

文章编号: 1000-4750(2015)02-0171-07

大跨屋盖结构风振响应参数灵敏度分析

吴 迪¹, 武 岳², 杨庆山¹, 陈 旭²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 结构风工程与城市风环境北京市重点实验室, 北京 100044;

2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江, 哈尔滨 150090)

摘 要: 对典型大跨屋盖结构风振响应开展参数灵敏度研究, 目的是定量评估各种不确定因素对结构风振响应不确定性的贡献率, 获得不确定性在风荷载与风振响应间的传递规律。首先结合 Sobol' 方差分解法和拉丁超立方抽样技术建立适用于大跨屋盖结构的全局灵敏度分析方法, 通过多次采样风洞试验获得大量脉动风荷载时程, 作为灵敏度分析的输入变量。合理建立结构参数概率统计模型, 分别应用局部和全局灵敏度分析方法对典型大跨屋盖结构极值风振响应进行了参数灵敏度分析, 研究发现: 多个参数共同随机变化时, 结构极值风振响应近似服从广义极值分布; 结构风振响应的不确定性主要受风荷载不确定性控制; 结构风振响应的参数灵敏度与共振响应在总响应中的比重有关, 共振响应占比越大, 结构对风荷载越敏感。

关键词: 大跨屋盖结构; 风振响应; 参数灵敏度; 不确定性; 多次采样风洞试验

中图分类号: TU312⁺.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.09.0844

PARAMETER SENSITIVITY ANALYSIS OF WIND-INDUCED RESPONSE OF LONG-SPAN ROOFS

WU Di¹, WU Yue², YANG Qing-shan¹, CHEN Xu²

(1. Beijing's Key Laboratory of Structural Wind Engineering and Urban Wind Environment,

School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China)

Abstract: The parameter sensitivity analysis of the wind-induced response of a long-span roof is performed in order to quantify the strength and relevance of the inputs in determining the variation in a wind-induced response. The propagation law of uncertainty between a wind load and a wind-induced response is discussed. First, repeated wind tunnel tests are carried out to obtain a large amount of fluctuating wind pressure time histories, which could be the input variable of sensitivity analysis. Then probability-statistic models of structural parameters are constructed reasonably. The parameter sensitivities to wind-induced responses are systematically analyzed by combining the Sobol' method and Latin hypercube sampling technique. It is found that the extreme wind-induced response approximately obeys a generalized extreme-value distribution. The uncertainty of wind-induced responses is mainly controlled by wind load uncertainty. The parameter sensitivity to a wind-induced response is related to the ratio of the resonant response to the total response. The sensitivity value is larger with the increase of the ratio.

收稿日期: 2013-09-09; 修改日期: 2013-11-22

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(91215302); 国家自然科学基金项目(51308039); 高等学校学科创新引智计划项目(B13002); 中国博士后科学基金项目(2013M530021); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130009120026); 中央高校基本科研业务费项目(2013JBM057)

通讯作者: 吴 迪(1982—), 男, 山东济南人, 讲师, 博士, 主要从事大跨屋盖结构抗风研究(E-mail: forseti2001@163.com).

作者简介: 武 岳(1972—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士, 博导, 主要从事大跨屋盖结构抗风研究(E-mail: wuyue_2000@163.com);

杨庆山(1968—), 男, 河北晋县人, 教授, 博士, 博导, 主要从事大跨屋盖结构抗风研究(E-mail: qshyang@bjtu.edu.cn);

陈 旭(1988—), 男, 江苏常州人, 博士生, 主要从事大跨屋盖结构抗风研究(E-mail: zui1988@126.com).

Key words: long-span roofs; wind-induced response; parameter sensitivity; uncertainty; repeated wind tunnel tests

基于可靠度的抗风设计是结构风工程理论发展的重要方向^[1]。结构在风荷载作用下的动力响应受包括风荷载和结构自身力学参数在内的众多不确定因素影响,如何定量评价各参数不确定性对风振响应不确定性的贡献率,是进行结构抗风可靠度分析的前提和必要条件。近年来,参数灵敏度分析技术的发展使定量刻画模型输入不确定性对输出不确定性的影响程度成为了可能,且已广泛应用于生态、经济、社会等领域的大型复杂模型中。但目前针对屋盖结构风振响应的参数灵敏度研究基本处于空白,相关分析无现成方法可循。

根据同时考虑变化参数的数量,灵敏度分析方法可分为局部灵敏度分析和全局灵敏度分析^[2]。其中,局部灵敏度分析主要考察单个参数变化对模型输出的影响,具有概念清晰、操作简便等优点,因而得到了广泛应用,但是这一方法也存在以下局限性:①当模型具有强非线性或输入变量的不确定性处于不同数量级时,可能不能够提供有效的分析结果;②研究某一参数的灵敏度时,其他参数的取值可能影响分析结果,即局部灵敏度分析无法考虑参数间相互作用的影响。尽管如此,局部灵敏度分析具有较高的计算效率,可用于模型全局灵敏度分析的预研究中。全局灵敏度分析则可以考察所有不确定参数共同变化对输出的影响,因此具有更强的适用性。目前多参数变化的灵敏度分析方法主要包括:基于回归和相关的分析方法^[3]、响应面方法^[4]、Morris方法^[5]、傅立叶幅度分析方法^[6]、Sobol'灵敏度分析方法^[7]等。

本文针对大跨屋盖结构体量巨大,施工条件复杂,在风荷载作用下的力学行为受多种不确定因素影响的特点,以多次采样风洞试验获得的大量脉动风荷载样本为基础,采用结合拉丁超立方抽样技术的全局灵敏度分析方法-Sobol'方差分解法,考察荷载不确定性和结构自身参数随机性对结构风振极值响应的影响,通过大规模随机模拟,揭示不确定性在风荷载与风振响应间的传递规律,建立结构动力极值响应的概率分布模型。

1 随机风振响应的灵敏度分析

1.1 Sobol' 灵敏度分析方法

对于大跨屋盖结构,其风振响应的参数灵敏度

分析具有如下特点:①结构随机响应与输入风荷载之间为复杂的非线性关系;②结构不确定参数众多,且各输入参数的概率分布也不一致。基于上述特点,本文采用基于方差的 Monte Carlo 方法-Sobol'方差分解法进行风振响应参数灵敏度分析,该方法的基本思想是把模型 $f(x)$ 分解为单个参数及参数之间相互组合的函数:

$$f(x_1, \dots, x_m) = f_0 + \sum_{i=1}^m f_i(x_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq m} f_{ij}(x_i, x_j) + \dots + f_{1,2,\dots,m}(x_1, \dots, x_m) \quad (1)$$

式(1)右侧共有 2^m 项, Sobol 证明^[8], 当满足下列条件时,这一分解具有唯一形式:

$$\int_0^1 f_i(x_i) dx_i = 0, \forall x_i, i = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

$$\int_0^1 \int_0^1 f_{ij}(x_i, x_j) dx_i dx_j = 0, \forall x_i, x_j, i < j \quad (3)$$

$$\int_{\Omega} f_{1,2,\dots,k}(x_1, x_2, \dots, x_k) dx_1 dx_2 \dots dx_k = 0 \quad (4)$$

式(1)等式右侧分解的各分项之间相互正交,即:

$$\int_{\Omega} f_{i_1, \dots, i_s} f_{j_1, \dots, j_t} dx = 0, (i_1, i_2, \dots, i_s) \neq (j_1, j_2, \dots, j_t) \quad (5)$$

记 $f_0 = \int_{\Omega} f(x) dx$, 对除 x_i 之外的所有参数积分可获得 $f_i(x_i)$:

$$f_i(x_i) = -f_0 + \int f(x) \prod_{j \neq i} dx_j \quad (6)$$

$$f_{ij}(x_i, x_j) = -f_0 - f_i(x_i) - f_j(x_j) + \int f(x) \prod_{l \neq i, j} dx_l \quad (7)$$

依此类推,可获得 $f_{1,2,\dots,k}(x_1, x_2, \dots, x_k)$, Sobol' 法用总方差来表示所有参数对模型结果的影响程度:

$$V = \int f^2(x) dx - f_0^2 \quad (8)$$

单个参数 x_i 对模型结果的影响程度用偏方差表示:

$$V_i = \int f_i^2 dx_i \quad (9)$$

参数之间的交叉作用对模型结果的影响程度用下式表示:

$$V_{i_1, i_2, \dots, i_s} = \int f_{i_1, i_2, \dots, i_s}^2 dx_{i_1} dx_{i_2} \dots dx_{i_s} \quad (10)$$

对式(1)两边平方再积分可得:

$$V = \sum_{i=1}^k V_i + \sum_{i < j} V_{ij} + \dots + V_{1,2,\dots,k} \quad (11)$$

对式(11)各项归一化即可获得模型单个参数及参数之间相互作用的灵敏度系数:

$$S_{i_1, i_2, \dots, i_s} = \frac{V_{i_1, i_2, \dots, i_s}}{V} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)可得:

$$\sum_{i=1}^k S_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} S_{ij} + \dots + S_{1,2,\dots,k} = 1 \quad (13)$$

式中: S_i 定义为一阶灵敏度; S_{ij} 为二阶灵敏度, 依次类推, $S_{1,2,\dots,k}$ 为 k 阶灵敏度。定义参数的总灵敏度 S_{Ti} :

$$S_{Ti} = \sum S_{(i)} \quad (14)$$

式中, $S_{(i)}$ 为所有包含参数 i 的灵敏度。

Sobol' 灵敏度分析方法的优点在于: ① 对评估模型的线性、单调性以及输入的概率分布特性没有要求; ② 可以分析模型单个参数及参数之间相互作用对模型输出的影响。

1.2 拉丁超立方抽样方法

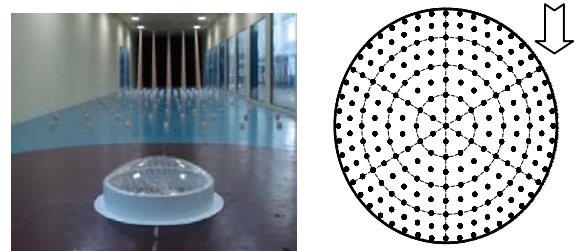
作为 Monte Carlo 方法的一种, Sobol' 灵敏度分析的精确性依赖于样本容量, 样本容量越大, 计算精度越高, 但是抽样次数过多会导致计算困难。合理的抽样方法不仅能降低模拟结果的估计方差, 提高模拟精度, 还能在小样本的情况下获得令人满意的结果。本文采用拉丁超立方抽样^[9]技术提高抽样效率, 其基本思路是对输入参数的抽样空间进行分层, 通过独立的从每个层抽样而得到输入变量值, 而不是从整个分布中抽样。具体做法是: 使用拉丁超立方抽样产生 m 个样本, 将每个输入变量分为 m 个等概率的区间, 依据概率分布从每个区间中随机抽取一个值作为输入, 进行结构风振响应分析。由于每个输入分布均有一个包含 m 个值的样本, 因此拉丁超立方抽样比严格随机抽样更为均匀, 用每个输入变量中得出的样本来表示均值、方差和其他参数将会比不分层的随机抽样结果更精确。研究表明, 同样精度要求下, 拉丁超立方抽样方法的抽样次数通常比简单随机抽样法少 20%~40%^[10]。

2 结构风振响应参数灵敏度分析

2.1 多次采样风洞试验

分别对实际工程中广泛采用的球面屋盖和柱面屋盖进行大规模重复采样风洞试验, 以风洞试验

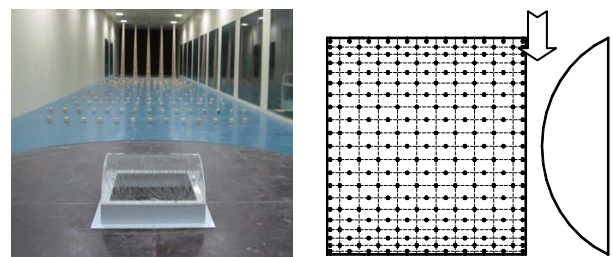
获得的脉动风荷载时程为激励, 采用上节所述方法对结构极值风振响应进行参数灵敏度分析。试验在一闭口回流式风洞中进行, 模型几何缩尺比为 1:100。球面屋盖矢跨比为 1:5; 柱面屋盖矢跨比 1:3, 长跨比 1:1, 支座高度均为 120mm。试验基本风速为 15m/s, 模拟 B 类地貌风场。测压信号采样频率为 625Hz, 单个样本采样时间为 12s, 在球面屋盖和柱面屋盖表面分别设置 217 个、241 个测点, 如图 1 和图 2 所示。按照相似准则, 换算到原型结构上的时间分辨率为 0.08s, 单个样本时长为 10min。通过编制相应接口软件实现多次自动采样功能, 试验中对球面屋盖和柱面屋盖分别进行同一工况下的 1411 次和 1347 次重复采样, 即在来流风速、粗糙元摆放、模型放置均不变的情况下, 对同一工况进行多次采样, 以考察气动力效应不确定性对结构风振响应的影响。需要说明的是, 对于该类曲面屋盖, 雷诺数效应可能对风荷载产生影响, 但本文的研究目的是考察结构风振响应对各不确定因素的灵敏度, 因此对雷诺数效应不做探讨。



(a) 试验照片 (b) 测点布置

图 1 球面屋盖模型

Fig.1 The spherical shell model for wind tunnel tests



(a) 试验照片 (b) 测点布置

图 2 柱面屋盖模型

Fig.2 The cylindrical shell model for wind tunnel tests

2.2 结构参数概率统计模型

采用通用有限元软件 Ansys 建立单层球面网壳和单层柱面网壳有限元模型(图 3~图 4)。球面网壳网格形式采用凯威特(K6)型, 柱面网壳为三向网格形式, 钢网壳和屋面质量分别采用 Beam4 和 Mass21 单元模拟。

实际结构中存在着各种不确定量,如材料特性、几何参数、边界条件等。结构参数的随机性可能引起结构随机响应的大幅涨落。研究表明,结构参数随机性对动力响应的贡献量可能与外激励随机性的贡献量处于同一量级^[11],按确定性模型分析所得到的计算结果不能精确描述结构的真实力学行为,因此有必要分析结构参数随机性对风振响应随机性的影响。本文根据屋盖结构实际情况,建立了不同类型结构参数的概率统计模型:

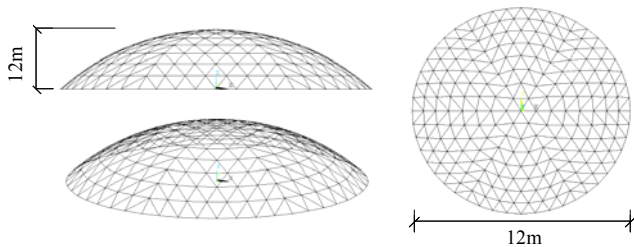


图3 球面网壳有限元模型

Fig.3 Finite element model of the spherical shell

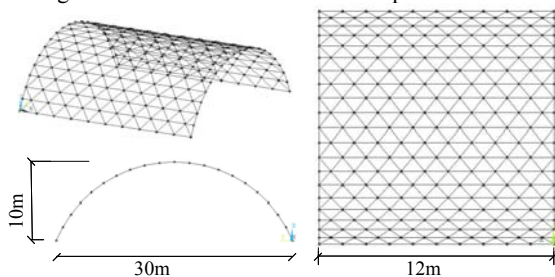


图4 柱面网壳有限元模型

Fig.4 Finite element model of the cylindrical shell

1) 屋面质量,由于结构所处环境的复杂性,导致了屋面恒荷载和活荷载具有不同程度的变异性。本文研究对象均为大跨轻屋盖,其恒荷载与活荷载的标准值均设为 40kg/m^2 。参考《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068-2001)^[12],屋面恒荷载近似服从正态分布,变异系数为 0.07;活荷载近似服从极值 I 型分布,变异系数为 0.29。结构屋面质量取为恒荷载+1/2 活荷载。

2) 杆件截面面积,网壳结构构件采用圆钢管,其横截面积受加工精度限制,具有一定随机误差。本文结构杆件截面按整体稳定性要求进行选取^[13],球壳主肋与环杆采用截面 $\Phi 146 \times 5.5$ 圆钢管,斜杆采用截面 $\Phi 133 \times 4$ 圆钢管,柱壳斜杆采用截面 $\Phi 140 \times 6.0$ 圆钢管,端杆和纵杆采用截面 $\Phi 102 \times 4.0$ 圆钢管。杆件截面面积近似服从对数正态分布,变异系数取为 0.02,且将每根杆件截面面积均设为独立的随机变量。

3) 结构阻尼比,阻尼是结构振动过程中所耗散

能量的度量,是结构动力响应计算的重要参数,通常将钢结构阻尼比均值取为 0.02。事实上,由于影响阻尼机制的复杂性和随机性,结构阻尼比也是一个随机变量,根据文献[14],风荷载作用下的钢结构的阻尼比近似服从对数正态分布,其变异系数设为 0.35。

4) 初始几何缺陷,空间结构的节点安装受施工顺序、安装工艺及设备、测量技术、工人熟练程度等因素影响,其空间位置不可避免的存在偏差,这一偏差的大小和分布形式可视为随机变量。根据文献[13],各节点的安装误差相互独立,且均近似服从正态分布。在进行随机抽样时,以两倍的标准差作为节点误差的最大值,假定结构模型中每个节点的最大允许偏差为 $\pm R$,则可将每个节点的误差设为 $RX/2$,其中 X 为服从标准正态分布的随机变量。最大节点安装容许偏差的取值参考《网壳结构技术规程》(JGJ 61-2003)^[15], R 不应大于跨度的 1/1500 或 40mm,分析时将各节点位置偏差均设为独立的随机变量。

综上,表 1 给出了网壳结构各随机参数的概率统计模型和变化范围。

表 1 结构参数概率统计模型

Table 1 Probability statistical models of structure parameters

| 随机参数 | 概率分布 | 均值 | 变异系数 | 标准差 |
|--------|----------|----------------------------------|------|------------------------|
| 屋面恒荷载 | 正态分布 | 35.87kg/m ² | 0.07 | 2.51kg/m ² |
| 屋面活荷载 | 极值 I 型分布 | 36.60kg/m ² | 0.29 | 10.61kg/m ² |
| 杆件截面面积 | 对数正态分布 | — | 0.02 | — |
| 结构阻尼比 | 对数正态分布 | 0.02 | 0.35 | 0.007 |
| 初始几何缺陷 | 正态分布 | 均值 0, 截断范围 $-L/1500 \sim L/1500$ | | |

2.3 局部参数灵敏度分析结果

由于屋盖结构存在多种随机参数,且每次随机抽样均对应一次动力分析,导致直接对各不确定参数进行全局灵敏度分析的计算量过大,为提高计算效率,通过单参数变化的局部灵敏度分析对各随机参数进行初选,作为全局灵敏度分析的预研究。局部灵敏度分析流程如下:针对某类结构参数,如结构初始几何缺陷,所有节点位置均在各自容许偏差的变化范围内随机抽样,而其他类型参数保持不变并取其中心值,进行相应的结构风振响应分析,对节点极值位移和杆件极值轴向应力进行统计分析,其他类型的结构参数进行类似计算。图 5 分别给出了不同结构参数各自单独随机变化所导致的风致极值响应的变异系数。结果表明对于本文研究的球面和柱面网壳结构,风荷载随机性对屋盖结构风致

极值响应影响远大于结构自身参数改变的影响，由参数随机性引起的风振响应的变异系数均在 0.02 以内，而与之对应的风荷载随机性引起的风振响应的变异系数则接近 0.15。相对而言，屋面质量对位移响应，杆件截面面积对内力响应有一定影响。

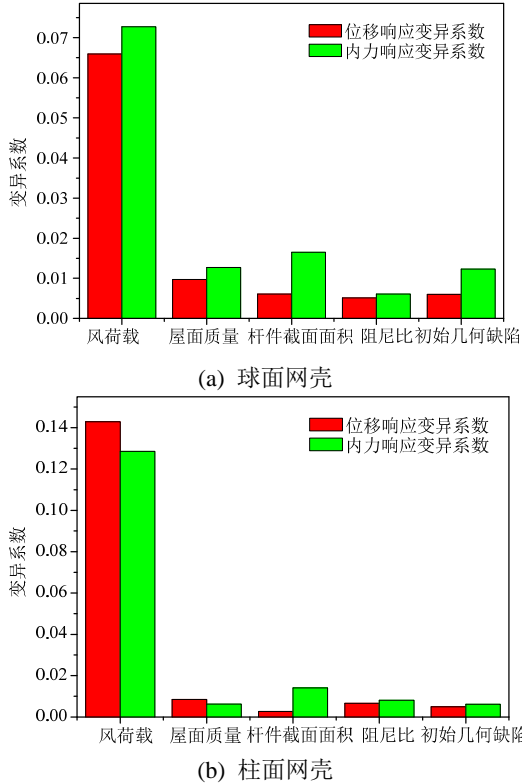


图 5 单参数独变化导致的风振响应变异系数

Fig.5 Coefficients of variation of wind-induced response resulted by individual variation of different parameters

2.4 全局参数灵敏度分析结果

根据局部灵敏度分析结果选择对结构极值位移和内力响应影响较为显著的风荷载、屋面质量和杆件截面面积作为不确定输入量，同时引入拉丁超立方随机抽样技术解决大规模参数灵敏度计算困难问题。为检验抽样次数是否满足计算稳定性要求，图 6 给出了多参数变化时球面网壳极值位移均值和标准差随模拟次数变化的曲线，可以看出，抽样次数大于 300 时，极值响应的统计特征即趋于稳定。统计结构节点最大位移和杆件最大应力值，并对其进行广义极值分布拟合，如图 7 所示。结果表明，多个参数共同随机变化时，结构极值风振响应近似服从广义极值分布，球面网壳极值位移的均值为 18.35mm，标准差为 1.21mm，杆件最大应力的均值为 73.63MPa，标准差为 5.35MPa。

采用 Sobol'方法对多参数变化下的风振响应结果进行分析可以得到结构极值风振响应对风荷载

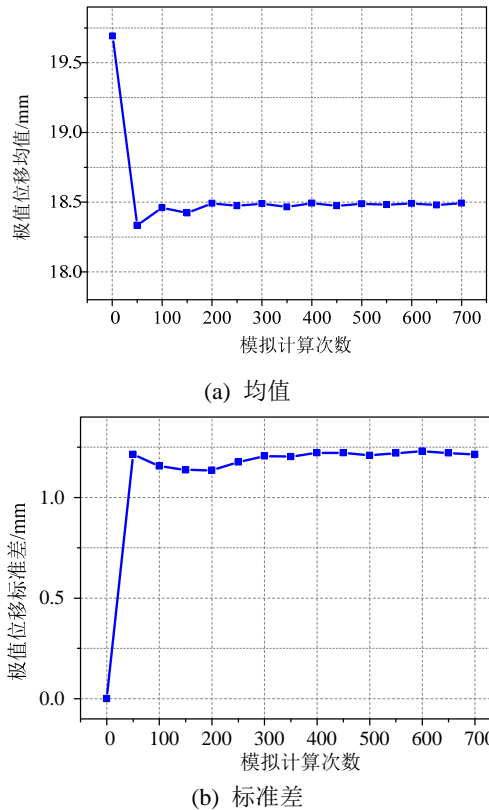


图 6 球面网壳极值位移统计特征与计算次数的关系

Fig.6 Relationship between statistical characters of maximum nodal displacement of the spherical shell and sample size

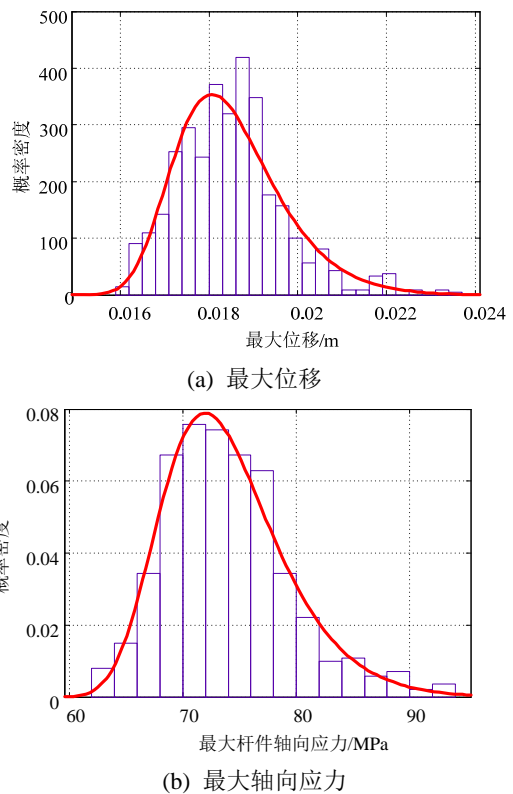


图 7 球面网壳极值响应的概率分布

Fig.7 Probability distribution of extreme response of the spherical shell

和结构参数的一阶灵敏度及总灵敏度,如表2~表5、图8~图9所示。结果表明,风荷载不确定性对结构风致极值响应的变异程度的影响最大,对于球面网壳,风荷载不确定性对位移响应和内力响应不确定性的贡献分别达到83%和71%;对于柱面网壳,这一数字分别为90%和81%。另外,屋面质量随机性对位移响应,杆件截面面积随机性对内力响应也存在一定影响。需要说明的是,一阶灵敏度反映的是单个参数变化对输出的影响;而本文给出的总灵敏度不仅反映了参数单独变化的影响,还反映了参数间交互作用对输出的影响。如得到的总灵敏度在数值上和一阶灵敏度差别很大,说明该参数的交互作用明显,根据表2~表5,对于给定的参数分布,影响屋盖结构风振响应的各参数间是存在交互作用的。局部和全局灵敏度分析均表明,风荷载不确定性对极值风振响应的影响远大于结构动力参数的影响,对于本文研究的单层球面和柱面网壳结构,抗风设计中仅考虑风荷载不确定性是可行的。

表2 球面网壳结构极值位移的全局灵敏度分析结果

Table 2 Results of global sensitivity analysis for maximum nodal displacement of the spherical shell

| 参数 | 一阶灵敏度 | 总灵敏度 | 贡献率/(%) |
|--------|-------|-------|---------|
| 风荷载 | 0.935 | 1.100 | 83 |
| 杆件随机面积 | 0.049 | 0.081 | 6 |
| 屋面质量 | 0.132 | 0.141 | 11 |

表3 球面网壳杆件极值应力的全局灵敏度分析结果

Table 3 Results of global sensitivity analysis for maximum member stress of the spherical shell

| 参数 | 一阶灵敏度 | 总灵敏度 | 贡献率/(%) |
|--------|-------|-------|---------|
| 风荷载 | 0.939 | 0.953 | 71 |
| 杆件随机面积 | 0.212 | 0.215 | 16 |
| 屋面质量 | 0.088 | 0.175 | 13 |

表4 柱面网壳结构最大位移的全局灵敏度分析结果

Table 4 Results of global sensitivity analysis for maximum nodal displacement of the cylindrical shell

| 参数 | 一阶灵敏度 | 总灵敏度 | 贡献率/(%) |
|--------|-------|-------|---------|
| 风荷载 | 0.882 | 0.986 | 90 |
| 杆件随机面积 | 0.022 | 0.034 | 3 |
| 屋面质量 | 0.071 | 0.081 | 7 |

表5 柱面网壳杆件最大内力的全局灵敏度分析结果

Table 5 Results of global sensitivity analysis for maximum member stress of the cylindrical shell

| 参数 | 一阶灵敏度 | 总灵敏度 | 贡献率/(%) |
|--------|-------|-------|---------|
| 风荷载 | 0.845 | 0.975 | 81 |
| 杆件随机面积 | 0.112 | 0.131 | 11 |
| 屋面质量 | 0.093 | 0.101 | 8 |

另一方面,对于位移响应和内力响应,柱面网壳对风荷载的灵敏度均大于球面网壳,为解释这一现象,图10分别给出了平均响应、背景响应和共振响应对风荷载灵敏度的贡献,可以看出共振响应对风荷载灵敏度的贡献大于背景响应,原因是共振响应反映结构在风荷载作用下的动力放大效应,即风荷载的不确定性经结构放大为共振响应的不确定性。图11分别给出了响应三分量占总响应的比例,可以看出柱面网壳共振响应所占比重大于球面网壳,因此柱面网壳对风荷载更敏感。综上可以得出:结构风振响应的参数灵敏度与共振响应在总响应中的比重有关,共振响应占比越大,结构对风荷载越敏感。

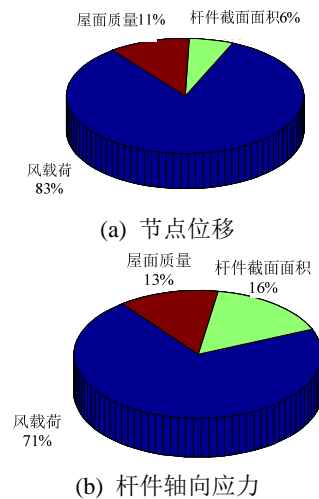


图8 球面网壳风致极值响应对各随机因素的灵敏度
Fig.8 Total sensitivities of different stochastic factors for extreme wind-induced response of the spherical shell

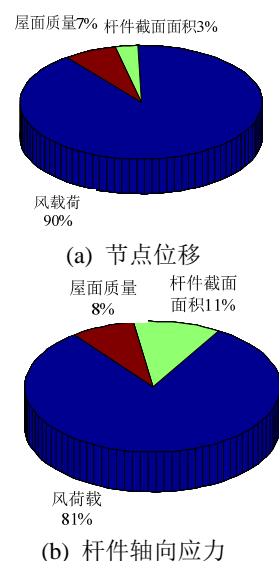


图9 柱面网壳风致极值响应对各随机因素的灵敏度
Fig.9 Total sensitivities of different stochastic factors for extreme wind-induced response of the cylindrical shell

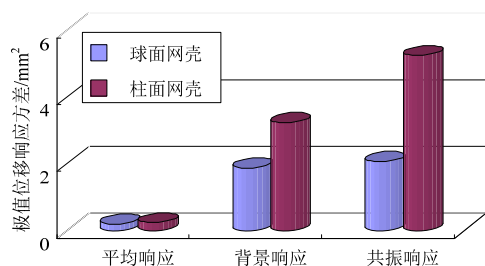


图 10 响应三分量对总灵敏度的贡献

Fig.10 Contribution of mean/background resonant variance to total sensitivity

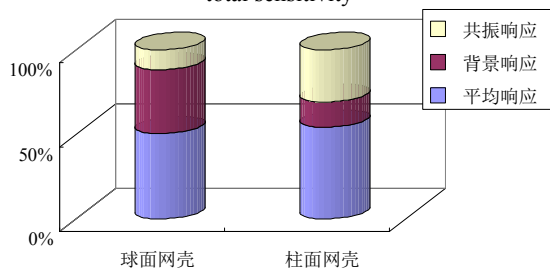


图 11 响应三分量占总响应的比例

Fig.11 Histogram for the ratio of mean background/resonant response to total response

3 结论

结合多次采样风洞试验,对典型大跨屋盖结构风振响应进行了参数灵敏度分析,定量评估了各种不确定因素对结构风振响应不确定性的影响程度,建立了结构动力极值响应的概率分布模型。主要结论有:

(1) 综合应用局部灵敏度分析、全局灵敏度分析和拉丁超立方抽样技术解决了大跨屋盖结构风振响应灵敏度分析参数规模庞大、计算模型复杂的问题。

(2) 多个参数共同随机变化时,屋盖结构极值风振响应近似服从广义极值分布。

(3) 对于本文研究的单层球面和柱面网壳结构,结构风振响应的不确定性主要受风荷载不确定性控制,屋面质量随机性对位移响应,杆件截面面积随机性对内力响应存在一定影响。

(4) 结构风振响应的参数灵敏度与共振响应在总响应中的比重有关,共振响应占比越大,结构对风荷载越敏感。

需要说明的是,本文采用的灵敏度分析方法可以定量评估各种不确定因素对结构风振响应不确定性的贡献率,后续可根据本文分析结果,重点考虑对输出结果影响大的参数,进而通过大规模随机模拟建立各类典型大跨屋盖结构动力极值响应的概率分布模型。

参考文献:

- [1] Davenport A G. Past, present and future of wind engineering [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(12): 1371—1380.
- [2] Saltelli A, Chan K, Scott M. Sensitivity analysis, probability and statistics series [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000: 15—17.
- [3] Manache G, Melching C S. Identification of reliable regression-and correlation—based sensitivity measures for importance ranking of water—quality model parameters [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2008, 23(5): 549—562.
- [4] Sanayei M, Imbaro G R. Structural model updating using experimental static measurements [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1997, 123(6): 792—798.
- [5] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments [J]. *Technometrics*, 1991, 33(2): 161—174.
- [6] Lu Y C, Mohanty S. Sensitivity analysis of a complex, proposed geologic waste disposal system using the Fourier amplitude sensitivity test method [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2001, 72(3): 275—291.
- [7] Sobol I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2001, 55(1/2/3): 271—280.
- [8] Sobol I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models [J]. *Mathematical Modeling and Computational Experiment*, 1993, 1(4): 407—414.
- [9] 戴鸿哲, 王伟. 结构可靠性灵敏度分析的低偏差抽样方法[J]. *工程力学*, 2010, 27(1): 104—108.
Dai Hongzhe, Wang Wei. Low-discrepancy sampling method for structural reliability sensitivity analysis [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(1): 104—108. (in Chinese)
- [10] Helton J C, Davis F J, Johnson J D. A comparison of uncertainty and sensitivity analysis results obtained with random and Latin hypercube sampling [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2005, 89(3): 305—330.
- [11] 赵雷, 陈虬. 随机有限元动力分析方法的研究进展[J]. *力学进展*, 1999, 29(1): 9—18.
Zhao Lei, Chen Qiu. Advances of dynamic response analysis based on stochastic finite element method [J]. *Advances in Mechanics*, 1999, 29(1): 9—18. (in Chinese)
- [12] GB 50068-2001, 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
GB 50068-2001, Unified standard reliability design of building structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2002. (in Chinese)
- [13] 沈世钊, 陈昕. 网壳结构稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 52—59.
Shen Shizhao, Chen Xin. Stability of reticulated shells [M]. Beijing: Science Press, 1999: 52—59. (in Chinese)
- [14] Kareem A. Reliability of wind-sensitive structures [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33(3): 495—514.
- [15] JGJ 61-2003, 网壳结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
JGJ 61-2003, Technical specification for latticed shells [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese)