

# 基于 Mann-Kendall 自适应阈值和比例拟合补偿 浮选泡沫层厚度测量方法 \*

胡 爽, 高云鹏, 王俊霖, 谢 琴, 杨唐胜

(湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082)

**摘要:**针对现有浮选泡沫层厚度检测精度不高、分界面判定误差大、对复杂工况适应性差等问题,提出了一种基于 Mann-Kendall 自适应阈值和比例拟合补偿的浮选泡沫层厚度检测方法。首先,建立工业浮选过程泡沫层厚度检测电导率模型,分析矿浆层与泡沫层在电导率特性上的差异;其次,提出基于 Mann-Kendall 的趋势检验方法,通过判断整体电压序列的单调趋势识别是否存在泡沫层,并结合矿浆层与泡沫层在分界面处测量电压的差异,基于拉依达准则构建出适应不同工况的自适应阈值,实现分界面位置的准确判定;最后,根据泡沫层气含率与电导率的关系建立分界面等效电阻模型,提出基于矿浆层与泡沫层比例系数的泡沫厚度补偿算法,修正由工况扰动和泡沫不均匀性引起的测量偏差,据此实现浮选泡沫层厚度的准确测量。仿真和实测实验结果表明,Mann-Kendall 自适应阈值法在不同浮选工况下均能准确识别矿浆层与泡沫层分界面的位置,且相较于现有方法,提出的基于矿浆层比例系数拟合法能更好对整体泡沫层厚度进行拟合、具有更高的测量准确度,厚度补偿的绝对误差在 5 mm 以内,最终浮选泡沫层厚度实测误差在  $\pm 1$  cm 范围,满足浮选过程工业现场的泡沫层厚度测量要求,为浮选过程的实时监测与自动控制提供准确可靠的技术支撑。

**关键词:** 泡沫层厚度; 界面识别; Mann-Kendall; 自适应阈值法; 比例拟合

中图分类号: TH816 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510. 10

## A Mann-Kendall adaptive threshold and proportional-fitting-based measurement method for flotation froth layer thickness

Hu Shuang, Gao Yunpeng, Wang Junlin, Xie Qin, Yang Tangsheng

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** To address the issues of low detection accuracy in existing flotation foam-layer thickness measurement, large errors in interface determination, and poor adaptability to complex operating conditions, this paper proposes a thickness-detection method for flotation foam layers based on a Mann-Kendall adaptive threshold and proportional-fitting compensation. Firstly, an electrical conductivity model for industrial flotation processes is established, and the differences in conductivity characteristics between the pulp layer and the foam layer are analyzed. Secondly, a trend-testing method based on the Mann-Kendall statistic is introduced. By assessing the monotonic trend of the overall voltage sequence, the presence of a foam layer is identified. Combined with the voltage difference at the pulp-foam interface, an adaptive threshold suitable for various operating conditions is constructed based on the Pauta criterion to accurately determine the interface position. Finally, an equivalent-resistance model of the interface is established according to the relationship between gas holdup and foam-layer conductivity. A foam-thickness compensation algorithm based on the proportional coefficient between the pulp layer and the foam layer is proposed to correct measurement deviations caused by operating-condition disturbances and foam nonuniformity, thereby enabling accurate measurement of flotation foam-layer thickness. Simulation and field-measurement results show that the Mann-Kendall adaptive-threshold method can accurately identify the pulp-foam interface under different flotation conditions. Compared with existing methods, the proposed proportional-coefficient fitting approach provides better overall foam-layer thickness estimation with higher measurement accuracy. The absolute error of thickness compensation is within 5 mm, and the actual measurement error of the final

flotation foam layer thickness is within  $\pm 1$  cm, which meets the requirements for measuring the foam layer thickness in the industrial field of the flotation process and provides accurate and reliable technical support for the real - time monitoring and automatic control of the flotation process.

**Keywords:** flotation foam-layer thickness; interface recognition; Mann-Kendall; adaptive threshold method; proportional fitting

## 0 引言

浮选是当前细粒和极细粒物料分选中应用最广、效果最佳的选矿方法,为原矿洗选加工提高精矿产率的重要手段<sup>[1]</sup>。在浮选过程中,泡沫层厚度作为反映浮选效率和稳定性的重要参数,直接关系着浮选回收率和精矿品位水平<sup>[2]</sup>。

现有泡沫层厚度检测技术包括浮子式检测法、压差检测法、电容检测法、视觉图像检测法等,存在机械结构老化、易受密闭空间环境影响、测量误差较大等弊端<sup>[3]</sup>。为克服上述不足,研究者开始尝试基于电导率特性的检测方法。Moys 等<sup>[4]</sup>率先提出利用矿浆与泡沫层间电导率的差异确定界面的思路。Chambers 等<sup>[5]</sup>在讨论河流阶地砂砾层储量估算时提出了利用“最大斜率”法来定位分界面的位置。Del Villar 等<sup>[6]</sup>根据电导率的变化拐点快速确定矿浆层与泡沫层的分界面。Maldonado 等<sup>[7]</sup>提出在界面附近对电导率进行加权平均,以减小神经网络对大量实验样本的依赖。Perez 等<sup>[8]</sup>提出使用神经网络模型模拟偏置与电导率曲线间关系。上述研究表明电导率法检测浮选泡沫层厚度具备可行性,但当面对复杂的工况环境时,测量算法对分界面检测的准确性及对干扰的处理需进一步研究与提升。

为适应工业浮选过程中矿浆的腐蚀,Xu 等<sup>[9]</sup>提出了一种基于视觉特征的泡沫层厚度多模型软测量方法,适合工业现场信号受噪声和干扰时来测量泡沫层厚度。Zhang 等<sup>[10]</sup>针对工业浮选泡沫图像的处理,提出了一种基于 Retinex 图像补偿方法的区域自适应和多尺度实现,以解决均匀光照不均和阴影影响浮选泡沫图像的问题。Richter 等<sup>[11]</sup>则采用超声波传输时间技术用于检测和测量分界面的位置。这些非侵入式方法虽有效解决了浮选泡沫层厚度测量过程中适应矿浆腐蚀等问题,但测量准确度和实时性尚待提高。

据此,本研究提出了一种基于 Mann-Kendall 自适应阈值和比例拟合补偿的浮选泡沫层厚度测量方法,在现有采用电极环测量分界面处电导率分布基础上,基于 Mann-Kendall 自适应阈值检测准确识别泡沫层与矿浆层的分界面,并构建分界面电阻等效模型,提出比例拟合法对泡沫层厚度进行补偿,最后通过仿真实验和实测实验对提出方法的有效性和准确性进行验证与分析。

## 1 浮选泡沫层厚度检测机理

### 1.1 浮选泡沫层厚度检测模型构建

工业浮选过程利用不同单体颗粒的疏水性差异来进行矿物分选<sup>[12]</sup>,根据组成成分将浮选设备从下往上粗略划分为矿浆层、泡沫层和空气层。根据矿物的成分加入起泡剂、捕收剂、调整剂等化学药剂,与矿浆作为浮选设备的输入原料,从高处加入并受到重力下沉,在浮选设备中搅拌和充气的作用下,矿浆中疏水性较大的颗粒与气泡相遇接触,即目标矿物颗粒附着气泡形成矿化气泡上浮至矿浆液面,气泡不断增加富集形成泡沫层,经机械刮板或在湍流作用下流出溢流口,获得精矿产品并进入后续流程。疏水性较小的颗粒由于无法附着在气泡上随着矿浆下沉至浮选设备底部作为尾矿产品排出。基于工业浮选过程,构建浮选泡沫层厚度检测模型<sup>[13]</sup>如图 1 所示。

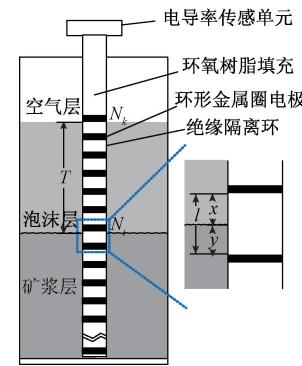


图 1 泡沫层厚度检测模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the detection model for foam layer thickness

如图 1,其中电导率传感单元由  $n$  个环形金属圈电极与  $n-1$  个绝缘隔离环依次相接构成,整体结构为表面光滑的圆柱形,有效减小矿浆与矿化泡沫的附着面积。 $T$  为泡沫层厚度,  $l$  为环间距,泡沫层与矿浆层的分界面中泡沫层厚度为  $x$ ,矿浆层厚度为  $y$ , $N_i$  为检测到分界面的电极环数, $N_k$  为检测到空气层所在的电极环数。电导率传感单元放置于浮选柱中时,矿浆层与泡沫层的分界面、泡沫层与空气层的分界面可能在电极环上,也可能位于两个电极环间。当矿浆层与泡沫层分界面位于电极环

上时,下一个电极组中全为泡沫层,记当前电极环为检测到分界面的电极环数  $N_i$ ;当分界面位于两电极环之间如第  $i-1$  电极环与第  $i$  电极环,记第  $i$  电极环为检测到分界面的电极环数  $N_i$ 。当泡沫层与空气层的分界面位于第  $k-1$  电极环上或者第  $k-1$  电极环与第  $k$  电极环之间,记第  $k$  电极环为检测到空气层所在的电极环数  $N_k$ 。由此,可得泡沫层厚度  $T$  的计算式为:

$$T = (N_k - N_i) \cdot l + x \quad (1)$$

根据泡沫层厚度检测模型,需判断出正确的分界面位置,即得到分界面的电极环数  $N_i$  与空气层所在的电极环数  $N_k$ ,进一步计算分界面处的泡沫层厚度  $x$ 。

## 1.2 矿浆层与泡沫层分界面特性分析

将电导率传感单元置于矿浆中,环形金属圈电极从矿浆层到泡沫层以及空气层依次标号,分别测量 5% 与 15% 不同矿浆浓度原铁矿矿浆下电导率传感单元各电极组的电压值,实验结果如图 2 所示。

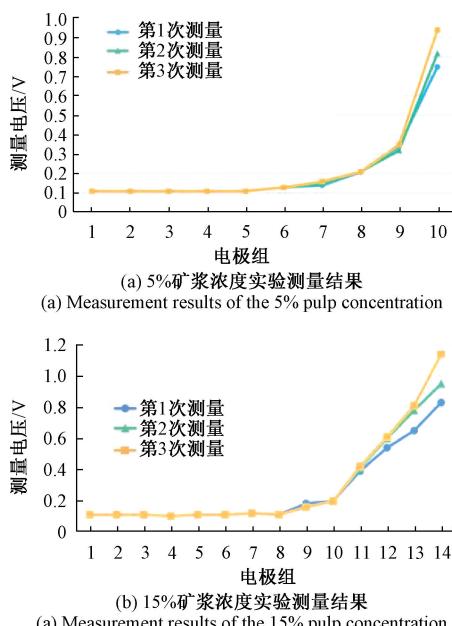


图 2 实验结果  
Fig. 2 Experimental result

在 5% 原铁矿矿浆实验中,1~7 号环形金属圈电极位于矿浆层中,8~11 号环形金属圈电极位于泡沫层中,其余电极位于空气层。由图 2(a) 可见,第 1~ 第 5 电极组测量电压较小且稳定,第 6 电极组测量电压开始逐渐增大,而对于第 11 电极组由于电流源不能开路,因此无法测量电压值。

在 15% 原铁矿矿浆实验中,1~8 号环形金属圈电极位于矿浆层中,9~15 号环形金属圈电极位于泡沫层中,其余电极位于空气层。由图 2(b) 可见,第 1~ 第 8 电极

组测量电压较小且稳定,第 9~ 第 14 电极组电压依次增大,第 15 电极组后无法测得数据结果。

综上分析可知,矿浆层导电能力强且稳定,矿浆层中测量电压稳定在一个较小值。矿浆中包含部分目标矿物在激励影响下具备更强导电能力,且对于传感单元附近与矿浆接触部分的导电能力稳定性影响较小;泡沫层间导电能力变化明显。泡沫层的导电能力逐渐减弱,表现为测得泡沫层的电压依次增强。泡沫层中气泡随着上浮逐渐增大,对电流阻碍作用增强,降低泡沫层的导电能力,泡沫层越厚,该变化趋势越缓慢;矿浆层与泡沫层分界面前后测量电压变化明显。分界面处测量电压不同于矿浆层测量电压,分界面处测量电压突然增大且后续电极组测量电压持续增大,通过该特性可有效分辨矿浆层与泡沫层的分界面。

## 2 基于 Mann-Kendall 自适应阈值和比例拟合补偿的浮选泡沫层厚度检测

### 2.1 Mann-Kendall 自适应阈值分界面检测

#### 1) Mann-Kendall 趋势检验

基于泡沫层厚度检测模型并根据分界面特性分析可知,矿浆层和泡沫层电导率存在较大差异,由此可以利用此差异通过趋势检验方法判断浮选过程中是否存在分界面。Mann-Kendall 趋势检验在于验证是否应当拒绝“不存在单调趋势”这一假设,并进而接受“存在单调趋势”的假设<sup>[14-15]</sup>。设采样获得电极环中电压序列为  $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , 第  $j$  个电压值大于第  $i$  个电压值时,记其符号为正,否则即为负,即:

$$\text{sgn}(v_j - v_i) = \begin{cases} 1, & v_j > v_i \\ 0, & v_j = v_i, 1 \leq i < j \leq n \\ -1, & v_j < v_i \end{cases} \quad (2)$$

因此,第  $j$  个电压值大于第  $i$  个电压值的统计量  $S$  为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n \text{sgn}(v_j - v_i) \quad (3)$$

计算采样电压序列  $S$  的均值和方差为:

$$\begin{cases} E(S) = 0 \\ \text{Var}(S) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{18} \end{cases} \quad (4)$$

定义标准化后的检验统计量为  $Z$  表示电压变化趋势,有:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

在双边趋势检验中,对于给定显著性水平  $\alpha$ ,若  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ ,则说明采样序列存在明显趋势变化,则没有单调趋势的假设是不可接受的,即在显著性检验水平上,采样电压数据存在明显的上升或下降趋势<sup>[16]</sup>。且  $Z > 0$  时,表明采样电压序列呈上升趋势; $Z < 0$  时,表明采样电压序列呈下降趋势。当检测到无泡沫层厚度时,使相对电压计算得到  $Z$  值为 0(本研究中的相对电压为实际测量电压与预设空气中电压的比值),而存在泡沫层厚度时, $Z$  值明显增大,表明 Mann-Kendall 趋势检验能敏锐分辨当前传感单元所在位置是否存在分界面,从而验证当前测量浮选过程是否存在泡沫层厚度。

## 2) 自适应阈值分析

Mann-Kendall 检验法只是对电压序列整体趋势进行分析,不能明确分辨出电导率变化的具体位置<sup>[17]</sup>,因此需进一步研究如何分辨电导率变化较大的位置。考虑矿浆层、泡沫层导电特性差异,矿浆层电压值稳定且保持在一个范围内波动,泡沫层电压值与矿浆层相对电压具有明显差异且在稳定变化,针对该特性根据矿浆层与泡沫层电压值变化存在某一明显阈值特征开展矿浆层和泡沫层分界面的位置判断研究。为能自动判断出不同浮选工况下不同成分矿浆层与泡沫层分界面位置,该阈值需根据每次测量矿浆层电压自动调整,而不是某一明确值。

参考拉依达准则(也称  $3\sigma$  准则)对该分界面进行阈值的自动判断,拉依达准则建立在数据符合正态分布情况下<sup>[18]</sup>。在显著性水平为 0.03 时,如果一组数据序列中,某个数据的剩余误差绝对值  $> 3$  倍的序列标准偏差,则该数据为粗大误差,说明当前值与序列之前的值差异明显。在实际测量过程中,由于气泡不停的自下往上,使得泡沫层测量电压值与矿浆层电压值差异明显,可根据上述拉依达准则构建阈值。对于电极组测量电压序列  $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ,设矿浆层与泡沫层分界面位于  $m$  ( $1 < m \leq n$ ) 电极组处,则在一般情况下,前  $m-1$  对测量电压基本趋于稳定,有:

$$\bar{v} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m-1} v_i \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{m-2} \sum_{i=1}^{m-1} (v_i - \bar{v})^2} \quad (7)$$

式中:  $\bar{v}$  为前  $m-1$  对测量电压的均值;  $S$  为前  $m-1$  对测量电压的标准差。

当第  $m$  电极组的测量电压超出前序的  $m-1$  对电极组电压变化范围时,即:

$$v_m \geq (\bar{v} + 3S) \quad (8)$$

因此,当前电极组测量电压序列的阈值  $\theta$  为:

$$\theta = \bar{v} + 3S \quad (9)$$

在实际计算过程中,根据式(9)计算每次电极组的测量电压是否大于等于该阈值,若当前电极组测量电压

大于该阈值,则认为当前电极组为分界面所在位置。由于该阈值是根据每次测量矿浆电压值重新计算而不为某一定值,由此可实现阈值的自适应调整,从而实现分界面的自适应判断。为方便算法对各种不同浮选工况的适应,设  $\lambda$  为阈值系数,则阈值  $\theta$  为:

$$\theta = \bar{v} + \lambda S \quad (10)$$

## 2.2 比例拟合泡沫层厚度补偿

由于实际无法稳定控制分界面处两电极间的泡沫层厚度,在鼓气量不变情况下,矿浆层与泡沫层分界面不停起伏,使通过实验测量得到的电压值无法对两电极间不同泡沫层厚度准确对应,所以分界面处的厚度不能根据当前电极组的相对电压进行直接换算。因此,还需根据浮选泡沫层厚度检测装置测量得到的相对电压拟合出分界面处的泡沫层厚度,进而完成泡沫层厚度测量结果的补偿。

构建分界面处等效电阻模型如图 3 所示,对于分界面前后的电极位置,假设电极组之间电导率均匀,上下两个电极组电导率存在差异,此时测得的相对电压表示两电极间溶液的电导率大小。

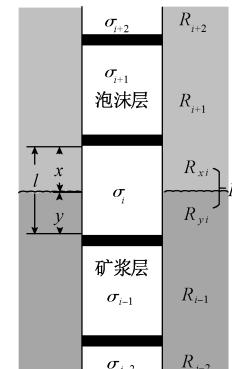


图 3 分界面处等效电阻示意图

Fig. 3 Equivalent resistance diagram at the interface

由图 3 可见,当矿浆层和泡沫层都将传感单元包裹时,矿浆层与泡沫层的分界面处于第  $i$  电极组间,前后电极组的等效电阻分别为  $R_{i-2}$ 、 $R_{i-1}$ 、 $R_i$ 、 $R_{i+1}$  和  $R_{i+2}$ ,  $l$  为环间距,  $x$  为当前极间泡沫层的厚度,  $y$  为当前极间矿浆层的厚度。假设两两电极间电导率均匀,上下电极间电导率存在变化,此时电极组间的电导率分别为  $\sigma_{i-2}$ 、 $\sigma_{i-1}$ 、 $\sigma_i$ 、 $\sigma_{i+1}$  和  $\sigma_{i+2}$ 。此时,分界面处的等效电阻  $R_i$  为:

$$R_i = R_{xi} + R_{yi} \quad (11)$$

式中:  $R_{xi}$  为分界面中泡沫层的等效电阻;  $R_{yi}$  为分界面中矿浆层的等效电阻。

根据电阻定律  $R = \rho \cdot \frac{l}{s}$  以及电阻率  $\rho$  与电导率  $\sigma$  成反比的关系,等效电阻与距离正相关,与电导率反相关,将电阻替换后可得:

在实际计算过程中,根据式(9)计算每次电极组的测量电压是否大于等于该阈值,若当前电极组测量电压

$$\frac{l}{\sigma_i} = \frac{x}{\sigma_{xi}} + \frac{y}{\sigma_{yi}} \quad (12)$$

式中:  $\sigma_{xi}$  为分界面中泡沫层的电导率;  $\sigma_{yi}$  为分界面中矿浆层的电导率。

由于分界面中泡沫层厚度  $x$  与矿浆层厚度  $y$  之和为环间距  $l$ , 则结合式(12)将  $y$  替换, 可得泡沫层厚度  $x$  的计算式为:

$$x = l \cdot \frac{\frac{1}{\sigma_i} - \frac{1}{\sigma_{yi}}}{\frac{1}{\sigma_{xi}} - \frac{1}{\sigma_{yi}}} \quad (13)$$

而电导率的倒数为电阻率, 为简便计算进行替换有:

$$x = l \cdot \frac{\rho_i - \rho_{yi}}{\rho_{xi} - \rho_{yi}} \quad (14)$$

式中:  $\rho_{xi}$  为分界面中泡沫层的电阻率;  $\rho_{yi}$  为分界面中矿浆层的电阻率。

因为环间距  $l$  为定值, 所以泡沫层厚度只与电阻率有关, 由此将电阻之间的关系转化为泡沫层厚度与电阻率之间的关系。由于分界面中矿浆层电阻率与泡沫层电阻率无法通过此时的电极组直接求出, 此时的相对电压代表矿浆层与泡沫层整体的电阻率  $\rho_i$ 。

根据等效电阻模型并基于气含率与电导率的关系, 提出比例拟合补偿方法, 根据比例系数对当前分界面所在位置进行性质判断, 进而根据不同性质进行补偿。由于分界面处存在矿浆层和泡沫层, 分别对泡沫层比例系数和矿浆层比例系数进行分析。

针对泡沫层比例系数, 定义泡沫层比例系数为:

$$\eta_{i+1} = \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} \quad (15)$$

泡沫层比例系数  $\eta_{i+1}$  表示第  $i$  个电极组与第  $i+1$  个电极组(泡沫层)的电阻率的相似程度, 当  $\eta$  接近于 1 时, 说明第  $i$  个电极组间基本为矿化泡沫; 当  $\eta < 0.5$  时, 极间的矿化泡沫较少, 需减少对泡沫层的衡量。当前极间泡沫层的厚度  $x$  为:

$$x = \begin{cases} 0.5\eta_{i+1}l, & 0 < \eta_{i+1} < 0.5 \\ \eta_{i+1}l, & 0.5 \leq \eta_{i+1} < 1 \end{cases} \quad (16)$$

针对矿浆层比例系数, 定义矿浆层比例系数为:

$$\eta_{i-1} = \frac{\rho_{i-1}}{\rho_i} \quad (17)$$

矿浆层比例系数表示第  $i$  个电极组与第  $i-1$  个电极组(矿浆层)电阻率的相似程度, 当  $\eta$  接近于 1 时, 说明第  $i$  个电极组间基本为矿浆, 当前极间泡沫层厚度  $x$  为:

$$x = \begin{cases} 1.5(1 - \eta_{i-1})l, & 0 < \eta_{i-1} \leq 0.5 \\ (1 - \eta_{i-1})l, & 0.5 < \eta_{i-1} < 1 \end{cases} \quad (18)$$

分界面处  $\eta$  通常不等于 1, 否则将不会判断到分界

面。当比例系数  $> 0.5$  时, 说明当前的分界面中矿浆层占比更多, 而矿化泡沫较少; 反之则矿化泡沫更多, 需增大对泡沫层厚度的衡量, 由于矿浆层占比低于 50%, 因此相应提高泡沫层的占比。

在实际测量过程中矿浆层电阻率基本稳定, 在分界面处受到矿化气泡的影响相对于泡沫层更小<sup>[19]</sup>, 使用矿浆层的电压对分界面进行拟合较准确。

### 3 浮选泡沫层厚度测量仿真验证

为验证基于 Mann-Kendall 自适应阈值和比例拟合补偿的浮选泡沫层厚度测量效果, 利用 COMSOL Multiphysics 软件建立浮选过程泡沫层厚度仿真模型, 通过获得两电极间不同泡沫层厚度对应的电压值, 为泡沫层厚度检测补偿方法提供足够的数据支撑, 构建浮选过程泡沫层厚度仿真模型<sup>[20]</sup> 如图 4 所示。

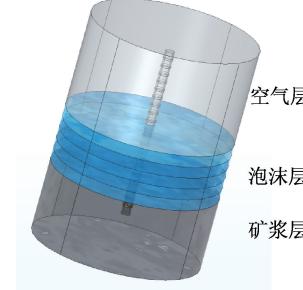


图 4 浮选过程泡沫厚度仿真模型

Fig. 4 Simulation model of foam thickness in flotation process

由图 4 可见, 模型外部圆柱体为浮选柱多相流分层静态物理仿真模型, 浮选柱内自下而上分为矿浆层、泡沫层、空气层这 3 种物理流体模型, 浮选柱内部嵌入多电极的传感单元物理仿真模型, 传感单元贯穿 3 层物理流体模型。建立浮选过程泡沫层厚度仿真模型后, 选取一对相邻电极分别作为激励电极与测量电极, 注入激励电流后对测量电极电压进行测量, 然后再选取该测量电极的另一相邻电极作为激励电极, 并重复上述过程直到所有电极对测量结束。

设置完成激励与测量方式, 对模型内场域进行网格剖分和设定物理场, 模型网格剖分结果如图 5 所示, 将模型敏感场规则剖分为多个独立的三角网格单元, 使用有限元法对每个独立的三角网格单元进行求解, 继而把所有独立的单元集合得到传感单元整个场域的离散解。

浮选过程泡沫层厚度检测仿真模型仿真结果如图 6 所示。

图 6 中图例为电极上的电位值, 其单位为 V。传感单元的 1~5 号电极位于矿浆层, 5~11 号电极位于泡沫

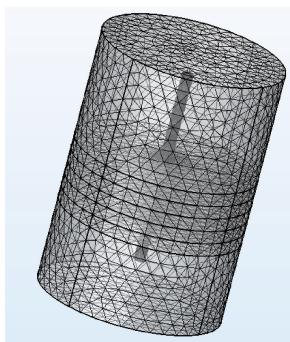


图 5 模型网格剖分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of model grid subdivision

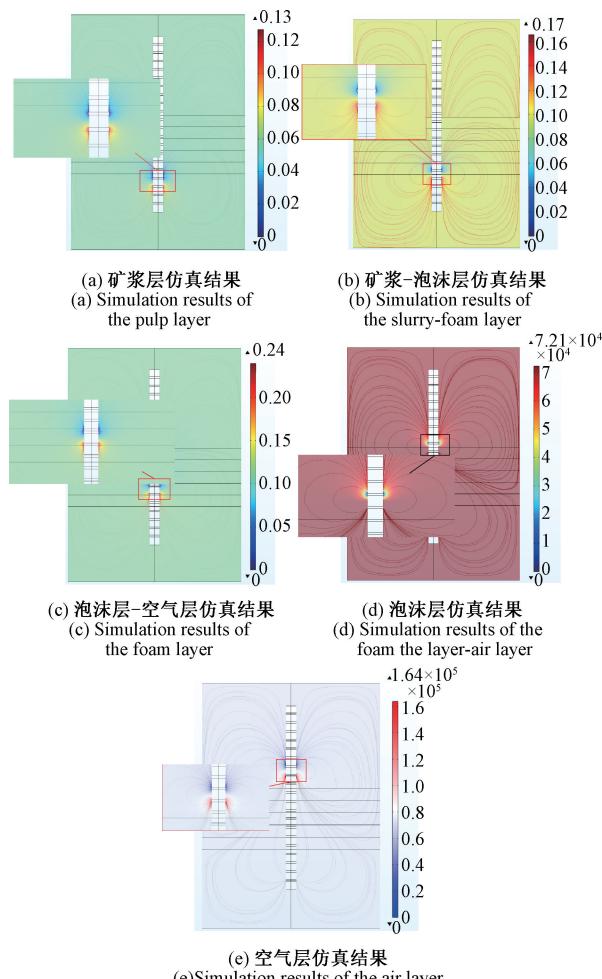


图 6 仿真结果

Fig. 6 Simulation result graph

层,其余电极位于空气层。由图 6(a)可见,3~4 号电极设置为激励电极与测量电极,此时位于矿浆层中时,测量电压相对较小;由图 6(b)可见,4~5 号电极设置为激励电极与测量电极,此时位于矿浆层与泡沫层的分界面,测量电压增大;由图 6(c)可见,6~7 号电极设置为激励电

极与测量电极,此时位于泡沫层中,测量电压继续增大,与实验结果一致。

而当激励电极有一个甚至两个位于空气中时,由图 6(d)和(e)可见测量电压增大了多个数量级,是由于在空气中电导率无限接近于 0,此时测得的电压无限大,而在仿真模型计算过程中,空气层电导率设置为零会影响计算过程,故空气层的电导率需设置更小。

综上可知,基于 Mann-Kendall 自适应阈值算法可根据电极环测得的电压准确找到分界面的位置,且对于后续检测装置的设计,为避免空气环中测量不到电压值,需在测量过程中定义 AD 采样的最大值,每个电极组的测量电压与空气电压值的比记为相对电压,用于描述当前电导率的大小关系,相对电压接近于 1 说明测量电极组的电导率较低,相对电压接近于 0 说明测量电极组的电导率较高。

## 4 浮选泡沫层厚度测量实测与验证

### 4.1 实验平台搭建

为验证基于 Mann-Kendall 自适应阈值和比例拟合补偿的浮选泡沫层厚度方法实测的有效性和准确性,利用小型浮选柱构建实测实验平台进行浮选泡沫层厚度的测量,实测实验平台如图 7 所示。实验平台包括传感单元夹具、浮选透明柱体、气盘、底流阀、出水口、进气管、气阀和压力表各部分构成。其中,传感单元夹具设置在浮选柱顶部用于固定电导率传感单元,浮选透明柱体内径为 0.2 m、高 1.5 m,并在其外表面贴上标尺,有利于实验过程中观察实际分界面,其底部与气盘顶部连接,使得空气进气口能够充分向浮选柱体内扩散,气盘底部连接进气管和排水管。

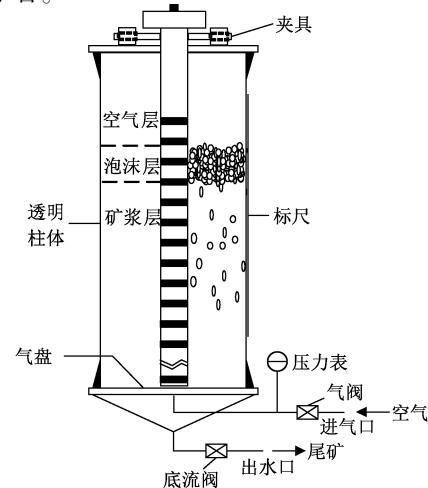


图 7 小型浮选柱实验平台示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the small-scale flotation column experimental platform

## 4.2 实测结果与分析

现场中影响泡沫层厚度的因素有很多,如矿浆浓度、鼓气量、药剂加入量等<sup>[21]</sup>,在实测实验过程中,为模拟浮选过程的溢流口,分别配置 5%、15% 和 30% 的原铁矿矿浆浓度的实验,并在测量过程中通过控制气阀来对鼓气量大小进行控制,实现泡沫层厚度大小的控制。为模拟不同矿物对测量结果的影响,在矿浆浓度为 30% 实验过程中,依次加入氧化铜、氧化铅、氧化锌设置多组实验对浮选泡沫层厚度检测装置进行检验。

### 1) 无泡沫层厚度

首先不加入任何矿浆,当前测量电极完全位于空气中,接入到测量电极中的等效电阻无穷大,理论相对电压为 1,各电极电压测量结果如图 8 所示,所有电极组相对电压均为 1。

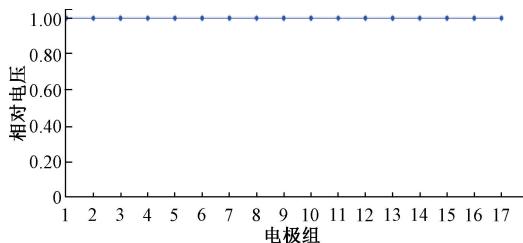


图 8 无矿浆时电极电压测量结果

Fig. 8 The measurement results of electrode voltage without pulp

加入配置好的矿浆后,完全关闭气阀,浮选柱中只有矿浆液位,检测到空气高度与矿浆高度一致,此时各电极电压测量结果如图 9 所示。

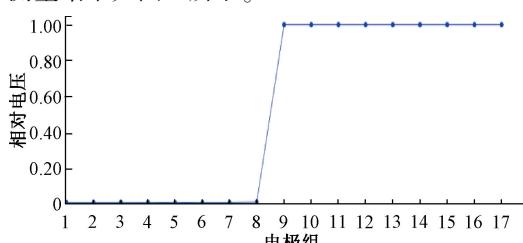


图 9 加入矿浆时电极电压测量结果

Fig. 9 The measurement results of electrode voltage when pulp is added

由图 9 可见,相对电压折线图中前 8 个电极组相对电压接近于 0,第 9 个电极组之后的相对电压为 1,这表明空气层的分界面位于第 9 个电极组处,矿浆层的分界面也位于第 9 个电极组,此时液位所在高度与空气所在高度一致,泡沫层厚度计算结果为 0。

上述测试中,基于 Mann-Kendall 趋势检验方法判断出当前相对电压不存在单调递增趋势,当前浮选过程为无泡沫层厚度,不作后续泡沫层厚度补偿计算。

### 2) 有泡沫层厚度

在加入配置好的矿浆后,调整气阀开合度,使矿浆开始充分搅拌形成泡沫层,为方便将实际矿浆层与泡沫层分界面与测量结果进行对比,将矿浆泡沫层控制在稳定的界面时,读取当前泡沫层厚度,此时各电极电压测量结果如图 10 所示。

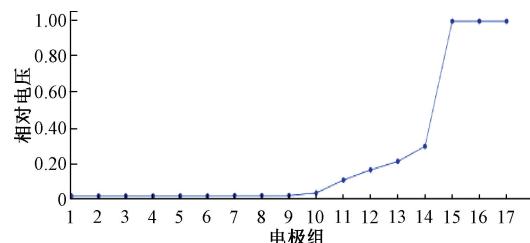


图 10 泡沫层变化时电极电压测量结果

Fig. 10 Measurement results of electrode voltage when the foam layer changes

由图 10 可见,相对电压折线图中前 9 个电极组相对电压接近于 0,第 15 个电极组相对电压为 1,基于 Mann-Kendall 趋势检验方法判断出当前相对电压存在单调递增的趋势,根据自适应阈值方法检测到分界面在第 10 电极组,空气和泡沫层的分界面位于第 15 电极组,经过计算得到液位层高度为 492.914 mm,空气层高度为 728 mm,此时泡沫层厚度为 235.086 mm。

不同配比的实验方案测量结果由表 1 和 2 所示,实验中按矿浆浓度与成分进行划分,控制鼓气量以及调配不同的浮选药剂用量用于不同的泡沫层厚度控制,每组测量 5 种不同的泡沫层厚度,将测量结果与实际泡沫层厚度进行对比。

由表 1 可知,在不同矿浆浓度和加入其他成分的泡沫层厚度测量结果的绝对误差最大为 30 mm,最小为 2.2 mm。这是因为在实验过程中,空气环所在高度受到传感单元的限制,且空气中电导率近似为 0,即电阻率为无穷大,无法检测出泡沫层与空气层分界面处的相对电压,使得不能通过补偿算法对这一高度进行准确测量。

在算法部署过程中,对这一补偿取值为一半的环间距,这会使得绝对误差增大。因此,根据浮选实际情况,设置高于泡沫层处的第 1 个电极环为溢流口,即空气环位置,空气层高度为定值,浮选泡沫层厚度最高不超过溢流口,这样测量误差仅来源于矿浆-泡沫层分界面。表 2 是设置溢流口后的实验结果,由表 2 可知,在不同矿浆浓度和加入其他成分的泡沫层厚度测量结果的最大绝对误差为 10 mm,最小为 1 mm,表明基于 Mann-Kendall 自适应阈值和比例拟合补偿的浮选泡沫层厚度测量方法的测量误差为  $\pm 1$  cm,满足浮选工业现场检测需求。

表1 不同矿浆浓度的测量误差对比(一)

Table 1 Comparison of measurement errors for different mineral slurry concentrations (I) (mm)

实验	次数	实际值	测量值	绝对误差
5%浓度 原铁矿矿浆	1	40	21.0	19.0
	2	90	69.2	20.8
	3	140	125.0	15.0
	4	180	152.5	27.5
	5	281	305.7	24.7
15%浓度 原铁矿矿浆	1	80	67.4	12.6
	2	110	96.1	13.9
	3	165	152.5	12.5
	4	240	222.0	18.0
	5	260	257.8	2.2
30%浓度 原铁矿矿浆	1	200	173.1	26.9
	2	230	206.7	23.3
	3	280	258.6	21.4
	4	390	360.0	30.0
	5	430	410.7	19.3
30%浓度 原铁矿矿浆加入 氧化铜	1	170	147.3	22.7
	2	230	202.6	27.4
	3	300	281.0	19.0
	4	340	327.4	12.6
	5	375	380.2	5.2
30%浓度 原铁矿矿浆加入 氧化铜、氧化铅	1	185	170.0	15.0
	2	230	227.8	2.2
	3	280	271.3	8.7
	4	320	304.1	15.9
	5	400	385.0	15.0
30%浓度 原铁矿矿浆加入 氧化铜、氧化铅、 氧化锌	1	180	164.9	15.1
	2	250	228.3	21.7
	3	290	266.6	23.4
	4	340	310.8	29.2
	5	395	381.1	13.9

表2 不同矿浆浓度的测量误差对比(二)

Table 2 Comparison of measurement errors for different mineral slurry concentrations (II) (mm)

实验	次数	实际值	测量值	绝对误差
5%浓度 原铁矿矿浆	1	20	21.0	1.0
	2	70	73.0	3.0
	3	120	125.0	5.0
	4	160	155.3	4.7
	5	320	325.9	5.9
15%浓度 原铁矿矿浆	1	60	67.4	7.4
	2	90	96.4	6.4
	3	145	152.5	7.5
	4	220	222.0	2.0
	5	250	256.5	6.5
30%浓度 原铁矿矿浆	1	180	173.1	6.9
	2	210	205.7	4.3
	3	260	254.1	5.9
	4	370	360.0	10.0
	5	410	407.4	2.6
30%浓度 原铁矿矿浆加入 氧化铜	1	150	147.1	2.9
	2	210	202.6	7.4
	3	280	281.0	1.0
	4	320	327.4	7.4
	5	370	379.4	9.4
30%浓度 原铁矿矿浆加入 氧化铜、氧化铅	1	165	170.0	5.0
	2	220	227.8	7.8
	3	270	271.3	1.3
	4	300	305.8	5.8
	5	380	385.0	5.0
30%浓度 原铁矿矿浆加入 氧化铜、氧化铅、 氧化锌	1	160	164.9	4.9
	2	230	228.3	1.7
	3	270	266.6	3.4
	4	320	310.8	9.2
	5	375	381.1	6.1

## 5 结 论

针对目前基于电导率的泡沫层厚度检测精度不高、分界面识别误差大的问题,本研究提出了一种基于Mann-Kendall自适应阈值和比例拟合补偿的浮选泡沫层厚度测量方法,仿真与实测实验结果表明:基于Mann-Kendall自适应阈值法在不同工况下均能准确识别出分界面位置,利用矿浆层比例系数作为泡沫层厚度检测的补偿算法,能更好对整体泡沫层厚度进行拟合,有效克服了分界面处电压无法准确测量导致厚度测量的误差,具有更高的测量准确度,最终泡沫层厚度实测误差在 $\pm 1$  cm,满足浮选过程工业现场的测量要求,有效提升了整体矿浆浮选效率和最终产品质量。

## 参考文献

- [1] 高文宇, 冯中爱, 仇庆敏, 等. 浮选泡沫环境下液位检测装置的设计与应用[J]. 选煤技术, 2021(3): 86-90.
- [2] GAO W Y, FENG ZH AI, QIU Q M, et al. Design and application of the liquid level meter for use in the presence of accumulated layer of secondary flotation foam[J]. Coal Preparation Technology, 2021 (3): 86-90.
- [3] 顾帼华, 李青柯, 巫銮东, 等. 微细粒矿物浮选技术在磨矿-调浆-分选体系的研究进展[J]. 矿冶工程, 2023, 43(2): 40-43.
- [4] GU G H, LI Q K, WU L D, et al. Progress in research of micro-fine mineral flotation technology in terms of grinding, pulping and separation system[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(2): 40-43.
- [5] NAKHAEI F, IRANNAJAD M, MOHAMMADNEJAD S. A comprehensive review of froth surface monitoring as an aid for grade and recovery prediction of flotation process. Part A: Structural features[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023, 45(1): 2587-2605.
- [6] MOYS M H, FINCH J A. Developments in the control of flotation columns [J]. International Journal of Mineral Processing, 1988, 23(3/4): 265-278.
- [7] CHAMBERS J E, WILKINSON P B, PENN S, et al. River terrace sand and gravel deposit reserve estimation using three-dimensional electrical resistivity tomography for bedrock surface detection [J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 93(2): 25-32.
- [8] DEL VILLAR R, GREGOIRE M, POMERLEAU A. Automatic control of a laboratory flotation column [J]. Minerals Engineering, 1999, 12(3): 291-308.
- [9] MALDONADO M, DESBIENS A, DEL VILLAR R. An update on the estimation of the froth depth using conductivity measurements [J]. Minerals Engineering, 2008, 21(12/14): 856-860.
- [10] PEREZ R, DEL VILLAR R, FLAMENT F. Level detection in a flotation column using an artificial neural network [C]. Proceedings of the 24th APCOM, 1993, 3: 174-181.
- [11] XU D G, CHEN Y W, CHEN X, et al. Multi-model soft measurement method of the froth layer thickness based on visual features[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2016, 154: 112-121.
- [12] ZHANG W K, LIU D, WANG CH J, et al. An improved Python-based image processing algorithm for flotation foam analysis[J]. Minerals, 2022, 12(9): 1126.
- [13] RICHTER T, HEITKAM S, ODENBACH S, et al. Detection of the pulp-froth interface using the ultrasound transit time technique[J]. Minerals Engineering, 2021, 160: 106679.
- [14] 赵佳铭, 周晓君, 高媛, 等. 基于多目标学习的泡沫浮选过程工况识别[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2022, 53(6): 2071-2079.
- [15] ZHAO J M, ZHOU X J, GAO Y, et al. Working condition recognition of froth flotation process based on multi-objective learning [J]. Journal of Central South University ( Science and Technology ), 2022, 53 ( 6 ): 2071-2079.
- [16] 陈启标, 高云鹏, 杨唐胜, 等. 浮选液位测量用高精度差分恒流源设计与优化[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(8): 154-164.
- [17] CHEN Q B, GAO Y P, YANG T SH, et al. Design and optimization of high precision differential constant current source for flotation level measurement [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45 ( 8 ): 154-164.
- [18] NYIKADZINO B, CHITAKIRA M, MUCHURU S. Rainfall and runoff trend analysis in the Limpopo river basin using the Mann Kendall statistic [ J ]. Physics and Chemistry of the Earth, 2020, 117: 102870.
- [19] SA'ADI Z, MAZILAMANI L S, SA'ADI N, et al. The likelihood of a significant trend based on a family of Mann-Kendall tests for extreme rainfall in Borneo [ J ]. Physics and Chemistry of the Earth, 2025, 139: 103959.
- [20] 张洪波, 李哲浩, 席秋义, 等. 基于改进过白化的Mann-Kendall趋势检验法[J]. 水力发电学报, 2018, 37(6): 34-46.
- [21] ZHANG H B, LI ZH H, XI Q Y, et al. Modified over-

- whitening process and its application in Mann-Kendall trend tests [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(6): 34-46.
- [17] 张姣, 胡庆芳, 黄璟胜, 等. 基于 ITA 法和 Mann-Kendall 法的漓江流域极端降水变化解析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 15-22.
- ZHANG J, HU Q F, HUANG J SH, et al. Analysis of extreme precipitation changes in Lijiang River Basin based on ITA and Mann-Kendall methods [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 15-22.
- [18] 郁明, 李旺林, 蓝盾. 基于优化自适应阈值的非线性机电系统传感器故障检测和主动容错控制 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 26-37.
- YU M, LI W L, LAN D. Sensor fault detection and active fault-tolerant control for the nonlinear mechatronic system based on optimized adaptive threshold [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 26-37.
- [19] 周开军, 阳春华, 牟学民, 等. 基于泡沫特征与 LS-SVM 的浮选回收率预测 [J]. 仪器仪表学报, 2009(6): 1295-1300.
- ZHOU K J, YANG CH H, MOU X M, et al. Flotation recovery prediction based on froth features and LS-SVM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009(6): 1295-1300.
- [20] 李曦婷, 高云鹏, 谢琴, 等. 基于 TV-KF 的矿浆液位电阻抗成像方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 141-151.
- LI X T, GAO Y P, XIE Q, et al. Research on electrical impedance tomography method for mineral slurry level based on TV-KF [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 141-151.
- [21] 王静, 陈淑婷, 李世银, 等. 煤泥浮选泡沫图像分割算法研究 [J]. 煤炭技术, 2017, 36(3): 311-313.
- WANG J, CHEN SH T, LI SH Y, et al. Research on image segmentation algorithm of coal flotation froth [J]. Coal Technology, 2017, 36(3): 311-313.

## 作者简介



胡爽, 2024 年于湖南大学获得学士学位, 现为湖南大学硕士研究生, 主要研究方向为智能检测技术。

E-mail: 1637530116@qq.com

**Hu Shuang** received his B. Sc. degree from Hunan University in 2024. Now he is pursing

his M. Sc. degree at Hunan University. His main research interests is intelligent detection technology.



**高云鹏**(通信作者), 2001 年于湖南大学获得学士学位, 2004 年于湖南大学获得硕士学位, 2009 年于湖南大学获得博士学位, 现为湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为智能信息处理、智能检测技术。

E-mail: gaoyp@hnu.edu.cn

**Gao Yunpeng** (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees all from Hunan University in 2001, 2004 and 2009, respectively. He is currently a professor and doctoral supervisor at Hunan University. His main research interests include Intelligent information processing, and intelligent detection technology.



**王俊霖**, 2022 年于湖南大学获得学士学位, 现为湖南大学博士研究生, 主要研究方向为智能检测技术。

E-mail: 1076901048@qq.com

**Wang Junlin** received his B. Sc. degree from Hunan University in 2022. Now he is pursing his Ph. D. degree at Hunan University. His main research interest includes intelligent detection technology.



**谢琴**, 2022 年于湖南大学获得学士学位, 现为湖南大学硕士研究生, 主要研究方向为智能检测技术。

E-mail: xieqin0723@163.com

**Xie Qin** received her B. Sc. degree from Hunan University in 2022. Now she is pursing her M. Sc. degree at Hunan University. Her main research interest includes intelligent detection technology.



**杨唐胜**, 1990 年于河海大学获得学士学位, 2002 年于武汉理工大学获得硕士学位, 2005 年于武汉理工大学获得博士学位, 现为湖南大学副教授, 主要研究方向为智能检测、微生物传感与检测。

E-mail: tsyang@hnu.edu.cn

**Yang Tangsheng** received his B. Sc. degree from Hohai University in 1990, his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Wuhan University of Technology in 2002 and 2005, respectively. He is currently an associate professor at Hunan University. His main research interests include intelligent detection, microbial sensing and detection.