

基于卡曼滤波的矿浆浓度计设计^①

肖晶峰, 刘石梅, 刘洋, 肖盛旺, 李然, 罗国奇, 张胜广

(长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012)

摘要: 设计了一种基于卡曼滤波的 γ 射线浓度计。通过分析射线浓度计的测量原理,建立了射线强度与矿浆浓度的关系式;利用卡曼滤波对射线强度进行最优估计,以抑制测量结果的扰动;最后通过最小二乘法分段拟合计算对应的浓度。结果表明,该浓度计测量及时、准确,最大误差0.328个百分点,均方根误差0.194个百分点,测量精度得到有效提高。

关键词: 矿浆浓度; 浓度检测; 射线浓度计; 卡曼滤波; 最小二乘法

中图分类号: TD45

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.02.009

文章编号: 0253-6099(2024)02-0034-04

Design of Slurry Concentration Meter Based on Kalman Filtering

XIAO Jingfeng, LIU Shimei, LIU Yang, XIAO Shengwang, LI Ran, LUO Guoqi, ZHANG Shengguang

(Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co Ltd, Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: A Gamma-ray concentration meter based on Kalman filtering was designed, and the relationship between ray intensity attenuation and slurry concentration was established by analyzing the measurement principle of ray concentration meter. To suppress the disturbance of the results, an optimal estimation of ray intensity was actualized by using Kalman filtering. The corresponding concentration is segmentally simulated and calculated by using the least square method. The results show that the concentration meter can provide timely and accurate measurement, with a maximum error of 0.328 percentage points and a root mean square error of 0.194 percentage points, presenting effective improvement in accuracy.

Key words: slurry concentration; concentration measurement; ray concentration meter; Kalman filtering; least square method

矿浆浓度是选矿过程中的重要参数,它对磨机的磨矿效果,磁选机、浮选机和摇床等选矿设备的选矿效率以及最终精矿质量等有重要影响,及时准确地测量矿浆浓度对稳定生产质量和提高选矿效率有着重要意义^[1-2]。目前矿浆浓度在线实时测量技术普遍存在测量准确度低、易受介质状态影响的问题^[3-4]。采用射线浓度计可以有效改善上述问题^[5],但由于噪声干扰,射线浓度计测量结果存在较大扰动。卡曼滤波能有效消除干扰噪声对系统测量的影响。为了解决目前矿浆浓度检测存在的不足,本文通过优化硬件结构,引入卡曼滤波,设计了一种基于卡曼滤波的 Na^{22} 射线浓度计,它具有受噪声干扰小、测量准确率高和安装维护方便等优点。

1 射线浓度计基本原理

1.1 测量原理

常规射线浓度计(如 Cs^{137} 、 Co^{60})放射性较强,而采用豁免级别 Na^{22} 作为浓度计的放射源,可极大降低其对人体和环境的威胁。 Na^{22} 放射源释放的 γ 射线穿透管道和矿浆到达探测器时,其强度会发生相应衰减,衰减后的射线强度通过探测器进行检测,输出为脉冲信号,测量原理如图1所示。

射线浓度计测量矿浆浓度基于物质吸收低能射线,测量条件一定时,射线穿过介质后其强度的衰减遵循郎伯-比尔定律^[6]:

$$I_x = I \times e^{-\mu\rho d + \lambda t} \quad (1)$$

① 收稿日期: 2023-09-28

基金项目: 湖南省科技创新计划(2022RC1053)

作者简介: 肖晶峰(1999—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要研究方向为选冶感知器件与技术。E-mail:285013803@qq.com

通信作者: 张胜广(1973—),男,山东曹县人,正高级工程师,主要研究方向为选冶自动化。E-mail:guang1098@163.com

式中 I_x 为穿过介质后的射线强度, Bq; I 为标定时的射线强度, Bq; μ 为介质对射线的质量吸收系数, cm^2/g ; ρ 为待测物质密度, g/cm^3 ; d 为测量路径长度, cm ; λ 为放射源的衰变常数, s^{-1} ; t 为标定后放射源的衰变时间, s 。

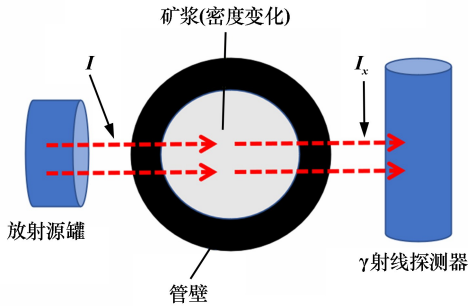


图1 测量原理

1.2 探测器原理

γ射线探测器结构如图2所示。它主要由闪烁体、光导和光电倍增管组成。闪烁体吸收射线能量后产生的闪烁光子经光导到达光电阴极,由于光电效应,光电阴极吸收光子后发射出光电子,光电子经过光电倍增管形成电子束,最终在阳极上产生电脉冲信号^[7]。

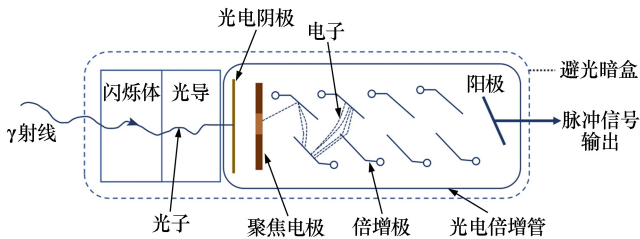


图2 γ射线探测器结构

光电倍增管输出的所有电流脉冲数 N 与塑料闪烁体吸收射线的能量成正比^[8],由此可以得到测量物质密度 ρ 与电流脉冲 N 的关系^[9]为:

$$\rho = -\frac{1}{\mu d} \ln \frac{I}{I_0} + \rho_b = -\frac{1}{\mu d} \ln \frac{N}{N_0} + \rho_b \quad (2)$$

式中 ρ_b 为标定密度, g/cm^3 ; I_0 为标定射线强度; N_0 为标定射线强度对应的电流脉冲数;斜率 $k = -1/(\mu d)$ 。通过对式(2)标定,可得到斜率 k 、标定密度 ρ_b 和表达计数 N_b ,从而测量电流脉冲数得到待测物质密度 ρ 。再通过干矿密度 ρ_0 、待测物质密度 ρ 与待测物质浓度 C 的关系,最终得到待测物质浓度 C 与电流脉冲数 N 的对应关系为:

$$C = \frac{\rho_0(\rho - 1)}{\rho(\rho_0 - 1)} = \frac{\rho_0(k \ln N - k \ln N_b + \rho_b - 1)}{(k \ln N - k \ln N_b + \rho_b)(\rho_0 - 1)} \quad (3)$$

1.3 卡曼滤波

管道抖动、空间电磁辐射、电源干扰、传感器探头的本底噪声以及放大器的线性度等因素会对脉冲信号产生干扰,如不去除干扰,会严重影响浓度测量结果的准确性。卡曼滤波在去除噪声方面有着广泛的应用,已知过程噪声和测量噪声方差时,能从存在噪声的数据中估计出动态系统的真实状态,从而滤除噪声干扰,实现快速准确测量矿浆浓度^[10]。

假设基于状态空间表达式的状态方程为:

$$x_k = Ax_{(k-1)} + Bu_k + \omega_k \quad (4)$$

观测方程为:

$$y_k = Cx_k + v_k \quad (5)$$

式中 $\omega_k \in N(0, Q_k)$, 为过程噪声; $v_k \in N(0, R_k)$, 为观测噪声。具体迭代如下:

预测方程:

$$\tilde{x}_t^- = F\tilde{x}_{(t-1)}^- + Bu_{(t-1)} \quad (6)$$

$$P_t^- = FP_{(t-1)}^- F^T + Q \quad (7)$$

状态更新方程:

$$K_t = P_t^- H^T (HP_t^- H^T + R)^{-1} \quad (8)$$

$$\tilde{x}_t^- = \tilde{x}_t^- + K_t(Z_t - H\tilde{x}_t^-) \quad (9)$$

$$P_t = (I - K_t H) P_t^- \quad (10)$$

整个方程中有两个超参数,即 Q (过程噪声方差) 和 R (观测噪声方差)。在实际滤波过程中,需要调整该参数使得数据快速收敛至稳定水平以达到最优滤波效果。

2 系统设计

2.1 硬件设计

选用STM32F427VIT6 嵌入式单片机作为主机对信号进行运算,具有低功耗、运算快和精度高的优势。浓度结果通过 HMI 触摸屏显示,方便现场实时观测数据和调控。硬件系统框架如图3所示。

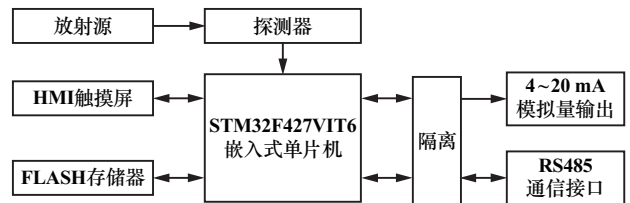


图3 浓度计硬件系统框图

2.2 软件设计

通过 HMI 触摸屏交互可进入软件系统选择不同功能,便于查看或操作不同系统参数。系统软件流程如图4所示。

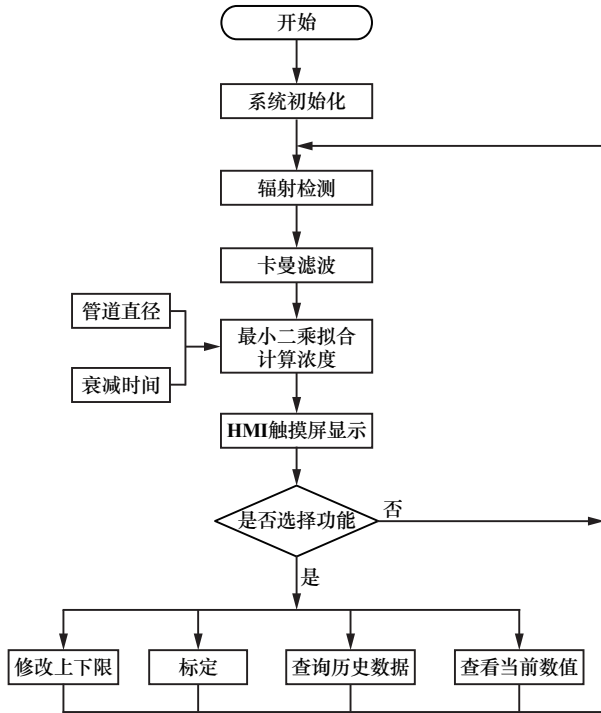


图4 系统软件流程

3 实验结果分析

3.1 滤波结果分析

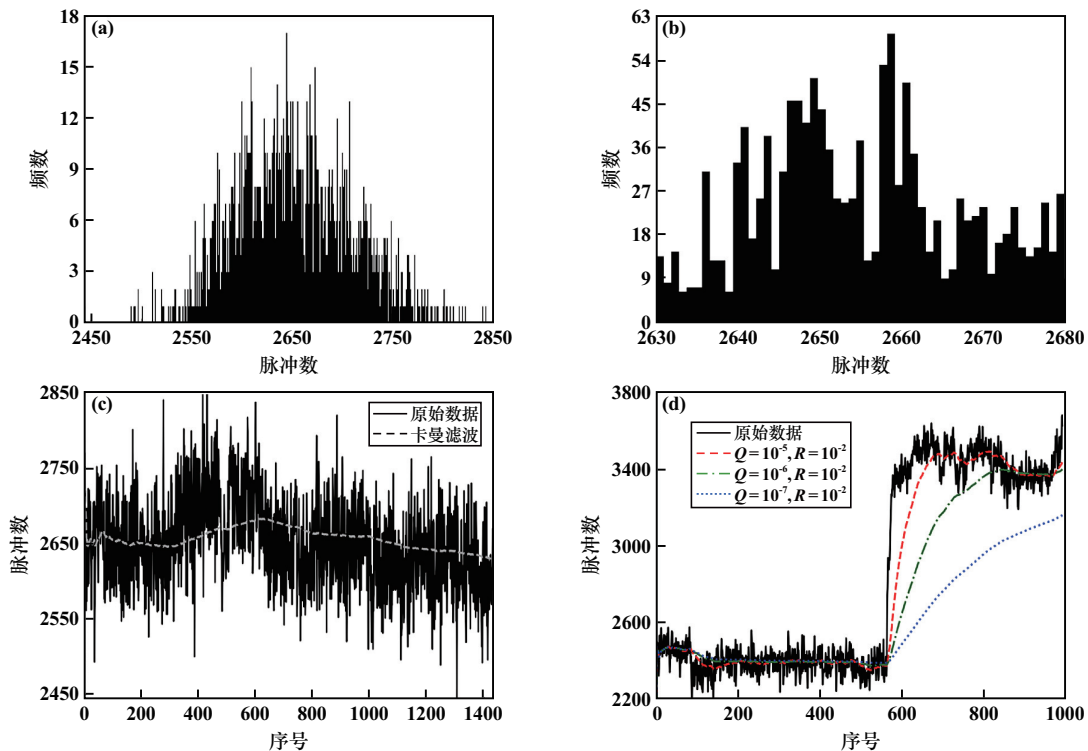
通过系统测量得出辐射源 Na^{22} 辐照下的脉冲数，

对计数值进行卡曼滤波处理,得到去噪后的电流脉冲数 N 。原始数据分布如图 5(a) 所示,其中最大值为 2 847,最小值为 2 443,平均值为 2 649,标准差为 58.5,数据呈高斯分布。经过卡曼滤波后的数据如图 5(b) 所示,其中最大值为 2 681,最小值为 2 628,平均值为 2 655,标准差为 13.3,数据基本呈高斯分布。经过滤波后数据明显变平滑,数据波动范围大幅缩小,滤波效果较好,没有损失原始数据信息,数据对比如图 5(c) 所示。

选取不同的 Q 值和 R 值,测试算法对浓度突变时(浓度从 20% 降至 10%,脉冲数从 2 400 升至 3 400 附近)的滤波跟踪效果,比较不同滤波效果筛选出最合适的 Q 值和 R 值。滤波结果见图 5(d)。图 5(d) 结果显示,当 Q 值减小时,滤波后的数据更加平滑,但快速性不好; Q 值越小,则对模型预测值越信任,系统收敛也越快; R 值越大,代表对测量值信任越低, R 值过低则系统表现为慢响应,会出现振荡。 $Q=1 \times 10^{-6}$ 、 $R=1 \times 10^{-2}$ 可同时保证收敛性和快速性,为当前最佳选择。

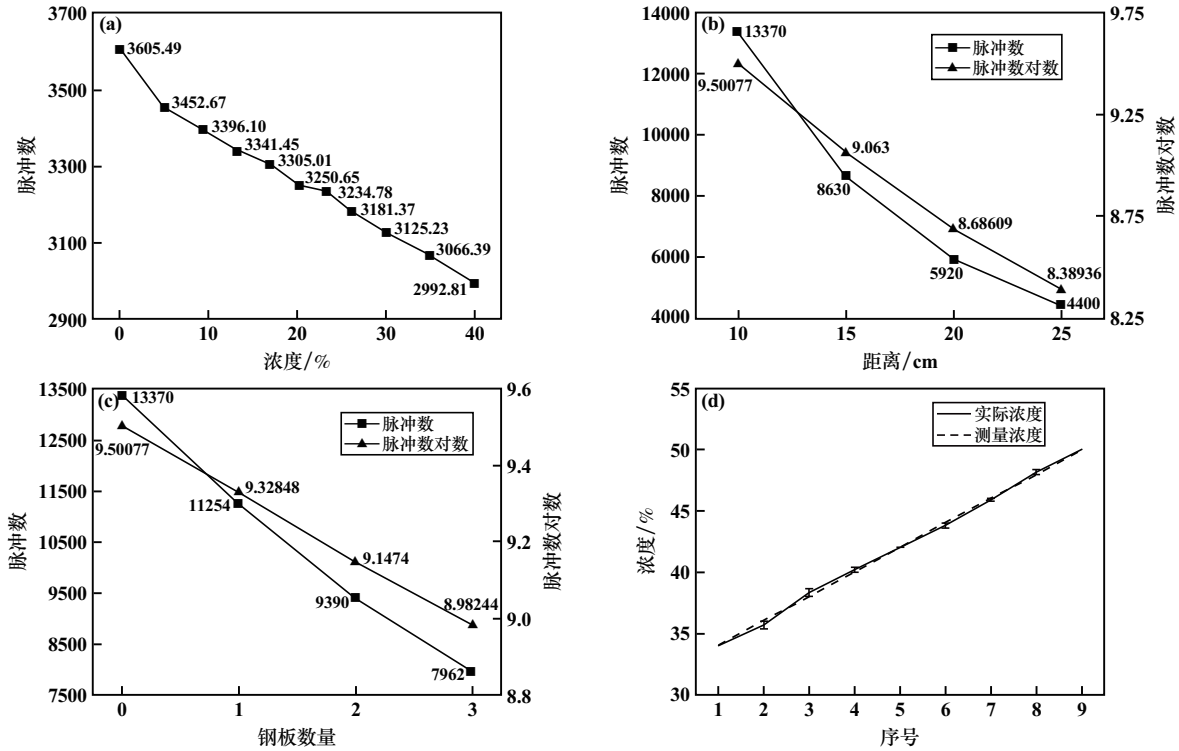
3.2 工业实际验证

为进一步验证所提方法的有效性,依次对工业现场实际的空管、0.5%、10% 等浓度进行测量,得到浓度与脉冲数对数的对应关系。采用最小二乘法分段拟合的方法对结果进行拟合,测试结果见图 6。



(a) 原始数据频数直方图; (b) 滤波后数据频数直方图; (c) 原始数据与滤波后数据对比; (d) 不同参数滤波结果对比

图5 原始数据及滤波结果



(a) 脉冲-浓度对应关系; (b) 间距的影响; (c) 钢板数量的影响(间距 10 cm); (d) 工业现场测试

图 6 测试结果

由图 6(a)可以看出,矿浆浓度与脉冲数对数呈负相关,随着浓度增加,信号接收器接收的脉冲数及脉冲对数逐渐降低,由此可见,放射源射线衰减基本与所穿透矿浆浓度呈负指数相关,基本符合预期线性关系。由图 6(b)和图 6(c)可得,随着间距变大或钢板数量增多,信号接收器接收的脉冲数及脉冲对数逐渐降低,放射源射线衰减与距离和所穿透物体的厚度呈负指数相关。测得衰减规律后,可以将脉冲数代入式(3)计算对应矿浆浓度。

工业现场测试结果表明,浓度计测量及时准确,最大误差 0.328 个百分点,均方根误差 0.194 个百分点,与实验室采样分析比对,误差在允许范围内。具体数据见表 1。

表 1 测试数据对比

实际浓度/%	测量浓度/%	误差/百分点
34	34.000	0
36	35.676	0.324
38	38.328	-0.328
40	40.201	-0.201
42	42.006	-0.006
44	43.793	0.207
46	45.887	0.113
48	48.177	-0.177
50	50.000	0

4 结 论

通过分析射线浓度计中射线强度衰减与矿浆浓度变化的关系,并探究 γ 射线探测器中闪烁体和光电倍增管中如何将测量的射线强度转化为电流脉冲信号,建立了射线强度与矿浆浓度的关系式。为改善测量过程中存在的噪声干扰和传感器探头转换非线性失真问题,创新性地引入卡曼滤波以改善测量结果,提高测量精度,并分析了滤波过程中超参数 Q (过程噪声方差) 和 R (观测噪声方差) 对滤波结果的影响。工业现场测试结果显示,本文提出的射线浓度计测量最大误差 0.328 个百分点,均方根误差 0.194 个百分点,表明该设备在现场使用时测量精度高、抗干扰能力强、运行稳定可靠,可广泛应用于矿浆浓度的测试。此外,该浓度计采用非接触式测量矿浆浓度,不会受到矿浆流速、压力、温度等因素的影响。综上所述,基于卡曼滤波的射线浓度计可有效检测矿浆浓度,且抗干扰能力强,在测量领域具有重要应用价值。

参考文献:

[1] 汪 洋,黄宋魏,唐 敏,等. 矿浆浓度检测技术及其应用研究[J]. 自动化仪表, 2022, 43(10): 96-100.

4 结 论

河北某钴镍矿石中的钴、镍元素部分以独立矿物形态存在,且存在原矿品位低、矿物成分多、钴氧化程度高、有用矿物嵌布粒度粗细不均、结构构造复杂、脉石矿物易泥化等特点。调整剂碳酸钠和石灰配合使用有助于节约成本、优化浮选环境,提高硫化钴回收率;选择六偏磷酸钠和羧甲基纤维素作为脉石组合抑制剂,有利于提高精矿品位;采用再磨不仅促进了细粒级矿物的解离还强化了硫化钠对氧化矿的硫化效果。通过两段磨矿、先浮选硫化矿再浮选氧化矿的异步浮选流程,可获得钴品位 2.00%、镍品位 3.90% 的混合硫化钴精矿和钴品位 1.47%、镍品位 2.73% 的混合氧化钴精矿,钴总回收率达到了 77.61%,镍总回收率达到了 79.20%,该流程克服了钴镍矿物氧化程度高、嵌布粒度粗细不均、脉石矿物泥化等不利影响,为钴镍的进一步提纯提供了较好原料。

参考文献:

[1] Dehaine Q, Tijsseling L T, Glass H J, et al. Geometallurgy of cobalt ores: A review[J]. Minerals Engineering, 2021,160:106656.

(上接第 37 页)

[2] 姚江,柳小波,王智强,等. 非接触式多通道矿浆浓度在线检测系统及方法[J]. 矿业研究与开发, 2021,41(9):154-158.

[3] 吴沅峻,张覃,黄宋魏,等. 磨矿分级智能控制研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2021,73(1):88-94.

[4] 吴西顺,邓杰,姜焕琴,等. 传感器驱动的智能选矿:过去、现在和将来[J]. 矿产综合利用, 2020,41(5):18-26.

[5] 尹坤,陈长正,干小宇,等. 非接触式在线核子密度计的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2013,33(9):1115-1118.

[6] ZHANG C L. Study on the regularity of the natural gamma-rays attenuation in the slurry water[J]. Advanced Materials Research, 2012, 468-471:1031-1035.

[7] Anfimov N, Fedoseev D, Rybnikov A, et al. Study of silicon photomultiplier performance at different temperatures[J]. Nuclear Instruments and

[2] 张惠,吴西顺,杨添天,等. 全球钴矿产的供应安全与技术创新[J]. 矿产综合利用, 2022(4):134-142.

[3] 于晓飞,公凡影,李永胜,等. 中国典型钴矿床地质特征及重点地区矿产资源预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022,52(5):1377-1418.

[4] 饶俊,刘鹏,杨炳飞. 冀南-邯邢铁尾矿理化特征及综合利用现状分析[J]. 中国矿业, 2018,27(1):100-104.

[5] 廖乾,程建国,李淮湘,等. 某含钴氧化铜矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2017,37(4):57-60.

[6] 高春庆,骆洪振,王海亮. 某共生硫钴磁铁矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(3):52-57.

[7] 赵玉卿,黄秉雄,刘磊,等. 蛇纹石、绿泥石、滑石的可浮性及抑制方法综述[J]. 矿产综合利用, 2018(2):7-11.

[8] 冯博,卢毅屏,冯其明. 绿泥石/蛇纹石聚集分散及抑制行为研究[J]. 稀有金属, 2016,40(2):167-171.

[9] 于志超,吴熙群,王立刚,等. 硫铜钴矿浮选行为研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(1):18-23.

[10] 欧乐明,尹冰一,冯其明,等. 某硫化-氧化混合型铜钴矿浮选工艺研究[J]. 金属矿山, 2009,39(2):75-78.

[11] 单志强,石少明,袁喜振. 刚果(金)某高氧化率铜钴矿选冶联合工艺试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):79-82.

引用本文: 田江涛,张凯熙,葛阳阳,等. 河北某低品位钴镍矿可选性试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):38-42.

Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021,997:165162.

[8] XIA J, QIAN S, WANG W, et al. A performance evaluation system for photomultiplier tubes[J]. Journal of Instrumentation, 2015,10(3):P03023.

[9] 高嵩,高瑞琢. γ 射线浓度计标定方法的研究[J]. 中国矿业, 2021,30(增刊1):148-150.

[10] Auger F, Hilairat M, Guerrero J M, et al. Industrial applications of the kalman filter: a review[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013,60(12):5458-5471.

引用本文: 肖晶峰,刘石梅,刘洋,等. 基于卡曼滤波的矿浆浓度计设计[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):34-37.