

冷锋过境时的边界层阵风结构分析

赵德山 王立治 洪钟祥

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文对冷锋过境时强风条件下平均风速、阵风、阵风系数、阵风谱、水平和垂直自相关进行了计算和分析。证明在强风条件下各层最大风速可以通过平均风速乘以各层的大于1的阵风系数求得。并且指出,该阵风系数随高度呈负指数规律变化。

阵风谱和自相关函数的计算结果表明,所有大气湍流统计量都与高度有关。320米以下各层阵风谱的含能区均在20秒到20分钟周期范围内,呈现出多峰值现象,而且含能区的峰频随高度明显地向低频方向移动。湍流总动能随高度的分布不是单一性减小的,而且在30米和150米高度附近出现两个极大值。阵风的水平自相关和垂直自相关分别随时间和垂直厚度加大呈负指数规律形式,而且两种相关都随高度增大而增大。

一、引 言

近年来,随着高层结构、建筑、桥梁、通讯、空间飞行和风能开发等的需要,风荷载问题已经成为设计师们考虑的焦点。因而给气象学者提出了一个非常复杂的研究课题,即强风条件下风结构的研究,尤其是阵风结构的研究。

以往边界层风结构的研究认为,实际风速可以用随时间变化缓慢的平均风速和随时间变化快、随机性强的脉动风速之和来描写。经验证明,在强风条件下由于湍流运动十分强烈,风速脉动分量的作用非但不能忽视,而且成为风荷载问题的关键。

关于强风条件下阵风结构的研究工作,近年来已得到许多气象学者的很大关注。例如, Davenport^[1], Hino^[2], Iwatani^[3], Shiotani, Iwatani 和 Ruroha^[4] 等对此都进行了大量的研究工作。

本文使用中国科学院大气物理研究所325米专用气象塔,于1980年1月28日—29日连续观测的冷锋过境时强风资料(使用电子计算机每10秒钟记录一次,连续观测时间为1小时35分钟),分析了平均风速随高度的分布,阵风、阵风系数、阵风谱和相关函数的特征,得到了一些有意义的结果。

二、平均风速廓线

平均风速随高度的分布是边界层风结构的基本特征。在强风条件下,根据梯度里查

孙数 Ri 的定义

$$Ri = \frac{g \partial \theta / \partial z}{\theta (\partial u / \partial z)^2}$$

不难得知,由于强风条件下边界层内风速垂直切变很大,大气的稳定度是近中性的,所以此时大气的热力层结对湍流运动几乎没有作用,风速廓线的形成主要取决于动力作用,即取决于地转风速和下垫面粗糙度的大小。

我们分析了连续取样得到的 582 条强风廓线(每两条廓线的间隔为 10 秒钟),计算了 10 分钟平均的风速随高度的分布(图 1)。由图 1 可见,在冷锋过境时的强风条件下,平均风速随高度的分布遵循对数规律的高度可以达到 150 米,对数规律公式为

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0}$$

式中 u_* 是地面摩擦速度, k 是卡曼常数, z 是高度, z_0 是地面粗糙度长度,这里得到 $z_0 = 0.21$ 米。

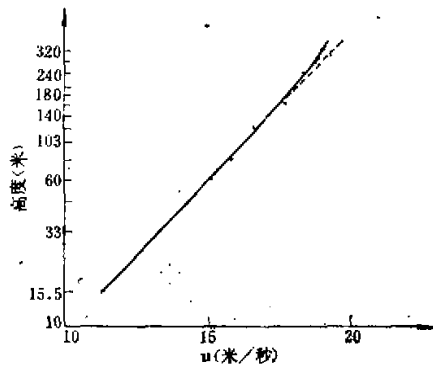


图 1 平均风速廓线

正如我们在北京西郊的观测研究一文^[3]中所指出的,在强风条件下对数规律之所以适用的高度这样高,主要是由于地面粗糙度大,强风与地面粗糙元素之间的相互作用使得扰动加强,从而使得机械湍流加强的缘故。

如何计算 150 米以上各高度的平均风速廓线,一直是气象学者所关心的问题。到目前为止,多数国家在实际应用中仍然使用比较简单的幂次律。

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^m$$

表 1 参数 m 与 z_0 的依赖关系

z (米)	z_0 (厘米)	0.2	1	2	10	20	50	100	200
50		0.107	0.132	0.143	0.186	0.214	0.267	0.329	0.431
100		0.104	0.126	0.137	0.176	0.201	0.247	0.301	0.386

式中 u_2 是 z_2 高度处的风速, u_1 是 z_1 高度处的风速, m 为指数参数。但是, 应该特别值得注意的是: 指数 m 与风速、所考虑高度的范围和地面粗糙度有关。因而使用幂指数规律时, 必须仔细研究 m 分别与 u , z , z_0 的关系。根据苏联学者阿尔列科^[6]的研究, 在强风条件下风速系数 u_2/u_1 (u_1 取 15 米高度上的风速) 和风速的依赖关系很小。并且在 $z_1 = 10$ 米, $z = 50$ 米和 100 米的条件下, 他计算了指数 m 与 z_0 的依赖关系, 结果见表 1。可以看到, m 随 z_0 的变化是明显的。本文在 $z_0 = 0.21$ 米, $z_1 = 15$ 米的情况下计算了 m 值与 z 的关系, 结果见表 2。进一步证明了指数 m 与 z 的关系也是很明显的。

表 2 参数 m 与 z 的依赖关系

z (米)	33	48	63	80	160	240	320
m	0.204	0.201	0.200	0.199	0.188	0.172	0.169

正是由于指数规律的指数参数随高度和地面粗糙度变化显著 (在强风条件下指数与风速的依赖关系很小), 给实际应用带来麻烦。所以, 我们建议在地面粗糙度比较大的地区计算强风条件下平均风速随高度的分布, 150 米以下最好使用对数规律, 因为它本身考虑了粗糙度的影响。

三、阵风特性

在考虑风荷载问题时, 人们最关心的问题之一是要计算不同高度上的最大风速。然而, 正如前面所说, 在强风条件下大气湍流运动十分强烈, 风速的阵性很大, 因而不能用平均风速廓线代替最大风速随高度的分布。石井德治^[7] (1976) 曾指出地面最大瞬时风速可以达到同样高度上平均风速的 2.4 倍, 可见研究阵风的特性对于风荷载问题是何等重要。

阵风通常是指在一定时距内最大风速和最小风速之差。根据这个定义计算了各种不同时间距的阵风平均值 (见图 2 中的虚线)。可以清楚地看到, 不同时间距内阵风平均值均随时距加大而增大, 而且开始增大迅速, 当时距大于 10 分钟后变得缓慢了。这表明 10 分钟

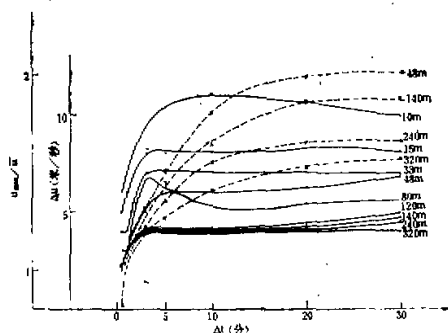


图 2 不同平均时距内的最大阵风系数 (实线) 和阵风平均值 (虚线)

这个时距可以近似地视为是得到最大阵风平均值的最小时距,也就是说取 10 分钟作为研究阵风时距所得到的阵风平均值是具有代表性的。

图 3 中所表示的正是以 10 分钟作为研究阵风时距的结果。其中 (a) 是 10 分钟平均的平均风速廓线; (b) 和 (c) 分别是 10 分钟内的最大风速平均值和最大风速瞬时值随高度的分布。可以看到, 10 分钟内的最大风速平均值廓线虽然和 10 分钟平均的平均风速廓线相类似, 然而前者随高度增大的速率明显地小于后者。所以人们在实用中常常假设两者是以同样的速率随高度增大是不正确的, 这相当于加大了风荷载的保险系数, 是很不经济的。同时我们还可以看到 [见 (b)、(c) 曲线], 最大风速瞬时值廓线不符合平均风速廓线所遵循的规律。而且, 正如曲线 (d) 所表示的那样, 时距为 10 分钟的阵风平均值随高度的分布在 30 米处出现第一个明显的极大值。此外, 在 150 米处还呈现出第二个极大值。这至少表明在此例中最大阵风不是发生在最低的地面处, 而是在离开地面一定距离的 30 米高度附近。

为了计算最大风速随高度的分布, 通常引用“阵风系数”这个量。阵风系数 p 是给定时间距内的最大风速 u_{max} 和该时距平均的平均风速 $\bar{u}$ 之比,

$$p = u_{max} / \bar{u}$$

由计算结果可以清楚地看到(图略), 在任何高度上当时距小于 3 分钟时, 最大阵风系数随时距的变化很大, 当时距大于 3 分钟后, 最大阵风系数几乎为一常数。这表明在计算阵风系数时所采用的时距必须大于 3 分钟才具有代表性。我们考虑到计算平均风速的稳

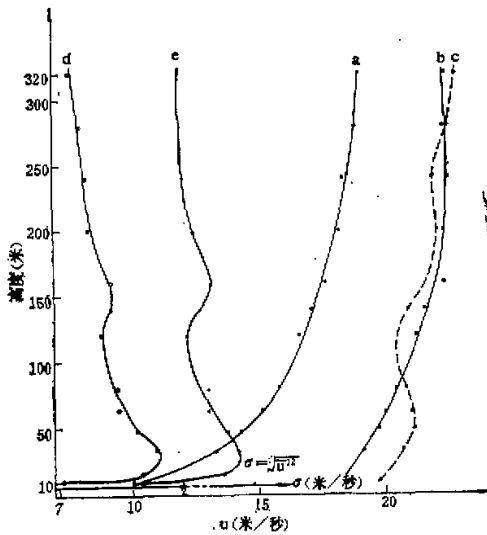


图 3

- (a) 10 分钟平均的平均风速随高度的分布
- (b) 10 分钟内的最大风速平均值廓线
- (c) 10 分钟内的最大风速瞬时值廓线
- (d) 10 分钟内阵风平均值随高度的分布
- (e) 湍流强度随高度的分布

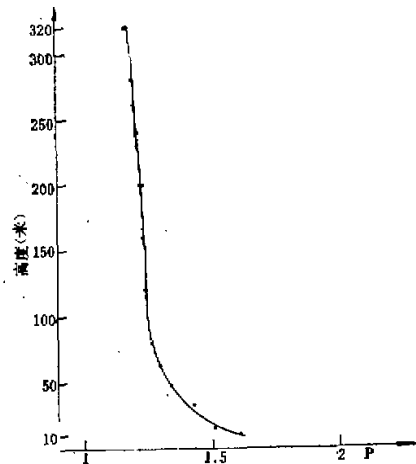


图 4 时距为 10 分钟的阵风系数平均值随高度的分布

定性, 将研究阵风采用的时距和研究平均风速采用的平均时距统一起来, 都采用 10 分钟的时距作为研究对象. 图 4 表示的正是时距为 10 分钟的阵风系数平均值随高度的分布. 由此可见, 不同高度的阵风系数明显不同, 即阵风系数随高度的分布基本上遵循负指数规律. 尤其是在 100 米以下的贴地层阵风系数随高度的减小比较明显, 而在 100 米以上阵风系数随高度减小很慢, 几乎可以视为一个不变的常数. 所以, 如果我们通过深入地研究能够得出一个可靠的阵风系数随高度分布的经验公式, 就可以根据不同高度上的平均风速分别乘以各高度上的阵风系数, 求得风荷载问题所关心的各高度上的最大风速.

四、阵风谱和相关

在强风条件下, 研究阵风能谱分布和涡旋尺度, 是风荷载和风能问题所必不可缺的内容.

本文利用《快速傅里叶变换》方法计算了阵风能谱、水平自相关和垂直自相关曲线. 使用的资料长度为 1 小时 35 分钟, 资料间隔为 10 秒钟.

1. 阵风谱 我们计算了 10 米、15 米、33 米、48 米、63 米、80 米、120 米、140 米、160 米、200 米、240 米、280 米和 320 米, 共 13 层高度上的阵风谱密度曲线 $S(n)-n$, 能谱曲线 $nS(n)-n$ 和无量纲谱曲线 $\frac{nS(n)}{u^2} - \frac{n}{u}$. 为了清楚起见, 我们只选用 15 米、140 米和 280 米三个高度作为低、中、高层的代表层, 并将其能谱曲线 $nS(n)-n$ 的计算结果详细叙述如下(见图 5).

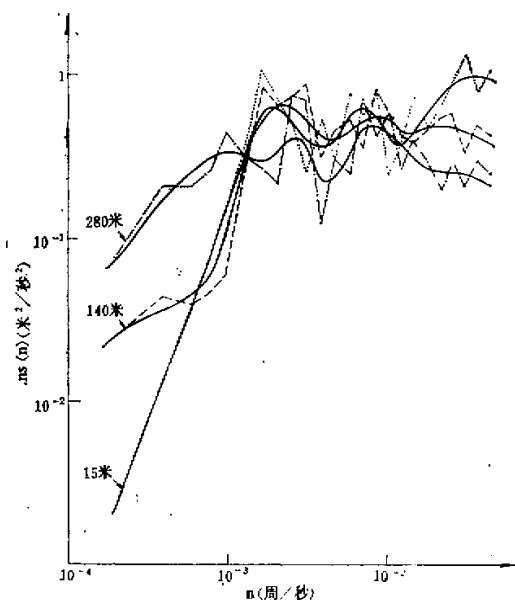


图 5 不同高度的阵风功率谱

由图 5 可以清楚地看到,不同高度上的阵风能谱有三个明显的特征。第一个特征是:在强风条件下 320 米以下各层的阵风能谱的含能区大约都位于 0.045 周/秒到 0.0009 周/秒范围内(相应的周期约为 20 秒钟到 20 分钟)。但是,各层能谱含能区的范围又有所不同,即含能区随高度明显地向低频方向移动。例如:在 15 米高度上阵风能谱含能区位于 0.045 周/秒—0.0015 周/秒范围(相应周期约为 20 秒到 11 分钟),而 280 米高度阵风能谱的含能区位于 0.02 周/秒—0.0009 周/秒范围(相应周期约为 50 秒到 20 分钟)。

第二个特征是:各层阵风能谱含能区呈现出多峰值现象,比较明显地有三个峰值区,为了叙述简便,我们将这三个高度层上的阵风能谱含能区各峰值的位置和占总能量的百分比列入表 3 中。由表 3 不仅可以看到在不同高度上阵风能谱含能区各峰值的位置和占总能量的百分比是不同的,而且可以看到在低层高频端的峰值含有的能量较多,而在高层低频端峰值含有的能量较多。表明在低层起主要作用的涡旋尺度较小,随着高度增加,起主要作用的涡旋尺度也在不断加大,这显然是地面摩擦作用的结果。

表 3 含能区各峰值位置和相对强度

z(米)	第一个峰值		第二个峰值		第三个峰值	
	位 置	占总能量%	位 置	占总能量%	位 置	占总能量%
15	0.018—0.045	33	0.045—0.011	19	0.0013—0.0027	20
140	0.015—0.0034	33	0.007—0.012	16	0.0013—0.0038	37
280	0.0058—0.012	21	0.0021—0.0038	19	0.00059—0.0021	22

第三个特征是:在本文所分析的频段内各层阵风功率谱的总能量是不同的,即湍流强度在各层是不同的。为了更确切地研究这一特征,我们计算了各层湍流强度。结果如图 3(c) 所示。曲线 c 非常明显地表明,湍流强度随高度的分布不是单一地随高度的增加而减小的,而是在 30 米高度出现了一个明显的极大值;此外在 150 米附近还出现了一个次极值。这和图 3(d) 所表示的阵风随高度的分布完全一致。指出湍流总动能最大的地方不是在地面而是离开地面一定距离的 30 米高度附近。

2. 相关函数

本文由于资料所限只计算了水平自相关和垂直自相关曲线,结果见图 6 和图 7。

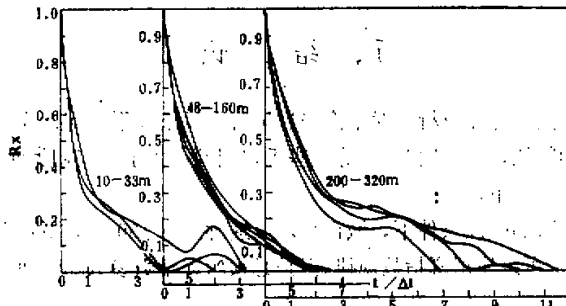


图 6 各层阵风水平自相关曲线

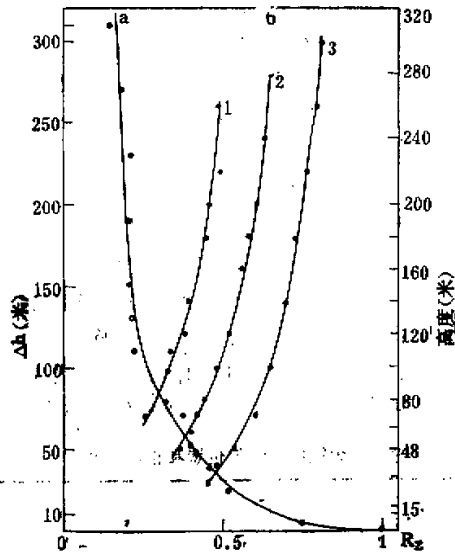


图 7

(a) 不同厚度的阵风垂直自相关曲线 (b) 等厚度的阵风垂直自相关曲线
(1) $\Delta h = 120$ 米 (2) $\Delta h = 80$ 米 (3) $\Delta h = 40$ 米

首先由图 6 可以看到, 各层阵风水平自相关曲线(沿风向方向)在 320 米以下各高度上都是随着时间呈指数衰减形式。而且对于相同的水平距离来说, 高层要比低层相关性好。同时还表现出, 在 33 米以下和 200 米以上各层的水平自相关曲线起伏性较大, 只有在 48—160 米的中层相关曲线比较光滑而一致。这可能是由于大气湍流运动在 33 米以下低层受地面扰动作用大的结果; 而 200 米以上虽然地面扰动作用几乎不存在, 但是受大尺度涡旋以及诸如柯氏力等因素的影响显著了。

图 7 表示的是阵风的垂直自相关曲线。显而易见阵风的垂直自相关也是随厚度的增大而呈指数衰减的。而且对于相同厚度而言阵风的垂直自相关函数随高度增大而增大, 无疑这是由于高层涡旋尺度大的缘故。

五、结 论

通过以上各节的计算和分析, 对于冷锋过境时强风条件下如何计算各高度的最大风速以及对于阵风的特征, 阵风谱和相关等一些重要问题得到了一些初步而有意义的结果, 概括起来可以总结为以下几点:

1. 在冷锋过境时的强风条件下, 城市平均风速廓线在 150 米以下可以用对数规律计算, 150 米到 320 米可以使用幂指数规律, 但是必须考虑指数参数随地面粗糙度和所考虑的厚度的依赖关系。

2. 在强风条件下, 用平均风速廓线代替最大风速廓线是不妥的。本文指出, 10 米高

度上时距为 10 分钟的最大风速可以达到同一高度上平均风速的 1.9 倍; 阵风系数随高度分布基本上呈负指数规律减小, 尤其是在 100 米以下的贴地层阵风系数随高度减小得比较快, 而在 100 米以上减小得很慢, 几乎可以视为一个不变的常数。因此, 各高度的最大风速必须以各高度的阵风系数乘以相应高度上的平均风速得到。

3. 阵风谱和自相关函数的计算证明, 所有大气湍流统计量都是和高度有关的。在 320 米以下各层阵风能谱含能区均在 20 秒到 20 分钟周期范围内, 并且峰频随高度明显地向低频方向移动。此外, 阵风能谱含能区还表现出多峰值现象。另一个重要的结果是, 在强风条件下湍流总动能随高度不是单一地减小, 而是在 30 米和 150 米附近出现两个极大值, 尤其是 30 米附近的极值是十分明显的。

4. 阵风水平自相关是随时间呈指数规律衰减的, 并且高层相关程度大于低层, 垂直自相关随厚度也呈指数规律衰减, 而且对于同一厚度来说垂直自相关也是随高度加大而加大的。表明由于地面摩擦作用, 在低层大涡旋不断破碎成小涡旋。

参 考 文 献

- [1] Davenport, A. G., The spectrum of longitudinal gustiness near the ground in high winds, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 87, 194—221, 1961.
- , The dependence of wind loads on meteorological parameters, Proc. Intern. Res. Seminar on wind effects on buildings and structures, Canada, 1967, 19—82, 1968.
- [2] Hino, M., Spectrum of gust wind, Proc. Conf., On wind effects on buildings and structures, Saikon Pub., 69—77, 1971.
- [3] Iwatani, Y., Some features of the spatial structures of the surface layer turbulence in high wind condition, *J. Meteor. Soc. Japan*, 55, 130—138, 1977.
- [4] Shiotani, M., Iwatani, Y. and Buroha, K., Magnitudes and horizontal correlations of vertical velocities in high winds, *J. Meteor. Soc. Japan*, 56, 35—42, 1978.
- [5] 赵德山、彭贤安、洪钟祥, 非均匀地面层风速廓线的实验研究, *大气科学*, 第 4 卷, 第 2 期, 1980.
- [6] 中央气象局研究所编, 应用气候和大气污染译文集, 1976.
- [7] 王学永、金维明, 关于国外风切变研究现状的综述 (未发表), 1979.

ANALYSIS ON THE STRUCTURE OF GUST IN BOUNDARY-LAYER WHEN A COLD FRONT PASSING

Zhao De-shan, Wang Li-zhi, Hong Zhong-xiang

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, the mean wind velocity, gust, gusty coefficient, gusty spectrum, and horizontal and vertical self-correlation when a cold front passing are computed and analysed. It is confirmed that the maxima of wind velocity at different heights can be obtained by multiplying the mean wind velocity by the gusty coefficients of the corresponding layer which are greater than unit. It is shown that the variation of gusty coefficient with height can be fitted by negative exponential law.

The results for the gusty spectrum and correlation function show that all statistical quantities of atmospheric turbulence are related to height. The energy-containing ranges of gusty spectrum in each layer below 320 m are in the range of 20 seconds to 20 minutes and show multi-peaks, moreover, as the height increases the frequencies of peak for the ranges of energy-containing are transferred towards low frequency.

The total kinetic energy of turbulence does not monotonically decrease with height, but show two maxima near 30 m and 150 m. The variations of horizontal and vertical self-correlations of gust with time and the vertical thick increase can all be fitted by negative exponential law and increase with height.