

doi: 10.7690/bgzdh.2022.07.008

插值算法在辐射场重构中的应用现状

王振宇¹, 黄伟奇¹, 孙健², 彭广宇³, 隋吉冰⁴

(1. 陆军防化学院核生化应急技术支持中心, 北京 102205; 2. 陆军防化学院核防护系, 北京 102205;
3. 湖南交通职业技术学院机电工程学院, 长沙 410132; 4. 中国人民解放军 91515 部队, 海南 三亚 572016)

摘要: 针对插值算法影响辐射场分布的问题, 对辐射场重构中的插值算法原理及应用进行梳理总结。介绍网格数据插值、有限元法、反距离权重法、克里金法、径向基函数法和神经网络逼近法等插值方法在辐射场重构中的应用现状, 分析不同插值方法进行辐射场重构时的异同和特点, 对插值算法在辐射场构建中的应用提出进一步展望。结果表明: 插值算法能解决源项信息和环境信息未知情况下的辐射场分布问题, 具有成本低、计算速度快的优势。

关键词: 辐射场重构; 插值算法; 反距离权重; 克里金

中图分类号: TJ99 **文献标志码:** A

Application Status of Interpolation Algorithm in Radiation Field Reconstruction

Wang Zhenyu¹, Huang Weiqi¹, Sun Jian², Peng Guangyu³, Sui Jibing⁴

(1. NBC Emergency Technical Support Center, Institute of NBC Defence, Beijing 102205, China;

2. Department of Nuclear Protection, Institute of NBC Defence, Beijing 102205, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hu'nan Communication Polytechnic, Changsha 410132, China;

4. No. 91515 Unit of PLA, Sanya 572016, China)

Abstract: Aiming at the problem that interpolation algorithm affects the distribution of radiation field, the principle and application of interpolation algorithm in radiation field reconstruction are summarized. The application status of grid data interpolation, finite element method, inverse distance weighting method, Kriging method, radial basis function method and neural network approximation method in radiation field reconstruction is introduced, the similarities and differences and characteristics of different interpolation methods in radiation field reconstruction are analyzed, and the further prospect of interpolation algorithm in radiation field construction is put forward. The results show that the interpolation algorithm can solve the problem of radiation field distribution with unknown source term information and environment information, and has the advantages of low cost and fast calculation speed.

Keywords: radiation field reconstruction; interpolation algorithm; inverse distance weighting; Kriging

0 引言

掌握辐射剂量场分布对实施辐射防护具有重要意义, 因此辐射场重构是辐射防护领域研究的重点。获取辐射剂量场分布的方法主要可分为计算和监测 2 大类, 计算通常有点核积分、蒙特卡罗、离散纵标等方法; 监测通常指部署固定或移动辐射测量设备来获取辐射场数据。在实际应用中, 计算类方法需要充分获取放射源的种类、活度、位置状态及周边环境等信息, 且计算速度较慢; 对未知源辐射场分布的调查多依赖于监测, 弊端是成本太高。插值算法能够在少量辐射场数据的基础上通过数学方法对未知放射源的辐射场分布进行重构, 缺点是结果的精度较计算与监测有所下降, 其优势是能解决源项信息和环境信息未知情况下的辐射场分布问题, 且成本低、计算速度快。研究辐射场插值算法对快速、低成本解决源项和环境信息复杂、不足等情况

下的辐射场分布问题具有重要意义。

1 插值算法的原理与应用

1.1 网格数据插值法

网格数据插值方法主要有线性插值、多项式插值和 Lagrange 插值, 以上方法均可扩展至 2 维双变量的情况。线性插值和多项式插值的双变量扩展分别为双线性插值、双多次插值。双线性插值的核心思想是在 2 个方向分别进行一次线性插值, 而双多次插值则是分别进行多项式插值, 如图 1。

双线性插值表达如下:

$$F(x, y) = (ax + b)(cy + d)。 \quad (1)$$

式中有 4 个待定系数, 利用 E 点所在的网格 4 个顶点 (A 、 B 、 C 、 D) 的数值可得到 4 个方程, 进而求解待定系数, 求得 E 点的数值。

双线性插值的本质是在 X 轴 ($A-B$ 和 $D-C$)、 Y

收稿日期: 2022-03-29; 修回日期: 2022-04-28

作者简介: 王振宇(1996—), 男, 河南人, 硕士, 从事核与辐射安全、辐射防护研究。E-mail: W97rain@163.com。

轴(点 E 的 Y 轴方向)上分别进行线性插值,共进行 3 次线性插值得到 E 点数值。将插值的线性函数换为多项式函数即为双多次插值,如式(2):

$$F(x,y)=(ax^3+bx^2+cx+d)(ey^3+fy^2+gy+h)。(2)$$

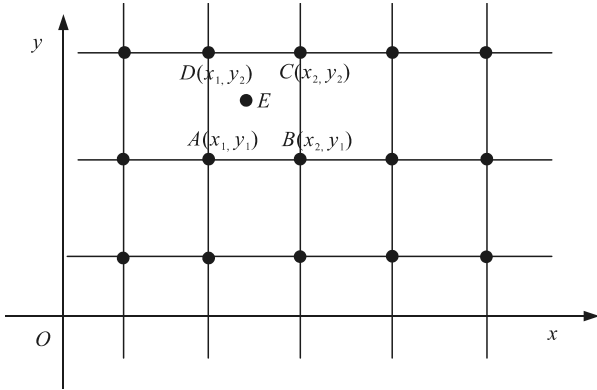


图 1 双线性插值计算

式中有 8 个待定系数,需要选取 8 个已知点求解。

网函数插值法是一种多变元函数的插值法,是单变元函数的 Lagrange 插值算法的自然推广。根据其基函数不同,网函数插值可分为一次插值、二次插值。以 Lagrange 插值算法类推来理解网函数插值算法。一次 Lagrange 插值算法的基函数是直线,二次 Lagrange 插值算法的基函数是二次曲线;同理,一次网函数插值算法的基函数是直面,二次网函数插值算法的基函数是曲面。其核心思想相同,均为构造不同类型的基函数,以基函数组合来构造插值函数,并表现为 2 次局部近似、1 次整体调整误差。网函数插值法与 Lagrange 插值法同样具有公式简单易操作的优点。Lagrange 插值函数和网函数插值函数的基本形式如下:

$$F(x)=F_1(x)+F_2(x)-F_3(x); (3)$$

$$F(x,y)=F_1(x,y)+F_2(x,y)-F_3(x,y)。(4)$$

以 $F(x)$ 、 $F(x,y)$ 来近似插值函数,保留 $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ 在区间端点处比较接近真实数据的部分,用 $F_3(x)$ 在区间上整体调整 $F_1(x)+F_2(x)$ 偏差较大的部分。其中 $F_3(x)$ 是根据 $F_1(x)+F_2(x)$ 在两端点产生的误差作加权平均得到的^[1],即:

$$F_3(x)=\frac{x_1-x}{x_1-x_0}F_2(x_0)-\frac{x-x_0}{x_1-x_0}F_1(x_1)。(5)$$

Ródenas 等^[2]在构建核电厂换料期间辐射场时运用了双线性插值法,数据点位呈 2 m 间隔的网格状分布,计算了 2 个高度平面上的剂量率。结果表明双线性插值法在剂量率突变处的不确定度较高。

Wang Z 等^[3]基于网函数插值提出了一种辐射场重

构方法,其主要步骤有:1) 以网格线上相邻 3 点处的剂量率为基础,进行二次函数 Lagrange 插值,得到网格线上任意点处剂量率;2) 进行网函数插值,得到网格内部任意点处的辐射剂量率。该方法在点源和多体源环境下均有较好的效果,与 MC 模拟辐射场误差分别在 1.91%和 5.47%。

1.2 有限元法

有限元法是借鉴求解微分方程的有限元方法,基本思想是先将一个连续区域离散化为若干有限大小的小单元,然后在每个单元内采用简单函数近似逼近求解函数。 $F_3(x)=(x_1-x)/(x_1-x_0)F_2(x_0)-(x-x_0)/(x_1-x_0)F_1(x_1)$ 有限元法的关键是单元剖分和单元插值。

单元剖分首先解决散乱数据的三角剖分问题,其中最优的三角剖分方法是 Delaunay 三角剖分法,该方法最早由前苏联科学家 Delaunay 提出。Delaunay 三角剖分法有 2 个重要特性:1) 空外接圆性质,每个三角形的外接圆均不包含其他任意点;2) 最大化最小角性质,三角网中每个三角形的角度尽可能最大($\omega_i=(1/r^a)/\sum_{i=1}^n(1/r^a)$),使三角形各边尽量接近等边^[4],其方法有分治法、三角网生长法、逐点插入法。在散乱数据插值中,常因数据点分布不均出现计算量大、误差大等($\omega_i=(1/r^a)/\sum_{i=1}^n(1/r^a)$)现象。Delaunay 三角剖分法可进行离散数据的空间重构,优化网格质量,在解决插值算法中邻近点选择问题上有重要意义。

单元插值是指在有限大小的单元格内部进行插值计算。常用的插值算法有 Clough-Tocher 法、Herron 插值法和最小模网络法(minimum norm network, MNN);此外,也可以采用距离加权的插值方法和以线性函数、多次函数、高斯函数等曲面拟合方法。Clough-Tocher 法属于多项式插值的一种,其插值函数为三次多项式 $f(x,y)=\sum_{j=1}^{3-i}c_{ij}x^i y^j$,即通过一个双自变量的三次多项式构成的三次曲面片对一个三角形的顶点进行插值。为求解该方程,Clough-Tocher 法将一个三角形分为 3 个小三角形,构造出 30 个关系式求解 30 个未知数的方程组。

S. H. Seo 等^[5]计算辐射场剂量率分布时在三角平面中采用了线性插值,即用平面进行单元插值拟合,计算简单但精度不高;谢长记等^[6]在构建 3 维辐射场时采用距离加权的插值方法进行单元插值计

算,即用此方法求得四面体单元各边上的等值点,以连接等值点形成等值面的方法来表示辐射场空间分布,缺点是无法形成连续曲面。

1.3 反距离权重法

反距离权重插值法(inverse distance weighting, IDW)是基于 Tobler 定理(地理第一定律)提出的一种确定性插值方法,其核心思想为插值函数 $Z(x, y)$ 是各数据的线性加权组合,其影响权重与距离相关。最早的 IDW 方法是由地质学家 Shepard 提出的,Shepard 法的数学表达式如下:

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i(x, y); \quad (6)$$

$$\omega_i = (1/r^a) / \sum_{i=1}^n (1/r^a)。 \quad (7)$$

式中: Z_i 为观测点处的数据; ω_i 为权重系数; n 为观测点的个数; r 为待插值点与观测点之间的距离; a 为权重幂数。Shepard 法是全局插值算法,权重系数的计算需要考虑所有的观测点,当其中一个点改变或增减时,所有权重系数均需重新计算;此外 Shepard 法的插值结果只是 C0 连续。针对以上缺点, Franke 和 Nielson 提出了 MQS 法(modified quadratic shepard)^[7], MQS 法对权重系数 ω_i 进行适当调整,使距离大于一定半径 r_w 的权重为零;因此, MQS 法作为局部插值算法避免了 Shepard 法的一些弊端。反距离权重法中最关键的影响因素是权重幂数 a 。当 $a=0$ 时, IDW 法为 k-最近邻法(k-nearest neighbor, KNN),插值函数为最近邻的 k 个点的平均值;当 $a=1$ 时,成为反距离线性法(inverse distance linear, IDL),权重系数与距离成反比;当 $a=2$ 时的应用最多,即反距离平方权重法,权重系数与距离的平方成反比;此外,还存在 $a=3$ 的反距离立方权重法和 $a=4$ 的反距离四次权重法。

仲崇军等^[8]参照美国环保局“Manual of Protective Action for Nuclear Incident”中推荐的确定照射率分布的方法,提出一种快速估算辐射场剂量率场的方法。该方法的假设是烟羽轴线照射率与释放点的距离成正比,即在烟羽轴线上的 IDL 法。该方法可在烟羽轴线上测量一些与释放点距离已知处的照射率来进行计算,但只能计算下风方向烟羽轴线附近某点处的辐射剂量率。李廷等^[9]在基于有限数量监测数据重建海上辐射场时采用 MQS 方法的反距离平方权重计算,权重幂数 $a=2$,邻近网格数量选为 8 个。该方法在 ^{60}Co 点源周围 1 m 范围内剂量率重建中平均偏差小于 1%, 150 个数据输入,

50 个数据输出的时间小于 1 s。刘永阔等^[10]在其发明的核设施退役辐射场剂量分布仿真方法中同样采用权重幂数 $a=2$ 的反距离平方权重插值法,且仅根据插值点邻近的 4 个点的剂量率插值计算。该方法计算较为简单,但需要按照监测点分布网络进行提取样本数据。王磊等^[11]在核电站辐射剂量虚拟仿真时采用一种就近采样与距离比例的插值方法,取待插值点附近 4 个标记点的样本数据进行插值,距离比例权重 $a = \ln(-r_i / \sum_{i=1}^4 r_i)$ 。

为解决插值方法还原的辐射场与真实不一致的弊端,张敏^[12]研究了未知放射源辐射场的重构还原,在反距离平方权重法思想的基础上,提出了辐射剂量值占优构造还原法。该方法主要考虑到了区域内剂量极大值点对附近影响较大的因素,在计算公式上进行了优化。该方法构建的辐射剂量场在放射源附近有明显的凸起,更符合辐射场特征,同时在样本数据稀疏时也能得到较好的结果。刘馨^[13]利用 Delaunay 三角剖分法对辐射剂量值占优构造还原法进行了改进,拓展了在样本数据随机分布情况下的应用,实验完成了医院核医学科房间的辐射场可视化,平均误差为 6.37%,优于同条件下的克里金插值法的 9.87% 平均误差。

1.4 克里金法

克里金法(Kriging)是一种最优线性无偏估计方法,是广义最小二乘回归算法的统称。克里金法与反距离权重法都属于距离加权平均法,插值函数也可以用样本函数的线性加权来表示:

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i(x, y),$$

其主要区别是权重系数 λ_i 的计算方法不同。克里金法也考虑了空间相关性,但权重系数不是根据空间距离直接计算的, λ_i 要满足无偏性条件:

$$E(z' - z_0) = 0; \quad (8)$$

并使估计值的方差最小:

$$\min_{\lambda_i} \text{Var}(z' - z_0); \quad (9)$$

此外半方差函数 r_{ij} 用于表示协方差 $\text{Cov}(z_i, z_j)$:

$$r_{ij} = \sigma^2 - \text{Cov}(z_i, z_j)。 \quad (10)$$

通过拉格朗日法可对上述 2 个约束条件进行求解,得到权重系数:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \\ r_{io} - \sum_{j=1}^n \lambda_j r_{ij} = 0; i = 1, 2, \dots, n \end{cases}。 \quad (11)$$

该方程组求解的关键是半方差函数 r_{ij} ，其等价形式为 $r_{ij}=E[(z_i-z_j)^2]/2$ ， r_{ij} 为 $i、j$ 2 点属性的相似度，空间的相似度则用距离 d_{ij} 表示。克里金法假设 r_{ij} 与 d_{ij} 存在着函数关系，可以将所有的 r 和 d 绘制成散点图，并寻求最优曲线拟合 r 和 d 的关系，得到曲面方程关系式 $r=r(d)$ 称为半方差函数的理论模型。常用的有线性模型、球形模型、指数模型和高斯模型。计算 2 点之间的距离可以根据函数式得到 2 点的半方差，进而得到插值权重和插值函数。根据均值的状态，发展了简单克里金插值、普通克里金插值、泛克里金插值、指示克里金插值、析取克里金插值和协同克里金插值多种方法^[14]。

李华等^[15]对比了克里金插值的线性模型、指数模型、高斯模型和反距离权重法的插值效果，根据点源状态和样本数据点分布设置了 3 种辐射场。结果表明反距离权重法的平均偏差在 15% 以上，而克里金法平均偏差在 10% 以内，多数情况下克里金插值法优于反距离权重法，但在数据极少的区域克里金法的误差较大。克里金法也被用于大范围本底辐射插值计算中，H.H.Paul 等^[16]针对荷兰放射性监测网络开发了自动插补系统。该系统采用全局的普通克里金插值方法，可以对 153 个环境伽马剂量率监测站每 10 min 更新一次的剂量率进行实时插值计算。A.K.Bassam 等^[17]提出了一种高斯过程 (Gaussian Process) 结合克里金法的辐射剂量场绘制方法，主要是利用机器学习中的高斯过程回归模型来解决克里金插值的问题，选择能够自动优化超参数的平方

指数函数为核函数，估算了 D-D 中子发生器实验室附近的总剂量，模型估计值与测量值最大相对误差为 11% 左右，与测量点距离远时误差会显著增加。

Zhao J F 等^[18]认为探测器的计数信号不能完全等同于辐射水平，并假设探测器计数服从期望为真实辐射水平的泊松分布；因此，克里金方法中常用的高斯假设不适用于辐射场数据模型。Zhao J F 采用 Monestiez 等^[19]在生物种群调查中提出的泊松克里金 (Possion Kriging) 方法，在 500×400 m² 的实验区域内获取了 CsI(Tl) 探测器在 ¹³⁷Cs 模拟源辐射场中不同距离的辐射计数率，通过 Possion Kriging 法计算出辐射水平的空间分布，并识别出了异常放射源的位置。

1.5 径向基函数法

径向基函数 (radial basis function, RBF) 插值法是一系列确定性插值法的组合^[20]，其插值曲面须通过每一个样本数据，即： $Fx=y_i, i=1, 2, \dots, N$ 。插值函数表达式为 $Fx = \sum_{i=1}^n \lambda_i \varphi(\|x-x_i\|)$ ，可认为各基函数的线性加权平均，每一个 RBF 对应一个不同的中心 x_i ，权重由近似系数 λ_i 表示。其中 $\varphi(\|x-x_i\|)$ 为 RBF。这是一种取值仅依赖 2 点间距离的实值函数，常见的基函数形式如表 1 所示。RBF 中的基本变量为欧氏距离 $\|x\|$ ，可以通过公式 $\|x-x_i\| = \sqrt{\sum_{m=1}^n (x_m - x_{i,m})^2}$ 求得；利用已有的样本数据 y_i 及其空间位置，可求解出权重系数 λ_i 。

表 1 常见的径向基函数

Linear	Cubic	Gaussian	Multiquadric(MQ)	Inverse Multiquadric(IMQ)	Thin Plate Spline(TPS)	Markoff
$\phi(r)=r$	$\phi(r)=r^3$	$\phi(r)=e^{-c^2r^2}$	$\phi(r)=(r^2+c^2)^{-\nu}$	$\phi(r)=(r^2+c^2)^{-\nu}$	$\phi(r)=r^2 \log(r)$	$\phi(r)=e^{-\phi I}$

RBF 插值分为全局和局部 2 种形式。当样本数据过大时，全局 RBF 插值面临插值矩阵无法解算或求逆困难的问题^[21]，局部 RBF 插值只利用附近的样本数据来构建基函数^[22]，可以避免上述问题。

赛雪^[23]将 Multiquadric 散乱数据插值方法应用于 γ 辐射场空间分布重构中。RBF 插值法的基函数采用多二次函数，插值结果误差为 1.13%，要好于 Spline 插值法。此外，对数据采样进行优化后，相对误差降低了 64.51%^[24]。

1.6 神经网络法

神经网络具有极强的非线性映射能力，可以按一定的智能算法通过相当数量的训练，找出输入与输出的内在联系；因此，大量研究者将神经网络方

法用于空间插值中，且在辐射场重构中也有成功应用。常用的有 BP 神经网络和 RBF 神经网络。

BP 神经网络^[25]是一种基于误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络。BP 神经网络的基本思想是从已知数据中归纳总结，获得内在规律。BP 神经网络的计算过程由正向计算过程和反向计算过程组成，正向传播过程对输入样本进行权值、阈值和传输函数进行运算以得到输出；然后与期望的样本进行比较，若有偏差，则从输出反向传播该偏差，通过修改各神经元的权值、阈值，使得误差趋于最小。

RBF 是径向基函数在神经网络算法中的应用^[26]。RBF 神经网络与 BP 网络相似，但其结构只有输入层、隐层、输出层 3 层。从输入层到隐层通

过径向基函数相连接，其变换是非线性的，而从隐层到输出层变换是线性的。隐层空间采用 RBF 作为隐单元的基，采用输入模式与欧氏距离作为函数自变量，通常将高斯径向基函数作为激活函数。高斯函数是两边衰减且对称的，当样本数据离径向基函数中心越远映射作用越小；RBF 网络属于局部逼近网络，其网络学习收敛速度较 BP 网络快。

广义回归神经网络 (generalized regression neural network, GRNN)^[27] 是 RBF 网络的一种变形形式，增加了求和层对径向基神经元和线性神经元 2 种类型的神经元进行求和，去掉了隐含层与输出层的权值连接。GRNN 比 RBF 更具有优势，样本数据少时，预测的效果也很好。

表 2 不同辐射场插值算法对比

方法	特点	关键因素	适用情景
网格插值法	包括线性、多项式、网函数多种插值方法	数据需按格点分布	网格状分布的样本数据
反距离权重法	影响随距离变化	权重函数、权重幂数、搜索半径	变化较大的散乱数据
克里金法	最佳无偏估计	变异函数	样本数据量大的场景
有限元法	散乱数据规则化	三角网生成方法	散乱数据
径向基函数法	插值函数多样	基函数	非线性数据空间
神经网络法	可迭代学习	大量的训练样本	环境固定大量数据场景

插值算法根据拟合范围可分为整体拟合和局部拟合，整体拟合是对整个空间进行插值计算，利用该区域内的所有样本数据，且样本数据发生增减、变化时需要重新进行拟合曲面计算，属于整体拟合的方法有径向基函数法、Shepard 方法；局部拟合则是对某一范围进行拟合计算，仅需要该范围内的样本数据，该方法更适合数值变化大的情况，有线性插值、多项式插值、有限元插值、克里金法和 MQS 法。整体拟合考虑的数据量大，最优化结果收敛较慢，局部拟合方法受局部异常数据的影响较大。

根据样本数据的分布情况还可以分为规则数据插值和散乱数据插值。规则数据插值方法主要有线性、多项式、拉格朗日和网函数等插值方法，要求样本数据均匀地分布在规则的网格节点上；散乱数据插值方法有克里金法、反距离权重法、有限元法、径向基函数等方法，此类方法对样本数据的分布没有严格要求，但样本数据的分布质量直接影响了插值结果的好坏。有限元法中的三角剖分是连接规则数据插值和散乱数据插值的重要方法，三角剖分可以将散乱数据规则化，进而使用规则数据插值方法。一般情况下规则数据插值的样本数据要求高、插值效果好，适用于具有规则监测网络的重点设施、固定场所的辐射场重构，散乱数据插值方法更适用于

由于剂量率水平受辐射透射、反射、散射等因素影响呈现非线性特点，巴西核能委员会 C. A. M. Antônio 等^[28]在核电厂辐射剂量率分布插值时采用了神经网络方法，工作中采用的是 GRNN。工作期间将测量点精细网格监测的数据作为离线数据，辐射监测仪测量的数据作为在线数据供系统训练。最终该系统针对 3 个感兴趣区域分别建模生成了 3 个插值函数，构建了该区域的辐射剂量率分布。

2 辐射场构建中插值算法的总结与展望

2.1 插值算法的总结

辐射场重构中用到的插值算法种类多。不同的算法原理特点、影响因素和适用条件如表 2 所示。

源项未知、气象及屏蔽等条件不清、应急监测数据难以满足规则格点布局要求的突发性核事故。

2.2 插值算法展望

插值结果的优化。样本数据的分布质量直接影响了辐射场的插值重构结果。考虑到网络状分布样本数据插值的优点，提高散乱数据插值精度可以从样本数据分布入手：1) 均匀性，监测样本数据应尽量覆盖全部感兴趣区域且分布均匀；2) 针对性，通过插值重构结果分析，针对辐射场变化剧烈区域应调整监测方案以获取该区域更多的样本数据。

插值算法的选取。不同的插值算法具有不同的特点和适用范围，进行插值计算时可根据数据分布、环境变化规律等特征选取插值算法。在进行插值计算前可对数据分布类型进行分区，在不同的区域可选取更适合其特征的插值算法。同时可以灵活结合多种插值算法对辐射场分布进行求解，例如采用高斯过程求解克里金问题^[17]，利用 Delaunay 三角剖分改进辐射剂量占优构造还原法^[12]。

误差校准。在源项信息未知时，插值算法是用数学模型来近似表示辐射场物理模型，存在一定的误差。Wang Z 等^[3]在这方面做了一些尝试，采用贝叶斯推断方法对屏蔽体附近区域辐射场分布进行了校准，大大降低了误差。在辐射场插值重构工作的

发展中,采用其他数理方法进行特殊情况下的误差校准会是一个值得关注的研究方向。

插值算法应用场景扩展。在核事故情景中放射性烟云随气象条件进行扩散,辐射场范围大、变化复杂,其辐射场插值需要考虑粒子射程以及动态因素。拓展核事故场景下的应用需要研究大环境辐射场与核设施内部辐射场模型的区别之处,确定核事故大环境条件下辐射场的物理模型、明确边界划分对于插值重构效果具有决定性作用。

3 结束语

在源项信息和环境信息未知情况下,合理地采用插值算法能够快速、低成本地解决辐射场分布问题。在不同辐射环境下,合理地设置辐射监测点、选择插值算法,有望进一步提高插值算法重构辐射场的效果。

参考文献:

- [1] 邱佩璋,陈启宏.网函数插值理论及其应用[M].上海:上海科学技术出版社,2007:12-13.
- [2] RÓDENAS J, ZARZA I, BURGOS M C, et al. Developing a virtual reality application for training nuclear power plant operators: setting up a database containing dose rates in the refuelling plant[J]. Radiation protection dosimetry, 2004, 111(2): 173-180.
- [3] WANG Z, CAI J J. Inversion of radiation field on nuclear facilities: A method based on net function interpolation[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018, 153: 27-34.
- [4] 熊敏詮. Delaunay 三角剖分法在降水量插值中的应用[J]. 气象学报, 2012, 70(6): 1390-1400.
- [5] SEO S H, KIM T K. Study on Interpolation Schemes of the Discrete Ordinates Interpolation Method for Three-Dimensional Radiative Transfer With Nonorthogonal Grids[J]. Journal of Heat Transfer, 1998, 120(4): 1091-1094.
- [6] 谢长记,朱波,陈玉清,等.基于Delaunay三角化方法的三维辐射场可视化研究[J].核动力工程,2011,32(5): 128-132.
- [7] RICHARD F, GREG N. Smooth interpolation of large sets of scattered data[J]. John Wiley & Sons, Ltd, 1980, 15(11): 1691-1704.
- [8] 仲崇军,苟全录,张鹏飞,等.核事故应急情况下快速确定辐射剂量率场的方法及其应用[J].中国核电,2009,2(4): 348-353.
- [9] 李廷,党同强,陈春花,等.海上核动力平台核应急辐射场快速反演[J].核电子学与探测技术,2019,39(4): 426-429.
- [10] 刘永阔,李梦堃,彭敏俊,等.一种核设施退役辐射场剂量分布仿真方法: CN107330187B[P/OL]. [2020-11-03]. <http://210.44.14.81/s/net/cnki/kns/G.https/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=SCPD&dbname=SCPD2020&filename=CN107330187B&v=ehMvH49XKEU5eaWsiFdX4IafsqPhDFaoSIlgfIRZT%25mm2Bb4W3WXRhmRT8sUWP36aZOg>.
- [11] 王磊,刘红冬,陈志,等.核电站操作与辐射剂量的虚拟现实仿真研究[J].计算机工程与应用,2016,52(20): 263-270.
- [12] 张敏.未知放射源辐射场构造与智能随机搜索及其优化研究[D].衡阳:南华大学,2016.
- [13] 刘馨.基于Delaunay三角网的辐射场可视化研究[D].成都:成都理工大学,2020.
- [14] 李海涛,邵泽东.空间插值分析算法综述[J].计算机系统应用,2019,28(7): 1-8.
- [15] 李华,赵原,刘立业,等.基于克里金理论的辐射剂量场插值重构与可视化研究[J].辐射防护,2019,39(6): 475-482.
- [16] PAUL H H, EDZER J P, CHRIS J W T, et al. Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch radioactivity monitoring network[J]. Computers and Geosciences, 2008, 35(8): 1711-1721.
- [17] BASSAM A K, WALID A M. Gaussian process approach for dose mapping in radiation fields[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52(8): 1807-1816.
- [18] ZHAO J F, ZHANG Z, CLAIR J S. Identifying anomalous nuclear radioactive sources using Poisson kriging and mobile sensor networks[J]. PLOS ONE, 2019, 14(5): 1-15.
- [19] MONESTIEZ P, DUBROCA L, BONNIN E, et al. Geostatistical modelling of spatial distribution of Balaenoptera physalus in the Northwestern Mediterranean Sea from sparse count data and heterogeneous observation efforts[J]. Ecological Modelling, 2005, 193(3): 615-628.
- [20] 魏义坤,杨威,刘静.关于径向基函数插值方法及其应用[J].沈阳大学学报,2008,20(1): 7-9.
- [21] RIO Y, BARBA L A, MATTHEW G K. PetRBF—A parallel O(N) algorithm for radial basis function interpolation with Gaussians[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199(25): 1691-1704.
- [22] CASCIOLA G, LAZZARO D, MONTEFUSCO L B, et al. Fast surface reconstruction and hole filling using positive definite radial basis functions[J]. Numerical Algorithms, 2005, 39(1): 289-305.
- [23] 赛雪.基于散乱数据插值方法的 γ 辐射场可视化技术研究[D].绵阳:中国工程物理研究院,2017.
- [24] 赛雪,陈颖,韦孟伏. Multiquadric 散乱数据插值方法在 γ 辐射场可视化中的应用初探[J].核技术,2016,39(10): 51-57.
- [25] 樊振宇. BP神经网络模型与学习算法[J].软件导刊,

2011, 10(7): 66-68.

[26] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 108-110.

[27] 徐富强, 郑婷婷, 方葆青. 基于广义回归神经网络 (GRNN) 的函数逼近[J]. 巢湖学院学报, 2010, 12(6):

(上接第 14 页)

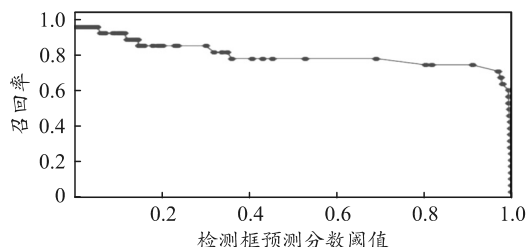


图 7 YOLOv4-tiny+Attention 判定 3、5 号位缺失召回率走势

实验结果表明, 数据增强对目标状态判断精度有一定提升作用, 而添加注意力机制模块后, 判断精度提升较大, 尤其对错误目标的判断准确度提升较多, 表示注意力机制善于捕捉错误目标的细微差异, 减轻背景中螺帽及其他零部件的干扰, 且模型体积较小, 帧率足够; 因此该方案不仅有足够的准确度, 也适合部署在移动终端, 贴合海航维修保障未来发展趋势。

3 结论

笔者首次在照相管理系统中使用目标检测算法, 针对系统实际需要高检测精度和速度的要求, 笔者选择 YOLOv4-tiny 及其改进算法进行了对比研究。实验结果表明, YOLOv4-tiny+Attention 算法符合预期, 在 mAP 值方面的值为 92.95%, 优于 YOLOv4-tiny 算法, 更容易部署在小型移动设备上, 同时提升检测速度。建议在外场手持终端中嵌入 YOLOv4-tiny+Attention 算法, 提高照片对比的效率和准确性, 以减少人工对比工作量。

(上接第 24 页)

[3] 李陆, 郭莉丽, 王克克. “星链”星座的军事应用分析[J]. 中国航天, 2021(5): 37-40.

[4] 方芳, 吴明阁. 全球低轨卫星星座发展研究[J]. 飞航导弹, 2020(5): 88-92, 95.

[5] 纽莉荣, 简晨. 用于互联网卫星监测的相控阵天线研究[J]. 中国无线电, 2021(6): 70-71, 77.

[6] 李强, 顾芳, 韩志军. 卫星互联网产业现状综述[J]. 通信技术, 2020, 53(8): 2059-2063.

[7] LI H H, HUANG Y, CHU J X, et al. Research on

11-16.

[28] ANTÔNIO C A M, CLÁUDIO M N A P, VICTOR G G F, et al. Radiation dose rate map interpolation in nuclear plants using neural networks and virtual reality techniques[J]. Annals of Nuclear Energy, 2010, 38(2): 705-707.

参考文献:

[1] 王晓林, 苏松志, 刘晓颖, 等. 一种基于级联神经网络的飞机检测方法[J]. 智能系统学报, 2020, 15(4): 697-704.

[2] 王婷婷, 苍岩, 毕晓君, 等. 改进的 Faster R-CNN 网络预测尺度参数[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(3): 426-432.

[3] 李维刚, 叶欣, 赵云涛, 等. 基于改进 YOLOv3 算法的带钢表面缺陷检测[J]. 电子学报, 2020, 48(7): 1284-1292.

[4] 曾广森, 俞万能, 王荣杰, 等. 船舶目标重叠下马赛克图像数据增强方法研究[J]. 控制理论与应用, 2021, 10(7): 1-8.

[5] 万卓, 叶明, 刘凯. 基于改进 YOLOv4 的电机端盖缺陷检测[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(3): 79-87.

[6] 刘正波, 鲍义东, 孟庆伟. 基于改进 YOLOv4 的棉花检测算法[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(8): 164-170.

[7] 杨琳, 陈赛旋, 崔国华, 等. 基于改进 YOLOv4 算法的零件识别与定位[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, 10(10): 28-37.

[8] 王国新, 王珂硕. 基于注意力机制的煤矿井下行人检测的轻量化网络结构[J]. 黑龙江科技大学学报, 2021, 11(6): 825-829.

[9] 赵博研, 王强, 王毅, 等. 改进 YOLOv4 算法的 GFRP 内部缺陷检测与识别[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 22(4): 55-62.

[10] 葛青青, 张智杰, 袁琬, 等. 融合环境特征与改进 YOLOv4 的安全帽佩戴检测[J]. 中国图象图形学报, 2021, 12(26): 2904-2916.

Inter-satellite and Satellite-Ground[C]//Communication Based on Multi-beam-Phased-Array Antenna. International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems. Springer, Singapore, 2018.

[8] 谢明聪, 姜兴, 彭麟, 等. 宽频带宽角域扫描的圆极化相控阵线阵设计[J]. 电讯技术, 2020, 60(8): 974-980.

[9] MUNK B, TAYLOR R, DURHARN T, et al. A low-profile broadband phased array antenna[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No. 03CH37450), 2003.