

大跨度双层扭网壳结构的优化分析

吴云芳, 张亮亮, 苏耀聪

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:在构造双层扭网壳结构优化的最小造价目标函数后,以网壳结构的矢跨比、网格尺寸、网壳厚度为设计变量,采用0.618法与穷举法,编制了优化设计程序LSD,通过优化计算,得出结构在轻屋面体系时,跨度在50-80m的最优网格尺寸和厚度,并将计算结果归纳为经验公式。

关键词:双层扭网壳;优化分析;目标函数

中图分类号:TU393.3 文献标识码:A 文章编号:1006-7329(2004)02-0059-04

Optimization of Large Span Double-layer Torsional Reticulated Shell

WU Yun-fang, ZHANG Liang-liang, SU Yao-cong

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R. China)

Abstract: The objective function of minimum cost is established for double layer torsional reticulated shell, taking the rise-span ratio, grid size and shell thickness as design variables. Based on the exhaustion and 0.618 methods, the computing program LSD has been developed. For the double layer torsional reticulated shell with the span of 50 m to 80m, the optimal grid size and thickness have been obtained for systems of light roof materials with different spans. Empirical formulas are deduced from the results.

Keywords: double layer; torsional reticulated shell; optimal analysis; objective function

扭网壳是一个负高斯曲率的网壳,造型优美,适用于矩形平面。其特点是与 xz 、 yz 平面平行的面与网壳曲面的交线是直线,便于施工。尽管现在对网壳结构的优化研究已取得了一定的成果,但大多局限于圆柱面和球面网壳,对大跨度双层扭网壳结构的优化分析还比较少。对于如何考虑设计、施工等因素的影响,选择适当的结构类型,几何外形及杆件,使结构设计更为经济合理的分析研究还需要进一步完善。本文以最小造价作为目标函数,对双层扭网壳进行了优化研究。

1 数学模型和力学模型

1.1 目标函数

双层扭网壳结构的杆件数以千计,影响结构受力性能、用钢量、造价的因素很多,这对于建立目标函数选取优化方法以及优化过程都具有一定的困难,因而必须选取其中起决定作用的参数作为设计变量。大量文献分析表明:网壳的厚度、网格尺寸、矢跨比是影响结构用钢量或造价的主要因素。因此,本文将它们作为优化分析的设计变量。

在网壳结构优化设计中,除了应考虑杆件、结点的重量外,屋面材料、施工、制作、采暖、通风等因素对结构的造价均有较大的影响,结合我国实际情况,综合考虑各种因素后,本文以总造价作为目标函数,表达式如下:

$$W = C_1 \sum_{i=1}^n \rho_g A_i l_i + C_2 \sum_{j=1}^n \rho_j V_j + C_3 A_b$$

式中: W 为网壳结构的造价(元); C_1 、 C_2 分别为杆件、结点的单位造价(约为6800元/t); C_3 为屋面材料

* 收稿日期:2003-11-20

作者简介:吴云芳(1963-),女,重庆人,讲师,硕士,主要从事工程力学教学及研究工作。

单位造价(如压型钢板为 140 元/m²); ρ_g 、 ρ_j 为杆件、结点材料质量密度(kg/m³); A_b 为屋面面积(m²)。

1.2 约束条件

①受拉杆件强度 $\sigma = \frac{N}{A} \leq f$; ②受压杆件稳定性 $\sigma = \frac{N}{\varphi A} \leq f$; ③杆件容许长细比限值 $\lambda = L/r \leq 300$; ④结构总体位移限值 $f_{\max} \leq L_1/400$; ⑤杆件最小截面限值 $A_i \geq A_{\min}(i = 1, 2, \dots, n)$; 对压杆, $t_j \geq t(j = 1, 2, \dots, n_1)$ 。

其中: N 为杆件轴力(kN); A 为杆件净截面面积(m²); f 为抗拉强度设计值(kN/m²); φ 为压杆稳定系数; L 为杆件长度(m); r 为杆件回转半径(m); L_1 为网壳的短向跨度(m); A_{\min} 为设计中允许杆件最小截面面积(m²); t 为设计中允许压杆最小厚度(m); n 、 n_1 分别为结构杆件和受压杆件数量。

1.3 基本假设和内力分析方法

双层扭网壳内力分析采用空间桁架位移法。假设双层扭网壳为正放四角锥双层网壳、周边支承,其壳面方程为 $z = f - \frac{y}{L_y}f - \frac{x}{L_x}f + \frac{2xy}{L_x L_y}f$ 。在考虑荷载作用时将网壳结构上的均布荷载和杆件自重转换成作用在节点上的集中荷载,即杆件只承受轴向力。取结点自重为杆件自重的 0.25 倍。在内力分析后进行杆件的强度和稳定性计算,校核长细比及结点最大位移,最后选择截面。

2 优化方法与程序

本文采用穷举法与黄金分割法(0.618 法)对双层扭网壳结构进行了优化设计。在整体分析时,将结构矢跨比作为最外层设计变量,网格尺寸作为次外层设计变量,网壳厚度则为内层设计变量。杆件截面面积的选取由静力分析程序确定。优化分析过程分为三个阶段:第一阶段对一定范围的矢跨比进行循环;对于每个确定的矢跨比均可各自进入第二阶段,第二阶段对一定范围的网格数进行循环,对不同的跨度,初定网格数范围是不同的;第三阶段即在一定的矢跨比与网格尺寸的前提下运用 0.618 法对网壳厚度进行优化计算。厚度优化属于单变量问题,对于这种单变量求极值的问题,通常采用 0.618 法求解比较合适。它能在给定的区间内,以比较少的计算量使搜索区很快缩小,从而求得极值点,是效率较高的一维搜索方法。从所查阅的文献资料来看,双曲抛物面网壳结构在应用于屋盖结构时,一般都做成扁网壳(矢跨比小于 1/5)。而根据造型的需要矢跨比一般都大于 1/10。因此,在对不同跨度轻型屋面体系的结构进行优化设计时,仅选择了矢跨比为 1/6、1/8、1/10 的情况。

本文编制的双层扭网壳结构优化程序 LSD 能在输入跨度、荷载、材料参数、杆件单位造价、节点单位造价、屋面材料单位造价后,自动划分杆件单元,对单元和结点编号,确定结点坐标,然后用空间桁架位移法对单元进行内力分析,根据各约束条件选择合适的杆单元截面。通过对网壳的不同矢跨比和网格尺寸进行循环,用 0.618 法对厚度优化,最后得到最优的矢跨比、网格尺寸、网壳厚度、杆件长度、杆件截面尺寸、用钢量和网壳总造价。

双层扭网壳结构优化程序 LSD 的程序粗框图如图 1 所示。

3 优化结果和分析

对不同跨度的正放四角锥双层扭网壳进行优化计算,同时也考虑了轻屋面跨度在 50~80 m 的情况。其中轻屋面采用含保温层的岩棉夹心板(100 mm 厚,250 元/m²)和不做保温处理的 V-125 多波型压型钢板(0.65 mm 厚,140 元/m²)。以 60 m 跨度的网壳为例研究了矢跨比,荷载对网壳优化结果的影响。

3.1 最优网格和厚度

表 1 给出了压型钢板和夹心板两种轻屋面体系在不同跨度下矢跨比分别为 1/

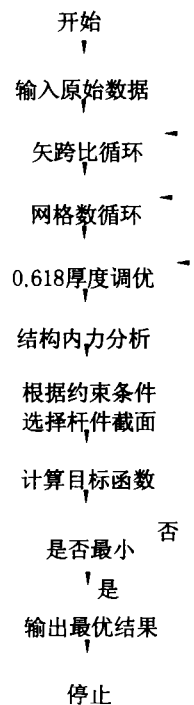


图 1 程序粗框图

6、1/8、1/10 的双层扭网壳的优化结果。由此可见,压型钢板和夹心板除了造价不同之外其它均相同;网壳结构的最优厚度、最优网格尺寸、杆件用钢量、总造价均随跨度的增加而不断增大。对于一定跨度的网壳,其网格尺寸较大时,杆件、结点数量较少,造价自然就较低。对于选定的矢跨比 1/6、1/8、1/10,它们只对总造价影响较大,因为屋面材料在总造价中占一定的比例,矢跨比越小,曲面展开的面积就越小,所以造价也就越低。从造价来看,夹心板屋面最高、压型钢板最低,但前者可以保温。

表1 轻屋面体系计算结果

跨度(m)	矢跨比	最优网格尺寸(m)	网壳最优厚度(m)	杆件用钢量(kg/m ²)	造价(元/m ²)	
					压型钢板	夹心板
50	1/6	3.333	2.751	19.011 9	302.907	414.777
	1/8	3.333	2.714	18.801 4	300.793	411.673
	1/10	3.333	2.714	18.713 2	299.793	410.343
60	1/6	3.529	3.474	23.892 2	344.386	456.256
	1/8	3.529	3.403	23.717 1	342.325	453.205
	1/10	3.529	3.452	23.572 4	340.833	451.383
70	1/6	4.118	4.053	31.092 9	405.593	517.463
	1/8	4.118	4.053	30.907 3	403.448	514.328
	1/10	4.118	4.050	30.763 3	402.448	512.998
80	1/6	4.706	4.747	52.156 7	584.635	696.505
	1/8	4.706	4.718	52.153 1	584.096	694.976
	1/10	4.706	4.819	51.833 1	581.113	691.663

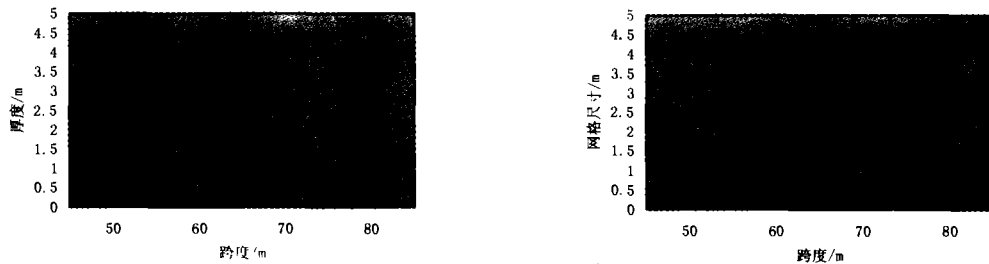


图2 跨度与网格尺寸、最优厚的关系(矢跨比为 1/6 的轻屋面)

3.2 荷载的影响

考虑不同荷载优化结果的影响,60 m 跨度的网壳结构屋面荷载为 0.5 ~ 3.0 kN/m²。按级差为 0.5 kN/m² 的 6 级荷载分别进行计算,结果见表 2,矢跨比取 1/6。从表 3 可以看出,荷载对各项结果影响较大。网壳最优厚度、杆件用钢量、总造价均随着荷载的增加而增加。在结构设计中,可先选定网格尺寸,再依据荷载大小确定网壳厚度。

表2 60 m 跨度网壳不同活载的计算结果(矢跨比 1/6)

活载(kN/m ²)	网格尺寸(m)	网壳最优厚度(m)	杆件用钢量(kg/m ²)	单位造价(元/m ²)
0.5	3.0	3.117	23.981 1	347.221
1.0	3.0	2.986	52.055 8	583.775
1.5	3.0	2.990	64.053 5	685.757
2.0	3.0	3.004	78.740	810.595
2.5	3.0	3.012	94.162 9	941.683
3.0	3.0	2.996	107.660	1056.41

3.3 矢跨比的影响

在上述计算分析中,由于工况繁多,计算量大,因此只依据大多数情况下使用的矢跨比及造型的需要选择了 1/6、1/8、1/10 三种比较合适的矢跨比。为了研究矢跨比对优化结果的影响,本文以 60 m 跨度的双层扭网壳(压型钢板屋面)为例,对矢跨比分别为 1/2、1/3、1/4、1/5、1/6、1/7、1/8、1/9、1/10 的网壳结构进行了计算,其中网格尺寸均定为 3.0 m,结果见表 3。

表 3 60 m 网壳不同矢跨比计算结果

跨度(m)	矢跨比	网格尺寸(m)	网壳最优厚度(m)	杆件用钢量(kg/m ²)	造价(元/m ²)
60	1/2	3.0	1.229	15.9	319.68
60	1/3	3.0	1.229	15.6	284.26
60	1/4	3.0	1.229	17.079	290.3
60	1/5	3.0	3.179	22.8	337.05
60	1/6	3.0	3.117	23.98	347.22
60	1/7	3.0	3.4	23.88	344.45
60	1/8	3.0	3.45	23.81	343.3
60	1/9	3.0	3.46	23.72	342.59
60	1/10	3.0	3.445	23.61	341.95

从表 3 可以看出,在矢跨比为 1/3 时,杆件用钢量和网壳总造价最小。矢跨比大于 1/3 或小于 1/3,杆件用钢量和网壳总造价均增加。当矢跨比在 1/3 ~ 1/6 之间变化时,杆件用钢量、总造价随着矢跨比减小而增加;而当矢跨比从 1/6 ~ 1/10 之间变化时,杆件用钢量变化不大,总造价便随着矢跨比减小而减少了。在总造价减少的过程中。可以看到当矢跨比小于 1/6 时,总造价降低的幅度明显变缓。

3.4 经验公式的归纳

为了适应工程设计的需要,本文将矢跨比为 1/6、1/8、1/10 的轻屋面体系的优化计算结果整理成经验公式:

$$\text{最优网格尺寸: } a = 0.945 + 0.0458D (D \geq 50 \text{ m}) \quad (1)$$

$$\text{最优厚度: } h = -0.566 + 0.0665D (D \geq 50 \text{ m}) \quad (2)$$

公式(1)、(2)较适合 50 m ~ 80 m 跨度的轻屋面体系双层扭网壳。

4 结论

1) 采用以结构最小造价作为优化设计的目标函数能够比较全面地权衡结构的优劣;以 0.618 法与穷举法相结合对双层扭网壳结构进行优化分析,结果有效且收敛速度快。

2) 荷载、跨度、网格尺寸对结构的优化有着较重要的影响;分析时将结构矢跨比设为最外层设计变量、网格尺寸设为次外层设计变量,将网壳厚度视为内层设计变量是确切的。

3) 本文通过理论与大量算例分析给出的各种跨度双层扭网壳结构在不同矢跨比下的最优网格尺寸、最优网壳厚度建议值,以及在此基础上归纳出的经验公式,可供实际工程设计参考。

参考文献:

- [1] 朱忠义.折板网壳的几何非线性和经济性分析[J].建筑结构学报,2000,21(5):54-58.
- [2] 单鲁阳.大跨度双层圆柱面网壳结构的优化分析[J].建筑结构学报,1999,20(6):47-55.
- [3] 沈祖炎.网架与网壳[M].上海:同济大学出版社,1998.
- [4] 席少霖.最优化计算方法[M].上海:上海科学技术出版社,1983.
- [5] Y. Hirata et al. Optimum Design of Space Trusses[R]. Takeasaka Technical Report, No. 8, August 1972.