



叶片振动监测系统

测试报告

时间：2023.10.24

文档状态：	文档编号	001
☐ 正式修改	被测件版本号	
☐ 经过评审	被测件完成时	
☐ 正式发布	间	

申明

这份文档包含了来自项目组的可靠、权威的信息，这些信息是作为公司的生产信息专用，文档的读者应对其内容保密，未经公司书面请求和书面认可，不得复制、泄露或散布这份文档。对这份文档内容的任何形式的泄露、复制或散布都是被禁止的。

目 录

1. 引言	5
1.1. 编写目的	5
2. 基本信息	6
2.1. 被测件版本	6
2.2. 重要变化	6
2.3. 测试设备及仪器	6
2.4. 辅助材料	6
3. 测试技术要求及原理	8
3.1. 技术要求	8
3.2. 测试原理	9
3.2.1. 与 BMS 通信稳定性测试	9
3.2.2. 振动信号采集性能测试	9
3.2.3. 波形频域分析性能测试	10
3.2.4. 波形时域分析性能测试	10
3.2.5. 模拟量采样性能测试	10
3.2.6. 温度测量测试	11
3.2.7. 倾角输入性能测试	11
3.2.8. UART 通信性能测试	11
3.2.9. 软件整体稳定性测试	11
4. 测试结果	12
4.1. 与 BMS 通信稳定性测试	12
4.1.1. 通信协议	12
4.1.2. 稳定性	12

4.1.3. 测试结果.....	13
4.2. 振动信号采集性能测试.....	13
4.2.1. 采样率.....	13
4.2.2. 准确性.....	13
4.2.3. 测试结果.....	15
4.3. 波形频域分析性能测试.....	15
4.3.1. 方波 FFT 变换特征值准确性.....	15
4.3.2. 正弦波 FFT 变换特征值准确性.....	18
4.3.3. 三角波 FFT 变换特征值准确性.....	20
4.3.4. 测试结果.....	22
4.4. 波形时域分析性能测试.....	22
4.4.1. 方波特征值计算准确性.....	22
4.4.2. 正弦波特征值计算准确性.....	24
4.4.3. 三角波特征值计算准确性.....	25
4.4.4. 离线数据存储性能.....	27
4.4.5. 测试结果.....	27
4.5. 模拟量采样性能测试.....	28
4.5.1. 准确性.....	28
4.5.2. 测试结果.....	29
4.6. 温度测量测试.....	29
4.6.1. 测试结果.....	29
4.7. 倾角输入性能测试.....	30
4.7.1. 通信速率.....	30
4.7.2. 传输协议.....	31
4.7.3. 测试结果.....	32
4.8. UART 通信性能测试.....	32



4.8.1. 通信速率.....	32
4.8.2. 准确性.....	33
4.8.3. 测试结果.....	33
4.9. 软件整体稳定性测试.....	33
4.9.1. 测试结果.....	33
5. 测试人员签字.....	35

1. 引言

1.1. 编写目的

叶片振动监测系统是预测、维护风机叶片安全运行的重要装置,该装置将通过相应传感器采集诸如转速、振动等信号。然后对原始数据进行特征值提取和傅里叶变换,研究分析动力传输部件在正常运行和故障状态下振动信号频率和相应的能量分布的改变,可以预测动力传输部件可能出现的问题,将实际可能出现的损失降到最低。此外,为了更好的参与市场竞争,叶片振动监测系统还应对比同类竞品在性能先进性、软硬件稳定性、元器件成本、供应链稳定性等方面进行优化设计开发。因此为了满足各项技术要求,叶片振动监测系统还将进行通信性能、信号采集性能等性能测试和软件长期运行稳定性测试。



2. 基本信息

2.1. 被测件版本

叶片振动监测系统 V1.0

2.2. 重要变化

无

2.3. 测试设备及仪器

名称	型号	数量	备注
波形发生器	UTG962E	1	
电源	220AC	1	
示波器	ZDS1104	1	100MHz
叶片振动监测系统		1	

2.4. 辅助材料

名称	型号	数量	备注
导线		若干	
镊子		1 个	



TEST REPORT

版 本 :

测试报告

A0

电烙铁		1 套	
各 类 常 用 规格电阻电容		若干	
STLINK 下 载器		1 个	
USB 转 TTL 串口		1 个	

成都昆朋新能科技有限公司

Companiontek Technology (Chengdu) Co., Ltd.

3. 测试技术要求及原理

3.1. 技术要求

测试要求分别如下：

1) 与 BMS 通信稳定性测试：

- a. 满足《风机 CMS 系统软硬件 MQTT 通讯协议详细设计》要求；
- b. 无故障运行时间 ≥ 168 小时；

2) 振动信号采集性能测试：

- a. 采样率 $\geq 52\text{kSPS}$ ；
- b. 幅值（正弦波）测量误差 $< 5\%$ ；
- c. 频率（正弦波）测量误差 $< 3\%$ 。

3) 波形频域分析性能测试：

- a. 方波 FFT 变换特征值计算误差 $< 5\%$ （对比 Matlab）；
- b. 正弦波 FFT 变换特征值计算误差 $< 5\%$ （对比 Matlab）；
- c. 三角波 FFT 变换特征值计算误差 $< 5\%$ （对比 Matlab）；

4) 波形时域分析性能测试：

- a. 方波有效值、峰值、峰峰值、峭度、峰值因数、歪度参数计算误差 $< 5\%$ （对比 Matlab）；
- b. 正弦波有效值、峰值、峰峰值、峭度、峰值因数、歪度参数计算误差 $< 5\%$ （对比 Matlab）；
- c. 三角波有效值、峰值、峰峰值、峭度、峰值因数、歪度参数计算误差 $< 5\%$ （对比 Matlab）；
- d. 离线数据存储性能：存储容量 $\geq 100\text{MB}$ ；

5) 模拟量采样性能测试：

- a. 测量范围：4-20mA，

-
- b. 测量误差 $<5\%$ 。
 - 6) 温度测量测试:
 - a. 成功读取环境温度
 - 7) 倾角输入性能测试:
 - a. 通信速率 $\geq 1\text{Mbps}$ (线长 1m)
 - b. 满足倾角传感器通讯协议 (Modbus RTU)
 - 8) UART 通信性能测试
 - a. 通信速率 $\geq 1.5\text{Mbps}$ (线长 0.5m) ;
 - b. 误码率小于 0.1% (线长 1m, 波特率: 115200bps)
 - 9) 软件整体稳定性测试:
 - a. 软件无故障运行时间 ≥ 168 小时。

3.2. 测试原理

3.2.1. 与 BMS 通信稳定性测试

叶片振动监测系统与上位机 BMS 软件通信采用 MQTT 方式进行。由采集器将数据发送至 MQTT 服务器, BMS 通过订阅 MQTT 服务器主题将数据进行保存、处理。具体通信协议参考《风机 CMS 系统软硬件 MQTT 通讯协议详细设计 v3》进行设计。

3.2.2. 振动信号采集性能测试

叶片振动监测系统使用 ADS1278 芯片同步采集 6 路振动信号。ADS1278 是 24 位, 8 通道同步采样模数数据采集系统 (DAS) , 采用 5V 单电源供电, 可以

处理 $\pm 10V$ 和 $\pm 5V$ 真双极性输入信号,同时所有通道均能以高达144Ksps的吞吐速率采样。因此在理论上ADS1278足以满足所需的60kSPS采样率。

关于采样的精度则通过串口或USB将采样的数据传输至上位机,通过上位机对数据进行分析得出相应的振动信号(正弦波)的频率和幅值。

3.2.3. 波形频域分析性能测试

波形的频域由时域信号经过傅里叶变换得来,故根据傅里叶变换的原理就可得出波形的频域图,从而得出波形的频域特征值。通过波形发生器产生相应的波形,由采集器根据波形时域数据得出频谱图,再与MATLAB根据时域数据得出的频谱图进行比较即可得出采集器频域分析的准确性。

3.2.4. 波形时域分析性能测试

采集器接收到的信号为振动传感器所采集的振动信号,振动信号的特征值包括有效值、峰值、峰峰值、峭度、峰值因数、歪度参数等。这些特征值可以预测动力传输部件可能出现的问题,因此为了保证计算特征值的精确性,使用波形发生器产生各类波形信号,将采集器计算的有效值、峰值、峰峰值、峭度、峰值因数、歪度参数等特征值的计算结果同MATLAB进行对比。

3.2.5. 模拟量采样性能测试

采集器主控芯片带有3个ADC每个ADC有16个外部通道。ADC即模

拟数字转换器，可以将外部的模拟信号转换为数字信号。因此可以通过 ADC 测量输入电流/电压。

3.2.6. 温度测量测试

温度测量使用 PT1000 热电阻加上高精度 ADC 采样电路组成。通过程序将采集器采集的温度数据打印在串口上，与高精度测温枪采集的数据相比，可对采集器的温度测量性能进行测试。

3.2.7. 倾角输入性能测试

倾角传感器通过 RS485 和采集器进行通信，二者之间的通信协议采用 Modbus 通讯协议 RTU 模式。采集器和倾角传感器直接的通信速率测试使用采集器通过 RS485 循环发送数据，用单片机定时器记录发送耗时得出传输速率。

3.2.8. UART 通信性能测试

通过 UART 循环发送数据，用单片机定时器记录发送耗时得出传输速率。后续比较发送和接收的数据是否一致得出 UART 的误码率。

3.2.9. 软件整体稳定性测试

长时间运行测试，通过定时器记录运行时间，通过串口打印出运行时间。

4. 测试结果

4.1. 与 BMS 通信稳定性测试

4.1.1. 通信协议

采集器与 BMS 之间的通信协议依据《风机 BMS 系统软硬件 MQTT 通讯协议详细设计 v3》进行设计，包含收集硬件信息、配置采集信息、警报数据信息、数据传递和重启数采设备功能。

4.1.2. 稳定性

采集器和 BMS 之间的通信和数据是通过 MQTT 服务器进行转发的，只需查看 MQTT 上采集器和 BMS 的留存时间就能得到采集器和 BMS 通信的稳定性，由图 4.1.2.1 可知采集器和 BMS 都已留存超过 168 小时，满足技术要求。

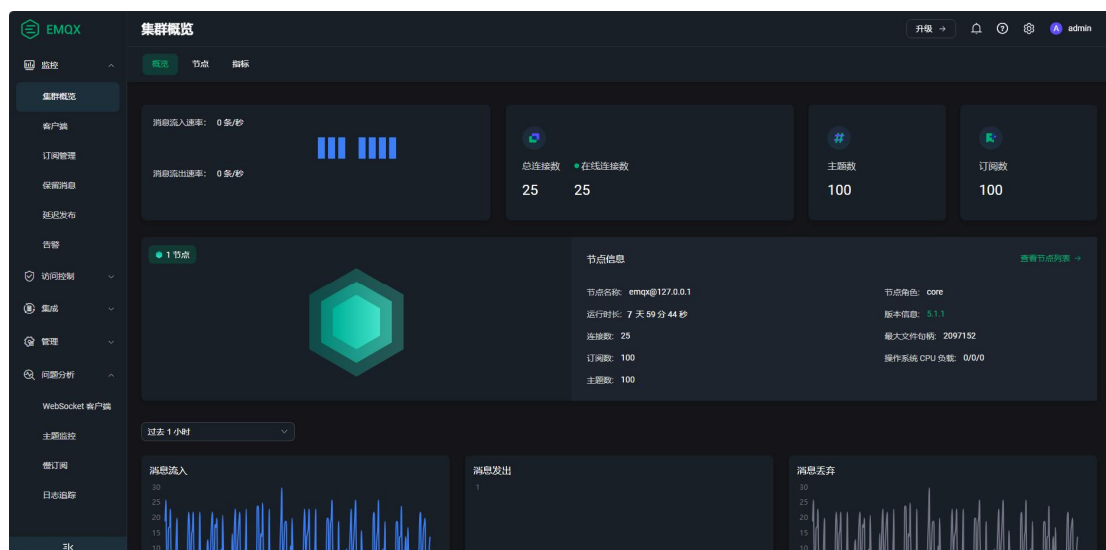


图 4.1.2.1 采集器和 BMS 通信留存时间

成都昆朋新能科技有限公司

Companiontek Technology (Chengdu) Co., Ltd.

4.1.3. 测试结果

由上可知采集器和 BMS 之间通信协议参考《风机 CMS 系统软硬件 MQTT 通讯协议详细设计 v3》进行规定，二者之间的通信时间都已超过 168 小时，故采集器与 BMS 通信稳定性满足技术要求。

4.2. 振动信号采集性能测试

4.2.1. 采样率

在中通过定时器中断设置采样频率。由公式 $T_{out} = \frac{PCS \times ARR}{T_{clk}}$ (T_{out} 定时器溢出时间; T_{clk} : 定时器输入时钟频率; PCS: 分频系数; ARR: 重装载值) 可知采集器定时器 2 主频在 $168/2=84\text{MHz}$, 故只需设置 $ARR=100$, $PCS=14$ 就可得到采样频率为 60KHz 的采样率。

4.2.2. 准确性

使用波形发生器向输入正弦波信号，通过 UART 或 USB 将采集的数据传输给上位机。在上位机上通过 MATLAB 编写程序对所收到的数据进行分析，得出幅值和频率并与波形发生器发送的标准值进行比较。

由图 4.2.2.1 可知波形发生器发送的信号为频率为 500Hz、幅度为 4.0Vpp 的正弦波信号。由图 4.2.2.3 可知采集的信号所描绘出的图形同样为正弦波，由图 4.2.2.2 可知输入信号幅度为 4.017, 由图 4.2.2.4 可知输入信号频率为 500Hz。故，

可得:

$$\text{幅值测量误差} = \frac{4.017 - 4}{4} \times 100\% = 0.425\% < 5\%$$

$$\text{频率测量误差} = \frac{500 - 500}{500} \times 100\% = 0\% < 5\%$$



图 4.2.2.1 波形发生器发送波形数据

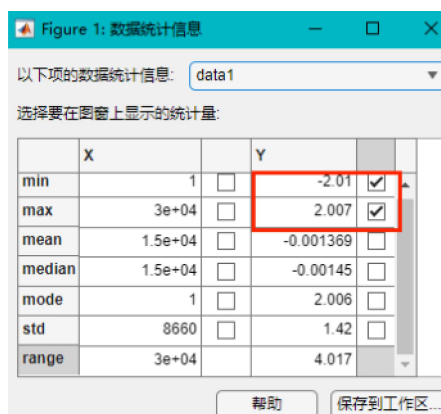


图 4.2.2.2 时域信号特征值

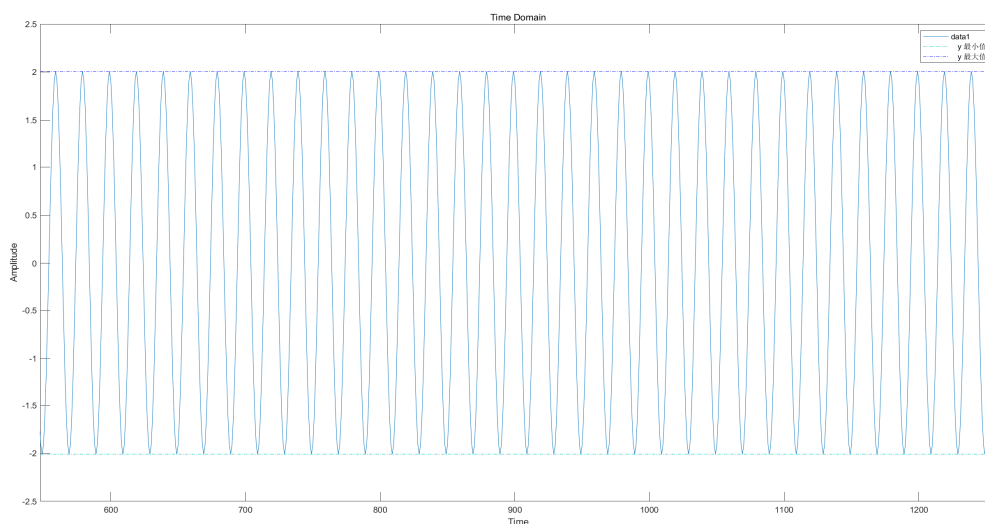


图 4.2.2.3 时域信号图

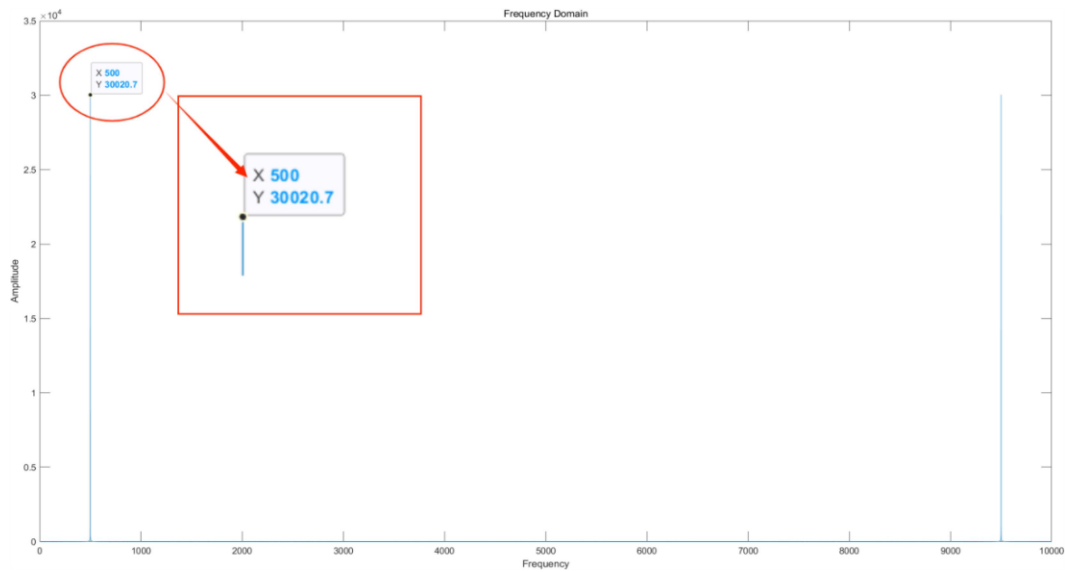


图 4.2.2.4 频域图

4.2.3. 测试结果

由上可知振动信号采集采样率为 40000KHz、时域测量误差为 0.425%、频域测量误差为 0%，均满足技术要求。

4.3. 波形频域分析性能测试

4.3.1. 方波 FFT 变换特征值准确性

使用波形发生器产生频率为 100Hz 的方波（见图 4.3.1.1），由于波形发生器的原因，其产生的方波不是标准方波，如图 4.3.1.2 所示的示波器测量的波形发生器产生的方波。采集器将接收到的时域信号数据保存为文件，采集器将 FFT 变换过后的频域数据也保存为文件，使用 MATLAB 软件对时域信号数据进行 FFT，并描绘出变换之后的频谱图（见图 4.3.1.3），然后使用 MATLAB 根据采集器产

生的频域数据描绘出频谱图（见图 4.3.1.4），由这两幅图可知采集器正弦波 FFT 变换后的特征值与使用 MATLAB 进行 FFT 变换一致。



图 4.3.1.1 波形发生器产生的方波

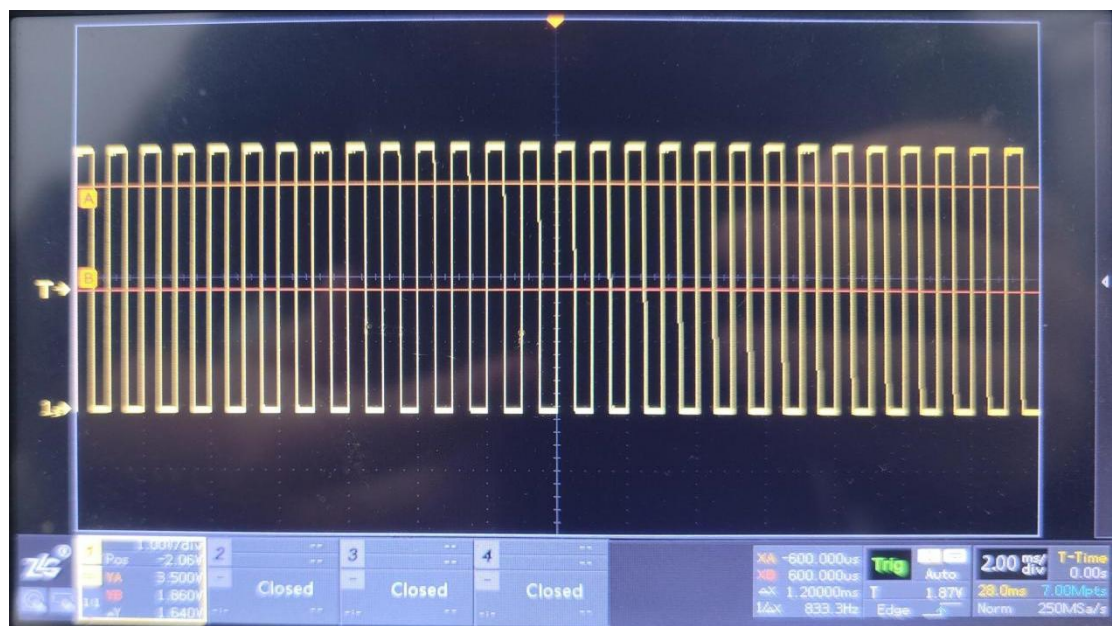


图 4.3.1.2 示波器测量波形

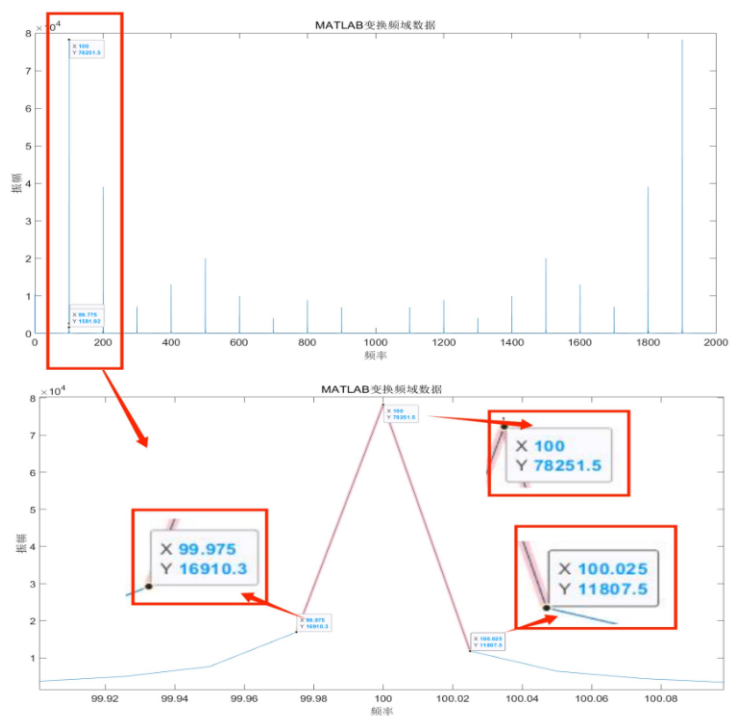


图 4.3.1.3 MATLAB FFT 变换特征值频谱图

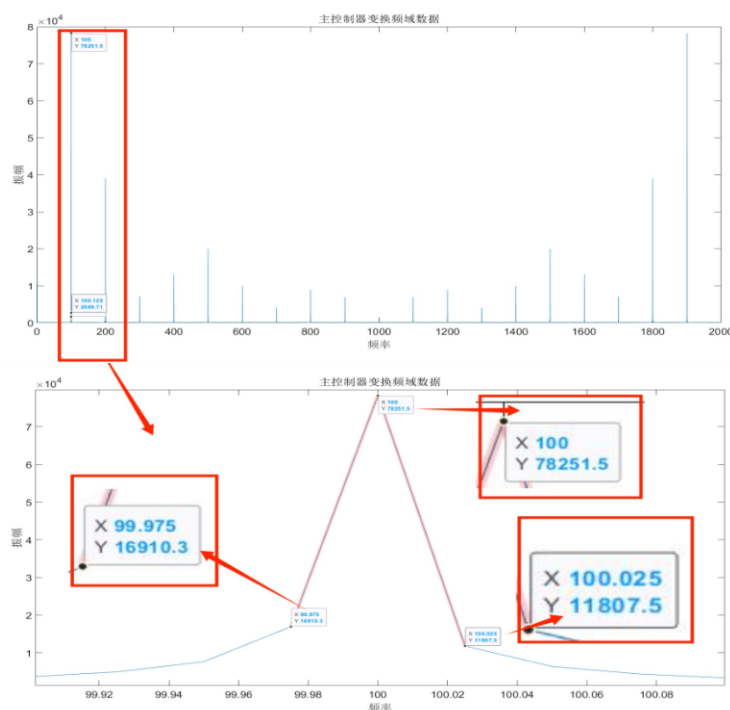


图 4.3.1.4 采集器 FFT 变换特征值频谱图

4.3.2. 正弦波 FFT 变换特征值准确性

使用波形发生器产生频率为 100Hz 的正弦波（见图 4.3.2.1），采集器将接收到的时域信号数据保存为文件，采集器将 FFT 变换过后的频域数据也保存为文件，使用 MATLAB 软件对时域信号数据进行 FFT，并描绘出变换之后的频谱图（见图 4.3.2.2），然后使用 MATLAB 根据采集器产生的频域数据描绘出频谱图（见图 4.3.2.3），由这两幅图可知采集器正弦波 FFT 变换后的特征值与使用 MATLAB 进行 FFT 变换一致。

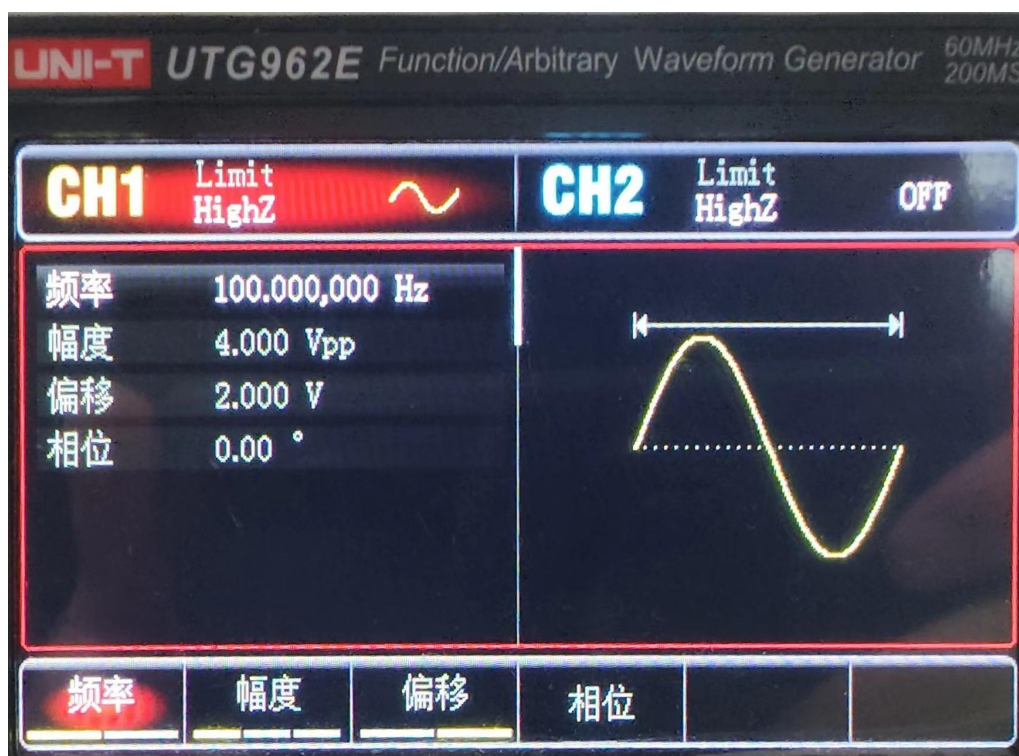


图 4.3.2.1 波形发生器产生的正弦波

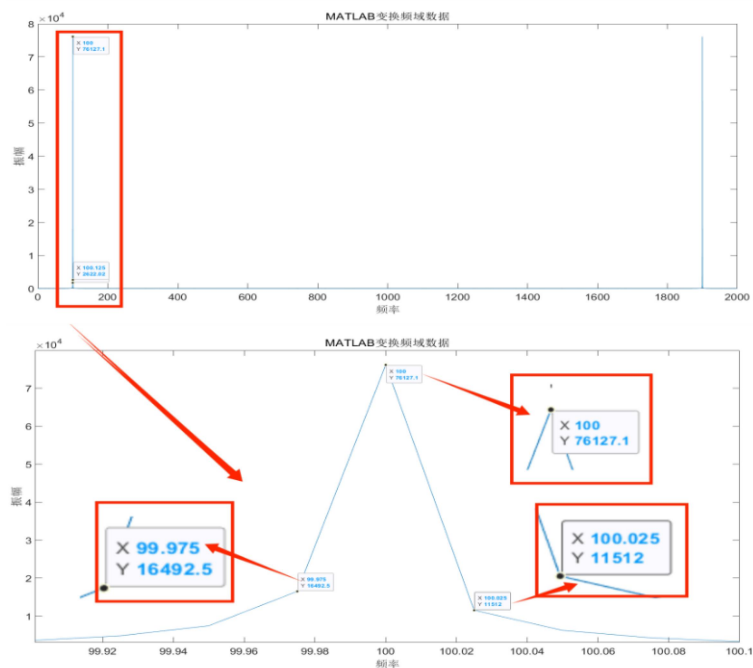
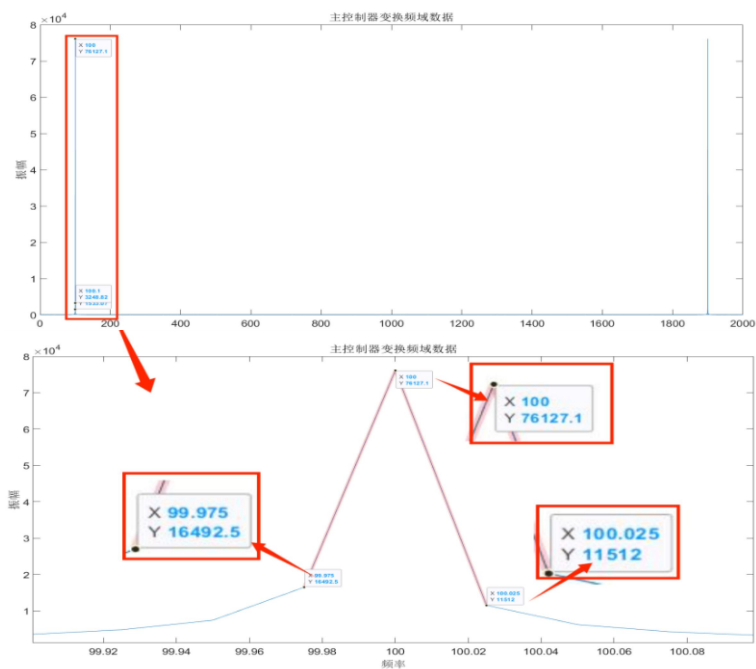


图 4.2.3.2 MATLAB FFT 变换特征值频谱图



4.3.2.3 采集器 FFT 变换特征值频谱图

4.3.3. 三角波 FFT 变换特征值准确性

使用波形发生器产生频率为 100Hz 的三角波（见图 4.3.3.1），采集器将接收到的时域信号数据保存为文件，采集器将 FFT 变换过后的频域数据也保存为文件，使用 MATLAB 软件对时域信号数据进行 FFT，并描绘出变换之后的频谱图（见图 4.3.3.2），然后使用 MATLAB 根据采集器产生的频域数据描绘出频谱图（见图 4.3.3.3），由这两幅图可知采集器正弦波 FFT 变换后的特征值与使用 MATLAB 进行 FFT 变换一致。



图 3.3.3.1 波形发生器产生的三角波

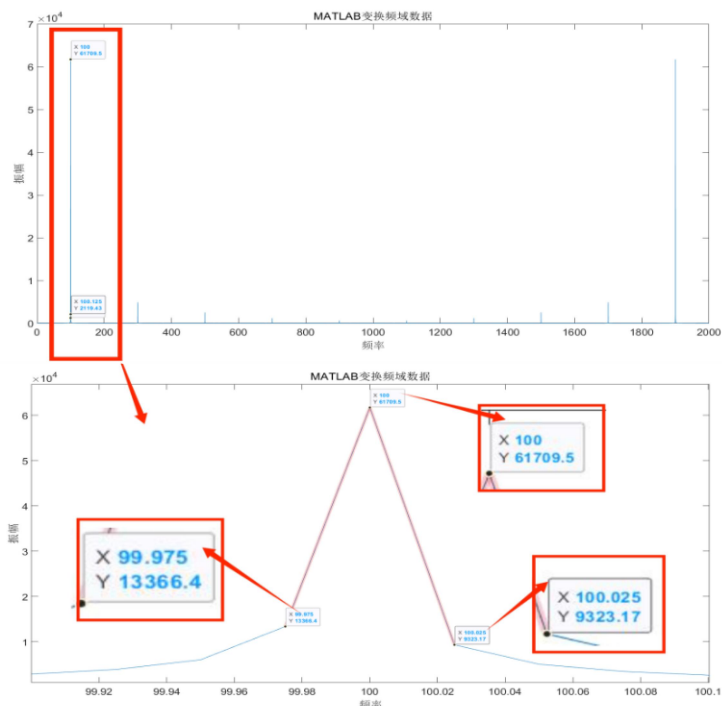
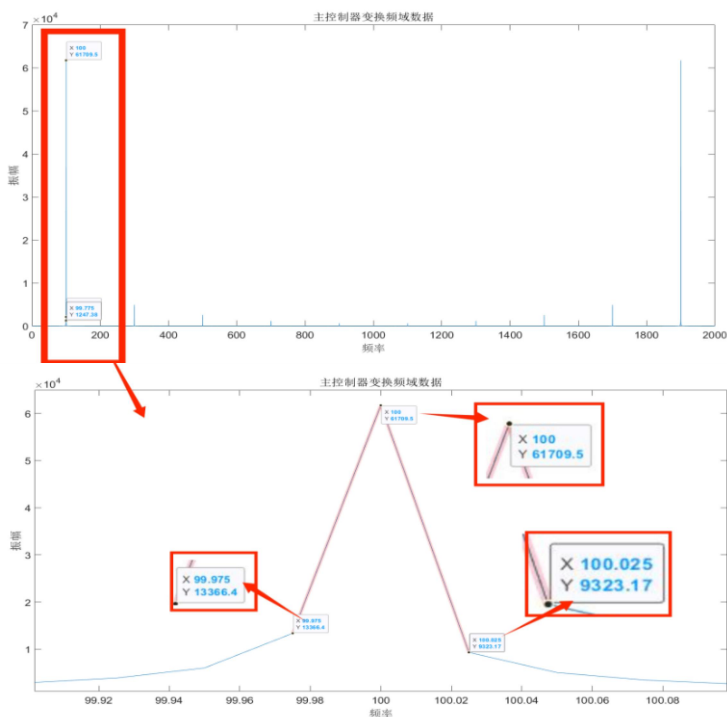


图 4.3.3.2 MATLAB FFT 变换特征值频谱图



4.3.3.3 采集器 FFT 变换特征值频谱图

4.3.4. 测试结果

由上可知采集器对输入的方波、正弦波和三角波信号的频率都能准确分析。
故采集器波形频域分析性能满足技术要求。

4.4. 波形时域分析性能测试

4.4.1. 方波特征值计算准确性

使用波形发生器产生频率为 100Hz 的方波（见图 4.4.1.1），采集器将接收到的时域信号数据保存为文件，使用 MATLAB 软件对时域信号数据进行特征值计算得到如图 4.4.1.2 所示的值。再从采集器发送的数据中得到采集器对时域数据计算得出的特征值，结果如图 4.4.1.3 所示。整理二者数据可得下表，由表 4.4.1.1 可知，采集器方波特征值计算准确性满足技术要求。

表 4.4.1.1 方波特征值计算误差

特征值	MATLAB 计算值	采集器计算值	误差值 (%)
有效值	3.9293	3.929290363	0.000245%
峰值	5.0285	5.02851222	0.000243%
峰峰值	9.5235	9.5234972	0.000029%
峭度	1.084	1.083975791	0.002233%
峰值因数	1.2798	1.279750732	0.003850%

歪度	-0.000641	-0.000641257	0.040094%
----	-----------	--------------	-----------



图 4.4.1.1 波形发生器产生的方波

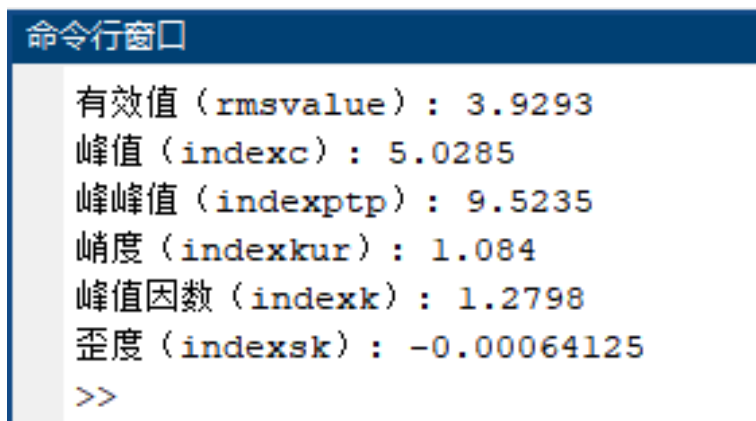


图 4.4.1.2 MATLAB 计算得出方波特征值

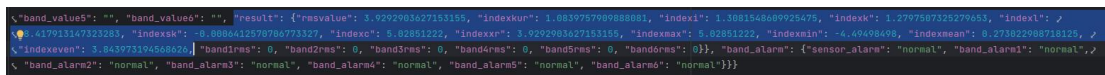


图 4.4.1.3 采集器计算得出方波特征值

4.4.2. 正弦波特征值计算准确性

使用波形发生器产生频率为 100Hz 的正弦波（见图 4.4.2.1），采集器将接收到的时域信号数据保存为文件，使用 MATLAB 软件对时域信号数据进行特征值计算得到如图 4.4.2.2 所示的值。再从采集器发送的数据中得到采集器对时域数据计算得出的特征值，结果如图 4.4.2.3 所示。整理二者数据可得下表，由表 4.4.2.1 可知，采集器方波特征值计算准确性满足技术要求。

表 4.4.2.1 正弦波特征值计算误差

特征值	MATLAB 计算值	采集器计算值	误差值 (%)
有效值	2.836	2.835968794	0.001100%
峰值	4.0283	4.01110723	0.426800%
峰峰值	8.0394	8.03943183	0.000396%
峭度	1.4996	1.499629596	0.001974%
峰值因数	1.4204	1.420440383	0.002843%
歪度	0.00010301	0.000103008	0.002144%

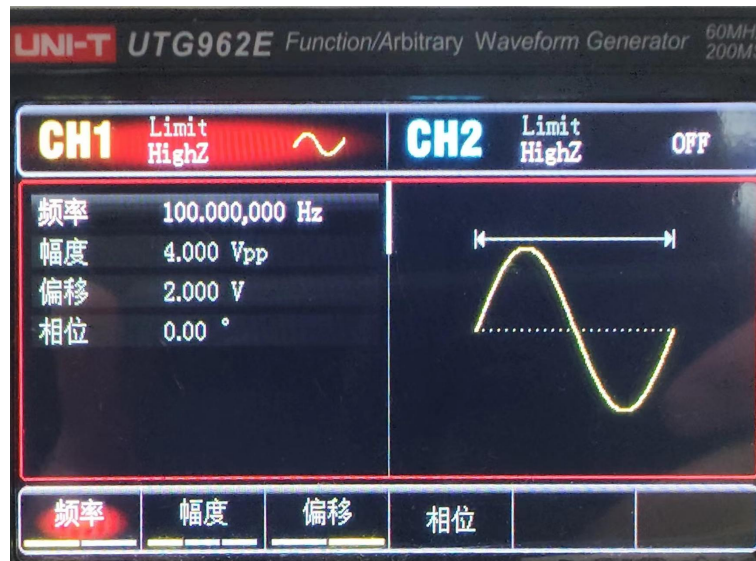


图 4.4.2.1 波形发生器产生的正弦波

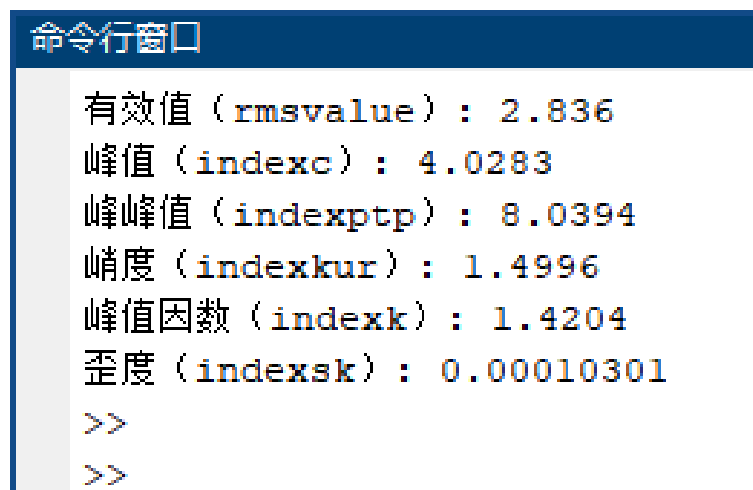


图 4.4.2.2 MATLAB 计算得出正弦波特征值

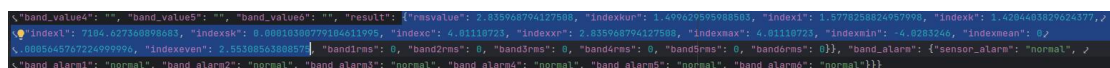


图 4.4.2.3 采集器计算得出正弦波特征值

4.4.3. 三角波特征值计算准确性

使用波形发生器产生频率为 100Hz 的三角波（见图 4.4.3.1），采集器将接

收到的时域信号数据保存为文件，使用 MATLAB 软件对时域信号数据进行特征值计算得到如图 4.4.3.2 所示的值。再从采集器发送的数据中得到采集器对时域数据计算得出的特征值，结果如图 4.4.3.3 所示。整理二者数据可得下表，由表 4.4.3.1 可知，采集器三角波特征值计算准确性满足技术要求。

表 4.4.3.1 三角波特征值计算误差

特征值	MATLAB 计算值	采集器计算值	误差值 (%)
有效值	2.3162	2.31616619	0.001460%
峰值	3.8549	3.85494411	0.001144%
峰峰值	7.7068	7.70680058	0.000008%
峭度	1.7962	1.796217065	0.000950%
峰值因数	1.6644	1.664364209	0.002150%
歪度	-5.71E-05	-5.71E-05	0.002212%



图 4.4.3.1 波形发生器产生的三角波

```
有效值 (rmsvalue) : 2.3162
峰值 (indexc) : 3.8549
峰峰值 (indexptp) : 7.7068
峭度 (indexkur) : 1.7962
峰值因数 (indexk) : 1.6644
歪度 (indexsk) : -5.7057e-05
>>
>>
```

图 4.4.3.2 MATLAB 计算得出三角波特征值

```
"rmshave": 2.316166190492233, "indexkurv": 1.7862178051970155, "indexl": 1.9199220897330673, "indexm": 1.6643642801937905, "indexn": 6102.918869829340, "indexsk": -5.785826229584277e-05,
```

图 4.4.3.3 采集器计算得出三角波特征值

4.4.4. 离线数据存储性能

采集器使用 SQLite 数据库保存离线数据, 按照每条数据为 13364 字节大小的数据, 一共能保存 14062 条数据, 共计 $14062 \times 9252 \div 1024 \div 1024 \approx 179\text{MB}$

4.4.5. 测试结果

由上可知采集器对方波、正弦波和三角波的时域信号进行特征值计算的结果误差没有超过 0.5%，采集器离线保存数据可达 120M。故采集器波形时域分析性能满足技术要求。

4.5. 模拟量采样性能测试

4.5.1. 准确性

模拟量采样性能测试主要通过 STM32F407 单片机的 ADC 功能将外部的模拟信号转换为数字信号。编写单片机程序使用 ADC 功能测量电流并与恒流源的电流值进行比较即可得到对于模拟量采样的准确性。由图 4.5.1.1 可知恒流源实际电流值为 4.84mA，由图 4.5.1.2 值测的电流值平均值为 4.87，故可得：

$$\text{模拟量测量误差} = \frac{4.87 - 4.84}{4.84} \times 100\% = 0.62\%$$

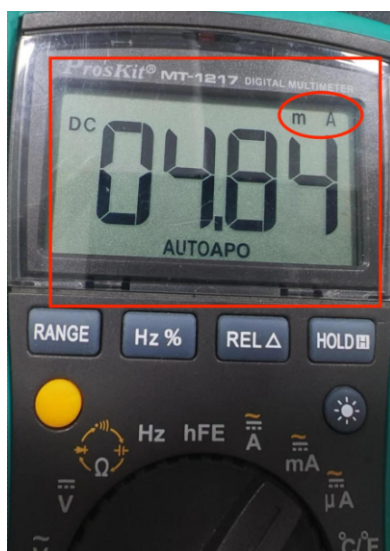


图 4.5.1.1 万用表所测电流值



图 4.5.1.2 所测电流值

4.5.2. 测试结果

由上可知，模拟量采样误差仅在 0.62%，因此模拟量采样的准确性满足技术要求。

4.6. 温度测量测试

4.6.1. 测试结果

采集器将 PT1000 和 max31865 组成的温度采集电路采集的数据通过串口打印出来（如图 4.6.1 所示）。所得温度的平均值为 25.46℃。

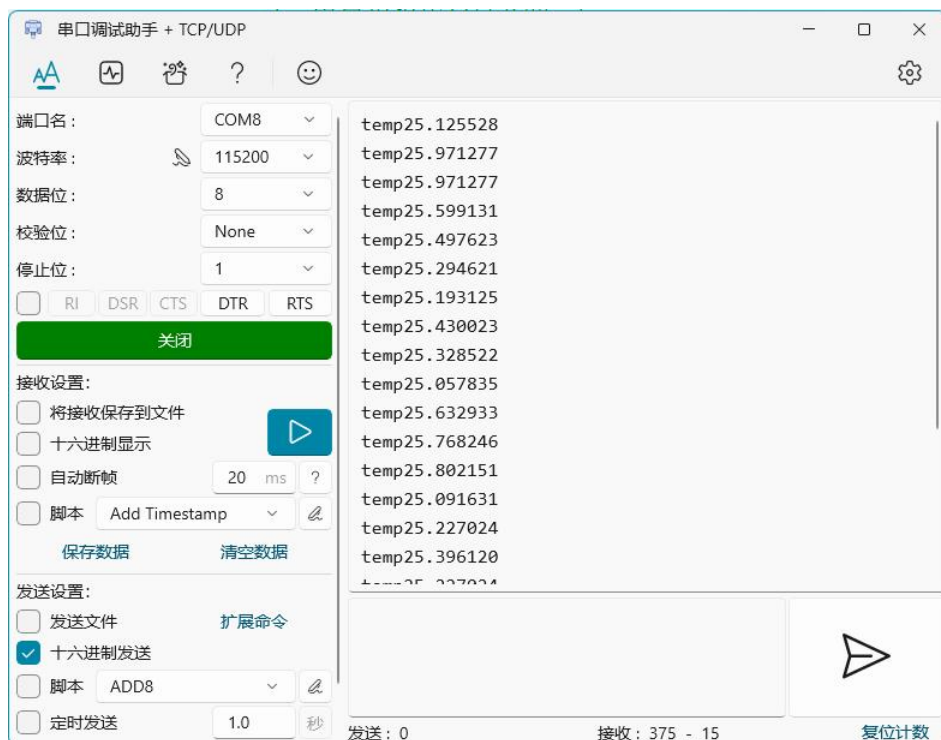


图 4.6.1 采集器测得温度值

4.7. 倾角输入性能测试

4.7.1. 通信速率

采集器使用的 RS485 芯片是 NSI8305E，根据芯片手册可知，NSI8305E 最大传输速率是 16Mbps，满足倾角输入所需的最低速率。实际测试采集器使用 RS485 发送 1KB 数据，通过定时器获取发送前后时间，在利用串口将实际时间和速率发送给上位机。

倾角输入性能测试要求通信速率大于 1Mbps，即 1048576bps，故将采集器 RS485 波特率设为 2000000，通过程序验证通信速率是否大于 1Mbps。由下图

4.5.1.1 可知倾角输入通信速率为 1.5Mbps，满足技术要求的 1Mbps。



图 4.7.1.1 采集器和倾角传感器通信速率

4.7.2. 传输协议

采集器和倾角传感器之间的传输协议使用 Modbus 协议中的 RTU 传输模式，在 Modbus RTU 模式下，数据帧由一系列连续的比特构成，每个比特都以特定的时间间隔传输。下面是一个 Modbus RTU 数据帧的结构：

起始位 (Start Bit)：一个低电平位，用于表示数据帧的开始。

地址位 (Address Byte)：一个包含设备地址的 8 位数据字节。它用于唯一识别每个从站设备。最高位表示广播地址，用于发送广播命令。

功能码 (Function Code)：一个 8 位数据字节，用于指示执行的具体操作。不同功能码代表不同的操作，例如读取寄存器、写入寄存器等等。

数据位 (Data Bytes)：包含命令数据或响应数据的 8 位数据字节序列。根据具体功能码和操作，可以有零个或多个数据字节。

循环冗余校验 (CRC)：一个 16 位的循环冗余校验码，用于检测数据的完整

性和准确性。

停止位 (Stop Bit): 一个或多个高电平位, 用于表示数据帧的结束。

4.7.3. 测试结果

由上可知与倾角传感器之间的通信速率为 1.5Mbps、通信协议使用 Modbus 协议, 满足倾角输入性能技术要求。

4.8. UART 通信性能测试

4.8.1. 通信速率

采集器串口通信芯片使用的是 CH340, 根据芯片手册可知 CH340 最高传输速率是 2Mbps, 理论上满足 UART 通信所要求的 1.5Mbps。2Mbps 转换为波特率为 2097152, 故采集器使用 2000000 波特率测试 UART 通信速率。由下图 4.8.1 可知 UART 通信速率为 1.52Mbps, 故满足 UART 通信性能要求的 1Mbps 的通信速率。



图 4.8.1.1 UART 通信速率

4.8.2. 准确性

串口的准确性通过采集系统使用串口发送前后的数据对比进行判断, 首先使用脚步随机生成 1000 个数据, 作为原始发送数据, 将这些数据填充在发送数组中, 并通过串口发送出来。在上位机上通过串口助手接收发送的数据并保存在文件中命名为《串口输出数据记录》。之后使用电脑自带命令窗口进行比较, 如图 4.8.2.1 所示。

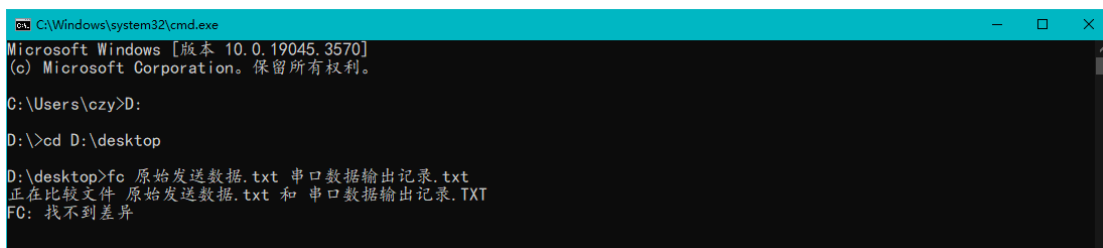


图 4.8.2.1 串口输出数据和原始数据比较

4.8.3. 测试结果

由上可知, UART 通信速率可达 1.5Mbps, 线长 1m、波特率为 115200 时无丢包现象, 故 UART 通信性能满足技术要求。

4.9. 软件整体稳定性测试

4.9.1. 测试结果

采集器在正常工作时数据是通过 MQTT 服务器进行转发的, 只需查看 MQTT 上采集器留存时间就能得到采集器操作系统的稳定性, 由图 4.9.1 可知采集器都

已留存超过 168 小时，满足技术要求。

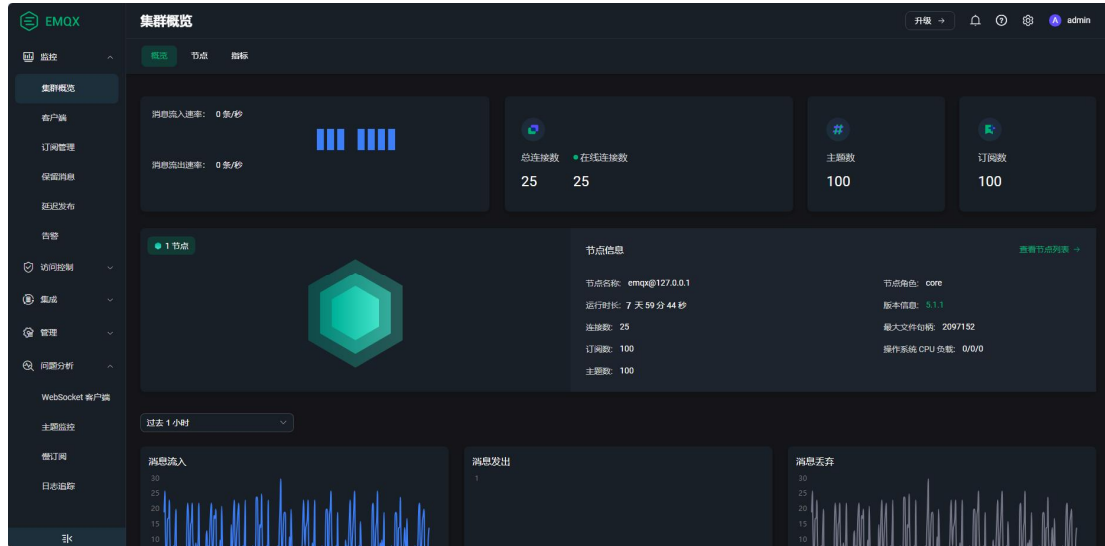


图 4.9.1 采集器操作系统稳定性



5. 测试人员签字

测试人员:	
项目负责人:	