面的张量积结构使得它难以表达铸钢相贯节点这一类拓扑结构复杂的曲面.因此,解决铸钢相贯节点的形状优化问题,仍需寻找新的几何表达方式.

细分曲面是一种基于网格的造型技术,其概念最早由Chaikin[24]提出.细分曲面是一种用网格表达曲面的方法,它的思想是从控制网格开始,按照一定细分规则,对网格进行反复细分,最终得到一个无限逼近光滑曲面的网格.细分曲面的控制网格可具有任意拓扑结构,因此细分曲面可以表达具有任意拓扑结构的几何形状.同时,细分曲面的形状完全由控制网格决定,移动控制网格顶点即可对曲面进行调整.细分曲面的这些特点充分满足了铸钢相贯节点形状优化的需要,因此,本文使用细分曲面完成铸钢相贯节点几何模型的构造.

1.2.2 几何模型构造方法与设计变量选取

图2展示了铸钢相贯节点几何模型的构造流程.首先,根据节点的轴线与管径参数,构造出节点的初始控制网格.其次,根据节点的形状控制参数,移动控制网格的顶点,使控制网格发生变形.最后,对变形后的控制网格进行细分操作,从而得到光滑的节点形状.

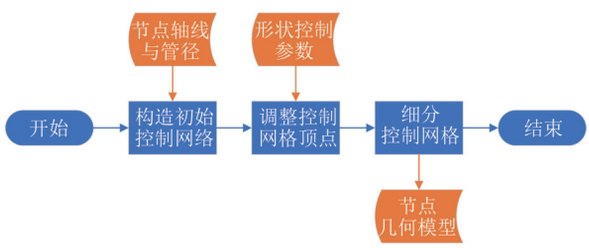


图 2 铸钢相贯节点几何模型构造流程

Fig.2 Geometric modeling process of the cast steel tubular joint

节点初始控制网格的构造是基于Rhino Grasshopper平台的MultiPipe运算器实现的,该运算器可根据用户提供的轴线与管径信息,构造出多管交汇的细分曲面控制网格(见图3).在获得初始控制网格后,移动控制网格顶点,以改变控制网格形状.为使顶点移动最大限度地改变曲面形状,限制顶点仅沿网格法线方向移动;同时,为保证节点能与相邻构件连接,使控制网格边界顶点固定不动,仅移动网格内部顶点(见图4).完成顶点移动后,即得到变形后的控制网格,对其进行细化操作,就得到了最终的节点形状(见图5).

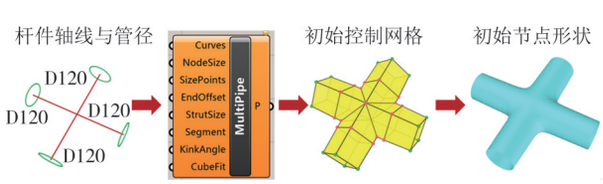


图 3 初始控制网格的构造

Fig. 3 The construction of the initial control mesh

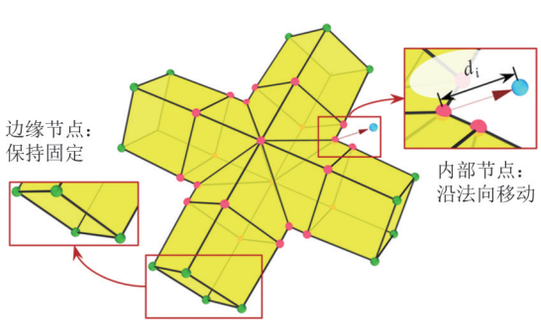
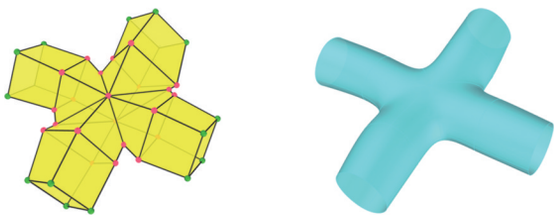


图 4 控制网格顶点的移动

Fig.4 The movement of the control mesh vertex



(a)变形后的控制网格　　(b)细分曲面

图 5　由控制网格得到的细分曲面

Fig.5　Subdivision surface obtained from the control mesh

将控制顶点 i 沿着法向移动的距离记作形状控制参数 d_i. 确定控制网格所有顶点的形状控制参数 d_i 后,节点的形状就被完全确定,因此将参数 d_i 取为优化问题的设计变量.

1.3　结构分析

结构分析模块负责完成铸钢相贯节点的有限元分析,并提取分析结果,以供优化算法模块使用. 该模块是在 ABAQUS 软件中通过二次开发实现的,其具体流程如图 6 所示. 首先,结构分析模块将节点的几何模型导入软件,并完成材料属性的设置. 在对节点进行分析时,采用线弹性模型. 铸钢材料的弹性模量与泊松比分别取 2.06×10^5 MPa 与 0.3. 随后,完成有限元模型的网格划分. 由于本研究主要关注等壁厚铸钢相贯节点的形状优化问题,因此可使用壳单元进行建模分析. 在这之后,根据节点的实际情况,完成荷载与边界条件的施加. 最后,进行有限元分析、提取并输出分析结果.

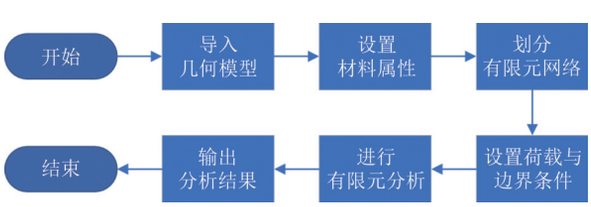


图 6　结构分析模块流程图

Fig.6　The flow chart of the structural analysis module

1.4　优化算法

优化算法模块负责根据节点有限元分析的结果对节点的形状控制参数进行调整. 在本研究中,形状优化问题的设计变量为节点的形状控制参数 d_i,目标函数为节点的力学指标. 由于二者之间的数学关系难以确定、目标函数的梯度信息不便计算,依赖梯度的数学规划方法难以应用,因此,本文采用无需计算梯度的遗传算法求解优化问题. 遗传算法已被广泛应用于各类结构优化问题的研究中. Kociecki 等[25]采用遗传算法对自由曲面钢网架屋盖的形状进行了优化,以减小结构自重;Gentils 等[26]采用遗传算法对海上风机的基础机构进行了优化;Zhu 等[27]以非线性屈曲荷载为目标函数,采用遗传算法对铝合金单层网壳的形状进行了优化;Wang 等[28]采用多目标混合遗传算法对自由曲面铝合金网壳的形状进行了优化;Li 等[29]采用遗传算法对铸钢相贯节点的单工况形状优化问题进行了求解.

本文的遗传算法流程图如图 7 所示. 首先,优化算法模块随机生成初始种群,确定种群所有个体的形状控制参数 d_i 并将其输出. 随后,几何建模模块和结构分析模块分别完成节点几何模型构建和有限元分析. 在获得所有个体的有限元分析结果后,计算所有个体的适应度,执行遗传操作并生成子代种群. 对子代种群重复上述过程,直至达到终止条件.

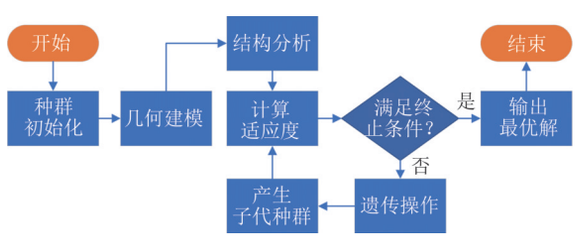


图 7　遗传算法流程图

Fig.7　The flow chart of the genetic algorithm

2　多工况形状优化目标函数

多工况优化问题的本质是一个多目标优化问题,多目标优化问题的求解方法可分为 Pareto 排序方法与目标合并方法. Pareto 排序方法根据 Pareto 支配关系对可行解进行排序,并将可行解中的非支配解作为最优解. 由于非支配解通常并不唯一,因此 Pareto 排序方法得到的最优解一般是多个可行解的集合. 然而,工程设计中的设计方案必须是唯一的,因此在使用 Pareto 排序方法时,工程师需要从多个非支配解中选出最终的设计方案. 非支配解之间通常不存在明显的优劣关系,故这种选择往往存在较大困难.

目标合并方法是按照一定方式将多个目标合并为单一的目标,并将多目标优化问题转化为单目标优化问题. 目标合并方法得到的最优解是唯一的,无需工程师进行选择,符合工程设计的实际需要. 因此本文采用目标合并方法建立多工况形状优化问题的目标函数. 常用的目标合并方法有线性加权法(lin-

ear weighted method)、折中规划法(compromise programming method)、ε-约束法(ε-constraint method)与最大值最小化法(minimax method)等.

线性加权法根据各目标函数的重要程度,确定其权重,并对所有目标函数加权求和,从而获得单一的目标函数.设多目标优化问题中有n个目标,则由线性加权法得到的目标函数为:

$$\min \sum_{k=1}^{n} \omega_k f_k(x) \tag{1}$$

式中:ω_k为目标k对应的权重.

折中规划法又叫作理想点法,核心思想是构造一个理想点,该点代表了所有目标函数的最优值.理想点法试图找到最接近这个理想点的可行解,从而在多个冲突目标之间达到最佳平衡.假设某问题存在2个优化目标f_1和f_2,其下限值分别为f_{1*}和f_{2*},则该问题的理想点即为(f_{1*},f_{2*})(图8中的红色点).设可行解$\boldsymbol{x}$的目标函数值为$f_1(\boldsymbol{x})$和$f_2(\boldsymbol{x})$,则折中规划法就是要寻找可行解$\boldsymbol{x}^*$,使点$(f_1(\boldsymbol{x}^*),f_2(\boldsymbol{x}^*))$到理想点的距离$L$最小.由此可得到折中规划法的目标函数为:

$$\min L = \sqrt{\left(f_1(\boldsymbol{x}) - f_{1*}\right)^2 + \left(f_2(\boldsymbol{x}) - f_{2*}\right)^2} \tag{2}$$

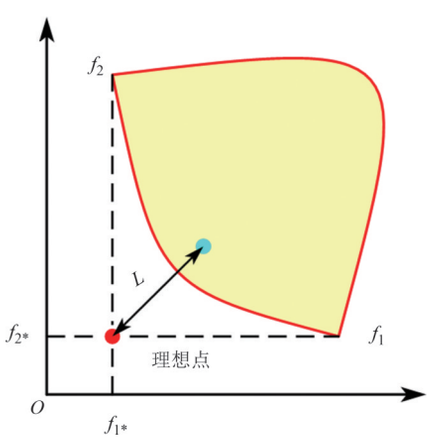


图8 折中规划法示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the compromising programming method

若目标函数的个数为n,同时考虑各目标函数的权重,则此时的目标函数为:

$$\min \sum_{k=1}^{n} \sqrt{\omega_k^2\left(f_k(\boldsymbol{x}) - f_{k*}\right)^2} \tag{3}$$

ε-约束法的思路是将某一个目标确定为主目标,同时为其他目标设定一个限值ε,从而将其他目标转化为约束条件.若设主目标为f_m,非主目标f_k的限值为ε_k,则由ε-约束法得到的优化格式为:

$$\begin{aligned} &\min f_m \\ &\text{s.t} f_k \leqslant \varepsilon_k (k \neq m) \end{aligned} \tag{4}$$

最大值最小化法的思路是使所有目标中的最大值最小的方法,相应的目标函数如式(5)所示.

$$\min \max_{1 \leqslant k \leqslant n} f_k \tag{5}$$

将上述目标合并方法应用于多工况形状优化问题中,就可以把多工况形状优化问题转化为单目标优化问题,继而可运用上文介绍的方法完成铸钢相贯节点的多工况形状优化.

3 优化算例

3.1 节点概况

本文以一柱面网壳为背景,对网壳中的一个典型铸钢相贯节点进行了多工况形状优化.柱面网壳如图9所示,其几何参数如表1所示.考虑6种荷载工况(见表2)和41种荷载组合(篇幅所限,此处不列举),对柱面网壳进行结构分析.提取图9所示节点的最不利内力,发现轴力F与绕水平轴的弯矩M的值较大,而其他内力项的值很小,因此在对节点进行分析和优化时,仅施加以上两项内力(如图10所示).最终,得到5组最不利工况如表3所示.

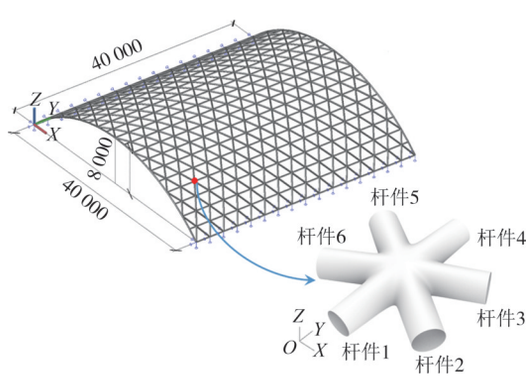


图9 柱面网壳与网壳中的铸钢相贯节点(单位:mm)

Fig.9 The cylinder shell and the cast steel tubular joint (unit:mm)

表1 柱面网壳几何参数

Tab.1 The geometric parameters of the cylinder grid shell

参数	取值
跨度	40 m
长度	40 m
矢高	8 m
杆件1/4截面	D219×12 mm
杆件2/3/5/6截面	D245×12 mm

表 2　柱面网壳荷载工况

Tab. 2　The load cases of the cylinder grid shell

荷载工况	荷载标准值/(kN·m^{-2})
恒荷载	1.00
活荷载	0.50
横向风荷载(+X)	0.55
横向风荷载(−X)	0.55
均匀雪荷载	0.65
不均匀雪荷载	0.65

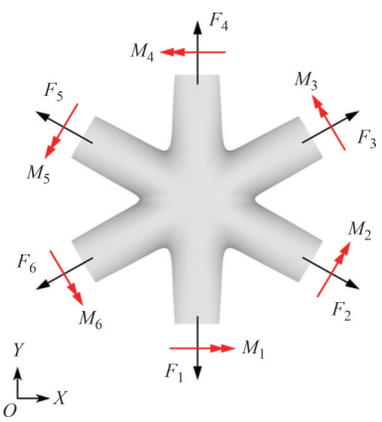


图 10　节点内力示意图

Fig.10　The internal forces of the joint

根据 1.2 节所述的几何建模方法,将形状控制参数 d_i 全部取为 0,得到节点的初始形状,如图 11 所示. 为确定初始节点的应力状态,建立了节点的有限元模型. 首先,采用壳单元进行建模,并通过敏感性分析将网格尺寸确定为 12 mm,节点的有限元网格如图 12 所示. 其次,在各杆端建立局部坐标系,局部坐标系 1 轴为杆轴方向,由杆端指向节点中心;2 轴位于竖直平面内,指向 Z 轴正方向;3 轴方向按照左手坐标系确定. 之后,对节点施加边界条件,约束 1 杆端部的 U1、U2、U3 和 UR1 自由度,约束了 4 杆的 U2 和 U3 自由度,节点的局部坐标系与边界条件如图 13 所示. 最后,按照表 3 对节点施加荷载,完成有限元模型的建立.

对初始节点进行有限元分析,得到了该节点在

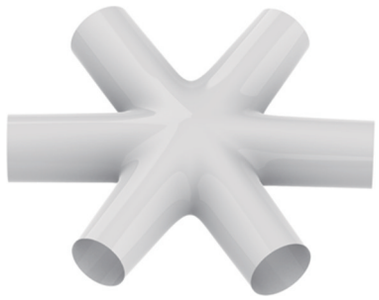


图 11　节点初始形状

Fig.11　Joint's initial shape

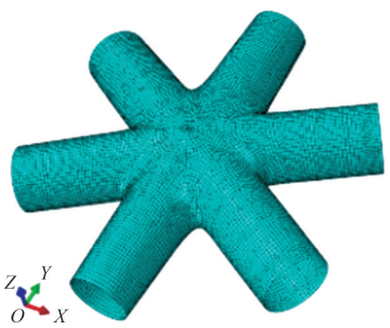


图 12　有限元网格

Fig.12　FE mesh

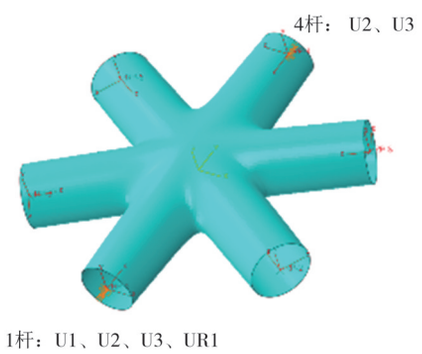


图 13　边界条件

Fig.13　Boundary condition

各荷载工况下的应力分布状况如图 14 所示. 各工况下节点的峰值 Mises 应力如表 4 所示. 由图 14 可以看出,节点在各工况下的应力分布状况存在显著差异.

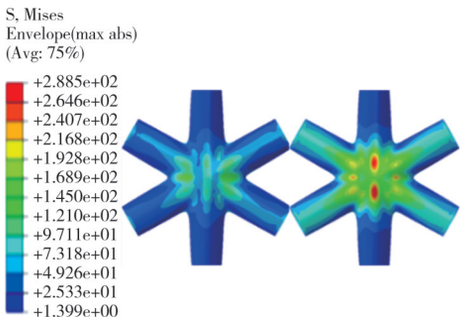
3.2　单工况优化

在对节点进行多工况优化前,首先对其进行单工况优化. 将节点的形状控制参数 d_i 取作优化问题

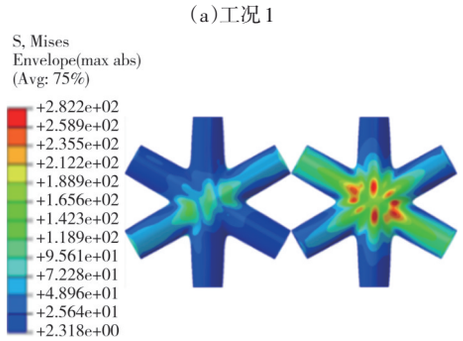
表 3　节点最不利工况

Tab.3　The most unfavorable load cases of the joint

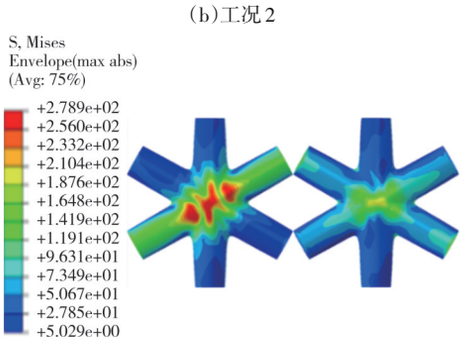
工况	F_1/kN	M_1/(kN·m)	F_2/kN	M_2/(kN·m)	F_3/kN	M_3/(kN·m)	F_4/kN	M_4/(kN·m)	F_5/kN	M_5/(kN·m)	F_6/kN	M_6/(kN·m)
工况 1	60.38	1.23	−132.47	34.63	−135.00	33.92	49.64	1.09	−123.78	33.09	−148.00	32.63
工况 2	47.89	0.48	97.48	−17.07	180.10	−45.27	44.14	0.50	104.70	−19.05	176.50	−46.96
工况 3	87.59	1.22	−147.92	20.69	−209.54	−53.71	90.78	1.17	−144.21	23.94	−213.26	−56.50
工况 4	35.74	0.36	−85.35	−54.74	−64.40	−20.48	34.34	0.37	−83.57	−56.22	−63.22	−21.05
工况 5	69.50	1.47	96.64	32.48	98.45	31.66	56.82	1.28	93.21	30.86	99.69	30.30



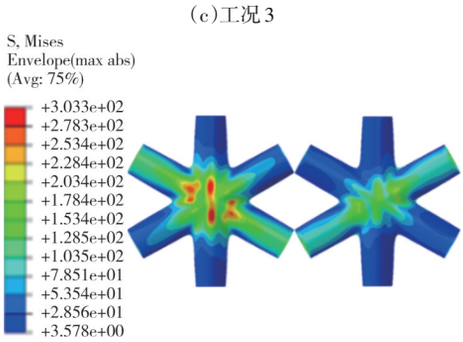
(a)工况 1



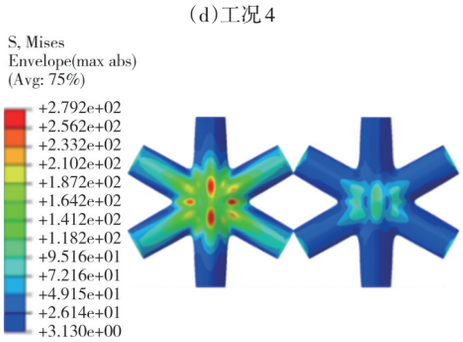
(b)工况 2



(c)工况 3



(d)工况 4



(e)工况 5

图 14 各工况下节点的应力云图(俯视图和仰视图)

Fig.14 The stress contour of the joint under each load case (top view and bottom view)

表 4 节点在各工况下的峰值 Mises 应力

Tab. 4 The peak Mises stress of the joint under each load case

工况	峰值 Mises 应力/MPa
1	290.7
2	285.3
3	280.0
4	307.5
5	281.3

的设计变量. 节点的峰值 Mises 应力是节点安全校核的关键指标,为了有效降低节点的应力水平,将节点的峰值 Mises 应力取为优化问题的目标函数. 同时,为了避免节点体积过度增大引起的造价提高,在优化问题的目标函数中添加节点体积的惩罚项,由此得到单工况形状优化问题的目标函数:

$$f(d_i)=\frac{\sigma}{\sigma_{\mathrm{ref}}}+\lambda\cdot\max\left(0,\frac{V}{V_0}\right) \tag{6}$$

式中:d_i为控制网格顶点 i 的形状控制参数;σ 为当前节点峰值 Mises 应力;σ_{ref}为应力参考值,此处取作铸钢材料的屈服应力,即 $\sigma_{\mathrm{ref}}=235$ MPa;λ 为惩罚系数,在本算例中取为 5;V 与 V_0分别为当前节点与初始节点的体积.

采用遗传算法对该优化问题进行求解. 遗传算法的种群规模为 100,遗传代数为 50 代;选择算子为锦标赛选择算子,锦标赛规模为 3;交叉算子为均匀交叉算子,交叉率为 0.5;变异算子为均匀变异算子,变异率为 0.3. 采用上述参数对节点在 5 组工况下的形状进行优化,每组工况分别进行 5 次尝试,并选取 5 次尝试中的最优个体作为该工况的优化结果.

节点在各工况下的优化形状与轮廓线分别如图 15 和图 16 所示. 由图 15 与图 16 可以看出,优化后的节点形状较初始形状有显著改变,这表明本文的几何模型构造方法能够灵活地调整节点形状. 同时,各工况下的优化形状存在较为明显的不同,说明不同工况下的优化方向存在差异,有必要综合考虑多个工况,进行多工况的形状优化.

统计单工况优化节点的峰值 Mises 应力水平,结果如表 5 所示. 为便于对比,绘制了如图 17 所示的峰值 Mises 应力柱状图. 由表 5 及图 17 可以看出,单工况优化节点在优化工况下的峰值 Mises 应力出现了显著降低,降幅在 44%~60% 不等. 然而,单工况优化

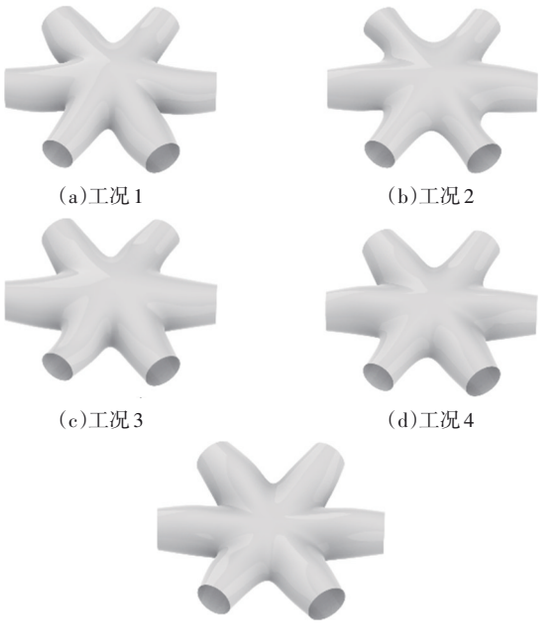


图 15　节点的优化形状

Fig.15　The optimized joint shape

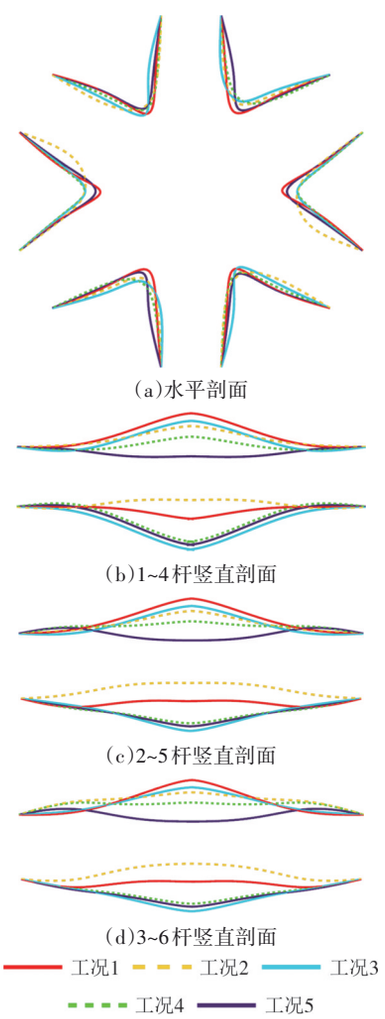


图 16　节点优化形状的轮廓线

Fig.16　The sectional profiles of the joint

节点在非优化工况下仍具有较高的应力水平.这表明,有必要对节点进行多工况优化,寻找在所有工况下都具有较低应力水平的节点形状.

表 5　单工况优化节点峰值 Mises 应力统计

Tab.5　The statistics of the peak Mises stress of the optimized joint under single load case

节点	峰值 Mises 应力/MPa				
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
初始节点	290.66	285.25	279.97	307.55	281.32
工况 1 最优	130.93	204.85	213.90	248.26	266.09
工况 2 最优	177.06	148.31	219.09	276.50	219.99
工况 3 最优	213.48	222.21	156.37	215.40	226.70
工况 4 最优	175.15	228.88	236.82	157.88	162.36
工况 5 最优	217.23	236.97	211.23	173.08	112.40

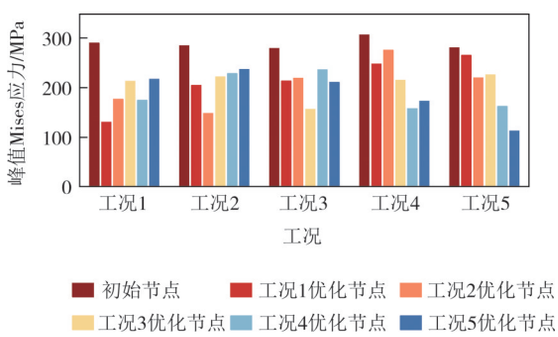


图 17　峰值 Mises 应力柱状图

Fig.17　Peak Mises stress column chart

3.3　多工况优化

3.3.1　优化目标函数

在单工况优化中,节点在工况 k 下的优化格式为:

$$\min f_k(d_i)=\frac{\sigma_k}{\sigma_{\text{ref}}}+\lambda\cdot\max\left(0,\frac{V}{V_0}\right) \tag{7}$$

在对节点进行多工况形状优化时,分别采用第 2 章所述的 4 种目标合并方法对 5 组荷载工况的优化目标进行合并,由此得到 4 种不同的目标函数.

使用线性加权法对目标进行合并时,需要确定各个目标的权重,本文对各工况取相等的权重,则有

$$\min f_{\text{ws}}=\sum_{k=1}^{n}\omega_k f_k=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}f_k \tag{8}$$

式中:n 为工况总数,此处 n=5.

在使用折中规划法时,首先需要确定各个目标的下限值 f_{k^*}. 本文将单工况优化得到的最小适应度作为各目标的下限值,并由此得到折中规划法的优目标函数.

$$\min f_{\mathrm{cp}}=\sqrt{\sum_{k=1}^{n}\omega_k^2\left(f_k-f_{k*}\right)^2}=\frac{1}{n}\sqrt{\sum_{k=1}^{n}\left(f_k-f_{k*}\right)^2} \tag{9}$$

ε-约束法将多个目标中的一个作为目标函数,将其他目标转化为约束条件.考虑到节点在工况4下的峰值Mises应力最高,因此将工况4的优化目标选作ε-约束法的目标函数.同时,经试算,将其他工况最优值的1.3倍作为约束值时,具有较为稳定的优化效果,故取其他工况最优值的1.3倍作为约束值.由此得到ε-约束法的优化格式.

$$\begin{aligned}&\min f_{\mathrm{ec}}=f_4\\&\text{s.t.}\,f_k<1.3f_{k*}\left(k=1,2,3,5\right)\end{aligned} \tag{10}$$

进一步地,将约束条件转化为惩罚项加入目标函数中,从而有:

$$\begin{aligned}&\min f_{\mathrm{ec}}=f_4+\lambda\sum_k\max\left(f_k-1.3f_{k*},0\right)\\&\left(k=1,2,3,5\right)\end{aligned} \tag{11}$$

式中:λ为惩罚系数,本算例中取λ=5.

最大值最小化法取各目标的最大值作为优化目标,即:

$$\min f_{\mathrm{mm}}=\max_{1\leqslant k\leqslant n}\left(f_k\right) \tag{12}$$

3.3.2 优化结果

在确定多工况形状优化问题的优化格式后,采用遗传算法对优化问题进行求解.为了消除随机性对优化结果的影响,4种方法分别进行10次优化尝试,并取10次尝试中的最优结果作为最终的优化结果.4种方法得到的优化节点的整体形状与剖面图分别如图18和图19所示.4种节点的整体形状与水平剖面各不相同.线性加权法节点、折中规划法节点、ε-约束法节点的竖直剖面较为相似,节点中部相对扁平;而最大值最小化法节点在中部则有较为明显的凸起.

统计4种优化节点在5组荷载工况下的峰值Mises应力,结果如表6所示.由表6可以看出,优化节点在各工况下的峰值Mises应力相较于初始节点均有显著降低,下降幅度为25%~55%.考察优化节点峰值Mises应力的平均值与最大值可以发现,ε-约束法节点具有最小平均值,而最大值最小化法节点则具有最小的最大值.图20为各优化节点峰值Mises应力柱状图,可以看出,线性加权法、折中规划法和ε-约束法在不同工况下的峰值应力存在较为显著的差距,相比之下,最大值最小化法的峰值应力则较为接近.这说明该方法能够较好地兼顾各工况的受力需求,并对各工况峰值Mises应力的最大值进行有效控制.由于在实际的工程设计中应当保证节点在最不利工况下仍具有安全的应力水平,换言之,需

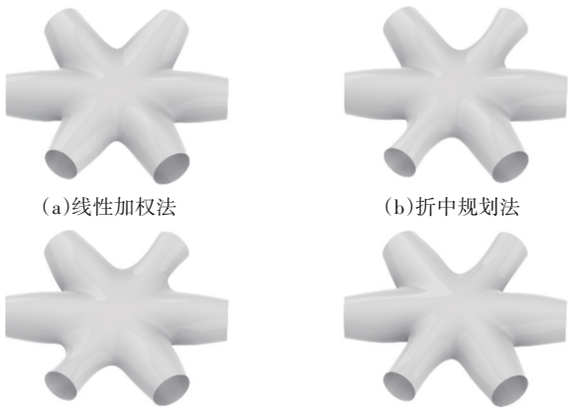


图18 优化节点的整体形状

Fig.18 The shapes of the optimized joints

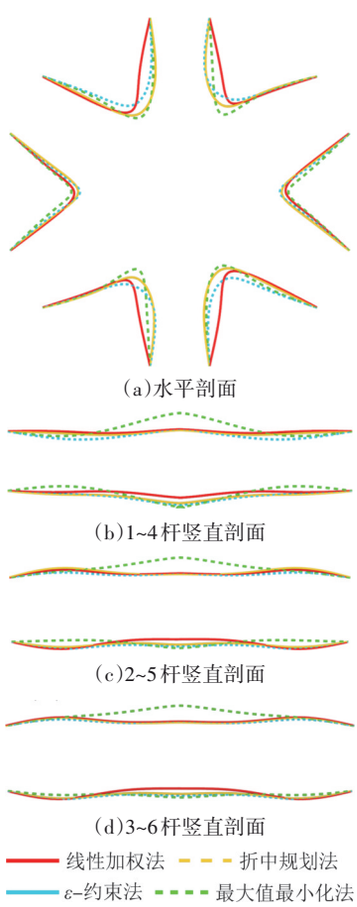


图19 优化节点剖面图

Fig. 19 Sectional profiles of the optimized joints

要将节点在各工况中峰值应力的最大值控制在安全范围内,因此,在对铸钢相贯节点进行形状优化时,应当优先考虑将最大值最小化法作为目标函数的构造方法.

表 6　优化节点峰值 Mises 应力

Tab. 6　The peak Mises stress of the optimized joints

优化方法	峰值 Mises 应力/MPa						
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	平均值	最大值
初始节点	290.66	285.25	279.97	307.55	281.32	288.95	307.55
线性加权法	131.61	185.72	207.75	185.13	147.26	171.49	207.75
折中规划法	160.91	186.21	208.18	191.57	132.75	175.92	208.18
ε-约束法	143.11	191.12	208.51	169.86	133.81	169.28	208.51
最大值最小化法	162.15	184.55	192.03	190.15	184.37	182.65	192.03

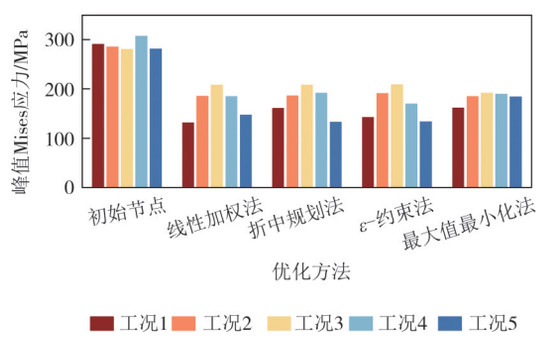


图 20　优化节点峰值 Mises 应力柱状图

Fig.20　Optimized joints' peak Mises stress column chart

4　结 论

本文面向铸钢相贯节点,提出了一种新的形状优化方法,并将该方法与 4 种目标函数构造方法相结合,实现了铸钢相贯节点的多工况形状优化.主要结论如下:

1) 所提出的形状优化方法由几何建模、结构分析和优化算法三个模块构成.几何建模模块基于细分曲面技术,实现了铸钢相贯节点的参数化建模.相结构分析模块基于 ABAQUS 二次开发,实现了节点的自动化有限元分析.优化算法模块基于遗传算法对节点形状进行调整.

2) 使用线性加权法、折中规划法、ε-约束法和最大值最小化法构造了多目标形状优化问题的 4 种目标函数,并将其与所提出的形状优化方法相结合,得到了铸钢相贯节点的多工况形状优化方法.

3) 以节点峰值 Mises 应力为目标函数,对某柱面网壳中的铸钢相贯节点进行了多工况形状优化.结果表明 4 种目标函数构造方法均可使铸钢相贯节点在各工况下的应力水平显著降低,但最大值最小化法可对节点在各工况下峰值应力的最大值进行最有效的控制.因此,在对铸钢相贯节点进行多工况形状优化时,应优先考虑将最大值最小化法作为目标函数的构造方法.

本文主要研究了等壁厚铸钢相贯节点的形状优化,未来的研究可以关注变壁厚铸钢相贯节点的形状优化问题,以拓宽本文形状优化方法的适用范围.

参考文献

[1] WEI Z Z, PEI X J, JIN H. Evaluation of welded cast steel joint fatigue data using structural stress methods [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 186: 106895.

[2] 左文康,陈满泰,程斌,等. 计算机辅助空间结构节点智能优化设计与3D打印[J]. 建筑结构学报,2024,45(4):131-141.
ZUO W K, CHEN M T, CHENG B, et al. Intelligent optimization and 3D printing of joints in spatial structures based on computer-aided technologies [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(4): 131-141. (in Chinese)

[3] ZUO W K, CHEN M T, CHEN Y Y, et al. Additive manufacturing oriented parametric topology optimization design and numerical analysis of steel joints in gridshell structures [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 188: 110817.

[4] CHEN M T, ZUO W K, CHEN Y Y, et al. Parametric topology optimization design and analysis of additively manufactured joints in spatial grid structures [J]. Engineering Structures, 2024, 300: 117123.

[5] CHEN M T, ZUO W K, HUANG Y E, et al. Novel paradigm for steel joints in gridshell structures: from structural optimization to advanced construction [J]. CE/Papers, 2023, 6(3/4): 781-787.

[6] 韩乐雨,杜文风,夏壮,等. 四分叉铸钢节点的衍生式智能设计研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(5): 325-334.
HAN L Y, DU W F, XIA Z, et al. Research on generative intelligent design of four-branch cast-steel joint [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(5): 325-334. (in Chinese)

[7] 王英奇,杜文风,王辉,等. 基于深度学习的两分叉铸钢节点智能生成方法[J]. 河南大学学报(自然科学版),2021,51(6):685-692.

WANG Y Q, DU W F, WANG H, et al. Intelligent generation method of two-branches cast-steel joint based on deep learning [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2021, 51 (6):685-692.(in Chinese)

[8] WANG H, DU W F, ZHAO Y N, et al. Optimization and experimental research on treelike joints based on generative design and powder bed fusion[J]. Engineering Structures, 2023, 278:115564.

[9] WANG L X, DU W F, HE P F, et al. Topology optimization and 3D printing of three-branch joints in treelike structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(1):04019167.

[10] HUANG S B, DENG X W, LAM L K. Integrated design framework of 3D printed planar stainless tubular joint: Modelling, optimization, manufacturing, and experiment [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 169:108463.

[11] HUANG S B, DENG X W, WANG Y H. Experimental investigations of optimized 3D printing planar X-joints manufactured by stainless steel and high-strength steel [J]. Engineering Structures, 2023, 285:116054.

[12] SEIFI H, REZAEE JAVAN A, XU S Q, et al. Design optimization and additive manufacturing of nodes in gridshell structures [J]. Engineering Structures, 2018, 160:161-170.

[13] LIU J K, MA Y S. A survey of manufacturing oriented topology optimization methods [J]. Advances in Engineering Software, 2016, 100:161-175.

[14] SUBEDI S C, VERMA C S, SURESH K. A review of methods for the geometric post-processing of topology optimized models [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2020, 20(6): 060801.

[15] XIA L, ZHANG L, XIA Q, et al. Stress-based topology optimization using bi-directional evolutionary structural optimization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 333:356-370.

[16] FAN Z, XIA L, LAI W X, et al. Evolutionary topology optimization of continuum structures with stress constraints [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 59 (2): 647-658.

[17] DING Y L. Shape optimization of structures: a literature survey [J]. Computers & Structures, 1986, 24(6):985-1004.

[18] 范文杰, 范子杰, 苏瑞意. 汽车车架结构多目标拓扑优化方法研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(12):1505-1508.
FAN W J, FAN Z J, SU R Y. Research on multi-objective topology optimization on bus chassis frame[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(12):1505-1508.(in Chinese)

[19] 张璟鑫, 梁伟, 夏阳. 结构多目标拓扑优化目标函数构建方法的研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(7):899-903.
ZHANG J X, LIANG W, XIA Y. Research on construction method of objective function for multi-objective topology optimization in structures [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(7):899-903.(in Chinese)

[20] 罗震, 陈立平, 张云清, 等. 多工况下连续体结构的多刚度拓扑优化设计和二重敏度过滤技术[J]. 固体力学学报, 2005, 26(1):29-36.
LUO Z, CHEN L P, ZHANG Y Q, et al. Multi-stiffness topological optimization for continuum structures with multiple loading cases and a duplicate sensitivity filtering method[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2005, 26(1): 29-36.(in Chinese)

[21] 兰凤崇, 赖番结, 陈吉清, 等. 考虑动态特性的多工况车身结构拓扑优化研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(20): 122-128.
LAN F C, LAI F J, CHEN J Q, et al. Multi-case topology optimization of body structure considering dynamic characteristic [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(20): 122-128.(in Chinese)

[22] 邢广鹏,孙志刚,崔向敏,等. 多工况载荷下航空发动机支架拓扑优化设计[J]. 航空动力学报, 2020, 35(11): 2248-2262.
XING G P, SUN Z G, CUI X M, et al. Topological optimization design of aero-engine support structure under multiple loading conditions[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(11):2248-2262.(in Chinese)

[23] HAFTKA R T, GRANDHI R V. Structural shape optimization: a survey [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1986, 57(1):91-106.

[24] CHAIKIN G M. An algorithm for high-speed curve generation[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1974, 3(4):346-349.

[25] KOCIECKI M, ADELI H. Two-phase genetic algorithm for topology optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex curvatures [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014, 32:218-227.

[26] GENTILS T, WANG L, KOLIOS A. Integrated structural optimisation of offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm[J]. Applied Energy, 2017, 199:187-204.

[27] ZHU S J, OHSAKI M, GUO X N, et al. Shape optimization for non-linear buckling load of aluminum alloy reticulated shells with gusset joints[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 154:106830.

[28] WANG X Y, ZHU S J, ZENG Q, et al. Improved multi-objective hybrid genetic algorithm for shape and size optimization of free-form latticed structures[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43:102902.

[29] LI G, LI Z N, ZENG Q, et al. Shape optimization of cast steel tubular joints based on subdivision surface and genetic algorithm [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 204: 112258.