

绪论

刘铭

2021 年 5 月 19 日

目录

1	研究背景与意义	1
2	研究方法和内容	2
3	国内外研究现状	2
4	本论文章节安排	3

1 研究背景与意义

空间辐射场三维重构方法是辐射场可视化仿真技术的一项重要技术。辐射场可视化仿真技术不仅能够应用在核设施退役工程,将辐射场的分布以可视化的形式显示在虚拟场景中,评估施工人员所接受的辐射剂量^[1];还能在核与辐射安全科普工作中发挥积极的作用,将辐射场的剂量值、分布等定量信息展现给公众,易于科普工作者与公众进行互动沟通,提高公众对核科学的认识^[2]。随着计算机硬件及相关技术的发展,可视化和虚拟现实技术在辐射防护领域得到了迅速发展^[3],进而辐射场重构技术的方法研究就显得格外迫切。

总所周知,核辐射是一种弱致癌物,例如氡(Rn)作为天然气态放射性核素,氡及其衰变子体已成为肺癌的第二大诱因^[4]。根据联合国原子辐射影响科学委员会(UNSCEAR)对氡及其子体的流行病学和计量学审查研究,矿工的肺癌终生风险率每工作一个月提高 $2.4 \sim 7.5 \times 10^{-4}$ (用WLM表示,Working Level Month)^[5]。2015年德国萨克森辐射防护局检察员Jörg Dehnert对矿井内252名矿工进行个人剂量监测,其中最高有效年剂量高达 $14.4mSv$,并且改进矿井内辐射防护措施:通过对矿井内放射性气体浓度进行监测,根据浓度调节矿井内风机转速^[6]。放射性浓度高的地区除了矿山矿井,还有地下建筑、窑洞、工业废渣建筑室内以及随着核工业技术的发展,核设施周围都存在不同强度的辐射场。这些辐射场都存在着一些特点:放射性物质分布不明、源项分布或场景结构复杂。

对于复杂的辐射场,目前常用的重构方法有正演方法和反演方法。正演方法是通过对辐射传输方程进行求解,在了解放射源基本信息的基础上,构造准确的系统模型进行粒子运输模拟,从而将空间辐射场进行重构;反演方法是在未知放射源基本信息的情况下,通过实际测量获得有限、离散的采样数据进行分析和空间重构,从而获得完整的辐射场分布数据。正演方法目前常用的一些算法有蒙特卡洛法^[7]和点核积分法^[8]等,其中蒙特卡洛法是通过随机性方法对辐射传输方程进行求解计算,点核积分法是通过确定论方法对辐射传输方程进行求解。反演方法也指散乱数据重构方法,目前主要有插值^[9]和逼近,常用的插值算法包括多项式插值、径向基插值、反距离权重插值等,常用的逼近算法包括最小二乘法、最小立方法等。

本文研究的重构方法基于反演方法,在未知源项信息的空间辐射场中,基于测量的有限个离散数据点,利用插值重构方法快速重构出空间辐射场的剂量分布情况。本文研究方法能够应用于监测工作场所辐射场分布、预估未知空间场源项位置、辅助核设施现场辐射防护计算等,拥有广阔的使用场景和应用领域。

2 研究方法和内容

空间插值重构方法有多种分类方式^[10]：按照插值区域范围分，有整体插值、局部插值、边界内插法等。其中整体插值是利用研究区域的所有散乱数据点进行全局特征拟合，采用整体插值方法时，整个区域的数值会影响单个插值点的数值，同理单个散乱数据点的数值增加、减少或删除对整个区域的特征拟合都会造成影响，代表性的整体插值方法有趋势面分析插值方法等；局部插值是利用临近数据点来预测插值点的值：首先定义邻域或搜索范围，然后在该区域内搜索散乱数据点，再对该区域内数据点选择插值函数进行拟合，最后通过计算插值函数得到预测点的值，代表性的局部插值方法有样条插值法、反距离权重插值法和克里金插值法等；边界内插法假设任何数值变化都发生在区域边界上，并且边界的变化是均匀的、同质的，代表性的边界内插方法有泰森多边形法等。

按照插值的标准分，可以分为确定性插值、地统计插值：确定性插值法主要采用数学工具，利用计算插值函数的方法来进行插值，这种方式用来研究某区域内部的相似性，其代表插值法有样条插值法、反距离加权插值法等；地统计插值是基于空间自相关性的，由观测数据产生具有统计关系的曲面，代表插值法有克里金插值法等。按照插值的精度分，可以分为精确插值、近似插值。精确插值重构出包括所有散乱数据点的辐射场；近似插值重构出不包含所有散乱数据点的辐射场。

本论文采用的空间插值重构方法是基于样条插值法和克里金插值法，对于给定的辐射场离散数据，首先分别通过样条插值方法和克里金插值方法重构出相应的辐射场数据；然后对比两种方法重构出的辐射场数据，选取重构结果数据相差较大的区域进行重新采样测量，直到两种方法重构出的辐射场结果大致相同；最后将两种方法重构的辐射场数据进行组合，得到重构空间辐射场分布。

3 国内外研究现状

相比于基于散乱数据插值方法重构辐射场，国内外当前对辐射场重构研究大部分研究都是基于正演方法。法国原子能委员会 (CEA) 开发基于虚拟现实技术的辐射剂量评估软件 NARVEOS^[11]，该软件基于点核积分法对辐射场进行重构；比利时核能研究中心 (SCK • CEN) 开发基于点核积分法和蒙卡抽样的辐射防护最优化工具 VISIPLAN^[12]；中国科学院核能安全技术研究所 (FDS) 开发了基于蒙特卡洛方法的虚拟仿真平台 SuperMC/RVIS^[13]。

由于正演法重构辐射场的点核积分法和蒙特卡洛法都必须在了解源项信息以及空间场结构信息后才能求解，而且点核积分法不适用于复杂的源项和空间场，蒙特卡洛方法对屏蔽较厚的场景无法得出可靠的结果以及计算时间过长，近年来，国内外开始研究基于散乱数据插值法的空间辐射场重构方法。俄罗斯科学院 Krasovskii 数学与力学研究所 Aleksey

M.Grigoryev 基于径向基函数插值对辐射场进行插值重构并基于重构辐射场计算路线最优化问题^[14]；英国布里斯托尔廷德尔大道布里斯托尔大学物理学院 HH Wills 物理实验室 Samuel R. White 基于投影线性重建（PLR）算法对源项进行定位^[15]；中国工程物理研究院赛雪基于 Multiquadric 散乱数据插值方法对辐射场可视化进行研究^[16]，证明了基于 Multiquadric 方法对辐射场重构是可行的；华南理工大学电力学院王壮提出一种基于网格函数插值方法^[9]，通过点源辐射场数据进行重构，验证了其方法的可行性。

尽管近些年来国内外都有对基于散乱数据插值方法的辐射场重构进行研究，但是他们都是基于单一的插值方法并且仅在二维空间辐射场上对其方法验证其可行性，而实际情况下辐射场为三维空间，基于三维空间辐射场数据对插值重构方法进行验证更能说明其可行性。

4 本论文章节安排

本文通过综合分析空间插值重构方法在各个领域的应用以及国内外研究现状，在传统单一插值重构方法上进行改进，提出结合优化样条插值重构法和克里金插值重构法的新型插值重构方法，通过对两种重构方法的结合，获得更符合实际辐射场的插值重构方法。结果表明，该方法重构出的辐射场相比于传统方法重构出的辐射场更接近实际辐射场。同时，在采用新型插值重构方法时，选取离散采样点时更有趋向性。

第一章主要介绍本论文的研究背景和研究意义以及空间辐射场重构的插值方法，分析国内外空间辐射场重构研究现状，提出本论文的主要研究内容和章节安排。

第二章主要介绍样条插值重构方法，分别对 B 样条插值和多层 B 样条插值的原理进行阐述，给出 BA 算法和 MBA 算法的具体计算流程。

第三章主要介绍克里金插值重构方法，具体阐述了克里金插值方法的具体理论，基于普通克里金模型推导出克里金插值方法的矩阵形式。

第四章提出基于样条插值方法和克里金插值方法的新型插值重构方法，通过程序框图具体说明新型辐射场重构方法的过程。

第五章基于蒙特卡洛应用工具框架 Geant4，模拟几组不同应用场景下的空间辐射场数据，用于验证空间辐射场重构方法的合理可行性，并对比其与传统重构方法的重构效果。

最后总结全文，对空间辐射场重构方法的进一步研究提出展望和建设性意见。

参考文献

- [1] Zhuang Wang and Jiejing Cai. Reconstruction of the neutron radiation field on nuclear facilities near the shield using bayesian inference. *Progress in Nuclear Energy*, 118:103070, 2020.
- [2] 曹亚丽, 王尔奇, 王晓峰, and 张瀛. 科学传播模式在我国核与辐射安全科普工作中的应用. *核安全*, (01):34–38, 2014.
- [3] Qiyi Chen and Jiawan Zhang. The visualization of 3d radiation dose field in virtual environment. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1827, page 012006. IOP Publishing, 2021.
- [4] Radoslav Böhm, Antonín Sedlák, Martin Bulko, and Karol Holý. Radon as a tracer of lung changes induced by smoking. *Risk Analysis*, 40(2):370–384, 2020.
- [5] John D Harrison. Lung cancer risk and effective dose coefficients for radon: Unsear review and icrp conclusions. *Journal of Radiological Protection*, 2021.
- [6] Jörg Dehnert. Radon exposures of miners at small underground construction sites in old mining: recommendations to improve radiation protection measures by the saxon radiation protection authority. *Health physics*, 118(1):96, 2020.
- [7] Marija Majer, Matej Roguljić, Željka Knežević, Andrey Starodumov, Dinko Ferenček, Vuko Brigljević, and Branka Mihaljević. Dose mapping of the panoramic 60co gamma irradiation facility at the ruđer bošković institute –geant4 simulation and measurements. *Applied Radiation and Isotopes*, 154:108824, 2019.
- [8] Zehuan Zhang, Yingming Song, Shaohang Ma, Yaping Guo, and Chao Li. A rapid coupling method for calculating the radiation field in decommissioning nuclear power plants. *Annals of Nuclear Energy*, 156:108179, 2021.
- [9] Zhuang Wang and Jiejing Cai. Inversion of radiation field on nuclear facilities: A method based on net function interpolation. *Radiation Physics and Chemistry*, 153:27–34, 2018.
- [10] 李海涛, 邵泽东, et al. 空间插值分析算法综述. *计算机系统应用*, 28(7):1–8, 2019.
- [11] J B Thevenon, O Tirel, L Lopez, L Chodorge, and P Desbats. Chavir: Virtual reality simulation for interventions in nuclear installations. 7 2006.

- [12] F Vermeersch and C Vanbosstraeten. Software visiplan: a powerful tool for optimisation. In *2nd European workshop on occupational exposure management at NPPS, Tarragona, Spain*, pages 5–7, 2000.
- [13] T He, L Hu, P Long, L Shang, S Zhou, Q Yang, J Zhao, J Song, S Yu, M Cheng, et al. Virtual reality-based simulation system for nuclear and radiation safety supermc/rvis.
- [14] Aleksey M. Grigoryev, Oleg L. Tashlykov, Andrey A. Popel, and Yuriy A. Kropachev. Determination of radiation field parameters for the problems of routing optimization based on interpolation with radial basis functions. *AIP Conference Proceedings*, 2313(1):020007, 2020.
- [15] Samuel R. White, Kieran T. Wood, Peter G. Martin, Dean T. Connor, Thomas B. Scott, and David A. Megson-Smith. Radioactive source localisation via projective linear reconstruction. *Sensors*, 21(3), 2021.
- [16] 赛雪. 基于散乱数据插值方法的 辐射场可视化技术研究. PhD thesis, 中国工程物理研究院, 2017.