

文章编号：0258-0926(2016)S1-0071-04；doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S1.0071

# 多堆事故近场区辐射剂量评价方法初步研究

彭海成<sup>1</sup>, 张言<sup>1</sup>, 方晟<sup>2</sup>, 刁非<sup>1</sup>, 卢春洪<sup>1</sup>

1. 国防科工局核技术支持中心, 北京, 100080; 2. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京, 100084

**摘要**：多堆事故源项具有多点同时释放、直接照射更强、各厂房屏蔽效应及反射效应交织、放射性物质浓度计算更加复杂的特点。现有的辐射剂量评价方法及系统难以满足多堆事故近场区应急评估需求。研究表明近场区小尺度风场和大气扩散对应急人员受到的烟羽照射剂量影响较大，大气扩散模型不能忽略附近复杂地形、建筑物等因素影响。对我国主要核电基地反应堆分布情况及场址特点进行了分析研究，选取 CFD 作为多堆场址近场区流场计算模拟手段。“保守法”用于多堆剂量场叠加计算快捷，易于操作；“现实法”计算量相对较大，但精度更高。应根据应急需要，选取合理的剂量叠加计算方法。

**关键词**：多堆事故；近场区；辐射剂量评价

**中图分类号**：TL33 **文献标志码**：A

## Preliminary Research on Multi-Reactor Accident Radiation Dose Evaluation Methodology in Near-Site

Peng Haicheng<sup>1</sup>, Zhang Yan<sup>1</sup>, Fang Sheng<sup>2</sup>, Diao Fei<sup>1</sup>, Lu Chunhong<sup>1</sup>

1. Nuclear Technology Support Center, State Administration of Science Technology and Industry for National Defense, Beijing, 100080, China ;  
2. Institute of Nuclear and New Technology, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

**Abstract**: Multi-reactor accident source terms have the characteristics of multi-point simultaneous dispersion, stronger direct radiation exposure, combination of building radiation shielding effect and reflection effect, and more complex radioactive material concentration computing. Current radiation dose evaluation methodology and systems can not fully satisfy the need of near-site dose evaluation and emergency under multi-reactor accident. It has been proved that small scale wind field and atmospheric dispersion are key elements affecting plume exposure dose to emergency workers, thus the complex terrain and building effect can not be neglected by the atmospheric dispersion model. Through the analysis of main Chinese multi-reactor distribution and site condition, CFD has been recommended as near-site fluent field computation method. For the multi-reactor dose field computing, conservative method proves the virtue of computing time saving and strong operability, while realistic method needs much time with more precision, and it should be selected based on the nuclear accident emergency demand.

**Key words**: Multi-reactor accident, Near-site, Radiation dose evaluation

### 0 引言

日本福岛核事故后，各国高度重视多堆严重事故的应急处置，开展了一系列研究工作<sup>[1]</sup>。环境保护部（国家核安全局）、国家能源局和中国地震局共同发布的《关于全国民用核设施综合安全检查情况的报告》中明确提出：“制订核电基地多

机组同时进入应急状态后核电厂的响应方案”；《福岛核事故后核电厂改进行动通用技术要求》中要求：“核电厂目前可依据 2 台机组同时发生事故工况的情形，在研究分析的基础上，制订多堆厂址两台机组同时发生事故工况情形下的应急响应方案”。

辐射剂量场估算是制定应急预案、评价事故后果和提高应急响应效率的基础。对于单堆核事故后果剂量评价已开展了大量研究工作,但其后果评价方法及系统难以满足近场区多堆事故辐射剂量评价及应急需求<sup>[2-3]</sup>,相关研究还处于起步阶段。

## 1 多堆事故源项释放特点

与三哩岛和切尔诺贝利核事故相比,福岛核事故(多堆事故)有以下特点:

(1) 事故序列更加复杂:多堆事故具有耦合效应,各反应堆分布及运行相互影响,事故谱更加复杂。

(2) 源项类型多样:各堆工况不一,存在多个释放点,释放的放射性物质数量、形态可能差别较大,点源、线源、面源和体源同时存在。

(3) 互屏蔽效应明显:放射性核素会经过破损的安全壳、墙体形成直接照射,同时又会被其它反应堆厂房等反射或屏蔽,既可能增大也可能减小对应急人员的照射。

(4) 源项叠加更加复杂:辐射剂量是直接外照射剂量与烟羽照射剂量的叠加,较远源项造成的辐射剂量可能很小,从而在计算时被忽略,而距离较近源项贡献又因互屏蔽效应与单堆源项不完全一致。

## 2 大气扩散模型

### 2.1 近场区大气扩散影响因素

近场区大气扩散的显著特点在于地形、建筑物布局有较大影响,而气象条件影响则相对有限。

(1) 地表效应:土壤类型、土地利用类型、粗糙度、反射率等将对空气对流产生重要影响,在一些平坦但不均匀地形中甚至可以观察到局部至中等尺度环流。地形差异将在表面温度、湍流流动特征中获得充分反应。

(2) 热岛效应:城市比周围乡村空气温度高,导致空气相互对流。核电厂属于大型工厂,且区域布局与城市十分相似,因此热岛效应也是核电厂区域存在的微观环流特征,且有周期性的方向变化。

(3) 山体效应:山体形状、大小和气流稳定性将决定风场走向。复杂地形如陡峭的山坡对山峰-山谷间微风热气环流起到抬升作用,使得气流产生与地形类似的起伏波动,会强烈地影响气流。

(4) 建筑物效应:反应堆安全壳高度显著高于其他建筑,需考虑高大建筑物引起的尾流效应。多堆场址由于存在多个高大建筑物,核素在建筑物之间传输和滞留情况成为大气扩散关键问题。

### 2.2 大气扩散模型比较

被广泛使用的大气扩散模型有高斯烟羽模型、欧拉模型、拉格朗日模型等。各扩散模式都有不同考虑因素和尺度适用范围。

多堆近场区大气扩散属于小尺度大气扩散问题,附近地形、建筑物等因素对风场影响与中尺度或大尺度大气扩散问题不同,不能完全简化处理。对于小尺度大气扩散问题,传统扩散模型与算法(如高斯烟羽模型或复杂地形的混合模型)仅在一些理想地形条件下才能得到较好结果,对于复杂地形计算结果不甚理想。

### 2.3 CFD在近场区大气扩散计算中的优势

多堆近场区的特点使得传统大气扩散模型中气象条件稳态假设不再成立,在计算中很难获得满意的结果。因此,必须采用更精细的模型描述流场分布与变化状态。

CFD通过求解 Navier-Stokes 方程,可以直接得到近场区流场时空分布,为风场计算提供了有效途径。在城市街道大气扩散研究中,CFD已经获得了大量应用,并且其预测结果与风洞实验和实际观测值也较好吻合。将 CFD 应用于多堆场址近场区流场计算已具有一定基础,有较强可行性。

## 3 剂量场计算

### 3.1 多源放射性物质浓度叠加

多个源项释放过程中,大部分情况对近场区的风场影响很小,放射性核素浓度分布为各个源所释放放射性物质浓度分布的叠加。如果放射性物质释放过程中伴随爆炸、热力抬升等明显改变局部风场的效应,则需要在考虑风场变化的基础上进行放射性核素浓度叠加。获得放射性核素浓度后便能计算烟羽外照射及烟羽吸入导致的内照射。

在核事故剂量场研究中需结合实际情况,将事故工况的情景假设更加切合核电厂的特点,细化事故场景和核素释放及分布情况。开展源项反演研究,在事故情况不明的时候估算核素释放及途径。

### 3.2 多源直接照射剂量叠加方法

在计算多源剂量之前,需先计算单源的剂

量。目前主要计算方法有基本公式法、点核积分法、迷宫公式法、蒙卡模拟法等。各方法优缺点如表 1 所示。

表 1 单源剂量计算方法比较  
Table 1 Comparison of Single Source Dose Computation Methodology

方法	适用范围	对应程序	优缺点
基本公式法	不受距离限制	无	计算速度快；计算准确性差
点核积分法	可以计算复杂的几何结构模型，但模拟空度不能超过直径 100 m 的球	QAD	计算速度和准确性介于基本公式和蒙卡模拟之间；计算尺度受限
迷宫公式法	适于处理散射问题	无	可快速估算迷宫、孔道等结构对射线的散射；计算较为粗糙，需提前拟合大量经验参数
蒙特卡罗模拟法	可处理复杂结构和源项	MCNP、FLUKA 等	对复杂的物理问题和几何模型，计算非常精确；计算速度慢，前期准备时间长

推荐点核积分法用于单源剂量的快速计算。该方法是一种格林函数积分方法，使用积累因子对光子散射进行修正，适宜于求解中子和 $\gamma$ 射线在复杂几何空间中形成的辐射剂量。

点核积分计算公式为：

$$R(E, \bar{\gamma}_p) = \int_D S(E, \bar{\gamma}) K(E, \bar{\gamma} \rightarrow \bar{\gamma}_p) d\bar{\gamma} \quad (1)$$

式中， $R(E, \bar{\gamma}_p)$  是响应函数，表示能量为  $E$  的辐射源在  $\bar{\gamma}_p$  处所产生的响应； $S(E, \bar{\gamma})$  是位于  $\bar{\gamma}$  处、能量为  $E$  的辐射源源强； $K(E, \bar{\gamma} \rightarrow \bar{\gamma}_p)$  是点核函数，表示在  $\bar{\gamma}$  位置处，能量为  $E$  的单位点源在  $\bar{\gamma}_p$  处造成的剂量响应； $D$  是辐射源所在的几何区域。

辐射源  $S(E, \bar{\gamma})$  在  $\bar{\gamma}_p$  位置处造成的剂量是通过点核函数和源强的积分获得的。获得单源剂量后，多源剂量叠加主要有“保守法”和“现实法”2 种方法。

(1) 保守法：用包络线上的最高剂量率之和，代表事故区域内可能受到的最高剂量率（图 1）。假设有多堆发生事故，每个堆的三维直接照射剂量场已经计算得到。在堆的外建筑表面一定距离处作一包络线，用每个建筑包络线上的最高剂量率之和代表整个事故区域内可能受到的最高剂量

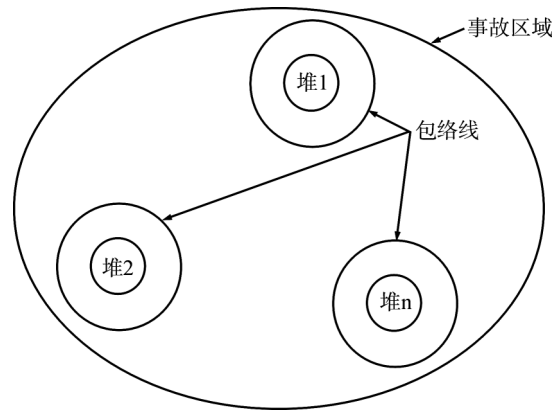


图 1 保守法示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Conservative Method

率  $H_{max}$ 。实际上，在整个事故区域内（除去建筑表面包络线内的区域），任何一个位置的剂量率都小于  $H_{max}$ 。这种计算方法较为保守，计算快捷，易于操作，优点是可以为应急人员工作时限提供最为保守、快捷的指导，缺点是过于保守，不利于人员利用的最优化，可能会造成工作拖延和人力资源浪费。

(2) 现实法：定义坐标原点，将事故区域划分网格，采用坐标变换的方法，将每个堆对每一点的剂量进行叠加，从而得到事故区域的剂量场分布（图 2）。假设有多堆发生事故，每个堆的三维直接照射剂量场已经计算得到。现实法先定义一个坐标原点，可以是以某个堆为圆心，也可以是整个事故区域内某点为圆心。将整个事故区域划分网格，采用坐标变换方法，将单堆对每一点的剂量率进行叠加，从而得到整个事故区域的剂量场分布。该法优点是计算更为准确，可为抢险救援人员工作时间和路线提供更为合理的指导方

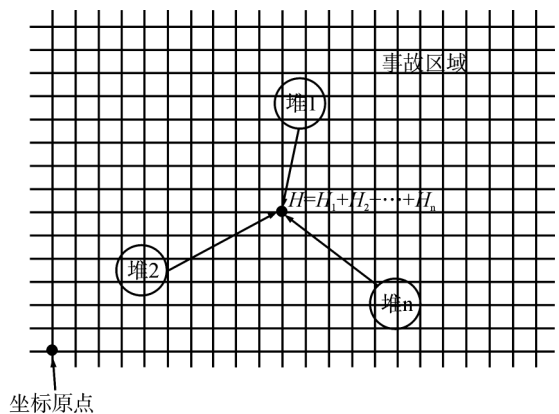


图 2 现实法示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Realistic Method

案,缺点是计算量较大,需要前期编程准备。

#### 4 结 论

(1)多堆事故源项具有多点同时释放、事故序列复杂、源项类型多样、直接照射更强、各厂房屏蔽效应及反射效应交织、剂量场叠加更加复杂的特点。应结合具体的场址及反应堆分布开展研究工作。评估直接照射的“保守法”计算快捷,易于操作,“现实法”计算量相对较大,但精度更高,应根据核事故应急需要,合理选取。

(2)近场区小尺度风场和大气扩散对应急工作人员受到的烟羽剂量影响较大,近场区大气扩散模式不能忽略附近复杂地形、山体、热岛、建筑物等因素对风场的影响。比较分析了现有的大气扩散模式应用于厂内小尺度计算存在的各种优缺点,选取CFD作为近场区风场计算及烟羽外照射剂量计算研究是较为可行的方法。

(3)对我国主要核电基地反应堆分布情况及场址特点进行了分析研究,我国各运行及在建核电厂均属沿海厂址,场址周围普遍存在山体,所

在地陆海风环流、山体抬生作用等对近场区大气扩散存在较大影响。下一步建议采用CFD开展多堆事故工况下应急人员的剂量评估研究工作。

(4)提出了多堆厂址近区剂量分布研究的技术路线。我国在核电厂厂址近区多堆核事故剂量分布研究的理论和验证方面还需要开展很多研究工作,包括多堆事故序列研究、建立事故源项模型、反应堆多源屏蔽计算方法、近场区大气扩散模式研究、模型的风洞实验验证,在此基础上开发专用计算软件,以形成合理可行的近场区剂量评价体系。

#### 参考文献:

- [1] IAEA. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, IAEA[R]. 2012.
- [2] 王醒宇,康凌,曲静原.核事故后果评价方法及其新发展[M].北京:原子能出版社,2003.
- [3] 胡二邦,姚仁太,张建岗.田湾核电厂核事故厂外后果评价系统简介[J].辐射防护,2006,26(5):286.

(责任编辑:张祚豪)