

陈正洪,刘来林,袁业畅. 湖北大畈核电站周边地区龙卷风参数的计算与分析[J]. 南京气象学院学报, 2009, 32(2): 333-337.

湖北大畈核电站周边地区龙卷风参数的计算与分析

陈正洪^{1,2}, 刘来林², 袁业畅²

(1. 中国气象局 武汉暴雨研究所, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉区域气候中心, 湖北 武汉 430074)

摘要:通过气象站记录、灾害大典、气候影响评价等多种途径,收集了核电站周边地区的300 km × 300 km区域1956—2000年间的龙卷风资料,并根据《核安全导则汇编(上册)》规定的方法详细计算了龙卷风各个参数间的关系,最后给出核电站的龙卷风设计基准参数,即最大风速为70 m/s(对应概率为 1×10^{-8}),平移速度13.5 m/s,旋转半径206 m,最大气压降9.9 hPa,设计基准等级为F3级,这些结论已在设计部门得到应用。

关键词:核电站;龙卷风;富士达F等级(Fujita等级);参数计算;最大风速;设计基准等级

中图分类号:P425.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-2022(2009)02-0333-05

Calculation and Analysis of Tornado Parameters around Dafan Nuclear Power Plant in Tongshan, Hubei

CHEN Zheng-hong^{1,2}, LIU Lai-lin², YUAN Ye-chang²

(1. Wuhan Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the data collected from the area of 300 km × 300 km (it covers 44 cities or counties) around the Dafan Nuclear Power Plant in Tongshan county, Hubei province from 1956 to 2000 through many ways, such as the record at meteorological stations, the collection of disaster events, the reports of climate impact assessment, etc., the relationships between main parameters that describe the characteristics of a tornado are calculated according to *Collections of National Standard for the Safety of Nuclear Power Plant*. Finally, the design basis standard parameters of tornadoes for the plant are given: maximum wind speed is 70 m/s (the corresponding probability is 1×10^{-8}), the horizontal moving speed of tornadoes is 13.5 m/s, the rotating radius is 206 m, the maximum air pressure drop is 9.9 hPa, the design basis standard wind speed category is F3 (Fujita tornado scale). And the above results have been used by the associated planning and designing departments.

Key words: nuclear power plant; tornado; Fujita category; parameter calculation; maximum wind speed; design basis category for tornado wind velocity

0 引言

风灾是我国的主要气象灾害之一^[1]。龙卷风则是地面最强烈的风,破坏力大,世界上以美国发生最多,我国与美国地理纬度相似,龙卷风发生也较多,但至今缺乏完整的气候观测和分析报告^[2]。根据一些个例和区域性特征分析,可概括出龙卷风4个方面的特征及危害:1)龙卷风中心最大风力大,

所到之处大树被拔起、车辆被掀翻、甚至把人吸走^[3],龙卷风多发生于强对流之中^[4,6],伴有暴雨、雷电或冰雹,使危害加剧,如湖北通山大畈核电站周边42次龙卷风,17次伴有冰雹,9次伴有暴雨,2次伴有雷击,1次伴有飚线^[5]。2)龙卷风往往发生在对流不稳定性大的夏季午后或傍晚,此外龙卷风有着一定地域差异,如在我国东部季风活动区多,西部地区少^[4],在福建^[3]和山东^[7]均是沿海、沿湖地区

收稿日期:2008-03-17;改回日期:2009-01-12

基金项目:湖北省发展和改革委员会核电项目办资助

作者简介:陈正洪(1964—),男,湖北大冶人,硕士,研究员,研究方向为应用气象、气候变化,chenzh64@126.com.

及丘陵山区出现机率大,较强龙卷风次数多。3)由于龙卷风通常产生于对流单体,影响范围较小,从数米到几十公里^[8-15],但对建筑物的破坏往往是毁灭性的^[16],除了风力极大外^[17],中心通过时产生的突然压力降可高达 20 hPa,如果建筑物不能充分通风使内外压力迅速平衡,就可能引起爆炸^[18-19]。4)龙卷风产生的飞射物可撞击重要设备、构筑物及人畜。

由于核电站对安全性要求十分严格,而龙卷风又可能对核电站造成致命影响,因此国际上和国内均规定在核电站选址和设计阶段,必须对站址区域出现龙卷风的可能性作出评价,所以详细收集站址周边地区龙卷风资料与相关风参数的计算至关重要,这些风参数与上述第 1、3、4 个特征对应,即:旋转风速、平移速度和最大旋转风速半径,风压差和风压变化速率,飞射物等,此外包括设计基准等级^[20-21]。

湖北通山大畈核电站(厂)是我国政府批准新建的第一个内陆核电站,在选址和设计阶段要考虑的极端气象参数很多,其中龙卷风是最重要的。受湖北省核电项目办委托,湖北省气象部门承担了该项任务。前期工作中已收集了站址周边地区龙卷风资料,并进行了气候特征和灾害特征分析^[5]。本文利用站址周边地区龙卷风资料,严格按照国家规范计算了湖北通山大畈核电站周边地区龙卷风的相关风参数,最后给出了内陆地区核电站最大的设计基准等级为 F3 级和最大的设计风速取值(70 m/s)。计算结果经过国内权威核电专家组成的专家组的验收认可,并已提供给有关部门作为设计的重要依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

考虑核电站的绝对安全性,按规定要收集以站址为中心的 300 km × 300 km 区域内历史灾害情况。本研究共涉及 44 个县市,其中湖北 28 个,湖南 2 个,江西 13 个,安徽 1 个。资料年代为 1956—2000 年。从所收集到的大风灾害个例中,若出现龙卷风的典型特征之一,如龙吸水、大树被连根拔起或扭断、车辆被掀翻、房屋被揭顶、甚至把人和物吸走、产生飞射物等,就记为 1 次龙卷风灾害过程,共得到 42 次龙卷风灾情记录,并有一些路径、带长和带宽的记录^[5]。

根据灾情程度,按照龙卷风的富士达 F 等级(Fujita 等级)分类法(表 1^[21]),对每次龙卷风过程均由 7 人分别给出 F 等级,选取众数为其级别,同时

参考《地面气象观测规范》中蒲福风力等级的风速范围和中数^[22],得到表 2。

表 1 龙卷风的富士达 F 等级分类

Table 1 Fujita scale for tornadoes and its destruction

等级	伴生的破坏
F0	小于 33 m/s,轻度破坏 对烟囱和电视天线有一些破坏; 树的细枝被断;浅根树被刮倒
F1	33 ~ 49 m/s,中等破坏 剥掉屋顶表层;刮坏窗户;轻型车拖活动住房 (或野外工作室)被推动或推翻;一些树被连根 拔起或被折断;行驶的汽车被吹离道路。
F2	50 ~ 69 m/s,相当大的破坏 掀掉框架结构房屋的屋顶,留下坚固的直立墙壁; 农村不牢固的建筑物被毁坏;车拖活动住房(或野 外工作室)被毁坏;大树被折断或连根拔起;火车 车厢被吹翻;产生轻型飞射物;小汽车被吹离公路
F3	70 ~ 92 m/s,严重破坏 框架结构房屋的屋顶和一些墙被掀掉,一些农村 建筑物被完全毁坏;火车被吹翻;钢结构的飞机库 和仓库型的建筑物被扯破;小汽车被吹离地面;森 林中大部分树被连根拔起、折断或被夷平
F4 ~ F12	略

表 2 42 次破坏性龙卷风两种分级情况

Table 2 Fujita and Beaufort categories
of 42 devastating tornado cases

蒲福 风力	风速中值/ (m · s ⁻¹)	龙卷风 次数	富士达 等级	龙卷风 次数
8	19	2	F0	16
9	23	0	F1	21
10	26	9	F2	4
11	31	5	F3	1
12	35	6	F4	0
13	39	9	F5	0
14	44	11		
15	49	5		
16	54	4		
17	59	2		
	70	1		

注:蒲福风力等级最大只有 17 级,风速 ≥ 70 m/s 是为了与富士达等级 F3 对应而增加的。

1.2 方法与模型

龙卷风的设计标准,即超出某一小概率的富士达(Fujita)等级或最大风速,此外还包括风险度评价。可根据表 1 的数据,按照《核安全导则汇编(上

册)》中《核电厂厂址选择的极端气象事件(HAD101/10):附录Ⅳ 龙卷风》的规定^[21]以及相关文献^[23]进行计算。这些规范在众多核电站设计中得以应用^[16-18],所用的资料和计算方法明显不同于普通建筑物设计风速采用的资料和计算方法^[24-26]。

1.2.1 最大风速与 Fujita 等级的换算

$$V_i = 6.30(i+2)^{1.5}, i = 1, 2, \dots, 5. \quad (1)$$

式中: i 是龙卷风的 Fujita 等级; V_i 是 Fujita 等级为 i 时的第 i 等级的最大风速下限,单位为 m/s。Fujita 等级(表 1)是根据龙卷风引起的破坏程度对龙卷风强度所作的一种分类。发生在它的路径内的最大破坏被看作是对龙卷风的全面评价。

1.2.2 龙卷风风险度方法

龙卷风风险度模型考虑了破坏带横断面上不同的破坏程度,其计算的基本步骤如下:

(1) 频次—强度关系

通常龙卷风风速超过 U_i 的累积次数 N_i 与风速呈指数关系,其线性表达式为

$$\ln N_i = -AU_i + B. \quad (2)$$

其中: A 和 B 是拟合系数(均为正值)。

(2) 面积—强度关系

龙卷风危害面积与风速呈双对数关系,其线性表达式为

$$\ln(a_i) = a \ln(\bar{V}_i) + b. \quad (3)$$

式中: a_i 是 Fujita 等级为 i 时的平均破坏面积; $\bar{V}_i$ 是 Fujita 等级为 i 时的中位值风速; a 和 b 是拟合系数。

(3) 风速概率关系

受破坏面积与风速 V_j 大小有关,假定在最大风速半径以外的分布为组合兰金涡流型(即 $V \times R = \text{常数}$)。在这种风险度模型中的平均破坏面积假定是由等于或大于 33.5 m/s 的风速造成的破坏面积。利用关系式 $V \times R = \text{常数}$,于是 $V \times R = 33.5 R_d$,其中 R_d 是最大破坏半径。对于一个 i 等级的龙卷风,在整个破坏路径长度 L_i 上被扫过的破坏面积 $a_i = 2L_i \times R_d$,所以

$$V \times R = 33.5 \frac{a_i}{2L_i}. \quad (4)$$

其中 a_i 是破坏面积。最大强度为 i 的龙卷风破坏路径内的面积,相应于 Fujita 等级 F_i (表 1)有关的风速区间,也就是区间 V_j 到区间 V_{j+1} ,这个面积是

$$a_{ij} = 2(R_j - R_{j+1})L_i = 33.5a_i \frac{V_{j+1} - V_j}{V_j \cdot V_{j+1}}, j < i. \quad (5)$$

式中: V_i 为 i 等级的最低风速。

对于给定的 i 等级的龙卷风的最高风速区间,破坏面积从 $R = 0$ 延伸到 $R = R_j$,而 $j = i$:

$$a_{ij} = 2R_{j=i} \times L_i = 33.5 \frac{a_i}{V_{j=i}}. \quad (6)$$

局部区域某个点在一年之内经受 F_j 等级风速的概率 $P(V_j, V_{j+1})$ 是

$$P(V_j, V_{j+1}) = \frac{\sum_{i=j}^n \lambda_i \cdot a_{ij}}{A}. \quad (7)$$

式中: λ_i 是局部区域 i 等级龙卷风每年发生的次数(从事件—强度关系方程中得出); A 是局部区域的面积; n 是局部区域所考虑的最强的龙卷风等级。

(4) 超过风速 V_k 的概率

$$P_E(V_k) = \sum_{j=i}^n P(V_j, V_{j+1}). \quad (8)$$

通过概率风速曲线,可以很容易地得到关于风险度模型的概率谱。

1.2.3 龙卷风模型

$$\frac{dP}{dt} = \frac{V_T}{R_m} \rho V_m^2, \quad (9)$$

$$\Delta P \approx \rho V_m^2. \quad (10)$$

式中: $\frac{dP}{dt}$ 是最大压降速率; ΔP 是总压力降; ρ 是空气密度; V_m 是最大旋转风速; V_T 是龙卷风的平移速度; R_m 是最大旋转风速的位置半径。

2 模型拟合与参数计算

2.1 频次与强度的关系

表 2 为 42 次龙卷风灾害对应的风速、灾害等级,据此可绘图 1、2。由表 2 和图 1、2 可见:破坏性龙卷风最大风力(蒲福等级)一般都会达到 10 级或 10 级以上;龙卷风次数与风力呈抛物线关系,即在 10~14 级出现最多,平均在 12 级左右;如果不考虑两次 8 级龙卷风,龙卷风次数则随风速加大或风力等级升高呈指数规律减少。

根据表 2 数据,利用式(2)对大于等于 F0、大于等于 F1 级所有个例高于某一强度龙卷风的累积次数与阈值风速 U_i 进行非线性拟合,拟合程度很高,相关系数 R 在 0.998 以上,从而得到两组参数:大于等于 F0 级时, $A = 0.0878, B = 6.102, R = -0.999$; 大于等于 F1 级时, $A = 0.0844, B = 5.895, R = -0.998$ 。其中大于等于 F0 级的临界风速取 24.5 m/s,即 10 级风的风速。

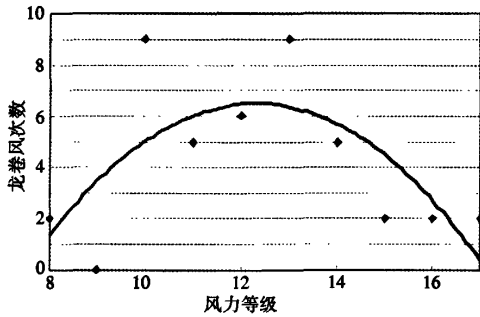


图 1 调查区域不同等级龙卷风的次数分布
Fig. 1 Distribution of numbers of tornadoes for various wind force categories in the survey area

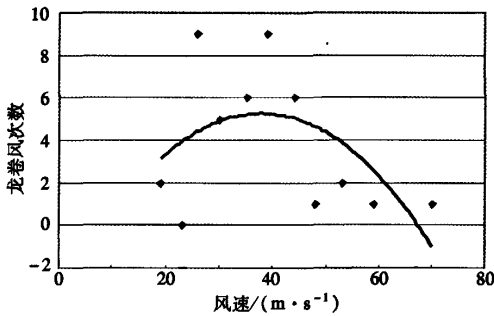


图 2 调查区域龙卷风风速与次数的关系
Fig. 2 Numbers of tornadoes versus wind speeds in the survey area

2.2 面积与强度的关系

F0 到 F2 各等级均有一些关于面积的记录^[5], 根据面积与风速的对应关系,用最小二乘法对面积与风速的对数进行线性拟合,得(3)式的系数:

$$\ln(a_i) = 2.794\ln(\bar{V}_i) - 9.198, \\ R = 0.997. \tag{11}$$

可见,龙卷风的风速越大,危害的面积也就越大。

2.3 与风速概率的关系

统计区域为 300 km × 300 km,所以 A = 90 000 km²,根据(4) ~ (8)式,可推导出各级龙卷风危害面积 a_i 和平均次数 λ_i ,其中 $\lambda_0 = 0.356$ 、 $\lambda_1 = 0.467$ 、 $\lambda_2 = 0.089$ 、 $\lambda_3 = 0.022$,进而算出区域内各等级每年龙卷风出现概率如下:

$$P_0(24.5, 33.0) = 1.393 \times 10^{-6}, \\ P_1(33.0, 50.0) = 1.79 \times 10^{-6}, \\ P_2(50.0, 70.0) = 1.89 \times 10^{-7}, \\ P_3(70.0, 93.0) = 2.8 \times 10^{-8}.$$

累积频率则为

$$P_{\geq 0}(24.5) = 3.45 \times 10^{-6}, \\ P_{\geq 1}(33.0) = 2.057 \times 10^{-5}, \\ P_{\geq 2}(50.0) = 2.17 \times 10^{-7}, \\ P_{\geq 3}(70.0) = 2.8 \times 10^{-8}.$$

由图 3 可见,设计基准龙卷风风速(V_F)可设定为 70 m/s,出现概率为 1×10^{-8} 。

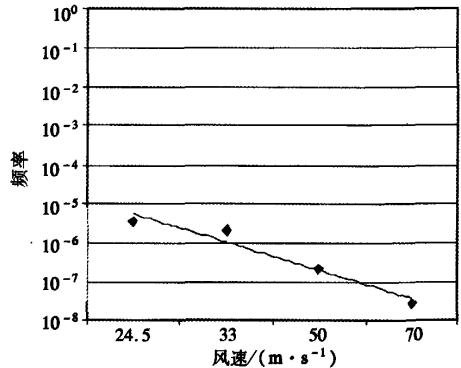


图 3 总区域一年中超过各级龙卷风下限风速的概率
Fig. 3 The occurrence probability of tornadoes whose wind speed is over a certain category in a year for the whole area (300 km × 300 km)

2.4 设计基准龙卷风的压降

为了评价总压力降和最大压降速率,必须对最大旋转风速半径(R_m)和最大平移速度(V_T)两者进行评价。按照文献[21],强龙卷风的最大旋转风速 V_m 和最大平移速度 V_T 之比为常数,即 $V_m/V_T = 290/70$ 或 $V_T = 0.24V_m$,Fujita 级别风速 $V_F = V_T + V_m = 1.24V_m = 70\text{m/s}$,从而可导出 V_m 和 V_T 。

假定 R_m 约为 50 m, $\rho = 1.15 \text{ kg/m}^3$,则可计算出 $\frac{dP}{dt}$ 和 ΔP ,如表 3 所示。

表 3 区域内有关龙卷风的设计参数

Table 3 The design parameters for tornadoes in the area

参数	数值
$V_F/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	70
$V_T/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	13.5
$V_m/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	56.5
$\frac{dP}{dt}/(\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1})$	9.9
$\Delta P/\text{hPa}$	36.72

2.5 龙卷风产生的飞射物的碰撞动量

计算龙卷风产生的飞射物的碰撞速度是困难的,因为有很多不确定性,于是安全导则^[21]把设计

基准龙卷风最大风速(70.0 m/s)的35%作为碰撞速度,即24.5 m/s。并建议将125 kg的20 cm穿甲炮弹和2.5 cm实心钢球作为龙卷风产生飞射物。两种情景的碰撞动量计算结果分别为 $3\ 062\ \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1\ 602\ \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

根据以上计算,认为站址区域龙卷风设计基准参数如下:最大风速70 m/s(对应概率为 1×10^{-8}),平移速度13.5 m/s,旋转半径206 m,最大气压降9.9 hPa,所以以F3为设计基准等级。

3 结语

F3为设计基准等级在内陆地区取值是最大的,其合理性如何是设计和建设部门最关心的,因为这样要增加很大的成本。其依据是在300 km范围内发生了一次严重的龙卷风事件,即1983年4月25日发生在湖北省大冶县境内,龙卷风导致4个40 000 kg重的钢架屋顶被龙卷风吹到60 m以外的地方落下,由于当时记录不详,关键是“吹起后再落地”还是“受力后从高处滚动落地”,经过查阅历史档案,并实地调查和访问,确定是前者,只是每个钢架屋顶加上木梁和红瓦的质量大约为2 000 kg,仍可考虑F3级,取其最小值是合理的。

致谢:湖南省气象科学研究所、江西省气候中心提供部分资料,陈璇、任光政参加部分资料收集和统计,周月华、李兰、向华、郭广芬等同志参与龙卷风评级,大冶市气象局在灾害调查中提供大力支持,在此一并致以诚挚谢意!

参考文献:

- [1] 章基嘉,周曙光.我国的主要气候灾害及其对农业生产的影响[J].南京气象学院学报,1990,13(2):259-265.
- [2] 骆继宾.龙卷风及其灾害[J].气象知识,2003(3):10-12.
- [3] 鹿世谨.福建龙卷风的活动特点[J].气象,1996,22(7):36-39.
- [4] 魏文秀.中国龙卷风的若干特征[J].气象,1995,21(5):37-40.
- [5] 陈正洪,刘来林.核电站周边地区龙卷风时间分布与灾害特征[J].暴雨灾害,2008,27(1):78-72.
- [6] MacGorman D R, Burgess D W. Positive cloud ground lightning in tornadic storms and hailstorms[J]. Mon Wea Rev, 1994, 122(8):1671-1679.
- [7] 薛德强,杨成芳.山东省龙卷风发生的气候特征[J].山东气象,2003,23(4):9-11.
- [8] 林志强.“6.9”南海、广州龙卷风灾情调查[J].广东气象,1995(1):36-38.
- [9] 李拽英,光东华.一次龙卷风的调查与分析[J].山西气象,1996(2):37-37.
- [10] 蒋汝庚.龙卷型强风暴——1995年4月19日洪奇沥龙卷风剖析[J].应用气象学报,1997,8(4):492-497.
- [11] 杨金莲,李臻宇.东洞庭湖湖洲“98.5”龙卷风分析[J].海洋湖沼学报,1998(4):13-17.
- [12] 陈永林.上海一次龙卷风过程分析[J].气象,2000,26(9):19-23.
- [13] 姚叶青,魏鸣,王成刚.一次龙卷过程的多普勒天气雷达和闪电定位资料分析[J].南京气象学院学报,2004,27(5):587-594.
- [14] 廖玉芳,俞小鼎,唐小新,等.基于多普勒天气雷达观测的湖南超级单体风暴特征[J].南京气象学院学报,2007,30(4):433-443.
- [15] Clark M R. The southern England tornadoes of 30 December 2006: Case study of a tornadic storm in a low CAPE, high shear environment[J]. Atmospheric Research, 2008, doi:10.1016/j.atmosres.2008.10.008.
- [16] 陈家宜,杨艳惠,宣德旺,等.龙卷风风灾的调查与评估[J].自然灾害学报,1999,8(4):111-117.
- [17] 干连君.龙卷风的风强分析与极值推断[J].气象科学,1999,19(1):99-103.
- [18] 薛德强.一次强龙卷风过程破坏力的估计[J].气象,2002,28(2):50-52.
- [19] Sengupta A, Haan F L, Sarkar P P, et al. Transient loads on buildings in microburst and tornado winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96:2173-2187.
- [20] American National Standards Institute. American national standard for estimating tornador and extreme wind characteristics at nuclear power site[S]. New York:ANSI/ANS-2.3, 1983.
- [21] 国家核安全局.核电厂厂址选择的极端气象事件(HAD101/10):附录IV 龙卷风[S]//核安全导则汇编(上册).北京:中国法制出版社,1992:764-771.
- [22] 中国气象局.地面气象观测规范[S].北京:气象出版社,2003:131-132.
- [23] 吴中旺,朱瑞兆.大庆200MW核供热堆安全级构筑物的设计基准龙卷风[J].核科学与工程,1998,18(3):285-288.
- [24] American Society of Civil Engineers. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[S]. New York:ASCE 7-05, 2006.
- [25] 中国建筑科学研究院.建筑结构荷载规范(GBJ50009—2002)[S]//中华人民共和国国家标准.北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [26] 陈正洪,向玉春,杨宏青,等.深圳湾公路大桥设计风速的推算[J].应用气象学报,2004,15(2):227-233.

(责任编辑:张福颖)