

# 基于改进的基本效应法的网壳结构构件重要性分析方法

栗云松<sup>1,2</sup>, 罗永峰<sup>1</sup>, 郭小农<sup>1</sup>, 张玉建<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 广州市住房和城乡建设局, 广东 广州 510032; 3. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 现有的网壳结构构件重要性计算方法仅考虑单根构件损伤或失效对结构的影响, 未考虑构件间的相互作用和损伤的随机性。为解决这一问题, 首先将基本效应法应用于构件的重要性判定中, 定义了适用于网壳结构的基本效应; 其次, 将构件分为重要构件和一般构件两类, 提出试算与正式计算结合的双阶段判定方法, 以提高确定重要构件的计算效率; 提出基于优劣解距离法的重要性排序方法, 以确定重要构件内部的相对重要性排序; 由此, 进一步提出了基于改进的基本效应法的网壳结构构件重要性分析方法。此外, 为减小改进的基本效应法的计算量, 提出适用于该方法的修正径向抽样方法。凯威特型球面网壳数值算例分析结果表明: 与现有方法相比, 采用该方法确定的重要构件进行抽样检测鉴定时, 评定网壳极限承载力的估计误差显著降低。

**关键词:** 网壳结构; 构件重要性; 基本效应法; 双阶段判定方法; 重要性排序

中图分类号: TU393.3

文献标志码: A

## Member Importance Analysis Method of Spatial Latticed Shell Structures Based on Improved Elementary Effects Method

LI Yunsong<sup>1,2</sup>, LUO Yongfeng<sup>1</sup>, GUO Xiaonong<sup>1</sup>, ZHANG Yujian<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Guangzhou Municipal Housing and Urban-Rural Development Bureau, Guangzhou 510032, Guangdong, China; 3. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** The existing member importance calculation methods of spatial latticed shell structures only analyze

the influence of the damage or failure of a single member on the total structure, without considering the random damage and interaction of members. To solve these problems, this paper introduces the elementary effects method into member importance analysis for the first time, and the new elementary effect is defined for spatial latticed shell structures. Meanwhile, members are divided into importance members and general members, and the two-stage decision method combining trial calculation and formal calculation is proposed to improve the calculation efficiency of determining importance members. Besides, the importance ranking method based on the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS decision method) is proposed to determine the relative importance ranking of important members. In summary, the member importance analysis method based on the improved elementary effects method is proposed. To reduce the calculation budget of the improved elementary effects method, a modified radial sampling strategy is proposed. The analysis results of the Kiewitt shell numerical model shows that compared with existing methods, random sampling based on the important members determined by the proposed method can effectively reduce the estimation error of the ultimate bearing capacity of the shell structure.

**Key words:** spatial latticed shell structures; member importance; elementary effects method; technique for order preference by similarity to an ideal solution; importance ranking

钢结构检测与鉴定多从构件层面出发, 通过对

收稿日期: 2021-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(51678431)

第一作者: 栗云松(1995—), 男, 工学博士, 主要研究方向为既有钢结构检测与鉴定。

E-mail: yunsongli@tongji.edu.cn

通信作者: 罗永峰(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢结构理论与施工技术。

E-mail: yfluo93@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

构件的安全性评定,进而评定整个结构的安全性。由于实际结构构件数量往往很多,对所有构件进行检测成本很高,因此一般采用抽样方法进行检测。抽样检测方法通常将构件划分为重要构件和一般构件,并对两类构件分别制定不同的检测鉴定方案<sup>[1]</sup>。然而,现行检测鉴定规范<sup>[1-4]</sup>均未给出一般构件和重要构件的定量判定方法。同时,与框架结构相比,对空间网壳结构构件重要性的研究也相对较少。

重要构件通常指其失效或损伤后会造造成结构严重损伤或破坏甚至可能倒塌的构件<sup>[3]</sup>。为确定结构中的重要构件或计算构件的相对重要性,基于能量的重要性判定方法<sup>[5-7]</sup>根据构件损伤或拆除前后结构应变能的变化判定构件的重要性,基于刚度的重要性判定方法<sup>[8-9]</sup>根据构件拆除前后结构整体刚度的变化判定构件的重要性,基于应力比的重要性判定方法<sup>[10]</sup>根据构件拆除前后构件平均应力比的变化判定构件的重要性。综合现有构件重要性方法的计算思路,可以将此类方法称为形式不同的局部灵敏度分析方法,即考察单个构件损伤或失效对结构整体性能影响的方法。此类局部灵敏度分析方法概念清晰、操作简便,得到了广泛的应用,但将其应用于网壳结构中时仍存在局限性:①网壳结构具有强非线性,局部分析可能无法提供有效的分析结果;②局部灵敏度分析方法只研究单根构件的损伤或失效,忽略了实际工程中其他构件存在的不同程度的损伤(或失效)对分析结果的影响。

相较于局部灵敏度分析方法,全局灵敏度分析方法可以考察所有不确定参数(构件损伤)共同变化对结构整体性能的影响,具有更强的适用性。现有的全局灵敏度分析方法中,基本效应法应用广泛,该法通过基本效应遍历输入变量空间,进而分析输入变量在其分布区域变化时对模型输出响应的平均影响。针对构件数量众多且非线性效应较强的网壳结构,基本效应法相对于其他方法计算代价较低,计算效率较高,因此本文将基本效应法应用于网壳结构的构件重要性计算。然而,经典的基本效应法仍存在诸多限制,不能直接应用于结构检测前的构件重要性分析。这些限制主要有:①基本效应是根据输入变量发生微小变化时的输出变量变化率定义的,而网壳结构在单根构件发生微小变化时整体承载能力基本不变,从而经典定义下的基本效应结果对所

有构件的结果都为0,缺乏应用价值;②基本效应法对所有输入变量都采用多次模拟的方式计算其基本效应,但网壳结构的重要构件数量通常较少,对所有构件进行相同的大规模非线性有限元模拟计算较为浪费;③基本效应法仅给出了重要变量与不重要变量的判定方法,未给出重要变量内部的相对重要性排序判定方法,但实际检测中限于成本可能无法检测全部重要构件,仅能检测重要构件中最为重要的部分构件,因此有必要研究网壳结构构件的重要性排序方法。

为解决现有的构件重要性分析方法的不足,本文将基本效应法应用于网壳结构构件的重要性判定;同时,为解决基本效应法不能直接用于构件重要性计算这一问题,针对网壳结构类型重新定义基本效应,并提出用于确定重要构件的双阶段判定方法和重要构件的构件重要性排序方法,进而提出基于改进的基本效应法的网壳结构构件重要性分析方法。此外,为减小改进的基本效应法的计算量,提出适用于本文方法的修正径向抽样方法。最后,基于两个凯威特网壳结构数值算例计算结果,通过与现有的基于损伤的构件重要性方法和基于拆除的构件重要性方法对比验证本文方法的有效性。

## 1 改进的基本效应法

### 1.1 基本效应

与竣工时的结构相比,由于服役期内各种不利因素的影响,结构构件会出现裂纹、腐蚀、变形等损伤甚至累积损伤,导致结构承载能力降低。一般认为,构件的损伤可以等价表示为结构局部刚度的损失,基于此,在构件重要性分析时,本文将结构局部刚度的损失表示为单根构件横截面面积的降低,并将构件截面面积的降低比例表述为构件削弱程度。同时,构件*i*的削弱程度记为 $X_i$ ,所有构件的最大削弱程度记为 $X_{\max}$ 。

参考 Morris<sup>[11]</sup>对基本效应(elementary effect, EE)的定义,可以将构件*i*的基本效应表示为 $R_{EE,i}$ ,且其定义为:在所有构件都带有某种程度的损伤时,当构件*i*的削弱程度 $X_i$ 增加 $\Delta_i$ 时所引起的网壳整体性能指标*g*的变化量与 $\Delta_i$ 之比,即:

$$R_{EE,i} = \frac{g(X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_i + \Delta_i, \dots, X_N) - g(X_1, X_2, \dots, X_N)}{\Delta_i} \quad (1)$$

式中: $N$ 为构件总数; $\Delta_i$ 为构件*i*的削弱程度 $X_i$ 的变化步长; $(X_1, X_2, \dots, X_N)$ 为所有构件的削弱程度,记

为样本点  $X$ , 并需满足  $X_i + \Delta_i < X_{\max}$  ( $i=1, \dots, N$ );  $g(X_1, X_2, \dots, X_N)$  为对应于含有所有构件削弱程度的样本点  $X$  的经有限元软件模拟计算或其他理论方法分析确定的网壳结构整体性能指标。

若将构件削弱程度分布区间  $[0, X_{\max}]$  均分为  $p$  级, 则  $\Delta_i$  可以取  $\left\{ \frac{1}{p-1} X_{\max}, \frac{2}{p-1} X_{\max}, \dots, \frac{p-2}{p-1} X_{\max} \right\}$  中的任一值。此外, 网壳结构的整体性能指标有极限稳定承载力、最大变形等, 应当根据工程需要选用, 本文这一指标具体指网壳结构的极限稳定承载力。

单层网壳结构的整体失稳通常是局部构件失稳引发的失稳传播所致<sup>[12]</sup>。当构件  $i$  不属于首先失稳的局部失稳区域内的构件时, 若构件  $i$  的削弱程度由

$$\begin{cases} R_{EE,i} = \frac{g(X_1, X_2, \dots, X_N) - g(X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_{\max}, X_{i+1}, \dots, X_N)}{\Delta_i} \\ \Delta_i = X_{\max} - X_i \end{cases} \quad (2)$$

与现有的重要性判定方法非常类似, 式(2)将单根构件的损伤提高到一个较大程度, 以使网壳整体指标有发生明显变化的可能; 同时, 式(2)在分析单个构件的损伤对网壳整体性能的影响时, 考虑了其他构件有损伤的情况, 继承了基本效应法的优点。此外, 本方法和现有重要性判定方法都未考虑实际结构构件损伤之间可能存在的相关性, 而假定各构件损伤之间相互独立。

## 1.2 重要构件的双阶段判定方法

式(2)所定义的基本效应  $R_{EE,i}$  仅是一个局部的灵敏度测度。为了得到一个全局的灵敏性的测度, Morris<sup>[11]</sup>考虑  $R_{EE,i}$  的分布  $F_i$ , 提出了用  $F_i$  对应的均值  $\mu_i$  和标准差  $\sigma_i$  作为输入变量  $X_i$  的灵敏度测度, 即:

$$\mu_i = \frac{\sum_{j=1}^r R_{EE,i}^{(j)}}{r} \quad (3a)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^r (R_{EE,i}^{(j)} - \mu_i)^2}{r-1} \quad (3b)$$

式中:  $r$  表示基本效应的个数, 并称为区块数;  $i$  表示构件编号;  $j$  表示区块数编号。

由式(3)可知, 均值  $\mu_i$  表示输入变量  $X_i$  在其整个分布区间内变化时对输出响应  $g$  的平均影响; 标准差  $\sigma_i$  表示  $X_i$  与其他变量变化之间的相互影响对输出的影响是线性的还是非线性的。

已有研究<sup>[7]</sup>表明, 网壳结构中存在着大量的一般构件, 即基本效应  $R_{EE,i}$  的  $\mu$  基本为 0 的构件。考虑到有限元模型计算较为耗时, 且基本效应法中判定单根构件的重要性需要计算  $r$  个基本效应, 因此为提

$X_i$  变化为  $X_i + \Delta_i$ , 则整体失稳的发展过程不受影响, 从而网壳结构稳定承载力并不因构件  $i$  的削弱程度变化而变化。对这一情况, 根据公式(1)计算得到的  $g(X_1, X_2, \dots, X_N) = g(X_1, X_2, \dots, X_i + \Delta_i, \dots, X_N)$ , 故  $R_{EE,i} = 0$ , 从而, 直接将经典的基本效应定义应用于网壳结构构件重要性计算时, 会导致基本效应(EE)的主要部分都为 0, 从而不同构件的基本效应之间缺乏辨识度, 无法实现从大量的构件中筛选出重要构件的分析目标。

针对经典基本效应不适用于构件重要性计算的问题, 本文提出将构件  $i$  的基本效应  $R_{EE,i}$  定义修正为: 在所有构件都带有某种程度损伤时, 构件  $i$  的削弱程度  $X_i$  变为  $X_{\max}$  引起的网壳整体性能指标  $g$  的降低率; 即将式(1)修改为

高确定重要构件的效率, 需要减小不重要构件的计算耗时。

为实现这一目的, 本文提出在正式计算之前, 进行一次试算, 即首先设定一较小的区块数  $r_s$ , 以计算得到每根构件的基本效应的  $\mu$  和  $\sigma$ 。考虑到重要构件的损伤会对结构性能产生较为明显的影响, 因此, 即使试算的区块数  $r_s$  较小,  $\mu$  和  $\sigma$  的估计值存在较大误差, 重要构件基本效应的  $\mu$  和  $\sigma$  也应当显著地大于 0。从而, 可将试算中基本效应基本为 0 的构件直接判定为一般构件; 对于基本效应较大的构件, 直接将其判定为重要构件则误判概率较高, 应进一步分析。考虑到有限元模型计算误差<sup>[13]</sup>可能达到 0.02, 因此在试算环节中, 本文判定  $\mu + \sigma \leq 0.02$  的构件为一般构件, 并将  $\mu + \sigma > 0.02$  的构件称为待观察构件, 以待后续正式计算确定其中的重要构件。本文定义待观察构件的判定式为

$$\mu_i + \sigma_i > 0.02 \quad (4)$$

本文将满足式(4)的所有构件称为待观察构件组, 对应的编号记为  $M_{ob} = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ , 其中  $n$  为待观察构件个数。

为确定待观察构件  $M_{ob}$  中的重要构件, 应在正式计算中采用一较大的区块数  $r$ , 根据式(3)计算相应的基本效应。计算得到待观察构件的灵敏度测度  $\mu$  和  $\sigma$  后, 本文综合考虑有限元数值计算可能的误差, 给出了同时考虑均值  $\mu_i$  和标准差  $\sigma_i$  时的重要构件判定标准:

$$\begin{cases} \mu_i - 2\frac{\sigma_i}{\sqrt{r}} > 0 \\ \mu_i > 0.02 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\mu_i - 2\sigma_i/\sqrt{r}$  为基本效应均值具有 95% 可信度的估计区间下限。此外, 为使得双阶段判定方法具有稳定的分析结果, 区块数  $r$  应根据实际计算需要取为一较大值, 根据经验  $r$  可取为大于 100 的整数。

由式(5)的定义可知, 重要构件的削弱程度  $X_i$  在全球范围内变化时, 其基本效应  $R_{EE,i}$  都大于 0, 即构件  $i$  的削弱程度由一随机值增加至  $X_{\max}$  时, 网壳整体稳定承载力将会发生显著降低, 结构发生严重损伤。此外, 与不满足式(4)的构件类似, 不满足式(5)的构件即为一般构件。

### 1.3 构件重要性排序方法

为确定重要构件内部的构件重要性排序, 本文基于优劣解距离法 (technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 同时考虑输入变量  $X_i$  的灵敏度测度: 即均值  $\mu_i$  和标准差  $\sigma_i$ 。基于这两个参数进行构件重要性的判定问题属于多属性决策问题, 解决此类问题, TOPSIS 法<sup>[14]</sup>是目前最广泛使用的方法之一。TOPSIS 法首先构造多属性决策问题的理想解和负理想解, 然后以评价对象与理想解和负理想解的距离作为参数, 判断各评价对象的相对优劣。

采用 TOPSIS 法判断结构中各重要构件的相对重要程度时, 可以将参数  $\mu_i$  和  $\sigma_i$  组成有序数对  $(\mu_i, \sigma_i)$ , 进而将该有序数对作为评价对象, 并构造关于  $(\mu_i, \sigma_i)$  的理想解和负理想解。理想解实际上就是构件损伤影响均值最大且变异性最小的情况, 即  $\mu_i = \mu_{\max}$  且  $\sigma_i = 0$ ; 负理想解就是构件损伤影响均值最小且变异性最小的情况, 即  $\mu_i = 0$  且  $\sigma_i = 0$ 。因此, TOPSIS 法就是根据各重要构件的  $(\mu_i, \sigma_i)$  与理想解  $(\mu_{\max}, 0)$  和负理想解  $(0, 0)$  的距离大小关系评价重要构件的相对重要性。

重要构件的  $(\mu_i, \sigma_i)$  与理想解的距离  $D_i^+$  和与负理想解的距离  $D_i^-$ , 可采用下式计算:

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{(\mu_i - \mu_{\max})^2 + \sigma_i^2} \\ D_i^- = \sqrt{\mu_i^2 + \sigma_i^2} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)计算得到  $D_i^+$  和  $D_i^-$  后, 可计算相对接近度  $I_i$ , 如下:

$$I_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (7)$$

由式(7)可知,  $I_i$  越大, 重要构件的  $(\mu_i, \sigma_i)$  与理想

解的距离越近, 与负理想解的距离越远, 表明该构件越重要。因此, 可将相对接近度  $I_i$  定义为构件重要性系数, 用于计算结构中重要构件的相对重要性。

### 1.4 修正径向抽样方法

计算输入变量  $X_i$  的灵敏度测度均值  $\mu_i$  和标准差  $\sigma_i$  的关键是产生  $r$  个基本效应  $R_{EE,i}$  的样本。由式(2)可看出, 计算一个  $R_{EE,i}$  需要两个样本点, 因此, 对含有  $N$  个构件的网壳共需要  $2rN$  个样本点来计算式(2)中的指标。实际计算中则常利用轨道抽样方法<sup>[11]</sup>、改进的轨道抽样法<sup>[15]</sup>、径向抽样方法<sup>[16]</sup>和改进的径向抽样方法<sup>[17]</sup>等抽样方法以将计算所需的样本点个数由  $2rN$  个降低至  $r(N+1)$  个。在上述方法中, 径向抽样方法根据一个相同的基准点  $a_1$  和不同的辅助点  $(a_2, a_3, a_4)$  来计算不同构件的基本效应, 可以在相同的轨道数下实现比轨道抽样法更高的精度<sup>[17]</sup>。图 1 为在三维空间内针对某仅含 3 根构件的结构给出径向抽样方法所生成的一个区块的示意图。在该区块内共有 1 个基准点和 3 个辅助点, 通过基准点和其他任意一个辅助点可以针对某一个构件计算出一个基本效应。从而一个区块可以针对每一根构件分别计算得到一个基本效应,  $r$  个区块可以针对每一个构件分别计算出  $r$  个基本效应, 从而可估计出全部构件的灵敏度指标。

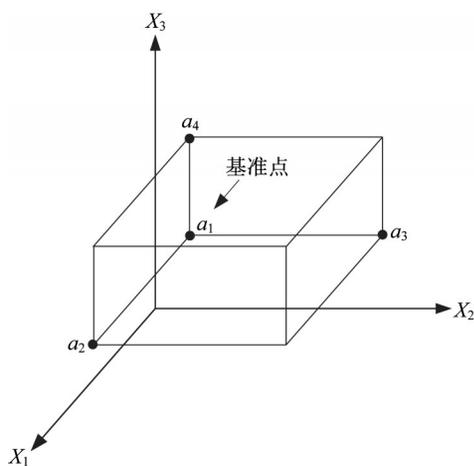


图 1 三维空间内一个区块的示意图

Fig. 1 An example of a block in 3D space

考虑到本文提出的改进的基本效应法在计算不同的基本效应时步长  $\Delta_i$  不同, 因此, 本文在 Campolongo 等<sup>[16]</sup>研究成果的基础上, 提出了适用于本文方法的修正径向抽样方法。其中, 为计算结果具有代表性, 本文根据文献<sup>[17]</sup>建议采用 Sobol 序列

选取基准点以保证所得到的 $r$ 个区块具有较高的分散度,从而保证计算结果的准确。此外,试算过程和正式计算过程中分析构件数量不同,相应的修正径向抽样法的步骤也有所不同,两阶段对应的修正径向抽样法的具体步骤如下。

第一,试算阶段,需针对所有构件在输入变量空间内建立 $r_s$ 个区块,每个区块包含 $N+1$ 个样本点,共需要 $r_s(N+1)$ 个样本点,基本过程如下:

- (1) 生成一个 $N$ 维Sobol低差异序列;
- (2) 根据Sobol序列第 $i$ 行中数据,产生一个基准点 $a_i = (a_1, a_2, \dots, a_N)$ ,其中 $a_1, a_2, \dots, a_N$ 代表所有构件的削弱程度。
- (3) 将基准点 $a_i$ 作为区块的第一个样本点。
- (4) 通过将基准点 $a_i$ 的第 $j$ 个坐标替换为 $X_{\max}$ 得到第 $(j+1)$ 个样本点。
- (5) 令步骤(4)中的 $j$ 分别取 $1, 2, \dots, N$ ,从而得到区块中其他的样本点,并得到一个含有 $N+1$ 个样本点的区块。
- (6) 重复步骤(2)~步骤(5)共 $r_s$ 次可以得到 $r_s$ 个区块, $r_s(N+1)$ 个样本点。

第二,正式计算阶段,需针对待观察构件组

$M_{ob} = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 中的 $n$ 根待观察构件在输入变量空间内建立 $r$ 个区块,每个区块包含 $n+1$ 个样本点,共需要 $r(n+1)$ 个样本点,基本过程如下:

- (1) 生成一个 $N$ 维Sobol低差异序列;
- (2) 根据Sobol序列第 $i$ 行中数据,产生一个基准点 $a_i = (a_1, a_2, \dots, a_N)$ 。
- (3) 将基准点 $a_i$ 作为区块的第一个样本点。
- (4) 通过将基准点 $a_i$ 的第 $j$ 个坐标替换为 $X_{\max}$ 得到第 $(j+1)$ 个样本点。
- (5) 令步骤(4)中的 $j$ 分别取 $m_1, m_2, \dots, m_n$ ,从而得到区块中其他的样本点,并得到一个含有 $n+1$ 个样本点的区块。
- (6) 重复步骤(2)~步骤(5)共 $r$ 次可以得到 $r$ 个区块, $r(n+1)$ 个样本点。

## 2 基于改进的基本效应法的构件重要性计算流程

对一个具有 $N$ 根杆件的网壳,采用本文提出的基于改进的基本效应法,计算网壳结构构件重要性的步骤如下,具体计算流程如图2所示。

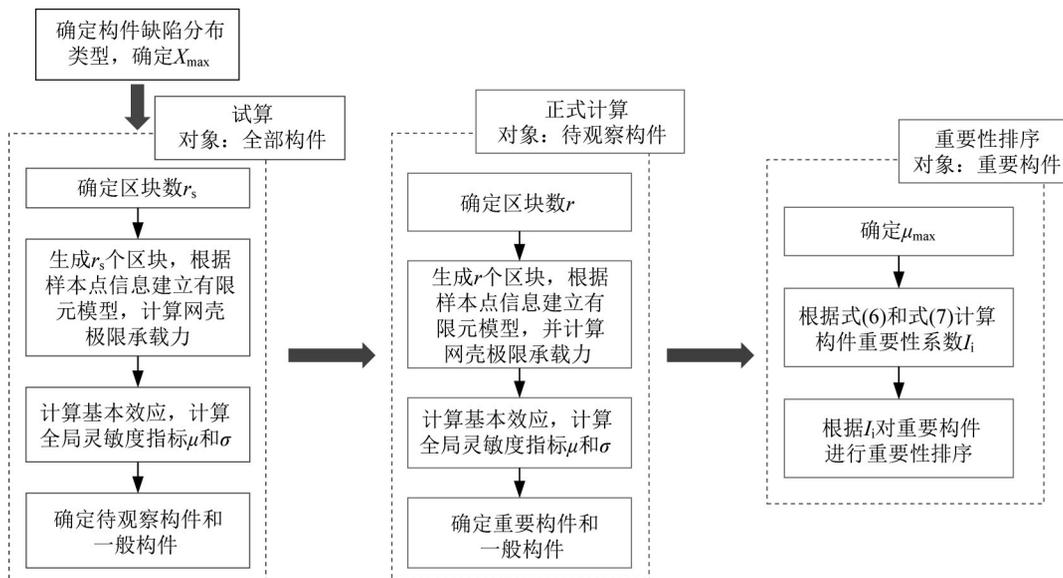


图2 本文构建重要性分析方法流程图

Fig. 2 Flowchart of proposed member importance analysis method

**步骤1** 确定或假定网壳结构构件缺陷的分布类型,根据该分布类型假定可能的最大构件缺陷程度 $X_{\max}$ 。

**步骤2** 基于修正的径向抽样法生成 $r_s$ 个区块( $r_s$ 为一较小值)的样本点,根据样本点在有限元软件中建立结构模型,并对全部 $N$ 根构件进行试算,计算

得到每个区块中每个点所对应的带缺陷网壳的极限承载力。其中,样本点包含了所有构件的削弱程度信息。

**步骤3** 根据式(2)计算基本效应,根据式(3)计算试算阶段中各构件全局灵敏度指标 $\mu$ 和 $\sigma$ 的估计值。

**步骤4** 基于式(4)将所有构件划分为待观察构件和一般构件,其中待观察构件记为  $M_{ob} = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ ,一般构件记为  $M_{U1}$ 。

**步骤5** 基于修正的径向抽样法生成  $r$  个区块( $r$  为一较大值)的样本点,根据样本点在有限元软件中建立结构模型,对  $M_{ob}$  中的  $n$  根构件进行重点计算,计算得到每个区块中每个点所对应的带缺陷网壳的极限承载力。

**步骤6** 根据式(2)计算基本效应,根据式(3)计算重点计算阶段中各待观察构件的全局灵敏度指标  $\mu$  和  $\sigma$  的估计值。

**步骤7** 基于式(5)将所有待观察构件划分为确定重要构件和一般构件,其中重要构件记为  $M_1 = \{m_1^*, m_2^*, \dots, m_c^*\}$ ,一般构件记为  $M_{U2}$ 。

**步骤8** 根据步骤4和步骤7确定一般构件为  $M_U = M_{U1} + M_{U2}$ 。

**步骤9** 根据步骤6得到的灵敏度指标  $\mu$ ,确定合适的最大均值  $\mu_{max}$ ;随后,对步骤7所得的重要构件  $M_1$ ,根据式(6)和式(7)计算构件重要性系数  $I_i$ ,确定重要构件的重要性排序。

### 3 数值算例

#### 3.1 算例一

##### 3.1.1 网壳结构模型

本节以一带构件损伤的凯威特型单层网壳为例,验证本文方法的有效性。该网壳跨度70 m,矢跨比1/3,网壳结构环向划分为8个相同扇形曲面,径向分为9环,其几何模型如图3所示,共361个节点和1 008根杆件。杆件采用圆钢管,主肋杆和环杆截面尺寸为146 mm×5.5 mm,斜杆截面尺寸为133 mm×4.0 mm,钢材强度等级为Q235,弹性模量  $E = 2.06 \times 10^5$  MPa、泊松比为0.3、质量密度为7 850 kg·m<sup>-3</sup>。构件损伤以截面面积降低比例  $d$  表示,且在区间[0, 50%]服从均匀分布。网壳结构节点均为刚性连接,支座为三向固定铰接。恒荷载取0.3 kN·m<sup>-2</sup>,活荷载取0.5 kN·m<sup>-2</sup>,满跨分布。屋面荷载按壳表面积(活载按投影面积)等效为集中荷载施加在节点处。本算例使用通用有限元软件ANSYS 17.0分析计算,其中构件选用空间弹塑性梁单元BEAM188模拟。

##### 3.1.2 构件重要性计算结果

为提高计算效率,在计算网壳构件的重要性时仅计算一个扇形曲面内所有构件的重要性结果,该

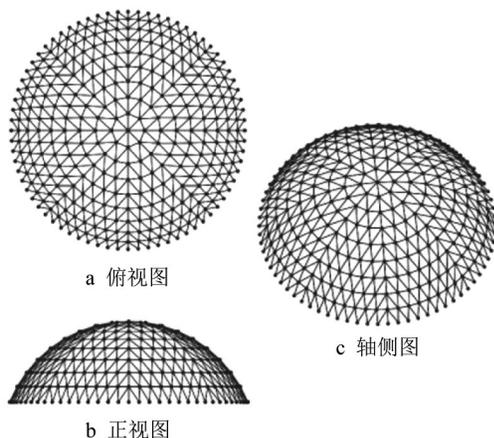


图3 70 m跨度K8网壳示意图

Fig. 3 Diagrams of a K8 shell of 70m span

扇形曲面及其内部构件编号如图4所示。试算时,较小的区块数  $r_c$  取20。图5给出了不同构件的基本效应的均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$  的计算结果,并在图中给出了待观察构件的构件编号。由于一般构件个数较多,且结果相近,不易以图的形式表示,图5中未给出一般构件的构件编号。

由图5可知,在试算中,579、491、419、9和417号构件基本效应较为显著,满足式(4),表现为待观察构件;其他构件的基本效应均值和标准差都接近0,表现为一般构件。待观察构件中,491和9号构件的计算结果较为集中,满足重要构件的判定标准式(5);579、419和417号构件的基本效应均值较大、标准差也较大,表明其构件削弱对结构整体性能的影响与其他构件存在较为明显的耦合效应,应当在后续分析中重点观察。

为进一步确定重要构件,正式计算中区块数  $r$  取为200,并仅对491、9、579、419和417号构件进行分析,其基本效应灵敏度指标结果如图6所示。

综合图5和图6可知,试算过程中满足重要构件判定标准式(5)的9号和491号构件在正式计算中表现为重要构件;试算过程中的579和419号待观察构件在正式计算中表现为重要构件,原因是其在正式计算中的基本效应标准差相对试算时有所减小,从而满足了式(5)的要求;试算过程中的417号待观察构件在正式计算时基本效应的均值小于0.02,从而被判定为一般构件。

对正式计算中判定为重要构件的491、419、579和9号构件进行构件重要性系数计算,其中  $\mu_{max}$  综合图6所示计算结果取为0.1,重要性系数结果如表1所示。

由表1可知,重要构件内部的构件重要性排序

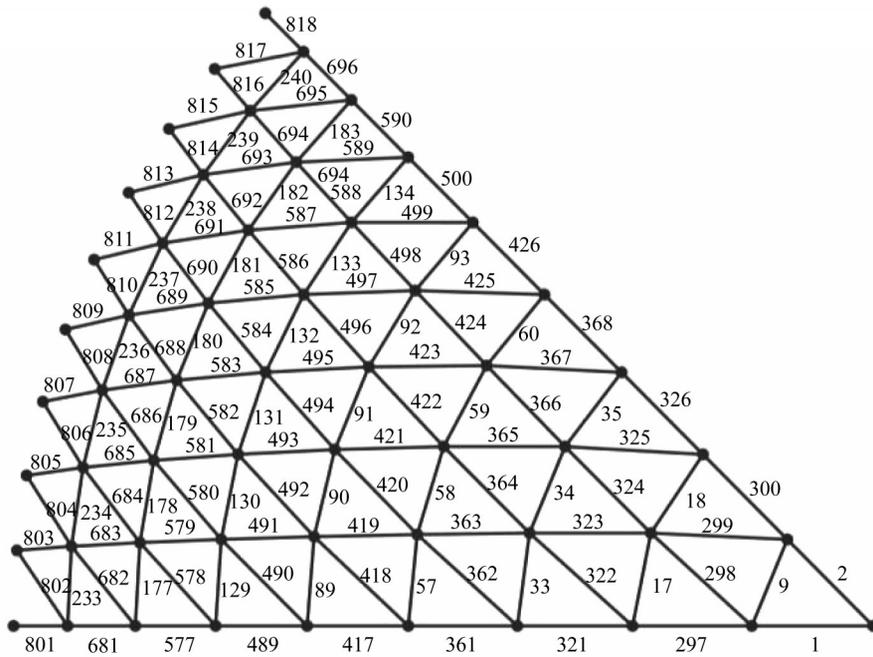


图 4 扇形曲面及其构件编号

Fig. 4 A sector shell and its member number

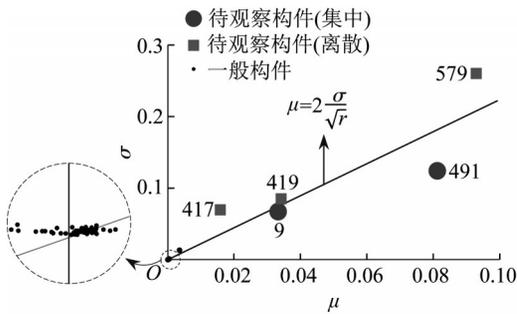


图 5 试算基本效应计算结果( $r_s = 20$ )

Fig. 5 Elementary effect results of trail calculation ( $r_s = 20$ )

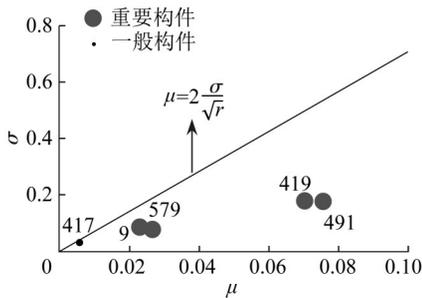


图 6 正式计算基本效应计算结果( $r = 200$ )

Fig. 6 Elementary effect results of formal calculation ( $r = 200$ )

为 491、419、579 和 9 号构件,其中 491 和 419 号构件构件重要性较为接近、579 和 9 号构件的重要性系数较为接近。根据对称性,选取其他扇形区域内对应

表 1 重要构件的构件重要性系数

Tab. 1 Importance factors of important members

构件编号	$\mu_i$	$\sigma_i$	构件重要性系数	重要性排序
491	0.075	0.178	0.518	1
419	0.070	0.180	0.514	2
579	0.027	0.078	0.436	3
9	0.023	0.085	0.434	4

于 491、419、579 和 9 号构件的构件作为重要构件,则该网壳的重要构件如图 7 所示。由图 7 可知,该网壳中重要构件为主肋两侧 5~7 环范围内的斜杆和第一环环杆,共 56 根。

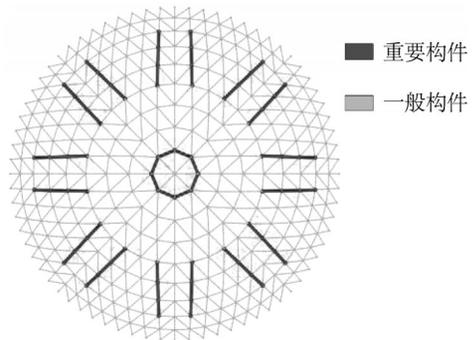


图 7 重要构件结果图

Fig. 7 Distribution results of important members

### 3.1.3 与其他方法的对比

(1) 基于拆除和基于损伤的构件重要性计算方法  
基于拆除的构件重要性计算方法<sup>[10]</sup>(简称为“拆除方法”)主要关注构件破坏对整体结构系统的影

响,如在爆炸、撞击等意外偶然作用下结构中部分构件失效对结构整体刚度、稳定性和承载力的影响程度。此类方法常以构件失效导致的结构整体性能指标的损失率作为衡量构件在结构系统中重要性的评价指标,如:

$$I_k = \frac{U_0 - U_{k,Re}}{U_0} = 1 - \frac{U_{k,Re}}{U_0} \quad (8)$$

式中: $I_k$ 为第 $k$ 根构件的重要性系数; $U_0$ 为初始结构的整体性能指标; $U_{k,Re}$ 为第 $k$ 根构件失效后的结构整体性能指标。初始结构是指所有构件都处于设计状态下的结构。

基于损伤的构件重要性计算方法<sup>[7]</sup>(简称为“损伤方法”)则认为,实际结构一般不会发生构件由于某原因而完全破坏的情形。在定义构件损伤时,通常假定结构的损伤是结构局部刚度的损失,并将结构局部刚度的损失定义为单根构件横截面面积的降低,同时将构件截面面积的降低比例表述为构件削弱程度。损伤方法<sup>[7]</sup>以构件截面损伤前后结构性能指标的变化来衡量构件重要性,采用性能指标的折减系数作为构件重要性系数,其表达式与拆除方法相似,即:

$$I_k = \frac{U_0 - U_{k,Da}}{U_0} = 1 - \frac{U_{k,Da}}{U_0} \quad (9)$$

与式(8)相似,式(9)中 $I_k$ 为第 $k$ 根构件的重要性系数; $U_0$ 为初始结构的整体性能指标;不同的是, $U_{k,Da}$ 为第 $k$ 根构件截面削弱后的结构整体性能指标。

综合式(8)和式(9)可知,拆除方法与损伤方法都是以构件失效或损伤后的结构整体性能的折减系数作为构件的重要性的衡量指标,两种方法的计算表达式相同,不同之处在于分析对象不同,前者针对构件失效这一极端事件,后者则针对实际工程中更为常见的构件损伤。

### (2) 三种方法计算结果对比

本节以网壳极限承载力为整体结构性能指标,分别根据拆除方法和损伤方法判定网壳的重要构件分布情况。为与本文方法所得的重要构件个数保持一致,拆除方法和损伤方法的重要构件个数均取为56。根据两种方法计算所得重要构件分布如图8所示。

由图7和图8可知:采用不同方法判定得到的重要构件分布存在较大差异。采用本文方法判定的重要构件为主肋两侧5~7环范围内的斜杆和第一环环杆;采用损伤方法判定的重要构件主要为主肋两侧3~4环范围内的斜杆和1~2环范围内的环杆;

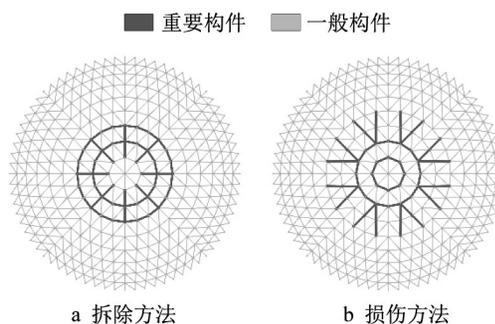


图8 不同方法的重要构件分布情况(算例1)

Fig. 8 Distribution results of important members of different methods (Example 1)

采用拆除方法判定的重要构件主要为3~4环范围内的主肋杆和2~3环范围内的环杆。

重要性构件判定的准确与否可以通过对带缺陷网壳稳定极限承载力的估计准确与否来判断。对一特定的带有构件损伤的网壳,其全部构件的损伤程度记为 $D = \{D(1), D(2), \dots, D(N)\}$ ,真实极限承载力记为 $f$ ,若根据某方法判定得到的重要构件编号为 $m = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ ,则推算网壳极限承载力的过程如下:

(1) 假定待检测网壳数值模型的构件损伤服从正态分布,其均值为 $\mu(D)$ ,标准差为 $\sigma(D)$ 。

(2) 将所有重要构件 $m$ 作为样本,抽取样本的“真实”构件损伤,记为 $d(m) = \{D(m_1), D(m_2), \dots, D(m_n)\}$ 。

(3) 计算样本的损伤均值 $\mu(d)$ 和标准差 $\sigma(d)$ ,并将 $\mu(d)$ 和 $\sigma(d)$ 分别作为 $\mu(D)$ 和 $\sigma(D)$ 的估计。

(4) 根据正态分布假设,基于 $\mu(d)$ 和 $\sigma(d)$ 随机生成所有未测构件的损伤,结合样本的已测数据,生成网壳全部构件的一个随机损伤 $D^*$ 。

(5) 根据 $D^*$ 生成有限元模型,并计算网壳极限承载力的一个模拟值 $f^*$ 。

(6) 根据蒙特卡洛方法,重复步骤(4)~步骤(5)进行 $s$ 次模拟计算,可得到一系列 $f^*$ 的模拟值,记为 $f^* = \{f^*(1), f^*(2), \dots, f^*(s)\}$ 。

(7) 将 $f^*$ 的均值 $\bar{f}^*$ 作为网壳承载力估计值;并将相对误差 $e = (\bar{f}^* - f)/f$ 作为基于该重要性判定方法推算网壳承载力的平均误差。

对带有构件损伤 $D$ 的网壳,分别基于本文方法、拆除方法和损伤方法得到的重要构件推算网壳承载力,可得到不同的承载力估计值向量 $f_{EE}^*, f_{Re}^*, f_{Da}^*$ 。

针对3.1.1节所述网壳,仍假定其截面面积降低比例 $d$ 在区间 $[0, 50\%]$ 服从均匀分布,并随机生

成 100 种损伤模式  $D$ , 假定每一种损伤模式对应一种真实的带构件损伤的网壳。对每一个带构件损伤  $D$  的网壳, 分别基于本文方法、损伤方法和拆除方法得到的重要构件推算其网壳承载力, 其中蒙特卡洛模

拟<sup>[18]</sup>次数  $s$  取为 30 次。根据显著性检验<sup>[19]</sup> 去除无明显差异结果后, 本文方法与拆除方法的平均误差结果频数分布如图 9a 所示, 本文方法与损伤方法的平均误差结果频数分布如图 9b 所示。

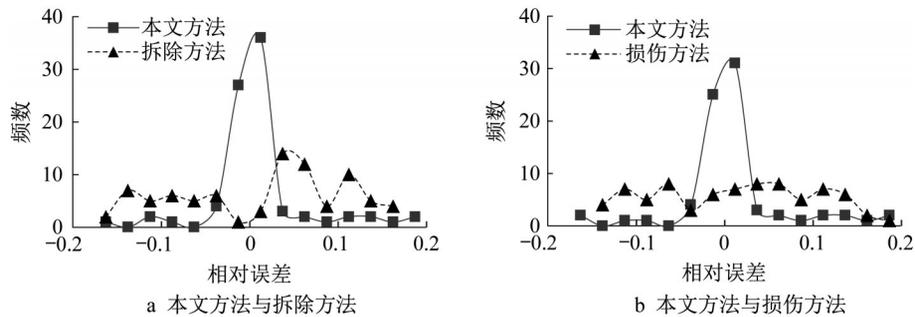


图 9 平均误差频数对比图(算例 1)

Fig. 9 Comparison of average error frequency (Example 1)

由图 9 可知, 采用本文方法估算网壳结构承载力时的相对误差主要集中在  $[-0.05, +0.05]$ , 拆除方法的相对误差集中于  $[-0.15, 0.15]$ , 损伤方法与拆除方法类似。与拆除方法和损伤方法相比, 采用本文方法时, 网壳结构极限承载力的估计误差更小, 便于检测鉴定时准确把握结构真实性能。

3.2 算例二

为说明本文方法在其他尺寸网壳中的适用性, 本节以一跨度为 40 m、矢跨比为 1/2 的凯威特型单层网壳为例进行验证。该网壳结构环向划分为 8 个相同扇形曲面, 径向分为 6 环, 共 169 个节点和 408

根杆件。其他结构信息与算例一保持一致, 详见 3.1.1 节。

限于篇幅, 不再展示试算与正式计算过程中的基本效应结果。经本文方法验证, 该网壳的重要构件如图 10a 所示(部分重要构件编号也标示在图中), 重要构件数量为 24, 单个扇形范围内的重要构件的重要性结果如表 2 所示。根据拆除方法和损伤方法计算所得重要构件分布如图 10b 和图 10c 所示。其中由于重要构件数量的限制, 拆除方法确定的重要构件未能保证中心对称。

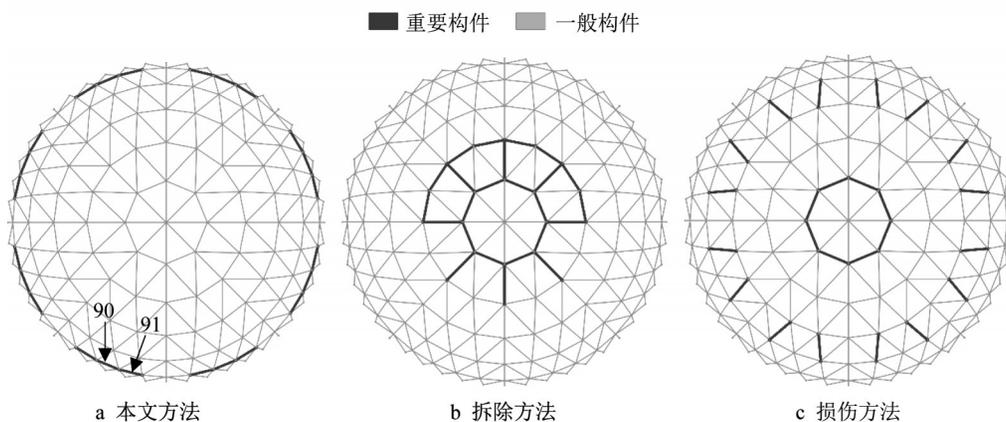


图 10 不同方法的重要性构件分布情况(算例 2)

Fig. 10 Distribution results of important members of different methods (Example 2)

表 2 重要构件的构件重要性系数(算例 2)

Tab. 2 Importance factors of important members (Example 2)

构件编号	$\mu_i$	$\sigma_i$	构件重要性系数	重要性排序
91	0.043	0.116	0.489	1
90	0.031	0.107	0.467	2

根据 3.1.3 节所述方法, 分别基于本文方法、损伤方法和拆除方法得到的重要构件推算其网壳承载力, 去除无明显差异结果后, 本文方法与拆除方法的平均误差结果频数分布如图 11a 所示, 本文方法与损伤方法的平均误差结果频数分布如图 11b 所示。由图 11 可

知,采用本文方法估算网壳结构承载力时的相对误差主要集中在 $[-0.025, +0.025]$ ,拆除方法的相对误差集中于 $[-0.05, +0.05]$ ,损伤方法与拆除方法类

似。与拆除方法和损伤方法相比,采用本文方法时,网壳结构极限承载力的估计误差更小。

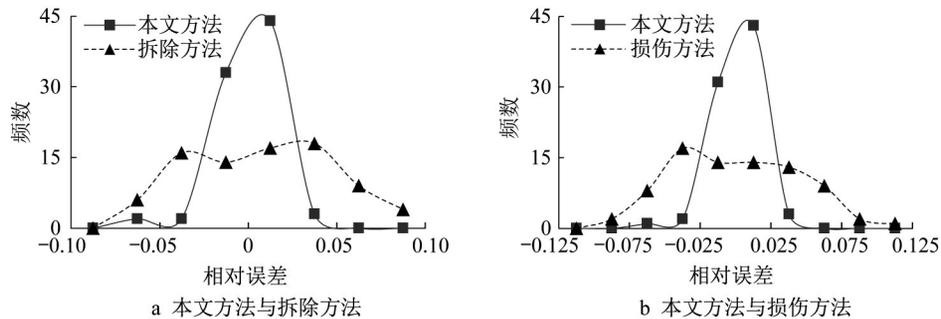


图 11 平均误差频数对比图(算例 2)

Fig. 11 Comparison of average error frequency (Example 2)

## 4 结论

传统的构件重要性分析方法仅提供局部的灵敏性分析结果,不能考虑所有构件共同变化对结构性能的影响。针对这一问题,本文提出了基于改进的基本效应法的构件重要性分析方法,并通过数值算例分析比较进行验证,通过研究分析,得到以下结论:

(1) 本文将基本效应法应用于网壳结构构件的重要性判定,定义了适用于网壳结构的改进的基本效应。该定义考虑了所有构件损伤共同变化对结构整体性能的影响,物理意义明确,计算简便。

(2) 基于改进的基本效应法的构件重要性分析方法分为试算、正式计算和重要性排序三个部分。其中试算与正式计算结合的双阶段判定方法可以准确判定重要构件和一般构件,并且有效减小了确定重要构件所需的计算量;重要性排序方法则有效解决了同时具有两个灵敏度测度指标的重要构件的相对重要性排序问题。

(3) 基于拆除的构件重要性计算方法、基于削弱的构件重要性计算方法与本文方法的重要构件判定结果存在较大差异。算例结果表明,相较于其他方法,基于本文方法确定的重要构件进行抽样检测鉴定分析时,可以得到更为准确的网壳结构极限承载力估算结果。

### 作者贡献声明:

栗云松:提出概念,有限元建模分析,论文撰写。

罗永峰:修改论文框架结构,指导数据分析,指导论文撰写。

郭小农:指导论文撰写。

张玉建:辅助有限元建模分析,修改论文。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑可靠性鉴定标准: GB 50292—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for appraisal of reliability of civil buildings: GB 50292—2015 [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2015.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工业建筑可靠性鉴定标准: GB 50144—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for appraisal of reliability of industrial buildings and structures: GB 50144—2008 [S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高耸与复杂钢结构检测与鉴定标准: GB 51008—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for inspection and appraisal of high-rise and complicated steel structures: GB 51008—2016[S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [4] 上海市建设和交通委员会. 钢结构检测与鉴定技术规程: DG/TJ08—2011—2007[S]. 上海:[s.n.], 2007. Shanghai Municipal Construction and Transportation Commission. Technical specification for structural inspection and appraisal of steel structures: DG/TJ08—2011—2007 [S]. Shanghai: [s.n.], 2007.
- [5] 叶列平, 林旭川, 曲哲. 基于广义结构刚度的构件重要性评价方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(1): 1. YE Lieping, LIN Xuchuan, QU Zhe. Evaluating method of element importance of structural system based on generalized structural stiffness [J]. Journal of Architecture and Civil

- Engineering, 2010, 27(1): 1.
- [6] 张雷明,刘西拉. 框架结构能量流网络及其初步应用[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 45.  
ZHANG Leiming, LIU Xila. Network of energy transfer in frame structures and its preliminary application[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 45.
- [7] 栗云松, 聂琪, 罗永峰, 等. 基于应变能的网壳结构构件重要性分类方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 22.  
LI Yunsong, NIE Qi, LUO Yongfeng, *et al.* Classification method of member importance based on strain energy theory for lattice shell structure[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(5): 22.
- [8] 柳承茂,刘西拉. 基于刚度的构件重要性评估及其与冗余度的关系[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 746.  
LIU Chengmao, LIU Xila. Stiffness-based evaluation of component importance and its relationship with redundancy[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(5): 746.
- [9] 罗立胜,罗永峰. 既有网格结构构件重要性实用判定方法[J]. 结构工程师, 2017, 33(2): 109.  
LUO Lisheng, LUO Yongfeng. A practical method for evaluation of members importances of existing spatial structures [J]. Structural Engineers, 2017, 33(2): 109.
- [10] 胡晓斌,钱稼茹. 结构连续倒塌分析改变路径法研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(4): 8.  
HU Xiaobin, QIAN Jiaru. Study on alternate path method of structural progressive collapse analysis [J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(4): 8.
- [11] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33: 161.
- [12] 罗永峰,韩庆华,李海旺. 建筑钢结构稳定理论与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.  
LUO Yongfeng, HAN Qinghua, LI Haiwang. Stability of steel structures — The theory and implement [M]. Beijing: China communications press, 2010.
- [13] 郭孟武. 基于对偶变分形式的有限元后验误差界[D]. 北京: 清华大学, 2017.  
GUO Mengwu. Dual-variational-formulation-based a posteriori error bounds for finite element analysis[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [14] JOSHI D, KUMAR S. Interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy choquet integral based TOPSIS method for multi-criteria group decision making [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 248(1): 183.
- [15] CAMPOLONGO F, CARIBONI J, SALTELLI A. An effective screening design for sensitivity analysis of large models [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22 (10) : 1509.
- [16] CAMPOLONGO F, SALTELLI A, CARIBONI J. From screening to quantitative sensitivity analysis: A unified approach [J]. Computer Physics Communications, 2011, 182(4): 978.
- [17] XIAO S, LU Z, XU L. A new effective screening design for structural sensitivity analysis of failure probability with the epistemic uncertainty [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 156: 1.
- [18] 陈旭. 单层网壳结构风振响应参数灵敏度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
CHEN Xu. Parametric sensitivity study on wind-induced vibration response of single-layer reticulated shells[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [19] NAKHAIE D, KOSARI A, MOL J M C, *et al.* Corrosion resistance of hot-dip galvanized steel in simulated soil solution: A factorial design and pit chemistry study [J]. Corrosion Science, 2020, 164(3): 1.