

# 核事故大气扩散的 多风扇风洞设计及实验验证

范海民<sup>1</sup>, 马元巍<sup>1,\*</sup>, 张继革<sup>1</sup>, 王 炫<sup>2</sup>, 吴思远<sup>1</sup>, 顾卫国<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 上海核工程研究设计院, 上海 200233)

**摘要:**在核电厂发生严重事故时,需用大气扩散模型对核事故后果进行环境评价,而模型的准确性可通过风洞实验进行验证。为了提高风洞实验验证的准确性,克服被动风洞对边界层模拟的适应性差、调节复杂等缺点,本文将结构抗风中的多风扇技术引入到核事故大气扩散模拟研究中。通过设计10(行)×8(列)多风扇风洞,搭建了带风速反馈的风机阵列主动控制系统,对D类稳定度下边界层风速廓线特性进行了风洞模拟。本文实现了石岛湾核电厂址的风速廓线的快速模拟,且模拟精度较高,验证了多风扇风洞技术对大气边界层模拟的可靠性,为核电厂址大气扩散风洞实验提供了新的实验方法。

**关键词:**多风扇风洞;大气扩散;主动控制;核事故;风速廓线

中图分类号:TM623.8

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2018)01-0168-07

doi:10.7538/yzk.2017.youxian.0182

## Design and Experimental Research of Multi-fan Wind Tunnel for Atmospheric Diffusion in Nuclear Accident

FAN Haimin<sup>1</sup>, MA Yuanwei<sup>1,\*</sup>, ZHANG Jige<sup>1</sup>, WANG Xuan<sup>2</sup>,  
WU Siyuan<sup>1</sup>, GU Weigu<sup>1</sup>

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** In the event of a serious accident in the nuclear power plant, the atmospheric diffusion model is needed to evaluate the environmental consequences of nuclear accidents, and the accuracy of the model can be verified by wind tunnel experiment. In order to improve the accuracy of the verification for the wind tunnel experiment, the multi-fan technology in the structural wind resistance, which overcomes the shortcomings of the traditional passive wind tunnel such as the poor adaptability to the boundary layer simulation and the complicated regulation, was put into the simulation of the atmospheric diffusion of the nuclear accident. Through the design of 10 (row) × 8 (column) multi-fan wind tunnel and the build of an active control system with wind

收稿日期:2017-03-27;修回日期:2017-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11575113);大型先进压水堆及高温气冷堆核电站专项资助(2013ZX06004-008)

作者简介:范海民(1993—),男,四川南充人,硕士研究生,核科学与技术专业

\*通信作者:马元巍,E-mail: coldtiger@sjtu.edu.cn

网络出版时间:2017-09-15;网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20170915.0845.014.html

speed feedback for fan array, the simulation of wind speed profile of boundary layer at class D stability was carried out by this multi-fan wind tunnel. The rapid simulation of the wind speed profile of the Shidaowan Nuclear Power Plant site was realized in this paper, and the simulation precision is relatively high. The reliability of the simulation for the atmospheric boundary layer is verified with the multi-fan wind tunnel technology, which provides a new empirical method for the experiment of atmospheric diffusion wind tunnel.

**Key words:** multi-fan wind tunnel; atmospheric diffusion; active control; nuclear accident; wind speed profile

核电厂一般采用高斯模型对核事故下气载放射性核素的扩散保守快速评估(RG1.145)<sup>[1-2]</sup>,但对于不同厂址、不同气象环境的高斯模型中的扩散参数的适用性有待进一步验证。我国核安全导则“核电厂厂址选择的大气弥散问题”中明确规定,对于复杂地形扩散建议通过实验(野外和物理模拟)确定特定厂址的扩散参数和烟羽轨迹<sup>[3-5]</sup>,其中风洞实验是一种重要的研究方法。由于传统上使用野外示踪实验得到扩散参数的准确性越来越受到质疑,通过对特定厂址环境及气象条件进行物理模拟的方法在国内外得到了较快的发展。

Michioka等<sup>[6]</sup>在研究冷却塔雾羽扩散的风洞实验时,提出用混合气体( $C_2H_4$ ,  $H_2$ )代替水蒸气模拟雾羽的扩散方法,其实验发现雾羽抬升高度和雾羽扩散长度与 Benning Road 电厂的现场观测值一致,验证了风洞实验模拟大气扩散的有效性;Guo等<sup>[7]</sup>对湖南桃花江核电厂冷却塔对周围的大气流动和污染物扩散的影响进行了风洞模拟,验证了距离冷却塔中心50~200 m范围内雾羽抬升高度满足 Briggs 公式。但其均采用被动风洞的方法进行扩散模拟,且对大气边界层的特征模拟缺乏深入研究。研究大气扩散时,风洞模拟范围一般在几公里,需在风洞中模拟出较大的湍流尺度,但这无法通过被动模拟实现。文献[8-9]通过多风扇风洞技术模拟出具有大湍流尺度的大气边界层,且几乎重现了与自然风湍流一致的脉动风速时程,因此,在模拟大气边界层方面,多风扇风洞技术相比传统风洞更具优越性。但由于大气扩散问题的边界条件、模拟尺度与传统结构抗风的条件并不相同,所以多风扇风洞的有效性需进一步

验证。

为解决核事故扩散中大气边界层难以模拟、克服传统风洞难以控制的问题,本文将多风扇技术引入到核事故大气扩散的模拟中。通过搭建10(行)×8(列)主动控制风机阵列,设计带风速反馈的风机阵列控制系统,并通过对石岛湾厂址环境下的边界层风速廓线的模拟进行多风扇风洞的有效性验证。

## 1 多风扇风洞系统设计

大气边界层的模拟技术主要分为两类:被动模拟和主动模拟。被动模拟的典型特征是利用尖劈、粗糙元、格栅等装置,经过适当的组合产生适当的风速剖面和大尺度湍流,从而形成一定厚度的风洞边界层来模拟大气边界层,但被动模拟需较长的扩散稳定段,边界层风速廓线的模拟对尖劈形状及粗糙元布置方式有较大的依赖性,湍流积分尺度与实际不一致导致流型与实际偏差较大。主动模拟的典型特征是通过主动控制结构,调节注入风场的能量来实现大气边界层的模拟<sup>[10]</sup>,如日本 Miyazaki 大学和 Tokyo 大学的多风扇风洞,均是通过风机阵列来调节不同空间位置注入能量。本文将多风扇主动风洞技术引入到核事故下大气边界层扩散的模拟。

### 1.1 多风扇风洞整体设计及结构

风洞设计总长8 m,截面尺寸1.6 m×1.6 m,主要的结构特征包括风洞入口段、收缩段、扩散段、实验段(图1)。其中,风洞入口(图2)为10(行)×8(列)的风机阵列,该结构是产生风速剖面的主要特征。每个风扇直径为20 cm,扇叶为铝合金材质,最大风速为10 m/s,且风速分布较为均匀,风扇通过联轴器与电机连接。

电机采用伺服电机,能实时反馈电机速度和位置信息,通过定制件固定到每个收缩段通道。收缩段为三维收缩曲面,长度为1.2 m,其为每个风扇提供独立的通道。扩散段和实验段分别为1.6 m的两个箱体模块,箱体材料为铝合金型材和钢化玻璃,从而便于采用激光测量方式(PIV, PLIF等)测量流场及浓度场。在风洞入口截面3.7 m处设计了二维坐标架,用于控制风速测量装置的位置,可测量风洞二维截面任意点的风速,该结构是风速反馈系统的基础。

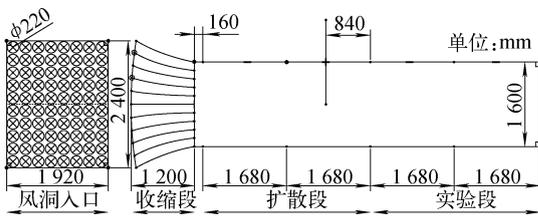


图1 多风扇风洞整体设计简图

Fig. 1 Sketch of overall design of multi-fan wind tunnel

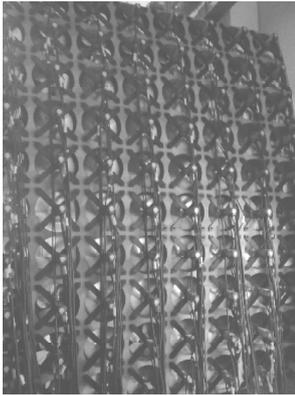


图2 多风扇风洞入口

Fig. 2 Inlet of multi-fan wind tunnel

## 1.2 多风扇风洞控制系统

该风洞使用多轴运动控制器 MC664-X (Trio Motion) 作为上位机,其最大支持128轴。采用RTEX通信模式完成上位机对多个伺服驱动器的通信,其主要包括3部分:风机阵列控制系统、二维坐标架控制系统和风速测量及反馈系统(图3)。

1) 风机阵列控制系统用于控制80个100 W伺服电机,通过驱动器的速度模式调节伺服电机的转速。

2) 二维坐标架控制系统通过两个正交放置的400 W伺服电机来控制风速仪的位置,从而实现不同位置风速的测量。同时,风速仪的位置通过驱动器的位置模式下的实时反馈信号及标定数据进行确定。

3) 为了实时获取测量点的风速数据,通过Modbus-RTU通信模式采集风速仪的RS485信号,且以此测量数据作为风速反馈调节依据,其风速测量二维平面位于距风洞入口3.7 m处。

## 2 多风扇风洞风速规律及大气边界层模拟验证

### 2.1 多风扇风洞风速规律

为高效、准确地模拟大气边界层,需对该多风扇风洞的风速规律进行研究,其中包括平均风速的估计(风速真值估计方法研究)、通道内电机转速对风速影响的规律研究(多风扇风洞出风风速规律研究)及风速廓线的控制策略研究。

#### 1) 风速真值估计方法

本实验采用测量频率为1 Hz的风速仪,其通过两个基准级铂电阻温度传感器的恒温差原理测量,测量精度为1.5%。由于风速脉动和

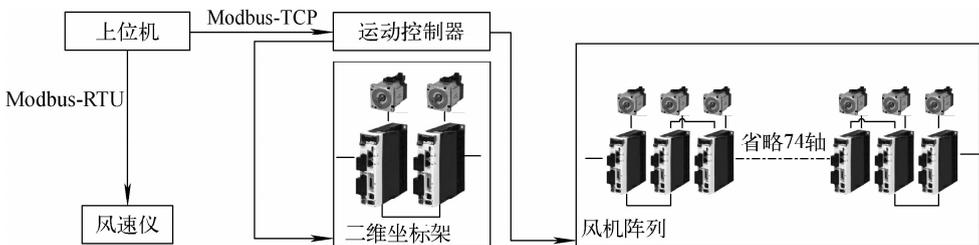


图3 多风扇风洞控制系统

Fig. 3 Control system of multi-fan wind tunnel

实验室环境的电磁干扰,传感器测量得到的风速呈现随机波动的特征,无法直接采用测量值作为平均风速,本实验通过集合卡尔曼方法估计的风速真值作为平均风速。

本实验设计了一滤波器,通过同化风速仪的测量值实时修正真值的估计值,由于该系统为线性系统,因此在滤波器的设计上最小方差估计、卡尔曼滤波等方法在数学上是等价的。这里假设风速受随机噪声的影响,采用集合卡尔曼滤波方法(EnKF)估计风速真值,也即平均风速<sup>[11]</sup>。首先假定风速真值是稳定的,仅受到环境的影响呈现微小的波动,则:

$$\psi_t = \psi_{t-1} + q \quad (1)$$

其中: $\psi$ 为风速真值; $q$ 为呈高斯分布的误差。

测量值可表示为:

$$d = H\psi + \epsilon \quad (2)$$

其中: $H$ 为测量函数,即真值经过矩阵 $H$ 转换为测量值,在此处由于是简单线性系统,该值为1; $d$ 为模型计算得到的探测值; $\epsilon$ 为呈高斯分布的探测误差。

定义一包含 $N$ 个风速值的集合 $\mathbf{A}^f = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N)$ ,其中 $f$ 代表预测值。模型误差协方差为 $\mathbf{P}$ ,测量误差协方差为 $\mathbf{R}$ ,对于 $N$ 个 $\psi$ ,则有:

$$d_j = d + \epsilon_j \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

可组成矩阵 $\mathbf{D}$ 为:

$$\mathbf{D} = [d_1, \dots, d_j, \dots, d_N] \quad (4)$$

根据集合卡尔曼滤波,最优估计值为:

$$\mathbf{A}^a = \mathbf{A}^f + \mathbf{P}^f \mathbf{H}^f (\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^f + \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{D} - \mathbf{H} \mathbf{A}^f) \quad (5)$$

其中,上标 $a$ 代表为分析得到的估计值。得到 $\mathbf{A}^a$ 后计算 $\psi$ 的平均值 $\bar{\psi}$ ,即为最优估计。

## 2) 多风扇风洞出风风速规律

为了研究10(行) $\times$ 8(列)风机阵列的整体性能,需定量研究电机转速与风洞风速的关系,得到多风扇风洞的风速规律。通过控制80个风扇电机工作在同一转速 $n$ ,在距离风洞入口3.7 m、高度0.8 m处测量该点位置的风速,且通过集合卡尔曼滤波方法估计平均风速 $\bar{v}$ (表1)。对 $\bar{v}$ 和 $n$ 进行线性拟合可得到式(6),可看出,两个变量具有较强的线性相关性。

$$\bar{v} = -0.04271 + 0.00105n \quad (6)$$

## 3) 风速廓线的控制策略

在多风扇风洞模拟大气边界层中,不仅需

研究整体出风风速规律,还需研究如何模拟目标风速廓线特征,由于流体连续性,每层电机转速的改变均将对相邻层风速产生较大影响。本文通过测量不同位置风速,且依据当前风速和目标风速的差异反复调节电机转速,从而实现大气边界层的模拟。

表1 不同电机转速下的平均风速

Table 1 Average wind speed at different motor speeds

$n/(r \cdot \min^{-1})$	$\bar{v}/(m \cdot s^{-1})$	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$\bar{v}/(m \cdot s^{-1})$
300	0.397	2100	2.136
600	0.603	2400	2.432
900	0.81	2700	2.815
1200	1.184	3000	3.128
1500	1.49	3300	3.45
1800	1.801	3600	3.725

该风洞调节策略主要是基于风速的实时测量值来调节电机转速,从而控制风速廓线,由于风洞为10行风机,因此将二维平面内10个高度层的风速作为边界层风速廓线模拟目标。根据每个高度层的目标风速及式(6)计算电机转速,并将其作为电机初始转速,然后依据各高度层测量点的风速反馈修正电机转速,且每层的风速目标值都基于对相邻3层电机转速的修正,最终使所有测量点符合风速廓线规律。风速测点位置示意图及调节流程如图4所示。

## 2.2 大气边界层模拟验证

对于核电厂事故应急,需模拟电厂周围几公里以内的扩散条件,且分析大气边界层高度内的扩散抬升。对放射性核素扩散的影响最为典型的气象特征是风速和风向,其直接影响核素扩散的快慢及范围。此外,大气边界层内的温度特征对扩散也有一定的影响,若出现逆温层是非常不利于核素垂向扩散的。其他大气特征如雨雪天气也会对扩散造成影响。中国现有法规中对大气边界层的分类推荐使用修订帕斯奎尔分类法(表2),将边界层分为强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、较稳定和稳定6级,分别表示为A、B、C、D、E、F。

其中,地面风速是指距地面10 m高度处10 min平均风速,太阳辐射等级数与云量及太阳高度角有关。在风洞环境下,由于空气流体

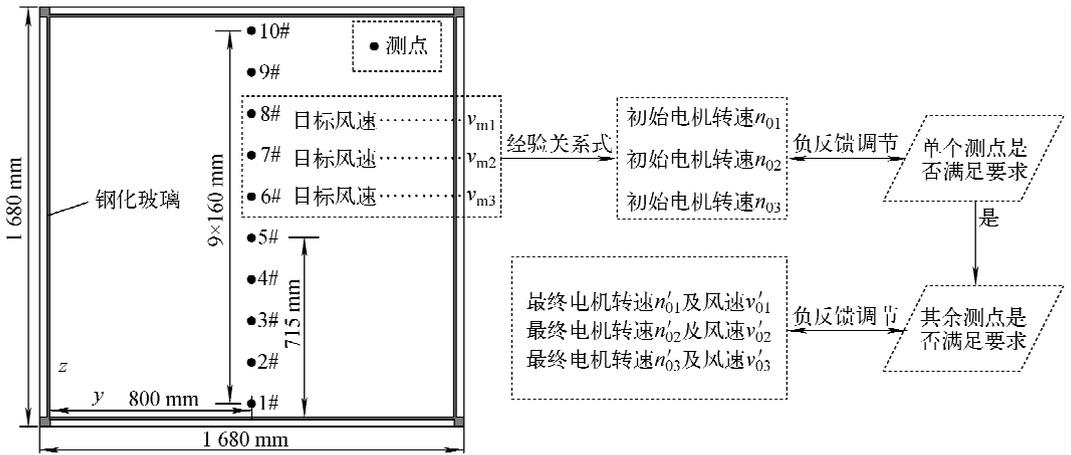


图4 风速测点示意图及调节流程图

Fig. 4 Sketch of wind speed measurement point and flow chart of wind speed adjustment

表2 中国大气稳定度分级

Table 2 China's atmospheric stability classification

地面风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	不同太阳辐射等级数下的大气稳定度					
	3	2	1	0	-1	-2
$\leq 1.9$	A	A-B	B	D	E	F
2~2.9	A-B	B	C	D	E	F
3~4.9	B	B-C	C	D	D	E
5~5.9	C	C-D	D	D	D	D
$\geq 6$	D	D	D	D	D	D

速度与温度的耦合,非常难以同时实现大气中的速度层结和温度层结特征,目前风洞研究主要集中在大气边界层的速度层结模拟,即对大气边界层速度廓线的模拟。本文根据石岛湾厂址的现场观测数据对该厂址的高频风向下的典型风速特征进行模拟验证,即对D类稳定度下SSW-NNE风向的边界层特征进行模拟。为了在1.6 m的风洞高度上模拟2 km高度边界层速度廓线特征,采用1:1 500的比例模拟。大气边界层速度廓线满足:

$$v_z = v_{10} (z/z_{10})^a \quad (7)$$

其中: $v_z$ 为高度为 $z$ (m)的平均风速; $v_{10}$ 为10 m高度处的平均风速,石岛湾现场测量值 $v_{10} = 6 \text{ m/s}$ ;  $a$ 为风廓线指数,现场测量值 $a = 0.2$ 。

在该多风扇风洞模拟中,根据相似准则中动力相似原则,即根本茂准则:

$$v_m/v_p = (L_m/L_p)^{1/3} \quad (8)$$

其中: $v_m$ 、 $v_p$ 分别为模型和原型平均风速; $L_m$ 、 $L_p$ 分别为模型和原型特征长度。

本系统中风速测量位置位于距离风洞入口3.7 m处,且测量10个高度层。原型各层高度 $h_p$ 和模型各层高度 $h_m$ 与风洞模拟目标风速 $v_b$ 的关系列于表3。

表3  $h_p$ 和 $h_m$ 与 $v_b$ 的关系Table 3 Relation of  $h_p$ ,  $h_m$  and  $v_b$ 

$h_p/\text{m}$	$h_m/\text{mm}$	$v_b/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$h_p/\text{m}$	$h_m/\text{mm}$	$v_b/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
112	75	0.850 5	1 312	875	1.390 2
352	235	1.068 8	1 552	1 035	1.437 7
592	395	1.185 7	1 792	1 195	1.479 6
832	555	1.269 2	2 032	1 355	1.517 3
1 072	715	1.335 2	2 272	1 515	1.551 5

在模拟风速廓线时,根据式(6),预定义各层电机转速 $n_0$ ,然后完成各层位置的风速测量,并比较其与目标风速值间的差异,通过调节各层及其附近层电机转速,实现风速廓线剖面的模拟。各调节结果列于表4,其中, $n'$ 为最终调节转速, $v'$ 为在 $n'$ 转速下各层平均风速。可看出,风洞顶部的高度层的最终电机转速与初始电机转速差异较大,这是由于风速廓线要求上部风速较高,而风洞顶部内壁面的边界层对风洞内流动有一定影响。 $v'$ 与 $v_b$ 的对比关系如图5所示。

表 4 电机初始转速与最终转速及对应风速

Table 4 Motor initial speed and final speed with corresponding wind speed

$h_m/mm$	$n_0/(r \cdot \min^{-1})$	$n'/(r \cdot \min^{-1})$	$v'/(m \cdot s^{-1})$	$h_m/mm$	$n_0/(r \cdot \min^{-1})$	$n'/(r \cdot \min^{-1})$	$v'/(m \cdot s^{-1})$
75	851	900	0.7679	875	1365	1380	1.3716
235	1059	1080	1.0507	1035	1410	1440	1.4210
395	1170	1200	1.2027	1195	1450	1500	1.4529
555	1249	1260	1.3353	1355	1486	1800	1.5070
715	1312	1320	1.3470	1515	1518	1920	1.4802

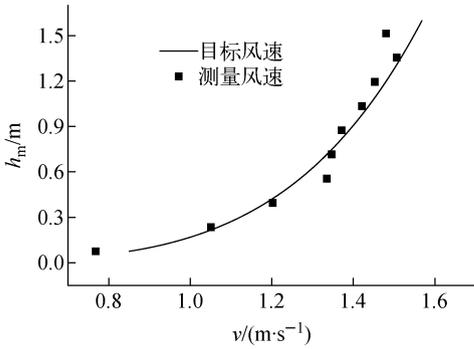


图 5 测量风速  $v'$  与目标风速  $v_b$  对比  
Fig. 5 Comparison between  $v'$  and  $v_b$

通过统计值可衡量多风扇风洞对风速廓线的模拟<sup>[12]</sup>,最大误差率  $\tau = \left( \frac{|v' - v_b|}{v'} \right)_{\max} = 0.097$ ,比例偏差  $FB = \frac{\overline{v'} - \overline{v_b}}{0.5(\overline{v'} + \overline{v_b})} = -0.003$ ,标准化平均方差  $NMSE = \frac{(\overline{v'} - \overline{v_b})^2}{\overline{v'} v_b} = -0.001$ ,

可看出,该多风扇风洞对 D 类稳定度下的大气边界层速度廓线模拟效果总体较好,但由于顶部目标风速较大,且受到顶部壁面边界层的影响,顶部模拟风速模拟效果较差。在实际应用中,由于核素在大气顶部的扩散结果对实验的影响较小,可忽略该误差。通过该多风扇反馈系统调节方法,克服了传统风洞需要多次实验得到风速廓线的缺点,调整 1 个工况的时间由原来的数天变为 1 h 以内,该实验系统可迅速进行大气扩散实验,为核事故后果评价提供了良好的实验基础。

该风扇在 4 000 r/min 的电机转速下风速接近 4 m/s,而该电机最大转速可达 5 000 r/min,即最大风速可达 5.3 m/s。石岛湾厂址的验证是在原型风速 6 m/s 情况下进行的相似性

验证,而一般对于核事故扩散评价主要考虑低风速( $<2$  m/s)下的扩散,即扩散条件不好的情况下。为了更准确地研究核事故扩散,应加大比例模型,根据相似性准则风洞中模拟的目标风速也有一定提高,但模型比例为 1 : 300 时最大风速也只需增加 1.71 倍,因此该风洞能满足大部分的核事故扩散大气边界层模拟的风速要求。

### 3 结论

本文将多风扇风洞技术引入到核事故大气扩散模拟的研究,通过集合卡尔曼滤波方法,解决了低频风速仪无法准确测量平均风速的问题;设计了 10(行)×8(列)的风机阵列结构及网络通信的控制系统,实现了多风扇风洞技术在环境风洞中的应用;探索了多风扇风洞出风规律,建立了电机转速和平均风速的经验关系式,设计了带风速反馈的风速廓线控制系统;对石岛湾核电厂址 D 类稳定度下的核事故扩散环境进行了缩尺 1 : 1 500 的模拟,验证了多风扇环境风洞对核电厂址的大气边界层模拟的可靠性,从而为核电厂址大气扩散风洞实验提供了新的方法。

### 参考文献:

[1] HANNA S R, BRIGGS G A, HOSKER R P, et al. Handbook on atmospheric diffusion[M]. US: Technical Information Center, Department of Energy, 1982.  
[2] Atmospheric dispersion models for potential accident consequence assessments at nuclear power plants: Regulatory Guide 1.145[R]. Washington: Nuclear Regulatory Commission, 1983.  
[3] 胡二邦, 辛存田, 闫江雨, 等. 福建惠安核电厂址

- 大气扩散野外示踪试验研究[J]. 中国核科技报告, 2003(4): 196-235.
- HU Erbang, XIN Cuntian, YAN Jiangyu, et al. Field tracing experiment of atmospheric diffusion in Huian Nuclear Power Plant at Fujian Province [J]. Chinese Nuclear Science and Technology Report, 2003(4): 196-235(in Chinese).
- [4] 姚仁太, 乔清党, 郝宏伟, 等. 田湾核电厂址大气弥散风洞实验研究[J]. 辐射防护, 2001, 21(2): 106-114.
- YAO Rentai, QIAO Qingdang, HAO Hongwei, et al. Experimental wind tunnel study on atmosphere dispersion in Tiawan Nuclear Power Plant [J]. Radiation Protection, 2001, 21(2): 106-114 (in Chinese).
- [5] CERMAK J E. Physical modelling of flow and dispersion over complex terrain [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1984, 30(1-4): 261-292.
- [6] MICHIOKA T, SATO A, KANZAKI T, et al. Wind tunnel experiment for predicting a visible plume region from a wet cooling tower[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(8): 741-754.
- [7] GUO D P, YAO R T, FAN D. Wind tunnel experiment for predicting a visible plume region from a nuclear power plant cooling tower [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(2): 234-241.
- [8] 杨立波. 风洞中大气边界层主动模拟技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [9] CAO S, NISHI A, KIKUGAWA H, et al. Reproduction of wind velocity history in a multiple fan wind tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12-15): 1 719-1 729.
- [10] CAO S, NISHI A, HIRANO K, et al. An actively controlled wind tunnel and its application to the reproduction of the atmospheric boundary layer[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 101(1): 61-76.
- [11] EVENSEN G. The ensemble kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation [J]. Ocean Dynamics, 2003, 53(4): 343-367.
- [12] BRITTER R, SCHATZMANN M. Background and justification document to support the model evaluation guidance and protocol[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2007, 44(1-2): 139-146.