核设施气态流出物取样代表性及取样系统研究进展

陈怡志[1,2] 周 浩[1] 郭子方[1,2] 雷青欣[1] 单陈瑜[1] 刘 峰[1] 刘春雨[1] 刘夏杰[1]

1（中广核研究院有限公司 深圳 518000）

2（西安交通大学 西安 710000）

摘要 核设施排放的气态流出物中常含有多种放射性核素，其排放监测对环境安全与公众健康具有重要意义。为了准确评估排放源强及其环境影响，取样系统需具备良好的代表性。本文系统综述了核设施气态流出物取样代表性及取样系统研究的最新进展。首先，梳理了国际与国内相关标准规范，明确了取样代表性的基本要求与技术指标；其次，从实验与数值模拟两个层面总结了排放筒内取样位置代表性研究成果，重点讨论了气溶胶与碘等混合场中颗粒沉积、流场分布及其对代表性的影响；然后，归纳了采样管路、过滤组件等系统结构优化措施对提升代表性的作用机制；最后，介绍了常用的代表性评估方法，包括实验验证、计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）模拟分析与相对偏差评估方法等。综合研究表明，采样代表性不仅受排放源特性和流动工况影响，还与取样系统设计密切相关。未来研究应进一步聚焦多组分耦合场下代表性精准评估方法的建立，并加强标准体系的完善，以支撑核设施排放监测的科学性与规范化。

关键词 气态流出物，取样代表性，核设施，取样系统，CFD模拟计算

中图分类号 TL75

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250221

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250221

Research progress on representativeness and sampling systems for gaseous effluents from nuclear facilities

CHEN Yizhi[1,2] ZHOU Hao[1] GUO Zifang[1,2] LEI Qingxin[1] SHAN Chenyu[1]
LIU Feng[1] LIU Chunyu[1] LIU Xiajie[1]

1(*China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, China*)

2(*Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000, China*)

Abstract Gaseous effluents discharged from nuclear facilities often contain various radionuclides, making discharge monitoring critical for environmental safety and public health. To accurately assess the source term and its environmental impact, the sampling system must exhibit good representativeness. This paper systematically reviews recent advances in the research on sampling representativeness and sampling systems for gaseous effluents from nuclear facilities. Firstly, relevant international and domestic standards are reviewed to clarify the fundamental requirements and technical criteria for sampling representativeness. Secondly, both experimental and numerical

中广核集团尖峰计划(No.R-2023ZBRRD005)资助

第一作者：陈怡志，女，1996年出生，2024年于中国科学技术大学获博士学位，研究领域为流出物监测

通信作者：郭子方，E-mail：gzf1212@mail.ustc.edu.cn

收稿日期：2025-06-09，修回日期：2025-09-15

Supported by CGN Peak Program (No.R-2023ZBRRD005)

First author: CHEN Yizhi, female, born in 1996, graduated from University of Science and Technology of China with a doctoral degree in 2024, focusing on effluent monitoring

Corresponding author: GUO Zifang, E-mail: gzf1212@mail.ustc.edu.cn

Received date: 2025-06-09, revised date: 2025-09-15

studies on the representativeness of sampling locations inside emission stacks are summarized, with a focus on the effects of aerosol and iodine mixtures, particle deposition, and flow field distribution on sampling representativeness. Thirdly, structural optimization measures for sampling systems (such as sampling lines and filtration components) are discussed in terms of their mechanisms for improving representativeness. Finally, commonly used evaluation methods are introduced, including experimental validation, CFD simulation analysis, and relative deviation assessment. The overall findings suggest that sampling representativeness is influenced not only by source characteristics and flow conditions but also by the design of the sampling system. Future research should focus on establishing accurate evaluation methods under multi-component coupled fields and enhancing the standard system to support the scientific and standardized monitoring of nuclear facility emissions.

Key words Gaseous effluents, Sampling representativeness, Nuclear facilities, Sampling system, CFD simulation

随着全球核电事业的快速发展，核设施的安全运营与环境监测变得愈发重要。核设施在正常运行或事故情况下，会向大气排放一定量的放射性气态流出物。这些气态流出物通常包含多种放射性物质，其中气溶胶（如铯、锶、氙等）和气态碘（如I_2、CH_3I等）尤为关键，它们不仅对环境和公众健康构成潜在威胁，同时也是核设施环境影响评估、源项重建和核事故后分析的重要依据。因此，准确监测这些气态流出物的放射性活度浓度，对环境保护和核安全至关重要。气态流出物通常包括气体与固体颗粒两种形态。固体颗粒物以气溶胶的形式存在，这些气溶胶粒子粒径通常较小，具有较强的沉积和扩散能力，因此在排放过程中会受到气流、温度、湿度等因素的强烈影响。气态碘则作为一种化学活性较高的气体，存在多种不同的形态，如单质碘（I_2）和甲基碘（CH_3I），在排放过程中也表现出复杂的化学行为。不同形态的碘会通过不同的路径被吸附、转化或溶解，因此在气溶胶与气体的混合场中，它们的迁移与沉积特性也有显著差异。气态流出物的排放过程中，气溶胶粒子与气体的分布通常是不均匀的，这种不均匀性可能由于烟囱结构的复杂性、气流速度的变化以及气流与固体颗粒的相互作用等因素引起。具体而言，气流的涡流、温度梯度和气溶胶粒子的沉积效应等因素都会导致流场中的气溶胶与气体浓度分布存在差异，这也意味着，采集的气体样本可能并不完全代表烟囱排放的整体情况。因此，如何在这些复杂的流动条件下选取一个具有代表性的取样位置，成为了气态流出物监测研究中的一个重要课题。

在核设施气态流出物的监测中，取样位置的选择是确保监测数据代表性和准确性的关键因素。由于气态流出物在烟囱或排风管道中的分布往往不均匀，传统的多点等速取样方法虽然可以在一定程度上减少气流分布不均的影响，但该方法在实际应用中存在一定的局限性，特别是在监测气溶胶等固体颗粒时，往往会受到管道内气溶胶粒子损失的影响，从而降低监测的准确性[1]。McFarland等[2]研究发现，多点等速取样会使气溶胶透过率下降，从而导致测量误差增大。因此，近年来，国际标准和研究工作逐渐提倡采用单点取样的方法。单点取样可以通过合理选择取样点位置，减少多点取样带来的损失与误差。单点取样能否真实反映排放物的全貌，关键在于取样位置是否处于流场混合均匀、各类放射性物质浓度分布均匀的区域。近年来，随着计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）技术的迅速发展，数值模拟已成为评估烟囱流场均匀性、确定合适取样位置的重要工具。研究者们提出了基于流场均匀性标准的取样位置优化方法，通过CFD模拟和实验验证手段来确定理想的单点取样位置。通过CFD模型，研究人员可以对烟囱内的流体速度、气旋角、气体浓度、气溶胶粒子浓度等进行精确预测，从而为取样点的布设提供理论依据。同时，实验验证方法也为这一领域提供了不可或缺的支持。结合模拟与实验数据，能够有效地验证取样位置的代表性，确保监测结果的准确性。

当前，国际上已制定多项标准以规范核设施中气态排放物采样的代表性。例如，美国ANSI/HPS N13.1-1969国家标准《核设施气载放射性物质的取样导则》[3]和ISO 2889：1975国际标准[4]均提出了关于采样点选择的判定依据，涵盖气体与气溶胶的浓度分布、气流速度和气旋角等参数。这些标准虽为采样代表性的评估提供了理论支撑，但其在不同类型核设施中的适用性，特别是针对新型堆型（如熔盐堆、气冷堆等）的适配问题，仍然存在较大实践难度，尚未形成统一解决方案。此后，ANSI/HPS N13.1标准于1999年和2011年进行了两次修订，发布为ANSI/HPS N13.1-1999[5]和ANSI/HPS N13.1-2011[6]，后一个版本主要对措辞进行了润色，未涉及核心内容的更改。基于该系列美国标准，国际标准化组织随后对ISO 2889标准进行了更新，最终形成

了最新版的ISO 2889:2023[7]。

本文旨在综述核设施气态流出物取样的代表性研究进展，重点分析当前主要的研究方法与技术，特别是CFD模拟与实验验证的结合应用，评估其在实际核设施中的适用性与挑战。通过梳理国内外研究成果，本文将总结已有技术的优势与不足，并提出未来研究方向，以期为核设施气态流出物的监测与源项评估提供理论支持和技术参考。

1 核设施气态流出物取样代表性标准与规范

在核设施的环境监测中，确保气态流出物取样的代表性对于准确评估放射性物质的排放和扩散具有重要意义。基于确保监测数据质量的考虑，国际与国内相继发布了一系列有关取样位置布设和取样方法的标准与指南，用于规范取样实践、提升结果的可靠性。针对取样截面的布设，各标准之间虽有所差异，但普遍强调应避开上游与下游存在显著扰动的区域，以便气流在测量截面内达到较高程度的均匀混合，进而取样过程具备良好的代表性，以下是一些标准对取样截面位置的具体要求。

1.1 国际标准与规范

ANSI/HPS N13.1-2011[6]：由美国国家标准协会（American National Standards Institute，ANSI）和健康物理学会（Health Physics Society，HPS）联合发布的标准，主要针对环境中放射性气溶胶和气态碘的取样方法。该标准规定了取样设备的性能要求、取样位置的选择标准以及数据处理的方法，旨在确保取样结果的代表性和准确性。根据ANSI/HPS N13.1-2011标准的要求，取样探头应优先设置在风机与烟囱出口之间的管道区域，且需避免靠近烟囱出口，以减小外部流场对流速分布的影响。在确定取样探头位置时，还应综合考虑操作人员的辐射防护需求、高温废气的冷却处理，以及气溶胶颗粒在采样管路中的沉积。标准要求，为确保烟囱取样的代表性，需保证污染物在取样截面上实现充分均匀混合。该均匀性可从以下4个维度加以衡量：气体流动的平均气旋角、气流速度的分布特征、示踪气体的浓度均匀性，以及示踪气溶胶的浓度一致性。相关技术指标要求如下：采样截面上的平均气旋角不应超过20°，气流速度的变异系数（Coefficient of Variation，COV）应控制在20%以内，示踪气体的浓度COV亦应小于20%，且任一测量点浓度与截面平均值的偏差不得超过30%，示踪气溶胶的COV同样需低于20%。

ISO 2889：2023[7]：国际标准化组织（International Organization for Standardization，ISO）发布的标准，规定了核设施气态流出物取样的通用要求。标准强调取样点应选择在气流场中浓度分布均匀的位置，并对取样设备的设计和性能提出了明确要求，以确保取样数据的可靠性。ISO 2889:2023标准规定，烟囱取样点应设置在风机与烟囱出口之间，避免靠近出口位置，以减小风效应对取样位置气流速度场的干扰。最佳的取样管嘴应位于气流已充分混合、具备代表性的区域，通常为下游5~10倍水力直径或上游不小于3倍水力直径的距离，有时需根据具体工况延伸布设距离。取样截面上的气流速度与污染物浓度分布需满足下列要求：1）截面的平均气旋角小于20°，通常以最大气旋角作为评估依据；2）截面中心区域的COV应控制在20%以内；3）示踪气体的最大浓度与其截面均值之间的偏差不超过30%，且截面中心2/3范围内COV不高于20%；4）示踪气溶胶在该区域的COV也应控制在20%以下，以确保测量结果具有良好的空间代表性。

IAEA Safety Series No.115[8]：国际原子能机构（International Atomic Energy Agency，IAEA）发布的安全系列报告，提供了关于核设施气态和液态排放物取样的指导原则。报告中详细阐述了取样点的布置、取样设备的选型以及质量保证措施，旨在帮助各国建立有效的环境监测体系。首先，取样点应远离流场扰动源，如风机、阀门和管道弯头等，以避免不均匀气流的影响。其次，应选择在流场已充分混合的区域，通常为流动通道的中段，远离进气口和出气口。同时，取样点应避免局部高浓度区域，并确保位置稳定，避免因设备振动或维护而影响取样。还需考虑取样设备的安装、操作和维护便利性，确保采样系统的可靠性。

美国环境保护署（Environmental Protection Agency，EPA）在“40 CFR PART 60 Appendix A Method 1”[9]文件中规定，取样位置距离烟囱入口和出口的距离应分别不少于烟囱直径的8倍和2倍。

根据《电厂烟囱释放的放射性流体速度和流量测量》（ISO 10780:1994）的规定[10]，取样管段应为直管段，且长度至少为7倍水力直径，取样位置应距气载入口5倍水力直径；若取样位置接近烟囱的出口大气端，则距离也不少于5倍水力直径。

1.2 国内标准与实践

根据《气载放射性物质取样一般规定》（HJ/T 22–1998）的要求[11]，取样点应设在排放管道或烟囱内气流充分混合、分布均匀的区域，以确保样本具有代表性。对于烟囱排放，最佳取样点通常位于气流混

合最充分的顶部区域。当取样点过高或取样管道过长时可能引发其他问题。为此，取样点通常选择布设在气流方向发生显著变化或管道直径突变处的下游区域，且应与该突变点保持不少于5倍管径的距离。

根据《核动力厂环境辐射防护规定》（GB6249–2025）要求[12]，核动力厂营运方必须编制排放监测大纲，并依此对气态与液态放射性流出物进行监控。为确保取样数据具有代表性，排放监测系统的设计应采用合理的工程措施方案，以尽可能降低取样过程中的损失。

《核设施流出物监测的一般规定》（GB11217–1989）[13]中也要求“核设施营运单位应当对核设施周围环境中所含的放射性核素的种类、浓度以及核设施流出物中的放射性核素总量实施监测”。核电厂排放的流出物分为气载和液态两类，其中气载流出物净化后通过烟囱排放至环境。为实现有效监控，核设施通常在烟囱或管道上布置气载流出物取样系统。由于放射性物质在流场中存在分布不均和沿程沉积等现象，样品的代表性将直接关系到监测数据的准确性。

国核安发[2020]44号《核电厂流出物放射性监测技术规范（试行）》中§3.3.5[14]中提到气载流出物应匀速采样，最大限度减少样品在取样管路弯头中的沉积及传送过程中的损失。烟囱的取样位置、采样管嘴、采样管路及采样管材等设计应符合相关技术要求，样品的采集效率须经过严格校准。对气载流出物采样，应论证气溶胶与碘采样的管道沉积率，并用于修正采集效率。

NB/T 20374–2016《核电厂烟囱的气载放射性物质取样》[15]要求核电厂烟囱气载流出物取样应满足几个关键条件。首先，在取样位置选择上，应确保烟囱内气流充分混合、分布均匀，取样口应布设在烟囱或排放管道顶部区域，同时避开局部流场扰动显著的部位，以保证样品具有代表性。其次，取样管路长度、弯头数量及管径变化应进行合理设计，最大限度减少气溶胶在管路中的沉积和传送过程中的损失。再次，取样装置应配备标准化采样管嘴和采样头相关材料，并对气溶胶和碘等不同类型的放射性核素的采集效率进行论证和必要的校正，以确保采样数据准确可靠。NB/T 20374还对气流速度、采样时间及管道清洁度等提出了具体要求，以保障连续监测的可重复性和数据的可比性。

我国核电厂在气态流出物取样系统设计中，主要参考ISO 2889和ANSI N13.1等国际标准，与ISO 2889、ANSI N13.1等国际标准在总体目标上相似，但在取样口布设细节、管路设计约束及核素校正方法等方面具有针对我国核电厂工程实践的具体规定，为国内核电厂烟囱气载流出物取样系统的设计和运行提供了明确技术依据，结合国内实际形成了具有中国特色的设计与实施路径。根据核电厂堆型、设计时间及运行需求的不同，各厂在取样位置布置、是否开展穿透系数分析、气流均匀性论证等方面呈现出明显差异，体现了标准在工程实践中的多样化应用。国内部分核电厂核岛烟囱取样系统的设计情况如表1所示，具体内容包括执行标准、采样方式、气流均匀性论证和粒子穿透计算等关键指标[16]。

表1　国内核电厂核岛烟囱取样系统设计与实践概况[16]

Table 1　Overview of the design and practice of sampling systems in nuclear island stacks of domestic nuclear power plants[16]

序号 Serial number	核电厂名称 Name of nuclear power plant	执行标准 Implementation standard	取样方式 Sampling method	是否开展气流均匀性论证 Whether to carry out airflow uniformity demonstration	是否开展穿透系数计算 Whether to carry out penetration coefficient calculation
1	CAP1400示范工程 CAP1400 demonstration project	ISO 2889:2010	单点 Single point	完成CFD计算；计划开展比例模型试验和现场验证试验 Complete CFD calculation; plan to carry out scale model test and field verification test	计划开展 Plan to carry out
2	台山1、2号（EPR） Taishan No.1, No.2	ISO 2889:2010	多点（12个） Multi-point (12 points)	8/2原则；计划开展粒子穿透系数验证试验 8/2 principle; plan to carry out particle penetration coefficient verification test	开展10 μm粒子穿透系数计算 Carry out 10 μm particle penetration coefficient calculation

续表

序号 Serial number	核电厂名称 Name of nuclear power plant	执行标准 Implementation standard	取样方式 Sampling method	是否开展气流均匀性论证 Whether to carry out airflow uniformity demonstration	是否开展穿透系数计算 Whether to carry out penetration coefficient calculation
3	田湾1、2号（VVER） Tianwan No.1 and No.2	ISO 2889:1975；ANSI N13.1-1999改进 ISO 2889:1975; ANSI N13.1-1999 improvement	多点等速（14个） Multi-point constant velocity (14 points)	水平风道取样，计算了速度场分布的不均匀度（13%），取气溶胶浓度的不均匀性保守值（25%） Horizontal wind duct sampling, calculated the unevenness of velocity field distribution (13%), and took the conservative value of aerosol concentration unevenness (25%)	开展10 μm和100 μm沉积因子计算 Carry out 10 μm and 100 μm deposition factor calculation
4	三门1、2号（AP1000） Sanmen No.1 and No.2	ANSI N13.1-1999	单点 Single point	已完成CFD计算和比例模型试验；现场验证试验计划开展 CFD calculation and scale model test completed; field verification test planned to be carried out	开展10 μm粒子穿透系数计算 10 μm particle penetration coefficient calculation carried out
5	阳江5、6号（ACPR100） Yangjiang No.5, No.6	ANSI N13.1-1999	单点、护套式取样嘴 Single point, sheathed sampling nozzle	已完成CFD计算；比例模型试验正在开展 CFD calculations completed; scale model tests underway	计划开展10 μm粒子穿透系数计算 Planning to calculate the penetration coefficient of 10 μm particles
6	福清5、6号（华龙一号） Fuqing No.5, No.6 (Hualong One)	ANSI N13.1-1999	单点、护套式取样嘴 Single-point, sheathed sampling nozzle	已完成CFD计算和比例模型试验；现场验证试验计划开展 CFD calculation and scale model test completed; field verification test planned to be carried out	开展10 μm粒子穿透系数计算 10 μm particle penetration coefficient calculation carried out
7	岭澳二期、秦山二期1、2号（二代加） Ling'ao Phase II, Qinshan Phase II No.1, 2 (second generation plus)	ISO 2889:2010	单点、护套式取样嘴 Single point, sheathed sampling nozzle	8/2原则 8/2 principle	运行后开展，试验测试开展5 μm粒子穿透系数计算 After operation, test and test to calculate the penetration coefficient of 5 μm particles
8	岭澳一期（M310） Ling'ao Phase I	ISO 2889:1975	多点等速（7个） Multiple points of equal speed (7 points)	8/2原则 8/2 principle	无 None
9	秦山一期（自主设计） Qinshan Phase I (Independent design)	ISO 2889:2010	多点等速（14个） Multi-point constant velocity (14 points)	8/2原则 8/2 principle	运行后开展，试验测试开展5 μm粒子穿透系数计算 After operation, test and test to calculate the penetration coefficient of 5 μm particles

2 取样位置代表性研究进展

核设施排放的气态流出物中通常含有气溶胶、碘、氚等多种放射性组分，这些组分在排气系统中的空间分布受到气流结构、粒径特性、温湿条件以及系统几何等多因素共同影响。因此，取样位置是否处于污染物充分混合的区域，直接关系到取样结果能否真实反映排放源的实际组成和浓度特征。近年来，随着核设施安全监管要求的提高和监测精度的提升需求，取样位置代表性的研究逐步从经验判断转向理论模拟与实验验证并重的模式，取得了一定进展。

2.1　CFD模拟在混合均匀性分析中的应用

近年来，CFD方法在核设施气态流出物取样系统混合均匀性研究中的应用愈发广泛，成为取样代表性分析的重要技术手段。该方法可有效弥补现场试验空间受限、测点有限和操作复杂等不足，为合理选取取样位置提供理论依据和辅助验证。王勰等[17]基于新版ISO 2889标准的取样位置判据，利用CFD对某核设施排气系统的流场进行建模分析，指出现有取样点选取存在代表性不足的问题，建议在距弯头下游约20 m处的直管段设置取样口，以获得更具代表性的样品。研究表明，CFD不仅可以输出速度、温度和浓度等参数，预测混合均匀区域，还能弥补气溶胶浓度实测难度大、误差大的不足，特别适用于评估不同运行工况下的取样代表性。

在模型构建方面，如图1所示，杨川等[18]引入离散颗粒模型（Discrete Phase Model，DPM）与离散随机游走模型（Discrete Random Walk，DRW），对某烟囱建立了气-固多相湍流耦合模拟体系，通过k-ε模型求解连续相，DPM模拟气溶胶颗粒输运，详细分析了排风管道中速度分布、气旋角和浓度变异系数等参数随截面高度的变化规律。结果表明，部分截面处气流与示踪组分的混合度满足标准要求，验证了基于CFD快速筛选代表性取样位置的可行性。

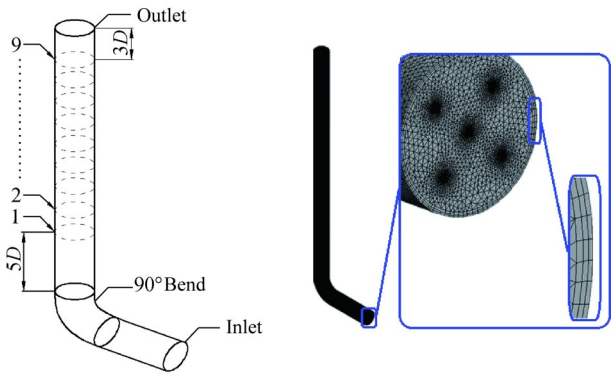


图1　烟囱内流道示意图及流场有限元网格模型[18]
Fig.1　Schematic diagram of the flow channel inside the stack and finite element mesh model of the flow field[18]

丁世海等[19]同样基于CFD技术，对某核设施的烟囱流场开展了混合均匀性模拟，结果显示气流速度可满足国际标准ISO 2889要求，但示踪气体与气溶胶浓度分布无法达标，如表2所示，说明单凭CFD模拟可能难以准确描述复杂的气溶胶行为。因此，该研究强调CFD结果需结合现场试验进行充分比对，才能用于指导工程实践；同时提出可引入混合装置改善现场混合状况，以满足标准要求。

表2　丁世海等[19]计算结果汇总
Table 2　**Summary of computational results from the simulation by DING Shihai *et al.*[19]**

序号 Serial number	计算参数 Calculation parameters	29 m标高 29 m elevation	39 m标高 39 m elevation	51.45 m标高 51.45 m elevation	61 m标高 61 m elevation	ISO 2889判定准则 ISO 2889 judgment criteria
1	最大气旋角 Maximum cyclone angle	21.3°	11.8°	14.6°	12.6°	≤20°
2	速度COV（中心2/3面积） Velocity COV (center 2/3 area)	7.5%	9.8%	7.9%	6.8%	≤20%
3	示踪气体浓度COV（中心2/3面积） Tracer gas concentration COV (center 2/3 area)	32.3%	28.9%	27.3%	27.2%	≤20%
4	示踪气溶胶浓度COV（中心2/3面积） Tracer aerosol concentration COV (center 2/3 area)	71.4%	64.3%	66.7%	66.5%	≤20%
5	整个截面示踪气体最大浓度与平均浓度的偏差 Deviation between maximum and average concentration of tracer gas in the entire cross section	70.5%	66.7%	63.4%	61.0%	≤30%

在工程实践中，王彤等[20]对秦山核电厂烟囱气体取样流场混合均匀性进行了分析，其中秦山烟囱及网格划分示意图如图2所示，他们通过CFD模拟对烟囱取样系统改造前后不同标高的混合状况进行了系统评估，比较分析气旋角、气速及示踪气体和气溶胶分布等指标，发现改造后位于50 m处的取样截面在混合均匀性方面显著优于原71.6 m标高处的取样截面，能够更好满足ISO 2889及ANSI/HPS N13.1等标准，进一步佐证了CFD在现场改造方案设计与验证中的应用价值。

总体而言，CFD模拟在核设施排气系统流场建模与代表性分析中已展现出重要潜力，其优势在于高分辨率参数输出、多工况适应性与可视化能力，尤其适用于前期方案评估与方案优化[21−22]。然而，也需注意其在颗粒物模拟精度、边界条件设定等方面的局限性，宜与实验验证手段相结合，形成互补，提

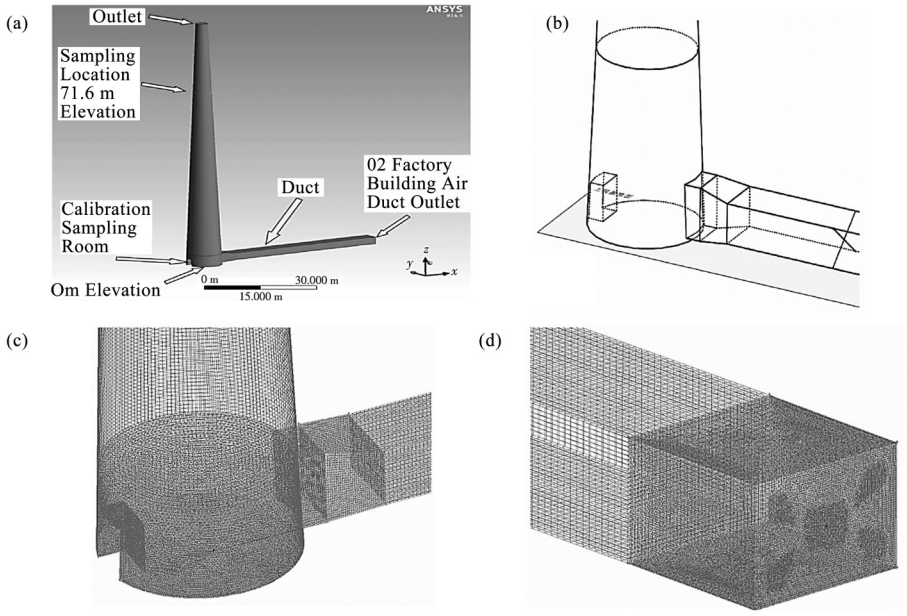


图2 秦山核电厂原型烟囱几何模型及烟囱计算模型网格划分示意图[20]
(a) 烟囱整体示意图，(b) 烟囱底部示意图，(c) 烟囱底部网格划分示意图，(d) 水平风管入口网格划分示意图

Fig.2 Geometric model of the prototype stack and mesh division diagram of the computational model for the Qinshan nuclear power plant[20] (a) Overall schematic diagram of stack, (b) Schematic diagram of stack bottom, (c) Schematic diagram of grid division at the bottom of stack, (d) Schematic diagram of grid division at inlet of horizontal air duct

升分析结论的可信度。

2.2 实验研究方法及验证技术

为了验证气态流出物取样系统在实际运行条件下是否满足代表性要求，实验研究作为与计算模拟相辅相成的重要手段，在国内外核设施中得到了广泛开展。该方法通过构建比例物理模型或依托运行装置，在可控条件下测量流场参数与污染物分布特性，依据相关国际标准评估取样位置的代表性，为系统设计与优化提供直接支撑。

在比例模型实验中，为保证实验结果能够合理外推至原型系统，必须充分考虑几何、动力学及边界条件的相似性。首先，几何相似性要求缩比模型严格保持烟囱直径与高度的比例，采样口位置与原型系统一一对应，同时内部管道、支撑结构及流道设计也需按相同比例缩放，以避免局部流场异常对整体结果造成影响。对于局部突起、弯管、分流器及其他几何特征，应分析其在缩放过程中可能引起的局部扰动和流场非均匀性，并通过适当设计或验证实验加以修正，从而保证模型几何对整体流动行为的代表性。其次，动力学相似性要求关键无量纲参数如雷诺数、斯托克斯数及雷诺应力比尽可能匹配，以保持湍流结构、涡流分布及气溶胶颗粒的运动和沉积特性在模型与原型之间一致[23]。在设计实验时，应考虑流体惯性力、黏性力及颗粒惯性效应的缩放影响，并结合文献报道的校正方法或经验公式，评估局部沉积模式和采样效率的潜在偏差。再次，边界条件相似性要求入口流速分布、速度剖面、湍动特性及波动幅度尽可能与原型一致，同时气溶胶粒径分布、浓度及颗粒注入方式也需匹配实际工况[24]。此外，温度、压力、湿度、壁面粗糙度及入口扰动等因素也会对局部流场和颗粒运动产生潜在影响，应在模型设计和实验分析中加以考虑。通过严格控制几何、动力学及边界条件的相似性，比例模型实验能够在保证可操作性和可重复性的前提下，实现结果向原型系统的合理外推，并为后续数值模拟、设计优化及工程应用提供参考。

董信芳等[25]围绕“华龙一号”第三代压水堆核电机组的烟囱取样系统，基于ANSI/HPS N13.1-1999标准，构建了1∶5的烟囱比例模型，如图3所示，采用单点取样器设计，并结合实际机组烟囱开展多项验证试验。试验指标涵盖气体流速分布、气旋角、示踪气体浓度及示踪气溶胶浓度等关键参数。在三种不同标高截面及两种设计通风工况下，所得气流速度变异系数COV、气旋角极值及污染物浓度分布COV均满足标准限值要求。进一步在福清核电站1、2号机组实际烟囱中开展验证试验，所得结果与模型试验一致，确认了该系统具备良好的代表性，可采用单点采样方式对烟囱排放物进行有效监测。

刘洪涛等[26]聚焦于气载放射性物质取样系统的取样点选型与布置合理性问题，结合ANSI/HPS N13.1标准技术路线，在某核电厂烟囱缩比模型上

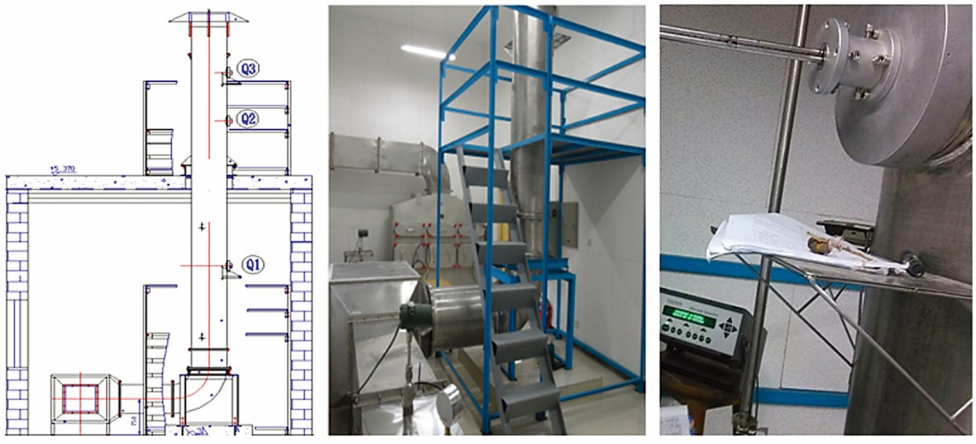


图3 “华龙一号”烟囱比例模型试验装置结构、实体及Q1测试平台[25]

Fig.3 Structural diagram, physical model, and snapshots of Q1 test platform of the scaled stack experimental setup for "Hualong I" nuclear power plant[25]

进行实验研究，采用皮托管、热线风速仪、SF_6示踪气体与气溶胶发生器等设备，系统验证了气旋角、流速及污染物分布状况。试验结果如表3所示，证实了其所设计的取样方案在缩比模型下具有良好的代表性，可有效评估真实工况下的取样性能，为后续核电厂实际排放监测系统设计提供了重要依据。

表3 刘洪涛等验证试验结果[26]

Table 3 Verification test results by LIU Hongtao *et al.* [26]

序号 Serial number	参数 Parameter	指标 Indicator	验证结果 Verification result	是否符合规定 Whether it complies with the regulations
1	气旋角 Cyclone angle	平均气旋角度≤20° Average cyclone angle ≤20°	最大值5.6° Maximum value 5.6°	是 Yes
2	气体流速 Gas velocity	烟囱截面中心周围至少2/3面积的COV≤20% COV≤20% for at least 2/3 of the area around the center of the stack cross section	最大值9.4% Maximum value 9.4%	是 Yes
3	示踪气体浓度 Tracer gas concentration	烟囱截面中心周围至少2/3面积的COV≤20% COV≤20% for at least 2/3 of the area around the center of the stack cross section	浓度分布最大值2.0% Concentration distribution maximum value 2.0%	是 Yes
4		任意点示踪气体浓度的测量值与均值之差≤30% The difference between the measured value and the mean of the tracer gas concentration at any point is ≤30%	示踪气体浓度与平均值之差最大值4.5% Difference between tracer gas concentration and average value maximum value 4.5%	
5	示踪气溶胶浓度分布 Tracer aerosol concentration distribution	烟囱截面中心周围至少2/3面积的COV≤20% COV≤20% for at least 2/3 of the area around the center of the stack cross section	最大值9.9% Maximum value 9.9%	是 Yes

综上所述，实验研究作为CFD模拟的有力补充，具备可视化、可量化和标准对照验证的优势，是当前气态流出物取样系统代表性分析中不可或缺的重要手段。在实际工程中，常通过构建缩比模型进行先期验证，并结合运行现场开展实测比对，确保系统性能满足相关标准要求。随着示踪技术与测量设备的不断进步，实验方法的精度与适用性将进一步提升，为核设施放射性监测提供更加可靠的数据支撑。

2.3 CFD与实验验证结合研究现状

在核设施气态流出物取样系统代表性研究中，单一依赖CFD模拟或实验验证方法均存在局限性。近年来，随着取样技术与测量方法的不断发展，越来越多研究将CFD模拟与实验验证相结合，通过优势

互补的方式实现对气流组织与污染物分布的全面掌握，提升取样系统布设的科学性与可靠性。

CFD模拟在流场结构与污染物迁移行为分析方面具有强大的可视化与参数可控能力，可对实际难以测量的边界条件和内部变量进行系统预测。然而，数值模型在描述气溶胶输运、湍流扩散、壁面沉积等复杂物理过程中仍存在不确定性，尤其在粒径分布广泛、流场变化剧烈的排风系统中，模拟结果容易因模型设定或网格划分而出现偏差。因此，依托现场或缩比实验进行CFD结果的验证与修正，已成为提高模拟可靠性的重要手段。

以王勰等[17]对某核设施排气系统的研究为例，虽然其通过CFD分析初步判定合理取样位置，但其结论仍需依赖后续实验进行验证；而丁世海等[19]的研究进一步指出，即使模拟表明某截面流速均匀，污染物（尤其是气溶胶）浓度可能仍不满足标准要求，因此建议结合试验手段对模拟结论加以校验。在实际工程中，如“华龙一号”烟囱取样系统的研发中，团队即在完成CFD模拟后开展比例模型实验与现场验证试验，对比分析速度场与示踪物分布，验证了模拟结论的准确性，为取样位置的最终确定提供了决策依据。此外，部分研究也探索在模拟—试验迭代优化中引入反馈机制，即以初步实验数据修正模型边界条件，提升CFD计算精度，再以高精度模拟结果指导第二轮实验设计，从而逐步收敛至最优取样方案。此类“模型—试验耦合设计”的策略已在多个核电厂的取样系统改造项目中应用，并取得了良好效果。

总体来看，CFD与实验验证的结合已成为取样代表性研究的主流技术路线。未来，随着高精度气溶胶输运模型、多尺度耦合算法与智能化实验数据采集系统的发展，二者的融合程度将进一步加深。如何高效地建立模拟与实验之间的对应关系、构建统一的评价指标体系，以及在不确定性控制下实现代表性取样方案的最优化，仍是当前研究的重点与难点。

2.4 国际实践与经验

除了国内在气态流出物取样代表性方面日益加强的研究与工程验证外，国际上也开展了大量系统性工作。美国太平洋西北国家实验室（Pacific Northwest National Laboratory，PNNL）在支持美国核监管委员会（Nuclear Regulatory Commission，NRC）和能源部（Department of Energy，DOE）相关项目过程中，长期致力于烟囱采样代表性评估与系统优化研究。美国太平洋西北国家实验室（Pacific Northwest National Laboratory，PNNL）在气态流出物取样代表性研究方面开展了系统性的研究工作，涵盖了现场试验验证、比例模型试验和数值模拟分析等多种技术路径。这些研究不仅增强了对烟囱流场特性和采样探头布置合理性的理解，也为采样系统设计优化提供了坚实的工程依据。在单点气溶胶采样的基本原理与适用条件方面，Rodgers等[27]早期提出了在实际流场中采用单点采样技术的基础理论，并分析了该方法的局限性。随后，Anand等[28]进一步结合实验与数值模拟，对直管道内气体混合程度与单点采样代表性的关系进行了系统研究，明确指出当管内流动满足特定雷诺数和湍流特性条件时，可实现具有代表性的单点采样。在烟囱采样系统的现场验证方面，Ballinger等[29]对PNNL高放建筑在回流条件下的采样点布置进行了现场测试，验证了在复杂流动背景下探头位置是否满足ANSI/HPS N13.1等标准。结果为工程实际布设提供了关键参考。在缩比模型试验研究方面，Recknagle等[30]采用比例模型结合风洞实验的方法，对污水处理设施中烟囱采样位置的气体混合性能进行了评估，明确了不同探头布置对采样代表性的影响，为今后的模型实验设计提供了参考。在多探头位置的标准符合性评估研究方面，Glissmeyer等[31]采用模拟与统计分析方法，对多个具体烟囱布置方案（如LB-C2、LB-S2、LV-S1）是否满足ANSI/HPS N13.1-1999标准进行了定量评估，展示了如何系统性地判定探头布设的规范性。此类研究对实际工程中探头的选址布置具有直接指导意义。关于3410型建筑排气系统的采样探头评估工作，Yu等[32]与Glissmeyer等[33]分别对原始和修订后的采样探头布置进行了性能评估。这些研究揭示了结构修改对气流混合与采样一致性的影响，强调了设计调整后需重新进行代表性验证的必要性。综上，PNNL在采样代表性研究方面通过理论、实验与工程应用的紧密结合，形成了一套完整的验证方法体系。这些成果在国际标准的制修订、取样系统改造升级以及新建设施设计中均具有重要参考价值。表4列举了PNNL及其他国际机构针对烟囱取样代表性所开展的主要研究与论证方法，展示了其在不同阶段采样系统设计与验证中的工程实践经验[16]。

这些工作为美国核设施排放监测系统的标准制定和工程应用提供了重要的技术支撑，特别是在复杂流场下的取样系统优化设计方面，具有极高的工程价值。通过PNNL等机构的研究成果，可以看出其在核设施烟囱取样代表性验证中的综合方法，包括比例模型试验、现场试验以及理论模拟等。这些方法的结合不仅提高了实验结果的准确性与可靠

性，还为我国核设施气态流出物取样系统的设计与验证提供了宝贵的经验和启示。通过对国际实践的总结不难发现，不同设施的气流分布和排放路径差异使得每一项取样方法的适用性各异，强调了根据设施特性进行定制化设计的必要性。同时，理论模拟的引入进一步提升了取样系统设计的科学性和合理性，为我国在新堆型核设施取样系统的设计与优化中提供了有价值的参考，尤其是在气流均匀性分析和取样点布设方面。这些国际经验为我国相关领域的技术进步和标准化建设提供了深刻的启发和支持。

表4 美国PNNL在烟囱取样代表性验证方面的研究与实践[16]
Table 4 Research and practice by the U.S. PNNL on stack sampling representativeness verification[16]

序号 Serial number	设施名称 Facility name	取样代表性论证方法 Sampling representativeness demonstration method
1	Hanford真空干燥设施烟囱 Hanford vacuum drying facility stack	现场试验 Field test
2	Hanford Pu稳定和处理项目296-Z-7烟囱 Hanford Pu stabilization and treatment project 296-Z-7 stack	现场试验 Field test
3	INL实验室的远程废物处理项目INTEC CPP-666烟囱 INL laboratory remote waste treatment project INTEC CPP-666 stack	现场试验 Field test
4	PNNL 3430厂房排风烟囱HV-C2烟囱 PNNL 3430 plant exhaust stack HV-C2 stack	比例模型试验+现场验证 Scale model test + field verification
5	PNNL 3420厂房排风烟囱HV-C2烟囱 PNNL 3420 plant exhaust stack HV-C2 stack	比例模型试验+现场验证 Scale model test + field verification
6	PNNL废物处理厂房HV-C2烟囱 PNNL waste treatment plant HV-C2 stack	比例模型试验+现场验证 Scale model test + field verification
7	Hanford Pu完成厂房296-Z-1烟囱 Hanford Pu completion plant 296-Z-1 stack	比例模型试验+现场验证 Scale model test + field verification
8	Hanford 296-S-21烟囱 Hanford 296-S-21 stack	比例模型试验+现场验证 Scale model test + field verification
9	PNNL物理科学厂房烟囱 PNNL physical science plant stack	比例模型试验+现场验证 Scale model test + field verification
10	Hanford废物处理和稳定厂房LB-C2\LB-S2\LV-S1烟囱 Hanford waste treatment and stabilization plant LB-C2\LB-S2\LV-S1 stack	比例模型试验+现场验证 Scale model test + field verification
11	Hanford废物处理和稳定厂房LV-S2&LV-S3烟囱 Hanford waste treatment and stabilization plant LV-S2&LV-S3 stack	比例模型试验+现场验证 Scale model test + field verification
12	Hanford 废物处理和稳定厂房HV-S1\HV-S2\IHLW-S1烟囱 Hanford waste treatment and stabilization plant HV-S1\HV-S2\IHLW-S1 stack	比例模型试验+现场验证 Scale model test + field verification
13	PNNL 3410厂房烟囱改造（增加风机） PNNL 3410 plant stack renovation (addition of fans)	现场试验+理论模拟（增加风机和混流器） Field test + theoretical simulation (adding fans and mixers)
14	PNNL 325厂房（放化处理实验室）排风烟囱 PNNL 325 plant (radiochemical processing laboratory) exhaust stack	比例模型+现场验证+理论模拟 Scale model + field verification + theoretical simulation

2.5 CFD方法在取样代表性研究中的局限性与改进

在核设施烟囱气溶胶取样代表性研究中，CFD模拟作为重要的数值分析工具，能够提供流场及颗粒输运的空间分布信息。然而，实践中CFD结果与实验数据常存在一定差异，其主要原因在于湍流与颗粒模型的局限性。首先，常用的重整化群（Renormalization Group，RNG）k-ε或标准k-ε湍流模型在处理复杂旋流及高雷诺数湍流时，难以准确捕捉局部涡结构及湍动能耗散特征，从而影响取样截面速度场均匀性的预测。其次，离散相模型通常将气溶胶视为非相互作用的理想颗粒，忽略了粒子间的凝聚、荷电效应以及壁面再悬浮等过程，导致浓度场分布与实际情况存在偏差。此外，入口边界条件的简化设置往往难以完全复现排放口的湍流强度和粒径分布，这种误差在下游取样截面被进一步放大。最后，数值计算过程中，网格划分精度、近壁面处理

方式以及收敛判据对结果影响显著，如果缺乏系统的网格无关性验证，误差可能不可忽略。

针对上述局限性，近年来的研究提出了多种改进策略。湍流建模方面，引入大涡模拟或混合雷诺平均纳维-斯托克斯（Reynolds-Averaged Navier-Stokes，RANS）-大涡模拟（Large Eddy Simulation，LES）方法，可更好地解析瞬态涡结构和旋流特征，提高局部速度场的预测精度。在颗粒相建模方面，通过采用湍流-颗粒双向耦合模型，并在条件允许时考虑粒子凝并、沉积等物理过程，可以更真实地再现气溶胶的迁移行为。在边界条件设置上，将实验测量数据与缩比模型结果作为驱动输入，可有效提高模拟的真实性与可靠性。最后，CFD模拟结果的校准与验证同样关键，通过与缩比实验或现场测量数据的对比，能够反向修正模型参数，并明确模拟结果的适用范围，从而增强CFD在取样代表性研究中的应用价值。总体来看，现行国际与国内标准对取样位置和系统性能均提出了明确的代表性指标要求，但在复杂工况下的实际应用和验证仍存在不足。这些问题促使研究者们在后续工作中探索基于数值模拟与实验验证的代表性评估方法。

3　取样系统对气溶胶与碘的传输效率研究

核设施排放监测中的取样系统是连接源项与测量结果的关键桥梁，而气溶胶和碘作为最主要的放射性核素形态，其在采样管道中的迁移效率直接影响采样数据的准确性和代表性。由于二者在物理和化学性质上的差异，其在取样路径中的传输效率受多种因素影响，包括流动状态、路径结构、管材材质、气体温湿度及核素形态等。ANSI/HPS N13.1-2011[6]明确要求整个传输系统对空气动力学直径为10 μm的微粒传输效率不应低于50%。但在实际工程中，由于管道结构复杂、流动条件不一，气溶胶和碘在传输过程中易发生沉积、吸附等损失，影响最终监测数据的代表性与准确性。近年来，国内多个核电项目围绕取样系统的污染物传输效率问题开展了系列研究，取得了重要成果。

3.1　气溶胶与碘的传输效率研究

气溶胶颗粒在取样系统中传输效率受气动力学行为影响显著，尤其在粒径约为10 μm的条件下更易发生重力沉降与惯性撞击损失。吴平韬等[34]对福清核电厂1、2号机组取样系统开展评估，测得原始系统传输10 μm气溶胶的效率仅为33.5%和23.5%。研究团队基于沉积机制分析，提出改进方案，优化管道走向、缩短水平段并减少弯头数，经Deposition 2001a模拟验证后效率提升至59%，显著改善系统性能。

张勇等[35]针对秦山核电站取样系统结构问题，指出长距离水平管道为气溶胶传输效率的主要瓶颈。通过将取样监测设备从远端移至烟囱底部校正室，取消85.4 m水平管线、保留70.6 m垂直管道后，有效控制了颗粒损失。在事故与正常工况下传输误差校正因子分别控制在1.65与1.1以内，说明结构优化对提高传输效率具有重要意义。

沈福等[36]在田湾、台山与CAP1400核电项目中，通过标准化试验平台测量不同类型管道对气溶胶的单位长度穿透率，发现水平段的传输效率远低于垂直段，90°弯头处尤为显著。实验装置示意图如图4所示，主要由气溶胶发生器、弥散室和试验部件及取样器构成。在60 L·min^{-1}与100 L·min^{-1}流量下均观察到气溶胶浓度显著低估，提示管道结构在取样系统设计中应被优先考虑。

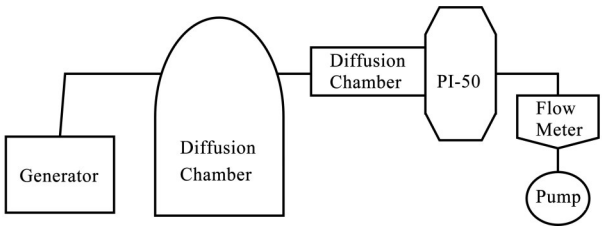


图4　实验装置示意图[36]
Fig.4　Schematic diagram of the experimental setup[36]

与气溶胶相比，碘具有更复杂的物理化学形态（如单质碘、甲基碘），在取样系统中更易受到管壁吸附、反应转化等影响。吴平韬等[34]在改进福清核电取样系统后，开展了碘的台架试验，分别测得系统对单质碘和甲基碘的传输效率为84.00%和84.97%，均高于气溶胶，说明碘在优化后的系统中仍能较好保持代表性。张勇团队[35]在秦山核电站的研究也证实了相似趋势，改造后系统对碘的吸附损失显著下降，传输效率得到改善，配合事故与正常工况下的系统评估，确保了对碘监测的响应准确性。

3.2　气溶胶与碘混合场传输行为与工程优化

在核设施的实际排放场景中，气溶胶与碘往往共同存在，其协同传输行为较单一组分更复杂，尚缺乏系统研究。尽管相关实验有限，但已有工程项目在试验设计中逐步引入“混合场”概念。如吴平韬等[34]研究中通过气溶胶与碘的同步测量，对比各自在相同条件下的传输效率，发现碘在同样条件下的穿透率高于气溶胶，表明其在管道中的沉积机理更为温和。此外，唐玉琴等[1]在三门核电站研究中分

析多点与单点取样嘴在混合场条件下的响应差异，发现多点取样嘴由于结构复杂，易形成紊流与沉积死区，尤其不利于大粒径气溶胶传输，间接影响碘监测准确性。因此推荐采用护套式单点取样方案，并通过结构优化与流速控制提升整体传输稳定性与一致性。

针对现有核设施中取样系统传输效率不足的问题，多项工程实践提供了具有代表性的优化路径。包括布设优化（缩短水平管段、降低弯头数量）、位置调整（就近布设监测单元）、结构替代（单点护套式取样）与参数控制（流速、管径等），均被证明可有效改善污染物穿透率。郑国文等[37]在秦山核电站运行经验基础上，建立了一套系统化试验方法，评估管道长度、布设角度与污染物损失之间的关系，为老厂改造与新厂设计提供了量化依据。沈福等[36]的定量实验研究进一步强调，在设计初期开展传输效率模拟与试验验证的重要性，提出应在核设施全生命周期中同步建立性能评价机制，构建标准化设计与评估流程。

综上所述，气溶胶与碘的传输效率不仅是取样系统设计与评估的重要指标，也直接关系到放射性排放监测的准确性与可溯性。通过系统优化设计与实验验证相结合的方式，可有效提高核设施取样系统对复杂排放环境的适应能力，保障其长期运行的代表性与合规性。

4 未来研究方向与建议

我国在核设施气态流出物取样系统的代表性研究方面虽已取得初步进展，但总体仍处于从工程经验主导向理论引导转型的过渡阶段。当前研究多集中于个别工程案例分析，尚缺乏系统化、前瞻性的方法体系与技术平台。结合国内外发展趋势及当前存在的关键问题，未来研究应重点围绕CFD仿真与实验验证的深度融合、新型堆型适配标准的构建、系统模块化设计理念的引入以及样品传输效率的实时监测与智能补偿等方面展开，逐步建立具有科学性、可操作性与工程适应性的技术体系。

首先，应加强CFD仿真与实验验证的耦合研究。CFD技术因其在复杂流动模拟中的高效性，已被广泛用于取样系统传输效率的预测研究。然而，由于气溶胶与碘的传输过程受粒径分布、气溶胶黏附性、流速不稳定性等因素影响显著，单一的数值模拟结果难以完全真实反映系统的传输损失[38]。因此，加强CFD模型与实验结果之间的耦合与验证是提升研究可信度的关键方向。一方面，应在实验室或现场搭建具有代表性的试验平台，通过真实粒径气溶胶及不同形态碘的输运实验，获取典型结构（如弯头、水平段、取样嘴）中的沉积数据；另一方面，需基于实验结果不断修正CFD模拟边界条件与颗粒运动模型，提高其对传输效率的预测能力。此外，未来还可探索引入人工智能算法，实现基于实验数据库的高效模型训练，从而提升复杂条件下的计算效率与精度。

其次，针对新堆型排放特征的差异，有必要开发相应的标准补充文件或技术指南。目前国内核设施气态流出物取样系统的设计与运行主要参考ANSI N13.1系列和ISO 2889等国际标准，这些标准在传统堆型中已得到广泛应用并具有良好适用性。然而，随着AP1000、CAP1400、华龙一号等新型堆型的投运，其排放路径、烟囱结构及流场特征较传统堆型存在显著差异，导致现有标准在采样点布设、粒径范围覆盖、多点取样与流速均匀性评价等方面的适配性有限。因此，建议在延续现有标准体系技术框架的基础上，结合新堆型的排放特征与监测需求，制定配套的标准补充文件或技术指南，细化关键技术参数推荐值、布设方案及评估方法。这类补充性文件既可强化标准对新堆型的适用性，也有助于提升取样系统设计的科学性、规范性与数据可比性。同时，应注重借鉴国际先进经验，结合国内工程应用实践，推动形成既对接国际标准、又体现中国特色的取样系统技术导则体系，为新一代核电技术的环境监测能力提供更坚实的技术支撑。

此外，为提升系统运行的灵活性与可维护性，应推动取样系统的模块化与可替换化设计。传统核设施取样系统多采用现场定制式设计，结构固定、灵活性差，一旦系统存在性能不足或损耗较大，往往难以在不中断运行的前提下进行有效更换或升级。为适应核设施运行周期长、维护环境复杂、监测精度要求高的现实需求，未来应积极推动取样系统的模块化与可替换化设计理念。通过将采样头、取样管、流量控制装置与分析接口集成为标准模块，形成结构统一、接口兼容的系统组件，有利于实现现场快速部署、在线维护与灵活替换。同时，在设计阶段应引入数字化建模手段，对系统布局进行三维模拟与干涉分析，提升空间利用效率与操作安全性。此外，模块化设计也为后续系统的智能化改造与升级提供了良好的硬件基础，使得整个取样系统能够更好地适应长期运行与技术迭代的需求。

最后，亟需发展具备实时监控与补偿功能的智能监测系统。目前大多数核设施在传输效率评估中仍采用静态校正因子，难以动态反映系统在长期运行中因沉积、堵塞或流速波动导致的代表性变化。

在气溶胶与碘等污染物对沉积环境高度敏感的前提下，未来亟需发展具备实时监控能力与自动补偿功能的智能监测系统。可通过在取样管道关键节点部署高精度流速传感器、粒径分析仪或小型放射性探测器，实时获取系统运行状态与污染物输运参数；结合已有的CFD模拟数据与历史监测经验，构建数据驱动的传输效率评估模型，进而实现代表性因子的在线计算与动态修正。最终，可将实时传输效率校正结果接入环境剂量评估与自动排放申报系统，实现数据链的闭环控制，显著提升监测数据的可靠性与科学性，为核设施环境安全管理提供坚实技术支撑。

作者贡献声明 本研究由陈怡志和郭子方提出研究思路并统筹全局；周浩和雷青欣负责资料收集与文献整理；陈怡志、郭子方和周浩撰写初稿；单陈瑜和刘峰对论文进行了审阅与修改；刘春雨和刘夏杰负责项目管理与技术支持。所有作者均审阅并同意最终稿内容。

参考文献

1 唐玉琴. 三门核电站烟囱流出物取样方式探讨[J]. 辐射防护通讯, 2013, **33**(1): 24－27, 30. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2013.01.006.
TANG Yuqin. Discussion on sampling method for stack effluent at Sanmen NPP[J]. Radiation Protection Bulletin, 2013, **33**(1): 24－27, 30. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2013.01.006.

2 McFarland A R, Rodgers J C. Single-point representative sampling with shrouded probes[R]. Texas: Los Alamos National Laboratory, 1993.

3 American National Standards Institute. Guide to sampling airborne radioactive materials in nuclear facilities: ANSI/HPS N13.1-1969[S]. US: New York, 1969.

4 International Organization for Standardization. General principles for sampling airborne radioactive materials: ISO 2889:1975[S]. Geneva, 1975.

5 American National Standards Institute. Sampling and monitoring releases of airborne radioactive substances from the stacks and ducts of nuclear facilities: ANSI/HPS N13.1-1999[S]. US: New York, 1999.

6 American National Standards Institute. Sampling and monitoring releases of airborne radioactive substances from the stacks and ducts of nuclear facilities: ANSI/HPS N13.1-2011[S]. US: New York, 2011.

7 International Organization for Standardization. Sampling airborne radioactive materials from the stacks and ducts of nuclear facilities: ISO 2889:2023[S]. Geneva, 2023.

8 IAEA. Safety Series No. 115: International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources[R]. Vienna: IAEA, 1996.

9 EPA. 40 CFR Part 60 Appendix A: Method 1 － Sample and velocity traverses for stationary sources[S]. Washington, DC: U. S. Government Publishing Office, 2020.

10 International Organization for Standardization. Stationary source emissions － Measurement of velocity and volume flow rate of gas streams in ducts: ISO 10780: 1994[S]. Geneva, 2023.

11 国家环境保护局. 气载放射性物质取样一般规定: HJ/T 22—1998[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China. General rules for sampling radioactive materials: HJ/T 22—1998[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996.

12 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. 核动力厂环境辐射防护规定: GB 6249—2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Regulations for environmental radiation protection of nuclear power plant: GB 6249—2025[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.

13 国家环境保护局. 核设施流出物监测的一般规定: GB 11217—1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China. The regulations for monitoring effluents at nuclear facilities: GB 11217—1989[S]. Beijing: Standards Press of China, 1990.

14 国家核安全局. 国核安发[2020]44号: 核电厂流出物放射性监测技术规范（试行）[Z]. 北京: 国家核安全局, 2020.
National Nuclear Safety Administration. NNSA [2020] No. 44: Technical specifications for radioactive monitoring of effluents from nuclear power plants (trial implementation) [Z]. Beijing: National Nuclear Safety Administration, 2020.

15 国家能源局. 核电厂烟囱的气载放射性物质取样: NB/T 20374—2016[S]. 北京: 新华出版社, 2016.
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Sampling airborne radioactive materials from the stacks of nuclear power plant: NB/T 20374—2016[S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2016.

16 吴平韬. 气态流出物取样系统性能试验与分析[D]. 衡阳: 南华大学, 2022. DOI: 10.27234/d.cnki.gnhuu.2022.001147.
WU Pingtao. Performance test and analysis of gaseous effluent sampling system[D]. Hengyang: University of South China, 2022. DOI: 10.27234/d. cnki. gnhuu. 2022. 001147.

17 王勰, 任忠国, 熊忠华. 基于CFD方法的核设施气载流出物取样代表性研究[J]. 辐射防护, 2018, **38**(6): 471–479.
WANG Xie, REN Zhongguo, XIONG Zhonghua. Application of computational fluid dynamics method in the analysis of representative aerosol sampling in the pipeline of nuclear facility[J]. Radiation Protection, 2018, **38**(6): 471–479.

18 杨川, 何泽银, 张坤, 等. 放射性气载流出物取样代表性分析[J]. 辐射防护, 2019, **39**(5): 372–378.
YANG Chuan, HE Zeyin, ZHANG Kun, *et al*. Analysis of sampling representativeness of radioactive airborne effluents[J]. Radiation Protection, 2019, **39**(5): 372–378.

19 丁世海, 许光, 尹振羽, 等. 应用计算流体动力学分析烟囱气载流出物取样的混合均匀性[J]. 核电子学与探测技术, 2012, **32**(3): 260–264, 302. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-0934.2012.03.005.
DING Shihai, XU Guang, YIN Zhenyu, *et al*. Computational fluid dynamics (CFD) analysis of stack effluent sampling mixing uniformity[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, **32**(3): 260–264, 302. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2012.03.005.

20 王彤, 徐佳林, 李航. 秦山核电厂烟囱气体取样流场混合均匀性分析[J]. 能源与节能, 2021(4): 2–9. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2021.04.002.
WANG Tong, XU Jialin, LI Hang. Analysis of mixing uniformity of flue gas sampling flow field in Qinshan nuclear power plant[J]. Energy and Energy Conservation, 2021(4): 2–9. DOI: 10.16643/j. cnki. 14-1360/td. 2021. 04.002.

21 Sun Q, Peng W, Li P, *et al*. Study on the representativeness of airborne effluent sampling in the stack of a high-temperature gas-cooled pebble-bed modular reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, **165**: 108680. DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108680.

22 Peng H H, Qiao Y B, Zhu G F, *et al*. Representative sampling analysis of radioactive airborne effluent for the stack system in a molten salt reactor[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, **131**: 103596. DOI: 10.1016/j.pnucene.2020.103596.

23 郑金阁, 程卫亚, 郭浩城, 等. 应用CFD方法研究雷诺数对烟囱气体混合均匀性影响[J]. 辐射防护, 2022, **42**(5): 411–417.
ZHENG Jinge, CHENG Weiya, GUO Haocheng, *et al*. Research on the influence of Reynolds number on the uniformity of gas mixing in chimney by CFD method[J]. Radiation Protection, 2022, **42**(5): 411–417.

24 王泽宇, 赵洲, 陈传奇, 等. 核设施排风烟囱内氮氧化物的载带排放过程数值模拟[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2024, **51**(2): 28–39. DOI: 10.13543/j.bhxbzr.2024.02.003.
WANG Zeyu, ZHAO Zhou, CHEN Chuanqi, *et al*. Numerical simulation of the discharge process of nitrogenoxides in the exhaust chimney of nuclear facilities [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2024, **51**(2): 28–39. DOI: 10.13543/j.bhxbzr.2024.02.003.

25 董信芳, 李航, 丁世海, 等. “华龙一号”核电厂烟囱气态流出物取样系统验证的试验与分析[J]. 中国辐射卫生, 2018, **27**(1): 52–57. DOI: 10.13491/j. cnki. issn. 1004-714x.2018.01.014.
DONG Xinfang, LI Hang, DING Shihai, *et al*. Verification for the representative sampling system of "Hualong I" NPP gaseous effluent: test and analysis[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2018, **27**(1): 52–57. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2018.01.014.

26 刘洪涛, 丁世海, 李航, 等. 核电厂烟囱流出物取样点选择和代表性验证[J]. 自动化仪表, 2021, **42**(S1): 16–20. DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2021030036.
LIU Hongtao, DING Shihai, LI Hang, *et al*. Selection and representative verification of sampling points for stack effluent of nuclear power plant[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, **42**(S1): 16–20. DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2021030036.

27 Rodgers J C, Fairchild C I, Wood G O, *et al*. Single point aerosol sampling[J]. Health Physics, 1996, **70**(1): 25–35. DOI: 10.1097/00004032-199601000-00005.

28 Anand M, McFarland A R, Rajagopal K R. Gas mixing for achieving suitable conditions for single point aerosol sampling in a straight tube: experimental and numerical results[J]. Health Physics, 2003, **84**(1): 82–91. DOI: 10.1097/00004032-200301000-00007.

29 Ballinger M Y, Recknagle K P. Sampling point compliance tests for 325 building at set-back flow conditions[R]. Washington: Pacific Northwest National

Laboratory, 2011.

30 Recknagle K P, Yokuda S T, Ballinger M Y, *et al*. Scaled tests and modeling of effluent stack sampling location mixing[J]. Health Physics, 2009, **96**(2): 164–173. DOI: 10.1097/01.hp.0000333680.18803.8a.

31 Glissmeyer J A, Flaherty J E, Piepel G F. Assessment of the group 5-6 (LB-C2, LB-S2, LV-S1) stack sampling probe locations for compliance with ANSI/HPS N13.1 1999[R]. US: Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2011.

32 Yu X Y, Recknagle K P, Glissmeyer J A. Assessment of the revised 3410 building filtered exhaust stack sampling probe location[R]. US: Pacific Northwest National Laboratory, 2013.

33 Glissmeyer J A, Flaherty J E. Assessment of the 3410 building filtered exhaust stack sampling probe location [R]. US: Pacific Northwest National Laboratory, 2010.

34 吴平韬, 连杰, 屈国普, 等. 福清核电烟囱气载流出物取样代表性分析与改进[J]. 核电子学与探测技术, 2020, **40**(2): 283–287.
WU Pingtao, LIAN Jie, QU Guopu, *et al*. Representative analysis and improvement of gas-borne effluent sampling in the chimney of Fuqing Nuclear Power Plant[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2020, **40**(2): 283–287.

35 张勇. 秦山核电厂气态流出物监测系统的研究及其改进[J]. 核动力工程, 2005(5): 466–470.
ZHANG Yong. Research and improvement of the gaseous effluent monitoring system of Qinshan Nuclear Power Plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2005(5): 466–470.

36 沈福. 新核电烟囱取样管路损失试验评估[J]. 核电子学与探测技术, 2020, **40**(3): 392–395.
SHEN Fu. Experimental evaluation of sampling pipeline loss in new nuclear power chimney[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2020, **40**(3): 392–395.

37 郑国文, 张勇, 徐宏明. 秦山核电厂烟囱取样监测系统运行状况分析[C]//全国放射性流出物和环境监测与评价研讨会, 2003.
ZHENG Guowen, ZHANG Yong, XU Hongming. Analysis of the operation status of the chimney sampling monitoring system of Qinshan Nuclear Power Plant[C]// National Symposium on Radioactive Effluent and Environmental Monitoring and Assessment, 2003.

38 代沁欣, 单陈瑜, 顾卫国, 等. 水平取样管道内气溶胶颗粒损失规律实验研究[J]. 核技术, 2025, **48**(4): 040501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240319.
DAI Qinxin, SHAN Chenyu, GU Weiguo, *et al*. Experimental study on particle loss in horizontal straight tube of sampling system in nuclear facilities[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(4): 040501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240319.