

双层 Kiewitt 型球面网壳优化设计

刘海军, 孙 尚, 许碧娟

(西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

摘要:以网壳的曲率半径、厚度、对称扇形曲面的个数、层数以及杆件截面积为设计变量,对双层 Kiewitt 型球面网壳以总造价为目标进行结构优化设计,结果表明,总造价降低 22.36%,比常见的只对构件截面尺寸优化(总造价降低 8.50%)的优化效果显著。

关键词:球面网壳;结构;优化设计

中图分类号: TU 393.3 **文献标识码:** A

0 引言

以往的优化设计,只将构件的截面尺寸作为变量进行结构尺寸优化设计,或者在保持构件截面尺寸不变的情况下,只把网壳的对称扇形曲面的个数、层数作为变量进行结构优化设计。这种设计的结果不仅不能充分发挥球面网壳每个组成构件的最大作用,更没有对影响结构性能或造价的主要参数进行优化。本文以双层 Kiewitt 型球面网壳为例,尝试以网壳的曲率半径、网壳的厚度、网壳的节点个数为优化变量进行形状优化设计,能很好地解决以上问题。为比较,这里也进行了以杆件截面积作为设计变量的网壳尺寸优化设计。经比较,以网壳的曲率半径、网壳的厚度、网壳的节点个数等作为优化变量进行的形状优化设计更为有效。

作者所用的优化的工具是 ISIGHT 软件,它是一套可整合设计流程中所用的各项软件的工具,并且能自动进行最优化设计的软件系统平台。目前,ISIGHT 软件已经在航空,汽车,电子,机械,化工等产业得到广泛的应用。作者尝试把 ISIGHT 软件应用于建筑结构领域。

1 结构优化设计的数学模型

1.1 约束条件的确定^[1,2]

双层 Kiewitt 型球面网壳结构设计约束条件:

(1) 容许长细比条件

$$\lambda_i = \frac{l_{oi}}{i_i} \leq [\lambda] = 150 \quad (1)$$

式中: l_{oi} 、 i_i 分别为第 i 根杆件的计算长度和回转

半径, m。

(2) 网壳最大挠度限制

$$f \leq [f] = \frac{l_2}{400} \text{ mm} = \frac{35\,000 \text{ mm}}{400} = 87.5 \text{ mm} \quad (2)$$

式中: l_2 网壳的跨度, mm。

(3) 杆件强度约束条件

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A_i} \pm \frac{M_{yi}}{\gamma_y W_{yi}} \pm \frac{M_{zi}}{\gamma_z W_{zi}} \leq [\sigma] = 210 \text{ MPa} \quad (3)$$

式中: γ_y, γ_z , 与截面模量相应的截面塑性发展系数; W_{yi}, W_{zi} 为两个主轴方向的毛截面抗弯模量, m^3 。

(4) 压弯杆件稳定性约束条件

$$\sigma_i + \frac{N_i}{\varphi_i A_i} = \frac{\beta_{my} M_{yi}}{\gamma_y W_{yi} (1 - 0.8 \frac{N_i}{N_{Eyi}})} + \frac{\beta_{iz} M_{zi}}{\varphi_{iz} W_{zi}} \leq [\sigma] = 210 \text{ MPa} \quad (4)$$

式中: β_{my}, β_{iz} 分别为弯矩作用平面内和平面外的等效弯矩系数; φ_{iz} 为均匀弯曲的受弯构件整体稳定系数; φ_i 为轴心受压构件稳定系数。

(5) 杆件构造要求

$$d_i \geq d_{\min} = 45 \text{ mm}; t_i \geq t_{\min} = 3 \text{ mm} \quad (5)$$

式中: d_i 为杆件的直径 mm; t_i 为杆件的壁厚 mm。

(6) 结点构造要求

$$D \geq 140 \text{ mm}; t_i \geq 4 \text{ mm} \quad (6)$$

式中: D 为空心球节点的直径 mm; t_i 为空心球节点的壁厚, mm。

2.2 尺寸优化设计

2.2.1 设计变量

$$Var = \{A_1, A_2, A_3\}^T \quad (7)$$

收稿日期:2006-06-11;修订日期:2006-09-30

作者简介:刘海军(1950-),男,吉林双辽人,西北工业大学教授,主要从事结构优化方面的研究工作。

式中: A_i 为杆件的截面积, $A_i \geq 396, \text{mm}^2$.

2.2.2 目标函数

$$P = c_1 \times W(A_i) + c_2 \times \delta \times 289 \tag{8}$$

式中: P 为网壳结构杆件和球节点的总造价, 元;

$W(A_i)$ 为杆件的总重量, kg , $W(A_i) = \sum_{i=1}^n \rho l_i A_i / 10^9$;

ρ 为杆件材料的密度, kg/m^3 ; δ 为单个焊接球节点的体积, 取 $7.36 \times 10^{-4} \text{m}^3$; 289 为球节点个数, 个; c_1, c_2 为圆钢管和球节点单位重量的价格, 元/吨, 取 $c_1 = 3\,500, c_2 = 6\,000$.

2.3 形状优化设计

2.3.1 设计变量

$$Var = \{r, nx, kn, h, A_1, A_2, A_3\}^T \tag{9}$$

式中: A_i 为杆件的截面积, $A_i \geq 396 \text{mm}^2$; r 为网壳的曲率半径, mm , $18\,000 \leq r \leq 30\,000$; nx 为层数, 个, $5 \leq nx$; kn 为对称扇形曲面的个数, 个, 取 6, 8, 10, 12; h 为网壳的厚度, mm , $600 \leq h \leq 1\,000$.

2.3.2 目标函数

$$P = c_1 \times W(A_i) + c_2 \times \delta \times (1 + kn \times nx^2) \tag{10}$$

式中: P, C_1, C_2, δ 同前.

2 算例及结果

K8 型球面网壳(见图 1), 层数为 6, 球面半径 20.0 m, 跨度约 35 m, 矢跨比 1:3.5 的双层球面网壳, 网壳结构采用 Q235 钢管, 网壳材料参数弹性模量 $2.06 \times 10^{11} \text{Pa}$, 泊松比 0.3. 网壳竖向作用 2.5 kN/m 的均布荷载, 水平方向作用 1.5 kN/m² 的均布荷载.

2.1 尺寸优化结果

用 ANSYS 建立模型(采用空间杆单元有限元模型)分析受力, 生成 ISIGHT 所需要的 3 个文件: 输入、输出和执行文件, 然后导入 ISIGHT 中进行优化设计. ISIGHT 软件中的优化方法的选取受到变量取值类型(有的优化方法不适用离散变量的优化)和目标函数类型(单目标或多目标函数)的限制, 对于尺寸优化中不含离散型变量的优化, 经过反复的计算比较, 最终选用优化效果显著的序列二次规划法(Sequential Quadratic Programm-

ing). 执行迭代 200 次之后的优化效果差别不大, 本例迭代次数设置为 200 次, 优化结果见表 1.

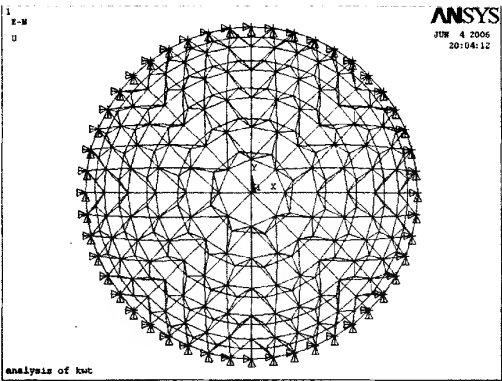


图 1 双层凯威特型球面网壳

Fig. 1 Double-layers of Kiewitt Reticulated Shell

表 1 设计变量、目标函数优化前后对照

Tab. 1 Comparision of design varieties and objective function

项目	A_1/mm^2	A_2/mm^2	A_3/mm^2	$P/\text{元}$
优化前	621	555	396	44 101
优化后	566	435	396	40 345

由表 1 可以看出, 采用杆件的截面积为设计变量的优化设计后, 杆件和结点的总造价降低了 $\delta = \frac{P_{\text{优化前}} - P_{\text{优化后}}}{P_{\text{优化前}}} \times 100\% = \frac{44\,101 \text{元} - 40\,345 \text{元}}{44\,189 \text{元}} \times 100\% = 8.50\%$.

2.2 形状优化结果

形状优化设计的变量中, 包含网壳层数和每层的节点数两个离散型变量, 优化方法选用指导性启发式搜索法(Directed Heuristic Search), 执行优化迭代的次数为 200 次, 优化结果见表 2.

由表 2 可以看出, 采用曲率半径、网壳的厚度、节点个数等为设计变量的优化设计后, 杆件和结点的总造价降低了 $\delta = \frac{P_{\text{优化前}} - P_{\text{优化后}}}{P_{\text{优化前}}} \times 100\% = \frac{44\,101 \text{元} - 34\,238 \text{元}}{44\,189 \text{元}} \times 100\% = 22.36\%$, 优化的效果显著.

表 2 设计变量、目标函数优化前后对照

Tab. 2 Comparision of design varieties and objective function

项目	r/mm	$nx/\text{层}$	$kn/\text{个}$	h/mm	A_1/mm^2	A_2/mm^2	A_3/mm^2	$P/\text{元}$
优化前	20 000	6	8	800	621	555	396	44 101
优化后	21 000	5	8	700	593.54	470.32	396	34 238

3 结语

(1)通过尺寸优化和形状优化的比较可以看出,以网壳的曲率半径、厚度和结点个数为变量的形状优化比传统的截面尺寸优化效果更为显著。

(2)以 ANSYS 为基础,以 ISIGHT 为优化平台,尝试把 ISIGHT 应用于建筑领域,结果证实是完全可行的、有效的。

(3)作者仅对网壳结构进行单目标形状优化,而优化设计是一项非常复杂的工程,其它复杂优化设计的层次逐渐由低至高,由结构的尺寸优化、形状优化、拓扑优化继后发展到最高层次的布局优化,优化的目标也逐渐从单目标扩展为多目标,优化模型亦将逐渐多样化和复杂化,这对设计提出了更高的要求。

参考文献:

- [1] 沈祖炎,陈扬骥.网架与网壳[M].上海:同济大学出版社,1997.169-197.
- [2] 尹德钰,刘善维,钱若军.网壳结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1996.243-417.
- [3] 尚晓江,邱峰. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M].北京:中国水利水电出版社,2006.353-369.
- [4] 刘宗法.单层球面网壳的优化设计[J].重庆建筑大学学报,2005,27(1):67-70.
- [5] 马静敏.基于 ISIGHT 的油船槽形横舱壁优化设计[J].航海工程,2005,(1):35-37.
- [6] 李静斌.静力弹塑性分析在大跨度钢结构设计中的应用[J].郑州大学学报(工学版),2005,26(4):15-19.

Optimization Design of Double-layer of Kiewitt Reticulated Shell

LIU Hai-jun, SUN Shang, XU Bi-Juan

(School of Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Shelly radius, thickness, symmetrical sector numbers, layer numbers and the area of steel tube are regarded as design variants, and the overall cost of roles and nodes are regarded as objective function. The result of optimization indicates that the cost is reduced by 22.36 percent. The result shows more remarkable optimization effect than just optimizing the cross-section size, of which the overall cost is reduced by 8.50%.

Key words: reticulated shell; construction; optimization design

(上转第90页)

Semi-rigid Materials Modulus Research in Different Temperature-integral

ZHANG bin^{1,2}, SHEN Ai-qin¹, LI Wei-guang¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. The First Highway & Design Institute of China, Xi'an 710075, China)

Abstract: For Semi-rigid materials paved in different seasons has notability performance on road using ability, the modulus of cement gravel, cement and fly ash gravel, lime and fly ash gravel are measured, but the design criterion-modulus can not be confirmed related the practical environment, so the problem on road construction design come forth. put forward the Temperature-integral to judge the influence of season to the performance of Semi-rigid material, by the connection of the Ratio of Temperature-integral with modulus-increase Ratio of three mixture mention before, by the climate surveying of 10 years in HeBei province, commend the modulus criterion of three mixture based on Temperature-integral, connection the practical using and test result in lab, the research result and methods can offer reference to other regions.

Key words: inorganic binder gravel; temperature-integral; modulus increase ratio