

基于 ANSYS 的 K6 球面网壳非线性屈曲特性研究

张宁宁¹, 朱品乾²

1. 辽宁工程技术大学土建学院, 辽宁阜新 (123000)

2. 上海宝冶海顿工程技术有限公司, 上海 (200092)

E-mail: znn8888888@yahoo.com.cn

摘要: 本文主要以 K6 单层球面网壳为研究对象, 用有限元软件 ANSYS 对其进行非线性屈曲分析, 预测一个理想弹性结构的理论屈曲强度, 也即弹性屈曲分析方法, 确定网壳结构开始变得不稳定时的临界载荷和屈曲模态的形状。结构在达到屈曲载荷之前其位移—变形曲线表现出线性关系, 达到屈曲以后曲线将跟随另外的路径。然而, 在实际的工程结构中特征值屈曲分析法会有一些的初始缺陷, 而且在使用过程中会出现材料非线性以及大变形等非线性因素, 使结构并不全是在其理想弹性屈曲强度处发生屈曲。因此, 特征值屈曲经常产生非保守结果, 不适用于工程结构屈曲分析, 由此应运而生的是非线性屈曲分析法。该方法是包括材料非线性、大变形等非线性因素的静力分析法, 计算过程可以一直进行到结构的限制载荷或最大载荷。

关键词: 非线性屈曲分析, 结构稳定, 有限元, 临界载荷

中图分类号: TU788.8

1. 引言

近年来, 网壳结构发展迅速、形式多样, 网壳结构在大跨度建筑中已越来越多地被利用, 而且具有广阔的发展前景。网壳结构在达到屈曲载荷之前其位移—变形曲线表现出线性关系, 达到屈曲以后曲线将跟随另外的路径。但在实际的工程结构中会有一些的初始缺陷, 而且在使用过程中会出现材料非线性以及大变形等非线性因素, 使结构并不全是在其理想弹性屈曲强度处发生屈曲。因此, 特征值屈曲经常产生非保守结果, 不适用于工程结构屈曲分析, 由此应运而生的是非线性屈曲分析法。该方法是包括材料非线性、大变形等非线性因素的静力分析法, 计算过程可以一直进行到结构的限制载荷或最大载荷^[1]。对网壳这种大型空间结构, 当地震发生时, 由于强烈的地面运动而迫使结构产生振动, 其惯性作用一般来说是不容忽视的。结构产生的地震内力和位移, 可能造成结构破坏或倒塌, 因此在地震设防区必须对网壳结构进行抗震计算^[2]。对网壳结构的稳定性能研究有着重要的意义, 这也是工程实践中急待解决的问题^[3]。

2. 结构稳定及非线性屈曲分析

结构失稳(屈曲)是指在外力作用下结构的平衡状态开始丧失稳定性, 稍有扰动则变形迅速增大, 最后使结构遭到破坏^[4]。稳定问题一般分为三类, 第一类失稳是理想化情况, 即达到某个荷载时, 除结构原来的平衡状态可能存在外, 出现第二个平衡状态。第一类稳定问题在 ANSYS 中为特征值屈曲(Eigenvalue buckling)。第二类和第三类稳定问题, 在 ANSYS 中称为非线性屈曲, 实际上就是非线性全过程分析, 其基本步骤是: 首先要打开非线性选项, 并设置求解控制选项, 可根据问题类型而定。其次是模型修正问题或缺陷问题, 对大多数实际问题分析中, 该项可根据实际结构修正模型, 或不修正模型也可直接进行计算分析; 但对于理想柱、梁侧倾的非线性分析, 则必须进行模型修正(可采用实际缺陷或采用 ANSYS 设置), 否则无法进行非线性分析。

屈曲分析主要用于研究结构在特定载荷下的稳定性以及确定结构失稳的临界载荷^[5]。屈曲分析是一种用于确定结构开始变得不稳定时的临界载荷和屈曲模态形状的技术。经典的屈

屈曲分析是采用特征值屈曲分析法,它适用于对一个理想弹性结构的理想屈曲强度(歧点)进行预测,主要是使用特征值公式计算造成结构负刚度的应力刚度阵的比例因子。结构在达到屈曲载荷之前其位移—变形曲线表现出线性关系,达到屈曲以后曲线将跟随另外的路径。

3. 数值模拟分析

3.1 工程概况

为了精确模拟实际结构,该模型采用空间三维模型。本文采用一个K6型网壳结构,其俯视平面形状为圆形,低平面的直径为90m,球面直径为90m,矢高为5.6m,球面中心角为60度,材料为钢管, $E=2.1e11$, $\nu=0.3$,剪切模量 $G=8e10$,环杆与内径 $R_i=0.09$,内径 $R_o=0.0925$,斜杆内径 $R_i=0.08$,外径 $R_o=0.083$ 。具体模型前视图、底视图,见图1,图2。

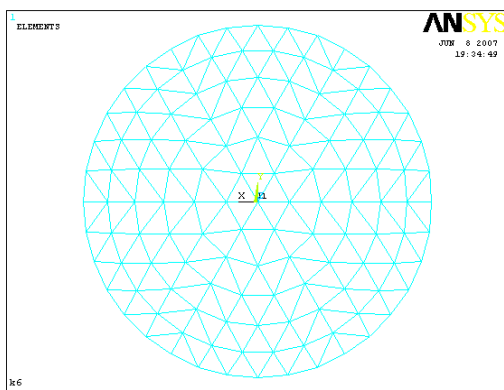


图1 模型前视图
Fig.1 Model front view

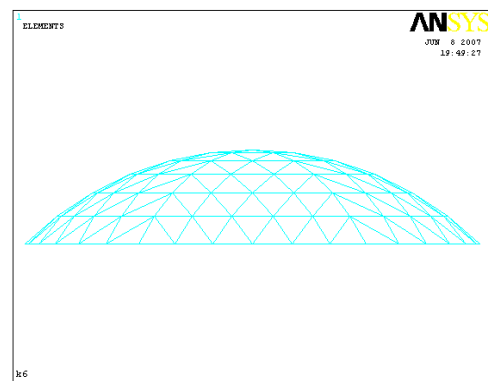


图2 模型后视图
Fig.2 Model back view

非线性屈曲分析可求解该网壳结构的极限承载能力,此分析是在大变形影响开关打开的情况下所作的一种静力分析,该方法用一种逐渐增加载荷的非线性静力分析技术来求解使得结构开始变得不稳定的临界载荷。此种分析较为精确,可用于实际工程中。计算模型见图3。

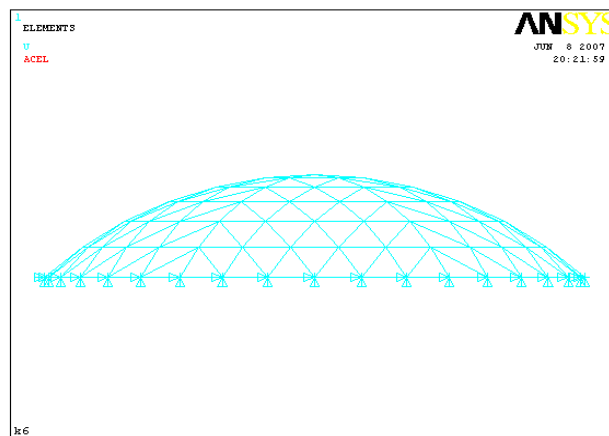


图3 计算模型
Fig.3 Calculation model

3.2 数值模拟结果及分析

网壳结构为—多自由度系统,将网壳简化为空间梁体系。

(1) 运动方程

网壳结构体系的振动方程为^[6]

$$[m]\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = -[m]\{\delta_0\}$$

式中 $[m]$ —质量矩阵, 对于有 N 个节点的网壳, 为一个 $3n \times 3n$ 的对角矩阵; $[C]$ —阻尼系数矩阵, 为一个 $3n \times 3n$ 的矩阵;

$[K]$ —网壳的总刚度矩阵, 由空间杆系非线性有限元得;

$\{\delta\}$ —相对于地面的相对位移列矩阵;

$\{\dot{\delta}\}$ —相对速度列矩阵;

$\{\ddot{\delta}\}$ —相对加速度列矩阵;

$\{\delta_0\}$ —地面地震运动加速度列矩阵。

(2) 阻尼矩阵

近似采用瑞利(Rayleigh) 阻尼,

$$[C] = \alpha_1[M] + \alpha_2[K]$$

通常根据第一、二振型的频率及阻尼比确定。

(3) 惯性特性

采用团聚质量矩阵。除结构自身质量外, 屋面荷载按静力等效原则作用于网壳节点, 这些等效集中力作为节点的等价集中质量, 且在空间三个自由度方向具有相同惯性作用。

(4) 方程求解

为了求出方程(1) 在整个时程 T 的解, 将 T 划分为几个相等的时间区间 ΔT , 在时刻 0 、 Δt 、 $2\Delta t$ 、 \dots 、 t 、 $t+\Delta t$ 、 \dots 、 T 上求解方程的近似解。本文采用Newmark计算格式, 对网壳结构进行动力时程分析计算。重复上述计算, 可得整个运动过程的解答。

4. 非线性屈曲分析

4.1 屈曲载荷

由于前面施加载荷为单位载荷, 所以取第一阶模态的比例因子作为模型的屈曲临界载荷, 即为89805, 见表1。

表1 ANSYS 计算出的网壳屈曲荷载

Table 1 Calculate the net shell buckling load taking place ANSYS

模态数	屈曲临界载荷	荷载步	荷载子步
1	89805	1	1
2	89805	1	2
3	0.10046×10^6	1	3

4.2 非线性屈曲分析结果

经ANSYS有限元分析得到部分节点的载荷—位移曲线, 见图4。

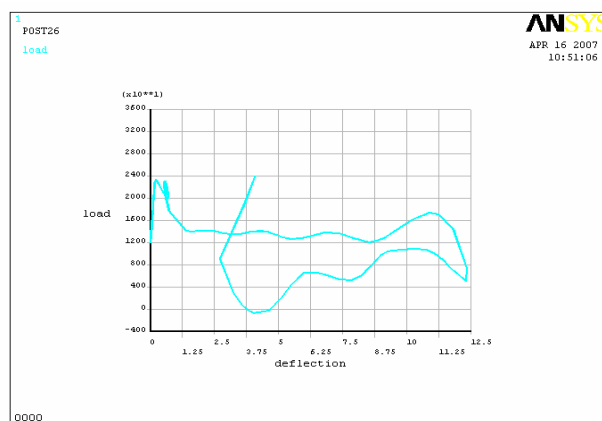


图4 部分节点的载荷—位移曲线
Fig.4 Part node loading displacement curve

5. 结论

本文研究了 K6 单层球面网壳非线性屈曲特性的分析，分析结果表明：

(1) 把工程结构看成是理想弹性的特征值屈曲分析明显没有考虑初始缺陷和材料非线性、大变形等非线性因素。

(2) 结构发生屈曲时，其变形方式会发生分叉，但是这对结构发生失稳时的临界载荷影响很小，在工程分析中若只需要计算结构的临界载荷，则不用过多地考虑这种分叉性。

(3) 特别需要注意的是，一个非收敛的解并不意味着结构达到了其最大载荷，也可能是由于数值的不稳定性引起的，可以通过细化模型的方法来修正。

参考文献

- [1] 陈务军, 董石麟, 付功义, 龚景海, 何艳丽. 施威德勒型局部双层网壳结构特性分析. 空间结构, 第 7 卷第 1 期, 2001.3:25-32
- [2] 姚建锋, 余建国, 高博青, 董石麟. 网壳结构的动力性能分析. 空间结构, 2002.9 第 8 卷第 3 期
- [3] 肖建春, 聂建国, 马克俭, 董石麟. 单双层浅网壳结构的结构分析, 清华大学学报(自然科学版) 2002.42 (SI) 105-108
- [4] 肖建春, 马克俭. 单双层浅网壳结构的几何非线性稳定分析. 空间结构, 2003.6 第 9 卷第 2 期
- [5] 张年文, 董石麟, 黄业飞, 赵阳. 考虑几何非线性影响的单层网壳优化设计. 空间结构, 第 9 卷第 1 期, 2003.3:31-44
- [6] 沈炎祖, 陈扬骥. 网架与网壳[M]. 上海, 同济大学出版社, 1997:190—195

Owing to the ANSYS Jiweite spherical surface net shell nonlinearity buckling, characteristic property studies

Zhang Ningning¹, Zhu Pinqian²

1 College of Civil and Architectural Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin (123000)

2 Precious seductive Shanghai Franz Joseph Haydn engineering Ltd., Shanghai (200092)

Abstract

The spherical surface covers the main body of a book as with a net mainly with Jiweite single layer for shell studying a marriage partner , ANSYS carries out nonlinearity buckling analysis on the person with finite element method software , forecast the architectural theory of an ideal elasticity buckling intensity, critical load and modal form of buckling also being that elasticity buckling analyses method , ascertains a net when shell structure begins to become unsteady. Whose displacement deformation curve shows outgoing line before structure reaching buckling loading sexual relationships, the curve will follow other route after reaching buckling. The spherical surface covers the main body of a book as with a net mainly with Jiweite single layer for shell studying a marriage partner , ANSYS carries out nonlinearity buckling analysis on the person with finite element method software , forecast the architectural theory of an ideal elasticity buckling intensity, critical load and modal form of buckling also being that elasticity buckling analyses method , ascertains a net when shell structure begins to become unsteady. Whose displacement deformation curve shows outgoing line before structure reaching buckling loading sexual relationships, the curve will follow other route after reaching buckling.

Keywords: Nonlinearity buckling analysis, structure stability, finite element method, critical load

作者简介:

张宁宁, 男, 1982 年生, 硕士研究生, 研究方向是空间结构, 钢结构;

朱品乾, 男, 1978 年生, 助理工程师, 上海宝冶海顿工程技术有限公司工作。