

文章编号: 1673-2049(2009)01-0037-06

## 风场长期观测与数据分析

阎 启<sup>1</sup>, 谢 强<sup>1,2</sup>, 李 杰<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 为了进行风场现场实测研究, 对 1 组风速采集设备的风场长期观测结果进行了分析。基于现场实测数据, 得到了 10 m 和 20 m 高度处 10 min 平均风速年最大值的 wind 玫瑰图; 选取了总时长达 75 h 的 18 组大风记录, 计算了湍流强度、风剖面参数、剪切波速; 拟合了风速谱并与 Von Karman 谱、欧洲规范谱进行了比较; 统计了主风方向湍流积分尺度; 对风场的垂直相关性进行了分析。结果表明: 实测湍流强度较经验值略大; 风剖面参数的离散性大, 而且均值与荷载规范取值存在一定差异; 实测大风记录拟合风速谱与 Von Karman 谱和欧洲规范谱吻合良好。

**关键词:** 风场; 长期观测; 数据分析; 风玫瑰图; 湍流结构; 风速谱; 剪切波速

中图分类号: TU973.32 文献标志码: A

## Long-term Observation and Data Analysis of Wind Field

YAN Qi<sup>1</sup>, XIE Qiang<sup>1,2</sup>, LI Jie<sup>1,2</sup>

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to study natural wind property, long-term observation results of wind field were analyzed. Based on the site observation, wind rose plots of annual maximum 10 min mean wind velocity at 10 m and 20 m were given. 18 series of record of strong wind (75 hours totally) were selected to calculate turbulence intensity, wind velocity profile parameters and shear wave velocity. Wind velocity spectrum was calculated and compared with Von Karman spectrum and Eurocode spectrum. The statistics of turbulence integral scale in primary wind direction was obtained and vertical correlation of wind field was analyzed. The results show that the measured turbulence intensity is a little higher than empirical value. Wind velocity profile parameters are scattered and the mean values differ from values recommended by load code. The measured wind velocity spectrum matches well with Von Karman spectrum and Eurocode spectrum.

**Key words:** wind field; long-term observation; data analysis; wind rose plot; structure of turbulence; wind velocity spectrum; shear wave velocity

## 0 引言

风荷载在高耸结构、输电线路、大跨桥梁的设计中起着控制性的作用。通过多年的观测, 可以给出

一个地区对应于不同重现期的极值风速作为设计风速的参考。事实上, 风对结构的作用是一种复杂的动力作用, 其动力作用强弱程度除了与风速大小有关外, 还与风的湍流结构密切相关。因此, 必须通过

收稿日期: 2009-01-06

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(50621062); 国家自然科学基金项目(50778135);

国家自然科学基金项目(50508026)

作者简介: 阎 启(1982-), 男, 甘肃兰州人, 工学博士研究生, E-mail: sevenyan\_tj@hotmail.com。

现场脉动风观测来了解风的特性,为进一步的风场建模以及风对结构的作用分析打下坚实基础。

1968 年美国空军剑桥研究实验室 (AFCRL) 在 Kansas 进行试验并得到一系列风速和温度的实测数据,为了解平坦地面近地层湍流的结构提供了坚实的基础<sup>[1]</sup>,Kaimal 等应用 Kansas 试验的数据给出了不同稳定度条件下脉动风速和脉动温度的谱的形式<sup>[2]</sup>,还有很多学者进行了风场的湍流结构的研究。Morfiadakis 等对复杂地形并且有风机影响的风场进行了观测,认为 Von Karman 谱在无风机尾流影响的条件下与实测结果吻合得很好,而在受到强烈的地形和尾流影响时是不足以描述风结构的<sup>[3]</sup>。Shiau 等对中国台湾基隆港附近的风特性进行了研究,得到了关于湍流强度、风速概率分布、剪切波度、风速谱的一系列测量结果,并且其垂直湍流强度与主风向湍流强度的比值为 0.45,与经验值 0.5 非常接近;在风速谱拟合方面,认为 Von Karman 谱和欧洲规范谱都可以很好地描述风的湍流结构<sup>[4]</sup>。Li 等在中国黄土高原上对中性大气边界层的风场进行了观测,得到了 3 个方向的谱的形式<sup>[5]</sup>。胡晓红等根据上海地区 2000 年 8 月“派比安”台风的实测结果,对水平和垂直 2 个方向的脉动风速谱拟合进行了探讨<sup>[6]</sup>。在中国,值得一提的是在北京的中国科学院的 325 m 气象塔,依靠该塔的高度优势及先进的数据采集设备,研究人员给出了一批有价值的观测结果<sup>[7-8]</sup>。

本文中通过对风场长期观测所得数据的计算和分析,给出了一些湍流结构参数的取值。

### 1 风速仪的安装

本文中选取的风场观测地点位于华东某地。观测位置周围为农田,有零星树木和房屋,符合中国《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001,以下简称规范)中的 B 类地貌。风速采集设备由 4 台风速仪和辅助设备组成。4 台风速仪包括 2 台三维超声风速仪 Young81000(量程为 0~40 m·s<sup>-1</sup>,精度为 ±0.03 m·s<sup>-1</sup>),1 台机械式水平风速仪 05103,1 台机械式垂直风速仪 27106。其中,10 m 高度处安装了 1 台三维超声风速仪和 1 台机械式水平风速仪,20 m 高度处安装了 1 台三维超声风速仪和 1 台机械式垂直风速仪(图 1)。2 台三维超声风速仪安装在同一个竖直面。

对各个风速仪采集的风速数据进行了初步验证,结果显示仪器的运行状况良好,采集的数据真实



(a) 10 m 高度处

(b) 20 m 高度处

图 1 风速仪的安装

Fig. 1 Installations of Anemometers

可信,可以根据此数据做进一步的分析。

## 2 各风向年最大风速风玫瑰图

### 2.1 平均风速和风向的计算

从风速采集设备中得到的数据分别为南北方向的风速时程  $u_x$ 、东西方向的风速时程  $u_y$  和垂直方向的风速时程  $u_z$ 。求平均风速和风向时不考虑垂直风。求 10 min 平均风速时,首先计算南北方向、东西方向的风速时程的平均值  $\bar{u}_x$  和  $\bar{u}_y$ ,之后根据式(1)求得平均风速  $U$ ,即

$$U = \sqrt{\bar{u}_x^2 + \bar{u}_y^2} \tag{1}$$

对于平均风速的主风向角,首先设正北风向角为 0°,正东风向角为 90°。在这样的坐标系下,主风向角  $\Phi$  可由式(2)获得,即

$$\Phi = \begin{cases} \arccos \frac{\bar{u}_x}{U} & \bar{u}_y > 0 \\ 360^\circ - \arccos \frac{\bar{u}_x}{U} & \bar{u}_y < 0 \end{cases} \tag{2}$$

### 2.2 最大风速风玫瑰图

风速采集设备从 2006 年 7 月中旬开始投入运行。本文中对设备运行后 1 年内的风速做了统计,得到了各风向 10 m 和 20 m 高度处 10 min 平均风速的年最大值的风玫瑰图,如图 2 所示。

从图 2 可以看出,该风速观测位置的风速分布随方向的变化比较明显。整体来说,北风无论是风速大小还是高风速分布的范围都比南风要大,说明该观测位置受北方季风影响较大。

## 3 风特性分析

### 3.1 大风记录的选取和脉动速度的计算

为了研究大风的湍流性质,从 1 年的数据中选取了 18 组大风记录。

主风方向脉动速度  $u$  的计算公式为

$$u = u_x \cos \Phi + u_y \sin \Phi - U \tag{3}$$

横风方向脉动速度  $v$  的计算公式为

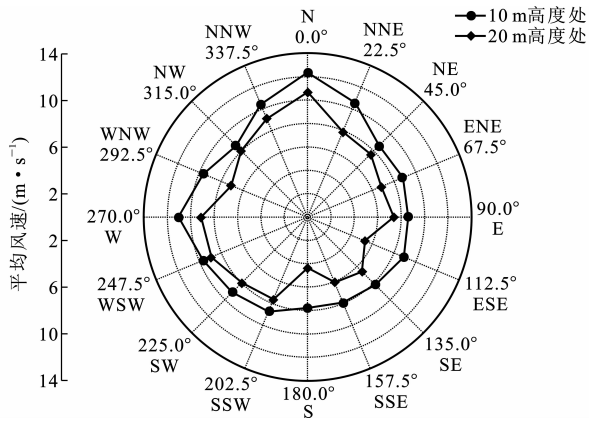


图2 10 min平均风速年最大值的风玫瑰图

Fig.2 Wind Rose Plot of Annual Maximum 10 min Mean Wind Velocities

$$v = -u_x \sin \Phi + u_y \cos \Phi \quad (4)$$

大风记录的选取原则为:①10 m高度处超声风速仪所记录的10 min平均风速在 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上;②大风持时超过2 h。所选取的18组大风记录时长为2~9 h不等,总时长75 h。

选取大风持时超过2 h是为了保证所选用的风速记录为较稳定、持续的大风,风向没有剧烈的变化。计算结果表明,这18组大风记录中,主风向角标准差最大仅为 $11^\circ$ ,说明风向变化较小。

### 3.2 湍流强度

主风方向、横风方向以及垂直方向湍流强度的定义分别为

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U}, \quad I_v = \frac{\sigma_v}{U}, \quad I_w = \frac{\sigma_w}{U} \quad (5)$$

式中: $\sigma_u$ 、 $\sigma_v$ 、 $\sigma_w$  分别为主风方向脉动风速  $u$ 、横风方向脉动风速  $v$ 、垂直风向脉动风速  $w$  的标准差。

表1为所有大风记录数据的湍流强度统计值,时距为10 min。

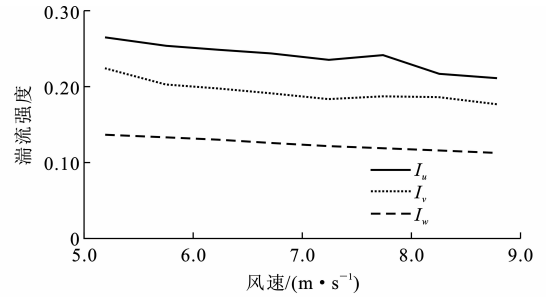
表1 湍流强度统计值

Tab.1 Statistical Values of Turbulence Intensities

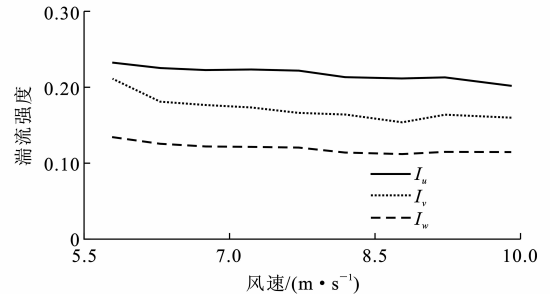
高度/m		10	20
$I_u$	均值	0.251	0.222
	标准差	0.034 5	0.029 6
$I_v$	均值	0.203	0.175
	标准差	0.033 8	0.030 9
$I_w$	均值	0.130	0.122
	标准差	0.013 6	0.014 1
$I_v \cdot I_u^{-1}$		0.809	0.788
$I_w \cdot I_u^{-1}$		0.518	0.549

从表1中可以看出,湍流强度随高度增加而减小。计算所得的横风向湍流强度、竖风向湍流强度

与主风向湍流强度的比值比经验值 0.75、0.5<sup>[9]</sup>略大。同时,从图3可以看出,湍流强度随风速增加而呈现缓慢下降的趋势,这也与一般的观测结果相吻合。



(a) 10 m高度处



(b) 20 m高度处

图3 湍流强度随风速的变化趋势

Fig.3 Changing Trend of Turbulence

Intensities vs Wind Velocities

### 3.3 风剖面参数统计

各国主要应用的风剖面形式是对数律和指数律。对数律有比较好的物理意义,其形式为

$$U(z) = u_* \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (6)$$

式中: $u_*$  为剪切波速; $\kappa$  为 Von Karman 谱常数,一般取0.4; $z_0$  为地面粗糙长度; $z$  为离地高度。其中最主要的参数为 $z_0$ ,它的物理意义是风速为0的大气距离地面的高度。

指数律为纯经验性质,但是使用方便,规范中采用的就是风剖面的指数律。指数律的形式为

$$U(z) = U(z_{ref}) \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (7)$$

式中: $z_{ref}$  为参考高度,一般取  $z_{ref} = 10 \text{ m}$ ;  $\alpha$  为指数。其中最主要的参数为指数  $\alpha$ ,规范中规定 B 类地貌  $\alpha = 0.16^{[10]}$ 。

通过测量同一位置处不同高度的风速(如10 m和20 m高度处),结合式(8)便可以计算得到地面的粗糙长度  $z_0$ ,即

$$z_0 = \exp \left[ \frac{U(10) \ln 20 - U(20) \ln 10}{U(10) - U(20)} \right] \quad (8)$$

图 4 为实测风剖面参数随风向的变化。 $z_0$  是一个随机变量,对不同的样本会得到不同的数值。通过前述大风记录计算得到的  $z_0$ ,其均值为 0.24 m,标准差为 0.22 m。实测现场为 B 类地貌,对比规范中推荐值  $z_0=0.05$  m,由此可见,计算值和推荐值差别比较大。

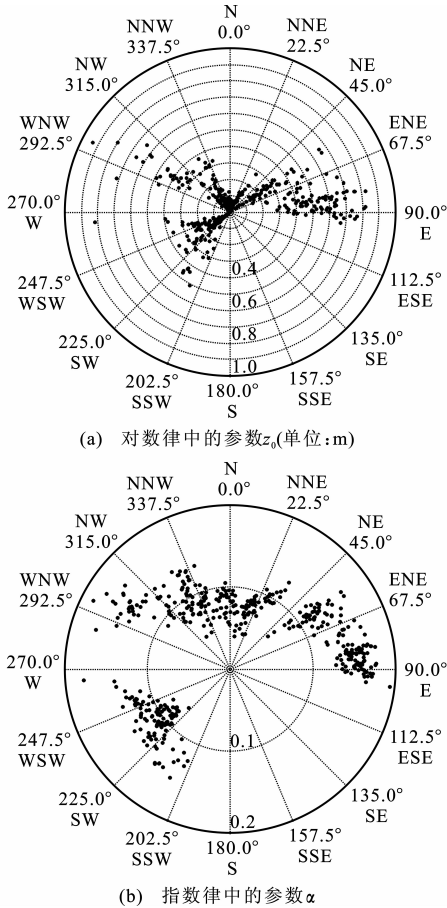


图 4 实测风剖面参数随风向的变化

Fig. 4 Changes of Measured Wind Profile Parameters vs Wind Directions

对于指数律中的参数  $\alpha$ ,规范中对 B 类地貌的取值为  $\alpha=0.16$ ,而应用大风记录计算得到  $\alpha$  的均值为 0.11,标准差为 0.03。计算得到  $\alpha$  的均值与规范值的差距仍然明显。

### 3.4 剪切波速

风剖面对数律中的剪切波速  $u_*$  在风工程中是很重要的物理量,其定义为<sup>[11]</sup>

$$u_* = \sqrt{-\overline{u'w'}} \quad (9)$$

式中: $u'$  为主风方向脉动; $w'$  为垂直风脉动; $\overline{u'w'}$  表示将它们的乘积对时间取均值,这个值在近地层风场中通常为负。主风方向脉动风速的方差  $\sigma_u^2$  与剪切波速的平方  $u_*^2$  之间的经验公式为

$$\sigma_u^2 = \beta u_*^2 \quad (10)$$

式中: $\beta$  为比例系数。

Von Karman 谱中认为系数  $\beta=6$ <sup>[12]</sup>,有些学者认为当地面粗糙长度  $z_0=0.05$  m(即 B 类地貌)时,  $\beta=6.25$ 。

图 5 为 10、20 m 高度处的剪切波速随 10 m 高度处平均风速的变化。由图 5 可以看出,剪切波速随风速增大而增大,与平均风速近似为线性变化关系。在风速小于  $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,10 m 和 20 m 高度处的剪切波速几乎相等,在风速大于  $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,20 m 高度处的剪切波速略大于 10 m 高度处的剪切波速。图 6 为主风方向脉动风速的方差  $\sigma_u^2$  与剪切波速的平方  $u_*^2$  之间的比例系数  $\beta$  随地面粗糙长度  $z_0$  的变化。从图 6 可以看出,比例系数在  $\beta=6$  附近波动,近似为一水平直线。

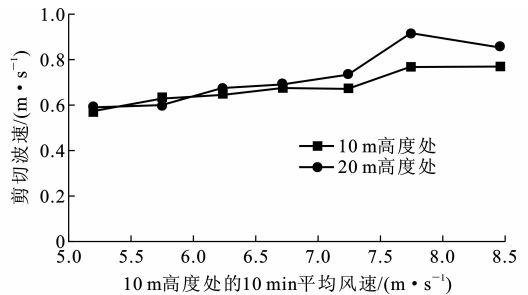


图 5 剪切波速随 10 m 高度处风速的变化  
Fig. 5 Shear Wave Velocities vs 10 m High Mean Wind Velocities

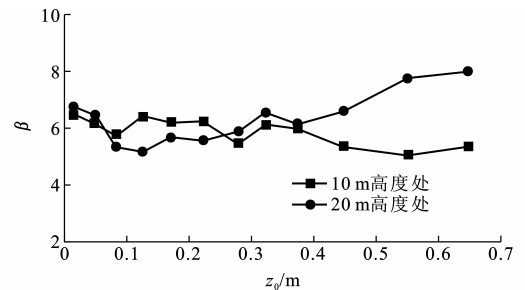


图 6  $\beta$  与  $z_0$  的关系

Fig. 6 Relationships Between  $\beta$  and  $z_0$

### 3.5 风速谱拟合

Von Karman 谱和欧洲规范谱是风工程中应用较广,并且被认为拟合效果较好的风速功率谱模型。Von Karman 谱的形式为<sup>[13-14]</sup>

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = 4 \frac{nL_u^x}{U} [1 + 70.8 (\frac{nL_u^x}{U})^2]^{-\frac{5}{6}} \quad (11)$$

式中: $n$  为自然频率; $S_u(n)$  为功率谱密度; $L_u^x$  为主风方向的湍流积分尺度,它可由式(12)定义

$$L_u^x = \frac{U}{\sigma_u^2} \int_0^{+\infty} R_u(\tau) d\tau \quad (12)$$

式中: $R_u(\tau)$ 为主风方向脉动风速时程的相关函数, $\tau$ 为时间差。欧洲规范谱的形式为

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = 6.8 \frac{nL_u^x}{U} (1 + 10.2 \frac{nL_u^x}{U})^{-\frac{5}{3}} \quad (13)$$

对所选取的大风记录计算了其功率谱并与上述 2 种功率谱函数进行了比较,如图 7 所示。

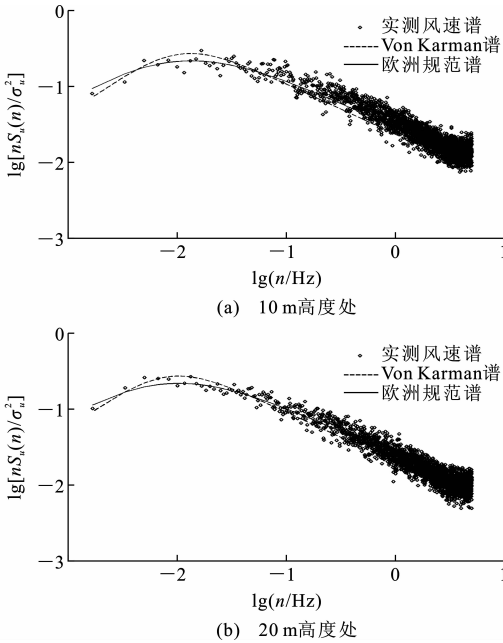


图 7 实测风速谱与功率谱的比较

Fig. 7 Comparisons Between Measured Wind Velocity Spectra and Power Spectra

从图 7 可以看出,2 种功率谱函数对实测功率谱都有着较好的拟合效果。但是相比来说,Von Karman 谱在低频区拟合效果更好,而欧洲规范谱在惯性子区的数值更接近实测风速谱。

### 3.6 湍流积分尺度的统计

应用式(12)可以计算得到主风方向的湍流积分尺度  $L_u^x$ 。如果认为湍流是由不同尺度涡的运动组成的,则  $L_u^x$  值近似地表征了整个湍流运动最大涡的尺度,在这个尺度范围之外空间两点湍流速度的相关性基本为零。表 2 为主风方向湍流积分尺度的统计结果。

表 2 主风方向湍流积分尺度的统计结果

Tab. 2 Statistical Results of Turbulence Integral Scale in Primary Wind Direction

高度/m	10	20
均值/m	74.67	108.01
标准差/m	15.62	22.99
变异系数	0.21	0.22

从表 2 中可以看出:20 m 高度处湍流积分尺度的均值要大于 10 m 高度处湍流积分尺度;两者变

异性相当,变异系数均在 0.20 左右。

从湍流积分尺度随高度的变化也可以得知,虽然 Von Karman 谱和欧洲规范谱在形式上不随高度变化,但是其主要变量  $L_u^x$  是与高度相关的,因此,Von Karman 谱和欧洲规范谱实际上是随高度变化的谱函数。

### 3.7 风场的竖向相关性

空间中任意两点的脉动风速之间存在着不同程度的相关性,这种相关性与两点间连线相对于风向的方位有关,也与湍流的特性范围有关<sup>[15-16]</sup>。在风工程中,一般使用相干函数来表征两点风速的相关性。Davenport 提出的相干函数的表达式为<sup>[17]</sup>

$$\text{coh}(r, n) = \exp(-f) \quad (14)$$

$$f = \frac{n[C_z^2(z_1 - z_2)^2 + C_y^2(y_1 - y_2)^2]^{\frac{1}{2}}}{0.5U} \quad (15)$$

式中: $r$ 为两点之间距离; $y_1, y_2$ 与 $z_1, z_2$ 为空间内两点的坐标值; $C_y, C_z$ 分别为 $y, z$ 方向的衰减系数。当风场中两点处于同一竖直面内时,就只存在竖向相关性,此时,式(15)中就只有竖向衰减系数  $C_z$  一个参数。

工程中最关心的是不同高度处主风方向脉动风速的相关性。在计算 10、20 m 高度处主风方向脉动时程相干函数后(图 8 中圆点),可以应用最小二乘法拟合得到竖向衰减系数  $C_z$  的值(图 8 中实线)。衰减系数  $C_z$  实质上是一个随机变量,18 组大风记录统计得到  $C_z$  的均值和标准差分别为 22.28、1.81,变异系数为 0.08。

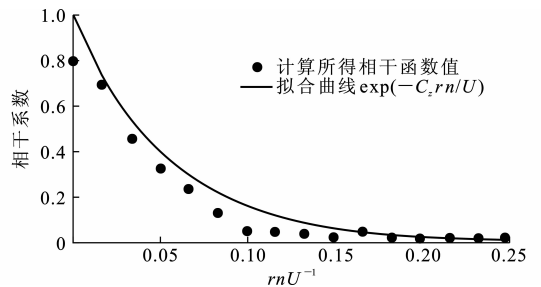


图 8 主风方向风速的竖向相干函数与拟合曲线

Fig. 8 Vertical Coherence Function and Fitting Curve of Wind Velocity in Primary Wind Direction

## 4 结语

本文中,对 1 组风速采集设备的风场长期观测结果进行了分析,得到了各风向 10 min 平均风速年最大值的风玫瑰图;对选取的 18 组总时长 75 h 的大风记录进行了大风湍流特性的分析。计算得到的湍流强度值比经验值略大;风剖面参数的离散性较大

且与规范推荐值有一定差异;剪切波速近似在 10 m 高度处随平均风速线性增加。应用大风记录拟合的风速谱与 Von Karman 谱和欧洲规范谱吻合良好,最后,统计了湍流积分尺度和竖向衰减系数,所得结论可供相关研究与工程参考。

### 参考文献:

### References:

- [1] HAUGEN D A, KAIMAL J C, BRADLEY E F. An Experimental Study of Reynolds Stress and Heat Flux in the Atmospheric Surface Layer[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1971, 97(412):168-180.
- [2] KAIMAL J C, WYNGAARD J C, IZUMI Y, et al. Spectral Characteristics of Surface-layer Turbulence [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, 98(417):563-589.
- [3] MORFIADAKIS E E, GLINOI G L, KOULOOUVARI M J. The Suitability of the Von Karman Spectrum for the Structure of Turbulence in a Complex Terrain Wind Farm[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 62(2):237-257.
- [4] SHIAU B S, CHEN Y B. Observation on Wind Turbulence Characteristics and Velocity Spectra near the Ground at the Coastal Region[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12):1671-1681.
- [5] LI W, HIYAMA T, KOBAYASHI N. Turbulence Spectra in the Near-neutral Surface Layer over the Loess Plateau in China[J]. Boundary-layer Meteorology, 2007, 124(3):449-463.
- [6] 胡晓红,葛耀君,庞加斌. 上海“派比安”台风实测结果的二维脉动风速谱拟合[J]. 结构工程师, 2002(2):41-47.  
HU Xiao-hong, GE Yao-jun, PANG Jia-bin. The Fitting of 2D Fluctuating Wind Spectrum for the Actual Measurement Data of “Pba” Typhoon in Shanghai [J]. Structural Engineers, 2002(2):41-47.
- [7] 胡非. 湍流、间歇性与大气边界层[M]. 北京:科学出版社, 1995.  
HU Fei. Turbulence, Intermittency and Atmospheric Boundary Layer[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [8] AL-JIBOORI M H. Correlation Coefficients in Urban Turbulence[J]. Boundary-layer Meteorology, 2008, 126(2):311-323.
- [9] DYRBYE C, HANSEN S O. Wind Loads on Structures[M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [10] GB 50009—2001, 建筑结构荷载规范[S].  
GB 50009—2001, Load Code for the Design of Building Structures[S].
- [11] HINZE J Q. Turbulence[M]. New York: McGraw-hill, 1975.
- [12] SIMIU E, SCANLAN R H. Wind Effects on Structures[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [13] VON KARMAN T. Progress in the Statistical Theory of Turbulence[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 1948, 34(11):530-539.
- [14] HARRIS R I. The Nature of Wind, in the Modern Design of Wind-sensitive Structures[R]. London: Construction Industry Research and Information Association, 1971.
- [15] 李清雅,叶继红. 典型空间结构平均风压分布及绕流特性的数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(1):76-83.  
LI Qing-ya, YE Ji-hong. Numerical Simulation of Characteristics of Mean Wind Pressure Distribution and Flow Field on Typical Spatial Structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(1):76-83.
- [16] 冼京晖,倪振华,谢壮宁,等. 城市广场环境风场分析及控制[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2):79-82.  
XIAN Jing-hui, NI Zhen-hua, XIE Zhuang-ning, et al. Analysis and Control of Urban Plaza Wind[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2):79-82.
- [17] DAVENPORT A G. The Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in High Winds[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1961, 87(376):194-211.