

# 面向铝电解智能制造的铝电解槽电压采集装置

崔家瑞, 周昊, 阎群, 李擎, 杨旭, 黄健, 张涛

(北京科技大学 自动化学院, 北京 100083)

**摘要:** 在铝电解智能制造领域, 为解决铝电解槽电压信号衰减问题, 设计了基于 VFC (Voltage-Frequency Converter) 的电压采集装置。装置由电源模块、VFC 模块和微控制器单元模块组成。电源模块提供不同等级的隔离电源, VFC 模块包含信号衰减、转换和异常报警电路, 信号衰减电路将 0~70V 槽电压衰减至 0~8V, 转换电路将电压转换为 RS485 差分频率信号, 实现长距离传输。异常报警电路在电压异常时发出警报并切断电机。微控制器单元通过频率捕获测量信号频率并计算原始电压值, 经滤波处理后上传。实验显示, 装置测量误差不超过 1.2%, 优于现场装置, 有助于推动铝电解行业低碳转型和装备升级。

**关键词:** 铝电解; 智能制造; 槽电压采集; Voltage-Frequency Converter; 频率捕获

## Aluminum Electrolysis Cell Voltage Acquisition Device for Intelligent Manufacturing

CUI Jiarui, ZHOU Hao, YAN Qun, LI Qing, YANG Xu, HUANG Jian, ZHANG Tao

(School of Automation & Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In the field of intelligent manufacturing for aluminum electrolysis, a voltage acquisition device based on VFC (Voltage-Frequency Converter) has been designed to address the issue of voltage signal attenuation in aluminum electrolysis cells. The system is composed of a power supply module, a VFC module, and a microcontroller unit module. The power supply module provides isolated power supplies of different voltage levels. The VFC module incorporates signal attenuation, conversion, and abnormal alarm circuits. The signal attenuation circuit is used to segment cell voltages 0-70V to a level of 0-8V, while the conversion circuit converts the voltage signal into an RS485 differential frequency signal to facilitate long-distance transmission to the microcontroller unit module. An alarm is issued and the motor is cut off by the abnormal alarm circuit when the voltage is abnormal. The microcontroller unit measures the signal frequency through frequency capture and calculates the original voltage value, which is then filtered and

uploaded. Experiments indicate that the system's measurement error does not exceed 1.2%, outperforming on-site devices, and contributes to the low-carbon transformation and equipment upgrading of the aluminum electrolysis industry.

**Keywords:** Aluminum Electrolysis; Intelligent Manufacturing; Cell Voltage Acquisition; Voltage-Frequency Converter; Frequency Capture

## 1 引言

在党的二十大报告中,铝电解产业被确认为国家经济的重要支柱,对经济增长和工业升级具有关键作用。智能制造技术的发展,尤其是智能感知技术的应用,对提高铝电解产业的生产力和竞争力至关重要<sup>[1]</sup>。

在铝电解的智能感知系统中,槽电压<sup>[2]</sup>的精确采集对控制电能消耗、维持生产热平衡具有显著影响。高精度的槽电压监测不仅能提升生产效率,还能降低能耗,减少环境污染,增强生产的灵活性和适应性,为铝电解产业的可持续发展提供技术保障。

在提高测量精度方面,王华阳等人<sup>[3]</sup>采用了 DAC 数模转换芯片和 ADC 模数转换芯片来采集槽电压,并利用基准电压芯片为 DAC 和 ADC 芯片提供稳定的基准电压。张启威等人<sup>[4]</sup>使用电压频率转换芯片 AD650 的反向工作模式,实现了 50~5000Hz 频率与 0.1~5V 电压之间的线性转换,其精度达到了 0.02V。

在铝电解现场,由于采集装置各模块之间的通信距离较远以及现场存在的强磁干扰,选择一种合适的通信方式以确保测量信号的完整传输尤为重要。邓旭东等人<sup>[5]</sup>利用模数转换器将输入的电压信号转换为数字信号,并通过微控制单元、调校单元和发送单元将数字频率信号转换为光脉冲信号。亢彦军等人<sup>[6]</sup>提出了基于 V/F 转换的高精度模拟信号光纤传输系统,该系统能够有效避免传输噪声和非线性的影响。王睿等人<sup>[7]</sup>则采用了电压/频率转换器,将电压幅度信息调制成数字频率信号进行传输。

针对铝电解生产过程中由于信号长距离传输以及电磁干扰导致的信号衰减问题,设计了一种基于 VFC 的铝电解槽电压采集装置。该装置将槽电压信号转换为 RS485 差分信号<sup>[8,9]</sup>,以实现长距离传输。在工业环境等复杂条件下,这种传输方式表现出更高的可靠性,能够有效抵抗电磁干扰,同时支持较长的通信距离和较高的数据传输速率。现场实验结果证明,装置在 3.700V~4.300V 的常见范围内误差不超过 5mV,在整个测量范围内相对误差不超过 1.200%,测量精度优于铝电解现场的测量装置。



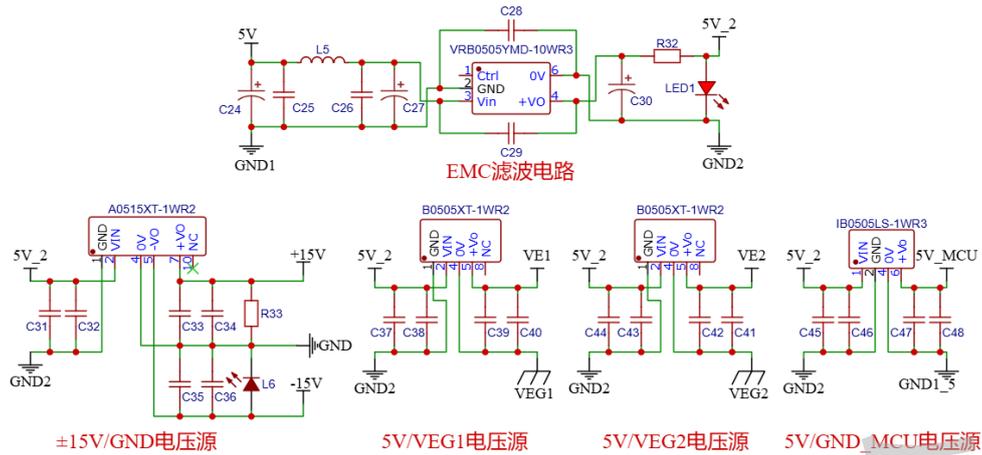


图 2 EMC 滤波电路原理图

为减少采集装置受到铝电解槽等设备的强磁干扰，以及阻隔本装置对周围环境造成电磁干扰，在电源输入端设计了 EMC 滤波电路。

VFC 模块中，在模拟与数字信号之间设计了三层光耦隔离，每层隔离电路需提供独立的供电电压。+15V、-15V 供应模拟电路部分，以 GND 作为电源地；VE1（5V）供应隔离电路的中间级别，VEG1 作为电源地；VE2（5V）供应数字电路，VEG2 作为电源地。微控制器单元模块中，5V 供应微控制器及其外围电路，GND\_MCU 作为电源地。

### 3.2 VFC 模块

VFC 模块由信号衰减电路、信号转换电路和异常报警电路组成。

#### 1) 信号衰减电路

在 400KA 槽电解槽中，槽电压超过 8V 时即视为发生阳极效应<sup>[14]</sup>，此时电压会急剧上升。故设计基于 LM741<sup>[15]</sup>的信号衰减电路在槽电压超过 10V 时提供更高的衰减比例，以确保在发生效应后维持对槽电压的高测量精度。信号衰减电路如下图 3 所示。

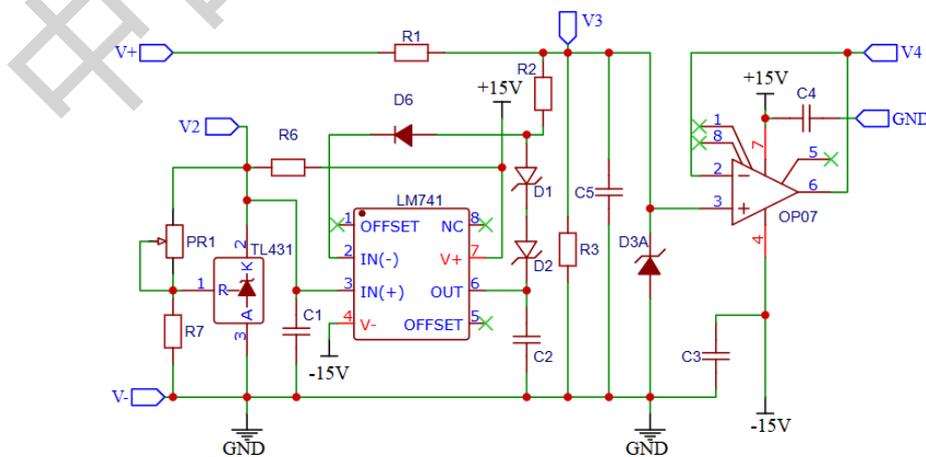


图 3 信号衰减电路原理图

TL431 内部基准电压  $V_{REF}=2.495V$ ，因此运算放大器 LM741 的 PIN3 端口电压公式为：

$$V_2 = 2.495 \times \frac{R_7 + PR_1}{R_7} \quad (1)$$

设 OP07 的 PIN3 端口电压为  $V_3$ ，当  $V_3 < V_2$  ( $V_1 < 10V$ ) 时，LM741 的 PIN6 输出高电平 (14.027V)，二极管 D1、D2 截止， $V_3$  公式如下：

$$V_3 = \frac{1}{4} V_1 \quad (2)$$

当  $V_3 > V_2$  ( $V_1 > 10V$ ) 时，LM741 的 PIN6 输出低电平 (1.844V)，二极管 D1、D2 导通， $V_3$  公式如下：

$$V_3 = \left[ \frac{V_1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \left( 2.495 \times \frac{R_7 + PR_1}{R_7} \right) \right] \times \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \times \frac{R_3}{R_3 + \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}} \quad (3)$$

## 2) 信号转换电路

信号转换电路将衰减后的电压信号转换为 RS485 差分信号。信号转换电路如下图 4 所示。

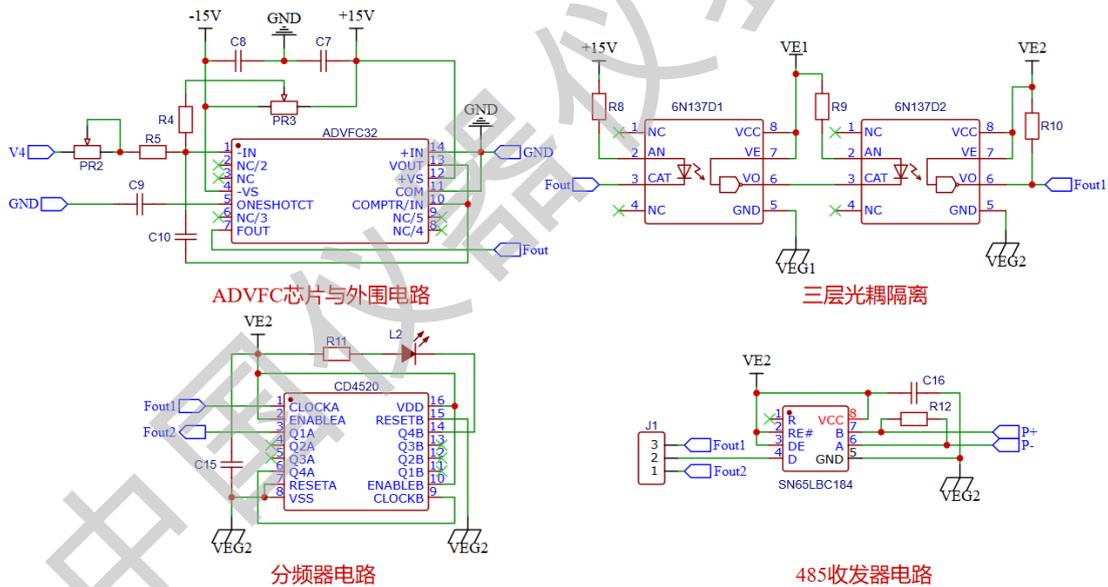


图 4 信号转换电路原理图

ADVFC 芯片与外围电路。ADVFC32 芯片是电压转频率芯片<sup>[16]</sup>，经过内部的运放、比较和单稳电路后输出频率信号  $F_{out}$ ，频率信号与输入电压的转换公式如下：

$$F_{out} = \frac{V_{IN}/R_{IN}}{1mA \times (C_9 + 44pF) \times 6.7k\Omega} \quad (4)$$

外围电路中，PR2 和 R5 组成  $R_{IN}$ ，通过调节  $R_{IN}$  和  $C_9$  实现输入电压与输出频率之间的对应比例；当输出频率对应电压与实际输入电压不符时，通过调节 PR2 和 PR3 来消除偏差。

三层光耦隔离。为增强信号的稳定性与减小电磁干扰<sup>[17]</sup>，在 ADVFC 芯片与 485 收发器之间设计基于光耦-逻辑输出隔离芯片 6N137 的电气隔离电路。其中， $F_{out}$  是 ADVFC 芯片输出的频率信号， $F_{out1}$  是经过电气隔离后的频率信号。

分频器电路。考虑存在频率过高、频率信号周期过短的问题，分频电路实现对频率信号的二分频处理，从而获得分频信号  $F_{out2}$ 。

485 收发器电路。在模块之间进行长距离通信时，考虑到信号的稳定性和抗干扰性，本装置使用 SN65LBC184 收发器芯片将单端逻辑电平信号转化为 RS485 差分信号<sup>[18,19]</sup>的方法。此外，将  $F_{out1}$  与分频后的  $F_{out2}$  分别接入排针  $J_1$ ，并通过跳线帽选择相应信号。

### 3) 异常报警电路

异常报警电路包含正常判断电路、危险判断电路以及报警电路。正常判断电路当检测到槽电压超过正常范围（10V）时，会发送报警信号  $V_5$  到报警电路。而危险判断电路在检测到槽电压超过危险范围（30V）时，驱动继电器切断电机运行。异常电压判断电路如下图 5 所示。

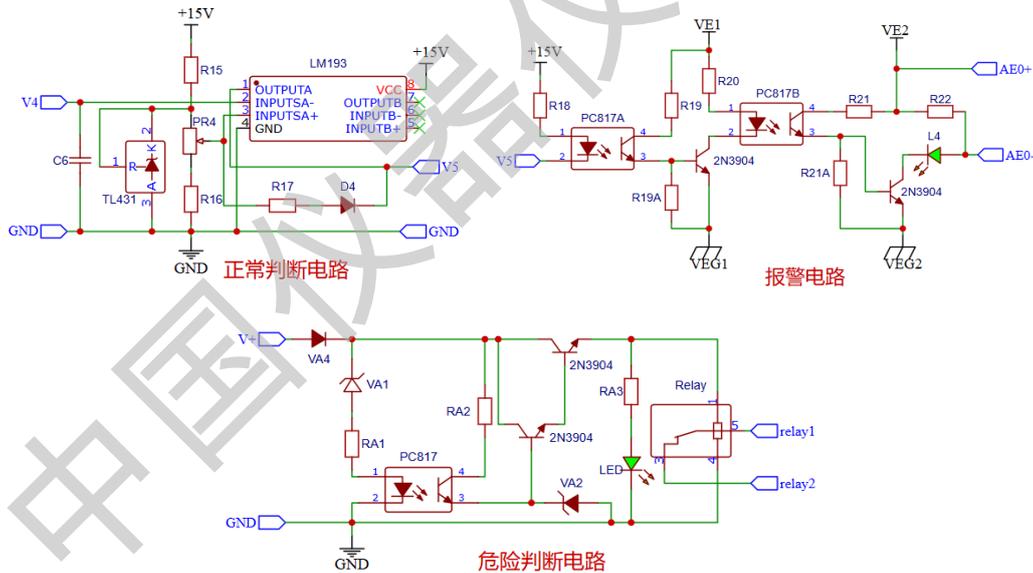


图 5 异常报警电路原理图

在正常判断电路中，稳压器 TL431 内部基准电压  $V_{REF}=2.495V$ ，LM193 的 PIN3 管脚的电压公式如下：

$$V_{193} = 2.495 \times \frac{R_{16} + PR_2}{R_{16} + PR'_2} \quad (5)$$

当 PIN2 管脚输入电压  $V_4$  大于  $V_{193}$  时，LM193 输出低电平报警信号  $V_5$ 。

报警电路在接收到正常判断电路发出的低电平报警信号  $V_5$  后,PC817B 的 PIN3 与 PIN4 引脚导通,从而导通 T2,点亮报警灯 L4。

在危险判断电路中,当槽电压  $V+$  大于 30V ( $UVA4+UVA1+UUA1$ ) 时,PC817 导通,从而两级三极管开关电路导通,常闭继电器断开,从而立即停止电机运行。

### 3.3 微控制器单元模块

#### 1) 硬件设计

微控制器单元模块首先使用 SN65LBC184 差分收发器,将 RS485 差分信号转化为单端信号;随后,单端信号通过光耦隔离后进入微控制器芯片。模块原理图如下图 6 所示。

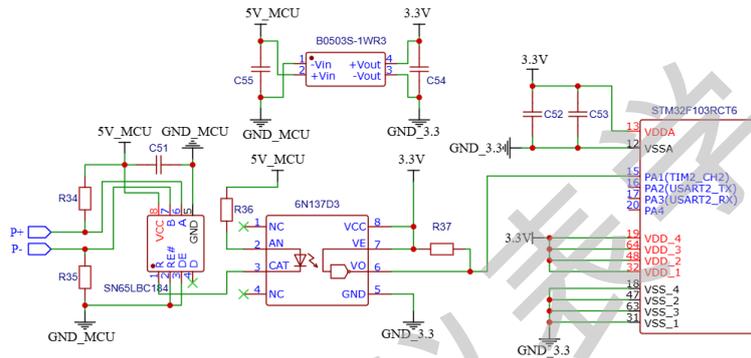


图 6 微控制器单元模块原理图

#### 2) 软件设计

主要程序流程图<sup>[20]</sup>如图 7 所示。

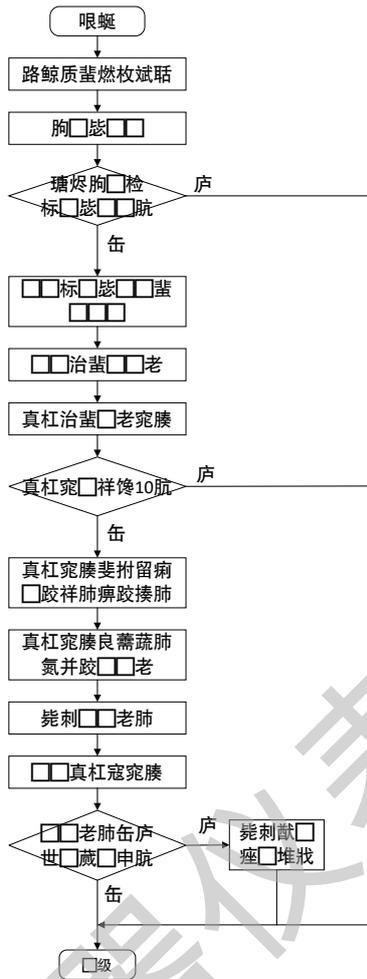


图7 主要程序流程图

在启动定时器和中断之后，首先等待下降沿的捕获；当成功捕获到两次下降沿后，计算定时器时间间隔值  $TIM2CH1\_CAPTURE\_VAL$ ，根据计数器频率  $84M$ ，计算两次下降沿之间的真实间隔时间  $T$  和信号频率值  $f$ ，计算公式如下：

$$T = \frac{1}{84M} \times TIM2CH1\_CAPTURE\_VAL \quad (6)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{84 \times 10^6}{TIM2CH1\_CAPTURE\_VAL} \quad (7)$$

根据公式(1)~(4)可以解析出实时槽电压值，并存入存储区；当存储区中的数据量达到 10 个之后，对数据排序并去除最大最小异常值；然后，计算剩余数据的平均值并将其作为最终的槽电压上传至上位机；最后，判断该值是否在正常范围内，如果超出正常范围，将故障信息上传到 PC 端上位机。

## 4 实验室与现场测试

### 4.1 实验室测试

在实验室中，搭建由电源模块、VFC 模块和微控制器单元模块组成槽电压采集装置，实物图如下图 8 所示。

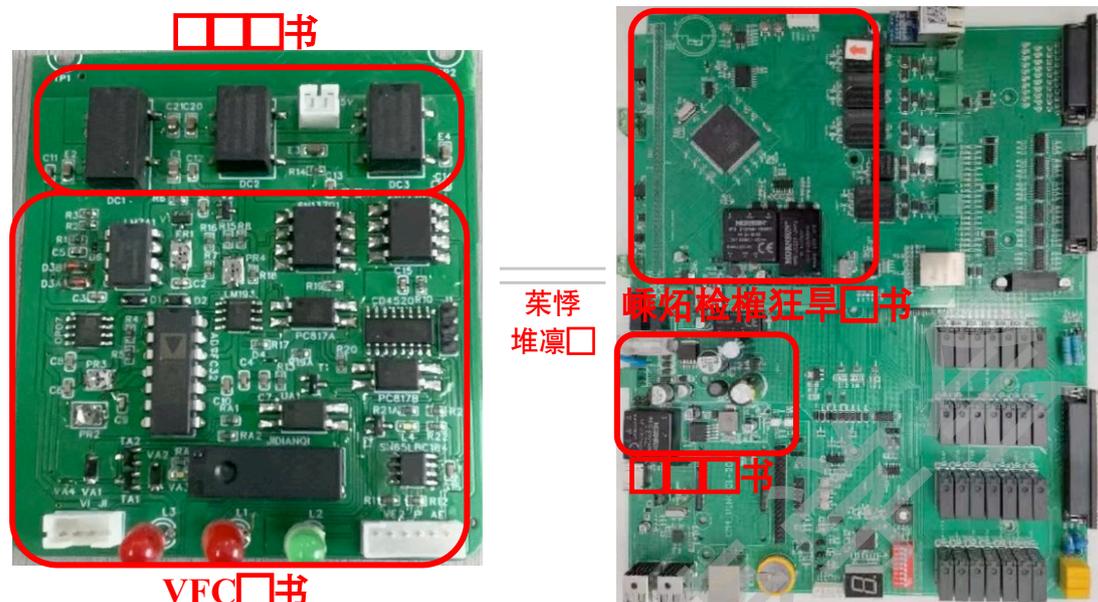


图 8 槽电压采集装置实物图

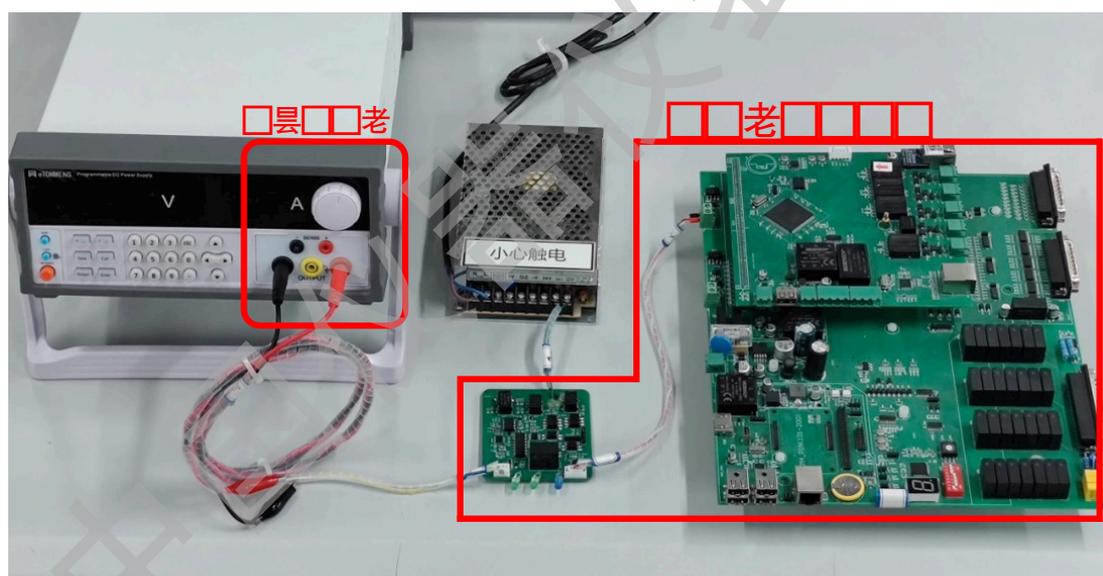


图 9 实验室内槽电压采集装置精度测量示意图

如上图 9 所示，在实验室内测量槽电压采集装置精度。mV 级信号发生器（eTM-L603SPD）产生 2V~40V 范围内的槽电压信号，将采集装置的槽电压测量结果与信号发生器输入的真实电压进行数据分析，分析结果如表 1 所示。

表 1 测量结果表

输入电压/V	测量结果/V	相对测量精度/%	扩展不确定度/mV
2.000	1.992	0.400	0.91
3.700	3.695	0.135	0.79
3.900	3.898	0.051	0.76
4.100	4.102	0.049	0.76
4.300	4.304	0.093	0.83
10.000	9.890	1.200	1.74
19.850	19.830	0.100	0.81
30.600	30.470	0.420	0.82

由表 1 分析结果可知，槽电压采集装置的测量精度范围介于 0.049%~1.200%之间，扩展不确定度范围是 0.76mV~1.74mV。在 3.700V~4.300V 常见电压工作范围内，采集装置精度范围进一步缩小至 0.049%~0.135%，对应的扩展不确定度范围为 0.76mV~0.83mV。

#### 4.2 现场测试

在贵州某铝业公司的 400 kA 系列电解槽上进行现场实验，现场安装图如下图 10 所示。槽电压采集装置安装在铝电解槽旁的槽控箱内。槽电压首先进入 VFC 模块，在转换为频率信号后，通过线槽中的差分信号线进入微控制器单元模块，计算出槽电压值。



图 10 采集装置现场实物图

本采集装置测量结果与现场槽电压值基本一致。当槽电压处于 3.700~4.300V 的常见工作范围时,误差在 5mV 以内;而在整体测量范围内,相对误差不超过 1.200%。这表明采集装置具有较高的测量精度和可靠性,在强磁环境下具有很强的抗干扰能力,能够满足铝电解槽电压测量的需求。

## 5 结论

设计了一种面向铝电解智能制造的铝电解槽电压采集装置。该装置通过设计隔离电路并利用 RS485 差分信号进行长距离传输,有效提高装置的采集精度和抗干扰能力。实验结果表明,在整个测量范围内,相对误差不超过 1.2%,测量精度优于铝电解现场的测量装置,能够满足实际测量精度需求,有助于推动铝电解行业低碳转型和装备升级。

### 参考文献:

- [1] 曹曦,胡红武,刘雅锋,等. 双碳背景下铝电解绿色低碳技术体系构建[J]. 轻金属, 2024, (02): 18-23.
- [2] 崔振军,程久元,杨成亮. 500 kA 铝电解槽节能降耗技术研究[J]. 甘肃冶金, 2024, 46(03): 85-89.
- [3] 王华阳,王嘉琪,朱志林,等. 一种铝硅合金电解槽的槽电压的采集及校准方法与系统: CN202211715317.4[P], 2023-07-04.
- [4] 张启威,郭涛. 一种频率/电压转换电路的设计[J]. 测试技术学报, 2020, 34(02): 137-140+146.
- [5] 邓旭东. 一种铝电解槽用电压频率转换装置: CN108149278B[P], 2019-07-19.
- [6] 亢彦军,宋光德. 基于 V/F 转换的高精度模拟信号光纤传输系统[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(6): 67-69.
- [7] 王睿,王菲,张宗达,等. 基于电压/频率转换的极简交流电压测量方法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2020, 38(3): 308-311.
- [8] 李明娟,李海龙. 单片机和RFID技术的智能门禁系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(11): 123-126.
- [9] 张守武,周波. 基于STC89C52的智能防盗防火报警系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(06): 116-118.

- [10] 周丽萍,程丽丽,张亚洁. 高灵敏微波载荷卫星出舱电缆及舱体屏蔽的EMC设计[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(02): 176-180.
- [11] 吴星明. ADVFC32电压 / 频率 (V / F) 转换器和频率 / 电压 (F / V) 转换器的应用[J]. 微计算机信息, 1995,(04): 62-64.
- [12] 毛幼维. 用ADVFC-32构成廉价的模拟数字转换接口[J]. 电子技术, 1991, (07): 17-18.
- [13] 赵兀君,高深圳. 一种频率信号测量方法设计[J]. 电子技术与软件工程, 2023, (01): 76-80.
- [14] 常玉杰,邓紫晴,陈晓方,等. 基于多元时间序列特征解释CNN的阳极效应识别方法[J]. 轻金属, 2023, (12): 18-24.
- [15] 刘方,林素敏,单鱼洋. 基于LM741的汽车蓄电池低电量报警系统设计[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(11): 118-120.
- [16] 刘巍,宫赤坤,王宏峰,等. 基于ADVFC32的信号变送模块在电子皮带秤中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(06): 1411-1413.
- [17] 王晓龙,李盛,许文萍. 从实践中谈单片机在工业环境中的抗干扰措施[J]. 电子技术与软件工程, 2014, (08): 272.
- [18] 赵胜,李围,赵权. 基于RS485通信的深海电池组数据监测系统设计[J]. 船电技术, 2022, 42(10): 84-86.
- [19] 甘雨,艾皖东,李翀,等. 基于RS485通信的列车重联设计[J]. 技术与市场, 2024, 31(01): 25-28.
- [20] 崔家瑞,李擎. 基于有限状态机的智能抄表集中器设计与实现[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(08): 134-139.