

嵌入式平台下多通道信号同步采集与控制系统研究

李保海

天津七一二通信广播股份有限公司, 天津 300462

DOI:10.61369/ME.2025060042

摘要 : 在嵌入式平台中, 针对多通道信号同步采集与控制的需求, 提出了一种基于嵌入式技术的信号同步采集与控制系统。该系统采用高效的硬件接口与实时软件处理方法, 实现了对多通道信号的同步采集, 数据传输与处理能力强, 能保证高精度的信号监测与实时反馈。通过优化设计, 系统具有较强的适应性与稳定性, 适合在工业控制、医疗检测等领域应用。实验结果表明, 该系统在实际应用中具有较高的信号处理效率和同步精度。

关键词 : 嵌入式平台; 多通道信号; 同步采集; 实时控制; 系统设计

Research on Multi-Channel Signal Synchronous Acquisition and Control System under Embedded Platform

Li Baohai

Tianjin 712 Communication & Broadcasting Co., Ltd., Tianjin 300462

Abstract : In response to the demand for synchronous acquisition and control of multi-channel signals in embedded platforms, this paper proposes a signal synchronous acquisition and control system based on embedded technology. The system employs efficient hardware interfaces and real-time software processing methods to achieve synchronous acquisition of multi-channel signals, featuring strong data transmission and processing capabilities that ensure high-precision signal monitoring and real-time feedback. Through optimized design, the system exhibits strong adaptability and stability, making it suitable for applications in industrial control, medical testing, and other fields. Experimental results demonstrate that the system offers high signal processing efficiency and synchronization accuracy in practical applications.

Keywords : **embedded platform; multi-channel signals; synchronous acquisition; real-time control; system design**

引言

随着科技的不断发展, 信号采集与控制技术在多个领域中得到了广泛的应用, 尤其是在工业自动化、医疗诊断及智能监控等方面。多通道信号的同步采集与实时控制已成为提高系统整体性能的关键。传统的采集控制系统往往存在信号不同步、处理延迟等问题。为此, 嵌入式技术凭借其高效能、低功耗及高度集成的特点, 成为解决这些问题的理想平台。本研究主要探讨如何基于嵌入式平台实现多通道信号同步采集与实时控制, 确保系统在高精度与高效能下运行。

一、嵌入式平台与多通道信号同步采集技术

(一) 嵌入式平台的硬件架构设计

嵌入式平台的硬件架构通常由处理单元、存储单元、输入输出接口和通信模块组成。在多通道信号同步采集系统中, 选择高性能的嵌入式微处理器或 FPGA 作为核心处理单元, 能够实现高速数据采集与处理。常见的处理器如 ARM Cortex-M 系列, 具有较高的计算能力和低功耗特性, 适用于实时处理任务^[1]。存储单元通常采用 SD 卡或嵌入式闪存来保存采集的数据。为了保证系统对外部设备的实时响应, 设计中需要选择多个高速的 ADC (模

拟-数字转换器) 与 DAC (数字-模拟转换器), 并确保各通道同步工作。此外, 通信模块如 UART、SPI、I2C 等可用于与外部设备进行数据交换。系统设计时还需考虑电源管理和抗干扰设计, 确保系统在复杂环境中稳定运行。

(二) 多通道信号采集原理与方法

多通道信号采集是指从多个信号源同时采集信号, 并将其转换为数字信号供后续处理。每个通道的信号采集通常需要独立的采样电路和模数转换器 (ADC)。为实现高精度采集, 选择高分辨率 (如 16 位或 24 位) 的 ADC 能够有效提升系统的采样精度^[2]。在采集过程中, 信号从传感器或外部设备通过信号调理电

路（如放大、滤波）处理后，送入 ADC 进行转换。为了确保多通道信号能够同步采集，设计时需考虑所有 ADC 的采样时钟同步。采样频率的选择依赖于应用场景的需求，一般情况下，采样频率至少应为信号频率的两倍以上，即符合奈奎斯特采样定理。假设采样频率为 f_s ，信号频率为 f ，则应满足关系式：

$$f_s \geq 2f$$

该公式确保了采样点密度足够，以避免混叠现象^[3]。

（三）多通道信号同步技术的关键问题

多通道信号同步是确保各个通道的信号采集和处理在同一时间基准下进行，以保持数据一致性和精度。同步问题的关键之一是时钟源的选择，所有通道的 ADC 需要通过一个共享的时钟源来进行同步采样。常见的做法是使用一个高精度的时钟发生器或通过外部同步信号来实现时钟同步。此外，信号的延迟也是同步控制中需重点关注的因素，不同通道的 ADC 之间可能会存在物理上的时延，影响同步精度。因此，需要通过硬件电路或数字校正算法来修正各通道间的相位差异。为了进一步提升同步精度，系统可以采用多级锁相环（PLL）技术，以减少时钟抖动和偏移对采样精度的影响。

二、信号采集系统的实现与优化

（一）系统硬件选择与设计

信号采集系统的硬件设计包括选择适当的传感器、信号调理电路、模数转换器（ADC）以及数据存储和处理单元。首先，传感器的选择应根据采集信号的类型（如温度、压力、振动等）及其精度要求来决定。例如，对于高精度温度测量，可选择高精度热电偶或 RTD（电阻温度检测器）。信号调理电路包括放大器、滤波器等模块，用于放大微弱信号并滤除噪声。其次，ADC 的选择要根据采样精度和速度的要求进行，常见的 ADC 精度为 16 位或 24 位。为了保证系统的实时性，采样率通常要满足应用场景的需求，例如，对于高频信号的采集，ADC 的采样频率应达到 1MSPS（百万样本每秒）以上。数据处理单元一般采用高性能的嵌入式微处理器（如 ARM Cortex-M 系列）或 FPGA 来进行数据处理与存储。数据存储可选用嵌入式闪存或外部 SD 卡，以便存储大量采集数据。如表 1 所示。

表 1 系统硬件组件选择

组件	型号	特性 / 参数
传感器	热电偶 / RTD	高精度，适用于温度测量
放大器	INA333	低噪声，高精度放大
ADC	AD9238	16 位分辨率，1MSPS 采样率
嵌入式处理器	STM32F407	ARM Cortex-M4，高效能处理
存储单元	SD 卡	支持大容量数据存储，快速读写

（二）软件算法与数据处理

在信号采集系统中，数据处理的核心是高效、精确地提取有用信号并实时反馈。数据采集后，系统需对信号进行去噪、滤波、增益调节等预处理操作。例如，可采用低通滤波器去除高频噪声，并使用数字信号处理算法（如卡尔曼滤波）提高信号的准确性。为了保证系统的实时性，数据处理应尽量减少延迟^[4]。常

见的实时处理方法包括中断机制和 DMA（直接内存访问）技术，前者通过硬件中断触发处理程序，后者通过直接将数据传输到内存以提高速度。对于大规模数据处理，采用多线程或多任务调度算法可以有效提升系统的响应速度和处理效率。

（三）系统性能优化方案

系统性能的优化涉及硬件和软件两个方面。在硬件方面，选择更高性能的 ADC 和处理器能够有效提升系统的采样速度和处理能力。例如，采用并行 ADC 配置，能够在同一时刻采集多个信号通道的数据，从而减少采集时间。在软件方面，优化算法可以通过减少冗余计算、合理调度任务来提升系统效率。此外，利用硬件加速模块（如 FFT 加速器或专用信号处理单元）进行快速数据分析，也能够显著提高系统的整体性能。为了降低功耗，系统还应采用低功耗模式并优化电源管理策略^[5]。

通过合理选择硬件组件、优化数据处理算法以及进行针对性的性能调优，可以显著提升系统的实时性、精度和稳定性。

三、多通道信号同步控制方法

（一）信号同步时钟的设计与实现

在多通道信号同步控制中，时钟同步是确保所有通道能够同时采样的关键。为了实现精确的信号同步，系统需要设计一个高精度的同步时钟。通常情况下，可以选择一个稳定的外部时钟源作为系统的主时钟，并通过分频或相位锁定环（PLL）技术生成多个同步时钟信号，为每个信号通道提供时序参考。采用高精度晶振（如 1 ppm 以内的温度补偿型晶振）可有效减少时钟抖动和漂移。同步时钟的精度直接影响到采集的信号是否能够保持一致性。为了解决时钟源之间的时延和漂移问题，通常采用精确的同步方法，通过高速缓存和时钟缓冲放大器，确保时钟信号能够稳定分发到每个通道^[6]。系统设计应特别关注时钟的分发网络，确保信号的延迟最小化，并在每个信号通道使用相同的同步时钟，避免因时延不同导致的数据偏差。同步时钟设计应考虑到系统中不同组件的时延，确保所有通道的 ADC 能够在相同的时间基准下采样。时钟信号的分发需通过缓冲放大器进行，以保证各通道接收到的时钟信号强度一致，减少时钟传输中的信号衰减。

（二）控制算法与反馈机制

为了确保多通道信号的同步采集与精确控制，需要设计合适的控制算法与反馈机制。控制算法的核心任务是协调各信号通道的采样与处理过程，并及时调整系统运行状态。常用的控制策略包括 PID 控制和状态反馈控制。在 PID 控制中，通过调整比例（P）、积分（I）、微分（D）参数来控制系统的响应速度和稳定性。例如，当采样时钟出现偏差时，PID 控制器可以根据实时反馈调整系统的采样时序，以确保信号同步^[7]。PID 控制算法能够自适应不同的系统动态，在信号同步和时延调整方面表现出良好的稳定性。反馈机制通过不断获取系统状态信息，并将这些信息送回控制算法进行分析和调整，从而实现系统的闭环控制。为了增强系统鲁棒性，可以在控制系统中引入自适应控制算法，使得系统能够根据外部环境变化进行实时调整，保持信号采集的高精度和稳

定性。自适应控制能够根据系统的当前状态和反馈误差调整控制参数，从而优化系统响应，并减少外部环境变化对系统性能的影响。

(三) 数据传输与实时处理的协同设计

数据传输与实时处理的协同设计是多通道信号同步控制系统中的另一个关键问题。为了确保采集到的多通道信号能够及时传输并实时处理，系统需要高效的数据传输协议和数据处理架构。常见的高效数据传输协议包括 SPI、I2C 和高速 USB 等。通过选择高带宽的数据总线（如 SPI 的传输速率可达 10 Mbps），可以快速地将信号数据传输至处理单元进行分析处理。高速数据传输不仅要求硬件支持大带宽，还需要优化数据包的传输格式，减少传输过程中的冗余数据和延迟。为了提高数据传输的稳定性，可以采用冗余传输技术，如使用双通道传输和差错检测机制，保证数据的可靠性。数据处理单元通常采用 DMA 技术，实现数据在内存与处理器之间的高速传输，减少数据传输过程中的延迟。DMA 技术不仅可以提高数据传输速度，还能减少 CPU 的负担，提高处理器的工作效率。为了保障数据处理的实时性，系统还需要合理地调度任务，使用实时操作系统（RTOS）进行多任务管理。RTOS 可以根据优先级分配处理器资源，确保高优先级任务（如信号采集和实时控制）能在规定的时间内完成。实时数据处理与传输的协同设计确保了多通道信号在同步控制下的高效运行与准确反馈，最终实现了系统在复杂应用场景中的高效性与可靠性^[9]。

四、系统测试与应用验证

(一) 实验平台搭建与测试环境

为了验证系统的性能与稳定性，首先需要搭建实验平台并构建合适的测试环境。实验平台包括硬件设备、测试仪器和数据采集系统。硬件设备包括嵌入式处理器、信号采集模块、传感器和信号调理电路等。测试仪器主要包括示波器、信号发生器、频谱分析仪等，用于检测和验证采集信号的质量。实验平台需配备多通道信号源，提供模拟信号输入，确保系统能够在不同输入条件下进行验证。为了创建真实的测试环境，实验平台应具备足够的干扰和噪声源，这有助于检验系统在复杂环境中的抗干扰能力和信号同步精度。实验环境应确保温度、湿度等因素保持稳定，以免影响系统的测试结果。此外，测试过程中需模拟各种可能的外部干扰，例如电磁干扰、信号衰减等，以全面评估系统在实际应用环境中的适应性和鲁棒性。为了实现高效的测试管理，可使用测试自动化系统，对测试过程进行控制、数据记录和结果分析，进一步提高测试效率和准确性。如表 2 所示。

表 2 实验平台设备清单

设备	型号	主要功能
嵌入式处理器	STM32F407	实现多通道数据采集、信号处理与系统控制功能，作为整个系统的核心控制单元。
信号发生器	Agilent 33500B	提供可编程的多通道模拟信号输入，用于模拟不同传感器信号及输入场景。

示波器	Tektronix MDO3104	用于实时观测信号波形、幅值和时序特性，分析系统采集与输出信号的一致性。
频谱分析仪	Rohde & Schwarz FSV	对采集信号进行频谱检测与分析，用于评估系统的信号质量、噪声水平及失真情况。
信号调理电路	AD620	负责对传感器输出的微弱模拟信号进行放大、滤波及抗干扰处理，确保输入信号稳定可靠。

(二) 系统测试与数据验证

在实验平台搭建完成后，系统测试主要分为功能验证、性能测试和精度验证三部分。功能验证首先确认各个硬件模块和软件组件是否能够正常协同工作。通过模拟多通道信号输入，测试系统的多通道信号同步采集功能，并利用示波器和频谱分析仪对采集波形和频谱进行对比分析，结果显示各通道信号的采样延时均小于 1 μs，满足系统同步采集的设计要求。

性能测试包括系统的实时性测试、数据传输速率测试以及抗干扰能力测试。实验通过调整输入信号的幅度、频率以及叠加不同强度的噪声信号，考察系统在复杂条件下的响应特性。结果表明，在 100 Hz ~ 10 kHz 信号范围内，系统的平均数据传输速率达到 8.2 Mbps，数据丢包率小于 0.05%。在电磁干扰强度为 60 dB μV 的条件下，信号幅值误差不超过 ±1.8%，系统仍保持较好的信号同步性能^[9]。

精度验证则通过与高精度参考采集系统（Keysight DAQ970A）进行对比实验，评估本系统在不同工况下的信号处理误差。测试结果如表 3 所示。

表 3 系统数据验证结果对比

测试项目	参考系统测量值	本系统测量值	相对误差 (%)	测试条件
正弦信号幅值 (1 kHz, 2 Vpp)	2.001 V	1.987 V	0.70	环境噪声 45 dB μV
方波信号上升时间	1.20 μs	1.22 μs	1.67	电磁干扰 50 dB μV
数据传输速率	8.25 Mbps	8.21 Mbps	0.48	多通道采集 (4 通道)
信号同步延时	0.98 μs	1.0 μs	2.04	温度 25°C, 湿度 50%
峰值检测误差	0.0 V	±0.02 V	1.0	高噪声 60 dB μV

从表 3 可以看出，系统在不同信号类型与干扰条件下的最大相对误差均小于 3%，且信号同步延时控制在 1 μs 以内，完全满足设计指标要求。数据验证结果表明，该系统在高噪声和复杂环境中依然能够保持较高的同步精度和数据准确性，证明了系统具有良好的环境适应能力和可靠性。

(三) 应用领域的适应性分析

系统的应用领域适应性分析主要从实际应用需求出发，评估该信号采集与控制系统在不同领域的可行性。首先，在工业自动化领域，系统能够在高速、复杂的生产线上对多通道信号进行实时监测与反馈，适用于机器状态监测、环境监控等应用。系统的多通道同步特性能够有效地进行复杂工艺的实时跟踪和控制，提高生产效率和安全性。其次，在医疗领域，该系统能够采集多通道生物信号（如心电图、脑电图等），用于患者健康状况的实时

监控与诊断。由于该系统具备高精度和高稳定性，能够适应各种医疗设备和环境需求，提供高质量的数据支持。系统的高精度与高稳定性使其在这些领域具有良好的适应性，特别是在对数据精度要求较高的应用中^[10]。除此之外，系统还可广泛应用于智能监控、自动驾驶等领域。这些领域对多通道信号的实时采集、同步处理和控制有着较高的需求，而该系统的优势恰好能够满足这些需求。

硬件设计、优化的软件算法以及精确的信号同步控制，该系统能够在复杂环境下稳定运行，满足高精度采集与实时反馈的需求。实验结果表明，系统在工业自动化、医疗监控等领域具有广泛的应用潜力，未来有望在更多行业中提供高效的信号采集与控制解决方案。

五、结语

本研究提出的基于嵌入式平台的多通道信号同步采集与控制系统，经过实验验证，展现了优异的性能与可靠性。通过合理的

参考文献

- [1] 胡蓉蓉. 打开嵌入式平台“夹心饼干”式困境 [D]. 浙江财经大学, 2024. DOI: 10.27766/d.cnki.gzjcj.2024.000267.
- [2] 李道豫. 嵌入式平台下红外图像增强算法的研究与实现 [D]. 新疆大学, 2023. DOI: 10.27429/d.cnki.gxjdu.2023.000979.
- [3] 张静, 燕正亮, 张增, 王利伟, 闫皓炜. 机载嵌入式平台下的输电线路导线自动跟踪 [J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(02): 236–239+280.
- [4] 刘赣秦, 李晖, 朱辉, 黄煜坤, 刘兴东. 低功耗嵌入式平台的SM2国密算法优化实现 [J]. 网络与信息安全学报, 2022, 8(06): 29–38.
- [5] 刘紫薇. 嵌入式平台下基于卷积网络的实时多目标跟踪方法研究 [D]. 天津大学, 2022. DOI: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2022.001638.
- [6] 孟祥斌, 刘笑凯, 郝克林. 可信技术在国产化嵌入式平台的应用研究 [J]. 电子技术应用, 2021, 47(12): 94–99. DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211350.
- [7] 王博, 王夕臣, 章诗晨. 一种嵌入式平台下的高可靠文件系统设计 [J]. 航空电子技术, 2021, 52(01): 16–20.
- [8] 王磊, 关英, 孟志敏, 郝永平, 徐九龙. 嵌入式平台下红外图像坦克目标识别的实现方法 [J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(04): 132–137.
- [9] 郭猛. 嵌入式平台下基于卷积神经网络的小目标探测方法研究 [D]. 天津大学, 2020. DOI: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2020.004322.
- [10] 周正, 周煦林, 刘彬, 姚秦. 一种适用于嵌入式平台的 Siamese 网络匹配算法 [J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(08): 6–9. DOI: 10.19304/j.cnki.issn1000-7180.2020.08.002.