

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

李铁林

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘 要: 本研究致力于机载无线柔性分布式测试系统的研制,以解决在飞行试验中测试系统占地空间大、线缆使用量大、走线复杂、测试通道数量多等问题。分布式系统的节点分布在不同的位置,其内部时钟可能因多种因素而出现不同步的情况,从而影响数据采集的精度。通过灵活的时隙资源分配机制实现 AUTBUS 总线的动态调整,确保系统通信的高效稳定。采用 1PPS、TOD 及 AUTBUS 总线对表算法,系统能够有效地实现全网节点设备的时间同步,确保各个节点在相同的时间基准上进行协同操作。测试数据同步采集基于外部触发的模数转换模块,在全网协同事件的时刻实现各节点数据的同步采集。测试结果表明系统的同步数据采集精度最低为 822.5 ns,满足飞行试验中机载测试的数据采集需求。

关键词: 机载测试;无线柔性测试系统;AUTBUS 总线;时间同步算法;数据同步采集

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

Synchronization data collection technique for airborne wireless flexible distributed testing system based on AUTBUS

Li Tielin

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

Abstract: This study focuses on the development of an airborne wireless flexible distributed testing system to address the challenges of large space occupation, high cable usage, complex wiring, and numerous testing channels in flight experiments. The distributed system consists of nodes distributed at different locations, and the internal clocks of these nodes may become unsynchronized due to various factors, which can affect the accuracy of data acquisition. By employing a flexible time slot allocation mechanism, the AUTBUS bus can be dynamically adjusted to ensure efficient and stable communication within the system. The synchronization of all network node devices is achieved through the utilization of 1PPS, TOD, and AUTBUS bus-based timing algorithms, ensuring synchronized operations among all nodes based on the same time reference. The synchronous data acquisition of the testing data is accomplished through an externally triggered analog-to-digital conversion module, enabling the synchronized data collection of all nodes during coordinated events across the network. The test results demonstrate that the system achieves a synchronization data acquisition accuracy of 822.5 ns, meeting the data acquisition requirements for airborne testing in flight experiments.

Keywords: onboard testing; wireless flexible testing system; AUTBUS; time synchronization algorithm; data synchronization and collection

0 引 言

在现代航空领域,试飞测试是确保飞行器性能和安全性关键环节之一^[1-4]。在民航智能飞行的进展中,机载无线柔性测试系统的研发作为关键技术备受关注,主要涵盖机载数据采集、智能数据处理以及多体制高效数据交互等

方面研究内容^[5-7]。通过机载环境下实现高速无线网络和柔性分布式测试,旨在建立一个以测试服务为中心、以数据为核心、具备良好扩展性和敏捷灵活性的机载分布式测试系统^[8]。为了满足民航试飞特种测试的需求,本文提出一种机载无线柔性测试系统。该系统旨在通过高效的数据采集和精准的时间同步,为试飞测试提供可靠的技术支持。

在分布式测试系统中,时间同步和采集同步是确保系统稳定高效运行的关键^[9-10]。由于分布式系统的节点分布在不同的位置,其内部时钟可能由于多种因素而不同步,这会影响到数据的准确采集^[11]。因此,一个有效的时间同步方法对于系统的整体性能至关重要。此外,节点之间协调采集是确保数据一致性和完整性的另一个挑战。目前的研究表明,为了解决分布式数据采集系统的同步授时问题,李彩华等^[12]研制了一套高精度时间同步授时系统。该系统在通信过程中周期性地发送同步授时秒脉冲,从而实现多通道高精度同步授时。李滚等^[13]将每个时钟看作网络系统中的节点,首先定义不同的分布式系统拓扑结构,然后分别设计了无主钟、有主钟和网络系统中存在固定通信时延的时钟同步控制算法。此外,之江实验室的宋俊男等^[14]采用了一种将 GPS 授时、秒脉冲(pulse per second,PPS)校时和脉冲触发相结合的方法进行传感器数据同步采集,同步精度达到了毫秒级。高宁等^[15]研究了弹载组合导航系统的数据同步采集,通过把 GPS 采集器接收的 1 PPS 信号接入 FPGA 与 DSP 以提供时间基准,利用 FPGA 实现 MIMU 与 GPS 数据在整秒时刻的同步采集。Pethig 等^[16]提出了一种在分布式系统中采集数据的方法,使用 IEEE1588 的精确时间协议进行同步,结果表明数据同步采集的精度为 10 ms。尽管已有一些方法来解决分布式测试系统的数据同步采集问题,但是关于机载柔性分布式采集模块同步数据采集的研究较少。此外,亟需进一步研究 PPS、时间信息(time of day, TOD)串口信号与总线时钟的融合算法,以提高时间同步的准确性和节点之间的协调采集数据能力。

在机载无线柔性分布式测试系统中,确保时间同步和数据采集同步是保障系统稳定高效运行的至关重要因素。由于分布式系统的节点分布在不同的地理位置,其内部时钟可能因多种因素而出现不同步的情况,从而对数据的准确采集和处理产生负面影响^[17-18]。因此,研究实现有效的的时间同步技术对于整个系统的综合性能至关重要。另一个面临的挑战是确保节点之间的协调采集,以保障数据一致性和完整性。在分布式系统中,不同节点可能由于网络延迟、硬件差异等因素导致数据采集的不一致性,需要采取相应的措施来协调和同步数据的采集过程。为解决上述问题,确保分布式测试系统的时间同步和数据采集同步,本文介绍了一种融合 1PPS、TOD 与 AUTBUS 总线时间的同步技术,并结合同步数据采集方法,实现了机载无线柔性分布式系统各个节点数据的同步采集。这种同步数据采集技术对于需要精确时间控制的机载测试非常重要。

1 测试系统的设计与实现

1.1 机载无线柔性分布式测试系统设计

机载无线柔性分布式测试系统根据民机试飞测试需求进行研制,其系统的组成架构如图 1 所示。相较于传统的

测试系统,该系统解决了测试系统占地空间大、线缆使用量大、走线复杂、测试通道数量多等问题,具备良好的扩展性和敏捷性。该系统旨在测试民机上的应变与温度,其中应变传感器采用 BE350 型应变片,而温度传感器采用 PT100 型铂电阻。系统正常工作时,全球定位系统(global positioning system,GPS)或北斗定位数据采集器接收到卫星的时间信号后,通过解算卫星的信号得到精确的时间 TOD。此外,其内部的定时电路会产生 1PPS 信号。首先,1PPS 与 TOD 有线传输至机载无线高速主控单元。随后,无线高速主控单元再将 1PPS 与 TOD 信号无线传输至时间同步终端。最后,由无线时间同步终端将该信号有线传输至控制模块。应变与温度柔性采集模块根据控制模块获得的 1PPS 与 TOD 信号完成总线时钟的修正,并为采集到应变与温度的数据添加时间戳^[19]。

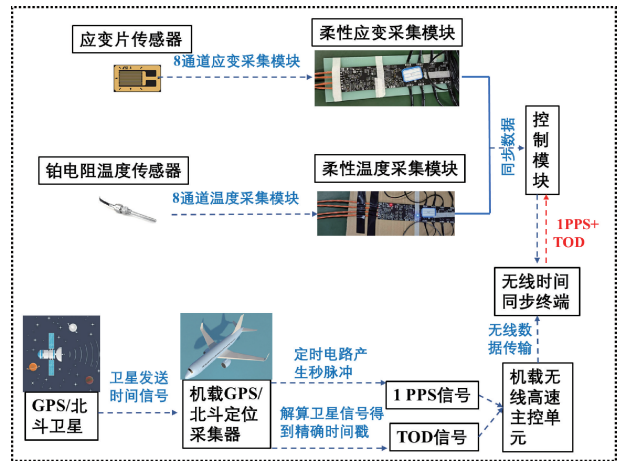


图 1 机载无线柔性测试系统组成架构

Fig. 1 Component architecture of airborne wireless flexible test system

1.2 机载无线柔性分布式测试系统授时架构

分布式系统在主从节点间的通信采用 AUTBUS 总线。AUTBUS 总线是一种宽带实时周期型总线,具备高带宽(总带宽 ≤ 100 Mbps)、多节点、长距离、全网协同能力强等特点。总线上的节点类型分为两种:主节点(control node,CN)和从节点(distributed node,DN)。CN 是全网网络通信的管理控制节点,负责 Frame(信号帧)的循环发送、整网的时间同步以及 Frame 内部时间资源的分配。每个节点间的交互通信需要设置通信资源,其通信资源分配的最小单位是 Symbol(时隙)。

分布式采集系统的主节点,也即控制模块,通过引入 CPU 侧的内部计时(capture compare pulse-width-modulation,CCP)模块,实现了更为精确和高效的数据采集。该系统的关键步骤之一是由 CCP 模块负责响应 PPS 信号的接收,通过这一过程,确保了系统对外部时间同步的准确性^[20]。

整个流程的详细步骤如图 2 所示,通过 CCP 模块捕获

1PPS 信号当前计时计数,并保存该计时值。通用异步收发器(universal asynchronous receiver transmitter,UART)串口同时接收 TOD 数据,根据 TOD 协议格式解析当前 1PPS 时刻的 UTC 时间,并获取解析完成当前时刻的计时计数。当前计时计数与捕获的 1PPS 计时计数的差值,即为获取解析 TOD 数据损耗时间,补偿损耗时间差值,即可获得当前的时间值。

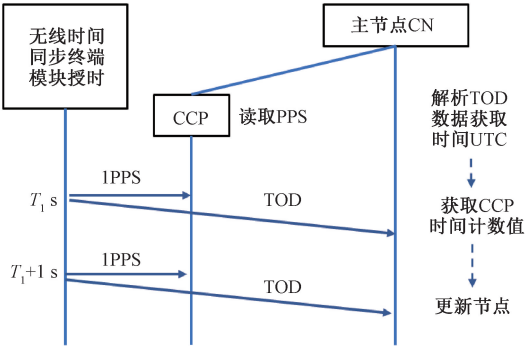


图 2 无线柔性分布式测试系统主节点授时流程
Fig. 2 Timing flow of master node of wireless flexible distributed test system

2 全网时间同步算法

通过灵活的资源分配机制使得 AUTOBUS 总线能够根据通信需求和网络负载进行动态调整,确保通信的高效性和稳定性。图 3 中清晰地展示了这种资源分配的不同方式,为网络通信提供了多样性和可定制性。总线通过持续发射物理层的 Frame 来控制 and 部署整个网络的通信节奏和通信资源规划。如图 3 所示,每个 Frame 内部由一系列连续的符号组成,总共有 64 个,被称为 Symbol。这些 Symbol 不仅代表时隙关系,同时包含了本时隙内的最大数据承载量,是通信资源最小分配单位。Frame 内部也有系统专用的 Symbol 通信资源,蓝色 Symbol 为系统占用部分,绿色 Symbol 为用户可配置的部分。

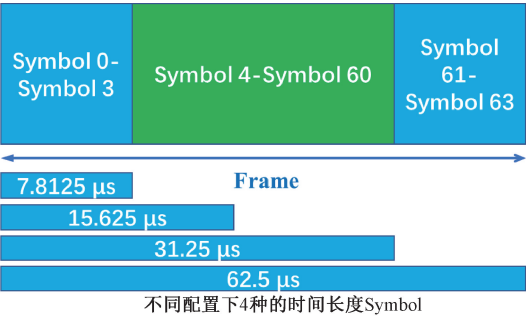


图 3 时隙资源分配示意图
Fig. 3 Schematic diagram of time slot resource allocation

AUTOBUS 总线时间同步机制如图 4 所示,在基于全网固定时钟节拍的同步总线中,CN 节点通过发送 Symbol 时

刻(总线媒体访问控制产生 Symbol 中断)的 AUTOBUS 总线时间以及发送时刻 CCP 的时间计数,计算当前 Symbol 时刻与协调世界时间(universal time coordinated,UTC)的差值如下:

$$d_{ccp} = UTC_{pps} - ccp_{symbol} \tag{1}$$

其中, d_{ccp} 表示在 1PPS 时刻 UTC 时间 UTC_{pps} 与发送信号帧 Symbol 时间 ccp_{symbol} 的差值,这个时间差与 Symbol 时刻的 AUTOBUS 时间呈正比关系。为了更好地同步时间,系统会创建一个 UTC 时间与 AUTOBUS 时间的对应表,并根据这个表修正 AUTOBUS 总线的时间,最终全网广播发送。

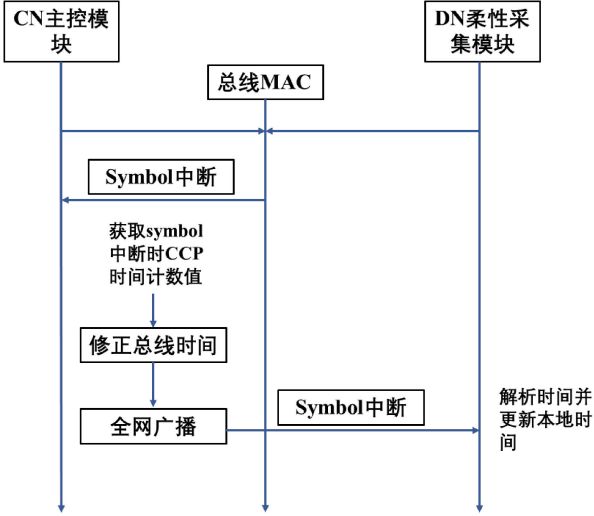


图 4 AUTOBUS 总线时间同步机制
Fig. 4 AUTOBUS time synchronization mechanism

由于总线具有固定的发送时间周期,DN 节点通过接收 Symbol 时刻(总线媒体访问控制产生 Symbol 中断)的 AUTOBUS 总线时间,即可以计算出接收到的 UTC 时间,计算公式如下:

$$UTC_{DN} = AB_time_1 - AB_time_2 - d_{ccp} + UTC_{pps} \tag{2}$$

其中, UTC_{DN} 表示 DN 节点的 UTC 时间, AB_time_1 表示 DN 接收到信号帧的总线时间,而 AB_time_2 表示 CN 发送信号帧的总线时间。通过这两个时间值的比较,DN 节点能够准确计算出接收到的 UTC 时间,实现了 AUTOBUS 总线内全网节点设备的时间同步。

综上所述,通过 1PPS、TOD 及 AUTOBUS 总线对表算法,系统能够有效地实现全网节点设备的时间同步,确保各个节点在相同的时间基准上进行协同操作。这种同步机制对于需要精确时间控制的机载测试十分重要。

3 测试数据的同步采集

同步采集算法的目标是在时间同步的基础上确保所有节点在同一时刻进行数据采集。全网协同事件的发生是基

于固定发送时间周期的 AUTBUS 总线,通过这个周期,全网可以生成相同的总线时刻,从而促使各节点在同一时刻共同处理特定事件。这种协同事件的流程如图 5 所示,在网络内的不同时刻(T_1, T_2, T_3)等,各节点会产生一个全网协同事件。

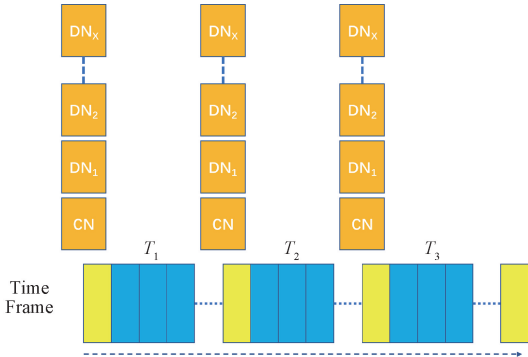


图 5 基于 AUTBUS 总线的全网协同数据采集

Fig. 5 Collaborative network-wide data acquisition based on the AUTBUS bus

数据采集的过程需要通过模数转换(analog-to-digital conversion, ADC)电路完成。在柔性采集模块中采用的是—种可以通过外部触发实现采集同步的 ADC,并实现各个 ADC 之间的同步。由于 IO 信号的传输延迟低,可以忽略不计。如图 6 所示,在 AUTBUS 总线全网节点设备中,可以通过以下方法实现无线柔性分布式采集系统的采集同步:首先在全网协同事件发生时刻,通过同步(synchronous, SYNC)引脚触发 ADC 启动数据转换,从而实现采集同步,随后读取本次数据转换数据并记录触发时刻的时间,对采集数据打上本次采集时刻的时戳标记。

如图 7(a)所示是机载无线柔性测试系统中的数据采集部分,由应变片传感器、铂电阻传感器、柔性采集模块(从左至右为 1~8 号)、主控模块(橙色)组成。数据采集的同步精度采用图 7(b)中的 Tektronix 示波器进行测试,柔性采集模块输出的 1PPS 信号(黄色曲线)与控制模块输入端的 1PPS 信号(蓝色曲线)存在一定的延时,该延时即为同步精度。从测试结果中可以看出:蓝色脉冲曲线的上升沿与黄色脉冲曲线的上升沿之间存在延时,此时的柔性采集模块与控制模块的同步精度 297.6 ns。

表 1 与 2 分别为不同应变、温度采集模块与控制模块的同步精度的测量结果。8 个应变模块与温度模块分别进行了编号,随后对每个模块进行了 4 次同步精度测试,并计算了平均同步精度。

如图 8 所示,为不同柔性采集模块与控制模块的同步精度测试结果,对于应变采集模块与温度采集模块,其最低的同步精度分别为 650.1 ns 与 822.5 ns,最高的同步精度分别为 59.2 ns 与 411 ns。主控模块与采集模块之间具有不同的同步精度,主要是由于底层 ADC 模块的性能略微不同所导致。此外,根据 AUTBUS 总线国际标准(IEC 61158

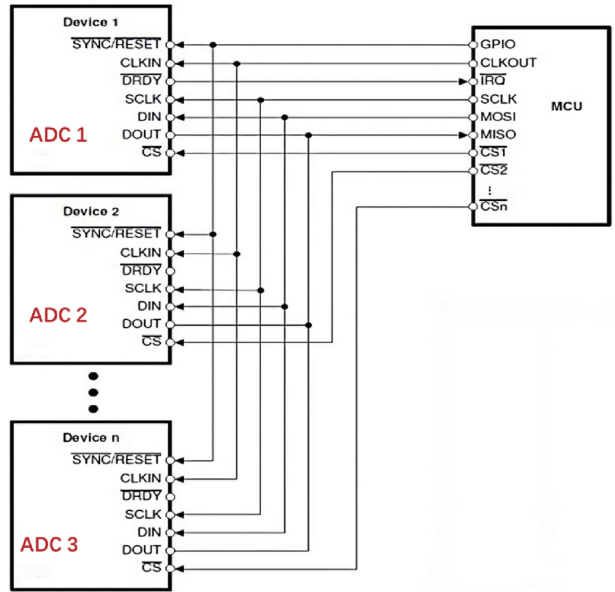
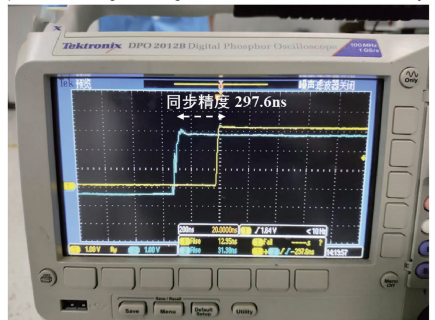


图 6 柔性采集模块中的 ADC 连接方式

Fig. 6 ADC connection in the flexible acquisition module



(a) 无线柔性测试系统中的数据采集部分
(a) The data acquisition part in the wireless flexure test system



(b) 柔性采集模块与控制模块的同步精度
(b) Synchronization accuracy of the flexure acquisition module with the control module

图 7 无线柔性测试系统中的数据采集部分与柔性采集模块与控制模块的同步精度

Fig. 7 The synchronization accuracy of the data acquisition part and the flexible acquisition module and the control module in the wireless flexible test system

Type 28, IEC 61784 CPF22),可知该总线自身的延时在 100 ns 的范围内,对同步精度也会造成影响。因此,根据测试结果可知,机载无线无线柔性测试系统的同步数据采集

表 1 应变模块同步精度测量结果

Table 1 Strain module synchronization accuracy

measurement results					
应变模块 设备编号	与控制模块同步精度 (测试 4 组数据)/ns				平均同步 精度/ns
1	587.6	611.5	621.8	615.7	609.2
2	248.6	240.3	235.5	233.2	239.4
3	280.6	287.5	293.5	276.8	284.6
4	169.5	181.1	171.3	171.6	173.4
5	653.5	676.3	604.8	665.8	650.1
6	150.3	145.9	123.1	145.9	141.3
7	63.9	62.8	66.4	58.5	62.9
8	60.0	62.3	58.5	55.9	59.2

表 2 温度模块同步精度测量结果

Table 2 Measurement results of synchronization accuracy
of temperature module

温度模块 设备编号	与控制模块同步精度 (测试 4 组数据)/ns				平均同步 精度/ns
1	799.3	810.3	848.7	831.6	822.5
2	475.6	490.3	499.5	461.2	481.7
3	420.5	431.8	431.4	453.0	434.2
4	636.9	636.5	603.4	658.2	633.8
5	574.4	582.0	581.3	576.7	578.6
6	416.2	390.2	387.6	450.1	411.0
7	500.9	546.7	564.8	521.3	533.4
8	451.6	431.2	457.4	442.1	445.6

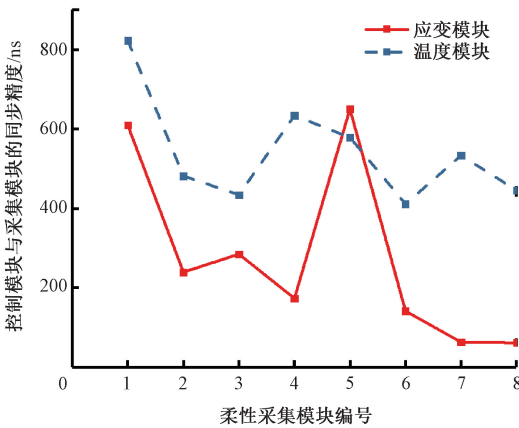


图 8 不同柔性采集模块与控制模块的同步精度测试结果

Fig.8 Synchronization accuracy test results of different
flexible acquisition modules and control modules

精度最低为 822.5 ns,满足机载无线柔性测试系统研制的要求($\leq 1\ \mu\text{s}$)。

4 结 论

本文研究了机载无线柔性分布式测试系统的同步数据采集技术。系统核心包括 GPS 定位数据采集器、机载无线高速主控单元、无线时间同步终端以及分布式数据采集系统。分布式数据采集系统采用高带宽的 AUSBUS 总线,为系统通信提供了可靠的基础。通过运用资源分配机制,使得系统能够根据通信需求和网络负载的变化进行动态调整,确保通信保持高效和稳定。全网时间同步算法基于固定时钟节拍的 AUSBUS 总线、1PPS 与 TOD 信号,使各节点能够在相同时间基准上协同操作。测试数据同步采集则通过外部触发的 ADC 在全网协同事件的时刻实现了各节点的数据同步采集,为试飞测试提供了准确的数据支持。测试结果表明,机载无线柔性分布式测试系统的同步数据采集精度符合系统研制的要求,为航空领域的测试与测量技术提供了有益的探索和创新。

参考文献

[1] 李卢丹,姜宏伟,蒋红娜. 基于 TDLAS 的飞机燃油箱氧浓度测试技术研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(7):187-191.
LI L D, JIANG H W, JIANG H N. Research on aircraft fuel tank oxygen concentration testing technology based on TDLAS [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(7):187-191.

[2] KUEHME D, ALLEY N R, PHILLIPS C, et al. Flight test evaluation and system identification of the Area-I Prototype-Technology-Evaluation Research Aircraft (PTERA) [C]. AIAA Flight Testing Conference, 2014: 2577.

[3] 赵忠良,吴军强,李浩,等. 2.4 m 跨声速风洞虚拟飞行试验技术研究[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 504-512.
ZHAO ZH L, WU J Q, LI H, et al. Research on virtual flight test technology of 2.4 m transonic wind tunnel[J]. Journal of Aeronautics, 2016, 37(2): 504-512.

[4] 刘涛,冯灿,陈家益. 民机试飞测试数据处理分析软件设计开发[J]. 民用飞机设计与研究, 2023(1): 115-121.
LIU T, FENG C, CHEN J Y. Design and development of data processing and analysis software for civil aircraft test flight[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(1):115-121.

[5] 王加熙,刘涛,冯灿,等. 基于超高速线程并行处理技术的民机试飞数据预处理系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2023.07.034.
WANG J X, LIU T, FENG C, et al. Design of civil

- aircraft test flight data preprocessing system based on ultra-high speed thread parallel processing technology[J]. Computer Measurement and Control, 2023, 3, DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2023.07.034.
- [6] 杨志刚, 张炯, 李博, 等. 民用飞机智能飞行技术综述[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 525198.
- YANG ZH G, ZHANG J, LI B, et al. A review of intelligent flight technology for civil aircraft [J]. Journal of Aeronautics, 2021, 42 (4): 525198.
- [7] 刘明, 马亚平, 李宏. 智能化机载测试系统关键技术综述[J]. 中国测试, 2018, 44(7): 6.
- LIU M, MA Y P, LI H. A review of key technologies for intelligent airborne test system[J]. China Test, 2018, 44(7): 6.
- [8] ALLRED J, HASAN A B, PANICHSAKUL S, et al. Sensorflock: An airborne wireless sensor network of micro-air vehicles [C]. Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2007: 117-129.
- [9] HAO Y, LI S, ZHANG T, et al. Research on synchronized data acquisition system based on distributed clock[J]. Mobile Information Systems, 2022.
- [10] COVIELLO G, AVITABILE G, FLORIO A. The importance of data synchronization in multiboard acquisition systems[C]. 2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), IEEE, 2020, 293-297.
- [11] FLAMMINI A, FERRARI P. Clock synchronization of distributed, real-time, industrial data acquisition systems[J]. Data Acquisition, 2010: 41-62, DOI:10.5772/10458.
- [12] 李彩华, 滕云田, 周健超, 等. 分布式地震数据采集器的高精度时间同步系统研制[J]. 地震学报, 2022, 44(6):1111-1120.
- LI C H, TENG Y T, ZHOU J CH, et al. Development of a high-precision time synchronization system for distributed seismic data collectors [J]. Journal of Seismology, 2022, 44(6):1111-1120.
- [13] 李滚, 牛梦洁, 柴阳顺, 等. 分布式系统中的时钟同步新方法[J]. 天文学报, 2016, 57(2): 196-210.
- LI G, NIU M J, CHAI Y SH, et al. A new approach to clock synchronization in distributed systems[J]. The Astronomical Journal, 2016, 57(2): 196-210.
- [14] 宋俊男, 朱世强, 原崧育. 地外探测设备多传感器硬件时间同步方法研究[J]. 空间控制技术与应用, 2022, 47(6): 19-26.
- SONG J N, ZHU SH Q, YUAN S Y. Research on multi-sensor hardware time synchronization method for extraterrestrial exploration equipment [J]. Space Control Technology and Applications, 2022, 47(6): 19-26.
- [15] 高宁, 李杰, 胡陈君, 等. 弹载 SINS/GPS 组合导航系统数据采集与同步设计[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2020, 41(1): 55-59.
- GAO N, LI J, HU CH J, et al. Design of data acquisition and synchronization for combinational navigation system with SINS/GPS [J]. Journal of North Central University: Natural Science Edition, 2020, 41(1): 55-59.
- [16] PETHIG F, KROLL B, NIGGEMANN O, et al. A generic synchronized data acquisition solution for distributed automation systems [C]. Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012), IEEE, 2012: 1-8.
- [17] XUAN M, YU F, FAN Q. Research of distributed acquisition system based on clock synchronization[C]. International Conference on Sensors and Instruments (ICSI 2021), SPIE, 2021, 11887: 476-481.
- [18] 杨壮涛, 朱纪洪, 刘兆沛, 等. 浅议无人车探测多通道数据同步采集系统[J]. 中国设备工程, 2022, (12): 29-32.
- YANG ZH T, ZHU J H, LIU ZH P, et al. Synchronized multi-channel data acquisition system for unmanned vehicle detection [J]. China Equipment Engineering, 2022, (12):29-32.
- [19] SCHWARTZ M L, ALADIN V M, RYZHKOV A V. Perspective equipment of primary reference time and clock for synchronization systems[C]. 2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), IEEE, 2022: 1-6.
- [20] 刘畅, 姜超, 柯明明. 一种提高 PON 系统时间同步精度的硬件架构[J]. 电子设计工程, 2021, 29(20): 189-193.
- LIU CH, JIANG CH, KE M M. A hardware architecture for improving time synchronization accuracy in PON systems [J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(20):189-193.

作者简介

李铁林, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行试验机载测试及传感器技术。