

泰山顶部近地层风的方差与谱分析*

王秀梅¹⁾ 王海英²⁾ 冯磊²⁾ 丁善文³⁾ 赵勇³⁾

¹⁾ (山东建筑工程学院, 济南 250014)

²⁾ (山东省科学院, 济南 250014)

³⁾ (山东省泰山气象站, 泰安 271000)

摘 要

风在速度与方向上的不稳定性可引发结构振动并可导致损坏。山顶风较少受局地作用影响, 流场较稳定, 作为典型风况对山顶风湍流脉动情形进行的观测和分析, 对于研究建筑结构风载振动情形有着重要意义。在不同风况下对泰山气象站近地层风的风速和风向进行了同时逐秒测记, 所得样本经检验符合正态分布。计算表明, 风向样本方差显著大于风速样本方差。绘制了各风速、风向样本自互谱密度曲线图。谱图显示诸样本具有红噪声序列特征, 不同样本自互谱密度曲线具有相近形状, 而以风速自谱曲线吻合程度最好, 谱密度曲线在周期为4秒及2秒处有峰值。此后的研究应结合记录仪器的改进增加采样频率, 对周期为2秒以下谱曲线作进一步分析。

关键词: 山顶风 风工程 风湍流 方差与谱分析

引 言

自然风的湍流分量在结构中产生动载, 引起各种形式的振动。如风速变化可引起结构的弯曲振动, 风向变化可引致某些结构的扭转振动, 它们的共同作用可引起结构的弯扭联合振动等。当湍流脉动频率接近结构自振频率时会很危险^[1, 2]。包括塔架等高耸结构在内的建筑结构自振周期较小, 其第一自振频率常只在秒的数量级(轻型结构可不足一秒), 因此应注意观测研究风湍流高频端脉动的情形。目前此类资料较少, 尚未见到关于湍流风向脉动规律的观测与研究资料。由于建筑结构振动分析的需要, 本文在这方面进行了一定的工作。

1 观测设计

(1) 测点选取 文献[3]曾比较了滨海、高山及城郊等不同地貌测点近地层风的湍流情形。该文显示滨海开阔地风的湍流分量较小, 城郊测点由于受到周围地形地物影响乱流较多, 风的流动较无规律, 显然这两种情形都不宜作为风载分析的典型风况。该文同时显示山顶(泰山顶部)风由于较少受到局地作用影响, 流场比较稳定, 风力也较大, 选取此

* 本项目得到山东省教委科研基金(J01E04)资助。

2002-07-24 收到, 2003-01-17 收到修改稿。

种风况作为结构风载分析的典型风况是适宜的。因此本工作以泰山气象站作为进行观测的地点。泰山主峰玉皇顶位于 36.16°N 、 117.6°E ，海拔高度 1545 m。泰山气象站处于山顶东部开阔地，其观测场海拔高度 1533.7 m，风传感器架设高度 22.2 m。

(2) 采样方式 根据 Shannon 采样定理，样本信息的稳定输出频率只能达到输入(采样)频率的一半，即是说采样频率应当大于目的频率的二倍。按照本文目的，由于建筑结构的自振周期最低可在 0.5 秒左右，因此采集风样本的时间间隔应当小于 0.25 秒，即采样频率应当大于每秒 4 次。在这方面的困难是，目前应用的各型风记录仪由于是为采集常规气象数据设计的，其最小采样间隔时间为一秒，且此一秒数据只是作为 10 分钟(2 分钟)平均值累积的基础数据，不能单独存储、打印或输出。山东省科学院能源研究所研制生产的 EN 型及 EN-2 型风记录仪具有 1 秒钟风速风向数据液晶屏显示功能(可连续显示 1 分钟)，我们利用这种功能，由泰山气象站观测员采用目测手记方法对所需的样本进行记录。记录是对风速、风向同时进行的，每分钟记录数据为 120 个。

2 风速风向观测值及其数据检验与方差分析

采用气象站的 EL 型风速风向传感器及 EN 型测风数据处理仪，于 2001 年 11 月至 2002 年 3 月记录了不同风速、风向下风的逐秒变化。共记录了 53 个大风及强风个例的

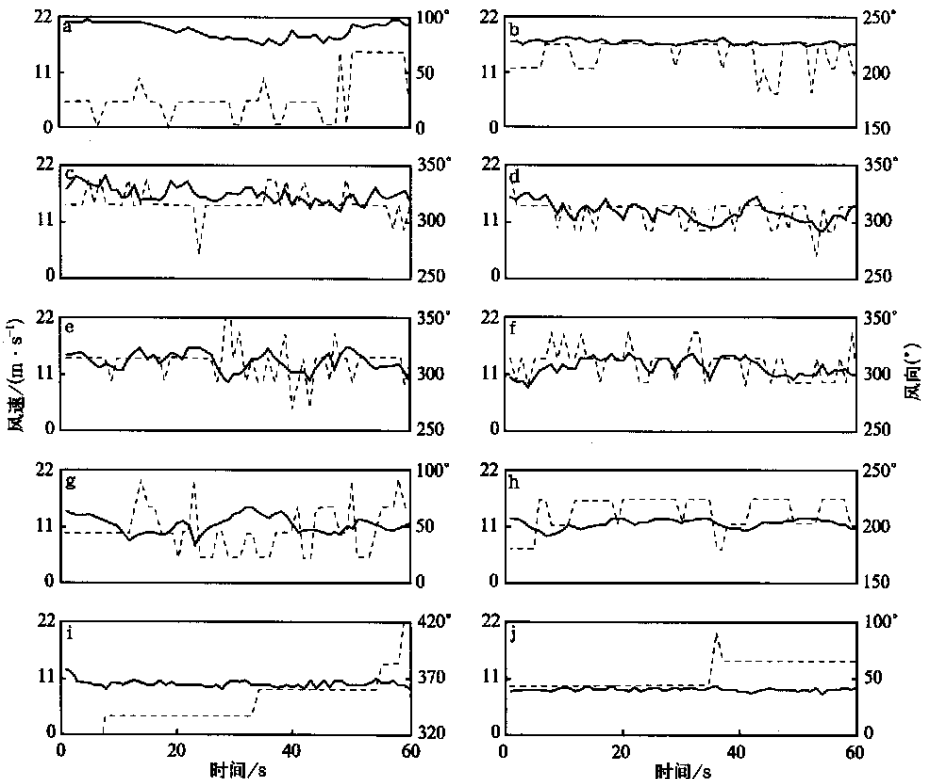


图 1 风速风向数据图示(实线:风速;虚线:风向)

样本数据,部分数据示于图 1。图中诸图左侧纵坐标为风速($m \cdot s^{-1}$),右侧纵坐标为风向($^{\circ}$),横坐标为时间(s),实曲线为风速测值连线,点曲线为风向测值连线。由于 EL 风向仪按 16 方位指示,因此风向角度间隔为 22.5° 。i 图风向实际为 320° 、 10° 及 60° 。

文献[4]认为一般气象要素的原始时间序列皆能较好地符合正态分布。文献[5、6]在研究不同地点近地层的风谱特性时,都是将样本按正态分布对待的。我们应用概率图对风速、风向样本的正态性进行了检验,结果示于图 2(即图 1 中 a 组风速、b 组风向及 d 组风速、风向概率图)。由图可见各组数据的概率拟合线为直线,表明其符合正态分布。

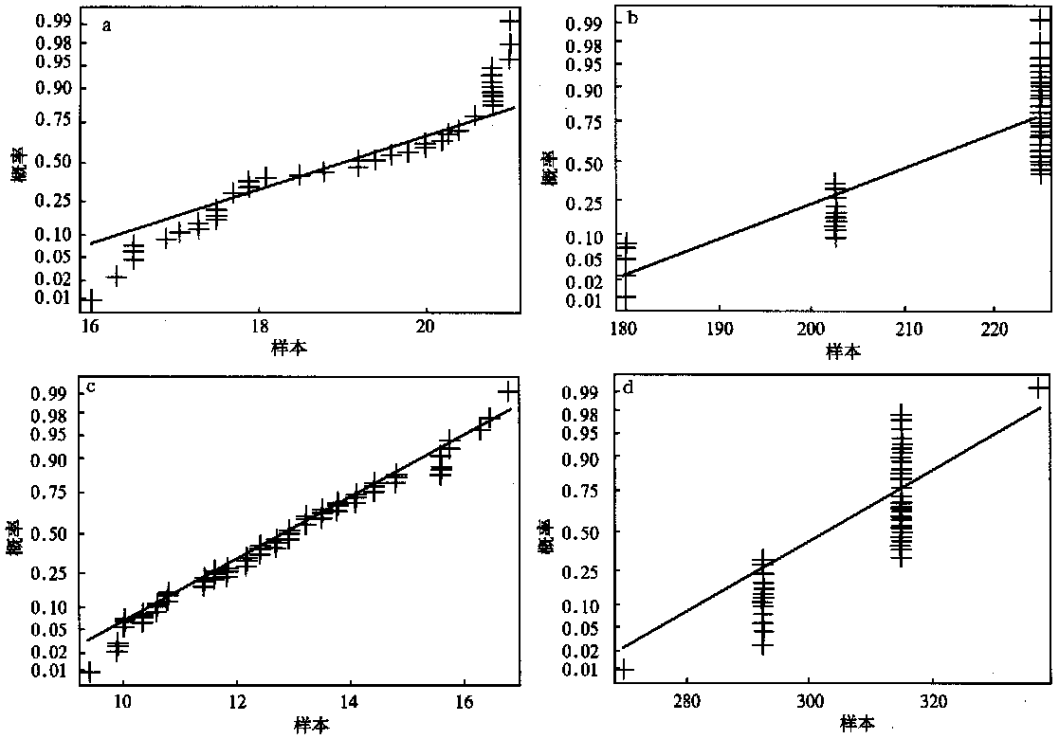


图 2 样本数据正态性检验

(a) 图 1 中 a 组的风速,(b) 图 1 中 b 组风向,(c) 图 1 中 d 组的风速,(d) 图 1 中 d 组的风向

严格地说,大气运动是非平稳随机过程。以加法型大气系统为例可有下式^[7]

$$Y_t = X_t + P_t + H_t$$

式中 Y_t 为目标系统参量, X_t 为平稳随机分量, P_t 为日、月、年的周期循环分量, H_t 为气候趋势分量,可见是在基底平稳分量上叠加了非平稳分量。由于本文只是研究风湍流的高频振动特性,这是一种短时间、微尺度的大气过程,在此期间非平稳因素的作用小,因此将其视为一种平稳随机过程并无不可。

一般认为正态分布的平稳随机过程具有时间上的各态历经性,即可用对过程的试验得到的样本函数 $x_n(t)$ ($n=0, 1, \dots, N-1$) 去表征过程 $X(t)$;以样本的均值与方差代表过程的均值与方差。表 1 为图 1 各组数据的均值与方差值。由表可见各组风向数据的方差大于风速数据方差,但均值与方差间的对应关系并不明显。

表1 样本的均值与方差

样本	风速		风向	
	μ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	σ^2	μ ($^\circ$)	σ^2
A	19.06	2.40	26.8(北北东)	477.4
B	16.85	0.17	215.3(西南)	212.2
C	16.32	2.23	316.9(西北)	128.1
D	13.05	3.34	307.9(西北)	145.7
E	13.41	3.03	311.3(西北)	208.8
F	12.54	2.84	310.5(西北)	202.5
G	11.28	2.86	47.3(东北)	372.4
H	11.60	0.81	213.4(南南西)	248.7
I	9.97	0.41	348.8(北)	523.4
J	8.97	0.10	54.8(东北)	143.6

3 样本的谱分析

对于作用在结构上的风过程谱密度函数的了解,是应用频域和时域方法对结构进行风载振动分析的前提。由对过程各态历经性的分析可知,当所采集的样本有足够数目时,可以用对样本谱密度函数的估计表征过程的谱密度函数。

对谱密度函数的计算采用了周期图法,并对数据进行了分段处理及 HANHING 平滑。各组风速、风向样本谱密度函数的计算结果示于图3。图中上部三图为样本a的谱

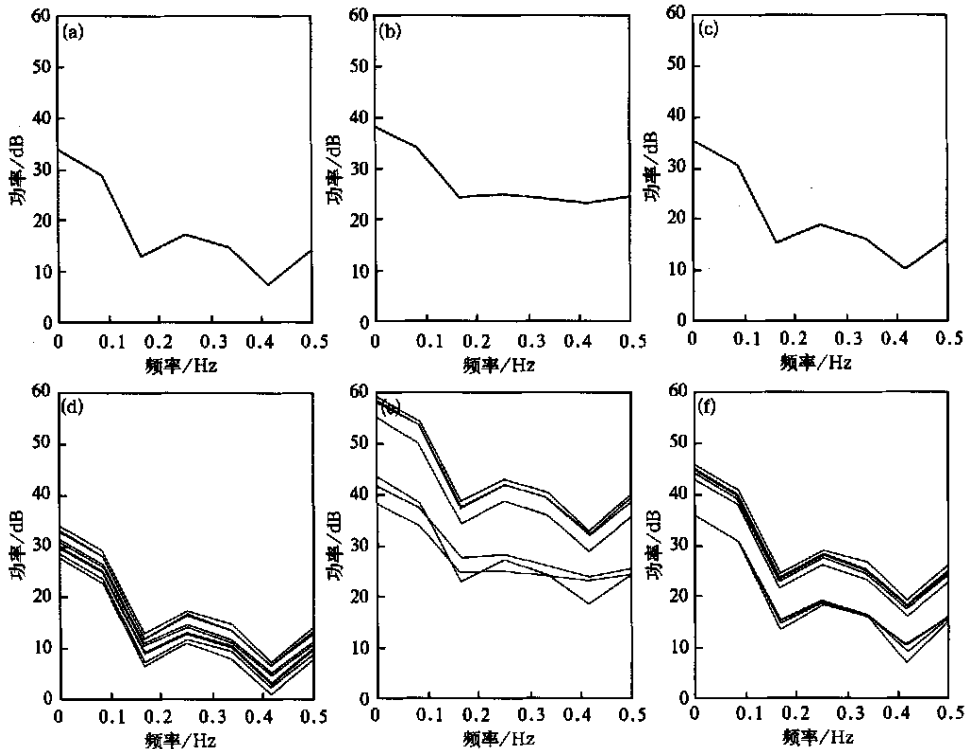


图3 风速、风向样本谱密度曲线

密度曲线,即风速自谱曲线 $P_{xx} F_{Sa}$ 、风向自谱曲线 $P_{xx} F_{Xa}$ 及风速-风向互谱曲线 $P_{xy} F_{Sa-FXa}$;下部三图为 a 至 j 各组样本相应谱密度曲线的叠加。图中纵坐标为功率(dB),横坐标为频率(Hz)。对图分析可知以下几点。

(1) 谱线形状 可以看出图中各谱线有相近形状,这种形状具有典型的红噪声序列特征^[4],其中以风速自谱曲线吻合程度最好。

(2) 峰值频率 各谱线除 0 频率外,约在频率为 0.25 及 0.5 Hz 处有峰值,相对应的周期为 4 及 2 s,约在频率为 0.15 及 0.40 Hz 处有谷值。对照其它文献给出的谱曲线可知^[5-8],在频率为 0.25 Hz 以下的低频段还有其它峰值,这一点在本图中显示得不明显,这可能与此图对低频段分辨率较低有关。由于本文主要关注湍流高频段的情形,对此可不作分析。

(3) 右端趋向 正如采样定理所指出,由于受采样频率的制约(每秒 1 次),图 3 各曲线其高端的截止频率为 0.5 Hz。由于大于 0.5 Hz 的频率区与多数轻型结构自振频率吻合,因此在以后的研究中应增加采样密度,获得 2 s 以下周期的谱曲线。

4 结论与讨论

(1) 根据结构风载振动分析的需要及现有测风数据处理仪器的可能,我们对流经泰山气象站的近地层风进行了逐秒的观测和记录,为了测定湍流风向脉动规律及风速与风向脉动之间的关系,测记是对风速和风向同时进行的。

(2) 应用概率图对所记样本的正态性进行了检验,表明逐秒取样的风速和风向样本符合正态分布。由于高频湍流属微尺度大气现象,因此可视为一种平稳随机过程。根据正态分布平稳随机过程各态历经性特点,可用样本的均值与方差来表征过程的均值与方差。计算表明各组风向样本方差显著大于风速样本方差,但其均值与方差之间的对应关系并不明显。

(3) 绘制了风速、风向样本的自、互谱密度图。谱图显示诸样本具有红噪声序列特征,不同样本自、互谱密度曲线有相近形状,而以风速自谱曲线吻合程度最好。谱密度曲线在周期为 4 及 2 秒处有峰值。

(4) 在以后的工作中,拟结合记录仪器的改进增加采样密度(拟达每秒 4 次的采样频率),以对周期为 2 秒以下的谱曲线作进一步分析。

参 考 文 献

- 1 吕升亮,王兴荣,陈晓平,等.亳州市电视铁塔倒塌事故的气象原因.气象,2001,27(2):52~54.
- 2 马人乐等.三角形螺栓球节点钢管塔倒塌事故调查研究.建筑结构学报,1998,19(1):11~14.
- 3 王秀梅,王德明,靳琳,等.不同地貌上风速风向逐秒变化的观测.气象,2002,28(8):54~56.
- 4 黄嘉佑,李黄.气象中的谱分析.北京:气象出版社,1984.
- 5 骆箭原,朱瑞兆.北京八达岭地区近地层风谱特性.太阳能学报,1993,14(4):279~287.
- 6 陈长河,黄建国,程麟生,等.复杂地形上大气边界层和大气扩散的研究.北京:气象出版社,1993.
- 7 丁裕国,江志红.气象数据时间序列信号处理.北京:气象出版社,1998.

8 Davenport A G. The relationship of wind structure to wind loading. W.E.B.E., 1963.

ANALYSIS OF VARIANCE AND SPECTRUM FOR WIND IN SURFACE LAYER ON SUMMIT OF TAI MOUNTAIN

Wang Xiu mei¹⁾ Wang Haiying²⁾ Feng Lei²⁾ Ding Shanwen³⁾ Zhao Yong³⁾

¹⁾ (Shandong Institute of Architecture and Engineering, Jinan 250014)

²⁾ (Shandong Academy of Science, Jinan 250014)

³⁾ (Tai Mountain Weather Station, Shandong Province 271000)

Abstract

The instability of wind in speed and direction can lead to vibration in the structure and can cause their damage. Wind over the summit of mountain affects less by locate landform and its flow pattern is the stability. As wind models, there is an important meaning for research the vibration by wind load on the building construction to the observation and analyses for wind turbulence over the summit of mountain. The changes of wind speed and direction under the various winds flowing through the Tai mountain Weather Station are observed simultaneously per second. The observed samples are tested and of the normal distribution. A statistical analysis shows that the sample variance of wind direction is obviously more than the sample variance of wind speed. The curve diagrams of own and mutual spectral density of each sample of wind speed and direction are given. The spectrum diagrams show that the samples have the characteristic of red noise sequence, the curves of own and mutual spectral density of different sample have a similar shape, but the own spectral curve of wind speed fits best. There are two peak values in the spectral density curve at the period of 4 and 2 second.

Key words: Wind over the summit of mountain Wind engineering Variance and spectral analysis Wind turbulence