

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202202010



采用量子粒子群优化算法的风荷载作用下伞形膜结构形态优化设计

孙芳锦^{1,2,3}, 苏基浩³, 李智达³, 张大明⁴

1. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004;
3. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;
4. 桂林理工大学 信息科学与工程学院, 广西 桂林 541006

摘要: 为获取具有最优性能的张拉膜结构的形态,基于量子粒子群优化算法,开展伞形膜结构在风荷载作用下的形态优化设计.以矢跨比和脊索拉力作为优化变量,将应变能、应力波动系数和最大支座反力作为优化目标建立多目标优化模型.通过分配系数法构造适应度函数,并以适应度函数为评价标准进行优化计算;然后,通过与粒子群优化算法优化结果的比较,证明量子粒子群优化算法的有效性和优越性.结果表明:风荷载作用下的最优伞形膜结构形态的脊索拉力、膜预应力和跨度之间的比值系数约为 0.77,最优结构矢跨比为 0.33~0.41,最优值主要集中在 0.35 左右.

关键词: 伞形膜结构; 风荷载; 多目标形态优化; 量子粒子群优化算法; 适应度函数

中图分类号: TU 383.04; TP 183 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2022)06-0719-08

Optimal Design of Umbrella-Shaped Membrane Structure Under Wind Load Using Quantum Particle Swarm Optimization Algorithm

SUN Fangjin^{1,2,3}, SU Jihao³, LI Zhida³, ZHANG Daming⁴

1. Guangxi Key Laboratory of Geotechnical Engineering and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Building New Energy and Energy Saving, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
4. College of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: In order to obtain the tensile membrane structure with optimal performance, the shape optimization design of umbrella-shaped membrane structure under wind load was carried out based on quantum particle swarm optimization algorithm. A multi-objective optimization model was established, taking the rise-span ratio

收稿日期: 2022-02-18

通信作者: 张大明(1978-),男,副教授,博士,主要从事智能算法与优化、数值计算、废弃物资源化利用的研究. E-mail: e_horse@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178468); 广西自然科学基金资助项目(2019GXNSFAA245037); 广西青年创新人才科研专项(桂科 AD19245012); 桂林理工大学科研启动基金(GUTQGJJ2019042, GUTQDJJ2019041); 广西建筑新能源与节能重点实验室自主课题(桂科能 19-J-21-14); 广西岩土力学与工程重点实验室项目(桂科能 19-Y-21-2)

and the chord cable tension as the optimization variables, and taking the strain energy, stress fluctuation coefficient and maximum support reaction force as the optimization objectives. The fitness function was constructed by the distribution coefficient method. The optimization calculation was carried out with the fitness function as the evaluation standard. The effectiveness and superiority of the quantum particle swarm optimization algorithm were proved by comparison with the optimization results of the particle swarm optimization algorithm. The results show that the ratio coefficient among the chord cable tension, membrane prestress and span of the optimal umbrella-shaped membrane structure under the action of wind load is about 0.77, and the optimal structural rise-span ratio is 0.33-0.41, and the optimal value is mainly concentrated around 0.35.

Keywords: umbrella-shaped membrane structure; wind load; multi-objective shape optimization; quantum particle swarm optimization algorithm; fitness function

膜结构是一种柔性结构体系,由于膜材不能抗压、抗弯,所以膜结构分析比刚性结构多了一个初始形态确定的过程^[1].结构的“形”和“态”相互影响且一一对应,两者共同决定了膜结构的力学性能.因此,形态优化分析对于膜结构设计具有重要的指导意义.膜结构优化理论最初是以最小曲面^[2]为优化目标提出的.2002年,钱基宏等^[3]提出了膜结构“最优形态”的概念.随后,卫东等^[4]把结构整体刚度最大,将受荷后各单元应力差值最小和结构整体投资值最小作为膜结构的优化目标,并解决了膜结构多目标优化的问题.伞冰冰等^[5]以应变能、最大支座反力、应力波动系数为膜结构优化目标,展开了分析研究.

目前,膜结构优化的方法主要有传统优化算法和遗传算法^[6].传统优化算法不利于解决具有多种约束或目标函数难以直接用数学式表达的优化问题,而遗传算法具有收敛速度慢、局部搜索能力差和控制变量较多等缺点.粒子群优化算法^[7-8]和量子粒子群优化算法是近年来发展迅速的智能仿生优化算法,其不仅具有概念简单、执行简易、收敛迅速快等优点,且对约束条件和目标函数的要求较低,因此,被广泛应用于工程优化领域中.梁美荣^[9]将粒子群优化算法应用到膜结构的找形分析中,并得到相关结论.

本文针对风荷载作用下的伞形膜结构展开形态优化分析研究,分别采用粒子群优化算法和量子粒子群优化算法^[10]自编程序并对风荷载作用下的伞形膜结构进行优化分析,得到伞形膜结构最优形态的相关参数,为张拉膜结构设计提供合理的设计依据.

1 多目标优化方法

1.1 优化原理

优化的一般思路首先是提出优化目标,并以某种数量的形式表达,它是结构优化运算的一个评价标准;其次是确定约束条件和优化变量.薄膜结构的优化目标有支座反力、结构刚度和薄膜应力分布均匀程度等,由于膜结构具有多个目标函数,可以通过分配系数法将其转化为单目标函数.

1.2 目标函数的建立

1.2.1 刚度最大^[11] 将荷载作用下结构产生的应变能 E 作为刚度的表达方式,应变能大小反映了结构刚度的强弱程度,结构产生的应变能越小,刚度越大.目标函数 f_1 表达式为

$$\min f_1 = E. \quad (1)$$

1.2.2 受荷后应力分布最均匀^[11] 由于膜面的面积大且厚度薄,为了避免膜面发生应力集中而引起撕裂破坏,采用各有限单元的最大主应力均方根与其平均值的比值来衡量应力分布均匀程度,并称为应力波动系数 D .应力波动系数越小,代表应力分布越均匀.目标函数 f_2 表达式为

$$\min f_2 = \frac{D(\sigma_i)}{E(\sigma_i)}. \quad (2)$$

式(2)中: $E(\sigma_i) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sigma_i$; $D(\sigma_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\sigma_i - E(\sigma_i))^2}{m-1}}$, m 为单元总数; σ_i 为第 i 个单元的最大主应力.

1.2.3 受荷后最大支座反力最小^[11] 为了减少膜结构给地基和下部结构的负担,选取各支座中最大支座反力 F_{\max} 为优化目标.目标函数 f_3 表达式为

$$\min f_3 = F_{\max} = (\sqrt{F_{i,x}^2 + F_{i,y}^2 + F_{i,z}^2})_{\max}. \quad (3)$$

式(3)中: $F_{i,x}, F_{i,y}, F_{i,z}$ 分别为第*i*个支座*x, y, z*向的支座反力。

1.3 优化变量的选取

决定膜结构初始形态的参数有索预拉力、膜初始预应力、结构控制点坐标、结构跨度和高度等。由于膜预张力的可调整变化范围较小,可通过对不同膜预张力的结构进行优化分析来研究膜预张力的影响,伞形膜结构伞高度为*H*,平面对角线跨度为*L*,取矢跨比 $\delta(\delta = H/L)$ 和脊索拉力*T*为优化变量。

1) 膜结构形状主要由支承点的相对位置及预应力分布决定。对于伞形结构,支承点相对位置主要是指矢跨比,具体限值根据建筑功能要求给出^[12],即

$$\delta_{\min} < \delta < \delta_{\max}. \quad (4)$$

式(4)中: $\delta_{\min}, \delta_{\max}$ 分别为最小、最大矢跨比。

2) 设定可知索截面积为*A_s*,维持曲面形状的最小拉力值为*T_{min}*,脊索材料强度为 σ_{\max} ,安全系数为 $\epsilon(\epsilon < 1)$,则最大拉力值*T_{max}*表达式为

$$T_{\max} = \epsilon \times \sigma_{\max} \times A_s. \quad (5)$$

优化变量的取值范围通常根据工程的常用范围而定,并要求满足建筑功能^[12],*T*的表达式为

$$T_{\min} < T < T_{\max}. \quad (6)$$

2 基于量子粒子群优化算法的优化设计方法

2.1 粒子群优化算法优化策略

粒子群优化(PSO)算法主要是通过经典速度更新公式和位置更新公式实现迭代运算,即

$$V_i^k = \omega_k V_i^{k-1} + c_1 r_1 (X_i^b - X_i^{k-1}) + c_2 r_2 (X_g^b - X_i^{k-1}), \quad (7)$$

$$X_i^k = X_i^{k-1} + V_i^k. \quad (8)$$

式(7),(8)中:*V*为粒子速度; r_1, r_2 为(0,1)之间的随机数;*X*为粒子位置;*k*为算法当前迭代次数; ω 为粒子保持的运动惯性; c_1, c_2 分别为局部学习因子和全局学习因子。

ω 一般采用从0.9到0.4线性递减的策略^[13],在此情况下,PSO算法具有较好的优化效果,计算结果已通过测试验证。 ω 的表达式为

$$\omega = \omega_{\max} - k \times \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k_{\max}}. \quad (9)$$

式(9)中: $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ 分别为最大、最小惯性权重, $\omega_{\max} = 0.9, \omega_{\min} = 0.4$; k_{\max} 为算法的最大迭代次数。

为了确保PSO算法前期全局搜索能力较强, c_1 采用不断减小的策略,具体表达式为

$$c_1 = c_s - k \times \frac{c_s - c_e}{k_{\max}}. \quad (10)$$

式(10)中: c_s 为最大学习因子, $c_s = 2.5$; c_e 为最小学习因子, $c_e = 0.5$ 。

后期为了确保粒子具有较强的局部搜索能力, c_2 采用不断增加的策略^[14],具体表达式为

$$c_2 = c_e + k \times \frac{c_s - c_e}{k_{\max}}. \quad (11)$$

粒子群优化算法具体有以下5个步骤。

- 1) 初始化. 初始化粒子种群数目,随机设定初始位置和初始速度。
- 2) 评价粒子. 通过适应度函数计算每个粒子的适应度值,将粒子的适应度值和对应的位置记录在 $p_{\text{best}}(X_i^b)$ 中,比较所有粒子的适应度值,将具有最优适应度的粒子位置和适应度值记录在 $g_{\text{best}}(X_g^b)$ 中。
- 3) 更新信息. 通过比较每个粒子当前位置和历史最优位置更新速度和位置信息。
- 4) 更新 g_{best} . 通过比较上个计算迭代周期的 g_{best} 和当前所有的 p_{best} ,实现 g_{best} 更新。
- 5) 停止条件. 如果计算结果满足设置条件,则运算结束;如不满足设置条件,则返回步骤2)继续运算,直到满足条件,最后输出搜索结果^[15]。

2.2 量子粒子群优化算法优化策略

量子粒子群优化(QPSO)算法是在粒子群优化算法的基础上,取消了粒子位置变化方向属性并引

入平均的粒子历史最好位置 $m_{\text{best}}^{[16]}$. QPSO 算法将不再考虑粒子的历史运动记录,其算法步骤更新为

1) 计算平均的粒子历史最好位置 m_{best} , 即

$$m_{\text{best}} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S p_{\text{local},i}. \quad (12)$$

式(12)中: S 为粒子群的数目; $p_{\text{local},i}$ 为当前迭代中第 i 个个体最优粒子.

2) 粒子位置 P_i 更新为

$$P_i = \varphi \times p_{\text{local},i} + (1 - \varphi) p_{\text{global}}. \quad (13)$$

式(13)中: P_i 为第 i 个粒子位置的更新; p_{global} 为到目前为止全局最优粒子; φ 为随机参数.

为了增加粒子运动的随机性,避免陷入局部收敛,将随机参数 φ 变为 2 个随机参数,粒子位置更新公式被修改为

$$P_i' = \frac{\varphi_1 \times p_{\text{local},i} + \varphi_2 \times p_{\text{global}}}{\varphi_1 + \varphi_2}. \quad (14)$$

式(14)中: φ_1, φ_2 为(0,1)之间的随机数.

最后,得到粒子位置更新公式为

$$x_i = P_i' \pm \alpha |m_{\text{best}} - x_i| \ln(1/u). \quad (15)$$

式(15)中: x_i 为第 i 个粒子的位置; u 为(0,1)中的均匀分布数值,取+和-的概率各为 0.5,当 $u > 0.5$ 时, P_i 后运算取+,反之取-; α 可以根据迭代次数不断更新,从而使粒子不断趋于最优解位置. α 是 QPSO 算法中的唯一参数,其取值一般小于 1, α 的表达式为

$$\alpha = 0.5 + 0.5 \times \left(\frac{k_{\text{max}} - k}{k_{\text{max}}} \right). \quad (16)$$

量子粒子群优化算法有以下 4 个步骤.

1) 参数初始化,设置粒子尺寸、粒子种群数目、运算终止条件和最大迭代次数.

2) 通过比较粒子当前位置适应度和到目前为止最优位置的适应度,决定是否更新最优位置信息和局部最佳权重.

3) 更新迭代 m_{best} , 根据 m_{best} 和粒子位置更新公式(15),从而更新粒子信息.

4) 若迭代次数达到上限或达到设定终止条件,则停止搜索输出优化结果;若未达到,则回到步骤 2) 继续搜索^[16].

2.3 算法适应度函数的构造

适应度函数 f 是算法进行迭代计算的衡量标准,其表达式为

$$\min f = \sum_{i=1}^n \beta_i \zeta_i f_i, \quad (17)$$

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 = 1. \quad (18)$$

式(17), (18)中: β_i 为优化目标的权重分配系数; f_i 为优化目标,各个优化目标之间存在不同量级的问题,通过优化目标乘以系数 ζ_i ,则各个 $f_i \zeta_i$ 成为统一数量级关系, ζ_i 表达式为

$$\zeta_i = \overline{f_1} / \overline{f_i}. \quad (19)$$

式(19)中: $\overline{f_1}$ 是第 1 个优化目标的平均值; $\overline{f_i}$ 是第 i 个优化目标的平均值. $\overline{f_1}$ 和 $\overline{f_i}$ 通过设置不同的工况由 ANSYS 中的膜结构模型大量计算取得.

3 风荷载下伞形膜结构的形态优化分析

3.1 优化目标分析和权重确定

以伞形膜结构为算例^[12],采用刚性直线性边界结构,脊索沿对角线布置,对角线跨度为 20 m,结构顶端开洞,洞口直径为 1 m,膜材厚度为 0.001 m,薄膜经、纬向刚度均为 $1\ 100\ \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$,结构剪切刚度为 $100\ \text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$,泊松比为 0.2,脊索截面积为 $3.14 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$,结构受竖向均布荷载为 $-0.48\ \text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$,风荷载为 $20\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$. 伞形膜结构示意图,如图 1 所示.

与雪荷载不同,风荷载不仅竖直向下作用于结构,还会垂直作用于膜表面.为了消除膜表面积影

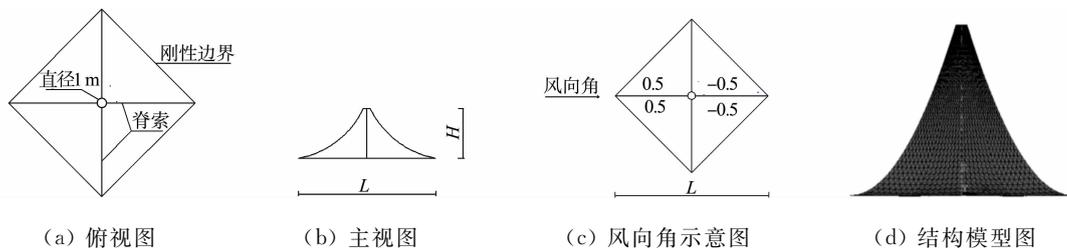


图 1 伞形膜结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of umbrella-shaped membrane structure

响, 设单位面积膜应变能 E_1 、单位长度索应变能 E_2 、应力波动系数 D 和结构最大支座反力 F_{\max} 为膜结构优化目标^[4], 设矢跨比和脊索拉力为优化变量. E_1, E_2 的表达式为

$$E_1 = E_{\text{膜}} / A, \tag{20}$$

$$E_2 = E_{\text{索}} / L_1. \tag{21}$$

式(20), (21)中: E_1 为单位面积膜应变能; $E_{\text{膜}}$ 为膜总应变能; A 为膜表面积总和; E_2 为单位长度索应变能; $E_{\text{索}}$ 为索总应变能; L_1 为脊索总长度.

为了得到优化目标的权重分配系数, 首先进行简单的参数分析, 脊索拉力 T 的取值要在具体设计荷载作用下保证结构内部具有维持曲面形状的应力值区间, T 取 10, 16, 22, 28 kN; 矢跨比 δ 采用伞形膜结构的常用取值范围^[5], δ 取 1/4.20, 1/2.50, 1/1.70, 1/1.34. 各优化目标与矢跨比和脊索拉力的关系, 如图 2 所示.

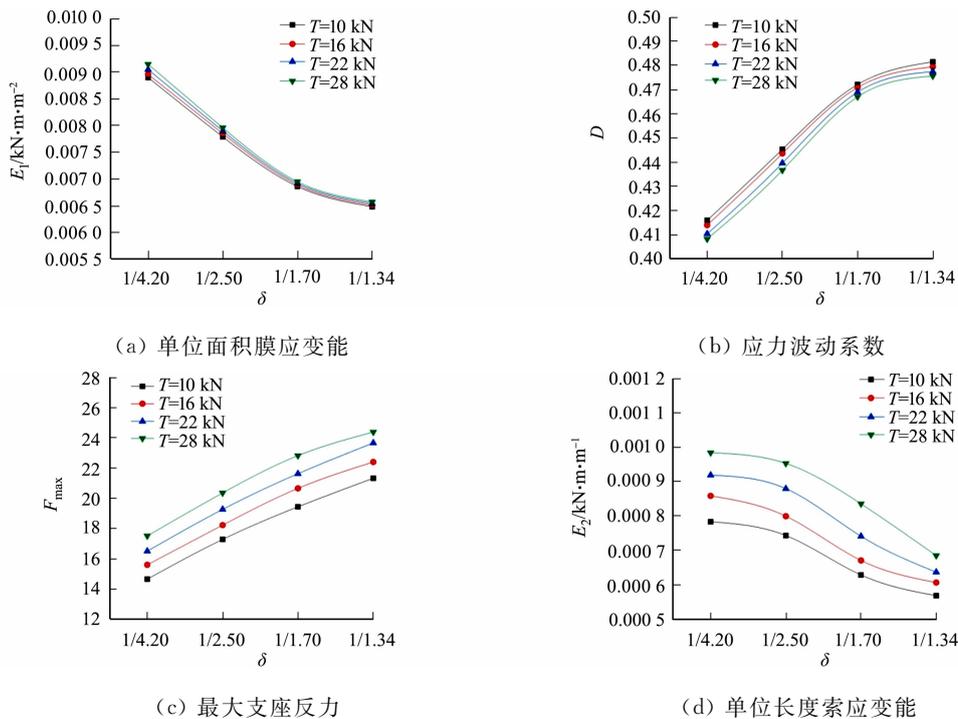


图 2 各优化目标与矢跨比和脊索拉力的关系

Fig. 2 Relationship among optimization objectives, rise span ratio and spinal cord tension

由图 2 可知: 随着矢跨比的增大, 应力波动系数和最大支座反力逐渐增大, 但单位长度索应变能和单位面积膜应变能逐渐减小; 单位长度索应变能、单位面积膜应变能在脊索拉力较小时达到最小值, 同时, 最大支座反力随着应变能的减小而减小. 因此, 最大支座反力的权重分配系数可以适当减小; 相对于单位长度索应变能, 单位面积膜应变能的变化量级更大, 变化范围更广, 优化的目的是使总应变能尽可能小, 所以, 单位面积膜应变能的权重分配系数应比单位长度索应变能的大.

综上所述, 无论矢跨比和脊索拉力趋于更大或更小, 都会导致有些优化目标向不好的方向发展, 从而使结构因为某些性能被忽略而提前产生破坏.

引进层次分析法^[17] 给每个优化目标分配权重系数, 4 个目标函数则可集成成一个目标函数. 优化目

标层次结构模型,如表 1 所示.表 1 可反映优化目标之间的重要程度关系.表 1 中:数值 1 表示横坐标和纵坐标重要性同等重要;数值 3 表示横坐标优化目标的重要性比纵坐标的强;数值 1/3 表示横坐标优化目标的重要性比纵坐标的弱.经过反复多次试算,得到优化目标应力波动系数、最大支座反力、单位面积膜应变能、单位长度索应变能对应的权重分配系数 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 分别为 0.35, 0.15, 0.35, 0.15.

表 1 优化目标层次结构模型

Tab.1 Optimization target hierarchical structure model

| 优化目标 | 单位面积膜应变能 | 单位长度索应变能 | 应力波动系数 | 最大支座反力 |
|----------|----------|----------|--------|--------|
| 单位面积膜应变能 | 1 | 3 | 1 | 3 |
| 单位长度索应变能 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1 |
| 应力波动系数 | 1 | 3 | 1 | 3 |
| 最大支座反力 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1 |

3.2 优化过程分析

在伞形优化模型确定的基础上,分别以 PSO 和 QPSO 算法编制程序并对其进行优化分析.采用表 1 的优化目标权重分配系数,优化过程如图 3,4 所示,优化结果如表 2 所示.

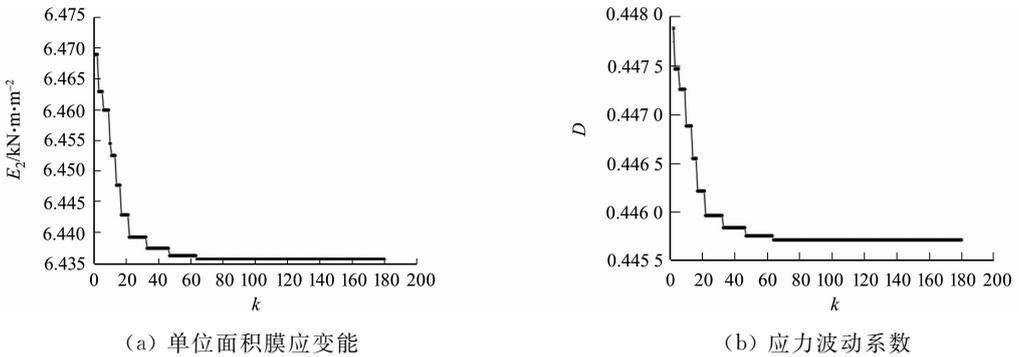


图 3 QPSO 算法的优化目标值

Fig. 3 Optimized target values of QPSO algorithm

每个粒子对应一个适应度和一组目标函数值,每组目标函数值是 4 个优化目标加权相加后的结果.优化目标由于设置了权重,没法保证每个优化目标值在迭代过程中都能比上一代更小,只要优化目标值的主要变化趋势随着适应度的减小而趋于减小,即是合理的.由图 3,4 可知:QPSO 算法的适应度、单位面积膜应变能和应力波动系数的变化趋势保持一致;两种算法的适应度一直朝着更小方向变化,表示搜索到的目标函数越来越小,目标函数越小,则结构越优化,最后适应度趋于平稳,即两种算法已找到最优解位置.

由图 4 可知:QPSO 算法在迭代更新到 63 代时得到最小适应度 5.325 8,而 PSO 算法在迭代更新到 72 代时得最小适应度 5.327 1.与 PSO 算法相比,QPSO 算法能以更少的迭代次数和更小的适应度找到最优解,证明了 QPSO 算法能以更快的速度找到最优解且优化效果更好.

表 2 优化结果

Tab.2 Optimization results

| 算法 | δ | T/kN | $E_1/\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-2}$ | $E_2/\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ | D | F_{\max}/kN |
|------|----------|---------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------|----------------------|
| QPSO | 0.389 | 16.64 | 6.431 | 0.576 | 0.445 | 13 381.36 |
| PSO | 0.378 | 17.07 | 6.459 | 0.589 | 0.451 | 13 423.82 |

3.3 结果分析

为了探究伞形膜结构最优形态相关参数之间的规律,采用量子粒子群优化算法对伞形膜结构展开大量的优化分析.风荷载取值为风荷载规范中 5~11 级区间内的风速;跨度和矢跨比取值范围为伞形膜

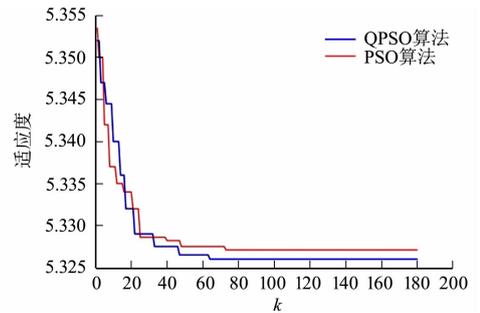


图 4 QPSO 算法和 PSO 算法的适应度

Fig. 4 Fitness of QPSO algorithms and PSO algorithms

结构常用参数^[5];膜预张力和脊索拉力大小由设计荷载确定,基本原则是在设计荷载作用下保证结构内部具有维持曲面形状的预应力值,同时随着跨度变化,结构需要的膜预应力和索拉力会发生变化^[11-12]. 16,20,25 m 跨度结构的优化结果,如表 3~5 所示.表 3~5 中: S_t 为膜预应力; v 为风速.

表 3 16 m 跨度结构的优化结果

Tab. 3 Optimization results of 16 m span structure

| $S_t/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ | $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 优化变量取值范围 | | 优化结果 | |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------------|----------------|---------------|----------|
| | | T/kN | δ | T/kN | δ |
| 1.5 | 20 | 8~20 | 1/4, 20~1/1.34 | 9.48 | 0.36 |
| 2.0 | 20 | 10~25 | 1/4, 20~1/1.34 | 11.68 | 0.33 |
| 2.0 | 25 | 10~25 | 1/4, 20~1/1.34 | 11.84 | 0.33 |
| 2.0 | 30 | 10~25 | 1/4, 20~1/1.34 | 12.32 | 0.36 |
| 2.5 | 20 | 13~30 | 1/4, 20~1/1.34 | 15.46 | 0.33 |

表 4 20 m 跨度结构的优化结果

Tab. 4 Optimization results of 20 m span structure

| $S_t/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ | $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 优化变量取值范围 | | 优化结果 | |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------------|----------------|---------------|----------|
| | | T/kN | δ | T/kN | δ |
| 1.5 | 20 | 8~25 | 1/4, 20~1/1.34 | 12.07 | 0.35 |
| 2.0 | 20 | 10~30 | 1/4, 20~1/1.34 | 15.80 | 0.33 |
| 2.0 | 25 | 10~30 | 1/4, 20~1/1.34 | 16.64 | 0.38 |
| 2.0 | 30 | 10~30 | 1/4, 20~1/1.34 | 16.41 | 0.33 |
| 2.5 | 20 | 13~30 | 1/4, 20~1/1.34 | 18.75 | 0.40 |
| 3.0 | 20 | 15~35 | 1/4, 20~1/1.34 | 23.44 | 0.41 |

表 5 25 m 跨度结构的优化结果

Tab. 5 Optimization results of 25 m span structure

| $S_t/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ | $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 优化变量取值范围 | | 优化结果 | |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------------|----------------|---------------|----------|
| | | T/kN | δ | T/kN | δ |
| 2.0 | 20 | 13~30 | 1/4, 20~1/1.34 | 21.35 | 0.37 |
| 2.0 | 25 | 13~30 | 1/4, 20~1/1.34 | 19.75 | 0.34 |
| 2.0 | 30 | 13~30 | 1/4, 20~1/1.34 | 21.25 | 0.34 |
| 2.5 | 20 | 15~30 | 1/4, 20~1/1.34 | 23.75 | 0.34 |
| 3.0 | 20 | 20~35 | 1/4, 20~1/1.34 | 30.25 | 0.34 |

由表 3~5 可知:随着膜预应力的增大,脊索拉力最优值也会随之增大,矢跨比最优值出现微弱减少;随着风速的增大,矢跨比和脊索拉力最优值几乎不受影响,即最优结构参数与风荷载大小无关;随着结构跨度的增大,脊索拉力最优值增大,矢跨比最优值变化细微且稳定在一个定值附近.

为探究最优结构形态的跨度、脊索拉力和膜预应力之间的关系,定义比值系数 $\gamma = T / (S_t \times 0.5 \times L)$ ^[5]. 最优形态的比值系数 γ 和矢跨比 δ ,如图 5,6 所示.

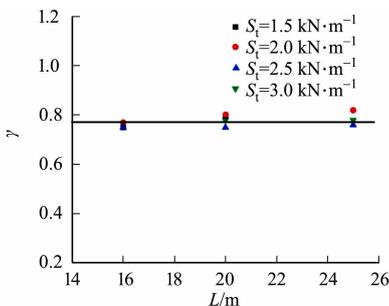


图 5 最优形态的比值系数

Fig. 5 Ratio coefficients of optimal form

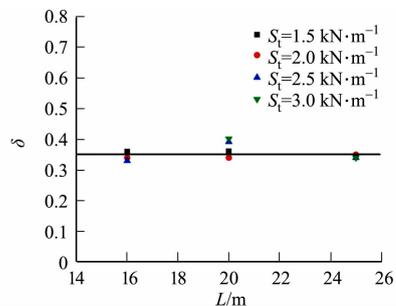


图 6 最优形态的矢跨比

Fig. 6 Rise span ratios of optimal form

通过以上分析可知:在风荷载作用下,最优伞形膜结构的脊索拉力、膜预应力和跨度之间的比值系数 γ 在 0.77 附近波动,最优结构矢跨比出现在 0.33~0.41,大部分最优值分布在 0.35 附近.将程序计

算结果与系数测算结果进行对比验证,结果基本一致。

4 结论

根据膜结构的特点建立伞形膜结构多目标优化模型,并采用粒子群优化算法和量子粒子群优化算法对伞形膜结构展开优化设计研究,得到以下2点结论。

1) 相对于粒子群优化算法,量子粒子群优化算法的收敛速度快且具有较强的全局搜索能力,在伞形膜结构形态优化分析中能够得到更精准的全局最优解。

2) 在风荷载作用下,最优伞形膜结构的脊索拉力、膜预应力和跨度之间的比值系数 γ 在0.77左右,最优结构矢跨比为0.33~0.41,最优值主要集中在0.35附近,结构最优形态与风荷载大小无关。

参考文献:

- [1] 杨庆山,姜忆南.张拉索-膜结构分析与设计[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] BLETZINGER K U. Form finding and optimization of membranes and minimal surfaces[EB/OL]. (2014-11-27) [2022-01-15]. https://www.researchgate.net/profile/Kai-Uwe-Bletzinger/publication/246215443_Form-Finding_and-Optimization_of_Membranes_and_Minimal_Surfaces/links/54775e600cf205d1687a6573/Form-Finding-and-Optimization-of-Membranes-and-Minimal-Surfaces.pdf.
- [3] 钱基宏,宋涛.张拉膜结构的找形分析与形态优化研究[J].建筑结构学报,2002,23(3):84-88. DOI:10.3321/j.issn:1000-6869.2002.03.014.
- [4] 卫东,沈世钊.张拉薄膜结构的形态优化设计[J].土木工程学报,2004,37(2):12-18. DOI:10.3321/j.issn:1000-131X.2004.02.002.
- [5] 伞冰冰,武岳,沈世钊.伞形膜结构的形态优化分析[C]//第十二届空间结构学术会议论文集.北京:中国建筑科学研究院,2008:229-233.
- [6] 刘绍兴.基于遗传算法的类岩材料配比优化研究与应用[D].邯郸:河北工程大学,2021.
- [7] 贾会群,魏仲慧,何昕,等.基于改进粒子群算法的路径规划[J].农业机械学报,2018,49(12):371-377. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.044.
- [8] CHEN Xianjie, XIE Zhuoliang, NAI Guoru. GB decomposition method based on standard particle swarm algorithm [C]//The 9th International Conference on Environmental and Engineering Geophysics. Changchun: IOP Publishing, 2021:012078. DOI:10.1088/1755-1315/660/1/012078.
- [9] 梁美荣.基于粒子群优化算法的索膜结构找形研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2019.
- [10] DONG Ang, SONG Xin. Reactive power optimization of dynamic power system based on QPSO algorithm [C]//International Conference on Energy, Material Science and Environment Engineering. Tianjin: IOP Publishing, 2020: 012012. DOI:10.1088/1755-1315/480/1/012012.
- [11] 武岳,伞冰冰,孙晓颖.膜结构的概念设计与形态优化[J].空间结构,2012,18(3):35-40. DOI:10.13849/j.issn.1006-6578.2012.03.008.
- [12] 李海蛟.张拉膜结构形态优化方法与优化形态分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [13] 李东.改进粒子群算法及结构优化设计应用研究[D].杭州:浙江工业大学,2018.
- [14] 居凤霞.粒子群优化算法的改进及应用[D].广州:华南理工大学,2014.
- [15] 李树松.粒子群算法在优化问题中的应用研究[J].科学技术创新,2020(32):103-104. DOI:10.3969/j.issn.1673-1328.2020.32.047.
- [16] 张德干,杨鹏,张捷,等.基于量子粒子群优化策略的车联网交通流量预测方法[J].计算机科学,2020,47(增刊2):327-333. DOI:10.11896/jsjcx.191200126.
- [17] 赵倩,邓咏梅.基于层次分析法的三维人体扫描仪的选择[J].纺织学报,2021,42(4):155-161. DOI:10.13475/j.fzxb.20200702207.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)