

# 荷载非对称分布对单层球面网壳稳定性的影响\*

张春丽<sup>1</sup>, 李正良<sup>1</sup>, 赵一<sup>1</sup>, 邵福建<sup>2</sup>

(1.重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2.中国房地产集团开封总公司, 河南开封 475001)

**摘要:**利用结构分析软件 ANSYS, 对不同跨度、不同矢跨比及不同截面的单层球面网壳结构进行了非对称荷载作用下的非线性全过程稳定分析。通过变化不同的参数, 考察荷载非对称分布对单层球面网壳稳定性能的影响规律, 对工程设计有一定的指导意义。

**关键词:**球面网壳; 稳定性; 非对称分布

**中图分类号:**TU311.2      **文献标识码:**A      **文章编号:**1006-7329(2004)02-0063-05

## Effect of Unsymmetrical Loading Distribution to the Stability of Single - Layer Latticed Domes

ZHANG Chun - li<sup>1</sup>, LI Zheng - liang<sup>1</sup>, ZHAO Yi<sup>1</sup>, SHAO Fu - jian<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Kaifeng Company of the Real Estate Group, Henan Prov. kaifeng 475001, P. R. China)

**Abstract:** Based on structure analysis software ANSYS, a non - linear complete - process analysis of stability behavior of single - layer latticed domes with different span and different rise - span ratio and different section is carried out. The effect of unsymmetrical loading distribution to the stability behavior of single layer latticed domes with various parameters is also analyzed. Some important conclusions are acquired and can be used as guidance to engineering design.

**Keywords:** single - layer lattice vaults; stability; unsymmetrical distribution

单层球面网壳具有优美的建筑造型和良好的力学性能,深受工程界的青睐。但由于其相对厚度较薄,几何非线性程度高,对稳定性特别敏感。并且球面网壳结构屋面一般设计成轻型屋面,作用于结构上的恒载较小,不对称荷载(如风载雪载)对网壳的稳定性有明显影响。在国内外实际工程中的网壳结构失稳就是遇到了不均匀的雪载,如1963年罗马尼亚布加勒斯特一个平面直径为93.5 m的单层球面网壳在大雪下失稳倒塌。而我们在实际设计某一结构时,需要考虑多种荷载组合,荷载分布在大多数情况下是不对称的,且非对称荷载通常是不利的荷载分布,对结构的受力性能可能会有明显影响。对于单层球面网壳结构来讲,结构设计可能由稳定承载力控制,荷载非对称分布对球壳结构稳定性能的影响程度,迄今没有明确的概念。本文试图运用大规模参数分析的方法对这一问题作一较为深入的探讨。利用ANSYS对一系列具有不同参数的球面网壳进行荷载-位移非线性全过程分析,系统地考虑了不同参数的非对称荷载分布,得出了它们的极限承载力,并进一步考察了它们对网壳稳定性能的影响。在分析过程中,仅考虑了几何非线性,因为网壳结构的正常工作状态是在弹性范围内,材料非线性对结构全过程曲线及其极限点的影响实际上是使结构稳定承载力的安全储备稍有下降,这种影响已有可能从定量上作出适当判断<sup>[1]</sup>。

\* 收稿日期:2003-11-25

作者简介:张春丽(1979-),女,河南商丘人,硕士生,主要从事高层及大跨结构研究。

## 1 计算理论

### 1.1 刚度矩阵<sup>[4]</sup>

根据网壳结构的受力特点及采用杆件的截面特性,在单刚推导过程中采用基本假设:(1)单元是等截面的,且双轴对称,这样就排除了扭转刚度与弯曲刚度以及扭转刚度与轴向刚度的相互耦联;(2)不考虑剪切变形和截面翘曲;(3)外荷载仅作用在结点上,且与变形无关。依据梁-柱理论直接建立平衡方程来推导空间梁单元在整体坐标系下的切线刚度矩阵 $[K]$ :

$$[K] = [R]([A][k][A]^T + [C])[R]^T \quad (1)$$

式中: $[R]$ 为局部坐标系与整体坐标系的转换矩阵; $[k]$ 为相对位移的切线刚度矩阵; $[A]$ 、 $[C]$ 是 $12 \times 12$ 的系数矩阵。

### 1.2 路径跟踪方法

球面弧长法具有较强且稳定的非线性跟踪分析能力,其越过极值点的能力较强且稳定,即使当正切刚度矩阵的倾斜为零或负值时,也可以阻止发散。这种迭代方法以图形表示在图 1 中。

其约束方程为

$$\{(t+\Delta t)\lambda^{(i-1)} - t\lambda\} + \Delta\lambda^{(i)}\}^2 + U^{(i)T}U^{(i)} = \Delta l^2 \quad (2)$$

其实, $U^{(i)} = t+\Delta U^{(i)} - tU$ ,  $t+\Delta\lambda^{(i-1)} = t+\Delta\lambda^{(i)} - \Delta\lambda^{(i)}$ ,  $U^{(i)}$ 是当前位移, $t+\Delta\lambda$ 是荷载比例系数, $\Delta l$ 是每步迭代的弧长增量。

### 1.3 临界点的判别准则

结构在每一荷载增量下的稳定性能都与结构当时的切线刚度有关。正定的切线刚度矩阵对应于结构的稳定平衡状态;非正定的切线刚度矩阵对应于结构的不稳定平衡状态;而奇异的切线刚度矩阵对应于结构的临界状态。

在计算求解时采用  $LDL^T$  分解,每步计算都将刚度矩阵分解为以下形式:

$$K = LDL^T \quad (3)$$

其中  $L$  是主元为 1 的下三角阵, $D$  是对角矩阵。则有切线刚度矩阵  $K$  与对角矩阵  $D$  的左上角各阶主子式的行列式相等。因此矩阵  $K$  是否正确完全可以由矩阵  $D$  来判别。

## 2 计算模型及参数分析方案

以联方型单层球面网壳作为研究对象,网壳跨度  $L$  为 40 m、50 m,矢跨比为 1/5、1/6、1/7、1/8。为了使杆件不致于过于密集,而且不会影响整个网壳的稳定性能,故灵活处理了一下网壳网格划分形式。40 m 跨度网壳网格划分形式为径向杆(肋)划分为 6 段,沿圆周方向(环向)则为 24 等分,但内部三环变为 12 等分和 6 等分(最内一环),这样中央网壳部分就不是典型的联方体系;50 m 跨度的网壳的网格划分形式类似,只是径向杆分为 7 段,而沿环向增为 32,如图 2 所示。

杆件长度控制在 3~5 m 范围内,两种跨度联方型单层球面网壳的再分频数( $NF$ )和相应的结构结点数及单元数如表 1 所示。

考虑两种荷载分布:满跨均布和半跨均布;恒载满跨均布,活载可满跨也可半跨均布(见图 3),但活载( $p$ )和恒载( $g$ )考虑四种不同荷载比例: $p/g = 0, 1/4, 1/2, 1$ 。

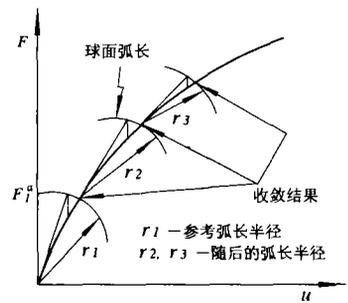


图 1 弧长法迭代过程

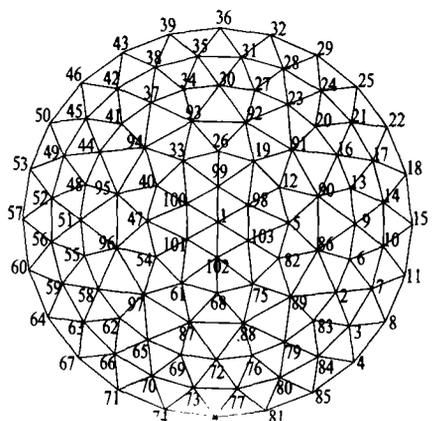


图 2 40 m 跨度单层联方型球壳网格划分及结点编号

表1 网壳的再分频数、结点数和单元数

跨度	频数	结点数	单元数
40 m	6	103	282
50 m	7	169	472

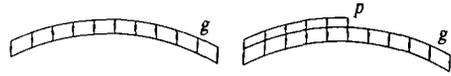


图3 荷载分布形式

杆件采用实际规格圆钢管,对每种跨度网壳均选用四套不同的截面尺寸。截面增强顺序为1、2、3、4截面,表2中列出各种跨度的工程中常用的规格的具体截面尺寸。

表2 网壳所选用的具体截面尺寸

跨度	1号截面	2号截面	3号截面	4号截面
40 m	$\varphi 102 \times 3.5$	$\varphi 114 \times 4$	$\varphi 121 \times 4$	$\varphi 127 \times 4.5$
50 m	$\varphi 121 \times 4$	$\varphi 127 \times 4$	$\varphi 133 \times 4.5$	$\varphi 140 \times 5$

单层网壳的结点均为刚性连接,其周围的支承结点一般也均固接在下部支承结构上。因而当下部支承结构具有一定刚度时,球面网壳的支承结点均应按固接考虑。在本文的参数分析方案中,其基本部分均假定支座为固接。综合以上参数确定的情况,具体选用如表3所示。

表3 参数分析方案

跨度	截面	矢跨比	荷载形式
40 m	4种	$f/L = 1/5, 1/6, 1/7, 1/8$	$p/g = 0, 1/4, 1/2, 1$
50 m	4种	$f/L = 1/5, 1/6, 1/7, 1/8$	$p/g = 0, 1/4, 1/2, 1$

### 3 按荷载参数组合的荷载-位移全过程曲线

一个单层联方球面网壳多达几百个结点,对每例进行荷载-位移全过程分析后,每个结点都可画出一条荷载-位移曲线。为避免不必要的繁琐,对每个结构仅取迭代结束时位移最大的结点绘出其全过程曲线作为典型代表。便于比较按荷载参数组合,把所得的全过程曲线示于图4,为节省篇幅,本文仅列出40 m的1号截面的曲线。这些曲线均以总荷载( $p + g$ )为纵坐标,可以看出这些全过程曲线都很有规律性。如当理想单层联方球面网壳达到第一个临界点时,位移一般不超过跨度的1/250。

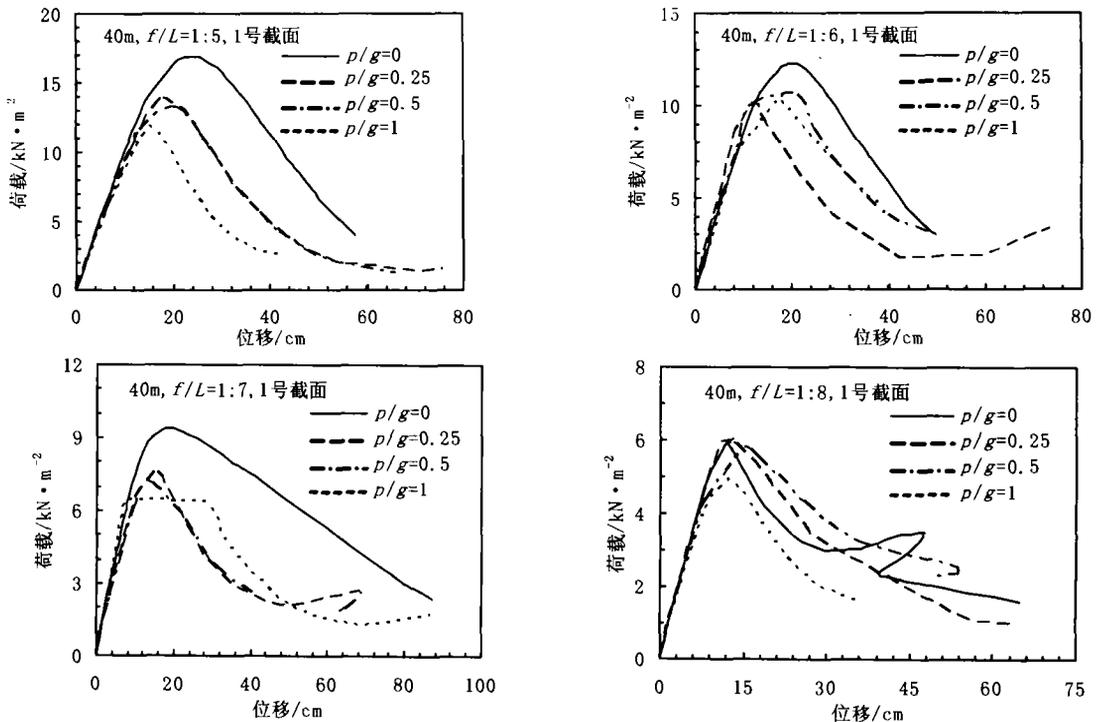


图4 网壳在不对称荷载作用下( $p/g = 0, 1/4, 1/2, 1$ )的全过程曲线

在竖向荷载作用下,网壳杆件的主要内力是轴力,且多为压力,但此类结构,有可能在结构的边缘部位少许杆件受拉<sup>[7]</sup>。而绝大多数杆件的弯曲应力和剪应力所占比例较小,整个网壳基本以薄膜力的方式承受荷载作用,杆件轴力变化比较平缓,分布也比较均匀,荷载主要是通过主肋和斜向杆来传递的,受力合理。结构边缘杆件,剪力和弯矩所引起的应力与轴力引起的应力相比较,其比值向跨中迅速衰减,但对于结构设计,这些杆件都不是控制杆。整个网壳结构传力路径明确,受力合理,杆件在一个整体中协同工作,是比较合理的空间结构体系。其屈曲均从主肋结点开始,多数情况下,从支环算起第四、第五或第六环的某个结点产生明显位移,然后随荷载增大形成逐渐扩大的凹陷(图5)。

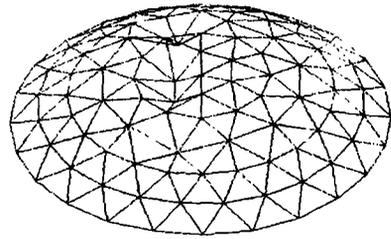


图5 40 m跨度1号截面网壳  
在  $p/g = 1/4$  的屈曲模式

#### 4 荷载非对称分布对单层球面网壳稳定性的影响

取第一个临界点(极值点或分枝点)处的荷载值作为结构的极限荷载。结构的极限承载力随  $p/g$  的变化规律如图6(为节省篇幅,仅列出  $L = 40$  m的情况),可以看出球面网壳对荷载的不对称分布并不十分敏感。当以  $p + g$  来定义极限荷载时,结构的稳定承载力随  $p/g$  的增大总体呈下降趋势,但下降缓慢。不对称荷载作用下网壳稳定承载力以  $(p + g)$  考虑,表4~表6给出了理想网壳在不对称荷载作用下,网壳稳定承载力相对于对应情况下对称荷载作用下网壳稳定承载力的比值。定义  $k$  为荷载非对称分布时极限荷载是荷载对称分布时极限荷载多少的降低系数,利用 MATLAB 软件回归得

$$k = -0.3678(p/g)^3 + 0.7296(p/g)^2 - 0.5771(p/g) + 1.0000$$

进一步分析,不对称荷载可以分解为对称荷载  $(g + p/2)$  加上反对称荷载  $(p/2)$ ,也就是说,相当于在均布荷载  $g + p/2$  作用下加一个反对称的干扰。所以如果把  $g + p/2$  作为荷载-位移曲线的纵坐标,则它的极限荷载相对于满跨均布荷载时极限荷载的比值,就代表这一反对称干扰的影响,表7给出了反对称荷载的影响系数(只给出了同一网壳四种不同截面的平均值)。

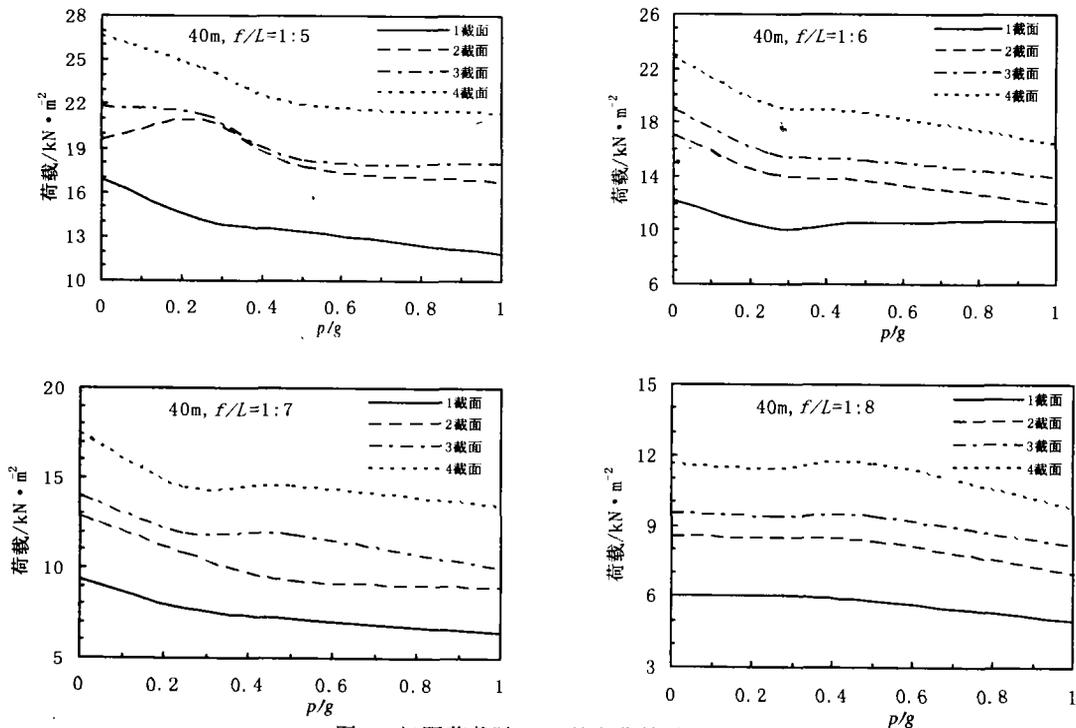


图6 极限荷载随  $p/g$  的变化关系

表4 不对称荷载影响系数(理想网壳) $p/g = 1/4$ 

截面	$L = 40\text{ m}$				$L = 50\text{ m}$			
	$f/L = 1/5$	1/6	1/7	1/8	1/5	1/6	1/7	1/8
1	0.835 7	0.825 7	0.821 6	0.995 6	0.966 2	0.832 9	0.832 0	0.918 4
2	1.069 9	0.828 8	0.838 5	0.984 2	0.953 9	0.892 3	0.831 6	0.891 8
3	0.972 5	0.824 2	0.849 8	0.982 9	0.960 0	0.871 7	0.930 2	0.882 0
4	0.915 4	0.842 1	0.827 8	0.979 8	0.909 0	0.761 7	0.880 2	0.905 9
平均值	0.948 4	0.830 2	0.834 4	0.985 6	0.947 3	0.839 7	0.879 5	0.899 5

表5 不对称荷载影响系数(理想网壳) $p/g = 1/2$ 

截面	$L = 40\text{ m}$				$L = 50\text{ m}$			
	$f/L = 1/5$	1/6	1/7	1/8	1/5	1/6	1/7	1/8
1	0.787 3	0.859 1	0.769 8	0.967 2	0.931 3	0.794 5	0.819 8	0.869 3
2	0.940 1	0.797 8	0.772 1	0.967 8	0.929 4	0.853 4	0.729 4	0.856 4
3	0.832 3	0.799 8	0.843 1	0.983 4	0.904 2	0.844 4	0.891 2	0.825 4
4	0.823 1	0.816 5	0.832 6	1.003 0	0.853 7	0.735 0	0.838 1	0.866 4
平均值	0.836 7	0.818 3	0.804 4	0.980 4	0.904 6	0.806 8	0.819 6	0.854 4

表6 不对称荷载影响系数(理想网壳) $p/g = 1.0$ 

截面	$L = 40\text{ m}$				$L = 50\text{ m}$			
	$f/L = 1/5$	1/6	1/7	1/8	1/5	1/6	1/7	1/8
1	0.699 7	0.868 6	0.686 8	0.818 8	0.776 7	0.747 5	0.779 6	0.776 4
2	0.853 6	0.692 7	0.691 4	0.809 1	0.852 5	0.806 6	0.744 8	0.784 9
3	0.823 9	0.730 1	0.711 7	0.853 2	0.886 7	0.802 1	0.832 0	0.772 5
4	0.799 5	0.714 4	0.765 7	0.837 1	0.823 8	0.705 1	0.795 6	0.780 1
平均值	0.794 2	0.751 5	0.713 9	0.829 6	0.834 9	0.765 3	0.788 0	0.778 5

表7 反对称荷载影响系数(理想网壳)

$p/g$	$L = 40\text{ m}$				$L = 50\text{ m}$			
	$f/L = 1/5$	1/6	1/7	1/8	1/5	1/6	1/7	1/8
1/4	0.853 6	0.747 2	0.751 0	0.888 4	0.852 6	0.755 7	0.791 6	0.809 6
1/2	0.697 3	0.681 9	0.670 6	0.816 9	0.753 9	0.672 4	0.697 7	0.712 1
1/1	0.595 7	0.563 6	0.535 4	0.622 2	0.620 8	0.573 9	0.572 9	0.583 9

从表7可以看出反对称干扰确实进一步降低了结构的稳定承载力,当 $p/g = 1/4$ 时降至均布荷载的75%~89%;当 $p/g = 1/2$ 时降至均布荷载的67%~82%;当 $p/g = 1$ 时降至均布荷载的54%~62%。结构的稳定承载力随 $p/g$ 的增大仍成下降趋势,且下降幅度较大。

## 5 结束语

单层联方球面网壳表现出良好的空间工作性能,其屈曲均从主肋结点开始,一般是个别杆件先于整体屈曲,并且荷载不对称分布对它的极限荷载影响不大。从实用角度考虑,以 $p + g$ 为荷载指标,荷载非对称分布引起单层球面网壳极限荷载的降低,降低系数为

$$k = -0.3678(p/g)^3 + 0.7296(p/g)^2 - 0.5771(p/g) + 1.0000$$

## 参考文献:

- [1] 王娜,陈昕,沈世钊.网壳结构弹塑性大位移全过程分析[J].土木工程学报,1993,26(2):19-28
- [2] 赵才其,朱建坤,赵惠麟.单层球面网壳非线性稳定分析的近似方法[J].工业建筑,1999,29(11):70-72.
- [3] 陈应波,陈军明,李秀才.单层球面网壳结构的力学性能研究[J].武汉理工大学学报,2003,25(5):40-49.
- [4] 沈世钊,陈昕.网壳结构稳定性[M].北京:科学出版社,1998.
- [5] 张峰,沈世钊.荷载非对称分布对单层柱面网壳稳定性的影响[J].哈尔滨建筑大学学报,1998,31(1):31-36
- [6] 沈世钊,陈昕,林有军,等.单层球面网壳的稳定性[J].空间结构,1997,3(3):3-12
- [7] 尹德珏,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.
- [8] 王永跃,吴德伦.刚架分析德割线刚度弧长法[J].重庆建筑大学学报,1996,18(1):27-31.