

核电厂超大型海水冷却塔设计风压的取值方法研究

李相业[✉]

(深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518031)

摘要: [目的]发展核电是我国构建清洁能源为主体的新型低碳电力系统的重要举措, 研究开发适用于核电厂的超大型海水冷却塔, 可以大大拓宽核电的厂址资源。[方法]核电厂超大型海水冷却塔属特种构筑物, 受力计算属于三维空间曲面结构, 通常由风荷载参与的组合起截面控制作用。基于核电厂冷却塔设计工程实例, 研究了核电厂超大型海水冷却塔的最大风速和设计风压。[结果]提出了核电厂冷却塔设计风压取值的建议和分析方法。[结论]研究成果对拓宽核电厂址资源储备有较好的应用前景。

关键词: 核电厂; 超大型海水冷却塔; 最大风速; 设计风压

中图分类号: TL4; TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)S1-0058-06

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Wind Pressure in Design of Super Large Seawater Cooling Tower in Nuclear Power Plant

LI Xiangye[✉]

(China General Nuclear Power Design Co., Ltd.(Shenzhen), Shenzhen, 518031, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] The development of nuclear power is an important measure to build a new low-carbon power system with clean energy as the main body in China. The research and development of super-large seawater cooling towers suitable for nuclear power plants can greatly expand the site resources of nuclear power plants. [Method] The super large seawater cooling tower of nuclear power plant was a special structure, and its stress calculation belonged to three-dimensional space curved surface structure, and the section control was usually performed by the combination of wind loads. The maximum wind speed and design wind pressure of super-large seawater cooling tower in nuclear power plant were studied based on the engineering example of cooling tower design in nuclear power plant. [Result] The suggestion and analysis method of design wind pressure value of cooling tower in nuclear power plants are put forward. [Conclusion] The research can expand the resource reserve of nuclear power plant site.

Key words: nuclear power plant; super large seawater cooling tower; maximum wind speed; design wind pressure

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

发展核电, 是我国能源建设的战略方向之一, 对于保障国家能源安全具有重要意义, 双碳背景下, 积极发展核电也是构建我国清洁能源体系, 满足“3060”双碳目标的重要举措。近10年来, 我国优良的核电厂址资源已趋于枯竭, 研究开发适用于核电厂的超

大型海水冷却塔, 可以大大拓宽核电的适宜性, 能为核电发展提供更多、地域更广的核电厂址资源储备。

2022年11月, 我国南方某核电厂被国家核准, 该厂采用了带海水冷却塔的再循环冷却方式, 为国内首例, 预计带冷却塔的再循环冷却方式将成为后续核电厂设计的一种趋势, 超大型冷却塔设计也将成为关注重点。

核电厂冷却塔配置基本均采用一机一塔的方案,海水冷却塔具有高度高、使用寿命长(60年)、占地面积大、建设难度大、造价高、工期长的特点,是核电厂最重要的子项之一。核电厂超大型海水冷却塔属特种构筑物,受力计算属于三维空间曲面结构,通常由风荷载参与的组合起截面控制作用,其基本风压的取值将显著影响冷却塔的结构尺寸及其经济合理性,因而,其风压取值研究具有重要意义。

我国北方某核电厂,自然场地标高 90~165 m(1985 国家高程),一期工程拟建设 2 台百万千瓦核电机组,考虑配置 2 座超大型海水冷却塔,单塔淋水面积约 18 000 m²,结构高度约 203 m,在初步设计过程中,冷却塔采用的设计基本风压取值为 1.015 kPa。核电厂设计原则已经明确海水冷却塔为非核子项,遵循一般的工业与民用建筑设计规范,而荷载规范提供的风压参考值为 0.65 kPa。两个不同的风压值,会导致 2 台机冷却塔的费用差额上亿元。因此,分析核电厂内核设施和非核设施在风压取值方面的异同,建立核电厂冷却塔设计风压的计算方法和设计标准,是一项必须开展的工作。

本文为解决上述问题开展了相关研究工作,以该工程为实例,建立了厂址站和参证站的风速的相关方程,利用耿贝尔分布和皮尔逊Ⅲ型概率分布^[1-2],推导了该核电厂超大型海水冷却塔的最大风速和基本风压,并和规范提供的基本风压值进行对比,为此项目超大型海水冷却塔的设计风压提出了建议,也为今后的核电厂超大型海水冷却塔的设计风压取值提供了一个可参考的分析方法。

1 分析方法

现行荷载规范对基本风压测定的要求是:测定风速处的地貌要求空旷平坦、距地 10 m、时距为 10 min 平均最大风速、历年最大风速的概率分布曲线采用极值 I 型。

《建筑结构荷载设计手册》(4 版)^[3]对基本风压的确定,提出了 3 种取值方法:

1) 直接按规范的规定取值。现行《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[4](简称荷载规范)通过全国基本风压分布图给出了全国基本风压的等压线分布,同时还对部分城市给出了有关的风压值,可以直接使用。

2) 根据当地气象台站年最大风速实测资料,按基本风压的定义,通过统计分析后确定。分析时应考虑样本数量(不得小于 10)的影响^[5-6]。

3) 若当地没有风速实测资料时,可通过附近地区的长期资料,通过气象和地形条件的对比分析确定。

现状核电厂场地上,有已经运行的风电场风机,每个风机顶部有风速仪,记录有连续 8 a 的观测数据;风电场建设前,另有风电场测风塔,积累有连续 6 a 的测风数据。其中 11 号风机距离风电场测风塔不到 200 m,可以将二者的观测数据经过归一化处理后再通过统计分析确定超大型海水冷却塔的基本风压。该方法属于上述手册中第 2 条的方法。

同时,目前的核电厂场地上建有核电专用百米气象塔,有最近 1 整年的风速观测数据,可以通过附近地区参证气象站的长期风速观测资料,建立相关性方程进而推导出核电厂百米气象塔场地的基本风压。该方法即是上述手册中第 3 条的方法。

本文用下列 3 种方法分析该项目超大型海水冷却塔的风速和基本风压的取值^[7]:

1) 规范直接取值法:直接在荷载规范中的全国基本风压分布图中选用百年一遇风压值。

2) 现场实测数据直接推算法:利用场地上现有的风电场 11 号风机上的风速仪和风电场测风塔的风速观测数据(衔接起来有连续 13 a 的风速观测数据),归一化后进行统计分析,按照荷载规范提供的极值 I 型概率分布曲线,计算百年一遇的风速和基本风压。

3) 参证站相关方程概率法:归一化参证站的观测数据,用极值 I 型和皮尔逊Ⅲ型概率分布曲线,计算参证站百年一遇的风速;建立厂址站与参证站的相关方程,推导出厂址站的风速,进而计算出基本风压。

比较上述 3 种方法得出的风速和基本风压,取大值作为冷却塔设计的建议值。

2 风速和基本风压值计算

2.1 规范直接取值法

荷载规范给出了全国各城市的基本风压值,也给出了全国基本风压分布图。其中,核电厂所在地 A 市的百年一遇风压为 0.60 kPa,距离核电厂不到 15 km 的 B 市的百年一遇风压为 0.65 kPa,全国基本

风压分布图中核电厂地区 50 年一遇基本风压为 0.60 kPa。将三个值换算为百年一遇并取大值,核电厂的百年一遇风压可以取为 0.65 kPa。反算风速,重现期 100 年的风速为 32.25 m/s^[6]。

2.2 现场实测数据直接推算法

2.2.1 风电场 11 号风机的实测风速

风电场 11 号风机位于核电厂西围墙处,核电厂建设后将予以拆除,风机地面高程 160 m,风机顶部(距地 83 m 高度处)有风速仪,有 2015~2022 年之间的实测风速。风速仪为 300 s 连续记录,年最大风速记录见表 1。

表 1 风电场 11 号风机的实测风速

Tab. 1 Measured wind speed of No. 11 fan of wind farm

年份	风速*	记录时间	
		日期	时刻
2015	40.82	2015-08-03	23:05:00
2016	37.24	2016-02-13	07:30:00
2017	25.01	2017-01-20	02:20:00
2018	38.11	2018-02-10	13:10:00
2019	23.24	2019-04-25	13:00:00
2020	41.21	2020-02-15	23:20:00
2021	36.94	2021-03-01	03:35:00
2022	26.17	2022-10-03	18:00:00

注: 1)*为 300 s 平均最大风速/(m·s⁻¹)。

2)测试高程为 160 m,风速仪距地高度为 83 m。

2.2.2 风电场建设期测风塔的实测风速

风电场建设期间的测风塔距离 11 号风机 200 m,现在已拆除,留存有 2010~2015 年间的测风资料,见表 2。

表 2 风电场测风塔 10 min 最大平均风速

Tab. 2 Maximum average wind speed in 10 minutes at anemometer tower in wind farm

m/s			
年份	风速	年份	风速
2010	20.30	2013	21.50
2011	23.80	2014	20.10
2012	24.00	2015	20.40

注:该风电场已拆除,高程 130 m,风速仪距地高度 10 m。

因为风电场 11 号风机上风速仪的绝对高程为 243 m,而测风塔下垫面高程为 130 m,需要将 11 号风机的实测风速归一化到测风塔下垫面的风速。

HAD101-10 导则指出,风速随高度的变化可以用幂函数式来表示:

$$V_h = V_z \left(\frac{h}{z} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中:

h ——参照高度(m);

z ——测量高度(m);

V_h 、 V_z ——相应高度的风速(m/s);

α ——气象专题研究报告推荐的该场地风廓线指数为 0.15。则有:

$$V_{243} = V_{130} \left(\frac{113}{10} \right)^{0.15} \quad (2)$$

由公式(1)推出:

$$V_{130} = \frac{V_{243}}{1.439} \quad (3)$$

式中:

V_{243} ——绝对高程为 243 m 处的风速(m/s);

V_{130} ——建设期测风塔场地的风速(m/s)。

按照《建筑结构荷载设计手册》(4 版)^[3]表 6-2 “不同时距与 10 min 时距风速换算系数 β ”, 10 min 时距和 5 min 时距的平均风速换算系数为 1.07。

对 11 号风机的风速进行高度和时次换算,归一化到测风塔上的风速结果见表 3。

表 3 归一化后风电场测风塔上的风速
(10 min 年平均最大风速)

Tab. 3 Wind speed at anemometer tower after normalization
(annual maximum average wind speed in 10 minutes)

m/s			
年份	风速	年份	风速
2010	20.30	2017	16.24
2011	23.80	2018	24.75
2012	24.00	2019	15.09
2013	21.50	2020	26.76
2014	20.10	2021	23.99
2015	20.40	2022	17.00
2016	24.18		

近 13 年最大风速样本的平均值及标准差:

平均值为: $\bar{x}=21.39$ m/s;

$$\text{标准差 } \sigma_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)} = 3.613 \text{ m/s} \quad (4)$$

查《建筑结构荷载设计手册》(4 版)^[3]表 5-1 “系数 C_1 和 C_2 ”, 当 $n=13$ 时, 有:

$C_1=0.9972$, $C_2=0.507$; 分布函数的位置参数 μ 及尺度参数 α 的近似估计值为:

$$\alpha = \frac{C_1}{\sigma_1} = \frac{0.9972}{3.613} = 0.276 \text{ m/s} \quad (5)$$

$$\mu = \bar{x} - \frac{c_2}{\alpha} = 21.39 - \frac{0.507}{0.276} = 19.55 \text{ m/s} \quad (6)$$

代入荷载规范第 E.3.3 条的公式 E.3.3, 重现期 100 年的最大风速为:

$$V_R = u - \frac{1}{\alpha} \ln \left[\ln \left(\frac{R}{R-1} \right) \right] = 36.22 \text{ m/s}。 \quad (7)$$

高度订正: 核电厂的厂坪设计标高为 100 m, 风电场测风塔的下垫面高度为 130 m, 应该将高度订正为厂坪标高, 才是冷却塔的设计风速和基本风压。按照公式(1), 有:

$$V_h = V_z \left(\frac{h}{z} \right)^\alpha \quad (8)$$

$$36.22 = V_z \left(\frac{30}{10} \right)^{0.15} \quad (9)$$

$$V_z = 30.72 \text{ m/s} \quad (10)$$

即冷却塔百年一遇设计风速为 30.72 m/s。

$$\text{基本风压为: } W_0 = \frac{V^2}{1600} = 0.590 \text{ kPa} \quad (11)$$

2.3 参证站相关方程概率法

2.3.1 参证站的选取

核电厂厂址附近范围内, 有 3 个主要气象站, 其中气象站 1 为国家基准站, 海拔高度为 4.80 m, 距离厂址站(核电厂专用百米气象塔, 下同)最近, 为 15.90 km, 地形地貌相似, 通过分析, 选择其作为参证站进行风速相关性分析。

利用厂址站与参证站 10 m 高度处一整年逐时同步测风数据, 采用数学统计的方法, 对两站同步的风观测数据进行相关性分析, 可以看出: 厂址站与参证站在 10 m 高度处平均风速、10 min 最大风速相关系数均在 0.70 以上, 且其相关关系均通过 0.01 显著性水平检验, 表明厂址站与参证站风速相关性较好, 选择气象站 1 作为参证站是合理的。

2.3.2 归一化后参证站的风速

参证站 1970 年前的测风仪时距是 2 min 的, 1970 年后风速记录仪是 10 min 时距; 参证站 1988 年迁过一次站址, 观测场高度有变化, 需要对风速资料同时进行高度和时次换算。参证站归一化处理后的历年最大风速见表 4。

表 4 参证站归一化处理后历年最大风速

Tab. 4 Maximum wind speed after normalization of reference station

		m/s	
年份	风速	年份	风速
1958	18.8	1990	18.8
1959	22.2	1991	18.5
1960	20.5	1992	13.0
1961	22.2	1993	11.8
1962	20.5	1994	12.6
1963	22.2	1995	13.5
1964	33.9	1996	17.1
1965	20.5	1997	12.3
1966	22.2	1998	12.7
1967	22.2	1999	11.4
1968	22.2	2000	14.3
1969	21.3	2001	12.8
1970	21.0	2002	10.4
1971	18.3	2003	12.9
1972	20.0	2004	10.9
1973	19.0	2005	12.1
1974	17.0	2006	11.9
1975	18.3	2007	13.1
1976	17.1	2008	11.2
1977	19.1	2009	11.4
1978	16.8	2010	13.4
1979	17.7	2011	10.3
1980	19.4	2012	13.1
1981	16.8	2013	10.9
1982	17.1	2014	11.3
1983	20.7	2015	10.3
1984	17.1	2016	10.6
1985	16.8	2017	9.6
1986	14.8	2018	10.6
1987	14.5	2019	11.1
1988	15.5	2020	11.5
1989	15.5	2021	9.9

2.3.3 参证站最大风速推算

采用耿贝尔分布、皮尔逊 III 型分布分别对参证站最大风速进行极值分析, 用柯尔莫哥洛夫检验方法对各种分布的拟合优度进行检验, 结果表明, 上述各种分布及参数估计方法柯氏检验 d 值均通过信度为 0.01 的检验。两种分布计算出的参证站最大风速见表 5。

表 5 参证站最大风速计算结果

频率	3.33%	2%	1.67%	1%	0.5%	0.1%
耿贝尔分布	26.0	27.8	28.5	30.3	32.8	38.6
皮尔逊III型分布	28.5	30.8	31.8	34.0	37.1	44.4

2.3.4 厂址站最大风速推算

厂址站的风速观测时间段为 2021 年 7 月~2022 年 6 月,考虑到风速的随机性较强,基于安全偏保守的原则,选取厂址站 10 m 高度处风速 ≥ 8.0 m/s 大风观测数据(样本数为 2 029 个)与参证站同期数据建立相关关系,如图 1 所示。

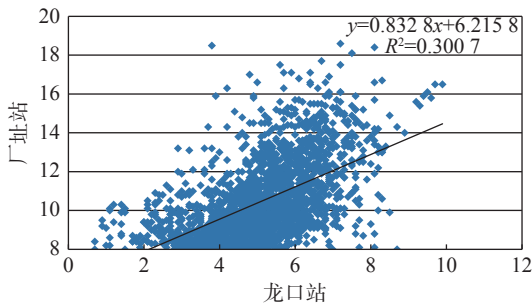


图 1 厂址站与参证站同期数据相关关系

Fig. 1 Correlation between data of plant site station and reference station at the same period

厂址站与参证站的相关方程为: $y_{\text{厂址}} = 0.8328x_{\text{参证}} + 6.2158$, 相关系数为 0.548 4。

由上述分析可以看出,大风速段参证站和厂址站相关性显著。采用参证站耿贝尔分布和皮尔逊 III 型分布频率 3.33%、2%、1%、0.5%、0.1% 的 10 min 最大风速计算结果,推算厂址站 3.33%、2%、1%、0.5%、0.1% 的 10 min 最大风速(见表 6)。

表 6 厂址站最大风速计算结果

频率	3.33%	2%	1.67%	1%	0.5%	0.1%
耿贝尔分布	27.9	29.4	29.9	31.4	33.5	38.4
皮尔逊III型分布	29.9	31.8	32.7	34.5	37.1	44.4

2.3.5 冷却塔设计风速换算

由表 6 可知,厂址站百年一遇的最大风速为 34.5 m/s(取值皮尔逊 III 型分布)。

厂址站下垫面标高为 130 m,核电厂厂坪设计标高为 100 m,需要进行高度订正才能得出冷却塔的设计风速和基本风压。根据厂址气象塔各层间的切变指数,采用最小二乘法拟合得到风廓线指数为 0.15,仍然采用公式(1),得出:

$$V_{130} = V_{100} \left(\frac{h}{z} \right)^{\alpha} \quad (12)$$

$$34.50 = V_{100} \left(\frac{30}{10} \right)^{0.15} \quad (13)$$

$$V_{100} = 29.26 \text{ m/s} \quad (14)$$

即冷却塔百年一遇设计风速为 29.26 m/s。

$$\text{基本风压: } W_0 = \frac{V^2}{1600} = 0.535 \text{ kPa} \quad (15)$$

3 结论

3.1 计算结果

上述 3 种方法计算出来的该核电厂超大型海水冷却塔的风速和风压值如表 7 所示。

表 7 冷却塔的风速和风压

Tab. 7 Wind speed and wind pressure of cooling tower

计算方法	百年一遇 10 min 最大风速/(m·s ⁻¹)	百年一遇基本风压/kPa
规范直接取值法	32.25	0.650
现场实测数据直接推算法	30.72	0.590
参证站相关方程概率法	29.26	0.535

综合比较,建议该核电厂超大型海水冷却塔的风荷载设计基准,按照百年一遇的风压取值,为 0.65 kPa。

3.2 讨论

1)核电厂极端气象参数和极端气象现象的设计基准为低超越概率的极值,比常规电力工程要求高^[5]。核电厂内的子项应该区分核设施与非核设施,非核设施,包括冷却塔,可以按照常规的工业与民用建筑设计规范进行设计。

2)分析极端风的影响时,核设施用的是“区域”的概念,一般会对厂址半径 80 km 范围内的气象资料进行统计和分析。一般的工业与民用建筑,用的是“场地”的概念,气象资料的收集范围会小一些,与风荷载有关的地面粗糙度一般考虑最远距离不小于建筑物高度的 20 倍且不小于 2 km 的范围,其场地的范围相当于厂区或不小于 1.0 km² 的平面面积。

3)核设施与非核设施,风速随高度的变化都可以用幂函数式(公式 1)来表示。核设施一般根据气象塔各层间的切变指数,采用最小二乘法拟合得到风廓线指数;非核设施,可以按照荷载规范的建议,标准地貌上的地面粗糙度指数按照 0.15 取值。

4)计算核设施风速时,设计最大风速的统计曲线函数一般会采用耿贝尔概率密度函数和皮尔逊 III 型概率密度函数两种方法,从其频率分布线型上选取不同频率对应的风速,两种方法取大值。

5)非核设施计算风速时,荷载规范规定历年最大风速的概率分布曲线采用极值 I 型。我国荷载规范早期采用皮尔逊 III 型分布曲线,现已与世界大多数国家一样,改用极值 I 型分布曲线来描述。从实际工程应用结果来看,皮尔逊 III 型分布曲线要比耿贝尔曲线更保守一些。

6)核电厂在确定设计风荷载时,对历史特大风应进行所谓的“特大值处理”,避免出现频率计算时定线不合理的情况。《数据的统计处理和解释: I 型极值分布样本离群值的判断和处理》(GB/T 6380—2019)^[1]标准规定了判断和处理 I 型极值分布样本中上侧离群值的一般原则和实施办法。对于收集到的数据应该首先据此进行判断和处理,否则有可能出现样本中含有上侧离群值而增大统计结果的问题。

7)荷载规范是在全国 672 个地点的基本气象站的观测资料的基础上,用概率论法对历史观测资料采用频率分析计算出来的风速的极值,其中已包括主导我国设计风荷载的极端风气候(台风或冷锋风)。非特殊地形地貌上的核电厂,其超大型海水冷却塔建议按非核设施考虑,其设计风压建议直接使用荷载规范中给出的基本风压参考值。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.数据的统计处理和解释 I型极值分布样本离群值的判断和处理:GB/T 6380—2019 [S].北京:中国标准出版社,2019. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Statistical interpretation of data—detection and treatment of outliers in the sample from type I extreme value distribution: GB/T 6380-

2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

- [2] 陈希孺. 概率论与数理统计 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
CHEN X R. Probability theory and mathematical statistics [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.
- [3] 沙志国, 沙安. 建筑结构荷载设计手册(4版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
SHA Z G, SHA A. Building structure load design manual (4th ed.) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [5] 国家核安全局. 核电厂厂址选择的极端气象事件(不包括热带气旋): HAD 101/10 [S]. 北京: 国家核安全局, 1991: 727-771.
National Nuclear Safety Administration. Extreme meteorological events (excluding tropical cyclones) for site selection of nuclear power plants: HAD 101/10 [S]. Beijing: National Nuclear Safety Bureau, 1991: 727-771.
- [6] 山东招远核电项目极端气象参数及常规气象参数分析与计算分析报告 [R]. 济南: 山东省气候中心, 2022.
Extreme meteorological parameters and conventional meteorological parameters analysis and calculation analysis report of Zhaoyuan nuclear power project in Shandong province [R]. Jinan: Shandong Climate Center, 2022.
- [7] 张相庭. 结构风工程理论·规范·实践 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
ZHANG X T. Structural wind engineering theory, specification and practice [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.

作者简介:



李相业

李相业 (通信作者)

1970-, 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为核科学与技术(e-mail)182266093@qq.com。

(编辑 赵琪)