

小型无人机发动机温度监控系统设计

胡宁博^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 475000;
2. 河南方达空间信息技术有限公司, 郑州 475000)

摘要: 为了实时监控小型油动无人机的发动机工作温度, 设计开发了基于 K 型热电偶的 4 路温度监控系统; 该系统采用模拟开关 CD4052 作通道切换, 选通的热电偶信号经放大调理, 由 STM32F103 控制器片上 A/D 采集, 经 DS18B20 数字温度传感器作冷端补偿, 最终以 Modbus RTU 协议将温度值发送到 485 总线上; 经调试校准, 该温度监控系统在蚊子直升机 MZ202 型发动机正常工作温度范围内与原机温度仪表相差 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 数据刷新率大于 2 Hz, 且工作稳定抗干扰能力较强, 为发动机调校提供了可靠的依据, 有效地保障了发动机安全稳定运行; 该温度监控系统也可用于 Rotax582, Rotax912/914 等小型活塞航空发动机缸头及排气温度的采集与监控。

关键词: 热电偶; 缸头温度; 排气温度; 小型无人机; 蚊子直升机; MZ202; Rotax582; Rotax912/914

Design of Temperature Monitoring System for Small UAV Engine

HU Ningbo^{1,2}

(1. 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 475000, China;
2. Henan Fangda Space Information Technology Co., Ltd., Zhengzhou 475000, China)

Abstract: In order to monitor the engine working temperature of small oil-powered drones in real time, a 4-channel temperature monitoring system based on K-type thermocouples was designed and developed. The system uses the analog switch CD4052 for channel switching, the selected thermocouple signal is amplified and adjusted, collected by the STM32F103 controller chip A/D, and DS18B20 digital temperature sensor for cold junction compensation, and finally the temperature value is sent to the Modbus RTU protocol on the 485 bus. After debugging and calibration, the temperature monitoring system is within the normal operating temperature range of the mosquito helicopter MZ202 engine and the temperature gauge of the original machine is $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, the data refresh rate is greater than 2Hz, and the work is stable and the anti-interference ability is strong, which provides for engine tuning. The reliable basis effectively guarantees the safe and stable operation of the engine. The temperature monitoring system can also be used to collect and monitor the cylinder head and exhaust temperature of small piston aero engines such as Rotax582, Rotax912/914.

Keywords: thermocouple; cylinder head temperature; exhaust temperature; small UAV; mosquito helicopter; MZ202; Rotax582; Rotax912/914

0 引言

近年来, 无人机技术蓬勃发展, 应用领域也不断拓展, 各种无人机层出不穷。其中, 油动无人机以载重量大、续航时间长等优点受到诸多行业用户的青睐。发动机工作状态影响着油动无人机的载重能力、飞行质量以及无人机的可靠性和安全性。发动机状态调校不合适, 无法达到最大功率输出, 问题严重时还可能会超温烧蚀缸体及活塞, 或者爆震影响正常飞行损坏结构件。监控发动机工作状态的手段主要是测量缸头及排气温度、发动机转速等, 水冷发动机还可以监测冷却液温度^[1]。在飞行中, 对发动机损害最大的因素就是发动机超温, 因此要严格控制发动机缸头及排气在正常范围内。

热端可与被测物体有良好热接触, 因而测温准确度较高。与其他测温手段相比, 更适合用于发动机缸头温度及排气温度的测量。

针对无人机发动机调试及飞行时监控发动机缸头及排气温度的需求, 参考蚊子超轻型直升机温度仪表电路, 设计了以 K 型热电偶为测温元件, 经过信号调理及采样计算, 通过 485 总线以 Modbus 协议发送温度数据, 供无人机飞控系统采集并下传到地面站显示以实现无人机发动机温度实时监控的温度监控系统。

1 系统结构及原理

为配合我单位蚊子直升机无人化改装的调试需求, 对所设计温度监控系统有如下的参数要求:

1) 传感器类型: K 型热电偶 (热端接地);

热电偶测温范围宽, 而且体积小结构简单便于维护,

收稿日期: 2020-12-17; 修回日期: 2021-01-11。

作者简介: 胡宁博(1984-), 男, 河南驻马店人, 硕士, 工程师, 主要从事无人机飞控器、机载电源、机载设备等方向的研究。

引用格式: 胡宁博. 小型无人机发动机温度监控系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 72-76.

- 2) 传感器路数：4 路（2 路缸头温度，2 路排气温度）；
- 3) 测温范围：-20~+800 ℃；
- 4) 允许误差：±5 ℃（常用工作温度范围内）；
- 5) 供电电压：12、或 24 V；
- 6) 输出形式：RS485 总线 查询方式输出；
- 7) 采集速率：≥2 Hz。

为了实时监控无人机发动机的温度变化，方便传感器的安装，采用蚊子直升机原机自带的接地型 K 型热电偶作测量。这类热电偶通过将焊点焊接到金属护套或者固定件上获得更有效的热传递，对温度变化的响应速度更快。与绝缘型的热电偶相比，金属与金属的接触会产生更短的热通路，检测滞后量小的同时，减小干扰，提高测量可靠性和精度。

但热端接地的热电偶安装后与发动机缸头或排气管接触，形成了热端接地。如果采集端也接地，就会由于两接地点存在微弱电势差而形成“接地回路”。因为所有金属体与热电偶热端都存在电势差，这种电势差作用于热电偶信号线上，将会引起较大的共模干扰^[2]。此外，发动机火花塞放电产生的电磁脉冲干扰，机载数传电台和图传链路的射频干扰，都会影响到热电偶信号的正常采集。

为了抑制共模干扰，可采用具有较高输入阻抗且以差分形式输入的仪表放大电路做信号调理^[3]。拟采用集成仪表器 AD620 搭建差分放大电路实现对热电偶信号的调理。其他集成化的温度采集方案，如 MAX31855，MAX6675 等采集芯片虽然使用更方便，精度也较高，但由于其内部断偶检测电路等的影响，采集热端接地的热电偶时，会因共模干扰抑制效果差而使数据跳变无法正常使用。

温度监控系统组成如图 1 所示。热电偶传感器信号进入系统后，首先经过通道切换电路，选通单通道进行采集。因为温度是缓变量不可能突变，因此逐通道采集并不会影响观测。选通的某通道电压经仪表放大器构成的信号调理电路放大后由微控制器片上 A/D 采集。微控制器同时采集冷端温度，对采集到的热电偶电压进行补偿计算最终得到热电偶传感器温度数据，并将数据以 Modbus 协议发送到 485 总线。为了与其他传感器共用 485 总线，采用查询方式发送数据。数据包加 CRC16 校验，避免传输过程出现数据错误影响观测。

2 系统硬件设计

2.1 通道切换电路

温度监控系统通道切换电路如图 2 所示。

采用模拟开关 CD4052 作通道切换。CD4052 是双四路模拟开关，具有较低的导通阻抗和截止漏电流。芯片 10 脚和 9 脚为地址端，根据地址选通一路信号进入后续调理放大电路。串联的 R5、R17 与输出端的 C2、C3 构成 RC 滤波电路。由于差分电路 RC 电路参数的不匹配会降低信号调理电路的共模抑制比，因此选用 ±0.1% 高精度低温漂电阻。

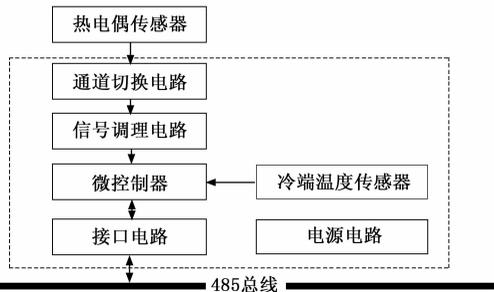


图 1 温度监控系统组成框图

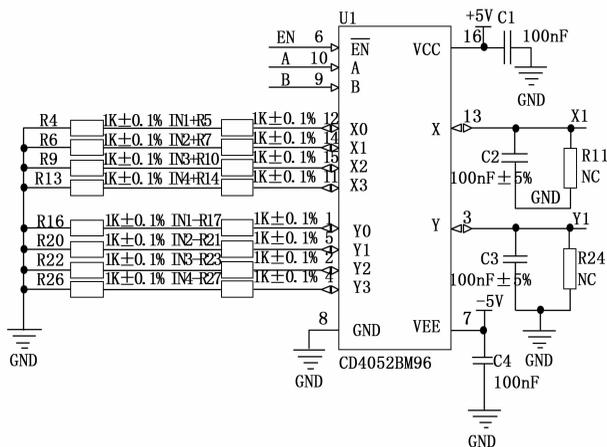


图 2 通道切换电路

R4、R16 等下拉电阻在发生断偶故障时拉低输入电平。

2.2 信号调理电路

信号调理电路如图 3 所示。采用集成仪表运算放大器 AD620 搭建。差分方式输入，±5 V 双电源供电。与采用通用运放搭建仪表放大电路相比，采用集成仪表运算放大器可以在保证共模抑制比的前提下减少外围高精度元件的需求数量^[4]。在图 3 中，仅 R15 需选用精度 ±0.1% 温度系数 ±10 ppm/℃ 的高精度低温漂电阻，其余电阻选用 ±1% 精度即可。由于 STM32 片上 AD 无法采集负电压，需将输入信号抬升以保证正常工作温度范围内信号调理电路不会输出负电压。AD620 的 5 脚为基准引脚，该引脚电位可定义零输出电压。在使用中，5 脚接 STM32 片上 DA 的输出，由 STM32 来提供所需 0.5 V 偏置电压。

信号调理电路增益^[5]：

$$G = 49.4\text{k}\Omega/R15 + 1 = 73.65$$

在仪表正常测量温度范围 -20~+800 ℃ 内热电偶输出电压范围约为 -0.78~+33.27 mV，经过放大电路后输出电压范围为 0.44~2.95 V，符合 STM32 片上 A/D 输入范围。

信号调理电路中由电阻引起的误差为：

$$\delta_1 = \sqrt{(\pm 0.1\%)^2 + (\pm 10 \times 10^{-6} \times (55 + 70))^2} = \pm 0.16\%$$

仪表放大器 AD620 引起的误差为：

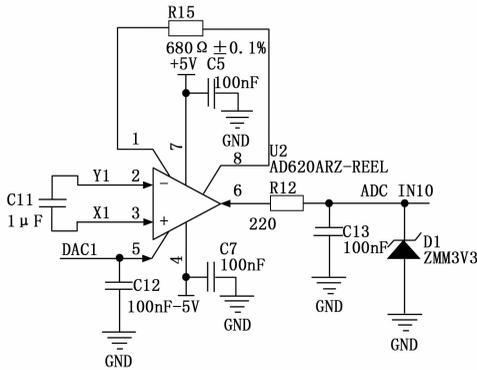


图 3 信号调理电路

$$\delta_2 = \pm 0.7\%$$

总的调理电路误差^[6]为:

$$\delta_{\max} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} = \pm 0.72\%$$

在软件调试时,需要对信号调理电路进行测量,并利用实际测得的数据拟合出电路电压放大倍数及直流偏置量写入程序进行计算^[7]。

2.3 控制器及接口电路

信号调理电路输出电压直接送控制器片上 A/D 进行采集。控制器采用 32 位 ARM 微控制器 STM32F103RET6,该控制器有 512 KB ROM 和 64 KB RAM,最高工作频率 72 MHz,片上集成了 16×12 bit A/D、3 路 USART、2 路 UART 以及其他外设,适用于嵌入式控制场合。485 接口电平转换采用 MAX3485,3.3 V 供电与控制器兼容。温度补偿采用单总线温度传感器 DS18B20 采集冷端温度^[8]。为了提高温度补偿的精度,可以将采集冷端温度的 DS18B20 传感器从板上引出安装在热电偶传感器与普通导线对接的接头附近。

2.4 电源电路

外部供电 VIN 为 10 ~ 30 V,经 DC-DC 模块 TPS5430DDAR 降压到 5.5 V,如图 4 所示。

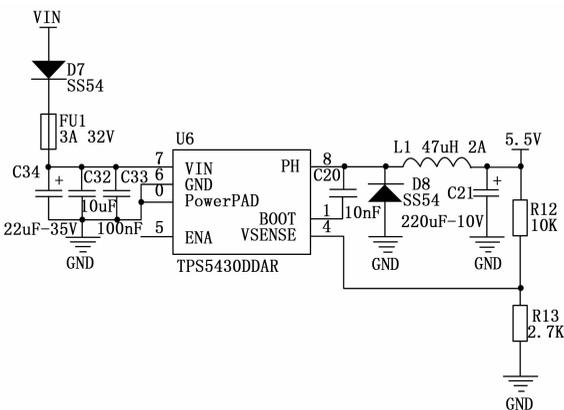


图 4 DC-DC 电源电路

TPS5430 是一个高输出电流 PWM 转换器,最大输出电流 3 A,片上集成了低阻抗高侧 N 沟道 MOSFET,开关

频率固定为 500 kHz。通道切换和信号调理电路所需的 +5 V 由 LDO 芯片 HT7550 提供,并经截止频率约 7.8 kHz 的 π 形滤波器滤除电源噪声。控制器及接口电路所需的 3.3 V 电源由 LDO HT7533 提供。控制器模拟部分供电 VDDA 由 3.3 V 电源经截止频率约为 78.2 kHz 的 π 形滤波器滤波后提供。反相器 74HC14D 搭建成的震荡电路配合 D2, D3 及 C12 构成电荷泵,对 5.5 V 进行反向,以提供通道切换及信号调理电路所需的 -5 V 电源。LDO 及负电源电路如图 5 所示。

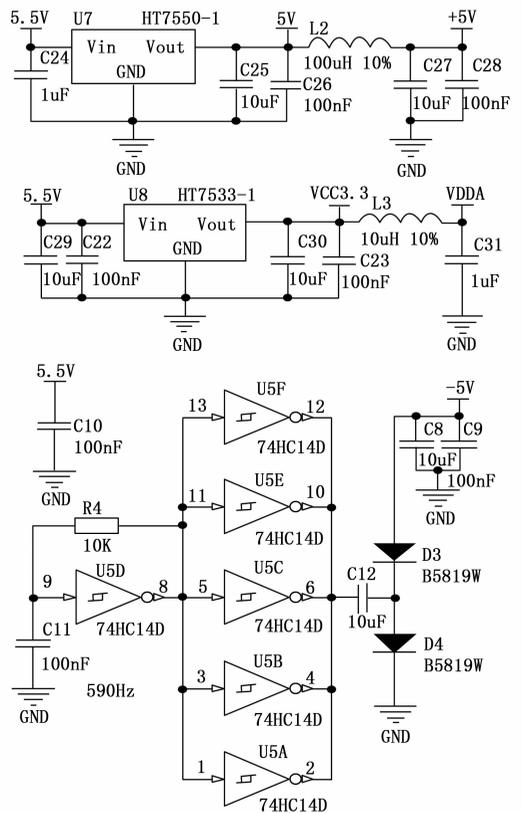


图 5 LDO 和负电源电路

3 系统软件设计

软件功能较为简单,而且温度参数为缓变量,对于实时性的要求不是很高,因此采用单循环程序结构,逐通道采集、计算。通信部分采用中断方式接收和发送,使通讯响应更为迅速。

3.1 主程序设计

主程序流程如图 6 所示。上电后先配置 IO 口、串口、A/D、D/A 等,D/A 输出直流偏置量提供给仪表放大器,然后初始化温度传感器 DS18B20 和看门狗最后进入主循环,依次采集冷端温度及各通道温度,并执行喂狗操作。

单总线温度传感器 DS18B20 为串行通信器件,读取数据时对于时序要求较严格。当 DS18B20 读取数据时被串口中断打断,将造成读取到的数据错误,影响温度补偿^[9]。简单的解决办法是在读取 DS18B20 时暂时关闭串口中断。

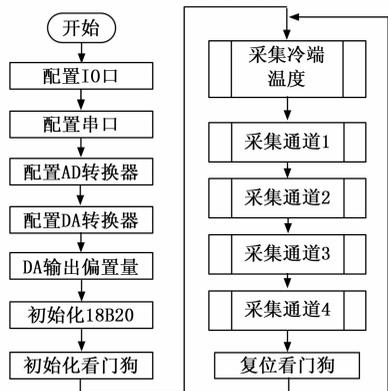


图 6 主程序流程图

或利用定时器中断控制 DS18B20 的读写时序，并配置定时器中断优先级高于串口中断。

3.2 串口中断子程序

串口中断子程序流程如图 7 所示，进入中断处理子程序后，首先判断中断类型。如果是接收中断，判断接收到的指令是否正确，指令正确则切换 485 总线为发送状态，准备好温度数据并且计算 CRC16 校验值，打开发送中断开始发送数据。如果是发送中断需要根据发送数据个数判断是否发送完毕，未发送完毕就把一字节待发送数据拷贝到控制器的发送缓冲，发送完毕则关闭发送中断并把 485 总线切换到接收状态。

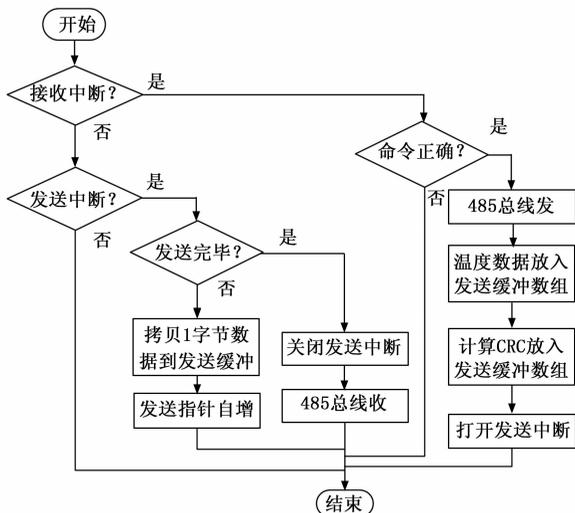


图 7 串口中断子程序流程图

485 串口通讯采用 Modbus RTU 协议，查询方式输出，以便于与其他传感器或机载设备组成总线实现集中管理^[10]。表 1 为采集指令的帧结构，表 2 为返回数据的帧结构。其中，返回的温度数据为 16 进制，高字节在前，数值转成 10 进制后除 10 即为温度值。

3.3 温度采集子程序

温度采集子程序流程如图 8 所示。切换通道后，延时

50mS 等待电压稳定，然后控制 A/D 采集电压值，这里实际进行了多次采集并求平均以减小误差。然后根据信号调理电路的直流电压偏移量和电压放大倍数计算热电偶输出电压。得到热电偶输出电压后需要进行冷端补偿，具体方法是查找 K 型热电偶分度表求得冷端温度对应的补偿电压值，将热电偶电压加上补偿电压后再次用查表内插法查分度表求得热电偶温度。在程序流程中，切换通道后延时最占用时间，但由于滤波电路稳定需要时间，这又是必不可少的。经实验测定，延时 50 ms 即可以保证信号电压达到稳定又可保证主程序运行效率，满足 2 Hz 数据刷新率的要求。

表 1 采集指令帧结构

字节数	功能	例
1	从机地址	01
2	功能号	03
3	数据地址	00
4		00
5	数据个数	00
6		04
7	CRC16 校验	04
8		0C

表 2 返回数据帧结构

字节数	功能	例
1	从机地址	01
2	功能号	03
3	字节数	08
4	温度数据 1	00
5		01
6	温度数据 2	00
7		02
8	温度数据 3	00
9		03
10	温度数据 4	00
11		04
12	CRC16 校验	04
13		0C

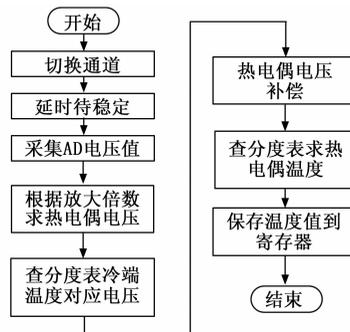


图 8 温度采集子程序流程图

4 实验结果与分析

4.1 实验步骤和方法

电路装配完成后,将热电偶输入端接毫伏电压源,用电压表测量信号调理电路输入及输出电压值,从 $-10\sim 35\text{ mV}$ 每间隔 5 mV 测量一组数据,测量完成后用线性曲线拟合,根据拟合得到的斜率和偏移量更正程序中的计算参数。蚊子直升机使用 MZ202 型两冲程双缸风冷发动机,缸头正常温度在 $148.8\sim 204.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,警惕温度为 $204.4\sim 260\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高温度为 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$,排气正常温度 $593.3\sim 648.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,警惕温度为 $648.8\sim 676.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高温度为 $676.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,超出最高温度发动机将会损坏。为提高测温精度减小调试工作量,也可以仅在常用的工作温度范围内进行校准。信号调理电路校准完成后与原机发动机温度仪表进行比对。

4.2 误差对比与分析

在正常工作温度范围内,缸头温度显示及误差如表 3 所示,排气温度显示及误差如表 4 所示。

表 3 缸头温度及误差 $^{\circ}\text{C}$

原机仪表	采集数据	误差
140	143	3
150	153	2
160	162	2
170	171	1
180	180	0
190	190	0
200	201	1
210	210	0
220	220	0
230	229	-1
240	238	-1
250	248	-2
260	257	-2

表 4 排气温度及误差 $^{\circ}\text{C}$

原机仪表	采集数据	误差
590	592	0
600	602	0
610	613	1
620	622	0
630	633	0
640	642	1
650	652	2
660	662	0
670	672	0
680	682	0

从表 3 可以看出,缸头温度在 $180\sim 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内较为准确,两端温度偏差较大。表 4 排气温度整体偏差不大。这是由于使用手持式 Fluke-17B 型万用表校准信号调理电路,电

压分辨力为 0.1 mV ,当输入电压较低时,量化误差影响较大。如使用高精度的台式万用表校准信号调理电路,应能进一步减小整体测量误差。综合表 3、4 来看,在蚊子直升机发动机正常工作温度范围内,相对于原机温度仪表的温度显示偏差为 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,与原机温度仪表一致性较好,符合设计参数要求,满足调试及飞行期间监测发动机温度的需求。

4.3 安装使用情况

实际使用时,安装位置应避开机舱内的电源、舵机控制盒等发热部件,远离舵机、数传图传电台等干扰源。热电偶传感器选用带屏蔽的铠装热电偶,屏蔽层在热端做好接地处理,采集端做好绝缘,保证屏蔽层单点接地^[11]。温度监控系统采用金属外壳,做好接地处理以屏蔽干扰。经地面联调及飞行测试,温度监控系统显示稳定,抗干扰能力较强,与原机自带温度仪表误差较小,为发动机调校提供了可靠的依据,有效地保障了发动机安全稳定运行。

5 结束语

针对小型无人机发动机调试及飞行中需要实时监测发动机缸头及排气温度的需求,设计开发了基于 K 型热电偶的温度监控系统。该系统测量精度满足调试及监控需求,且工作稳定抗干扰能力强,投入使用后极大地方便了发动机工况调试,避免了因盲目调试造成发动机活塞烧蚀、拉缸等事故。该温度采集电路也可用于 Rotax582、Rotax912/914 等小型活塞航空发动机的温度采集。

参考文献:

- [1] 荆晓东. 浅析活塞发动机气缸头温度 [J]. 科技资讯, 2005 (26): 30.
- [2] 徐炳华. 电子仪表系统的外部噪声及抑制 [J]. 石油化工自动化, 1980 (2): 3-11.
- [3] 蒙建波, 朱林章. 仪表测量系统中的噪声干扰及其抑制方法 [J]. 自动化仪表, 1990, 11 (6): 6-10.
- [4] 张 华, 邱 红, 宋 智. 由于电阻精度引起差分放大电路误差的分析 [J]. 现代电子技术, 2007, 30 (18): 181-182.
- [5] 刘建成, 陈玉林. 新型热电偶实验系统研制 [J]. 实验技术与管理, 2018, 35 (7): 90-94.
- [6] 杨朋樽. 热电偶传感器调理电路设计 [J]. 山西电子技术, 2017 (6): 19-21.
- [7] 李 伟, 胡 强, 陈 迪. 基于 MSP430 的 Rotax914 发动机检测系统设计 [J]. 四川兵工学报, 2014 (2): 105-108.
- [8] 李 雷, 张建彪, 张 南, 等. DS18B20 在发动机排气温度测量中的应用 [J]. 数字通信世界, 2018 (11): 159.
- [9] 凌振宝, 王 君, 朱凯光, 等. 数字温度传感器在热电偶冷端补偿中的应用 [J]. 传感器技术, 2003 (6): 45-46.
- [10] 朱小超, 徐雪春. 基于 Modbus 协议的上位机与单片机通信的实现与仿真 [J]. 仪表技术与传感器, 2011 (6): 65-68.
- [11] 王金全, 黄彬业. 工业计算机系统工程化应用的抗干扰问题文 [J]. 中国电力, 1996, 29 (7): 18-21.