

内陆核电厂冷却塔对大气扩散影响的 CFD 模拟

王博¹, 郭瑞萍¹, 张琼¹, 王尔奇¹, 杨阳¹, 刘福东¹, 王炫², 耿楠³

1. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082
2. 上海核工程研究设计院, 上海 200233
3. 北京创联智软科技有限公司, 北京 100027

摘要 风场的时空变化和大气湍流特征是影响局地大气污染物迁移、扩散的重要因子。本文以某内陆核电厂址为背景, 针对内陆核电厂址气象及地形条件的复杂性, 选用三维计算流体力学 (CFD) 模型 Fluidyn-PANACHE, 模拟气载放射性颗粒 ¹³⁷Cs、气溶胶 ¹³¹I 和常规气态污染物 CO 在大气中的三维风场及浓度场分布情况。该方法可合理模拟内陆核电厂大型冷却塔等建筑物周围的湍流和绕流, 弥补了标准高斯模型精细化程度不足的缺陷。此外, 该方法也突破了常规 CFD 模型很难在一次计算中进行多风向模拟的局限性。计算获得的正常工况下年均大气扩散因子能反映出该厂址大气扩散的季节性差异, 即秋季的平均大气扩散因子最大, 因此, 可考虑将换料大修等非运行工况安排在秋季进行, 以降低污染强度。研究获得的年均大气扩散模拟结果与高斯混合排放模式推荐的厂址扩散参数较为一致, 典型固定风向的模拟结果与风洞物理模拟结果符合较好, 可为中国内陆核电厂址大气扩散研究和评价提供参考。

关键词 多风向模拟; 大气扩散因子; Fluidyn-PANACHE; 高斯模型; 风场

中图分类号 X591

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.32.005

CFD Simulation of Atmospheric Dispersion Influenced by Cooling Towers in Inland Nuclear Power Plant

WANG Bo¹, GUO Ruiping¹, ZHANG Qiong¹, WANG Erqi¹, YANG Yang¹, LIU Fudong¹, WANG Xuan², GENG Nan³

1. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Beijing 100082, China
2. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China
3. Beijing Intelligent United Innovation Technology Co. Ltd., Beijing 100027, China

Abstract The spatial and temporal variations of wind field and the atmospheric turbulence characteristics are important factors that affect the migration and dispersion of local atmospheric pollutants. Considering the complexity of meteorological and landform conditions around the inland nuclear power plant, the 3-Dimensional wind field and concentration field distribution of airborne radionuclide particle ¹³⁷Cs, aerosol ¹³¹I and conventional gas pollutant CO dispersion in the atmosphere were carried out by a 3-Dimensional CFD (computational fluid dynamics) model Fluidyn-PANACHE. This method can be used to reasonably simulate the turbulent and circumferential flow around large cooling towers in the inland nuclear power plant, compensating the shortage in subtleness of the standard Gaussian model, as well as shortage in realizing multi-wind direction simulation in the calculation by the traditional CFD model. The calculation results of annual average atmospheric dispersion factor under normal operation indicated the seasonal differences, with maximum average dispersion factor in autumn, which were consistent with those suggested by Gaussian mixture model. Consequently, it's

收稿日期: 2013-07-31; 修回日期: 2013-10-18

基金项目: 国家科技重大专项 (2013ZX06002001)

作者简介: 王博, 工程师, 研究方向为辐射防护与环境保护, 电子信箱: wangbo@chinansc.cn; 刘福东 (通信作者), 研究员, 研究方向为辐射防护与环境保护, 电子信箱: liufudong@chinansc.cn

reasonable to arrange refueling overhauling in autumn to diminish pollution. The numerical simulation results from four typical fixed wind directions were compared and they are consistent with the observed values of wind tunnel experiments, providing new references for atmospheric dispersion research and evaluation on inland nuclear power plants in China.

Keywords multi-wind direction simulation; atmospheric dispersion factor; Fluidyn-PANACHE; Gaussian model; wind field

0 引言

2011年发生的日本福岛核事故,向环境释放了大量放射性物质,给环境和人体带来了极大的危害^[1]。相比于滨海核电站厂址,内陆电厂的气象及地形条件均较复杂,并且内陆电厂一般都采用大型自然通风冷却塔的二次循环冷却系统,冷却塔阻碍产生的升降气流、涡流和扰流,使得核电厂所在区域风场的变化极为复杂,核电厂产生的气载放射性核素的扩散也呈现出极大的不规则性^[2]。

大气扩散模拟自20世纪30年代得到发展,至今已发展出上百种用于不同场合的大气扩散模型^[3-6],但这些模型的基础主要基于标准高斯模型、拉格朗日烟团模型和计算流体力学(CFD)模型^[7]。高斯模型可以较为快速地对核素扩散进行模拟^[8],但高斯模型对于小静风气象条件和复杂地形条件(在内陆核电厂,静风频率往往较大,并且地形较为复杂)的模拟结果较差,并且无法准确反应出内陆核电厂大型构筑物(如高大自然通风冷却塔)对于厂区流场的影响^[9];拉格朗日烟团模式虽然适用于各种气象条件和地形条件^[10],但该模型仍无法准确模拟微尺度建筑群(内陆核电厂厂区附近)对于风环境的影响^[11];CFD模型借助于精确的三维建模和网格划分,可以有效解决上述两个模型存在的缺陷,并且国内外的研究成果表明,CFD模型的模拟结果与风洞实验的模拟结果吻合较好^[12]。CFD模型虽然具有诸多优点,但其无法在一次计算中进行多风向模拟的局限性也是显而易见的^[13]。

针对以上情况,在CFD模型的基础上,针对核电厂气载放射性核素在不同季节的风向变换,筛选出最不利扩散情况,并对厂址周围风场及气载放射性物质的扩散进行合理模拟。

1 Fluidyn-PANACHE 计算原理

Fluidyn-PANACHE软件是法国Transoft公司与法国环境与能源署(ADEME)协作开发,并与现代软件工程技术相结合,使用三维有限体积方法(FVM)求解模拟空气运动的Navier-Stokes方程。PANACHE包含内置的自动三维网格生成工具,可以在障碍物周围生成用于计算的有限体积网格,并且沿起伏地形生成贴体网格。计算网格可以是结构化的(矩形)或非结构化的(三角形)。在某些区域可以使用嵌套区域加密网格。

1.1 控制方程

Fluidyn-PANACHE的基本求解方程为Navier-Stokes方程,同时求解物种的浓度、质量和能量守恒方程。对于颗粒及气溶胶的扩散,还要求解拉格朗日描述下的颗粒运动轨迹方程。对于湍流模式,PANACHE求解上述方程的雷诺平均形

式。雷诺应力模型使用线性涡黏性模型(LEVM)^[14]方程:

(1) 物种浓度守恒

$$\frac{\partial(\rho y_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U y_m) = \nabla \cdot D_m \nabla(y_m) + S_m \quad m=(1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

(2) 连续性方程

式(1)对所有物种求和,得到连续性方程(质量守恒)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = S_p \quad (2)$$

(3) Navier-Stokes 方程(动量守恒)

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = \nabla \cdot \tau - \nabla p + S_U \quad (3)$$

(4) 能量守恒

$$C_p \left[\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U T) \right] = -\nabla \cdot q + \left[\frac{\partial p}{\partial t} + U \cdot \nabla p \right] + \tau : \nabla U + S_T \quad (4)$$

$$\tau = \mu \dot{\gamma} - \left(\frac{2}{3} \mu - \kappa \right) (\nabla \cdot U) \delta \quad (5)$$

$$\dot{\gamma} = \nabla U + (\nabla U)^T \quad (6)$$

式中, τ 为黏性应力张量; $\dot{\gamma}$ 为变形率张量; ρ 为密度; U 为速度矢量; y_m 为物种 m 的质量分数; T 为温度; p 为压力; D_m 为物种 m 的有效扩散系数; μ 为有效黏性系数; κ 为膨胀黏性系数($\kappa=0$ 为Stokes流体); δ 为单位张量; C_p 为定压比热; q 为热通量向量, $q=-k \nabla T$; k 为有效热传导系数; S_m 为物种 m 浓度守恒方程的源项; S_p 为连续性方程的源项; S_U 为动量守恒方程的源项; S_T 为能量守恒方程的源项。

1.2 大气边界层(PBL)模型

大气边界层(PBL)是靠近地表的大气区域,地面通过湍流交换动量、热量和水分。描述大气较大尺度的方程(式(3)和式(4))没有考虑大气与地表的相互作用。这种相互作用是以湍流运动体现的,其特点是小尺度、次网格,因此需要进行参数化(建模)。专用的PBL模型内置在Fluidyn-PANACHE软件中,可以考虑所有地形地貌影响,诸如地形起伏、植被冠层和城市冠层等。

PBL模型用于建立CFD求解器所需气象观测和边界条件之间的接口,由两部分组成:

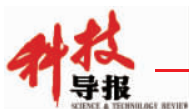
- (1) 微气象模型,由观测数据计算PBL基本物理参数;
- (2) 边界层模型,规定风速、温度和湍流的垂直剖面。

1.3 湍流模型

本文选用 $k-\varepsilon$ 模型。 $k-\varepsilon$ 模型是两方程线性涡黏性模型。PANACHE使用修正浮力和可压缩性的标准高雷诺数格式^[15,16],它求解湍流动能 k 的输运方程及其耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + (\rho U k) = \nabla \cdot \left(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k + P_k + P_b - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot U + S_k \quad (7)$$

式中, $P_k = \mu_t \dot{\gamma} : \nabla U$,为 k 的机械产生速率; $P_b = \mu_t \beta \frac{g \cdot \nabla T}{\sigma_h}$,为 k 的



浮力产生速率; ε 为 k 的耗散率; $\sigma_k=1.0$, 为 k 的湍流耗散普朗特数; S_k^v 为由于植被冠层产生的源项。

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+(\rho U\varepsilon)=\nabla\cdot\left(\mu_r\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon+\frac{\varepsilon}{k}[C_{\varepsilon 1}(P_k+P_b)-C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon]-\left(\frac{2}{3}C_{\varepsilon 3}-C_{\varepsilon 3}\right)\rho\varepsilon\nabla\cdot\mathbf{U}+S_\varepsilon^v \quad (8)$$

式中, S_ε^v 为由于植被冠顶产生的源项。

$k-\varepsilon$ 模型由局部湍流特性计算涡旋湍流脉动的长度尺度, 因此它适用于机械剪切(障碍、地形起伏、树冠)以及浮力(稳定性和浮力/重气)。 $k-\varepsilon$ 模型是湍流各向同性模型, 因此, 某处由它计算的结果在水平和垂直方向的湍流扩散相同。

1.4 边界条件

求解方程式(1)~式(4)和式(7)或式(8)时, 主区域边界、地面以及障碍物上需要给定边界条件。边界条件分为 3 类, 如表 1 所示。

表 1 边界条件
Table 1 Boundary conditions

类型	说明	给定变量	求解变量
入口	气流定向流进	$U, y_m, T, k, \varepsilon$	p
出口	气流定向流出	p	$U, y_m, T, k, \varepsilon$
壁面	地面或障碍物表面	U, ε	p, y_m, T, k

顶部边界通常被认为是出流边界。区域的侧边界通常根据风向被认为是入口或出口边界, 如图 1 所示。



图 1 流动边界条件

Fig. 1 Flow boundary conditions

(1) 入口。在入口边界, 速度、温度、物种浓度、湍流变量都需要给定。压力由区域内部计算得到。物种浓度根据设定的物种背景浓度设置。以下介绍其他变量的设定。

入口边界的速度设为:

$$u=U\cos\alpha \quad v=U\sin\alpha \quad w=0 \quad (9)$$

式中, U 为高度 z 的风速; $\alpha=-\varphi-90^\circ$, 为风向与屏幕 x 轴的角度; φ 为相对正北方的风向。高度 z 处的风速是根据所选的垂直速度剖面设定的。入口边界的速度根据所选定的垂直速度剖面设定。

(2) 出口。即使设定某边界为出口边界, 但由于障碍物或冠层的影响, 风依然可以从此处进入区域。基于此, PANACHE 会指定某些变量以及从域内部推导出某些变量。表 2 列出了几类出口边界条件, 出口边界的静压通常规定为环境压力。

表 2 出口边界条件

Table 2 Outlet boundary conditions

变量	当地流入	当地流出
压力	规定	规定
速度	推导	推导
温度	指定	推导
浓度	指定	推导
湍流	指定	推导

(3) 壁面。PANACHE 应用壁面函数计算湍流边界层中固体壁面的拖曳力, 壁面函数从平衡条件下湍流边界层的 Navier-Stokes 方程中计算得到。

1.5 CFD 求解器

PANACHE 是一个模拟工具, 可以解决质量守恒定律、动量、能量及各类浓度等非线性偏微分方程。PANACHE 的 CFD 求解器在三维空间和时间上求解控制方程式(1)~式(4)和式(7)或式(8)。这些控制方程可以表示为具有以下一般形式的对流扩散方程:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\mathbf{U}\phi)=\nabla\cdot(\Gamma_\phi\nabla\phi)+S_\phi \quad (10)$$

$$(I) \quad (II) \quad (III) \quad (IV)$$

式中, ϕ 为待求变量(动量、温度、浓度等); Γ_ϕ 为 ϕ 的交换系数(黏度, 热扩散系数等); S_ϕ 为 ϕ 的源项(污染物排放等)。(I)为时间微分项, (II)为对流项, (III)为耗散项, (IV)为源项。

数值求解上述类型控制方程结果的精度直接取决于前 3 项所采用的离散格式。随着离散元素的变小(元素数量增加), 计算精度会提高。但是, 计算成本(内存及 CPU, 时间)会随着元素数量的增加而增大。因此, 需要在精度要求与计算效率之间达到平衡。上述控制方程中微分算子通过泰勒级数展开离散。

(1) 时间差分。时间差分采用近似离散的时间序列 $t^n(n=0, 1, 2, \dots)$, 时间间隔 $\Delta t^l=t^{l+1}-t^l$ 为时间步长, ϕ^n 为在 t^n 时刻对变量 ϕ 的差分近似, 微分项 $\partial\phi/\partial t$ 近似用一阶差分 $(\phi^{n+1}-\phi^n)/\Delta t^n$ 表达。

(2) 空间差分。空间离散是通过由单元(控制体)构成的三维网格实现的。每个单元的有限差分近似采用整体平衡法以保证差分变量的局部守恒。PANACHE 求解速度向量笛卡尔坐标系下分量的 Navier-Stokes 方程。所有变量(压力、速度分量、温度、浓度、湍流等)在同一控制体内求解得到。

耗散项的离散采用二阶精度法; 对流项的离散通常决定了求解的精度, 当使用有限体积法离散时, 对流项表示为

$$\nabla\cdot(\rho\mathbf{U}\phi)=\sum_f[(\rho\mathbf{A}\mathbf{U}\cdot\mathbf{N})\phi]=\sum_f m_f\phi_f \quad (11)$$

式中, f 为控制体的面; A 为面积; N 为面上的法向量; m 为流过面的质量通量; m 由连续性方程求解得到。因此 ϕ_f 的计算决定了所采用计算格式的精度。变量 ϕ 在面 f 附近的变化如图 2 所示。

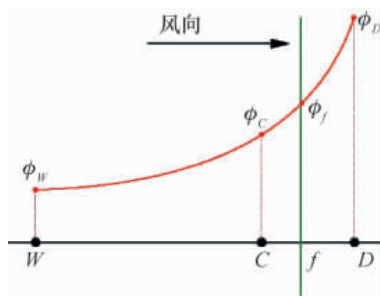


图2 变量 ϕ 在面 f 附近的变化
Fig. 2 Variation of ϕ across face f

图2中, C 为上风单元, D 为下风单元, W 为远处上风单元。因此, ϕ_f 可由 ϕ_c 、 ϕ_d 及 ϕ_w 的函数表示。

2 厂区三维建模

如图3所示, 本文以某内陆核电厂址为背景, 将其等高线地形图(GIS文件)的地形信息(红线)直接导入 Fluidyn-PANACHE 软件, 并在导入的地形信息基础上绘制冷却塔及安全壳厂房等建筑物, 在模型建立过程中, 考虑到计算的复杂程度, 对部分建筑物进行简化。根据所选厂址 2010 年风向频率分布和逐时气象数据等气象条件, 并结合厂址建筑物布局情况, 以一期工程二号烟囱为模拟排放烟囱和位置中心, 模拟的区域范围为 $10\text{km} \times 10\text{km}$, 模型垂直方向自地面至 1000m 。采用 PANACHE 内嵌的网格划分工具, 整个计算区域划分为非均匀的结构化网格, 并在排放源附近将网格做了加密处理(全场共 379312 个六面体网格)。所采用的计算网格在本案例模拟范围内, 兼顾效率和精度, 经过验证, 排除了网格依赖性。

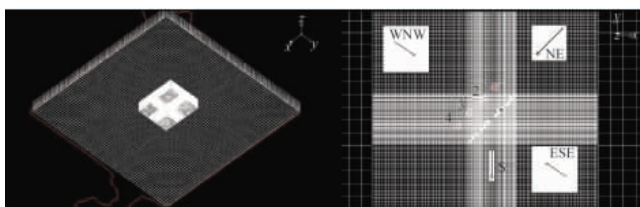


图3 网格划分及关键区域加密

Fig. 3 Mesh generation and the key domain densification

3 典型风向的模拟分析

风场的时空变化和大气湍流特征是影响局地大气污染物迁移、扩散的重要因子。为使模拟结果能较好地反映建筑物周围的流场特征和核电厂所排污染物的扩散规律, 以一期工程 2# 机组烟囱作为模拟烟囱, 在冷却塔无水汽排放情况下, 以烟囱设计高度为基准, 开展了 4 个特征风向的大气扩散模拟——东南东 (ESE)、西北西 (WNW)、南 (S) 和东北 (NE), 各模拟风向与建筑物群之间的夹角关系如图 3 所示。WNW 和 ESE 风向时, 烟囱分别位于冷却塔的背风面和迎风

面, 冷却塔对烟囱排放烟羽的影响最大, 风向与建筑物群主体近似呈 90° ; NE 风向是秋、冬季的主导风向, 风向与建筑物群主体近似呈顺风向; S 风向的风频也较大, 风向与建筑物群主体近似呈 45° 。考虑到一期工程设计烟囱高度为 75m , 与 70m 高度比较接近, 故各固定风向模拟时采用 70m 高度处的年风向频率分布结果, 其中年平均风速为 5.2m/s 。

模拟结果表明, 内陆核电厂址高大冷却塔等复杂下垫面对烟羽扩散的影响复杂多变, 比较显著的特点是高大建筑物的尾流影响区域广泛, 因此, 本文以 WNW 风向为代表, 分析内陆核电厂址的大气扩散特点。图 4 和图 5 分别给出了有无冷却塔时 WNW 风向时的归一化速度剖面, 由图 4 可看出, 有冷却塔时安全壳下游 4619m 处的速度廓线恢复程度与无冷却塔时 2369m 处相当, 可见冷却塔的存在对局地流场的影响范围更长远, 影响程度也更大。对比图 4 和图 5 可见, WNW 风向时, 冷却塔对局地风场的影响范围较大, 在冷却塔上游 300m 处即对迎面气流造成一定阻挡; 在安全壳上游 159m 处冷却塔尾流又对垂向流场造成较大影响; 后经安全壳进一步扰动, 在安全壳下游 269m 处, 速度亏损达到最大, 地面风速仅为来流的 10% , 随着下游距离的增加, 建筑物的影响逐渐减小, 速度廓线逐步恢复到来流状态。

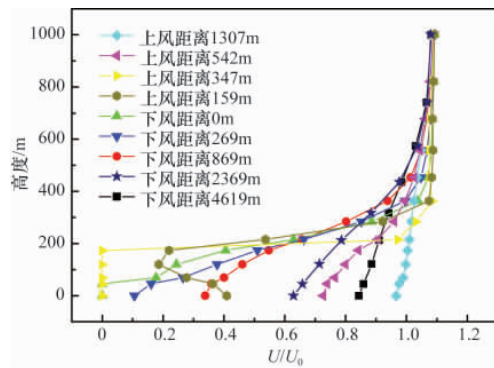


图4 有冷却塔 WNW 风向时的归一化速度剖面
Fig. 4 Section profile of wind velocity vector with cooling towers

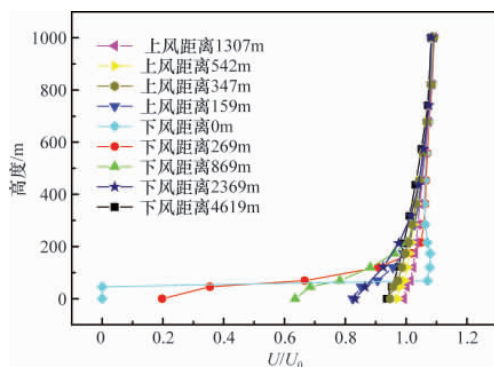
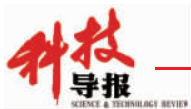
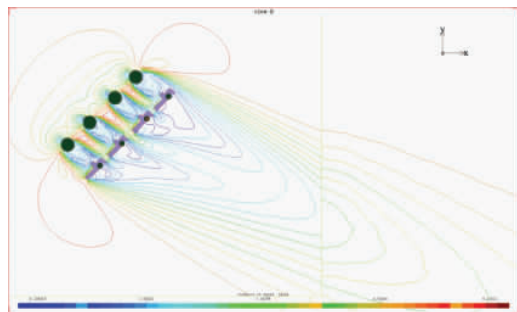


图5 无冷却塔 WNW 风向时的归一化速度剖面
Fig. 5 Section profile of wind velocity vector without cooling towers

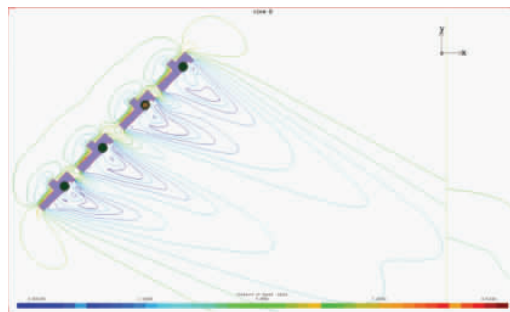


为直观考察局地流场,数值模拟直接截取关注区域,图6为距地面10m和70m高度处的流场图,图7为有无冷却塔时厂区湍流动能等值线分布图,图8为有无冷却塔时污染物地面浓度等值线分布图。由于冷却塔横截面为圆形,其对流场

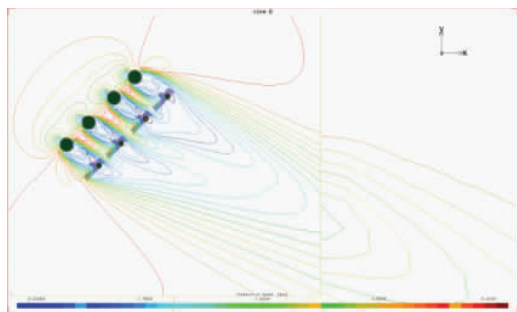
及扩散过程的影响与锐缘建筑物的影响有明显差异,主要表现为:建筑物前的扰流区与建筑物后端的回流区体积减小,强度减弱,从而使烟羽形态受冷却塔的阻隔作用不明显,在冷却塔附近主要表现为偏转,在冷却塔后端未见明显滞留。



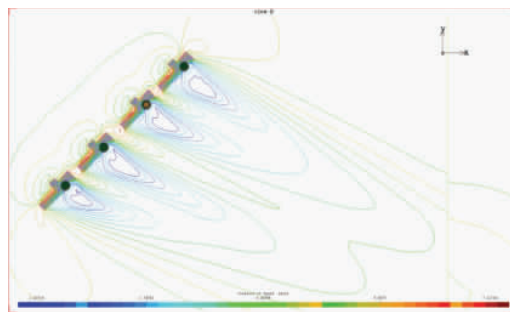
(a) 有冷却塔距场坪10m高度处流场
(a) Wind field at 10m with cooling towers



(b) 无冷却塔距场坪10m高度处流场
(b) Wind field at 10m without cooling towers



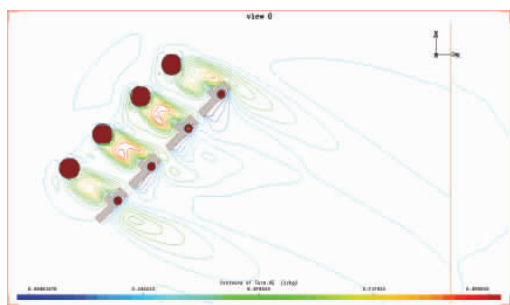
(c) 有冷却塔距场坪70m高度处流场
(c) Wind field at 70m with cooling towers



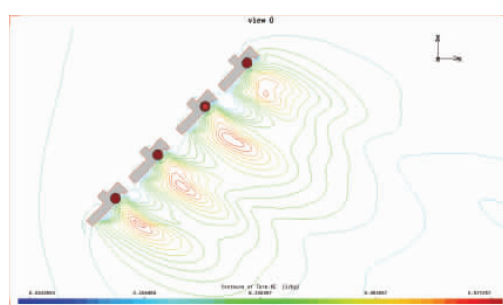
(d) 无冷却塔距场坪70m高度处流场
(d) Wind field at 70m without cooling towers

图6 有无冷却塔时WNW风向距场坪10m和70m高度处流场

Fig. 6 Wind field at 10m and 70m above the ground in WNW direction with and without cooling towers



(a) 有冷却塔距场坪10m高度处湍流动能
(a) Turbulent kinetic energy at 10m with cooling towers



(b) 无冷却塔距场坪10m高度处湍流动能
(b) Turbulent kinetic energy at 10m without cooling towers

图7 有无冷却塔时距场坪10m高度处WNW风向湍流动能等值线分布比较

Fig. 7 Profile comparison of the turbulent kinetic energy at 10m above the ground with and without cooling towers

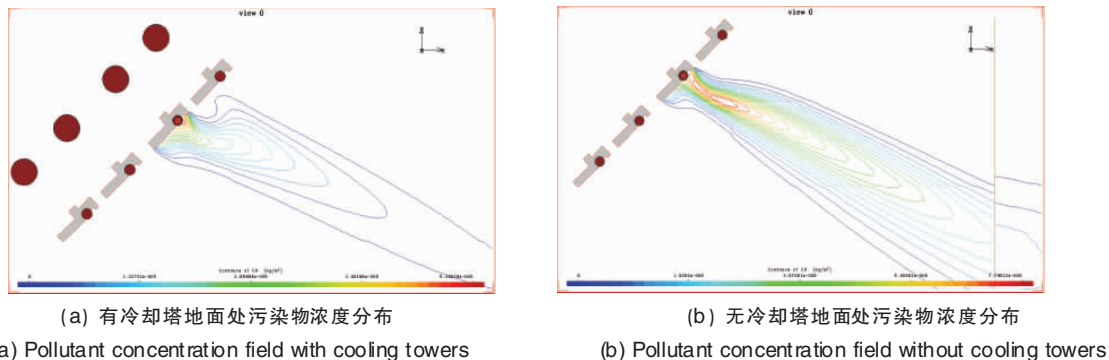


图 8 有无冷却塔时地面处 WNW 风向烟囱污染物浓度等值线分布比较

Fig. 8 Profile comparison of the pollutant concentration field at ground with and without cooling towers

图 6、图 7、图 8 不仅可以反映出整个模拟区流场,还可显示出核设施周围,特别是冷却塔等高大建筑物附近流场的变化,即该电厂厂区附近,冷却塔周围流场受机械扰流作用,表现出明显的扰动;通过冷却塔侧向及顶部的气流明显加速,而从冷却塔顶开始的下风向,尾流区(包括回流区)风速明显减小,湍动能相应增加;在近地面层(10m 高),在冷却塔与厂区其他建筑物的共同作用下,厂区内环境风速明显低于周

边环境风速,可见冷却塔在近地面及厂区内对风速的影响是十分显著的;在 70m 高度层及以上,冷却塔背风处的空腔区依然十分明显,其他建筑物的影响逐渐减弱,主要表现为冷却塔尾迹的影响,4 个冷却塔的尾迹亦相互影响,扩大了尾流影响范围。随着下风距离的增大,气流混合逐渐均匀,速度廓线的垂向分布趋于来流状况,数值模拟结果与风洞实验物理模拟结果符合较好(表 3)。

表 3 CFD 模拟各风向大气扩散因子最大值及下风距离与风洞实验结果比较

Table 3 Comparison between CFD simulation and wind tunnel test in the maximum atmospheric dispersion factors and the occurrence distance

风向	风洞模拟实验(有冷却塔)		CFD 模拟有冷却塔时		CFD 模拟无冷却塔时	
	最大值/(s·m ⁻³)	下风距离/m	最大值/(s·m ⁻³)	下风距离/m	最大值/(s·m ⁻³)	下风距离/m
NE	2.55×10 ⁻⁵	150	9.50×10 ⁻⁶	284	1.23×10 ⁻⁵	104
S	6.16×10 ⁻⁶	563	5.63×10 ⁻⁶	687	4.79×10 ⁻⁶	545
ESE	2.23×10 ⁻⁵	225	1.36×10 ⁻⁵	101	3.15×10 ⁻⁵	63
WNW	2.27×10 ⁻⁵	75	5.25×10 ⁻⁵	31	7.84×10 ⁻⁶	138

表 3 汇总了 CFD 模拟各风向大气扩散因子最大值及下风距离与风洞实验的比较结果,可以看出,复杂地形对烟羽扩散的影响复杂多变,随各风向变化而变化。总体而言,建筑物对扩散的影响表现在两个方面,一方面,建筑物的扰动使扩散增强,在近距离,扩散明显增强,加大了污染物的扩散速率;另一方面,起伏下垫面改变了决定地面最大浓度及其出现位置的重要因子——烟流在垂直方向上的路径,尤其是高大建筑物的尾流影响区域广泛(如 WNW 风向),导致地面空气最大浓度增加,也提前了轴向最大扩散因子的出现位置。

4 年均大气扩散因子的比较

采用年均大气扩散因子预测建设项目大气污染和气载污染物在各种环境条件下的空间及时间分布,可在平均过程中消除复杂气象条件和复杂下垫面变化引起的污染物浓度偏差,使评价更加客观合理^[7],故根据上海核工程研究设计院提供的部分数据^[25],采用 Fluidyn-PANACHE 实时模拟计算该候选厂址全年的年均大气扩散因子。为实现在一次计算中进

行多风向模拟,采取如下两步:

第一步是基于气象观测数据获取风向、风速、大气稳定度联合频率分布,提取发生频率较高的前 50 类气象条件(占总气象条件 70% 以上)为典型气象条件,并分别计算该 50 类气象条件相应的平均温度、气压和相对湿度(表 4),利用 Fluidyn-PANACHE 软件计算该 50 类气象条件下的风场状况;

第二步是污染物扩散模拟,即软件基于第一步计算的 50 类气象条件下的风场条件,根据逐时气象数据选择合适的风场结果。采用与第一步相同的计算域、计算网格及物理模型,通过求解标准对流-扩散方程计算污染物的扩散,时间推进为隐式的瞬态计算,时间步长为 900s。由于是实时的天气变化,数据量巨大,直接进行全年的数值模拟需要耗费较多的机时和存储空间,故模拟时分月进行。每个月的模拟均为连续计算。对于计算核素,根据以往压水堆排放源项各核素对公众的剂量贡献,选取具有代表性的气载放射性颗粒 ¹³⁷Cs、气溶胶 ¹³¹I 及常规气态污染物 CO。

正常运行工况下,空气中污染物年均浓度分布的模拟和

结果表示采用扇形网格法。网格的划分方法如下:扇形区划分为 16 个方位;径向在 10km 范围内,按半径 100~10000m,

划分为 15 个圆环,总共 16×15=240 个子区。计算时取圆环半径为 50m 至 7500m,如表 5 所示。

表 4 50 类典型风向和风速频率分布

Table 4 50 typical categories of wind directions and frequencies distribution

类别	发生频率/%	平均风向/(°)	平均风速/m	平均温度/°C	平均气压/hPa	相对湿度/%	类别	发生频率/%	平均风向/(°)	平均风速/m	平均温度/°C	平均气压/hPa	相对湿度/%
1	10.0	35.4	8.3	8.9	1020	80.9	26	0.9	76.8	1.2	16.8	1014	81.5
2	5.2	33.7	3.9	17.3	1014	82.7	27	0.9	33.3	1.4	17.1	1013	84.0
3	5.0	188.6	3.9	24.5	1008	73.5	28	0.9	12.2	1.5	21.1	1013	71.6
4	3.3	34.6	5.5	13.5	1017	81.7	29	0.9	55.3	1.5	21.3	1010	81.2
5	3.0	33.1	4.2	14.4	1016	80.4	30	0.9	15.6	3.6	16.5	1015	85.4
6	3.0	54.1	3.9	19.1	1012	76.9	31	0.9	211.7	1.3	18.1	1012	83.0
7	3.0	51.3	8.4	12.1	1017	73.8	32	0.8	13.7	4.1	11.2	1018	86.3
8	2.5	32.0	2.6	19.0	1012	85.4	33	0.8	33.5	1.5	20.4	1013	74.5
9	2.5	123.2	1.3	13.2	1017	87.5	34	0.8	173.4	4.0	25.1	1005	74.4
10	1.9	187.7	7.1	19.8	1009	63.5	35	0.8	122.1	2.3	13.2	1017	85.5
11	1.9	188.6	5.4	20.7	1009	67.3	36	0.8	54.2	2.5	19.6	1014	67.8
12	1.7	166.6	1.2	17.3	1013	84.5	37	0.8	33.4	1.5	21.2	1010	87.0
13	1.5	54.6	4.0	20.6	1013	68.2	38	0.8	73.3	3.9	17.9	1015	71.1
14	1.5	190.8	1.2	17.1	1013	83.8	39	0.8	55.3	1.3	20.9	1011	82.6
15	1.5	159.8	1.2	20.9	1009	80.8	40	0.7	212.1	1.5	20.4	1010	88.1
16	1.4	53.4	5.4	17.6	1013	73.5	41	0.7	303.4	1.5	25.5	1010	62.4
17	1.4	143.9	1.2	12.9	1017	87.8	42	0.6	280.8	1.6	21.6	1013	56.4
18	1.4	100.6	1.3	14.3	1016	85.2	43	0.6	212.2	3.9	20.3	1012	60.6
19	1.3	55.2	2.4	19.5	1012	78.8	44	0.6	35.4	2.6	17.1	1015	80.6
20	1.2	209.1	3.7	17.1	1012	70.8	45	0.6	53.3	1.5	19.3	1013	75.3
21	1.2	189.1	4.1	24.1	1009	61.3	46	0.6	190.1	2.5	20.7	1009	80.8
22	1.0	34.6	2.5	18.1	1016	73.1	47	0.6	15.7	7.0	7.1	1018	89.2
23	1.0	56.4	2.5	20.4	1011	76.2	48	0.6	349.7	1.4	22.0	1012	69.6
24	1.0	191.8	2.5	19.4	1011	76.8	49	0.6	210.5	2.5	17.7	1011	76.4
25	0.9	13.5	2.5	19.6	1012	84.8	50	0.6	192.2	3.9	12.7	1016	61.9

表 5 某内陆核电厂址有冷却塔时 ¹³¹I 年均大气弥散因子

Table 5 Average atmospheric dispersion factor of ¹³¹I with cooling towers

风向	大气弥散因子/(10 ⁻⁷ s·m ⁻³)														
	100m	200m	300m	400m	500m	600m	700m	800m	900m	1000m	2000m	3000m	4000m	5000m	10000m
N	11.20	4.27	2.30	1.31	0.90	0.67	0.56	0.48	0.42	0.37	0.28	0.14	0.08	0.06	0.03
NNE	25.80	4.45	2.37	1.76	1.30	0.86	0.68	0.57	0.49	0.43	0.28	0.20	0.09	0.06	0.02
NE	26.40	12.00	10.10	6.57	5.60	3.98	2.63	1.85	1.43	1.07	0.53	0.29	0.17	0.11	0.04
ENE	24.00	15.50	12.40	9.24	8.29	7.24	6.23	5.81	5.27	4.74	3.33	1.27	0.85	0.56	0.30
E	11.10	4.95	3.30	2.09	1.53	1.20	1.05	0.88	0.78	0.67	0.48	0.20	0.11	0.07	0.03
ESE	10.40	5.42	3.77	2.72	2.05	1.65	1.34	1.10	0.94	0.87	0.48	0.15	0.08	0.05	0.01
SE	9.45	5.46	3.87	2.92	2.21	1.75	1.44	1.23	1.09	0.97	0.59	0.25	0.14	0.08	0.03
SSE	10.10	5.60	4.22	3.62	3.14	2.66	2.23	1.94	1.69	1.48	1.00	0.33	0.18	0.10	0.04
S	13.40	9.26	6.68	5.39	4.95	4.95	4.54	4.20	3.82	3.50	2.39	0.92	0.50	0.32	0.17
SSW	15.60	12.40	8.31	7.97	7.88	7.37	7.22	6.77	6.48	6.01	3.66	1.22	0.78	0.56	0.25
SW	42.90	24.90	9.81	8.37	7.60	5.05	4.40	3.88	2.96	2.41	1.30	0.69	0.35	0.23	0.11
WSW	38.90	18.60	9.52	7.92	5.45	3.89	2.83	1.97	1.68	1.39	0.71	0.42	0.18	0.14	0.06
W	25.00	14.90	10.60	8.62	6.65	4.42	3.30	2.82	2.27	1.78	0.91	0.55	0.27	0.17	0.09
WNW	27.80	13.80	10.70	5.84	5.23	4.30	3.05	2.42	2.01	1.75	1.02	0.57	0.25	0.14	0.05
NW	34.70	12.50	7.97	6.56	4.90	3.85	2.53	1.84	1.43	1.12	0.60	0.29	0.10	0.06	0.02
NNW	28.50	15.70	10.10	8.80	5.78	4.78	3.74	2.91	2.45	2.07	1.31	0.45	0.24	0.13	0.05

为了比较和分析大型冷却塔对烟囱所排污染物的影响程度,本文分别模拟了有无冷却塔两种情况下3种核素的大气弥散特征,表5以 ^{131}I 为例,列出了拟选厂址2010年有冷却塔时年均大气扩散因子在各风向扇区随距离的变化情况。一般而言,风频高的风向对应的下风向年均扩散因子高,上述模拟结果均表明SW方位的大气扩散因子最高,有冷却塔时 ^{137}Cs 、 ^{131}I 和CO的最大年均大气扩散因子分别为 4.49×10^{-6} 、 4.37×10^{-6} 和 $4.29 \times 10^{-6} \text{ s/m}^3$;无冷却塔时分别为 4.66×10^{-6} 、 4.60×10^{-6} 和 $4.88 \times 10^{-6} \text{ s/m}^3$,且均出现在SW方位100m处,而同期气象观测期间主导风向为NE,该结果不仅与风频分布协调一致,而且与高斯模式按照混合排放模式计算的年均扩散因子最大值($1.77 \times 10^{-6} \text{ s/m}^3$)和出现距离都较接近,并可对后者在0至1000m的敏感区域跨度内提供更加灵活和精细化的模拟结果,这为合理预测和定位污染物在地面出现浓度最大值的方位和距离提供了更加有效的参考。

进一步比较发现,无冷却塔时各核素的年均最大大气扩散因子均比有冷却塔时高,说明冷却塔对烟囱所排污染物的扩散效果有一定的增强作用。此外还分析比较了3种核素在4个季节的平均大气扩散因子,所得结果均为秋季(9—11月份)的平均大气扩散因子最大,以有冷却塔为例,3种核素 ^{137}Cs 、 ^{131}I 和CO的秋季平均大气扩散因子分别为 7.27×10^{-6} 、 6.11×10^{-6} 和 $5.93 \times 10^{-6} \text{ s/m}^3$ 。导致该结果的原因可能是秋季平均风速(10m和70m高度)最小,导致污染物沉积到地面的平均浓度最大,即秋季是全年中大气扩散状况相对较差的季节,可考虑将换料大修等非运行工况安排在秋季进行,以减少污染物释放,降低污染强度。

5 结论

利用CFD模拟软件Fluidyn-PANACHE对某内陆核电站厂址地区全年及各典型风向10km范围内风场和气载放射性颗粒 ^{137}Cs 、气溶胶 ^{131}I 以及常规气态污染物CO的扩散进行模拟,通过与风洞流场测量结果比较分析,表明数值模拟结果与风洞物理模拟结果符合较好,利用Fluidyn-PANACHE软件可以比较合理地模拟建筑物附近的流动与扩散。

(1) 结合逐时气象数据模拟该内陆厂址2010年大气扩散特征,统计分析不同季节的大气扩散特征,发现秋季平均大气弥散因子最大,可认为是筛选出的最不利扩散季节;各核素最大年均大气扩散因子均在SW方位100m处,与同期气象观测主导风向为NE风向协调一致。

(2) 对该厂址而言,厂址布局以及高大冷却塔等特殊建筑物对风向的影响较为显著,主要体现在风向与冷却塔等建筑物群之间的相对位置。当风向与建筑物群主体近似呈 90° 和 45° 时,冷却塔对扩散的影响较显著。

(3) 厂区冷却塔等高大建筑物对局地区域(5000m范围内)风场作用明显,随着下风距离的增加,建筑物的影响逐渐减小,速度廓线逐步恢复到来流状态。冷却塔和安全壳等建筑物的扰动一方面加快了污染物的扩散速率,这对扩散是有

利的;另一方面,起伏下垫面改变了烟轴的垂直轨迹,提前了轴向最大扩散因子的出现位置,这对扩散是不利的。

参考文献 (References)

- [1] Povinec P P, Gera M, Holý K, et al. Dispersion of Fukushima radionuclides in the global atmosphere and the ocean [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2013, 81: 383-392.
- [2] 乔清党,姚仁太,郭占杰,等. 内陆核电站冷却塔对周围大气流动和污染物扩散影响的风洞实验研究[J]. 辐射防护, 2011, 31(3): 141-149. Qiao Qingdang, Yao Rentai, Guo Zhanjie, et al. Radiation Protection, 2011, 31(3): 141-149.
- [3] An Junling, Xiang W, Han Z, et al. Validation of the Institute of Atmospheric Physics emergency response model with the meteorological towers measurements and SF6 diffusion and pool fire experiments[J]. Atmospheric Environment, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.041>.
- [4] Ermak D L. User's manual for SLAB: An atmospheric dispersion model for denser-than-air releases[R]. America: Lawrence Livermore National Laboratory UCRL-MA-105607, 1990.
- [5] Sørensen J H, Baklanov A, Hoe S. The Danish emergency response model of the atmosphere (DERMA) [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2007, 96: 122-129.
- [6] 张健文,安宇,魏利军. 化学危险品事故应急响应大气扩散模型评述[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(6): 12-17. Zhang Jianwen, An Yu, Wei Lijun. China Safety Science Journal, 2007, 17(6): 12-17.
- [7] 王炫. 基于CFD模型的内陆核电站厂址流场模拟[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(3): 54-60. Wang Xuan. Journal of Meteorology and Environment, 2012, 28(3): 54-60.
- [8] Grbić A R, Slišković D, Kadlec P. Adaptive soft sensor for online prediction and process monitoring based on a mixture of Gaussian process models[J]. Computers & Chemical Engineering, 2013, 58: 84-97.
- [9] 王海超,焦文玲,邹平华. AERMOD大气扩散模型研究综述[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(11): 115-119. Wang Haichao, Jiao Wenling, Zou Pinghua. Environmental Science & Technology, 2010, 33(11): 115-119.
- [10] 任永建,赖宏伟,高庆先. 基于数值模拟的区域大气环境研究[J]. 科技导报, 2008, 26(19): 31-36. Ren Yongjian, Lai Anwei, Gao Qingxian. Science & Technology Review, 2008, 26(19): 31-36.
- [11] Shi R F, Cui G X, Wang Z S, et al. Large eddy simulation of wind field and plume dispersion in building array[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(6): 1083-1097.
- [12] Gromke C, Buccolieri R, Sabatino S D, et al. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations-Evaluation of CFD data with experimental data [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(37): 8640-8650.
- [13] Tominaga Y, Stathopoulos T. CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques[J]. Atmospheric Environment, 2013, 79: 716-730.
- [14] Reid R C, Prausnitz J M, Polling B E. The properties of gases and liquids[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987.
- [15] Ferziger J H, Perić M. Computational methods for fluid dynamics[M]. Berlin: Springer, 2002.
- [16] Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N. Transport phenomena[M]. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [17] Hill R, Taylor T J, Lowles I, et al. A new model validation database for the evaluating AERMOD, NRPB R91 and ADMS using Krypto-85 data from BNFL Sellafield[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2005(24): 75-87.

(责任编辑 王媛媛)