

中国的阵风极值及其统计研究*

董双林

(北京应用气象研究所, 北京, 100029)

摘 要

文中给出了中国地面到 300 m 高空阵风极值及阵风因子的统计研究。给出了阵风因子随稳定风速、平均时间、距地面高度、地面粗糙度和稳定风速三阶矩变化的经验公式。所得结果已应用于国家军用标准的制定。

关键词: 阵风极值, 阵风因子, 统计研究。

1 引 言

风速是由许多在时空上随机变化的小尺度脉动, 叠加在大尺度规则气流上的一种三维矢量^[1]。在有关空中污染传播和飞机着陆之类的问题中, 需要考虑三维矢量风速。但在很多应用方面只需考虑二维风速, 且目前气象业务观测得到的还是二维风速, 所以这里只讨论二维风速。

阵风一般是与风速脉动相联系的。实际应用不同, 存在多种定义及参数。由于脉动复杂, 缺乏足够的观测资料及成因分析, 研究相当薄弱; 已有的部分成果比较零散, 考虑的影响因素不全, 且不同文献阵风因子随稳定风速变化的程度差别较大; 而军标制定等应用要求很高; 所以必须进一步研究。本文侧重于装备设计时确定水平阵风载荷的阵风极值, 收集使用了较大的观测样本, 将统计分析和阵风成因分析相结合, 得出影响因素较全、较可靠的阵风极值计算公式。

2 阵风的定义

2.1 定义 1

世界气象组织(WMO)在文献[1]中指出: 阵风(Gust)是在规定时间间隔内, 风速对其平均值的、持续时间不大于 2 min 的正的或负的偏离。负的阵风又称为息静。其参数有: 阵风峰值风速 p 为与正的阵风振幅联系在一起的风速; 阵风持续时间 t_g 为从阵风开始到结束的时间间隔; 阵风值 m 为阵风峰值风速与邻近的息静风速之间的标量差; 阵风频率 n 为单位时间出现的正的阵风数; 阵风振幅 g_a 为偏离平均风速的最大阵风的标量值; 阵风息静风速 l 为与负的阵风振幅联系在一起的风速; 阵风形成时间 t_f 为从阵风开始到阵风

* 初稿时间: 1998 年 11 月 18 日; 修改稿时间: 1999 年 8 月 23 日。

振幅值的时间间隔; 阵风衰减时间 t_d 为从达到阵风振幅值到阵风结束的时间间隔; 如图 1。

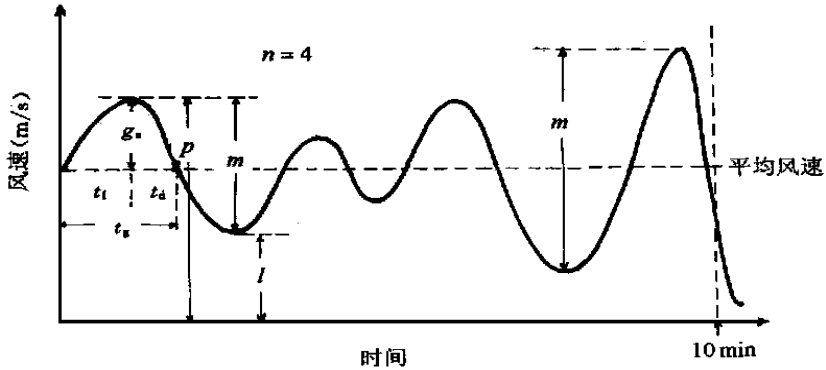


图 1 文献[1]阵风参数示意图

2.2 定义 2

航天器发射时, 升速增长很快, 2 min 可升到数 10 km 高空, 可穿过高空风廓线的西、东风急流。以航天器为参考系时, 环境风速就呈现很大的脉动。因此定义: 绝对阵风分量 U 为参考高度 (H_0) 附近连续的零跨越层之间的风速最大变化值; 关联阵风长度 L 为这两个零跨越层之间的距离 (图 2)。

这里, 零跨越层是指风速垂直切变为零的层^[2]。

$$U = u_1 - u_2 = |u_1| + |u_2| \quad (1)$$

$$L = H_{u_1} - H_{u_2} \quad (2)$$

2.3 定义 3

《GB1172.1~1172.19-91 军用设备气候极值》等^[3,4], 依据风对设备作用的专门研究结果, 认为风的作用必须达到一定的持续时间 t , 它等于风吹过设备顺风尺寸的 8 倍所经历的时间。因此, t 也是作用于设备上的阵风的平均时距。

由于风速的脉动, 平均时距不同时, 相应的阵风, 特别是阵风极值是不同的。因此定义: 风速平均时距 t 为求平均风速的时段长度或测风时仪器感应空气运动的时段长度; 稳定风速 V 为平均时距等于 10 min 的风速; 阵风 V_t 为平均时距小于 10 min 的风向量; 阵风因子 G_t 为 t 秒阵风风速与相应稳定风速的比 (图 3)。当阵风风速和相应稳定风速都取极大值时, $G_t > 1.0$ 。

2.4 3 种定义的比较

3 种定义的共同点是, 描述了风对设备的作用在短时间内的起伏特征。定义 1 较细致地描述引起作用起伏的风速脉动特征, 但过于理想。阵风平均时距有很多, 平均时距变化

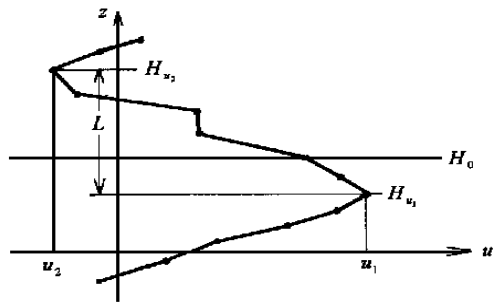


图 2 绝对阵风分量 U 和相关阵风长度 L 示意图 (取自文献[2])

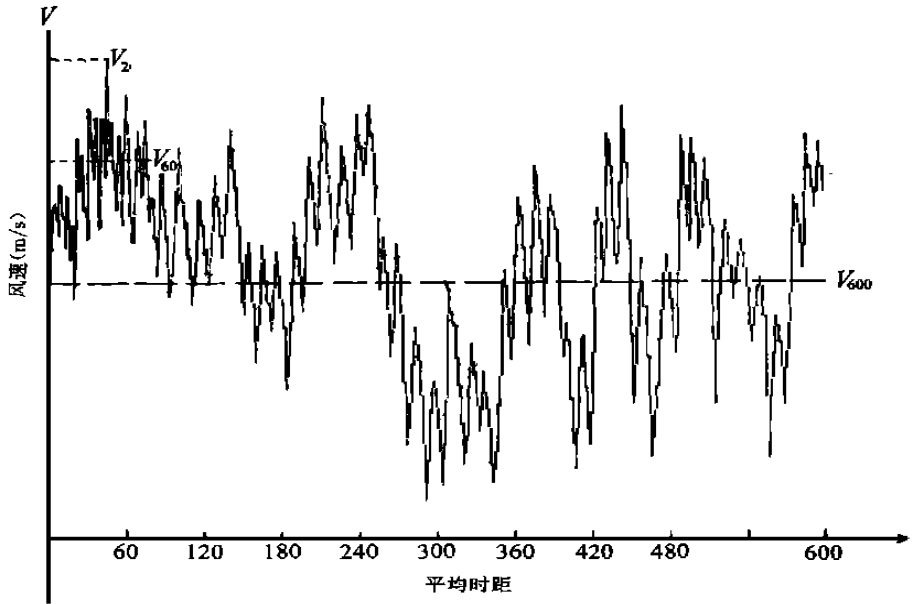


图 3 阵风风速与稳定风速示意图

及平均起始时刻变化时图 1 曲线会有较大变化, 很可能出现风速明显变化但却未小于稳定风速的情况。如图 1 中第 2 个息静风速处的风速略大于平均风速。这时阵风峰值与息静风速间风速变化不再是单调的, 阵风频率与脉动变化数目的关系发生变化, 观测、统计和应用就困难多了。定义 2 只限于航天器的应用, 且作用起伏不是由大气运动的脉动引起的, 与一般阵风概念不符合。定义 3 紧密结合风荷载的应用, 特别是确定阵风平均时距的依据和用阵风因子将阵风与稳定风速联系起来, 既弥补了阵风观测的不足, 又解决了应用的难题。文中推荐定义 3。

3 阵风极值的统计研究

阵风风速极值 $V_i = G_i V$, 因此阵风极值的统计研究包括稳定风速极值和阵风因子的统计研究。

3.1 阵风因子

影响阵风因子的原因有测风平均时距、稳定风速、距地面高度、地面粗糙度、层结稳定度以及天气系统等。

3.1.1 2 秒阵风因子与稳定风速的关系

2 秒阵风因子 G_2 与稳定风速 V 的关系一般用

$$G_2 = 1 + A \exp(-BV) \quad (3)$$

即

$$\ln(G_2 - 1) = \ln A - BV \quad (4)$$

作为统计模型。2 秒阵风风速一般称为瞬时风速。由于资料离散程度大, 文献[3]中按稳定风速 5 m/s 间隔分组, 用 G_2 组平均值和稳定风速组中点值拟合模型。但不同作者所得结

果差别较大。一般认为阵风因子随着稳定风速增大而减小,但 Mackey^[5]报告袭击香港的台风中观测到 5 min 风速 28.3 m/s 和相应阵风风速 44 m/s,阵风因子 $G_t = 1.56$ 。Durst^[6]的统计模型(样本来源较单一,稳定风速不大于 20 m/s)曾得出阵风因子不随稳定风速变化的结果,长期不为人们所接受。本文取自全国 80 个测站的资料包含不同地面粗糙度,不同天气系统,不同季节情况下的稳定风速最大风速和相应的瞬时风速极值资料 1417 组。每组可计算一个 G_2 ,然后按照全国,沿海,内陆,以及气象区站号的 51, 52, ..., 59 区分区进行统计。使用按稳定风速 V 间隔 5 m/s 分组和不分组两种统计方案。分组统计结果表明,式(4)相关系数都通过显著性检验,置信度 $\alpha < 0.05$ 或 0.01。不分组统计结果如表 1。

表 1 不同地区拟合模型(3)和(4)的结果

分区	样本量	A	B	式(4)的相关系数 R	R 的置信水平 α
全国	1417	0.68352	0.027098	-0.28735	< 0.01
沿海组	462	0.55354	0.0068235	-0.11394	< 0.05
内陆组	955	0.77940	0.039952	-0.36090	< 0.01
51 区	124	0.40880	0.018285	-0.28328	< 0.01
52 区	47	0.91180	0.054515	-0.71553	< 0.01
53 区	81	1.2051	0.076844	-0.71033	< 0.01
54 区	176	0.71489	0.034718	-0.35884	< 0.01
55 区	26	1.2870	0.026913	-0.41977	< 0.05
56 区	88	0.98032	0.057917	-0.42758	< 0.01
57 区	218	0.53421	0.0079676	-0.05045	> 0.05
58 区	165	0.59124	0.014685	-0.17726	< 0.05
59 区	492	0.63125	0.0049649	-0.08631	> 0.05

随着稳定风速的增大, G_2 都减小,但沿海组比内陆组减小慢得多。且沿海组组内 G_2 的离散程度比内陆组小得多。52, 53, 54, 56 区与内陆组类似, 51, 55, 57, 58, 59 区与沿海组类似。这说明不同地区阵风因子随稳定风速的增长而减小的速度差别较大,可能是不同作者的结果差别较大的原因。因此有必要研究不同地区的阵风因子的变化规律。

动量的垂直湍流输送和不同尺度垂直运动造成的辐合辐散,是阵风的主要物理成因。中国气象场的统计特征^①表明,中国中部地区受到不同类型、不同来向的天气系统的影响。这可能是 52, 53, 54, 56 区阵风因子离散程度较大,阵风因子随极值稳定风速增大而减少较快的一个原因。沿海地区造成极值风速的天气系统主要是热带风暴,阵风因子随极值稳定风速增大而减少较慢。这些特征可能与各站风速的统计特征有关。为此用 170 个测站严酷月的逐时风速资料求各阶原点矩和中心矩,用 V_M 代表这些风速矩及其组合,将有瞬时风速和稳定风速资料的测站按照 V_M 值的不同进行分组,分别拟合模型(3),得出 A_i , B_i , 与 V_{Mi} 一起拟合

$$A = A_a + A_b V_M \quad (5)$$

$$B = B_a + B_b V_M \quad (6)$$

最后得

$$G_2 = 1 + (A_a + A_b V_M) \exp[-(B_a + B_b V_M) V] \quad (7)$$

① 董双林, 1982, 我国气象场的统计特征。

经过对各种 V_M 拟合结果的分析, 选择 3 阶中心矩 μ_3 表示不同测站由于影响天气系统不同引起的湍流活动对阵风因子与稳定风速关系的影响。得

$$G_2 = 1 + (0.9753 - 0.1065\mu_3) \exp[-(0.03642 - 0.004555\mu_3)V] \quad (8)$$

式中 V 的单位是 m/s , μ_3 的单位是 $(\text{m/s})^3$ 。

统计系数 $A = 0.9753 - 0.1065\mu_3$ 和 $B = 0.03642 - 0.004555\mu_3$ 的全国分布图(图略)表明, A, B 分布基本一致。中国中部、东南部较大, 东南沿海、东北、西北、青藏高原东部及一些孤立山峰(华山、庐山、衡山等)较小。风速极值大的测站, A, B 较小, 风速极值小的测站, A, B 反而较大。即地面极值风速越大 μ_3 就越大, 说明除了个别地形影响(如山口)为主的测站外, 地面极值风速和阵风极值的主要成因相同, 即动量垂直湍流输送和垂直运动在近地面造成的辐散辐合。这说明统计结果与物理解释基本相符。

3.1.2 阵风因子随平均时距的变化

中国建筑荷载规范^① 用

$$G_t = 1 + 0.16(G_1 - 1) \ln(600/t) \quad (9)$$

表示 t 秒阵风因子与 1 秒阵风因子 G_1 的关系。用 2 秒阵风因子 G_2 代替 G_1 得

$$G_t = 1 + (G_2 - 1) \ln(600/t) / \ln 300 \quad (10)$$

上式 G_t 表示对于稳定风速平均时距为 10 min 的测风高度为 10 m 的 t 秒阵风因子。美国军用标准用列线图查算对于 1 min 平均时距的距离地面 3 m 高度的稳定风速的阵风因子。经过平均时距和测风高度订正后, 式(10)与制定美军标用的列线图相当一致, 但比列线图精密而方便。

3.1.3 阵风因子随高度的变化

阵风因子随高度的变化与地面粗糙度 Z_0 有关^②

$$G_t = 1 + g(t) / \ln(Z/Z_0) \quad (11)$$

式中 $g(t)$ 与阵风平均时距 t 有关。有关文献提供了稳定风速较小、地面较平坦(如机场)的 $g(t)$ 数值表。为确定 $g(t)$ 的函数关系, 合并式(10)和(11)并取 $Z = 10$ m 得

$$g(t) = (G_2 - 1) \ln(600/t) \ln(10/Z_0) / \ln 300 \quad (12)$$

经验证, 取 $G_2 = 1.59, Z = 0.02$ m 时(即稳定风速较小、地面较平坦)时, 与 $g(t)$ 数值表相当一致。所以假设式(12)普遍成立。这样, 阵风因子随阵风平均时距和高度的变化为

$$G(t, Z) = 1 + (G_2 - 1) \ln(600/t) \ln 300 \times [\ln(10/Z_0) / \ln(Z/Z_0)] \quad (13)$$

式中 $[\ln(10/Z_0) / \ln(Z/Z_0)]$ 称为高度转换因子。地面粗糙度 Z_0 取值范围较广, 当 Z_0 数值较大时, 它应改为

$$[\ln(10 + h - d) / Z_0) / \ln(Z - d) / Z_0] \quad Z > h$$

式中 $d = h - 2.5Z_0$, h 为建筑物平均高度。

3.1.4 统计结果的可靠性分析

作为风速脉动的阵风, 其变化非常复杂。即使只考虑风速极大值, 阵风因子的离散度也较大。分析统计结果的可靠性十分必要。本文的结果统一了不同来源、不同形式的研究

① 上海市建筑科学研究所, 1986, 近地层风特性咨询报告。

② 美国风工程手册。

成果,解释了它们之间的矛盾,与物理定性分析一致,且全国组、内陆组、沿海组样本量较大,所以结果可靠。但阵风因子与稳定风速关系随地点的定量变化式(8),样本量较小,模型(5),(6)也较简单,有待进一步检验。

3.2 阵风极值(如表 2)

表 2 地面粗糙度为 0.05 m 时,与时间风险率为 1%,面积风险率为 0.5% 的稳定风速工作极值 $V_g(0.5\%, 1\%)$ 相应的阵风极值(单位: m/s)

距地面高度(m)	稳定风速 $V_g(0.5\%, 1\%)$ = 26.6	设备最短水平尺寸(m)					
		1	2	3	8	15	30
		阵风风速					
1	18	31	29	29	27	26	24
3	22	34	33	33	31	30	29
6	25	37	36	35	33	32	31
9	26	38	37	36	35	34	33
12	27	39	38	37	36	35	34
15	28	40	38	38	36	35	34
20	29	40	39	39	37	36	35
25	30	41	40	39	38	37	36
30	30	41	40	40	38	37	36
35	30	42	41	40	39	38	37
40	31	42	41	40	39	38	37
45	31	42	41	41	39	38	37
50	31	42	41	41	39	39	38
60	32	43	42	41	40	39	38
70	32	43	42	41	40	39	38
80	33	43	42	42	40	40	39
90	33	43	43	42	41	40	39
100	33	44	43	42	41	40	39
120	34	44	43	42	41	40	39
140	34	44	43	43	41	41	40
160	34	44	43	43	42	41	40
180	34	44	44	43	42	41	40
200	35	45	44	43	42	41	40
225	35	45	44	43	42	41	40
250	35	45	44	44	42	41	41
275	35	45	44	44	42	42	41
300	35	45	44	44	43	42	41

确定设备的阵风极值,需要确定稳定风速极值 V 和阵风因子 G_t 。依据设备实际使用高度、预期寿命、各种风险率确定 $V^{[3]}$,同时确定 10 m 高度处的 V_0 。用 $t = L/V$ (L 为设备顺风尺寸或最小水平尺寸) 确定阵风平均时距 t 。用 V_0 依据式(3)或(8)确定 G_2 ,再依据式(13)确定 $G_t = G(t, Z)$ 。阵风极值 $V_t = G_t V$ 。

4 小 结

在广义上,所关注的目标受到的具有短时间风向、风速变化明显的脉动特征的风向量,称为阵风。具体定义及其参数含义要视应用情况而定。由于风向风速的脉动非常复杂,又缺乏足够的观测资料和阵风成因分析,所以阵风研究相当薄弱。在收集国内外已有研究

成果的基础上, 本文对于稳定风速极值相应的阵风极值进行了较深入、较完整的统计研究, 得出了稳定风速、平均时距、距地面高度和地面粗糙度等与阵风因子的综合经验公式。其结果既与物理分析相一致, 又与已有的形式不同、来源不同的研究结果相一致, 已用于国家军用标准。阵风因子随地点的变化规律, 不仅使已有的表面相互矛盾的结果得到较完满的解释, 而且对阵风成因分析及进一步研究具有一定的指导意义。

参考文献

- 1 WMO. Guide to meteorological instruments and methods of observation(中译本). 北京: 气象出版社, 1992, 131pp
- 2 Adelfang S I, Smith O E. Vector wind profile gust model. 1981, 8, NASA TM- 82441
- 3 GJB1172. 1~1172. 18- 91 军用设备气候极值. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1991, 45
- 4 Sissenwine N, et al. Extreme wind speeds, gustiness, and variations with height for MIL- STD- 210B, AFCRL- TR- 73- 0560. 1973, AF surveys in geophysics No. 273, AD774044
- 5 Mackey S. Discussion of wind effects on buildings and structures. Her Majesty's Stationary Office. London, 1965. 422~423
- 6 Durst C S. Wind speeds over short periods of time. Meteor Magazine, 1960, 89: 181~186

GUST EXTREMES IN CHINA AND ITS STATISTICAL STUDY

Dong Shuanglin

(Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029)

Abstract

This paper was about the statistical study of gust extremes and gust factor, including the gust from ground to 300 m high in China. Firstly, it discussed several definitions of gust. Secondly, it described the relationships of gust factor with constant wind speed, gust factor with measuring mean time of wind speed, and gust factor with height, respectively. Finally, the paper gave the method and result of estimating gust extremes.

This paper unified study results of gust factor with varied resources and varied forms. Furthermore, it explained the differences among them. The result of this study has used in the formulation of the Military Standards.

Key words: Gust extremes, Gust factor, Statistical study.