

# 基于 LXI 总线的热电偶采集系统设计与应用验证

金天贺<sup>1</sup>, 韩丙同<sup>2</sup>, 张小廷<sup>1</sup>, 邹 璞<sup>1</sup>, 耿青凯<sup>1</sup>, 胡志臣<sup>1</sup>, 刘 军<sup>3</sup>

(1. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041; 2. 北京无线电测量研究所, 北京 100854;

3. 中国人民解放军 63768 部队, 北京 100094)

**摘要:** 针对复杂装备测试时多通道热电偶传感器的高精度高稳定性温度测试需求, 设计了一种基于 LXI 总线的热电偶采集系统, 单台设备具有 48 个测量通道, 通过 LXI 总线可以实现多设备间同步测量, 大幅提高了测量效率与测量精度; 该系统采用高精度 24 位模数信号采集与调理技术, 电压采集分辨率最小可达到  $0.032 \mu\text{V}$ 、温度采集分辨率达到  $0.04^\circ\text{C}$ , 电压测量精度达到  $0.05\%$ ; 设计了一种高精度快速冷端温度补偿模块, 可以有效补偿环境温度变化所带来的测量误差, T 型热电偶温度测量精度达到  $0.25^\circ\text{C}$ ; 集成了多种热电偶传感器电压-温度信号转换与补偿算法, 支持 J、K、T、E、S、R、B、N 型 8 种热电偶; 为有效解决数百通道温度采集面临的多设备同步采集问题, 采用了 LXI 总线架构, 多设备间均通过 LAN 进行数据通讯; 为进一步验证所设计系统的性能, 通过某计量实验室进行了温度准确度与电压准确度测试, R 型热电偶温度测量误差在  $0.45^\circ\text{C}$  内、S 型热电偶温度测量误差在  $0.6^\circ\text{C}$  内; 最后, 在某发动机综合测试试验台上进行了 K 型热电偶实测试验, 并通过与 NI 公司的 PXIe-4353 模块进行对比测试, 验证了所设计的热电偶采集系统具备较高的测量精度, K 型热电偶准确度达到了  $0.5^\circ\text{C}$ 。

**关键词:** 热电偶; LXI 总线; 模数转换; 冷端温度补偿; 发动机测试

## Design and Application Verification of Thermocouple Acquisition System Based on LXI Bus

JIN Tianhe<sup>1</sup>, HAN Bingtong<sup>2</sup>, ZHANG Xiaoting<sup>1</sup>, ZOU Pu<sup>1</sup>, GENG Qingkai<sup>1</sup>, HU Zhichen<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>3</sup>

(1. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China;

2. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China;

3. The Unit 63768 of PLA, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Aiming at the requirements of high-precision and high-stability temperature testing of multi-channel thermocouple sensors in complex equipment testing, this paper designs a thermocouple acquisition system based on LXI bus. And the single device has 48 measurement channels. Synchronous measurement between multiple devices can be realized through the LXI bus, which greatly improves the measurement efficiency and measurement accuracy. The system adopts high-precision 24-bit analog-to-digital signal acquisition and conditioning technology, so that the voltage acquisition resolution can reach  $0.032 \mu\text{V}$ , and the temperature acquisition resolution can reach  $0.04^\circ\text{C}$ , and the voltage measurement accuracy can reach  $0.05\%$ . A high-precision fast cold junction temperature compensation module is designed, which can effectively compensate for the measurement error caused by ambient temperature changes, and the temperature measurement accuracy of T-type thermocouple reaches  $0.25^\circ\text{C}$ . The voltage-temperature signal conversion and compensation algorithms of various thermocouple sensors are integrated into the system, which can support temperature measurement of eight thermocouple types of J, K, T, E, S, R, B, and N. In order to effectively solve the synchronous acquisition problem between multiple devices faced by hundreds of channels of temperature acquisition, the system adopts the LXI bus architecture, and the data communication between multiple devices is carried out through LAN. In order to further verify the performance of the designed system, a temperature accuracy and voltage accuracy test was carried out by a metrology laboratory, and the results showed that the temperature measurement error of R-type thermocouple was  $0.45^\circ\text{C}$  and that of S-type thermocouple was  $0.6^\circ\text{C}$ . Finally, the K-type thermocouple was verified on a comprehensive engine test bench, and the comparison test with NI's PXIe-4353 module was passed. It is verified that the designed thermocouple acquisition system has high measurement accuracy, and the measurement accuracy of K-type thermocouple reaches  $0.5^\circ\text{C}$ .

**Keywords:** thermocouple; LXI bus; analog-to-digital conversion; cold junction temperature compensation; engine testing

## 0 引言

复杂装备测试时, 通常会对其结构数以百计个关键位

置进行温度监测, 以有效评估装备运行状态与健康状况,

如对发动机进行测试时会实时采集其发动机本体内壁、外

收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2023-07-17。

作者简介: 金天贺(1992-), 男, 工学博士, 高级工程师。

引用格式: 金天贺, 韩丙同, 张小廷, 等. 基于 LXI 总线的热电偶采集系统设计与应用验证[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(10): 247-254.

壳、保温层、喷管、活塞等结构关键位置的温度数据,进而对发动机进行状态评估<sup>[1-3]</sup>。传统的温度测量方式为将热电偶传感器测量端贴在被测结构上,同时将热电偶传感器的冷端置于冰水混合物中进行测量,然后通过电压采集设备测量热电偶传感器的电压值,再根据热电偶分度号将采集得到的电压值进行换算得到温度值。这一传统测量方式较为复杂,效率较低,引入测量不确定因素较多,在较多通道温度采集时弊端明显,且成本较高。因此,致力于提高热电偶传感器温度采集的效率与测量精度对复杂装备的状态监测具有十分重要的意义与工程应用价值。

为有效解决多通道热电偶传感器温度采集时面临的问题,设计了一种基于 LXI 总线的热电偶采集系统,单套设备具备 48 个测量通道,通过 LXI 总线可以实现多设备间的同步采集,大幅提高了测试效率,并且设备内部集成了高精度冷端温度补偿模块,简化了温度采集方式的同时也大幅提高了温度测量精度<sup>[4-6]</sup>。本文首先介绍了系统总体与硬件设计方案,然后给出了软件功能与系统工作流程,最后通过实验室测试与装备实测试验证了所设计基于 LXI 总线的热电偶采集系统的性能,该系统的成功研制可以有效提高复杂装备的综合保障能力与测试效率。

## 1 系统总体设计

所设计基于 LXI 总线的热电偶采集系统总体架构如图 1 所示,系统由硬件、软件和机械结构组成。系统硬件主要由主控计算机、交换机模块与热电偶采集仪三部分构成,主控计算机作为上位机软件的运行平台,其可以通过以太网、USB、串口等方式对仪器参数进行设置,也可以获取仪器的状态参数和测量数据;交换机模块作为整个系统的通讯连接和数据中转中心,主要完成主控计算机与热电偶采集仪之间通讯的物理连接。

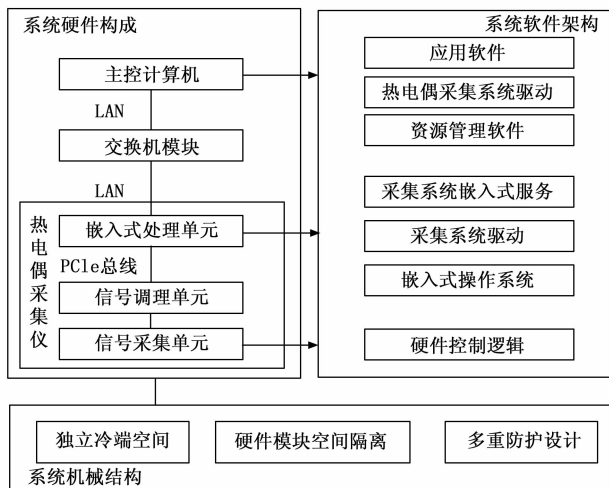


图 1 基于 LXI 总线的热电偶采集系统总体架构图

热电偶采集仪是热电偶测试系统的核心硬件单元,其主要包括嵌入式处理单元、信号调理单元和信号采集单元。其中,嵌入式处理单元作为整个采集仪器的中央控制器,

对模块内所有单元进行管理和监控,同时对外部的通信接口进行管理,内部集成了 J、K、T、E、S、R、B、N 全部 8 型热电偶温度—电压转换及补偿算法,可以实现所有热电偶传感器的高精度温度测量;信号调理单元作为电压测试通路,可以实现对  $\pm 10\text{ mV}$ 、 $\pm 67\text{ mV}$ 、 $\pm 100\text{ mV}$ 、 $\pm 1\text{ V}$ 、 $\pm 10\text{ V}$  共五个量程进行电压测试;信号采集单元主要实现传感器信号输入及冷端温度测量。

系统软件主要由仪器端嵌入式软件和计算机端管理分析软件两个部分组成。采用 LXI 总线架构,支持 IEEE-1588 网络协议,多设备间均通过 LAN 进行数据通讯<sup>[7-8]</sup>。热电偶采集仪采用 X86 处理器平台,运行嵌入式 Linux 操作系统,实现 LXI 仪器发现与识别、IP 配置与管理、命令解析与控制等各类服务功能。计算机端管理分析软件运行于 Windows 平台,包括系统初始化、参数设置、数据采集、数据分析与处理、数据存储与生成报告等功能。

系统机械结构中采用独立的冷端槽方案,使热电偶冷端及冷端测试传感器独立于系统其它电路设备,避免硬件电路工作带来的温度波动对冷端测温精度的影响。仪器内各个单元采用模块化设计,各模块可独立拆卸更换,测试点均可在线连接,方便维护和检测。

## 2 系统硬件设计

热电偶采集仪由信号调理采集单元和数据处理与通信单元组成,仪器硬件总体方案如图 2 所示。数据处理与通讯单元通过 SDRAM 和 E2PROM 保存采集数据,并以 FPGA 和嵌入式处理器单元为核心运行 LXI 热电偶采集仪相关服务程序,一方面通过 LAN、RS232、USB 与外部主控计算机通信;另一方面通过内部 PCIe 总线控制热电偶信号调理采集单元,实现各通道信号的同步采集。

信号调理采集单元由保护电路、信号增益调整电路、信号滤波电路、冷端补偿电路、信号切换电路、自校准电路、多通道高精度 ADC 和 FPGA 组成,对输入电压信号和热电偶信号进行调理、滤波,对调理后信号及冷端测试信号进行高分辨率采集,并将采集结果传输至嵌入式处理单元进行补偿和校准。

信号调理采集单元整体硬件布局如图 3 所示。信号接口及冷端测试部分,每 3 个测试通道构成一个相对隔离的温度稳定空间,空间内设置 1 个冷端测试节点,用于提高冷端补偿精度;信号调理部分,共设置 8 个信号调理模块,每个模块实现前述两个独立空间的共 6 个测试通道及 2 个冷端测试通道的信号调理工作。最后由一个 8 选 1 差分选择电路将信号向后传递(8 通道包含 6 个信号通道和 2 个冷端测试通道);扫描 AD 及控制器实现对前述 8 个信号调理模块的信号选择与扫描采样,并为所有模块提供控制信号、电源激励及基准信号。通过上述 3 个部分的协同工作,最终实现对全部 48 个测试通道及 16 个冷端补偿通道的循环测试。测试得到数据由高速串行总线交由嵌入式控制单元进行数据处理。

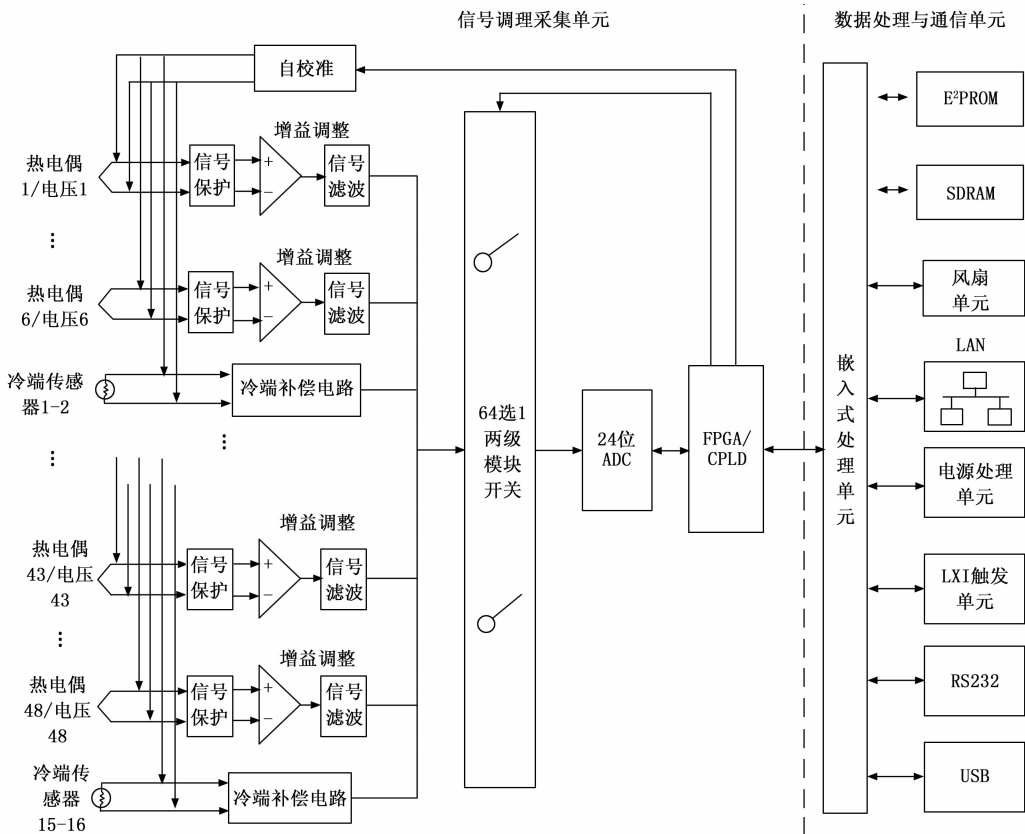


图 2 热电偶采集系统硬件原理图

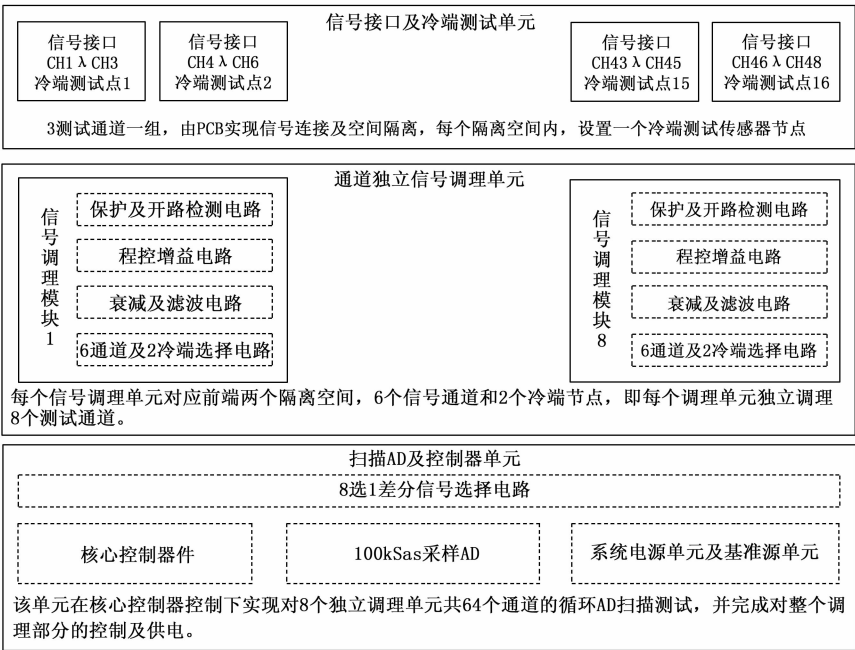


图 3 仪器整体硬件布局图

信号调理模块内的每个单通道信号调理电路构成如图 4 所示。单通道信号调理电路单元由输入保护电路、传感器开路检测电路、输入 RFI 滤波电路、程控信号增益调整电路、1/2 衰减电路、程控信号滤波电路构成。

单通路下自信号输入至经过调理后输出，再到 AD 芯片，全流程为差分电路，避免了信号经过差分到单端及单端转差分过程引入的噪声或信号衰减和畸变。采用高精度 24 位模数信号采集与调理技术，经过实测与理论计算，电压采集分辨率最小可达到  $0.032\ \mu\text{V}$ 、温度采集分辨率达到  $0.04\ ^\circ\text{C}$ ，电压测量精度达到  $0.05\%$ 。

在信号幅度范围匹配上，信号经过程控增益电路后，经过合适增益调整，信号被调整为  $\pm 10\ \text{V}$  范围，由于程控滤波电路和 AD 芯片输入均为  $\pm 5\ \text{V}$  信号，故接入 1/2 衰减电路进行信号范围匹配，同时也起到电压跟随的作用，保证前后级的阻抗匹配。

系统具备分别测试热电偶传感器信号和电压信号的能力，设置有信号切换电路、冷端补偿电路、自校准电路、扫描用多级模拟开关和可编程处理器 FPGA，实现了电压信号和热电偶信号输入适配，并对其进行调理、滤波、补偿和校准工作，可以对调理后信号及冷端测试信号进行高分辨率采集，并将采集结果传输至嵌入式处理单元。

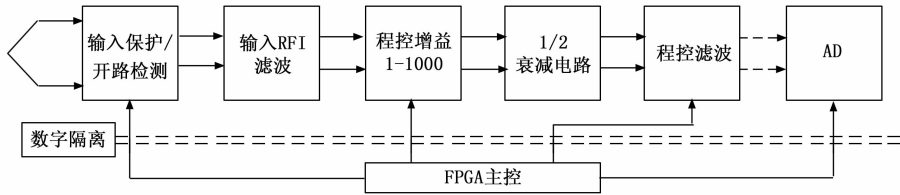


图 4 单通道信号调理电路构成框图

同时，系统采用数字隔离方案，在保证模拟信号调理电路维持较高性能的基础上，通过光耦对 FPGA 到多个调理控制及 AD 控制节点的信号进行隔离。在 PCB 布局布线过程中，依旧遵循模拟数字分离布设方案，对模拟芯片地及数字芯片地区域进行隔离铺设，避免模拟信号与数字信号引线平行等情况，并在关键模拟信号线两侧设置足够宽的模拟地隔离区域，避免数字信号辐射噪声对模拟电路产生影响，保证系统具备良好精度的同时提升系统的稳定性。

### 3 系统软件设计

热电偶采集系统的软件开发符合 LXI 规范的要求，支持 B/S 和 C/S 两种访问方式。在 B/S 方式下，主控计算机通过浏览器就可以直接访问仪器，对仪器进行控制。在 C/S 方式下，主控计算机上需要运行资源管理器软件和 LXI 仪器对应的应用软件，通过 VXI-11 协议对仪器进行访问控制，该方式下提供了供用户二次开发的仪器 IVI 驱动。因此，热电偶采集系统的软件包括下位机和上位机两个部分，下位机软件运行在 LXI 热电偶采集仪器中，上位机软件运行在工控计算机端。热电偶采集系统软件架构如图 5 所示。

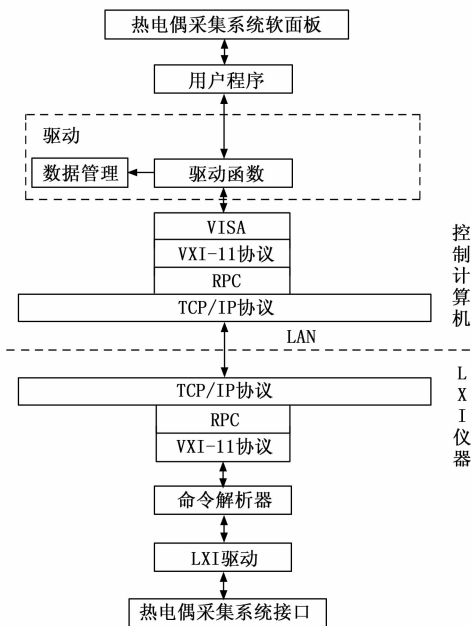


图 5 热电偶采集系统软件架构

热电偶采集仪采用 X86 处理器平台，运行嵌入式 Linux 操作系统，实现 LXI 热电偶采集仪器各类服务功能。LXI 接口电路内的软件对外实现 LXI 接口网络服务功能及各种

触发功能，对内实现控制设备功能电路的功能。为了便于开发，管理和维护，LXI 热电偶采集设备平台软件采用层次化，模块化的方式进行开发，根据不同的应用功能封装在不同的程序中。LXI 热电偶采集仪接口电路内的软件架构如图 6 所示。

热电偶采集系统软件主要分系统初始化、参数设置、数据采集、数据分析与处理和其他功能共 5 部分内容，如图 7 所示。

系统初始化完成整个温度数据采集系统的初始化工作，为数据的采集分析作好准备，主要包括系统自检和系统校准功能。系统上电后，热电偶采集系统对其硬件连接和工作状态进行自检；系统校准可在由性能稳定的直流电源或热电偶温度校验仪搭建的校准平台下进行零漂和温漂校准。

参数设置功能主要是对上位机软件进行“采样率设置”、“曲线显示”、“报警阈值”、“功能设置”和“量程设置”等进行设置。上位机软件将设置完毕的参数保存为系统配置文件以供日后使用，启动系统后可以自动载入为默认值。热电偶采集系统的最高采样率为 1 kSa/s，上位机软件可根据实际需要重新设置采样率；可以对温度曲线外观进行设置，包括曲线颜色、时间轴长短、温度轴大小；可以对 48 路热电偶温度的预警值进行设置，保障系统安全性；可设置为热电偶测量功能或者电压测量功能；可以为每个电压通道设置独立的通道电压输入的范围，最大值为 10 V。

数据采集功能是整个热电偶采集系统软件的核心部分，包含通道选择功能、通道显示功能、通道报警功能。可选择某一路热电偶通道或者多路热电偶通道；可显示指定的热电偶通道采集数据的实时数值；当热电偶温度超出预警值时，可设置报警提示。

数据分析与处理功能主要针对上位机软件，同样是上位机软件的核心，主要完成可编程滤波、时域分析、频域分析。可编程滤波是由用户需要改变滤波器特性的数字滤波功能，可改变的参数为滤波器频带（低通、高通、带通和带阻）、滤波器类型（贝塞尔、巴特沃斯）、截止频率、滤波器阶数等参数<sup>[9-10]</sup>；时域分析主要搜索整个时间历程中信号的最大、最小、极大或极小值的位置。还可以进行多个信号的比较、压缩、叠加合成等操作；频域分析具备 FFT 自谱分析、幅值谱 peak、幅值谱 RMS、功率谱、功率谱密度、谱密度等频域分析功能。

其他功能主要完成采集系统的数据存储和报告生成工作，包括数据存储和报告生成功能。数据存储完成采集系统及上位机软件数据和图片保存设置，内容由数据保存、

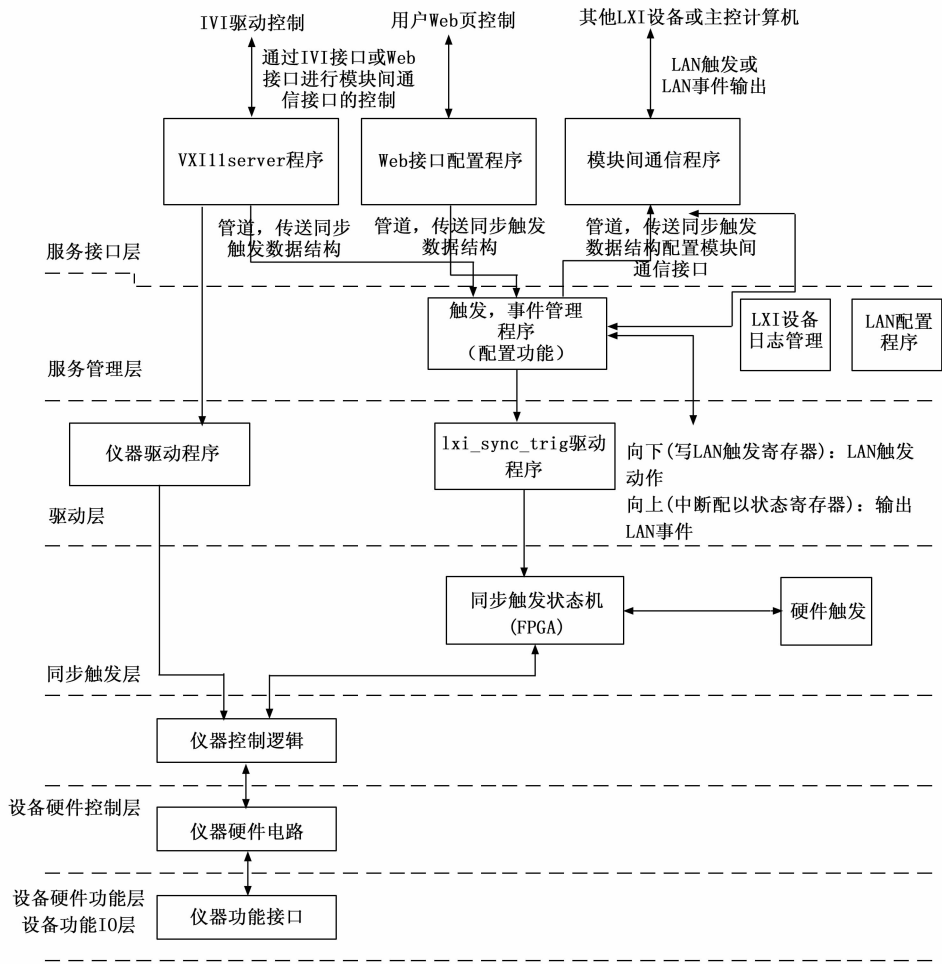


图 6 LXI 设备平台软件架构图

数据删除、图片保存和频谱保存组成；根据要求制定出试验报告格式，可以自动生成实验测试报告。

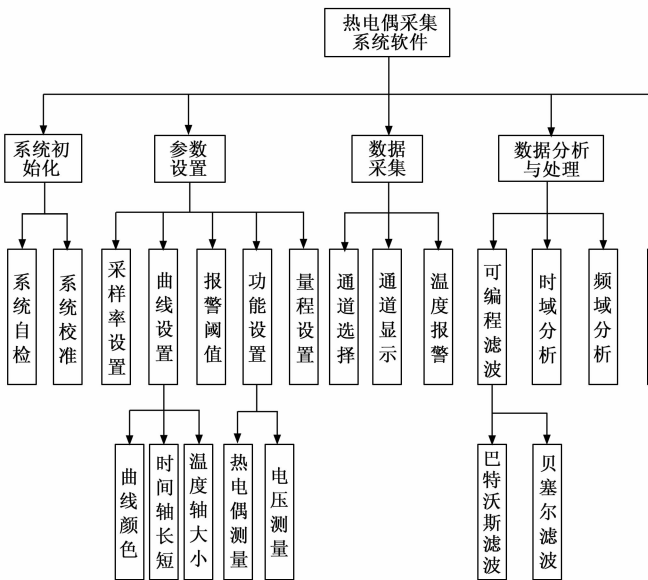


图 7 热电偶采集系统软件功能框图

置于被测环境中，冷端（仪器设备端）暴露于作业环境中，冷端温度即为作业环境的温度。作业环境温度是随四季气候变化而变化的，造成冷端温度不恒定，由热电偶测温原理可知，为了提高温度测量的精确度，必须对热电偶传感器冷端进行温度补偿<sup>[11-13]</sup>。

热电偶采集系统支持内部和外部冷端补偿。外部冷端补偿为通过软件输入环境温度进行计算补偿；热电偶内部冷端补偿采用软件测温补偿法，在热电偶的冷端放置一个恒流源与高精度热电阻，经放大电路构成测温电路，再经由调理与 AD 转换测得冷端补偿电压，由该电压值查表获取当前热电阻的温度响应，再将该温度响应换算至对应热电偶传感器类型的温度系数中确定冷端电压值，最终对热电偶系统测得的电压进行偏置补偿，计算得到热电偶温度测量值。

内部冷端补偿电路如图 8 所示，由恒流源、高精度热电阻 PT1000 和放大电路构成冷端测温电路。冷端补偿传感器选用松公司生产的 PT1000 热电阻，其精度为  $\pm (0.1 + 0.001 | t | ) ^\circ \text{C}$ 。PT1000 传感器最大测量范围为  $-50 \sim 400 ^\circ \text{C}$ ，通过调整电路，将其测试范围  $-20 \sim 80 ^\circ \text{C}$  对应电阻产生的电压信号调整至 AD 测量范围

内,从而实现覆盖仪器使用和存储温度范围,并可进一步提高冷端补偿温度测试精度,降低系统误差。

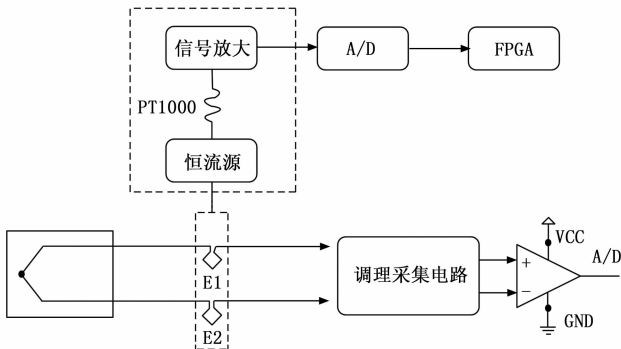


图 8 冷端补偿原理图

冷端补偿温度传感器一般安装在紧靠输入插座的均温块中,在温度变化时,PT1000 冷端补偿传感器利用铂金属的电阻随之发生变化的特性来测量温度。PT1000 是中低温区常用的测温元件,在远程测量过程中,由于 PT1000 阻值小、温度系数低,其测温精度易受导线电阻影响。采用基准电压源和精密放大器产生小于 0.9 mA 的恒电流,为 PT1000 提供低噪声、稳定的电流,将电阻信号转换为电压信号。同时设计一种三线制的新型热电阻测温方法,如图 9 所示,与传统方法不同,在控制导线电阻一致的前提下,只需测量一次,即可得到与导线电阻无关的测试结果。

如图 9 所示,  $R_x$  为热电阻 PT1000,  $r_A$ 、 $r_B$ 、 $r_C$  为三线制接法三引线的引线电阻,基准  $+0.1 V_{ref}$  输入的 AD8608 运放构成恒流源,根据运算放大器虚短虚断,流过 RTD 的电流与流过  $R_{24}$  的电流相等且恒定:  $I=0.1 V/910 \Omega=0.109 9$  mA。该电流较小以减小 RTD 自发热对测温的影响,由于  $r_C$  几乎没有电流,其压降也可以忽略。通过 U40.1 运放将 RTD 电阻电压进行放大,计算如式 (1) 所示:

$$V_{coldout} = \frac{V_{ref}}{R_{24}}(r_A + R_x + r_B + R_{24}) - \frac{R_{39} \parallel R_{43}}{R_{35} + R_{39} \parallel R_{43}} \left( \frac{1 + R_{27}}{R_{31}} \right) - \frac{V_{ref}}{R_{24}}(r_B + R_{24}) \frac{R_{27}}{R_{31}} \quad (1)$$

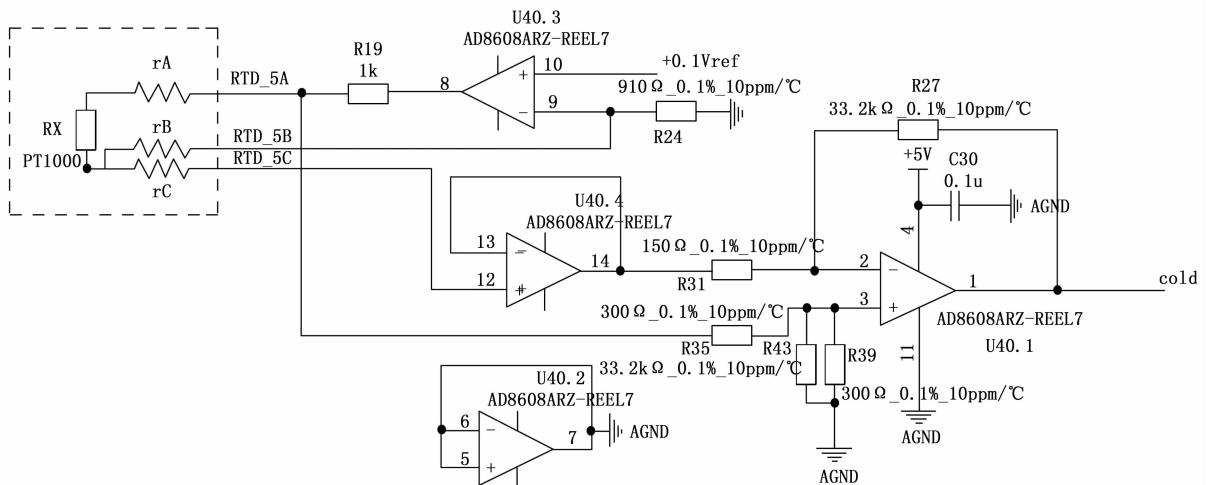


图 9 新型三线制冷端测温电路

通过引线等长设计使  $r_A=r_B$ , 则式 (1) 可简化为式 (2):

$$V_{coldout} = \frac{V_{ref}}{R_{24}} \left[ \frac{33.2k}{300} (2r_A + 910 + R_x) - \frac{33.2k}{150} (r_A + 910) \right] = \frac{0.1}{910} \left[ \frac{33.2k}{300} R_x - \frac{33.2k \times 910}{300} \right] = \frac{83}{6825} R_x - \frac{166}{15} \quad (2)$$

由式 (2) 可见, RTD 电阻电压与引线电阻  $r_A$ 、 $r_B$  无关。利用测得的电压  $V_{coldout}$  即可得到 PT1000 当前对应阻值,并通过 PT1000 标准温度—电阻分度表,查表即可得到冷端温度值。

获得冷端温度值后,通过 NIST 标准分度表查询得到冷端温度对应的被测热电偶传感器类型的冷端电动势,并将测得热电偶电压值加上冷端电动势,即为补偿后的热电偶实际电压值;然后再次通过查对应热电偶标准分度表即可得到最终热电偶温度测量结果。热电偶温度测量补偿校准流程如图 10 所示,系统集成了多种热电偶传感器电压—温度信号转换与补偿算法,支持 J、K、T、E、S、R、B、N 型 8 种热电偶类型,经过实测, T 型热电偶温度测量精度达到 0.25  $^{\circ}\text{C}$ 。

## 5 试验测试与应用验证

为充分测试验证所设计热电偶采集系统的性能,分别通过某计量实验室温度综合验证试验系统和某发动机试车台实测进行了分析与验证。

某计量实验室温度综合验证试验系统如图 11 所示,由双铂铑热电偶检定炉、零点恒温器、转换开关(纳伏卡)、0.01 级数字多用表、一等标准铂铑 10-铂热电偶传感器和接口转换电缆等组成<sup>[14-16]</sup>。试验系统以一等标准铂铑 10-铂热电偶作为标准测温传感器,并使用 R 型和 S 型热电偶传感器进行测温验证。试验系统采用双级比较法,标准传感器的测量端经过零点恒温器后,采用吉时利公司的 7168 纳伏卡和 2182A 纳伏表进行电压测量,电压测量精度达到 0.005%、寄生电势小于 0.1  $\mu\text{V}$ ,远高于测量精度要求。由于纳伏表测量电压值为热电偶冷端经过零点恒温器后的结果,故该电压测量结果即为热电偶检定炉内热电势,通过

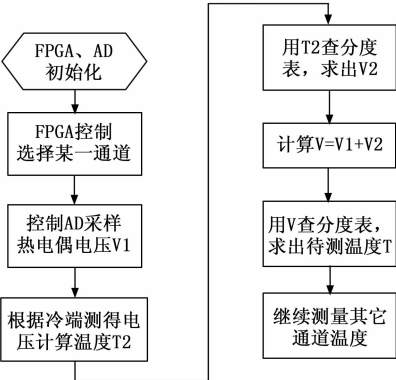


图 10 冷端补偿原理框图

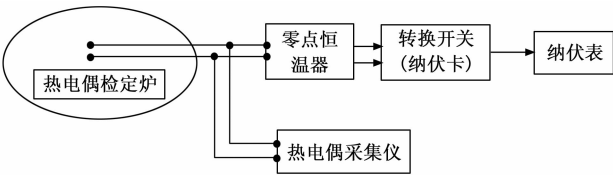


图 11 某温度综合验证试验系统

NIST 热电偶分度表查表即可获得测量电压值对应的热电偶温度值，也即检定炉内温度。热电偶采集仪自身具备补偿功能，其测量温度值即为最终测试结果，并与检定炉内温度进行对比分析。

热电偶采集仪测量得到的 S 型和 R 型热电偶温度结果如表 1 所示，通过与标准温度值进行对比，R 型热电偶温度测量误差在 0.45℃ 内、S 型热电偶温度测量误差在 0.6℃ 内。

表 1 试验系统温度准确度对比测试结果

检定炉内温度/℃	热电偶类型	测量结果/℃	测量误差/℃
600.55	R 型	600.46	-0.09
	S 型	600.35	-0.20
799.73	R 型	799.28	-0.45
	S 型	799.17	-0.56
1 000.14	R 型	1 000.39	0.25
	S 型	1 000.60	0.46

某发动机试车台综合测试系统如图 12 所示。采用 K 型热电偶传感器贴于被测发动机壳体表面，进行发动机点火试验壳体温度过程监测与状态评估；热电偶传感器冷端置于冰水混合物冷端槽中，模拟零点温度用于补偿环境温度的变化所到来的测量误差；热电偶传感器冷端经过冷端槽后通过接插器分为两路，分别连接至 NI 公司 PXI-4353 测试板卡和热电偶采集仪中。PXI-4353 测量得到的电压值通过 NIST 热电偶分度表查表获取对应温度值，即为对比测试温度结果。

发动机试车台实测结果对比如图 13 所示，所研制热电偶采集仪测量结果温度最大值为 379.68℃，NI 公司 PXI-4353 测试板卡测量结果最大值为 380.14℃，最大值误差为 0.46℃；在全时域过程中，两者测量误差均在 0.5℃ 以内。

通过以上实验室与实装测试验证，R 型热电偶温度测

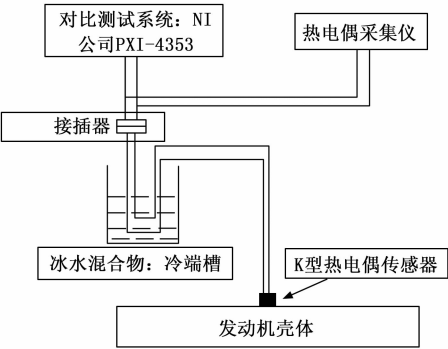


图 12 某发动机试车台综合测试系统

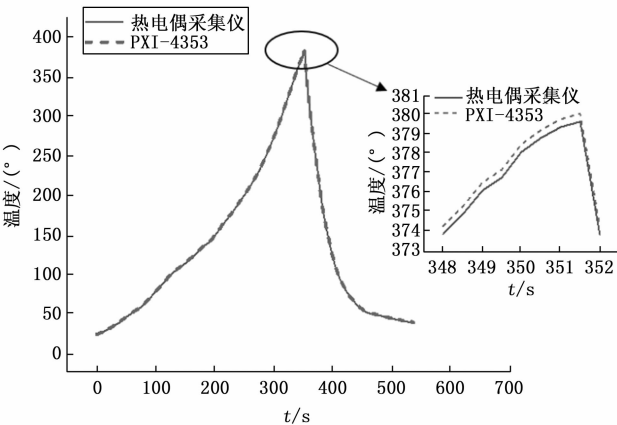


图 13 某发动机试车台实测结果

量误差在 0.45℃ 内、S 型热电偶温度测量误差在 0.6℃ 内、K 型热电偶温度测量误差在 0.5℃ 以内，验证了所设计热电偶采集系统的性能。经过其他实验室测试与验证，所设计基于 LXI 总线的热电偶采集系统电压测量准确度为 0.05%、J 型热电偶准确度为 0.45℃、T 型热电偶准确度为 0.25℃、E 型热电偶准确度为 0.35℃、B 型热电偶准确度为 1.65℃、N 型热电偶准确度为 0.40℃。

6 结束语

本文设计了一种基于 LXI 总线的热电偶采集系统，采用高精度 24 位模数信号采集与调理技术，大幅提高了电压采集分辨率与测量精度，电压测量精度达到 0.05%。系统集成了多种热电偶传感器电压-温度信号转换与补偿算法，支持 J、K、T、E、S、R、B、N 型 8 种热电偶。为提高热电偶传感器测量精度与稳定性，设计了一种高精度快速冷端补偿模块及其算法，可以有效补偿环境温度变化所带来的测量误差，有效提高了温度测量准确度，并通过计量试验与实装测试进行了验证，结果表明 R 型热电偶温度测量准确度达到了 0.45℃、S 型热电偶准确度达到了 0.6℃、K 型热电偶准确度达到了 0.5℃。通过本系统的设计与验证，可以有效支撑发动机结构状态监测、复杂结构温度测量等，具有十分重要的工程应用价值。

参考文献：

[1] 杨国辉. 典型装备温度响应测量及平衡时间研究 [J]. 装备环

境工程, 2023, 20 (4): 128-135.

- [2] 石敬南, 王代华, 张 强, 等. 嵌入式发动机活塞温度测试系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 119-123.
- [3] 魏志刚. 基于多热电偶法的固体推进剂燃烧室动态温度场测试研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [4] 高 媛, 金天贺, 胡志臣. 基于 LXI 总线的多通道振动信号测试系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 93-98, 103.
- [5] 梁旭铭. 基于 LXI 的热电偶采集系统软件设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [6] 邓启斌, 夏智勋. 基于 LXI 总线的分布式测试系统设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (7): 1273-1275.
- [7] 崔永俊, 韩一德, 郭 峰. 基于 IEEE1588 协议的高精度时钟同步系统设计与实现 [J]. 仪表技术与传感器, 2021 (12): 97-101.
- [8] 韩一德. 基于 IEEE1588 协议的高精度时钟同步系统研究与实现 [D]. 太原: 中北大学, 2021.
- [9] 唐金元, 王翠珍, 任秀芳, 等. 带阻滤波器的设计与仿真研究

[J]. 仪表技术, 2023 (1): 64-68.

- [10] 朱齐媛, 陈新原. 基于 ADS 的滤波器类型选择对滤波性能的影响分析 [J]. 电子设计工程, 2015, 23 (1): 137-138, 142.
- [11] VáCLAV K, JAN K, JIRÍ M, et al. Computational compensation of systematic errors accompanying non-equilibrium thermocouple measurements [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 168.
- [12] 陈永强, 崔馨元, 吴 勤, 等. 热电偶校准过程中的不同冷端补偿方法的比较 [J]. 计量与测试技术, 2018, 45 (5): 68-69.
- [13] 邹 轶. T 型热电偶测量中冷端补偿温度的研究 [J]. 计量与测试技术, 2020, 47 (9): 5-7.
- [14] 刘红彦, 张帅星, 徐震震, 等. 多区加热热电偶检定炉的温场研究 [J]. 计量学报, 2022, 43 (2): 228-234.
- [15] 王 喆, 赵新明, 崔尧尧. 热电偶检定炉温场测量不确定度评定 [J]. 自动化应用, 2019 (9): 41-43.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. 热电偶检定炉温度场测试技术规范: JJF 1184-2007 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2008.

(上接第 246 页)

术。从实验结果中可以看出, 在优化设计技术的作用下, 能够在保证特种车辆通行安全的基础上, 加快车辆的通行速度, 具有较高的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 黄艳国, 刘红军, 张升升. 城市路网交通拥堵传播模型分析 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (2): 155-160.
- [2] 马秀博, 孙熊伟. 交通场景中多目标车辆快速检测与分割算法 [J]. 湖北大学学报 (自然科学版), 2022, 44 (6): 742-749.
- [3] 侯运锋, 龚朝晖. 无信号交叉口车辆调度方法研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2021, 42 (4): 725-731.
- [4] 孙 伟, 张梦雅, 马成元, 等. 新型混合交通交叉口信号与车辆轨迹协同控制方法 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23 (1): 97-105.
- [5] 刘 卓, 卢凯明, 何 佳, 等. 面向人机混驾环境的交叉口车辆通行控制策略 [J]. 北京工业大学学报, 2022, 48 (6): 608-621.
- [6] 杨 达, 杨 果, 罗 旭, 等. 考虑前车状态的智能网联车交叉口行为决策 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57 (2): 410-417, 433.
- [7] 张娟萍, 韩 函. 城市交叉路口智能控制与协同优化算法 [J]. 机械设计与制造, 2022 (12): 168-171.
- [8] 石 琴, 陈沪江, 陈一锴. 信号交叉口智能网联车车队速度引导策略研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2021, 40 (2): 47-53.
- [9] 王润民, 张心睿, 赵祥模, 等. 混行环境下网联信号交叉口车路协同控制方法 [J]. 交通运输工程学报, 2022, 22 (3): 139-151.
- [10] 陈秀锋, 聂蕊蕊, 吴阅晨, 等. 基于熵值法的左转可逆交叉

口配时优化方法 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (34): 14836-14842.

- [11] 林清平, 张麒麟, 肖 蕾. 采用改进 YOLOv5 网络的遥感图像目标识别方法 [J]. 空军预警学院学报, 2021, 35 (2): 117-120.
- [12] 童蔚苹, 袁诗琳, 刘菲菲, 等. 基于通行能力的借对向车道左转交叉口信号控制模型优化 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (3): 87-95.
- [13] 金立生, 郭柏苍, 谢宪毅, 等. 基于行车安全场模型的交叉口车辆控制算法 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57 (4): 753-760.
- [14] 孙启鹏, 武智刚, 曹宁博, 等. 基于风险预测的自动驾驶车辆行为决策模型 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2022, 56 (9): 1761-1771.
- [15] 余 志, 许焕挺, 何兆成. 基于马尔科夫链的短车道通行能力建模 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2021, 60 (5): 32-38.
- [16] 潘福全, 张 游, 张丽霞, 等. 车路协同下基于间隙理论的交叉口智能控制策略 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2022, 41 (1): 44-52.
- [17] 马成元, 朱际宸, 赖金涛, 等. 基于群体决策的多交叉口协同控制方法 [J]. 交通运输工程学报, 2022, 22 (3): 152-161.
- [18] 成 卫, 刘翔, 雷建明. 基于 RBF 神经网络预测的交叉口信号周期时长优化 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2021, 40 (4): 13-18.
- [19] 徐建闽, 席嘉鹏. 基于 Q-强化学习的干道交叉口信号配时模型 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2021, 46 (4): 1036-1044.
- [20] 伟利国, 袁玉龙, 董 鑫, 等. 拖挂式大载荷特种车辆导航控制系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53 (S1): 324-331.