

# 异型网壳结构的建模与分析

周 飞<sup>1</sup> 陈思作<sup>2</sup> 宛树旗<sup>2</sup>

(1 广东省高教建筑规划设计院, 广州 石牌 510631; 2 武汉大学 土木工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 以湛江某大学综合馆为工程背景, 采用大型有限元分析软件 ANSYS 实现了异型网壳的建模, 在确定构件设计截面后, 研究了异型网壳结构的静力计算及其内力位移分布规律, 并对它的整体稳定性进行了分析, 最后, 得出对工程设计有益的结论

**关键词:** 网壳; 参数化设计; 静力分析; 屈曲特征值

**中图分类号:** TU 356 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7037(2005)01-0094-04

网壳结构是将杆件沿着某个曲面有规律地布置而组成的空间结构体系, 属于整体受力的空间结构体系, 其受力特点与薄壳结构类似, 是以“薄膜”作用为主要受力特征。对于异型网壳, 由于几何形状的独特性和约束条件的不规则使得常规的拟壳法不能适用, 因此必须采用三维有限元的分析模型。作者以湛江某大学综合馆为实际工程背景, 利用有限元软件 ANSYS 为工具, 研究了如何利用 ANSYS 参数化设计语言建立异型网壳的三维参数化有限元模型。在确定优化的构件设计截面后, 重点研究了该实际异型网壳结构的静力计算及其内力位移分布规律, 并对它的整体稳定性进行了分析。

## 1 工程概况

湛江某大学综合馆是一座集体育、娱乐及演讲等多功能于一体的现代化建筑, 造型别致, 平面形似舰艇, 取意舰遨游于江海, 前视图呈飞翼状,

含勃勃向上之意, 建筑面积为  $14\ 000\text{ m}^2$ , 工程近海。其屋盖采用钢网壳结构(图 1), 水平投影面积  $6\ 946\text{ m}^2$ , 长向  $96.4\text{ m}$ , 短向(最长处)  $86.3\text{ m}$ 。该网壳结构与一般的网壳结构相比有许多不同点。

a 平面形状极不规则。现有的工程事例均是针对形如圆形、矩形或多边形等规则的形状, 对于不规则网壳的受力本质和稳定性研究得还不多。

b 拟壳法不再适用。上层节点处于一球面上, 而下层节点却均位于一平面上, 拟壳法就不适用了。

c 内力分布不规则。该网壳采用周边和中间支点相结合的支撑方式, 且网壳两个方向截面均为变截面, 造成网壳的网格在局部不规则, 使得局部的受力会与规则地方的受力有区别。

## 2 网壳的计算模型

为了对网壳结构进行静力计算和稳定性分析, 特别是为了方便对网壳结构进行重分析和重设计, 作者研究了异型网壳的参数化建模(图 1, 2)。

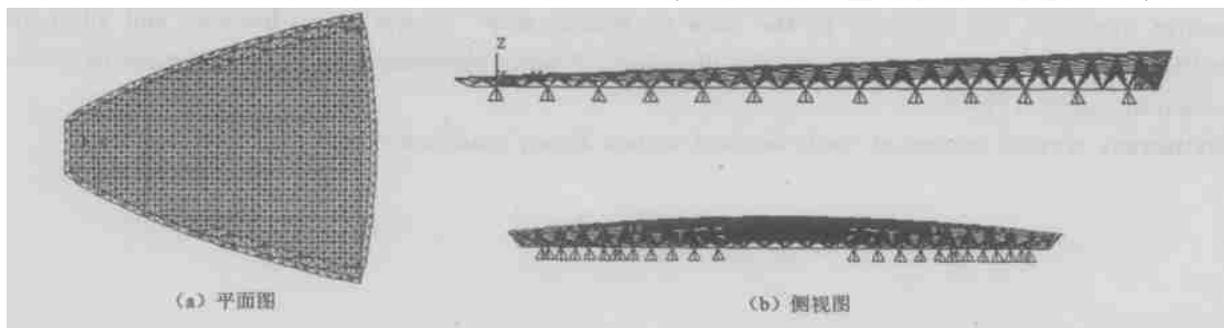


图 1 网壳平面及侧视图示意

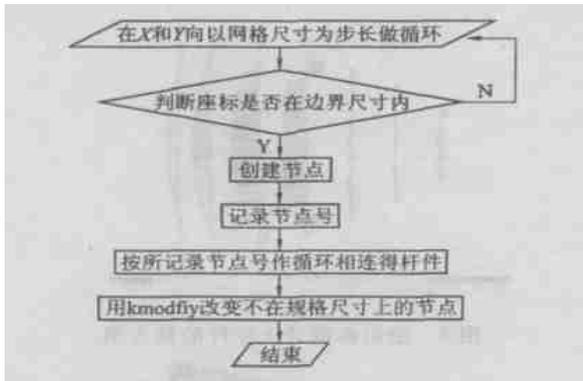


图 2 网壳几何模型的建立程序框图

## 2 1 几何建模

异型网壳几何模型的建立很繁琐,作者设计的网壳几何模型是采用 ANSYS 提供的参数化设计语言 APDL (analysis parameter design language) 编制程序自动实现的

a 按建筑的柱轴线和网壳的设计经验人工制定网格尺寸,在  $X$  和  $Y$  向相邻柱之间均布两个网格,网格中大部分尺寸均为  $3.75\text{ m} \times 3.75\text{ m}$ 。同时,求出网壳的曲面和边界的曲线方程

b 在  $X$  和  $Y$  向以网格尺寸为步长作循环,在  $Z$  向由网壳的曲面方程建立节点,同时记录  $X$  向的循环始终节点号,在建立节点的时候要将点的坐标和边界比较,这样就可以将节点控制在边界内

c 利用 b 中的始终节点号按  $X$  和  $Y$  向的网格数做循环,建立网壳的上弦杆件

d 同 c 建立网壳的下弦杆和腹杆

## 2 2 荷载组合

按 GB 50009-2001《建筑结构荷载规范》和网壳的设计规范,该工程的设计荷载取(竖直向下为负):屋面恒载加杆件自重为  $-1.71\text{ kN/m}^2$ ;屋面活载为  $-0.60\text{ kN/m}^2$ ;风荷载为  $0.80\text{ kN/m}^2$ 。荷载组合为  $1.2 \times \text{恒载} + 1.4 \times \text{活载} = -2.892\text{ kN/m}^2$  (组合 1);  $1.0 \times \text{恒载} + 1.4 \times \text{上吸风载} = 0.59\text{ kN/m}^2$  (组合 2)。

完成上述网壳的几何建模后,可以很方便将其变成三维杆系有限元计算模型,并做计算分析

## 3 静力计算和分析

### 3 1 计算方法

网壳结构的静力计算和后面的整体稳定性分析均采用空间杆系有限元法,该方法以有限元理论为基础,能对分析空间杆系结构的静动力响应进行有效的分析。通过空间杆件单元刚度集成总刚度后,利用边界条件和荷载作用方式,可以形

成如下的平衡方程,即  $[K]\{U\} = \{F\}$ , 式中,  $[K]$  为结构的刚度矩阵;  $\{U\}$  为结构的位移向量;  $\{F\}$  为结构的荷载向量

### 3 2 构件截面

对于网壳结构体系,在给定结构形状、约束条件和设计荷载下,必定存在一种最优的杆件截面尺寸与之相匹配。针对该网壳的结构特点,为了避免出现过多的杆件截面和方便施工,选择了几种构件作优化构件,并采用 APDL 语言进行优化程序的编制。调用结构优化程序对网壳分析后,选定最不利荷载下最优的杆件截面:  $D60 \times 3.5$ ,  $D75.5 \times 3.5$ ,  $D88.5 \times 4$ ,  $D114 \times 4$ ,  $D140 \times 4$ ,  $D159 \times 6$ ,  $D219 \times 6$  等 7 种截面。同时,还对其它荷载工况进行了分析校对,用以确认上述截面

### 3 3 静力响应分析

在选定最优杆件截面的基础上,求出了两种荷载组合的结果。对于不利荷载组合 1 进行分析,可以得到网壳上弦杆、下弦杆和腹杆的轴力及壳体整体变形如图 3~10。

该网壳在荷载组合 1 下的内力特性呈现出类似于薄板在均布荷载下的内力分布特征。由于中间约束的存在,使得网壳被分成两部分,每个部分类似于一块,同时上弦杆还呈现出一般网壳的受力特征

a 图 3 所示的下弦杆主要承受拉力,只在中间约束处由于类似反弯点而局部受压力。沿长向如图 4,取部分杆件可以很明显地看出一排杆件类似于两跨简支梁在均布荷载下的弯矩分布特征;短向如图 5,类似于单跨固支梁弯矩分布特征

b 图 6 所示的上弦杆主要承受压力,只在中间约束处由于类似于反弯点而局部受拉。沿长向取部分杆件如图 7,可以很明显看出一排杆件类似于两跨简支梁在均布荷载下的弯矩分布特征;短向如图 8,类似于外伸梁的内力分布特征

c 图 9 所示腹杆压力和拉力并存,在中间和边界约束处轴力较大,特别是由于曲线边界的原因,造成靠近边界处杆件的几何布置无规律,其轴力变化也较大。图 10 显示右壳中间变形最大,这和在该处的内力较大是一致的

## 4 网壳稳定性分析

对于网壳结构,目前一般仅考虑单层网壳的稳定性,认为双层网壳不存在稳定性问题,显然这只是一个定性认识,没有从数量上进行考虑。结构失稳的特征类同于脆性破坏,失稳前无明显的征

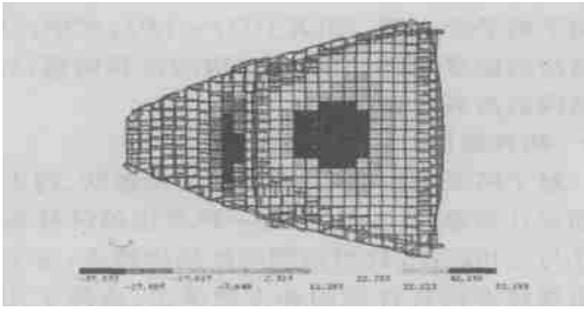


图3 下弦杆的轴力图

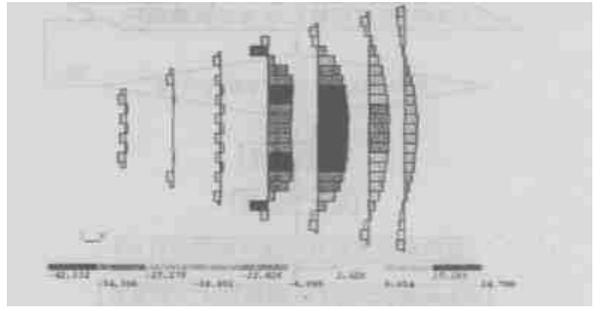


图8 沿短向部分上弦杆的轴力图

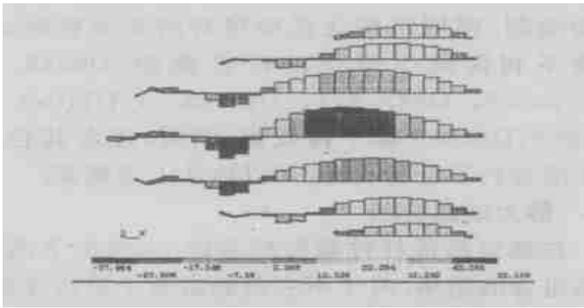


图4 沿长向部分下弦杆的轴图

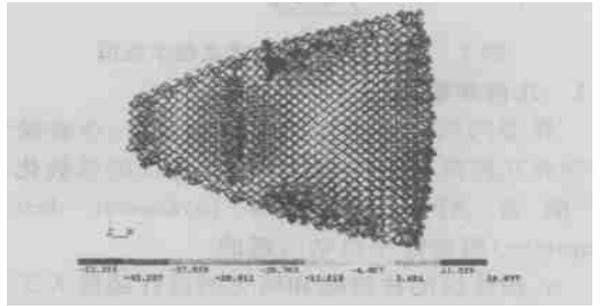


图9 腹杆的轴力图

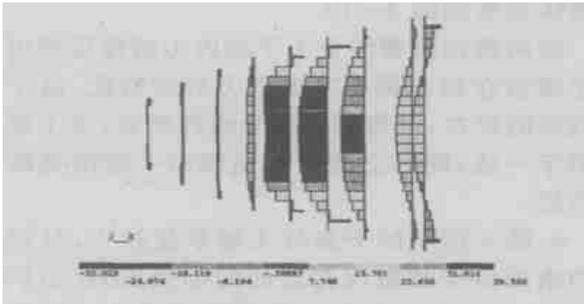


图5 沿短向部分下弦杆的轴力图

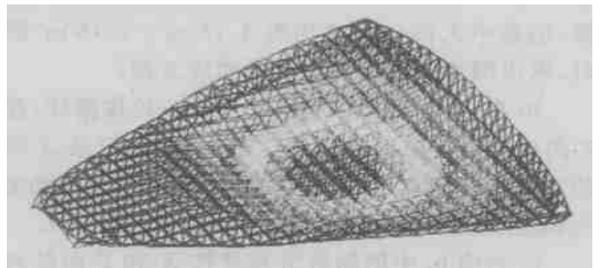


图10 不利工况下整体变形图

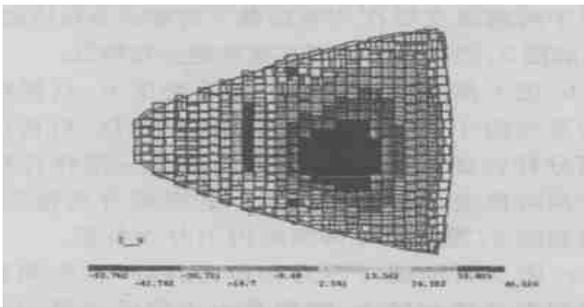


图6 上弦杆的轴力图

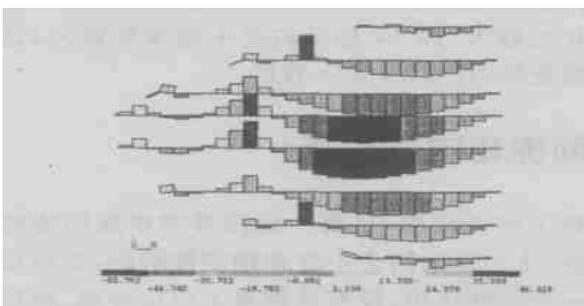


图7 沿长向部分上弦杆的轴力图

兆,而且按静力分析,网壳的杆件大多是轴心受压杆。如果忽略其整体稳定性的校核,显然对于本工程这样大型的异型网壳是不适宜的。

特征值分析虽然过高估计了结构或构件的失稳强度,但是可以预测一个完善结构的理论屈曲强度,得到结构的理想临界荷载和屈曲形态,并可为非线性分析提供可参考的荷载值和缺陷模式,其控制方程为

$$([K_0] + \lambda [K_\sigma])\{\varphi\} = 0,$$

式中,  $[K_0]$  为结构的弹性刚度矩阵;  $\lambda$  为失稳特征值;  $[K_\sigma]$  为结构的初始应力刚度矩阵;  $\{\varphi\}$  为失稳形态。作者采用 ANSYS 中的 Block Lanczos 方法求出网壳的前 6 阶特征值。从图 11 中可看出,网壳结构整体失稳位置靠近边界。由于边界的特殊性,使得网壳在靠近边界杆件的几何布置破坏了网壳中间部分的规律,从静力分析可知,在靠近边界处的杆件轴力值较大,变化也较大,因而,失稳位于该位置。

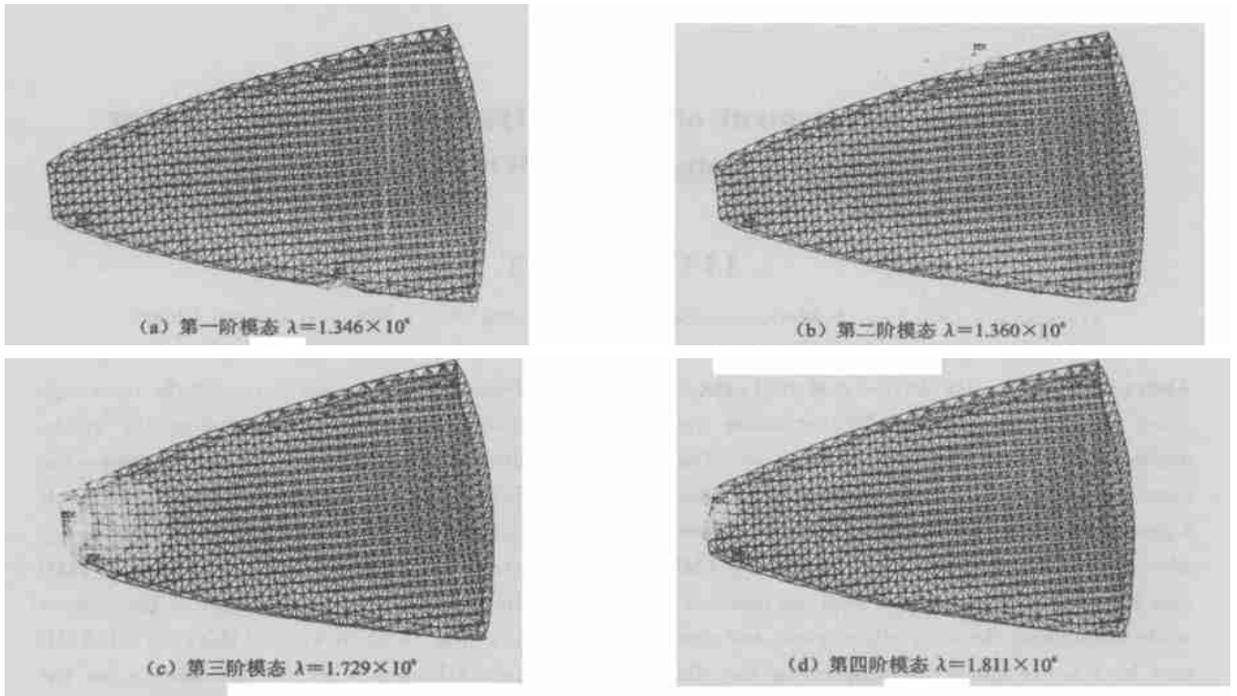


图 11 部分模态分析图

## 5 结论

a 运用 ANSYS 软件对湛江某大学综合馆的异型网壳结构进行了自动参数化建模, 并利用优化方法选定了不利荷载工况下的构件截面, 重点研究了网壳的内力变形, 讨论了网壳的内力位移分布特征

b 由于边界形状和支撑的几何排列不规则, 使得网壳结构在该局部易出现较大轴力, 特别是壳体中部支撑处下弦杆和第一、二局部失稳模态处腹杆的轴力较大, 因此, 在设计中要保证该处杆

件的稳定性。另外, 还要保证右壳中间上弦杆的稳定性

c 网壳结构的整体失稳特征值的数值较大, 说明了该网壳的整体安全性较好

### 参 考 文 献

- [1] GB 50009-2001, 建筑结构荷载设计规范[S]
- [2] GB 50011-2001, 建筑抗震设计规范[S]
- [3] GB 50017-2003, 钢结构设计规范[S]
- [4] JGJ 61-2003, 网壳结构技术规程[S]
- [5] 嘉木工作室 ANSYS 57 有限元实例分析教程[M] 北京: 机械工业出版社, 2002

## Modeling and Analysis of Special Shaped Lattice Shell Structures

ZHOU Fei<sup>1</sup> CHEN Si-zuo<sup>2</sup> WAN Shu-qi<sup>2</sup>

(1. Architectural & Planning Design Inst. of Guangdong Advanced Edu., Guangzhou 510631, China;  
2. School of Civil Eng., Wuhan Univ., Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Utilizing the finite element analysis software—ANSYS, a special double-layers lattice shell based on geometric model of parameters is designed and the area of the bar is selected on the basis of the danger case. The static analysis and the stability analysis are carried out based on the selected bar. The whole process leads to the beneficial conclusion for the design of the lattice shell.

**Key words:** double-layers lattice shell; parameter design; static analysis; buckling eigenvalue