

DOI:10.11918/202308041

采用机器学习的 X、 γ 辐射剂量仪现场校准技术

高飞,董璐琪,张昕宇,刘蕴韬,刘佳瑞,王菲菲

(中核核工业计量与测试技术重点实验室(中国原子能科学研究院),北京 102413)

摘要:为解决固定式 X、 γ 辐射剂量仪现场校准的散射和剂量率定值难题,保障核设施安全稳定运行,基于 X 光机研究建立了便携式 X 射线照射装置和自屏蔽式 X 射线照射装置。基于蒙特卡罗模拟及机器学习算法和实验方法完成了 X 射线辐射场散射辐射修正并开展辐射场剂量率定值技术研究。首先,使用 MCNP 对便携式 X 射线参考辐射场及自屏蔽式 X 射线参考辐射场的均匀性、散射辐射和能谱分布等辐射特性进行了模拟,将得到的结果与实验数据进行对比,验证了数值模拟方法的有效性以及该装置应用于现场校准的可行性;其次,基于机器学习算法搭建现场校准环境散射辐射修正系统,使用平均绝对值误差对机器学习模型效果进行评价;最后,结合照射装置及次级电离室利用搭建的环境散射辐射修正系统开展现场校准实验。研究表明,便携式 X 射线照射装置及自屏蔽 X 射线照射装置均能提供满足 GB/T 12162.1—2000 标准要求的参考辐射场,基于环境散射辐射修正系统开展的固定式 X、 γ 辐射剂量仪现场校准的校准因子和实验室校准因子的相对误差不大于 6.2%,满足现场校准工作要求。

关键词: 机器学习;散射辐射;蒙特卡罗;X 射线照射装置;现场校准

中图分类号: TL72 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2024)12-0049-13

Study of on-site calibration technique of X/gamma radiation dosimeter based on machine learning algorithm

GAO Fei, DONG Luqi, ZHANG Xinyu, LIU Yuntao, LIU Jiarui, WANG Feifei

(China National Nuclear Corporation Key Laboratory of Metrology and Measurement Technology
(China Institute of Atomic Energy), Beijing 102413, China)

Abstract: To solve the problem of scattering and dose-rate setting for on-site calibration of fixed X, gamma radiation dosimeter, and to ensure the safe and stable operation of nuclear facilities, a portable X-ray irradiation device and self-shielded X-ray irradiation device were established based on X-ray machine. Based on Monte Carlo simulation, machine learning algorithms and experimental methods, the scattering radiation correction of X-ray radiation field was completed and the radiation field dose rate setting technology was studied. Firstly, MCNP was used to simulate the radiation characteristics of portable X-ray reference radiation field and self-shielded X-ray reference radiation field, such as uniformity, scattered radiation and energy spectrum distribution. The obtained results were compared with experimental data to validate the effectiveness of the numerical simulation method and the feasibility of applying the device to field calibration. Secondly, an ambient scattered radiation correction system for on-site calibration was built based on machine learning algorithm, and the mean absolute error (MAE) was used to evaluate the performance of the machine learning model. Finally, on-site calibration experiments were carried out by combining the irradiation device and secondary ionization chamber with the ambient scattered radiation correction system built. The results show that both the portable X-ray irradiation device and self-shielded X-ray irradiation device can provide reference radiation field meeting the requirements of GB/T 12162.1—2000. The relative error of calibration factor and laboratory calibration factor of fixed X, gamma radiation dosimeter calibration based on environmental scattered radiation correction system is less than 6.2%, meeting the requirements of on-site calibration work.

Keywords: machine learning; scattering radiation; Monte Carlo; X-ray irradiation device; on-site calibration

收稿日期: 2023-08-10;录用日期: 2023-11-22;网络首发日期: 2024-10-15

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20241015.0931.004>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0607300)

作者简介: 高飞(1983—),男,博士,研究员;刘蕴韬(1972—),男,研究员,博士生导师

通信作者: 高飞,83jerry@163.com

核电站反应堆等核设施内部及周边广泛配备有固定式 X、 γ 辐射剂量仪, 此类仪表是辐射监测网络系统中的重要组成部分, 具有灵敏度高、稳定性好、操作简便和反应快速等优点^[1]。固定式 X、 γ 辐射剂量仪不便于拆卸送往计量实验室进行校准检定, 而且送检周期较长(至少 1 周), 影响辐射剂量监测结果的连续性。此类仪表拆卸后不便于安装且在运输和安装过程中容易造成损坏^[2], 无法保障其监测结果的准确可靠, 影响了其辐射剂量监测能力, 存在现场校准技术需求。固定式 X、 γ 辐射剂量仪的现场校准方法需要选择合适的射线装置以提供必要的参考辐射场, 通常使用放射性同位素作为 γ 辐射源, 但放射源存在丢失的风险, 且受到法律法规的管控, 运输手续审批困难。而 X 射线机在运输过程中不存在放射性, 比运输同位素放射源更为安全, 且已有实验论证利用 X 射线(管电压范围: 80 ~ 200 kV) 替代¹³⁷Cs γ 射线对常用固定式 X、 γ 辐射剂量监测仪表进行现场校准是可行的^[2], 因此使用 X 射线机作为现场校准的射线装置。固定式 X、 γ 辐射剂量仪的现场校准方法分为原位校准和现场校准。其中原位校准直接使用便携式 X 射线照射装置产生的辐射场对仪表进行校准, 其优点在于不需要拆卸仪表, 但由于固定式辐射监测仪表通常固定在墙上, 且环境条件复杂, 会有大量来自墙体和其他障碍物的散射辐射, 参考点处剂量率定值存在一定困难; 现场校准则是在现场拆卸仪表的探头, 放入由自屏蔽式 X 射线照射装置产生的封闭辐射场进行校准, 现场校准相较于实验室送检的优势在于不需要拆卸固定式 X、 γ 辐射监测仪的全部线缆和主机, 在封闭辐射场中, 散射辐射较为单一, 主要来自屏蔽体和仪表探头, 仪表探头形状多为圆柱体, 散射辐射类似, 易于通过机器学习的方法对散射辐射造成的影响进行修正。为解决固定式 X、 γ 辐射剂量仪的现场校准技术需求, 基于 X 光机研究建立了便携式 X 射线照射装置和自屏蔽式 X 射线照射装置, 基于蒙特卡罗模拟、GBRT 模型、极端随机树模型等机器学习算法和实验方法完成了 X 射线辐射场散射辐射修正并开展辐射场剂量率定值技术研究。结合照射装置和次级标准电离室开展了固定式 X、 γ 辐射剂量仪现场校准实验, 现场校准因子和实验室校准因子的相对误差不大于 6.2%, 满足现场校准工作要求。

1 便携式 X 射线照射装置

1.1 结构

便携式 X 射线照射装置的结构见图 1。便携式

X 射线照射装置主要包括: X 射线管、屏蔽体、限束光阑、附加过滤、俯仰角调节装置和三脚架。X 射线管用于产生 X 射线, 选取 XPO EVO 225D 型便携式恒电压 X 射线管, 最大功率可达 1 200 W, 具有管电压、管电流调节范围宽, 输出剂量重复性与稳定性较好等优点, X 射线管的主要技术参数见表 1^[3-4]。

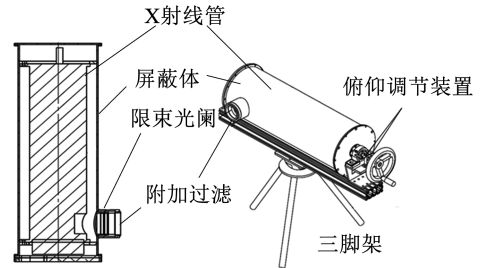


图 1 便携式 X 射线照射装置结构

Fig. 1 Structure diagram of portable X-ray irradiation device

表 1 便携式 X 射线管技术参数^[3]

Tab. 1 Technical parameters of X-ray tube

| 属性 | 技术参数 |
|-----------------------------|----------------------------------------------------|
| 光机类型 | 便携式定向 225 kV 金属陶瓷管 X 射线管 |
| 管电压调节范围 | 25 ~ 225 kV, 调节步距 1 kV/step, 调节精度 $\pm 1\%$ |
| 管电流调节范围 | 0.5 ~ 10.0 mA, 调节步距 0.1 mA/step, 调节精度 $\pm 1\%$ |
| 单次最大连续曝光时间/s | 1 ~ 3 600 |
| 最大功率/W | 1 200 |
| 固有滤片/mm Be | 0.8 \pm 0.1 |
| 辐射泄漏/(mSv·h ⁻¹) | 5(最大泄漏剂量) |
| 年稳定性/% | ≤ 2 |
| 重复性/% | ≤ 1 |
| 阳极靶/(°) | 钨靶, 20 |

由表 1 可知, 便携式 X 射线管最大辐射泄漏剂量率为 5 mSv/h, 为达到防护目的, 在 X 射线管外部设计厚度为 5 mm 的铅体以及 1 mm 的不锈钢材料的屏蔽箱, 可将表面(距屏蔽体表面 30 cm)泄漏剂量率降低至 25 μ Sv/h。X 射线管产生的 X 射线不能直接用于仪表的现场校准实验, 需要研制一系列的附加过滤, 选用 GB/T 12162.1 — 2000《用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的 X 和 γ 参考辐射 第 1 部分: 辐射特性及产生办法》^[5] 推荐的 L 系列和 N 系列参考辐射质, 附加过滤片按焦距斑由近及远按原子序数减小的顺序进行排列, 依次为: Pb、Sn、Cu、Al 金属过滤片, 可以有效减少杂质射线对出射束的污染。

位于出射口的限束光阑主要用于对 X 射线出射束的限束与整形^[3],其内孔直径大小直接影响到 1 m 处所形成辐射场范围大小。GB/T 12162.1—2000《用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的 X 和 γ 参考辐射 第 1 部分:辐射特性及产生办法》^[5]规定,辐射场直径应保证足以完全和均匀地照射离焦斑最近检验点上的探测器,且整个探测器灵敏体积上剂量率的变化不应超过 5%。因此利用蒙特卡罗中子和光子传输代码(Monte Carlo Neutron and Photon transport code, MCNP)软件建立模型,模拟不同光阑内孔半张角条件下距焦斑 1 m 处的辐射场范围,源项设置为 N-150 谱分布点源,光阑内孔半张角设置为 3°~15°不同角度,计算结果见表 2。由表 2 可知,内孔形状不同而半张角大小相同的限束光阑在 1 m 处产生均匀性在 $\pm 5\%$ 以内的辐射场直径完全相同(即限束效果完全相同),参考对常见固定式 X、 γ 辐射剂量仪外形尺寸调研情况可知,便携式 X 射线参考辐射场均匀性可满足大部分此类仪表的现场校准测量工作,因此限束光阑设计为相同直径两级切片状,每级光阑厚度 3 mm,相邻两级光阑间距 10 mm。

表 2 不同半张角大小对应的辐射场直径模拟结果

Tab. 2 Simulation results of radiation field diameters corresponding to different half opening angles

| 限束光阑张角/(°) | 3 | 5 | 8 | 10 | 15 |
|------------|----|-----|-----|-----|-----|
| 辐射场直径/mm | 60 | 100 | 160 | 200 | 300 |

便携式 X 射线照射装置设置有俯仰角调节装置,可实现 $-15^\circ \sim +15^\circ$ 的范围内的照射功能。便携式 X 射线照射装置设置有三角架,可实现焦点距离地面 1.00~1.75 m 高度调节。

1.2 便携式 X 射线照射装置辐射场特性研究

1.2.1 辐射场均匀性

通常将均匀性 $\geq 95\%$ 的辐射场范围作为校准场,辐射场的均匀性是研究便携式 X 射线照射装置辐射场特性的关键指标。对不同半张角 θ 条件下参考辐射场范围进行测量^[3],测量结果见表 3。由表 3 可知,均匀性在 $\pm 5\%$ 以内的辐射场范围随限束光阑半张角的增大呈增大趋势,且半张角为 $10^\circ \sim 15^\circ$ 时的均匀场范围相同,这主要是 X 射线管出射口结构尺寸限制所导致的。当参考点距焦斑 2 m 时,辐射场直径范围最大可达 38 cm,因此便携式 X 射线参考辐射场均匀性可满足大部分常规仪表的现场校准测量工作。

表 3 不同半张角条件下便携式 X 射线照射装置参考辐射场范围

Tab. 3 Reference radiation field range of portable X-ray irradiation device with different half opening angles of beam collimating apertures

| 距焦斑距离/m | 辐射场直径/mm | | | | |
|---------|----------|-----|-----|-----|-----|
| | 3° | 5° | 8° | 10° | 15° |
| 1 | 60 | 140 | 160 | 180 | 180 |
| 2 | 120 | 300 | 340 | 380 | 380 |

1.2.2 散射辐射

GB/T 12162.1—2000《用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的 X 和 γ 参考辐射 第 1 部分:辐射特性及产生方法》^[5]规定,测量射线束中轴线上检验点的空气比释动能率,经修正后应在 5% 以内正比于焦点到探测器几何中心距离平方的倒数,即满足平方反比定律要求。以 N-150 参考辐射质为例,设置限束光阑半张角 $\theta = 8^\circ$,测量参考点距离焦斑不同距离处的空气比释动能率,将其作为实测剂量率值 D ,将实测值经空气衰减修正因子修正得到修正剂量率 D' ^[3-4],表 4 为 $D'l^2$ 随距离 l 的变化关系。由表 4 可得,距焦斑距离为 0.5~4.5 m 时,修正后各测量点处剂量率的距离平方反比定律与 0.5 m 处的相对偏差 $\leq 5\%$,符合 GB/T 12162.1—2000《用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的 X 和 γ 参考辐射 第 1 部分:辐射特性及产生方法》^[5]规定。

表 4 限束光阑半张角 $\theta = 8^\circ$ 时平方反比定律检验结果

Tab. 4 Result of inverse square law test for the half opening angle $\theta = 8^\circ$ of beam collimating apertures

| 距焦斑距离/m | 实测剂量率/(mGy·h ⁻¹) | 空气衰减修正系数 | 修正剂量率/(mGy·h ⁻¹) | $D'l^2$ | 与 0.5 m 的相对偏差/% |
|---------|------------------------------|----------|------------------------------|---------|-----------------|
| 0.5 | 365.46 | 1.000 | 368.91 | 92.23 | 0 |
| 1.0 | 91.57 | 1.016 | 93.66 | 93.66 | 1.55 |
| 1.5 | 39.82 | 1.007 | 41.27 | 92.86 | 0.68 |
| 2.0 | 22.19 | 1.011 | 23.30 | 93.20 | 1.05 |
| 2.5 | 14.05 | 1.013 | 14.95 | 93.45 | 1.33 |
| 3.0 | 9.74 | 1.025 | 10.51 | 94.56 | 2.53 |
| 3.5 | 7.14 | 1.036 | 7.80 | 95.54 | 3.59 |
| 4.0 | 5.42 | 1.040 | 6.00 | 95.94 | 4.02 |
| 4.5 | 4.22 | 1.039 | 4.73 | 95.82 | 3.89 |

1.2.3 能谱分布

便携式 X 射线照射装置的能谱分布与阳极靶材料、角度、附加过滤材料、固有过滤等均有密切的关系,使用蒙特卡罗模拟法对便携式 X 射线照射装置的电子打靶初级 X 射线谱与 N 系列、L 系列 X 射线过滤谱进行模拟并将模拟结果与德国联邦物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)实测谱进行对比^[6],部分结果见图 2。

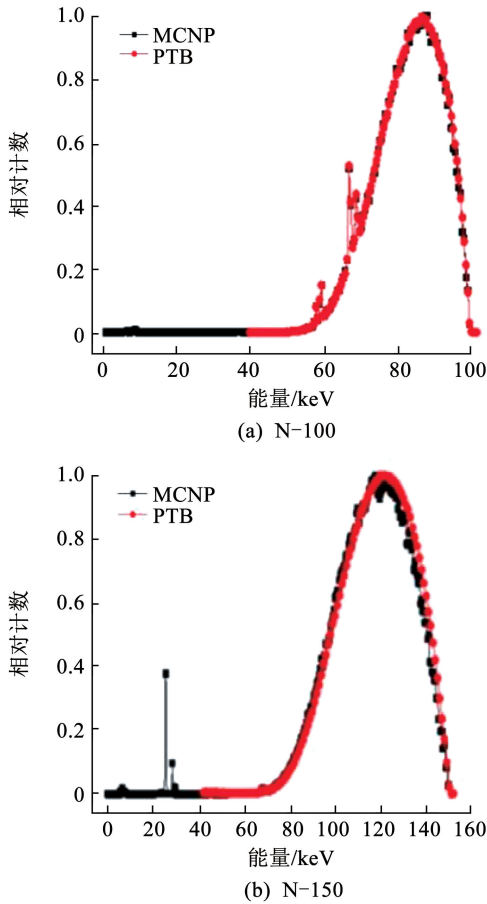


图 2 MCNP 模拟谱与 PTB 实测谱对比

Fig. 2 Comparison of MCNP simulated spectrum and PTB measured spectrum

由图 2 可知,MCNP 模拟谱与 PTB 实测谱存在细微差别,这主要是由于 PTB 谱线为实测谱,其测量过程将受到实验环境影响(尤其是低能散射部分),且两者装置可能存在差异。在实际校准场应用中,起主要作用的是连续谱部分,因此便携式 X 射线照射装置应用于现场校准是可行的。

2 自屏蔽式 X 射线照射装置

2.1 结构

自屏蔽式 X 射线照射装置包括:X 射线管、屏蔽体、限束光阑、附加过滤与校准腔室等组成,限束

光阑和附加过滤与便携式 X 射线照射装置通用,整体结构示意图见图 3。校准腔室内部为 $\Phi 44 \text{ cm} \times 44 \text{ cm}$ 的圆柱体,为保证人员安全,采用 20 mm 厚的铅作为屏蔽体材料,铅屏蔽层内外分别由 5 mm 厚的不锈钢包裹。校准腔室前表面有圆孔与 X 射线管对接,用于接收来自 X 射线管的 X 射线束,上表面有圆孔用来放入待校仪表的探头,后下方约开有 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 方孔,用于插入并摆放测量空间散射辐射的谱仪探头。

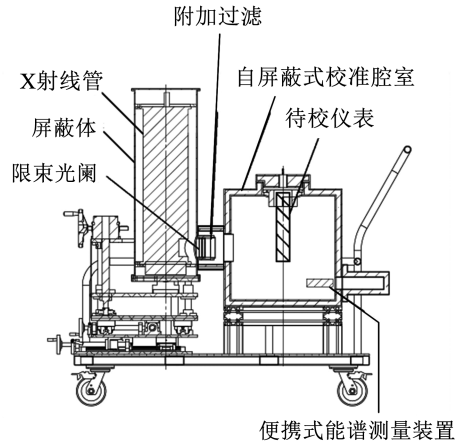


图 3 自屏蔽式 X 射线照射装置剖面示意

Fig. 3 Schematic diagram of self-shielded X-ray irradiation device

2.2 自屏蔽式 X 射线照射装置辐射场特性研究

2.2.1 辐射场均匀性

结合实验测量和蒙特卡罗模拟方法研究自屏蔽式照射装置参考辐射场均匀性,对自屏蔽式 X 射线照射装置进行建模(见图 4),并利用 MCNP 计算自屏蔽式照射装置内的辐射场的剂量分布。源项分别设置 N-100 和 N-150 谱分布点源,X 射线源在半张角 8° 范围内均匀分布,限束光阑材料为钨镍合金,分别在距离焦斑 30、40、50、60、70 cm 处不同垂直位置设置体积为 27.9 cm^3 的球型计数栅元,使用 MCNP 的 F4 计数卡,配合 DE4、DF4 转换系数卡,分别计算距离焦斑不同位置处不同垂直位置的空气比释动能分布情况,结果见图 5。

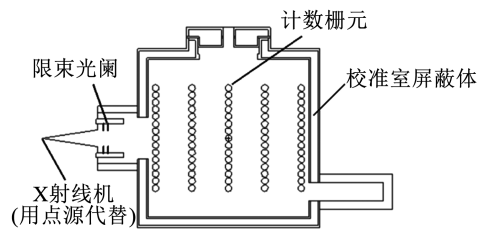


图 4 自屏蔽式 X 射线照射装置辐射场均匀性 MCNP 模型

Fig. 4 MCNP model of radiation field uniformity of self-shielded X-ray irradiation device

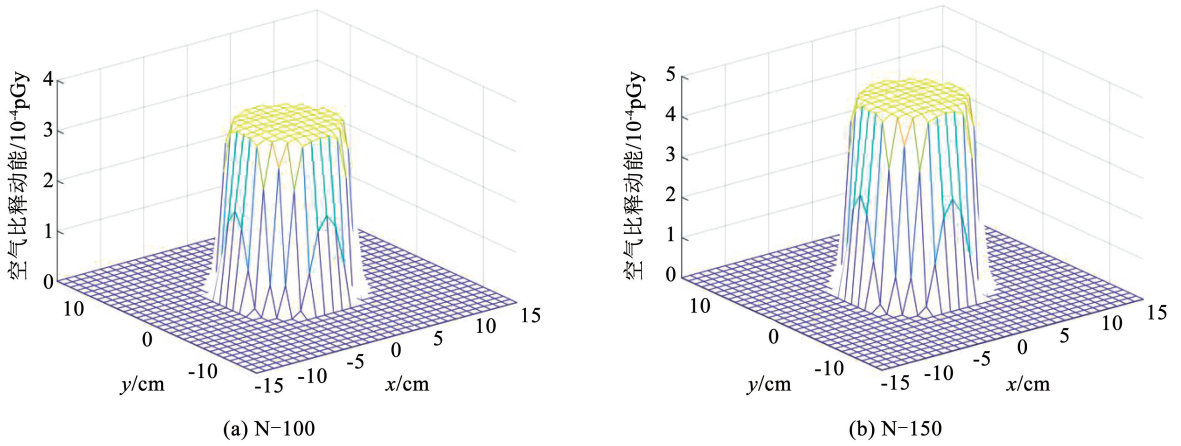


图 5 不同辐射质检验点所在平面的空气比释动能分布

Fig. 5 Distribution of air kerma at the plane where different inspection points located with different radiation quality

X 射线管产生的 X 射线束经过准直光阑、附加过滤进入自屏蔽式 X 射线照射装置的校准室中,形成自屏蔽式 X 射线辐射场,选取参考辐射质 N - 100 和 N - 150,使用德国 PTW 公司生产的 TW32005 球形电离室测量参考点垂直剂量率分布,将实测结果

与模拟结果进行比较,结果见图 6。由图 5、6 所示,自屏蔽式 X 射线照射装置参考点处的辐射场直径大于 10 cm,能够覆盖绝大多数固定式 X、 γ 辐射剂量仪探头的灵敏区直径,可以用于此类仪表的现场校准工作。

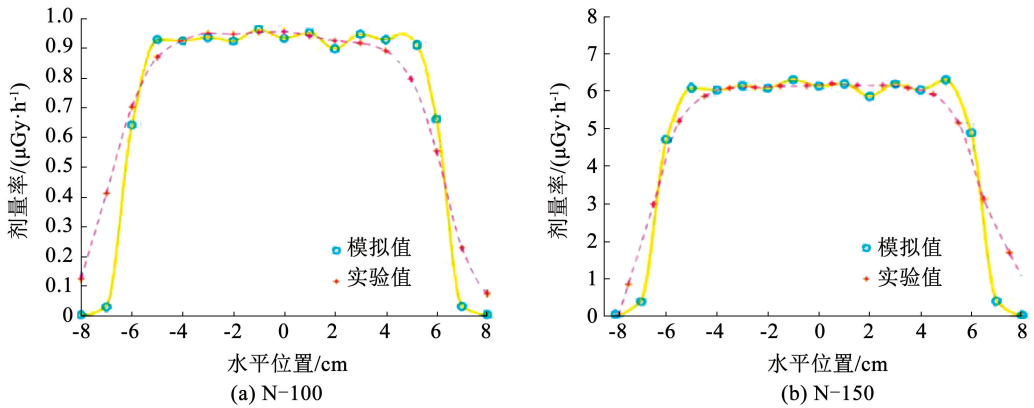


图 6 不同辐射质剂量率分布的 MCNP 模拟与实验值对比

Fig. 6 Comparison between simulated and measured results for the dose rate distribution of radiation quality

2.2.2 能谱分布

选取 SPEAR 碲锌镉探测器 (CZT) 置于参考点处,对自屏蔽式 X 射线照射装置的能谱进行测量,同时对探测器结构进行蒙特卡罗建模,使用点源代替 X 射线管,限束光阑材料为钨镍合金,校准室屏蔽体为 2 cm 厚的铅内外分别包覆 0.5 cm 的 304 不锈钢,CZT 探头尺寸为 5 mm × 5 mm × 5 mm,组成元素比例为 Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te,源项选取 N - 80 ~ N - 100 参考辐射质,使用 MCNP 的 F8 计数卡,模型如图 7 所示,计算自屏蔽式 X 射线照射装置参考点处 CZT 晶体的脉冲高度谱,并与测量结果进行对比,结果见图 8。

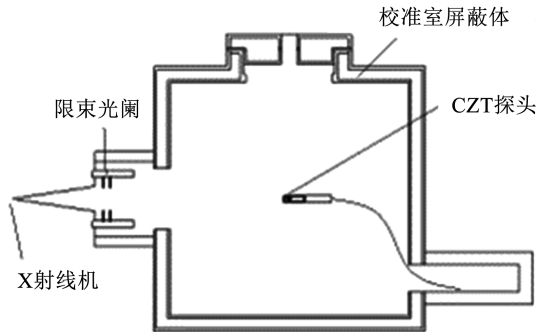


图 7 自屏蔽式 X 射线照射装置能谱特性 MCNP 模型

Fig. 7 MCNP model of energy spectrum characteristic of self-shielded X-ray irradiation device

能谱右侧的小峰是由于堆积效应造成的虚假峰,由于 N 系列辐射质在参考点处的光子注量率较高,因此谱仪的计数率也比较高,在一个时间周期内,可能不止一个光子与 CZT 晶体发生相互作用,此时放大器输出的脉冲的高度为多次相互作用产生的脉冲高度之和。由图 8 可以看出,MCNP 能够有效模拟参考点处能谱的真实情况。以 N-100

和 N-150 辐射质的能谱测量结果为例,比较参考点处自屏蔽式 X 射线照射装置的实测谱与开放场 0.5 m 处的实测谱,结果见图 9。从图 9 中可以看出开放场和自屏蔽辐射场在能谱分布方面基本相同,即在实际校准场应用中并没有显著差别,说明了自屏蔽式 X 射线照射装置用于现场校准的可行性。

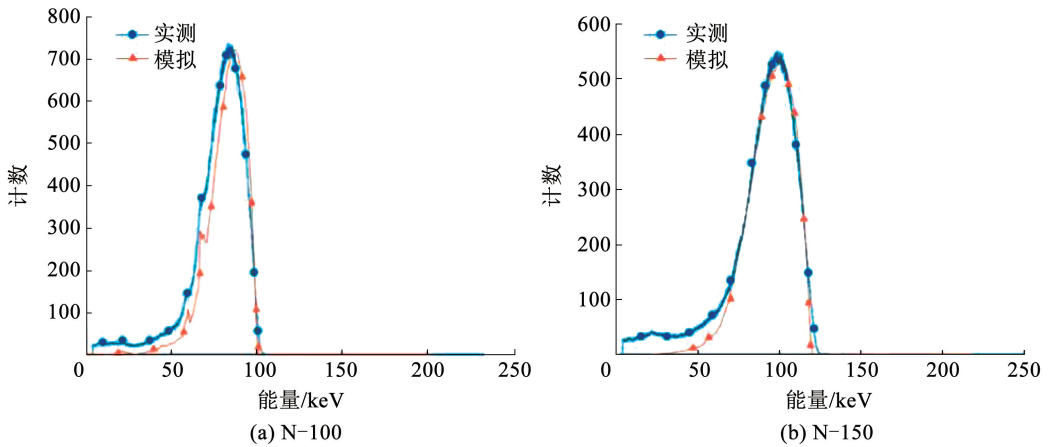


图 8 参考点处实测谱与 MCNP 模拟对比

Fig. 8 Comparison of measured spectrum and MCNP simulated spectrum

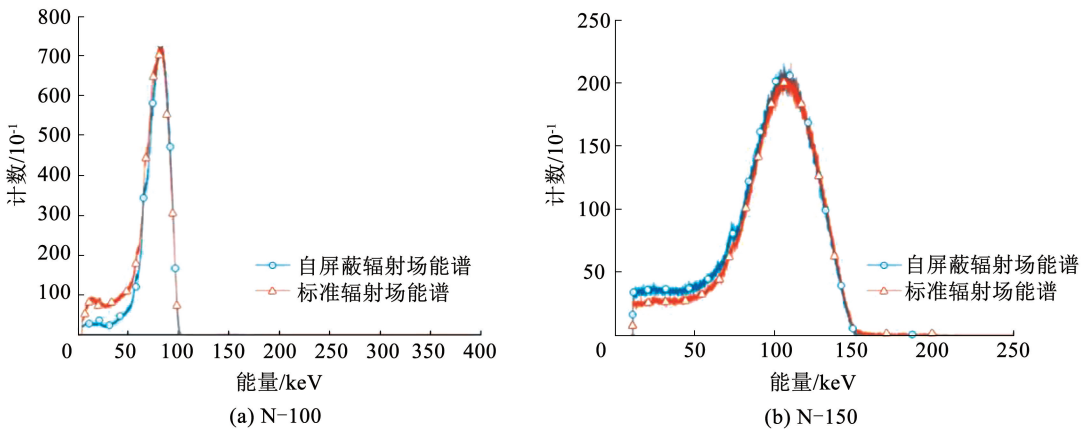


图 9 自屏蔽辐射场和开放场能谱对比

Fig. 9 Comparison of self-shielded radiation field spectrum and open field spectrum

3 基于机器学习的现场环境散射辐射修正系统研究

固定式 X、 γ 辐射剂量仪一般固定在距离地面 1 m 高的墙体上,进行原位校准时墙壁是散射辐射的主要来源,需开展必要的环境散射辐射修正。

机器学习可以基于采样数据对未知状况、未知问题进行识别和解决。近年来,机器学习逐渐应用于辐射剂量学研究^[7-10]。拟结合机器学习模型完

成 X 射线辐射场散射辐射修正的研究,在现场校准过程中可根据实际情况输入相关环境参数,直接得到修正后的辐射剂量值,以替代现场采用电离室测量散射辐射,有效减少测量工作量与校准时间。修正流程如图 10 所示,利用 MCNP 蒙特卡罗程序建立典型现场的计算模型,计算散射辐射贡献,并开展实验验证。经验证后的蒙特卡罗计算结果作为机器学习的训练集^[10]。

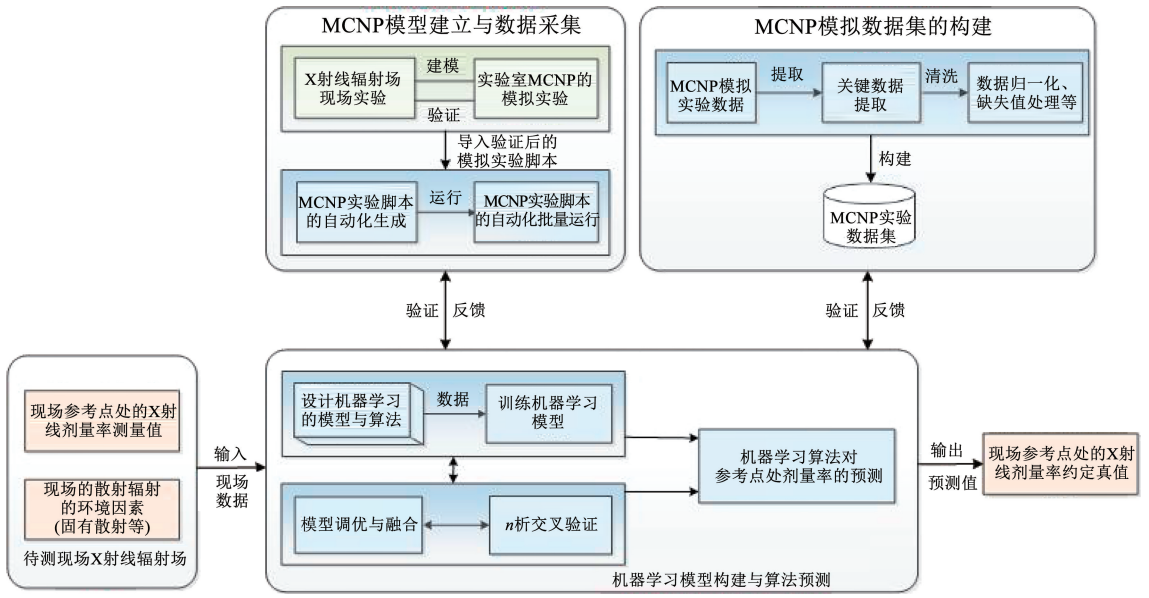


图 10 机器学习预测模型搭建流程示意

Fig. 10 Diagram of machine learning prediction model construction process

3.1 基于便携式 X 射线照射装置的蒙卡计算模型搭建与验证

3.1.1 蒙特卡罗模型建立

基于典型现场校准基本场景条件,利用 MCNP 建立现场环境散射蒙卡计算模型(见图 11),主要包括:X 射线管、屏蔽体、限束光阑以及周围可能会成为散射辐射来源的物体(如墙壁、天花板、地面等)。

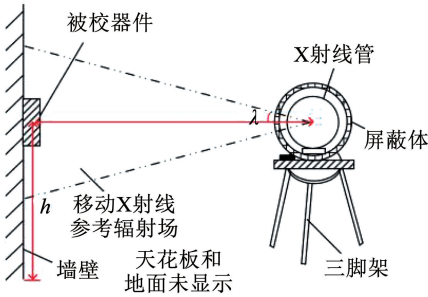


图 11 现场校准基本场景条件

Fig. 11 Basic scene condition of on-site calibration

建立上述的蒙卡模型,粒子源项为带 30° 偏倚的窄谱系列参考辐射注量谱,使用 MCNP 的 F4 计数卡,配合 DE4、DF4 转换系数卡得到探测栅元处的剂量值,将其作为“有环境散射剂量值 D”,再将照射装置周围物体的栅元填充为空气材料,重新得到探测栅元处剂量值,作为“忽略环境散射剂量值 d”^[10],环境散射辐射份额模拟值 k_s 为

$$k_s = \frac{D - d}{D} \times 100\% \quad (1)$$

现场环境散射辐射修正系统可以通过输入相关环境条件参数,从而获得环境散射辐射份额的预测值,从而实现对现场环境散射辐射的修正。

3.1.2 模拟结果验证

对蒙卡模拟结果进行实验验证,实验过程中的环境参量取值情况见表 5。

表 5 环境参量取值情况

Tab. 5 Values of environmental parameters in model verifications

| 序号 | 参量名称及单位 | 基本场景模型验证中各参量的取值情况 | | 说明 |
|----|------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------------------------------------------|
| 1 | X 射线入射角度 $\theta / (^\circ)$ | 0° | | 垂直入射条件下 $\theta = 0^\circ$, 取值范围: $-60^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ |
| 2 | 辐射质类型 | N - 60 ~ N - 200 | | N 系列: N - 60, N - 80, N - 100, N - 120, N - 150, N - 200 |
| 3 | 限束光阑半张角 $\lambda / (^\circ)$ | 5°/8°/10° | | 取值范围: $\lambda = 5^\circ, \lambda = 8^\circ, \lambda = 10^\circ$ |
| 4 | 墙壁材料 m_1 | 混凝土 | | 通常为混凝土 |
| 5 | 地面材料 m_2 | 混凝土 | | 通常为混凝土 |
| 6 | 天花板材料 m_3 | 混凝土 | | 通常为混凝土 |
| 7 | 焦斑 - 检验点距离 L_1 / cm | 96, 150, 200 | | 取值范围: $50 \leq L_1 \leq 200$ |
| 8 | 检验点 - 前方墙壁距离 l / cm | 4.0 | | 取值范围: $5 \leq l \leq 15$ |
| 9 | 焦斑 - 天花板距离 L_2 / cm | 196 | | 取值范围: $100 \leq L_2 \leq 500$ |

表 5(续)

| 序号 | 参量名称及单位 | 基本场景模型验证中各参量的取值情况 | 说明 |
|----|----------------------|-------------------|-------------------------------|
| 10 | 焦斑 - 地面距离 L_3/cm | 150 | 取值范围: $130 \leq L_3 \leq 180$ |
| 11 | 焦斑 - 左侧墙壁距离 L_4/cm | 93 | 取值范围: $50 \leq L_4 \leq 500$ |
| 12 | 焦斑 - 右侧墙壁距离 L_5/cm | 407 | 取值范围: $100 \leq L_5 \leq 500$ |
| 13 | 焦斑 - 后方墙壁距离 L_6/cm | 470 | 取值范围: $50 \leq L_6 \leq 500$ |

环境散射辐射份额的实验值可由如下方法得到:将便携式 X 射线照射装置及传递标准电离室 PTW 32005 放置在实验室中央导轨上(此时周围墙壁距离检验点大于 2 m,可忽略环境散射),配合 UNIDOS E 剂量仪测量得到距离 X 光机焦斑 L_1 处检验点的剂量率,将其记为“忽略环境散射剂量率 d_i ”;再将照射装置及电离室依照现场校准场景布局摆放,得到同距离 L_1 处检验点剂量率,将其记为“有

环境散射剂量率 D_i ”,则可以得到环境散射辐射份额的实验值 k_i 为

$$k_i = \frac{D_i - d_i}{D_i} \times 100\% \quad (2)$$

根据表 5 中各环境参量的取值情况,由上述方法得到不同管电压条件下散射辐射份额实验值 k_i ,并将其与模拟计算环境散射辐射份额 k_s 比较,结果见图 12。

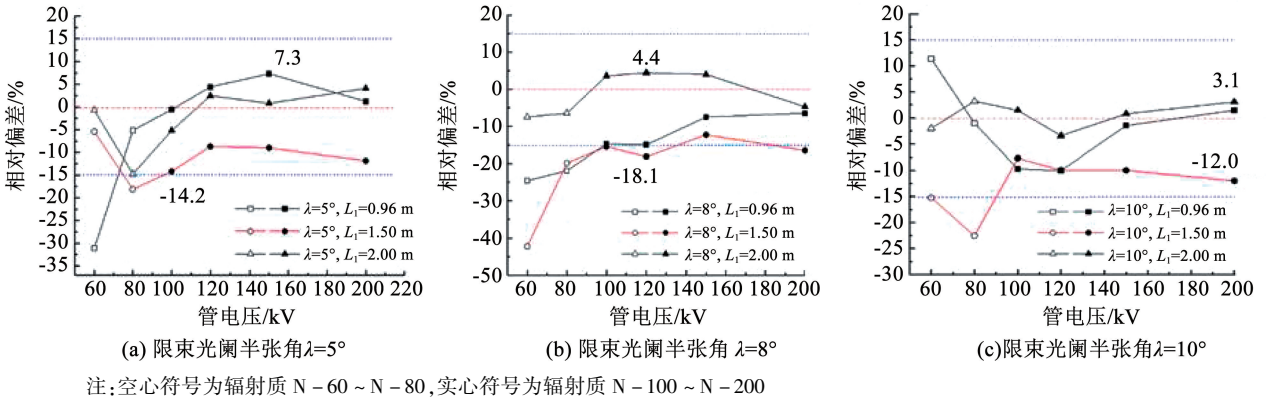


图 12 模拟与实验环境散射辐射份额结果相对偏差

Fig. 12 Relative deviation of proportion of environmental scattering radiation between simulated and experimental

由图 12 可以看出辐射质类型为 N - 60 与 N - 80 时, k_i 的相对偏差较大,因此在固定式 X、 γ 辐射剂量仪的现场校准中,选用 N - 100 ~ N - 200 辐射质得到的结果更为可靠。模拟计算得到的环境散射辐射份额结果与实验结果在辐射质为 N - 100 ~ N - 200 时相对偏差为 -18.1% ~ 7.3%,因此利用此模型为机器学习模型构建提供大量的训练数据与测试数据是可行的。

3.2 基于便携式 X 射线照射装置机器学习模型的建立

3.2.1 MCNP 数据集的构建

由表 5 可知,MCNP 计算模型所涉及的参量个数为 13 个,对其随机组合后在取值范围之内产生的输入文件数目将是巨大的。分析可知,校准源距天花板、地面以及墙壁距离的改变对模拟结果的影响不大,因此在模拟中设置校准源 - 天花板距离 $L_2 = 200$ cm,校准源 - 地面距离 $L_3 = 150$ cm,校准源 - 左

墙距离 $L_4 = 300$ cm,校准源 - 右墙距离 $L_5 = 300$ cm,校准源 - 后墙距离 $L_6 = 400$ cm。图 13 为环境散射 MCNP 计算模型示意图,该模型主要包括:便携式 X 射线照射装置、探测栅元、前后左右四面墙壁、地面及天花板。

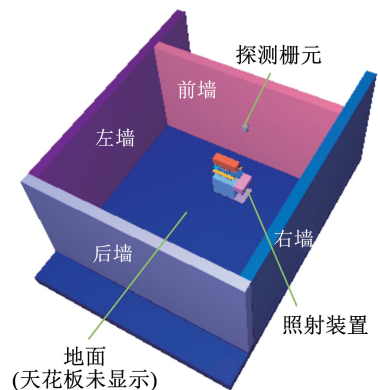


图 13 环境散射 MCNP 计算模型示意

Fig. 13 Schematic diagram of MCNP calculation model for environmental scattering

根据表 5 对其余各参量取值随机组合,可以提供不同辐照条件下环境散射份额数据为 47 868 个。使用 MCNP 脚本运行工具简化运行代码以半自动化批量生成更多输入脚本文件,完成对原始数据输入脚本文件集的生成工作。再通过关键数据提取模块中的提取功能,完成对原始输出脚本文件中关键信息(即空气比释动能和周围剂量当量)的提取工作,根据式(1)计算得到 k_1 (空气比释动能散射辐射份额)与 k_2 (周围剂量当量散射辐射份额),从而完成 MCNP 数据集的构建工作。

3.2.2 机器学习模型构建与算法选择

拟采用机器学习简单模型与集成模型两类模型^[11-14]研究基于便携式 X 射线照射装置的散射辐射修正问题。其中,机器学习简单模型有:支持向量回归(support vector regression, SVR)与决策树回归。机器学习集成模型有:Adaboost(adaptive boosting)模型, Bagging(bootstrap aggregating)模型, GBRT(gradient boosting regression tree)模型和随机森林回归模型。使用表 5 中环境参量组作为机器学习模型的输入特征,参考点处的散射辐射份额作为模型的输出,利用 MCNP 数据集(训练集)对上述 6 种机器学习预测模型进行训练与优化并对模型预测结果进行验证与评价。

3.2.2.1 基于支持向量机的预测模型

SVR 回归是找到一个回归超平面,让一个集合的所有数据到该超平面的距离最近。对于待测 X 射线辐射场中参考点处的散射辐射份额而言,即通过寻找一个带有一定误差允许范围的超平面,实现环境参量组与参考点处的散射辐射份额之间关联关系的拟合过程。利用图 14 所示的 SVR 回归模型构建散射辐射修正模型,预测值和真实值之间的偏离程度 ε 在一个可接受范围时,即可认为预测正确,图 14 中阴影区域的数据点都被认为是预测准确的点。通过计算阴影外的数据点的损失值,最小化预测值与真值的损失值组成的损失函数,即可完成预测函数的拟合过程。

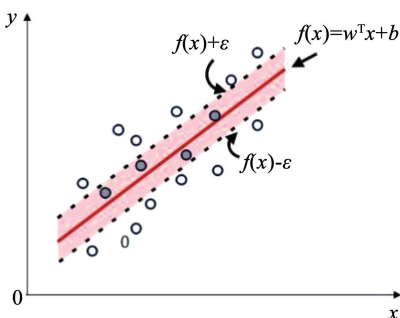


图 14 SVR 回归模型

Fig. 14 SVR regression model

3.2.2.2 基于决策树回归的预测模型

该模型以最小二乘回归树生成算法为基础,将构建的参数变量组作为样本特征空间,采用启发式方法对该样本特征空间进行划分,每次划分逐一考察当前集合中所有特征的所有取值,根据平方误差最小化准则选择其中最优的一个作为切分点。具体步骤如下。

Step1 将训练集中第 j 个特征变量 $x(j)$ 与它的取值 s 作为切分变量和切分点,并定义两个区域 $R_1(j, s) = \{x | x(j) \leq s\}$ 和 $R_2(j, s) = \{x | x(j) > s\}$, 为了找出最优的切分变量 j 与分点 s ,需求解下式:

$$\min_{j,s} \left[\min_{c_1} \sum_{x_i \in R_1(j,s)} (y_i - c_1)^2 + \min_{c_2} \sum_{x_i \in R_2(j,s)} (y_i - c_2)^2 \right] \quad (3)$$

式中: y_i 为第 i 条样本数据中参考点处的散射份额, x 为环境参数组变量, c_1, c_2 为划分后两个区域内固定的输出值。

Step2 用 Step1 中选定的 (j, s) 划分区域并决定相应的输出值为

$$\hat{C}_m = \frac{1}{N_m} \sum_{x_i \in R_m(j,s)} y_i, x \in R_m, m = 1, 2 \quad (4)$$

式中 N_m 为划分区域后区域 m 内的样本个数。

Step3 继续对两个子区域调用 Step1、Step2,直至满足停止条件。

Step4 将输入空间划分为 M 个区域 R_1, R_2, \dots, R_M , 生成决策树 $f(x) = \sum_{m=1}^M \hat{C}_m I(x \in R_m)$, $f(x)$ 即为散射辐射份额与环境参量的数学关系模型。

3.2.2.3 基于集成模型的预测模型

决策树模型的优点在于可解释性和准确性很高,但同时存在过拟合的问题。Adaboost 模型和 Bagging 模型都是在决策树模型的基础上,针对同一个训练集训练 k 个决策树模型,再通过取平均值的方法得到预测结果,可以改善决策树易于过拟合的问题, Bagging 模型特点是各个决策树之间没有依赖关系,可以并行拟合,而 Adaboost 模型的各个决策树模型之间有依赖关系; GBRT 模型是以一棵决策树模型拟合上一棵决策树的误差,通过将所有模型的预测结果相加即为预测值;随机森林模型利用样本随机和属性随机等方式将许多决策树组合成一个森林,每棵树的参数都不同,将每棵树的预测结果取平均值作为最终预测结果。

选取回归模型常用评价指标:平均绝对值误差(mean absolute error, MAE)评价机器学习模型预测效果,其计算公式如下式,平均绝对值误差约接近 0,模型越准确。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |y_i - \hat{y}_i| \quad (5)$$

式中:MAE 为平均绝对值误差, n 为样本数量, y_i 为模拟值, \hat{y}_i 为预测值。

根据表 5 中不同环境参量的取值范围, 随机选取 50 组不同环境参量组验证各个模型在预测空气比释动能率散射辐射份额时的性能表现, 见图 15。图 15 中, 三角形点折线表示预测值, 圆形点折线表示模拟值, 三角形点折线和圆形点折线重合程度越高说明模型性能越好。从图 15 中可以看出, 简单模型如支持向量机回归和决策树相较于集成模型如随机森林模型等而言, 存在对新鲜样本的适应能力不强、准确度不足的问题。在集成模型中, Bagging 模型和 GBRT 模型相较于随机森林模型和 Adaboost 模

型而言, 具有更好性能, 预测值与真实值的偏差更小。4 种集成模型的预测效果相近, 其中, Bagging 模型、随机森林模型相对于 GBRT 模型对 k_1 的预测结果偏差整体保持在 $\pm 5\%$ 以内, Adaboost 算法的预测结果偏差整体保持在 $\pm 10\%$ 以内。以平均绝对值误差作为主要评价指标, GBRT 模型具有最优的性能表现。

为验证机器学习模型的预测效果, 采取不同环境参量组, 在标准实验室中开展了一系列实验验证工作, 以评价结果较好的 GBRT 模型为参考, 由预测的空气比释动能率散射辐射份额反推得到的检验点处剂量率与实测剂量率的相对偏差整体保持在 $\pm 10\%$ 范围内, 满足现场校准的要求。

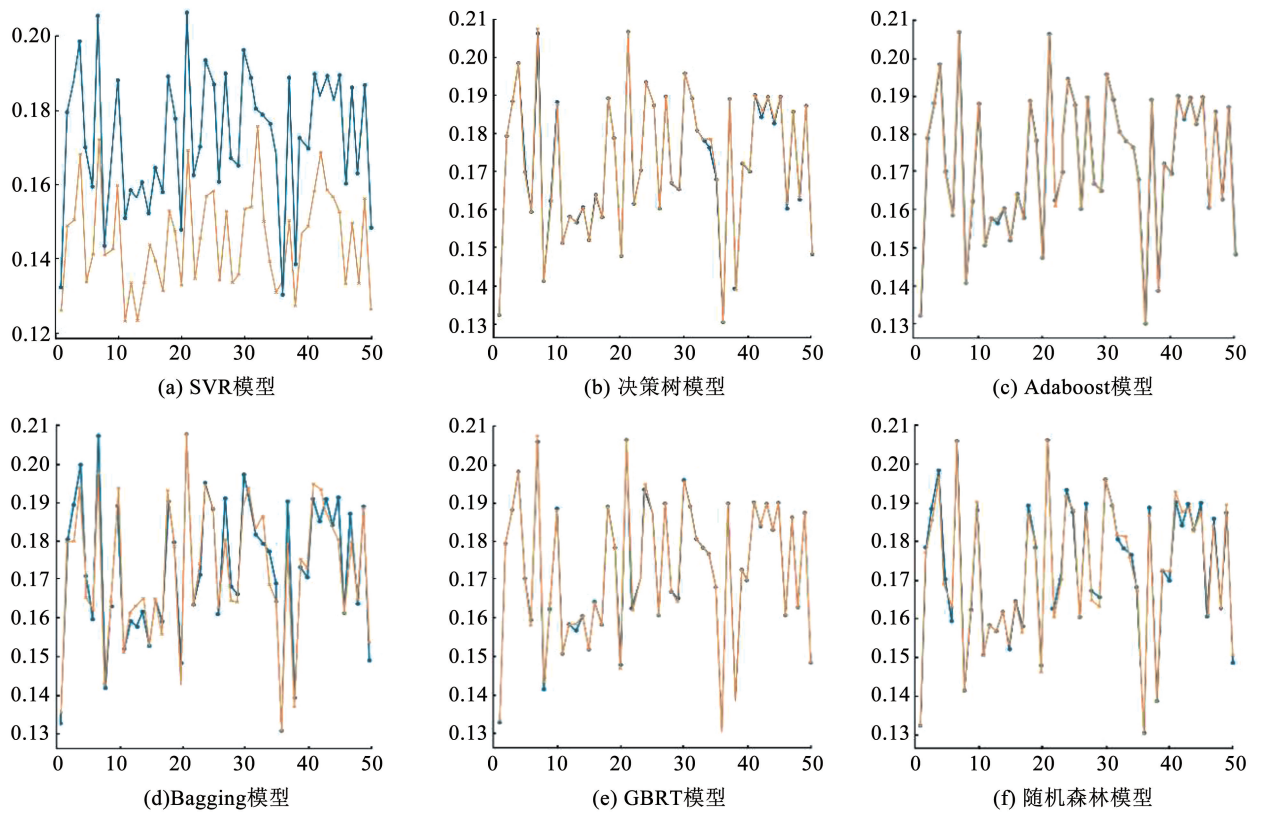


图 15 不同模型对 k_1 的预测性能

Fig. 15 Predictive performance of different models for k_1

3.3 自屏蔽式 X 射线照射装置机器学习模型的建立

在自屏蔽式 X 射线照射装置内, 同一辐射质的散射辐射受到介入场内的探测器尺寸、形状和材料等参数的影响而不同。当不同探测器介入辐射场时, 射线受到扰动致使场内参考点处剂量率约定真值发生改变, 散射谱成分也会发生改变。因此可基于图 3 所建的蒙特卡罗模型, 模拟得到自屏蔽式 X 射线照射装置能谱数据作为机器学习模型的输入特征, 通过对探测器尺寸、形状和材料等参数的组合获

得多组训练数据集。出于对模型预测精度的考虑, 基于误差项对能谱特征进行处理, 通过误差值构造一个可信度系数, 最终使用可信度系数与能谱特征的积作为机器学习模型的输入特征, 参考点处的空气比释动能和周围剂量当量作为模型的输出。

通过组合介入场内的探测器尺寸、形状和材料等参数, 得到 MCNP 原始数据集的训练集数据 3 528 条测试集数据 1 512 条。根据数据集的特征, 为达到更好训练效果, 在基于便携式 X 射线照射装置机器学

习模型的基础上增加神经网络和极端随机树两类模型。神经网络模型是由大量神经元相互连接组成的网络模型,其中神经元之间的连接权重则是可学习的参数,训练过程中将输入数据输入网络模型,计算得到输入结果,并根据网络实际输入和期望输入之间的误差不断修正权重。极端随机树模型与随机森林模型类似,同样由多个决策树模型组成,但极端随机树使用全部样本训练模型,特征同样是随机抽取^[15],且会通过随机的方式得到属性的分裂值,训练效果更好。选用平均绝对值误差作为主要评价指标对训练后的不同机器学习模型进行评价,结果见表 6。

表 6 机器学习模型预测空气比释动能和周围剂量当量的平均绝对值误差比较

Tab. 6 Mean absolute error comparison of air kerma and ambient dose equivalent predicted by machine learning model

| 模型 | 平均绝对值误差 | |
|----------|---------------------------|---------------------------|
| | 空气比释动能/pGy | 周围剂量当量/pSv |
| 支持向量机回归 | $1.468\ 3 \times 10^{-4}$ | $5.313\ 1 \times 10^{-4}$ |
| 决策树 | $3.198\ 5 \times 10^{-4}$ | $3.911\ 5 \times 10^{-4}$ |
| 神经网络 | $1.711\ 1 \times 10^{-3}$ | $2.743\ 1 \times 10^{-3}$ |
| Adaboost | $4.272\ 0 \times 10^{-4}$ | $7.646\ 1 \times 10^{-4}$ |
| Bagging | $1.396\ 2 \times 10^{-3}$ | $5.667\ 1 \times 10^{-3}$ |
| 随机森林 | $2.022\ 8 \times 10^{-4}$ | $3.724\ 7 \times 10^{-4}$ |
| GBRT | $1.291\ 1 \times 10^{-4}$ | $2.038\ 5 \times 10^{-4}$ |
| 极端随机树 | $9.859\ 9 \times 10^{-5}$ | $1.586\ 0 \times 10^{-4}$ |

通过比较不同机器学习模型得到的预测值与模拟值的平均绝对值误差,可以发现使用极端随机树模型的预测效果最好,因此采用极端随机树模型构建现场环境散射辐射修正系统,当以考虑误差项的能谱数据作为输入特征时,误差在 10% 以内,满足现场校准散射辐射修正的要求。

4 辐射防护级 X、 γ 辐射剂量(率)仪现场校准方法研究

在辐射场中检验点处的剂量率已知的前提下,仪器的校准因子 N_1 可由下式得到:

$$N_1 = \frac{\dot{K}_T}{M_1} \quad (6)$$

式中: N_1 为被校仪器的校准因子, M_1 为被校仪器的测量值, \dot{K}_T 为剂量率约定真值。

按下式计算每个点的相对误差 I 为

$$I = \frac{M_1 - \dot{K}_T}{\dot{K}_T} \times 100\% \quad (7)$$

若相对固有误差 I 不超过 $\pm 25\%$,且任何两个 I 之差都不大于 30%,则认为待校仪表的相对固有误差合格。在相同条件下连续测量 20 次,且相邻两次读数的时间间隔应大于等于仪器时间常数的 3 倍^[16]。记录每次测量结果的指示值 M_i 并计算其算术平均值 \bar{M} ,则相对标准偏差 V 为

$$V = \frac{1}{\bar{M}} \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{20} (M_i - \bar{M})^2} \quad (8)$$

若 $V \leq 30\%$ 则认为待校仪器的重复性符合要求。

采用便携式 X 射线照射装置产生的开放型 X 射线参考辐射或自屏蔽式 X 射线照射装置产生的参考辐射对被校仪表的能量响应进行实验。通过调节 X 射线管的高压,并选配不同的附加过滤,可实现不同能量点的校准。根据被校准仪表的测量参数选择相应的传递标准装置,对辐射剂量率的输出进行定值。

选取不同管电压确定仪器对不同能量 X 射线的响应 $R(E)$ 为

$$R(E) = \frac{M_1}{\dot{K}_T} \quad (9)$$

式中: M_1 为被校剂量仪的测量值(已扣除本底), \dot{K}_T 为便携式 X 射线照射装置或自屏蔽式 X 射线照射装置产生的 X 射线参考辐射场参考点处的约定真值。

在现场选择好照射角度以后,通过调整便携式 X 射线装置或固定式 X 射线装置的管电流来获得不同的剂量率对仪表进行校准。调整照射装置的高度 h ,利用激光对准器将待检仪表的检验点放置在辐射场中的参考点上进行照射。将基于机器学习的散射辐射修正模型的预测结果作为待校仪表参考点处的 X 射线剂量率约定真值,由式(6)获得待校仪表的校准因子。

对现场校准进行不确定度分析,并将现场校准结果与实验结果比较,若实验结果与现场校准的结果相对偏差小于 10%,则说明现场校准结果有效。表 7 为使用便携式 X 射线照射装置的现场校准实验结果,可以看出对于 N-100、N-120、N-150 和 N-200 辐射质,基于便携式 X 射线照射装置的现场校准结果是有效的。

表 7 基于便携式 X 射线照射装置现场校准实验结果

Tab. 7 Results of on-site calibration based on portable X-ray irradiation device

| 辐射质 | 平均剂量率/(mSv·h ⁻¹) | 待校仪表校准因子 | 剂量率约定真值/(mSv·h ⁻¹) | 原位剂量率真值/(mSv·h ⁻¹) | 相对偏差/% |
|-------|------------------------------|----------|--------------------------------|--------------------------------|--------|
| N-100 | 2.937 | 0.502 | 1.475 | 1.364 | -7.5 |
| N-120 | 2.362 | 0.604 | 1.426 | 1.343 | -5.8 |
| N-150 | 3.489 | 0.755 | 2.636 | 2.550 | -3.2 |
| N-200 | 2.101 | 0.879 | 1.847 | 1.755 | -5.0 |

选择 1 台 RMS5226 作为待校仪表,将待校准仪表送检,获得校准证书,并开展现场校准实验,将现

场校准因子与证书上的校准因子进行对比,实验结果见表 8。

表 8 基于自屏蔽式 X 射线照射装置现场校准实验结果

Tab. 8 Results of on-site calibration based on self-shielded X-ray irradiation device

| 辐射质 | 修正真值/(mGy·h ⁻¹) | 测量值/(mGy·h ⁻¹) | 现场校准因子 | 证书校准因子 | 相对偏差/% |
|-------|-----------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|
| N-60 | 123.90 | 3.589 6 | 34.50 | 49.90 | 44.7 |
| N-80 | 70.66 | 23.541 0 | 3.00 | 3.05 | 1.7 |
| N-100 | 31.27 | 24.142 0 | 1.30 | 1.22 | 5.4 |
| N-120 | 12.92 | 12.669 0 | 1.02 | 0.98 | -3.3 |

由表 8 可知,对于 N-60 辐射质相对偏差较高,这可能是由于对于低能辐射质,探测器造成的介入散射辐射更加复杂,蒙特卡罗模拟过程中探测器的几何模型可能过于简略,无法精确反映真实情况。对于 N-80、N-100 和 N-120 辐射质,相对偏差不超过 6%,可以满足现场校准的需求。后续若进一步优化蒙特卡罗模型,增加训练集数量,将有可能进一步降低现场校准的偏差。

5 结 论

1) 经测试,便携式 X 射线照射装置剂量率范围为(1×10⁻⁷~10) Gy/h,散射辐射的剂量率不大于总剂量率的 5%,满足 GB/T 12162.1—2000《用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的 X 和 γ 参考辐射 第 1 部分:辐射特性及产生方法》^[5] 相关标准的要求。自屏蔽式 X 射线照射装置剂量率范围为 1~400 mSv/h,满足现场校准所需参考辐射场的要求。

2) 基于机器学习搭建现场校准环境散射辐射修正系统的预测值与实测剂量率的相对偏差整体保持在 ±10% 范围内,满足现场校准的要求。

3) 结合照射装置和次级标准电离室开展了固定式 X、γ 辐射剂量仪现场校准实验,实验结果与现场校准结果的相对偏差在 7.5% 以内,证明了现场校准结果的有效性,为解决固定式 X、γ 辐射剂量仪的现场校准技术需求提供了一种新的方法。

参 考 文 献

- [1] 国家市场监督管理总局. 固定式环境 γ 辐射空气比释动能: JJF 1733—2018[S]. 北京: 中国质检出版社, 2019
State Administration for Market Regulation. Calibration specification for field environmental gamma radiation dose(rate) meters; JJF 1733—2018 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2019
- [2] 高飞. 利用便携式 X 光机开展现场校准工作的可行性研究[J]. 宇航计测技术, 2016, 36(5): 58
GAO Fei. Feasibility study of on-site calibration using portable X machine for fixed X and gamma radiation dose rate meters [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2016, 36(5): 58. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7202.2016.05.013
- [3] 徐阳, 林敏, 高飞, 等. 现场校准用便携式 X 射线照射装置的优化设计及辐射特性研究[J]. 辐射防护, 2021, 41(2): 97
XU Yang, LIN Min, GAO Fei, et al. Optimization design of portable X-ray irradiation device for on-site calibration and study of its radiation characteristics[J]. Radiation Protection, 2021, 41(2): 97
- [4] BHARATI M S S, SOMA V R. Flexible SERS substrates for hazardous materials detection; recent advances[J]. Opto-Electronic Advances, 2021, 4(11): 210048. DOI: 10.29026/oea.2021.210048
- [5] 全国核能标准化技术委员会. 用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的 X 和 γ 参考辐射 第 1 部分: 辐射特性及产生办法: GB/T 12162.1—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000
Nuclear Energy. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy; Part 1: Radiation characteristics and production methods; GB/T 12162.1—2000[S]. Beijing: Standards Press of China, 2000
- [6] 徐阳, 高飞, 肖雪夫, 等. 过滤 X 射线参考辐射场特性的蒙特卡罗模拟研究及实验验证[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(9): 1691
XU Yang, GAO Fei, XIAO Xuefu, et al. Study on characteristic of filtered X ray reference radiation field with Monte Carlo method and

- experimental verification [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(9): 1691. DOI: 10.7538/yzk.2017.51.09.1691
- [7] NAZEMI E, ROKROK B, MOVAFEGHI A, et al. Calculation of airkerma inside the radiation field of X-ray tube [J]. Radiation Measurements, 2019, 124: 79. DOI:10.1016/j.radmeas.2019.03.011
- [8] NAZEMI E, MOVAFEGHI A, ROKROK B, et al. A novel method for predicting pixel value distribution Non-uniformity due to heel effect of X-ray tube in industrial digital radiography using artificial neural network [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2018, 38(1): 3. DOI:10.1007/s10921-018-0542-9
- [9] NAZEMI E, ROSHANI G H, FEHCHI S A H, et al. Optimization of a method for identifying the flow regime and measuring void fraction in a broad beam gamma-ray attenuation technique [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(18): 7438. DOI:10.1016/j.ijhydene.2015.12.098
- [10] 徐阳, 高飞, 韦凯迪, 等. 移动 X 射线参考辐射场的环境散射辐射份额模拟研究[J]. 核技术, 2021, 44(10): 100201-1
XU Yang, GAO Fei, WEI Kaidi, et al. Simulation study on the fraction of environmental scattered radiation in mobile X-ray reference radiation field [J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(10): 100201-1. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.100201
- [11] 王安娜, 袁文静, 王勤万, 等. 一种新的基于 ART 的支持向量机多类分类方法 [J]. 信息与控制, 2007, 36(4): 455
WANG Anna, YUAN Wenjing, WANG Qinwan, et al. A novel ART-based multi-class classification method for SVM [J]. Information and Control, 2007, 36(4): 455. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0411.2007.04.010
- [12] ASGARY S, BAGHBAN A, ZAYERI F, et al. Selection of the best endodontic treatment option using data mining: a decision tree approach [J]. Saudi Endodontic Journal, 2023, 13(1): 44. DOI: 10.4103/sej.sej_97_22
- [13] 谢兆贤, 邹兴敏, 张文静. 大型数据集的高效参数剪枝决策树算法研究 [J/OL]. 计算机工程. <https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0066519>
XIE Zhaoxian, ZOU Xingmin, ZHANG Wenjing. Research on high efficient parametric of pruning decision tree algorithm for large dataset [J/OL]. Computer Engineering. <https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0066519>
- [14] 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述 [J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 2
DING Shifei, QI Bingjuan, TAN Hongyan. An overview on theory and algorithm of support vector machines [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(1): 2. DOI:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.01.001
- [15] ALSWAINA F, ELLEITHY K. Android malware permission-based multi-class classification using extremely randomized trees [J]. IEEE Access, 2018, 6: 76217. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2883975
- [16] 韦应靖, 孟艳俊, 柯海鹏, 等. 国内常见的用于辐射防护监测的 γ 辐射监测仪性能评价 [J]. 辐射防护, 2014, 34(3): 162
WEI Yingjing, MENG Yanjun, KE Haipeng, et al. Performance assessment of gamma-ray monitors for radiation protection monitoring in China [J]. Radiation Protection, 2014, 34(3): 162

(编辑 张红)

(上接第 19 页)

- [26] 傅德彬. 数值仿真及其在航天发射技术中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011
FU Debin. Application of numerical simulation in aerospace launching technology. Beijing: National Defense Industry Press, 2011
- [27] JENSEN D E, JONES G A. Reaction rate coefficients for flame calculations [J]. Combustion and Flame, 1978, 32: 1. DOI:10.1016/0010-2180(78)90078-0
- [28] 张小英, 朱定强, 蔡国飙. 固体火箭羽流中 Al_2O_3 粒子的辐射特性 [J]. 固体火箭技术, 2006, 29(4): 247
ZHANG Xiaoying, ZHU Dingqiang, CAI Guobiao. Radiation characteristics of Al_2O_3 particles in solid rocket plume [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2006, 29(4): 247. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2793.2006.04.004
- [29] 王伟臣, 魏志军, 张峤, 等. 铝粉对固体推进剂羽流红外特性的影响 [J]. 固体火箭技术, 2011, 34(3): 304
WANG Weichen, WEI Zhijun, ZHANG Qiao, et al. Influence of aluminum on infrared signature of exhaust plume from solid propellant [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(3): 304. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2793.2011.03.009
- [30] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory [J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3. DOI:10.1007/BF01061452
- [31] LUDWIG C B, MALKMUS W, REARDON J E, et al. Handbook of infrared radiation from combustion gases: NASA SP-3080 [R]. Washington; Published by NASA, 1973
- [32] REED R A, CALIA V S. Review of aluminum oxide rocket exhaust particles [C]//28th Thermophysics Conference. Reston: AIAA, 2012. DOI: 10.2514/6.1993-2819
- [33] BOHREN C F, HUFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles [M]. New York: Wiley, 1983
- [34] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算: 计算热辐射学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006
TAN Heping, XIA Xinlin, LIU Linhua, et al. Numerical calculation of infrared radiation characteristics and transmission: computational thermal radiation [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006
- [35] 刘连伟. 发动机尾流红外光谱特性分析与图像仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018
LIU Lianwei. Infrared spectral characteristic analysis and image simulation of engine exhaust plume [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018
- [36] RIALLAND V, GUY A, GUEYFFIER D, et al. Infrared signature modelling of a rocket jet plume-comparison with flight measurements [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 676: 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/676/1/012020
- [37] NOAA. US standard atmosphere [M]. Washington; NOAA, 1976

(编辑 张红)