

放射源密度检测低温计数率衰减补偿方法*

尚鹏举 王小鹏

(兰州交通大学电子与信息工程学院 兰州 730070)

摘要:放射源密度检测系统是一种利用放射性同位素进行物质密度测量的仪器。在石油化工、矿业医疗都有应用,原理是放射源信号利用其本身优秀的穿透性,穿过装有物质的密闭管道,被闪烁体和光电倍增管检测到并转换为电压脉冲信号。而化工现场复杂环境会影响系统的工作性能,最明显直观的就是低温影响。相对于系统在标定温度下工作性能,系统在低温环境中输出脉冲计数率发生明显衰减,相对于标定温度 20℃ 时单位时间系统采集脉冲计数,−30℃ 时最多时衰减能达到标定温度的 25%,严重影响测量密度准确性,使系统输出变得不可靠,引发现场工作人员误操作。因此,对系统在低温下的输出进行补偿势在必行,通常根据系统中受温度影响期间来进行相应补偿,如高压模块在低温下输出不稳定,则进行高压补偿,对光电倍增管低温下倍增减少情况进行阈值补偿等,这些补偿方式有效但效果有限,引入基于概率主成分回归模型的温度补偿方法,在不对硬件做改动的情况下,依据收集到的脉冲衰减数据,构建 PPCR 模型,并进行补偿。测试结果表明,低温环境中该补偿方法能够将计数率损失能够控制在 3% 以下,提升了系统在低温环境下的密度检测精度。

关键词: 闪烁体;光电倍增管;温度衰减补偿;概率主成分回归(PPCR);密度检测

中图分类号: TP212.9;TN206

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.40

Low temperature counting rate attenuation compensation method for radiation source density detection

Shang Pengju Wang Xiaopeng

(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The radioactive source density detection system is an instrument that uses radioactive isotopes to measure material density. It has applications in petrochemical, mining, and medical industries. The principle is that the radiation source signal utilizes its excellent penetrability to pass through a sealed pipeline containing substances, be detected by scintillators and photomultiplier tubes, and converted into voltage pulse signals. However, the complex environment of chemical sites can affect the performance of the system, with the most obvious and intuitive being the impact of low temperatures. Compared to the performance of the system at calibration temperature, the output pulse count rate of the system significantly decreases in low-temperature environments, reaching up to 30% at most, resulting in a decrease in measurement density accuracy and even causing misoperation by on-site personnel, making the system output unreliable. This article introduces a temperature compensation method based on probabilistic principal component regression model, analyzes the changes of key detection devices such as scintillators and photomultiplier tubes in the system at low temperatures, collects attenuation data, and constructs a PPCR model without hardware modifications. The maximum expected estimation algorithm is used to estimate the attenuation parameter set of the model and compensate for it. The test results show that this compensation method can control the count rate loss below 3% in low-temperature environments, improving the density detection accuracy of the system in low-temperature environments.

Keywords: scintillator; photomultiplier tube; temperature attenuation compensation; probabilistic principal component regression (PPCR); density detection

0 引言

在化工生产过程中,生化反应对各个物料的密度要求非常严格,一旦出现偏差就会影响产品质量,造成资源浪费。生化反应中经常含有一些特殊产品,如苯酚、甲醛之类有毒液体,为了人身和生产安全,只能在密闭管道中输送,因而在工业上,通常选用穿透性优良的放射源探测器^[1]对其进行监控检测。放射源密度检测系统由放射源、闪烁体、光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)、信号检测电路组成,系统有放射源发出射线,穿过待测物由闪烁体和光电倍增管收集,再由信号检测电路采集单位时间内脉冲计数(pulse count per second, CPS),最终转换为待测物密度。工业现场使用时,为了适配不同的密度情况,要进行一次标定,以保障测量结果的准确性。然而,系统的关键探测器件-闪烁体和光电倍增管工作特性会受温度(主要是低温)影响^[2],致使系统结果出现偏差,与标定温度下计数率相比,系统在-15℃时计数率损失了5%~15%,从而造成计算密度和实际密度不匹配,这会导致现场工作人员的误判,引发误操作,造成损失。

为了获得稳健可靠的校准模型,最常见的方法是将温度视为必须纠正或消除其影响的外部干扰。为此,国内外已经提出了许多校准方案,这些方案按补偿方式可以分为3类。第1类按经验数据模型补偿,通过温度实验建立温度-计数率衰减模型^[3],并根据衰减系数估算补偿系数,这种方法往往因为温度控制问题,常常划分几个温度区间,只对区间端点处温度计算,区间内则进行拟合,该方法对区间内温度补偿误差大,也称为拟合补偿^[4],如文献[5]基于工业相机建立漂移参数补偿模型进行补偿,文献[6]通过逆模型进行校准补偿,文献[7]提出加权时域弯折的温度补偿方法进行补偿,刘晨昊等^[8]研究了主成分回归模型及温度补偿在航空发动机回油管路上的应用;第2类降低固定阈值进行补偿^[9],对相同的系统,设置不同的阈值,进行温度实验,根据系统输出计数率选择衰减较小、效果较好的阈值,但该方法在调低阈值时容易混入噪声,导致系统信噪比降低;第3类是通过提高增益来进行补偿,文献[10]使用霍尔电流传感器电路进行增益方法补偿,在放射源密度检测系统中,提高高压来补偿低温造成的计数率衰减^[11]也是常用方法之一,光电阴极产生光电子经过倍增级产生电流脉冲,现场观察到光电倍增管供电高压会受温度变化而出现波动,因而提高供电电压在低温下的稳定性,也能对衰减进行补偿,但该方法补偿效率较为有限。无论是调整阈值补偿还是提高增益补偿,都是从系统的某一方面进行衰减分析和补偿运算,补偿效果有限。

概率主成分回归模型^[12](probabilistic principal

component regression mode, PPCR)是一种处理多维数据有效方法。Memaeilal等^[13]利用此特性开发一种局部加权半监督概率主成分回归模型,该模型对缺失数据具有鲁棒性,较好的解决了由于模型-对象关系模糊的难题,并通过实例证明该算法的实际适用性;Yuan等^[14]将PPCR方法引入软传感器建模,用来处理数据共线性和随机噪声,并在工业过程中验证该方法的有效性;Sadeghian等^[15]用PPCR预测不可测量或昂贵测量变量的过程变量,并讨论其可行性和有效性。

上述研究充分验证了PPCR方法在模型-对象关系模糊的数据处理方面的优势,但从现有文献来看,用于放射源密度探测仍鲜有报道,需要根据工业现场实际工况,研究其传感器和测量补偿方法并论证其可靠性。本研究将受温度影响的光电倍增管和闪烁体成分作为主成分分析,收集NaI闪烁体和光电倍增管受低温影响时所产生的计数率数据,利用PPCR建模,并推出温度补偿算法,实验测试结果表明,相比于阈值补偿、高压补偿和拟合算法补偿,PPCR对低温下系统输出脉冲计数率衰减有着较好的补偿。

1 衰减原因分析与PPCR建模

1.1 放射源系统及输出衰减原因分析

放射源密度检测是一种微弱光信号探测技术^[16],理论基础是单光子计数技术微弱光信号探测,利用弱光照射下光电倍增管输出电流信号自然离散化的特征,采用了脉冲高度甄别技术和数字计数技术来滤除噪声和采集信号。整个放射源密度检测系统由NaI(Tl)闪烁体、光电倍增管、信号检测电路组成,放射源辐射穿过待测液体,射入闪烁体,闪烁体原子经过激发和退激过程产生可见光,可见光被收集到光电倍增的光阴极,产生光电子,经过光电倍增管打拿级倍增,在阳极输出回路输出信号。

图1是放射源密度检测系统框图,可以看出,系统以单位时间内采集的计数数据作为输出(也成为计数率),则系统输出的非线性衰减受闪烁体输出和光电倍增管输出共同影响。放射源衰变后产生的 γ 射线入射至闪烁体时,产生的次级电子使闪烁体分子电离和激发,退激时发出大量光子。闪烁体发出的光子被闪烁体外的光反射层反射,会聚到光电倍增管的光阴极上。由于光电效应,光子在光阴极上打出光电子。光阴极上打出的光电子在光电倍增管中倍增,电子数目增加几个数量级,最后被阳极接收形成电压脉冲。因此本文认为电压脉冲计数减少有两方面可能,如图2所示。1)光子数量减少导致光电阴极产生的光电子减少,最终使得计数减少,文献[17]讨论了闪烁体的温度依赖性,证明了上述导致光子计数减少的可能性;2)幅值降低,在固定阈值的滤除下,一部分

幅值低于阈值的信号没有被检测记录。

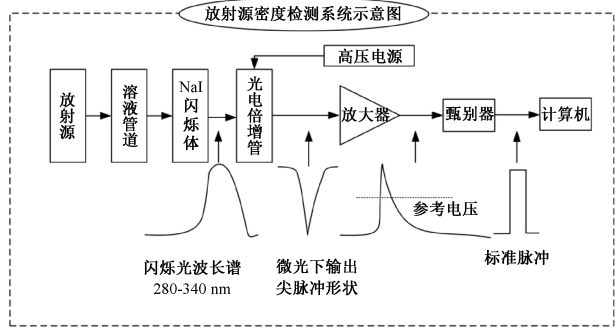


图1 放射源密度检测系统框图
Fig.1 Block diagram of radiation source density detection system

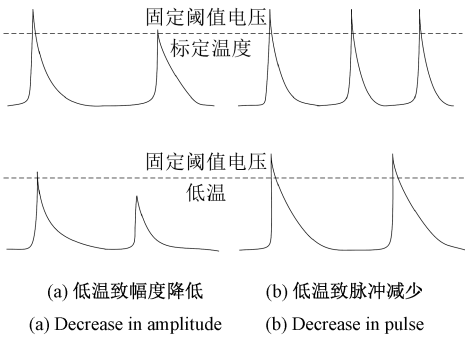


图2 低温下计数率衰减原因分析
Fig.2 Analysis of the reasons for count rate attenuation at low temperature

图2(a)表示相对于标定温度下,低温导致脉冲幅度降低,被固定阈值滤除的情况;图2(b)表明了相对于标定温度下,低温导致闪烁体输出光脉冲能量降低,处于光电阴极不敏感区域,导致光电阴极产生光电子脉冲减少,最终输出脉冲减少情况;光电阴极脉冲数和阈值都会对系统输出造成影响,对系统而言,产生脉冲数的多寡与NaI 闪烁体和光电阴极有密切关系;而阈值影响取决于脉冲幅值的变化,在阈值固定的情况下,脉冲幅值降低会导致系统输出计数率减少,放大器放大倍数不变的情况下,脉冲幅值受光电倍增管打拿级的影响。

NaI 闪烁体是一种常用的闪烁体材料,具有优良的闪烁性能。它由钠离子和碘离子组成,在探测辐射和 γ 射线方面具有很好的性能。NaI 闪烁体的工作原理是当辐射与 NaI 闪烁体发生相互作用时,会激发闪烁效应,产生可被探测和测量的光信号,弱光信号照射到光阴极上时,每个入射的光子以一定的概率(即量子效率)使光阴极发射一个光电子。这个光电子经倍增系统的倍增,在阳极回路中形成一个电流脉冲,即在负载电阻 R_L 立一个

电压脉冲,脉冲的宽度 t_w 于光电倍增管的时间特性和阳极回路的时间常数 $R_L C_0$,其中 C_0 为阳极回路的分布电容和放大器的输入电容之和。

光电倍增管过程是光电阴极发射的电子经倍增级倍增后的电子最终到达阳极,由于入射的光子流是一个一个离散地入射到光电阴极上,则在示波器采集得到波形为一系列分立的脉冲信号,图3 为示波器采集不同温度下的系统脉冲信号波形。

图3(a)展示了 20℃ 时示波器采集脉冲信号,信号幅值高,且伴有闪烁噪声;图3(b)为 10℃ 时脉冲输出,相较于 20℃ 时,脉冲幅度略有降低,噪声被抑制;图3(c)和(d)为-10℃ 和-20℃ 信号,此时信号幅值有了明显降低,信号本身较小的脉冲被固定阈值滤除,导致测得结果与标定结果不一致。

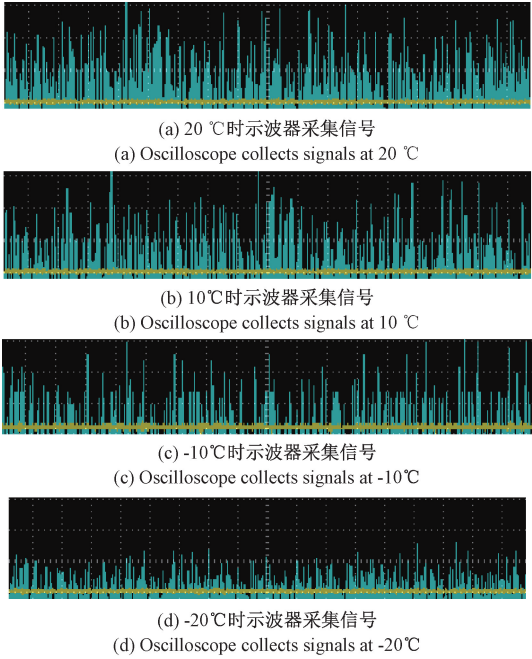


图3 不同温度下系统输出脉冲
Fig.3 System output pulse diagram at different temperatures

在对 NaI(Tl) 光脉冲的测量中,通常认为光脉冲形状取决于 Tl 的掺杂水平,低温会影响光脉冲的幅度值和计数率,这会降低光子的流量,表1 展示了不同温度下,入射光能量相同情况下,随着温度降低,检测到一次光脉冲的时间在增加,这意味着在相同时间内,光流量在减少,也就是脉冲计数率在减少。以-20℃ 为例,相较于 20℃ 时,检测到 1 次光脉冲时间变长了 8.10 μs ,意味着系统输出脉冲少了将近 20%。文献[18] 阐述了一种区分核素并校正闪烁体温度转换效率的算法,并在基于 A9 的数字便携式辐射探测器的闪烁体中实现该算法。

表 1 不同温度下,固定阈值下,检测到 1 次
光脉冲所需的时间平均时间长度

Table 1 Average time required to detect a light pulse at
a fixed threshold at different temperatures

温度/℃	检测到 1 次光脉冲平均时间长度/μs	偏差/μs
20	24.27	-
10	24.45	0.18
0	25.76	1.49
-10	27.97	3.70
-20	32.37	8.10

1.2 PPCR 模型建模

概率主成分模型是一种流行的潜在变量模型^[19],通常以概率方式对数据进行多层降维,Roweis、Tipping 和 Bishop 的最初提出概率模型,把原始数据写成一个变量线性模型的形式,这个变量称为潜在变量。这个模型的目的是找到要分析的主成分,该概率模型是把原始变量表示为潜在变量的线性形式再加上一个高斯噪音,并且假定潜在变量的分布是服从正态分布,随机噪音也是服从正态分布^[20]。

原子核发生衰变后,用探测器对衰变产生的粒子进行探测,只有被探测器接收并能引起计数的事件才为人所感知。假定在某时间间隔内放射源衰变发出的 N 个粒子全部入射到探测器上,探测器对入射粒子的探测效率为,即每个入射粒子引起探测器计数的概率为 ε ,未引起计数的概率为 $(1-\varepsilon)$,这相当于一个伯努利试验。这 N 个入射粒子引起的计数为 n , n 也是一个随机变数,它服从的分布为:

$$P(n | N) = \frac{N!}{(N-n)! n!} \varepsilon^n (1-\varepsilon)^{N-n} \quad (1)$$

假定 N 服从泊松分布:

$$P(N) = \frac{M^N}{N!} e^{-M} \quad (2)$$

式中: M 式入射粒子数 N 的期望值。

由于入射粒子 N 也是随机变量,根据全概率公式,可以推的 n 的概率密度分布为:

$$P(n) = \sum_{N=n}^{\infty} P(n | N) P(N) \quad (3)$$

将式(1)和(2)代入式(3)中,得:

$$P(n) = \frac{(M\varepsilon)^n}{n!} e^{-M\varepsilon} \quad (4)$$

当 n 比较大时,即 $M\varepsilon \gg 1$ 时,式(4)中泊松分布可以表示为高斯分布:

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(n-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

考虑到低温下计数率衰减的原因可能出在闪烁体和光电倍增管两部分,对受现场复杂工业环境下的物理过

程进行建模,闪烁体和光电倍增管为需要的两个主成分。放射源通过衰变释放射线,到达闪烁体激发闪烁体,记 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 为系统的输入数据,用放射源衰变计数率矩阵表示, x_i 为衰变计数率,是放射源每秒发生的衰变次数,其中 n 是不同温度下的样本数, m 是 n 温度下的影响因素数量, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 表示系统的输出数据, y_i 用脉冲计数率表示,脉冲计数率为系统每秒输出的脉冲计数。PPCR 模型公式生成以下方程:

$$x_i = P t_i + e_i \quad (6)$$

$$y_i = C t_i + f_i \quad (7)$$

其中, $P \in \mathbf{R}^{n \times q}$ 和 $C \in \mathbf{R}^{n \times q}$ 是加权矩阵,用于模拟闪烁体和光电倍增管, $t_i \in \mathbf{R}^{q \times 1}$ 属于过程变量,假设 t_i 服从高斯分布, $e_i \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 和 $f_i \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 分别是闪烁体发光噪声和光电倍增管暗计数脉冲噪声,其中 $e_i \sim N(0, \sigma_x^2 \mathbf{I})$, $f_i \sim N(0, \sigma_y^2 \mathbf{I})$, $\mathbf{I}$ 是单位矩阵, σ_x^2 和 σ_y^2 分别是闪烁体和光电倍增管的噪声方差,利用条件独立性,边际概率 $p(x_i, y_i)$ 可以通过对过程变量进行积分来表示。

$$p(x_i, y_i | P, C, \sigma_x^2, \sigma_y^2) = \int p(x_i | t_i, P, \sigma_x^2) p(y_i | t_i, C, \sigma_y^2) dt_i \quad (8)$$

PPCR 是估计未知参数集 $\theta = \{P, C, \sigma_x^2, \sigma_y^2\}$,以模拟系统模型,最典型的方法是通过最大似然估计来估计。

$$L(P, C, \sigma_x^2, \sigma_y^2) = \ln \prod_{i=1}^n p(x_i, y_i | P, C, \sigma_x^2, \sigma_y^2) \quad (9)$$

采用期望最大化算法(expectation maximization, EM)求解式(9)中的优化问题,该算法分为 E 步和 M 步, E 步是期望步,它基于当前的参数估计值来计算隐变量的后验概率分布; M 步是极大步,它根据 E 步得到的后验概率分布来更新模型的参数。在 E 步中,通过数据 x_i 和 y_i 以及过程变量的后验分布 t_i 可以通过贝叶斯规则计算。

$$p(t_i | x_i, y_i, P, C, \sigma_x^2, \sigma_y^2) = \frac{p(x_i | t_i, P, \sigma_x^2) p(y_i | t_i, C, \sigma_y^2) p(t_i)}{\sum_{i=1}^n p(x_i, y_i, P, C, \sigma_x^2, \sigma_y^2)} \quad (10)$$

其中,式(10)右侧的所有项均为高斯项,后验分布(10)的预期均值和方差相关项可由式(11)、(12)推导。

$$E(\hat{t}_i | x_i, y_i, \theta) = (\sigma_x^{-2} P^T P + \sigma_y^{-2} C^T C + \mathbf{I})^{-1} (\sigma_x^{-2} P^T x_i + \sigma_y^{-2} C^T y_i) \quad (11)$$

$$E(\hat{t}_i^T | x_i, y_i, \theta) = (\sigma_x^{-2} P^T P + \sigma_y^{-2} C^T C + \mathbf{I})^{-1} + E(\hat{t}_i | x_i, y_i, \theta) E^T(\hat{t}_i | x_i, y_i, \theta) \quad (12)$$

在 M 步中,通过最大化对数似然估计函数(9)估计参数集 $\theta = \{P, C, \sigma_x^2, \sigma_y^2\}$ 。更新后的参数为:

$$\hat{P} = \left[\sum_{i=1}^n x_i E^T(\hat{t}_i | x_i, y_i, \theta) \right] \left[\sum_{i=1}^n E(\hat{t}_i^T | x_i, y_i, \theta) \right]^{-1} \quad (13)$$

$$\hat{C} = [\sum_{i=1}^n y_i E^T(\hat{t}_i | x_i, y_i, \theta)] [\sum_{i=1}^n E(\hat{t}_i \hat{t}_i^T | x_i, y_i, \theta)]^{-1} \tag{14}$$

$$\hat{\sigma}^2_{2_x} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \left\{ x_i^T x_i - 2E^T(\hat{t} | x_i, y_i, \theta) \hat{P}^T x_i \right. \\ \left. + \text{tr}[E(\hat{t}_i \hat{t}_i^T | x_i, y_i, \theta) \hat{P}^T \hat{P}] \right\} \tag{15}$$

$$\hat{\sigma}^2_{2_y} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \left\{ y_i^T y_i - 2E^T(\hat{t} | x_i, y_i, \theta) \hat{C}^T y_i \right. \\ \left. + \text{tr}[E(\hat{t}_i \hat{t}_i^T | x_i, y_i, \theta) \hat{C}^T \hat{C}] \right\} \tag{16}$$

重复式(10)~(16),通过 EM 算法 E 步与 M 步估计参数集,直到模型参数收敛^[21],得到最优参数集 $\theta = \{P, C, \sigma_x^2, \sigma_y^2\}$ 。

2 温度补偿方法

将放射源密度检测系统分为闪烁体和光电倍增管两部分来考虑温度变化的影响,主要是因为两者对系统脉冲计数输出有着不同方面的影响,闪烁体对脉冲频次起着主要影响,而光电倍增管则对脉冲的幅值影响较大,参数 P 、 C 的最终估计值可以用来描述闪烁体和光电倍增管随温度降低发生的衰减行为, $e_i \int_i$ 则是各温度点下的闪烁体和光电倍增管的噪声信息。

由于 X 、 Y 是关于不同温度点下的计数率信息,所以

表 2 不同位置上,系统在不同温度段输出 CPS 及对应密度值

Table 2 CPS and corresponding density values output by the system at different temperature ranges at different positions							
温度	30 ℃	20 ℃	10 ℃	0 ℃	-10 ℃	-20 ℃	-30 ℃
#1	CPS	5 020	5 017	5 006	4 963	4 915	4 570
	密度	0.928	0.928	0.929	0.953	0.958	1.023
#2	CPS	2 170	2 159	2 150	2 104	2 091	2 046
	密度	0.927	0.928	0.929	0.955	0.975	1.002
#3	CPS	41 090	41 087	40 874	40 377	37 755	32 919
	密度	0.928	0.928	0.930	0.945	1.018	1.071
#4	CPS	43 052	42 992	42 600	42 039	41 050	40 375
	密度	0.928	0.928	0.936	0.948	0.996	1.009
#5	CPS	11 166	11 083	11 075	10 871	9 046	8 164
	密度	0.927	0.928	0.928	0.958	1.031	1.074



图 4 实验系统实物

Fig. 4 Physical picture of the experimental system

P 、 C 内含有温度变化信息,假设 T_0 是标定温度点,则对 $\frac{X}{x_{T_0}}$ 和 $\frac{Y}{y_{T_0}}$ 可以表示出计数相对于标定温度的计数率比例, K_1 、 K_2 为与 X 、 Y 大小相同的全 1 矩阵,则 $W_1 = K_1 - \frac{X}{x_{T_0}}$ 和 $W_2 = K_2 - \frac{Y}{y_{T_0}}$ 表示着计数率衰减,则系统输出温度补偿计数率可以表示为:

$$\hat{y}_i = (C(P^T P)^{-1} P^T (W_1^T x_i - e_i)) W_2 y_i + y_i \tag{17}$$

3 实验测试结果

实验室用恒温箱做多组温度实验,获取放射源密度检测系统输出脉冲计数率随温度变化数据,用 Cs137 当放射源,固定在铅罐内,放射源密度检测系统置于防爆桶并固定在恒温箱箱中,待测液体为酒精浓度 40% 的混合溶液,密度理论值为 0.928 g/cm³。由于放射源射线强度与所处位置有很大关系,因此选取 5 个不同位置,且在 20 ℃ 时每个位置做一次初始化标定,以匹配相应的放射源强度,为了确定温度对每个位置的系统计数率输出影响趋势是否具有 consistency,统一放置在恒温箱中,设置标定时温度 20 ℃,温度范围从 30 ℃ ~ -30 ℃,间隔为 10 ℃,每个温度点保持 30 min 以确保恒温箱内部热平衡,甄别器阈值设置为 8 V,实物图如图 4 所示。

图 5 展示了 5 个不同的探测器位置,防止在温度实验过程中发生位置偏移,而导致系统输出计数率发生变化,避免偶然实验现象的发生,相同温度实验做 3 次,从表 2 为不同位置上,系统在不同温度段输出计数率 3 次温度实验均值,可以看出衰减情况普遍存在,且趋势大体相同。由表 2 可以看出,温度变化对输出计数率和检测结果密度值影响很大,在 20 ℃ 以上温度段内,系统输出 CPS 稳定,检测密度误差较小,随着温度逐步降低,CPS 出现衰减,检测密度出现偏差,系统检测精度下降。为了能够更直观观测到低温下 CPS 衰减趋势,作出温度变化下 CPS 相对于标定温度(20 ℃)的变化率与温度的散点

图,图 6 可以明显观察到,系统输出计数随着温度的降低有明显的非线性衰减,在温度为 0 ℃ 时计数率损失为 3%~5%,当温度降低到-20 ℃ 时计数率损失达到了 10%~25%,同时也注意到,#1 和#2 的计数率损失在 6%~9%,而#3、#4 和#5 损失达到了 15%~25%。

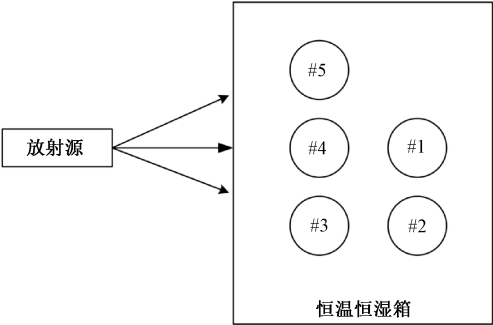


图 5 #1~#5 位置示意图
Fig. 5 #1~#5 position diagram

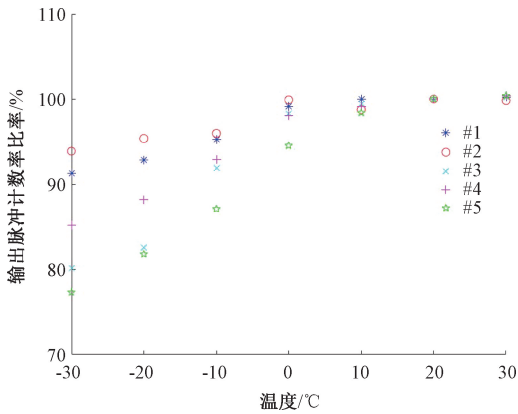


图 6 不同位置上和温度变化下系统输出计数率相对于标定温度(20 ℃)的变化率

Fig. 6 The rate of change of the system output count rate relative to the calibration temperature (20 ℃) at different positions and temperature changes

为了确定该计数率只与位置有关,还是因为温度降低,放射源密度检测系统中的信号检测电路性能下降引起的;本研究设计了实验去验证。首先,选定衰减最小的#2 和衰减最大的#5,将#2 和#5 依次固定到#1~#5 的位置上,做完整温度实验,即将标定温度设为 20 ℃,控制恒温箱将温度从 30 ℃ 降到-30 ℃,每 10 ℃ 设置一个温度点,记录每个温度点系统计数率。

表 3 为#2 和#5 在标定温度下不同位置的计数率,可以看出计数率跟位置有关系,当距离相同时,处于放射源直射方向上的系统输出计数率几乎是两侧位置的 1 倍,而在同一照射方向上,离放射源越近,系统输出计数率越高。

表 3 标定温度下,#2 和#5 在不同位置下的计数率
Table 3 Count rates of # 2 and # 5 at different positions under calibrated temperature

位号	#1 位置	#2 位置	#3 位置	#4 位置	#5 位置
#2	5 065	2 159	41 141	42 292	11 083
#5	5 017	2 177	41 092	43 052	11 118

其次,在放射源直射方向上,在放射源位置 10、15、20、30 cm 处设置固定系统点,选择#1 系统作为测量样品,在每个固定位置做温度测试,不同距离下,不同温度计数率与标定温度下计数率比值变化情况如图 7 所示,可以看出,离放射源 10 cm 处时,计数率衰减随温度变化更加剧烈,在-30 ℃ 时衰减接近 30%,而离放射源比较远的位置,如 30、15 cm 处反而衰减更小,可以确定,在温度下降的过程中,出现的计数率衰减程度不同,不是由信号检测电路引起的,而是跟固定位置有关。

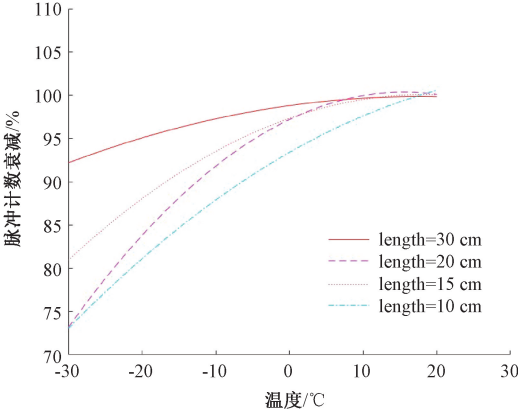


图 7 不同距离下#1 输出计数率随温度的变化情况
Fig. 7 Variation of # 1 output count rate with temperature at different distances

高压补偿和阈值补偿通过改进硬件电路的方式进行补偿,阈值补偿是通过调整比较器的参考路信号,进行有规律的上下调整,使得通过比较器的信号在温度变化下保持稳定;高压补偿是增加反馈电路以获取当前的高压值,经过与期望值比较后,自适应的调整控制值,拟合补偿通常利用数据分析衰减,并使用插值算法补偿。

与高压补偿和阈值相比,PPCR 补偿模型在不改变原有电路的基础,通过先验经验和数据在软件层面建模补偿,与拟合补偿相比,PPCR 模型充分考虑过程变量带来的影响,模型更加精确。分别采用阈值补偿,高压补偿,拟合补偿和 PPCR 补偿模型进行上述实验,结果对比如图 8 所示,可以看出,相对于未补偿的衰减程度,每个补偿方法都有补偿效果。虽然高压补偿对温度引发计数率衰减在-30 ℃ 时提升了将近 18%,但是补偿效果有限;阈值补偿和拟合补偿都有明显补偿,但是阈值补偿会引

进噪声,导致补偿过度;而 PPCR 模型下衰减补偿则时补偿最优的,-30℃时补偿后计数率能维持在标定温度计数率的3%内波动。将每个补偿方法结果转化位密度变化曲线,如图8所示,可以看出,将较于未补偿时的检测密度变化曲线,各方法都有着补偿效果,而 PPCR 补偿方法则更接近于标准值。

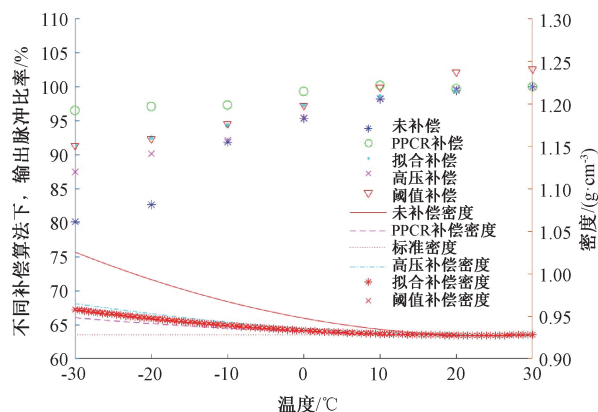


图8 不同补偿方法计数率和密度随温度变化对比

Fig.8 Comparison of count rate and density with temperature for different compensation methods

4 结 论

放射源密度检测系统在工业检测中起到了十分重要的作用,为了使放射源密度检测系统更好的适应工业现场环境变化,尤其是提高低温下工作可靠性。本研究从闪烁体和光电倍增管两方面探究低温下导致放射源密度检测系统输出计数率衰减的原因,并利用基于 PPCR 建模技术,对闪烁体和光电倍增管过程建模,并依据该模型推出温度补偿方法,所提出的 PPCR 建模相对于传统的拟合补偿、高压补偿和阈值补偿准确度更高,尤其是在低温环境下补偿效果更明显,相较于标定温度时的脉冲计数率,在-30℃时脉冲计数率维持在3%上下波动,相较于传统算法检测密度更精确,很大程度提高系统在低温下的工作性能,证明了本研究提出的补偿方法相比于传统方法能够使系统在复杂工业环境,特别是能够保障较低温度条件下的系统工作时精度。然而,PPCR 模型的精确度非常依赖高质量的数据输入,只有在数据分布式正态分布时,模型才能达到最佳效果,在面对数据维度非常高的情况时,计算复杂性会增加,导致计算时间较长。在实际生产生活中,用算法模型解决复杂数据问题越来越流行,适用性和实时性是工业生产中最看重的两方面,相信在不久的将来,会有一款实时性高、适应性强的模型应用在工业现场。

参考文献

- [1] 刘蕴韬, 安世忠, 梁积新. 核技术应用现状及发展趋势[J]. 科技导报, 2022, 40(11): 88-97.
LIU Y T, AN SH ZH, LIANG J X. Current status and prospect of nuclear technology and application [J]. Science and Technology Review, 2022, 40(11): 88-97.
- [2] PEYVANDI R G, TOOTKALEH S R, ISLAMI R S Z, et al. Influence of temperature on the performance of gamma densitometer[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2014, 57: 667-670.
- [3] WANG CH J, MIAO Y X, WANG C E, et al. Inversion correction method for NaI (Tl) gamma spectra on arbitrary energy scale based on the function theory of random variables [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2022, 65(2): 362-369.
- [4] LEE H Y, JEON J A, KIM K W, et al. Scintillation characteristics of a NaI(Tl) crystal at low-temperature with silicon photomultiplier [J]. Journal of Instrumentation, 2022, 17(2): P02027.
- [5] 杨锋, 闵永智, 孙天放. 图像式路基沉降监测系统的温度补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 18-25.
YANG F, MIN Y ZH, SUN T F. Temperature compensation method for the image subgrade settlement monitoring system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 18-25.
- [6] 朱志峰, 张海宁. 压力变送器非线性校准及温度补偿方法的研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(21): 71-76.
ZHU ZH F, ZHANG H N. Research on nonlinear calibration and temperature compensation method of pressure transmitter [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(21): 71-76.
- [7] 汪懿, 蔡建, 付尚琛, 等. 基于加权时域弯折的 Lamb 波自适应温度补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 50-58.
WANG Y, CAI J, FU SH CH, et al. An adaptive temperature compensation method of Lamb waves based on the weighted time domain warping [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 50-58.
- [8] 刘晨昊, 谷俊, 田光雄, 等. 航空发动机回油管路油气两相空腔率测量及温度补偿方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 214.
LIU CH H, GU J, TIAN G X, et al. Study on voidage measurement of gas-oil two-phase and its temperature compensation method in oil return tube of aeroengine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 214.

- [9] KAPRI R K, RATHORE K, DUBEY P K, et al. Optimization of control parameters of PMT-based photon counting system. [J]. MAPAN, 2020, 35: 177-182.
- [10] 王兰雨, 陈红梅, 张昊哲. 适用于霍尔电流传感器的温漂补偿电路设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 8-15.
WANG L Y, CHEN H M, ZHANG H ZH. Design of temperature drift compensation circuit for hall current sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (9): 8-15.
- [11] 杜树标, 乔杨, 陶茂辉, 等. $\alpha\beta$ 表面污染检测仪温度补偿技术[J]. 兵工自动化, 2017, 36(12): 31-33, 38.
DU SH B, QIAO Y, TAO M H, et al. Temperature compensation technology for α and β surface contamination detector [J]. Ordnance Automation, 2017, 36(12): 31-33, 38.
- [12] LUAN X L, HUANG B, SEDGHI S, et al. Probabilistic PCR based near-infrared modeling with temperature compensation[J]. ISA Transactions, 2018, 81: 46-51.
- [13] MEMARIAN A, VARANASI S K, HUANG B, et al. Smart optimization with PPCR modeling in the presence of missing data, time delay and model-plant mismatch[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2023, 237: 104812.
- [14] YUAN X F, GE ZH Q, SONG ZH H, et al. Soft sensor modeling of nonlinear industrial processes based on weighted probabilistic projection regression [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(4): 837-845.
- [15] SADEGHIAN A, JAN N M, WU O, et al. Robust probabilistic principal component regression with switching mixture Gaussian noise for soft sensing [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2022, 222: 104491.
- [16] 刘康, 武烘萱, 易俊, 等. 单光子计数太赫兹雷达直接探测方法与性能研究[J]. 雷达学报, 2023, 13(4): 904-916.
LIU K, WU H X, YI J, et al. Research on direct detection method and performance of single-photon counting terahertz radar [J]. Journal of Radar, 2023, 13(4): 904-916.
- [17] PAYNE S A, HUNTER S, AHLE L, et al. Nonproportionality of scintillator detectors. III. Temperature dependence studies [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(5): 2771-2777.
- [18] LIM I C, PARK G, KIM Y. Implementation of A9-based digital portable radiation detector with the algorithm of temperature compensation in scintillator [J]. Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, 2017, 21(10): 1981-1989.
- [19] WANG B, LI ZH CH, DAI ZH W, et al. A probabilistic principal component analysis-based approach in process monitoring and fault diagnosis with application in wastewater treatment plant [J]. Applied Soft Computing, 2019, 82: 105527.
- [20] ZHOU L, CHEN J H, SONG ZH H, et al. Probabilistic latent variable regression model for process-quality monitoring [J]. Chemical Engineering Science, 2014, 116: 296-305.
- [21] 马帆, 罗尧治, 万华平, 等. 基于概率主成分分析的结构健康监测数据修复方法研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(21): 135-141, 167.
MA ZH, LUO Y ZH, WAN H P, et al. Repair method of structural health monitoring data based on probabilistic principal component analysis [J]. Vibration and Shock, 2021, 40 (21): 135-141, 167.

作者简介



尚鹏举, 2019 年于江苏师范大学获得学士学位, 现为兰州交通大学硕士研究生, 主要研究方向为信息与通信工程。

E-mail: 1064044883@qq.com

Shang Pengju obtained his B. Sc. degree from Jiangsu Normal University in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Lanzhou Jiaotong University. His main research interests include Information and Communication Engineering at Lanzhou Jiaotong University.



王小鹏 (通信作者), 2005 年于西北工业大学获得博士学位, 现为兰州交通大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为信息与通信工程、智能化信息处理等。

E-mail: Wangxiaopeng@mail.lzjtu.cn

Wang Xiaopeng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2005. He is currently a professor and doctoral supervisor at Lanzhou Jiaotong University. His main research interests include information and communication engineering, intelligent information processing, etc.