

大跨度钢网架结构屋面风压预测

周 纲

(长江大学城市建设学院,湖北 荆州 434023)

摘 要:风洞试验中,由于结构表面所布置的测点个数远远少于结构节点的个数,因而需要对未布置测点的屋架节点处的风压进行预测。本文采用本征正交分解法利用部分模态对部分测点风压进行了重组,并采用双线性插值和加权的本征正交分解法这两种方法对某海洋馆的屋面风压进行了预测,并对预测结果进行了比较和分析。

关键词:双线性插值;本征正交分解(POD);风压时程

中图分类号:TU279.7 **文献标识码:**A

大跨度屋盖结构已被越来越多地用于机场、体育馆等大型公共建筑中,风荷载也成为其主要的控制荷载。为了得到屋盖上各点的风压时程,通常采用风洞试验的同步测压来进行。但是由于风洞试验室设备的限制,一般这种同步测压的点数不会很多,这就要对未布置测压点的风压时程进行预测。文献[1~6]利用本征正交分解(POD)法对屋盖风压场进行了重组和预测,本文采用POD法利用部分模态对部分测点风压进行了重组,并采用双线性插值和加权的本征正交分解法这两种方法对某海洋馆的屋面风压进行预测,并对预测结果进行对比。

1 预测方法简介

1.1 双线性插值法

利用距插值点最近的四个点 r, s, t, o 及其上的 $P(x, y, t)$ 构造一个双线性曲面来插值,屋架节点上的风压可由式(1)计算^[7]:

$$P'(x, y, t) = \{N(x, y)\} [\alpha_e] \{P(x, y, t)\} \quad (1)$$

其中 $P(x, y, t)$ 为测点风压时程, $[\alpha_e]$ 为单元指示矩阵,全部由0和1组成的一个 $4 \times n$ 阶稀疏矩阵,只在单元节点编号所在位置的元素为1; $\{N(x, y)\}$ 插值函数:

$$\{N(x, y)\} = \frac{1}{D} \{A_r \quad A_s \quad A_t \quad A_o\}$$
$$D = \begin{vmatrix} 1 & x_r & y_r & x_r y_r \\ 1 & x_s & y_s & x_s y_s \\ 1 & x_t & y_t & x_t y_t \\ 1 & x_o & y_o & x_o y_o \end{vmatrix},$$

$$A_r = \begin{vmatrix} 1 & x & y & xy \\ 1 & x_s & y_s & x_s y_s \\ 1 & x_t & y_t & x_t y_t \\ 1 & x_o & y_o & x_o y_o \end{vmatrix},$$
$$A_s = \begin{vmatrix} 1 & x_r & y_r & x_r y_r \\ 1 & x & y & xy \\ 1 & x_t & y_t & x_t y_t \\ 1 & x_o & y_o & x_o y_o \end{vmatrix}, A_t, A_o \text{ 依此类推.}$$

1.2 本征正交分解法(POD)

结构表面坐标为 (x_i, y_i) 的测点在 t 时刻的风压为 $P(x_i, y_i, t)$,于是可以得到屋盖表面上所有测点的风压协方差矩阵 R :

$$R_{i,j} = \overline{P(x_i, y_i, t) P(x_j, y_j, t)}$$
$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T P(x_i, y_i, t) P(x_j, y_j, t) dt$$

考虑到测点的不均匀性, R 的本征值问题可以表示如下:

$$[R][A]\{\phi\}_k = \lambda_k \{\phi\}_k$$

$\lambda_k, \{\phi\}_k$ 为对应的加权脉动风压的协方差的特征值和特征向量, $k=1, 2, \dots, n$,为测点数, A 为对应测点的流域面积, $A(x_i, y_i) = \Delta x_i \Delta y_i$,对于不均匀测点的复杂屋面,用泰森多边形法(Thiessen Polygon)可以求得^[8].

为了保证加权后的协方差有实本征值和下本征向量,就要保证它为Hermitian矩阵,即对称阵,于是对协方差进行合同变换,使其成为对称阵:

$$[R']\{\phi\}'_k = \lambda'_k \{\phi\}'_k$$
$$[R'] = ([A]^{1/2})^T [R] ([A]^{1/2})$$

由合同变换的性质可知, \mathbf{R}' 与 \mathbf{R} 具有相同的特征值, 即 $\lambda_k = \lambda'_k$, 相应地,

$$\{\boldsymbol{\phi}\}_k = [\mathbf{A}]^{1/2} \{\boldsymbol{\phi}'\}_k$$

随机风压函数 $P(x_i, y_i, t)$ 可以表示为

$$P(x_i, y_i, t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \phi_i(x_i, y_i)$$

由于本征模态的正交性, $a_i(t)$ 可由式(2)确定.

$$a(t) = \frac{\sum_{i=1}^n P(x_i, y_i, t) \phi_i(x_i, y_i) A_i}{\sum_{i=1}^n \phi_i^T \phi_i A_i} \quad (2)$$

特征值 λ_k 是每个特征向量对脉动风压的方差贡献的度量, 可用如下的方法规格化:

$$E_k = \lambda_k / \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

根据规格化的 E_k , 可仅保留前少数特征向量 (假设为 m 阶) 就能对每一时刻的脉动风压值作较为精确的近似. 那么 t 时刻某测点脉动风压向量可以表示为:

$$\{\mathbf{P}\} = \{\boldsymbol{\phi}\}_{n \times m} \{\mathbf{a}\}_{m \times 1}$$

屋盖节点上的特征模态向量 $(\bar{\boldsymbol{\phi}}_k)_{N \times m}$ 可用测点坐标内插或外推得到, N 为屋盖受风节点总数. 屋盖节点 t 时刻脉动风压向量为

$$\{\bar{\mathbf{P}}\} = \{\bar{\boldsymbol{\phi}}\}_{n \times m} \{\mathbf{a}\}_{m \times 1}$$

2 数值计算

2.1 风洞试验概况

该风洞主试验段截面宽 3 m, 长 20 m, 为闭合的回流式风洞. 海洋馆是平面投影为矩形的曲面屋盖结构, 两个方向的长度为 148 m 与 105 m, 屋面中间布有锯齿条形采光天窗. 模型的几何缩尺比例为 1:150. 图 1 为海洋馆的风洞试验测点布置图, 采样点数为 20 480, 采样频率为 312.5 Hz. 风向角以 15 度为间隔, 共 24 个风向角. 测点总数 113 个, 不均匀布置, 其中矩形周边两列为屋盖四周测点, 其余测点为天窗测点. 本文以 0 度风向角为例, 将整个屋盖分为四周和天窗两个部分来处理.

用加权 POD 法预测结构表面风压场, 每个本征模态所含的荷载信息量经过规格化处理见图 2.

当风荷载本征模态取前 80 阶时, 所含荷载信息量已达到 91%, 因此作用在结构上的脉动风压可用前 80 阶本征模态来模拟.

2.2 屋盖部分测点风压重组

图 3~6 为部分测点的原始风压 (wind tunnel) 与采用前 80 阶模态的 POD 重组后的风压比较

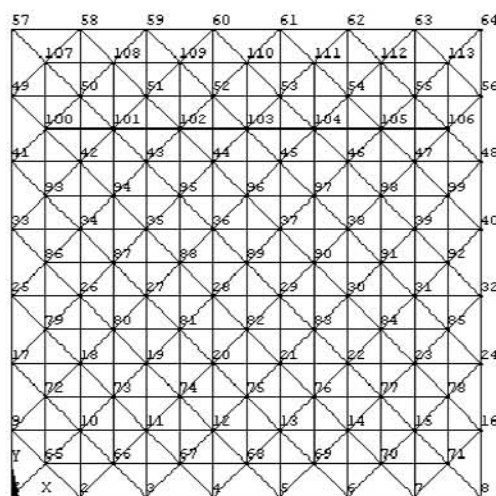


图 1 屋盖测压点布置

Fig. 1 Distribution of load cells on the rooftop

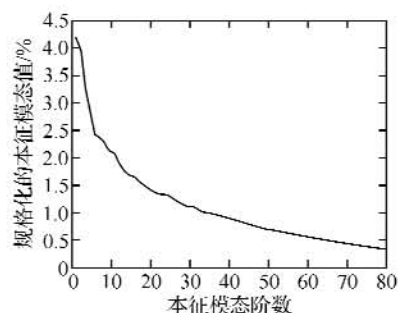


图 2 规格化的脉动风压本征模态特征值

Fig. 2 Characteristic number of normalized pulsatory wind pressure mode

图, 其中测点 1、24 为屋盖四周测点, 测点 89 为锯齿天窗尖上测点, 29 号测点为锯齿沟测点. 通过比较可知, 测点 1、24 的重组风压与原始风压吻合较好, 除了部分峰值没有模拟到之外; 测点 89、29 的重组风压比原始风压 (绝对值) 整体偏小约 0.003 kPa, 原因在于天窗呈锯齿状, 此处风场受气流的分离及绕流的影响, 脉动风压的空间相关性大为减弱, 波动较大, 需要用更多阶的模态来模拟.

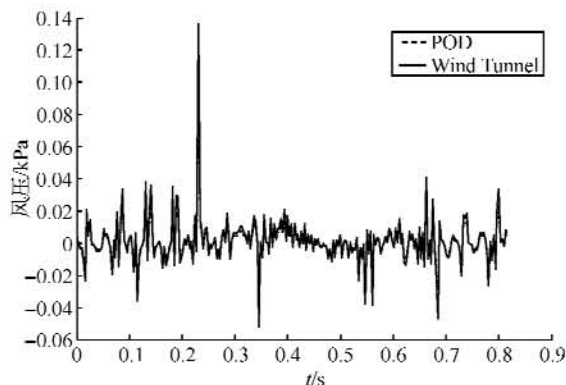


图 3 测点 1

Fig. 3 Load cell 1

2.3 屋盖部分节点风压预测

图7~10为屋盖部分节点分别利用直接插值(griddata,简称方法1)和采用前80阶模态的本征正交模态法(POD,简称方法2)预测得到的风压时程比较图。通过比较可知,节点1和节点1493两种方法预测的风压相比,方法1得到的风压部分峰值比方法2得到的峰值大,而节点465和1493除了上述特征外,同时方法2得到的风压时程比方法1得到的时程整体偏小约0.003 kPa,误差原因同前。而通过与预测节点附近的测点的原始风压相比,利用方法1得到的风压时程更为合理。

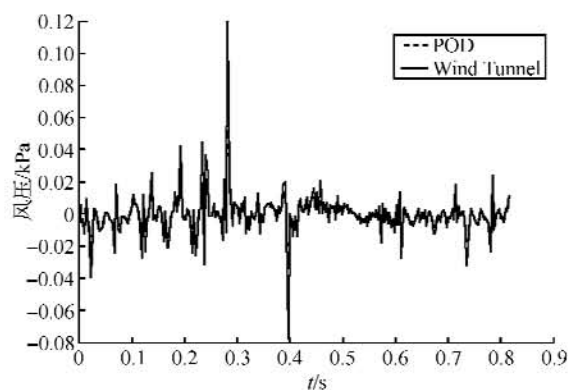


图4 测点24
Fig. 4 Load cell 24

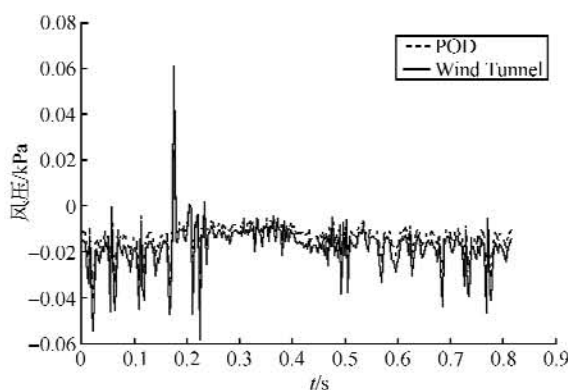


图5 测点89
Fig. 5 Load cell 89

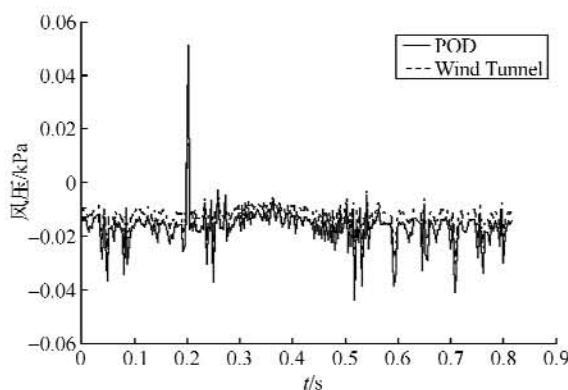


图6 测点29
Fig. 6 Load cell 29

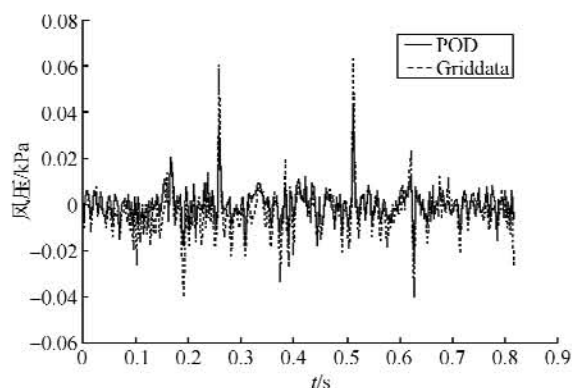


图7 节点1
Fig. 7 Node 1

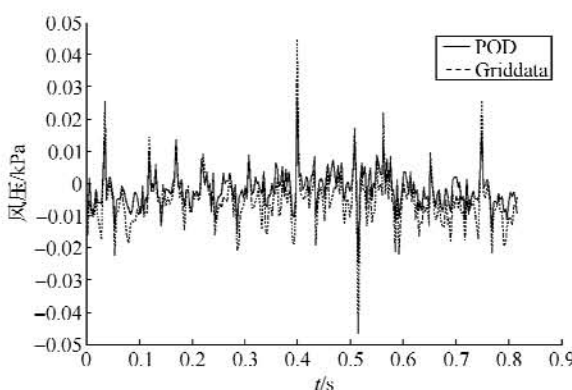


图8 节点1493
Fig. 8 Node 1493

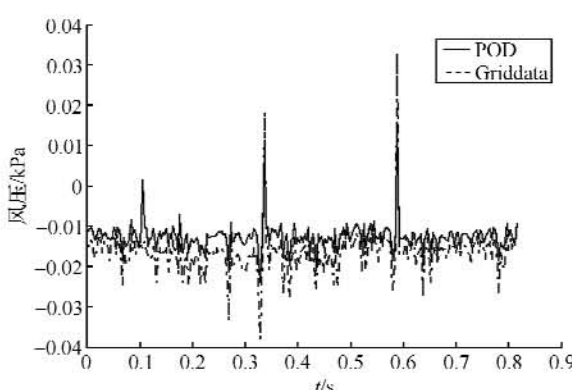


图9 节点465
Fig. 9 Node 465

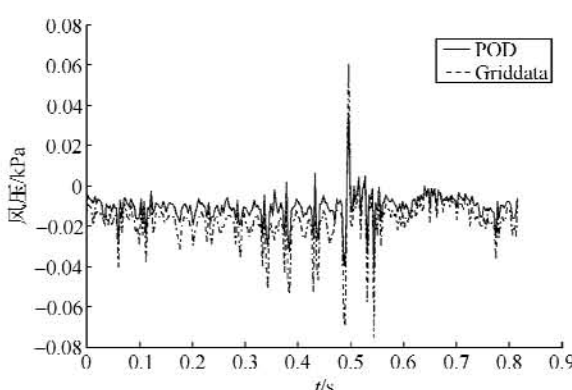


图10 节点2382
Fig. 10 Node 2382

从以上的分析和对比中不难看出,预测精度不仅跟测(节)点的位置有关,位置不同,测得精度不同.还跟所采用的方法有关,对于 POD 法和双线性插值法,后者具有更高的精度.本方所采用的插值方法只是众多方法中的一种,各种方法的精度也不一样^[5,9].

3 结 语

本文所采用的双线性插值法与 POD 法并无实质差别,即同样是利用插值原理,前者直接按坐标对风压进行二维线性插值,后者按坐标对本征模态进行二维线性插值.相对于双线性插值法,POD 法的优点是:在预测风压时节省机时^[5,9],在计算风振响应时具有缩阶功效^[9].但是从以上的分析可知,采用部分阶模态的 POD 法会遗漏多点风压的峰值,文献[6]也得到了同样的结论,对于复杂结构而言可能会使结构偏于危险,而现在飞速发展的计算机技术,计算时间在将来已不再是首要考虑的问题.而且线性插值法简单易行,在商业软件包 Matlab 中有现成的命令可以直接采用,而且有多种插值方法可供选择.因此,采用何种方法进行预测,应根据具体的分析目标来选择,在现有的计算机计算速度下,如果结构形式简单,采用双线性插值会得到比较精确的结果,但如果结构较复杂,需要计算风振响应时,则应用 POD 法会使计算量和计算时间大为减少,但同时会让结构偏于危险.

参考文献:

- [1] Jeong S H, Bienkiewicz B, Ham J H. Proper Orthogonal Decomposition of building wind pressure specified at non-uniformly distributed pressure Taps [J]. Wind Eng Ind Aerodyn, 2000, 87, 1: 14.
- [2] Tarnura Y, Ueda H, Kikuchi H, et al. Orthogonal decomposition study of approach wind-building pressure correlation [C]. Proceedings of the Ninth International Conference on Wind Engineering, 1995: 2115-2126.
- [3] Tamura Y, Suganuma S. Proper orthogonal decomposition of random pressure field [J]. Journal of Fluids and Structures, 1999, 13: 1069-1095.
- [4] 夏法宝,梁枢果,郭必武,等.武汉国际证券大厦表面风压重组的 POD 法[J].华中科技大学学报(城市科学版), 2005, 22(2): 90-94.
- [5] 周福,倪振华,谢壮宁.利用 POD 技术对双坡屋面进行风压场预测[J].力学季刊, 2005, 26(2): 248-256.
- [6] 张相庭.工程结构风荷载理论和抗风计算手册[M].上海:同济大学出版社, 1990.
- [7] 万艳玲,朱从乔.插值算法在模糊控制中的应用与仿真研究[J].计算机仿真, 2006, (4): 151-153.
- [8] 余吉仁,靳立亚,彭友兵,等.一种求解区域平均值的权重面积设计及其应用[J].气象, 2006, (4): 52-55.
- [9] 江梓荣. POD 技术以及在屋盖风压场中的应用[D].汕头:汕头大学, 2006.

Prediction of wind pressure on the roof of one large span truss structure

ZHOU Gang

(School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: In the wind tunnel test, the pressure tap is much less than the nodes that does not distribute taps, so it is necessary to predict the wind pressure of the nodes. In this paper, we use POD to rebuild the wind pressure field and also use bilinear interpolation and proper orthogonal decomposition to predict the wind pressure of the roof of one Athletics Centre. In the end, we discussed and compared the results of the two methods.

Key words: bilinear interpolation; proper orthogonal decomposition; wind pressure time series

本文编辑:萧 宁