

文章编号 1004-924X(2025)16-2531-12

高压纹波对光电倍增管计数率的影响及补偿方法

王小鹏, 李家隆*, 许金玉

(兰州交通大学 电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:在化工产品生产过程,利用放射源射线穿透管道测量溶液密度时,光电倍增管输出计数率易受高压纹波噪声的影响,发生明显衰减,导致密度测量精度下降。为降低纹波噪声对计数率的影响,需要补偿因纹波而衰减的计数率。首先,根据在不同高压纹波条件下所收集得到的计数率实验数据,建立了计数率与高压纹波之间的数学模型。然后,通过分析数学模型得知,降低高压纹波幅值和频率能够减少高压纹波对计数率的影响。最后,采用自适应卡尔曼滤波算法对高压纹波进行抑制,通过调整过程噪声和测量噪声因子,实现对计数率的自适应补偿。实验采用 40% 的酒精溶液进行测试,对补偿前后的计数率及溶液密度测量结果进行对比分析。实验结果表明,相比较补偿前,补偿后所测得的脉冲计数损失率降低至 3.54%~5.46%,溶液密度与真实值之间最大偏差为 0.019 g/cm³,密度检测精度提高了 1.51%。

关键词:光电倍增管;纹波噪声;计数率;卡尔曼滤波;自适应补偿

中图分类号:TP274.2;TN911.4 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253316.2531

CSTR:32169.14.OPE.20253316.2531

Effects of high-voltage ripple on photomultiplier tube count rate and compensation techniques

WANG Xiaopeng, LI Jialong*, XU Jinyu

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

* Corresponding author, E-mail: 11230708@stu.lzjtu.edu.cn

Abstract: In the production process of chemical products, when utilizing radiation from a radioactive source to measure the density of a solution by penetrating a pipeline, the count rate output from the photomultiplier tube is susceptible to degradation due to high-voltage ripple noise. This degradation leads to noticeable attenuation in the count rate, thereby reducing the density measurement accuracy. A series of methods were proposed to mitigate the impact of ripple noise on the count rate and compensate for the attenuation caused by the ripple. First, based on experimental data under various ripple conditions, a mathematical model was established to characterize the relationship between the count rate and high-voltage ripple. Analysis of this model revealed that reducing the ripple's amplitude and frequency effectively diminishes its influence on the count rate. Subsequently, an adaptive Kalman filtering algorithm was employed to suppress the ripple noise. By dynamically adjusting the process and measurement noise parameters, the algorithm enabled adaptive compensation of the count rate. Experimental validation was carried out using a

收稿日期:2025-04-21;修订日期:2025-07-04.

基金项目:甘肃省高校产业支撑计划项目(No. 2023CYZC-40);兰州市科技计划项目(No. 2023-3-104);甘肃省优秀研究生“创新之星”项目(No. 2025CXZX-685)

40% ethanol solution, and comparative analysis was performed on the count rate and density measurement results before and after compensation. The results demonstrate that, compared to the uncorrected state, the pulse count loss rate decreased to 3.54% - 5.46% after compensation. Furthermore, the maximum deviation between the measured and actual solution density was reduced to 0.019 g/cm³, with overall density measurement accuracy improved by up to 1.51%.

Key words: photomultiplier tube; ripple noise; count rate; Kalman filtering; adaptive compensation

1 引 言

光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)具有灵敏度高、噪声低、响应速度快等特点,是检测可见光、紫外光和近红外辐射的最佳仪器。它们被广泛应用于各种领域,包括光电探测信号研究^[1-2]、铁路交通检测^[3]、粒子物理学^[4-5]、天文学和空间科学^[6-10]等。在工业环境生产过程中,为了保障人身和生产安全,一些企业会采用穿透性优良的放射源探测器对其工业物料的密度、浓度进行监控检测。整个密度检测系统由放射源、闪烁体、PMT、信号检测电路组成,系统由放射源发出射线,穿过待测溶液管道,然后接收闪烁体和 PMT 收集得到的射线光子信号,并通过信号检测电路采集单位时间内的脉冲计数(Pulse Count Per Second, CPS),最后利用数学公式计算出待测溶液密度。然而,由于 PMT 的工作特性,易受环境各种因素干扰,例如:高温、低温、高压纹波等等,导致其输出计数率不稳定。此一系列影响 PMT 工作的因素,受到器件制造商与研究单位的持续关注。

为解决高温对计数率的影响,北方夜视科技研究院有限公司的严仕凯^[11]等,通过引入热循环后处理方法,来提高计数率的稳定性。同时,针对 PMT 输出脉冲高度随机分布、脉冲堆叠现象和光子事件鉴别阈值的设置对光子事件探测概率的影响,武汉大学向雨琰^[12]等提出了一个新的 PMT 光子探测模型。为解决光电子信号在阳极位置上的差异所带来的信号时间测量误差,西安邮电大学王翀^[13]等提出了一种新的误差补偿方法,能够有效提升光电子信号的时间测量精度。除了在科研与工程上给出解决方案,针对 PMT 的设计理论与制造工艺也提出多种方案。Yun 等在文献[14]中提到一种新型 2 英寸低本底 R12699 PMT,优化了 PMT 在低温下的电性能,

其增益提高了 30%。Liu 等在文献[15]中研究开发出一种具有门控功能的新型大面积微通道板光电倍增管(Microchannel Plate-Photomultiplier, MCP-PMT),实现了对目标脉冲信号的优异门控功能,能够满足白中子探测和激光雷达等各种领域的应用需求。

除了上述环境因素带来的影响,系统自身带来的噪声也不容忽视。由于 PMT 器件体积较大,工作时需要在其阴极和各级打拿级之间施加负高电压,造成器件的噪声来源较多。PMT 内部的噪声、后续放大电路的噪声以及高压电源所引入的噪声均会对系统的噪声产生影响,会让噪声计数干扰正常的光子计数,使得实际测量的计数率存在偏差,从而造成计算溶液密度与实际密度不匹配,引发后续现场工作人员的误判和误操作,造成一定的损失。因此,分析各类噪声对 PMT 及其计数率的影响具有重要意义。文献[16]通过分析微通道板(Microchannel Plate, MCP)PMT 中 MCP 发光噪声的比例,建立了管的噪声模型,得出 MCP 的发光噪声约占整个管噪声的 7%~22%。文献[17]介绍并评估了一种在现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)上实现的数字实时算法,该算法可快速区分硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier, SiPM)的热噪声和噪声脉冲堆积与中子信号,并且减少了检查噪声脉冲所花费的死区时间,能够有效地减少误报数量,但需要借助 FPGA 进行加速,运算成本较高。中国工程物理研究院的张琦^[18]等人研究了 PMT 的增益温度漂移与噪声机理,设计了一套自动增益校正系统。但其高压电源模块工作温度范围仅限 -10~60 ℃,在过低温和过高温的场景下,高压电源都会产生较大的纹波。中国科学院长春光机所的李乐^[19]等,介绍了一种基于光电倍增管的锁相环放大光电系统,并且设计了一款高稳定低纹波高压电源,提升整个

系统的信噪比,但该方法需要对硬件设备做一定的改动。

但是,以上研究中对于高压纹波对光子计数率的影响尚无定性讨论。如果高压电源的稳定性不佳,会造成PMT的增益发生变化,而高压电源的稳定性取决于其内部反馈系数、器件温度漂移等因素,需要在设计时着重考虑。此外,高压电源纹波会通过分压电阻耦合进入PMT的打拿级,并逐级放大,增大PMT噪声。对于高压纹波这类信号抑制往往有以下两种方法:第一种根据信号和噪声在时频变换域中系数幅值差异的特性,采用小波变换对噪声进行抑制^[20],但其存在计算量较大和实时性较差的问题;第二种是根据信号和噪声在特定域分选性的差异,采用传统卡尔曼滤波对高压纹波进行抑制,但收敛速度和稳定性可能不足,无法对计数率进行动态自适应补偿。而自适应卡尔曼滤波是一种自适应性强、鲁棒性好和实时性高的算法,它能够在动态工况下保持稳定抑制效果的同时,通过调整过程噪声和测量噪声因子,来实现对计数率自适应补偿。

为解决高压纹波噪声影响PMT输出计数率这一问题,本文将受到高压纹波噪声影响的PMT作为研究主体,收集PMT受纹波影响时所产生的计数率数据,通过数据分析,构建计数率-纹波数学模型,采用自适应卡尔曼滤波算法对计数率进行估计补偿。

2 系统介绍与纹波噪声分析

2.1 系统介绍

通过 γ 射线穿透溶液进行密度检测,这是一种微弱光信号探测技术^[21-23],其利用弱光照射下PMT输出电流信号自然离散化的特性,采用脉冲高度甄别技术和数字技术来区分噪声和采集信号。整个密度检测系统是由NaI闪烁体、PMT、信号处理电路组成,放射源辐射穿过待测溶液,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PMT的光阴极,产生光电子,经过PMT打拿级倍增,在阳极输出回路输出信号。图1是整个溶液密度检测框图,从中可以看出,高压电源给PMT进行供电这一环节,容易引入纹波噪声,导致下一环节PMT

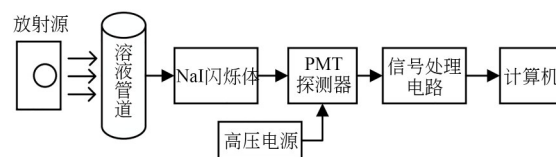


图1 溶液密度检测系统框图

Fig. 1 Block diagram of solution density detection system

输出的CPS夹杂纹波噪声,然后被信号处理电路采集。

信号处理电路如图2所示,输入的信号被前置放大器放大,通过I/V转换电路,将电流信号转换成电压信号,再进入信号甄别器,通过设定的阈值筛选出有用的信号,转移到抗噪电路,进行噪声滤除,最后经过A/D转换,将得到的数字信号送进MCU控制单元,MCU控制单元进行CPS阈值补偿处理运算,经过D/A转换返回给信号甄别器,不断重复进行补偿计算,最后将得到的最佳值经过Hart通信收发电路,传输给计算机进行综合运算。

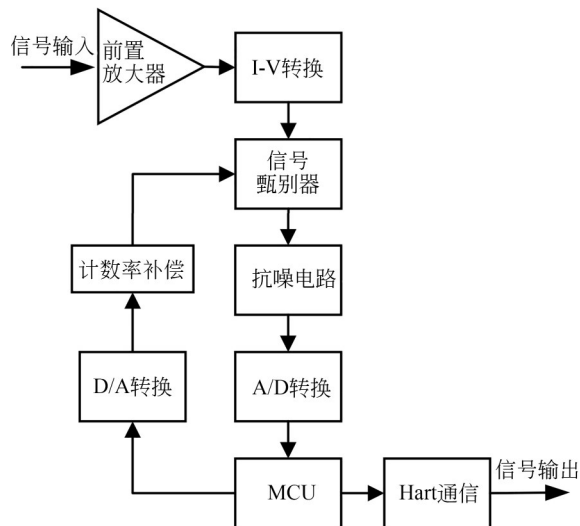


图2 信号处理电路框图

Fig. 2 Block diagram of the signal processing circuit

2.2 高压纹波噪声对计数率的影响

高压纹波噪声主要在两方面对PMT产生影响,一方面在无光条件下,高压纹波噪声会近似线性地耦合进系统噪声中,此时的系统噪声以PMT暗噪声为主;另一方面是在有光条件下,高压纹波造成的噪声与PMT的光电流值呈正相关,此时的系统噪声以阳极电流散粒噪声为主。

本文分别在无光与有光条件下测试了不同纹波下的 PMT 的暗计数率,并对其测试结果进行分析。

在无光条件下,随机测量了 15 组不同纹波下暗计数所占 PMT 总脉冲计数的比率值,近似拟合出高压纹波与 PMT 的暗计数率变化曲线,如图 3 所示。可以观察到,无光条件下 PMT 的暗计数与高压纹波呈正相关,随着高压纹波增大,暗计数率随之增多。这表明暗噪声计数混入脉冲计数会对 PMT 总脉冲计数产生影响,会导致 CPS 发生明显衰减。此外,为了测试不同高压纹波条件下的系统噪声,测试了 4 款不同纹波的高压电源,其型号与纹波指标如表 1 所示。

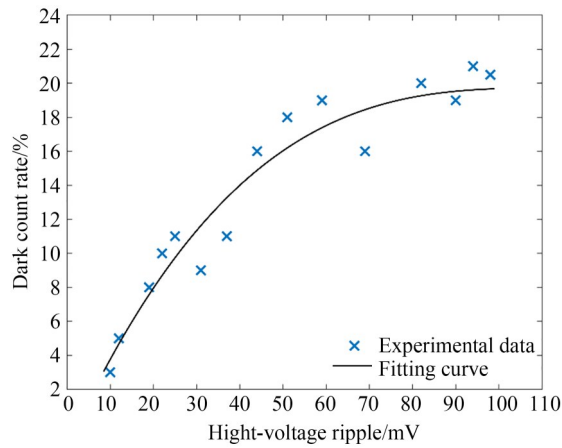


图 3 高压纹波与暗计数率变化拟合曲线
Fig. 3 Fitted curve of high-voltage ripple and dark count rate variation

表 1 高压电源型号与指标

Tab. 1 Type and index of high-voltage power supply			
编号	厂家	型号	纹波 (V_{p-p})/mV
1	艾德克斯	IT6700H	35
2	滨松	C9727	50
3	是德科技	N6700	80
4	SCHROFF	PSK105	105

在有光条件下,高压纹波对 PMT 噪声的影响与光照强度有关。实验中测得的不同高压纹波下光电流与暗计数率的关系拟合曲线,如图 4 所示。值得注意的是,在有光条件下,暗噪声光子数随着光电流的增大而增多;在相同光电流的情况下,高压纹波越大所带来的暗噪声光子越

多。这说明有光条件下,PMT 噪声等于系统噪声 N_s ,其主要由 PMT 阳极电流散粒噪声 N_i 和高

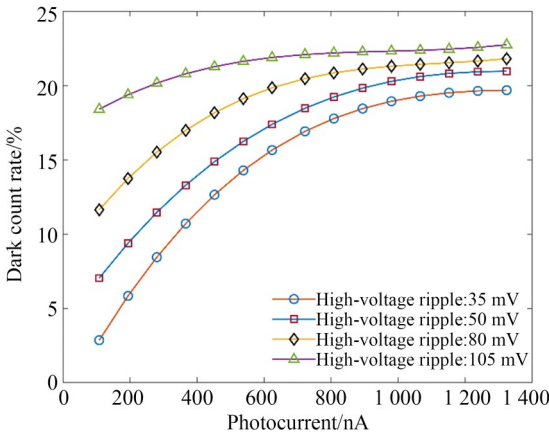


图 4 不同高压纹波下光电流与暗计数率拟合曲线(有光)
Fig. 4 Fitted curves of photocurrent and dark count rate under different high-voltage ripple conditions in light

压纹波噪声 N_{HV} 组成。由此,可以推导出系统噪声 N_s 为阳极电流散粒噪声 N_i 和高压纹波噪声 N_{HV} 的矢量和,具体参考文献[19],则其表达式为:

$$N_s = \sqrt{N_i^2 + N_{HV}^2}. \quad (1)$$

由公式(1)可以推导得到 N_{HV} 的表达式:

$$N_{HV} = \sqrt{N_s^2 - N_i^2}. \quad (2)$$

结合公式(2)和图 4 的暗计数率与光电流的曲线关系,可以得到不同高压纹波、光电流与计数率的关系拟合曲线,如图 5 所示。

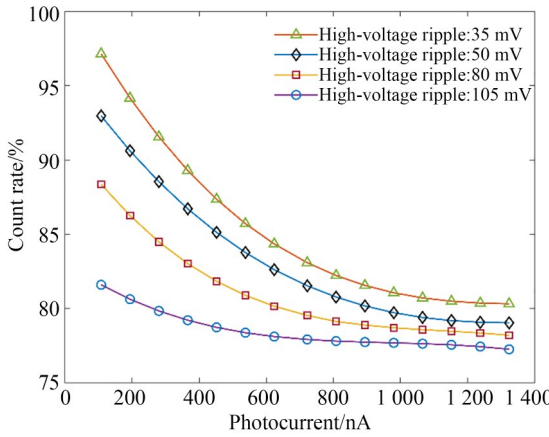


图 5 不同高压纹波下光电流与计数率拟合曲线(有光)
Fig. 5 Fitted curves of photocurrent and count rate under different high-voltage ripple conditions in light

由图 5 可以观察到,在相同的光电流条件下,高压纹波噪声越大,计数率衰减越明显,所占比率越小,由此可知高压纹波噪声对 PMT 计数率是有影响的。而产生图 4 和图 5 现象的原因是 PMT 的供电高压是经电阻分压后,逐级施加在其内部的打拿级上,光电子在打拿级电场作用下加速并被放大。同时,高压纹波无法被彻底消除,致使各级打拿级的电场出现波动,这不仅影响光电子按照既定轨迹加速与倍增,部分光电子还会因电场异常而出现提前或延迟到达打拿级,甚至发生散射等情况。这些额外产生的电子信号逐渐累积,最终在 PMT 阳极表现为噪声贡献,致使暗噪声级数增加。为此,构建高压纹波对光电倍增管输出 CPS 影响的数学模型,对其 CPS 衰减进行补偿,减小纹波噪声对其系统的影响,对提高系统检测溶液密度精度是非常必要的。

3 模型构建与计数率补偿算法

3.1 计数率-纹波模型构建

在化工产品生产过程中,系统输出高压纹波的实测图如图 6 所示。从图中可以观察到,高压纹波是以一个较低频的周期性波形为基础,叠加了小幅度的高频抖动,波形呈现为类正弦或调幅特征。波形的“峰-谷”变化接近正弦曲线,无尖锐脉冲、平顶或凹陷,说明此纹波是一种周期性的低阶谐波信号。考虑到系统对工频及其低阶谐波的频率响应极其敏感,又因其纹波的主频分量集中在工频及低阶谐波,因此用主频正弦波建

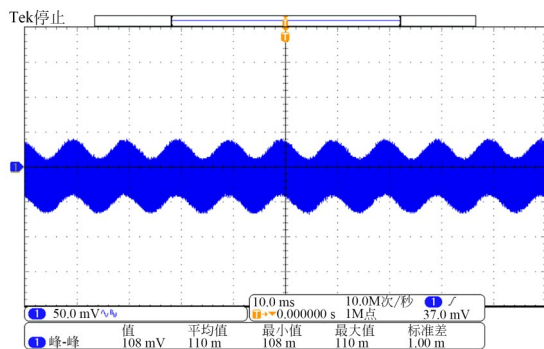


图 6 高压纹波实测图

Fig. 6 High-voltage ripple oscillogram

模可以很好地反映影响系统的主要因素。

基于上述分析,高压纹波可以看作一个周期性的小幅度波动,近似为正弦波,可以表示为:

$$V_{rip}(t) = A_{rip} \sin(2\pi f_{rip} t), \quad (3)$$

其中: A_{rip} 是纹波幅度, f_{rip} 是纹波频率, t 是时间。

假定高压的平均值为 $V_{HV,a}$, 则实际施加的高压值可以表示为:

$$V_{HV}(t) = V_{HV,a} + V_{rip}(t), \quad (4)$$

PMT 的增益 G 与高压 V_{HV} 存在幂函数的关系,则可以表示为:

$$G(V_{HV}) = k V_{HV}^n, \quad (5)$$

其中: k 和 n 是 PMT 的结构和材料常数,根据公式(4)可以得到 PMT 的增益 G 与高压纹波 V_{rip} 的关系,则其表达式如式(6):

$$G(V_{HV}) = k(V_{HV,a} + A_{rip} \sin(2\pi f_{rip} t))^n. \quad (6)$$

高压纹波幅度 A_{rip} 相对 $V_{HV,a}$ 较小,可以利用泰勒级数展开:

$$(V_{HV,a} + A_{rip} \sin(2\pi f_{rip} t))^n \approx V_{HV,a}^n + n V_{HV,a}^{n-1} A_{rip} \sin(2\pi f_{rip} t), \quad (7)$$

$$G(t) \approx k V_{HV,a}^n + k n V_{HV,a}^{n-1} A_{rip} \sin(2\pi f_{rip} t) = G_0 + \Delta G(t). \quad (8)$$

假设 PMT 的入射光子数为 N_{ph} , 量子效率为 η , 则可以得到光阴极产生的光电子数为:

$$N_{pe} = \eta N_{ph}, \quad (9)$$

其中: $G_0 = k V_{HV,a}^n$ 是无纹波时的增益, $\Delta G(t) = k n V_{HV,a}^{n-1} A_{rip} \sin(2\pi f_{rip} t)$ 是由纹波引起的增益变化。PMT 的计数率 R 与光电子数 N_{pe} 和增益 G 成正比,比例常数为 α , 则计数率 R 如式(10)所示:

$$R = \alpha N_{pe} G. \quad (10)$$

将 $N_{pe} = \eta N_{ph}$ 和 $G(t)$ 代入公式(10), 可以得到计数率 R 与增益 G 的关系为:

$$R(t) = \alpha \eta N_{ph} (G_0 + \Delta G(t)). \quad (11)$$

令无纹波时的计数率 $R_0 = \alpha \eta N_{ph} G_0$, 高压纹波引起的计数率变化为 $\Delta R(t) = \alpha \eta N_{ph} \Delta G(t)$, 最终可以得到高压纹波对 PMT 计数率影响的数学模型为:

$$R(t) = R_0 + \alpha \eta N_{ph} k n V_{HV,a}^{n-1} A_{rip} \sin(2\pi f_{rip} t). \quad (12)$$

通过对模型分析,降低高压纹波的幅值 A_{rip}

和降低高压纹波频率 f_{rip} ,可以减少高压纹波对 PMT 计数率的影响。

3.2 计数率补偿算法

经过前文分析,高压电源给 PMT 进行高压供电过程中,高压纹波会影响探测器的增益,从而导致光子计数率的周期性波动。为了补偿高压纹波对光子计数率的影响,提高计数率的稳定性,需要采用相关算法实现对计数率的精准补偿。在算法选择上,小波变化和自适应卡尔曼滤波在高压纹波抑制方面都有自己独特的优势。小波变化对非平稳和瞬态纹波有着较好的抑制能力,不需要建立模型,能够通过局部阈值进行抑制,但该算法过度依赖小波基选择、分解层数和阈值函数的参数匹配,实时性较差,同时需要系统设备具备一定算力。自适应卡尔曼滤波算法对时变纹波的动态跟踪能力较强,计算效率高,能够通过动态调整过程噪声和测量噪声因子实时补偿计数率,但该算法补偿效果严重依赖状态方程和观测方程的准确性。

由于计数率衰减是一个动态变化的过程,需要算法具备一定的实时性和自适应性,所以本文决定采用自适应卡尔曼滤波算法,降低高压纹波幅值,通过不断动态调整估计值来补偿计数率,得出最佳 CPS 值,从而减小测量误差,使实验数据更接近于理论真实值。

真实光子计数率 R_{PCR} 与增益 G 成正比,根据公式(6),则其表达式为:

$$R_{PCR}(t) = R_0 G(t), \quad (13)$$

其中, R_0 是目标 CPS 值。实际测量中,CPS 受到高压纹波噪声干扰,根据上述计数率-纹波模型可以得到含纹波噪声的 CPS 表达式为:

$$R_{PCR_noisy}(t) = R_{PCR}(t) + \varepsilon(t), \quad (14)$$

其中: $\varepsilon(t) \sim N(0, \sigma^2)$, σ 为噪声的标准差。

卡尔曼滤波是一种递归的最优估计方法,它通过预测和更新两个步骤来估计系统的状态。假设系统的状态方程和测量方程分别为:

$$\mathbf{x}_k = F_k \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k, \quad (15)$$

$$\mathbf{z}_k = H_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (16)$$

其中: $\mathbf{x}_k$ 是系统的状态向量, $\mathbf{z}_k$ 是测量向量, F_k 是

状态转移矩阵, H_k 是测量矩阵, $\mathbf{w}_k$ 是过程噪声, $\mathbf{v}_k$ 是测量噪声。过程噪声和测量噪声均为零均值的纹波噪声,其协方差分别为 $\mathbf{Q}_k$ 和 $\mathbf{R}_k$ 。

卡尔曼滤波的预测步骤为:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = F_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = F_k \mathbf{P}_{k-1} F_k^T + \mathbf{Q}_k, \quad (18)$$

其中: $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 是预测状态向量, $\mathbf{P}_{k|k-1}$ 是预测误差协方差矩阵。

卡尔曼滤波的更新步骤为:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} H_k^T (H_k \mathbf{P}_{k|k-1} H_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}, \quad (19)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}), \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k H_k) \mathbf{P}_{k|k-1}, \quad (21)$$

其中: $\mathbf{K}_k$ 是卡尔曼增益矩阵, $\hat{\mathbf{x}}_k$ 是更新后的状态向量, $\mathbf{P}_k$ 是更新后的误差协方差矩阵。

在实际应用中,过程噪声协方差 $\mathbf{Q}_k$ 和测量噪声协方差 $\mathbf{R}_k$ 可能会随时间变化。为了提高滤波效果,本文采用自适应调整的方法来更新 $\mathbf{Q}_k$ 和 $\mathbf{R}_k$ 。具体更新公式为:

$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{Q}_0 + \gamma |\hat{\mathbf{R}}_{k-1} - \hat{\mathbf{R}}_{k-2}|, k > 2, \quad (22)$$

$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{Q}_0, \mathbf{R}_k = \mathbf{R}_0 + \lambda |R_{PCR_noisy,k} - \hat{\mathbf{R}}_{k-1}|, k \leq 2, \quad (23)$$

其中: $\mathbf{Q}_0$ 和 $\mathbf{R}_0$ 分别是初始过程噪声协方差和初始测量噪声协方差, γ 和 λ 分别为过程噪声和测量噪声调整因子。

卡尔曼滤波算法详细流程如下:

步骤 1:设置初始 CPS 状态估计值 $\hat{\mathbf{R}}_0$ 和初始估计误差协方差 $\mathbf{P}_0$;

步骤 2:利用公式(17)计算预测值 $\hat{\mathbf{R}}_{k|k-1} = \hat{\mathbf{R}}_{k-1}$;

步骤 3:利用公式(18)计算预测误差协方差

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{P}_{k-1} + \mathbf{Q}_k;$$

步骤 4:利用公式(19)计算卡尔曼增益

$$\mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{P}_{k|k-1}}{\mathbf{P}_{k|k-1} + \mathbf{R}_k};$$

步骤 5:利用公式(14)和步骤 2 得到的预测值计算出新息序列 $\mathbf{y}_k = R_{PCR_noisy,k} - \hat{\mathbf{R}}_{k|k-1}$;

步骤 6:更新 CPS 估计值 $\hat{\mathbf{R}}_k = \hat{\mathbf{R}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{y}_k$;

步骤 7:更新估计误差协方差

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k) \mathbf{P}_{k|k-1};$$

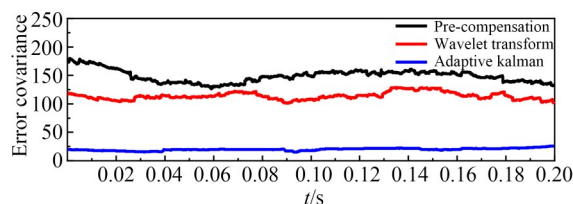
步骤 8:重复步骤 2~步骤 7,直到处理完所有的测量数据,完成计数率补偿。

由此,可以得到滤波前误差 e_{raw} 和滤波后误差 e_{filtered} 分别为:

$$e_{\text{raw}}(t) = |R_{\text{PCR_noisy}}(t) - R_{\text{PCR}}(t)|, \quad (24)$$

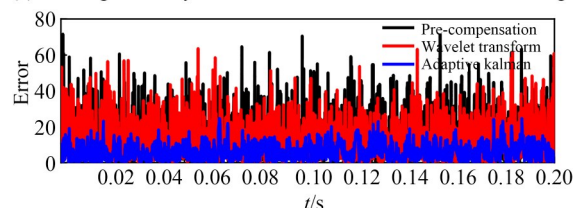
$$e_{\text{filtered}}(t) = |\hat{R}(t) - R_{\text{PCR}}(t)|. \quad (25)$$

为了观察误差随时间的变化趋势,使用协方差来衡量误差的局部波动性,来判断误差是否收敛。具体误差协方差与误差仿真结果如图 7 所示,从图 7(a)可以观察到,采用自适应卡尔曼滤波算法补偿后的误差协方差比补偿前和小波变化补偿后的协方差局部波动更小,且更加收敛,稳定性更好;从图 7(b)可以观察到,小波变化补偿后的 CPS 误差相较于补偿前的 CPS 误差有一定地减小,但不及自适应卡尔曼补偿后的误差更小。由此可以说明该自适应卡尔曼滤波算法比小波变换算法的误差估计稳定,补偿效果更好。如图 8 所示,基于小波变换的 CPS 补偿值曲线图 8(c)比实际测量值曲线图 8(b)更加光滑一些,但补偿效果不及自适应卡尔曼滤波补偿效果好,图



(a) 滤波前后误差协方差收敛分析

(a) Convergence analysis of error covariance before and after filtering



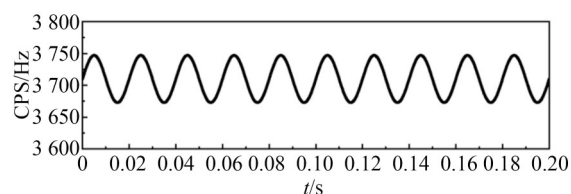
(b) 滤波前后误差收敛分析

(b) Convergence analysis of error before and after filtering

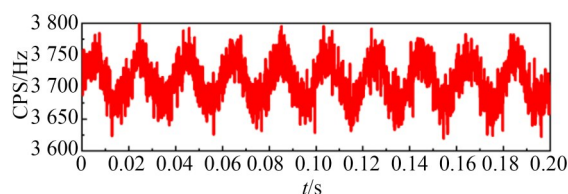
图 7 补偿前后协方差与误差收敛分析

Fig. 7 Convergence analysis of covariance and error before and after compensation

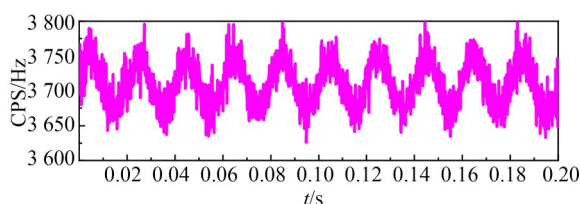
8(d)自适应卡尔曼补偿值曲线更加接近理论值曲线图 8(a)。综上,可以表明该卡尔曼滤波算法稳定性和补偿效果更好,能够有效补偿高压纹波影响后的计数率。



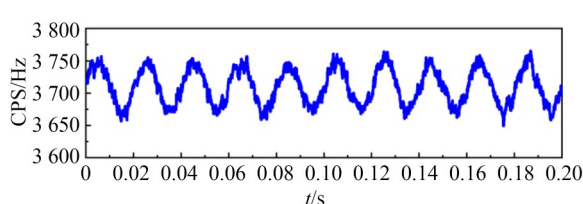
(a) CPS理论值
(a) CPS theoretical value



(b) CPS测量值
(b) CPS measured value



(c) 基于小波变换的CPS补偿值
(c) Wavelet transform-based CPS compensation value



(d) 基于自适应卡尔曼滤波的CPS补偿值
(d) Adaptive kalman filter-based CPS compensation value

图 8 补偿前后效果对比图

Fig. 8 Comparison chart of effects before and after compensation

4 实验结果与分析

使用 Cs-137 做放射源,将其固定在铅罐内,整个系统装置置于防爆桶中,待测溶液为 40% 的

酒精混合溶液,室温 25 °C 情况下,其溶液密度值为 0.928 g/cm³,所对应的标定 CPS 理论值为 3 846。装有待测溶液管道的管壁厚度为 $d=10$ cm,管道吸收系数 $u=0.093 6$ cm²/g,且管道材

料对射线的衰减常数 $k=2.3$ 。根据 γ 射线的衰减遵循 Lambert-Beer 定律可以得到:

$$I = kI_0 e^{-\mu d}, \tag{26}$$

其中: I 是穿过溶液后的射线强度, I_0 是无液体时的射线强度。根据公式 (26) 可以转换成 CPS 换算公式:

$$CPS = kCPS_0 e^{-\mu d}, \tag{27}$$

其中: CPS 是穿过溶液后所测得的 CPS 值, CPS_0 是无液体时所测得的 CPS 值。通过换算, 可以得到溶液密度计算公式:

$$\rho = \frac{\ln(kCPS_0/CPS)}{\mu d}. \tag{28}$$

实验制备了 6 组系统装置, 选取高压纹波为 35 mV 系统装置作为改进对象, 第一、二组分别加入自适应卡尔曼滤波和小波变换补偿算法; 其余四组为不同高压纹波 35, 50, 80, 105 mV 系统装置, 不加入补偿算法。溶液密度测量示意图如图 9 所示, 现场环境系统测试装置如图 10 所示。

由于放射源射线强度与所处位置有很大关系, 因此为了更加充分验证实验结果, 在放射源距离溶液管道 0~35 cm 区间范围内, 每隔 5 cm

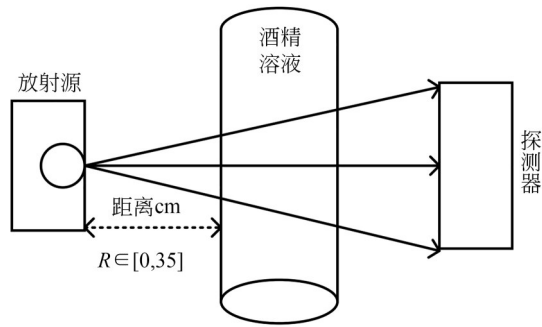


图 9 溶液密度测量示意图

Fig. 9 Schematic diagram of solution density measurement



图 10 现场环境测试图

Fig. 10 Schematic diagram of solution density measurement

的位置测量一次 CPS, 所测得结果如表 2 所示。可以观察到, 距离管道位置越远, 收集到的 CPS 越少, 说明放射源距离管道位置越远, 放射强度会有一定的衰减; 而距离管道相等的位置, 纹波越高的实验组收集得到的 CPS 越少, 与理论值 $CPS=3\ 846$ 相差越大。相比之下, 加入补偿算法的实验装置, 所收集到的 CPS 随位置不同变化幅度不大, 且更加接近理论值。然而从表 2 中可以清楚地看出, 在计数率补偿方面, 卡尔曼补偿算法的实验装置整体要优于小波变换补偿算法的实验装置, 仅距离 15 cm 的实验组数据低于小波变换的实验数据。表 3 所展示的是不同实验装置通过收集到的 CPS 计算得到的酒精溶液密度, 从中可以看出, 距离管道位置越远, 计算得到的溶液密度越大, 误差越大; 而距离管道相等的位置, 纹波越高的实验组计算得到的密度越大, 与理论值 0.928 g/cm^3 相差越大。相比之下, 加入补偿算法的实验装置计算得到的溶液密度变化幅度不大, 与理论值结果更接近, 自适应卡尔曼

表 2 六组实验装置距离管道不同位置所测 CPS

Tab. 2 CPS measured by six experimental setups at different distances from the pipeline

对照组	输出脉冲计数(CPS)						
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Kalman	3 710	3 710	3 706	3 690	3 679	3 655	3 636
Wavelet	3 706	3 701	3 708	3 672	3 662	3 623	3 607
35 mV	3 698	3 683	3 671	3 651	3 628	3 605	3 582
50 mV	3 667	3 655	3 636	3 617	3 593	3 582	3 563
80 mV	3 655	3 632	3 617	3 589	3 574	3 559	3 536
105 mV	3 613	3 593	3 570	3 551	3 529	3 514	3 495

表 3 六组实验装置距离管道不同位置所测酒精溶液密度

Tab. 3 Densities of the alcohol solutions measured by six experimental setups at different distances from the pipeline

对照组	密度/(g·cm ⁻³)						
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm
Kalman	0.928	0.928	0.929	0.933	0.936	0.942	0.947
Wavelet	0.929	0.931	0.928	0.939	0.942	0.953	0.958
35 mV	0.931	0.935	0.938	0.943	0.949	0.955	0.961
50 mV	0.939	0.942	0.947	0.952	0.958	0.961	0.966
80 mV	0.942	0.948	0.952	0.959	0.963	0.967	0.973
105 mV	0.953	0.958	0.964	0.969	0.975	0.979	0.984

补偿算法的实验组的最大偏差为 0.019 g/cm³, 而加入小波变换补偿算法的实验装置最大偏差为 0.030 g/cm³。由此可以说明, 高压纹波对 CPS 和检测结果密度具有影响, 会使系统计算得到的密度出现偏差, 导致检测精度下降, 补偿前的 4 组溶液检测精度偏差分别为 3.56%, 4.09%, 4.85%, 6.03%; 加入小波变换补偿算法后的溶液密度检测精度偏差降低至 3.23%, 相较于补偿前高压纹波 35 mV 的实验组, 密度检测精度提高了 0.33%; 而加入自适应卡尔曼补偿算法之后, 溶液密度检测精度偏差降低至 2.05%, 相较于补偿前高压纹波 35 mV 的实验组, 密度检测精度提高了 1.51%。

不同实验装置距离管道不同位置所测 CPS 变化曲线如图 11 所示。可以看出, 随着位置的改变, 小波变化补偿后的 CPS 幅度有一定的抖动, 相较于其余未补偿的 4 组的衰减一定程度上得到

减缓, 幅度衰减略快于自适应卡尔曼补偿的实验组, 测量得到最大 CPS 值与最小 CPS 值相差 99; 而自适应卡尔曼补偿后的 CPS 整体衰减幅度相较于其余 5 组不大, 测量得到最大 CPS 值与最小 CPS 值相差 74; 而其余 4 组所测得 CPS 的最大值与最小值差值分别为 116, 104, 119, 118。由此可以说明, 改进后的系统装置能够有效抑制纹波对 CPS 的衰减, 提高测量精度。

6 组系统装置所测酒精溶液密度变化曲线如图 12 所示, 可以看出, 在 0~15 cm 距离区间内, 小波变换和自适应卡尔曼补偿后计算得到的溶液密度基本等于理论值 0.928 g/cm³; 在 20~35 cm 距离区间内, 加入小波变换补偿后与理论值相差在 0.011~0.030 g/cm³; 加入自适应卡尔曼补偿后与理论值偏差在 0.005~0.019 g/cm³, 整体偏差远小于其余 5 组。图 13 展示的是 5 组实验装置计数损失率直方图, 在 0~35 cm 区间内,

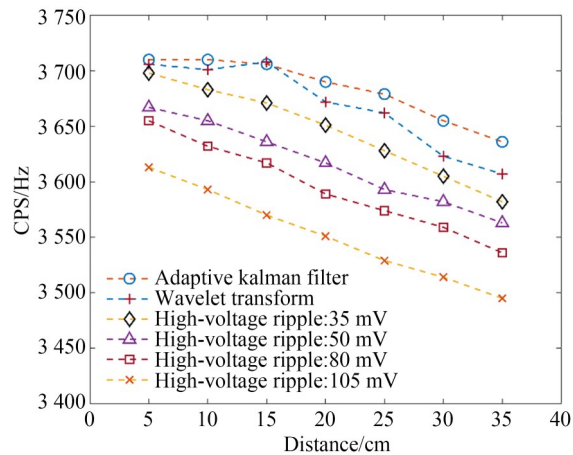


图 11 六组实验装置所测 CPS 变化曲线

Fig. 11 Change curves of CPS measured by six experimental setups

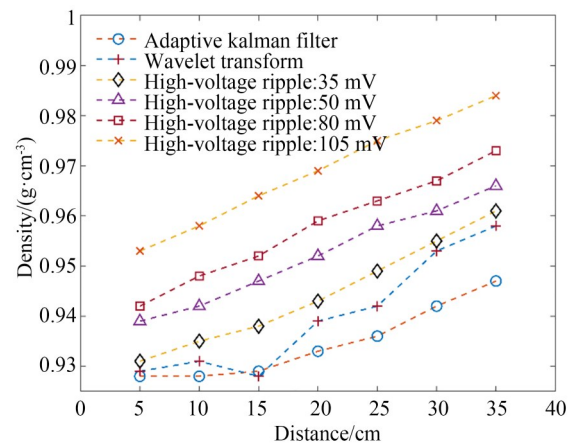


图 12 六组实验装置所测酒精溶液密度曲线

Fig. 12 Density curves of the alcohol solutions measured by six experimental setups

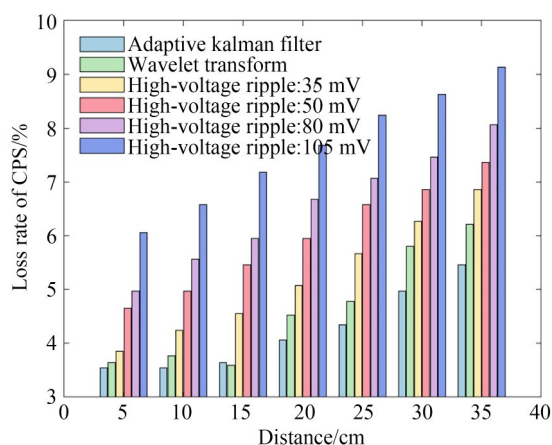


图13 六组CPS损失率

Fig. 13 Loss rates of CPS in six groups

加入小波变换补偿后的计数损失率在3.64%~6.21%之间;加入自适应卡尔曼补偿后的计数损失率在3.54%~5.46%之间;其余4组计数损失率分别处于3.85%~6.86%, 4.65%~7.36%, 4.97%~8.06%, 6.06%~9.13%。综上研究分析,自适应卡尔曼滤波算法的补偿效果要优于小波变换算法的补偿效果,能够有效补偿CPS,减少CPS的损失率,提高溶液密度的检测精度。

5 结 论

为提高溶液密度测量精度,针对高压纹波噪

声如何影响光电倍增管输出的计数率进行研究分析。研究表明,在无光条件下的主要噪声来源于PMT阳极暗噪声以高压纹波直接耦合进PMT阳极所引入的噪声;在有光条件下,噪声主要来自阳极电流的散粒噪声以及高压纹波通过PMT各级放大过程所引入的噪声,且后者随光电流的增大而增大。在相同光电流条件下,高压纹波幅值越大,有效的CPS越少,暗计数越多,整体系统噪声水平随之上升。基于上述分析,建立了CPS与高压纹波之间的数学模型,并在此基础上提出了一种基于卡尔曼滤波的计数率自适应补偿算法,以降低纹波噪声对CPS测量结果的影响。实验结果表明,相比较补偿前的其余实验组,补偿后所测得的脉冲计数损失率降低至3.54%~5.46%,溶液密度与真实值之间最大偏差为0.019 g/cm³,密度检测精度提高了1.51%。由此可以说明,该补偿算法能够有效提升CPS的稳定性和溶液密度的测量精度,这对于工业生产中的高精度密度检测具有一定的应用价值。

作者贡献声明:

王小鹏:论文框架构思与审核;

李家隆:算法的提出,实验设计和论文撰写;

许金玉:数据整理和分析。

参考文献:

- [1] SHI R H, JIN C, LIU C, *et al.* Enhanced collection of scattered photons in nonlinear fluorescence microscopy by extended epi-detection with a silicon photomultiplier array [J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22 (10): 1289-1298.
- [2] 侯冠廷, 徐宝腾, 周伟, 等. 共聚焦激光显微内窥成像中PMT与APD探测器性能对比分析[J]. *光学学报*, 2023, 43(11): 172-180.
- [3] HOU G T, XU B T, ZHOU W, *et al.* Comparative analysis of the performance of PMT and APD detectors in confocal laser endomicroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43 (11): 172-180. (in Chinese)
- [4] 于晓英, 苏宏升. 基于PMT电压一次积分值的城轨弓网电弧检测系统[J]. *铁道学报*, 2019, 41 (9): 51-58.
- [5] YU X Y, SU H S. Arcing detection system for pantograph-catenary system of urban rail transit based on voltage integral value of PMT[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41 (9): 51-58. (in Chinese)
- [6] NIU Y Z, ZHAO S S, TSUJI N, *et al.* Development and commissioning of a technological prototype of a highly-granular scintillator-based electromagnetic calorimeter [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2025, 1073: 170237.
- [7] SUN B H, LI H L, LI Q Y, *et al.* Characterization of silicon photomultipliers for their application in muon scattering tomography[J]. *Journal of Instrumentation*, 2019, 14 (12): 120001.

- tation, 2025, 20(2): T02003.
- [6] GULICK H, YONEDA H, TAKAHASHI T, *et al.* A study of afterglow signatures in NaI and CsI scintillator modules for the background and transient observer instrument on COSI[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2025, 561: 165631.
 - [7] DU Z Y, ZHANG Z F, QIN R, *et al.* Surface hardness prediction for laser shock peening using narrow-band MCP-PMT and deep feature fusion with key elements and key frames[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 136: 228-245.
 - [8] SAITO T, TAKAHASHI M, INOME Y, *et al.* Development and quality control of PMT modules for the large-sized telescopes of the Cherenkov Telescope Array Observatory[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2025, 1073: 170229.
 - [9] SANVITO A, CASSINA S, LAMPERTI M, *et al.* Assessing a binary quantum channel exploiting a silicon photomultiplier based hybrid receiver[J]. *Optics Express*, 2024, 32(22): 39846-39859.
 - [10] SUN X L. Review of photodetectors for space lidars[J]. *Sensors*, 2024, 24(20): 6620.
 - [11] 严仕凯, 司曙光, 江涛, 等. 热循环后处理提升高温光电倍增管计数率稳定性分析[J]. *光学学报*, 2024, 44(20): 9-16.
YAN S K, SI S G, JIANG T, *et al.* Analysis of count rate stability improvement of high-temperature photomultiplier tubes based on thermal cycling post-treatment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(20): 9-16. (in Chinese)
 - [12] 向雨琰, 马跃, 郭高峰, 等. 考虑脉冲高度分布(PHD)的光电倍增管光子探测模型[J]. *红外与毫米波学报*, 2023, 42(1): 88-101.
XIANG Y Y, MA Y, GUO G F, *et al.* The photon detection mode of photomultiplier tubes considering the pulse height distribution[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2023, 42(1): 88-101. (in Chinese)
 - [13] 王翀, 党文斌, 朱炳利, 等. 光电倍增管时间测量误差补偿方法研究[J]. *物理学报*, 2022, 71(22): 76-82.
WANG C, DANG W B, ZHU B L, *et al.* Method of compensating for time measurement error of photomultiplier tube[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(22): 76-82. (in Chinese)
 - [14] YUN Y H, ZHOU Z Z, AN B G, *et al.* A novel low-background photomultiplier tube developed for xenon based detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2025, 1073: 170290.
 - [15] LIU Z Y, LIU H L, CHEN P, *et al.* The development of a large-area microchannel plate photomultiplier tube with a gate function[J]. *Photonics*, 2025, 12(1): 46.
 - [16] REN L, WANG X C, HUANG G R, *et al.* Contribution of microchannel plate luminescence to the noise of 20-inch photomultiplier tubes[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022, 1022: 165973.
 - [17] PRITCHARD K, CHABOT J P, ROBUCCI R, *et al.* Real-time signal processing for mitigating SiPM dark noise effects in a scintillating neutron detector[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2021, 68(7): 1519-1527.
 - [18] 张琦, 王传伟, 李洪涛. 硅光电倍增管自动增益校正系统设计[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(7): 159-164.
ZHANG Q, WANG C W, LI H T. Design of automatic gain correction system for silicon photomultiplier tube[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(7): 159-164. (in Chinese)
 - [19] 李乐, 汪龙祺, 黄煜, 等. 光电探测系统噪声特性研究与降噪设计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(12): 2674-2683.
LI Y, WANG L Q, HUANG Y, *et al.* Study on noise characteristics of photoelectric detection system and noise reduction design[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(12): 2674-2683. (in Chinese)
 - [20] QIU H F, LAN J Q, HU Q, *et al.* An enhancement filtering method based on CEEMDAN-EP-WTD for TDLAS gas sensing[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 141: 105466.
 - [21] 赵志浩, 杨照华, 吴云, 等. 弱光环境下基于深度学习的单光子计数成像去噪方法[J]. *航空学报*, 2025, 46(3): 116-124.
ZHAO Z H, YANG Z H, WU Y, *et al.* Denoising method of single photon counting imaging based on deep learning in low light environment

- [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(3): 116-124. (in Chinese)
- [22] LIU J X, PENG Z H, TAN C, *et al.* Emerging single-photon detection technique for high-performance photodetector [J]. *Frontiers of Physics*, 2024, 19(6): 62502.
- [23] YIN X T, ZHANG C, GUO Y X, *et al.* PbS QD-based photodetectors: future-oriented near-infrared detection technology [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(2): 417-438.

作者简介:



王小鹏(1969—),男,甘肃庆阳人,博士,教授,博士生导师,2005年于西北工业大学获得博士学位,主要从事信息处理及应用、智能化信息处理等研究。E-mail: Wangxiaopeng@mail.lzjtu.cn

通讯作者:



李家隆(1999—),男,江西抚州人,硕士研究生,2022年于渤海大学获得学士学位,就读于兰州交通大学,主要从事信息处理及应用研究。E-mail: 11230708@stu.lzjtu.edu.cn