

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.152



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



实测下击暴流风场特性分析

陈超豪¹, 王子茹¹, 霍林生¹, 黄国庆²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:目前下击暴流风场特性的研究大多是围绕风速模型和部分风场特性展开,较少涉及风场特性与平均风速之间的关系、不同风场特性之间的相关性以及与大地边界层近地风特性的比较研究。基于下击暴流实测风速数据,运用滑移平均法提取下击暴流的时变平均风速,进而获得脉动风速。在此基础上,研究下击暴流的紊流度、紊流积分尺度和阵风因子的特性,并分析3种特性与平均风速的关系以及3种特性之间的相关性。结果表明:下击暴流的紊流度、紊流积分尺度以及阵风因子均大于相应场地类别下相同高度处大气边界层近地风的对应风场;下击暴流的紊流度与平均风速之间、紊流积分尺度和紊流度之间均存在负相关性,而紊流积分尺度与平均风速之间、阵风因子与紊流度之间则都表现为正相关;低矮建筑的抗风设计应重点考虑下击暴流脉动成分的影响,而高层建筑和高耸结构的抗风设计应重点关注下击暴流气流涡旋的威胁;相比大气边界层近地风,下击暴流容易产生更大的瞬时极值风速,对工程结构威胁更大。

关键词:下击暴流;紊流度;紊流积分尺度;阵风因子;风场特性;相关性分析

中图分类号:TU312;TU14 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0126-08

Analysis of wind field characteristics of measured downburst

CHEN Chaohao¹, WANG Ziru¹, HUO Linsheng¹, HUANG Guoqing²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: At present, most of the studies on the wind field characteristics of downburst mainly focus on the wind speed model and partial wind field characteristics. Few studies on the relationship between wind field characteristics and mean wind speed, the correlation between different wind field characteristics or the comparison with the boundary layer surface wind characteristics are carried out. Based on the measured wind speed data of downburst, the time-varying mean wind speed of downburst is extracted by utilizing the moving average method, and then the fluctuating wind speed is obtained. On this basis, the characteristics of turbulence intensity, turbulence integral scale and gust factor of downburst are studied. The relationships between the above three characteristics and mean wind speed, as well as the correlations among the above three characteristics are analyzed. The results show that: 1) the turbulence intensity,

收稿日期:2020-07-13

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0701103)

作者简介:陈超豪(1989-),男,博士生,主要从事结构抗风与风振控制研究,E-mail:17chchen@mail.dlut.edu.cn.

霍林生(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:lshuo@dlut.edu.cn.

Received:2020-07-13

Foundation item:National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0701103)

Author brief:CHEN Chaohao (1989-), PhD candidate, main research interests: structural wind resistance and wind vibration control, E-mail: 17chchen@mail.dlut.edu.cn.

HUO Linsheng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: lshuo@dlut.edu.cn.

turbulence integral scale and gust factor of downburst are greater than the corresponding wind field characteristic of atmospheric boundary layer surface wind at the same height under the corresponding site category; 2) there is a negative correlation between the turbulence intensity of downburst and the average wind speed, as well as between the turbulence integral scale and the turbulence intensity while there is a positive correlation between the turbulence integral scale and the average wind speed, as well as between gust factor and turbulence intensity; 3) the wind resistance design for low-rise buildings should focus on the influence of fluctuating components of downburst, while the threat of airflow vortexes of downburst should be paid more attention for high-rise buildings and high-rise structures; 4) compared with the atmospheric boundary layer surface wind, downburst is prone to produce larger instantaneous extreme wind speed, which could pose greater threats to engineering structures.

Keywords: downburst; turbulence intensity; turbulence integral scale; gust factor; wind field characteristic; correlation analysis

作为自然灾害的重要类型之一,风灾因其发生频率高、波及范围广、直接灾害和次生灾害严重,早已引起了风工程界的广泛关注。对于高层建筑、大跨结构以及高耸结构等风敏感性结构而言,风荷载往往是影响其安全性的关键因素,因而也是结构设计中必须充分考虑的。分析已有风灾事故可知,风荷载轻则引起工程结构的局部破坏,重则导致工程结构的整体倒塌,不仅会造成重大的经济损失,还往往伴随着人员伤亡。

下击暴流是多种强风灾害中的一类特殊气候现象,其发生区域涉及全球多个国家和地区,在亚洲、澳洲以及北美等地更是频繁发生。统计资料显示,仅澳大利亚、美国以及南非等地,“风气候”这一罪魁祸首引发的大量输电线塔破坏事故中,就有约80%是由下击暴流或龙卷风等极端风气候所致^[1]。下击暴流大多产生于雷暴天气环境中,1978年,Fujita^[2]首先给出了下击暴流的定义,即一种生成于地面或近地面附近并且极具突发性和破坏性的强下沉气流。2009年5月,美国达拉斯牛仔训练场馆因遭受下击暴流袭击而倒塌^[3]。同年6月,下击暴流突袭江苏,镇江市的“5291江晋线”输电线塔突然倒伏,现场实测获得的下击暴流瞬时极值风速达到了33 m/s^[4]。2016年9月,南澳大利亚遭遇连续下击暴流袭击,直接导致了23座输电线塔的倒塌破坏^[5]。

可见,有效应对下击暴流灾害对工程结构的破坏,提出相应的抗风措施势在必行。为此,首先需要了解其风场特性。尽管下击暴流实测风速数据较难获得,但目前也有部分学者开展了针对下击暴流风场特性的相关研究。Chen等^[6]提出了一种新的非平稳风速分析框架,并将该框架应用于两组下击暴

流风速时间序列,重点分析了下击暴流的平均风速垂直廓线、紊流度垂直廓线、功率谱密度以及相关函数。Chen等^[7]利用两组全尺度实测下击暴流时间序列,分析了下击暴流的横向尺度相关性。Orwig等^[8]研究了下击暴流部分风场特性的时程变化及其随高度的变化关系。Lombardo等^[9]基于实测风速数据,对近地面下击暴流的风场特性进行了识别与分析,并推荐了可用于下击暴流参数计算的风速时距取值。Shu等^[10]基于香港6个气象站的6年风场资料,针对热带气旋、季风和下击暴流的阵风因子特性进行了研究。Su等^[11]以两组全尺度下击暴流风速记录为例,对3种不同时间窗尺度的下击暴流风速时变均值的计算方法进行了比较,并提出了合理的计算方法 and 时间窗大小。以上关于下击暴流风场特性的研究工作大多是围绕风速模型以及部分风场特性展开,甚少涉及针对风场特性与平均风速的关系、各类风场特性之间的相关性分析,以及与大气边界层近地风(以下简称常态风)的风场特性的比较研究。

笔者基于实测风速数据,针对下击暴流的风场特性进行研究,对比分析了下击暴流与常态风的紊流度、紊流积分尺度和阵风因子3个风场特性参数。另外,考虑到相关性对工程结构风压分布的影响,详细分析了下击暴流不同风场特性之间的相关性,以期下击暴流多发地区的工程结构抗风设计提供参考。

1 下击暴流风速数据采集

选取的下击暴流风速数据由美国德州理工大学(Texas Tech University, TTU)风工程实验室于

2008年6月19日实测采集得到,采集地点位于距离卢博克市(Lubbock)以西15 km的里斯技术中心(Reese Technology Center, RTC),采集现场为开阔地带。

数据采集现场布设了一座高200 m的塔架,如图1所示,在塔架0.9、2.4、4、10、116、158、200 m高度处分别安装了风速计,用于采集不同高度处的下击暴风风速数据^[12]。风速计采用RM Young Gill 27005T U-V-W三向风速传感器,可用于测量3个正交方向的风速,数据采集频率为30 Hz。

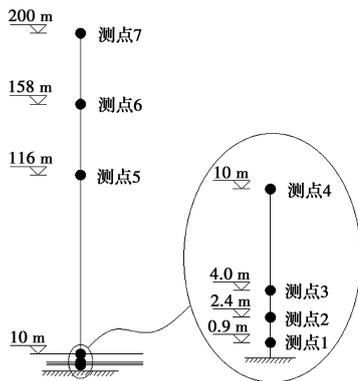


图1 下击暴风风速计安装示意图

Fig. 1 Installation diagram of downburst anemometers

2 下击暴风实测风速数据的处理

2.1 风速数据的预处理

由于篇幅限制,仅选取图1中测点1和测点5采集到的水平方向下击暴风风速数据作为研究对象。为方便表述,将测点1和测点5对应的风速时程分别命名为风速样本A和风速样本B。此外,考虑到数据采集过程中风速仪响应带来的高频噪声的影响,基于实测风速数据处理中常用的数值平均法,将下击暴风风速数据的频率降低为2 Hz,得到如图2所示的风速时程。

2.2 时变平均风速的提取

与常态风类似,下击暴风风速可以采用式(1)所示风速模型表征^[13]。

$$U(t) = \bar{U}(t) + u(t) \quad (1)$$

式中: $U(t)$ 、 $\bar{U}(t)$ 和 $u(t)$ 分别为下击暴流的总风速、时变平均风速和脉动风速。

采用滑移平均法^[14]提取下击暴风实测风速的时变平均值,进而获得脉动成分。图3所示为下击暴流的时变平均风速(以下简称平均风速)和脉动风

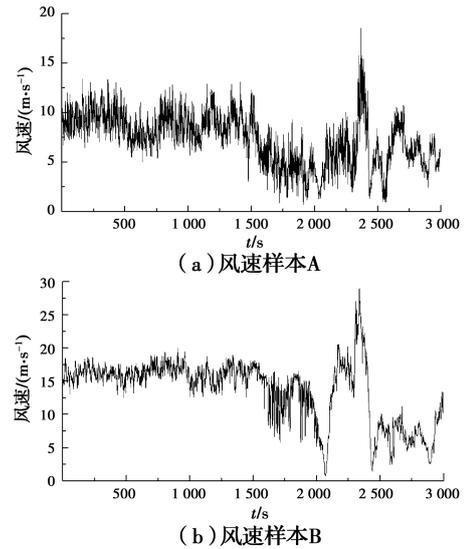


图2 实测下击暴风风速时程

Fig. 2 Wind speed time history of measured downburst

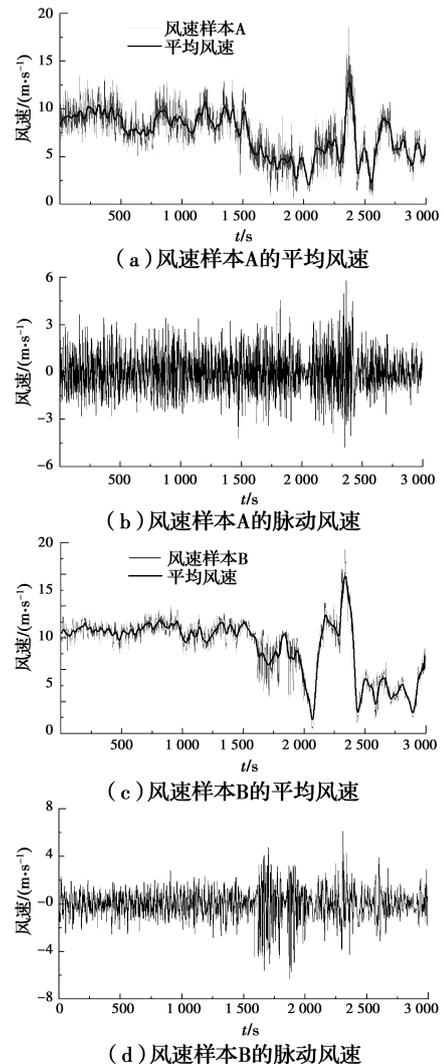


图3 下击暴流的平均风速和脉动风速

Fig. 3 Mean wind speed and fluctuating wind speed of downburst

速提取结果。可以直观地看出,样本 A 和样本 B 的平均风速均较好地反映了实测下击暴流风速的变化趋势。

在得到下击暴流的脉动风速后,脉动风速的概率密度 $p(u)$ 应接近高斯分布模型^[15]

$$p(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma_u^2}\right) \quad (2)$$

式中: σ_u 为脉动风速的标准差。

为进一步验证平均风速提取结果的正确性,在得到样本 A 和样本 B 的脉动风速后,分别计算两个样本脉动风速的概率密度分布情况,并进行数值拟合,结果如图 4 所示。可以看出,样本 A 和样本 B 脉动风速的概率密度分布情况均与高斯分布模型吻合较好,从而验证了平均风速提取结果的正确性。

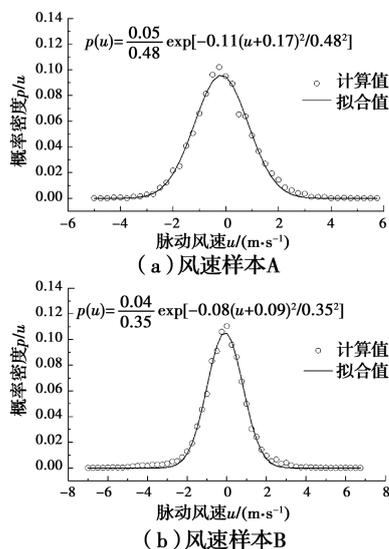


图 4 脉动风速的概率密度

Fig. 4 Probability density of fluctuating wind speed

值得注意的是,数值拟合结果和理想的高斯分布模型存在一定的偏差,说明下击暴流的脉动风速并不是严格意义上的零均值平稳随机过程,这是由于下击暴流风速的瞬时突变性导致了其本身强烈的非平稳性。

3 风场特性分析方法

3.1 紊流度

风的脉动强弱程度可以用紊流度来表征,空间中任意一点的紊流度可以定义为一定平均时距内脉动风速的标准差与平均风速的比值,即^[16]

$$I_u = \sigma_u / \bar{U} \quad (3)$$

式中: I_u 为紊流度。

而对于常态风,任意高度 z 处的紊流度还可以按式(4)计算^[16]。

$$I_u(z) = I_{10}(z/10)^{-\alpha} \quad (4)$$

式中: α 为地面粗糙度指数; I_{10} 为 10 m 高度处的名义紊流度。

3.2 紊流积分尺度

紊流积分尺度 L_u 是描述空间紊流中任意两点脉动风速相关性的重要参数,同时,该参数直接表征给定方向气流涡旋的平均尺度的大小。任意高度 z 处的紊流积分尺度可以定义为^[16]

$$L_u(z) = \frac{\bar{U}}{\sigma_u^2} \int_0^{\infty} R_u(\tau) d\tau \quad (5)$$

式中: $R_u(\tau)$ 为高度 z 处脉动风速 $u(t)$ 的自相关函数。

对于常态风,任意高度 z 处的紊流积分尺度可按式(6)计算^[16]。

$$L_u(z) = 100(z/30)^{0.5} \quad (6)$$

3.3 阵风因子

阵风因子 G 是与结构在服役期内可能遭遇的最大风速(即极值风速)紧密相关的重要参数,其定义可以采用多种形式,笔者将其定义为^[17]

$$G = 1 + \frac{\max(\overline{u(t_g)})}{\bar{U}} \quad (7)$$

式中: $\max(\overline{u(t_g)})$ 为阵风持续期 t_g 内脉动风速均值的最大值。

对于常态风,阵风因子和紊流度之间满足关系^[16]

$$G = 1 + gI_u \quad (8)$$

式中: g 为峰值因子,按规定一般取 2.5。

4 下击暴流风场特性分析

由于下击暴流具有强烈的非平稳性,且下击暴流的持续时间通常较短,一般不超过 600 s,因此,Holmes 等^[18]指出,传统的基于 10 min 或 1 h 时变平均的处理方法并不适用于下击暴流风场特性相关参数的计算。文献[9]指出,下击暴流相关参数计算的基本时距可以取 60~240 s。结合所取下击暴流风速样本的时程情况,选取 60 s 作为下击暴流相关参数计算的基本时距。此外,在得到下击暴流的风场特性后,将其与常态风的风场特性参考值进行了比较。

4.1 紊流度

图 5 给出了两个下击暴流风速样本的紊流度时

程,可以看出,样本 A 和样本 B 的紊流度在约 0~1 500 s 时段较为稳定,而在约 1 500~3 000 s 时段波动较大,这是由于两个风速样本在该时段的平均风速波动较大所致。

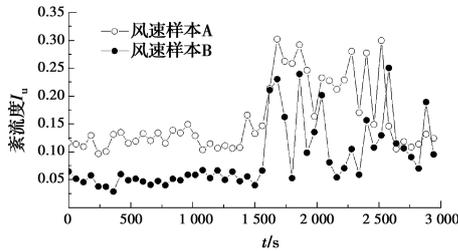


图 5 下击暴流的紊流度

Fig. 5 Turbulence intensity of downburst

为了与常态风的风场特性进行比较,表 1 给出了下击暴流两个风速样本各风场特性的最大值、平均值和最小值,以及相同地貌下测点 1 和测点 5 对应高度处常态风风场特性的计算参考值。从表 1 的对比结果可知,样本 A 和样本 B 的紊流度最大值分别达到了 0.302、0.251,均明显大于测点 1 和测点 5 所在高度处常态风的紊流度参考值 0.201 和 0.097,说明下击暴流中的脉动成分多于常态风中的脉动成分,气流更加不稳定,更容易对结构造成威胁。

表 1 风场特性对比

Table 1 Comparison of wind field characteristics

样本	取值	紊流度 I_u	紊流积分尺度 L_{u_0}/m	阵风因子 G
样本 A	最大值	0.302	118.45	1.531
	平均值	0.121	69.273	1.249
	最小值	0.096	22.511	1.135
样本 B	最大值	0.251	450.6	1.743
	平均值	0.088	268.133	1.240
	最小值	0.028	77.694	1.131
常态风	测点 1 位置	0.201	17.321	1.503
	测点 5 位置	0.097	196.638	1.243

4.2 紊流积分尺度

图 6 给出了下击暴流的紊流积分尺度时程。可以看出,样本 B 的紊流积分尺度明显大于样本 A 的紊流积分尺度,这是由于下击暴流竖向风剖面的性质所决定的。翟伟廉等^[19]指出,与常态风风速沿高度单调增加不同的是,下击暴流的风速随高度的增加先增大后减小,且在约 80 m 高度附近取得最大值。测点 1 所处位置低,风速较小,下击暴流的紊流积分尺度较小。

而测点 5 所在高度风速更大,由此产生的涡旋尺寸更大。同样地,从表 1 可知,样本 A 和样本 B 的紊流积分尺度最大值分别达到了 118.45、450.6 m,均显著大于测点 1 和测点 5 所在高度处常态风的紊流积分尺度参考值 17.321、196.638 m。如前面所述,紊流积分尺度表征了气流中涡旋平均尺度的大小,这意味着,与常态风相比,下击暴流会产生尺度更大的涡旋,这些涡旋更容易将结构包围,脉动风在结构各个部位所引起的动荷载更容易接近同步,从而威胁到结构的安全。尤其是测点 5 所在高度 116 m 处,紊流积分尺度很大,而这一高度是高层建筑和高耸结构经常触及到的,因此,在这类结构的抗风设计中,有必要针对下击暴流的威胁提出有效的应对措施。

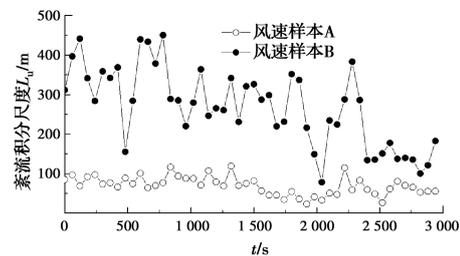


图 6 下击暴流的紊流积分尺度

Fig. 6 Turbulence integral scale of downburst

4.3 阵风因子

在常态风和台风的风场特性分析中,阵风因子的计算时距一般取 $t_g = 3$ s。针对下击暴流的瞬时特性,根据文献[8]中对计算时距的分析,取 $t_g = 1$ s,即采用时距更短的 1 s 阵风因子。计算得到样本 A 和样本 B 的阵风因子时程,如图 7 所示。同样,由于样本 A 和样本 B 的平均风速在约 1 500~3 000 s 时段波动较大,导致该时段内的阵风因子也呈现较大的波动性,而在 0~1 500 s 时段则变化较小。

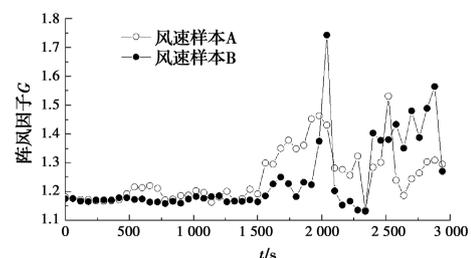


图 7 下击暴流的阵风因子

Fig. 7 Gust factor of downburst

表 1 的对比结果同样说明,相比常态风,下击暴流的阵风因子更大,尤其是样本 B 的最大阵风因子达到了 1.743,远大于对应高度处常态风的阵风因

子 1.243。这表明,相对常态风而言,下击暴流容易产生更大的瞬时极值风速,这对高层建筑以及高耸结构的安全非常不利。此外,可以看到,样本 B 的最大阵风因子大于样本 A 的最大阵风因子,如前面所述,这也是由下击暴流竖向风剖面的性质所决定的,相比于测点 1,测点 5 所在高度处容易产生更大的瞬时极值风速。

4.4 相关性分析

图 8、图 9 分别为下击暴流的紊流度、紊流积分尺度与平均风速的关系。可以看出,两个风速样本的紊流度与平均风速之间都表现出了负相关性,平均风速的增大会促使紊流度减小;而紊流积分尺度与平均风速之间则呈现正相关性,平均风速的增大会使得紊流积分尺度也随之增大。

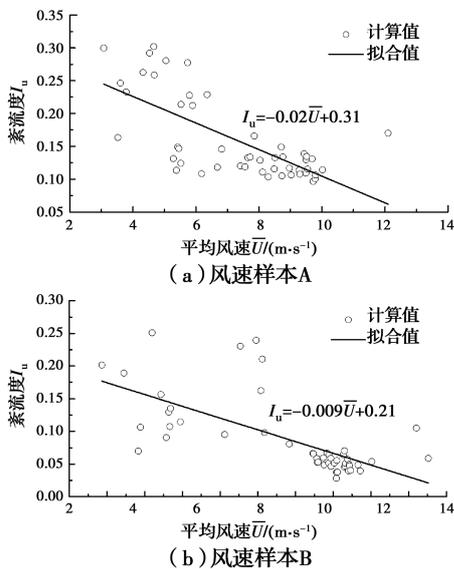


图 8 紊流度与平均风速的相关性
Fig. 8 Correlation between turbulence intensity and mean wind speed

图 10 为下击暴流的紊流积分尺度与紊流度的关系。可以看出,紊流积分尺度和紊流度之间存在负相关性,即当紊流度增大时,紊流积分尺度减小,这与二者和平均风速的相关性分析结果吻合。

通常认为下击暴流的阵风因子 G 和紊流度 I_u 之间存在着与台风风场特性类似的关系^[10],即

$$G = 1 + k_1 \times I_u + k_2 \times \ln(T/t_g) \quad (9)$$

式中: T 为平均风速计算时距; k_1 、 k_2 为拟合参数。在台风风场特性分析中, Ishizaki^[20] 建议 $k_1 = 0.5$, $k_2 = 1.0$; Cao 等^[21] 建议 $k_1 = 0.5$, $k_2 = 1.15$ 。

图 11 为下击暴流的阵风因子与紊流度之间的关系。对于样本 A, $k_1 = 0.22$ 、 $k_2 = 0.7$, 对于样本 B,

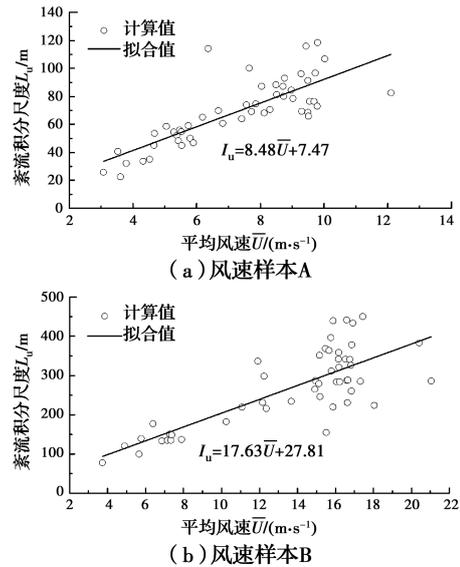


图 9 紊流积分尺度与平均风速的相关性

Fig. 9 Correlation between turbulence integral scale and mean wind speed

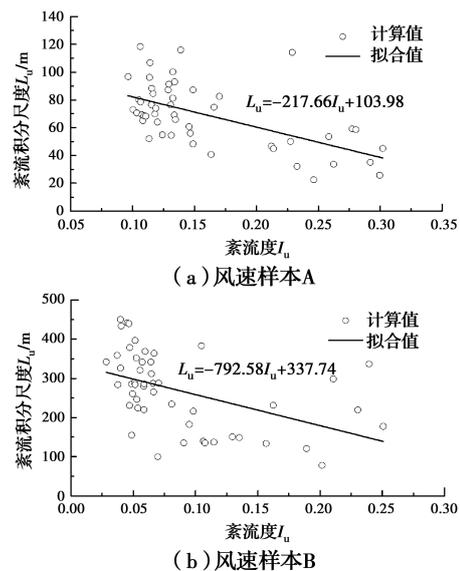


图 10 紊流积分尺度与紊流度的相关性

Fig. 10 Correlation between turbulence integral scale and turbulence intensity

$k_1 = 0.22$ 、 $k_2 = 0.53$ 。可以看出,下击暴流的阵风因子和紊流度之间同样存在着正相关性,但二者并不是普通的线性关系。此外,其相关性和台风风场特性类似,但拟合参数 k_1 和 k_2 的取值略小于台风风场特性分析中的结果。

综合以上相关性分析结果可知,对低矮建筑而言,由于所处高度下击暴流风速较小,气流涡旋的尺度较小,但脉动成分却较多,因此,在该类结构的抗风设计中应重点关注脉动成分的影响。而对高层建

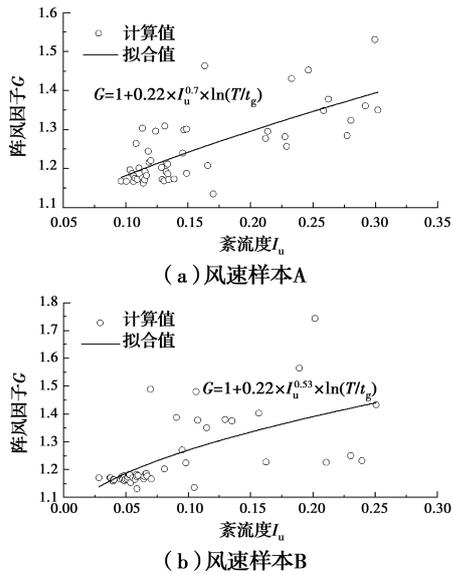


图 11 阵风因子与紊流度的相关性

Fig. 11 Correlation between gust factor and turbulence intensity

筑和高耸结构而言,由于所处高度下击暴流风速较大,气流涡旋的尺度往往很大,因此,在该类结构的抗风设计中需要侧重考虑气流涡旋的威胁。最后,针对下击暴流极值风速可能造成的结构破坏,在各类结构的抗风设计中都必须严格考虑。

5 结论

基于下击暴流实测风速数据,分析了下击暴流的风场特性,并与常态风的风场特性进行了对比,得到以下结论:

1)下击暴流的紊流度、紊流积分尺度以及阵风因子均大于相应场地类别下相同高度处常态风的对应风场特性。

2)下击暴流的紊流度与平均风速之间存在负相关性,平均风速的增大会促使紊流度减小;而紊流积分尺度与平均风速之间则呈现正相关性,平均风速的增大会使得紊流积分尺度也随之增大。

3)下击暴流的紊流积分尺度和紊流度之间表现为负相关,阵风因子与紊流度之间则呈现出与台风风场特性类似的非线性正相关关系。

4)下击暴流风场中,对于低矮建筑,应重点关注脉动成分的影响;而对于高层建筑和高耸结构,则应侧重考虑气流涡旋的威胁。

5)相比常态风,下击暴流能够产生更大的瞬时极值风速,会对结构构成更大的威胁,需要引起工程设计人员的充分重视。

参考文献:

- [1] SAVORY E, PARKE G A R, ZEINODDINI M, et al. Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower [J]. *Engineering Structures*, 2001, 23(4): 365-375.
- [2] FUJITA T T. Manual of downburst identification for project NIMROD [R]. SMRP Research Paper 156, University of Chicago, 104 [NTIS PB-286048], 1978.
- [3] TRAUTNER C, OJDROVIC R, SCHAFFER B W, et al. An investigation of the collapse of the Dallas cowboys practice facility [J]. *Bridges*, 2013, 10: 1268-1277.
- [4] 王唯. 基于有限质点法的下击暴流作用下输电塔一线体系倒塌模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018. WANG W. Collapse simulation of transmission tower-line system under downburst based on finite particle method [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [5] ELAWADY A, ABOSHOSHA H, EL DAMATY A, et al. Aero-elastic testing of multi-spanned transmission line subjected to downbursts [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, 169: 194-216.
- [6] CHEN L, LETCHFORD C W. Proper orthogonal decomposition of two vertical profiles of full-scale nonstationary downburst wind speeds [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, 93(3): 187-216.
- [7] CHEN L, LETCHFORD C W. Multi-scale correlation analyses of two lateral profiles of full-scale downburst wind speeds [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, 94(9): 675-696.
- [8] ORWIG K D, SCHROEDER J L. Near-surface wind characteristics of extreme thunderstorm outflows [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(7): 565-584.
- [9] LOMBARDO F T, SMITH D A, SCHROEDER J L, et al. Thunderstorm characteristics of importance to wind engineering [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 125: 121-132.
- [10] SHU Z R, LI Q S, HE Y C, et al. Gust factors for tropical cyclone, monsoon and thunderstorm winds [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 142: 1-14.
- [11] SU Y W, HUANG G Q, XU Y L. Derivation of time-

- varying mean for non-stationary downburst winds [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 141: 39-48.
- [12] LOMBARDO F T. Analysis and interpretation of thunderstorm wind flow and its effects on a bluff body [D]. Texas: Texas Tech University, 2009.
- [13] CHAY M T, ALBERMANI F, WILSON R. Numerical and analytical simulation of downburst wind loads [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(2): 240-254.
- [14] SOLARI G, BURLANDO M, DE GAETANO P, et al. Characteristics of thunderstorms relevant to the wind loading of structures [J]. *Wind and Structures*, 2015, 20(6): 763-791.
- [15] XU Y L, CHEN J. Characterizing nonstationary wind speed using empirical mode decomposition [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(6): 912-920.
- [16] 武岳, 孙瑛, 郑朝荣. 风工程与结构抗风设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.
WU Y, SUN Y, ZHENG CR. Wind engineering and structural wind resistant design [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2014. (in Chinese)
- [17] 邝伦海, 李秋胜, 胡非. 城市地区近地强风特性实测研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(2): 8-12.
- ZHI L H, LI Q S, HU F. Field measurements of strong wind characteristics near ground in urban area [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2009, 36(2): 8-12. (in Chinese)
- [18] HOLMES J D, HANGAN H M, SCHROEDER J L, et al. A forensic study of the Lubbock-Reese downdraft of 2002 [J]. *Wind and Structures*, 2008, 11(2): 137-152.
- [19] 瞿伟廉, 王锦文. 下击暴流风荷载的数值模拟[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(2): 70-74.
QU W L, WANG J W. Numerical simulation of downburst wind loads [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008, 30(2): 70-74. (in Chinese)
- [20] ISHIZAKI H. Wind profiles, turbulence intensities and gust factors for design in typhoon-prone regions [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 13(1/2/3): 55-66.
- [21] CAO S Y, TAMURA Y, KIKUCHI N, et al. Wind characteristics of a strong typhoon [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(1): 11-21.

(编辑 胡玲)