

文章编号:1671-6833(2011)04-0022-04

龙卷风近地移动梯度对低层房屋风场影响

甘文举¹, 何益斌², 童小龙¹

(1. 湖南理工学院 土建学院, 湖南 岳阳 414006; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为研究龙卷风灾害机理,运用 Burgers 涡运动理论及平移风速梯度理论,建立了涡旋及平移运动合成下的准定常三维龙卷风模型,并进行了柱坐标下的 Navier-stokes 方程的数值求解,得到了速度场及压力场的表达式。由此,探讨了考虑近地平移风剖面分布下的风场规律及其对低层房屋的作用特点。研究表明:考虑平移风梯度后,龙卷风前端右侧涡核负压值增大,高度较小时负压增加更为明显。因此,对低层房屋所受风吸力的影响更大。

关键词:龙卷风;低层房屋;Burgers 涡;平移风近地梯度;流场

中图分类号: TU312⁺.1

文献标志码: A

0 引言

龙卷风是一种破坏力极大的小尺度大气旋涡,给人类造成的损失巨大。国外通过多普勒雷达和一种预设在潜在龙卷风路径地面上的 HITPR 探测器^[1]实现原位近地观测研究,但目前所得资料仍然非常有限。图 1 为 2006 年 8 月 4 日,广东佛山西樵广播电视站记者邝宇成、张国淇拍摄的我国第一个近距离龙卷风照片,可以说明龙卷风旋转的同时在竖向高度上前移速度的梯度变化,这一梯度变化在文献[2]中日本海岸雷达观测的一个龙卷风形成时刻云底风速剖面图可得以证实。

由于龙卷风涡旋在建筑物周围产生巨大的气压降主要取决于涡旋的本构特性,因此,不同于一般风荷载的分析,为估算上述影响,需要假设龙卷风的流动模型和确定气流的详细参数,常用的理论模型有: Rankine-Combined 涡和 Wen Y. K. 风场半经验公式。以上模型能反映涡旋的一般运动规律,流场参数少且容易确定,目前仍是计算流体力学的基础^[3]。我国核电工程标准^[4]及核电厂安全导则就是基于以上理论。但 Rankine-Combined 涡作为二维涡无法真实模拟对低矮房屋近地流场的变化,且没有考虑黏性作用,其切向速度在涡核半径附近没有表现为一定程度的过渡区^[5], Wen Y. K. 风场半经验公式规定涡边界内外风速及各最大运动参数的固定比例,



图1 龙卷风移动照片

Fig.1 Photo of the moving tornado

隐认了龙卷风规模的缩放关系及模型的指向性,与龙卷风运动的多样性相悖。Burgers 涡近似作为具有轴向流动的定常不可压缩流体对称涡,考虑了空气黏性作用,与雷达观测龙卷风切向速度随径向距离变化的剖面图分布具有较好的吻合形态^[6],可为考虑近地风特性的研究涡旋,笔者结合平移风速梯度理论对此加以分析。

1 Burgers 涡的梯度风平移模型

1.1 龙卷风的涡旋运动

Burgers 涡能反映龙卷风涡旋在空间流场的一般特性,其速度分布为^[5]

$$\begin{cases} V_z = 2az & a > 0, z \geq 0 \\ V_r = -ar \\ V_\theta = \frac{\Gamma_0}{2\pi r} [1 - \exp(-\frac{ar^2}{2v})] \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2011-02-11;修订日期:2011-04-23

基金项目:湖南省高等学校科学研究资助项目(10C0760)。

作者简介:甘文举(1968-),男,湖南湘阴人,湖南理工学院讲师,硕士,一级注册结构工程师,主要研究方向:建筑结构设计理论及应用。

式中: a 为常数, (V_r, V_θ, V_z) 分别是速度矢量 \vec{V} 在 (r, θ, z) 方向的分量; V_z, V_θ, V_r 分别代表轴向速度,切向速度和径向速度; ρ 为流体密度; Γ_0 为初始速度环量,环量可表达为

$$\Gamma = \Gamma_0 [1 - \exp(-\frac{ar^2}{2v})]$$

取: $\frac{\partial V_\theta}{\partial r} = 0, r = r_0 \approx 2.241 \sqrt{\frac{2v}{a}}$ 时,取得切向速度极大值

$$V_{\theta m} \approx 0.0508 \Gamma_0 \sqrt{\frac{2a}{v}} \quad (2)$$

若将 r_0 定义为 Burgers 涡的涡核半径,在涡核区内,

若 $r \leq \sqrt{\frac{2v}{a}}$,则 $V_\theta \approx \frac{a\Gamma_0}{4\pi v} r$ 流体近似作刚体式旋转,

在 $r \geq \sqrt{\frac{2v}{a}}$ 的外区,则 $V_\theta \approx \frac{\Gamma_0}{2\pi r}$ 这正是二维 Rankine 涡的切向速度分布^[7].

1.2 龙卷风的平移运动

实际龙卷风除保持涡旋运动外,在前进方向是一种具有梯度风特性的平移运动.若不考虑高空云层对平移运动的影响,龙卷风的近地梯度与地形、地貌、地面建筑物分布相联系.龙卷风在水平面内的平移运动近似按 A. G. Davenport 教授提出的平均风速沿高度变化的指数函数规律为

$$\frac{v_z}{v_b} = \left(\frac{z}{z_b}\right)^\alpha \quad (3)$$

式中: α 为地面粗糙度指数,在梯度风高度 Z_c (即边界层厚度)内为常数; z_b, v_b 为标准参考高度(我国取10 m)和标准参考高度处的风速; v_z 为任一高度处的风速.则龙卷风平移运动的断面平均流速为

$$V_T = \frac{1}{H} \left[\int_0^{Z_c} v_z dz + \int_{Z_c}^H \left(\frac{Z_c}{z_b}\right)^\alpha v_b dz \right] \quad (4)$$

式中: H 为龙卷风积雨云至地面的距离,我国一般取800~1500 m,规范^[8]规定的各参数见表1.

表1 我国地面粗糙度类别和对应的 z_c, α 值

Tab. 1 Ground roughness category and corresponding values of z_c and α in china

地面粗糙度类别	描述	Z_c/m	α
A	指近海面、海岛、海岸及沙漠地区	300	0.12
B	指田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的乡镇与城郊	350	0.16
C	指有密集建筑群的城市市区	400	0.22
D	指有密集建筑群且房屋较高的城市市区	450	0.30

1.3 龙卷风运动合成的流场分布

龙卷风作为短时间风暴,因此不考虑其脉动风效应,只考虑平均风速的作用,将龙卷风的涡旋运动与视为恒定非均匀流的平移运动相叠加,其运动模型如图2,则速度分布为:

$$\begin{cases} V_z = 2az & a > 0, z \geq 0 \\ V_r = -ar + v_\theta \sin\theta \\ V_\theta = \frac{\Gamma_0}{2\pi r} \left[1 - \exp\left(-\frac{ar^2}{2v}\right) \right] + v_\theta \cos\theta \end{cases} \quad (5)$$

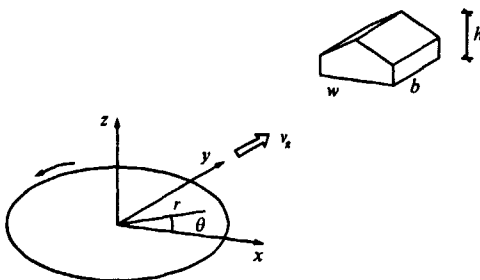


图2 Burgers 涡平移模型

Fig. 2 The model of moving Burgers vortex

根据叠加原理,近似考虑龙卷风在一定运动时段内各空间点上的任何流动要素不随时间变化,即将其运动视为运动黏度 μ 为常数的均质不可压缩定常流,代入不可压缩黏性流的 Navier-stokes 柱坐标系方程:

$$\begin{cases} V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\nabla^2 V_r - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} - \frac{V_r}{r^2} \right) \\ V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left(\nabla^2 V_\theta + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta}{r^2} \right) \\ V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 V_z \end{cases} \quad (6)$$

式中算子:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

由 $dp = \frac{\partial p}{\partial r} dr + \frac{\partial p}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial p}{\partial z} dz$ 得:

$$p_s(r, z, \theta) = p_\infty - \rho g z - \frac{\rho}{2}(4a^2 z^2 + a^2 r^2) + \rho \int_0^r \frac{V_\theta^2}{r} dr + \rho v_s \cos \theta \int_0^r \frac{V_\theta}{r} dr + 2\rho r a v_s \sin \theta + 2\rho r \mu \alpha (\alpha - 1) v_s \frac{1}{z^2} \sin \theta - 4\rho r a \alpha v_s \sin \theta + \frac{\rho \mu_s \Gamma_0}{2\pi r} \left[1 - \exp\left(-\frac{ar^2}{2v}\right) \right] (1 - \cos \theta) - \frac{\rho r a v_s \Gamma_0}{2\pi v} \exp\left(-\frac{ar^2}{2\mu}\right) (1 - \cos \theta) \quad (7)$$

若取 $r = 0$, 则可求得涡核中心最大负压强分布为:

$$p_s(0, z, \theta) = p_\infty - \rho g z - 2\rho a^2 z^2.$$

当不考虑平移风梯度影响时, 将 v_s 以常量 V_r 代入 Navier-stokes 方程, 同理可得:

$$p_r(r, z, \theta) = p_\infty - \rho g z - \frac{\rho}{2}(4a^2 z^2 + a^2 r^2) + \rho \int_0^r \frac{V_r^2}{r} dr + \rho V_r \cos \theta \int_0^r \frac{V_\theta}{r} dr + 2\rho r a V_r \sin \theta - \frac{\rho V_r \Gamma_0 \cos \theta}{2\pi r} \left[1 - \exp\left(-\frac{ar^2}{2\mu}\right) \right] + \frac{\rho r a V_r \cos \theta \Gamma_0}{2\pi v} \exp\left(-\frac{ar^2}{2\mu}\right) \quad (8)$$

以上两式相减, 并令,

$$f(r, z, \theta) = p_s(r, z, \theta) - p_r(r, z, \theta), \text{ 则:}$$

$$f(r, z, \theta) = 2\rho r \mu \alpha (\alpha - 1) v_s \frac{1}{z^2} \sin \theta - 4\rho r a \alpha v_s \sin \theta + 2\rho r a (v_s - V_r) \sin \theta + \rho (v_s - V_r) \cos \theta \int_0^r \frac{V_\theta}{r} dr + \frac{\rho r a (v_s - V_r) \Gamma_0 \cos \theta}{2\pi v} \exp\left(-\frac{ar^2}{2v}\right) - \frac{\rho (v_s - V_r) \Gamma_0 \cos \theta}{2\pi r} \left[1 - \exp\left(-\frac{ar^2}{2v}\right) \right] + \frac{\rho v_s \Gamma_0}{2\pi r} \left[1 - \exp\left(-\frac{ar^2}{2v}\right) \right] - \frac{\rho r a v_s \Gamma_0}{2\pi v} \exp\left(-\frac{ar^2}{2v}\right) \quad (9)$$

可简化为:

$$f(r, z, \theta) = 2\rho r a \alpha (\alpha - 1) v_s \frac{1}{z^2} \sin \theta - 4\rho r a \alpha v_s \sin \theta + 2\rho r a (v_s - V_r) \sin \theta + \rho (v_s - V_r) \cos \theta \int_0^r \frac{V_\theta}{r} dr + [v_s - v_s \cos \theta + V_r \cos \theta] \left\{ \frac{\rho \Gamma_0}{2\pi r} - \exp\left(-\frac{ar^2}{2v}\right) \left[\frac{\rho \Gamma_0}{2\pi r} + \frac{\rho r a \Gamma_0}{2\pi v} \right] \right\} \quad (10)$$

上式即为是否考虑平移风梯度的差异.

2 近地压力场分析

我国龙卷风多发生在 A、B 类地面且以 B 类地面为主. 以 B 类地面为例, 将 $z_c = 350$ m 代入 (4) 式得:

$$V_r = \frac{1}{H} \left[\int_0^{z_c} v_s dz + \int_{z_c}^H \left(\frac{z_c}{z_b} \right)^a v_b dz \right] = 1.681 v_{10} / H$$

对低层建筑物, 研究高度取 $z < 24$ m, 将式 V_r $= 1.681 v_{10} / H$, $v_s = \left(\frac{Z}{10} \right)^{0.16} v_{10}$

代入式 (10) 各分项表达式, 经化简得:

$$\begin{aligned} & 2\rho r a (v_s - V_r) \sin \theta - 4\rho r a \alpha v_s \sin \theta \\ &= -2\rho r a (1.681/H - 0.470 z^{0.16}) v_{10} \sin \theta \\ & 2\rho r \mu \alpha (\alpha - 1) v_s \frac{1}{z^2} \sin \theta = -\frac{186}{H} \rho r \mu z^{-1.84} v_{10} \sin \theta \\ & \rho (V_s - V_r) \cos \theta \int_0^r \frac{V_\theta}{r} dr = -\rho (1.681/H - 0.692 z^{0.16} v_{10} \cos \theta \int_0^r \frac{\Gamma_0}{2\pi r^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{ar^2}{2v}\right) \right] dr \end{aligned} \quad (11)$$

由以上各式可知: 当 θ 为 $0 \sim 90$ 度间的某一特定角度时, 根据图 3 函数变化曲线, 随着高度减小, 该流场空间上负压真空值增加, 式 (10) 前四个分项全为负值. 且在该角度区间:

$$v_s - v_s \cos \theta + V_r \cos \theta > 0$$

$$\text{令 } f(r) = \frac{\rho \Gamma_0}{2\pi r} - \exp\left(-\frac{ar^2}{2v}\right) \left[\frac{\rho \Gamma_0}{2\pi r} + \frac{\rho r a \Gamma_0}{2\pi v} \right]$$

由图 4, 在涡核区内 $r \leq r_0 = 2.241 4 \sqrt{\frac{v}{2a}} = 1.120 7 \sqrt{\frac{2v}{a}}$ 时 $f(r) \leq 0$ 成立, 则涡核区恒有:

$$[v_s - v_s \cos \theta + V_r \cos \theta] \left\{ \frac{\rho \Gamma_0}{2\pi r} - \exp\left(-\frac{ar^2}{2v}\right) \left[\frac{\rho \Gamma_0}{2\pi r} + \frac{\rho r a \Gamma_0}{2\pi v} \right] \right\} \leq 0 \quad (12)$$

且当 $r \leq r_0$, 上式在涡核区关于 z 单调递减, $r > r_0$ 在涡核外区关于 z 单调递增.

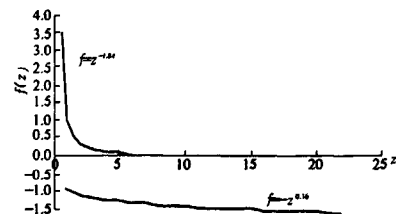


图 3 随距地高度的函数变化曲线图

Fig. 3 Function curves along with ground level

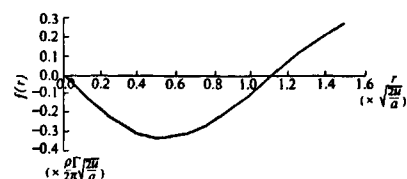


图 4 函数曲线

Fig. 4 Function curve of $f(r)$

根据上述表达式,可作如下定性分析:龙卷风的前端右侧: $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, $f(r, z, \theta)$ 的前4个分项值均小于零,第五项在涡核区为负值,对某一角度值,龙卷风前端涡核右侧可产生更大的负压真空值;且前四项及第五项的涡核外区随距地高度 z 值减小,负压真空值均增加。

3 结论

通过探讨 Burgers 涡模型下龙卷风的三维流场,分析了压力场的近地特性。考虑平移风速递度后,低层房屋实际承担了更大的风吸力作用。

(1)增加了前端右侧负压,可产生更强的风吸力;

(2)距离地面高度越小,前移风速越低,负压增加越多,对低层房屋不利。这与文献[9]风洞试验关于平移风速较慢的龙卷风引起的房屋模型损害较平移快的更加严重这一结论相吻合。

参考文献:

- [1] SAMARAS T M, LEE J J. Measuring tornado dynamics with in-situ instrumentation[C] // 2006 Structural Engineering and Public Safety ASCE. <http://www.ascelibrary.org>.
- [2] FUMIAKI K, YUKARI S, TOMOYUKI S. Doppler radar observation of a tornado generated over the Japan Sea Coast during a cold air outbreak[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2007, 85(3): 321 - 334.
- [3] SELVAM R P, MILLETT P C. Large eddy simulation of the tornado-structure interaction to determine structural loadings[J]. Wind and Structures, 2005, 8(1): 49 - 60.
- [4] EJ/T420—1989,三十万千瓦压水堆核电厂安全重要土建结构抗龙卷风设计规定[S].北京:中华人民共和国标准出版社,1989.
- [5] 童秉纲,尹协远,朱克勤. 涡运动理论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1994:89 - 92.
- [6] SARKAR P, HAAN F, GALLVS W, et al. Velocity measurements in a laboratory Tornado simulator and their comparison with numerical and full-scale data [J] Technical Memorandum of Public Works Research Institute, 2005, 3983: 197 - 211.
- [7] 甘文举,何益斌. Rankine 涡平移模型下低层房屋龙卷风荷载的分析[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(1): 84 - 89.
- [8] 中华人民共和国建设部. GB5009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中华人民共和国标准出版社, 2001.
- [9] HAAN F L, BALARAMVDV V S P P. Tornado-induced wind loads on a low-rise building[J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2010, 1: 106 - 116.

Infuence of Near-Ground Translational Gradient on the Tornado-Induced Wind-field Around a Low-rise Building

GAN Wen-ju¹, HE Yi-bin², TONG Xiao-long¹

(1. Department of Civil and Architectural Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to research the mechanism of tornado's damage, this paper sets up the model of quasi-steady three-dimensional tornado formed in vortex and translational motion by using the theories of Burgers vortex and translational wind gradient, and make the calculation of the Navier-stokes equation under cylindrical coordinate, getting the expression of the velocity field and pressure field. Therefore, this paper discusses wind regulation under the consideration of distribution of near-Earth traoslational wind profile and its effects on low-rise buildings. The study indicates that, after considering translational wind gradient, negative pressure in the right front of tornado core increased and the negative pressure increases more obviously when the height becomes lower. Therefore, the lower-rise buildings suffer greater impact of wind suction than higher ones.

Key words: tornado; low-rise building; burgers vortex ;translational wind gradient; flow field