

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519729

基于 PowerBus 总线的试飞测试数据采集技术研究

闫蓉 李卢丹 尹川 吴金星

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘要: 在机载测控领域,传感器的模拟量形式输出常受限于信号传输距离和电磁干扰的影响,导致信号失真和精度下降的问题,难以满足试飞测试对高精度数据采集的需求。此外,对于温度、压力等变化相对缓慢的信号,传统点对点多线制连接方式带来了布线复杂、安装成本高及系统灵活性受限等问题。为应对上述挑战,本文提出了一种基于PowerBus总线的传感器数字化采集技术方案。该方案利用PowerBus总线的能量一体低压载波技术和二线制连接特性,结合传感器数字化转换理念,构建了一个适用于缓变信号(如温度、压力)的高性能采集系统。采集系统由PowerBus主站(总线网络节点)和PowerBus从站(数字化传感器)组成。从站负责前端(包括铂电阻、热电偶、压力传感器)传感信号的采集、调理及高精度模数转换,并将数字化后的数据通过PowerBus总线传输;主站则负责管理PowerBus网络、接收来自各从站的数据,并进行数据封装与上传。实验结果表明:该系统能够实现1 kspS的内部采样频率和16 bit有效位数的采样精度,并在PowerBus总线9 600 bps的速率限制下,实现了稳定可靠的多节点传感器数据传输,验证了该方案在机载测试等带宽受限环境下的可行性与高效性。

关键词: 数字化传感器;PowerBus;能信一体;低压载波

中图分类号: TN915.41 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.5020

Research on test flight data acquisition technology based on PowerBus bus

Yan Rong Li Ludan Yin Chuan Wu Jinxing

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In the field of airborne measurement and control, the analog output of sensors is often limited by the influence of signal transmission distance and electromagnetic interference, resulting in signal distortion and accuracy reduction, which is difficult to meet the needs of high-precision data acquisition in test flight tests. In addition, for signals that change relatively slowly such as temperature and pressure, the traditional point-to-point multi-wire connection method brings problems such as complex wiring, high installation costs, and limited system flexibility. In order to solve the above challenges, this paper proposes a digital sensor acquisition technology scheme based on PowerBus bus. This solution uses the low-voltage carrier technology and two-wire connection characteristics of the PowerBus bus, combined with the concept of digital conversion of sensors, to build a high-performance acquisition system suitable for slowing signals (such as temperature and pressure). The acquisition system consists of a PowerBus master (bus network node) and a PowerBus slave station (digital sensor). The slave station is responsible for the acquisition, conditioning and high-precision analog-to-digital conversion of the front-end (including platinum resistors, thermocouples, and pressure sensors), and transmits the digitized data through the PowerBus bus. The master is responsible for managing the PowerBus network, receiving data from each slave, and encapsulating and uploading the data. The experimental results show that the system can achieve the internal sampling frequency of 1 kspS and the sampling accuracy of 16 bit effective bits, and realize stable and reliable multi-node sensor data transmission under the rate limit of 9 600 bps of PowerBus bus, which verifies the feasibility and efficiency of the scheme in bandwidth-limited environments such as airborne testing.

Keywords: digital sensor;PowerBus;power-signal integration;low voltage carrier

0 引言

在飞行试验中,高精度、高可靠的传感器测量系统是

实时监测飞机关键参数、验证飞行性能、确保飞行安全的核心保障^[1]。飞行试验对发动机温度、压力、结构应力等众多物理量的精确感知与记录至关重要。然而,飞机内部空间

布局复杂,传感器与传统信号变换器或数据采集单元往往分散布置,导致传感器输出的模拟信号需要通过铺设大量线缆进行远距离传输^[2]。这种传统的模拟信号传输方式在复杂的航空电磁环境中极易受到干扰,导致信号衰减和噪声耦合等问题,严重影响了传感器采集数据的精度和可靠性^[3]。

对于温度和压力这类变化相对缓慢的信号,传输方式通常采用四线制甚至更多线缆连接,这使得飞机机舱内的线缆数量庞大、连接器节点繁多,导致布线极为复杂,增加了设计、改装和维护的难度与成本^[4]。大量的线缆和连接器还显著增加了飞机的重量,对飞机的有效载荷和燃油效率造成不利影响。同时,复杂的线束也降低了传感器系统的灵活性和可扩展性,难以适应飞行试验中频繁的构型变化和新增的测点需求^[5]。

近年来,国内外针对上述问题进行了不同方向的研究。国外方面:NASA Armstrong 在 F-15B 上验证的 AFDX/TSN 分布式温度系统虽然采样精度达到 16 bit,但节点功耗高达 1.8 W、同时仍需六类双绞线^[6]。DLR 基于 CAN-FD 的方案把采样频率提到 1 kHz,但总线利用率只有 35%,且 28 V 供电线无法裁剪^[7]。Honeywell Power-over-HSDB 虽实现二线制,其 100 Mbps 物理层面向的是航电高速数据,节点功耗>2 W,对温度、压力等毫伏级缓变信号既未开放接口,也未解决小信号抗干扰问题^[8]。国内方面:飞行院 2021 年提出的 CAN 分布式方案把线束削减 40%,但供电与通信仍分走两对线^[9]。西工大 2022 年验证的 RS-485+PoE 架构因 48 V 隔离电源导致单节点质量 45 g,最终未能装机^[10]。

为克服上述问题,传感器技术的数字化转型和新型通信总线技术的应用成为必然趋势。因此,本文提出了一种基于 PowerBus 总线的传感器数字化采集系统设计方案。PowerBus 总线作为一种国内自主研发的创新型现场总线技术,与传统的 CAN 总线等技术相比,PowerBus 总线最显著的特点在于其能信一体的二线制载波技术,能够在单对线缆上实现电能和数字信号的同步可靠传输,且具备无极性接线、抗干扰能力强等特点^[11-12]。该系统通过在传统传感器前端集成数字化和 PowerBus 通信功能,形成能够通过 PowerBus 总线进行二线制连接和数据传输的“数字化传感器”从站,并构建由 PowerBus 主站集中管理的分布式采集网络^[13-14]。本系统重点关注在飞行试验中广泛应用的温度(如铂电阻、热电偶)和压力传感器的信号采集,旨在通过 PowerBus 总线的应用,有效解决传统模拟传感器系统在飞行试验中面临的布线复杂和抗干扰能力弱的问题,实现高精度、高可靠性的数据采集^[15]。

1 关键技术分析

如图 1 所示为 PowerBus 通信架构,PowerBus 总线采用两线制物理拓扑,支持总线型、树型、星型等多种灵活的

网络架构。其最为显著的特点是能信一体融合传输,通过特定的低压载波调制方式实现,信息被调制在总线电压或电流波形上进行传输^[16]。相较于至少需要 4 根线缆的传统分离供电与通信方案,PowerBus 显著减少了机上线缆数量,降低了线束的复杂度、重量和成本,减少了连接器数量,提高了系统的安装便利性和可靠性。

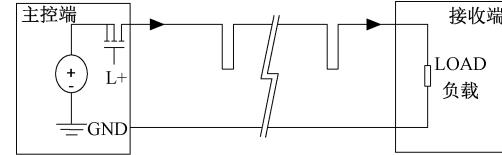


图 1 PowerBus 通信架构图

Fig. 1 PowerBus communication architecture diagram

1.1 PowerBus 从站工作原理

PowerBus 从站被设计为能够从总线获取工作电能并进行数据通信的终端设备。其通信模块核心组成如图 2 所示,主要包括整流桥、分压电路、恒流源和蓄能电路。从站向主站发送数据时,通过 PO 接口驱动恒流源工作,从而调制总线电压实现数据的上行传输。蓄能电路,通常由大容量电解电容组成,用于在总线电压因通信调制发生瞬时波动时,为从站内部电路提供稳定的电源供应,确保数据采集和处理过程不受干扰,提高从站设备采集数据的可靠性。

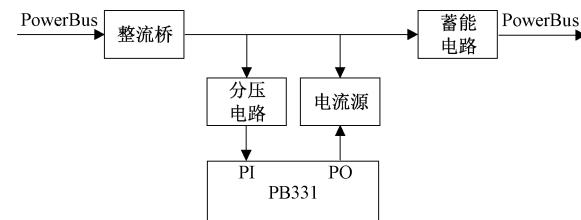


图 2 PowerBus 从站工作原理

Fig. 2 Working principle of PowerBus station

1.2 PowerBus 主站工作原理

PowerBus 主站是总线网络的控制中心,负责为总线供电、管理总线状态及与各从站进行通信。主站通信模块的工作原理如图 3 所示,其核心组成包括 P-MOSFET 控制电路、通信电源、信号读取电路和信号控制电路。主站通过精确控制 CONH 和 CONL 管脚的时序,生成 PowerBus 协议规定的总线电压波形,实现主从站之间的通信。

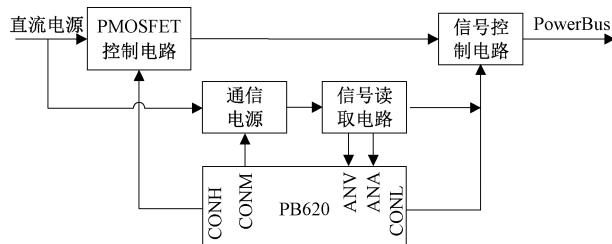


图 3 PowerBus 主站工作原理

Fig. 3 PowerBus main station working principle

1.3 PowerBus 数据编码原理

PowerBus 总线的数据传输通过对总线电压波形的特定调制实现。总线空闲时,总线电压呈周期性变化,如图 4 所示。PowerBus 的一个周期约为 1 ms,在单个周期内,总线电压首先维持在较高的主电源电压 V_H 约 800 μs ,随后快速切换至较低的通信电压 V_M (表现为一个负脉冲)并保持约 200 μs 。这种周期性的 V_M 负脉冲被主站和从站用于维持同步和判断总线空闲状态。

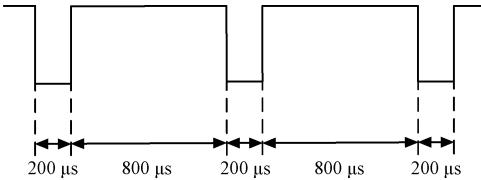


图 4 总线空闲波形

Fig. 4 Bus idle waveform

总线下行发送(主站到从站)数据从总线电压由 V_H 转换为 V_M 的起始时刻开始。主站通过精确控制总线电压状态来编码数据位,如图 5 所示。逻辑“1”通过将总线电压保持在 V_H 高电平持续 100 μs 来表示。逻辑“0”通过一个特定的电压序列表示,具体为:首先将总线电压拉低至 0 V 保持 40 μs ,随后快速拉高至 V_H 保持 60 μs 。总线通过特定的编码特性依次发送数据,待所有数据位发送完成后,总线电压恢复至 V_H ,开始一个新的空闲周期。

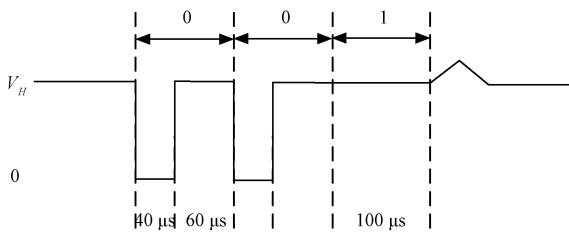


图 5 总线下行发送波形

Fig. 5 Bus downlink transmission waveform

总线上行发送(从站到主站)数据编码过程如图 6 所

示。首先,从站发送数据前需监听总线,当总线电压处于通信电压 V_M 时,表明当前总线没有主站下行数据传输,从站才允许启动上行传输。从站通过控制从总线接收电流来调制总线电压,其中,逻辑“0”通过从站将总线电压拉低至一个较低的电压 V_N 来表示;逻辑“1”通过从站释放总线,允许总线电压恢复至 V_M 来表示。

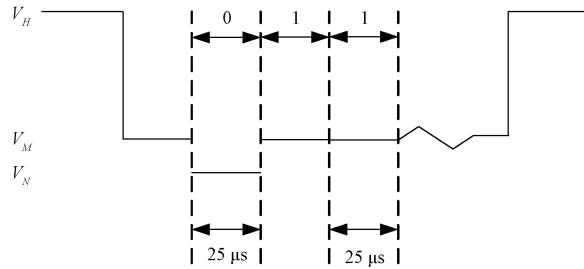


图 6 总线上行发送波形

Fig. 6 The waveform sent upstream on the bus

2 系统总体方案设计

本文设计的传感器数字化采集系统采用了分布式架构,将功能单元划分为总线网络节点(PowerBus 主站)和数字化传感器(PowerBus 从站)两个层级。

如图 7 所示,系统总体框图清晰地展示了各组成部分的结构与相互关系。总线网络节点作为系统的上层管理单元,集成了以下核心模块:PowerBus 主站电路,负责 PowerBus 总线的供电控制及电平转换;LVDS 接口电路,作为总线网络节点与上级控制系统的高速数据接口,用于上传采集到的传感器数据;FPGA 核心控制单元,负责与上、下行设备的通信管理,包括指令收发、数据编帧和数据收发等;时钟模块,为 FPGA 提供精确稳定的时钟信号;配置模块,用于存储和管理系统的配置参数,如从站地址列表、采集策略等;电源模块,负责将外部输入的较高电压转换为 PowerBus 总线的工作电压 V_H ,同时产生 FPGA 内部数字逻辑电路所需的多种低压供电(如 1 V、1.8 V、3.3 V)。

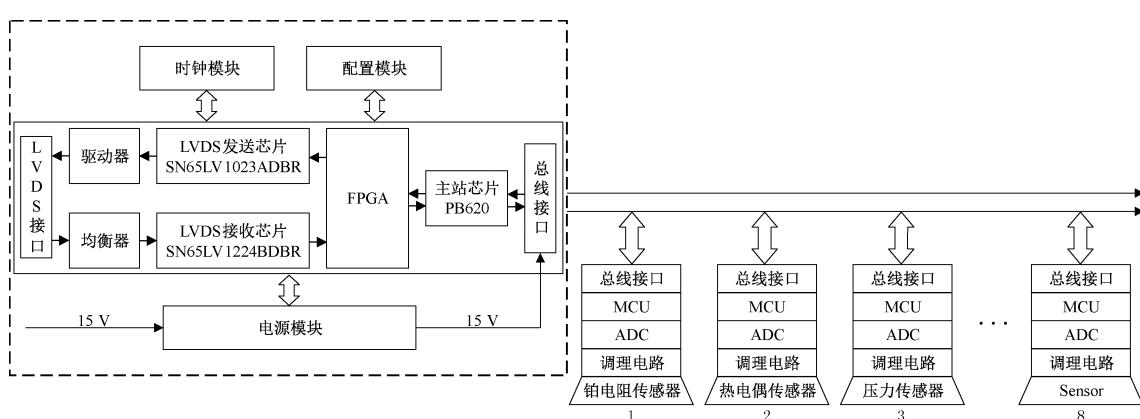


图 7 系统总体框架

Fig. 7 Overall framework of the system

数字化传感器作为系统的下层执行单元,是直接面向传感器信号的采集处理节点。其主要包含:前端传感器,本设计重点关注铂电阻、热电偶和压力传感器这 3 种类型,它们是待测物理量的源头;调理电路,用于对传感器输出的模拟信号进行预处理,如放大、滤波等,使其满足模数转换器的输入范围和要求,调理电路设计需具备一定的兼容性以适应不同传感器类型;ADC 模数转换电路,负责将调理后的模拟信号高精度地转换为数字量。

单片机(MCU),作为数字化传感器的控制单元,负责控制 ADC 进行数据采集,对采集到的原始数据进行必要的滤波和处理(如峰值滤波、滑动滤波等),将处理后的数据按照 PowerBus 协议进行编帧封装,并通过 PowerBus 从站电路与主站进行通信;PowerBus 从站电路,负责实现 PowerBus 总线通信功能,从总线获取工作电能,接收并解析主站下达的指令,并根据指令要求向主站上报告本地设备信息和采集到的传感器数据。

如图 8 所示,采集系统还具备良好的级联和扩展能力,能够灵活构建大规模分布式传感网络,适用于飞机等具有大量分散测点且对布线有严格要求的复杂系统。单个 PowerBus 主站(总线网络节点)可以连接和管理 8 个 PowerBus 从站(数字化传感器),形成一个 PowerBus 子网。同时,总线网络节点本身可以作为下级节点,通过 SharkNet 总线与上级控制模块相连。例如,一个上级 SharkNet 总线控制模块可以挂载 9 个总线网络节点。

通过这种分层级联的方式,系统的规模可以呈指数级扩展:一个 SharkNet 模块理论上可以控制 72 个数字化传

感器。进一步,通过 SharkNet 总线控制模块间的级联,可以轻松实现对数百甚至数千个分布式传感器的集中管理和数据采集。这种模块化和层级化的设计大大提高了系统的可扩展性、部署灵活性和故障隔离能力。

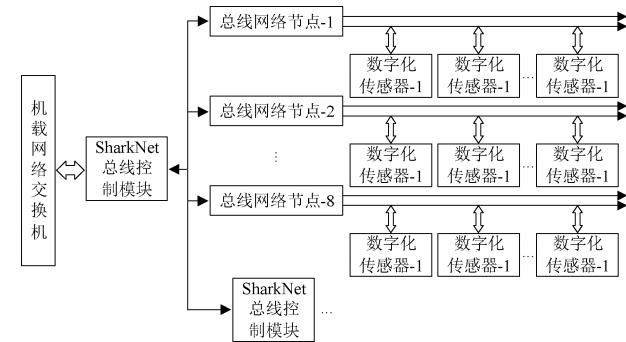


图 8 系统级联图

Fig. 8 System-level cascade diagram

3 传感器数字化采集系统硬件设计

3.1 传感器数字化硬件设计

如图 9 所示的传感器数字化硬件原理图,展示了将模拟传感器信号进行调理和数字化转换的核心电路。为提高设计的通用性,调理电路对铂电阻、热电偶和压力传感器信号进行了兼容性设计,通过调整阻容元件的焊接参数即可适应不同类型的传感器接入。表 1 详细列出了实现这种兼容性所需的关键阻容元件的标号与数值配置。

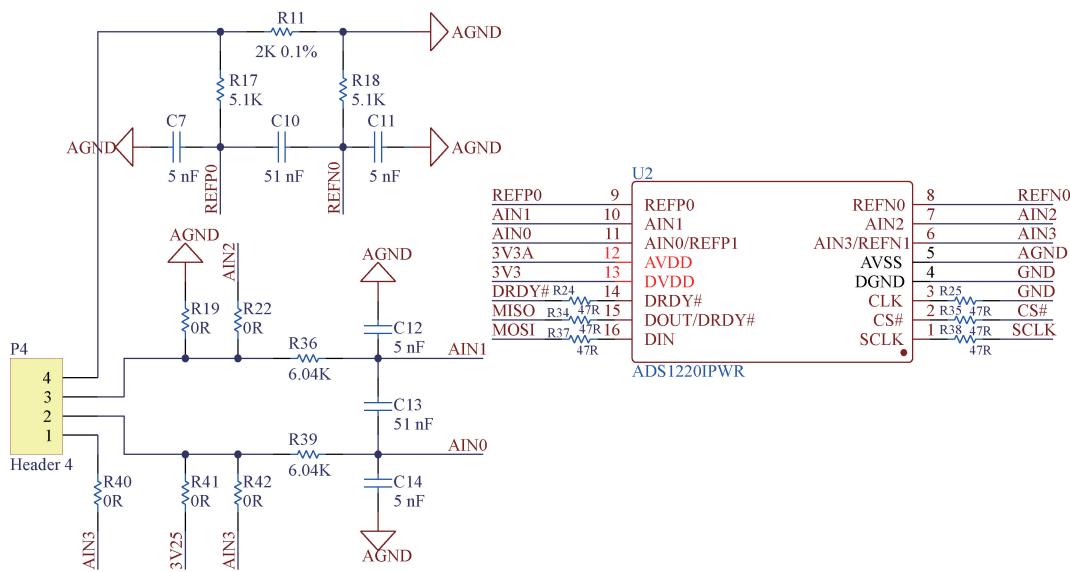


图 9 传感器数字化硬件原理图

Fig. 9 Schematic of sensor digital hardware

针对铂电阻传感器(Pt100),设计采用三线制连接方式,基于经典的惠斯通电桥原理进行阻值测量,进而推算

温度^[17]。图中 3V25 连接至一个高精度基准电压源,为电桥提供稳定且精确的激励电压。铂电阻作为电桥的一个

表 1 传感器数字化兼容性设计

Table 1 Sensor digital compatibility design

阻容参数	铂电阻传感器配置	热电偶传感器配置	压力传感器配置
R11	2.01K/1%	6.04K	0R
R17	100R	1K	6.04K
R18	22R	22R	22R
C7	1 μF	0.1 μF	4.7 μF
C10	0.1 μF	10 μF	1 μF
C11	22 nF	22 nF	22 nF
R22	0.1 μF	33 pF	0.1 μF

臂,其阻值随温度的升高而增大。AIN0 和 AIN1 是 ADC 的差分输入端,用于测量电桥输出的微小电压差,该电压差正比于铂电阻的阻值变化。REFP0 和 REFN0 提供 ADC 内部用于差分测量的参考电压。Pt100 的阻值 RPT 与温度 T 之间的关系可以通过多项式近似表示,如式(1)所示。

$$R_{PT} = R_0 [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \gamma(T - T_0)^3] \quad (1)$$

其中, R_{PT} 为温度 T 时铂电阻的阻值, R_0 为参考温度 $T_0=0$ 时铂电阻的阻值, α 、 β 、 γ 为温度系数,对于 Pt100, α 、 β 、 γ 分别约为 $0.385 \Omega/\Omega/\text{°C}$ 、 $-0.000\ 586 \Omega/\Omega/\text{°C}^2$ 、 $0.000\ 000\ 6 \Omega/\Omega/\text{°C}^3$ 。

针对热电偶传感器,其工作原理基于塞贝克效应,利用两种不同金属导体存在温差时产生热电势。热电偶产生的信号是毫伏甚至微伏级别的微弱电压信号。电路设计中,AIN0 和 AIN1 作为差分输入端直接测量热电偶的热电势。R36 和 R39 电阻与 ADC 内部运放构成差分放大电路,用于放大热电偶产生的微弱电压信号。C12、C13 和 C14 等电容构成低通滤波网络,有效滤除工业环境中叠加在热电偶信号上的高频噪声和共模干扰,提高测量纯净

度。热电偶测量还需进行冷端补偿,设计选用的 ADS1220IPWR 内部集成温度传感器,精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,单次转换时间为 2.1 ms。在每次热电偶差分采样后,通过寄存器切换把 ADC 输入瞬间切换至片上温度通道,读取冷端温度 T_{cj} ,再依据 NIST 分度表将 T_{cj} 换算为 0°C 基准电势,与热电偶相对电势叠加得到绝对电势,从而实时计算出热端温度。

针对压力传感器,本设计基于惠斯通电桥原理,采用四线制方式连接。当压力作用于传感器的敏感元件时,电桥内部的压敏电阻发生形变,导致阻值变化,进而产生与压力成正比的差分输出电压。ADS1220IPWR 的 AIN0 和 AIN1 管脚用于直接测量压力传感器电桥的差分输出电压。通过精确测量该电压并结合传感器的标定曲线,可以准确计算出作用在传感器上的压力大小。

传感器的模数转换芯片选用 ADS1220IPWR,这是一款 24 位、低噪声、低功耗的 Delta-Sigma ADC,集成了 PGA 和精密参考电压,非常适合高精度小信号的测量,能够满足对温度和压力信号的高精度数字化需求。通过调整表 1 中的阻容参数,使得同一套硬件电路能够适配不同类型的传感器,体现了设计的通用化理念。

3.2 PowerBus 从站硬件设计

如图 10 所示,为 PowerBus 从站硬件电路设计。总线输入端串联了额定电流为 1 A 的自恢复保险丝,为从站设备提供可靠的过流保护。当单个从站的电流消耗异常并且超过 1 A 时,保险丝会自动断开,并在故障排除后自动恢复,避免对从站电路及整个总线的损坏。TVS1 是一个双向瞬态电压抑制二极管,并联在总线输入端,用于吸收总线上可能出现的静电放电(ESD)或感应雷击等瞬态高能量脉冲,保护后续敏感电路免受冲击。C3 和 C4 为去耦电容并联在电源路径上,用于滤除电源线上的高频纹波和噪声,为从站内部的数字逻辑电路和模拟电路提供稳定纯净的电源,减少电源噪声对测量和通信的影响。

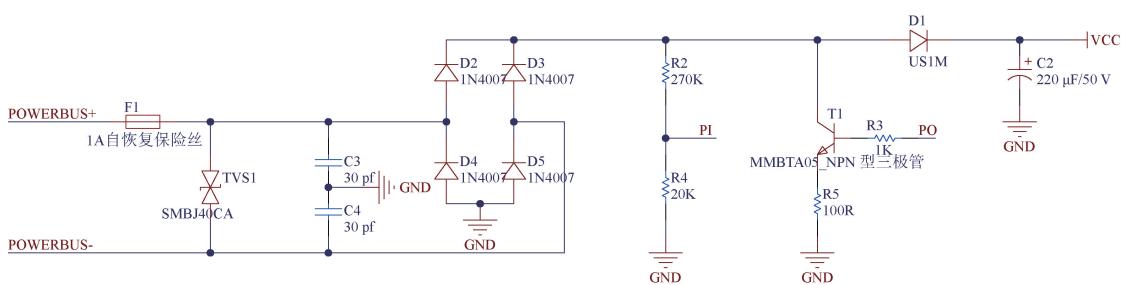


图 10 PowerBus 从站原理图

Fig. 10 PowerBus station schematic

从站无极性接线的特性由 4 个 1N4007 二极管组成的整流桥电路实现,使 PowerBus 总线的两根线任意接入都能保证从站内部获得极性一致的直流电源,极大地简化了安装过程。PI 和 PO 是 PowerBus 从站芯片的通信接口,它们分别用于从总线感应电压变化接收主站数据和通过

控制电流调制总线电流发送数据,实现了 PowerBus 总线的载波通信功能。

3.3 PowerBus 主站硬件设计

如图 11 所示,为 PowerBus 主站硬件电路设计。考虑 PowerBus 规范、从站供电需求及 DCDC 电源效率考虑,系

统选用 15 V 作为 PowerBus 总线的工作电压 V_H 。在主站的总线上串联了额定电流为 5 A 的自恢复保险丝, 为整个 PowerBus 总线提供过流保护, 防止总线短路或多个从站同时过载对主站及总线造成永久性损伤。

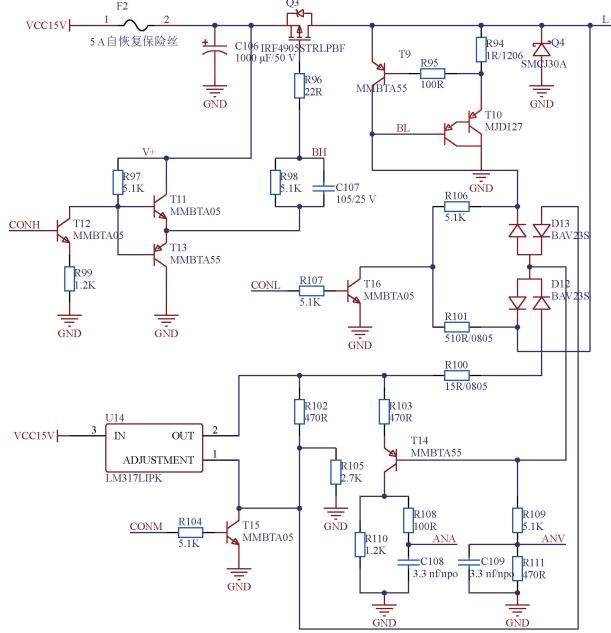


图 11 PowerBus 主站原理图

Fig. 11 PowerBus main station schematic

主站控制芯片选用 PB620, 它集成 PowerBus 协议栈和物理层控制功能。PB620 的 CONH 管脚控制外部的 IRF4905STRLPBF 的导通与关断。该 P 沟道 MOSFET 作为主电源的开关, 在 CONH 为高电平时导通, 将 15 V 主电源连接到总线; 在 CONH 为低电平时关断, 断开主电源。CONM 管脚控制通信电源 LM317LPK, 用于在主电源断开期间维持总线在较低的通信电压 V_M , 并为部分内部电路供电。ANA 和 ANV 为主站芯片用于监测总线电压和电流的输入管脚, 通过对总线状态的实时监测, 主站能够接收从站发送的数据并判断总线状态。CONL 管脚用于主站发送数据时对总线电压进行精确调制, 生成符合 PowerBus 下行协议的波形。整个主站的硬件设计保证了 PowerBus 总线的稳定供电、可靠通信及必要的电气保护。

4 传感器数字化采集系统逻辑设计

4.1 传感器数字化通信逻辑设计

PowerBus 从站(数字化传感器)的核心逻辑是实现传感器信号的高精度采集、处理以及将结果封装为数字帧进行传输。传感器模拟信号经过硬件调理后, 由 ADS1220IPWR 高精度 ADC 进行模数转换, 并通过 SPI 接口与从站主控单片机(MCU)进行通信, 将转换后的 16 位数字量传送给 MCU。

设计选用 STM32G431CBU6 作为从站的主控单元

(MCU), 其基于 ARM Cortex-M4F 内核, 具备单精度浮点单元(FPU), 支持 DSP 指令集, 工作频率高达 170 MHz。根据系统设计要求, 传感器采样率为 64 Hz。为显著提升数据采集的信噪比和有效精度, 从站 MCU 将 ADC 的实际采样频率设置为 1 kHz, 实现了高倍率的过采样。MCU 接收到 ADC 的 16 位原始采样数据后, 首先进行数据格式处理, 将最高位作为符号位, 低 15 位作为数据位的二进制整数转换为内部浮点数表示, 便于后续的数值计算和处理。

如图 12 所示, 数据处理流程包括两个主要环节:

峰值滤波: 对接收到的实时采样数据进行判断, 滤除采集过程中瞬间出现且数值远超正常范围的异常尖峰数据。峰值滤波有助于消除由于瞬时干扰引起的错误读数, 提高数据的抗干扰能力。

滑动滤波: 为进一步提高测量值的稳定性, 对经过峰值滤波后的数据进行滑动平均处理。设计选用一个包含 80 个采样点的滑动窗口, 将最新的采样数据顺序移位存入窗口中。从站 MCU 在接收到主站下达的回读指令时, 计算当前滑动窗口内数据的平均值作为本次上报的传感器测量值。

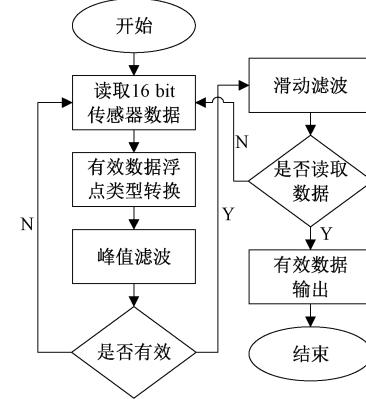


图 12 传感数据处理

Fig. 12 Sensor data processing

AA	参数信息	传感器类型	传感数据	DD
1 Byte	1 Byte	1 Byte	2 Byte	1 Byte

图 13 传感数据帧格式

Fig. 13 Sensor data frame format

经过处理的有效传感器数据需要按照特定的帧格式进行封装以便通过 PowerBus 总线进行传输。如图 13 所示, 本系统设计的传感器数据包由 6 个字节组成。包头占用 1 字节位宽, 固定为 x“AA”, 用于标识数据帧的起始。参数信息占用 1 字节位宽, 用于记录传感器配置参数及工作状态信息。传感数据占用 2 字节位宽, 存储经过处理后的传感器测量值。

传感器类型占用 1 字节位宽, 用于区分不同传感器的类型。如表 2 所示, x“00”表示该数据来自铂电阻传感器,

x“01”表示来自热电偶传感器，x“02”表示来自压力传感器。这种类型标识有助于主站区分和处理来自不同传感器的数据。包尾占用 1 字节位宽，固定为 x“DD”，用于标识数据帧的结束。此外，还定义了一种本地设备信息包格式(x“AA_XX_03_XX_XX_DD”），用于上报设备的基本信息，例如设备 ID、工作状态等。

表 2 传感器数据包类型

Table 2 Sensor data packet type

数据包类型	数据帧格式
铂电阻传感器检测信息	AA_XX_00_XX_XX_DD
热电偶传感器检测信息	AA_XX_01_XX_XX_DD
压力传感器检测信息	AA_XX_02_XX_XX_DD
本地设备信息	AA_XX_03_XX_XX_DD

4.2 PowerBus 总线通信逻辑设计

PowerBus 总线通信遵循一主多从的模式，通信协议通过主站和从站内部的 PowerBus 芯片与各自 MCU 之间的串口通信实现，通信速率设定为与 PowerBus 总线最高速率一致的 9 600 bps。

通信过程中，各从站设备持续监听 PowerBus 总线的主站指令数据。如图 14 所示，当从站检测到有效的下行指令时，其 MCU 会接收并解析指令数据包。指令解析包括检查包头、包尾以及提取关键的指令码和从站地址。

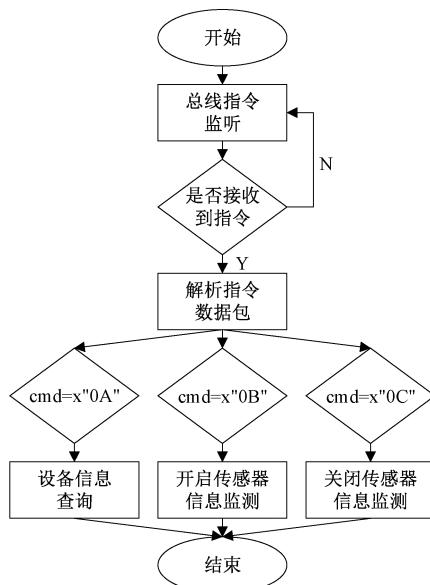


图 14 PowerBus 主从通信流程

Fig. 14 PowerBus master-slave communication process

主站下达的指令数据包格式如图 15 所示，包含 4 个字节。其中，包头占用 1 字节位宽，固定为 x“AB”，用于标识指令帧的起始。指令数据占用 1 字节位宽，表示具体的控制指令。

如表 3 所示，方案定义了 3 种主要指令：x“0A”用于查

AB	指令数据	从站设备地址	DD
1 Byte	1 Byte	1 Byte	1 Byte

图 15 指令数据帧格式

Fig. 15 Command data frame format

询指定从站的设备信息；x“0B”用于广播开启所有从站的传感器信息周期性监测和上报；x“0C”用于广播关闭所有从站的数据上报。从站设备地址占用 1 字节位宽，对于需要指定目标从站的指令（如 x“0A”），此处填写目标从站的唯一地址；对于广播指令（如 x“0B”、x“0C”），此处填写无效地址（如 x“00”）。包尾占用 1 字节位宽，固定为 x“DD”，用于标识指令帧的结束。

表 3 指令数据包类型

Table 3 Command data packet type

指令内容	指令数据包
设备信息查询	AB_0A_XX_DD
开启传感器信息监测	AB_0B_00_DD
关闭传感器信息监测	AB_0C_00_DD

从站接收到指令并完成解析后，执行相应的操作：

当接收到指令 x“0A”（设备信息查询）时，从站会比对指令数据包中的设备地址与自身的唯一地址。如果地址匹配，从站则封装包括传感器类型、当前工作状态、最新的传感器检测值及预先写入的从站设备标识等本地信息，并按照约定的格式上报至主站。

当接收到指令 x“0B”（开启传感器信息监测）时，这是一个广播指令，所有从站都会响应。为避免多个从站在接收到指令后同时上报数据导致总线冲突，从站采用基于自身唯一设备序号 M 的时分多址（TDMA）策略。每个从站根据主站设定的数据上报周期 T 和自己的序号 M 计算其数据上报的起始时刻 T_s ： $T_s = M \times T$ 。在计算出的时刻 T_s ，从站开始周期性地封装最新的传感器监测数据帧并通过 PowerBus 总线上传至主站。该静态时分策略实现简单，适用于本设计温度、压力等缓变信号的传输。其总线利用率不高，且设备序号越大的节点，数据上报的固有延迟越长，不适用于某些对实时性要求高的测点。

当接收到指令 x“0C”（关闭传感器信息监测）时，这是一个广播指令，所有从站都会立即停止周期性的传感器监测数据上报任务，并释放 PowerBus 总线回到空闲监听状态。

这种基于指令控制和时分复用的通信逻辑确保了 PowerBus 总线上的数据传输有序进行，有效管理了多个从站的数据上报行为。

5 系统功能调试与分析

5.1 系统实验平台搭建

这种基于指令控制和时分复用的通信逻辑确保了

PowerBus 总线上的数据传输有序进行,有效管理了多个从站的数据上报行为。

为全面验证所设计的基于 PowerBus 总线的传感器数字化采集系统的功能和性能指标,搭建了如图 16 所示的实验平台。该平台包含实际的铂电阻传感器、热电偶传感器和压力传感器作为物理量输入源,由信号变换器设备(即数字化传感器从站)执行信号采集、调理和数字化转换,由总线网络节点设备(PowerBus 主站)进行 PowerBus 总线管理、从站数据接收和数据上传。

实验旨在模拟系统在航空应用中的工作环境,全面评估其性能。系统设计遵循通用化和小型化原则,便于在不同场景下进行测试和部署。实验对系统各关键环节进行了功能和性能调试,包括 PowerBus 总线的通信波形分析、主站指令的下发、从站响应及从站数据的上报。

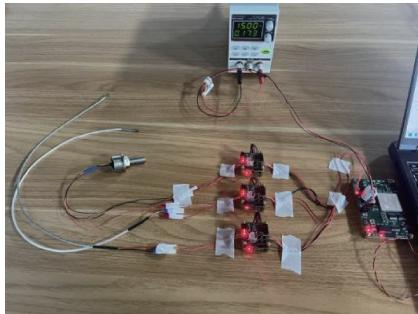


图 16 实验平台搭建

Fig. 16 Establishment of the experimental platform

实验使用示波器捕获总线网络节点向下行数字化传感器设备发送指令时 PowerBus 总线的电压波形,如图 17 所示。实验波形清晰地展示了总线电压在主电源电压 V_H (15 V) 和 0 V 之间按照特定的时序进行切换。通过对波形时序的测量,确认了其完全符合 PowerBus 下行数据编码规则:100 μ s 的高电平 V_H 代表逻辑“1”,而 40 μ s 的低电平 0 V 后紧跟 60 μ s 的高电平 V_H 则代表逻辑“0”。

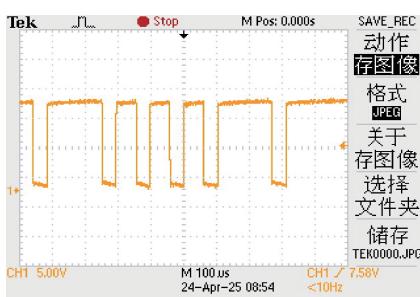


图 17 主站下行发送数据

Fig. 17 The main station sends down data

实验使用示波器捕获数字化传感器设备向总线网络节点发送数据时 PowerBus 总线的电压波形,如图 18 所示。在总线处于通信电压 V_M 时,从站通过控制从总线接收的电流来调制电压。实验波形显示,从站通过将总线电

压拉低至 V_N 来表示逻辑“0”,通过释放总线使其电压恢复至 V_M 来表示逻辑“1”。

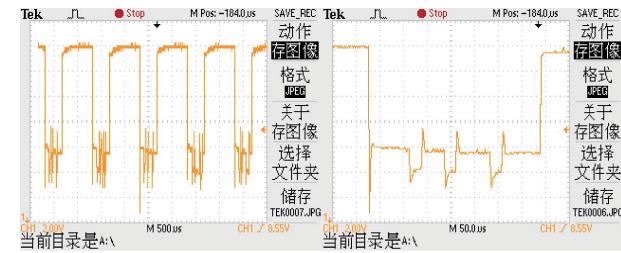


图 18 从站上行发送数据

Fig. 18 Send data from the station

5.2 系统采样精度验证

如图 19 所示,实验使用信号发生器生成了一个 0.5 V 的电源电压作为直流参考电压,通过高精度万用表测量其标准参数为 +0.500 802 V。同时该电压通过镀银同轴线直接接入从站的 ADC 采样点,从站 MCU 对采样值进行浮点换算后得 +0.500 837 V,再经 POWERBUS 总线上传至主站,最终又 RS485 上传至上位机端。通过对比基准与回读值,差值仅 +37 μ V,约 0.46 LSB,同时对其进行多次实验,标准偏差 $\leqslant 50 \mu$ V,实验证明该系统具备 16 Bit 有效采样精度。



图 19 采样精度验证图

Fig. 19 Sampling accuracy verification diagram

5.3 系统性能及可靠性验证

如图 20 所示,实验将每组传感器数据上报的协议格式进行了调整,将最后 1 字节包尾 x"DD"更换为了帧计数。主站下达开始采集指令 x"AB_0B_00_DD"后,POWERBUS 总线上的传感器依次将传感数据上报至主站节点,主站通过 RS485 透明转发至上位机。

在 9 600 bps、常温常湿、无额外屏蔽的实验室条件下,系统连续运行 12 h,累计完成 2.16×10^6 次数据帧上报,总数据量约为 37.1 B。如图 21 所示,传感器数据经上位机数据分析软件拆分后可知:帧序号严格连续,未出现丢包、重号、误码或帧序跳变,误码率 $< 1 \times 10^{-7}$ 。该结果初步验证了在静态工况下,本系统可满足长时间无差错传输需求。

如图 22 所示,实验还对该系统在振动环境下进行了可靠性验证。将被测节点固定在电磁振动台上,施加 10~500 Hz、加速度 3 g 的扫频振动,持续 2 h。实验过程中,系统持续运行并正常采集、上传传感器数据,未出现通信中



图 20 数据丢包验证

Fig. 20 Data packet loss verification

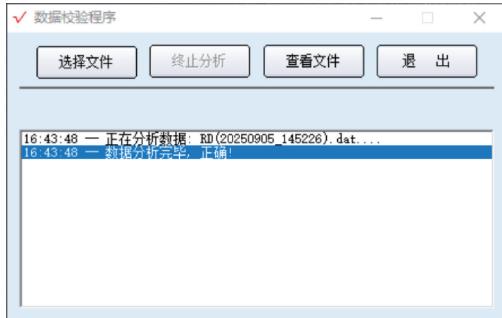


图 21 数据拆分验证

Fig. 21 Data split verification

断、数据丢包或功能异常。振动结束后,节点外观无松动、裂纹等结构损伤,功能测试结果表明其性能指标与振动前一致,验证了系统在典型航空振动环境下的结构稳定性与运行可靠性。

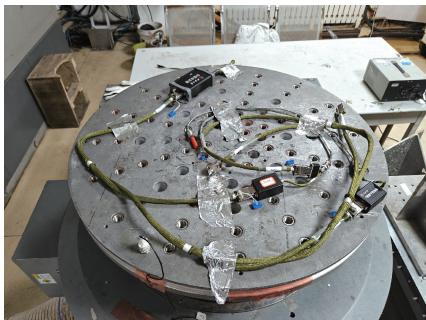


图 22 振动环境可靠性测试

Fig. 22 Vibration environmental reliability testing

如图 23 所示,实验还对该系统在高低温环境下进行了可靠性验证。将被测节点置于高低温试验箱中,分别在 -40°C 和 $+85^{\circ}\text{C}$ 的极端温度条件下各保持 2 h,并在温度稳定期间持续进行数据采集与通信测试。实验过程中,系统各模块工作正常,传感器数据采集、处理与上传功能未出现中断或异常,通信链路保持稳定。实验结束后,节点在常温下恢复运行,功能测试结果表明其性能指标与试验



图 23 高低温环境可靠性测试

Fig. 23 Reliability testing in high and low temperature environments

前一致,未出现温度漂移、数据误差增大或硬件失效等现象,验证了系统在宽温范围内的环境适应性和长期可靠性,满足航空等复杂工况下的应用需求。

如图 24 所示,为单包传感器数据传输时延测试图。该设计中传感器数据单包共 7 个字节,POWERBUS 总线数据传输码率为 9 600 bps,根据计算可得,传感器单包数据传输的理论时延为 5 ms。由测试图可知,实际传输时延为 5.2 ms,时延差 0.2 ms 为总线上实际传输时间与理论传输时间的差值及 MUC 处理传感器数据包的时间和。

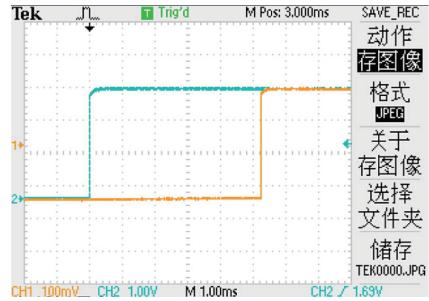


图 24 传输时延测试

Fig. 24 Transmission delay test

5.4 系统遥控指令验证

实验通过上位机模拟总线网络节点向特定地址的数字化传感器下发设备信息查询指令。如图 25 所示的抓包数据,指令信息为 x“AB_0A_01_DD”。该数据包符合 PowerBus 指令帧格式,其中包头 x“AB”和包尾 x“DD”正确,指令码 x“0A”指示设备查询,设备地址 x“01”指定了目标从站为设备 1。

如图 26 所示,为总线网络节点设备下发开启传感器信息监测指令。依据指令数据包信息可知,有效指令数据为 x“0B”,同时设备地址被设置为无效地址 x“00”。当数字化传感器接收到该条指令后,将忽略设备地址,依据自身序号及划分好的时间槽依次上报传感器监测值。

如图 27 所示,为总线网络节点设备下发关闭传感器信息监测指令。其中,有效指令数据为 x“0C”,设备地址为无效地址 x“00”。当数字化传感器设备接收到该条指令后,统一停止对传感器监测数据的上报工作。

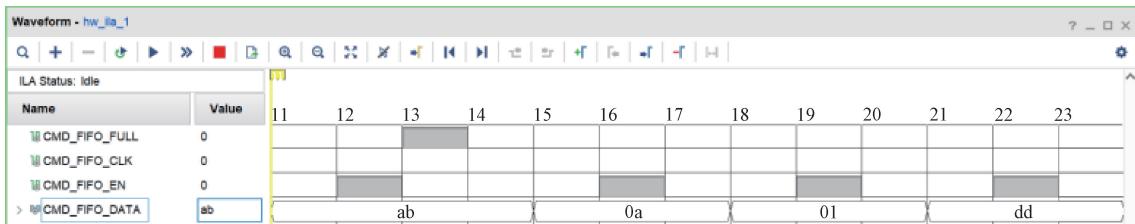


图 25 设备信息查询指令下发

Fig. 25 Device information query command issued

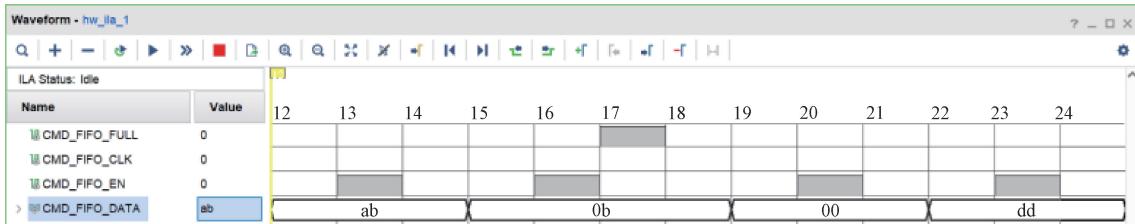


图 26 开启传感器信息监测指令下发

Fig. 26 Initiate sensor information monitoring command issuance

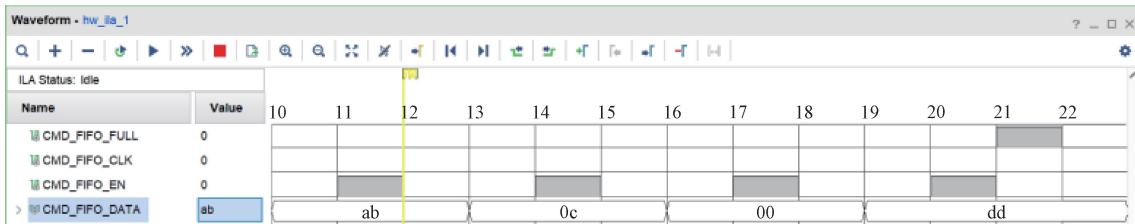


图 27 关闭传感器信息监测指令下发

Fig. 27 Turn off sensor information monitoring command issuance

5.5 系统遥测数据验证

在主站下发设备信息查询指令后,实验平台成功捕获了来自设备 1、设备 2 和设备 3 的监测数据包,如图 28 所示。这些数据包包含了各自设备的属性信息,如传感器类型、工作状态等,有效数据占 2 字节位宽,验证了数字化传感器从站在接收到定向查询指令后,能够正确识别地址并上报自身的设备信息。

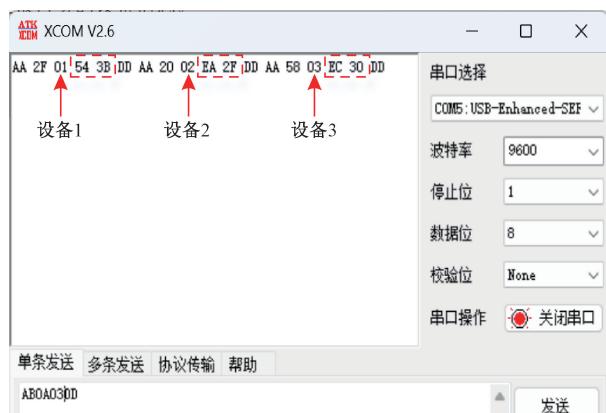


图 28 设备信息上报

Fig. 28 Device information reporting

在主站下发开启传感器信息监测指令后,实验平台捕获了不同类型数字化传感器从站周期性上报的传感器监测数据包,如图 29 所示。

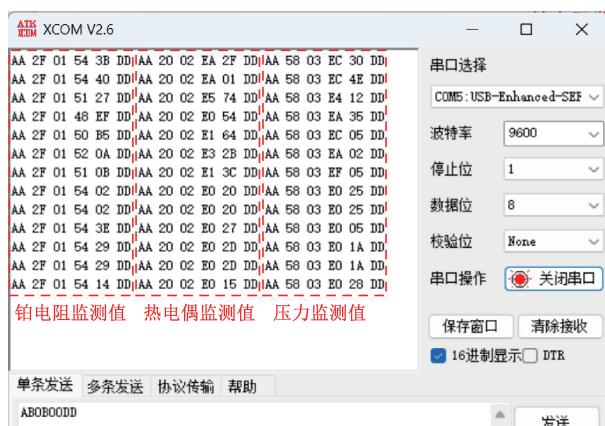


图 29 传感器监测值上报

Fig. 29 Sensor monitoring value reported

图中清晰显示了铂电阻传感器设备 ID 为 x“01”,热电偶传感器设备 ID 为 x“02”,压力传感器设备 ID 为 x“03”,并且传感器监测值位于设备 ID 之后,占用 2 字节位宽。验

证了数字化传感器从站能够按照时分复用策略,周期性地采集、处理、封装并上报对应类型的传感器监测数据。

实验结果表明,本文设计的基于 PowerBus 总线的传感器数字化采集系统,能够在 9 600 bps 的传输速率下准确、可靠地采集铂电阻、热电偶和压力传感器数据。同时利用 PowerBus 总线实现能信一体的二线制传输,有效解决了传统模拟系统在布线和抗干扰方面的不足。

6 结 论

针对传统工业传感器系统在布线复杂性、信号传输距离及电磁干扰敏感性方面存在的显著局限性,特别是对温度、压力等变化相对缓慢的关键参数采集,本研究提出并设计了一种基于 PowerBus 总线的传感器数字化采集系统。该系统核心创新在于将传感器信号调理、高精度模数转换及 PowerBus 从站通信功能紧密集成于传感器前端,形成具有智能感知和数字化传输能力的“数字化传感器”从站,并通过 PowerBus 二线制能信一体总线与上层“总线网络节点”主站构建分布式采集网络^[18]。

系统设计详细阐述了 PowerBus 总线的独特优势,包括能信一体的低压载波技术和二线制拓扑,以及主从站硬件电路的关键构成和工作原理。在软件逻辑层面,设计实现了数字化从站的高频过采样与数据平滑处理,以及基于 PowerBus 协议的指令解析和数据上报机制,特别是考虑了多从站环境下基于时分复用的总线访问策略^[19]。系统在硬件层面实现了对铂电阻、热电偶、压力传感器的兼容性支持,体现了设计的通用化理念。

实验验证通过搭建真实传感器的测试平台,全面评估了系统的各项功能和性能。波形分析证明了系统对 PowerBus 物理层协议的准确实现。指令交互测试验证了主站对从站的有效控制和从站的正确响应^[20]。数据上报测试确认了系统能够准确采集、处理和封装传感器数据,并按照规定的协议格式通过 PowerBus 总线上传。实验结果表明:系统成功实现了 1 ksps 的内部采样频率和 16 bit 的有效采样精度,并通过 9 600 bps 的 PowerBus 总线进行了可靠的数据传输。

本系统设计及实验验证工作有效解决了传统传感器系统在工业应用中面临的布线复杂和抗干扰能力弱等突出问题,显著降低了系统部署的复杂度和成本,提高了数据采集的可靠性,加速了传感器采集系统的数字化和网络化转型^[20]。这为构建面向现代工业、航空等领域的分布式高精度传感网络提供了高效可行的技术路径,具有重要的理论研究和工程实践意义,对推动工业自动化水平的提升起到了积极作用。

参考文献

- [1] 张时雨. 飞机多传感器融合数字化测量技术分析与研究[J]. 工程机械文摘, 2025(2):25-28.
- [2] ZHANG SH Y. Analysis and research on aircraft multi-sensor fusion digital measurement technology [J]. Abstracts of Construction Machinery, 2025(2):25-28.
- [3] 倪波波. 多传感器温度采集系统设计与数据处理研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019.
- [4] NI B B. Research on design and data processing of multi-sensor temperature acquisition system [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2019.
- [5] 高歌. 基于多传感器数据采集系统的存储与传输设计研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [6] GAO G. Research on storage and transmission design based on multi-sensor data acquisition system[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [7] 岳一领, 张志鸿, 同献国, 等. 基于 PowerBus 通讯协议的远程测控系统[J]. 现代制造工程, 2006(10):13-16.
- [8] YUE Y L, ZHANG ZH H, YAN X G, et al. Remote measurement and control system based on PowerBus communication protocol [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2006(10):13-16.
- [9] HUANG X Y, MEI Z, YANG CH. Retraction note: Image acquisition system based on optical sensors for swimmer technical analysis and simulation[J]. Optical and Quantum Electronics, 2024, 56(10):1586.
- [10] 张嘉英, 范佳月, 袁亚丽. 基于 PowerBus 总线技术的智能灌溉系统[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2022, 38(1):38-43.
- [11] ZHANG J Y, FAN J Y, YUAN Y L. Intelligent irrigation system based on PowerBus technology[J]. Journal of Hebei North University (Natural Science Edition), 2022, 38(1):38-43.
- [12] 梁炼, 卢超, 赵俊江, 等. 一种新型过载传感器的数字化设计[J]. 电子器件, 2018, 41(5):1222-1225.
- [13] LIANG SH, LU CH, ZHAO J J, et al. Digital design of a new type of overload sensor[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2018, 41(5):1222-1225.
- [14] ZHANG F ZH, WANG F X, GU N. A non-invasive and high precision sensor for in-situ temperature monitoring of cells[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2022, 32(9):095001.
- [15] 金光虎. 传感器数字化接口技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- [16] JIN G H. Research on digital interface technology of sensors[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.
- [17] 党皓, 朱耀国. 温度传感器在飞机环境控制系统中的应用研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28(6):79-82.
- [18] DANG H, ZHU Y G. Research on the application of temperature sensors in aircraft environmental control systems [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 28(6):79-82.
- [19] YUAN M N, LI X R. Point cloud registration method for indoor depth sensor acquisition system based on dual graph computation with irregular shape factors[J]. IET Image Processing, 2024, 18(8):2161-2178.
- [20] 杜林颖, 于鸿彬, 王磊. 基于 K 型热电偶温度传感器的

- 测温系统研究[J].现代电子技术,2019,42(14):36-40.
DU L Y, YU H B, WANG L. Research on temperature measurement system based on K-Type thermocouple temperature sensor [J]. Modern Electronics Technique, 2019,42(14):36-40.
- [13] 林燕虹,杨成海,李建国.基于数字温度传感器的热电偶冷端补偿研究[J].南方金属,2024(2):30-33.
LIN Y H, YANG CH H, LI J G. Research on cold-junction compensation of thermocouples based on digital temperature sensors[J]. Southern Metals, 2024 (2):30-33.
- [14] PIENIAZEK J. Thermocouple sensor response in hot airstream[J]. Sensors, 2025,25(15):4634.
- [15] 张旭博,姚雪美,徐贺杨,等.多通道热电偶温度采集系统设计与实现[J].计算机测量与控制,2025,33(4):270-276,321.
ZAHNG X B, YAO X M, XU H Y, et al. Design and implementation of multi-channel thermocouple temperature acquisition system [J]. Computer Measurement & Control, 2025,33(4):270-276,321.
- [16] 高富来.高温薄膜热电偶传感器的研制与性能研究[D].大连:大连交通大学,2021.
GAO F L. Research on development and performance of high-temperature thin-film thermocouple sensors [D]. Dalian:Dalian Jiaotong University,2021.
- [17] 李洋,刘振革,王仁辉,等.分布式热电偶温度采集系统设计[J].内燃机与动力装置,2020,37(2):12-17.
LI Y, LIU ZH G, WANG R H, et al. Design of distributed thermocouple temperature acquisition system[J]. Internal Combustion Engines and Power Plants, 2020,37(2):12-17.
- [18] 张红兵,王华凌.基于铂电阻 Pt100 的温度传感器设计[J].电子制作,2012(11):36.
ZHANG H B, WANG H L. Design of temperature sensor based on platinum resistance Pt100 [J]. Electronic Production, 2012(11):36.
- [19] 席鹏,於二军.铂电阻温度传感器的测量方法及其应用[J].山西电子技术,2015(1):23-25.
XI P, YU ER J. Measurement methods and applications of platinum resistance temperature sensors [J]. Shanxi Electronic Technology, 2015(1):23-25.
- [20] MALLICK M, FRANKE L, RÖSCG A G, et al. High-density flexible thermocouple sensor arrays via printing and photonic curing [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 34 (20), DOI: 10.1002/ADFM.202301681.

作者简介

闫蓉(通信作者),硕士,高级工程师,主要研究方向为传感测量与总线采集。

E-mail:986038910@qq.com

李卢丹,硕士,高级工程师,主要研究方向为传感系统测量与校准。

尹川,硕士,高级工程师,主要研究方向为传感系统测量与校准。

吴金星,博士,高级工程师,主要研究方向为传感测量与机载测试系统设计等。