氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

福清核电厂厂址区域龙卷风设计基准参数的估算

蔡秀华 吕文忠 陈龙泉

Estimation of Design Basis Tornado Parameters for the Zone around the Fuqing Nuclear Power Plant

CAI Xiuhua L Wenzhong CHEN Longquan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20088

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

珠海凤凰山森林下垫面干季和湿季气象要素的对比分析与动量和感热交换系数的参数化研究

Comparison of Meteorological Elements in Dry and Wet Seasons and Parameterization of Momentum and Sensible Heat Exchange Coefficients near the Underlying Surface of the Zhuhai Phoenix Mountain Forest

气候与环境研究. 2020, 25(5): 457 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19027

源项对FLEXPART模式模拟福岛核事故放射性物质长距离传输的影响

Influences of Source Term on Long-Range Transport of Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Accident with FLEXPART Model

气候与环境研究. 2017, 22(1): 10 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15246

香河地区冬季$_2$光解速率的变化特征及其估算方法的建立

Variation Characteristics and Estimation Method of NO_2 Photolysis Rate in Xianghe during Winter

气候与环境研究. 2020, 25(1): 64 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18080

我国西北大规模太阳能与风能发电场建设产生的可能气候效应

Climate Effect Assessment of Ideal Large-Scale Solar and Wind Power Farms in Northwest China

气候与环境研究. 2021, 26(2): 123 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19126

农田灌溉过程与土壤参数更新对中亚费尔干纳盆地WRF/Noah模拟精度的提升

Improvement of WRF/Noah Simulations for the Fergana Basin in Central Asia Based on Irrigation Schemes and Soil Data Update

气候与环境研究. 2021, 26(2): 202 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20074

基于陆面模式基准平台ILAMB对陆面模式CoLM的评估

Evaluation of Common Land Model Based on International Land Model Benchmarking System

气候与环境研究. 2020, 25(6): 649 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20021

关注微信公众号，获得更多资讯信息

蔡秀华, 吕文忠, 陈龙泉. 2021. 福清核电厂厂址区域龙卷风设计基准参数的估算 [J]. 气候与环境研究, 26(3): 351−358. CAI Xiuhua, LÜ Wenzhong, CHEN Longquan. 2021. Estimation of Design Basis Tornado Parameters for the Zone around the Fuqing Nuclear Power Plant [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (3): 351−358. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20088

福清核电厂厂址区域龙卷风设计基准参数的估算

蔡秀华[1] 吕文忠[2] 陈龙泉[3]

1 中国气象科学研究院，北京 100081
2 中国气象局气象干部培训学院，北京 100081
3 中国辐射防护研究院，太原 030006

摘 要 基于 1959～2017 年福清核电厂区龙卷风的调查资料，采用 Rankine 涡模型估算该区域超过某一特定风速的概率分布，通过概率值导出设计基准龙卷风和基准设计风速，按照压降模型计算出龙卷风的压降，研究结果表明：福清核电评价区域龙卷风的总压降为 4.29 kPa；平移速度 13.8 m/s，最大旋转风速 57.6 m/s，最大压降速率为 1.18 kPa/s，基准设计风速为 71.4 m/s，属于 F3 级别的龙卷风；在 125 kg 下落的穿甲弹类和 2.5 cm 实心钢球两种不同情景下计算出的龙卷风产生的飞射物的最大水平碰撞速度均为 24.99 m/s、碰撞动量依次为 3123.75 kg m s^{-1} 和 1.615 kg m s^{-1}。这些计算结果，从龙卷风的角度，为政府相关部门在规划和建设福清核电厂时提供了可靠的理论依据。

关键词 龙卷风 核电厂 基准设计参数 碰撞动量
文章编号 1006-9585(2021)03-0351-08 **中图分类号** X321 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20088

Estimation of Design Basis Tornado Parameters for the Zone around the Fuqing Nuclear Power Plant

CAI Xiuhua[1], LÜ Wenzhong[2], and CHEN Longquan[3]

1 *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081
2 *China Meteorological Administration Training Centre*, *Beijing* 100081
3 *China Institute for Radiation Protection*, *Taiyuan* 030006

Abstract Based on the investigation data of tornadoes in the Fuqing Nuclear Power Plant area from 1959 to 2017, the probability distribution of exceeding a specific wind speed is calculated using the Rankine model. The design basis tornado wind speeds are derived from the probability values, and the pressure drop of tornadoes is calculated using the pressure drop model. Results show that the design basis wind speed of an F3 category tornado is 71.4 m/s, with a probability of 1×10^{-8}. Moreover, the total pressure drop of an F3 category tornado is 4.29 kPa, the translation speed is 13.8 m/s, the maximum rotating wind speed is 57.6 m/s, and the maximum pressure drop rate is 1.18 kPa/s. Furthermore, the collision velocity and momentum of the projectile produced by the tornado in two different scenarios are calculated. These two scenarios involve an air penetrator with a weight of 125 kg and a solid steel ball with a radius of 2.5 cm. The maximum horizontal collision velocity of the projectile caused by the tornado is 24.99 m/s in both scenarios. The collision momentum is 3123.75 kg m s^{-1} in the air penetrator with a weight of 125 kg and 1.615 kg m s^{-1} in the solid steel ball with

收稿日期 2020-07-20；**网络预出版日期** 2020-10-16
作者简介 蔡秀华，女，1963 年出生，高工，主要从事环境评价、极端气象和工程气象的研究。E-mail: caixha@126.com
通讯作者 吕文忠，Email: wzhlu@sohu.com
资助项目 中国气象科学研究院科技发展基金项目 2020KJ024
Funded by Science and Technology Development Foundation of Chinese Academy of Meteorological Sciences (Grant 2020KJ024)

a radius of 2.5 cm. From the perspective of these scenarios, the calculations will provide the scientific and theoretical bases for the planning and construction of the Fuqing Nuclear Power Plant.

Keywords Tornado, Nuclear power plant, Design basis parameters, Collision momentum

1 引言

龙卷风是在核电厂的选址、设计和安全评价中需要考虑的一种重要外部自然事件。龙卷风冲击核电厂等建筑物时，对其设备和构筑物会造成破坏，严重时会引起爆炸。龙卷风是对流风暴产生的最猛烈的小尺度天气现象（姚聃, 2018），维持时间仅有几分钟到几十分钟，预报准确率十分有限（Wurman et al., 2012; Anderson et al., 2016）。即使采用世界上最先进的移动雷达系统进行观测，对于龙卷精细化结构和演变的分析研究仍然十分困难（Wurman et al., 2013）。虽然龙卷风生命史短暂，但其破坏力惊人，所到之处造成的灾害都是毁灭性的（俞小鼎等, 2008; 曹治强等, 2008; 王霁吟等, 2015; 杜康云等, 2019）。全球每年大约发生 2000 多个龙卷，美国是龙卷发生频率最高的国家，我国龙卷风相对少发（范雯杰和俞小鼎, 2015）。通过对福清核电厂评价区域内龙卷风调查的案例进行初步的统计分析获知，龙卷风多发生在午后和春、夏二季强对流盛行之时，常伴有雷电、暴雨、冰雹、飞射物等，使灾害加重。该区域内，1959～2017 年龙卷风总体有上升趋势。

为了解龙卷风对建筑结构的影响，国内外学者们进行了大量研究。1882 年 Rankine 提出了 Rankine 涡模型，它是一种二维环流运动，具有模型简单、有精确解等优点，且在一定程度能够反应龙卷风风场的一般特性（张文娜和钱江, 2016）；目前有关对龙卷风荷载的规定大多是采用二维 Rankine 模型表示龙卷风风速分布（US Nuclear Regulatory Commision, 2007）。Sun et al.（1977）以 Navier-Stokes 方程和 Hoecker 提出的旋转风方程等为基础进行理论推导，提出了适用于核电站风荷载计算的龙卷风通用简化模型；Kuo（1971）考虑到轴向流运动的二维流及黏性作用，提出三维龙卷风理论模型，并给出了龙卷风风速分布。

中国对涉核工程结构抗龙卷风研究起步较晚，夏祖讽（1987）年编制了秦山核电厂核安全结构抗龙卷风设计标准。中国核工业总公司（1989）批准了《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（EJ420-89）》，该规定对抗龙卷风设计进行了较系统的阐述。并成为之后涉核工程结构抗龙卷风设计的参考依据。甘文举和何益斌（2009）等应用 Rankine 涡模型，结合中国的龙卷风灾害探讨了气流速度和压力沿平面的分布规律，对建筑物风压力、风吸力、扭转的实用计算进行了探讨。朱好等（2016）等定量分析了设计基准龙卷风风速对拟合样本区间和高强度样本评级的敏感性，指出高强度级别的龙卷风累积频数分布是否满足对数线性规律决定了设计基准龙卷风风速计算结果的稳定性。郑永光等（2016）等给出了风速等级标准；尽管学者们对于龙卷风的研究投入了大量的精力，并取得一系列成果。但是，实际的龙卷风风场是非常复杂的，迄今为止人们对它还不完全了解。从核安全角度考虑，龙卷风极高风速的冲击作用、中心通过时产生的突然压力降、产生的飞射物对核电厂设备和构筑物的撞击可能会对核电厂造成破坏。国际原子能机构和我国的核安全导则均要求：应评估龙卷风在区域内发生的可能性，如可能发生，则对设计基准龙卷风进行评价。福建福清核电厂是我国政府批准兴建的核电厂，为了保障核电厂的绝对安全性, 在选址和设计阶段对龙卷风的设计基准参数进行科学计算评估是必须要进行的一项工作。

2 资料及算法研究

2.1 资料

根据国家核安全局（1991）制定的核安全导则 HAF101《核电厂厂址选择的极端气象事件》中对外部事件设计基准评价的要求，对厂址区域出现龙卷风的可能性必须做出评价。如果该地区曾经出现过龙卷风，则必须收集详细的历史资料。按照核安全导则 HAF101 中的相关规定，确定以核电站厂址为中心的龙卷风评价区域（以下简称为评价区域），该区域面积为 3°（纬度）×3°（经度）。本文中龙卷风的样本资料源于《中国气象灾害大典》、《全国气候影响评价》、《中国气象灾害年鉴》，福建省各县、市气象局历年灾情报表，过去已整编和归纳的科研成果等。龙卷风资料调查年限为 1959～2017 年，获得厂址区域有记录的龙卷风总数达到

107 例。

由于龙卷风的尺度小、经历时间短，绝大多数情况下气象站不可能定量观测到其风速大小，更少有机会测量到旋转流最强的部位（Davies-Jones, 2015; 王美珍和吕令毅, 2017）。设计基准龙卷风评价着重于剧烈大风、压降和飞射物的破坏作用，因此调查落实内容更强调与风有关的灾害。根据灾害的程度，按照富士达（F）龙卷风强度等级分类法（表 1），由多位专家会商后对各龙卷风案例确定其级别（表 2）。

表 1　富士达龙卷风强度等级及其典型的破坏程度

Table 1　Fuji-level tornado intensity grades and typical damage levels

等级	估计风速/m s^{-1}	典型的龙卷风破坏程度
F0	<33	轻度破坏：损坏烟囱；刮断树枝；拔起浅根树木；毁坏商店招牌。
F1	33～50	中度破坏：掀起屋顶砖瓦；刮跑或掀翻移动住房；行驶的汽车被刮离路面。
F2	51～70	较严重的破坏：刮走屋顶；摧毁活动住房；掀翻火车车厢；连根拔起大树；空中轻物狂飞；汽车被卷离地。
F3	71～92	严重破坏：坚固房屋的屋顶和墙壁被刮走；掀翻火车；森林中大多数树木被连根拔起；重型汽车被卷离地并被抛起。
F4	93～116	毁灭性破坏：坚固房屋被夷为平地；基础不牢的建筑物被刮走；汽车被抛向空中，空中大的物件横飞。
F5	117～142	极度破坏：坚固房屋框架被刮走；汽车大小的物件在空中横飞超过100 m；飘飞碎片挂树梢；出现难以置信的现象。

表 2　1959 ~ 2017 年福清核电厂评价区域龙卷风富士达等级次数

Table 2　Number of Fuji-level tornadoes in the Fuqing Nuclear Power Plant evaluation area during 1959−2017

	次数
F0级别	51
F1级别	42
F2级别	14
合计	107

2.2　算法

对于核电工程而言，龙卷风调查与分析的主要目的是确定设计基准龙卷风和龙卷风风速的设计基准。然后再进一步延伸到评价在遭到达到设计基准风速的龙卷袭击时，地面构筑物等设施可能发生的破坏。按照导则《核电厂厂址选择的极端气象事件》HAD101/10（1991）的推荐，计算步骤和做法如下：（1）确定评价区域的龙卷风事件；对各次龙卷风逐一确定富士达（简称 F）级别；（2）通过分析，确定供进一步统计计算的样本年代；（3）建立确定设计基准龙卷风事件所必须的各项基本关系式和基本参数，即评价区域达到或超过各富士达级别龙卷风阈值风速的概率、龙卷风的面积—强度关系及相应参数；（4）采用兰金流模型计算厂址位置超过某一特定风速的概率分布，然后根据规定或借鉴的概率值确定设计基准龙卷风和基准设计风速；（5）确定设计基准龙卷风袭击情况下的压降和发生的飞射物性质。

2.2.1　各级龙卷风的出现概率

按照导则的推荐，出现高于某一强度龙卷风的累积频数可以用以下的函数式来描述：

$$\ln N_i = -AU_i + B, \qquad (1)$$

其中，U_i 表示 i 级龙卷风的下限风速；N_i为龙卷风风速超过 U_i 的累积次数；A 和 B 是经验拟合系数（A、B 均为正值），这正是要通过选择有代表性的龙卷风样本来加以确定的参数。公式（1）则为通常的经验指数分布函数：

$$N_i = N_0 \mathrm{e}^{-AU_i}, \qquad (2)$$

其中$N_0 = \mathrm{e}^B$，是拟合函数外延至U_i=0 的频数。这里已约定龙卷风的强度以阈值风速，即 i 级龙卷风的下限风速来度量。各级别对应的下限风速可用下式转化：

$$U_i = 6.30(i+2)1.5, \quad i = 1, 2, \ldots, 5. \qquad (3)$$

2.2.2　面积—强度关系

为了计算平均破坏面积与龙卷风强度的关系，要求根据评价区域的资料，建立一个平均破坏面积—强度关系式。导则推荐的经验公式的形式是：

$$\lg(a_i) = c\lg\left(\bar{V}_i\right) - k, \qquad (4)$$

其中，a_i是 F 等级为 i 时的龙卷风的平均破坏面积；$\bar{V}_i$是 F 等级为 i 时的龙卷风中位值风速；c、k 是根据最小二乘法线性回归分析得到的常数。

破坏面积原则上应当从龙卷风的路径长度和宽度确定。遗憾的是国内的调查资料，包括本项目的调查均无法达到足以建立面积—强度函数和确定相

应拟合参数的程度。为此，本文应用与富士达皮尔森龙卷风标度有关的面积公式进行计算：

$$a_i = L_{pi}W_{pi} = 1.609^2 \times 10^{i-3},\ i = 1, 2, \ldots, 5, \quad (5)$$

其中，i 是龙卷风的级别，L_{pi}、W_{pi} 分别为 i 等级龙卷风的长度和宽度的下限值，单位：km。

2.2.3 超过额定风速概率的确定方法

在风险度评价模型中考虑到受破坏面积与风速大小有关。某一具体地点经受风速等于或大于等级为 i 的龙卷风速的概率为

$$P_E(V_i) = \sum_i^n P(V_j,\ V_{j+1}), \quad (6)$$

其中，V_j是等级为 j 龙卷风的最低风速，$P(V_j, V_{j+1})$是风速大于等于 j 级龙卷风的下限但小于上限的概率，

$$P(V_j, V_{j+1}) = \sum_i \lambda_i a_{ij}/S, \quad (7)$$

式中，λ_i是强度 i 等级的龙卷风的年平均出现次数；a_{ij} 是 i 等级龙卷风出现时风速会处于(V_j, V_{j+1})区间的面积；S 是龙卷风样本区域的总面积。

为了计算$P(V_j, V_{j+1})$公式中的a_{ij}，要引用龙卷风的兰金涡流模型以便把面积—强度和事件—强度关系与风速分布结合起来。龙卷风流场的兰金流模型假定在最大风速半径以外的速度分布遵守角动量守恒 $V\times R$=常数。又假定平均破坏面积是由等于或大于 33.5 m/s 的风速造成的，于是得 $V\times R=33.5R_d$，其中 R_d 是破坏半径的最大值。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 $a_i=2L_iR_d$，于是有：

$$V \times R = 33.5a_i/2L_i, \quad (8)$$

其中，a_i是破坏面积。按照V_j到V_{j+1}的几何权重得到 i 级龙卷事件出现过程中受(V_j, V_{j+1})区间风速影响的面积a_{ij}为

$$a_{ij} = 2\left(R_j - R_{j+1}\right)L_i = 33.5a_i\frac{V_{j+1} - V_j}{V_jV_{j+1}}, \quad j \leqslant i. \quad (9)$$

2.2.4 龙卷风的压降

按照压降模型，可计算龙卷风的其他有关参数。压降速率和总压降的计算式如下：

$$\frac{dP}{dt} = \frac{V_T}{R_m}\rho V_m^2, \quad (10)$$

$$\Delta P \approx \rho V_m^2, \quad (11)$$

其中，dP/dt 是最大压降速率；ΔP是总压降，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。

3 模型拟合与参数计算

3.1 各级龙卷风出现概率的拟合区域、样本

拟合区域面积是以福清核电厂厂址为中心的 3 个经纬度范围，各级龙卷风的出现次数已在表 2 中给出。考虑到样本级别对累积频数分布的影响，将富士达等级进行更细致的分类，F0 分为 F0.0、F0.2、F0.4、F0.6、F0.8；F1 分为 F1.0、F1.2、F1.4、F1.6、F1.8；F2 分为 F2.0、F2.2、F2.4、F2.6、F2.8。分辨率为 0.2 的由低到高各等级龙卷风的累积次数见图 1。图中显示，F0.0 以上级别的龙卷风共有 107 次，F1.0 以上 56 次，F2.0 以上 14 次。其中，达到 F2.6 级别的有 1 次，达到 F2.4 级别的有 4 次。总体上看，龙卷风累积次数随风速加大或风力等级升高呈减少的趋势，破坏性较大的龙卷风最大风力一般都会达到 10 级以上。

根据表 2 及公式（1）～（3）推导计算超过各级龙卷风下限风速的累积次数示于图 2。由图 2 可见，高强度和低强度龙卷风的出现频数呈现出不同

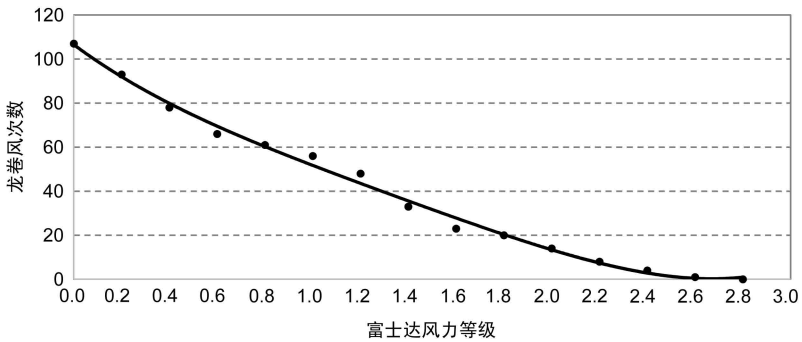

图 1 1959～2017 年福清核电厂评价区内调查样本各级龙卷风的累积次数

Fig. 1 Cumulative number of tornadoes by class in the survey sample in the Fuqing Nuclear Power Plant evaluation area during 1959–2017

规律。龙卷风强度越强则出现的频数越低，反之，强度越弱的龙卷风则出现的频数越高。图上的点分别是分辨率为 0.2 级别龙卷风对应的下限风速，如 F2.0 级别的龙卷风出现 14 次，对应的风力级别下限为 50 m/s，F2.6 级别的龙卷风仅出现 1 次，对应的下限风速为 62 m/s。

3.2　面积－强度关系

利用公式（4）和（5），根据面积与风速的对应关系，可以分段用经验指数分布函数来拟合，得出拟合参数。调查样本的参数在≥F1.8 时，c 和 k 的拟合值分别为 0.1881、12.037。将参数 c 和 k 的拟合值代入（4）式得 $\log(a_i) = 0.1881\log\left(\bar{V}_i\right) - 12.037$。可见，龙卷风的风速越大，危害的面积也就越大。

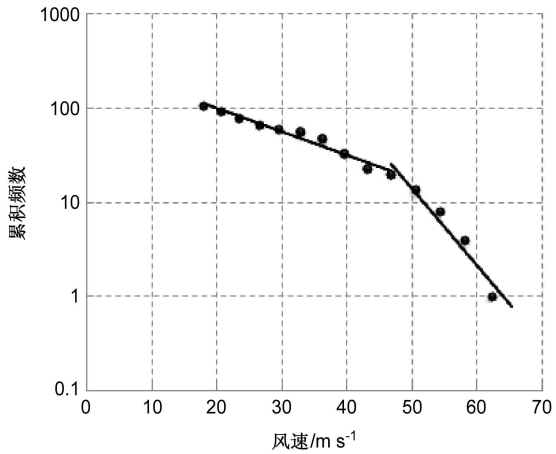

图 2　1959～2017 年福清核电厂厂址评价区内出现和超过各级龙卷风下限风速的累积次数

Fig. 2　Cumulative number of tornadoes that occurred and exceeded the lower limit of wind speed at each stage in the Fuqing Nuclear Power Plant evaluation area during 1959–2017

3.3　超过额定风速概率的计算

在确立了函数关系和参数之后，就能够计算厂址所在地点每年经受到某一级风速区间风速的概率和超过额定风速的概率，这就是龙卷风风险度评价模型。

基于公式（6）～（9）和拟合参数，可推导出评价区内每年出现各级龙卷风的平均次数，核电厂每年遭遇不同区间风速的概率和每年超过龙卷风下限风速的概率，结果分别图 3、图 4 和表 3。

由图 3 可见，评价区域内每年 F1 级别（平均次数为 λ_1）的龙卷风出现概率为 0.731，F2 级别（平均次数为 λ_2）出现概率为 0.214，F3 级别（平均次数为 λ_3）出现概率 0.00497，其他详见图 3。

图 4 说明核电厂每年单位面积区域内出现 F1 到 F2 级别之间（区间风速 33～50 m/s）龙卷风的概率为 7.67×10^{-7}；F2 到 F3 级别之间（区间风速 50～70 m/s）的概率为 3.19×10^{-7}；F3 到 F4 级别之间（区间风速为 70～93 m/s）的概率为 4.12×10^{-8}，以此类推。

由表 4 所列结果可知，核电厂每年单位面积区域出现超过 F1 级（下限风速 33 m/s）龙卷风的概率为 1.13×10^{-6}；超过 F2 级 (下限风速 50 m/s) 的概率为 3.64×10^{-7}；F3 级（下限风速 70 m/s）为 4.55×10^{-8}，根据表 4 给出核电厂区域风速与龙卷风级别概率图（图 5）。用于确定 10 的−7 次方时的风速，该风速就是龙卷风实际计算的设计风速。

用于评价设计基准龙卷风的方法应当以指定的设计基准概率值的概念为根据。对一个确定的厂址来说，比设计基准龙卷风风速更严重的情况每年发生的概率应小于一个给定的概率水平。我国的安全

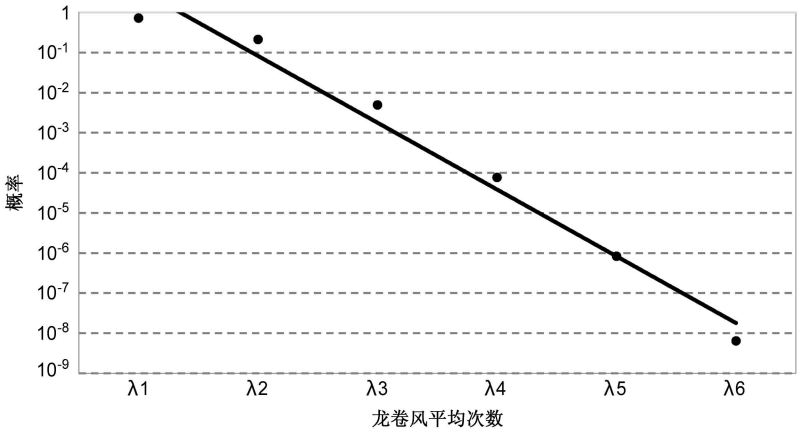

图 3　1959～2017 年福清核电厂评价区每年出现各级龙卷风的平均次数

Fig. 3　Average annual number of tornadoes in each level in the evaluation area in the Fuqing Nuclear Power Plant evaluation area during 1959–2017

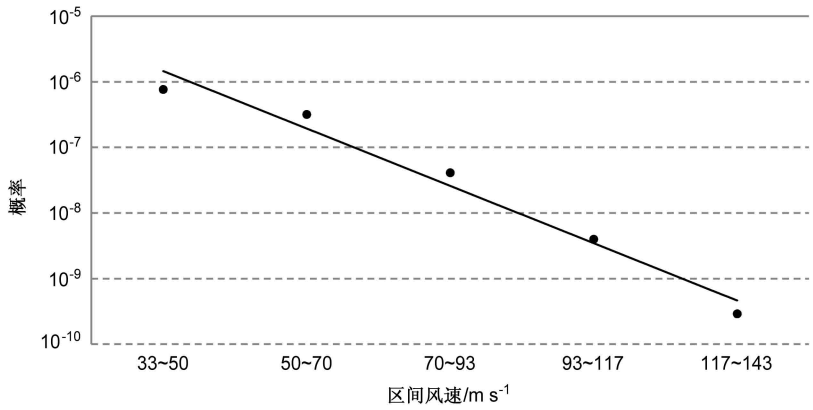

图 4 1959～2017 年福清核电厂评价区每年遭遇不同风速区间风速的概率

Fig. 4 Probability of a nuclear power plant encountering tornadoes with different wind speed ranges each year in the Fuqing Nuclear Power Plant evaluation area during 1959–2017

表 3 1959 ~ 2017 年福清核电厂评价区每年超过龙卷风下限风速的概率

Table 3 Probability of a nuclear power plant encountering a tornado that exceeds the minimum wind speed limit of tornado per year in the Fuqing Nuclear Power Plant evaluation area during 1959–2017

等级	下限风速	概率
1	33	1.13×10^{-6}
2	50	3.64×10^{-7}
3	70	4.55×10^{-8}
4	93	4.31×10^{-9}
5	117	3.09×10^{-10}

表 4 设计基准龙卷风参数

Table 4 Design basis tornado parameters

V_F/m s^{-1}	V_T/m s^{-1}	V_m/m s^{-1}	dP/dt/kPa s^{-1}	ΔP/kPa
71.4	13.8	57.6	1.18	4.29

分析多引用美国的有关标准 ANSI/ANS-2.3-1983 推荐的 10^{-7} 概率水平进行评价。图 5 所示结果为实际计算结果的拟合图，根据图中拟合结果，参照国家核安全局（1991）的核安全导则中对安全余量规定，龙卷风基准设计风速推荐值为 71.4 m/s，出现概率为 1×10^{-8}，设计基准龙卷风级别属于 F3 级。

3.4 设计基准龙卷风的压降和飞射物的评价

在确定了最大旋转风速半径（R_m）和最大平移速度（V_T）之后，才能对总压力降和最大压降速率评价。遵照国家核安全局（1991）的核安全导则，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_T=0.24V_m，富士达级别龙卷风风速 V_F=V_T+V_m=1.24V_m，从而可导出 V_m 和 V_T。对于强龙卷风设定最大旋转风速半径 R_m 为 50 m，取 ρ=1.293 kg/m^3，由公式（10）和（11）推算得出设计基准龙卷风风速及 dP/dt 和 ΔP 特性列于表 4。由表 4 可知，福清核电评价区域内的总压降为 4.29 kPa，最大压降速率为 1.18 kPa/s。

计算龙卷风产生的飞射物的碰撞速度相当困难，这是因为下列各项的不确定性造成的：（1）飞射物进入龙卷风场的方式（例如，爆炸的、气动的或滑行的）；（2）在龙卷风中被加速物体的空气动力学系数；（3）龙卷风场的形状和速度梯度。

根据核安全导则 HAF101 中的规定，同时考虑到福清评价区域内设计基准龙卷风级别为 F3，而 F3 级龙卷风还不致于使一台 1800 kg 的汽车进入飞射物的状态，所以，在这里只考虑将一个 125 kg 重的 20 cm 穿甲炮弹和一个 2.5 cm 实心钢球作为龙卷风产生飞射物的情景。

根据核安全导则 HAF101 中的规定，计算飞射物的碰撞动量，可把龙卷风设计基准风速 71.4 m/s 的 35% 作为碰撞动量的最大水平速度，得出碰撞动量的最大水平速度为 24.99 m/s。在情景 1 中，假定的穿甲弹的质量为已知量 125 kg；情景 2 中 2.5 cm 实心钢球的质量，可以根据质量=密度×体积计算得出。再根据动量=质量×速度，计算出碰撞动量。由此得到情景 1 的碰撞动量为 3123.75 kg m s^{-1}；情景 2 的碰撞动量为 1.615 kg m s^{-1}。

根据以上计算，可得福清核电评价区域龙卷风设计基准参数如下：最大风速 71.4 m/s（对应概率为 1×10^{-8}），平移速度 13.8 m/s，最大旋转风速 57.6 m/s，最大压降速率为 1.18 kPa/s，总压降 4.29 kPa，龙卷风设计基准等级为 F3。上述分析表明，F3 级

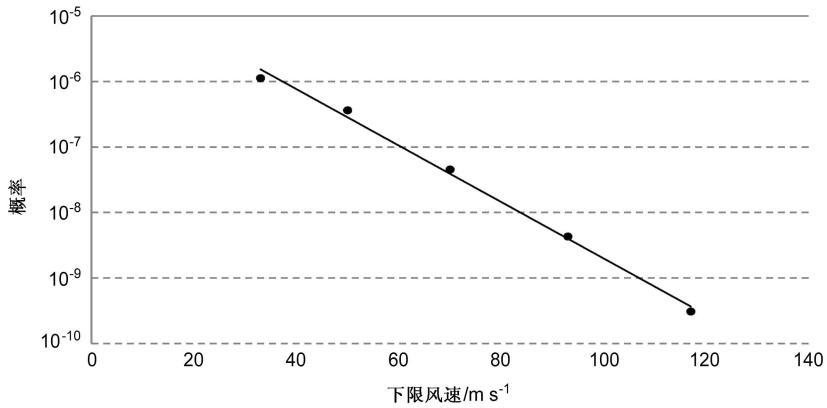

图 5　1959～2017 年福清核电厂评价区每年超过特定风速的概率

Fig. 5　Probability of a nuclear power plant encountering a tornado that exceeds a specified wind speed per year in the Fuqing Nuclear Power Plant evaluation area during 1959–2017

龙卷风在福清核电评价区域内具有足够的保守性和合理性。政府相关部门在福清核电厂以后的建设中，从龙卷风的角度考虑，可以把 F3 级作为基准设计标准。

4　结论

通过调查和统计，1959～2017 年影响福清核电厂评价区域的龙卷风有 107 个，整体来看有上升的趋势。根据灾害的程度，按照富士达（F）龙卷风强度等级分类法，评定为 F2 级的有 14 次，F1 级 42 次，F0 级 51 次。

基于 1959～2017 年福清核电厂厂址区域龙卷风的调查统计资料，采用 Rankine 涡模型计算福清核电厂规划中评价区域超过某一特定风速的概率分布，通过概率值导出设计基准龙卷风和基准设计风速，按照压降模型计算出龙卷风的压降，估算出符合福清厂址实际情况的设计基准龙卷风最大风速的推荐值为 71.4 m/s（对应概率为 1×10^{-8}），平移速度 13.8 m/s，最大旋转风速 57.6 m/s，最大压降速率为 1.18 kPa/s，总压降 4.29 kPa，龙卷风设计基准等级为 F3。事实上厂址地区已在龙卷风少发生的区域，F3 级龙卷风在福清核电评价区域内具有足够的保守性和合理性。这些估算结果为政府相关部门在福清核电厂以后的规划和建设中，从龙卷风的角度考虑，提供了科学的理论依据。

参考文献（References）

Anderson-Frey A K, Richardson Y P, Dean A R, et al. 2016. Investigation of near-storm environments for tornado events and warnings [J]. Wea. Forecasting, 31(6): 1771−1790. doi:10.1175/WAF-D-16-0046.1

曹治强, 方宗义, 方翔. 2008. 2007 年 7 月皖苏北部龙卷风初步分析 [J]. 气象, 34(7): 15−19.　Cao Zhiqiang, Fang Zongyi, Fang Xiang. 2008. Analysis of tornado events in north Anhui and Jiangsu Provinces in July 2007 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34(7): 15−19. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.07.003

Davies-Jones R. 2015. A review of supercell and tornado dynamics [J]. Atmospheric Research, 158–159: 274−291. doi:10.1016/j.atmosres.2014.04.007

杜康云, 顾光芹, 许启慧, 等. 2019. 京津冀区域龙卷风灾害特征分析 [J]. 气象科技, 47(1): 140−146.　Du Kangyun, Gu Guangqin, Xu Qihui, et al. 2019. Disaster characteristics of tornadoes in Beijing –Tianjin –Hebei region [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 47(1): 140−146. doi:10.19517/j.1671-6345.20180039

范雯杰, 俞小鼎. 2015. 中国龙卷的时空分布特征 [J]. 气象, 41(7): 793−805.　Fan Wenjie, Yu Xiaoding. 2015. Characteristics of spatial–temporal distribution of tornadoes in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 41(7): 793−805. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.07.001

甘文举, 何益斌. 2009. 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, 35(1): 84−86, 89.　Gan Wenju, He Yibin. 2009. Analysis of tornado forces on low-rise buildings according to the model of transmitting Rankine vortex [J]. Sichuan Building Science (in Chinese), 35(1): 84−86, 89. doi:10.3969/j.issn.1008-1933.2009.01.023

国家核安全局. 1991. HADl01/10 核电厂厂址选择的极端气象事件: 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.　The National Nuclear Security Agency. 1991. HAD101/10 Extreme Weather Event for Nuclear Power Plant Site Selection: Appendix IV Tornado [S]. Compilation of nuclear safety guidelines (volume I). BEIJING: China Legal Press.

Kuo H L. 1971. Axisymmetric flows in the boundary layer of a maintained vortex [J]. J. Atmos. Sci., 28(1): 20−41. doi:10.1175/1520-0469(1971)028<0020:AFITBL>2.0.CO;2

Sun C N, Burdette E G, Barnett R O. 1977. Theoretical tornado vortex model for nuclear plant design [J]. Nuclear Engineering and Design, 44(3): 407−411. doi:10.1016/0029-5493(77)90175-3

US Nuclear Regulatory Commision. 2007. Design-basis tornado and tornado for nuclear power plants: Regulatory guide 1.076 [S]. Washington: Office of Nuclear Research.

王美珍, 吕令毅. 2017. 基于流固耦合龙卷风作用核电常规岛主厂房响应研究 [J]. 工程建设, 49(3): 23−26, 32. Wang Meizhen, Lü Lingyi. 2017. Tornado-induced response analysis for main power house in conventional Island of nuclear power plant based on fluid-solid coupling method [J]. Engineering Construction (in Chinese), 49(3): 23−26, 32. doi:10.13402/j.gcjs.2017.03.005

王霁吟, 陈宝君, 宋金杰, 等. 2015. 基于再分析资料的我国龙卷发生环境和通用龙卷指标 [J]. 气候与环境研究, 20(4): 411−420. WANG Jiyin, CHEN Baojun, SONG Jinjie, et al. 2015. Atmospheric conditions of tornado genesis and universal Tornadic index based on reanalysis data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20(4): 411−420. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14127

Wurman J, Dowell D, Richardson Y, et al. 2012. The second verification of the origins of rotation in tornadoes experiment: VORTEX2 [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93(8): 1147−1170. doi:10.1175/BAMS-D-11-00010.1

Wurman J, Kosiba K, Robinson P. 2013. In situ, Doppler radar, and video observations of the interior structure of a tornado and the wind-damage relationship [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 94(6): 835−846. doi:10.1175/BAMS-D-12-00114.1

夏祖讽. 1987. 秦山核电厂核安全结构的抗龙卷风设计 [J]. 核动力工程, 8(6): 26−28. Xia Zufeng. 1987. Tornado-resistance design for the nuclear safety structure of the Qinshan nuclear power plant [J]. Nuclear Power Engineering (in Chinese), 8(6): 26−28.

姚聃. 2018. 龙卷数值模拟研究进展 [J]. 气象科技进展, 8(2): 28−35. Yao Dan. 2018. Recent progresses in the numerical simulation of tornadoes [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 8(2): 28−35. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2018.02.003

俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究 [J]. 大气科学, 32(3): 508−522. Yu Xiaoding, Zheng Yuanyuan, Liao Yufang, et al. 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(3): 508−522. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.08

张文娜, 钱江. 2016. 龙卷风作用及核电站结构极端风荷载相关问题研究综述 [J]. 土木建筑与环境工程, 38(6): 121−128. Zhang Wenna, Qian Jiang. 2016. Literature review of tornado action and related issues of nuclear power plants under extreme wind load [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering (in Chinese), 38(6): 121−128. doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.06.016

郑永光, 朱文剑, 姚聃, 等. 2016. 风速等级标准与 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷强度估计 [J]. 气象, 42(11): 1289−1303. Zheng Yongguang, Zhu Wenjian, Yao Dan, et al. 2016. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing county, Jiangsu Province [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(11): 1289−1303. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.11.001

中国核工业总公司. 1989. EJ 420-89 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标 [S]. 北京: 中华人民共和国核工业标准出版社. China National Nuclear Corporation. 1989. EJ 420-89 Three hundred thousand kw PWR nuclear power plant safety critical civil structures tornado resistant design standard [S]. Beijing: People's Republic of China Nuclear Industry Standard Press.

朱好, 陈家宜, 李凤菊, 等. 2016. 核电厂设计基准龙卷风评价的敏感性研究 [J]. 核安全, 15(2): 77−83. Zhu Hao, Chen Jiayi, Li Fengju, et al. 2016. Sensitivity analysis of design−basis tornado for nuclear power plants [J]. Nuclear Safety (in Chinese), 15(2): 77−83. doi:10.16432/j.cnki.1672-5360.2016.02.015