

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107431

## 金属水溶液电解电极电流在线测量方法\*

李平, 赵仁涛, 铁军, 张水华, 刘伟泉

(北方工业大学电气与控制工程学院 北京 100144)

**摘要:**在金属的水溶液电解提取过程中,电极短路会降低电解电流效率,增大电耗,降低阴极产品的质量。电极电流的变化是监测电极短路的最有效方法。由于电解环境恶劣、电磁场分布复杂,电极数目众多,目前缺少有效的电极电流在线测量方法。本文提出一种测量电极电流的方法,其采用线性霍尔传感器实时检测电极下的磁感应强度,利用霍尔电势、磁感应强度和电流之间的解耦数学模型计算出流过导电棒电流。在实验室使用导电棒代替电极搭建电解槽进行测试,结果表明,当流过导电棒的总电流在10~100 A之间按照线性变化时,本文提出的方法测得的单个导电棒的电流与钳形表测量值的偏差在1 A以内,测量误差在2%以内。本电流测量系统精度高,可以用于铜、锌等金属水溶液电解槽的电极电流在线测量。

**关键词:**水溶液电解;电流模型;电极电流测量;检测系统

**中图分类号:** TH86 TF301 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 450.50

## An on-line measurement method for electrode current of metal aqueous solution electrolysis

Li Ping, Zhao Rentao, Tie Jun, Zhang Shuihua, Liu Weiquan

(School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** During the process of electrolytic extraction of metal from aqueous solutions, short-circuiting electrodes could reduce electrolysis current efficiency, increase power consumption, and reduce the quality of cathode products. The change of electrode current is the most effective way to monitor electrode short circuit. Due to the harsh electrolysis environment, the complex electromagnetic field distribution, and the large number of electrodes, there are currently lack of effective online electrode current measurement methods. This paper proposes a method of measuring electrode current, which uses a linear Hall sensor to detect the magnetic induction under the electrode in real time. The decoupling mathematical model among the Hall potential, magnetic induction and current is utilized to calculate the current flowing through the conductive rod. In the laboratory, conductive rods are used instead of electrodes to build an electrolytic cell for testing. Results show that when the total current flowing through the conductive rods varies linearly between 10 and 100 A, the current of a single conductive rod measured by the proposed method is comparable to the clamp. The deviation of the measured value of the shape meter is within 1 A. And the measurement error is within 2%. The current measurement system has high accuracy and can be used for on-line measurement of electrode currents in electrolyzers of metal aqueous solutions such as copper and zinc.

**Keywords:** aqueous electrolysis; current model; electrode current measurement; detection system

### 0 引 言

在铜、铅、锌等金属的提取冶炼过程中,电解沉积或电解精炼是生产工艺流程中不可或缺的重要环节。例

如,在铜的生产工艺中,硫化铜矿经火法冶炼得到纯度为99%的粗铜,其作为阳极,在通电时溶解在 $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 溶液中形成 $\text{Cu}^{2+}$ ,然后在阴极还原为99.99%的精铜<sup>[1]</sup>。而在锌的生产工艺中,锌矿经过焙烧、浸出、净化处理,获得硫酸锌溶液,在电解槽中以铅-银合金为阳极、铝板为

收稿日期:2021-01-30 Received Date:2021-01-30

\* 基金项目:国家自然科学基金(21978004)项目资助

阴极通过直流电进行电解,溶液中的锌离子在阴极铝板上获得电子还原为单质金属<sup>[2-3]</sup>。目前湿法冶金在工艺对能耗的影响方面的研究相对成熟,如:提高电解液温度<sup>[4]</sup>、降低电解液电阻、合理控制酸和金属离子的比例<sup>[5]</sup>,均可以实现降低能耗的目的<sup>[6]</sup>。然而,关于电解过程中的电极电流检测、短路检测等方面的研究相对较少。在电解槽中阴极、阳极的数量都达到了50余块,电解系列电流为25~40 kA数量级。理想情况下,电解槽中每块阳极或者阴极上的电流都应该相等,即等于系列电流除以电极数量。但是,由于电解槽中电极的摆放位置、阴极-阳极距离、导电棒与导电排的搭接等众多因素的影响,实际电极上的电流各不相同,一般呈现正态分布<sup>[7]</sup>。

同时,在电解过程中,由于阴极或阳极变形,或者在阴极上存在树状结瘤,往往会导致阴极-阳极之间的短路<sup>[8]</sup>。发生短路时,相当数量的电流不经过电解液/电极界面,直接从短路位置由阳极流向阴极,未进行金属还原析出的电化学反应,因而降低了电流效率。电流效率的降低,不仅降低了产量,还显著增加了单位产品的能耗。短路的发生,还会烧损阳极,增加阳极维修费用。

因此,电解生产过程中发现短路快速处理是一项常规性的生产作业,现行生产过程中,生产企业通过高斯计<sup>[9]</sup>、红外成像<sup>[10-12]</sup>、磁灵敏元件等手段进行电极短路检测,其依据是当短路发生后短路电极的大电流会产生比正常电解电流大的磁场,同时该大电流会加热电极导电棒,显著提高导电棒的温度。这些方法不仅需要大量的巡检工作,更主要是这些方法都是在短路已经发生了一段时间、短路电流已经变得很大且产生了显著的热效应后才发现,此时已经造成了大量的电流损失<sup>[13]</sup>。

本项目组利用光纤电流传感器监测了铜电解极间短路发生时电流的变化过程,发现了短路时电极电流的快速上升趋势,以及短路前的电流增加模式,为此提出了电极短路的快速预测方法<sup>[13]</sup>。通过短路的快速检测或预测,可以在电极刚发生短路时就能够处理,甚至可以预测短路的发生,从而尽早消除短路的危害,降低能耗,提高金属的产量。

然而,实施短路快速检测的前提条件是能够实时检测每根电极上通过的电流的变化。由于电解槽中的电极多达50余块、每个车间有数百台电解槽,电极之间仅有数十毫米的间隙,选择合适测量方法成为实施电流检测的关键。

文献[14]借助MATLAB仿真,研究了铝电解槽中电极周围磁感应强度模型,获得流过极板电流测量模型的解析表达式,为电极电流测量提供了一种思路。Wiechman等<sup>[15]</sup>针对传统的Walker式配置的槽间导电排结构,根据上游槽阴极导电棒上的电流在导电排上传送到下游槽阳极的特性,在阴极导电棒与导电排的搭接触

点位置下方放置线性霍尔效应传感器来测量该阴极电流产生的磁场,并在霍尔效应传感器两边使用聚磁条增强磁场强度信号。为了减小邻近阴极电流的磁场耦合影响,采用有限元法来计算各阴极的电流。在利用Optibar型©槽间导电排的电沉积槽上,上游电解槽的阴极电流直接通过导电排传递到下游槽的阳极上,利用聚磁条增强磁感应强度的测量方法不仅得到阴极电流,同时也得到下游槽的阳极电流,并方便定位出短路电极的位置<sup>[16-17]</sup>。

Fraser等<sup>[18]</sup>报道的电解槽阴极电流测量方法中,将测量霍尔传感器放置在导电棒下方的槽沿上,采用数学模型消除邻近阴极上的电流的影响,实现阴极电流的测量,进而实现短路和接触不良的检测。针对双触点电气连接的导电排结构,芬兰Outotec提出将电流测量点放置在两个触点之间的导电排或平衡母线位置,通过霍尔传感器探测磁感应强度来测量流入或流出电极的电流大小,以检测极间短路、断路故障,从而进行工艺优化和控制<sup>[19]</sup>。

Urata等<sup>[20-21]</sup>在铝电解阳极电流测量的研究中,采用前后两个相距一定距离的霍尔传感器同时测量同一电极电流产生的磁感应强度。测量时,由于其它电极和导电体的在这两个霍尔元件位置均产生背景磁场,两个霍尔元件的磁感应强度差几乎全部是目标电极的电流产生的,从而近似消除了临近电极对当前电极的影响。传感器被应用于加拿大云雀铝业(Aluminerie Alouette)的两台实验电解槽上,用于监测阳极电流分布与槽稳定性,改进控制过程和预测阳极效应<sup>[22-24]</sup>。

综上所述,冶金电解槽中电极电流的测量是监测极间短路、电极断路的最有效方法,是实现电解槽数字化的核心,也是优化极间电流分布、过程控制和生产工艺的重要信息来源之一。然而,高腐蚀性环境、狭窄的空间和数量巨大的测量点,对电极电流测量方法提出了严苛的要求,这也是时至今日尚未得到很好解决的技术难题。

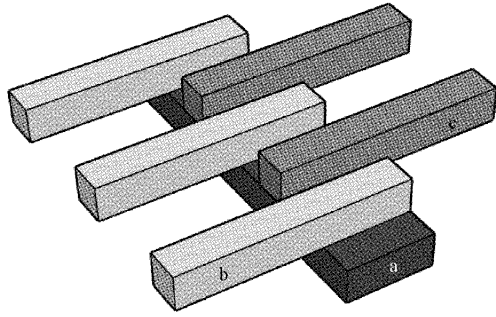
本文根据槽间导电排布局结构,设计了可以嵌入槽间导电排垫板中的磁感应强度检测电路,通过霍尔输出电势、导电棒电流和磁感应强度之间的数学模型,计算出实时流过各个导电棒的电流,为电解过程中的电极短路检测提供了技术支撑。

## 1 电流测量模型

### 1.1 电流测量拓扑结构

工业电解槽槽间导电排结构如图1所示,其主要应用于早期的铜电解精炼和当前的锌电解沉积。

本文对图1所示的槽间导电排结构进行改造,将检测节点电路板内嵌到导电排下面,用于测量各磁感应极板下的磁感应强度,如图2所示。



a: 导电排; b: 上游槽电极导电棒; c: 下游槽电极导电棒

图 1 槽间导电排结构

Fig. 1 Inter-slot conductive row structure

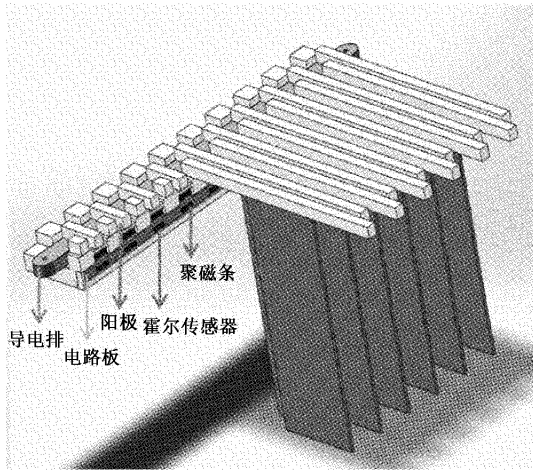


图 2 电解槽局部图

Fig. 2 Partial view of the electrolyzer

为了获得准确的测量结果,每根导电棒下放置霍尔传感器,霍尔传感器位于导电棒下 20~40 mm、离导电排 50~70 mm 的位置。为了提高磁感应强度的采样分辨率,在霍尔传感器两旁放置了聚磁条来增大导电棒下磁感应强度。聚磁条长宽高分别为 10×5×5 mm<sup>3</sup>。电解槽中任意一个导电棒下的磁感应强度都是流过该导电棒的电流和它周围流过电流的导电棒产生的磁感应强度的线性叠加。

### 1.2 霍尔传感器输出特性

本文利用单片机片上的 ADC 模块定时采样霍尔传感器输出电势,实时获取导电棒下固定测量位置的磁感应强度。

单片机 AD 采样分辨率为 12 位,采样通道的基准电压为 2.5 V,将导电棒不通电时的霍尔采样值定义为采样零点  $N_{i,0}$ ,假设导电棒通电时,第  $i$  个导电棒下霍尔传感器采样结果为  $N_i$ ,则通过式(1)可以将采样值  $N_i$  转化为霍尔电势  $U_i$ 。

$$U_i = N_i / 4\ 096 \cdot 2.5 \quad (1)$$

以  $S_i$  表示环境温度 25℃ 时第  $i$  个霍尔传感器的灵敏度,可以利用式(2)由霍尔电势  $U_i$  求出磁感应强度  $B_i$ ,该公式来自霍尔传感器数据手册;其中  $U_{i,0}$  是霍尔传感器的零点电压,  $T_A$  为当前环境温度,通过单片机可以测量得到,  $S_{TC}$  是温度补偿系数,取值为 0.12%/℃。

$$U_i = U_{i,0} + B_i S_i [1 + S_{TC}(T_A - 25^\circ\text{C})] \quad (2)$$

联立式(1)、(2)可以得到  $N_i$ 、 $B_i$ 、 $S_{TC}$ 、 $T_A$  的关系如式(3):

$$N_i = N_{i,0} + \tilde{S}_i B_i [1 + S_{TC}(T_A - 25^\circ\text{C})] \quad (3)$$

其中,  $\tilde{S}_i = 4\ 096 / 2.5 \cdot S_i$ 。

### 1.3 自耦合系数

由磁感应强度  $B_i$  与电流  $I_i$  之间的线性关系、磁感应强度  $B_i$  与霍尔电势  $U_i$  之间的线性关系,以及式(1)中表达的霍尔电势  $U_i$  与采样值  $N_i$  之间的线性关系可知,当只有第  $i$  个阳极导电棒通电的时候,流过它的电流和第  $i$  个阳极下霍尔传感器采样值  $N_i$  之间的关系可用式(4)表示。

$$N_i = a_{i,i} I_i + N_{i,0} \quad (4)$$

式中:  $a_{i,i}$  为自耦合系数,反映导电体的位置、形状的影响,当温度恒定时为一常数,其值可以按照式(4)在不同电流下回归得到。  $N_i$  为  $i$  电极下霍尔传感器的采样值,  $i$  表示电极的位置;  $N_{i,0}$  为  $i$  电极下霍尔传感器的零点采样值。当环境温度发生变化时,需要对耦合系数进行温度补偿<sup>[25]</sup>,假设通入第  $i$  个阳极的电流  $I_i$  不变,环境温度  $T_A$  发生改变,温度变化之前霍尔输出为  $N_i(1)$ ,温度变化后霍尔输出变为  $N_i(2)$ ,自耦合系数变为  $\bar{a}_{i,i}$ ,结合式(4)有式(5)和式(6):

$$N_i(1) = a_{i,i} I_i + N_{i,0} \quad (5)$$

$$N_i(2) = \bar{a}_{i,i} I_i + N_{i,0} \quad (6)$$

将(5)、(6)两式相减,得到式(7):

$$\Delta N_i = N_i(2) - N_i(1) = (\bar{a}_{i,i} - a_{i,i}) I_i \quad (7)$$

将  $N_i(1)$ 、 $N_i(2)$  分别带入式(3),两式相减可以得到式(8):

$$\Delta N_i = \tilde{S}_i I_i k_{i,i} S_{TC} \Delta T \quad (8)$$

联立式(7)、(8)得到温度影响下自耦合系数补偿公式(9):

$$\bar{a}_{i,i} = a_{i,i} + \tilde{S}_i k_{i,i} S_{TC} \Delta T \quad (9)$$

式中:  $k_{i,i}$  称为位置系数,表示第  $i$  个阳极下方测量位置的磁感应强度  $B_i$  和流过该电极的电流  $I_i$  之间的关系:  $B_i = k_{i,i} I_i$ ,它只与导电棒的位置和形状有关。

### 1.4 互耦合系数

由对称性可知,当流过第  $i$  个电极和第  $j$  个电极的电流相同时,第  $i$  个电极的电流在第  $j$  个电极下产生的磁感应强度与第  $j$  个电极在第  $i$  个电极下产生的磁感应强度大小相等,因而  $i$  电极对  $j$  电极的互耦合系数  $a_{j,i}$  与  $j$  电极对  $i$  电极的互耦合系数  $a_{i,j}$  相等。只有  $i$  电极通电时,流过  $i$  电极的电流和  $j$  电极下霍尔传感器采样值之间有如式(10)所示关系:

$$N_{j,i} = a_{j,i} I_i + N_{j,0} \quad (10)$$

式中:  $a_{j,i}$  表示互耦合系数,可以由回归分析得到。  $N_{j,i}$  表示只有第  $i$  个电极通入电流  $I_i$  时,第  $j$  个电极下霍尔传感器的采样值,  $N_{j,0}$  表示第  $j$  个霍尔传感器的零点采样值。

参考自耦合系数的求解过程可以得到互耦合系数表达式如(11)所示:

$$a_{j,i} = k_{j,i} \tilde{S}_i [1 + S_{TC}(T_A - 25)] \quad (11)$$

式中:  $k_{j,i}$  也称为位置系数,表示第  $j$  个阳极下方测量位置的磁感应强度  $B_j$  和流过  $i$  导电棒的电流  $I_i$  之间的关系:  $B_j = k_{j,i} I_i$ , 它只与导电棒的位置和形状有关。

参考式(9)可以温度影响下互耦合系数补偿公式。

### 1.5 电流计算模型

在生产实践中,电解槽是数十个电极同时导电工作。由文献[26]可知,当前电极左右间隔2个以外的电极对当前电极的影响小于2%,为此只考虑左右各两个电极对当前测量位置的影响。以包含10个导电棒的实验槽为例,下面直接给出各个霍尔传感器采样向量  $N$  和电流向量  $I$  之间的数学关系如式(12)所示:

$$N = KI + N_0 \quad (12)$$

其中,  $N = [N_1 \ N_2 \ \dots \ N_{10}]^T$ 。

$N_i$  表示第  $i$  个导电棒下固定测量位置霍尔传感器的输出,列向量  $I$  表示流过各个导电棒的电流。其中:  $I = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_{10}]^T$ 。

$N_0$  为各个测量位置霍尔传感器的零点采样值:  $N_0 = [N_{1,0} \ N_{2,0} \ \dots \ N_{10,0}]^T$ 。

$K$  是由自耦合和互耦合系数组成的矩阵,结构如式(13)所示。

$$K = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{2,1} & a_{3,1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_{1,2} & a_{2,2} & a_{3,2} & a_{4,2} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{8,9} & a_{9,9} & a_{10,9} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{8,10} & a_{9,10} & a_{10,10} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$a_{i,i}$  表示自耦合系数;  $a_{j,i} (i \neq j)$  表示互耦合系数,

$j$  取值为  $i \pm 1, i \pm 2$ 。则电流向量  $I$  计算公式如式(14)所示:

$$I = K^{-1}(N - N_0) \quad (14)$$

## 2 检测系统设计

检测系统主要包括网关节点和检测节点电路。其中检测节点通过霍尔传感器采集各导电棒下的固定测量点的霍尔输出值,然后借助 RS485 电路将其上传到网关节点,网关节点接收到检测节点发送的采样结果后,根据当前环境温度变化判断是否需要自耦合和互耦合系数的修正,如果需要,则根据式(9)和温度对互耦合系数的影响公式进行修正;如果不需要,则根据电流模型表达式(14)计算出流过各个导电棒的电流,并将每个导电棒的电流无线传输到上位机。上位机根据电流数值来判断、预测当前电解槽短路故障,以及短路发生的具体位置。

### 2.1 检测节点和网关节点设计

网关节点主要包括电压转换供电模块、STM32 最小系统、RS485 通信模块、温度测量模块、槽电压检测模块、无线 LORA 模块。网关节点为检测节点供电,并通过 RS485 与检测节点通讯。网关节点实物图如图3所示。

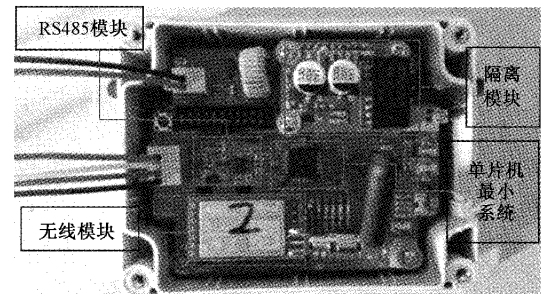


图3 网关节点实物图

Fig.3 Physical view of the gateway node

检测节点主要包括电压转换模块、MSP430 单片机最小系统、地址选择模块、RS485 通信模块和霍尔传感器模块。检测节点实物图如图4所示。单片机定时采集霍尔传感器输出,并通过 RS485 将采样结果、节点工作状态、当前检测节点的地址等信息实时传输到网关节点。

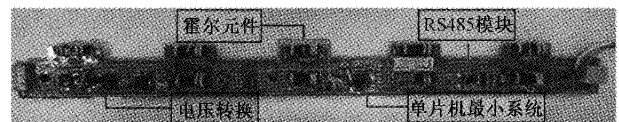


图4 检测节点实物图

Fig.4 Physical view of the detection node

### 3 实验测量结果及讨论

为了获取电流模型中的主要参数,需要对耦合系数和温漂的影响进行标定。实验槽结构如图 5 所示。

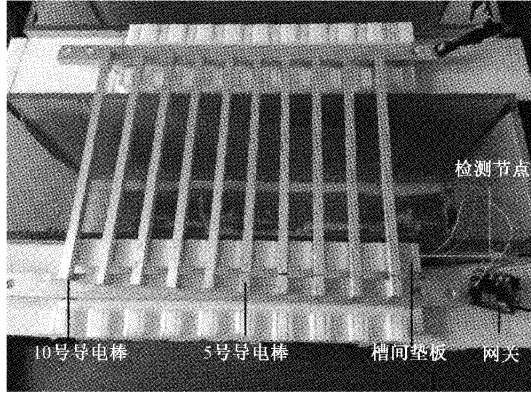


图 5 实验槽结构图

Fig. 5 Diagram of experimental tank structure

#### 3.1 耦合系数的标定

本文采用单个阳极导电棒通电的方法进行自耦合和互耦合系数的标定。导电棒依次通入 0、20、35、50、65、80 A 电流。由上位机发送标定指令给网关节点,网关控制检测节点对各个导电棒下固定测量位置的磁感应强度进行采样并传输到网关节点。网关节点使用 6 种不同的电流,以及对应的霍尔采样值实现耦合系数的标定。

典型地,在 3 号导电棒上依次通入不同的电流,采集 1、2、3、4、5 号导电棒下方的霍尔输出。各个导电棒下霍尔采样值随 3 号电极输入电流的变化规律如下图 6 所示。

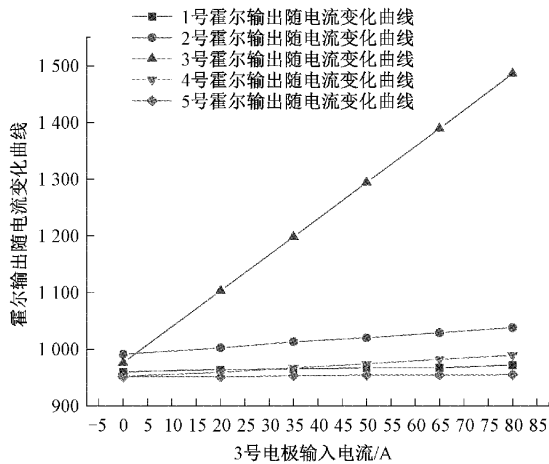


图 6 霍尔传感器输出增量随电流的变化

Fig. 6 Variation of Hall sensor output increment with current

图 6 中各曲线的拟合结果如表 1 所示。

表 1 图 6 各个曲线拟合结果

Table 1 Fitting results of each curve in Fig. 6

Table with 6 columns: 各霍尔采样值随电流变化曲线, 1号, 2号, 3号, 4号, 5号. Rows include fitting equation, weight, intercept, slope, residual sum of squares, and R-squared.

由图 6 和表 1 可见,霍尔传感器采样值与电流之间具有非常好的线性关系,线性方程的斜率分别对应 1、2、4、5 号导电棒的互耦合系数,以及 3 号导电棒的自耦合系数,截距对应各个霍尔的零点。依次从 1~10 号导电棒重复上述过程,得到各个耦合系数,由于聚磁条间隙、霍尔传感器焊接位置等不可控因素的影响,自耦系数并不完全相同且各个互耦合系数也各不相同,但这些并不会影响最终电流测量结果的精度,下面给出它们的取值范围。自耦合系数 a\_{i,i} 为 6.175~6.924,当前导电棒相邻测量位置的互耦合系数 a\_{i±1,i} 为 0.306 3~0.647 6,当前导电棒间隔 1 个导电棒的测量位置互耦合系数 a\_{i±2,i} 为 0.030 9~0.194 6。可见,a\_{i±1,i} 和 a\_{i±2,i} 分别约为 a\_{i,i} 的 7% 和 3%。测量也发现,a\_{i±3,i} 及更远距离的互耦合系数所占比例低于 1%,不予考虑。

#### 3.2 温漂对霍尔输出的影响

由式(3)可知,在 B\_i 不变的情况下,环境温度的变化会改变霍尔传感器的输出。在所有导电棒都没有通电的情况下,霍尔传感器电压随温度的变化情况如图 7 所示。

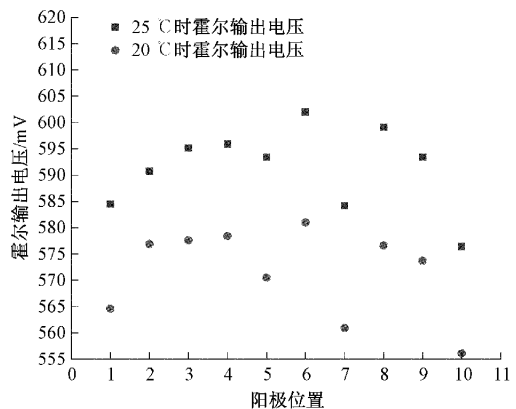


图 7 各个霍尔元件输出随温度的变化

Fig. 7 Variation of Hall element output with temperature

如图7所示,温度升高5℃后霍尔传感器的输出电压约增大20 mV,然而式(3)中零点不受温度影响。究其原因是在实际测量过程中,地磁穿过霍尔传感器,经过聚磁条加强改变了霍尔元件的输出电压。实际应用时,可以通过根据式(7)实时修正灵敏度的方式进行温度补偿。

### 3.3 模型实验验证

在图5所示实验槽上,使用钳形表(型号为:FLUKE 319)测量流过电极的电流将其与检测节点测量得到流过电极的电流进行对比。图8给出控制总电流,只有1、2号导电棒通电时,钳形表和检测节点测量得到的1号导电棒的电流值。

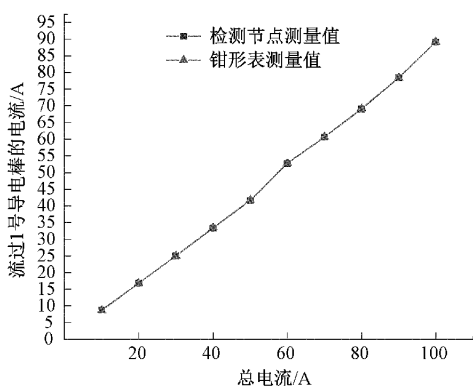


图8 流过1号导电棒的计算电流和实测电流  
Fig. 8 Calculated and measured current flowing through conductive rod No. 1

从图8可以看出检测节点测量得到的流过1号导电棒的电流和钳形表测量得到流过该导电棒的电流很接近。

图9是只有1、2、3、4、5号导电棒通电时控制总电流,钳形表和检测节点测量得到的流过4号导电棒的电流值。

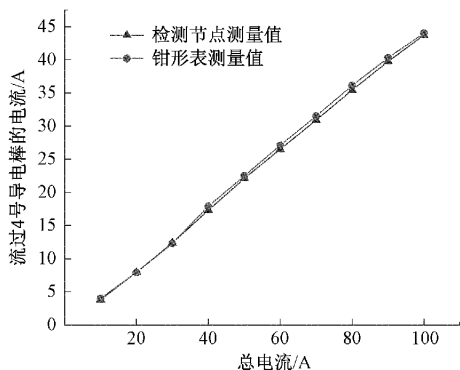


图9 流过4号导电棒的计算电流与实测电流  
Fig. 9 Calculated and measured current flowing through conductive rod No. 4

从图9可以看出,5个导电棒通电时,随着输入总电流的增加,流过4号导电棒的电流也在增加。检测节点测量得到的流过4号导电棒的电流与钳形表测量值基本一致。

图8和9证明,本文提出的电极电流测量方法是合理可行的。

## 4 结 论

本文设计了一种电解槽电极电流的在线测量方法,推导出了电流的计算模型,讨论了多电极磁场之间的耦合效应以及温度对耦合系数的影响,解决了电解过程中由于极板间距小,电极数目多,各极板之间电磁场叠加复杂,无法有效测量各电极电流的问题。本文提出电极电流测量方法可以应用金属水溶液冶炼过程中电极电流的测量,实验结果表明检测节点电流测量误差在1 A以内,完全满足工业现场电解槽电极电流在线检测的要求,可以实现极间短路故障的早期发现。本文提出的电极电流测量方法相对简单,成本低,当环境温度变化时,系统能够自动调整耦合系数,准确地测量流过各个电极的实时电流。

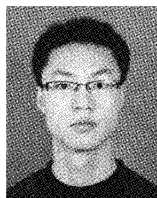
### 参考文献

- [1] SCHLESINGER M E, KING M J, SOLE K C, et al. Extractive metallurgy of copper (fifth edition) [M]. England: Pergamon Press, 2011: 56-58.
- [2] ZHANG Z L, FREE M L. Review of progress on computational modeling and simulation of the zinc electrowinning production process [J]. JOM, 2019, 71(5): 1623-1633.
- [3] XU X L, LI D D, CHEN L L, et al. Improve the energy efficiency: Effects of additives on long time zinc electrowinning [J]. Hydrometallurgy, 2020, 193: 105326.
- [4] 王宏丹, 任兵芝, 夏文堂, 等. 工艺条件对锌电解能耗的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018, (3): 6-13.  
WANG H D, REN B ZH, XIA W T, et al. Effect of process conditions on energy consumption of zinc electrolysis [J]. Non-Ferrous Metals (Smelting Part), 2018, (3): 6-13.
- [5] 陈匡义, 周玉琳. 降低锌电解直流电耗的生产实践[J]. 湖南有色金属, 2018, 34(1): 35-37.  
CHEN K Y, ZHOU Y L. Production practice of reducing DC power consumption in zinc electrolysis [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2018, 34(1): 35-37.
- [6] 陈源. 锌湿法冶炼电解过程能耗分析与建模[D]. 湖

- 南:中南大学, 2008.
- CHEN Y. Energy consumption analysis and modeling of zinc hydrometallurgy electrolysis process [D]. Hunan: Central South University, 2008.
- [7] ASLIN N J, STONE D, WEBB W. Current distribution in modern copper refining [EB/OL]. [2020-10-22]. <https://www.isakidd.com/en/downloads/Pages/Technical-Papers.aspx>.
- [8] NAKAI Y, ADACHI K, KITADA A, et al. Experimental modeling of nodulation in copper electrorefining [C]. Rare Metal Technology, 2018;319-323.
- [9] AQUEVEQUE PE, WIECHMANN EP, BURGOS RP. Short-circuit detection for electrolytic processes employing optibar intercell bars [C]. 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting, 2007;2074-2079.
- [10] MAEKIPAEAE E, TANTTU J T, VIRTANEN H. IR-based method for copper electrolysis short circuit detection [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1997;100-109.
- [11] MAKIPAA E, TANTTU J T, VIRTANEN H. IR-based system for short-circuit detection during copper electrorefining process [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1999, 3652;2-9.
- [12] 赵仁涛, 张雨, 李华德, 等. 基于铜电解槽电流分布估计的烧板故障诊断[J]. CIESC 期刊, 2015, 66(5): 1806-1814.
- ZHAO R T, ZHANG Y, LI H D, et al. Fault diagnosis based on current distribution estimation for copper electrolytic tank [J]. CIESC Journal, 2015, 66(5): 1806-1814.
- [13] ZENG Q Y, LI C, MENG Y, et al. Analysis of interelectrode short-circuit current in industrial copper electrorefining cells [J]. Measurement, 2020, 164: 108015.
- [14] 赵仁涛, 紫京浩, 范涵奇, 等. 电解槽电流测量模型建模及测量位置的研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3):496-503.
- ZHAO R T, ZI J H, FAN H Q, et al. Research on modeling of electrolytic cell current measurement model and measurement position [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3):496-503.
- [15] WIECHMANN E P, MORALES A S, AQUEVEQUE P E, et al. Measurement of cathodic currents in equipotential inter-cell bars for copper electrowinning and electrorefining plants [C]. Conference Record-IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2007;2074-2079.
- [16] WIECHMANN E P, MORALES A S, AQUEVEQUE P. Full measuring system for copper electrowinning processes using optibar intercell bars [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5):1575-1582.
- [17] AQUEVEQUE P, WIECHMANN E P, MORALES A S. System for the measurement of cathodic currents in electrorefining processes that employ multicircuitual technology [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(5):1764-1768.
- [18] FRASER R, JOHNSTON T, YESBERG J, et al. Helm trackerm cathode current sensing technology [C]. Ni-Co, 2013;201-209.
- [19] GRANT D, BARKER M H, NORDLUND L, et al. Measurement of Electric Current in an Individual Electrode in an Electrolysis System. US, US20160002802 [P/OL]. 2016-07-01 [2020-1-1]. [https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=11480eu097660ag0g47d0pm03m674543&site=xueshu\\_se](https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=11480eu097660ag0g47d0pm03m674543&site=xueshu_se).
- [20] URATA N, EVANS J W. The determination of pot current distribution by measuring magnetic fields [J]. TMS Light Metals, 2010;473-478.
- [21] URATA N, EVANS J W. The determination of pot current distribution by measuring magnetic fields [C]. Light Metals, 2010;473-478.
- [22] DION L, LAGACÉ C L, EVANS J W, et al. On-line monitoring of individual anode currents to understand and improve the process control at alouette [C]. Light Metals, 2015;723-728.
- [23] DION L, LAGACÉ C-L, LAFLAMME F, et al. Preventive treatment of anode effects using on-line individual anode current monitoring [C]. Light Metals, 2017;509-517.
- [24] BOJAREVICS V, EVANS J W. Mathematical modelling of hall-hérault pot instability and verification by measurements of anode current distribution [C]. Light Metals, 2015;783-788.
- [25] 高敏, 卢文科, 孙仁涛. 基于二维回归分析法的霍尔电流传感器温度补偿[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(2):100-104.
- GAO M, LU W K, SUN R T. Temperature compensation of Hall current sensor based on two-dimensional regression analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2009, 23(2):100-104.

- [26] WIECHMANN E P, MORALES A S, AQUEVEQUE P E, et al. Measurement of cathodic currents in equipotential inter-cell bars for copper electrowinning and electrorefining plants [ C ]. 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting, New Orleans, IEEE, 2007; 2074-2079.

### 作者简介



**李平**, 2017 年获得北方工业大学学士学位, 现为北方工业大学硕士研究生, 主要研究方向为: 嵌入式系统、冶金自动化。

E-mail: 2353672581@qq.com

**Li Ping** received his B.Sc. degree from North China University of Technology in 2017.

He is currently a master student at North China University of Technology. His main research interests include embedded systems and metallurgical automation.



**赵仁涛** (通信作者), 2004 年于内蒙古科技大学, 获得硕士学位, 2016 年于北京科技大学, 获得博士学位, 现为北方工业大学教授, 主要研究方向为工业信号分析与处理。

E-mail: ray\_zhao@263.net

**Zhao Rentao** (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Inner Mongolia University of Science and Technology in 2004, and received his Ph. D. degree from Beijing University of Science and Technology in 2016. He is currently a professor at North China University of Technology. His main research field is industrial signal analysis and processing.



**铁军**, 1990 年于东北大学, 获得硕士学位, 1994 年于北京科技大学, 获得博士学位, 现为北方工业大学教授, 主要研究方向为有色金属材料设计及制备过程数据分析、有色金属材料制备过程检测技术。

E-mail: tie jun67@263.net

**Tie Jun** received his M. Sc. degree from Northeastern University in 1990, and received his Ph. D. degree from University of Science and Technology Beijing in 1994. He is currently a professor at North China University of Technology. His main research interests include non-ferrous metal material design and preparation process data analysis, non-ferrous metals Material preparation process detection technology.