

基于SVM的放射源快速定位技术研究

管弦¹ 魏星¹ 李子锟^{1,2} 樊海军¹ 张济鹏¹ 孙涛¹

1(国民核生化灾害防护国家重点实验室 北京 102205)

2(成都理工大学 地学核技术四川省重点实验室 成都 610059)

摘要 针对丢失放射源快速定位需求,设计了一套NaI(Tl)探测阵列装置,基于阵列探测器间的阴影效应,通过蒙特卡罗模拟软件,获得计数率与入射射线角度之间的变化响应曲线。利用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)方法建立探测阵列计数-入射射线角度预测模型。搭建放射源定位物理实验平台,开展多种条件下的探测阵列-放射源角度响应实验与位置响应实验,并使用计数率-角度响应模型对放射源定位,测试结果表明:¹³⁷Cs点源角度预测平均最大偏差为9.21°,最小偏差为1.77°,该方法可实现对放射源的快速、精确定位。

关键词 放射源快速定位, 支持向量机, 探测阵列, 阴影效应

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090202

Fast localization of radiation sources based on Support Vector Machine

GUAN Xian¹ WEI Xing¹ LI Zikun^{1,2} FAN Haijun¹ ZHANG Jipeng¹ SUN Tao¹

1(State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China)

2(Nuclear Technology Key Laboratory of Earth Science in Sichuan, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract [Background] Lost radioactive sources need to be quickly retrieved, positioning of radioactive source in complex environment is the key to find the lost radioactive source. [Propose] This study aims to develop a novel approach for the rapid positioning of orphan sources using a NaI(Tl) array detection device. [Method] First of all, by leveraging the shadow effect between array detectors, a response curve between gamma-ray incidence angles and counts was obtained through the use of Monte Carlo simulation software. Then, the support vector machine (SVM) method was employed to establish a predictive mathematical model for the counting rate of array detectors as a function of gamma-ray incidence angle, utilizing. Finally, a radioactive source localization physical experiment platform was constructed, and a series of incidence angle response experiments were conducted for the validation of this approach applied to radioactive source localization under varying conditions. [Results] Experimental results demonstrate that, through the use of the SVM regression prediction model, the maximum average deviation of the angle is 9.21° whilst the minimum is 1.77° for the angle prediction of an orphan ¹³⁷Cs point source. [Conclusions] This method can achieve rapid and accurate localization of an orphan radioactive source.

Key words Radioactive source rapid location, Support Vector machine, Array detector, Shadow effect

随着放射源在能源、工业、农业、医疗等领域的广泛应用,辐射安全要求也日益严格,截至2021年,国内生产、销售、使用放射性同位素和射线装置的单

位有92 453家,目前,在用放射源共156 539枚,当年共发生5起辐射事故,其中放射源丢失事故就占3起^[1]。遗失放射源对社会与公众的生命财产安全造

第一作者:管弦,男,1993年出生,2021年于成都理工大学获博士学位,研究领域为核辐射探测

通信作者:孙涛, E-mail: suntao81@qq.com

收稿日期:2022-12-23, 修回日期:2023-05-09

First author: GUAN Xian, male, born in 1993, graduated from Chengdu University of Technology with a doctoral degree in 2021, focusing on nuclear radiation detection

Corresponding author: SUN Tao, E-mail: suntao81@qq.com

Received date: 2022-12-23, revised date: 2023-05-09

成严重威胁,而常见放射源通常较小,发生丢失事故后只能使用辐射探测仪定位。

传统放射源定位方法是通过固定式监测节点或者便携式辐射测量仪遍历待测区域,耗时长且效率低,需要专业人员进入未知辐射水平区域内操作,难以保障工作人员的生命健康安全。目前已有较多放射源快速定位相关研究,张振朝等^[2]设计了一种由NaI、CsI、锗酸铋($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$,BGO)3种晶体与铅耦合组成的 γ 射线方向探测器,利用各晶体性能差异特点,快速确定 γ 射线入射方向。周杨等^[3]设计了一套基于3种NaI(Tl)晶体的 γ 射线源定位阵列系统,通过建立各探测器全能峰占比与入射光子角度间关系函数实现对放射源快速定位。杨静远等^[4]设计了多探测器放射源定位系统,基于核电厂环境监测数据,建立指纹定位方法。Willis等^[5]设计一套四阵列式NaI(Tl)放射源定位装置,估计入射射线角度。Durbin等^[6]使用机器学习算法GLAM,基于“十字形”阵列NaI(Tl)探测器对放射源进行快速定位。Fragkos等^[7]利用小型CZT探测网络,实现了对无屏蔽放射源的精准定位。众多研究成果表明,利用阵列探测器可实现放射源的快速、精准定位。

本文针对快速寻源定位问题,设计了一套NaI(Tl)探测阵列放射源定位装置,利用蒙特卡罗方法,模拟4个探测器计数率随入射射线角度的变化曲线,基于支持向量机SVM(Support Vector Machine)回归拟合获得计数率-角度响应模型,使用模拟数据初步验证模型的有效性,并开展了放射源角度定位与位置定位物理实验,进一步验证了探测装置和定位模型可精准、快速定位放射源位置。

1 探测阵列定位原理

探测阵列放射源定位装置由4个 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的NaI(Tl)闪烁探测器组成,装置结构如图1所示。4个探测器呈“田”字型紧靠排列摆放在水平面上,探测器之间。在放射源定位过程中,源与探测装置的距离通常较远,远大于10倍探测装置尺寸(2 m),此时放射源对探测装置所展开的空间角较小,因此,可近似认为到达探测装置表面的源 γ 射线为平行束^[8-9]。方向为点源到探测装置中心的连线向量,此时各探测器对源射线的响应只与入射角度和能量相关。

为探究入射角度和探测器响应之间的关系,利用蒙特卡罗模拟软件SuperMC,开展平行束入射数值模拟,模拟模型如图2所示。以阵列探测器中心为原点建立直角坐标系,以象限分别对探测器进行编号。为提升采样效率,降低模拟方差,源项设置为

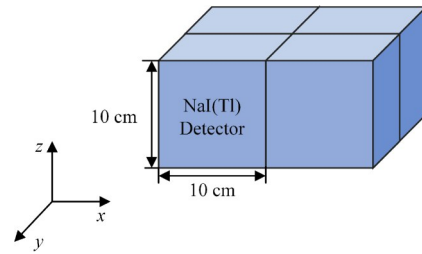


图1 NaI(Tl)探测阵列放射源定位装置结构示意图
Fig.1 Structure diagram of array NaI(Tl) detector device for radiation source location

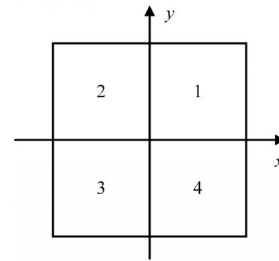


图2 平行束入射蒙特卡罗模拟模型示意图
Fig.2 Diagram of Monte Carlo simulation model with parallel beam γ -ray

半径0.5 m的圆形面源,面源中心与原点间的连线为源平面中心轴法线,连线长度为50 cm,取法线反方向与y轴正方向的夹角为入射射线参考角度 θ ,初级射线为发射角度(θ)的 γ 平行束,模拟能量为0.661 MeV,发射粒子总数为 10^6 个,面源与探测器间为标准大气压空气。图3分别展示了 θ 分别为 60° 和 210° 时, γ 射线在各探测器内的碰撞分布。

从图3中可得出,平行束入射时,4个探测器之间互相屏蔽,当初级 γ 射线入射角度发生变化后, γ 射线在各探测器内发生碰撞概率存在明显变化。可见,4个探测器所测得能谱计数与入射射线角度存在一定关系,因此,模拟入射角度 θ 范围 $[10^\circ\sim 360^\circ]$,每隔 10° 取一发射角,4个探测器的全谱总计数随角度分布如图4所示。

图4纵坐标为模拟各探测器发生能量沉积的光子数,从中可得出,对所有探测器,其在固定角度范围内呈较为平滑的变化趋势,4个探测器的总计数与入射射线角度存在唯一对应关系,且总计数与入射射线角度 θ 呈一定函数关系。但当 θ 变化至 90° 、 180° 、 270° 、 360° 处时,探测器总计数变化趋势发生明显变化,这是由阴影效应所导致,当 θ 处于 $[90^\circ, 180^\circ]$ 范围内,进入1号探测器的部分初级 γ 射线被4号探测器所屏蔽,进入4号探测器的初级射线则没有被屏蔽,而当 θ 处于 $[0^\circ, 90^\circ]$ 范围内时则相反。致使在二维空间内难以通过单个函数描述总计数和入射角度对应关系,为解决这一问题,本文使用支持向量线性回归方法对入射射线角度进行预测。

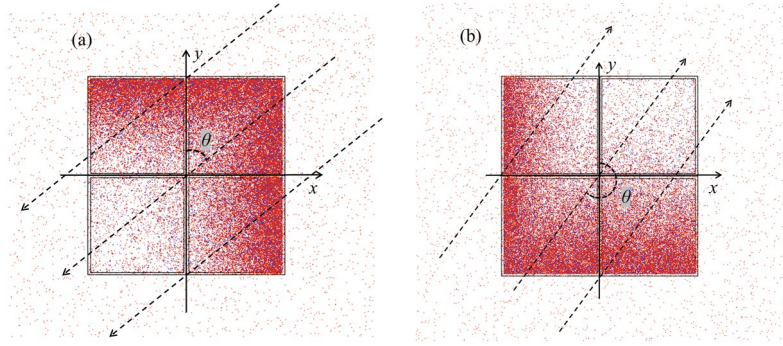


图3 γ 射线在阵列探测器内的碰撞分布 (a) $\theta=60^\circ$, (b) $\theta=210^\circ$
Fig.3 Collision distribution of particles in array detector (a) $\theta=60^\circ$, (b) $\theta=210^\circ$

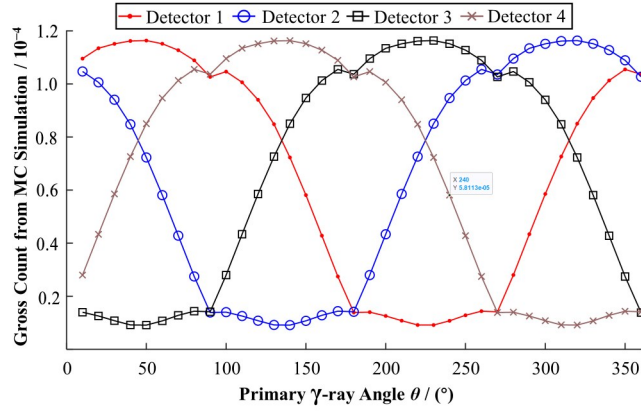


图4 阵列探测器模拟总计数随入射射线角度分布曲线
Fig.4 Distribution curves of MC simulation gross counts with γ -ray incidence angles

2 SVM线性回归原理

2.1 线性回归理论基础

支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 是一种基于统计学习理论的前馈网络学习方法, 其通过核函数, 将数据从原始低维空间映射至高维欧氏空间, 建立超平面带, 在高维空间内实现对数据线性回归, 从而解决非线性回归问题^[10]。

假定现有一组测量数据, 包含各探测器总计数 c 与对应入射射线角度 θ , 以改组数据为训练集, 其如式(1)所示。

$$T = \{(c_1, \theta_1), (c_2, \theta_2), \dots, (c_l, \theta_l)\} \quad (1)$$

$$c_i \in R^4, i = [1, 2, \dots, l]$$

$$\theta_i \in R, i = [1, 2, \dots, l]$$

式中: R 为实数空间; R^4 为四维实数空间, 对应4个探测器计数; l 为测量点数量。

从图4中可看出, 此数据集无法使用线性函数描述输入和输出的对应关系, 因此, 将原始数据映射到高维空间, 具体如式(2)所示^[11]。

$$T_\phi = \left\{ \begin{aligned} &\{(\Phi(c_1), \theta_1), (\Phi(c_2), \theta_2), \dots, (\Phi(c_l), \theta_l))\} \in (H \times 1)^l \\ &\Phi(c_i) \in H \end{aligned} \right. \quad (2)$$

经过映射 $\Phi(x_i)$ 后, 数据集 T_ϕ 在高维空间 H 内为近似线性数据。

给定高维空间的 H 一个超平面, 其表达式为^[11-12]:

$$\begin{cases} f(c_i) = (\omega \cdot \Phi(c_i)) + b \\ \omega \in H \\ b \in R \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω 为权重向量; b 为偏置。将该超平面沿 Y 轴方向上下平移 ε 形成一个超平面带, 使得所有的数据点都被包含在内, 将非线性回归问题转化为凸优化问题, 如式(4)所示^[11-12]。

$$\begin{aligned} \min & \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^l |f(c_i) - \theta_i| \\ \text{s.t.} & f(c_i) - \theta_i \leq \varepsilon + \zeta_i \\ & f(c_i) - \theta_i \geq \varepsilon - \zeta_i \\ & \zeta_i \geq 0 \\ & \zeta_i' \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中:加和为 ε -不敏感训练误差的总和; C 为惩罚因子,用于权衡训练误差和惩罚项 $\|\omega\|^2$; ξ_i 和 ξ'_i 为两个非负松弛变量,其代表允许数据点越过超平面带的程度^[12-13]。

为求解该最优化问题,引入拉格朗日函数,如式(5)所示^[12-13]。

$$J(\omega, \xi_i, \xi'_i, \alpha_i, \alpha'_i, \gamma_i, \gamma'_i) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi'_i) - \sum_{i=1}^l (\gamma_i \xi_i + \gamma'_i \xi'_i) - \sum_{i=1}^l \alpha_i (\omega \cdot \Phi(c_i) + b - f(c_i) + \varepsilon + \xi_i) - \sum_{i=1}^l \alpha'_i (f(c_i) - \omega \cdot \Phi(c_i) - b + \varepsilon + \xi'_i) \quad (5)$$

式(5)中 $\alpha_i, \alpha'_i, \xi_i, \xi'_i$ 为拉格朗日乘子,将上式转化为对偶问题,如式(6)所示^[13]。

$$\begin{aligned} \min_{\alpha_i, \alpha'_i \in \mathbb{R}^2} & \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l (\alpha'_i - \alpha_i) (\alpha'_j - \alpha_j) (\Phi(c_i) \cdot \Phi(c_j)) + \\ & \varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha'_i + \alpha_i) - \sum_{i=1}^l (\alpha'_i - \alpha_i) \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^l (\alpha'_i - \alpha_i) = 0 \\ & 0 \leq \alpha'_i \leq C, i = 1, \dots, l \end{aligned} \quad (6)$$

在 $[0, C]$ 范围内寻得最优解 $\bar{\alpha}'_i$,则凸二次规划问题的最优解如式(7)所示^[14]。

$$\begin{cases} 0 \leq \bar{\alpha}'_i \leq C, \bar{\alpha}'_i \in \mathbb{R} \\ \omega' = \sum_{i=1}^l \bar{\alpha}'_i \theta_i \Phi(c_i) \\ b' = \theta_i - \sum_{i=1}^l (\bar{\alpha}'_i - \bar{\alpha}_i) (\Phi(c_i) \cdot \Phi(c_j)) + \varepsilon \end{cases} \quad (7)$$

角度回归预测函数如式(8)所示。

$$f(c) = \sum_{i=1}^l (\bar{\alpha}'_i - \bar{\alpha}_i) (\Phi(c_i) \cdot \Phi(c_j)) + b' \quad (8)$$

为降低运算维度,使用高斯核函数代替映射内积,则角度回归预测函数如下所示^[14-15]。

$$f(c) = \sum_{i=1}^l (\bar{\alpha}'_i - \bar{\alpha}_i) e^{-\frac{\|c_i - c_j\|^2}{\sigma^2}} + b' \quad (9)$$

2.2 入射角度线性回归预测模型

使用入射角度在 $[10^\circ, 180^\circ]$ 的模拟各探测器总计数作为训练集,采用高斯核函数,使用留一验证法获得最佳核函数参数,建立线性回归模型。

采用各探测器能谱计数占比作为预测模型输入,真实角度作为输出,如式(10)所示:

$$p_i^j = \frac{c_i^j}{\sum_{j=1}^4 c_i^j} \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (10)$$

式(10)中, c_i^j 为第 i 个测量点的 j 号探测器能谱计数。由于阵列探测器的尺寸相对于离源距离较小,可认为在源与探测器的距离远大于探测器尺寸时,各探测器对放射源的张角以及距离一致,此时能谱计数占比只与入射射线角度相关。则计数占比误差为:

$$\Delta p_i = \sqrt{\left(\frac{\sum N_i - N_i}{N_i \cdot \sum N_i} \right)^2 \Delta N_i^2} \quad (11)$$

式中: ΔN 为能谱计数标准误差。

将计数占比与真实角度作为训练集,其表达式如式(12):

$$\begin{cases} T_x = \begin{Bmatrix} p_{1,1}, \dots, p_{1,n} \\ p_{2,1}, \dots, p_{2,n} \\ p_{3,1}, \dots, p_{3,n} \\ p_{4,1}, \dots, p_{4,n} \end{Bmatrix} \\ T_y = \{\theta_1, \dots, \theta_n\}^T \end{cases} \quad (12)$$

式中: n 为训练集内的测量点数量; T_x 为训练集输入,其是由4个探测器能谱计数之比构建的矩阵; T_y 为训练集输出,其是由各测量点对应真实角度组成的列向量。

建立模型过程中,从训练集内随机抽取一个测量点的计数占比 p_i 和真实角度 θ_i 为测试集,用于测试预测模型的输出与真实输出 T_y 间的误差,多次迭代直至达到误差最小,模型公式如式(13)所示:

$$\bar{\theta}_i = \bar{\alpha}_i \exp(-\|T_{x,i} - \mu\|^2 / \sigma^2) + \bar{b} \quad (13)$$

式中: $T_{x,i}$ 为第 i 个测量点4个探测器能谱计数之比组成的列向量; θ 为预测模型输出角度; μ 为高斯核函数参考向量; σ 为高斯核函数参数; $\bar{\alpha}$ 为最优权重向量; \bar{b} 为最优偏置。 $\mu, \sigma, \bar{\alpha}, \bar{b}$ 均通过求解凸优化问题得到^[9]。通过此回归模型即可对射线入射角度进行预测。

使用蒙特卡罗模拟 $[10^\circ \sim 180^\circ]$ 范围内的模拟各探测器总计数能谱计数之比作为训练集获得模型最优参数,在 $[190^\circ \sim 360^\circ]$ 范围内的模拟各探测器能谱计数之比作为测试集,测试入射角度预测模型,测试结果如表1所示。

从表1中可得出,基于SVM角度回归预测模型,最大角度绝对偏差为 2.53° ,平均绝对偏差为 0.52° ,对于模拟数据可精确估计入射射线角度。

表1 MC模拟放射源角度预测结果(190°~360°)
Table 1 Angle predictions of MC simulation radioactive source

实际角度 Actual angle / $^{\circ}$	预测角度 Predicted angle / $^{\circ}$	绝对偏差 Absolute deviation / $^{\circ}$
190	189.41	0.59
200	199.11	0.89
210	209.54	0.46
220	219.91	0.09
230	229.63	0.37
240	239.73	0.27
250	249.83	0.17
260	259.63	0.37
270	269.99	0.01
280	279.73	0.27
290	289.74	0.26
300	299.72	0.28
310	309.78	0.22
320	319.73	0.27
330	329.54	0.46
340	339.25	0.75
350	349.48	0.52
360	362.53	2.53

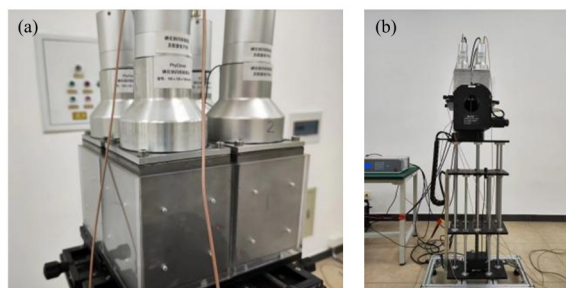


图5 探测器装置实物图
(a) NaI(Tl)阵列探测器, (b) 阵列旋转台
Fig.5 Physical photos of array NaI(Tl) detector radiation source location device
(a) Array NaI(Tl) detector, (b) Array rotation platform

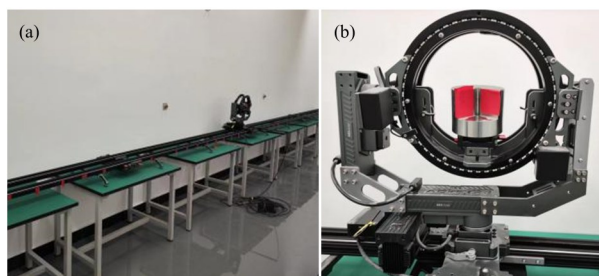


图6 线性轨道实物图
(a) 轨道整体, (b) 放射源托架平台
Fig.6 Physical diagram of linear orbits
(a) Orbits, (b) Radioactive source bracket platform

3 放射源定位物理实验

为验证角度回归预测模型定位效果,开展放射源定位物理实验,探测装置由4个10 cm×10 cm×10 cm的NaI(Tl)探测器阵列组合而成。探测器安装于一旋转平台之上,平台可在水平方向360°旋转,放射源固定在一线性轨道之上,轨道长10 m,可远程操控放射源至轨道任意位置。实验装置实物如图5所示。

3.1 放射源角度响应实验

为获取阵列探测器对入射射线角度的响应关系,开展放射源角度响应实验,源位于轨道中心5 m处,探测器与放射源的连线与轨道垂直,为确保入射射线为平行束,两者直线距离为4 m,调整探测器与源在同一水平面高度,通过旋转平台改变阵列探测器与放射源的相对角度。实验装置摆放以及测量过程如图7所示。

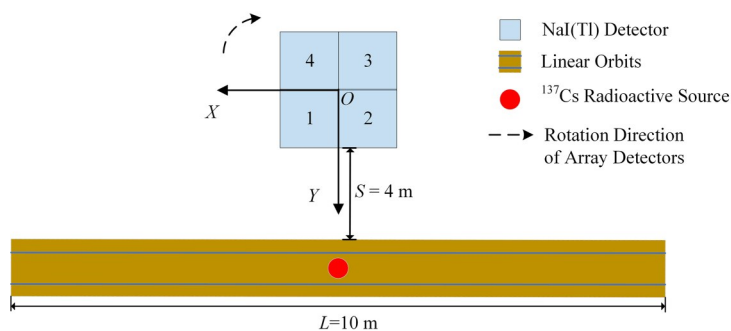


图7 放射源角度响应实验示意图
Fig.7 Diagram of radioactive angle response experiment

实验过程中,记录4个探测器的总计数,单次测量时间为3 min,每次测量完毕后将平台沿逆时针方向旋转10°,图7展示了 $\theta=0^{\circ}$ 时各探测器位置分布。

实验结果如图8所示。

从图8中可得出,实验测得各探测器总计数随入射射线角度的变化趋势与模拟结果基本一致,然

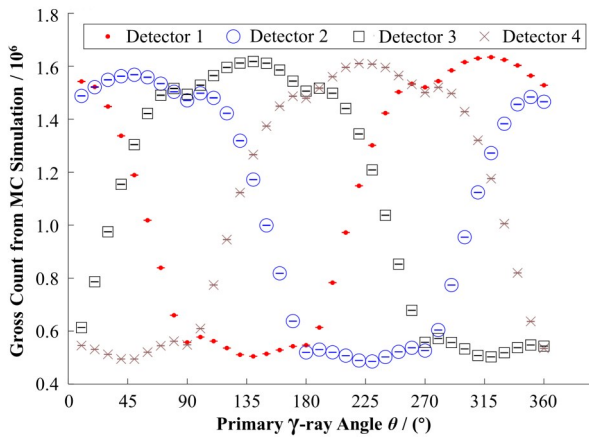


图8 放射源角度响应实验结果
Fig.8 Experiment results of radioactive angle response

而,由于实验测量总计数受放射源活度和放射源离探测器距离影响,难以直接通过探测器能谱总计数建立线性回归预测模型,考虑到辐射事件的独立性,对于固定能量的 γ 平行束,各探测器总计数与所有探测器净计数之和之比与射入探测器的 γ 射线注量无关,因此实验采用的训练集 n 如式(14):

$$n_i = N_i / \sum N_i \quad (14)$$

式中: N_i 为第 i 号探测器的能谱总计数,则 n_i 的误差可表示为:

$$\Delta n_i = \sqrt{\left(\frac{\sum N_i - N_i}{N_i \cdot \sum N_i} \right)^2 \Delta N_i^2} \quad (15)$$

训练集 n 随入射射线角度分布如图9所示。

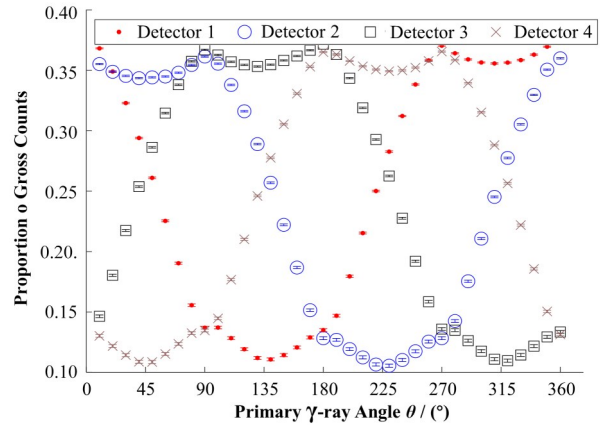


图9 角度响应实验能谱计数占比
Fig.9 Proportions of gross count from energy spectra of radioactive angle response experiment

同样将 $[10^\circ \sim 180^\circ]$ 范围内的实验测得各探测器能谱计数之比和真实角度分别作为训练集输入和输出,获得模型最优参数,并建立角度预测回归模型,在 $[190^\circ \sim 360^\circ]$ 范围内的实验测得各探测器能谱计数之比作为测试集作为测试集输入获得预测角度,结果如表2所示。

表2 角度响应实验角度预测结果
Table 2 Prediction of angle response experiment results

实际角度 Actual angle / $^\circ$	预测角度 Predicted angle / $^\circ$	绝对偏差 Absolute deviation / $^\circ$	实际角度 Actual angle / $^\circ$	预测角度 Predicted angle / $^\circ$	绝对偏差 Absolute deviation / $^\circ$
190	185.40	4.60	280	282.50	2.50
200	195.32	4.68	290	291.94	1.94
210	205.17	4.83	300	300.18	0.18
220	216.04	3.96	310	310.25	0.25
230	225.41	4.59	320	320.46	0.46
240	234.05	5.95	330	329.50	0.50
250	246.48	3.52	340	339.06	0.94
260	257.52	2.48	350	345.07	4.93
270	265.89	4.11	360	353.50	6.50

从表2中可知,角度预测结果最大偏差出现在 360° 处,为 6.5° ,最小偏差出现在 300° 处,为 0.18° ,平均偏差为 3.35° ,表明在源与探测器距离固定情况下,预测模型能较为准确预测入射射线角度。

3.2 放射源位置响应实验

为验证角度预测回归模型是否适用于不同距离下的场景,开展放射源位置响应实验,如图10所示,

实验过程中,以轨道最左端为零点,远程操控 ^{137}Cs 点源从轨道左端起点(20 cm)处,移动至轨道右端终点(940 cm)处至轨道中心处,每隔40 cm取一坐标点进行测量,单次测量时间为3 min,探测器与放射源平行,记录4个探测器的全谱计数,实验过程中分别改变阵列探测器离轨道距离 S ,实验结果如图11所示。

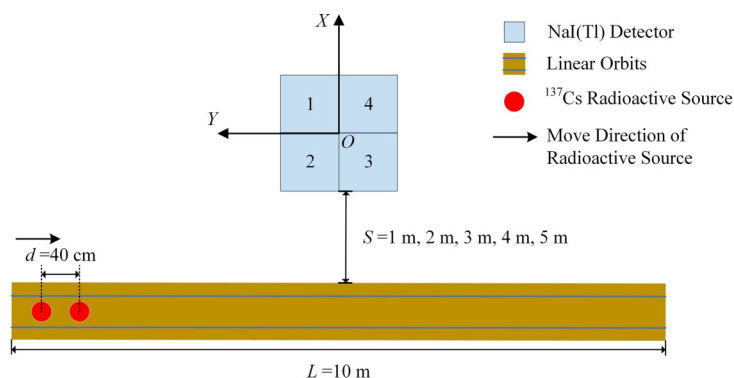


图10 放射源位置响应实验示意图
Fig.10 Diagram of radioactive location response experiment

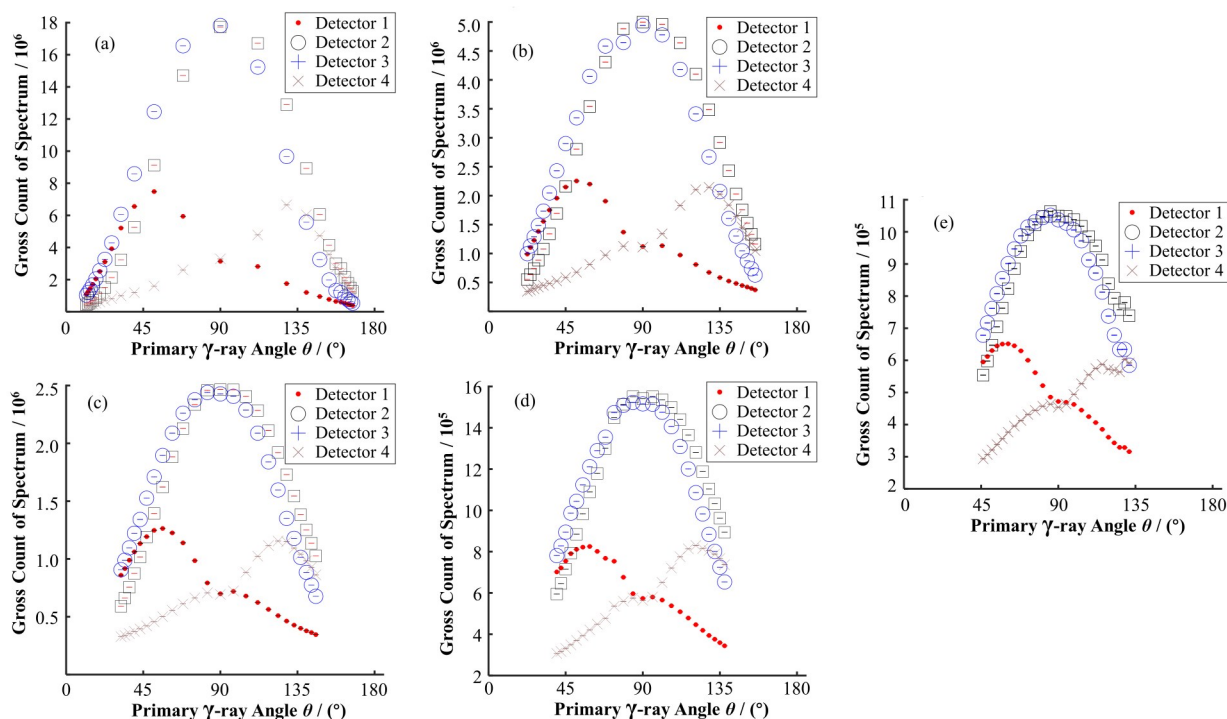


图11 位置响应实验结果 (a) $S=1$ m, (b) $S=2$ m, (c) $S=3$ m, (d) $S=4$ m, (e) $S=5$ m
Fig.11 Results of location response experiment (a) $S=1$ m, (b) $S=2$ m, (c) $S=3$ m, (d) $S=4$ m, (e) $S=5$ m

将位置响应实验结果依照式(14)构建测试集输入,通过模型获得预测角度,各距离实验的角度预测结果如图12。

从图12中可得出,随着探测器离轨道距离增大,角度预测平均偏差也随之降低,这是由于当源距离探测器较近时,点源对探测器的张角较大,此时入射射线不可视为平行束,因此误差较大,当源与探测器距离相对较远时(≥ 3 m),角度预测平均误差低于 3° ,表明平行束入射时,模型能精确预测入射射线角度。

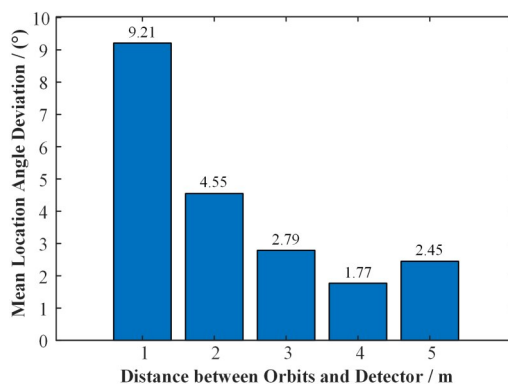


图12 位置响应实验角度预测平均偏差
Fig.12 Predicted mean angle deviation of location response experiment

4 定位影响因素测试

4.1 相对高度影响测试

在实际放射源定位场景中,放射源与定位探测器往往不处于同一水平面,为评估探测器与放射源相对高度差对定位效果的影响,开展探测阵列高度

响应实验,实验过程中,探测阵列与轨道的直线距离调整为4 m,探测阵列中轴线与轨道平行,放射源移动过程与位置响应实验一致,单次测量时间为3 min,通过操纵阵列旋转台,将探测阵列相对轨道的高度分别调至0.3 m、0.4 m、0.5 m、0.6 m,记录各探测器的全谱计数,实验结果如图13所示。

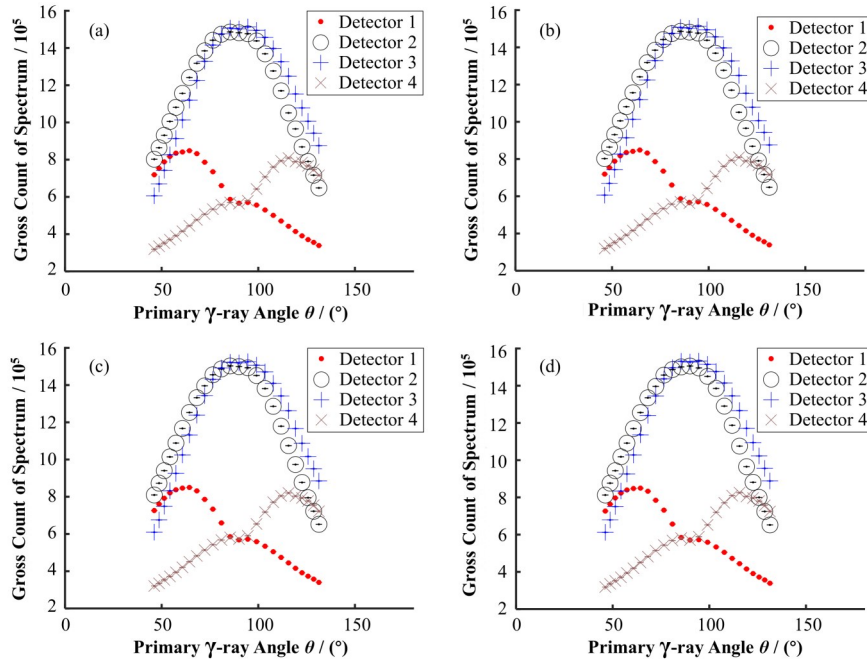


图13 高度响应实验结果 (a) 相对高度0.3 m, (b) 相对高度0.4 m, (c) 相对高度0.5 m, (d) 相对高度0.6 m

Fig.13 Results of relative height response experiment

(a) Relative height 0.3 m, (b) Relative height 0.4 m, (c) Relative height 0.5 m, (d) Relative height 0.6 m

表3 高度响应实验结果

Table 3 Results of relative height response experiment

相对高度 Relative height / m	各测量点探测器全谱计数之和 Sum of the full spectrum counts of each measurement point detector				
	1号 No.1	2号 No.2	3号 No.3	4号 No.4	总和 Total
0.3	14 710 836	27 439 608	27 838 795	13 933 090	83 922 329
0.4	14 710 836	27 439 608	27 838 795	13 933 090	83 922 329
0.5	14 765 717	27 702 879	28 117 655	14 117 337	84 703 588
0.6	14 770 562	27 758 672	28 226 407	14 131 304	84 886 945

从图13和表3中可得出,不同高度下的探测器全谱计数响应曲线未发生明显变化,随着探测器高度提升,虽然探测器与点源距离增大,但各探测器能谱计数反而提升,这可能由于 γ 射线在垂直方向上不同角度入射方形探测器时,探测器对射线束的探测截面积也随之增大,接收到初级射线的数量发生改变,致使对点源探测效率发生改变,导致随探测器高度增高,能谱计数增大。使用角度预测模型对实验数据进行处理,定位平均偏差如图14所示。

从图14中可得出,探测阵列与放射源相对高度为0 m时定位偏差最小,随着相对高度增加偏差逐

渐增大,但变化幅度较小,偏差均小于 5° ,表明在一定相对高度范围内,角度预测模型能够较为精确地对放射源进行定位。

4.2 放射源能量与强度影响测试

在实际定位场景中,考虑到探测器不同活度和不同能量的放射源的探测能力存在一定差异,定位能力必然存在一定不同,为探究对不同能量射线源的定位能力,开展蒙特卡罗模拟,模拟模型与图1中的模型基本相同,分别设置射线能量为:50 keV、100 keV、200 keV、300 keV、500 keV、750 keV、1 000 eV、1 500 keV、2 000 keV、3 000 keV,模拟粒子

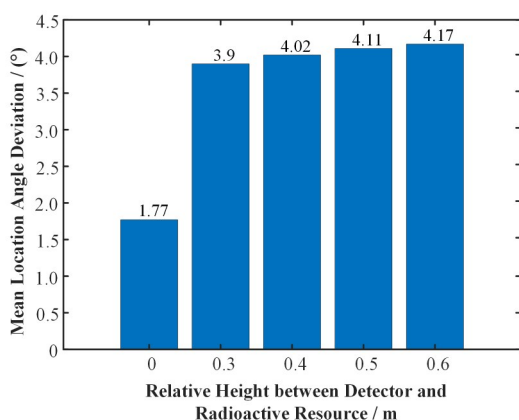


图 14 高度响应实验角度预测平均偏差
Fig.14 Predicted mean angle deviation of relative height response experiment

数为 10^9 个,得到各探测器的归一化全谱计数。使用角度预测模型定位放射源,结果如图 15 所示。

从图 15 中可得出,低能射线源(50~1 000 keV)的定位角度偏差相对较低,最大值为 0.41° ,高能射线源(1 500~3 000 keV)的定位角度偏差相对较高,最大值为 0.77° ,角度偏差整体随能量而增大,这是由于两个方面的原因所导致:一是当射线能量越高,探测器的探测效率越低;二是当射线能量高于 1.022 MeV 后,发生电子对效应产生的逃逸光子有可能进入相邻探测并发生能量沉积,致使响应规律发生变化,但由于本文设计的定位装置晶体体积较大,因此这两个因素对定位结果影响较小,整体定位角度偏差较小。

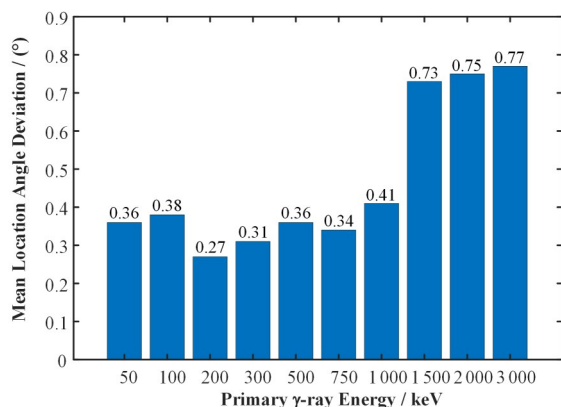


图 15 各能量射线入射角度预测平均偏差
Fig.15 Predicted mean angle deviation with various energy γ -ray

在以上模拟的基础上,探究探测阵列与定位模型可定位不同能量射线源的最小活度。物理实验过程中探测器的本底计数率约为 1 600,重构后不同活度下探测器全谱计数如式(16)所示:

$$N = I \cdot \bar{N} + \text{Poisson}(1\ 600) \quad (16)$$

式中: N 为探测器全谱计数; I 为放射源射线强度; \bar{N} 为模拟归一化全谱计数;Poisson(1 600)为服从泊松分布的本底计数。设置射线强度范围为 $[10^4, 10^{10}]$,使用不同强度下的探测器全谱计数作为输入,获得定位偏差变化规律。图 16 为能量为 50 keV 时定位偏差随射线强度的变化曲线。

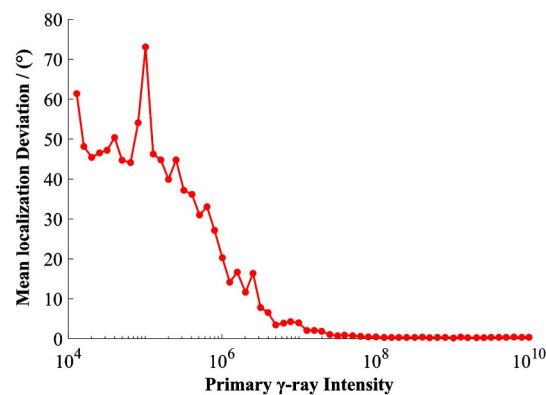


图 16 定位平均偏差随 γ 射线源强度变化
Fig.16 Variation of mean localization deviation with the primary γ -ray intensity

从图 16 中可得出,随着射线强度的增大,定位偏差也逐渐降低,定义定位偏差为 5° 时的射线强度为最小可定位强度,不同能量的最小可定位强度如图 17 所示。

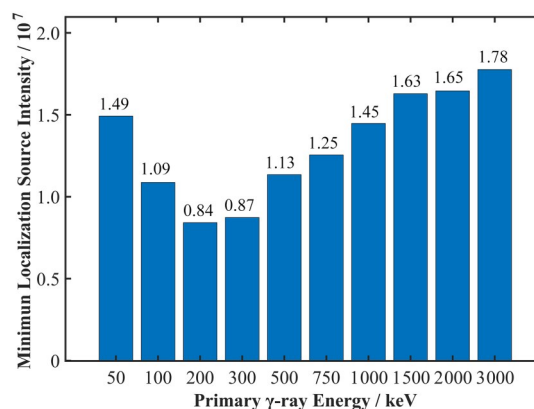


图 17 放射源最小可定位强度
Fig.17 Minimum localizable intensity of radiation source

在探测阵列距离放射源 4 m 时,源强度达到最小可定位强度即可确保射入探测阵列的光子所产生的全谱计数能够实现精准定位,而探测阵列表面的射线强度与源离探测阵列的距离的平方成反比。因此,基于图 17 中最小可定位强度可获得不同距离下的最小可定位强度。

5 结语

针对丢失放射源快速定位问题,提出一种基于

SVM的放射源角度回归预测模型,该模型通过的各探测器能谱计数之比,快速预测放射源与探测器间的相对角度。放射源角度响应实验角度预测结果显示,模型预测角度最大偏差为 6.5° ,最小偏差为 0.18° ,平均偏差为 3.35° ,表明在放射源与探测器距离固定的场景下,回归模型能够准确预测相对角度;放射源位置响应实验角度预测结果显示,随着探测器与放射源的距离增大,平均偏差逐渐降低,最大偏差为 9.21° ,最小偏差为 1.77° ,说明当入射射线越趋近于平行束时,回归模型预测精度越高;通过相对高度测试实验,证明定位模型在一定相对高度差内均可实现对放射源的精准定位;基于不同能量射线入射蒙特卡罗模拟结果,获得了不同能量下的最小可定位放射源强度,该方法可快速、精确预测放射源与阵列探测器的相对角度。

作者贡献声明 管弦负责算法设计、实验数据收集与处理、文章的起草与修订;孙涛负责研究的提出与设计,和文章的最终修订;魏星负责实验方案设计;李子锃负责开展实验与蒙特卡罗模拟;樊海军负责资料调研;张济鹏负责算法实现与测试。

参考文献

- 1 国家核安全局. 中华人民共和国国家核安全局2021年年报[EB/OL]. [2022-06-23]. <https://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqnb/202206/P020220623505600970403.pdf>. National Nuclear Safety Administration. The People's Republic of China National Nuclear Safety Administration 2021 Annual Report[EB/OL]. [2022-06-23]. <https://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqnb/202206/P020220623505600970403.pdf>.
- 2 张振朝, 左国平, 谭军文, 等. 基于三晶体耦合 γ 射线方向探测器的放射源定位[J]. 核技术, 2017, 40(10): 100402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100402. ZHANG Zhenchao, ZUO Guoping, TAN Junwen, *et al.* Locating radioactive source based on three coupled-crystals directional detector of γ rays[J]. Nuclear Techniques, 2017, 40(10): 100402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100402.
- 3 周杨, 赵越, 张振朝, 等. 基于三NaI(Tl)晶体探测器的放射源定位研究[J]. 核技术, 2019, 42(8): 080401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.080401. ZHOU Yang, ZHAO Yue, ZHANG Zhenchao, *et al.* Radiation-source localization based on three NaI(Tl) crystal detectors[J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(8): 080401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.080401.
- 4 杨静远, 金珊, 韩冬傲, 等. 基于指纹定位技术的放射源定位方法研究[J]. 核科学与工程, 2021, 41(6): 1289 - 1296. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2021.06.026. YANG Jingyuan, JIN Shan, HAN Dongao, *et al.* Study on the radioactive source location method based on the fingerprint location technology[J]. Nuclear Science and Engineering, 2021, 41(6): 1289 - 1296. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2021.06.026.
- 5 Willis M J, Skutnik S E, Hall H L. Detection and positioning of radioactive sources using a four-detector response algorithm[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, 767: 445 - 452. DOI: 10.1016/j.nima.2014.08.033.
- 6 Durbin M, Sheatsley R, McDaniel P, *et al.* Experimental tests of Gamma-ray Localization Aided with Machine-learning (GLAM) capabilities[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, 1038: 166905. DOI: 10.1016/j.nima.2022.166905.
- 7 Fragkos G, Karafasoulis K, Kyriakis A, *et al.* Localization of radioactive source using a network of small form factor CZT sensors[J]. Journal of Instrumentation, 2020, 15(4): C04015. DOI: 10.1088/1748-0221/15/04/c04015.
- 8 刘浩杰, 肖宇峰, 张华, 等. 基于改进粒子滤波的未知放射源定位方法[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(11): 2264 - 2272. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0753. LIU Haojie, XIAO Yufeng, ZHANG Hua, *et al.* Location method of radioactive source based on improved particle filtering[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(11): 2264 - 2272. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0753.
- 9 赵娟, 高正明. 基于辐射探测器阵列的单个 γ 源定位方法[J]. 核技术, 2016, 39(1): 010402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.010402. ZHAO Juan, GAO Zhengming. Location method of a single gamma source based on the detectors array[J]. Nuclear Techniques, 2016, 39(1): 010402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.010402.
- 10 Vapnik V N. Estimation of dependences based on empirical data[M]. New York: Springer-Verlag, 1982.
- 11 Vapnik V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer, 1995.
- 12 杜树新, 吴铁军. 用于回归估计的支持向量机方法[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(11): 1580 - 1585, 1633. DOI: 10.3969/j.issn.1004-731X.2003.11.023. DU Shuxin, WU Tiejun. Support vector machines for

- regression[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2003, **15** (11): 1580 - 1585, 1633. DOI: [10.3969/j.issn.1004-731X.2003.11.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-731X.2003.11.023).
- 13 曾杰, 张华. 基于最小二乘支持向量机的风速预测模型[J]. *电网技术*, 2009, **33**(18): 144 - 147.
ZENG Jie, ZHANG Hua. A wind speed forecasting model based on least squares support vector machine[J]. *Power System Technology*, 2009, **33**(18): 144 - 147.
- 14 顾燕萍, 赵文杰, 吴占松. 最小二乘支持向量机鲁棒回归算法研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2015, **55** (4): 396 - 402. DOI: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2015.04.005](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2015.04.005).
GU Yanping, ZHAO Wenjie, WU Zhansong. Investigation of robust least squares-support vector machines[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2015, **55**(4): 396 - 402. DOI: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2015.04.005](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2015.04.005).
- 15 朱家元, 杨云, 张恒喜, 等. 基于优化最小二乘支持向量机的小样本预测研究[J]. *航空学报*, 2004, **25**(6): 565 - 568. DOI: [10.3321/j.issn:1000-6893.2004.06.008](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6893.2004.06.008).
ZHU Jiayuan, YANG Yun, ZHANG Hengxi, *et al.* Data prediction with few observations based on optimized least squares support vector machines[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2004, **25**(6): 565 - 568. DOI: [10.3321/j.issn:1000-6893.2004.06.008](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6893.2004.06.008).