

文章编号: 2097-1974(2026)01-0084-08

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20260111

# 新一代分布式箭载电气系统统一实时网络设计

施睿, 隗同坤, 刘箭言, 薛志超, 叶威  
(空间物理重点实验室, 北京, 100076)

**摘要:** 新一代箭载电气系统体系架构充分体现了分布式信息综合的特征, 可通过适当的统一实时网络设计实现箭载电气系统的物理分立、信息共享和资源动态分配, 减少跨域信息交互的影响, 提高系统组网的确定性、可靠性和容错能力。结合实时网络流控机制不同的实时保障能力, 对箭载综合电子系统信息传输需求进行分析, 进行了时间敏感流控机制选择, 实施了消息与流量类型的匹配, 通过路径和调度的联合优化完成了时间触发窗口的设计, 并利用OMNet++搭建网络仿真模型对网络系统的性能进行了仿真评价。通过仿真, 验证了典型箭载综合电子系统中所有流量与时间敏感网络流控机制的匹配关系, 展示了时间敏感网络在箭载综合电子系统中应用的可行性。

**关键词:** 分布式; 箭载电气系统; 时间敏感网络; 流控机制; 联合优化

中图分类号: V243.1; TN914

文献标识码: A

## Design of Unified Real-time Network for New Generation Distributed Rocket-borne Electrical System

SHI Rui, WEI Tongkun, LIU Jianyan, XUE Zhichao, YE Wei  
(Key Laboratory of Science and Technology on Space Physics, Beijing, 100076)

**Abstract:** The new generation of rocket-borne electrical system architecture fully embodies the characteristics of distributed information synthesis, which can realize the physical separation of rocket-borne electrical system, information sharing and dynamic resource allocation through appropriate unified real-time network design, reduce the impact of cross-domain information interaction, and improve the determinacy, reliability and fault-tolerant ability of system networking. Combined with the different real-time guarantee ability of real-time network flow control mechanisms, the information transmission requirements of rocket-borne integrated electronic system are analyzed, the time-sensitive flow control mechanisms are selected, the message and traffic type are matched, the time trigger window is designed through the joint optimization of path and scheduling, and the network simulation model is built using the OMNet++ to simulate and evaluate the performance of the network system. Through simulation, the matching relationship between all traffic and time-sensitive network flow control mechanisms in typical rocket-borne integrated electronic system are verified, and the feasibility of time-sensitive network application in rocket-borne integrated electronic system is demonstrated.

**Keywords:** distributed; rocket-borne electrical system; time sensitive networking; flow control mechanism; joint optimization

### 0 引言

机载航空电子系统的综合化技术经历了四代发展, 明确了分布式综合模块化的发展方向。分布式综合航电系统(Distributed Integrated Modular Avionics, DIMA)通过机载网络实现信息高度共享, 由不同电子设备和子系统分布式协作完成系统功能, 形成了基于域的航电系统综合实践。

为满足新一代火箭智能化高可靠大算力强实时控

制需求, 新一代箭载电气系统充分借鉴分布式综合模块化电子系统架构特点, 通过分布式异构高性能处理模块和全局组网实现箭载电气系统物理分立、信息共享和资源动态分配, 减少跨域信息交互的影响, 提高系统组网的确定性、可靠性和容错能力。

相较于总线式网络技术, 交换式网络技术增加了寻址和路由的灵活性, 避免了点对点通信造成的带宽限制, 是DIMA架构首选的组网方案。交换式网络技

术的具体运用主要涉及组网方案的制定、拓扑结构的设计、流控机制的选择、网络参数的配置,以及网络性能的分析 and 确认等工作。

本文将结合箭载电气系统网络需求,选择适当的流控机制,进行箭载电气系统统一实时网络设计,并通过仿真验证设计结果的合理性。

### 1 时间敏感网络流控机制分析

当前已经在综合电子系统中应用或者潜在可应用的交换式组网技术主要包括以太网、FC-AE、航空电子全双工交换式以太网、时间触发以太网(Time-Trig-

gered Ethernet, TTE)、时间敏感网络(Time-Sensitive Network, TSN)等。TTE和TSN凭借较高的可靠性、较强的时间确定性,以及对各类数据的共享传输策略,具备新一代箭载网络应用所需的基本条件。其中TTE的实时性最强,TSN使用方式更灵活,方便依据具体需求进行裁剪。

在TTE和TSN组网技术中,确定性和可靠性的关键在于流控机制。流控机制可实现不同类型流量高效低时延转发和共享传输。依据通信触发条件,可以将流控机制分为异步和同步两类,表1为流控机制的简要对比分析<sup>[1-2]</sup>。

表1 流控机制简要对比

Tab.1 Comparison of different flow control mechanisms

名称	核心算法	标准	机制	描述	时延	抖动	优缺点	应用
CBS	信用量整形算法	IEEE 802.1 Qav 时延敏感流的转发与排队	异步	通过信用量的增长和消耗规则,控制音视频流在一定带宽保障的前提下转发,并控制其突发度	大	较小	通过逻辑带宽提供较为稳定的消息传输,支持突发流量传输,但平均时延较大	突发流量有限,支持一定时延容忍的小规模网络,对简单音视频流数据传输提供较好的支持
SP	静态优先级调度算法	IEEE 802.1 Q 严格优先级	异步	按照优先级顺序进行调度转发	大	高优先级流的抖动较大	保障不同优先级流的服务质量,但优先级反转会大幅度增加延迟	优先级规定、无优先级反转的简单网络,对于消息传输的抖动无严格要求的网络
TAS	时间感知整形算法	IEEE 802.1 Qbv 流调度增强,时间感知整形	同步	优先级队列后增加门控阵列控制帧按照时间窗口调度输出	较小	小	通过时间隔离不同类流量的传输,但需要严格的时间同步	支持混合优先级传输,支持复杂配置和管理的大型网络
FP	帧抢占算法	IEEE 802.1 Qbu 帧抢占	异步	高优先级帧可以抢占正在传输的低优先级帧,但需要保证最小可抢占单元长度	高优先级流时延小	高优先级流抖动小	明显优于SP策略下的高优先级流的时延,但是低优先级消息的传输存在较大不确定性,如果考虑TAS的保护间隔的问题,FP策略有可能会对高低优先级消息传输都带来潜在的好处	存在优先级反转现象或具有截止期限特性的问题
CQF	循环排队与转发算法	IEEE 802.1 Qch 循环排队与转发	同步	以循环方式同步帧的传输	较小	小	可获得确定的网络时延,但需要考虑周期时间对齐的问题	对拥塞性能要求和实时性能要求较高的网络
ATS (UBS)	异步流整形算法	IEEE 802.1 Qcr	异步	按照优先级和合格时间对速率控制的帧进行调度输出	较小	较小	高效利用带宽,竞争导致因特网流时延性能下降	无需时间同步,混合流量负载的网络
RC-policing	速率约束整形-流量管制算法	ARINC 664 P7 航空电子全双工交换式以太网	异步	基于逻辑带宽约束的流量整形,附流量管制算法对异常流量进行进一步的约束	大	高优先级流的抖动较大	通过逻辑带宽提供源端较稳定的消息传输,但交换路径中缺乏进一步的整形机制,虽然提供流量管制算法对异常流量进行约束,但缺乏逻辑带宽的精细化调控机制	存在确定性传输需求,但对于消息传输的抖动无严格要求的网络
TT-TDMA	时间触发-时分复用算法	AS 6802 时间触发以太网	同步	基于全局时间同步,按照离线设计的时间触发窗口进行调度	较小	小	针对单独流的全局时间触发调度,确定性强,但是整网耦合性强,可扩展性一般,配置参数多且复杂	支持混合优先级传输,且需要高确定性消息传输保障的组网场景,需要具备拜占庭故障的时钟同步算法

由表1可以看出, TSN协议具有不同的流控机制且各具特点, 需要结合箭载电气系统的具体传输需求, 选择合适的TSN流控子协议及组合策略。流控机制的重点选择要素就是其实时性保障的能力, 以及基于实时性保障的性能优化的流量应用建议<sup>[3]</sup>。Zhao等<sup>[4]</sup>基于网络演算理论, 对大部分现有不同的流控机制及其可能的组合进行了延迟边界、积压边界以及抖动边界的性能比较, 可以看出: 信用量整形传输时延较大, 但抖动较小, 适应需要较大带宽同时具有一定时延容忍的流量传输; 时间感知TAS传输时延和抖动都较小, 通过时间隔离不同类流量的传输, 但需要严格的时间同步; 循环排队与转发传输时延和抖动也较小, 但需要考虑周期时间对齐的问题; 异步流整形ATS传输时延和抖动也较小, 可以高效利用带宽, 但竞争导致时间感知调度流时延性能下降。对于TTE网络中的流控机制, 速率约束传输延迟和抖动都较大, 可通过逻辑带宽提供源端较稳定的消息传输, 但是缺乏逻辑带宽的精细化处理; 时间触发对单独信息流进行全局时间触发调度, 确定性强, 但是可扩展性一般, 配置参数复杂。

## 2 电气系统需求分析

### 2.1 电气系统架构

参照DIMA架构, 新一代分布式箭载电气系统由处理器、传感器、受动器、交换机等组成。典型处理器为分布于箭体各级的通用处理平台, 是全箭或各级的运算处理中心, 负责实现传感器的信息融合和受动器的时序控制。

分布式箭载电气系统中典型的传感器包括综合射频设备、传感网络、导航接收机、惯导、星光敏感器、光学/雷达感知设备、摄像装置等, 主要布置于载荷舱。典型的受动器包括舵机控制器、火工品起爆器、配电器等, 通过大功率器件实现相应动作。处理器、传感器、受动器之间通过交换机级联实现系统组网。为实现处理器算力资源的分配与隔离, 实现全系统算力资源共享, 适应故障状态下的任务迁移, 提升全系统容错能力, 处理器和交换机采用冗余设计。图1展示了新一代箭载电气系统的典型架构, 箭载处理器、传感器和受动器通过交换机实现互联组网, 地面测发控系统、指挥通信系统和数据处理与存储系统通过统一网络与箭载电气系统互联组网, 实现一体化测发控管。

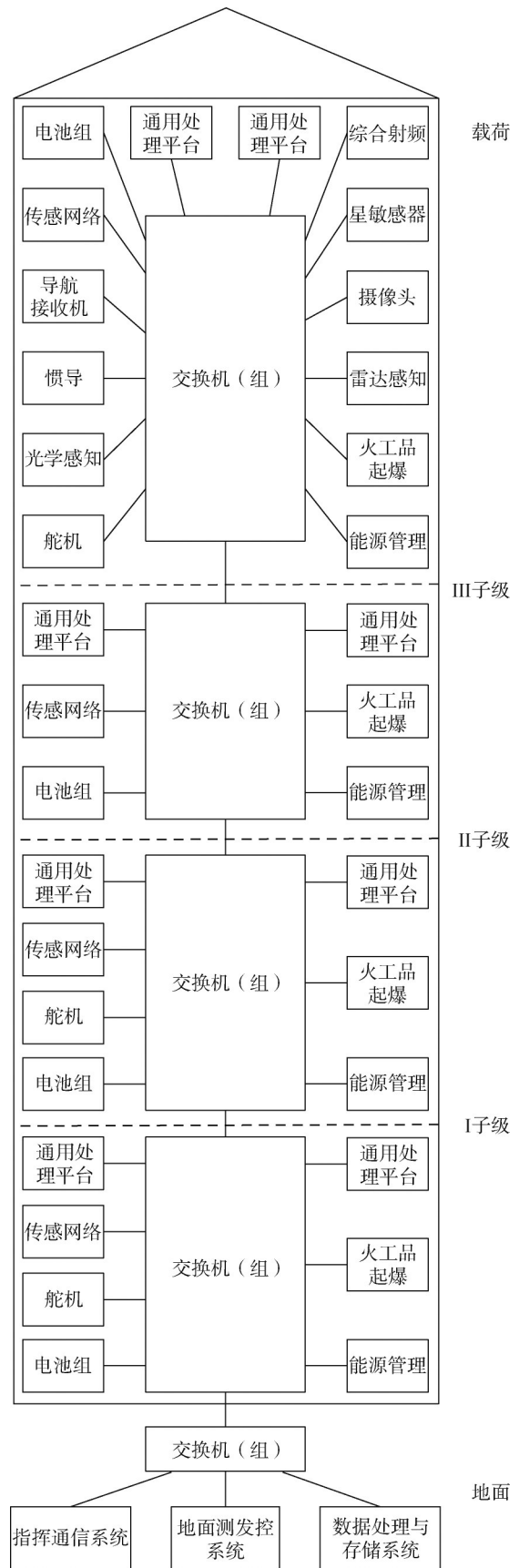


图1 典型箭载电气系统架构

Fig.1 Typical rocket-borne electrical system architecture

2.2 组网通信典型需求

组网通信的典型需求如下：

- a) 具有时间同步功能：时间同步是通信的时间确定性的基础，先进的组网通信要求时间同步精度达100 ns；
- b) 具有时间确定性通信功能：可按预定时间进行信息交互，关键控制信息传输延迟可控制在20 μs 以内；
- c) 支持高速传输：基本带宽至少可达到100 Mbit/s，

高速通信场景需达到1 Gbit/s 甚至是10 Gbit/s；

- d) 支持混合流量调度：强实时信息用于实现控制通信、同步通信及紧急突发通信，弱实时信息用于实现其他周期数据和偶发数据传输；
- e) 具有可靠性通信机制：实现故障隔离和冗余设计，保证关键控制信息的可达性，某节点故障后不影响其他节点；
- f) 以通用处理平台为中心，典型信息通信带宽需求见表2。

表2 典型信息流通信带宽需求

Tab.2 Bandwidth requirements for typical information flow communication

功能	输入	输出	输入周期/ms	等效接收消息长度/Byte	输入带宽需求/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	输出周期/ms	等效发送消息长度/Byte	输出带宽需求/(Mbit·s <sup>-1</sup> )
惯性导航	惯组脉冲数	修正后的速度位置姿态	5	18	0.028 8	5	40	0.064
卫星导航	导航接收机原始导航参数		500	12	0.000 192	5	40	0.064
星光导航	星敏传感器四元数		100	16	0.001 28	5	40	0.064
光学感知	光学图像	机动控制信息	20	262 144或1 500 MTU×175包	104.857 6	5	8	0.012 8
雷达感知	雷达图像	机动控制信息	20	131 072×8或1 500 MTU×88×8包	419.430 4	5	8	0.012 8
摄动制导	时间速度位置姿态、机动控制信息	舵偏	5	48	0.076 8	5	16	0.025 6
自适应制导	时间速度位置姿态、机动控制信息	舵偏	5	48	0.076 8	5	16	0.025 6
摄像头数据压缩	摄像头原始图像	压缩图像	20	262 144×8或1 500 MTU×175×8包	838.860 8	20	100 000或1 500 MTU×67包	40
遥测数据综合	原始遥测数据流(传感器数据、压缩图像数据等)	遥测综合数据帧	25	312 500或1 500 MTU×209包	100	25	312 500或1 500 MTU×209包	100
突发数据	突发任务输入	突发结果输出	10(假定)	125 000或1 500 MTU×84包	100	10(假定)	125 000或1 500 MTU×84包	100

3 网络信息规划

结合新一代分布式箭载电气系统的功能性能需求，以通用处理平台为核心，对各种传感器、受动器与处理器之间的信息流的种类、周期、流量、实时性、重要性要求进行规划。其中：

- a) 惯性导航、卫星导航和星光导航数据为速度位置姿态信息，其中惯性导航信息流实时性要求高，其他两类实时性要求一般；
- b) 光学感知和雷达感知数据输入带宽较高，实时性要求高；
- c) 摄动制导、自适应制导数据为关键传输信息

流，实时性要求高；

- d) 摄像头数据、遥测数据用于事后分析，实时性要求一般；
- e) 突发数据传输实时性要求高，但无统一周期律，突发数据间隔在10 ms 以上。

结合表1中各流控机制的对比，对于通用处理平台系统的输入消息进行如下规划。

- a) 短帧控制类数据1：主要为惯性导航数据，等效消息长度不超过18 Byte，单条消息带宽需求不超过28.8 kbit/s。该数据较关键，实时性要求高，传输延时小于20 μs。可以采用TAS/TT-TDMA 机制，保障

其严格实时性。

b) 短帧控制类数据2: 主要包括摄动制导数据、自适应制导数据等, 等效消息长度不超过 48 Byte, 单条消息带宽需求不超过 76.8 kbit/s。该数据较关键, 实时性要求高, 传输延时小于 20  $\mu$ s。可以采用 TAS/TT-TDMA 机制, 保障其严格实时性。

c) 短帧控制类数据3: 主要包括卫星导航数据、星敏感器数据等, 等效消息长度不超过 16 Byte, 单条消息带宽需求不超过 1.28 kbit/s。该数据重要性一般, 实时性要求低, 可以采用 CBS/ATS/RC 机制。

d) 图像类流数据: 主要包括光学图像、雷达图像等, 其中光学图像传输带宽需求达 104.85 Mbit/s, 雷达图像共包含 8 路数据, 单路图像传输带宽需求达 52.43 Mbit/s。按照 1 500 的最大单帧传输单元, 光学图像数据要分成 175 包, 雷达图像要分成 704 包。该数据较关键, 实时性要求高, 单帧传输延时小于 5  $\mu$ s, 可以采用 TAS/TT-TDMA 机制, 保障其严格实时性。

e) 遥测类流数据: 主要包括摄像头数据、遥测数据等, 其中摄像头数据包含 8 路数据, 单路图像传输带宽需求达 104.85 Mbit/s, 按照 1 500 的最大单帧传输单元, 摄像头数据要分成 1 400 包, 遥测数据要分成 209 包。该数据重要性一般, 实时性要求低, 可以采用 CBS/ATS/RC。

f) 突发数据: 主要为突发任务输入数据, 带宽需求为 100 Mbit/s, 该数据关键, 实时性要求高, 单帧传输延时小于 10  $\mu$ s, 突发数据间隔在 10 ms 以上。按照 1 500 的最大单帧传输单元传输, 需要分成 84 个包。由于突发数据不存在周期性, 推荐采用异步方式实现流量映射, 考虑高实时性要求, 可以采用 ATS 机制并与 TAS 结合, 以最高优先级完成消息传输, 并采用 FP 帧抢占机制增强传输, 对于 TAS 预留窗口, 采用多孔调度模式, 以增强突发数据的发送机会。由于考虑了 FP 抢占机制, 突发数据可以抢占优先级低的消息进行传输, 但对于时间触发消息, 不推荐对其进行抢占或采取洗牌模式进行延迟发送。可以增强时间触发消息之间的空隙, 以增大突发数据的发送机会。

通用处理平台系统输出消息的内容典型包括:

a) 短帧控制类数据1: 主要包括速度位置姿态数据(惯性导航)等, 等效消息长度不超过 40 Byte, 单条消息带宽需求不超过 64 kbit/s。该数据较关键, 实时性要求高, 传输延时小于 20  $\mu$ s。可以考虑采用 TAS/TT-TDMA 机制, 保障其严格的实时性。

b) 短帧控制类数据2: 主要包括机动控制信息、舵偏数据等, 等效消息长度不超过 16 Byte, 单条消息带宽需求不超过 25.6 kbit/s。该数据关键, 实时性要求高, 传输延时小于 20  $\mu$ s。可以考虑采用 TAS/TT-TDMA 机制, 保障其严格实时性。

c) 短帧控制类数据3: 主要包括速度位置姿态数据(卫星导航数据、星敏感数据), 等效消息长度不超过 40 Byte, 单条消息带宽需求不超过 64 kbit/s。该数据重要性一般, 实时性低。可以采用 CBS/ATS/RC, 考虑优先级较高完成消息传输, 对于 CBS/ATS 可以与 TAS 进行结合, 对于 RC 可以与 TT-TDMA 结合。

d) 遥测类流数据: 主要包括压缩图像、遥测综合数据等, 单路压缩图像传输带宽需求可达 100 Mbit/s, 按照 1 500 的最大单帧传输单元, 压缩图像数据要分成 67 包, 遥测数据要分成 209 包。该数据重要性一般, 实时性要求低, 可以采用 CBS/ATS/RC。

e) 突发数据: 主要包括突发任务输出数据, 带宽需求为 100 Mbit/s。该数据较关键, 实时性要求高, 单帧传输延时小于 20  $\mu$ s, 突发数据间隔在 10 ms 以上。按照 1 500 的最大单帧传输单元传输, 需要分成 84 个包。对其处理方式参照通用处理平台系统内输入消息的规划结果进行执行。

#### 4 流量调度与路由规划

基于如上流控选择和流量的匹配关系, 对流量调度与路由进行联合规划。现有流量调度机制大多基于给定的路由方案, 通常采用生成树协议或最短路径路由算法确定<sup>[5-6]</sup>, 在此基础上流量调度执行端口队列和帧传输时隙分配。由于路由机制只考虑路由相关指标, 如路径长度、负载均衡等, 并未考虑每条流的分类和性能要求, 因此可能产生不利于甚至阻碍流传输性能的路由方案<sup>[6]</sup>。如果路由机制将多条延时紧迫的 TAS/TT-TDMA 流分配至同一链路, 则严重的时隙争用将难以满足所有流的截止时间, 更难以以为其他流量留出优化的空间。

在电气系统中, 流量  $\tau_i$  通常定义为五元组的形式, 即  $\tau_i = [T_i, L_i, D_i, S_i, D_{e_i}]$ ,  $T_i$  为流量的传输周期,  $L_i$  为持续时间长度,  $D_i$  为截止期限,  $S_i$  为源端系统,  $D_{e_i}$  为目的端系统。其中  $L_i$  可以通过流量帧长与链路传输速率的比值计算获得。针对流量的调度规划设计以流量在流经节点处的输出端口处发送的时间偏置  $O_{i,k}$

作为变量,  $k$  表示传输路径  $P_i = \{[S_s, S_p], \dots, [S_q, D_{ei}]\}$  上的某条逻辑链路  $l_k = [N_x, N_y] \in P_i$ 。其中传输路径  $P_i$  表述为一系列链路  $[S_s, S_p], \dots, [S_q, D_{ei}]$  的集合,  $S_s$  为流量传输路径的起始端系统,  $S_p, S_q$  则为中间端系统;  $l_k$  表示传输路径  $P_i$  上的第  $k$  条链路,  $N_x, N_y$  代表链路  $l_k$  连接的两个节点,  $N_x$  为发送端,  $N_y$  为接收端, 由于  $l_k \in P_i$ , 故当  $k=1$  时, 有  $N_x=S_s, N_y=S_p, k$  为其他值时可以此类推。图2为路径和调度联合优化设计流程。

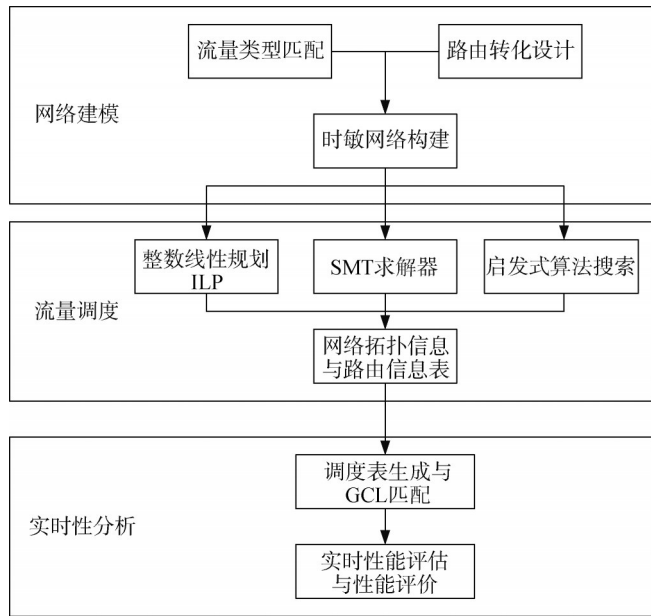


图2 路径和调度联合优化设计

Fig.2 The joint optimization for path and scheduling

考虑图2所示网络设计与验证流程, 如果流量的路由与调度被单独规划, 则在  $O_{i,k}$  求解的过程中  $l_k$  是固定不变的。此时时间敏感流量的调度规划要求任意  $O_{i,k}$  均能满足窗口定义、顺序、大小以及流量周期、传输、隔离等约束条件, 各类约束条件的具体说明见表2中的调度约束。传输、隔离等约束条件涉及到多条流量之间的相互干扰, 且存在较为复杂的逻辑或关系, 这使得  $O_{i,k}$  的解空间受限, 当流量规模达到一定程度可能难以求解。将流量路由与流量调度联合规划时可将  $P_i$  同时纳入规划求解的范畴, 典型地, 可以借助二进制路由变量  $\alpha_{i,k}$  来表征流量  $\tau_i$  是否流经链路  $l_k$ , 此时联合规划需要同时进行  $\alpha_{i,k}$  和  $O_{i,k}$  的求解, 故应在调度约束的基础上额外增加端系统、交换机、无回环等路由约束以及面向调度和路由的联合约束, 如表3所示。

表3 路径和调度联合优化约束

Tab.3 The joint optimization constriction for path and scheduling

约束类型	约束名称	约束含义
调度约束	窗口定义	窗口开闭应在整体调度周期以内,同时源端窗口开启时刻与流量偏置匹配
	窗口顺序	同一时刻只能有一个时间触发类流量队列开启,其他关闭
	窗口大小	流量负载、帧长等特性,保障相关帧能在窗口内完整传输
	流量周期	超周期流量调度
	流量传输	路径中同一流量帧的前后顺序,同时考虑网络时钟精度常数以补偿同步误差
	流量隔离	不同流量到达节点后转发的先后顺序
路由约束	端系统	流量只能从源端系统流出,并流入目的端系统,而不流经其他端系统及相连交换机
	交换机	流量如果流入某个交换机,则也将该交换机流出
	无回环	流量在沿路径传输过程中,不会多次经过相同的网络节点
联合约束	路由规划	调度偏置变量所面向的逻辑链路应为流量路由所流经的逻辑链路
用户约束	抖动约束	源端、目的端有限抖动
	端到端延迟	流量从源端到目的端时延不超过截止期限

这种链路级的综合规划方法可以通过释放  $O_{i,k}$  中逻辑链路的可能范围来增大调度解空间, 同时也会引入路由变量使规划求解变量增多。一种更高效的联合规划方式是预先分析流量传输可能流经的传输链路, 形成相应的可行路径集合, 并以路径选择变量来标识从流量可行路径集合中所选择出的传输路径。这种路径级的综合规划方法既能增大解空间又无需引入过多新变量, 能够更有效地提升规划求解性能, 使更多流量可调度并且取得更优的性能<sup>[7-8]</sup>。在本文具体的流量调度处理过程中, 采用通用SMT方法对路径和调度窗口进行联合求解。

在图1所示的典型箭载电气系统架构中, 载荷区完成箭载电气系统主要功能, 设置2x2两两交换结构, 采用4个通用处理平台完成核心任务处理; I子级、II子级、III子级里面各自包含2个级联交换机, 与各个功能分区里面的设备进行互联。

箭载电气系统各功能分区之间通过交换机进行互联, 以实现控制信息跨域下发, 状态信息跨域收集, 时钟同步信息跨域同步。

针对关键消息, 采用时间触发机制进行传输, 根

据消息的周期，按照 20 ms 为一个轮转时长进行设计。在端口输出的时间窗口中对于消息的多次实例化输出，采用各个调度窗口的稀疏化处理规则。对于图像类视频流数据，采用分包传输，对于单路图像数据采用集中调度的方式进行输出；对于多路图像数据如摄像头数据和雷达感知数据，8 路数据流之间的窗口采用稀疏方式进行调度输出。

### 5 网络设计结果评估

基于 OMNeT++ 平台 INET 网络仿真框架设计 TAS+CBS+ATS+TT+RC 机制的网络仿真系统，其系统方案如图 3 所示。网络拓扑主要包括端系统、交换机这两大模块，二者之间的链路可由 OMNeT++ 平台集成，不需要额外设计。

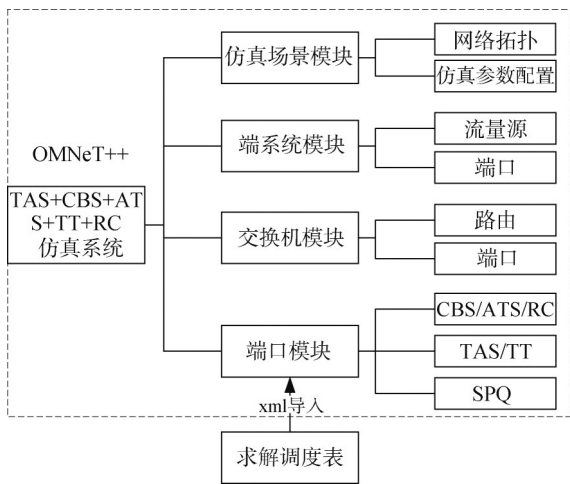


图3 网络仿真模块

Fig.3 The simulation models

#### a) 端系统模块。

该模块包含流量源子模块和端口子模块。流量源需要集成源端和目的端的功能。作为源端，需要支持多流量、多类型与多周期发送；作为目的端，需要接收目标流量包，同时需具备统计信息采集等功能。端口子模块能够区分发送和接收帧区分，对待发送帧可实现排队、门控整形等功能。

为验证本文针对分布式箭载电气系统网络设计的结果，实现了 Talker、Listener、FlowPolice 以及端口子模块。Talker 和 Listener 分别代表发送和接收消息，FlowPolice 则判断消息来自发送还是到达接收。

#### b) 交换机模块。

该模块需包含路由子模块和端口子模块。路由需实现多链路寻址，需要依照路径列表，将包传输到准

确端口。端口子模块能够区分进入帧和发出帧。发出帧支持多个优先级队列先入先出，支持多种整形机制，支持严格优先级选择。本文设计实现了 Filtering Database、时钟、技术延迟以及转发模块。Filtering Database 存储路由所需信息，转发模块将消息从输入端口转发到输出端口。

在端系统和交换机中都包含相似的端口模块。端口模块是仿真设计的核心，其集成了门控制器、队列管理、整形器以及流量的传输选择等子模块，是实现 TAS+CBS+ATS+TT+RC 机制的主要部分。当消息进入输出端口时，根据消息帧优先级信息的不同，将其分配给不同的队列；整形器则记录了相应队列信用量值，以判断是否继续向后输出；门状态则由门控制器基于预先设计的调度表，通过时钟发送 Tick 触发改变；最后消息还会经过严格优先级选择，优先级高的优先输出。

CBS 机制的核心有两点：一是感知队列、门状态，二是感知当前帧信息从而进行信用量增减或保持操作。如图 4 所示，在 OMNeT++ 仿真中，CBS 整形器与队列、门的交互通过自消息传递实现（即仿真事件），CBS 对信用量的操作通过接收并传递流量帧实现。为了提高模块的可复用性，在 CBS 整形器模块中，将门状态恒定设为开，从而能够与 TAS+CBS 等效。在这里将门作为一个状态量，同时将门的开闭活动作为 CBS 的驱动事件，从而尽可能还原实际的运行场景。

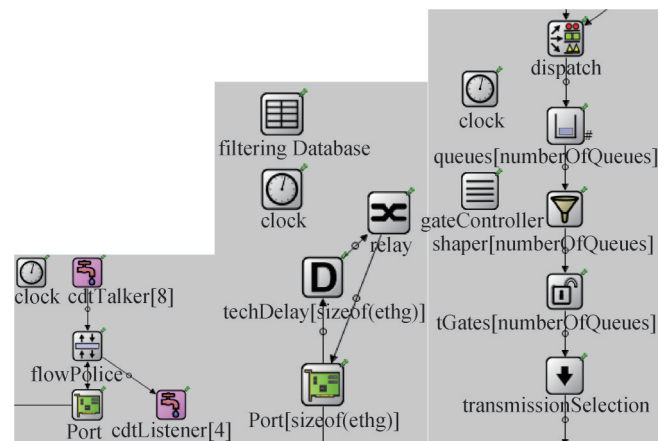


图4 仿真系统中的端口模型

Fig.4 The port model in out simulation system

对流量进行仿真分析，其流量传输延时如表 4 所示。

表4 流量时延对照表  
Tab.4 The delay for flows

消息	数据源、目的端	数据关键性	最大延迟/ $\mu$ s	最小延迟/ $\mu$ s	延迟均值/ $\mu$ s
Msg01	惯导->通用处理平台1	高(延时<20 $\mu$ s)	0.189	0.188	0.189
Msg02	导航接收机->通用处理平台2	低	0.180	0.180	0.180
Msg03	星敏传感器->通用处理平台2	低	0.186	0.063	0.161
Msg04	光学感知->通用处理平台1	中(延时<1 ms)	253.2	253.2	253.2
Msg05~Msg12	雷达感知->通用处理平台3	中(延时<1 ms)	243.1	242.9	243.0
Msg13, Msg14	舵机->通用处理平台1	高(延时<20 $\mu$ s)	0.117	0.097	0.107
Msg15~Msg22	摄像头->通用处理平台4	低	243.1	242.9	242.9
Msg23	传感网络->通用处理平台2	低	302.2	302.2	302.2
Msg24(突发)	综合射频->通用处理平台1	高(单帧延时<20 $\mu$ s)	124.5(单帧1.482)	122.2(单帧1.454)	122.9(单帧1.463)
Msg30, Msg33, Msg35, Msg36	通用处理平台1->舵机	高(延时<20 $\mu$ s)	0.186	0.033	0.094
Msg31, Msg32	通用处理平台2->舵机	高(延时<20 $\mu$ s)	0.448	0.448	0.448
Msg34	通用处理平台3->舵机	高(延时<20 $\mu$ s)	0.026	0.024	0.025
Msg37	通用处理平台4->通用处理平台1	低	904.1	904.1	904.1
Msg38	通用处理平台2->通用处理平台1	低	904.1	904.1	904.1
Msg39(突发)	通用处理平台1->通用处理平台2	高(单帧延时<20 $\mu$ s)	337.1(单帧4.013)	337.1(单帧4.013)	337.1(单帧4.013)

基于以上仿真试验结果，典型箭载电气系统中各流量能够满足端到端时延的实时性要求。

## 6 结论

本文针对箭载综合电子系统信息传输需求，进行了网络设计规划和实时性仿真评估。依据通信组网需求，进行时间流控机制选择，依据消息的周期率、时间关键特性、消息包长等特征实施消息与流量类型的匹配。在其基础上，通过路径和调度联合优化约束，建立多约束调度求解模型，以最小化端到端延时、实时流量占用队列数和帧缓存时间为目标，实现调度窗口的优化设计，并保证消息传输的实时性。利用OM-Net++搭建网络仿真模型，通过对网络设备、通信流量以及通信协议进行行为抽象，构建了端系统与交换机仿真模型，实现了整个网络系统的仿真模拟，从而获得了网络设计与优化所需的关键性能数据。

通过仿真验证了典型箭载综合电气系统中所有流量与各种流控机制的匹配关系，网络设计后流量端到端延迟结果均能够满足新一代箭载电气系统组网通信的要求，验证了时间敏感网络在箭载综合电子系统中应用的可行性。

### 参考文献

[1] Alliance of Industrial Internet. Time sensitive network (TSN) industry white paper v1.0 [EB/OL]. (2021-03-10)[2024-08-01]. [http://www.aii-alliance.org/static/upload/202009/0901\\_165010\\_961.pdf](http://www.aii-alliance.org/static/upload/202009/0901_165010_961.pdf).  
 [2] AerospaceSAE. Time-triggered ethernet: SAE AS6802[S]. SAE International, 2016.

[3] LEONARDI L, BELLO L L, PATTI G. Bandwidth partitioning for time-sensitive networking flows in automotive communications[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(10): 3258-3261.  
 [4] ZHAO L, POP P, STEINHORST S. Quantitative performance comparison of various traffic shapers in time-sensitive networking [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2022, 19(3): 2899-2928.  
 [5] YU Q, WAN H, ZHAO X, et al. Online scheduling for dynamic vm migration in multicast time-sensitive networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(6): 3778-3788.  
 [6] ATALLAH A A, HAMAD G B, MOHAMED O A. Routing and scheduling of time-triggered traffic in time-sensitive networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(7): 4525-4534.  
 [7] NAYAK N G, DÜRR F, ROTHERMEL K. Incremental flow scheduling and routing in time-sensitive software-defined networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(5): 2066-2075.  
 [8] XU L, XU Q M, TU J Z, et al. Learning-based scalable scheduling and routing co-design with stream similarity partitioning for time-sensitive networking[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(15): 13353-13363.

### 作者简介

施睿(1988—)，男，高级工程师，主要研究方向为航天电子、通信技术。  
 隗同坤(1994—)，女，工程师，主要研究方向为航天电气系统。  
 刘箭言(1989—)，男，高级工程师，主要研究方向为航天电子、通信技术。  
 薛志超(1982—)，男，高级工程师，主要研究方向为航天电子、通信技术。  
 叶威(1986—)，男，高级工程师，主要研究方向为航天电气系统。