

文章编号: 1000-4750(2011)04-0096-06

基于本征模态补偿的 大跨屋盖脉动风等效静力风荷载

孙五一^{1,2}, 周暄毅¹, *顾明¹

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 中国地质大学工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 在刚性建筑模型风洞测压试验的基础上, 该文首先根据脉动风荷载引起的多个等效目标响应而对由结构上脉动风荷载的协方差本征变换得到的本征模态进行补偿, 然后提出了一种新的计算线性复杂大跨屋盖脉动风荷载的等效静力风荷载的方法, 最后并应用于一实际工程中。计算结果表明该文方法具有物理含义明确、计算方法简单和计算精度较高的优点, 能比较有效地避免以前传统方法计算等效静力风荷载的缺陷, 可以满足工程设计的需求。

关键词: 大跨屋盖; 等效静力风荷载; CPT 模态; 模态补偿; 等效目标响应

中图分类号: TU311.3; TU312.1 **文献标识码:** A

EQUIVALENT STATIC WIND LOADS OF FLUCTUATING WIND ON LARGE-SPAN ROOFS BASED ON EIGEN-MODE COMPENSATION

SUN Wu-yi^{1,2}, ZHOU Xuan-yi¹, *GU Ming¹

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the pressure measurements of wind tunnel test on a rigid model, this paper first compensates the eigen-modes of fluctuating wind loads with the covariance proper transformation (CPT) technique according to multiple equivalent target responses induced by the fluctuating wind loads. Then, a new computational method was proposed to calculate the equivalent static wind loads (ESWL) of fluctuating wind loads on those linear and complex large-span roofs. At last, the new method was applied to a real engineering project. The results demonstrate that the new method has the merits of explicit physical meaning, simple computational principle and high computational accuracy; it can also effectively avoid the defects in former traditional methods of computing the ESWL and can satisfy the requirements of engineering design.

Key words: large-span roofs; equivalent static wind loads (ESWL); CPT mode; mode compensation; equivalent target responses

大跨屋盖结构通常具有质量轻、柔性大、阻尼小和自振频率低等特点, 风荷载是这类结构设计控制荷载, 其等效静力风荷载(ESWL)已经成为风工程的研究热点。

ESWL 理论研究始于高层建筑结构, 文献[1]借助阵风荷载因子(GLF)法将用于结构设计的 ESWL 表示为作用在高层建筑上的平均风荷载乘以 GLF 而得到的。GLF 法因为形式简单, 所以它在大

收稿日期: 2009-09-25; 修改日期: 2010-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50608060); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(50621062); 科技部科技支撑计划项目(2006BAJ06B05)

作者简介: 孙五一(1976—), 男, 四川平昌人, 讲师, 博士生, 主要从事结构抗风研究(E-mail: sunwuyi@gmail.com);

周暄毅(1975—), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士, 主要从事结构抗风研究(E-mail: zhouxuytj@tongji.edu.cn);

*顾明(1957—), 男, 江苏兴化人, 教授, 博士, 主要从事结构抗风研究(E-mail: minggu@tongji.edu.cn).

跨屋盖结构抗风研究中也得到了一定的应用。文献[2-9]基于不同响应,采用阵风荷载因子(GLF)法对不同外形与结构形式的大跨屋盖的 ESWL 进行了研究。

近期的研究表明,尽管 GLF 法使用简单,并考虑了某些不利因素的影响,但依然存在着较大的局限性,对于大跨屋盖脉动风荷载的 ESWL,有必要寻找更加精确的方法。Holmes^[10]建议采用荷载响应相关(LRC)法和多阶模态惯性力线性组合的方法来考虑脉动风荷载的 ESWL;Chen^[11]用 LRC-POD 方法确定背景分量,用通过 Ritz-POD 方法选出的主导模态的惯性力来表示共振分量;而 Fu^[12]把 ESWL 表示成平均分量和动力分量二者之和,其中动力分量即为脉动风荷载的 ESWL,为每个关心的模态所贡献成分的一系列线性组合,相当于考虑了背景分量和共振分量之和;文献[13]基于计算共振分量的修正 SRSS 法,提出了用 LRC 法和考虑模态耦合系数的惯性风荷载相结合来表示大跨屋盖脉动风荷载的 ESWL,其中 LRC 法计算 ESWL 的背景分量,考虑模态耦合的惯性风荷载法计算 ESWL 的共振分量。上述方法^[10-13]与结构振动模态有关,不能完全解决复杂大跨屋盖中模态选取和模态耦合的问题。文献[14]采用与结构振动模态无关而仅与脉动风压场的协方差本征变换所得模态(CPT 模态)有关的 ESWL 计算方法,该方法更加真实地考虑了空气的动力特性。

需要指出的是,文献[14]方法用到最小二乘法求解方程,适合于结构简单、CPT 模态数较少、响应绝对值较大且响应较少的情况,但当结构复杂、CPT 模态数较少、响应数较多时,误差往往较大,得到的 ESWL 也常是近似值。为此,本文基于风场 CPT 模态补偿对文献[14]方法进行了修正,以此来研究针对多个等效目标响应的线性复杂大跨屋盖脉动风荷载的 ESWL 分量,克服了文献[14]方法的缺陷;最后将本文方法和文献[14]方法应用于一实际工程进行对比分析。

1 脉动风荷载 ESWL 计算方法

脉动风荷载的 ESWL 就是指当该值作为静力荷载作用于结构上时,它引起的结构某一响应与实际脉动风荷载作用时引起的等效目标响应是一致的。

1.1 等效目标响应

本文在求脉动风荷载的 ESWL 时所用到的脉

动等效目标响应 $\{r_o\}$ 列向量为:

$$\{r_o\} = g \cdot \{\text{sign}\{\bar{r}\}\} \cdot \{\sigma_r\} \quad (1)$$

式中: $\{\bar{r}\}$ 表示平均响应列向量; sign 表示符号算子; $\{\sigma_r\}$ 表示响应均方根列向量,本文 $\{\sigma_r\}$ 基于风洞试验的非定常风压,采用时域方法计算得到; g 表示峰值因子,本文取为 2.5。

需要说明的是,式(1)规定的不同初始等效目标响应之间是彼此独立的。

1.2 ESWL 计算方法

1.2.1 文献[14]ESWL 的计算方法

文献[14]将 ESWL 表示为 CPT 模态的线性组合:

$$\{F_{eq}\} = [\phi]\{C\} \quad (2)$$

式中: $[\phi]$ 表示脉动风压场的 CPT 模态矩阵,由风洞试验得到,其中列向量为 CPT 模态; $\{C\}$ 表示贡献系数列向量。于是,脉动等效目标响应 $\{r_o\}$ 可由下式进行求解:

$$\{r_o\} = [I_r][\phi]\{C\} = [R_0]\{C\} \quad (3)$$

式中, $[I_r]$ 表示影响函数矩阵,其中列向量为单位力引起的响应。

在式(2)、式(3)中:如果 $[R_0]$ 是可逆的, $\{C\}$ 有唯一精确解,则 $\{F_{eq}\}$ 是唯一精确值;如果未知数的个数远远大于联立方程组的个数, $\{C\}$ 的解不唯一, $\{F_{eq}\}$ 也不唯一;如果未知数的个数远远小于联立方程组的个数, $\{C\}$ 不存在精确解,但可以用最小二乘法得到其近似解,此时得到的 $\{F_{eq}\}$ 也只能是近似值。

大跨屋盖常借助风洞试验来获得建筑表面的风压时空分布特性,CPT 模态数等于试验时的独立测点数。由于设备条件的限制,独立测点数往往远小于结构有限元模型的节点数。如果脉动风压场为结构节点上的三维空间压力场,此时 $[\phi]$ 便为行数远大于列数的列满秩矩阵,再左乘一个行数不小于列数的列满秩矩阵 $[I_r]$,则 $[R_0]$ 为一个行数远大于列数的列满秩矩阵,显然属于上面的第三种情况,只能得到 $\{C\}$ 唯一的最小二乘解,当然 $\{F_{eq}\}$ 也是近似值。

1.2.2 新的 ESWL 计算方法

如前文所述,尽管文献[14]方法具有明显的优点,但对复杂结构并不适用,需要做进一步的改进。本文采用模态补偿方式来对风场的模态进行补偿,然后求解 ESWL,具体步骤如下:

1) 已知初始等效目标响应 $\{r_o\}$ 、影响函数矩阵

$[I_r]$ 和脉动风压场的 CPT 模态矩阵 $[\phi]$ ，首先按照文献[14]方法用最小二乘法对式(3)进行求解，结果记作 $\{C_1\}$ 。

2) 把 $\{C_1\}$ 回代入式(3)，求出结构响应，记作 $\{r_{o,1}\}$ 。

3) 求出等效目标响应补偿值：

$$\{r_{o,comp}\} = \{r_o\} - \{r_{o,1}\} \quad (4)$$

4) 根据式(4)和式(3)左端等式构造风场的补偿模态 $\{\phi_{comp}\}$ 和补偿贡献系数 C_{comp} ：

$$\{\phi_{comp}\} = pinv([I_r]) \cdot \{r_{o,comp}\} / C_{comp} \quad (5a)$$

$$C_{comp} = norm(pinv([I_r]) \cdot \{r_{o,comp}\}) \quad (5b)$$

式中： $pinv$ 表示求 Moore-Penrose 广义逆； $norm$ 表示求向量的模。

5) 把式(5)中得到的补偿模态 $\{\phi_{comp}\}$ 和补偿贡献系数 C_{comp} 分别加进 $[\phi]$ 和 $\{C_1\}$ ，得到总脉动风压场模态矩阵 $[\phi_t]$ 和总贡献系数列向量 $\{C_t\}$ 。

6) 新的 ESWL 为：

$$\{F_{eq,new}\} = [\phi_t]\{C_t\} \quad (6)$$

2 工程实例分析

前面介绍了 ESWL 计算方法，本节以某电厂干煤棚的大跨屋盖为工程应用背景，对本文方法和文献[14]方法进行对比分析，以验证本文方法的有效性。

2.1 工程概况及风洞试验简介

某电厂干煤棚为圆柱面双层网壳结构，纵向长度 140m，径向跨度 103m，高 40m，其风洞试验模型如图 1 所示。限于篇幅，本文只给出一些必要的试验资料，试验详细资料见文献[15]。

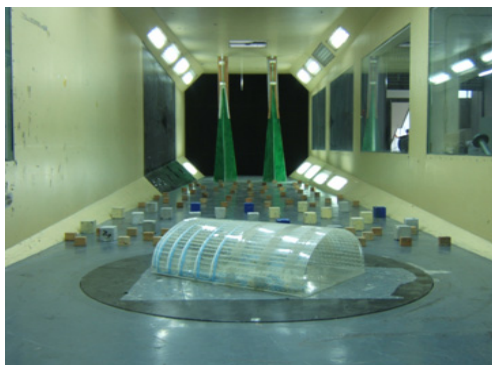


图 1 风洞试验模型(几何缩尺比 1:150)

Fig.1 model of wind tunnel experiment (1:150)

风洞测压试验的参考点选在高度为 1.0m 处，风速为 12m/s；干煤棚方位及风向角定义如图 2 所

示；结构模型风洞试验的测点共计 215 个，呈双轴对称分布，其具体布置见图 3。由于模型内外表面同时受风，每个测点位置需布置 1 对测点，每对测点包括内表面、外表面两个测压孔，以同步测量该点处内外表面的压力，而该测点最终的风荷载为外表面、内表面压力之差。

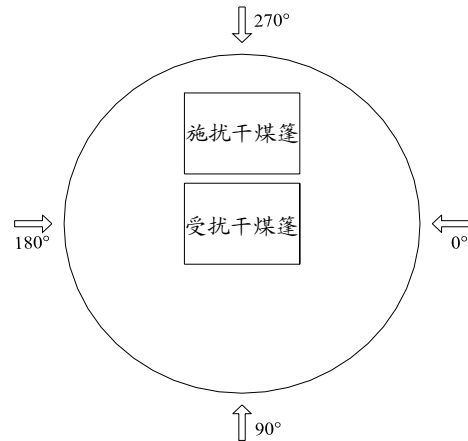


图 2 干煤棚方位及风向角

Fig.2 position and wind direction of dry coal shed

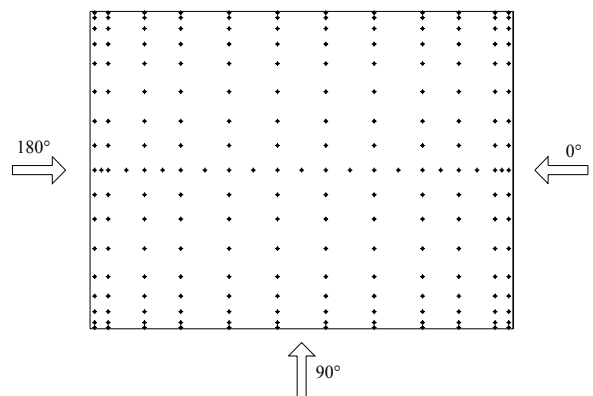


图 3 测压点布置俯视图

Fig.3 planform of pressure tapping distribution

2.2 计算分析

2.2.1 计算参数及工况的选取

用时域方法计算结构风致抖振响应的参数有：

- 1) 基本风压：基本风压(50 年重现期)为 0.80kPa；
- 2) 结构阻尼比：0.01；
- 3) 时间步长：0.1043s；
- 4) 体系为经典阻尼体系，阻尼矩阵 $[c]$ 、质量矩阵 $[M]$ 和刚度矩阵 $[K]$ 的关系为 $[c] = \alpha[M] + \beta[K]$ ，本文中 $\alpha = 0.1578$ ， $\beta = 5.1733 \times 10^{-4}$ 。本文对多个重要风向角的风振响应进行了分析，限于篇幅，只以 90° 风向角且周边无其它干扰建筑的 B 类风场的风洞试验结果对受扰干煤棚的 ESWL 进行研究。

2.2.2 等效精度的误差分析

在分析误差之前，先对相关参数的特点做一个

说明。该结构非完全约束的自由节点数为 2450 个，每个节点有 3 个自由度，因而总自由度为 7350 个，自由的二力杆单元数为 10080，该结构为多节点、多单元的复杂大跨屋盖结构。由于结构对称，由图 3 可知结构左、右边部分的风压以中轴线而完全对称，因此进行试验时，可只测量半边结果，根据对称性便得到另外一半的结果，此时独立测点数为 108，CPT 模态数也为 108 个，风荷载按三维方向作用在上述自由节点上，形成一个列满秩的 CPT 矩阵 $[\phi] \in R^{7350 \times 108}$ ；对于影响函数矩阵，节点位移为 $[I_r] \in R^{7350 \times 7350}$ ，单元轴力为 $[I_r] \in R^{10080 \times 7350}$ ，二者的秩均为 7350；对于初始等效目标响应，节点位移为 $\{r_o\} \in R^{7350 \times 1}$ ，单元轴力为 $\{r_o\} \in R^{10080 \times 1}$ 。

本文首先从风洞试验结果计算出实际结构节点上脉动风的三维风压场，并根据协方差本征变换^[16]计算出脉动风压场的 CPT 模态矩阵。同时计算出节点位移和单元轴力响应，并按照式(1)求出两种响应的初始等效目标响应。然后分别用文献[14]方法和本文方法计算节点位移响应和单元轴力响应对应的 ESWL。最后求出在两种方法的 ESWL 作用下结构的响应，并和式(1)得到的初始等效目标响应进行误差分析，以此来验证两种方法的精度。定量分析两个非零向量 $\{X\}$ 和 $\{Y\}$ 之间的误差，可从它们之间的夹角 θ 和相对误差 e 进行综合分析^[17]：

$$\theta = \arccos \left[\frac{\{X\}^T \cdot \{Y\}}{\text{norm}(\{X\}) \cdot \text{norm}(\{Y\})} \right] \quad (7a)$$

$$e = \text{norm}(\{X\} - \{Y\}) / \text{norm}(\{Y\}) \quad (7b)$$

式中： \arccos 表示求反正弦； $\{X\}$ 表示在 ESWL 作用下的响应； $\{Y\}$ 表示初始等效目标响应，本文认为是精确值。

显然， θ 和 e 越小，向量之间的误差越小，ESWL 越精确；当 θ 和 e 同时为零时， $\{X\}$ 完全等于 $\{Y\}$ ，则 ESWL 是精确的。所有节点的三维位移和所有单元轴力的误差结果见表 1。

表 1 初始等效目标响应和 ESWL 作用下的响应之间的整体误差

Table 1 Errors between original equivalent target responses and ESWL-induced responses

| 误差 | 文献[14]方法响应 | | 本文方法响应 | |
|------------------------|------------|--------|--------|--------|
| | 节点位移 | 单元轴力 | 节点位移 | 单元轴力 |
| 夹角 $\theta / (^\circ)$ | 0.3765 | 0.3833 | 0 | 0.1583 |
| 相对误差 $e / (\%)$ | 36.77 | 37.40 | 0 | 15.76 |

由表 1 可知，对于本文的等效目标响应，无论是节点位移还是杆单元轴力，本文方法误差均远小

于文献[14]方法，说明本文方法算出的 ESWL 精度更高。由前面分析可知 CPT 模态矩阵和影响函数矩阵的结构特点对于文献[14]方法来说是求不出高精度的贡献系数，因而造成了响应较大的误差，显然 ESWL 精度较低；而本文对此误差进行了一定程度的补偿，较好地克服了文献[14]方法的缺陷，算出的 ESWL 精度较高。

由表 1 还可以看出，本文方法算出的 ESWL 作用下的节点位移和相应初始等效目标响应之间没有误差，表明本文方法中基于节点位移等效所求得的 ESWL 是完全精确的，原因在于位移影响函数矩阵是一个可逆方阵，在用式(5a)构造补偿模态时可以求得精确解；而本文方法算出的 ESWL 作用下的单元轴力和相应初始等效目标响应之间存在一定的误差，反映了基于单元轴力等效算出的 ESWL 并不是精确解，原因在于轴力影响函数矩阵并不是一个可逆方阵，在用式(5a)构造补偿模态时只能求得其近似解，最终的 ESWL 也只能是一种近似结果，正如文献[18]指出：基于单元内力等效的精确的 ESWL 是不存在的。

此外，本文对上表面第 1 跨、第 6 跨、第 12 跨和第 18 跨的节点和单元(见图 4)的初始等效目标响应和两种方法的 ESWL 作用下的响应进行了对比，见图 5。

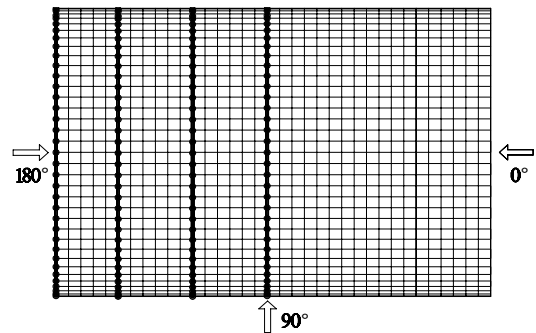
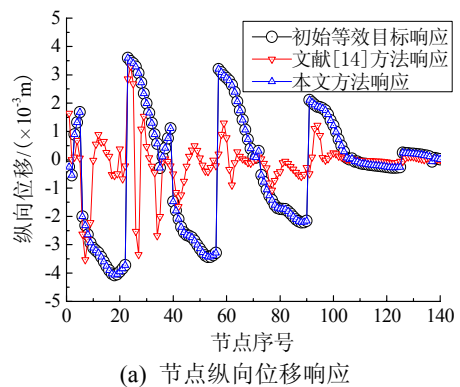


图 4 上表面第 1、6、12 和 18 跨的节点和单元
Fig.4 Nodes and elements located in 1st、6th、12th and 18th span on upper surface



(a) 节点纵向位移响应

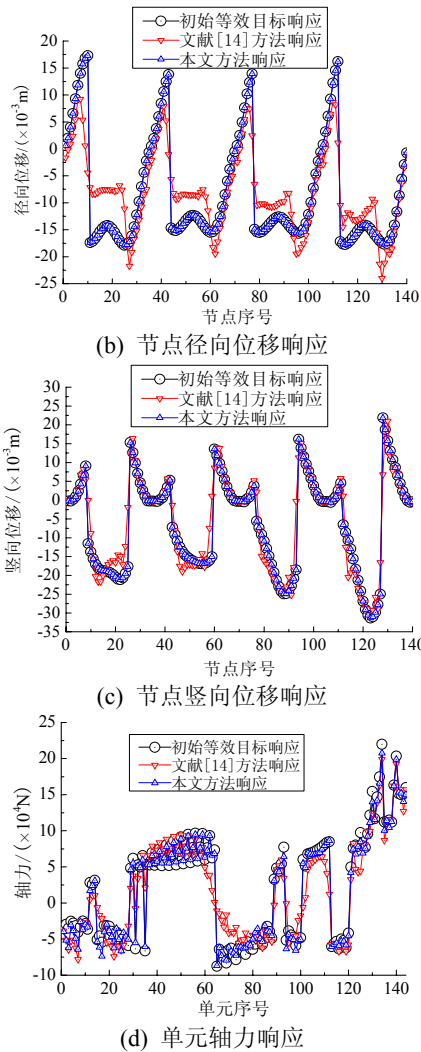


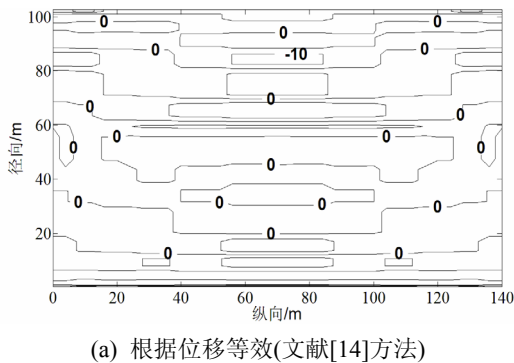
图5 上表面部分节点和单元响应对比

Fig.5 Response comparisons of partial nodes and elements on upper surface

由图5明确地看出,本文方法算出的ESWL作用下的响应和初始等效目标响应之间的差异均较文献[14]方法小,这与表1的结果是一致的,进一步说明本文方法算出的ESWL更加精确和可靠。

2.2.3 ESWL 分布分析

为了进一步对比分析,本文也给出两种方法算出的结构上表面法向ESWL等压线,见图6。图6中压力离开表面为负,指向表面为正。



(a) 根据位移等效(文献[14]方法)

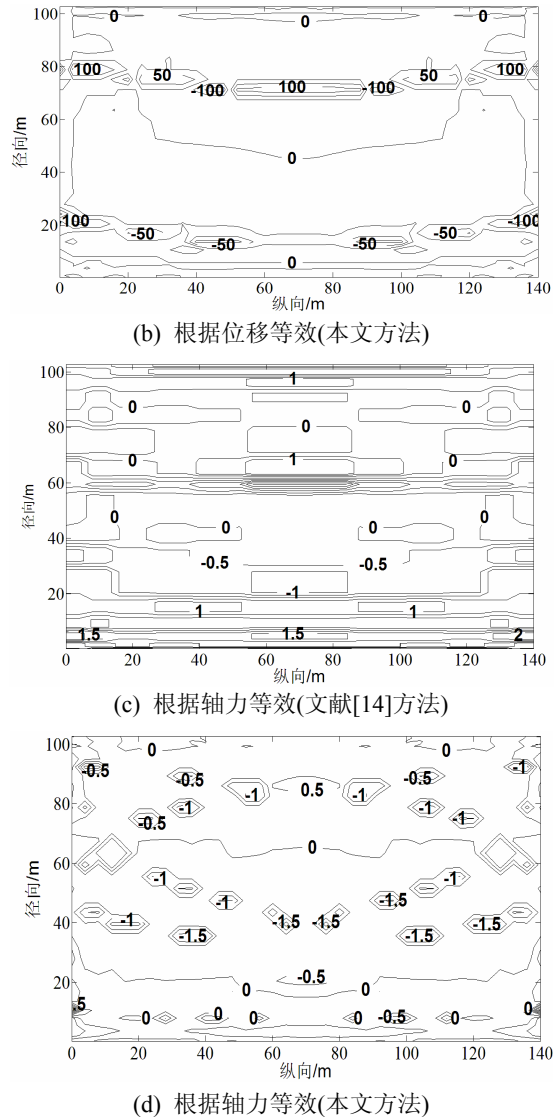


图6 90°风向角结构上表面法向ESWL等压线图 /kPa
Fig.6 Normal ESWL isobars on upper surface with 90° wind direction

由图6可知:ESWL是关于径向中轴线对称分布的,这与试验时外荷载的对称性是一致的;根据位移和根据轴力等效算出的ESWL差异是比较大的。

3 结论

本文以一实际工程为背景,在文献[14]方法的基础上,提出了一种计算复杂大跨屋盖脉动风ESWL的新方法。其核心就是进行风场模态补偿以此来克服文献[14]所带来的局限性。新方法具有物理含义明确、计算方法简单和计算精度较高的特点。此外新方法不仅适用于求解复杂大跨屋盖脉动风的ESWL,而且同样适用于求解其它线性复杂结构的脉动风荷载的ESWL。

参考文献:

- [1] Davenport A G. Gust loading factor [J]. *Journal of Structural Division*, 1967, 93(ST3): 11—34.
- [2] Uematsu Y, Yamada M, Sasaki A. Wind-induced dynamic response and resultant load estimation for a flat long-span roof [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996, 65(1-3): 155—166.
- [3] Uematsu Y, Yamada M, Karasu A. Design wind loads for structural frames of flat long-span roofs: Gust loading factor for the beams supporting roofs [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 66(1): 35—50.
- [4] Uematsu Y, Yamada M, Karasu A. Design wind loads for structural frames of flat long-span roofs: Gust loading factor for a structurally integrated type [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 66(2): 155—168.
- [5] Uematsu Y, Watanabe K, Sasaki A, Yamada M, Hongo T. Wind-induced dynamic response and resultant load estimation of a circular flat roof [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 83(1-3): 251—261.
- [6] Uematsu Y, Kuribara O, Yamada M, Sasaki A, Hongo T. Wind-induced dynamic behavior and its load estimation of a single-layer latticed dome with a long span [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(14): 1671—1687.
- [7] Lou W J, Lu F, Sun B N. Study on buffeting response for flexible roof structures [C]// Ko J M, Xu Y L. *Advances in Structural Dynamics*, Oxford, UK, 2000: 1519—1526.
- [8] Shen S Z, Yang Q S. Wind-induced response analysis and wind-resistant design of hyperbolic paraboloid cable net structures [J]. *International Journal of Space Structures*, 1999, 14(1): 57—65.
- [9] Suzuki M, Sanada S, Hayami Y, Ban S. Prediction of wind-induced response of a semi-rigid hanging roof [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 72(1-3): 357—366.
- [10] Holmes J D. Effective static load distributions in wind engineering [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(2): 91—109.
- [11] Chen B, Wu Y, Shen S Z. Equivalent static wind loads on large span roofs [C]// *Proceedings of the IASS-APCS Symposium*. Beijing, China, 2006: 358—359.
- [12] Fu J Y, Xie Z N, Li Q S. Equivalent static wind loads on long-span roof structures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(7): 1115—1128.
- [13] 顾明, 周晖毅. 大跨屋盖结构等效静力风荷载方法及应用[J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(1): 125—129.
Gu Ming, Zhou Xuanyi. Equivalent static wind loads of large-span roof structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(1): 125—129. (in Chinese)
- [14] Katsumura A, Tamura Y, Nakamura O. Universal wind load distribution simultaneously reproducing largest load effects in all subject members on large-span cantilevered roof [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(9-11): 1145—1165.
- [15] 叶孟洋. 大跨度干煤棚结构风载风洞试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
Ye Mengyang. Wind tunnel test and research on the wind load characteristics of long-span dry-coal-shed [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [16] Tamura Y, Suganuma S, Kikuchi H, Hibi K. Proper orthogonal decomposition of random wind pressure field [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1999, 13(78): 1069—1095.
- [17] Gill P E, Murray W, Wright M H. *Practical Optimization* [M]. London: Academic Press, 1981.
- [18] Wu H Y. Numerical evaluation of equivalent static wind loads of long-span roofs [DB]. *Sciencepaper Online*, 2007.