

严寒地区地下空间空气环境安全设计模拟计算方法研究进展

刘存, 李文卓

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024

DOI: 10.61369/TACS.2025080025

摘要 : 本研究对严寒地区地下空间空气环境安全设计的模拟计算方法体系展开了全面且系统的综述。通过构建融合 CFD 数值模拟、通风网络解算以及多参数实测验证的协同分析框架, 对国内外相关研究进行了对比分析。研究揭示了有限体积法和 RNG $k-\epsilon$ 模型在该领域的显著优势, 同时也指出当前方法在热-湿-气多场耦合以及瞬态边界条件响应方面存在的理论瓶颈。在此基础上, 提出了基于数字孪生的多物理场耦合模拟技术这一具有前瞻性的发展方向, 为深埋地下工程的环境安全设计提供了全面且深入的方法论参考。

关键词 : 严寒地区; 地下空间; 空气环境安全; CFD 模拟; 通风网络解算

Research Progress on Simulation Calculation Methods for Air Environment Safety Design in Underground Spaces in Cold Regions

Liu Cun, Li Wenzhuo

PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024

Abstract : This study provides a comprehensive and systematic review of the simulation calculation methods for air environment safety design in underground spaces in cold regions. By constructing a collaborative analysis framework that integrates CFD numerical simulation, ventilation network calculation, and multi-parameter field measurement verification, a comparative analysis of relevant domestic and foreign research is conducted. The study reveals the significant advantages of the Finite Volume Method and the RNG $k-\epsilon$ model in this field, while also pointing out the theoretical bottlenecks of current methods in thermo-hygro-pneumatic multi-field coupling and transient boundary condition response. On this basis, a forward-looking development direction based on digital twin multi-physics coupling simulation technology is proposed, offering a comprehensive and in-depth methodological reference for the environmental safety design of deep-buried underground projects.

Keywords : cold regions; underground space; air environment safety; CFD simulation; ventilation network calculation

引言

随着全球基建与能源开发的推进, 严寒地区地下空间(如抽水蓄能电站、交通隧道等)的开发利用规模日益扩大。然而, 这些空间普遍面临低温、高湿及复杂通风网络带来的多重挑战。研究表明, 失控的空气环境致使该地区设备故障率比温暖地区高出 3-5 倍, 严重影响设备寿命与运维成本, 并对人员安全构成威胁^[1]。

面对日趋严格的行业规范, 传统经验设计方法已难以满足现行标准。为此, 构建基于数值模拟的精细化设计体系变得刻不容缓。本文从控制方程离散化、湍流模型优选和网络拓扑解析三个关键维度, 对相关研究方法进行系统梳理, 旨在为严寒地区地下空间的环境安全设计提供理论基础和可靠方法, 以解决实际工程难题^[2]。

一、计算流体力学技术

在 CFD 数值模拟体系中, 控制方程的离散化是整个计算流程的基石, 它直接决定了模拟结果的准确性和可靠性。在众多离

散化方法中, 有限体积法凭借其独特的优势脱颖而出, 成为解决地下空间 CFD 模拟问题的主流选择。该方法的核心在于其积分守恒性, 即能够确保质量、动量以及能量等关键物理量在计算过程中严格遵循守恒定律, 这一特性从根本上保障了模拟结果的精

准确性。此外,有限体积法对地下空间中常见的复杂几何形状,如不规则洞室、曲折管道等,展现出了出色的网格适应性,能够在不损失计算精度的前提下,有效处理各种复杂边界条件。同时,该方法在计算精度与效率之间取得了良好的平衡,既保证了模拟结果的准确性,又提高了计算速度,为大规模、高精度的地下空间模拟提供了有力支持^[9]。在处理地下空间自然对流问题时,Boussinesq 近似法作为一种简化手段,通过忽略密度变化中的微小波动,仅考虑其对浮力的影响,从而显著简化了计算过程,提升了计算效率。研究表明,采用 Boussinesq 近似法可以有效减少计算量,特别是在处理大规模自然对流问题时,其优势更为明显。因此,结合有限体积法与 Boussinesq 近似法,已成为解决地下空间自然对流问题的有效手段^[10]。在地下空间气流模拟中,湍流模型的选择同样至关重要。不同的湍流模型适用于不同的流动场景,需根据具体模拟需求与计算资源进行综合考量。其中,RNG k- ϵ 模型在处理强旋流区域时表现尤为突出。在地下空间中,通风管道急转弯或设备周围普遍存在强旋流现象,这些区域的流动状态复杂多变,对模拟精度提出了极高要求。RNG k- ϵ 模型凭借其独特的数学结构和对湍流特性的精准描述,能够深入剖析流动特征,准确模拟流体旋转与混合过程,为空气环境模拟提供高精度结果^[5]。而 SST k- ω 模型则在近壁区低雷诺数流动模拟方面展现出了卓越性能。在壁面附近,流体受摩擦力和粘性力影响显著,流动状态复杂多变。SST k- ω 模型通过精确计算湍动能和比耗散率,能够敏锐捕捉近壁区的速度剧变、边界层发展与分离等流动细节,有效避免了模型简化带来的误差,显著提升了模拟准确性^[6]。

二、通风网络解算技术

作为地下工程通风分析的核心技术,通风网络解算技术基于克希荷夫定律建立模型,通过解析通风网络中的非线性流动特征,为系统优化提供坚实的理论依据。角联网络中,风流的稳定性直接取决于对角分支的风阻比。合理的风阻比设计能够确保系统稳定运行,有效避免因风流紊乱和通风死角等问题对安全与作业环境造成的不利影响。传统的 Hardy-Cross 迭代法在处理小规模通风网络时表现尚可,但在面对大规模、复杂通风网络时,其效率低下、收敛迟缓的问题愈发凸显^[7]。与之相比,Newton-Raphson 算法通过构建雅可比矩阵,实现了对非线性方程组的快速求解,显著缩短了计算时间,为系统快速设计与优化提供了有力支持^[8]。此外,随着智能算法的发展,基于遗传算法的智能解算技术逐渐崭露头角。该技术通过多目标 Pareto 最优解搜索,能够在满足通风和空气质量要求的前提下,自动优化设备配置、降低能耗,从而实现经济与环境效益的最大化^[9]。

三、现场测试技术

现场测试是确保模拟结果准确性与工程安全性的关键环节。为了精确捕捉地下空间内的热传递与气流运动规律,我们构建了一

套包含红外热成像仪与超声波风速仪的先进测试体系。红外热成像仪能够非接触式地测量壁面温度分布,为分析热传递过程提供直观数据;而超声波风速仪则能够精确测量气流速度,揭示气流运动规律。通过将这两类数据相结合,我们可以全面掌握地下空间内的热-湿-气耦合作用机制。

大量研究证实,壁面热流密度的实测值与 CFD 预测值之间存在高度相关性,这一发现为模拟方法的可行性提供了有力实证。然而,实测数据中往往包含因设备故障或环境干扰产生的异常值,这些异常值会严重影响模拟结果的准确性。为了进一步提升数据质量,我们引入了深度学习辅助的异常数据识别算法。该算法通过训练神经网络模型,能够自动识别并排除异常数据,为模拟计算的验证提供更准确、可靠的数据支持。这一创新不仅提高了数据处理的效率,还推动了地下空间模拟研究达到新的高度^[10]。

四、挑战与优化方向

(一) 现存理论瓶颈

在地下空间热湿环境与稳定性模拟领域,现有模型在构建及算法应用上存在一定局限性,同时实测数据也面临精度不足的问题,极大地限制了模拟研究的准确性与可靠性。目前,大部分现有模型假定热-湿场解耦,单纯考量热传递或湿传递过程,忽略了水分相变潜热对温度场的反馈作用。水分在蒸发、凝结过程中会吸收或释放大潜热,这对地下空间温度场有着显著影响。这种简化处理致使模拟结果与实际状况存在偏差,无法精准反映地下空间中热湿传递的复杂过程,进而误导后续的工程设计与调控策略制定。在算法层面,传统的稳态算法难以应对瞬态荷载引发的动态失稳问题。在严寒地区,地下空间极易遭受突然的温度骤变、强气流冲击等瞬态荷载影响。稳态算法基于静态条件设计,无法及时、准确模拟这些动态变化,导致模拟结果与实际严重不符,难以对地下空间的实时稳定性提供有效评估。此外,实测数据空间分辨率不足,也给模拟结果的验证带来难题。由于数据采集设备及方法的限制,实测数据无法提供足够详细的空间信息,难以全面反映地下空间各位置的真实状态,使得模拟结果的准确性难以得到有效验证,降低了模拟研究的实用价值。

(二) 技术突破路径

1. 数字孪生平台构建

随着抽水蓄能电站建设规模的不断扩大,传统通风管理模式难以满足高效运维的需求,构建集成 5G 物联网实时数据与 AI 预测算法的数字孪生平台,成为解决上述问题的有效途径。该数字孪生平台依托 5G 网络的高速、低延迟特性,将通风系统中的各类传感器、设备进行互联,实现对通风系统的实时监控。平台可以基于 AI 预测算法,通过实时获取环境参数和设备状态数据,对系统的运行趋势进行精准预测,并自动调整风机转速、阀门开度等相关参数,实现通风系统的自校正和优化控制,从而显著提升通风系统的智能化管理水平,为电站安全、高效运行提供有力

保障。

2. 高性能计算应用

在抽水蓄能电站地下空间复杂通风系统和结构力学模拟分析场景中，计算任务数据规模庞大，传统计算方式效率低下，难以满足工程设计与决策的时间要求。而采用 GPU 并行加速技术，能够将计算任务分解并同步处理，显著提高计算效率。以千万级网格的复杂模拟计算为例，该技术可将原本耗时较长的计算任务，压缩至小时级完成，极大地满足了复杂模拟计算对计算资源的迫切需求，为工程决策提供及时支持。此外，在处理大规模地下空间模拟问题时，高性能计算技术凭借其强大的运算能力，大大缩短计算时间，助力设计团队快速迭代方案，显著提升设计效率。

五、结论

本研究系统地综述了严寒地区地下空间空气环境安全设计的模拟计算方法体系，深入探讨了关键技术路径。明确指出当前方法在热-湿-气多场耦合及瞬态边界条件响应等方面存在的理论瓶颈，并提出了基于数字孪生的多物理场耦合模拟技术这一具有前瞻性的发展路径。本研究为深埋地下工程环境安全设计提供了全面、深入的方法论参考，有助于提高设计水平和质量，推动严寒地区地下空间空气环境安全设计领域的发展。未来的研究可以进一步深入探索数字孪生平台的应用，提高其在复杂地下空间环境中的适应性和准确性；同时，不断优化高性能计算技术，以满足日益增长的模拟计算需求。

参考文献

- [1] 耿永常, 邵龙. 哈尔滨地下空间开发利用现状与对策分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10):5.
- [2] 祁晓天. 地铁隧道及地下工程病害分析与风险防治 [J]. 2023(7):176-178.
- [3] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 55-68.
- [4] 王香丽. 地下变电站通风空调系统的节能性研究 [D]. 上海: 东华大学, 2012.
- [5] Wang X, Pepper D W. Numerical simulation for under floor air distribution system with swirl diffusers[C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2006, 47861: 397-403.
- [6] Masson E, Gleize V. Wall-distance free k-omega turbulence model for compressible unsteady flows[J]. ONERA: Tire a Part, 2004 (149): 1-18.
- [7] 赵厚春, 冯建文. 矿井通风网路中风流稳定性分析 [J]. 煤矿现代化, 2004, (04):40-41.
- [8] Krach A. Node method for solving the mine ventilation networks[J]. Archives of Mining Sciences, 2011, 56(4): 601-620.
- [9] 陈学雷. 基于改进遗传算法的矿井风网特征图优化研究 [J]. 工矿自动化, 2023, 49(S2):71-74.
- [10] Wu A, Keum S, Greene M, et al. Comparison of near-wall flow and heat transfer of an internal combustion engine using particle image velocimetry and computational fluid dynamics[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2019, 141(12): 122202.