



不同下垫面的热带气旋强风阵风系数研究

陈雯超^①, 宋丽莉^{②③*}, 植石群^①, 黄浩辉^①, 秦鹏^①

① 广东省气候中心, 广州 510080;

② 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080;

③ 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

* E-mail: llsong@grmc.gov.cn

收稿日期: 2011-04-18; 接受日期: 2011-06-28

国家自然科学基金重点项目(批准号: 90715031)、国家自然科学基金项目(批准号: 40775071)和国家科技部公益性行业科研专项(批准号: GYHY200806012)资助

摘要 利用设置在近海海上和海岸上的3个观测塔共同获取的一个强台风过程数据以及3个观测塔1个年度的梯度风实测资料, 对观测塔不同方位的下垫面进行分类并定量计算出塔周边不同下垫面的粗糙长度参数, 在对强台风“黑格比”的强风数据代表性判别和样本筛选的基础上, 分析了不同下垫面的热带气旋强风阵风系数变化特征, 发现以下观测事实 and 变化规律: 1) 依据实测风资料, 采用对数风廓线法给出的中性大气层结条件下的粗糙长度参数, 能够客观刻画出下垫面的细微变化; 2) 台风强风阵风系数不随风速大小产生趋势变化, 但在粗糙下垫面上会产生很大的变幅, 这对工程结构的设计取值将产生重要影响; 3) 阵风系数的高度变化呈幂指数或对数律分布, 幂指数法可更好地拟合较光滑下垫面的近地层阵风系数廓线, 对粗糙下垫面对数律拟合效果略好; 4) 对实测数据的分析还发现, 阵风系数与其下垫面粗糙长度之间可用幂指数或线性方程来描述; 5) 本观测个例的阵风系数与WMO的推荐值存在差异——粗糙下垫面的离岸阵风系数比WMO推荐值大, 而来自光滑下垫面的离海阵风系数则小于WMO的推荐值。

关键词

热带气旋
下垫面粗糙度
阵风系数

1 引言

阵风系数是阵风风速和平均风速之间理论上的转换系数, 可直观地表征气流中湍流运动强弱. 阵风系数在风工程和气象界被广泛应用, 因为阵风系数所表征的近地紊流风(即湍流)对建筑 and 结构的作用是风工程力学的核心问题^[1], 其与结构相互作用而产生的动力风效应, 即风致振动问题是现代结构风工程的主要研究方向之一^[2]. 我国现行的建筑结构规范给出了4类粗糙度条件下离地面5至300 m各高度层

的阵风系数^[3]. 但近几年对登陆热带气旋实测资料研究显示, 现行规范推荐的关于表征阵风特性的参数并不能完全适用于热带气旋影响的情况^[4, 5], 这主要由于热带气旋特有的涡旋结构导致它的湍流运动比常态风况更强, 当叠加了不同的下垫面效应之后, 其风场特别是湍流运动会产生显著改变^[4]. 国内外学者^[6-10]从多个热带气旋个例的实际观测研究中发现, 其阵风特性随下垫面粗糙长度的变化而显著改变, 甚至台风中心经过前和经过后不同来向风的阵风系数会因其经过的下垫面的不同而明显不同. Powell

等人^[11]在较全面的热带气旋影响下的海洋边界层风廓线测量基础上,建立了美国受热带气旋影响的气象站各方位粗糙度、零平面位移和实况照片等特征资料库,为热带气旋风况的准确判别提供详细依据;鉴于热带气旋特有的近地层涡旋型风场特点,WMO(国际气象组织)组织专家根据各国获取的热带气旋实测个例(但其中没有涉及中国的观测个例),研究制定热带气旋影响的不同下垫面条件下各种时距风速的转换^[12],该技术文件主要推荐了海上、陆地、离岸和离海等4种下垫面条件下各时距风速之间的转换系数,并特别声明该技术文件还需在取得更多的实测个例基础上予以修订和完善。

本文利用登陆我国的强台风“黑格比”路径上的3个观测塔实测数据以及3个观测塔1个年度的梯度风实测资料,在分类计算观测塔不同方位的下垫面粗糙长度参数基础上,研究热带气旋强风在不同下垫面的阵风系数变化特征,以期为热带气旋影响地区的工程抗风和防台减灾预警研究提供参考。

2 分析数据说明

2.1 数据来源和观测设置

热带气旋属于中尺度大气涡旋结构系统,其中心、眼壁和外围的近地层风况特征差异显著^[4, 5],工程抗风关注的强风主要出现在紧邻热带气旋中心附近的眼壁区域。由于登陆热带气旋的强随机性,要完整地观测到适于工程抗风研究应用的包括眼区、眼壁和外围风区的强风风况数据的机会相当少。从我国近十几年来获取的登陆热带气旋近地层观测资料中,

选取了能够较完整观测到眼区、眼壁和外围强风区风况数据的强台风“黑格比”(中心最大风力达到15级以上的热带气旋称为强台风)观测个例,该强台风于2008年9月24日6时45分(北京时间)在广东省茂名市电白县陈村镇沿海地区登陆,在“黑格比”中心经过的路径上,有3座设置于近海海上和海岸上处于不同下垫面上的观测塔获取了该台风完整的过程风况数据(见图1)。

图1显示了强台风“黑格比”路径与3个观测塔的相对位置。

1) 近海海上100 m高观测塔位于离陆地海岸最短距离4.5 km的峙仔岛上,该小岛露出海面的部分长约90 m、宽约40 m,地面为沙石间或有稀疏的杂草。桅杆式气象塔塔基位于小岛中间隆起的小山包上,塔基离海平面10 m,在塔的10, 20, 40, 60, 80和100 m等6个层次设置了风速观测,风向观测高度为10, 60和100 m等3个层次。塔基所在的小山包呈东北-西南走向的长条状,山包底部宽5 m,长约30 m,由于该山包很小,对观测塔的测风影响甚微,因此该塔的各层观测可以较好地代表海面上20, 30, 50, 70, 90和110 m等6个高度的风速以及20, 70和110 m等3个层次的风向。

2) 在“黑格比”台风路径附近的覃巴和吴阳海岸,分别设有80和70 m高的桅杆式观测塔,其中,覃巴塔所在的海岸线为东-西走向,塔基海拔高度19 m,由于该塔附近为较密集的树林,因此代表10 m高度的风速观测实际设在12 m高度上,其他风速观测层高为30, 50, 70和80 m,风向观测层高为10和70 m,该塔北侧附近的沿岸区域分布有居民区;吴阳塔所

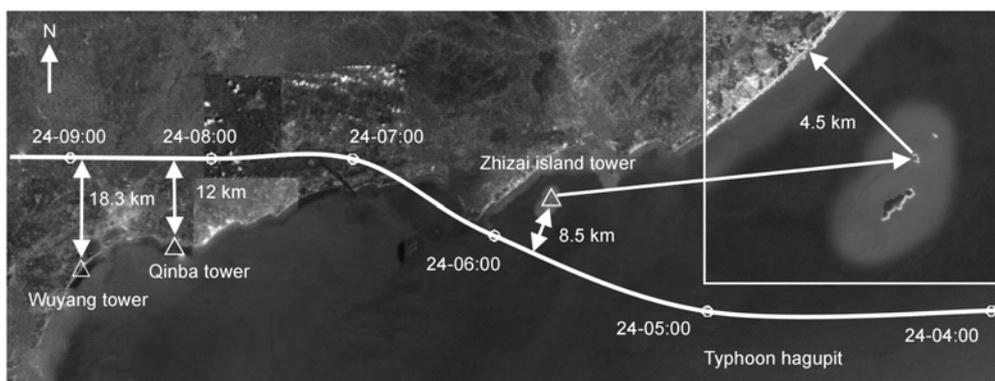


图1 强台风“黑格比”路径与观测塔的相对位置

在的海岸线为东北-西南走向, 塔基海拔高度为 7 m, 其周围均为稀疏低矮的灌木, 在观测塔西北侧 2 km 远处有居民区分布, 风速观测层为 10, 30, 50 和 70 m, 风向观测层为 10 和 70 m.

3 个观测塔均采用美国生产的 NRG-Symphonie 型测风仪, 其运行环境温度为 $-55^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$, 风速量程范围为 1~96 m/s, 在 5~25 m/s 范围内精度为 0.1 m/s. 风速数据采集的时间步长为 1 s, 记录每个 10 min 平均风速、最大阵风(3 s)风速以及时距为 1 s 风速相对 10 min 平均风速的标准差等.

峙仔岛、覃巴、吴阳观测塔所在位置距离“黑格比”中心的最短距离分别为 8.5, 12 和 18.3 km; 在“黑格比”强台风经过时, 峙仔岛塔 100 m 高度测得的 10 min 平均最大风速 48.5 m/s, 极大(3 s)风速为 59.8 m/s, 覃巴塔 70 m 高度测得的 10 min 平均最大风速 33.9 m/s, 极大(3 s)风速为 43.6 m/s, 吴阳塔 60 m 高度测得的 10 min 平均最大风速 31.3 m/s, 极大(3 s)风速为 44 m/s.

2.2 台风观测数据代表性判断和分析样本选取

按照文献[13]的规定, 对 3 个测风塔数据进行初步处理, 发现峙仔岛 90 m 高处的风速仪和 20, 110 m 处的风向仪在台风强风时损坏, 故分析不涉及这些数据.

由于台风天气系统的涡旋结构特征, 导致其核心、眼壁强风区至外围环流等不同位置处的近地层风场结构和风脉动特性显著不同^[4]. 由于工程抗风研究主要关注强风风况, 因此筛选本研究的基础数据首先需要能够代表台风眼区、眼壁强风和外围大风等较完整的过程观测数据. 根据台风的涡旋系统结构以及强台风等级标准, 在此判断台风核心强风区域是否经过观测点的条件为同时满足以下 2 点: 1) 观测点获取的 8 级(10 min 平均风速为 17.2 m/s)以上风速的风向需要连续转换方位角度大于 120° ; 2) 台风过程的风速时程曲线应呈 M 型“双峰”变化, “双峰”之间出现 10 min 平均风速小于 11 m/s(5 级)的风速时, 可以判断为台风眼区经过^[14]. 图 2 给出“黑格比”过程中 3 个观测塔的风速、风向时程变化.

图 2 显示, 台风过程 8 级以上大风的风向在峙仔岛塔沿顺时针方向连续转换了 210° 方位角, 在覃巴和吴阳塔沿逆时针方向连续转换的方位角分别为 169° 和 150° ; 峙仔岛、覃巴、吴阳等 3 个观测塔测得的过程风速均呈 M 型“双峰”分布, “双峰”之间 10 m 高度(峙仔岛为 20 m)的 10 min 平均最小风速分别为 11.9, 3 和 6.4 m/s, 可以判断为台风“眼区”; 并由此可以判断 3 个观测塔获取的“黑格比”强台风数据包含了台风中心眼区和眼壁强风区在内的完整过程的强风

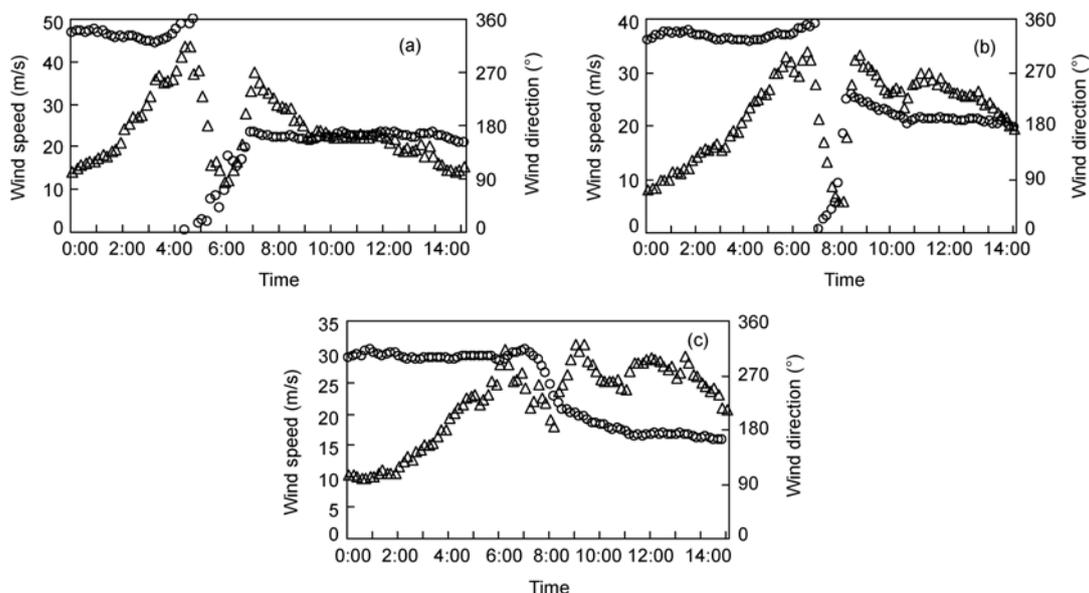


图 2 强台风“黑格比”70 m 高度层的风速、风向时程变化

(a) 峙仔岛塔; (b) 覃巴塔; (c) 吴阳塔 (Δ : 风速; \circ : 风向)

风况数据, 能够代表该台风过程特有的强风特性.

3 下垫面特征的表达和分类

影响空气运动的地球表面地形、地貌、植被、建筑和水陆分布等的差异决定了其粗糙的程度, 在此采用粗糙长度来定量表达下垫面的动力特征.

3.1 粗糙长度的计算方法

空气动力粗糙度长度被定义为风速为零的高度^[15]. 粗糙长度的计算方法主要有风、温观测确定方法和粗糙元形态学计算方法^[16, 17]. 形态学方法对粗糙度精确估算的前提是对下垫面粗糙元的详细、精确了解, 然而获取准确的粗糙元信息并不容易. 文本利用气象塔梯度式实测风资料, 运用高度-风速半对数图的对数风廓线拟合方法来计算粗糙长度, 可以客观反映当地下垫面粗糙特征.

根据莫宁和奥布霍夫研究提出的对数风速廓线表达式^[18]:

$$U(z) = \frac{1}{\kappa} u_* \left[\ln \frac{z}{z_0} - \psi \left(\frac{z}{L} \right) \right]. \quad (1)$$

(1)式中, κ 为冯·卡门常数, u_* 为摩擦速度, z_0 为粗糙长度, ψ 为莫宁-奥布霍夫函数, L 为莫宁-奥布霍夫长度. 在中性大气层结条件下, $L = \infty$, $\psi = 0$, 则公式(1)变为

$$U(z) = \frac{1}{\kappa} u_* \ln \frac{z}{z_0}. \quad (2)$$

因为强风条件下多近似为中性层结, 则可根据(2)式得到粗糙长度 z_0 的计算公式:

$$z = z_0 e^{\frac{\kappa U(z)}{u_*}}. \quad (3)$$

根据(3)式, 将 u_* 和 z_0 作为 2 个拟合参数, 利用最小二乘法进行拟合, 然后采用图解法, 在半对数图上将测风塔各高度层风速实测值的拟合直线外推到风速为零时的对应高度, 此高度即为粗糙长度 z_0 .

3.2 基于下垫面特征的风况分类

鉴于下垫面的粗糙程度能够直接影响其近地层风况的特性, 因此, 有必要根据各个测风塔周边下垫面特点, 将测风塔的风观测数据进行“风况”分类, 以定量了解不同下垫面上风况的特征参数差别. 在此

参考 WMO 推荐的技术文件^[12]的思路方法进行“风况”分类.

峙仔岛观测塔位于离海岸最短距离 4.5 km 处的近海海上(图 1), 该塔的测风数据可以代表“近海海面风况”, 覃巴和吴阳观测塔均位于海岸边(图 1), 可以代表“近海海岸风况”. 根据 3 个观测塔周边地形和海陆分布特点, 可以再将每个观测塔风况大致分为 2 类, 如图 3 所示: 1)峙仔岛塔的 $67.5^\circ \sim 247.5^\circ$ (沿逆时针方向旋转)方位上, 主要为开阔的海面, 此方位区域的来风, 可以代表离海的近海海面风况, 其他方位近处为海面, 远处为陆地, 此方位区域来风可以代表离岸的近海海面风况(见图 3(a)); 2)覃巴塔 $90^\circ \sim 247.5^\circ$ (沿逆时针方向旋转)方位上, 为开阔的海面, 此方位区域的来风可以代表离海的海岸风况, 其他方位均为陆地, 该方位区域来风可以代表离岸的海岸风况(图 3(b)); 3)吴阳塔的 $45^\circ \sim 202.5^\circ$ (沿逆时针方向旋转)方位上, 全部为开阔的海面, 此方位区域的来风, 可以代表离海的海岸风况, 其他方位均为陆地, 该方位区域来风可以代表离岸的海岸风况(图 3(c)).

3.3 不同下垫面的粗糙长度

根据公式(3)应在中性大气层结条件下适用的要求, 并考虑工程抗风主要关注强风特征的需求, 因此, 需要对测风塔 1 年度的测风数据进行筛选和分类: 1)符合中性大气层结条件的风况数据选择是依据 Pasquill 大气边界层的稳定性分级标准, 当 10 m 高平均风速 > 6 m/s 时, 只有在强太阳辐射出现时, 大气层结才为弱不稳定层结, 其他情况均为中性层结, 据此, 选取了 3 个观测塔 10 min 平均风速大于 6 m/s 的风速样本. 为了进一步确定该样本符合中性层结, 根据(2)式对每个风速样本进行对数拟合, 从中筛选实测风速与拟合风速的残差平方和的平均值 $\leq (0.2 \text{ m/s})^2$ 的样本作为下垫面粗糙长度计算的基础数据; 2)考虑具有强烈涡旋特征的台风系统可能会干扰粗糙长度的稳定性, 计算样本选取了“常态风况”(非台风影响)数据; 3)按照第 3.2 节的风况分类, 将每个测风塔测风数据分为“离海”和“离岸”两类.

对筛选的数据样本, 同时采用对数函数和幂指数函数 2 种方法进行平均风速廓线拟合(见图 4). 可以看出, 在最低观测层(10 或 12 m)以下, 对数函数(实线)拟合曲线的风速衰减比幂指数(虚线)拟合线要快, 这是由于幂指数函数认为高度为零(地面或水面)

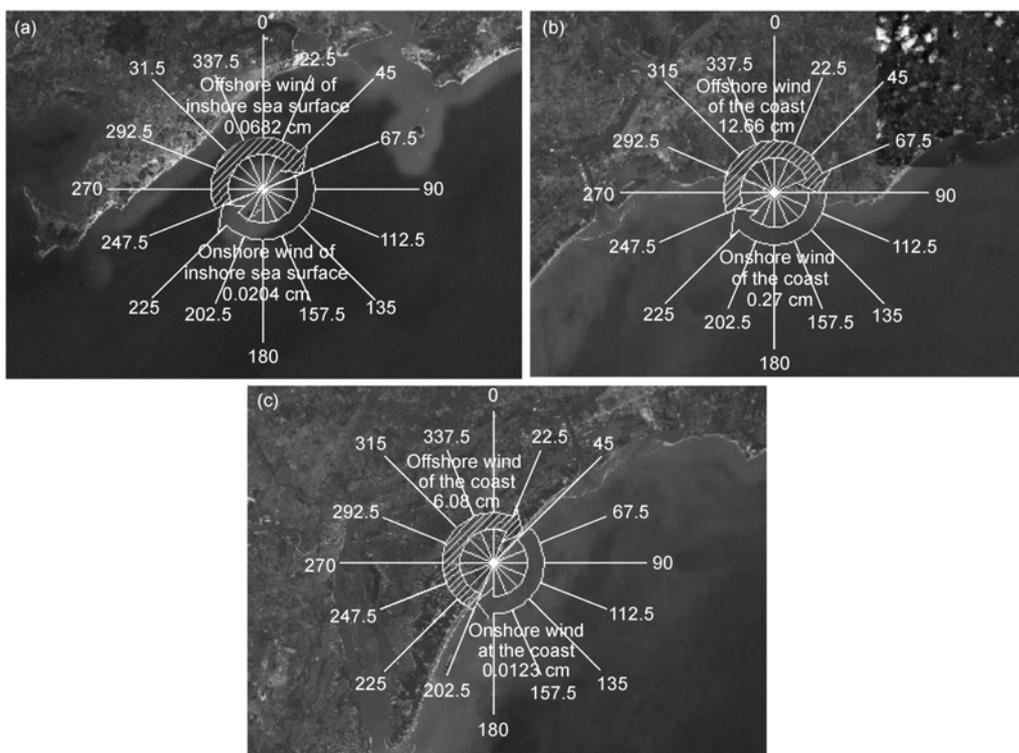


图3 各测风塔风况分类示意图(填充箭头为离岸风况方位, 空心箭头为离海风况方位)
(a) 峙仔岛塔; (b) 覃巴塔; (c) 吴阳塔

处风速才会为零, 而对数函数则认为在粗糙长度的高度处风速就已经为零; 而在最低观测层以上, 对数和幂指数函数都能很好地拟合风速的垂直分布. 由于工程抗风主要关注 10 m 以上的风况参数, 因此就工程抗

风研究而言, 2 种函数在贴地层的差异通常可以忽略.

对筛选后的数据样本, 采用对数风廓线拟合方法, 分别计算 3 个塔 2 类不同下垫面在中性大气层结条件下的粗糙长度, 见表 1.

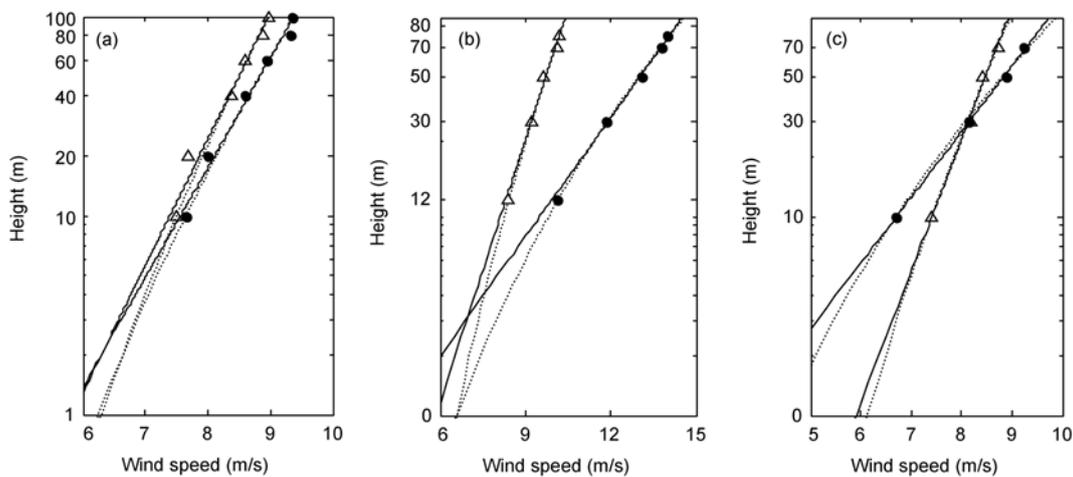


图4 常态风况下各塔两类下垫面的风廓线拟合图
(a) 峙仔岛塔; (b) 覃巴塔; (c) 吴阳塔 (●: 离岸风; △: 离海风; 实线: 对数函数; 虚线: 幂指数函数)

3 个塔不同类型下垫面粗糙长度计算结果显示, 海洋下垫面与陆地下垫面相比, Z_0 值要偏小 2 个数量级. 同是海洋下垫面, 但吴阳塔 $45^\circ\sim 202.5^\circ$ 方位(逆时针旋转, 下同)是完全开阔的海面, 所以其 Z_0 值最小, 仅为 0.0123 cm , 峙仔岛塔因在面向海洋的方位上还存在一座小岛屿, 从而导致其 Z_0 值略大, 为 0.0204 cm , 两者均接近于文献[18]中给出的砂地粗糙长度 $0.01\sim 0.1\text{ cm}$ 的下限; 由于覃巴塔面向海洋的方位实际上是海湾, 仍会受到远处和附近陆地的影响, 因而其 Z_0 值是 3 个塔中最大的为 0.27 cm , 接近文献[18]中给出的雪地情况. 可见下垫面细微的差异仍能够从粗糙长度上表达出来.

覃巴和吴阳 2 个海岸塔观测的陆地下垫面粗糙长度分别为 12.66 和 6.08 cm , 介于文献[18]中给出的高草地和矮棕榈之间.

4 不同下垫面的台风强风阵风系数

4.1 阵风系数定义

阵风系数是时距较短的阵风风速和时距较长的平均风速之间理论上的转换系数. WMO^[12]给出阵风系数的定义为: 在时间间距为 T_0 的时间内持续时间为 τ 的最大阵风风速与时距为 T_0 的平均风速之比, 即

$$G_{\tau, T_0} = \frac{V_{\tau, T_0}}{V_{T_0}}. \quad (4)$$

(4)式中, V_{τ, T_0} 为在观测周期 T_0 中, 持续时间为 τ 的风速最大值(阵风), V_{T_0} 为观测周期 T_0 的风速平均值. 目前我国气象和风工程领域一般取 T_0 为 10 min (这也是世界气象组织推荐的平均风速标准), 取 τ 为 3 s ,

因此, 本文主要针对阵风 3 s 相对于平均风速 10 min 的阵风系数 G_{3600} 进行分析.

4.2 强风数据样本选取

多篇文献给出的阵风系数随风速大小的变化研究结果显示, 阵风系数随平均风速的增加有减小的趋势, 当风速增大到某一阈值后, 阵风系数的趋势变化消失而只在一定的变幅内波动^[19-21], 王丙兰等人^[22]根据 Davis 和 Newstein(1968)提出的阵风风速和平均风速的关系式计算了中国沿海的 4 个台风个例, 发现对于平滑下垫面, 平均风速达到 14 m/s 这一阈值后阵风系数就会基本保持不变, 因此, 强风数据样本首先要满足平均风速大到足以使阵风系数的趋势变化消失的风速阈值; 此外, 由于 3 个观测塔离台风中心的远近不一、观测数据包括了低层(峙仔岛塔 20 m 、吴阳和覃巴塔 10 m)和高层(70 m)等 2 个特征高度, 同时还要考虑两类下垫面均需有一定数量的代表样本(尤其吴阳塔 10 m 高度的离岸风较小)等, 因此, 对 3 个塔 70 m 高度层和峙仔岛塔 20 m 高度层的数据, 强风样本的选取标准是风速大于 10 级(10 min 平均风速 $\geq 24.5\text{ m/s}$), 对吴阳和覃巴塔 10 m 高度选取风速大于 6 级(10 min 平均风速 $\geq 10.8\text{ m/s}$)的数据.

图 5 给出了峙仔岛、覃巴和吴阳等 3 个观测塔 2 个特征高度层在“黑格比”台风影响时 2 种不同下垫面上来风的阵风系数随强风风速的变化, 可以看出, 2 种下垫面的阵风系数没有随风速的增大产生明显趋势变化, 符合强风数据样本选取标准.

4.3 不同下垫面的阵风系数变化

从图 5 显示的 2 个特征高度上离岸(实心圆点)和离海(空心三角)风况代表的不同垫面的阵风系数

表 1 常态风况下各观测塔不同下垫面的粗糙长度

Observation site	Type of wind	Azimuth (anticlockwise)	Description of the underlying surface	Roughness length (cm)
Zhizai island	Offshore wind at inshore sea surface	$247.5^\circ\sim 67.5^\circ$	4.5 km wide sea area between the tower and the land	0.0682
	Onshore wind at inshore sea surface	$67.5^\circ\sim 247.5^\circ$	Open sea area, an island of 3.5 km^2 lies on $180\sim 210^\circ$ to the tower and about 1 km from the tower	0.0204
Qinba	Offshore wind at the coast	$247.5^\circ\sim 90^\circ$	Dense forest at the coast with residential area nearby	12.66
	Onshore wind at the coast	$90^\circ\sim 247.5^\circ$	Open sea area and the underlying surface of $211^\circ\sim 247.5^\circ$ to the tower is bay	0.27
Wuyang	Offshore wind at the coast	$202.5^\circ\sim 45^\circ$	coast with cultivated land and sparse forest and residential area	6.08
	onshore wind at the coast	$45^\circ\sim 202.5^\circ$	Complete open sea surface	0.0123

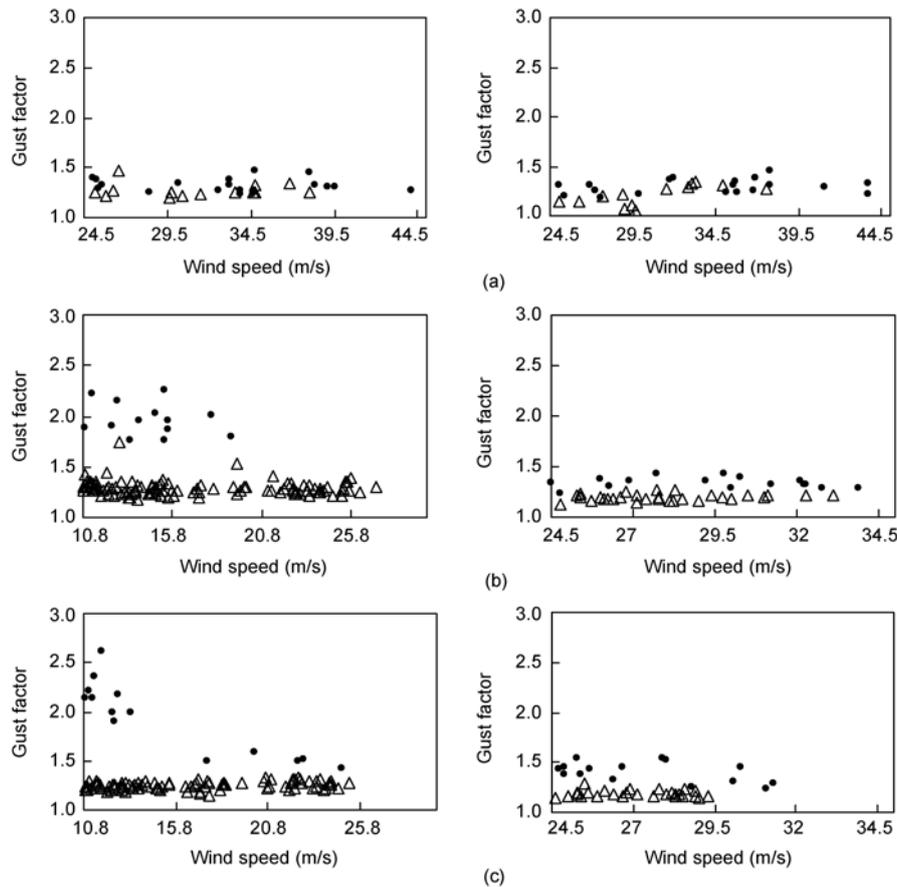


图5 台风强风影响的各塔不同下垫面低层(左侧)和高层(右侧)高度的阵风系数

(a) 峙仔岛塔; (b) 覃巴塔; (c) 吴阳塔 (●: 离岸风; △: 离海风)

变化, 可发现:

1) 离岸风的阵风系数变动幅度均大于离海风况, 并且低层的变幅明显大于高层, 这在覃巴和吴阳 2 个海岸塔表现的尤其显著, 可见, 虽然强风阵风系数不会随风速大小产生明显的趋势变化, 但仍会在某一幅度内波动, 下垫面越粗糙, 阵风系数波动幅度越大: 覃巴和吴阳塔 10 m 高度的离岸风况阵风系数标准差分别为 0.16 和 0.218, 离海风况分别为 0.071 和 0.066, 前者是后者的 2~3 倍; 70 m 高度的离岸和离海风况阵风系数波动幅度明显减小, 但离岸风况的阵风系数标准差仍是离海风况的 2 倍左右. 台风强风在粗糙下垫面产生的阵风系数的较大变幅, 显示了粗糙下垫面对台风这种涡旋式气流的动力作用被显著放大, 工程设计选取阵风系数时, 不宜只对实际观测的强风阵风系数进行简单的数学平均, 而应根据工程结构的特点和需要进行更细致地评估和参数选择.

2) 从同一个塔的离岸和离海风况的阵风系数差异来看, 峙仔岛塔(图 5(a))由于位于近海海面, 其离岸和离海 2 种下垫面上的阵风系数差异较小, 以 70 m 高度为例, 离岸和离海阵风系数分别为 1.29 和 1.21, 由于该塔离海风况的 $180^{\circ}\sim 210^{\circ}$ 方位约 1 km 远处的岛屿影响, 一定程度上增大了离海下垫面的粗糙度, 使该岛离岸风况的阵风系数比离海的值仅大了 7%; 覃巴和吴阳 2 个海岸塔 70 m 高度上的离岸阵风系数分别是 1.34 和 1.4, 比离海风况的阵风系数分别大了 13% 和 18%(表 2), 而在 10 m 高度的离岸阵风系数达 1.96 和 2.17, 分别比其离海阵风系数大 51% 和 72%. 可见, 即使同一个塔, 由于其各方位下垫面的差异将导致其阵风系数产生显著变化, 因此, 对工程应用来说, 观测评估出工程所在地最危险的强风方位上的阵风系数是十分必要的, 并且下垫面越粗糙, 其阵风系数的高度变化也越大.

3) 与 WMO 推荐的热带气旋影响下不同下垫面 10 m 高度的阵风系数 G_{3600} 值^[12]比较, “黑格比”台风影响时的覃巴和吴阳 2 个海岸塔 10 m 高度观测的离岸阵风系数分别达 1.96 和 2.17, 均比 WMO 推荐的 1.52 显著偏大, 而 2 个海岸塔实测的离海阵风系数分别为 1.29 和 1.26, 均比 WMO 推荐的 1.38 要小, 其原因是本文实测的“黑格比”台风观测数据更靠近台风中心位置, 更能够反映出台风的涡旋结构特征和眼壁强风在不同下垫面的综合影响, 而文献[12]采用的样本个案还包括了热带气旋的外围风况的观测数据.

4.4 不同下垫面的阵风系数高度变化

从实测发现阵风系数随高度的变化并不是均匀的, 利用选取的强风样本, 将各塔 2 种风况各高度的阵风系数平均值点于图 6 中(空心菱形符号为离岸风、实心圆点符号为离海风), 可以发现, 阵风系数随高度的变化大致呈指数或对数型分布, 因此, 采用幂指数和对数律分布方法, 对阵风系数的垂直廓线进行拟合(图 6), 幂指数和对数律公式分别为以下两式:

$$G_{z_2} = G_{z_1} \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha, \quad (5)$$

$$G_z = \beta \left(\ln \frac{z}{z_0} \right)^{-1}, \quad (6)$$

其中, G_{z_1} 为 z_1 高度处的阵风系数, G_{z_2} 为 z_2 高度处的阵风系数, G_z 为 z 高度处的阵风系数, z_0 为下垫面粗糙长度.

从图 6 和表 3 显示的幂指数和对数拟合效果看, 幂指数律方法对光滑下垫面阵风系数廓线拟合效果(实线)很好, 位于海面上的峙仔岛塔的 2 种风况和 2 个海岸塔的离海风况的拟合残差方差均小于 10^{-5} , 而粗糙下垫面上, 2 种方法的拟合效果都略差一些, 从 2 个海岸塔的离岸风况拟合效果看, 对数律方法略优于指数律: 覃巴塔离岸风况的对数律廓线拟合残差方差比幂指数律的小 37%, 而吴阳塔离岸风况的 2 种方法拟合精度相近.

从阵风系数的廓线拟合的幂指数 α 值来看, 离

表 2 两类不同下垫面的台风强风阵风系数

Observation site	Observation height (m)	Offshore	Onshore	Gust factor ratio between offshore and onshore
Zhizai island	20	1.32	1.27	1.04
	70	1.29	1.21	1.07
Qinba	10	1.96	1.29	1.52
	70	1.34	1.19	1.13
Wuyang	10	2.17	1.26	1.72
	70	1.40	1.19	1.18

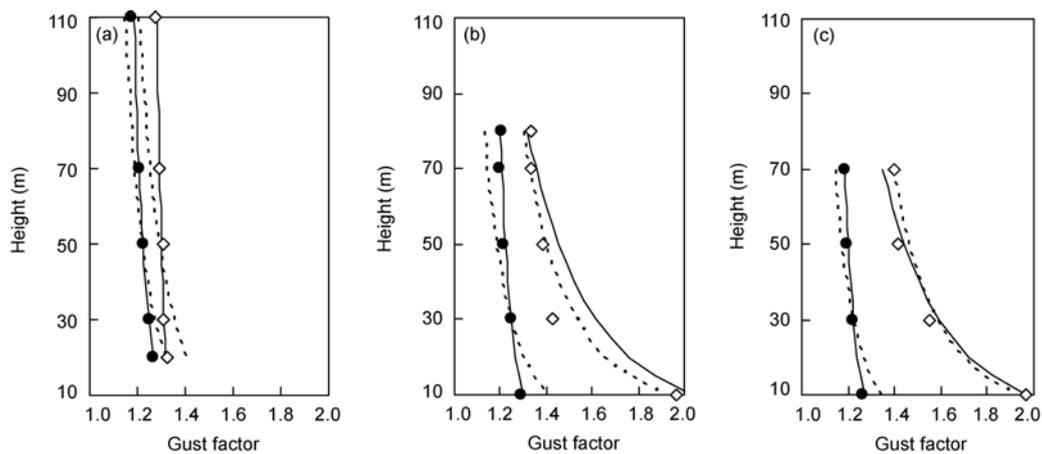


图 6 不同下垫面的阵风系数的高度变化及其拟合曲线

(a) 峙仔岛; (b) 覃巴; (c) 吴阳 (◇: 离岸风; ●: 离海风; 实线: 幂指数拟合曲线; 虚线: 对数拟合曲线)

表3 阵风系数随高度变化幂指数和对数拟合曲线的残差方差

Observation site	Power law fitting			Logarithmic fitting		
	Wind type	Z ₁ (m)	α	Residual	β	Residual
Zhizai island	Offshore	20	-0.0166	2.36×10 ⁻⁵	14.4300	3.26×10 ⁻³
	Onshore	20	-0.0404	1.51×10 ⁻⁵	15.1106	8.8×10 ⁻⁴
Qinba	Offshore	10	-0.2085	4.6×10 ⁻³	8.3530	2.9×10 ⁻³
	Onshore	10	-0.0381	2.97×10 ⁻⁵	11.5919	4.7×10 ⁻³
Wuyang	Offshore	10	-0.1936	1.18×10 ⁻³	9.8020	1.28×10 ⁻³
	Onshore	10	-0.0346	3.91×10 ⁻⁶	15.1238	1.95×10 ⁻³

岸的海岸风况α值在-0.2左右, 离海的海岸风况和近海海面上的2种风况的α值在-0.02到-0.04之间, 两者相差约1个数量级。

4.5 阵风系数与粗糙长度的关系分析

如前文所述, 不同类型的下垫面上, 台风强风阵风系数的大小和高度变化显著不同, 那么, 阵风系数与定量刻画下垫面类型的粗糙长度之间能否用数学表达式来描述呢? 将3个观测塔的2类风况阵风系数和相应的粗糙长度点在半对数坐标图中(图7), 可以

发现, 两者有很好的相关性, 分别采用线性和指数方法进行拟合, 建立台风强风的阵风系数与下垫面粗糙长度的线性关系式

$$G(z_0) = a \cdot z_0 + b, \tag{7}$$

和指数关系式

$$G(z_0) = c \cdot z_0^d, \tag{8}$$

(7), (8)式中, z₀表示粗糙长度, G(Z₀)表示粗糙长度为z₀时的阵风系数。

两种方法的拟合结果见图7和表4。从图7和表4

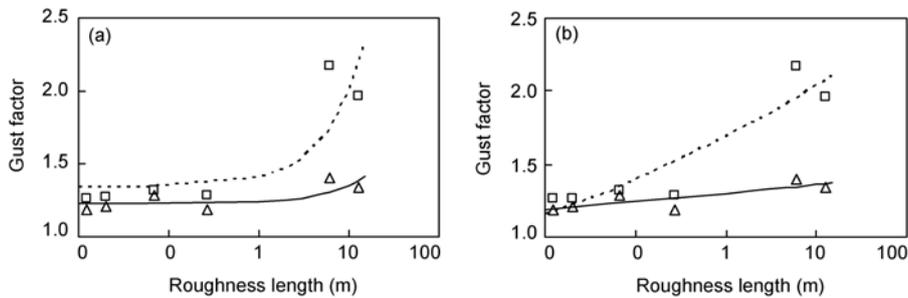


图7 阵风系数与粗糙长度的关系

(a) 线性拟合; (b) 幂指数拟合
 (□: 10, 20 m 实测阵风系数; △: 70 m 实测阵风系数; 虚线: 10, 20 m 拟合线; 实线: 70 m 拟合线)

表4 阵风系数与粗糙长度拟合曲线的参数与残差方差

Height of gust factor (m)	Linear fitting			Power law fitting		
	a	b	Residual	c	d	Residual
10, 20,	0.0657	1.3358	0.04115	1.3011	0.0193	0.00212
70	0.0121	1.2314	0.00309	1.6805	0.0825	0.02002

可见, 低层 10, 20 m 的阵风系数随粗糙长度的变化比较符合幂指数律, 而 70 m 高度层的阵风系数随粗糙长度的变化更符合线性分布。

5 小结与讨论

根据登陆我国的强台风“黑格比”路径附近的峙仔岛、覃巴和吴阳等 3 个观测塔实测资料, 在对各个观测塔不同方位的下垫面在中性大气层结条件下的粗糙长度参数进行计算以及对台风强风数据代表性判别、筛选基础上, 探讨了热带气旋强风在不同下垫面的阵风系数变化特征, 发现了一些对工程结构抗风设计有价值的观测事实和变化规律, 小结如下。

1) 根据工程抗风研究关注强风的需求, 利用非台风影响下并筛选中性大气层结的 1 年度实测风资料, 采用对数风廓线法给出各塔不同方位下垫面的粗糙长度参数, 能够客观、定量地刻画出在中性大气层结条件下各类下垫面的细微变化;

2) 台风强风阵风系数不随风速大小产生趋势变化, 但仍会在某一幅度内波动, 离岸风的阵风系数变幅均大于离海风况, 低层大于高层, 即下垫面越粗糙, 阵风系数变幅越大, 显示了粗糙下垫面对台风这种涡旋式气流的动力作用被显著放大, 这对工程结构的设计取值将产生重要影响, 工程设计选取阵风系数时, 不宜只对实际观测的强风阵风系数进行简单的数学平均, 而应根据工程结构的特点和需要进行更细致地评估和参数选择;

3) 即使同一个塔, 由于其各方位下垫面的差异

将导致其阵风系数产生显著变化, 这在覃巴和吴阳 2 个海岸塔表现的尤为突出, 两塔 10 m 高度的离岸阵风系数比其离海阵风系数大 51% 和 72%, 70 m 高度的离岸阵风系数分别比离海的大了 13% 和 18%, 因此, 对工程应用来说, 观测评估出工程所在地最危险的强风方位上的阵风系数是十分必要的;

4) 阵风系数的高度变化呈幂指数或对数律分布, 并且幂指数法可更好地拟合较光滑下垫面的近地层阵风系数廓线, 对粗糙下垫面, 对数律拟合效果略好; 离岸的海岸风况 α 值在 -0.2 左右, 离海的海岸风况和近海海面上的 2 种风况的 α 值在 -0.02 到 -0.04 之间, 两者相差约 1 个数量级;

5) 对实测数据的分析还发现, 阵风系数与其下垫面粗糙长度之间可以幂指数或线性方程来描述, 10, 20 m 高度层比较符合幂指数律, 70 m 高度层更符合线性分布;

6) 本观测个例的阵风系数与 WMO 的推荐值存在差异: 来自粗糙下垫面的离岸风阵风系数比 WMO 推荐值大, 而来自光滑下垫面的离海风阵风系数则小于 WMO 的推荐值, 这是由于本文实测的“黑格比”台风观测数据更靠近台风中心位置, 更能够反映出台风的涡旋结构特征和眼壁强风在不同下垫面的综合影响, 而文献[12]采用的样本个例还包括了热带气旋的外围风况的观测数据。

本文依据 3 个观测塔获取的一个具有典型台风强风特性的实测数据进行分析计算, 得出的观测事实和变化规律虽具有一定的代表性, 但仍需要更多的有效实测个例进行检验和完善, 以进一步研究取得更具普适性的参数、规律和分析方法。

参考文献

- 1 项海帆. 环境、灾害和力学. 力学与实践, 1991, 13: 1-6
- 2 项海帆. 结构风工程研究的现状和展望. 振动工程学报, 1997, 10: 258-263
- 3 中华人民共和国建设部. 建筑结构荷载规范(GB50009-2001). 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. 47-48
- 4 宋丽莉, 毛慧琴, 黄浩辉, 等. 登陆台风近地层湍流特性观测研究. 气象学报, 2005, 63: 915-921
- 5 宋丽莉, 庞加斌, 蒋承霖, 等. 澳门友谊大桥“鹦鹉”台风的湍流特性实测和分析. 中国科学: 技术科学, 2010, 40: 1409-1419
- 6 Naess A, Clausen P H, Sandvik R. Gust factors for locations downstream of steep mountain ridge. J Wind Eng Ind Aerodyn, 2000, 87: 131-146
- 7 Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A. Reduced drag coefficients for high wind speeds in tropical cyclones. Nature, 2003, 422: 279-283
- 8 Wang H, Li A Q, Guo T, et al. Field measurement on wind characteristic and buffeting response of the Runyang Suspension Bridge during typhoon Matsa. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52: 1354-1362

- 9 Schroeder J L, Simth D A. Hurricane bonnie wind flow characteristics as determined from WEMITE. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2003, 91: 767–789
- 10 Cao S Y, Tamura Y, Kikuchi N, et al. Wind characteristics of a strong typhoon. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2009, 97: 11–21
- 11 Powell M D, Bowman D, Gilhousen D, et al. Tropical cyclone winds at landfall. *Amer Meteor Soc*, 2004, 7: 845–851
- 12 Harper B A, Kepert J D, Ginger J D. Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions. In: *Sixth Tropical Cyclone RSMCs/TCWCs Technical Coordination Meeting Technical Document*, Brisbane, 2009
- 13 中国气象局. 《地面气象观测规范》. 北京: 气象出版社, 2003. 108–116
- 14 陈瑞闪. 台风. 福州: 福建科学技术出版社, 2002. 12
- 15 Stull R B. 边界层气象学导论. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1991. 402–403
- 16 胡张保, 俞炳丰. 城市下垫面空气动力学参数确定方法综述. *气象与环境学报*, 2008, 24: 55–60
- 17 刘小平, 董治宝. 空气动力学粗糙度的物理与实践意义. *中国沙漠*, 2003, 23: 337–346
- 18 希缪, 斯坎伦. 《风对结构的作用——风工程导论》. 第二版. 上海: 同济大学出版社, 1992. 27–29
- 19 顾明, 匡军, 全涌, 等. 上海环球金融中心大楼顶部风速实测数据分析. *振动与冲击*, 2009, 28: 114–118, 122
- 20 鄧伦海, 李秋胜, 胡非. 城市地区近地强风特性实测研究. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2009, 36: 8–12
- 21 史文海, 李正农, 张传雄. 温州地区近地强风特性实测研究. *建筑结构学报*, 2010, 31: 34–40
- 22 Wang B L, Hu F, Cheng X L. Wind gust and turbulence statistics of typhoon in south China. *Acta Meteor Sinica*, 2010, 1: 113–127