

文章编号: 1000-4750(2014)09-0152-08

基于构形度的强震下单层球壳结构 倒塌模式优化研究

刘文政, 叶继红

(东南大学混凝土与预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

摘 要: 基于杆系结构构形易损性理论, 以构形度标准差最小为目标函数, 以构件截面尺寸为优化变量, 并考虑长细比、挠度、杆件强度及稳定约束条件, 建立了单层球壳结构构形度优化模型。将遗传算法和模拟退火算法作为子算法, 基于混合策略构造出遗传-模拟退火算法(GASA), 并采用自适应策略降低算法对优化参数的依赖性。以跨度 70m 的单层球壳结构为例, 通过凝聚过程分析识别结构存在的构形度不均匀区域。采用 GASA 算法对该区域的杆件截面进行构形度优化。通过对优化后结构凝聚过程分析和地震动力时程分析, 表明优化模型和优化算法可以有效的解决优化变量繁多的大型单层球壳结构地震作用下倒塌模式的优化问题。

关键词: 单层球壳; 倒塌模式优化; 遗传-模拟退火算法; 自适应策略; 构形度

中图分类号: TU311.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0286

COLLAPSE SCENARIO OPTIMIZATION OF SINGLE-LAYER SPHERICAL SHELLS UNDER SEVERE EARTHQUAKE EXCITATIONS BASED ON WELL-FORMATION

LIU Wen-zheng, YE Ji-hong

(Southeast University, Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on the form vulnerability theory of skeletal structures, a well-formation optimal model of single-layer spherical shells is established by taking the minimization of the standard deviation of the well-formation as the optimization objective and the cross-sectional dimensions of members as the optimization variables. This optimal model takes into account the constraints of a slender ratio, a deflection, bar strength and stability. Taking genetic algorithm and simulated annealing as sub algorithms, a genetic-simulated annealing algorithm (GASA) is put forward using a mixed strategy. Meanwhile, adaptive strategies are adopted to reduce the dependency of the algorithm upon the optimization parameters. Taking an example of a 70m span single-layer spherical shell, the uneven well-formation regions are identified through a clustering process. The cross-sectional dimensions optimization of members located in those regions is carried out using GASA. By the clustering process analysis and the seismic time history analysis, it is indicated that the optimized model and algorithm can effectively solve the collapse scenario optimization of large-scale single-layer spherical shells with several optimization variables under earthquake excitations.

Key words: single-layer spherical shell; collapse scenario optimization; genetic-simulated annealing algorithm; adaptive strategies; well-formation

收稿日期: 2013-03-30; 修改日期: 2014-01-09

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(51125031)

通讯作者: 叶继红(1967—), 女, 辽宁锦州人, 教授, 博士, 博导, 从事大跨空间结构抗震、抗风及轻钢结构研究(E-mail: yejihong@seu.edu.cn).

作者简介: 刘文政(1986—), 男, 山东德州人, 中级工程师, 博士, 从事网壳抗震研究(E-mail: liuwenzheng1986@163.com).

根据单层网壳在地震作用下的倒塌破坏特征,可将倒塌模式分为强度破坏和动力失稳^[1-2],其中动力失稳模式的延性和耗能能力较差,破坏具有突发性。如果此类结构在地震作用下发生无征兆的动力失稳破坏,会危及人民生命安全并造成巨大的经济损失。因此有必要对网壳结构在强震作用下的倒塌模式进行优化,对防止此类结构在强震作用下发生无征兆的局部倒塌或整体倒塌具有重要的理论意义和工程价值。

现阶段,对网壳结构在静力荷载作用下的优化研究已经开展的较为深入,其优化目标主要是降低结构自重,优化方法从最初的准则法发展到遗传算法等智能优化算法^[3-7]。结构在动力荷载作用下的优化分为动力特征优化和动力响应优化。动力特性优化是以结构固有频率为目标函数或约束条件,通过优化使结构的基本频率偏离动力荷载包含的频率范围,避免共振。Grandhi等^[8]采用准则法对桁架结构在多重频率约束条件下进行优化。Sedaghati等^[9]将数学规划法和有限元技术相结合,对桁架结构和刚架结构分别进行单重和多重频率约束下的优化。Wang等^[10]采用最优准则算法对考虑自振频率特性约束的三维桁架结构进行优化。Gomes^[11]采用粒子群优化算法对空间结构在频率约束下进行优化。动力响应优化是以结构在动力激励下的响应为目标函数或约束条件的优化设计。Cassis^[12]采用数学规划法对半正弦冲击荷载作用下的钢框架结构进行了动力响应优化。Kapoor等^[13]采用Powell法对地震作用下的发射塔桁架结构进行了动力响应优化。Kang等^[14]根据位移场等效原则,将动荷载转化为等效静荷载,对桁架结构进行优化。Hajirasouliha等^[15]对地震作用下的桁架结构进行优化,使其达到延性需求均匀的状态。网壳属于高次超静定结构,其动力性能复杂,针对网壳结构在动力荷载作用下的优化研究较少。文献[16]将ANSYS非线性动力响应分析和小生境遗传算法相结合,以单层球壳结构动位移的最大值和最大节点动位移的给定区间为优化目标,对单层球壳结构的倒塌模式进行了全局优化和局部优化,但未从机理上揭示网壳结构呈现不同倒塌模式的原因,方法不具有普适性。

鉴于上述研究现状,有必要从网壳结构自身入手,通过改善结构拓扑关系层面上存在的刚度不均匀区域,提高结构在地震作用下的延性和变形能

力。本文首先介绍了构形易损性理论中的构形度概念和凝聚过程,在此基础上以构形度标准差最小为目标函数,建立单层网壳结构构形度优化模型;然后针对遗传算法存在局部搜索能力不强和模拟退火算法存在计算效率低的缺点,将两种算法的优化机制相结合,通过混合策略构造出遗传-模拟退火算法(GASA);最后以70m跨度的单层球壳结构为例,采用构形度优化模型和GASA算法对结构拓扑关系中存在的刚度不均匀区域进行优化,并通过地震动力时程分析对优化结果进行验证。

1 构形易损性理论

易损性是指结构对相对较小的损伤、摄动或改变产生不成比例的较大破坏后果的敏感性,它反映了结构对于意外损伤的承受能力。Blockley提出易损性主要源于结构内部本身的构形及连接程度,基于图论建立了平面杆系结构的构形易损性理论^[17-20]。Agarwal^[21-22]进一步将构形易损性理论推广应用到简单三维桁架和刚架结构中。构形易损性分析与常规响应分析不同,它是从结构自身拓扑关系入手,分析结构中存在的薄弱部位。

1.1 结构簇及构形度

结构簇表示网壳内部杆件连接紧密程度高于其与外部杆件连接程度的子结构。图1所示可以看作单层网壳结构的一个结构簇。构形度是衡量结构簇杆件拓扑关系好坏的标准,其定义为结构簇内部节点构形度的平均值,即:

$$Q = \sum_{k=1}^d q_k / d \quad (1)$$

式中: Q 为结构簇的构形度; d 是结构簇的节点数量; q_k 为节点 j_k 的构形度; q_k 计算如下:

$$q_k = \prod_1^c \lambda_i = \det(\mathbf{K}_{kk}) \quad (2)$$

式中: \mathbf{K}_{kk} 为结构总体刚度矩阵中与节点 j_k 对应的子矩阵; c 为子矩阵 \mathbf{K}_{kk} 的维数; λ_i 为子矩阵 \mathbf{K}_{kk} 的特

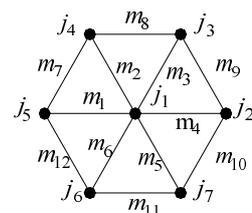


图1 单层网壳的结构簇(注: m_i 为杆件, j_i 为节点)
Fig.1 Structural cluster of single-layer latticed shells
(Note: m_i represents the member, j_i represents the joint)

征值,称为节点主刚度系数; $\det(\mathbf{K}_{kk})$ 为子矩阵 \mathbf{K}_{kk} 的行列式值。构形度与节点类型、杆件刚度及连接角度有关,与总体坐标系的选取无关。

1.2 凝聚过程

凝聚过程是构形易损性分析的重要组成部分,它是通过应用聚类分析中的层次凝聚方法,依据构形度等凝聚准则,将位于结构簇(子结构)外部的杆件逐步并入其内部的过程。通过凝聚过程可以建立结构拓扑关系层级模型。凝聚过程分为初始凝聚、二次凝聚、最后凝聚三个阶段,目的是寻找结构杆件连接薄弱的区域,并进行优化分析。

初始凝聚阶段是逐步将构形度增加最大的结构杆件并入已有的结构簇中,直至构形度不再增大时停止,此时的结构簇称为自由簇;二次凝聚阶段是根据构形度增加最大或减小最小的原则,将自由簇进一步合并,直至整个上部结构凝聚成为一个结构簇;最后凝聚阶段是将基础部分并入上部结构中。

2 优化模型

文献[23]采用构形易损性理论分析单层球壳结构在强震下的倒塌失效机理,通过研究三个单层球壳结构初始凝聚阶段自由簇构形度的变化规律,发现结构构形度低的区域对应结构构件拓扑关系的薄弱区域;通过对比三个单层球壳结构的构形易损性分析结果和振动台试验结果,从结构构件拓扑关系层面揭示了结构在强震作用下呈现不同倒塌破坏特征的机理,即结构簇构形度 Q 值与倒塌模式密切相关:构形度 Q 值变化均匀,则结构整体刚度均匀,在强震作用下易出现强度破坏倒塌模式;构形度 Q 值变化不均匀,则结构存在薄弱区域,在强震作用下易出现动力失稳倒塌模式。根据文献[23]的研究成果,本文建立的优化模型如下。

2.1 优化目标

以凝聚过程中自由簇构形度 Q 值标准差最小为优化目标,即:

$$\min(S_T(\lg Q)) = \min \left\{ \left(\sum_{i=1}^n (\lg Q_i - \lg \bar{Q})^2 / (n-1) \right)^{1/2} \right\} \quad (3)$$

式中: Q 为自由簇构形度数值; Q_i 表示第*i*个自由簇的构形度数值; n 为自由簇数量; \bar{Q} 为*n*个自由簇构形度的均值。

2.2 优化变量

以构件截面尺寸为优化变量,即:

$$D_i \times t_i, \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

式中: D_i 为网壳第*i*根杆件的外径; t_i 为网壳第*i*根杆件的壁厚; n 为结构杆件数量;其中外径 D_i 和壁厚 t_i 均为离散变量。杆件截面规格应满足如下:

$$D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

$$t_{\min} \leq t_i \leq t_{\max}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (6)$$

式中: D_{\min} 和 D_{\max} 分别为第*i*根杆件外径的最小值和最大值; t_{\min} 和 t_{\max} 分别为第*i*根杆件壁厚的最小值和最大值。

2.3 约束条件

1) 长细比约束条件:

$$\lambda_i = \frac{l_{0i}}{i} \leq [\lambda], \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (7)$$

式中: λ_i 为第*i*根杆件的长细比; l_{0i} 为第*i*根杆件的计算长度; i 为第*i*根杆件的截面回转半径; $[\lambda]$ 为单层球壳结构的容许长细比。受压杆件的容许长细比取 150;受拉杆件的容许长细比取 300。

2) 位移约束条件:

$$w_{\max} \leq \frac{L}{400} \quad (8)$$

式中: w_{\max} 为单层球壳结构的节点最大挠度; L 为结构跨度。

3) 强度约束条件:

$$\frac{N_i}{A_{ni}} \pm \frac{M_{xi}}{\gamma_x W_{nxi}} \pm \frac{M_{yi}}{\gamma_y W_{myi}} \leq f, \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (9)$$

式中: N_i 为第*i*根杆件的轴力值; A_{ni} 为第*i*根杆件的净截面积; M_{xi} 和 M_{yi} 分别为第*i*根杆件两个主轴方向的弯矩值; γ_x 和 γ_y 为截面塑性发展系数,此处取值为 1.15; W_{nxi} 和 W_{myi} 分别为第*i*根杆件两个主轴方向的净截面抵抗矩; f 为构件材料的强度设计值。

4) 稳定约束条件:

$$\frac{N_i}{\varphi_i A_i} + \frac{\beta_{mi} M_{xi}}{\gamma_x W_{xi} \left(1 - 0.8 \frac{N_i}{N_{Ei}} \right)} + \eta \frac{\beta_{ti} M_{yi}}{\varphi_{bi} W_{yi}} \leq f, \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (10)$$

式中: A_i 为第*i*根杆件的毛截面面积; W_{xi} 和 W_{yi} 分别为第*i*根杆件两个主轴方向的毛截面抵抗矩; φ_i 为第*i*根杆件的轴心受压稳定系数; β_{mi} 和 β_{ti} 分别为第*i*根杆件在弯矩作用平面内和平面外的等效弯

矩系数; γ_x 为截面塑性发展系数; η 为截面影响系数; φ_{bi} 为均匀弯曲受弯构件的整体稳定系数; N'_{Ei} 为第 i 根杆件的欧拉临界力。

2.4 惩罚函数

由于优化模型存在约束条件, 因此优化过程中采用惩罚函数对违反约束条件的目标函数值进行惩罚。本文采用 Gen 和 Cheng 的惩罚函数^[24], 其构造如下:

$$p(x) = 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{\Delta b_i(x)}{b_i} \right]^\alpha \quad (11)$$

$$\Delta b_i(x) = \max \{0, g_i(x) - b_i\} \quad (12)$$

式中: x 为当前种群中的一个个体; $\Delta b_i(x)$ 为个体 x 对于第 i 项约束条件的违反量; $g_i(x)$ 为个体 x 对于第 i 项约束条件的计算值; b_i 为第 i 项约束条件的界限值; m 为个体 x 违反的约束条件数量; α 为调节惩罚力度的参数, 本文取 1。

3 遗传-模拟退火算法

3.1 理论基础

遗传算法(GA)的理论基础是生物进化理论和遗传学说, 通过模拟自然界的自然选择和生物的有性繁殖, 寻找优化问题的相对最优解^[25]。遗传算法的主要操作包括选择、交叉和变异。由于遗传算法采用种群搜索策略, 并且直接以目标函数值作为搜索信息, 不受目标函数和约束空间的连续性或可导性限制, 因此能够快速有效的搜索复杂、高度非线性和多维空间问题, 但是遗传算法用于实际结构优化分析时, 容易出现早熟收敛现象。模拟退火算法(SA)的理论基础是统计物理学的固体退火原理, 通过赋予搜索过程一种时变且最终趋于零的概率突跳性, 能够有效避免算法陷入局部最优, 并最终趋于全局最优^[26]。模拟退火算法是对 Metropolis 算法进行迭代的优化算法, 具有通用性和灵活性, 同样适用于难以求导和导数不存在的优化问题, 但是模拟退火算法用于实际结构优化分析时, 存在计算效率低的缺点。

由于遗传算法和模拟退火算法均属于基于概率分布机制的优化算法, 并且二者均存在不同的优缺点^[27]。因此本文将遗传算法和模拟退火算法作为子算法, 通过混合策略构造出一种遗传-模拟退火算法(GASA), 其构造出发点如下:

1) 优化机制融合: 遗传算法的优化机制是优胜

劣汰; 模拟退火算法的优化机制是概率接受准则。两种优化机制的混合有利于丰富优化过程中的搜索行为, 增强算法在全局和局部的搜索能力和效率。

2) 优化结构互补: 遗传算法采用种群并行搜索结构, 模拟退火算法采用单点串行优化结构。将两种优化结构相结合, 可以提高算法的整体优化性能。同时, 模拟退火算法作为一种自适应变概率的变异操作, 可以有效增强和补充遗传算法的局部进化能力。

3) 优化行为互补: 遗传算法经常出现早熟收敛现象, 这主要因为算法进程后期, 较高适应度个体会控制整个种群, 此时选择操作对当前种群外的变量空间缺乏探索能力, 交叉操作又对整个种群的进化能力变得非常有限, 而小概率的变异操作难以增加种群多样性。另一方面, 理论上模拟退火算法的全局收敛对退温历程的限制条件很苛刻, 因此算法的时间性能较差。将这两种算法结合之后, 模拟退火算法可以控制算法的收敛性, 避免出现过早收敛, 同时遗传算法内含并行性能能够提高算法的时间性能。

3.2 优化流程

遗传-模拟退火算法是以遗传算法为主体流程, 将模拟退火算法的优化机制融入其中, 其计算流程如图 2 所示。遗传-模拟退火算法计算流程的解释如下:

1) 编码: 本文采用二进制编码方案。对于离散优化变量, 其相应的编码串位数取决于此变量的取值数目。

2) 适应度函数: 适应度函数用于评价个体的优良程度。本文的优化目标是使目标函数达到最小, 因此适应度函数 $F(x)$ 表示为:

$$F(x) = \begin{cases} f_{\max} - f(x), & f(x) < f_{\max} \\ 0, & f(x) \geq f_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $f(x)$ 为目标函数; f_{\max} 为当代种群中个体目标函数的最大值。

3) 选择、交叉和变异: 本文采用轮盘赌选择方案, 利用比例于各个个体适应度的概率决定个体是否被选中, 实现种群的优胜劣汰。交叉和变异用于产生新的个体, 为了提高搜索效率, 本文采用自适应策略根据种群实际情况随机调整交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的大小^[28], 即:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{P_{c1} - P_{c2}}{F_{max} - \bar{F}} (F' - \bar{F}), & F' \geq \bar{F} \\ P_{c1}, & F' < \bar{F} \end{cases} \quad (14)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{P_{m1} - P_{m2}}{F_{max} - \bar{F}} (F - \bar{F}), & F \geq \bar{F} \\ P_{m1}, & F < \bar{F} \end{cases} \quad (15)$$

式中： P_{c1} 为交叉概率的上限值； P_{c2} 为交叉概率的下限值； F_{max} 为群体中最大的适应度值； \bar{F} 为每代种群的平均适应度值； F' 为要交叉的两个个体中较大的适应度值； P_{m1} 为变异概率的上限值； P_{m2} 为变异概率的下限值； F 为要变异个体的适应度值。

4) 初始温度及温度衰减函数：初始温度 t_0 过高会影响算法的时间性能，初始温度 t_0 过低会影响算法的优化质量。本文采用自适应策略^[29]，根据初始种群中个体适应度确定初始温度 t_0 ，即：

$$t_0 = -|F_{0,max} - F_{0,min}| / \ln p_r \quad (16)$$

式中： $F_{0,max}$ 、 $F_{0,min}$ 为初始种群个体适应度的最大值和最小值； p_r 为初始接受概率。

温度衰减函数采用指数退温函数，即：

$$t_{k+1} = \alpha t_k \quad (17)$$

式中： α 通常取 0.5~0.99； k 为当前迭代次数。

5) 概率接受函数：采用 Metropolis 概率接受准则，即：

$$P_i = \begin{cases} 1, & F(j) \leq F(i) \\ \exp\left(\frac{F(i) - F(j)}{t}\right), & F(j) > F(i) \end{cases} \quad (18)$$

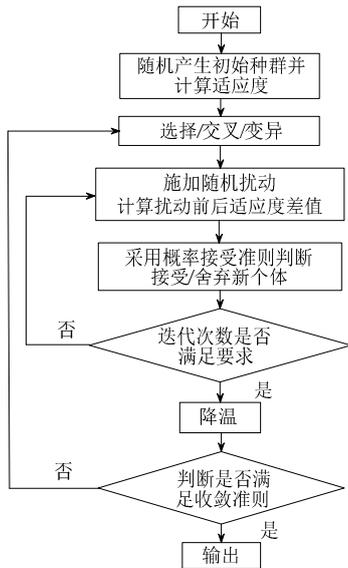


图2 遗传-模拟退火算法(GASA)程序流程

Fig.2 Program flow of the genetic-simulated annealing algorithm (GASA)

从式(18)可以看出：在算法开始阶段，模拟温度 t 较高，算法可以接受较差的恶化解；随着 t 值的减小，只能接受较好的恶化解；最后当 t 值趋于 0 时，不能接受恶化解。上述概率接受准则能够使算法跳出局部最优，而更有可能求得整体最优解。

6) 内外循环终止准则：为了兼顾算法的优化性能和时间性能，Metropolis 算法的迭代次数采用固定长度法。算法的终止准则为采用遗传算法的停止准则，即达到最大进化代数。

4 70m 跨度单层球壳构形度优化

4.1 结构布置

K6 型单层球壳的跨度为 70m，矢跨比为 1/2.5，结构布置如图 3 所示。整个结构共有 930 根杆件和 331 个节点，支座采用固定支座，分布在单层球壳最外环的每一个节点处。结构杆件均采用 Q235 钢管，弹性模量为 $2.06 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ ，钢材密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，泊松比为 0.3。作用于单层球壳结构上的各种荷载标准值如下：球壳自重为 0.4 kN/m^2 ，节点自重为 0.1 kN/m^2 ，屋面板自重为 0.6 kN/m^2 ，设备管道自重为 0.4 kN/m^2 ，屋面活荷载为 0.5 kN/m^2 ，因此作用于单层球壳结构上的均布荷载设计值为 $q = 1.2 \times \text{恒荷载} + 1.4 \times \text{活荷载} = 2.5 \text{ kN/m}^2$ ，以等效集中荷载的形式作用于节点上，等效节点力为 20.50 kN 。根据静力满应力设计准则，结构采用的杆件规格如表 1 所示。

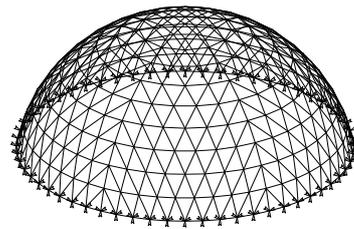


图3 K6 型单层球壳

Fig.3 K6 single-layer spherical shell

表1 单层球壳的杆件规格

Table 1 Sectional specifications of the shell

杆件名称	杆件规格/mm
环向杆件	108×4
斜向杆件	114×4
径向杆件	127×4/133×4

注：从内向外第 1~4 圈径向杆件采用 $\Phi 127 \times 4$ ，5~10 圈的径向杆件采用 $\Phi 133 \times 4$ 。

4.2 结构构形度优化

采用 C++ 语言编制单层球壳结构构形易损性分析程序，对上述单层球壳结构进行凝聚过程分析。

在初始凝聚阶段,自由簇构形度 Q 值的变化规律如图 4 所示。可以看出, Q 值变化不均匀,其中自由簇 C58、C59、C72、C73 的构形度数值相对较小,自由簇 C43 的构形度数值相对较大。因此将自由簇 C43、C58、C59、C72、C73 对应的杆件截面尺寸作为优化变量,采用 GASA 算法和构形度优化模型对此单层球壳结构进行优化。为了减少优化变量的数量,将位于对称位置上的杆件进行归类。归类处理后,优化区域内的杆件分为 5 类,即共存在 5 组优化变量 $D_i \times t_i (i=1,2,\dots,5)$,优化变量与杆件位置的对应关系如图 5 所示。在算法进程中,优化变量 $D_i \times t_i (i=1,2,\dots,5)$ 按照离散变量进行取值,每组截面尺寸优化变量的取值范围如表 2 所示。可以看出,每组优化变量 $D_i \times t_i$ 对应的杆件取值存在 16 种,因此每组优化变量 $D_i \times t_i$ 对应的二进制编码位数至少为 4 位,一条染色体对应的二进制编码串位数为 $4 \times 5 = 20$ 位。

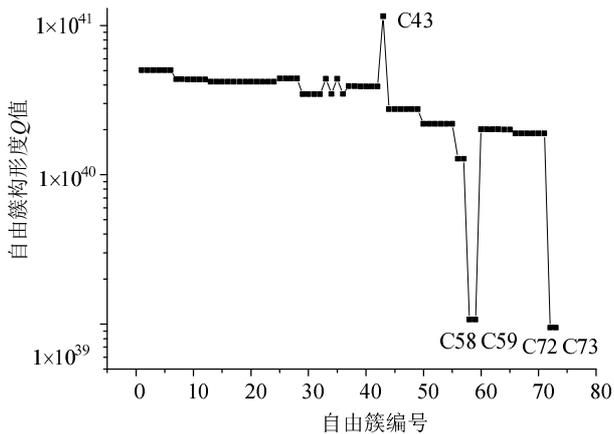


图 4 单层球壳自由簇构形度 Q 值变化规律

Fig.4 Variation of Q -values of free clusters of the dome

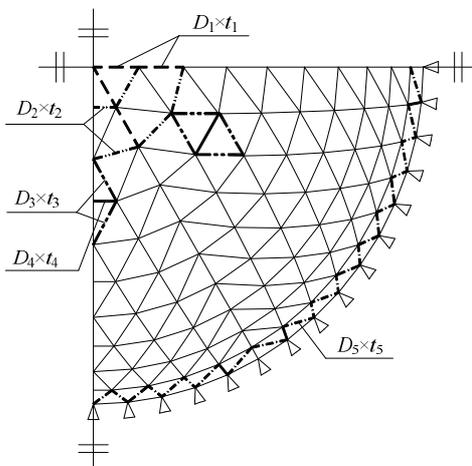


图 5 单层球壳优化变量对应的杆件位置

Fig.5 Position of bars corresponding to the optimization variables for the dome

表 2 单层球壳优化变量的取值范围

Table 2 Value range of optimization variables for the dome

规格编号	1	2	3	4	5	6	7	8
管径 D_i /mm	108	108	108	114	114	114	121	121
壁厚 t_i /mm	4	6	8	4	6	8	4	6
规格编号	9	10	11	12	13	14	15	16
管径 D_i /mm	121	127	127	127	133	133	140	140
壁厚 t_i /mm	8	4	6	8	4	6	4	6

4.3 优化结果

采用 C++ 语言编制遗传-模拟退火算法(GASA)程序, GASA 算法的计算参数如表 3 所示。目标函数值随算法进程的变化曲线如图 6 所示。可以看出,目标函数值随算法进程逐渐减小,最终收敛于 0.212,与优化前相比有明显降低。最终的优化结果如表 4 所示,优化后结构杆件最大长细比为 150,挠度为 0.03m,杆件最大强度应力为 114N/mm^2 ,杆件最大稳定应力为 203N/mm^2 ,满足式(7)~式(10)所示约束条件的要求。从表 4 可以看出优化前后杆件重量基本保持不变。

对优化后的单层球壳结构进行凝聚过程分析,得到初始凝聚阶段自由簇构形度 Q 值的变化规律如图 7 所示。可以看出,与优化前相比,优化后自

表 3 单层球壳构形度优化计算参数

Table 3 GASA calculation parameters of the single-layer spherical shell

参数名称	参数取值
种群大小	10
进化代数	25
交叉概率	$P_{c1}=0.9, P_{c2}=0.7$
变异概率	$P_{m1}=0.05, P_{m2}=0.005$
降温系数	0.95
Lk	1
pr	0.9

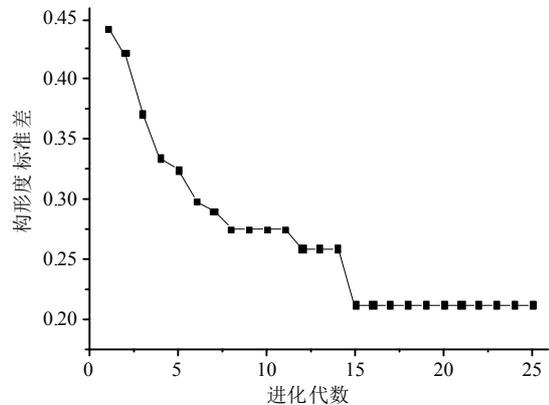


图 6 单层球壳优化的目标函数值变化曲线

Fig.6 Variation curve of the objective function value of the single-layer spherical shell

表 4 单层球壳的优化结果

Table 4 Optimization results of the single-layer spherical shell

优化变量	优化结果
$D_1 \times t_1 / \text{mm}$	108×4
$D_2 \times t_2 / \text{mm}$	108×4
$D_3 \times t_3 / \text{mm}$	127×6
$D_4 \times t_4 / \text{mm}$	133×4
$D_5 \times t_5 / \text{mm}$	108×4
目标函数值 $S_r(\lg Q)$	0.212
杆件重量/kg	50445
计算时间/h	13.4

注：原试验模型杆件重量为 50210kg。

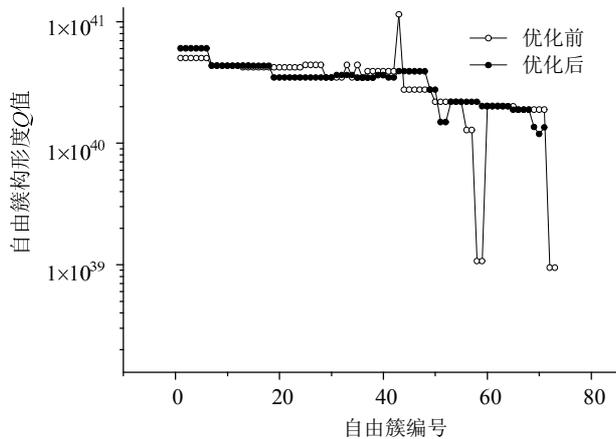


图 7 优化后球壳的自由簇构形度 Q 值变化曲线

Fig.7 Variation curve of Q value of the optimized dome

由簇构形度 Q 值的波动明显减小, 说明优化后结构整体刚度均匀。按照一致缺陷模态法对结构施加 $L/300$ 的初始缺陷, 采用弧长法对其进行弹塑性全过程稳定分析, 得到的荷载-位移曲线如图 8 所示。可以看出, 优化后的单层球壳结构失稳临界荷载为 103.5kN, 大于 5 倍的等效节点力, 满足静力稳定性要求。

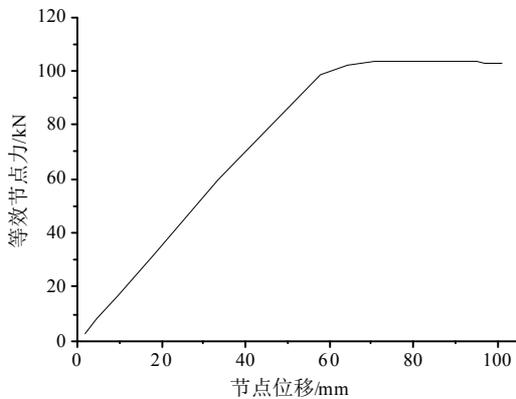
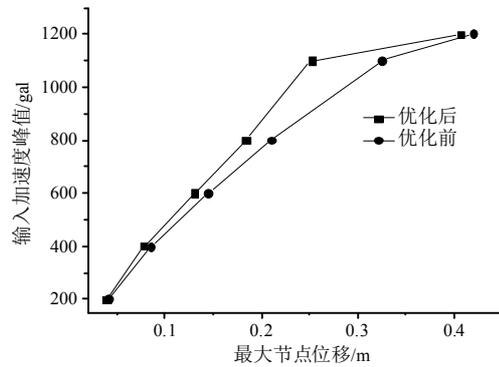


图 8 优化后球壳的荷载-位移全过程曲线

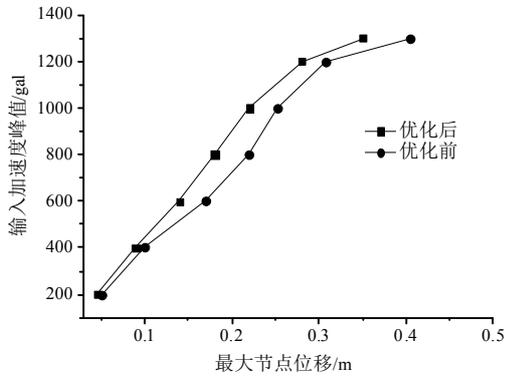
Fig.8 Load-displacement curve of the optimized dome

为了分析优化后的单层球壳结构在地震作用

下的倒塌破坏特征, 采用 ANSYS 有限元分析软件对优化结构进行动力时程分析。杆件采用 BEAM189 单元, 材料为理想弹塑性材料, 同时考虑几何非线性, 阻尼假定为 Rayleigh 阻尼, 阻尼比取 0.02。考虑地震作用时, 重力荷载代表值为 1.75kN/m^2 , 以等效集中质量的形式作用于节点上。基底分别三向输入 TAFT 地震波和 El-Centro 地震波, 通过逐级提高输入地震波的加速度峰值, 得到两种地震波作用下结构输入 PGA-节点最大位移曲线分别如图 9(a)、图 9(b)所示。其中优化前后结构在 TAFT 地震波作用下的极限 PGA 为 1200gal, 在 El-Centro 地震波作用下的极限 PGA 为 1300gal。



(a) TAFT 地震波



(b) El-Centro 地震波

图 9 优化前后球壳输入地震波峰值-最大节点位移曲线

Fig.9 Peak ground acceleration-maximum nodal displacement curve of the shell before and after optimization

根据图 9(a)、图 9(b)优化前后网壳结构在地震作用下的荷载峰值-最大节点位移曲线的变化趋势上可以看出, 在两种地震波作用下, 随着动荷载强度的提高, 优化后网壳结构在地震作用下的变形能力和延性较优化前得到了提升, 强度破坏特征更加明显。结构在遭遇较低水平的地震作用时, 能够产生一定程度的变形, 例如当输入 PGA 为 400gal 时, 优化后结构的最大节点位移分别为 0.085m 和 0.1m,

大于优化前的最大节点位移 0.07m 和 0.09m, 而且当 PGA 为 600gal 及以上时, 优化前后结构的挠度差异更加显著。优化后结构的倒塌破坏特征能够使结构在小震时的变形更加明显, 引起人们警觉, 及时加固修复, 进而避免在遭遇未预料的强震时结构发生无征兆的倒塌破坏。

5 结论

(1) 网壳结构在地震作用下的倒塌模式与结构构形度密切相关。本文以构形度标准差最小为优化目标函数, 以杆件截面尺寸(离散变量)为优化变量, 并考虑长细比、挠度、杆件强度及稳定等约束条件, 建立单层网壳结构构形度优化模型, 以对结构的倒塌模式进行控制。

(2) 将遗传算法(GA)的优化机制和模拟退火算法(SA)的优化机制相融合, 基于混合策略构造出遗传-模拟退火优化算法(GASA)。GASA 通过选择、交叉和变异使搜索过程快速进入最有希望的重点区域, 防止优化效率迟滞; 通过赋予搜索过程中各状态可控的概率突跳性, 避免算法陷入局部最优; 通过自适应策略削弱算法对优化参数的依赖性。GASA 实现了两种算法优化机制的融合和优化行为的互补, 为解决网壳结构复杂优化问题提供了路径。

(3) 以跨度为 70m、矢跨比为 1/2.5 的 K6 型单层球壳结构为例, 通过凝聚过程识别出构形度不均匀区域。以此区域对应的杆件截面尺寸为优化变量, 采用 GASA 算法和构形度优化模型对此单层球壳结构进行优化。结果表明: 优化后结构满足静力稳定性要求, 在地震作用下的变形能力和延性较优化前得到提升, 其强度破坏倒塌特征更加明显; 与优化前相比, 优化后结构的杆件重量基本保持不变。因此本文的优化模型和 GASA 算法可以胜任大型单层球壳结构地震作用下的倒塌模式优化问题。

参考文献:

- [1] 沈世钊, 支旭东. 球面网壳结构在强震下的失效机理[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 11—29.
Shen Shizhao, Zhi Xudong. Failure mechanism of reticular shells subjected to dynamic actions [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 11—29. (in Chinese)
- [2] 支旭东, 范峰, 沈世钊. 凯威特型单层球面网壳在强震下的失效研究[J]. 工程力学, 2008, 25(9): 7—12.
Zhi Xudong, Fan Feng, Shen Shizhao. Seismic failure of single-layer reticulated domes [J]. Engineering

- Mechanics, 2008, 25(9): 7—12. (in Chinese)
- [3] 贺拥军, 齐冬莲, 董石麟. 遗传算法在双层圆柱面网壳结构优化中的应用[J]. 建筑结构, 2002, 32(3): 60—61.
He Yongjun, Qi Donglian, Dong Shilin. Application of genetic algorithm in the optimization of double-layer cylindrical latticed shell [J]. Building Structure, 2002, 32(3): 60—61. (in Chinese)
- [4] 徐菁, 杨松森, 刁岩松. 单层球面网壳的优化设计[J]. 空间结构, 2006, 12(3): 35—37.
Xu Jing, Yang Songsen, Diao Yansong. Optimum design of single-layer spherical lattice shells [J]. Spatial Structures, 2006, 12(3): 35—37. (in Chinese)
- [5] Kameshki E S, Saka M P. Optimum geometry design of nonlinear braced domes using genetic algorithm [J]. Computers & Structures, 2007, 85(1/2): 71—79.
- [6] 牟在根, 梁杰, 随军, 等. 基于小生境遗传算法的单层网壳结构优化设计研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(2): 115—119.
Mou Zaigen, Liang Jie, Sui Jun, et al. Study of optimum design of single layer dome structures based on niche genetic algorithm [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(2): 115—119. (in Chinese)
- [7] 江季松, 叶继红. 遗传算法在单层网壳质量优化中的应用[J]. 振动与冲击, 2009, 28(7): 1—7.
Jiang Jisong, Ye Jihong. Application of genetic algorithm in section optimization of a single layer dome [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(7): 1—7. (in Chinese)
- [8] Grandhi R V. Structural optimization with frequency constraints—a review [J]. AIAA Journal, 1993, 31(12): 2296—2303.
- [9] Sedaghati R, Suleman A, Tabarrok B. Structural optimization with frequency constraints using the finite element force method [J]. AIAA Journal, 2002, 40(2): 382—388.
- [10] Wang D, Zhang W H, Jiang J S. Truss optimization on shape and sizing with frequency constraints [J]. AIAA Journal, 2004, 42(3): 622—630.
- [11] Gomes H M. Truss optimization with dynamic constraints using a particle swarm algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(1): 957—968.
- [12] Cassis J H, Schmit L A. Optimal structural designs with dynamic constraints [J]. Journal of the Structural Division ASCE, 1976, 102: 2053—2071.
- [13] Kapoor M P, Kumarasamy K. Optimum configuration of transmission towers in dynamic response regime [C]// Proceedings of International Symposium on Optimum Structural Design. Tucson, USA, Arizona University, 1981: 73—82.
- [14] Kang B S, Choi W S, Park G J. Structural optimization under equivalent static loads transformed from dynamic loads based on displacement [J]. Computers & Structures, 2001, 79(2): 145—154.

(参考文献[15]—[29]转第 181 页)

- 槽形截面轴压构件试验研究及承载力分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(11): 17—25.
- Li Yuanqi, Wang Shukun, Shen Zuyan, et al. Experimental study and load-carrying capacity analysis of high-strength cold-formed thin-walled steel lipped channel columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(11): 17—25. (in Chinese)
- [11] 李元齐, 刘翔, 沈祖炎, 等. 高强冷弯薄壁型钢卷边槽形截面偏压构件试验研究及承载力分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(11): 26—35.
- Li Yuanqi, Liu Xiang, Shen Zuyan, et al. Experimental study and load-carrying capacity analysis of eccentrically-compressed high-strength cold-formed thin-walled steel lipped channel columns [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(11): 26—35. (in Chinese)
- [12] 姚行友. 冷弯薄壁型钢开口截面构件畸变屈曲性能与设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2012: 146—153, 155—187.
- Yao Xingyou. Distortional buckling behavior and design method of cold-formed thin-walled steel members with opening section [D]. Shanghai: Tongji University, 2012: 146—153, 155—187. (in Chinese)
- [13] 姚谏. 普通卷边槽钢的弹性畸变屈曲荷载[J]. 工程力学, 2008, 25(12): 30—34.
- Yao Jian. Distortional buckling loads of cold-formed lipped channels [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12): 30—34. (in Chinese)
- [14] 姚谏, 滕锦光. 冷弯薄壁卷边槽钢弹性畸变屈曲分析中的转动约束刚度[J]. 工程力学, 2008, 25(4): 65—69.
- Yao Jian, Teng Jinguang. Web rotational restraint in elastic distortional buckling of cold-formed lipped channel sections [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(4): 65—69. (in Chinese)
- [15] 姚谏, 程婕, 刑丽. 冷弯薄壁卷边槽钢梁的弹性畸变屈曲荷载简化计算公式[J]. 工程力学, 2011, 28(10): 21—26.
- Yao Jian, Cheng Jie, Xing Li. Simple formulae for distortional buckling loads of cold-formed lipped channels subjected to major axis bending [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(10): 21—26. (in Chinese)
- [16] 罗洪光, 郭耀杰, 马石城. 斜卷边冷弯薄壁槽钢轴压柱弹性畸变屈曲计算[J]. 工程力学, 2012, 29(4): 72—77.
- Luo Hongguang, Guo Yaojie, Ma Shicheng. Calculation of the elastic distortional buckling for cold-formed thin-walled channel columns with inclined simple edge stiffeners under axial pressure [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 72—77. (in Chinese)
- [17] 周绪红, 王世纪. 薄壁构件稳定理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 94—95.
- Zhou Xuhong, Wang Shiji. Stability and application of thin-walled members [M]. Beijing: Science Press, 2009: 94—95. (in Chinese)

(上接第 159 页)

- [15] Hajirasouliha I, Pilakoutas K, Moghaddam H. Topology optimization for the seismic design of truss-like structures [J]. Computers & Structures, 2011, 89(7/8): 702—711.
- [16] 叶继红, 江季松. 遗传算法在单层球壳动力响应优化中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(2): 414—419.
- Ye Jihong, Jiang Jisong. Application of genetic algorithm in dynamic response optimization of single layer dome [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(2): 414—419. (in Chinese)
- [17] Agarwal J, Blockley D J, Woodman N J. Vulnerability of systems [J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2001, 18(2): 141—165.
- [18] Wu X, Blockley D I, Norman J Woodman. Vulnerability of structural systems part1: Rings and clusters [J]. Civil Engineering Systems, 1993, 10(4): 301—317.
- [19] Wu X, Blockley D I, Norman J Woodman. Vulnerability of structural systems part2: Failure scenarios [J]. Civil Engineering Systems, 1993, 10(4): 319—333.
- [20] Lu Z, Yu Y, Woodman N J, Blockley D I. A theory of structural vulnerability [J]. The Structural Engineer, 1999, 77(18): 17—24.
- [21] Agarwal J, Blockley D I, Woodman N J. Vulnerability of 3-dimensional trusses [J]. Structural Safety, 2001, 23(3): 203—220.
- [22] Agarwal J, Blockley D J, Woodman N J. Vulnerability of structural systems [J]. Structural Safety, 2003, 25(3): 263—286.
- [23] Ye J H, Liu W Z, Pan R. Research on failure scenarios of domes based on form vulnerability [J]. Science in China (Series E: Technological Sciences), 2011, 54(11): 2834—2853.
- [24] Gen M, Cheng R. A survey of penalty techniques in genetic algorithms [C]// Proceedings of the 1996 International Conference on Evolutionary Computation. Nagoya University, Japan, IEEE, 1996: 804—809.
- [25] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning [M]. New York: Addison Wesley, 1989: 12—43.
- [26] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing [J]. Science, 1983, 220(4598): 671—680.
- [27] 王凌. 智能优化算法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 22—46.
- Wang Ling. Intelligent optimization algorithms and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 22—46. (in Chinese)
- [28] Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. IEEE Trans on SMC, 1994, 24(4): 656—667.
- [29] Jeong I K, Lee J J. Adaptive simulated annealing genetic algorithm for system identification [J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, 1996, 9(5): 523—532.