

文章编号: 1000-4750(2011)05-0166-06

基于应变能等效的大跨屋盖结构背景响应 等效静力风荷载

*李玉学^{1,2}, 杨庆山², 田玉基²

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要: 根据结构应变能等效, 推导了大跨屋盖结构背景响应等效静力风荷载表达式, 解决了大跨屋盖结构等效静力风荷载计算中需要兼顾多个等效目标的问题, 并赋予了其明确的物理意义, 即将其与脉动风荷载下结构的应变能联系起来。最后将该方法应用于国家体育场屋盖结构背景响应等效静力风荷载的计算以验证其有效性。

关键词: 大跨屋盖; 等效静力风荷载; 背景响应; 多目标; 应变能

中图分类号: TU393.3; TU312 **文献标识码:** A

EQUIVALENT STATIC WIND LOAD OF LARGE-SPAN ROOFS BASED ON ENERGY EQUATION

*LI Yu-xue^{1,2}, YANG Qing-shan², TIAN Yu-ji²

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on strain energy equivalency, the background response equivalent static wind load of large span roofs is derived. It solves the matter that numerous structural response control objects should be considered in calculating the equivalent static wind load of large span roofs, and gives a clear physical meaning for the equivalent static wind load. This establishes the relationship between the structural strain energy and fluctuant wind loads. Finally, the method is used to the back equivalent static wind load analysis of the China National Stadium roof structure. The results illustrate that the method proposed in this paper is effective.

Key words: large-span roof; equivalent static wind load; background response; multi-objects; strain energy

随着大跨屋盖结构跨度的不断增大以及轻质屋面材料的采用, 结构对风荷载的作用变得十分敏感^[1-2], 风荷载往往成为该类结构设计的控制荷载。为了方便工程设计, 通常利用等效静力风荷载将结构在脉动风荷载作用下的效应按照静力问题处理, 相应的提出了多种等效静力风荷载分析方法。

Davenport 于 1967 年提出了分析高层、高耸结构等效静力风荷载的阵风荷载因子法^[3], 后来经过许多学者的改进, 成为包括我国在内的许多国家制

定风荷载规范的依据^[4-9]。该方法的优点是表达简洁、使用方便, 缺点是仅能从数值上保证最大响应点与实际风荷载产生的响应等效, 是一种数学处理。真正从风荷载作用机理研究等效静力风荷载是 Kasperski 在 1992 年提出的荷载响应相关法(LRC 法)^[10-11], 后来该方法被广泛应用到结构背景响应等效静力风荷载的研究中^[12]。

对于结构形式比较单一, 风振响应分析只取第一阶模态就可以达到所需精度的高层、高耸结构,

收稿日期: 2009-11-05; 修改日期: 2010-07-21

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50725826); 北京市自然科学基金项目(8072017)

作者简介: *李玉学(1978—), 男, 河北人, 博士生, 从事结构抗风研究(E-mail: liyuxue2000@163.com);

杨庆山(1968—), 男, 河北人, 教授, 博士, 博导, 从事结构抗风、抗震研究(E-mail: qshyang@bjtu.edu.cn);

田玉基(1967—), 男, 江苏人, 副教授, 博士, 从事结构抗风、抗震研究(E-mail: yujitian@bjtu.edu.cn).

由于在振动过程中各位置节点相位完全相同, 结构响应的控制点比较明确, 即顶点位移或者基底弯矩。对于此类结构, 上述等效静力风荷载分析方法能够保证在控制点响应最大时刻, 非控制点响应也正好与按照随机振动理论得到的动力极值响应相符, 即给出的等效静力风荷载分布形式是保证所有节点响应最不利的荷载分布形式。而大跨屋盖结构形式复杂, 风振响应具有多模态参与的特点^[13], 振动过程中不同位置的节点存在一定相位差, 不在同一时刻达到极值, 响应控制点不再明确, 针对不同响应控制点会得到不同的等效静力风荷载分布形式, 而且得到的等效静力风荷载也往往只能保证该控制点响应与动力极值响应等效, 如何确定不利的那组等效静力风荷载是相当麻烦的^[14]。因此, 需要提出一种能够兼顾多个节点响应的等效静力风荷载分析方法。

在随机脉动风荷载作用下所有节点响应同时达到极值的概率很小, 此时也是结构最危险的情况, 因此, 从保证结构整体安全的角度, 偏于保守的以此情况下结构的应变能相等作为等效原则, 即结构各节点上作用的等效静力风荷载可以由等效静力风荷载作用下结构的应变能与脉动风荷载作用下结构的应变能极值相等得到。按照上述思路, 本文得到了大跨屋盖结构背景响应等效静力风荷载, 该背景响应等效静力风荷载, 兼顾了多个节点响应, 同时赋予了明确的物理意义, 即从结构整体安全的角度, 将背景响应等效静力风荷载与结构在脉动风荷载作用下的应变能背景分量联系起来, 不仅仅是单纯的数学处理方法。限于篇幅, 基于应变能等效的共振响应等效静力风荷载将另文发表。

1 应变能背景分量

大跨屋盖在脉动风荷载作用下的运动方程为:

$$M\ddot{X}_d + C\dot{X}_d + KX_d = LP_d(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C 和 K 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \ddot{X}_d 、 \dot{X}_d 和 X_d 分别为加速度向量、速度向量和位移向量; $P_d(t)$ 为测压点处的脉动风荷载列向量; L 表示测压点与节点间等效力转换矩阵。

对运动方程式(1)不考虑其动力项, 便可以得到结构的背景响应求解方程:

$$KX_b(t) = P_d(t) \quad (2)$$

在脉动风荷载作用下, 结构的应变能背景分量

等于脉动风荷载在背景响应上所做的功:

$$W_b(t) = \frac{1}{2} X_b^T(t) P_d(t) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \text{diag}[P_d(t) X_b^T(t)] \quad (3)$$

式中: $X_b(t)$ 和 $X_b^T(t)$ 为结构总背景响应及其转置; $\sum \text{diag}[\cdot]$ 表示矩阵对角线元素求和; n 为节点数。

由结构背景响应的求解方程式(2), 可以得到结构总背景响应:

$$X_b(t) = K^{-1} P_d(t) \quad (4)$$

将式(4)代入到式(3)可以得到:

$$W_b(t) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \text{diag}[P_d(t) X_b^T(t)] = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \text{diag}[P_d(t) P_d^T(t) K^{-1T}] \quad (5)$$

式(5)又可以写成:

$$W_b(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} p_i(t) p_j(t) \quad (6)$$

式中: $p_i(t)$ 和 $p_j(t)$ 分别为节点 i 和节点 j 处的脉动风荷载时程; k_{ij} 为矩阵 K^{-1T} 相应位置的元素。

为了表达方便, 式(6)又可以写成:

$$W_b(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} P_{ij} \quad (7)$$

式中: P_{ij} 为 $p_i(t)$ 和 $p_j(t)$ 的乘积; 其余符号意义同前。

2 应变能等效背景响应等效风荷载

2.1 背景响应等效风荷载计算

根据方差的定义可以得到式(7)表示的应变能背景分量的方差:

$$\sigma_{W_b}^2 = E \left\{ \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} P_{ij} - E \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} P_{ij} \right) \right]^2 \right. \\ \left. \left[\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{kl} P_{kl} - E \left(\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{kl} P_{kl} \right) \right]^2 \right\} \quad (8)$$

由于 k_{ij} 和 k_{kl} 均为常数, 式(8)又可以表示为:

$$\sigma_{W_b}^2 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{ij} k_{kl} \cdot \\ E \{ [P_{ij} - E(P_{ij})][P_{kl} - E(P_{kl})] \} = \\ \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{ij} k_{kl} \sigma_{P_{ij}} \sigma_{P_{kl}} \rho_{P_{ij}, P_{kl}} = \\ \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{ij} k_{kl} \sigma_{P_{ij}, P_{kl}}^2 \quad (9)$$

式中: $\sigma_{P_{ij}}$ 和 $\sigma_{P_{kl}}$ 分别为 P_{ij} 的均方根和 P_{kl} 的均方根; $\sigma_{P_{ij}, P_{kl}}^2$ 和 $\rho_{P_{ij}, P_{kl}}$ 分别为 P_{ij} 、 P_{kl} 的协方差和相关系数, 其关系式为:

$$\rho_{P_{ij}, P_{kl}} = \frac{\sigma_{P_{ij}, P_{kl}}^2}{\sigma_{P_{ij}} \sigma_{P_{kl}}} \quad (10)$$

根据协方差定义, P_{ij} 和 $W_b(t)$ 的协方差可以表示为:

$$\sigma_{P_{ij}, W_b}^2 = \text{cov}(P_{ij}, W_b) = E \left\{ [P_{ij} - E(P_{ij})] \left[\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{kl} P_{kl} - E \left(\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{kl} P_{kl} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

同理, 由于 k_{kl} 为常数, 式(11)又可以表示为:

$$\sigma_{P_{ij}, W_b}^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{kl} E \{ [P_{ij} - E(P_{ij})][P_{kl} - E(P_{kl})] \} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{kl} \sigma_{P_{ij}, P_{kl}} \rho_{P_{ij}, P_{kl}} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{kl} \sigma_{P_{ij}, P_{kl}}^2 \quad (12)$$

定义 P_{ij} 和 $W_b(t)$ 的相关系数为:

$$\rho_{P_{ij}, W_b} = \frac{\sigma_{P_{ij}, W_b}^2}{\sigma_{P_{ij}} \sigma_{W_b}} \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)得到:

$$\rho_{P_{ij}, W_b} = \frac{\sigma_{P_{ij}, W_b}^2}{\sigma_{P_{ij}} \sigma_{W_b}} = \frac{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{kl} \sigma_{P_{ij}, P_{kl}}^2}{\sigma_{P_{ij}} \sigma_{W_b}} \quad (14)$$

由式(9)~式(14), 得到 $W_b(t)$ 均方根为:

$$\sigma_{W_b} = \frac{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{ij} k_{kl} \sigma_{P_{ij}, P_{kl}}^2}{\sigma_{W_b}} = \frac{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \left(\frac{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{kl} \sigma_{P_{ij}, P_{kl}}^2}{\sigma_{W_b}} \right)}{\sigma_{W_b}} = \frac{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \left(\frac{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{kl} \sigma_{P_{ij}, P_{kl}}^2}{\sigma_{W_b} \sigma_{P_{ij}}} \right) \sigma_{P_{ij}}}{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \rho_{P_{ij}, W_b} \sigma_{P_{ij}}} \quad (15)$$

因此, 结构在脉动风荷载作用下的应变能背景

分量极值可以表示为:

$$W_{b, \max} = g_{W_b} \sigma_{W_b} = \frac{1}{2} g_{W_b} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \rho_{P_{ij}, W_b} \sigma_{P_{ij}} \quad (16)$$

式中: g_{W_b} 为应变能背景分量的峰值因子, 可以按照极值超越理论计算得到^[2]。

按照式(6)中应变能背景分量的定义, 可以得到保证结构背景响应应变能等效的 i 节点上的背景响应等效静力风荷载为:

$$P_{eq, b, i} = (g_W \rho_{P_{ii}, W_b} \sigma_{P_{ii}})^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

对于刚度较大的屋盖结构, 当结构风振响应共振分量所占比例很小, 以背景响应为主时, 其总的等效静力风荷载可以近似表示为:

$$P_{eq, i} = \bar{P}_i + \text{sign}(\bar{P}_i) P_{eq, b, i} = \bar{P}_i + \text{sign}(\bar{P}_i) (g_W \rho_{P_{ii}, W_b} \sigma_{P_{ii}})^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

其中: \bar{P}_i 为 i 点的平均风荷载; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。

对于柔度较大的屋盖结构, 共振响应分量不可忽略, 此方法可以用来单独计算背景响应等效静力风荷载, 然后再与共振响应等效静力风荷载组合。

得到作用在结构上的总等效静力风荷载以后, 就可以方便的与自重、活荷载等进行荷载效应组合, 以此进行结构设计。

2.2 等效静风荷载下结构应变能计算

根据 2.1 中得到的背景响应等效静力风荷载, 按照结构应变能背景分量定义, 可以得到结构在该背景响应等效静力风荷载作用下的应变能背景分量。

考虑结构所有节点, 将节点上的背景响应等效静力风荷载结果代入式(6)可以得到:

$$W_{eq, b} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} p_{eq, b, i} p_{eq, b, j} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} (g_W \rho_{P_{ii}, W_b} \sigma_{P_{ii}})^{\frac{1}{2}} (g_W \rho_{P_{jj}, W_b} \sigma_{P_{jj}})^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

由式(9)、式(12)、式(14), 式(19)又可以进一步表示为:

$$W_{eq, b} = \frac{1}{2} g_W \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \sqrt{\frac{\sigma_{P_{ii}, W_b}^2}{\sigma_{P_{ii}} \sigma_{W_b}} \frac{\sigma_{P_{jj}, W_b}^2}{\sigma_{P_{jj}} \sigma_{W_b}}} \sigma_{P_{ij}} = \frac{1}{2} g_W \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \frac{\sigma_{P_{ii}, W_b} \sigma_{P_{jj}, W_b}}{\sigma_{W_b}} =$$

$$\frac{1}{2} g_W \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{kl} k_{kl} \sigma_{P_{ii}, P_{kl}}^2 \sigma_{P_{jj}, P_{kl}}^2} =$$

$$\frac{1}{2} g_W \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \frac{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{kl} \sigma_{P_{ii}, P_{kl}} \sigma_{P_{jj}, P_{kl}}}{\sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{ij} k_{kl} \sigma_{P_{ij}, P_{kl}}^2}} =$$

$$\frac{1}{2} g_W \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \left(\frac{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n k_{kl} \sigma_{P_{ij}, P_{kl}}^2}{\sigma_{W_b} \sigma_{P_{ij}}} \right) \sigma_{P_{ij}} =$$

$$\frac{1}{2} g_W \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \rho_{P_{ij}, W_b} \sigma_{P_{ij}} = W_{b, \max} \quad (20)$$

由式(20)可见,式(17)表示的背景响应等效静力风荷载能够保证在该等效静力风荷载下结构的应变能背景分量与实际脉动风荷载作用下结构的背景响应应变能极值相等。

3 算例分析

根据所提方法采用FORTRAN语言编制了计算程序,以国家体育场屋盖主结构为例,该结构共振响应不明显^[13],采用本文方法计算其背景响应等效静力风荷载,并求得了在此背景响应等效静力风荷载作用下结构的静力响应,为了比较,还采用LRC法计算了该结构的背景响应等效静力风荷载以及该荷载作用下的结构静力响应。最后,与目标背景响应(频域分析得到的结构背景响应)进行了比较。

国家体育场的结构形式和风洞试验情况参见文献[15]。

为了方便风荷载分析,将屋盖划分为74个板块,本文的计算采用风洞试验340°风向角时的测压数据(图1)。74个板块上的平均风压分布和脉动风压均方根分布,分别如图2和图3所示。

由图2可见,340°风向角下屋盖上表面的风荷载以负压(风吸力)为主,正压主要出现在来流区屋盖的最外边缘;靠近来流前缘区域风吸力较大,随着距离的增加,风吸力逐渐减弱,而在来流方向上内缘屋盖位置又出现较大的负压区。而图3脉动风压均方根的分布,表现出在平均风压较大的部位其值较大,在屋盖来流区域两侧其值则较小。

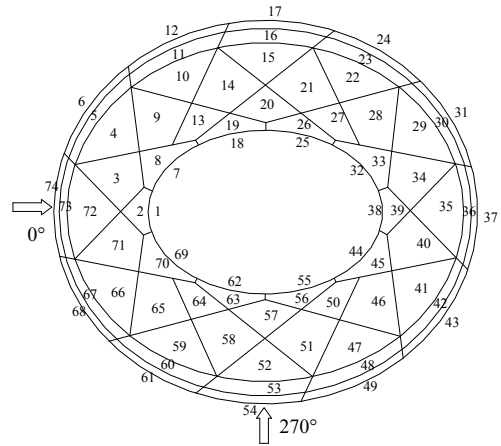


图1 板块划分及风向角示意图

Fig.1 Sketch of panel division and wind position

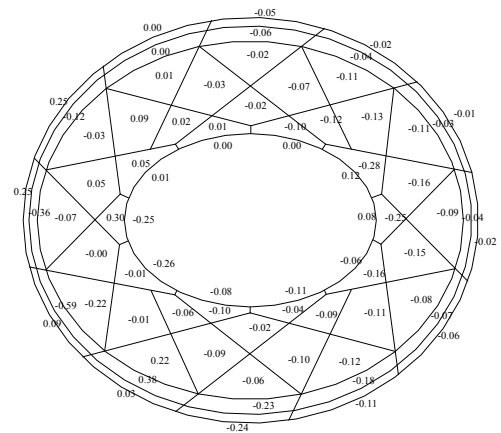


图2 平均风压分布(向上为正) / (kN/m²)

Fig.2 Mean wind pressure distribution

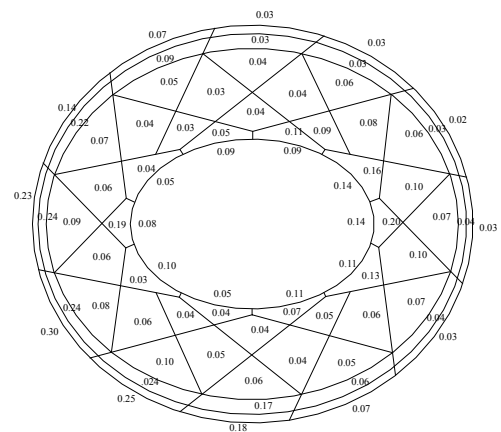


图3 脉动风压均方根分布 / (kN/m²)

Fig.3 RMS wind pressure distribution

3.1 背景响应等效静力风荷载结果

根据所提方法,计算得到背景响应等效静力风荷载在结构74个板块上的分布,如图4所示;为了比较,还采用LRC法计算了屋盖内环节点取最大竖向位移(目标响应)时的背景响应等效静力风荷

载, 其分布如图 5 所示。

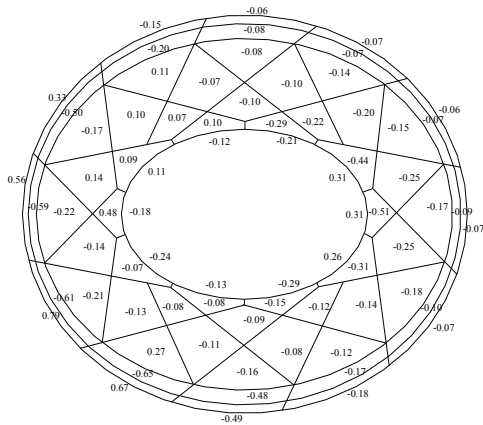


图 4 背景响应等效静力风荷载(本文方法) $/(kN/m^2)$

Fig.4 Background response equivalent static wind load based on energy equivalency

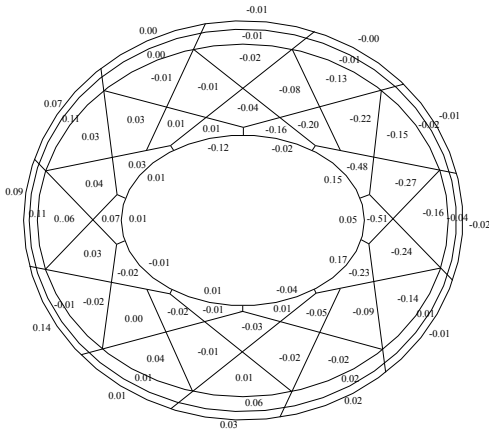


图 5 背景响应等效静力风荷载(LRC法) $/(kN/m^2)$

Fig.5 Background response equivalent static wind load based on LRC

从图 4 和图 5 的计算结果可以发现, 基于应变能等效得到的背景响应等效静力风荷载在数值上较 LRC 法得到的背景响应等效静力风荷载在屋盖结构局部位置偏大, 而且在 74 个板块上的分布规律也不大相同, 基于应变能等效得到的背景响应等效静力风荷载在结构的来流区域荷载值明显大于尾流区域, 而 LRC 法得到的荷载值在来流区域和尾流区域基本相当; 而在来流和尾流区域的两侧, 其荷载值较小, 在这一点上, 两种求解方法得到的计算结果却表现出了相同的规律。

3.2 静力响应求解结果对比

为了考察本文方法求解背景响应等效静力风荷载的效果, 分别把本文方法和 LRC 法得到的背景响应等效静力风荷载作用在屋盖上, 采用静力方法计算结构的竖向位移响应, 并与频域内得到的结构竖向位移极值背景分量(作为精确结果, 也为目标响

应)进行比较, 选取内环屋盖上 28 个节点的结果示于图 6 和图 7, 其中所选 28 个节点的位置和编号如图 8。

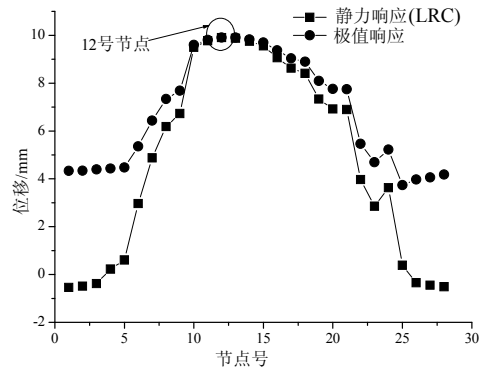


图 6 等效静力风荷载下结构竖向位移响应对比(LRC法)
Fig.6 Comparison of vertical static displacement (LRC)

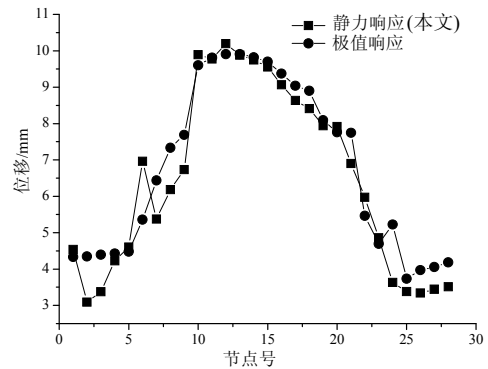


图 7 等效静力风荷载下结构竖向位移响应对比(本文方法)
Fig.7 Comparison of vertical static displacement (proposed method)

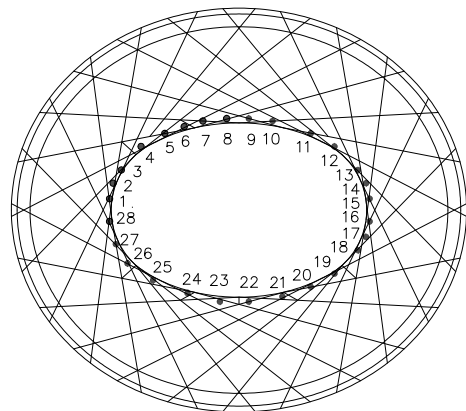


图 8 所选节点位置及编号

Fig.8 Position and number of the selected nodes

由图 6 可以看出, 基于 LRC 法背景响应等效静力风荷载作用下的结构静力响应能够保证目标点(图 8 中 12 号节点)与频域内得到的竖向位移极值响应背景分量(精确值)相等; 另外, 目标点附近数值较大的几个节点的静力响应与频域内结果(精确值)也比较接近, 而远离目标点、响应数值较小的那

些节点的静力响应与精确值相差较大,再次表明 LRC 法得到的等效静力风荷载能够很好的保证单一目标点响应等效,但是无法保证其它点响应与其动力响应极值等效。图 7 的对比结果表明,按照本文方法得到的背景响应等效静力风荷载作用下的结构静力响应除了能够保证响应数值较大的那些节点与精确值接近外,还能够使得响应数值较小的那些节点静力响应与精确值也比较接近,表明本文方法得到的背景响应等效静力风荷载能够较好的兼顾结构上多个节点的响应。

4 结论

针对大跨屋盖结构等效静力风荷载计算需要兼顾多个响应控制点的特点,依据应变能等效,推导了其背景响应等效静力风荷载,主要有以下几点结论:

(1) 依据应变能等效得到的背景响应等效静力风荷载,不但兼顾了结构多个节点响应,同时赋予了其明确的物理意义,即从结构整体安全的角度,将背景响应等效静力风荷载与结构的应变能联系起来,不仅仅是为了工程应用方便而单纯进行的数学处理。

(2) 作为结构背景响应等效静力风荷载的计算方法,对于刚度较大,共振响应不明显的大跨屋盖结构,可以将得到的背景响应等效风荷载与平均风荷载组合近似作为结构的总等效静力风荷载。

(3) 结合国家体育场屋盖主结构,采用本文方法计算其背景响应等效静力风荷载,同时计算该等效静力风荷载下的静力响应,并与 LRC 法和频域分析得到的背景响应进行对比,结果表明所提方法能够很好的兼顾多个位置点的响应,对于大跨屋盖结构的抗风设计具有工程应用价值。

参考文献:

- [1] 沈世钊. 大跨空间结构理论研究和工程实践[J]. 中国工程科学, 2001, 3(3): 34—41.
Shen Shizhao. Theoretical study and engineering practice of long-span spatial structures [J]. Engineering Science, 2001, 3(3): 34—41. (in Chinese)
- [2] 田玉基, 杨庆山. 国家体育场屋盖结构风振响应的时域分析[J]. 工程力学, 2009, 26(6): 95—99.
Tian Yuji, Yang Qingshan. Wind-induced response of Beijing National Stadium using time history analysis method [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(6): 95—99. (in Chinese)

- [3] Davenport A G. Gust loading factors [J]. Journal of Structural Division, 1967, 93(3): 11—34.
- [4] Simiu E. Equivalent static wind loads for tall buildings design [J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1976, 102(4): 719—737.
- [5] Solari G. Gust buffeting I: Peak wind velocity and equivalent pressure [J]. Journal of Structural Engineering, 1993a, 119(2): 365—382.
- [6] Solari G. Gust buffeting II: Dynamic along wind response [J]. Journal of Structural Engineering, 1993b, 119(2): 383—398.
- [7] Zhou Y, Kareem A. Gust loading factor: new model [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(2): 168—175.
- [8] Zhou Y, Kijewski T, Kareem A. Along-wind effects on tall buildings: comparative study of major international codes and standards [J]. Journal of Structural and Engineering, 2002, 128(6): 788—796.
- [9] 张相庭. 结构风工程理论·规范·实践[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2006.
Zhang Xiangting. Wind engineering theory . code . practice [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006. (in Chinese)
- [10] Kasperski M. Extreme wind load distributions for linear and nonlinear design [J]. Engineering Structures, 1992a, 14(1): 27—34.
- [11] Kasperski M, Niemann H J. The LRC method—a general method of estimation unfavorable wind load distributions for linear and non-linear structures [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992b, 41(44): 1753—1763.
- [12] Holmes J D. Effective static load distributions in wind engineering [J]. Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(2): 91—109.
- [13] Li Y X, Yang Q S, Tian Y J. Identification of dominant modes to wind-induced vibration response of large-span roofs [C]. The 10th International Symposium on Structural Engineering for Young Experts, Changsha, Hunan, China, 2008: 1051—1056.
- [14] 陈波, 杨庆山, 武岳, 沈世钊. 多目标等效静风荷载分析方法研究[C]. 第十四届全国结构风工程学会会议论文集, 北京, 2009: 423—428.
Chen Bo, Yang Qingshan, Wu Yue, Shen Shizhao. Study of multi-objects equivalent static wind load [C]. The 14th national conference on wind engineering, Beijing, 2009: 423—428. (in Chinese)
- [15] 李玉学, 杨庆山, 田玉基. 基于能量的大跨屋盖结构共振响应模态耦合效应分析[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 85—90.
Li Yuxue, Yang Qingshan, Tian Yuji. Modal coupling effects for wind-induced response of large-span roof structures [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 85—90. (in Chinese)