

# 网壳结构稳定性分析的改进随机缺陷法智能控制

唐 敢<sup>1,2</sup> 郭小明<sup>1</sup> 练兰英<sup>2</sup> 尹凌峰<sup>1</sup>

(1. 东南大学土木工程学院, 南京, 210096; 2. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016)

**摘要:**以作者前期研究的网壳结构缺陷稳定分析的改进随机缺陷法为基础,将异常值检验、临界荷载分布规律检验、设计临界荷载的取值等与随机缺陷稳定计算程序相结合,并增加智能控制模块,实时监察临界荷载分布规律及其统计参数的变化。当计算样本容量已能够恒定反映临界荷载的分布规律时即可停止整个缺陷稳定分析过程,从而使随机缺陷稳定性分析的计算工作量尽量小。计算结果表明,程序智能控制的样本数能够恒定反映临界荷载的分布规律。改进随机缺陷法智能控制程序的开发不但节约了网壳结构随机缺陷稳定分析的样本数和计算时间,而且为计算样本数的选取提供了依据,从而可针对不同分析对象确定需要的最小样本数。

**关键词:**网壳结构; 改进随机缺陷法; 智能控制; 临界荷载

**中图分类号:**TU311.2      **文献标识码:**A      **文章编号:**1005-2615(2012)03-0409-06

## Intelligent Control of Advanced Stochastic Imperfections Method for Stability Analysis of Lattice Shells

Tang Gan<sup>1,2</sup>, Guo Xiaoming<sup>1</sup>, Lian Lanying<sup>2</sup>, Yin Lingfen<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China;

2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:**Based on the advanced stochastic imperfections method, the program of stochastic imperfections stability analysis is combined with abnormal value examination, statistical regulation of critical loads, and selection of critical design load. And an intelligent control module is developed. The distribution and parameters of critical loads can be monitored in real time. When the calculation number is large enough to reflect the statistical regulation of critical loads invariably, the whole process is stopped instantly. Examples show that the calculation number selected by the intelligent control module can reflect the statistical regulation of critical loads invariably. The calculation number and time are greatly reduced and it provides the theoretical foundation for the selection of calculation number. It is achieved that the minimum calculation number is determined in accordance with different latticed shells.

**Key words:**latticed shells; advanced stochastic imperfections method; intelligent control; critical loads

近几十年以来,空间结构因其受力合理,刚度大,重量轻,造价低,结构形式新颖丰富,生动活泼,可以突出结构美而富有艺术表现力,在国内外应用非常广泛。其中,网壳结构是典型的三维结构,各杆件协同作用,合理的曲面可使结构力流均匀,应力

峰值较小。此外,网壳建筑造型美观多样,不论建筑平面、立面或型体都能给人以美的感受,较之平板网架,网壳结构具有自动排水的功能,这使得网壳结构越来越广泛地应用于体育馆、展览馆、飞机库、机场航站楼等各种大跨度建筑结构中。

**基金项目:**国家自然科学基金(51008067)资助项目;航空科学基金(2010ZA52009)资助项目;江苏省六大人才高峰基金(2010-JZ-007)资助项目;南京航空航天大学基本科研业务费(NS2010018,2010ZA52009)资助项目。

**收稿日期:**2011-02-07; **修订日期:**2012-02-13

**通讯作者:**唐敢,男,博士后,副教授,1976年出生,E-mail:tangan@sina.com。

随着建筑材料、计算机技术和结构理论的发展,网壳结构总的发展趋势是:跨度越来越大,所用材料越来越经济。空间网壳结构,尤其是单层网壳结构受载时其构件以受压为主,结构位移较大,非线性(几何非线性、材料非线性)的影响十分明显,典型的破坏形态为失稳破坏;并且,网壳结构为缺陷敏感性结构,初始缺陷对网壳结构稳定性的影响非常显著。缺陷稳定性分析,已成为空间网壳结构设计中的关键问题<sup>[1-3]</sup>。

## 1 网壳结构缺陷稳定性分析

结构稳定性分析的主要目的是确定结构的临界荷载,目前工程上常用的稳定分析方法有两种,即特征值(线性)屈曲分析和非线性稳定分析。特征值屈曲分析用于预测一个理想弹性结构的理论屈曲强度,该方法相当于弹性屈曲分析方法。但是,非线性和初始缺陷等因素使得很多实际结构都不是在其理论弹性屈曲强度处发生屈曲,因此,特征值屈曲分析经常得出非保守结果,通常不能用于实际的工程分析。非线性稳定分析用一种逐渐增加载荷的非线性静力分析技术来求得使结构开始变得不稳定时的临界载荷,可应用各种非线性技术,还可以跟踪结构的后屈曲行为,因而可用于对实际结构的设计或计算。随着计算机的发展和广泛应用,非线性有限元分析方法逐渐成为结构稳定性分析的有力工具。本文所有非线性稳定分析都是在通用有限元分析软件 ANSYS 上完成。

对于整个网壳结构的稳定性,初始曲面形状的安装偏差,即各结点位置的偏差是一个起主要作用的初始几何缺陷因素<sup>[1-4]</sup>。考虑这种缺陷面临两个问题:(1)如何确定初始缺陷的模式,(2)如何确定缺陷的最大值 $R$ 。第二个问题由施工方式、施工水平、工人素质等因素决定。

在缺陷分析中典型方法有两类:一类是确定性方法<sup>[1-2,4-6]</sup>,它通过实测或人为假定,将结构的初始缺陷的大小、分布等完全确定下来,然后进行稳定研究分析,得到临界荷载和屈曲路径,并与理想结构进行对比分析,从而确定初始缺陷的影响。实测缺陷法<sup>[1]</sup>和一致缺陷模态法<sup>[2,4]</sup>均属于此类方法。另一类为随机缺陷的方法<sup>[1-2,7-9]</sup>,它认为初始缺陷是随机的,在此基础上通过随机计算得到结构的临界荷载,从而研究确定初始缺陷的影响。作者在对结构缺陷稳定性研究提出的改进随机缺陷法<sup>[1]</sup>即属于一种随机缺陷的方法。

结构初始曲面形状的安装偏差受多种因素如施工程序、安装设备、测量技术、工人的熟练程度和素质等影响,因此,从本质上讲,结构的缺陷分布是随机的,因而随机缺陷方法更能反映实际结构的工作性能。改进随机缺陷法实现了形成缺陷分布、将缺陷叠加到理想结构上形成非完善结构、对样本进行非线性计算、计录和输出结果等过程的全计算机化,从而使改进随机缺陷法完全可用于分析复杂结构和实际工程。另外,利用假设检验方法可分析出不同结构的各种临界荷载分布规律,从而为设计临界荷载的取值及其可靠性的定量衡量提供理论依据。

## 2 改进随机缺陷法智能控制

改进随机缺陷法不能自动控制计算样本数,仅能人工输入需要计算的样本数,且需要计算的个数也仅是靠计算经验去选取,目前,关于随机法的计算样本数 $N$ 并没有一个定数,靠计算经验选取计算样本数使得计算的样本数因人而异,在作者的前期研究中,曾建议取 $N=100$ ,而文献<sup>[10]</sup>中则取了 $N=1\ 000$ 。计算样本数取得过大,将导致计算工作量大大增加;过小,则无法反应出分布规律。另外,改进随机缺陷法中假设检验工作都是在数学软件 MathCAD 中进行,而非线性稳定分析是在软件 ANSYS 上完成的,假设检验与计算工作分别在不同的软件上进行,从而使得操作比较复杂。

针对以上情况,以改进随机缺陷法为基础,将异常值检验、临界荷载分布规律检验、设计临界荷载的取值等嵌入到 ANSYS 二次开发计算程序,编写智能控制模块,在一个平台上实现形成缺陷分布、将缺陷叠加到理想结构上形成缺陷结构、对样本进行非线性计算、计录和输出结果等过程的全计算机化及自动化;实现计算样本数、临界荷载分布规律及其统计参数、是否出现异常值、设计临界荷载等参数的实时显现和误差分析,从而控制整个缺陷稳定分析过程,当计算结果已能够恒定反映临界荷载的分布规律时即可停止整个缺陷稳定分析过程,尽量节省计算工作量。

### 2.1 基本假定

与改进随机缺陷法采用相同的假定:

(1)在随机缺陷模态法中,假定每个结点的位置偏差符合二倍均方差范围内的正态概率密度函数,即每个结点的位置偏差随机变量为 $RX/2$ ,其中随机变量 $X$ 服从标准正态分布,即 $X \sim N(0,1)$ 。作

者曾对6个试验模型和南通体育会展中心体育馆钢屋盖结构的结点位置偏差实测数据进行了较为系统的概率统计及假设检验分析,研究结果验证了该假定的正确性<sup>[11]</sup>。

(2)由于实际结构初始安装误差影响因素非常多,进一步假定各结点位置偏差相互独立。

2.2 异常值检验

在参数估计与假设检验时都假定样本数据是来自某个总体 $X$ 的,即它们是独立同分布的随机变量,且它们的分布都与 $X$ 的分布相同。但若由于种种原因,在数据中出现过大或过小的数据,从数理统计的观点,不能认为这些数据来自总体 $X$ 。这些数据通常称为异常值。当临界荷载样本中出现异常值时,不能随便取舍。首先应分析、判断对该样本的有限元非线性计算的正确性。重新检查、计算。如果找不出原因,在进行统计推断之前,可以用显著性检验的方法把异常值从样本数据中检查出来。

设总体 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ,则按 $3\sigma$ 准则有
$$P(|X - \mu| \geq 3\sigma) = 0.003$$
即对任意一个 $x_i$ ,它落在区间 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 之外的概率为0.3%,这是一个小概率。按照实际推断原理,小概率事件在一次试验中通常是不应该发生的,因此可以把 $x_i$ 视作异常值。由于 $\mu$ 和 $\sigma$ 是未知的,用它们的极大似然估计值 $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ 与 $s_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ 来代替,在重新检查、计算后, $\frac{|x_i - \bar{x}|}{s_n} > 3$ 时,把 $x_i$ 看作异常值。

2.3 分布检验

$\chi^2$ 拟合优度检验法是最主要的一种非参数检验方法。它实质上是要解决可否用已知总体的分布去拟合未知总体 $X$ 的分布,其思想是将样本空间划分成 $k$ 个互不相交的区间, $(a_0, a_1], (a_1, a_2], \dots, (a_{k-1}, a_k]$ ,  $n_i$ 为落入第 $i$ 个子区间中的实际频数,  $n = \sum_{i=1}^k n_i$ 为样本容量。然后从考察实际频数 $n_i$ 与期望频数 $np_i$ 的显著的差异性入手,寻求并构造下列服从分布的检验统计量

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - E_i)^2}{E_i}$$

英国著名统计学家皮尔逊(K Pearson)证明了当样本容量 $n$ 很大的时候,这个统计量近似地服从 $\chi^2(k-1)$ 分布。统计学家费歇(R Fisher)又证明了

当分布函数中含有 $r$ 个未知参数,需要以它们的极大似然估计去替代时,这个统计量近似地服从 $\chi^2(k-1-r)$ 分布。于是对于给定的显著性水平 $\alpha$ ,确定检验的拒绝域为 $(\chi_{1-\alpha}^2(k-r-1), +\infty)$ 。最后,根据样本计算的统计量是否落入拒绝域来判断原假设是否成立。

运用 $\chi^2$ 拟合优度检验法进行分布的假设检验时需注意计算的样本容量 $n$ 不宜太小,一般要求不能少于50,此外,在结果恒定检验中一般数目不小于5个,故本文在 $i \geq 55$ 时开始进行临界荷载的分布规律恒定检验。

根据作者前期已有的研究及大量的试算,单层网壳结构随机缺陷法计算的设计临界荷载均呈现正态分布规律,所以编制程序时假定结果数据为正态分布,其统计参数包括均值和均方差。

2.4 结果恒定检验

- 采用两个检验准则:
- (1) 临界荷载的分布恒定,即临界荷载的分布不随样本数目的增加而改变;
  - (2) 临界荷载分布的统计参数恒定,即临界荷载分布统计参数相对误差均小于设定的设定的阈值 $\epsilon$ 。

当计算结果同时满足这两个检验准则时,即认为计算结果已能够恒定反映临界荷载的分布规律,可停止整个缺陷稳定分析过程。

2.5 程序编制

程序流程图见图1。图1是整个程序的运行过程,为了方便使用,程序中还增加了各功能单独使用的子程序,包括仅形成缺陷分布,仅建立模型,对样本从第 $i$ 个至第 $j$ 个进行计算并对计算样本数进行判断,仅对样本从第 $i$ 个至第 $j$ 个进行计算,仅对计算样本数进行判断及结果输出等。灵活运用这些子程序,可以大大提高效率。

3 算 例

3.1 算例1

如图2所示,K8型凯威特单层球面网壳<sup>[2]</sup>,跨度 $L=50$  m,矢跨比 $f/L=1/6$ ,杆件采用空心热轧圆钢管,主肋和环肋截面为 $\varnothing 140 \times 5$ ,斜杆截面为 $\varnothing 133 \times 4$ 。网壳仅受竖向结点均布荷载,支座情况为周边固接。有限元计算模型中,杆件均采用两节点的Timoshenko梁单元。对于几何非线性,考虑大变形效应,即采用大变形,小应变假定;对于材料非线性,材料本构关系采用理想弹塑性模型,屈服准则采用Von Mises屈服准则,屈服强度为235

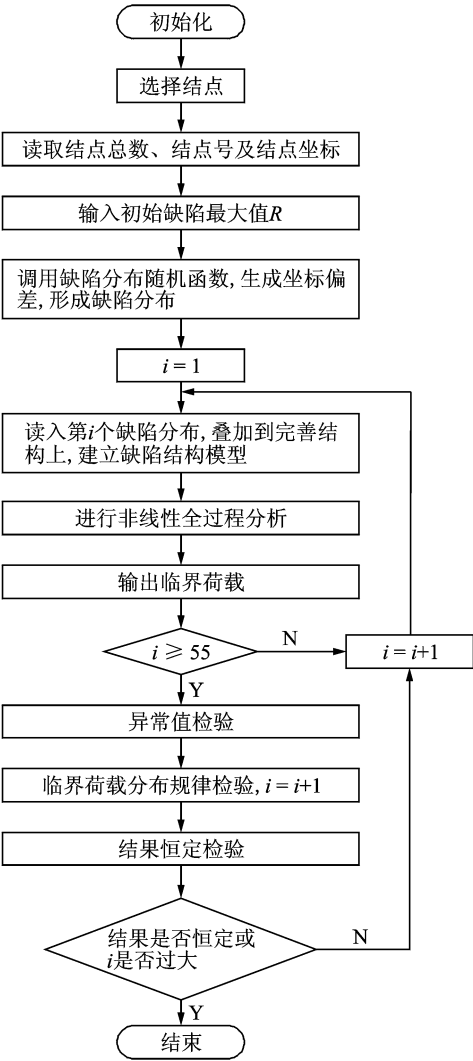


图1 程序流程图

MPa。非线性求解采用基于全牛顿-拉普森法的弧长法,收敛准则采用力收敛检查。缺陷最大值  $R$  取为  $L/1\,000=5\text{ cm}$ 。

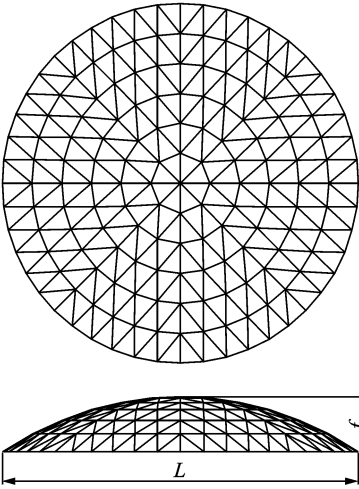


图2 K8型凯威特(Kiewitt)网壳

对完善结构进行几何非线性全过程分析,临界荷载为  $11.63\text{ kN/m}^2$ ,双非线性分析的临界荷载为  $7.81\text{ kN/m}^2$ ,与仅考虑几何非线性时相比降低了  $32.81\%$ 。

对K8型网壳进行随机缺陷稳定性分析,程序自动停止计算时,几何非线性和双非线性计算样本数  $N$  均为55。图3和图4表示了临界荷载的均值与均方差随样本数目增加的变化过程。结果恒定检测表明,当  $N\geq 50$  后,临界荷载均符合正态分布,且均值和均方差的变化均较小。因而可认为程序智能控制的样本数已能够恒定反映临界荷载的分布规律,停止整个缺陷稳定分析。

采用“ $3\sigma$ 原则”得到几何非线性和双非线性的概率可靠度为  $99.87\%$  的设计临界荷载值分别为  $6.13\text{ kN/m}^2$  和  $4.06\text{ kN/m}^2$ ,与完善结构相比分别降低了  $47.24\%$  和  $48.02\%$ 。

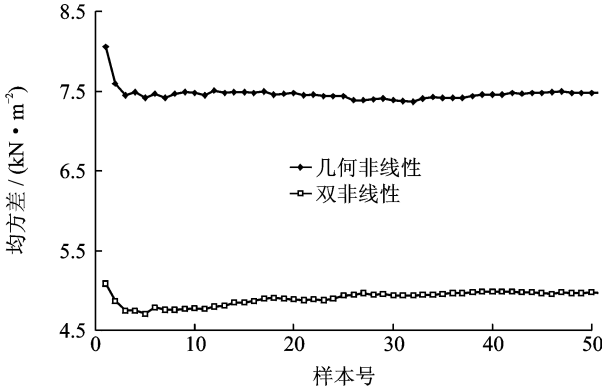


图3 算例1均值变化过程

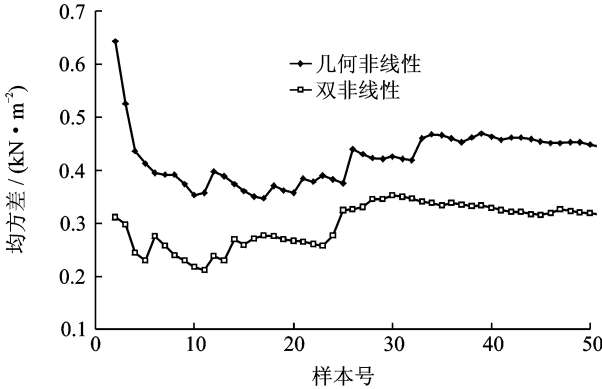


图4 算例1均方差变化过程

3.2 算例2

如图5所示,50 m跨度的K6型单层球面网壳,矢跨比  $f/L=1/5$ ,杆件采用空心热轧圆钢管,截面均为  $\varnothing 180\times 5$ 。网壳仅受竖向结点均布荷载,支座

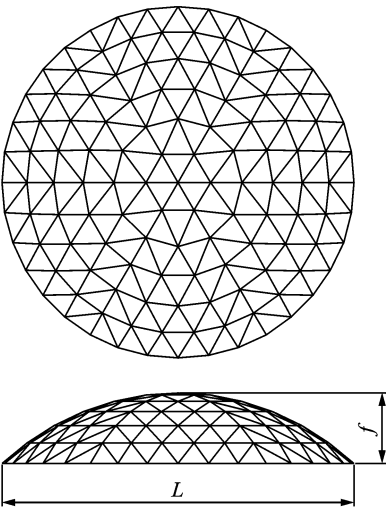


图5  K6型凯威特(Kiewitt)网壳

情况为周边铰接。考虑几何非线性,不考虑材料非线性。与文献[1]一样,设定缺陷的最大值 $R=6\text{ cm}$ 。

程序自动停止计算时,计算样本数 $N=55$ ,比文献[1]中选取的 $N=200$ 及 $N=100$ 均小,减少了不少计算量。结果恒定检测表明,当 $N\geqslant 50$ 后,临界荷载均符合正态分布,且均值和均方差的变化均较小。因而,可认为程序智能控制的样本数已能够恒定反映临界荷载的分布规律,停止整个缺陷稳定分析。采用“ $3\sigma$ 原则”,设计临界荷载 $P_{\text{cr}}=\mu-3\sigma=$

$9.772\text{ kN/m}^2$ ,它与100个样本的设计临界荷载<sup>[1]</sup>相差5.30%,与200个样本的设计临界荷载<sup>[1]</sup>相差1.36%。详细结果比较见表1。

3.3  算例3

取文献[2,4]中的50 m 跨度、矢跨比1/6 的K6型凯威特单层球面网壳进行几何非线性随机缺陷稳定性分析,截面类型与文献[2,4]一致,是工程中常用的截面类型,其中主肋和环肋采用较大截面,斜杆采用较小的截面。缺陷的最大值 $R$ 分别采用 $L/1\,000,L/500,L/300$ 。每种参数方案的计算过程与实例1,2 相同。

计算结果见表2,其中设计临界荷载均采用“ $3\sigma$ 原则”,即设计临界荷载 $P_{\text{cr}}=\mu-3\sigma$ ,在临界荷载服从正态分布条件下其概率可靠度为99.87%。

从上述计算结果可以看出,K6型凯威特单层球面网壳随机缺陷稳定性分析的临界荷载均呈现正态分布规律;计算样本数比较恒定,一般在55~60 之间;缺陷最大值 $R$ 对网壳结构稳定性能的影响很大,随着缺陷最大值 $R$ 的增大,样本的最大值、最小值、均值均显著下降,而缺陷最大值 $R$ 对样本均方差的影响较复杂;设计临界荷载随着缺陷最大值 $R$ 的增大也显著下降,说明缺陷最大值 $R$ 对结构的缺陷敏感程度影响很大。

表1  算例2 计算结果比较

	样本数	最大值/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )	最小值/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )	均值/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )	均方差/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$\chi^2$ 拟合优度检验			设计临界荷载/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )
						$\chi^2$	$\chi^2_{1-\alpha}(k-r-1)$	结论	
本文	55	17.74	10.92	14.47	1.58	2.27	9.21	正态分布	9.77
文献[1]	100	17.84	10.92	14.63	1.45	2.26	5.59	正态分布	10.29
	200	17.87	10.92	14.50	1.53	5.57	9.49	正态分布	9.91

表2  算例3 计算结果

截面	$R/L$	样本数	最大值/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )	最小值/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )	均值/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )	均方差/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )	分布规律	设计临界荷载/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$ )
$\varnothing 127\times 3.5$ $\varnothing 140\times 4$	1/1 000	55	7.36	4.76	6.08	0.59	正态分布	4.31
	1/500	55	5.62	3.80	4.73	0.37	正态分布	3.61
	1/300	55	4.63	2.98	3.89	0.44	正态分布	2.57
$\varnothing 133\times 4$ $\varnothing 140\times 5$	1/1 000	55	9.10	5.99	7.59	0.71	正态分布	5.47
	1/500	55	6.91	4.76	5.96	0.45	正态分布	4.61
	1/300	55	5.82	3.85	4.90	0.53	正态分布	3.31
$\varnothing 140\times 4.5$ $\varnothing 152\times 5$	1/1 000	55	12.40	8.15	10.35	0.99	正态分布	7.38
	1/500	59	9.53	6.48	8.20	0.59	正态分布	6.44
	1/300	55	7.95	5.23	6.67	0.70	正态分布	4.58
$\varnothing 152\times 5$ $\varnothing 168\times 6$	1/1 000	55	16.42	11.37	13.87	1.11	正态分布	10.54
	1/500	59	13.09	8.84	11.15	0.79	正态分布	8.78
	1/300	55	11.17	7.16	9.13	0.89	正态分布	6.46

## 4 结 论

(1) 以作者前期研究的网壳结构缺陷稳定分析的改进随机缺陷法为基础,将异常值检验、临界荷载分布规律检验、设计临界荷载的取值等与随机缺陷稳定计算程序相结合,并增加智能控制模块,实时监察临界荷载分布规律及其统计参数的变化,当计算样本容量已能够恒定反映临界荷载的分布规律时即可停止整个缺陷稳定分析过程,从而使随机缺陷稳定性分析的计算工作量尽量小。

(2) 分别对—50 m 跨度的K8,K6 型单层球面网壳进行随机缺陷稳定性分析,结果表明,当计算样本数  $N$  大于一定数值后,临界荷载均符合正态分布,且均值和均方差的变化均较小,即程序智能控制的样本数能够恒定反映临界荷载的分布规律。

(3) 在作者的前期研究中建议结构随机缺陷稳定分析的计算样本数  $N=100$ 。算例结果表明,改进随机缺陷法智能控制程序的开发不但大大节约了网壳结构随机缺陷稳定分析的样本数和计算时间,而且为计算样本数的选取提供了依据,从而可针对不同分析对象确定需要的最小样本数,结束了靠经验选取样本数的历史。

(4) 对 50 m 跨度、矢跨比 1/6 的 K6 型凯威特单层球面网壳进行了参数化分析,结果表明,临界荷载均呈现正态分布规律;计算样本数比较恒定,一般在 55~60 之间;缺陷最大值  $R$  对网壳结构稳定性能的影响很大:随着缺陷最大值  $R$  的增大,样本的最大值、最小值、均值均显著下降,而缺陷最大值  $R$  对样本均方差的影响较复杂;设计临界荷载随缺陷最大值  $R$  的增大也显著下降。

### 参考文献:

[1] 唐敢. 板片空间结构缺陷稳定分析及试验研究[D]. 南京:东南大学,2005.

- [2] 沈世钊,陈昕. 网壳结构稳定性[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [3] 中国建筑工业出版社. 网壳结构技术规程(JGJ61-2003)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [4] 曹正罡,范峰,沈世钊. K6 型单层球面网壳的弹塑性稳定性能研究[J]. 空间结构,2005,11(3): 22-26.  
Cao Zhengguang, Fan Feng, Shen Shizhao. Elastic plastic stability of K6 single layer latticed domes[J]. Spatial Structures, 2005, 11(3):22-26.
- [5] Chan S L, Huang H Y, Fang L X. Advanced analysis of imperfect portal frames with semirigid base connections [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(6): 633-640.
- [6] Ye Jianqiao. Large deflection of imperfect plates by iterative BE-FE method [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(3): 431-444.
- [7] Schenk C A, Schueller G L. Buckling analysis of cylindrical shells with random geometric imperfections [J]. International Journal of Non-linear Mechanics, 2003, 38: 1119-1132.
- [8] Ikeda K, Murota K, Elishakoff I. Reliability of structures subject to normally distributed initial imperfections [J]. Computers & Structures, 1996, 59(3): 463-469.
- [9] Oyesanya M O. Influence of extra terms on asymptotic analysis of imperfection sensitivity of toroidal shell segment with random imperfection [J]. Mechanics Research Communications, 2005, 32: 444-453.
- [10] 樊亭. 带随机缺陷网壳结构的极限荷载[D]. 武汉:武汉理工大学,2008.
- [11] 唐敢,黎德琳,赵才其,等. 空间结构初始几何缺陷分布规律的实测数据及统计参数[J]. 建筑结构,2008, 38(2): 74-78.  
Tang Gan, Li Delin, Zhao Caiqi, et al. Statistical regulation and parameter study on initial geometrical imperfections of spatial structures based on measured data[J]. Building Structure, 2008, 38(2):74-78.