

面向航空智能制造的边缘计算 光交换技术研究



赵俊^{1,2}, 吴宝锋², 徐盛果³, 孙小茵¹

1. 东南大学, 江苏 南京 210096

2. 南京曦光信息科技研究院有限公司, 江苏 南京 210012

3. 长园深瑞继保自动化有限公司, 江苏 南京 210000

摘要:面向航空智能制造大批量数据采集与传递的实时性要求,提出一种基于异步光分组交换(optical packet switching, OPS)技术的具有多级管理能力的边缘计算系统方案,满足多源、海量、易构、分布式数据的实时采集、安全交互及预测性分析需求。提出一种基于循环光纤延时线(Rec-fiber delay lines, FDL)全光分组冲突解决机制,建立了系统的稳定性与时延分析模型,并完成仿真分析。结果表明,对于边缘计算节点规模为16385的系统,Rec-FDL冲突解决机制的分组平均最长等待时间为7.63ns,而传统数据重传(PRA)机制的时间为16.85ns。因此,Rec-FDL冲突解决机制能够在交换节点内部进行数据冲突的本地解决,它可避免PRA机制带来的路径时延,同时更有利于系统的扩展。

关键词:智能制造; 边缘计算; 光分组交换; 稳定性; 时延

中图分类号: TP399

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.07.011

航空智能制造是引领智能制造工业化发展的重要产业,是推动工业转型升级的引擎^[1-2]。智能制造从宏观上将推动传统的标准化、大批量、刚性、缓慢的生产模式向个性化、高度柔性化、快速响应市场需求的生产模式转变,在微观上,将通过数字化、网络化、自动化和智能化的制造装备与系统集成,实现产品研制过程的全闭环控制。

随着航空智能制造过程中设备数量的迅速增加及海量数据的爆炸式增长,以云计算模型为核心的集中式大数据处理技术已经不能高效处理边缘设备所产生的数据,主要表现在从设备传输海量数据到集中式数据中心致使网络传输带宽的负载量急剧增加,造成较长的网络延迟^[3]。为此,以边缘计算模型为核心的面向网络边缘设备所产生海量数据计算的边缘式大数据处理应运而生,其与现有以云计算模型为核心的集中式大数据处理相结合,可较好地解决航空智能制造大数据处理中所存在的诸多问题^[4-6]。因此,如何构建航空智能制造场景下,适于海量、突发、易构、分布式业务特性,以及具备实时数据采集、传输、存储、分析能力的

边缘计算系统及网络架构,成为需要解决的重中之重。

以传统铜线或无线传输为基础的数据传输链路的带宽及其能够承受的信号处理比特率已不能满足目前高速、大容量数据交互的需求。在互联网应用趋于宽带化的今天,光纤通信网络发挥着越来越重要的作用,更适用于海量及时延敏感类业务^[7]。光互连方式从光交换的角度来看主要可以分为光线路交换(OCS)^[8]、光突发交换(OBS)^[9-10]和光分组交换(OPS)^[11]。

OCS技术的静态及粗粒度特性降低了端口和链路的利用率,不能满足用户突发数据交换需求。采用OBS技术将数据组装成突发包进行传输,既可满足较大文件的传输对较高吞吐量的需求,又可满足较小命令的传输对较低时延的需求。但突发的组装会引入较大的突发装配时延,不能满足低时延的实时传输需求。

OPS技术具有容量大、交换灵活、速率和格式透明、粒度细、可配置、资源利用率高等特点,将OPS技术与波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)技术相结合,可

收稿日期: 2021-01-15; 退修日期: 2021-04-15; 录用日期: 2021-05-20

基金项目: 航空科学基金(2019ZH069003)

引用格式: Zhao Jun, Wu Baofeng, Xu Shengguo, et al. Research on optical switching technology for aeronautical intelligent manufacturing edge computing[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(07): 73-78. 赵俊, 吴宝锋, 徐盛果, 等. 面向航空智能制造的边缘计算光交换技术研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(07): 73-78.

实现网络交换容量与传输容量的匹配,已成为下一带光网络实时、突发业务处理的核心技术。其中,异步 OPS 可以更灵活地满足随机突发业务的交换及处理需求。

基于此,本文面向航空智能制造等工业互联网大批量数据采集与传递的实时性要求,提出一种基于异步 OPS 技术的具有多级管理能力的分布式边缘计算系统方案,满足多源、海量、易构、分布式数据的实时采集、安全交互及预测性分析需求。针对航空智能制造低时延数据交互要求,提出一种就地化全光分组冲突解决机制,建立了系统的稳定性与时延分析模型,完成仿真分析。

1 基于异步 OPS 的航空智能制造系统方案

1.1 系统架构

图 1 为提出的基于异步 OPS 的航空智能制造系统总体方案,由感知层、边缘层及应用层三层构成。

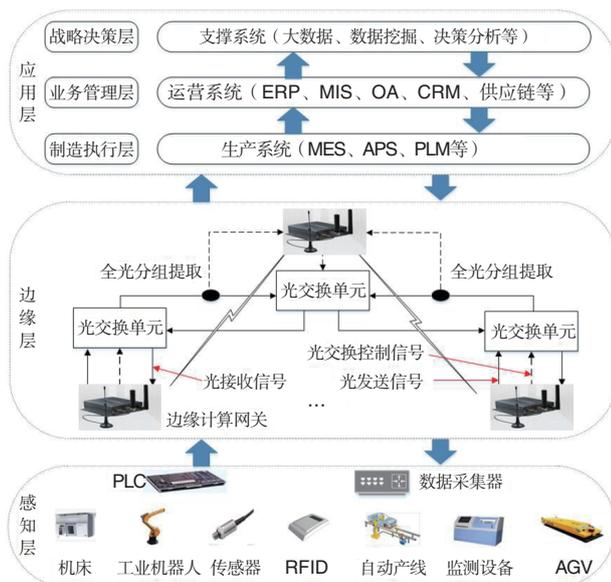


图 1 基于异步 OPS 的航空智能制造系统架构

Fig.1 Architecture of aviation intelligent manufacturing system based on asynchronous OPS

感知层由各种航空工业现场设备、产品、物料,以及能够实时获取设备数据的传感器及数据收集器组成。整个感知层具有执行反馈功能,除了上传感知数据,还需要响应上层下达的各种控制指令。

边缘层由边缘计算网关(ECN)和光交换单元(OSU)组成,面向航空制造设备的分布式、异构特点,可提供本地化管理和实时分析、处理能力,能满足更灵活、广泛的设备接入需求,支持航空智能制造应用快速开发,提供云计算中心无法有

效提供的低延时、位置感知及物联网安全策略。基于异步 OPS 的分布式边缘计算光交换网络,具备能够满足异步、变长分组突发交互需求的就地化全光冲突解决能力,以减小数据传输时延,提高系统资源的利用率。

应用层面向业务需求,整合边缘层各类资源数据与数据分析结果,全面感知生产过程要素,提供生产运营监控,工艺加工可视化分析,设备健康分析,生产排产优化,工艺及车间综合优化等功能,其与边缘层协同配合,可实现系统计算资源的动态协调和优化分配,满足全局性大数据处理及业务决策需求,进而最大化边缘计算和云计算的应用价值。

1.2 基于异步 OPS 的分布式边缘计算系统

本文提出的边缘计算系统采用全光、可扩展的分布式管理方案。各级边缘计算节点间采用密集波分复用(DWDM)技术互联,高速、突发业务以异步方式随机发送,可减小业务交换时延,避免大批量边缘计算节点互连时的同步困难。

图 2 为基于异步 OPS 及 DWDM 技术的分布式边缘计算系统架构。边缘计算主节点(ECN-M)带有 n 组边缘计算从节点(ECN-S),每组边缘计算从节点由 m 个 ECN 组成,因此,两级系统可实现 $n \times m + 1$ 个 ECN 的互联。

ECN 的光收发模块将组装好的数据包转换成光分组,每组边缘计算从节点的数据分别由波长 λ_1 到 λ_m 信号承载,并通过阵列波导光栅(AWG)复用。ECN-M 下行的数据则由波长 λ_{m+1} 信号承载。

OSU 单元由环形器、 $1 \times m$ 光分路器、可调谐光纤布拉格光栅(TFBG)及可调谐滤波器(TF)组成。光分组头提取模块(HEM)用于将光分组标签信息从光分组当中提取出来,并送往 ECN 进行处理,ECN 根据标签信息产生控制信号,控制 TF 的滤波状态,进而将某个光分组选择出来,并送往一个或多个目的地,实现光组播。如果该从节点没有相应的目的地,或没有足够的可用资源,从节点的 ECN 则通过调节 TFBG 的反射波长,将分组经过 Circulator 交换到主节点,然后,主节点的 ECN 则根据系统中各个从节点的资源情况,将收到的分组下发到别的从节点。

1.3 Rec-FDL 冲突解决方案

数据以异步、变长分组形式在节点处实现交换,相对于同步交换模式具有相对较大的冲突概率。常规基于重传的数据冲突解决机制会增加管理的复杂性,增大分布式系统的数据交换时延。

本文提出一种基于 Rec-FDL 的就地化全光数据冲突解决方案,如图 3 所示,由光耦合器、TF、AWG 及光纤延时线组成。

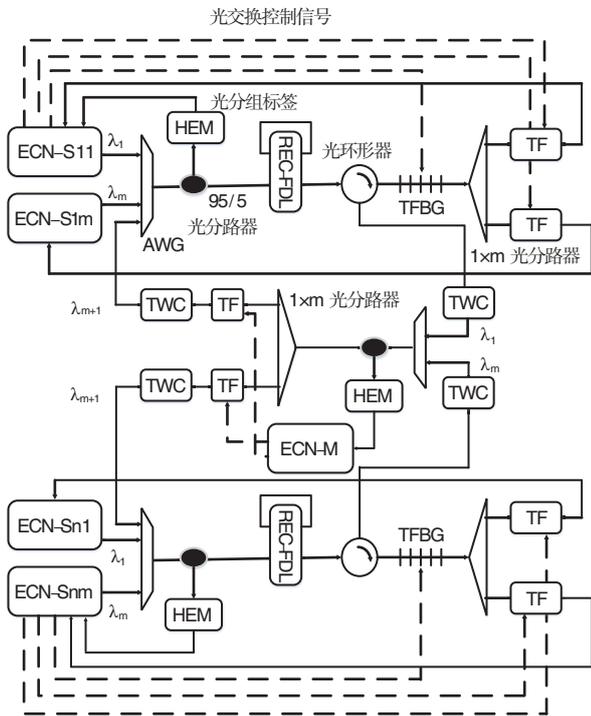


图2 基于异步OPS及DWDM技术的分布式边缘计算系统
Fig.2 Distributed edge computing system based on asynchronous ops and DWDM Technology

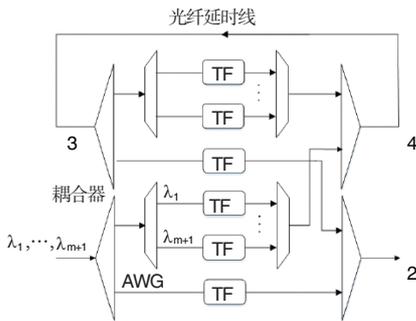


图3 Rec-FDL系统架构
Fig.3 Rec-FDL system architecture

Rec-FDL的1端口由Coupler分成两部分,其中一部分经过TF与2端口连接,另一部分经过一个多波长选择模块与4端口连接。其中,多波长选择模块由两个AWG分别完成复用及解复用功能,TF则完成波长选择功能。3端口同样经过多波长选择模块与TF单元分别与4端口及2端口相连。

如果没有冲突,分组可经过1→2链路送往2端口。而如果同时有多个数据选择同一个目标端口,ECN则根据各个分组的优先级别产生控制信号控制TF的滤波状态。优先级别最高的分组送往端口2,而优先级别低的冲突分组送往端口4,进而在FDL中循环,并按照固定的周期释放出来。

2 系统分析模型

2.1 稳定性分析模型

若在光收发模块接收时间 t 内产生 j 个分组,则冲突分组在Rec-FDL中的最长等待时延 $T_d=jt$ 。 T 表示一个冲突分组在Rec-FDL中循环一圈所需要的时间, T' 表示前一个 T 时间段内最后一个冲突分组进入Rec-FDL以后,在随后的 T 时间内,可能产生新的分组的时间段。若 T' 时间段内产生分组,则 T_d 会发生变化,变化量的平均值为:

$$E(T') = -\left(1 - \frac{1 - e^{-\lambda T}}{m+1}\right)^{m+1} t + \sum_{i=1}^{m+1} \binom{m+1}{i} \left(\frac{1 - e^{-\lambda T'}}{m+1}\right)^i \left(1 - \frac{1 - e^{-\lambda T'}}{m+1}\right)^{m+1-i} \quad (1)$$

式中: λ 为分组的到达率。只有当 T_d 不断减小,系统才能够保持稳定。因此,该分布式边缘计算系统的稳定性条件为 $E(T') < 0$ 。

2.2 时延分析模型

设 T_d 减小为0所需时间为 $T_{FDL}(j)$ 。则分组在Rec-FDL中的平均最长等待时间为:

$$T_D = \sum_{j=1}^{\infty} P(j) T_{FDL}(j) \quad (2)$$

式中: $P(j)$ 为分组接收时间 t_{rec} 内,同时到达 j 个业务的概率,如式(3)所示:

$$P(j) = \binom{m+1}{j+1} \left(\frac{1 - e^{-\lambda t_{rec}}}{m+1}\right)^{j+1} \left(1 - \frac{1 - e^{-\lambda t_{rec}}}{m+1}\right)^{m-j} \quad (3)$$

$T_{FDL}(j)$ 计算流程图如图4所示。每经过一个 T 时间, T_d 减小量为 $E(T)$,则 T_d 减小为0所需的时间 $T_{FDL}(j)$ 为各个 T 的总和。

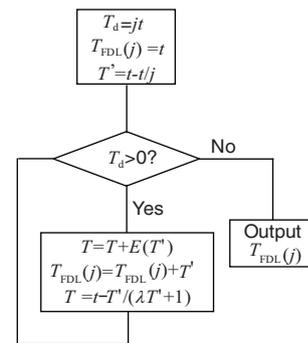


图4 $T_{FDL}(j)$ 计算流程图
Fig.4 $T_{FDL}(j)$ calculation flow chart

3 仿真分析

针对Rec-FDL冲突解决机制仿真分析分布式边缘计算系统的阻塞率、稳定性和时延特性。仿真参数取 $m=64$, $t=51.2ns$ 。图5为采用Rec-FDL方案解决分组冲突时,系统稳定

性随 λ 变化示意图。 $E(T) < 0$ 时,其绝对值越大,分组最长等待时延减小的越快,系统越稳定。由于 λ 越大,同时到达光收发模块的分组越多,阻塞可能性增大,所以稳定性随 λ 的增大而降低。为保证系统稳定, λ 的最大取值为 $30 \times 10^6 \text{packets/s}$ 。

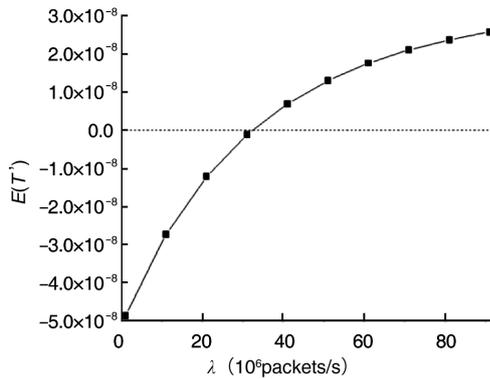


图5 系统稳定性随 λ 变化示意图
Fig.5 System stability changing with λ

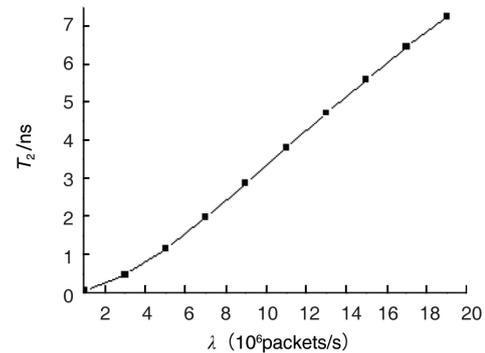
图6分析了Rec-FDL冲突解决机制的时延特性。 T_D 会随着 λ 的增大而增大,当 λ 从 $1 \times 10^6 \text{packets/s}$ 增加到 $20 \times 10^6 \text{packets/s}$ 时, T_D 由 0.06ns 增加到 7.24ns 。图6(b)分析了系统规模对分组等待时延的影响。可以看出,在 $\lambda = 20 \times 10^6 \text{packets/s}$ 时,当系统规模由 $5 (m=2)$ 个ECN增加到 $16385 (m=128)$ 个ECN时, T_D 的增量仅为 1.3ns 。

图7为PRA冲突解决机制的时延(T_{D2})分析。由图7(a)可以看出,当 $\lambda = 20 \times 10^6 \text{packets/s}$,在 $D=0$ 时, T_{D2} 为 8.0ns ,而当 D 增至 $20m$ 时, T_{D2} 增加至 39.5ns 。从图7(b)可以看出,当系统规模由 $5 (m=2)$ 个ECN增加到 $16385 (m=128)$ 个ECN时,分组等待时延 T_{D2} 的增量为 3.9ns 。

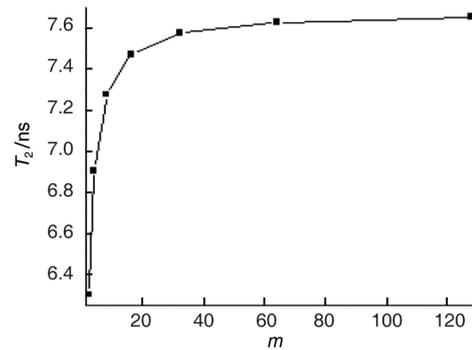
采用PRA算法,ECN优先交换级别最高的分组,并将级别较低的冲突分组进行异步重传。如果一个分组被成功接收,目的节点将向源节点发送确认信号,于是,源节点发送新分组。显然,PRA冲突解决机制需要在系统中发送确认信号及进行旧分组的重传,会带来额外的路径时延。而Rec-FDL冲突解决机制能够在交换节点内部进行就地化冲突解决,因此,它具有更低的数据交换时延,同时更有利于系统的扩展。

4 试验测试

搭建了 2×2 异步OPS系统单节点示范试验平台,验证了基于异步OPS技术边缘计算系统的可行性。其中,ECN带有光口和5G接口,支持PLC采集,适配主流数控系统,满足航空智能制造应用需求。采用“10001”和“10100”分组脉冲序列(见图8)进行了异步分组交换测试。



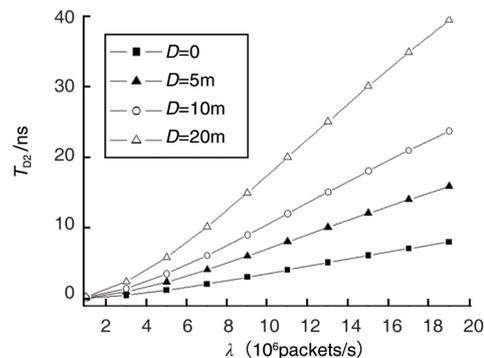
(a) λ 对Rec-FDL时延影响



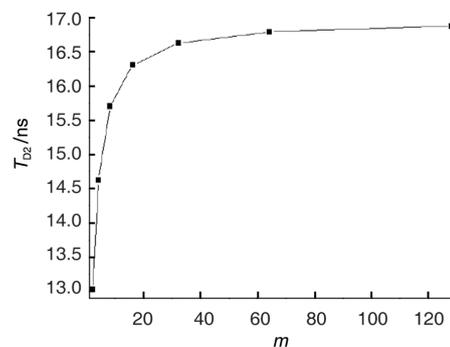
(b) m 对Rec-FDL时延影响

图6 Rec-FDL机制时延分析

Fig.6 Delay analysis of Rec-FDL mechanism



(a) λ 对PRA时延影响



(b) m 对PRA时延影响

图7 PRA冲突解决机制的时延分析

Fig.7 Delay analysis of PRA mechanism

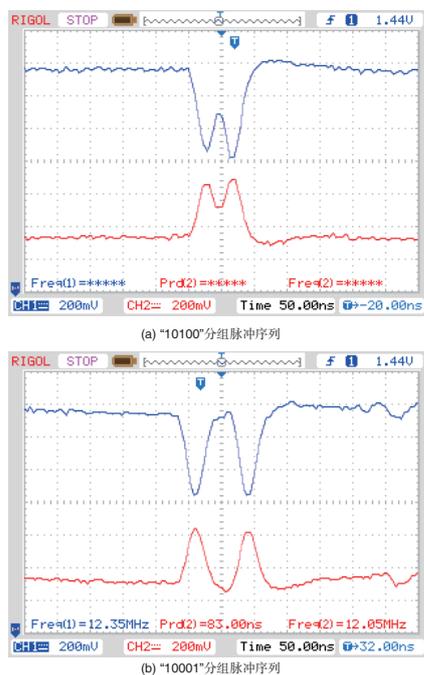


图8 光分组脉冲序列(蓝、红色为一对差分信号)
Fig.8 Optical packet pulse sequence (blue and red are a pair of differential signals)

图9为光分组异步交换测试结果。ECN接收光分组头信息后进行计算分析,并产生控制信号,控制系统的交换状态。在控制信号的上升沿,系统为直通态传输,在下降沿,为交叉态传输。试验结果表明,在ECN的控制下,光分组能够被正确地交换至其目的节点,验证了基于异步OPS的分布式边缘计算系统的可行性。

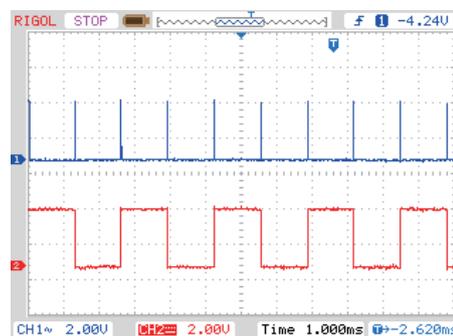
5 结束语

面向航空智能制造大批量数据采集与传递的实时性要求,本文提出一种基于异步OPS技术的具有多级管理能力的边缘计算系统方案,满足多源、海量、易构、分布式数据的实时采集需求。提出一种基于Rec-FDL的全光分组冲突解决机制,建立了系统的稳定性与时延分析模型,并完成仿真分析。结果表明,Rec-FDL冲突解决机制能够在交换节点内部进行就地化冲突解决,因此具有更低的交换时延,更有利于系统的扩展。

AST

参考文献

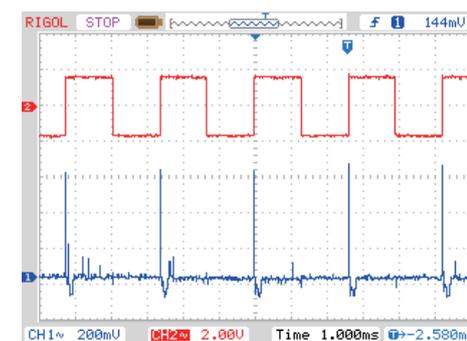
- [1] 单继东,曹增义,王昭阳.航空发动机制造企业智能工厂建设[J].航空制造技术,2018,61(15):70-77.
Shan Jidong, Cao Zengyi, Wang Zhaoyang. Smart factory construction research of aero-engine manufacturing enterprises



(a) 光分组序列(上)及产生的控制信号(下)



(b) 控制信号(上)及系统交叉态端口输出(下)



(c) 控制信号(上)及系统直通态端口输出(下)

图9 光分组交换测试结果

Fig.9 Test results of optical packet switching

- [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(15): 70-77. (in Chinese)
- [2] 向恒. 浅析智能制造在航空航天制造业的应用[J]. 智能制造, 2018(6): 40-42.
Xiang Heng. Application of intelligent manufacturing in aerospace manufacturing industry[J]. Intelligent Manufacturing, 2018(6): 40-42. (in Chinese)
- [3] 姚立权. 智能化控制系统在航空制造中的应用[J]. 现代工业经济和信息化, 2020, 10(6): 79-80.
Yao Liquan. Application of intelligent control system in

- aviation manufacturing [J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2020, 10(6):79-80. (in Chinese)
- [4] 邹宁, 王淑芳, 杜圣超. 飞机研制中的产品数据管理研究[J]. *航空科学技术*, 2017, 28(2):43-48.
- Zou Ning, Wang Shufang, Du Shengchao. Research on product data management in aircraft development[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2017, 28(2):43-48. (in Chinese)
- [5] 曲昌琦, 周锐, 杜宝隆, 等. 航空装备故障预测与健康管理的数据库体系研究[J]. *航空科学技术*, 2020, 31(12):61-67.
- Qu Changqi, Zhou Rui, Du Baolong, et al. Research on PHM data system architecture for aviation equipment[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(12):61-67. (in Chinese)
- [6] El A A, Largo S, Kaissari S, et al. Machine learning-based edge-computing on a multi-level architecture of WSN and IoT for real-time fall detection[J]. *IET Wireless Sensor Systems*, 2020, 10(6): 320-332.
- [7] 王世奎, 焦龙, 邓发俊. 机载波分多路复用光网络研究与设计[J]. *航空科学技术*, 2015, 26(7):83-87.
- Wang Shikui, Jiao Long, Deng Fajun. Study and design of the WDM optical network on board [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2015, 26(7):83-87. (in Chinese)
- [8] Luis R, Furukawa H, Rademacher G, et al. Demonstration of an SDM network testbed for joint spatial circuit and packet switching[J]. *Photonics*, 2018, 5(3):20.
- [9] Hasan M, Hasan K, Sattar A. Burst header packet flood detection in optical burst switching network using deep learning model[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 143: 970-977.
- [10] Garg A. Heuristic solutions related to challenges of optical burst switching paradigm[J]. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2019, 10(2):367-378.
- [11] Jun Z, Xiaohan S. An optical router with multistage management functions for asynchronous optical packet switching network[J]. *Journal of Photonic Network Communications*, 2011, 21(1):56-63.

Research on Optical Switching Technology for Aeronautical Intelligent Manufacturing Edge Computing

Zhao Jun^{1,2}, Wu Baofeng², Xu Shengguo³, Sun Xiaohan¹

1. Southeast University, Nanjing 210096, China

2. Nanjing Sunlight Information Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210012, China

3. Changyuan Shenrui Jibao Automation Co., Ltd., Nanjing 210000, China

Abstract: In order to meet the real-time requirements of large-scale data acquisition and transmission in aviation intelligent manufacturing, an edge computing system with multi-level management capability based on asynchronous Optical Packet Switching (OPS) technology is proposed to meet the requirements of real-time acquisition, security interaction and predictive analysis of multi-source, massive, easy to construct and distributed data. An all-optical packet conflict resolution mechanism based on recyclable optical fiber delay line (Rec-FDL) is proposed. The stability and delay analysis model of the system are established, and the simulation analysis is completed. The results show that the average longest packet waiting time of Rec-FDL conflict resolution mechanism is 7.63ns, while that of traditional data retransmission (PRA) mechanism is 16.85ns. Therefore, Rec-FDL conflict resolution mechanism can solve the data conflict locally within the exchange node, which can avoid the path delay caused by PRA mechanism, and is more conducive to the expansion of the system.

Key Words: intelligent manufacturing; edge computing; optical packet switching; stability; latency

Received: 2021-01-15; **Revised:** 2021-04-15; **Accepted:** 2021-05-20

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2019ZH069003)