

消防机器人底盘热防护多通道温度采集系统设计与试验

张慧贤¹, 张学贺², 马利民¹, 郭哲锋¹, 梁莉¹,
郭兆锋³, 王文豪¹, 范一赢¹

(1. 洛阳理工学院 智能制造学院, 河南 洛阳 471023;

2. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

3. 上海倍伺特自动控制设备有限公司, 上海 201818)

摘要: 针对消防机器人底盘工作环境不低于 300 °C 的要求, 以及对底盘型腔进行多点测温的需求, 开发了基于 Labview 的消防机器人底盘热防护 8 通道温度采集软硬件系统; 实现了基于串口 Modbus RTU 协议的温度数据采集与传输, 系统具有用户注册、串口配置、温度曲线实时显示、超温声光报警、数据显示与保存、历史数据回放、数据表显示与小波降噪等功能; 通过该系统对底盘型腔进行了 4 种工况的热防护温度检测试验, 验证了系统的可靠性; 此外, 针对温度曲线中出现的噪声干扰, 引入了小波分析, 采用 Labview 与 Matlab 混合编程方法, 通过小波阈值滤波算法对采集到的数据进行了降噪处理, 并与各通道温度原始数据进行了对比, 达到了较好的滤波效果; 该系统可视化效果好, 数据采集实时且准确, 对工业现场多点温度的实时检测具有借鉴意义。

关键词: Labview; 消防机器人; 热防护; 多通道; 温度采集; 小波分析

Design and Experiment of Multi-channel Temperature Acquisition System for Fire Fighting Robot Chassis Thermal Protection

ZHANG Huixian¹, ZHANG Xuehe², MA Limin¹, GUO Zhefeng¹, LIANG Li¹, GUO Zhaofeng³,
WANG Wenhao¹, FAN Yiyang¹

(1. School of Intelligent Manufacturing, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

2. State Key Laboratory of Robotics and Systems, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. Shanghai Best Automation Control Equipments Co., Ltd, Shanghai 201818, China)

Abstract: Aiming at the working environment of fire-fighting robot chassis is not lower than 300 °C, for meeting the demand of multi-point temperature measurement of robot chassis cavity, an 8-channel temperature acquisition system including software and hardware based on Labview platform is developed, and the thermal protection testing of fire-fighting robot chassis is used. The system realizes the temperature data collection and transmission by the serial port and Modbus RTU protocol, in detail, which has the functions of user registration, serial port configuration, temperature curve real-time display, over-temperature sound and light alarm, data display and storage, historical data playback, data table display and wavelet denoising etc. Through this system, four working conditions of thermal protection temperature detection experiments for the chassis cavity are carried out, and the system reliability is verified. In addition, in view of the noise interference appearing in the temperature curve, Labview and Matlab hybrid programming method is adopted by the Matlab wavelet threshold filtering algorithm, the collected data is filtered by four different threshold criteria. Meanwhile, which is compared with the original temperature data of each channel, indicating that a better filtering effect is obtained. In conclusion, the system has good visualization effect, real-time and accurate data collection function, which has certain reference significance for real-time detection of multi-point temperature in industrial field.

Keywords: Labview; fire-fighting robot; thermal protection; multi-channel; temperature collection; wavelet analysis

收稿日期: 2021-10-05; 修回日期: 2021-11-18。

基金项目: 国家重点研发计划资助(2019YFB1312101); 河南省重点研发与推广专项(202102210333); 河南省高等学校重点科研项目(20A460020); 2021 年河南省高校国家级大学生创新创业训练计划项目(202111070004); 洛阳理工学院 2020 年度“专创融合”课程建设项目。

作者简介: 张慧贤(1975-), 男, 甘肃天水人, 博士, 副教授, 主要从事机电液一体化、计算机控制方向的研究。

通讯作者: 张学贺(1985-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 副研究员, 主要从事人机协作型机器人、仿生机器人、机器人视觉等方向的研究。

引用格式: 张慧贤, 张学贺, 马利民, 等. 消防机器人底盘热防护多通道温度采集系统设计与试验[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 190-196, 243.

0 引言

消防机器人在一定程度上能代替消防员进入有毒、浓烟、高温、缺氧、坍塌、狭小空间等事故现场, 承担侦查检验、排烟降温、搜索救人、灭火等任务, 对提高部队灭火救援能力和效率, 保障消防员安全及社会进步具有重大意义。根据石化爆燃等危险环境防爆型作业机器人底盘耐高温防护的要求, 对机器人底盘耐高温防护技术进行研究, 确保消防机器人能够在 300 °C 以上的高温环境中正常工作, 这对于提高消防机器人的火场适应性、提高现场救援效率非常重要。

虚拟仪器作为模块化软件开发系统, 能代替一定的硬件或与硬件相结合完成信息的采集与显示。Labview 作为广泛使用的虚拟仪器软件, 能借助虚拟模板用户界面和方框图建立虚拟仪器的图形程序设计系统, 能更好的完成程序的开发及数据显示, 在工业领域应用广泛^[1-8]。基于以上需求, 本文采用 Labview2018 设计了消防机器人底盘热防护多通道温度采集软硬件系统, 该系统除开发的电气硬件、测试软件外, 还包括加热炉、机器人底盘试验箱、机器人底盘耐高温涂层、耐高温隔热棉等试验材料。控制系统主要由上位机和下位机构成, 热电阻 PT100 布置在底盘试验箱不同点, 将采集到的多点温度传输到温控仪, 温控仪再通过 485 接口将数据通过串口 Modbus RTU 协议传输到上位机, 并在 PC 端开发的软件界面上实现了 8 路温度的实时采集、显示与保存^[9-16]。最后针对出现的信号噪声干扰, 采用小波阈值滤波算法对数据进行了滤波处理^[17-20], 并与各通道温度原始数据进行了对比, 表明该系统工作可靠、测量精度高、可视化效果好, 对于工业自动化领域多点温度的测量具有实际意义。

1 硬件设计

1.1 系统原理

多个 PT100 热电阻温度传感器分布在消防机器人底盘试验箱的不同部位, 通过两个 4 路辉控 HKDN2-4 温控仪, 将温模拟信号转化为数字信号并通过 485 串口输出, 并通过 JPX6021 中继器将两路 485 信号合并为 1 路 485 串口信号, 通过 485 屏蔽双绞线连接至上位 PC 机的 USB 接口, 系统硬件连接结构如图 1 所示。

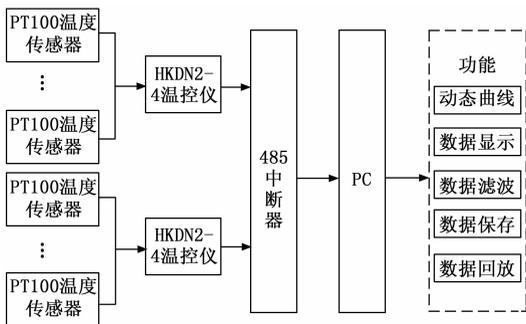


图 1 多路温度采集系统硬件结构图

1.2 传感器与温控仪

温度传感器采用三线制的 PT100 铂热电阻, 测温范围为一 70~450 °C, 引线采用耐高温屏蔽线。三线制 PT100 可消除连接导线电阻引起的测量误差, 提高了测量精度, 测温精度为 ±0.3 °C。PT100 与 HKDN2-4 温控仪连接, HKDN2-4 温控仪为 DC24V 供电, 支持 PT100 输入, 通信接口为 RS485, 通信协议为标准的 Modbus RTU 串口协议, 可将采集到的温度信号转换为数字信号并通过 485 串口输出, 温控仪具体的 Modbus RTU 规约命令格式如表 1 所示。

表 1 Modbus RTU 规约命令格式

地址代号 (站号)	功能码	寄存器地址位	参数个数	校验方式
1 个字节	1 个字节	两字节 (高前低后)	两字节 (高前低后)	CRC16 校验

温控仪默认数据位为 8, 1 位停止位 (无奇偶校验), 波特率 9 600 (9 600、19 200、38 400、57 600、115 200 可调)。在实际运行中, 温控仪与 PC 串口的波特率均设置为 9 600, 为保证数据传输的准确性, 数据校验方式采用循环冗余校验 CRC16。

表 2 部分 HKDN2-4 温控仪功能码

功能码	作用	说明
03	读取仪表内部数据	读取仪表内部数据, 适用于内部保持寄存器
04	读取测量值数据	读取温度与湿度测量值, 适用于测量值寄存器
06	写入仪表内部数据	写入仪表数内部数据, 适用于内部保持寄存器

表 3 部分内部寄存器地址

寄存器地址	数据类型	说明
0~3	INT16	1~4 通道设定值
16	INT16	LOCK 参数选择菜单
17	INT16	CH 当前通道号

由于 Modbus 协议使用的是主从通讯技术, 即由主设备主动查询和操作从设备, 因此, 每次通信都是主站先发送指令, 从站响应指令, 并按要求应答, 或者报告异常。当主站不发送请求时, 从站不会自己发出数据, 从站和从站之间也不能直接通信。比如在本系统中, 上位机 Labview 程序主动查询温控仪传送到 COM 串口中的数据, 当读取到温控仪采用 Modbus RTU 协议发送的数据为: 01 04 00 00 00 04 F1 C9 时, 根据表 1 通信协议规约格式, 01 表示第 2 块仪表, 如果是 00, 则表示第 1 块仪表; 04 表示表 2 中的功能码 04 (读取测量值数据); 中间的 00 00 表示表 3 中的寄存器地址, 存储着当前的温度实际测量值; 00 04 表示参数个数, 即表示 1 块仪表总共 4 个通道; F1 C9 表示采用 CRC16 校验的数值。

1.3 485 串口中继器 JPX6021

由于开发的是 8 通道温度采集系统, 采用了 2 个 4 路的

HKDN2-4 温控仪，为保证两个温控仪的数据通过 485 串口传输到上位 PC 机，选用了串口中继电器 PX6021。该中继器相当于一个 RS485 集线器，除了将多路 485 信号集中后整体输出，还可以将单路 485 信号分成多路分别输出。此外，该中继器还具有放大信号、光电隔离、防雷浪涌保护，及其自动感知数据流向并切换控制电路的功能。在系统组网方面，该中继器每一路可以串联多达 256 个设备，具有较强的驱动能力。在本系统中，中继器 JPX6021 通过 DC9~40 V 宽电压供电，2 个 4 路的 HKDN2-4 温控仪通过 485 接口和集线器相连，组成 1 路 485 信号通过屏蔽双绞线连接至上位 PC 机的 USB 接口，并通过 485-USB 通信模块，完成了现场温度采集硬件与上位机的连接。

1.4 485- USB 通信模块

485-USB 通信模块采用 RJ303X2，该模块为通用的双向 RS485/422-USB 转换器，不仅能够将现场仪表平衡差分的 RS485 信号转换为单端的 USB 信号传送到上位 PC 机，也可通过主机将数据通过 USB 接口转换为 RS485 串口信号发送给外设。I/O 电路自动控制数据流方向，转换器内部带有零延时自动收发转换，不需任何握手信号即可实现全双工、半双工模式转换，确保适合一切现有的通信软件和接口硬件，可以为点到点、点到多点的通信提供可靠的连接。在本系统中，从中继器 JPX6021 引出的 485 信号只需 2 根线便可实现串行异步通信，具体接线方式为：中继器 JPX6021 中 RS485 串口的 A、B 分别连接 485-USB 通信模块 RJ303X2 输入接口的 485+ 和 485-，系统硬件接线如图 2 所示。

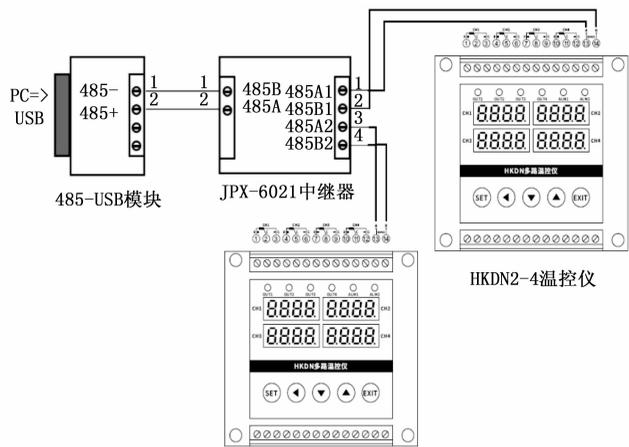


图 2 系统硬件接线图

2 软件开发

本课题采用 Labview 软件开发平台开发了消防机器人底盘热防护 8 通道温度采集系统，实现了基于串口 Modbus RTU 协议的温度数据采集与传输，软件功能主要包括用户注册、串口配置、温度曲线实时显示、超温声光报警、数据显示与保存、历史数据回放、数据表显示与数据滤波等功能，程序流程如图 3 所示。

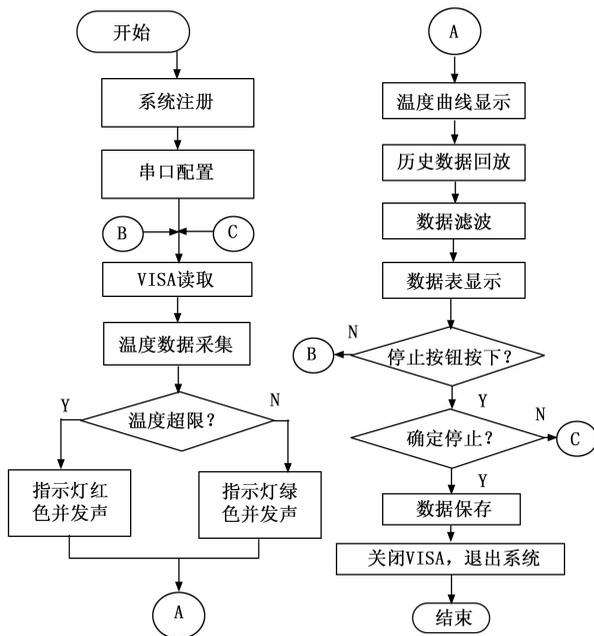


图 3 多通道温度检测系统程序流程图

2.1 串口配置与 VISA 读取

VISA 是 Labview 仪器编程的标准 API 函数，作为新一代仪器 I/O 通用标准，LabVIEW 将 VISA 节点单独组成一个子模块，共包含 8 个节点，分别实现初始化串口、串口写、串口读、中断以及关闭串口等功能。首先通过 COM 端口号对 VISA 资源进行配置，如波特率 (9 600)、数据比特 (8)、校验位 (None) 等参数。配置完串口后，通过 VISA 读取各串口缓冲区的数据，由于开发的 8 通道温度采集系统由两个 4 通道的 HKDN2-4 温控仪进行温度信息的现场显示，并且通过一组 485 通信线 (二线制) 与上位 PC 机连接。为保证温度信息的可靠传输，上位机程序在读取温控仪数值的时候，两个温控仪的数据通过 VISA 进行读取后，通过加入延时函数 (延时 0.5 s) 采用分时传输的方式，避

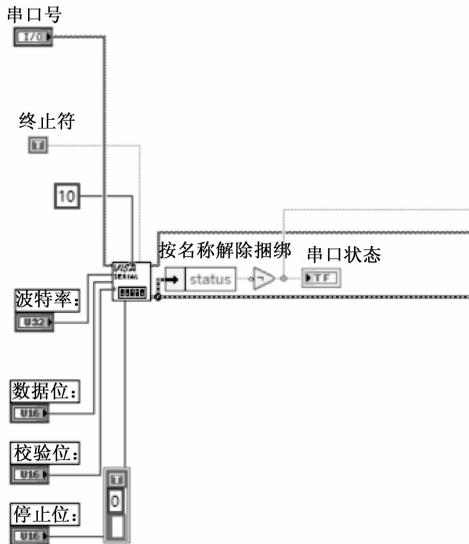


图 4 串口配置与 VISA 读取

免了温度数据在 485 串口线上的冲突, 确保了数据的有效传输。

2.2 温度数据提取与转换

8 个 PT100 热电阻温度传感器分别连接两个具有 RS485 串口输出的 4 路辉控 HKDN2-4 温控仪, 通过 JPX6021 中继器将两路 RS485 信号合并后经 485 屏蔽双绞线输出, 再经过 485-USB 通信模块 RJ303X2 与上位 PC 机的 USB 接口连接。由于本温控仪采用的是 Modbus RTU 协议, 依据 Modbus 协议通过主从模式读取数据的特点, 结合表 1 的通信协议规约命令格式、表 2 的温控仪功能码以及表 3 的温控仪寄存器地址编写 Labview 程序, PC 机上开发的 Labview 程序通过 VISA 函数主动读取温度数据到输入缓冲区, 并对数据进行 16 位 CRC 校验, 确保温度数据传输的正确性。另外, 由于 Modbus RTU 协议的报文格式为十六进制, 因此在数据传输结束后要通过数值转换控件将十六进制制字符串变换为十进制进行显示。以其中 1 个通道为例, 温度数据传输与转换的部分计算程序如图 5 所示。

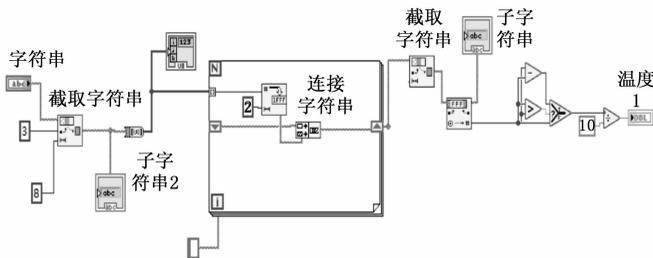


图 5 温度数据的传输与转换程序

2.3 温度实时曲线与数据保存

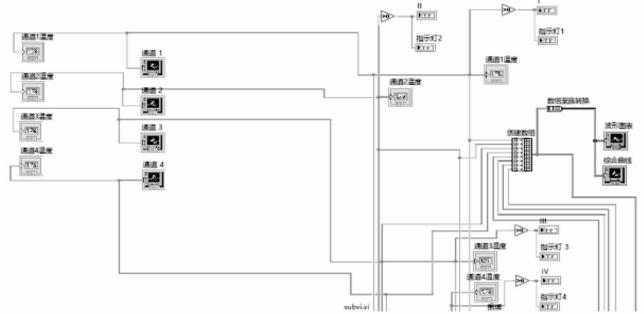
8 个通道的温度数据传输到用 Labview 开发的程序交互界面, 通过数据表格进行实时显示, 并绘制成温度实时曲线。根据实际工作需要及实时化显示需求, 系统开发了 8 通道综合曲线显示界面及分通道曲线显示界面, 用户可以根据需求选择查看综合对比曲线或各通道温度变化曲线。为方便后期对测量的温度数据进行统计和分析, 系统设计了将温度数据保存为 *.txt 的文本文档进行备份, 同时采用数据表格功能也可以将数据导出为 *.xls 的 excel 文档, 方便后期数据处理。温度数据保存及数据表显示的部分程序如图 6 所示。

2.4 登录及用户注册程序

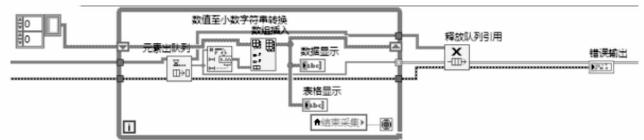
为保障系统的安全及使用权限, 还开发了系统登录界面及用户注册功能, 用户通过注册将信息写入 *.txt 文件, 只有通过注册的用户才可以用户名及密码登录。用户注册程序及界面如图 7 所示。

2.5 小波分析与滤波

由于在温度检测过程中信号出现了瞬时的毛刺等突变现象, 为消除信号噪声干扰并最大化保证信号成分不丢失, 本文采用小波阈值滤波算法实现了信号降噪。由于 Fourier 变换只能获取一段信号总体上包含哪些频率的成分, 但是对各成分出现的时刻并无所知。小波 (Wavelet) 分析是通

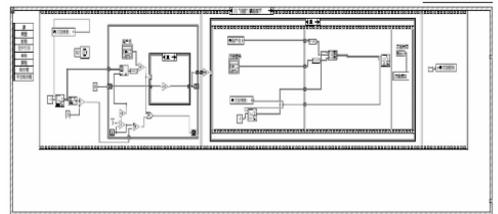


(a) 温度实时曲线程序



(b) 数据保存程序

图 6 温度实时曲线与数据保存程序



(a) 用户注册程序



(b) 登录及用户注册界面

图 7 登录及用户注册功能

过伸缩平移运算对信号逐步进行多尺度细化, 将无限长的三角函数基换成了有限长的会衰减的小波基, 这样不仅能够获取频率, 还可以定位到时间, 最终将获取到低频与高频处的时间细分, 能自动适应时频信号分析的要求, 从而可聚焦到信号的任意细节, 解决了 Fourier 变换对瞬态信号处理不完善的问题。

假设存在函数 $\varphi(t) \in L^2(R)$, 如果满足下面的允许条件^[21]:

$$C_{\varphi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\varphi(\hat{t})|}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则函数 $\varphi(t)$ 称为基本小波或母小波, 母小波通过伸缩、

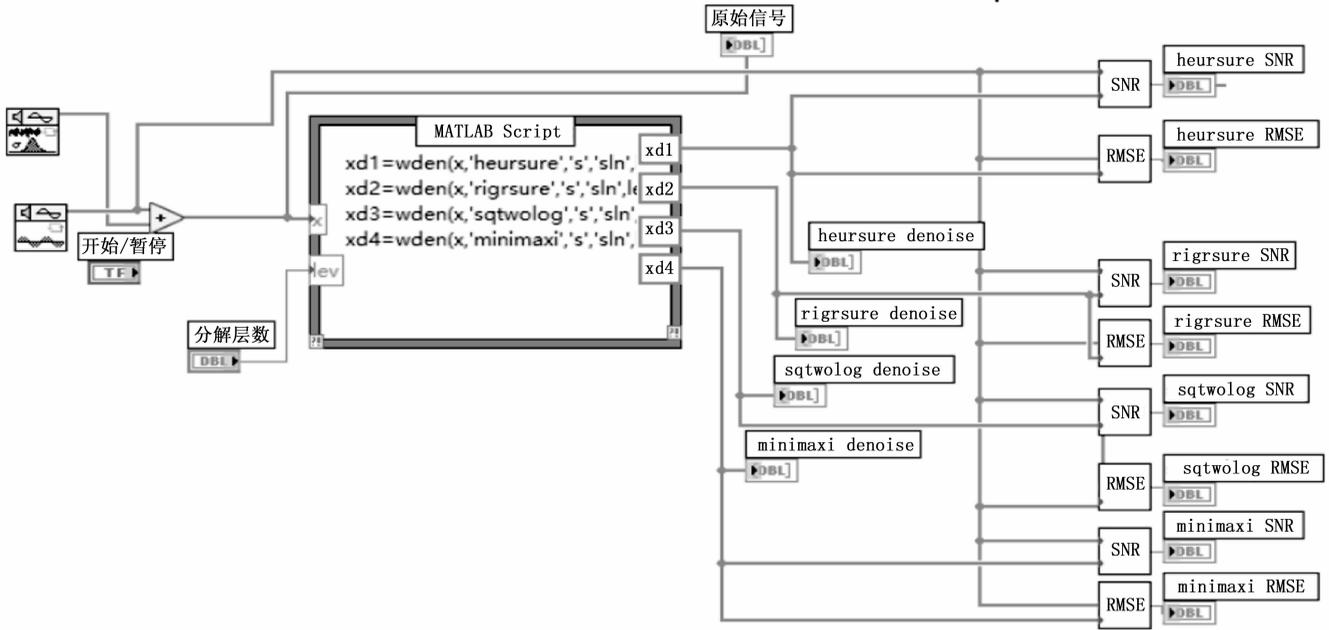


图 8 小波阈值滤波降噪程序

平移可以构成 $L^2(R)$ 的一个标准正交基:

$$\varphi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right), a \in R^+, b \in R \quad (2)$$

其中: a 称为尺度参数, b 称为平移参数。 $L^2(R)$ 中的任意函数 $f(t)$ 的连续小波变换可以定义为:

$$WT_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt, a \neq 0 \quad (3)$$

同傅立叶变换一样, 连续小波变换也可定义为函数与小波基的内积, 即:

$$WT_f(a,b) = [f(t), \varphi_{a,b}(t)] \quad (4)$$

然后采用离散小波变换, 将尺度按幂级数进行离散化, 取幂级数的底数为 2。当尺度 a 较大时被分析的信号区间长而分析频率低, 可作近似观察; 当尺度 a 较小时信号区间短而分析频率高, 可作细节观察。令: $a = 2^{-j}, b = 2^{-j}k, j, k \in Z$, 可得离散小波变换为:

$$DWT_f(j,k)[f(t), \varphi_{j,k}(t)] \quad (5)$$

其中: 小波函数 $\varphi_{j,k}(t)$ 为:

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \varphi(2^j t - k), j, k \in Z \quad (6)$$

式 (6) 所示的表达式为尺度取 2 的整幂的多分辨率分析的多贝西小波 (daubechies wavelet, db 小波), 由于其在时域和频域对不规则信号较为敏感, 并有良好的局域性, 且可作为 Mallat 算法成熟常用的母小波, 因此本文选用 db 小波对信号进行分解和重构。为实现小波降噪, 文中具体采用 Labview 与 Matlab 混合编程的方法, 通过 Labview 调用 Matlab 自带的 4 种不同阈值准则下的小波去噪算法进行降噪处理, 其中包括混合准则 heursure、无偏风险估计准则 rigrsure、固定阈值准则 sqtwolog 和极大极小准则 minimaxi。Labview 提供了 Matlab Script 节点, 通过该节点可以直接调用 Matlab 应用程序。在程序中, 通过分析对比采用

db4 小波 5 层分解, 阈值函数选取软阈值函数, 阈值选取 heursure 规则作为小波分析的阈值规则, 程序如图 8 所示。

3 温度采集试验

3.1 硬件系统

课题需要对消防机器人底盘进行耐高温设计, 其中包括机器人部件耐高温结构设计以及机器人底盘型腔耐高温防护技术研究, 以实现机器人底盘能够在不低于 300 °C 高温环境下工作。设计加工了耐高温试验测试台架, 该台架主要由耐高温加热炉和温控箱组成, 高温加热炉的加热范围为 10~600 °C, 满足机器人耐高温试验所需的工作温度要求, 内部空间尺寸规格为: 2 000 mm × 1 000 mm × 1 000 mm, 满足容纳履带式消防机器人底盘的空间要求, 具体参数如表 4 所示, 开发的多通道温度采集系统如图 9~12 所示, 分别为温度采集系统软件界面、综合曲线显示界面、分通道显示界面及数据表。

表 4 高温试验炉参数

型号:	工作温度范围:	室温+10~600 °C (可调)
使用电压:	380 V/50 Hz	控温精度: ±1 °C
加热介质:	不锈钢加热管	加热功率: 45 kW
鼓风机功率:	无	温度均匀性: ±2% °C
规格尺寸:		
工作室尺寸:	1 000 * 2 000 * 1 000	深 * 宽 * 高(mm)
外形尺寸:	1 400 * 2 400 * 1 600	深 * 宽 * 高(mm)

3.2 温度采集试验

在图 13 所示的消防机器人底盘试验型腔 1 和型腔 2 中分别加入一定量的冰块, 并在型腔外部包覆 5 mm 厚的纳米

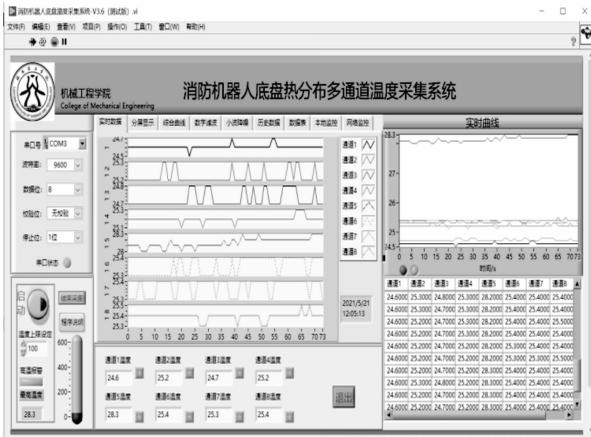


图 9 多通道采集软件界面

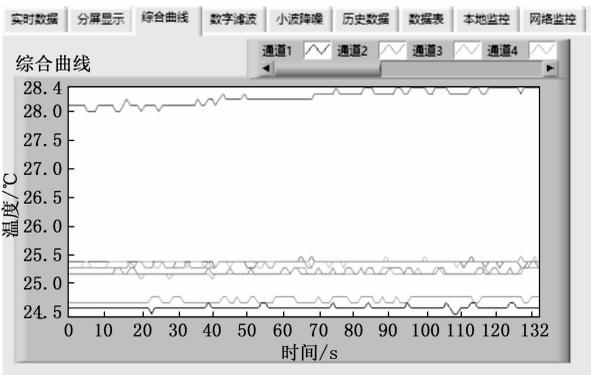


图 10 综合曲线显示界面

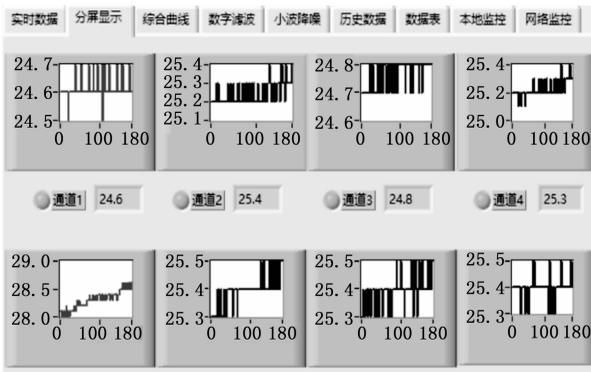


图 11 分通道显示界面

微孔隔热棉。将 5 个 PT100 热电阻温度传感器按表 2 所示的工况进行安装, 温度数据每隔 1 s 采集 1 次。根据机器人通用底盘工作环境要求, 在 300 °C 以上炉温环境下, 对底盘型腔 4 种工况进行了耐热试验温度测试, 测试时间为 30 分钟, 采集到的部分数据如表 5 所示。图 11 为底盘型腔在不同工况下测得的温度趋势, 表明在型腔中加入冰块, 能有效降低热传导, 效果良好, 而在型腔外包裹纳米微孔隔热棉, 能有效降低升温速度。该试验检验了系统工作的正常性, 也为后续底盘热防护设计提供了技术参考。

表 5 温度采集试验(部分示例数据)

时间/s	型腔 1 温度/加冰块	炉温	型腔 2 温度/加冰块	隔热棉与型腔外壳夹层	室温
0	12.9	81.8	8.9	20.7	24.5
1	12.9	84.1	9	21	24.4
2	12.9	86.4	9	21	24.4
3	12.9	87.5	9	21.2	24.4
4	12.9	89.7	9	21.4	24.4
5	12.9	91.9	9	21.5	24.5
6	12.9	93.1	9	21.7	24.4
7	12.9	95.3	9	22	24.4
8	12.9	96.4	9.1	22.1	24.5
9	12.9	98.6	9.1	22.2	24.4
10	12.9	100.8	9.1	22.4	24.4
11	13	102	9.2	22.7	24.4
12	13	104.2	9.2	23	24.5
13	12.9	106.4	9.2	23.1	24.5
14	12.9	107.5	9.2	23.4	24.4
15	13	109.7	9.3	23.7	24.4
16	12.9	110.8	9.3	23.8	24.4
17	13	113	9.3	24.1	24.5
18	13.1	115.1	9.3	24.2	24.5
19	13.1	116.2	9.4	24.5	24.5
20	13.1	118.4	9.4	24.7	24.5
21	13.1	120.6	9.4	24.9	24.4
22	13.1	121.6	9.4	25.4	24.4
23	13.1	123.7	9.5	25.4	24.4
24	13.2	125.9	9.5	25.8	24.4
25	13.2	126.8	9.6	26.1	24.4
26	13.2	129.1	9.6	26.3	24.4
27	13.3	134.2	9.7	27.1	24.5
28	13.3	135.2	9.7	27.4	24.5
29	13.3	137.3	9.7	27.7	24.5
30	13.3	139.3	9.7	28	24.5
31	13.4	140.4	9.8	28.3	24.4
32	13.4	142.5	9.9	28.5	24.5
33	13.4	144.5	10	28.9	24.5
34	13.5	145.5	10	29.1	24.5
35	13.5	147.6	10.1	29.4	24.5
36	13.5	148.6	10.1	29.9	24.5
37	13.5	150.5	10.1	30	24.4
38	13.6	152.6	10.2	30.4	24.5
39	13.6	153.7	10.2	30.8	24.5
40	13.6	155.6	10.3	31.1	24.5

3.3 数据滤波分析

图 15 为温度检测原始数据分通道显示界面, 图 16 为在图 15 中提取的部分数据段生成的温度综合曲线。从各通道温度实时曲线可以看出, 各通道温度信号出现了瞬时的毛刺等突变现象, 这是由于在信号传输过程中因为各种原因引入的噪声干扰。通过图 8 所示的小波阈值滤波降噪程序, 对各通道温度数据进行了滤波处理, 显示界面如图 17 所示, 与图

