

DOI: 10.7511/jslx20220824003

基于节点构形度的自由曲面网壳结构 形态优化研究

朱南海^{*1,2}, 张文强^{1,2}

(1. 江西理工大学 土木与测绘工程学院, 赣州 341000;

2. 江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室, 赣州 341000)

摘要:为获得形式自由且受力性能合理的自由曲面单层网壳结构形态,以单位力作用下的位移响应作为结构连接性能的衡量参数,同时为保证结构曲面的光顺性引入 NURBS 技术,基于考虑荷载作用的结构节点构形度评价指标,提出了相应的自由曲面结构形态优化方法。将结构控制点的坐标作为优化变量,节点构形度最小值的最大化作为优化目标,综合结构总用钢量、最大节点位移和构件长细比等约束条件,采用遗传算法对结构的曲面形态进行优化。结果表明,节点构形度可以准确反映节点的连接性能,采用遗传优化算法优化结构的曲面形态,可获得杆件以受轴压为主的结构形态,受力模式得到有效改善,受力合理,保证了结构极限承载力及其安全性。

关键词:自由曲面;形态优化;NURBS 曲面;节点构形度;遗传算法

中图分类号:TU311;O224

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2024)02-0233-08

1 引言

自由曲面单层网壳结构作为一种新颖的结构形式,以其灵活、自由、多样的建筑造型成为空间结构的一个发展方向。传统的自由曲面主要是从图形学角度创建结构的自由曲面形状,忽略了结构形态对受力性能的影响。合理的自由曲面结构应同时兼顾其具有良好的视觉效果和受力性能上的合理性。因此,如何生成形态优美和受力性能优越的自由曲面网壳结构形态是该类结构设计的关键。

结构形态创建方法主要有物理模型实验法和数值计算方法。逆吊试验^[1]是早期最为常用的物理找形方法,该方法利用柔性结构在自重荷载作用下只受拉的特点,将结构固化翻转获得重力荷载下的纯压结构,其本质是实现结构的零弯矩。近年来随着计算机技术的高速发展,通过数值分析探索合理结构形态成为研究的热点,与传统的物理试验相比,数值找形法不仅经济,且不受试验环境等条件限制。崔昌禹等^[2]针对自由曲面创建问题提出了高度调整法,具有较强的工程实用价值。Ding 等^[3]以节点坐标作为优化变量,结构总应变能最小化为优化目标,梯度法为优化算法提出了一种增强结构

刚度的广义形状优化方法,较好地解决了传统逆吊试验法无法解决的悬臂结构找形问题。刘峰成等^[4]提出了一种以结构弯曲应变能比例作为约束条件的单层网格结构形态优化方法,该方法通过调整结构弯曲应变能和总应变能的比值,降低优化后结构对初始几何缺陷的敏感性。文献^[5,6]研究了自由曲面结构的多目标形态优化,优化中为保证优化后曲面光顺引入了 B 样条技术,并以 B 样条控制点作为优化变量,极大地提高了优化效率。

对于自由曲面结构的形态优化,通常以结构的某些力学指标为目标,通过优化算法获得使结构整体受力性能得到提升的优化参数值,因此选择合理有效的评价指标是结构形态优化的关键。结构总应变能作为结构常用的结构性能评价指标,通过最小化结构总应变能达到提升结构整体刚度的目的,该方法在多个实际工程得到应用。但对于空间网壳结构来说应变能最小化并不能保证结构的极限承载力和稳定性的最大化。

节点构形度是构形易损性分析理论中的一个重要指标参数,反映了节点的连接性能,节点构形度值越高表示节点间的连接越牢固,结构抵抗荷载的能力越强^[7-9],但节点构形度的计算只考虑了节点自身的刚度,而未考虑外部荷载的作用,此外单层网壳结构的静力稳定性及其力学性能等与荷载作用紧密相关,因此需建立考虑荷载作用的节点构形度指标,以更准确地反映结构节点的连接性能。

收稿日期:2022-08-24;修改稿收到日期:2022-09-27.

基金项目:国家自然科学基金(51768024;52368018)资助项目.

作者简介:朱南海^{*}(1981-),男,博士,副教授

(E-mail:zhunanhai@jxust.edu.cn).

本文以单位力作用下的位移响应作为结构连接性能的评价指标,与荷载作用相结合,建立荷载作用下的节点构形度衡量指标,并以此为基础,引入非均匀有理 B 样条曲面技术,提出以节点构形度最大化为目标的自由曲面结构形态优化方法,提高结构的整体刚度和力学性能。

2 NURBS 建模技术

NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 曲面即非均匀有理 B 样条曲面,是一种由双参数控制的曲面,是 B 样条、有理以及非有理 Bézier 曲线曲面的推广^[10]。一张在 u 方向 p 次, v 方向 q 次非均匀有理 B 样条曲面数学表达式可以定义为

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^e \sum_{j=0}^f N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^e \sum_{j=0}^f N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j}} \quad (0 \leq u, v \leq 1) \quad (1)$$

式中 u 和 v 为曲面两个方向的参数, $S(u, v)$ 为参数 u, v 对应的三维点阵, $P_{i,j}$ ($i = 0, 1, \dots, e; j = 0, 1, \dots, f$) 为控制点矩阵形成的两个方向的控制网格, $\omega_{i,j}$ 为权因子,通常权因子越大曲面越接近控制点, $N_{i,p}(u)$ 和 $N_{j,q}(v)$ 分别为定义在节点矢量 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 上的 p 和 q 次 B 样条基函数,其可以定义为

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & (u_i \leq u < u_{i+1}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (2)$$

节点矢量表达式为

$$\mathbf{U} = \{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \}$$

$$\mathbf{V} = \{ \underbrace{0, \dots, 0}_{q+1}, u_{q+1}, \dots, u_{s-q-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{q+1} \} \quad (3)$$

式中 $r = e + p + 1, s = f + q + 1$ 。

非均匀有理 B 样条技术不仅易于编程且优化后的结构光滑连续,是形成结构光滑曲面常采用的方法,图 1 为结构形态控制点的空间分布,采用 NURBS 技术处理后得到如图 2 所示 x 方向和 y 方向皆为 5 次的 NURBS 曲面。

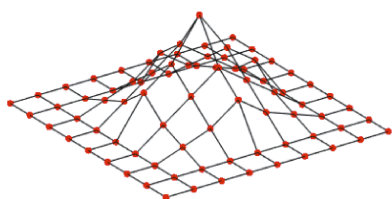


图 1 控制点网格
Fig. 1 Control point grid

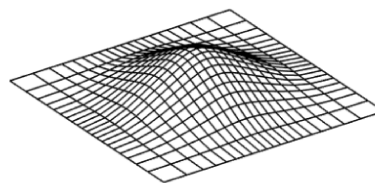


图 2 NURBS 曲面
Fig. 2 NURBS surface

3 节点构形度的计算

3.1 基于刚度的节点构形度计算

节点构形度是结构构形易损性分析理论中的一个重要概念,是一个表示节点连接性能的参数,反映的是该节点抵抗任意方向荷载的能力^[9],节点 i 的构形度可表示为

$$q_i = \det(\mathbf{K}_{ii}) = \lambda_1 \times \dots \times \lambda_m \quad (4)$$

式中 矩阵 \mathbf{K}_{ii} 为结构总体刚度矩阵中与节点 i 对应的刚度子矩阵, $\det(\mathbf{K}_{ii})$ 和 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 为矩阵 \mathbf{K}_{ii} 的行列式和其特征值。

由于非线性的影响,荷载作用下结构的刚度与变形有关,基于刚度子矩阵计算的节点构形度不再是一个恒定的常数,而是一个与结构变形相关的量,其大小随刚度矩阵的变化而变化。此外在结构产生变形的情况下,结构原有的拓扑构形发生改变,节点位移的大小使节点之间的连接性能差异体现得更加明显,所以应考虑荷载效应的影响,并采用合理的指标衡量节点的连接能力,以能够真实地反映结构内部的连接性能。构形易损性理论^[7,8]只针对结构本身拓扑构形,未考虑荷载等外部作用。为考虑荷载作用的影响,应采用合理的指标来衡量节点刚度的大小,正确反映节点的连接性能。

3.2 考虑荷载作用的节点构形度计算

一个由 m 个构件单元和 n 个节点组成的结构系统,若其空间布局及单元几何布置方式不受限制,对于节点在荷载作用下的刚度,文献[11]将其定义为在节点上施加单位力时产生位移的倒数,即节点 i 的刚度 k_i 为

$$k_i = \frac{1}{u_i} \quad (5)$$

式中 u_i 为在节点 i 上作用的单位力沿荷载方向产生的位移。

结构刚度是结构抵抗外部作用下产生变形的能力,所以以位移变形来衡量荷载作用下的节点连接性能是合理的。文献[12]将节点 i 的构形度 q_i^F 定义为

$$q_i^F = k_i = \frac{1}{u_i} \quad (6)$$

4 基于节点构形度的结构形态优化及算法实现

4.1 优化目标

荷载作用下,节点构形度最小的节点其连接性能差,随作用荷载的增大此类节点将率先失效,属于结构的薄弱部位。提高节点的构形度,有利于提高结构的整体性能,以节点的构形度作为控制参数,可以实现结构刚度及其承载能力的提升。结构各节点中其节点构形度的最小值 q_{\min}^F 越大,结构极限承载力越高。因此,本文以结构各节点构形度的最小值 q_{\min}^F 的最大化为优化目标,建立基于节点构形优化的结构形态控制方法,即优化目标为

$$\text{obj} = \max\{q_{\min}^F\} \quad (7)$$

式中 $q_{\min}^F = \min(q_1^F, q_2^F, \dots, q_k^F, \dots, q_n^F)$, n 为结构非约束节点的个数。

4.2 优化变量

本文通过引入 NURBS 技术,在其权因子 $\omega_{i,j}$ 、节点矢量 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 不变的条件下,以 NURBS 曲面控制点的纵坐标值 h_i 为优化变量,通过不断改变控制点位置达到调整曲面形态的目的。

4.3 约束条件

4.3.1 结构总用钢量

为保证经济效益,需要控制结构的总用钢量,结构的总用钢量约束可以表示为

$$M_{ei} \leq [M_e] \quad (8)$$

式中 M_{ei} 为进化至第 i 代时的结构总用钢量, $[M_e]$ 为结构总用钢量最大允许值。

4.3.2 结构的节点最大位移

根据《空间网格结构设计规程》(JGJ7-2010)^[13],单层网壳结构最大位移应满足,

$$\delta_{\max} \leq L/400 \quad (9)$$

式中 δ_{\max} 为结构的节点最大位移, L 为结构的纵向跨度。

4.3.3 结构杆件的长细比

根据《空间网格结构设计规程》(JGJ7-2010)^[13],单层网壳结构杆件长细比应满足,

$$\lambda_i = l_{0i}/\alpha_i \leq [\lambda] \quad (10)$$

式中 λ_i 为构件 i 的长细比, l_{0i} 为构件 i 的计算长度, α_i 为构件 i 的截面回转半径, $[\lambda]$ 为构件长细比容许值,其取值对受拉构件(含轴拉和压弯构件)为 250,对受压构件(含轴压和压弯)为 150。

4.3.4 结构控制点节点的纵向坐标值

结构控制点的纵向坐标值应满足

$$h_{\min} \leq h_i \leq h_{\max} \quad (11)$$

式中 h_i, h_{\min} 和 h_{\max} 分别为 NURBS 曲面第 i 个控制点的纵向坐标值及其上限和下限值。

4.4 遗传优化算法

遗传算法是一种借鉴生物界自然选择和生物遗传机制的随机搜索算法,与梯度法不同,遗传算法可以同时搜索空间多个解进行评估,具有较好的全局搜索性能,且不依赖于梯度信息^[14]。近来,遗传算法广泛应用于各种工程优化设计领域,如结构拓扑优化^[15]、结构形态优化^[16]和结构截面优化^[17]等,本文以 NURBS 曲面控制点竖向坐标为优化参数,采用遗传算法对结构的节点构形度最小值进行优化,实现结构刚度的稳步提升,其具体步骤如下。

(1) 算法参数初始化。设置种群规模 NIND、最大遗传代数 maxgen 和变异概率 pm 等算法信息。

(2) 编码和初始种群生成。对控制点的纵坐标采用二进制编码规则进行二进制转化,并生成控制点的纵向坐标初始种群。

(3) 生成结构形态模型。由控制点网格生成 NURBS 曲面,并投影得到离散的结构模型。

(4) 个体适应度评价。适应度主要用于衡量各个体在优化计算过程中与目标最优解的接近程度并决定种群各个体遗传到下一代的概率,考虑约束后的适应度函数通常由目标函数简单处理转化得到,根据本文优化目标,构造如下适应度函数,

$$F(x) = p(x)f(x) = p(x)q_{\min}^F \quad (12)$$

式中 x 为当前种群中个体对应的控制点纵坐标值, $f(x)$ 为优化目标函数, $p(x)$ 为惩罚函数。

本文采用 Gen 等^[18]的罚函数计算方法,通过对不满足约束的目标函数值按违反约束的量乘以相应惩罚项降低其种群适应度,罚函数构造如下,

$$p(x) = 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{\Delta b_i(x)}{\Delta b_i^{\max}} \right] \quad (13)$$

$$\Delta b_i(x) = \max\{0, g_i(x) - b_i(x)\} \quad (14)$$

$$\Delta b_i^{\max} = \max\{\epsilon, \Delta b_i(x)\} \quad (15)$$

式中 $\Delta b_i(x)$ 为个体 x 对第 i 个约束条件的违反程度, Δb_i^{\max} 为当前种群在第 i 个约束条件的最大违反量, $g_i(x)$ 为第 i 个约束条件的计算值, $b_i(x)$ 为第 i 个约束的限值, ϵ 为避免除 0 的小正数。

(5) 选择。根据个体适应度值进行选择,适应度高的个体遗传到下一代种群的概率更大。

(6) 交叉。父代基因按一定概率进行交叉形成新的子代个体。

(7) 变异。部分基因发生变异,产生新的染色

体表现新的性状。

(8) 判断是否达到终止条件,即是否达到最大进化代数 \max_{gen} ,如满足则结束程序,否则返回步骤(3)。

整个遗传算法优化流程如图3所示。

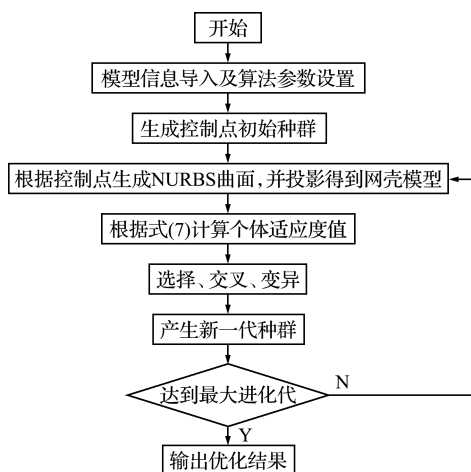


图3 基于节点构形度的结构形态优化流程
Fig. 3 Flow chart of structural shape optimization based on nodal well-formedness

5 优化算例分析

5.1 四角支撑方形网壳结构

如图4所示的一跨度为6.0 m的四角支撑方形网壳结构,其初始结构如图4(a)所示,四个角点处设置固定支座,结构杆件采用截面尺寸为40.0 mm×3.0 mm的Q235圆钢管,弹性模量为2.06 GPa,密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比为0.3,结构初始用钢量为 14.13 kg/m^2 ,最大允许用钢量为 20.0 kg/m^2 ,结构的等效节点荷载设计值为2.5 kN。

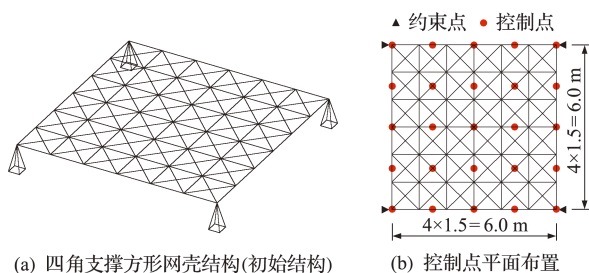


图4 初始结构及控制点平面布置
Fig. 4 Initial structure and the layout of control points

优化过程中采用 x 方向和 y 方向皆为4次的NURBS曲面,并以如图4(b)所示控制点的竖向坐标值为优化变量,以结构节点构形度 q_{\min}^F 最小值的最大化为优化目标,采用遗传算法对该结构进行优化设计。图5为该网壳结构的形态进化过程,可知在进化初期结构的形态变化幅度较大,随着进化代

数的增加,结构中间部位的节点逐渐向上拱起,结构形态趋于平稳,在满足结构总用钢量等约束条件下,达到设定的最大进化代数,最终形成如图5(d)所示的结构形态。优化后结构总用钢量为 17.19 kg/m^2 ,最大节点竖向位移为 $7.50 \times 10^{-3} \text{ m}$,杆件最大长细比为127.93,各项约束条件均满足设计要求。

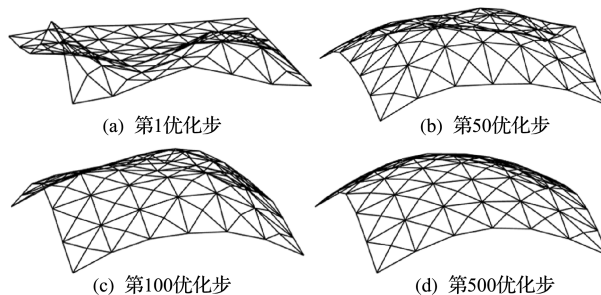


图5 四角支撑方形网壳结构的形态进化过程
Fig. 5 Morphological evolution of the square reticulated shell structure with four corner supported

网壳作为形状抵抗型结构,受力特性主要体现在薄膜效应^[17],最理想的受力模式是以杆件受轴压为主,而弯矩则是导致结构失稳破坏的重要原因,应减小杆件的截面弯矩。图6为优化过程中结构内力的变化率曲线,可以看出随着进化代数的增加,结构平均轴压力和平均合弯矩分别下降至第一代时的17.9%和3.4%,其中弯矩下降速度明显大于轴力,结构的传力模式逐渐转变为以轴向受力为主。当作用于结构所有节点上的荷载大小为1.0 N时,杆件的轴力最大值和弯矩最大值分别为11.95 N和0.15 N·m。

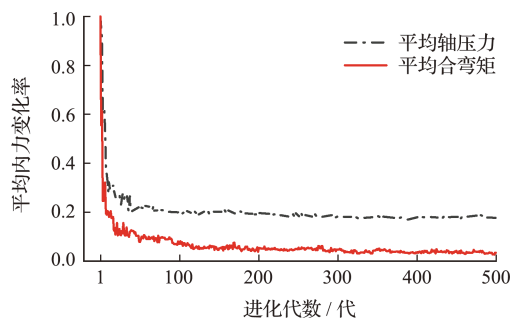


图6 四角支撑方形网壳结构优化中内力比的变化
Fig. 6 Changes of internal force ratio in the optimization of the square reticulated shell structure with four corner supported

考虑材料和几何非线性的影响,对优化后的结构进行全过程分析,得到结构的等效节点荷载-位移曲线如图7所示,可以看出,随着进化代数的增加,荷载-位移曲线的第一个临界点逐渐上升,表明结构的极限承载能力逐步提高且曲线在到达第一个临界点之前逐渐趋于陡峭,进化过程中结构的刚

度得到了逐步增强。

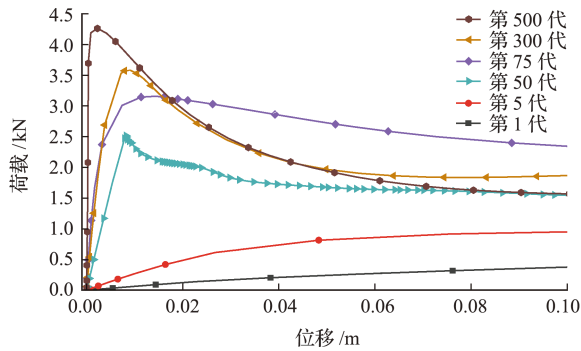


图7 四角支撑方形网壳各进化代的荷载-位移曲线
Fig.7 Load-displacement curves of the square reticulated shell in each evolutionary generation

图8为结构的节点构形度最小值 q_{\min}^F 及其极限承载力 P_{cr} 的变化曲线,可以看出在进化初始阶段,结构的节点构形度最小值较小,结构的极限承载能力为 0.26 kN,随着进化代数的增加,结构的节点构形度逐步提高,结构的极限承载力显著提升,最终达到 4.26 kN,结构的薄弱部位得到有效改善,结构整体刚度得到增强。

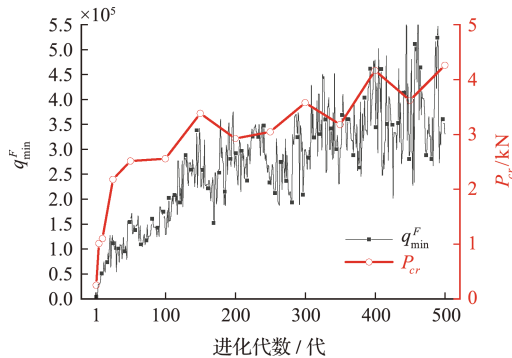


图8 四角支撑方形网壳的 q_{\min}^F 及 P_{cr} 的变化过程曲线
Fig.8 q_{\min}^F and P_{cr} optimization process curves of the square reticulated mesh shell with four corner supported

依据《空间网格结构设计规程》(JGJ7-2010)^[13]规定,对优化得到的结构考虑 $L/300$ 的初始缺陷,此时其极限承载力为 3.78 kN,高于等效节点荷载设计值,满足设计要求。

为进一步验证上述以构形度为目标的结构形态优化方法的可行性,以结构总应变能的最小化为目标对该结构的形态进行优化,设定等效节点荷载为 1.0 kN。优化中结构应变能及其极限承载能力随迭代步数的过程曲线如图9所示,随迭代步数的增加,结构应变能趋于平稳,优化后结构对应的极限承载能力 P_{cr} 为 2.57 kN。

从图8和图9可以看出,以节点构形度为目标时,在优化迭代过程中结构的极限承载力 P_{cr} 基本

呈上升趋势,而以结构应变能为目标时则波动较大,结构极限承载力 P_{cr} 随迭代过程上下波动,难以获得稳定的结构形态。以节点构形度为目标可获得较为稳定的结构形态,且其极限承载力不低于以结构应变能为优化目标得到的结构。

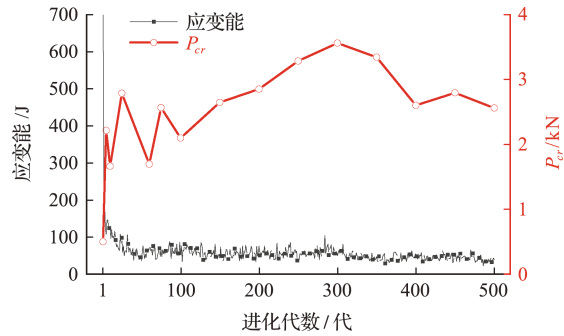


图9 四角支撑方形网壳应变能及 P_{cr} 优化历程
Fig.9 History of strain energy and P_{cr} of the square reticulated shell with four corner supported

5.2 一体育场屋盖网壳结构

图10(a)为一体育场屋盖结构的平面图,进行如图10(c)所示三角形网格划分,并采用如图10(b)所示的控制点,共25个控制点生成 x 方向和 y 方向皆为4次的NURBS曲面,固定支座约束沿外边界设置,结构杆件采用截面尺寸为 108.0 mm × 5.0 mm 的 Q345 圆钢管,弹性模量为 2.06 GPa,密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3,结构的等效节点荷载设计值为 1.5 kN。初始结构用钢量为 21.51 kg/m²,结构允许最大用钢量为 22 kg/m²。图10(c,d)为该结构采用的网格及其初始优化模型。

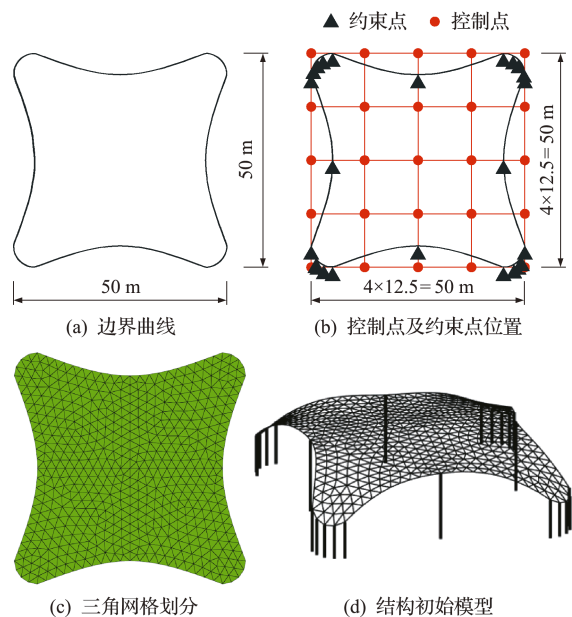


图10 体育场屋盖网壳结构的初始模型
Fig.10 Initial model of the reticulated shell structure of a stadium roof

以图 10(b)所示控制点的竖向坐标为优化变量,结构节点构形度 q_{\min}^F 最小值的最大化为优化目标,采用遗传算法对该结构进行优化设计。图 11 为该结构的形态优化过程,可知在结构迭代进化初期结构的形态极不稳定,变化多样,随着进化步数的增加,结构形态逐渐趋于平稳最终形成如图 11(d)所示结构的形态,优化后结构的总用钢量为 21.60 kg/m^2 ,构件最大长细比为 77.58,最大竖向节点位移为 $3.68 \times 10^{-2} \text{ m}$,均满足各项设计约束条件。

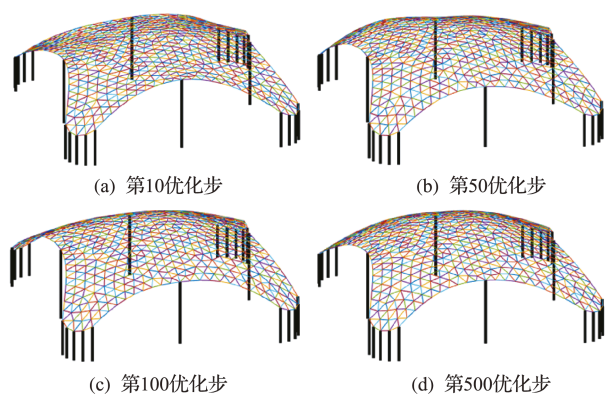


图 11 体育场屋盖网壳结构的形态进化过程
Fig. 11 Morphological evolution of the reticulated shell structure of a stadium roof

随着该结构形态的不断变化,结构内部传力模式逐渐改变,如图 12 所示为结构内力变化曲线。可以看出,进化初始阶段结构的平均轴压力和平均合弯矩迅速下降,并在逐渐趋于稳定,其平均轴压力和平均合弯矩分别下降至初始时的 70.4% 和 8.6%,表明结构逐渐形成以受轴力为主的合理的受力模式。优化后结构在单位荷载作用下的轴力最大值和弯矩最大值分别为 115.78 N 和 $2.69 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

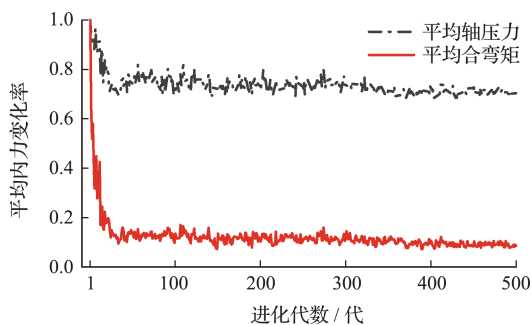


图 12 体育场屋盖网壳结构优化中内力比的变化
Fig. 12 Change of internal force ratio in the optimization of the reticulated shell structure

同理,在优化过程中对结构进行弹塑性非线性分析,得到结构的荷载-位移曲线如图 13 所示,随

着进化代数的增加,结构的极限承载力逐步提高。图 14 为结构节点的构形度最小值及结构极限承载力随迭代步的变化过程曲线,可知随节点构形度最小值 q_{\min}^F 快速提高,结构的极限承载力也随之提升,节点构形度的最小值 q_{\min}^F 逐渐平缓上升并趋于稳定,最终获得最优的结构形态,其对应的极限承载能力为 2.47 kN。

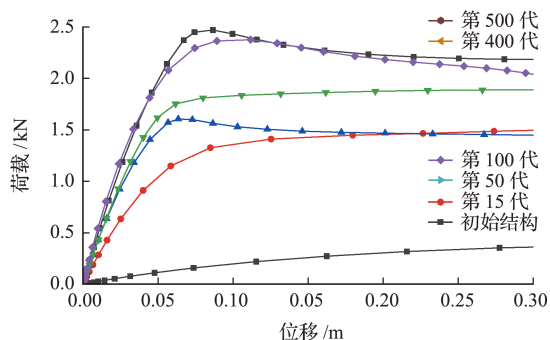


图 13 体育场屋盖网壳结构各进化代的荷载-位移曲线
Fig. 13 Load-displacement curves of the reticulated shell structure in different evolution generations

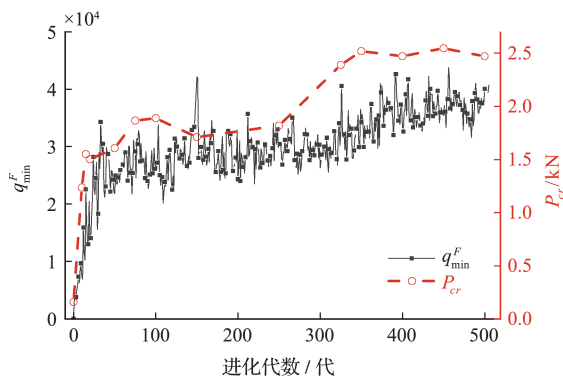
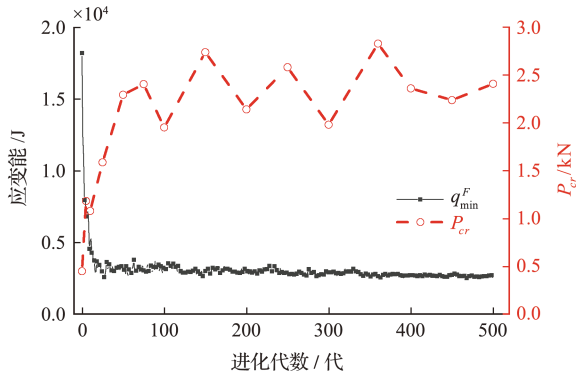


图 14 体育场屋盖网壳结构的 q_{\min}^F 及 P_{cr} 优化历程
Fig. 14 History of q_{\min}^F and P_{cr} of the reticulated shell structure

对优化后的结构施加 $L/300$ 的初始缺陷后,其承载力为 2.13 kN,满足结构设计要求。这也表明了以节点构形度作为优化目标并作为评价结构整体力学性能指标的合理性。

以结构总应变能的最小化为优化目标,对该结构的曲面形状进行优化,设定等效节点荷载为 1.0 kN,其优化过程中结构应变能和结构对应的极限承载力如图 15 所示,随迭代步的增加,结构应变能逐渐收敛,但其极限承载力波动较大,优化结束时结构的极限承载能力为 2.41 kN。

与之相比,从图 14 可以看出,以节点构形度为目标时,结构的极限承载力随迭代步的增加逐步上升,总体呈上升趋势,可获得相对稳定的结构形态。

图 15 体育场屋盖网壳结构应变能及 P_{cr} 优化历程Fig. 15 History of strain energy and P_{cr} of the reticulated shell structure

6 结 论

本文在考虑荷载作用的条件下,采用可以反映结构节点连接性能的物理指标-节点构形度 q_i^F ,其最小值 q_{\min}^F 与结构极限承载力密切相关。在此基础上为保证优化过程中自由曲面结构的光顺性,引进非均匀有理 B 样条曲面技术,以其控制点高度作为设计变量, q_{\min}^F 为优化目标,建立了自由曲面结构的形态优化模型。以提升结构极限承载力为导向,在给定约束条件的前提下,通过遗传算法获得最优自由曲面结构形态。主要结论如下。

(1) 通过引入 NURBS 技术对自由曲面进行形态优化,不仅保证了优化过程中结构的光顺性,而且极大地减少了优化变量,提高了优化效率。

(2) 以单位荷载作用下结构位移响应定义的节点构形度可以准确反映节点的连接性能和结构的整体力学性能。

(3) 以节点构形度作为优化目标,可以改善结构的受力模式,形成以受轴压为主的合理受力结构形态,结构极限承载力及其安全性得到有效提升。

参考文献(References):

- [1] Isler H. Generating shell shapes by physical experiments[J]. *Journal-International Association for Shell and Spatial Structures*, 1993, **34**: 53-63.
- [2] 崔昌禹, 严慧. 自由曲面结构形态创构方法: 高度调整法的建立与其在工程设计中的应用[J]. *土木工程学报*, 2006, **39**(12): 1-6. (CUI Chang-yu, YAN Hui. A morphosis technique for curved-surface structures of arbitrary geometries; Height adjusting method and its engineering applications [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, **39**(12): 1-6. (in Chinese))
- [3] Ding C, Seifi H, Dong S L, et al. A new node-shifting method for shape optimization of reticulated spatial structures [J]. *Engineering Structures*, 2017, **152**: 727-735.
- [4] 刘峰成, 冯若强. 考虑结构缺陷敏感性影响的单层空间网格结构形态优化研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, **39**(7): 25-32. (LIU Feng-cheng, FENG Ruo-qiang. Shape optimization of single-layer reticulated structure considering influence of structural imperfection sensitivity [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, **39**(7): 25-32. (in Chinese))
- [5] 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.
- [6] Wang Z C, Cao Z G, Fan F, et al. Shape optimization of free-form grid structures based on the sensitivity hybrid multi-objective evolutionary algorithm [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, **44**: 102538.
- [7] Agarwal J, Blockley D, Woodman N. Vulnerability of 3-dimensional trusses [J]. *Structural Safety*, 2001, **23**(3): 203-220.
- [8] Lu Z, Yu Y, Woodman N J, et al. A theory of structural vulnerability [J]. *The Structural Engineer*, 1999, **77**(18): 17-24.
- [9] 刘文政, 罗永峰. 单层球面网壳基于节点构形度的刚度均匀性判定准则[J]. *建筑结构学报*, 2015, **36**(11): 38-45. (LIU Wen-zheng, LUO Yong-feng. Uniform stiffness criterion of single-layer spherical shells based on nodal well-formedness [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, **36**(11): 38-45. (in Chinese))
- [10] Piegl L, Tiller W. *The NURBS Book* [M]. New York: Springer, 1997.
- [11] Ji T J, Bell A. *Seeing and Touching Structural Concepts* [M]. New York: Taylor & Francis, 2008.
- [12] Zhu N H, Ye J H. Structural vulnerability of a single-layer dome based on its form [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2014, **140**(1): 112-127.
- [13] JGJ7-2010. 空间网格结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (JGJ7-2010. Technical Specification for Space Frame Structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [14] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014. (LEI Ying-jie, ZHANG Shan-wen. *MATLAB Genetic Algorithm Toolbox and Its Application* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2014. (in Chinese))
- [15] 张成. 空间网格结构的鲁棒性理论与试验研究 [D]. 浙江大学, 2013. (ZHANG Cheng. Theoretical and Experimental Study on Robustness of Spatial Latticed Structures [D]. Zhejiang University, 2013.

- (in Chinese))
- [16] 吴志海. 基于遗传算法的网壳结构形态创构方法研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2013. (WU Zhi-hai. Study on Morphogenesis Technique for Reticulated Shells Based on Genetic Algorithm [D]. Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese))
- [17] 陆明飞, 叶继红. 基于节点构形度的单层柱面网壳稳定优化设计 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(9): 74-79. (LU Ming-fei, YE Ji-hong. Stability optimization design for single-layer cylindrical domes based on joint well-formedness [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(9): 74-79. (in Chinese))
- [18] Gen M, Cheng R. A survey of penalty techniques in genetic algorithms [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation [C]. 1996.

Research on shape optimization of free-form surface reticulated shell structure based on nodal well-formedness

ZHU Nan-hai^{*1,2}, ZHANG Wen-qiang^{1,2}

(1. School of Civil and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;
2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Environmental Geotechnical and Engineering Disaster Control, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to obtain the free-form and reasonable mechanical properties of the free-form single-layer reticulated shell structure, the displacement response under the action of a unit force was taken as the measurement parameter of the structural connection performance, and NURBS technology was introduced to ensure the smoothness of the structural surface. Based on the evaluation index of the nodal well-formedness under load, the corresponding optimization method of the free-form surface structure is proposed. Taking the coordinates of structural control points as the optimization variables and the maximization of the minimum nodal well-formedness as the optimization objective, a genetic algorithm was used to optimize the surface shape of the structure by considering the constraint conditions such as total mass of the steel material, the maximum node displacement and the slenderness ratio. The results show that the nodal well-formedness can accurately reflect the joint connection performance, and the genetic algorithm can obtain the structural shape of the rod mainly subjected to axial compression. The stress mode is effectively improved, the stress level is reasonable, and the structure's ultimate bearing capacity and safety are guaranteed.

Key words: free-form surface; shape optimization; NURBS surface; nodal well-formedness; genetic algorithm

引用本文/Cite this paper:

朱南海, 张文强. 基于节点构形度的自由曲面网壳结构形态优化研究 [J]. 计算力学学报, 2024, 41(2): 233-240.

ZHU Nan-hai, ZHANG Wen-qiang. Research on shape optimization of free-form surface reticulated shell structure based on nodal well-formedness [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2024, 41(2): 233-240.