

# 一种基于 IEEE 1588 与总线架构的高精度同步采集技术

谷士鹏<sup>1,2</sup> 喻天翔<sup>1</sup> 尹 川<sup>2</sup> 张 磊<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学航空学院 西安 710072; 2. 中国飞行试验研究院 西安 710089)

**摘 要:** 针对飞行测试与航空发动机试验中传感器数据采集规模庞大、时间同步精度要求极高的问题,设计并实现了一种基于网络化传感器的同步采集系统。该系统采用总线型网络架构,融合了节点内基于共享时钟的统一触发机制与基于 IEEE 1588 的跨节点高精度时间同步技术,实现了多层级、高精度的数据同步,通过在总线型网络中集成基于 IEEE 1588 的增强型时间同步算法,在全网实现了纳秒级同步精度。然后结合增强型时间同步算法,在整个网络范围内达到了纳秒级同步精度。通过 OMNeT++ 仿真和 FPGA 硬件测试验证,结果表明该方案在大规模分布式传感网络中依然具备优异的同步采集性能,可满足飞行测试中对微秒级同步采集的严苛要求。本研究为构建高可靠性、多层级大规模传感系统提供了理论依据和实践路径。

**关键词:** 同步采集;时间同步;数据采集;OMNeT++

**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

## A high-precision synchronous acquisition technology based on IEEE 1588 and bus architecture

Gu Shipeng<sup>1,2</sup> Yu Tianxiang<sup>1</sup> Yin Chuan<sup>2</sup> Zhang Lei<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** In view of the large-scale sensor data collection and extremely high time synchronization accuracy requirements in flight tests and aero-engine tests, this paper designs and implements a synchronous acquisition system based on networked sensors. The system utilizes a bus-based network architecture, integrating a unified trigger mechanism within nodes based on a shared clock with high-precision time synchronization across nodes based on IEEE 1588. This enables multi-level, high-precision data synchronization. By integrating an enhanced time synchronization algorithm based on IEEE 1588 into the bus-based network, nanosecond-level synchronization accuracy is achieved across the entire network. Combined with the enhanced time synchronization algorithm, nanosecond-level synchronization accuracy is achieved across the entire network. Through OMNeT++ simulation and FPGA hardware test verification, the results show that the scheme still has excellent synchronous acquisition performance in large-scale distributed sensor networks, and can meet the stringent requirements for microsecond-level synchronous acquisition in flight tests. This study provides a theoretical basis and a practical path for constructing a highly reliable, multilevel large-scale sensing system.

**Keywords:** synchronous acquisition; time synchronization; data acquisition; OMNeT++

## 0 引 言

在飞机试飞测试过程<sup>[1-2]</sup>中,所搭载的传感器种类繁多,采集的数据量庞大<sup>[3]</sup>。在这些测试环境中,确保各类传感器在时间轴上的精确同步采集,对于分析物理量间的相

互关系和变化规律具有重要意义。尤其是在极端测试条件下,传感器数据的同步性显得尤为关键<sup>[4]</sup>。精准传感器数据同步不仅保障了各系统信息的协调性,还为飞行器性能评估、故障诊断及优化设计提供了科学依据<sup>[5]</sup>。在飞行测试中,涉及到多个不同类型的传感器,如气压、温度、加速

度、姿态等,它们的测量数据需要在同一时间点精确记录和分析<sup>[6]</sup>。任何在数据采集过程中存在的时序误差,都可能导致测试结果的不准确,进而影响飞行器安全性评估及性能表现。因此,如何有效地实现多源数据的同步采集<sup>[7]</sup>,确保数据的时间一致性,已成为当前试飞测试领域亟待解决的关键技术挑战之一。

在航空航天领域,总线型数据采集系统长期作为传感器互联与数据传输的主要方式。典型代表包括 MIL-STD-1553B、ARINC429、CAN 以及 PowerBus 等。这些总线结构在工程实践中具有稳定性高、抗干扰能力强等优势,但在大规模同步采集场景中也暴露出明显局限性。例如,1553B 与 ARINC429 总线带宽有限,难以支撑高频率传感器数据的实时传输;CAN 总线虽然具备较好的鲁棒性,但其基于优先级仲裁的访问机制在高负载下会产生不可忽略的时延抖动;PowerBus 系统能够提供统一的电源与数据通道,但其时间同步机制依赖额外的授时信号,在多节点、多层次扩展时精度难以保持。总体而言,现有总线型采集技术在带宽扩展性、纳秒级同步精度、跨异构系统互操作性等方面仍难以满足复杂试飞任务的需求。

现有的时间同步方法包括 NTP (network time protocol)<sup>[8]</sup>、IRIG-B<sup>[9]</sup>、GPS<sup>[10]</sup>等。然而,每种方法都有其自身的局限性。例如,NTP 完全通过软件实现,在客户端和服务端上运行,通常只能在毫秒级别实现同步精度。此外,IRIG-B 需要专用布线来传输定时信号,从而导致更高的部署和维护成本。GPS 依靠卫星信号进行时间同步,不适合在地下或室内环境中使用。然而,在变电站网络同步中,实现高精度同步至关重要。IEEE 1588 精确时间协议 (precision time protocol, PTP)<sup>[11]</sup>提供微秒级的同步精度,同时确保跨异构系统的兼容性和互操作性。已在对时间同步要求严苛的领域(如变电站网络)得到成功应用,并被认为是实现高精度网络同步的关键技术之一,然而,如何将 IEEE 1588 协议高效地应用于大规模、多层次级的总线式传感器网络架构中,并确保在整个系统中维持纳秒级精度,仍是当前研究面临的挑战。

为应对上述挑战,设计并实现了一种基于网络化传感器的数据同步采集系统,通过精准的同步触发机制与高稳定性的采样时钟对齐方法,确保分布式节点在统一时间坐标系下协同采集,以满足复杂测试环境下对时序控制与同步精度的严苛要求。其主要贡献包括系统结构创新、增强型时间同步方法以及全面的性能验证。首先,将采集系统划分为同一总线网络节点内传感器之间的同步采集与不同总线网络节点之间的同步采集两个层次。通过结合层次化的同步机制与适配策略,实现了纳秒级同步精度的数据采集系统。其次,引入了一种增强型时间同步算法,显著提升了不同总线网络之间的同步精度,使其同步偏差控制在纳秒量级。最后,通过仿真分析与实际测试,全面验证了所提出同步采集系统的精度、稳定性与实用性,证明其可有效满

足高复杂度测试场景中的同步需求。

## 1 采集系统数据同步的影响因素

在数据采集系统<sup>[12]</sup>中,实现高精度的数据同步是确保测试结果时效性与有效性的关键。数据同步主要包括 3 个要素:同步触发,即多个采集通道在相同的时间点启动采集,确保采集起始时间的一致性;采样时钟同步,即采样过程中各通道的时间间隔保持一致,确保数据采样的节奏一致;以及数据补偿处理,当无法在采集阶段实现理想同步时,需要通过后处理手段对数据进行时间对齐和补偿。

从系统实现角度来看,数据同步的本质在于构建统一的时间参考,并对各节点的本地时钟进行实时校准。通常,同步触发依赖于全局事件或由主节点发出的控制命令,通过网络广播的方式统一启动各采集节点。而采样时钟同步则更侧重于采样过程中的时序一致性,往往基于时间同步协议(如 IEEE 1588<sup>[12-14]</sup>或自定义轻量级协议)来实现频率与相位的双重对齐。

然而,在实际的同步采集系统中,同步过程不可避免地会受到多种误差因素的影响,主要包括:1)时间戳采样误差:即节点记录事件时间时因硬件延迟或时钟量化引入的误差;2)报文传输延迟及其抖动:同步信息通过网络传输时受到链路负载和时延波动影响;3)链路非对称性:上下行路径延迟不一致会引发时钟偏移误差;4)本振时钟漂移:节点内部晶振频率误差或温漂导致长期同步误差积累。

对于如飞机试飞等高复杂度测试场景,系统所采集的信号类型众多,通道间存在强关联性,对同步精度提出了更高的要求。为有效抑制上述误差因素,确保数据质量,“同步触发”的精确性和“采样时钟同步”的稳定性成为数据采集系统设计的核心环节。二者共同构成了高性能数据采集系统中保障时间一致性、事件关联性与测量有效性的基础能力<sup>[15]</sup>。

## 2 基于网络化传感器的数据同步采集系统

基于网络化传感器的数据同步采集系统,旨在实现系统内所有传感器的统一、同步采集。为提升系统的可扩展性与结构管理效率,本系统采用总线型网络架构,其中数字传感器并非作为独立节点直接接入网络,而是通过总线网络节点进行集中接入与管理。每个总线网络节点可挂载 9 路传感器,设计为每节点挂载 9 路数字传感器。然后将总线网络节点链接到总线控制器上,通过总线控制器来构建整个网络,实现数据的同步采集。

如图 1 所示,系统的同步采集设计方案分为两个层次:1)同一总线网络节点内传感器之间的同步采集:即在单一网络节点下,多个挂载的数字传感器需要实现统一的采集启动和采样时钟控制,确保采集数据在时间上的一致性与可比性;2)不同总线网络节点之间的同步采集:由于系统中存在多个网络节点,各节点分布式地管理不同传感器单元,因此需要跨节点实现全系统级的数据同步机制,以保障多

节点采集数据在全局时间参考下的一致性。

针对上述两个层次的同步需求,提出了相应的解决方案:在节点内部,通过共享时钟与统一触发机制实现节点内多通道同步采集;在节点间,通过具备高精度时间同步功能

的专用总线网络,结合同步执行策略,实现跨节点的高精度数据同步采集。该分层次、模块化的同步设计方案可有效提升系统的同步精度与工程可实现性,适用于大规模、高可靠性传感采集系统的构建。

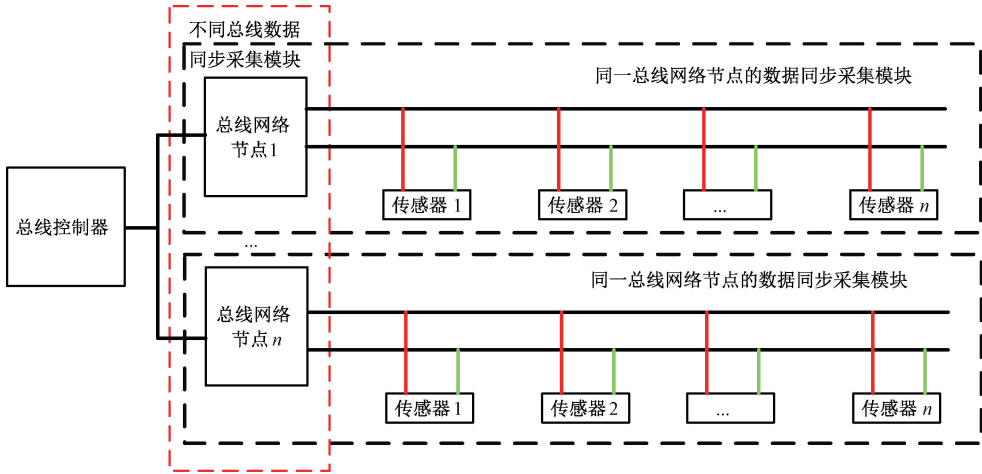


图 1 基于网络化传感器的数据同步采集系统

Fig. 1 Data synchronization acquisition system based on networked sensors

2.1 同一总线网络节点的数据同步采集设计

同一总线网络节点的数据同步采集,是指节点模块与其挂载的数字传感器在时间上保持一致性。本系统采用二线制连接结构,总线网络节点通过 PowerBus 总线与数字传感器相连,其组合拓扑如图 2 所示。具体而言,各总线网络节点之间首先通过时间同步机制建立统一时基,随后系统下发同步采集指令,该指令经由总线网络节点转发

至其所连接的 PowerBus 总线。由于 PowerBus 总线具备统一供电与数据传输的特性,同一条总线上的传感器能够在极短时间内同时接收到采集命令,从而保证该线路上各传感器的采集操作在时间上对齐。进一步地,借助分布式总线网络节点间的高精度同步机制,不同节点之间的采集时间偏差亦可控制在极小范围内,最终实现整个系统范围内的高精度同步采集。

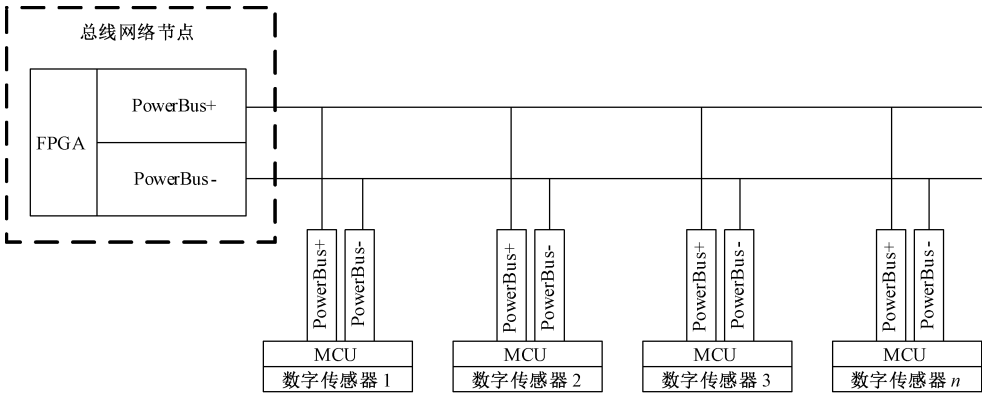


图 2 智能传感网络二线制数字传感器组合

Fig. 2 Two-wire digital sensor combination in intelligent sensor network

在该结构中,数字传感器以总线网络节点模块提供的本地时间为统一时间基准,实现采集控制与数据回传。具体的采集流程如下:

1) 同步采集命令广播:当启动数据采集过程时,总线网络节点模块首先通过 PowerBus 广播一个“开始采集”命令。由于采用二线制通信,所有挂载的数字传感器会同时接收该命令。此时,网络节点模块记录系统当前时间为

$T_1$ ,作为采集时序的基准起点。

2) 传感器响应与数据上传顺序控制:所有传感器在接收到采集命令后即启动采集任务。假设系统挂载了  $n$  个传感器,编号为  $1 \sim n$ ,每个传感器在完成数据采集后会主动向总线网络节点发送数据。然而,由于传感器共享同一总线,不能同时传输数据,否则会引发总线冲突。因此,系统为每个传感器分配一个依次发送数据的时间窗口。具

体地,第  $i$  个传感器的数据发送时间为:

$$T_{ci} = T_1 + i \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中:  $T_{ci}$  表示第  $i$  个传感器发送数据时间,  $\Delta t$  表示统一设定的传输间隔时间。通过此方式可避免总线冲突,同时保障数据采集时间的可计算性和序列化。

3) 数据同步的实现与误差分析:总线网络节点模块可根据各传感器的编号与系统时间  $T_1$ ,结合已知的传输延时  $\Delta t$ ,还原每个传感器的实际采集时间,从而完成数据的同步重建。

需要指出的是,该方案虽可实现逻辑上的同步采集,但仍存在一定的时间误差来源,主要包括:1)命令传播延迟差异:由于数字传感器在总线中的物理位置和线路长度存在差异,采集命令的接收时间会略有不同。但经实测,该延迟实测为纳秒级,与其他误差源相比影响极小,在本方案中可初步忽略。2)传感器启动与采集的不一致性:各传感器在接收到命令后,其响应时间、采样电路启动时间存在微小差异。为简化系统处理,统一规定各传感器以固定间隔进行数据上传,可能带来微量采集时间误差。但由于此延时为可控变量,且已纳入系统模型,可通过补偿或后处理手段(如相关的滤波算法、补偿算法)进行修正。

## 2.2 不同总线网络节点的数据同步采集设计

尽管单个总线网络节点能够实现所挂载传感器的数据同步采集,但在实际应用中,尤其是在如飞机试飞或航空发动机试验等大规模测试场景中,单节点可接入的传感器数量有限。为了满足系统级、多源同步采集需求,需通过多个总线网络节点协同构建分布式传感采集网络。因此,如何实现不同总线网络节点之间的高精度同步采集,成为系统设计的关键问题。

图 3 展示了提出的不同总线网络节点的数据同步采集架构。在该架构中,所有总线网络节点通过一条具备高精度时间同步能力的专用总线控制器互联,形成统一的时

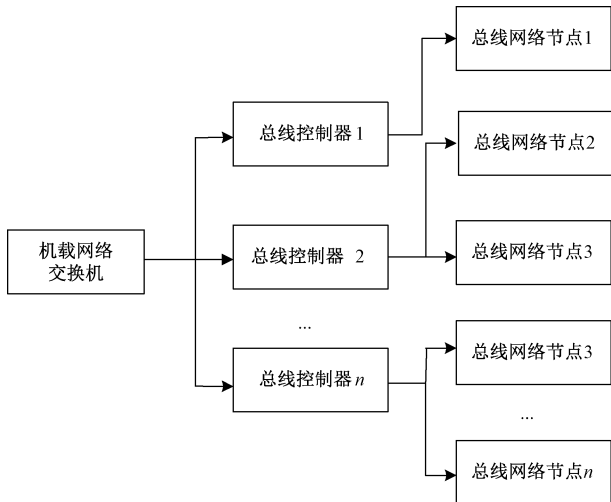


图 3 分布式总线网络节点架构图

Fig. 3 Distributed bus network node architecture

间域。只要该专用网络实现了全网时间同步,即可在不同网络节点之间构建同步采集能力。

为满足飞行测试中对时间同步精度优于  $1 \mu s$  的要求,提出在专有总线控制器中引入基于 IEEE 1588 协议的高精度时间同步机制。IEEE 1588 具备纳秒级的同步能力,该协议通过主从时钟之间交换时钟信息,时钟通过 Sync、Delay\_Req、Delay\_Resp 这 3 个报文获得时间戳信息。根据式(2)和(3),从时钟计算时钟偏差 Offset 与网络延迟 Delay,然后调整自己的本地时钟<sup>[15]</sup>。通过该协议对整个网络进行时间同步,可确保网络中所有节点的时间一致性达到纳秒级,从而为高精度同步采集提供保障<sup>[16]</sup>。

$$\text{Offset} = \frac{(t_{i3} + t_{i2}) - (t_{i1} + t_{i4})}{2} \quad (2)$$

$$\text{Delay} = \frac{(t_{i2} - t_{i3}) + (t_{i4} - t_{i1})}{2} \quad (3)$$

式中:Offset 表示从时钟计算时钟偏差,Delay 表示从时钟计算的网路延迟,  $t_{i1}$ 、 $t_{i2}$ 、 $t_{i3}$ 、 $t_{i4}$  表示 PTP 协议获取的时间戳。

在完成时间同步后,各总线控制器可采用内部时钟源驱动的周期执行机制,实现跨节点的数据同步采集,具体流程如图 4 所示。具体方法如下:

1) 在全网时间同步的基础上,每个总线控制器利用其通过 PTP 同步后的本地时钟生成高精度时间计数器 GT\_counter 作为统一时间轴;

2) 设定一个统一的采集启动时间点  $T_1$ ;

3) 指定周期执行的时间间隔  $T_2$ ,假设采样频率为 10 kHz,即周期为 1 ms;

4) 启动“同步执行功能”,各总线控制器将从时间  $T$  触发开始,以周期  $T_2$  输出一个 10 kHz 的周期方波信号(据调研大部分常用传感器的采样频率均小于 10 kHz。而且该值是可以根据传感器采样频率进行修改的,不是固定的);

5) 每个总线控制器根据方波上升沿触发采集命令的发送,实现跨节点一致的采样调度。

该方法通过将时间同步与采样控制进行解耦,以周期性输出信号实现分布式节点之间的统一采集调度。其同步精度取决于各总线控制器内部 GT\_counter 与全网时间同步的一致性。

为了实现多级级联网络下的高精度时间同步,文献[17]在 IEEE 1588 协议的基础上进行优化,提出了一种增强型的时间同步算法,该算法的核心思想是“预测与补偿”,即利用上一周期的时钟偏移量来预测并提前校正当前周期的潜在偏移,从而实现更精细的同步控制(如式(4)所示)。该算法可以将网络的时间同步精度保持在纳秒级。为此,采用该算法去实现专有网络的时间同步。

$$\text{cnt} = \frac{t_{(i+1)2} - t_{i2}}{\text{offset}} \quad (4)$$

式中:  $t_{(i+1)2}$  表示本轮从时钟接收 Sync 消息包时的时间,



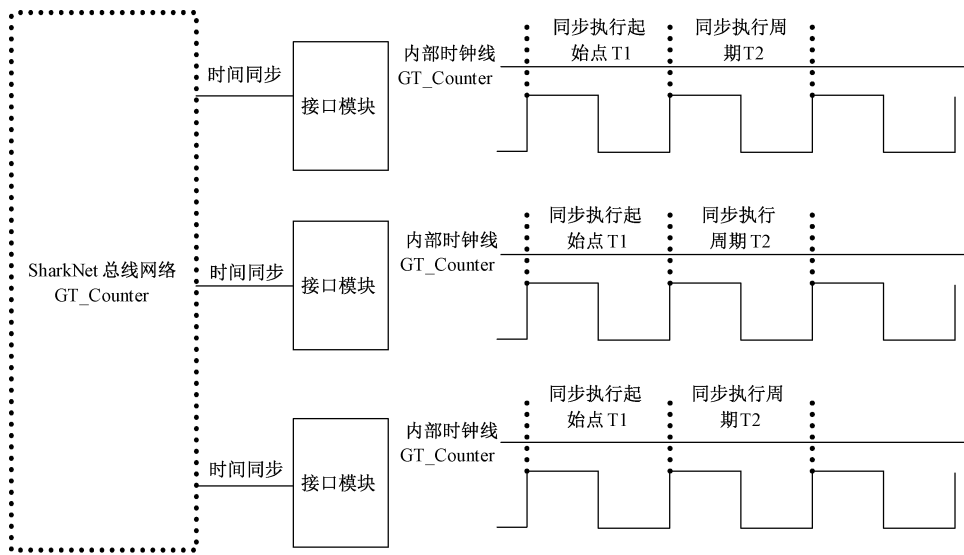


图 4 内部时钟源驱动的周期同步执行

Fig. 4 Cycle-synchronous execution driven by an internal clock source

$t_{i2}$  表示上一轮从时钟接收 Sync 消息包时的时间,offset 表示上轮所计算的主从时钟之间的时间偏移。

该优化方法可在多级网络中实现  $\pm 50\text{ ns}$  的对时精度,结合本方案中的调度控制逻辑,跨节点采集误差基本可限定在  $\pm 50\text{ ns}$  以内。此外,系统架构不受限于网络节点之间的拓扑层级,即使存在跨层传输,不同节点之间采集时间误差也不会显著放大。该算法在理论上可将多级网络中的同步精度维持在纳秒级远低于飞行试验系统对微秒级同步的要求。

综上所述,本研究提出的“专用总线网络+周期同步执行”方案,在保障结构灵活性的同时,可实现高精度、高可靠性的跨总线节点数据同步采集,满足复杂分布式测试系统对时间一致性的严格要求。

3 实验验证

由于提出的同步采集系统高度依赖于整个网络/系统的时间同步精度,为了更全面地验证其性能,首先基于 OMNeT++ (objective modular network testbed in C++) 构建了仿真环境,对系统的同步精度进行了模拟测试与评估。

OMNeT++ 是一个强大而灵活的仿真框架,用于构建和模拟离散事件仿真模型。它能够模拟多种网络环境,包括有线网络、无线网络、传感器网络和移动网络,并支持对协议栈进行详细仿真,如 TCP/IP 和 MAC 层协议等。搭建了如图 5 所示的精心设计的仿真环境,主时钟、从时钟 A~G,形成分层级联结构。

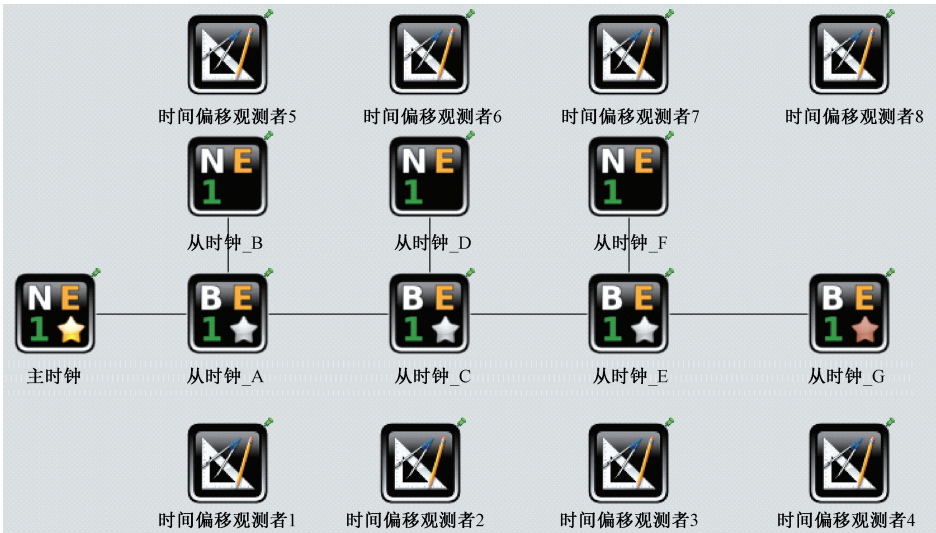


图 5 OMNeT++ 搭建的时间同步仿真模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the time synchronization simulation model built with OMNeT++

其中主时钟通过从时钟 A、C、E、G 形成级联主干链路,而从时钟 B、D、F 分别是 A、C、E 的下一级节点,模拟了分层网络结构系统中引入时间偏移观测模块,用于实时监测各从时钟与主时钟之间的时间偏差。具体的仿真参数如表 1 所示,其中主时钟被设置为完美时钟,即不会受制造工艺、环境温度或晶体老化等因素影响导致误差累积。从时钟则采用带噪声的设置,并使用 libPLN 库提供高效生成幂律噪声(PLN)实现该功能,这种类型的噪声在晶振中常见。在仿真过程中,配置了时间偏移观测者模块,该模块记录两个时钟之间相对路径和时间间隔信息。在运行过程中,该模块定期查询两个时钟状态,并将它们之间的差异显示在用户界面上以便实时监测和跟踪情况,有助于研究人员进行后续分析与评估。

图 6 展示了在 20~40 s 时间区间内,1~4 跳设备相对于主时钟的时间偏移情况。由图 6 可知,整个网络的时间偏移始终控制在±50 ns 以内,且随着跳数的增加,时间偏移呈现出逐渐增大的趋势。这一现象主要源于每一跳所引入的时间误差累积效应,从而导致整体时间同步精度有所下降。尽管如此,整个网络仍能够维持在纳秒级的同步精度,充分满足提出的系统性能需求。

表 2 展示了各总线控制器在 100 MHz 时钟频率下 20~100 s 的时间内,同步精度统计结果。结果表明,随着

网络跳数的增加,节点间的时间同步精度虽有一定下降,

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter settings	
参数	设置
主时钟晶振	100 MHz,完美时钟
从时钟晶振	100 MHz,含有噪声
监测间隔	1 ms
同步消息发送间隔	0.015 625 s
传输链路带宽	250 Mbps
传播延时	10 ns
链路长度	2 m
发送节点的处理延时	176 ns + random (0,4)×10 ns
接收节点的接收延时	76 ns + random (0,1)×10 ns
初始主从时钟偏差	2 ms
主从偏差统计开始时间	20 s
主从偏差统计结束时间	100 s
时间戳分辨率	10 ns
同步报文类型	Sync/Delay_Req/Delay_Resp

注:1. 发送节点处理延迟中,random(0,4)表示每次会随机取 0~4 之间的整数;2. 接收节点处理延迟中,random(0,1)表示每次会随机取 0~1 之间的整数。

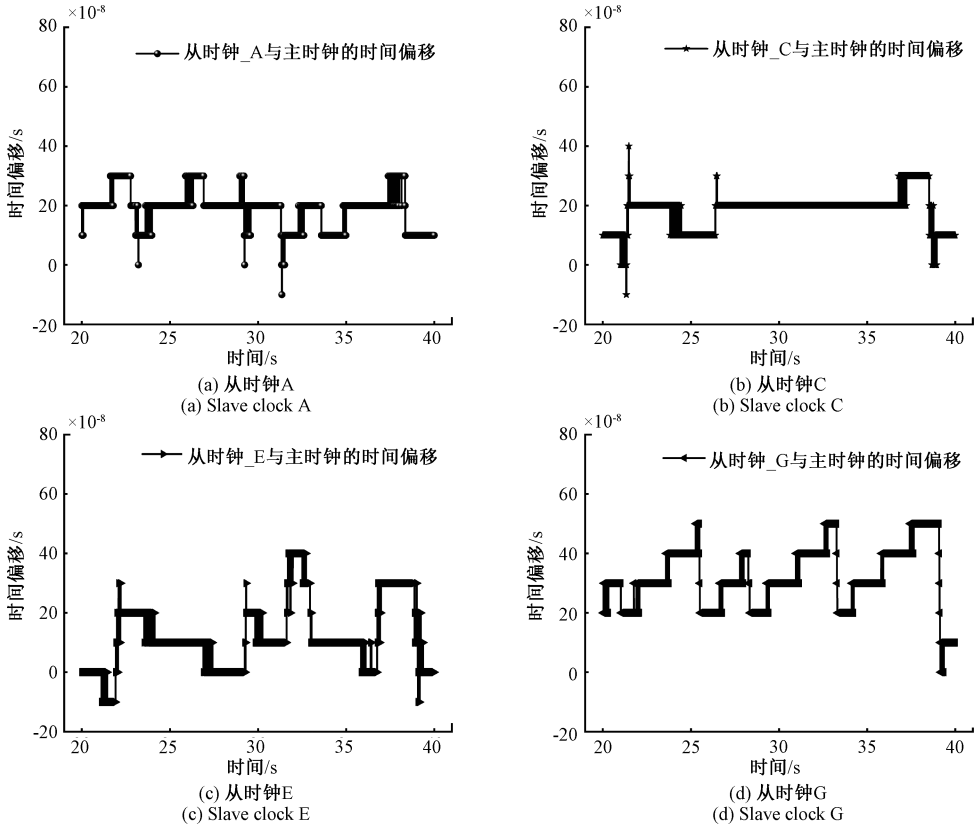


图 6 20~40 s 的从时钟 A、C、E、G 与主时钟的时间偏移

Fig. 6 Time offsets of slave clocks A, C, E and G relative to the master clock during 20 to 40 s

表 2 各从时钟在 20~100 s 仿真时间内的同步误差统计  
Table 2 Synchronization error statistics of each slave clock  
in the simulation time of 20~100 s ns

设备	最大值	最小值	平均值
从时钟_A	30	-20	8.58
从时钟_B	-30	40	8.62
从时钟_C	40	-40	11.52
从时钟_D	30	-40	26.13
从时钟_E	40	-30	6.53
从时钟_F	50	-50	13.50
从时钟_G	50	-50	13.88

但整体依然维持在纳秒量级的高精度水平。具体而言,比较从时钟\_A 与从时钟\_C,或者从时钟\_C 与从时钟\_D,可以发现,它们之间的时间偏差相差大概 $\pm 20$  ns;在第 4 跳的设备中(从时钟\_F 和从时钟\_G),系统仍可实现不超过 $\pm 50$  ns 的时间同步精度。

接下来,构建了一个实际的测试网络,并基于 FPGA 实现了总线控制器的核心功能,所用晶振频率为 100 MHz。其中,FPGA 的型号是 xilinx 的 xc7k325 t-3ffg900i,晶振所采用的是北京晨晶的 ZPB-26-80-V3。为了便于后续使用示波器进行监测,将同步采集信号引出至电路的专用管脚,其示波器的所使用的是 RIGOL 普源数字示波器。具体的逻辑设计细节如图 7 所示。最终,通过高精度示波器对所提出的同步采集方法的精度进行了验证。

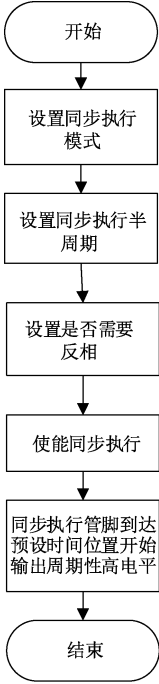


图 7 FPGA 逻辑设计流程图  
Fig. 7 FPGA logic design flow chart

器所输出的同步采集触发信号。从图 8 可以看出,各控制器之间的时间偏差均未超过 50 ns。测试结果表明,总线控制器之间的同步采集精度优于 50 ns,能够满足机载测试系统对同步采集精度的要求。这一实测结果( $<50$  ns)与仿真结论( $<\pm 50$  ns)高度一致,共同验证了本方案在实际应用中的高精度与可靠性。

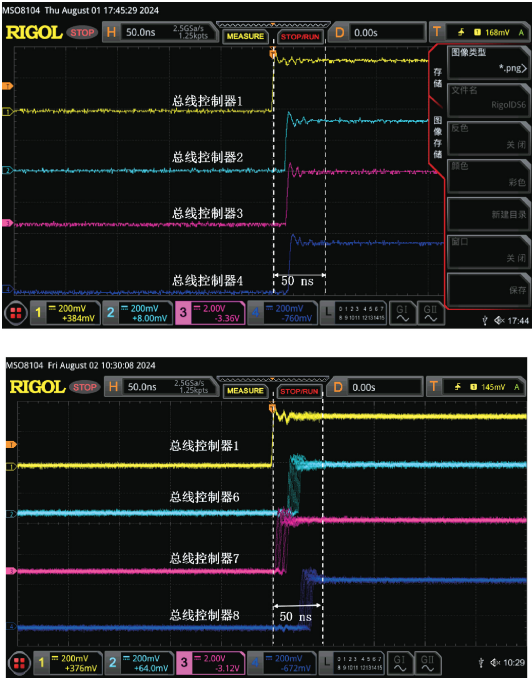


图 8 示波器实际采集的 8 个不同总线控制器输出的同步触发信号波形图

Fig. 8 Waveforms of synchronous trigger signals output by eight different bus controllers captured by the oscilloscope

基于上述性能表现,进一步分析该系统在大规模应用场景中的可扩展性。假设一个总线控制器作为从时钟节点,可下挂多达 15 个网络总线节点或总线控制器(这是由于一个总线控制器的总线负载能力为 15 个),1 个网络总线节点可挂载 9 个数字化传感器,则通过四级网络级联拓扑,系统理论上可接入上万个传感器,构建大规模分布式同步采集网络。在此拓扑结构下,任意两个网络总线节点之间的最大时间偏差不得超过 $\pm 50$  ns,而在单一总线节点下的传感器之间,由于二线制传输引入的微小延迟,其同步时间偏差通常控制在 200 ns 以内(该偏差值是通过综合考虑导线传播延迟、总线长度、信号转换时间以及设备处理延迟等多种因素计算得出的,是理论计算值。假设总线长度为 2 m,导线延迟约 5 ns/m,则延迟仅为 10 ns)。

综上所述,提出的同步架构不仅具备良好的拓展性和工程可实施性,更能够在大规模、深层级网络结构中保持优异的时间同步性能。该方案完全满足飞行测试系统对微秒级同步精度的严苛要求,为高可靠、高分辨率的飞行测试数据采集提供坚实的技术支撑。

## 4 结 论

针对飞机试飞测试及航空发动机试验测试过程中所面临的试验数据规模庞大、同步精度要求极高的技术挑战,提出了一种基于网络化传感器的数据同步采集系统设计方案。该系统综合采用同一总线网络节点内的数据同步采集与不同总线网络节点间的数据同步采集两种协同机制,通过引入高精度时间同步算法,实现了在大规模分布式传感器网络中的纳秒级同步采集能力。实验结果表明,所提的方法整体同步精度达到纳秒级,完全满足飞行测试系统和高动态复杂测试环境对微秒级甚至亚微秒级时间同步精度的严苛要求。为未来复杂系统中的多节点协同测试与数据融合分析提供了坚实的技术基础。

## 参考文献

- [1] 李铁林. 基于 AUTBUS 总线的机载无线柔性分布式测试系统数据同步采集技术[J]. 电子测量技术, 2024, 47(11): 176-181.  
LI T L. Synchronization data collection technique for airborne wireless flexible distributed testing system based on AUTBUS [J]. Electronic Measurement Technology. 2024, 47(11): 176-181.
- [2] 陈源林, 孙尚民, 许西宁. 基于 FPGA 和 STM32 的多通道超声信号同步采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(11): 142-147.  
CHEN Y L, SUN SH M, XU X N. Design of multi-channel ultrasonic signal synchronous acquisition system based on FPGA and STM32 [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(11): 142-147.
- [3] 王晶, 罗丹. 基于 LXI 总线的数据采集系统数据同步方法研究[J]. 电子测试, 2017(8): 72-74, 71.  
WANG J, LUO D. Research on data synchronization method of LXI-based data acquisition system [J]. Electronic Test, 2017(8): 72-74, 71.
- [4] 单晓明, 高倩, 魏秀利. 航空发动机试验与测试技术发展分析[J]. 航空动力, 2022(3): 67-70.  
SHAN X M, GAO Q, WEI X L. Test and measurement technology for aero engines [J]. Aerospace Power, 2022(3): 67-70.
- [5] 陈康. 面向室内大空间动态定位的多传感器同步技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.  
CHEN K. Research on multi-sensor synchronization technology for indoor large space dynamic positioning[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [6] 程建兴, 史仪凯. 基于多传感器数据融合的飞机电源系统故障诊断[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(8): 184-187.  
CHENG J X, SHI Y K. Aircraft power system fault diagnosis based on multi-sensor data fusion [J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(8): 184-187.
- [7] 陈小宇, 汪歆, 武瑞宏, 等. 轨道动静结合快速检测多源数据采集模块设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(7): 111-117, 124.  
CHEN X Y, WANG X, WU R H et. al. Design of multi-source data acquisition module for rapid detection of track dynamics and statics [J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(7): 111-117, 124.
- [8] BURBANK J, MILLS D, KASCH W. Network time protocol version 4: Protocol and algorithms specification [J]. Heise Zeitschriften Verlag, 2010, DOI: 10.17487/RFC5905.
- [9] ZHANG H, PENG S, LIU L, et al. Review on GPS spoofing-based time synchronisation attack on power system [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(20): 4301-4309.
- [10] EIDSON J C, FISCHER M, WHITE J. IEEE-1588™ Standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[C]. 34th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, 2002: 243-254.
- [11] 吴春林, 陈勇, 邵红, 等. 基于 ADS-B 的飞行数据采集处理系统设计与实现[J]. 火控雷达技术, 2022, 51(2): 53-57.  
WU CH L, CHEN Y, SHAO H. et. al. The design and implementation of flight data acquisition and processing system using ADS-B [J]. Fire Control Radar Technology, 2022, 51(2): 53-57.
- [12] 高中淦. 基于 IEEE 1588 协议的时间同步系统研究与设计[D]. 太原: 中北大学, 2024.  
GAO ZH G. Research and design of time synchronization system based on IEEE 1588 protocol [D]. Taiyuan: North University of China, 2024.
- [13] 徐卓汀, 商艳娟, 王成群. 基于 FPGA 的 IEEE 1588 时钟同步系统的设计与实现[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(5): 64-69.  
XU ZH T, SHANG Y J, WANG CH Q. Design and implementation of IEEE 1588 protocol based on FPGA [J]. Intelligent Computer and Applications, 2023, 13(5): 64-69.
- [14] 黄健, 冯暄, 翁凯, 等. DCQD: 一种物联网高性能数据采集平台的设计与实现[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2014, 51(4): 707-712.  
HUANG J, FENG X, WENG K. et. al. DCQD: Design and implementation of a high-performance buffering queue for database disks within the context



of massive data acquisition of internet of things[J].  
Journal of Sichuan University ( Natural Science  
Edition),2014,51(4):707-712.

[15] 卢灏,余修武,刘永. 基于节点自补偿的 IEEE 1588 时  
钟同步算法[J]. 传感技术学报,2023,36(1):53-59.  
LU H, YU X W, LIU Y. IEEE 1588 clock  
synchronization algorithm based on node self-  
compensation [J]. Chinese Journal of Sensors and  
Actuators,2023,36(1):53-59.

[16] LI Q, ZHANG Y Z, LIU W Y. An IEEE 1588 time  
synchronization algorithm based on frequency  
compensation[C]. Eleventh International Symposium  
on Precision Mechanical Measurements, 2024, 13178:

149-157.

[17] WEHRLE K, GÜNEŞ M, GROSS J. Modeling and  
tools for network simulation [M]. Berlin: Springer  
Science & Business Media, 2010.

作者简介

谷士鹏, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为传感测量、  
机载测试、遥测传输等。

E-mail:fywodeshijie@126.com

喻天翔(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为飞行器  
结构/机构创新设计、飞机复杂机构系统数字孪生技术等。

E-mail:tianxiangyu@nwpu.edu.cn

尹川, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为传感测量。

张磊, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为传感测量。