

单层球面网壳选型优化设计*

刘宗发¹, 晏致涛², 王彦生¹, 李作良¹

(1. 河南科技大学 建筑工程学院, 洛阳 471003; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:采用改进的自适应遗传算法来解决单层球面网壳结构构件截面优化问题,并采用 VC++ 语言编写了相应的自适应遗传算法和有限元计算程序,可以实现单层球面网壳结构的自动优化设计。设计了不同类型、跨度和矢跨比的网壳优化算例;并通过按照现行相关规范优化设计的单层球面网壳和符合现行相关规范要求但未经优化设计的单层球面网壳用 ANSYS 软件进行考虑几何非线性屈曲分析,分别确定其屈曲荷载与设计荷载之比,以比较它们的受力和安全性能。结果表明采用自适应遗传算法进行离散变量的网壳结构截面优化设计容易收敛,优化效果良好。如果综合考虑经济和安全因素,设计网壳时,其矢跨比取 $1/6 \sim 1/5$ 比较合适。

关键词:单层球面网壳; 结构优化设计; 遗传算法; 屈曲分析

中图分类号: TU33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7329(2007)03-0083-04

Scheme Selection and Optimum Design of Single-Layer Reticulated Domes

LIU Zong-fa¹, YAN Zhi-tao², WANG Yan-sheng¹, LI Zuo-liang¹

(1. College of Construction Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The member bar's section optimization problem of single-layer reticulated domes is solved with adaptive genetic algorithm, and the program of adaptive genetic algorithm and finite element is written in VC++ language according to the introduced algorithm, which can realize automatic optimum design of single-layer reticulated domes. Some optimum examples of Single-Layer Reticulated Domes design are given, whose type and span and the ratio of height to span are different. The ratio of buckling load to designing load, which can be used to evaluate bearing and safety performance, will be got through the buckling analysis of the single-layer reticulated domes which are optimum designed according to applicable procedures and the single-layer reticulated domes which are designed according to applicable procedures but not be optimized. Thus reliability of optimum design and performance of kinds of single-layer reticulated domes can be assessed. The optimum result of the single-layer reticulated domes, which is designed with the optimum design program of latticed domes based on adaptive genetic algorithm and finite element theory, indicated that the optimum design program has the character of easy convergence, good and reliable result. If the economic factor and safety factor are taken into account integrally, that the ratio of rise to span of single-layer reticulated domes equals to $1/6 \sim 1/5$ is reasonable

Keywords: single-layer reticulated domes; structural optimum design; genetic algorithm; buckle analysis

单层球面网壳结构目前已被广泛应用于大跨度建筑结构。单层球面网壳结构形式多样,如用传统的方法进行设计,工作量繁重,受时间和费用的限制难以进行多方案比较,往往导致最终设计方案并非最优方案。若用优化方法进行设计,工程结构设计便由“分析与校核”发展为“综合与优选”,使设计者由被动的分析、校核转为主动设计,这对提高工程结构的经济效益和功

能有重大意义^[1]。

传统的结构优化方法在理论上比较成熟,在实际工程中得到广泛应用。但对于单层网壳结构,用传统优化方法就比较困难。因单层网壳结构的每根杆件为空间梁单元,其承载力不仅取决于杆件的强度,还取决于网壳结构的整体稳定和局部稳定;在单层网壳结构设计过程中必须考虑其强度、刚度、稳定以及几何尺寸

* 收稿日期:2006-12-25

作者简介:刘宗发(1972-),男,河南信阳人,硕士,主要从事力学、结构研究。

等约束条件,而其中很多约束条件不能以显式表达,属隐式约束问题;难于计算出函数偏导数,优化时需将约束优化问题转为无约束优化问题;同时,单层网壳的每根杆件还要符合现有的规格和型号,即单层网壳结构的优化设计属于离散变量结构优化设计问题。近年来发展起来的遗传算法^[2]为解决结构优化问题开辟了一个新思路。它具有广泛的适用性,可以处理各类优化问题,尤其适用于传统的搜索方法解决不了的复杂和非线性问题。

采用 VC++ 语言编写了相应的自适应遗传算法和有限元计算程序,可以实现单层球面网壳结构的自动优化设计。并用 ANSYS 软件对优化前后的网壳进行考虑几何非线性的屈曲分析,确定其屈曲荷载与设计荷载之比,以比较它们的受力和安全性能,从而验证优化设计的可靠性和各类型网壳的技术经济性能的优劣。

1 网壳结构优化设计的数学模型^[3~5]

网壳结构主要由杆件、节点和屋面板组成。仅对单层球面网壳结构的杆件进行优化。

1) 设计变量。圆钢管杆件型号的编号。其截面特性依据(YB 231-70)。

2) 目标函数。以单层网壳的总重量为目标函数。

3) 约束条件

(1) 长细比条件:

$$\lambda_j = l_{0j} / i_j \leq [\lambda] \quad (1)$$

式中: i_j 为第 j 根杆件截面的回转半径, m ; l_{0j} 为第 j 根杆件的计算长度, m ; $[\lambda]$ 为杆件的容许长细比。

(2) 网壳最大挠度的限制:

$$f_{\max} \leq L_s / 400 \quad (2)$$

式中: L_s 为网壳的跨度, m 。

(3) 杆件强度的约束条件:

$$\sigma_{Qj} = \frac{N_j}{A_j} \pm \frac{M_{yj}}{1.15W_j} \pm \frac{M_{zj}}{1.15W_j} \leq [\sigma] \quad (3)$$

式中: N_j 为第 j 根杆件的轴心压力或拉力, kN ; A_j 为第 j 根杆件的截面积, m^2 ; W_j 截面抗弯模量, m^3 ; M_{yj} 和 M_{zj} 分别为作用在第 j 根杆件两个主平面内的最大弯矩, $kN \cdot M$; $[\sigma]$ 为材料抗弯强度设计值。

(4) 压弯杆件稳定性约束条件:

$$\sigma_{w_j} = \frac{N_j}{\varphi_j A_j} + \frac{M_{yj}}{1.15W \left(1 - 0.8 \frac{N_j}{N'_{Eyi}}\right)} + 0.7 \frac{M_{zj}}{W} \leq [\sigma] \quad (4)$$

式中: $N'_{Eyi} = \frac{\pi^2 EA_j}{1.1\lambda_j^2}$; φ_j 为轴心受压构件稳定系数。其它符号同式(3)。

(5) 压杆局部稳定条件:

$$\beta_j = \frac{R_{0j}}{t_j} \leq 50 \frac{235}{f_y} \quad (5)$$

式中: R_{0j} 为第 j 根杆件的外半径; t_j 为第 j 根杆件的壁厚; f_y 为钢材的屈服强度, kN/mm^2 。

(6) 杆件截面外半径和壁厚的限制:

$$R_{0j} \geq R_{\min}, t_j \geq t_{\min} \quad (6)$$

2 遗传算法

2.1 遗传算法的实现技术

遗传算法是基于生物进化论中自然遗传机制的优化算法。它是由 John Holland 最先提出^[6], 后经 Goldberg 等对遗传算法理论及其它领域的应用进行较为全面的分析和例证, 从而使其得到普及和推广^[7]。遗传算法一般包括编码、产生群体、计算适应度、再生、交叉、变异等操作。具体步骤为:

1) 随机地建立由字符串组成的初始群体: 将优化问题中的所有变量进行二进制编码, 然后将各自变量的二进制代码连在一起即得到一个二进制字符串, 该串就代表了优化问题的一个可能解。

2) 计算各个体的适应度: 适应度用来度量群体中各个个体在优化计算中有可能达到或接近于或有助于找到最优解的优良程度。适应度函数 F 是由目标函数来表示的:

$$F = \frac{C_0}{W(1+C)} \quad (7)$$

式中: C_0 为常数, 取 106; W 为目标函数值; C 为约束条件罚函数方程。

3) 根据遗传概率, 利用选择、交叉、变异等遗传操作产生新群体^[8]。

4) 反复执行第二、三步后, 一旦达到终止条件, 选择最佳个体作为遗传算法的结果。

2.2 约束的处理

在网壳结构优化设计中, 通常遇到的应力、变形、位移及稳定性等方面的约束条件。

作为对策, 可采取罚函数法。其基本思想是设法对个体违背约束条件的情况给予惩罚, 并将此惩罚体现在适应度函数设计中。

本文中约束条件罚函数方程的表达式如下:

$$C = \sum_{i=1}^{N_e} C_i^{\sigma} + \sum_{i=1}^{N_e} C_i^{w} + \sum_{i=1}^{N_e} C_i^{\lambda} + \sum_{i=1}^{N_d} C_i^f \quad (8)$$

式中: C_i^{σ} , C_i^{w} , C_i^{λ} , C_i^f 分别为强度、稳定性、长细比和位移约束罚函数方程; N_e , N_d 为网壳中的杆件数和节点数。

3 优化算例

为了验证基于自适应遗传算法的优化程序在结构优化设计中的效果,采用 VC++ 语言编写了相应的自适应遗传算法和有限元计算程序,并依照现行的网壳结构技术规程和钢结构设计规范^[4,5]和所建立的优化数学模型,设计了不同跨度、不同矢高比的 K6-7 和 K8-7 型凯威特型单层球面网壳优化设计算例。其基本参数设置如下:凯威特型单层球面网壳的支撑都设定为周边铰支撑型;荷载也为均布荷载,其值为 $q = 2.5 \text{ kN/m}^2$;网壳的各杆件均为热轧无缝钢管(参见

YB231-70),可供选择的钢管型号有 255 种;钢材的弹性模量 $E = 2.06 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$,材料密度 $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,强度设计值 $[\sigma] = 2.15 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$;位移的最大容许值 $[\delta] = L_s/400$,其中 L_s 为网壳的跨度;自适应遗传算法的种群大小为 200,最大世代数为 300 代,用二进制表示的染色体中的每个设计变量长度为 8。不同结构类型、不同跨度、不同矢跨比的单层凯威特型球面网壳遗传进化过程如图 1,优化前(优化初始随机选取的符合规范要求的网壳)和优化后耗钢量如表 1。

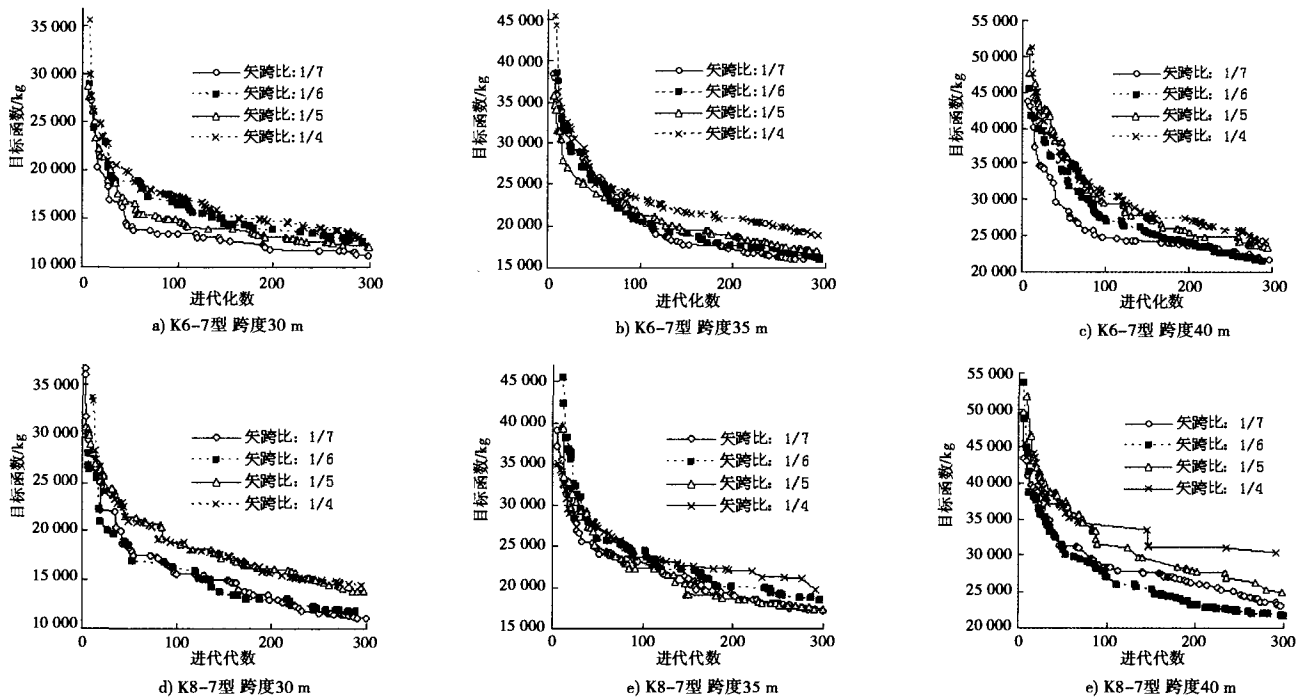


图 1 不同类型和跨度的网壳遗传进化过程

表 1 网壳优化前后耗钢量

网壳类型	跨度/m	矢跨比	优化前耗钢量/kg	优化后耗钢量/kg	优化前后耗钢量之比
K6-7	30	1/7	27 109.0	11 259.4	2.41
		1/6	28 852.6	12 562.1	2.30
		1/5	31 419.0	12 672.0	2.48
		1/4	35 573.6	13 049.9	2.73
	35	1/7	38 417.4	16 141.8	2.38
		1/6	38 519.8	16 037.3	2.40
		1/5	35 828.7	17 089.6	2.10
		1/4	45 490.1	18 957.6	2.40
	40	1/7	43 736.5	21 764.1	2.01
		1/6	45 368.8	21 439.8	2.12
		1/5	50 793.6	23 432.2	2.17
		1/4	51 329.8	24 391.8	2.10

续表 1

网壳类型	跨度/m	矢跨比	优化前耗钢量/kg	优化后耗钢量/kg	优化前后耗钢量之比
K8-7	30	1/7	36 606.6	11 092.1	3.30
		1/6	27 917.2	11 699.7	2.39
		1/5	30 774.8	13 906.2	2.21
		1/4	33 764.5	14 576.7	2.32
	35	1/7	39 097.3	17 198.9	2.27
		1/6	45 442.9	18 383.8	2.47
		1/5	39 624.4	17 414.7	2.28
		1/4	34 964.7	19 769.8	1.77
	40	1/7	49 511.0	23 064.4	2.15
		1/6	53 632.7	21 620.7	2.48
		1/5	51 858.9	25 035.2	2.07
		1/4	45 470.0	30 459.5	1.49

4 优化前后网壳的性能分析

理论和实践都表明,优化设计方法能收到很好的效果。但是由于各方面的原因,这种应用还远未达到与这门学科当前发展水平相适应的程度。原因之一就是怕这种设计会过度降低结构的安全度。为此,通过对按照现行相关规范优化设计的单层球面网壳和按照现行相关规范设计但未经优化的单层球面网壳用 ANSYS 软件进行考虑几何非线性的屈曲分析,确定其屈曲荷载与设计荷载之比,以比较它们的受力和安

是怕这种设计会过度降低结构的安全度。为此,通过对按照现行相关规范优化设计的单层球面网壳和按照现行相关规范设计但未经优化的单层球面网壳用 ANSYS 软件进行考虑几何非线性的屈曲分析,确定其屈曲荷载与设计荷载之比,以比较它们的受力和安

全性能,从而验证优化设计的可靠性和各类型网壳的受力性能^[9,10]。K6-7型和K8-7型不同跨度和矢跨比的单层凯威特型球面网壳优化前后屈曲荷载与设计荷载之比如表2和图2。

表2 网壳优化前后屈曲荷载与设计荷载关系

网壳类型	跨度/m	矢跨比	优化后 β	优化前 β	优化前 β 优化后 β
K6-7	30	1/7	10.95	23.21	2.12
		1/6	12.88	23.94	1.86
		1/5	16.49	46.87	2.84
		1/4	25.89	33.11	1.28
	35	1/7	8.20	29.69	3.62
		1/6	9.96	24.42	2.45
		1/5	14.58	32.91	2.26
		1/4	19.56	39.29	2.01
	40	1/7	7.56	12.73	1.68
		1/6	9.87	23.76	2.41
		1/5	14.75	34.33	2.33
		1/4	24.20	37.68	1.56
K8-7	30	1/7	6.77	25.62	3.78
		1/6	10.05	33.42	3.32
		1/5	15.25	41.39	2.71
		1/4	24.62	63.44	2.58
	35	1/7	6.06	16.15	2.67
		1/6	9.50	17.50	1.84
		1/5	13.32	25.54	1.92
		1/4	17.95	29.75	1.66
	40	1/7	5.97	12.44	2.08
		1/6	6.92	21.14	3.05
		1/5	14.75	34.33	2.33
		1/4	17.47	32.10	1.84

注: β 为屈曲荷载与设计荷载之比。

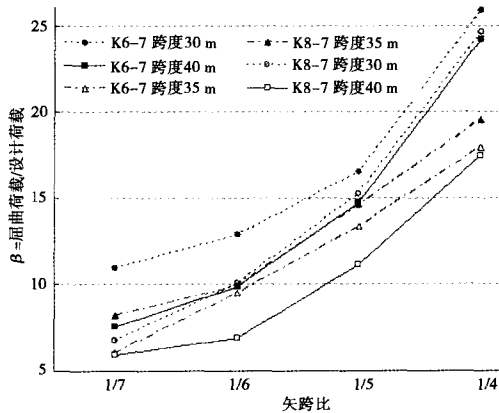


图2 不同类型和跨度的网壳优化后的 β 值与矢跨比关系

5 结论

通过对计算结果的分析,可以得到以下结论:

1)根据自适应遗传算法的实现技术和有限元结构分析理论编制了基于自适应遗传算法的网壳结构优化设计程序,并设计了不同跨度和矢跨比的K6-7型和K8-7型网壳优化算例。结果表明采用自适应遗传算法进行离散变量的网壳结构截面优化设计原理简单,容易收敛,结果可靠,优化效果良好。

2)屈曲分析结果表明:按照现行相关规范优化设计的网壳的屈曲荷载比按照现行相关规范设计但未优化的网壳(优化初始随机选取的符合规范要求的网壳)的屈曲荷载有大幅度的降低,即其安全储备也同时有大幅度的降低;但优化设计的网壳的屈曲荷载与设计荷载的比值一般高于网壳结构技术规程^[4]中5倍值的限制。这说明如果按现行相关规范设计,还是能满足规定的安全要求的。

3)相同结构类型、相同跨度的网壳随着矢跨比不同,其优化后的屈曲荷载与设计荷载比值是不同的。矢跨比越大,其屈曲荷载与设计荷载比值也越大,这就表明大矢跨比网壳要比小矢跨比网壳具有更高的安全储备。当网壳的矢跨比小到1/7时,其屈曲荷载与设计荷载的比值都接近规范的限值。所以网壳设计时,其矢跨比不应小于1/7;而对于较小矢跨比的网壳,设计时要提高相关的约束条件,以提高其安全储备。

4)用优化程序设计不同结构类型的网壳优化设计结果表明:不同结构类型的网壳的单位面积耗钢量相差不多。但这并没有考虑到屋面的耗材量,当矢跨比增大时,显然屋面的耗材量也会增加。如果综合考虑经济和安全因素,设计网壳时,其矢跨比取1/6~1/5比较合适。

参考文献:

- [1] 陶全心,李著景.结构优化设计方法[M].北京:清华大学出版社,1985.
- [2] S. RAJEEV, C. S. KRISHNAMOORTHY. Discrete Optimization Via the Genetic Algorithm[J]. Computers & Structures. Printed in Britain, 1991(5):1 321-1 327.
- [3] 刘宗发,李正良,晏致涛.单层球面网壳的优化分析[J].重庆建筑大学学报,2005,27(1):67-70.
- [4] JGJ61-2003/J258-2003,网壳结构技术规程[S].
- [5] GB50017-2003,钢结构设计规范[S].
- [6] HOLLAND JH. Adaptation in Nature and Artificial Systems[J]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.
- [7] GOLDBERG DE. Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine learning[J]. Addison - Wesley Publishing, 1989.
- [8] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [9] 伊德钰,刘善维,钱若军.网壳结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [10] 易日.使用ANSYS6.1进行结构力学分析[M].北京:北京大学出版社,2002.

(编辑 王秀玲)