

# TSN 交换机（TSNSwitch3.2）设计方案

## （版本 1.2）

OpenTSN

OpenTSN 开源项目组

2021 年 11 月

## 版本历史

版本	修订时间	修订内容	文件标识
1.0	2021.10.14	为了使得 OpenTSN3.2 项目中的 TSN 交换机能更好地支持对标准以太网报文的转发，在 TSN 交换机中增加 MAC 自学习和标准以太网报文查 MAC 表转发功能。	OpenTSN3.2
1.1	2021.11.10	1.MSL 模块优化了 MAC 转发表表项老化的逻辑功能； 2.文档架构上进行了调整，主要是第 2 章节	
1.2	2021.11.18	1.整理文档格式	

## 目录

1.	项目概述 .....	5
1.1.	设计目标 .....	5
1.2.	设计指标 .....	5
2.	总体设计 .....	6
2.1.	TSS 总体设计 .....	8
2.1.1.	TSS 内部功能划分 .....	8
2.1.2.	TSS 的处理流程 .....	17
2.2.	HCP 总体设计 .....	19
2.2.1.	HCP 内部功能划分 .....	19
2.2.2.	HCP 的处理流程 .....	23
附录 A.	数据格式定义 .....	28
A.1.	TSN 标签格式 .....	28
A.2.	报文描述符格式 .....	29
附录 B.	配置说明 .....	29
B.1.	硬件地址 .....	29
B.2.	配置内容 .....	30
B.2.1.	控制寄存器 .....	30
B.2.2.	TSN 报文转发表 .....	32
B.2.3.	门控列表 .....	33
附录 C.	配置/上报报文格式 .....	33
C.1.	配置报文格式 .....	33
C.2.	上报报文格式 .....	35
C.2.1.	单个寄存器上报报文格式 .....	38
C.2.2.	硬件状态上报报文格式 .....	39

C.2.3. 门控列表/转发表表项上报报文格式 .....	41
附录 D. wr_command/rd_command/rd_command_ack 命令格式 .	41
附录 E. PTP 协议格式 .....	41
附录 F. TSMP 消息协议格式.....	42
F.1. TSMP 帧设计原则.....	42
F.2. TSMP 帧格式.....	43

## 1. 项目概述

本文档是介绍 OpenTSN（版本 3.2）开源项目中的 TSN 交换机设计，主要分为项目概述、总体设计两部分。

### 1.1. 设计目标

TSN 对传统以太网在时间同步、延迟确定性、可靠性传输和管理控制等方面进行增强，其应用场景已经由最初的工业互联网扩充至运营商网络、车载网络和航空航天器网络等。随着不同领域网络应用的丰富和扩展，应用场景已呈现多样化和差异化的特点。为了满足上述场景多样化与差异化的应用需求，OpenTSN（版本 3.2）开源项目设计了 TSN 交换机。TSN 交换机通过提取 TSN 标准中合适的子集进行设计，旨在设计一套能够满足不同领域对 TSN 网络的多样化及差异化需求的架构。

### 1.2. 设计指标

- 支持 IEEE 802.1AS、802.1Qch、802.1Qbv、802.1Qcc 标准
- 同时支持时间敏感、带宽预约和尽力转发三种流量的转发交换
- 支持 MAC 自学习和标准以太网报文转发
- 支持 8 个千兆以太网网络接口
- 硬件调度时间槽设置范围为[4us, 512us]
- 时间敏感流量最大支持 1024 个硬件调度时间槽的延迟
- 交换容量 16Gbps
- 交换延迟小于 30us
- 支持 16K 条流的转发配置

## ■集中式报文交换缓存管理

## 2. 总体设计

TSN 交换机（TSNSwitch3.2）的总体设计如图 2-1 所示，TSNSwitch3.2 包括时间敏感交换 TSS 和硬件控制点 HCP 两部分逻辑，将数据处理逻辑和控制逻辑进行解耦。

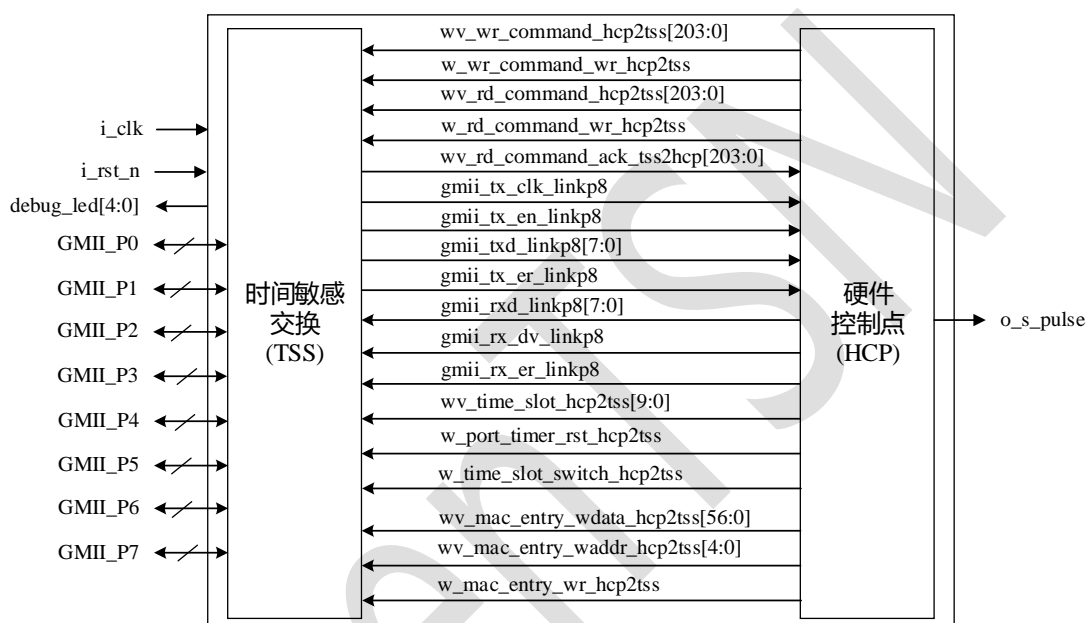


图 2-1 TSNSwitch3.2 总体架构

TSNSwitch3.2 总体架构图中的信号含义如表 2-1 所示。

表 2-1 TSNSwitch3.2 总体架构图中信号含义

信号	位宽	含义
i_clk	1	时钟信号，时钟频率为 125MHz
i_rst_n	1	复位信号，低有效
debug_led	5	输出到 FPGA 板上的 5 个 LED 灯上，该 5 个信号可用于显示 FPGA 烧录逻辑（TSN 交换机、TSN 网卡和 ST SN 测试仪等）以及硬件状态
GMII_PN	-	N 号网络交换 GMII 接口，N 取 0、1、...、7
wv_wr_command_hcp2tss	204	写命令，格式详见附录 D
w_wr_command_wr_hcp2tss	1	写命令使能信号
wv_rd_command_hcp2tss	204	读命令，格式详见附录 D

信号	位宽	含义
w_rd_command_wr_hcp2tss	1	读命令使能信号
wv_rd_command_ack_tss2hcp	204	读命令响应信号, 格式详见附录 D
gmii_tx_clk_linkp4	1	GMII 时钟信号
gmii_tx_en_linkp4	1	GMII 数据有效信号
gmii_txd_linkp4	8	GMII 数据
gmii_tx_er_linkp4	1	GMII 数据错误信号
gmii_rxd_linkp4	8	GMII 数据
gmii_rx_dv_linkp4	1	GMII 数据有效信号
gmii_rx_er_linkp4	1	GMII 数据错误信号
wv_time_slot_hcp2tss	10	当前全局时钟所在的一个周期内的时间槽 ID
w_timer_rst_hcp2tss	1	19bit 时钟复位信号
w_time_slot_switch_hcp2tss	1	时间槽切换信号输入
o_s_pulse	1	秒脉冲或毫秒脉冲 (可配置)
wv_mac_entry_wdata_hcp2tss	57	缓存 MAC 转发表的 RAM 写数据
wv_mac_entry_waddr_hcp2tss	5	缓存 MAC 转发表的 RAM 写地址
w_mac_entry_wr_hcp2tss	1	缓存 MAC 转发表的 RAM 写使能, 高有效

**TSS(Timing Sensitive Switch, 时间敏感交换)模块:** 主要功能是对 TSN 报文和标准以太网报文进行交换; 基于 IEEE 802.1Qch/IEEE 802.1 Qbv 调度模型对流量进行整形; 以及计算 PTP 报文在 TSS 中传输的时间, 即透明时钟, 并将透明时钟累加到 PTP 报文透明时钟域中。

**HCP(Hardware Control Point, 硬件控制点)模块:** 主要功能是对 PTP 报文/状态报文进行封装、对配置封装报文/PTP 封装报文进行解封装; 对配置报文进行解析, 并生成配置控制寄存器、转发表、门控表和映射表的写/读命令, 收集 TSN 交换机状态并周期性进行上报; 在 PTP 报文中记录时间戳, 计算 PTP 报文在 HCP 中传输的时间, 即透明时钟, 并将透明时钟累加到 PTP 报文透明时钟域中; 以及对标准以太网报文 MAC 地址进行自学习。

## 2.1. TSS 总体设计

### 2.1.1. TSS 内部功能划分

时间敏感交换 TSS 的内部功能划分如图 2-2 所示，下面对模块的功能进行描述。

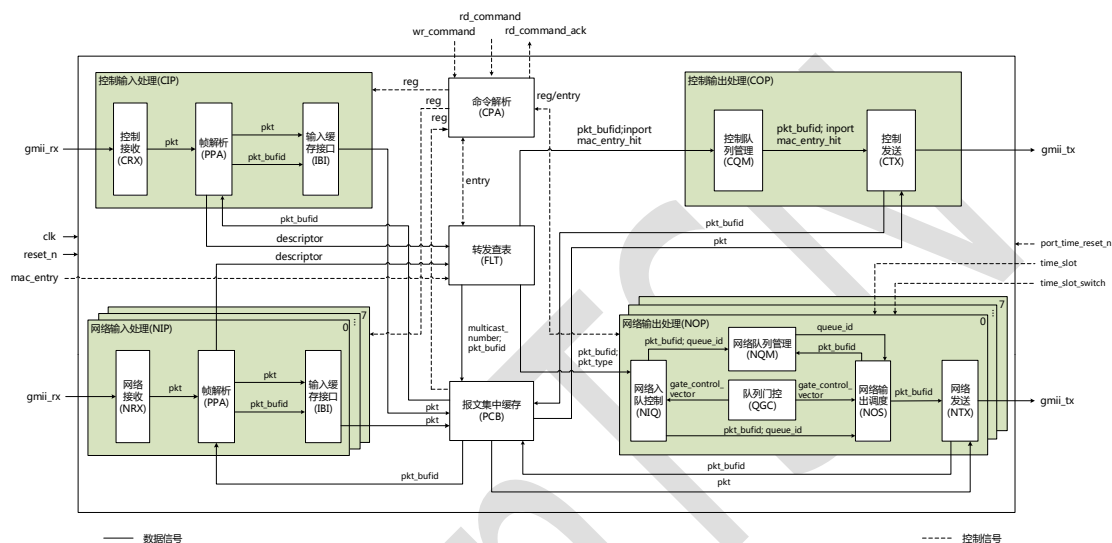


图 2-2 交换逻辑 TSS 内部功能划分

时间敏感交换 TSS 内部功能划分图中的信号含义如表 2-2 所示。

表 2-2 TSS 总体架构图中信号含义

信号	位宽	含义
pkt_134 (报文集中缓存接收或发送的信号)	134	报文体数据，具体格式参考附录 A
pkt_9 (非报文集中缓存模块的信号)	9	报文体数据，具体格式参考附录 A
descriptor	72	报文描述符数据，用于标识报文数据
pkt_bufid	9	报文数据在报文缓存区中缓存的 ID 号
pkt_type	3	报文类型数据
flow_id	14	报文数据的流 ID，用于标识流
lookup_en	1	查表使能
outport	9	输出端口号 (bitmap)
inport	4	输入端口 号
queue_id	3	queue_id 号，用于标识队列缓存的 ID



信号	位宽	含义
		号
multicast_count	4	组播报文的输出端口数量
gate_ctrl_vector	8	门控信号
forward_table	14	16K 转发表项
mac_entry_hit	1	查 MAC 转发表是否命中信号
mac_entry	-	MAC 转发表
port_time_rst_n	1	端口时钟复位信号
time_slot	11	时间槽信号
time_slot_switch	1	时间槽切换信号
wr_command	204	写命令
rd_command	204	读命令
rd_command_ack	204	读命令响应

现将整个架构划分为五大部分逻辑：网络输入处理逻辑、网络输出处理逻辑、控制输入处理、控制输出处理以及内部处理逻辑，下面对五部分逻辑进行逐一介绍。

#### 2.1.1.1. 网络输入处理逻辑

网络输入处理逻辑的内部组成框图如图 2-3 所示。

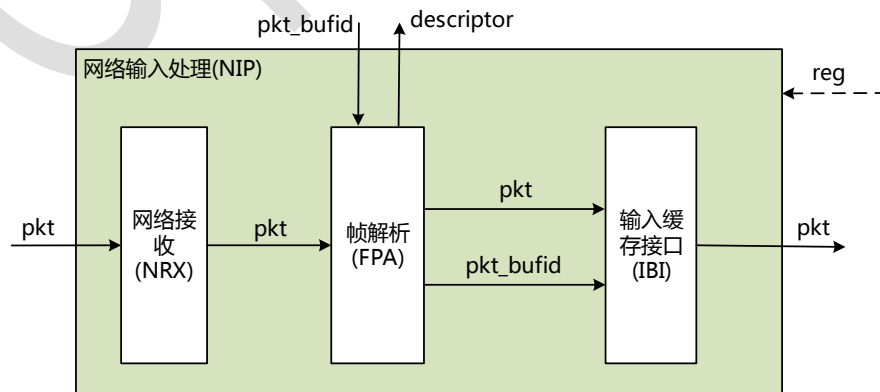


图 2-3 NIP 模块内部功能划分

**NRX(Network RX, 网络接收)模块:** 主要功能是接收网络接口传来的报文, 将报文传输时钟域从 GMII 接口接收时钟域切换到 TSS 内部时钟域; 记录本模块接收时间同步报文的时间, 并将其存放在 TSNTag 中; 识别标准以太网报文和 TSN 报文并根据 TSS 所处的阶段来决定是否传输报文: 若 TSS 处于初始化阶段, 丢弃所有报文; 若 TSS 处于配置阶段, 传输标准以太网报文和 TSN 报文中的配置报文; 若 TSS 处于时钟同步阶段, 传输标准以太网报文和 TSN 报文中的非时间敏感报文; 若 TSS 处于正常工作阶段, 传输标准以太网报文和 TSN 报文。

**FPA(Frame Parse, 帧解析)模块:** 主要功能是接收报文集中缓存模块分配的 pkt\_bufid, 将报文每拍数据位宽由 9bit 转换为 134bit, 并将位宽转换后的报文和 pkt\_bufid 输出给输入缓存接口模块; 根据接收到的报文构造报文描述符, 并将其输出给转发查表模块进行查表; 识别报文类型, 并对 RC 流量、BE 流量和标准以太网流量进行监管。

**IBI(Input Buffer Interface, 输入缓存接口)模块:** 主要功能是将报文数据发送给报文集中缓存模块进行缓存。本模块接收帧解析模块传来的 134bit 数据, 并使用两个寄存器进行缓存, 其中任何一个寄存器有数据则往报文集中缓存模块发出写请求, 在接收到报文集中缓存模块传来的响应后, 才完成一拍数据的写入; 并将帧解析模块传来的数据写入另一个寄存器中。

### 2.1.1.2. 网络输出处理逻辑

网络输出处理逻辑的内部组成框图如图 2-4 所示。

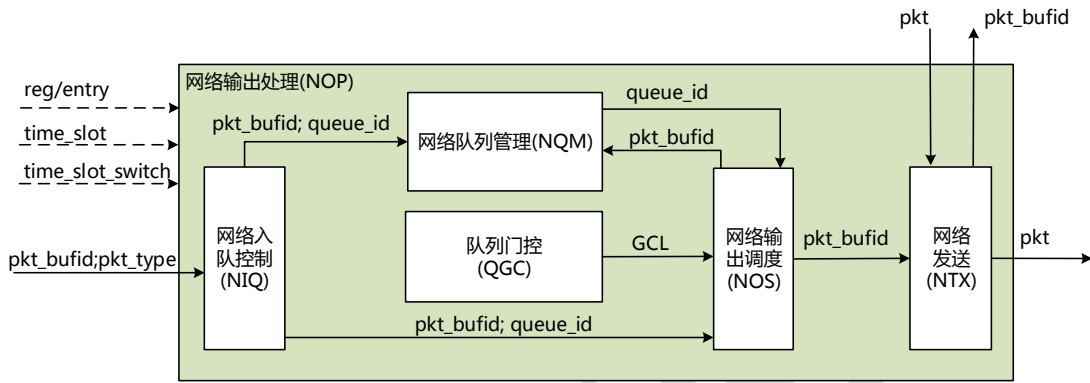


图 2-4 NOP 模块内部功能划分

**NIQ(Network Input Queue, 网络入队控制)模块:** 主要功能是将 `pkt_bufid` 写入到网络队列管理模块中进行缓存。本模块需要根据接收到的报文类型信息、队列门控模块传来的门控信息进行 `queue_id` 的映射,并将 `pkt_bufid` 与 `queue_id` 发送给网络队列管理模块进行缓存。同时将 `pkt_bufid` 与 `queue_id` 发送给网络输出调度模块,以便对队列首地址进行管理。本模块还需要根据写入队列的信息与网络输出调度模块传输的调度队列的信号来对队列的状态进行管理,主要是对所有队列中目前所写入的 `bufid` 数量进行管理。

**NQM (Network Queue Manage, 网络队列管理) 模块:** 主要功能是对网络输出端口的队列集中缓存管理

**QGC(Queue Gate Control, 队列门控)模块:** 主要功能是根据架构的全局时钟进行门控列表的读取,并将门控列表(门控列表的格式如表 2-3 所示)中 8 个队列的门控开关信息发送给网络入队控制模块

和网络输出调度模块。

表 2-3 门控列表数据格式

名称	含义	备注
gate_ctrl_vector[7:0]	门控向量，对应 8 个门控信息。	使用 RAM 进行实现，深度为 1024

**NOS(Network Output Schedule, 网络输出调度)模块：**主要功能是根据调度后的队列信息从网络队列管理模块提取出 pkt\_bufid。本模块需要根据当前队列信息与队列门控模块传来的门控信息进行计算，得出一个最优先调度的队列，并从网络队列管理模块的对应队列中得到 pkt\_bufid。

**NTX(Network TX, 网络发送)模块：**主要功能是从报文缓存区中读取报文并释放 pkt\_bufid、计算时间同步报文的透明时钟并累加到透明时钟域、将报文传输时钟域从架构内部处理时钟域切换到 GMII 发送时钟域、构造帧前导符和帧开始符并将报文从网络接口输出。读取报文时，需要先将 pkt\_bufid 映射成报文在集中缓存区中缓存的基地址，并根据此地址往报文集中缓存模块读取报文，将读出报文的位宽由 134bit 转换为 8bit，在接收到最后一拍数据时，将此 pkt\_bufid 传输给报文集中缓存模块进行释放，以便后续进入架构的报文使用。

#### 2.1.1.3. 控制输入处理逻辑

控制输入处理逻辑的内部组成框图如图 2-5 所示。

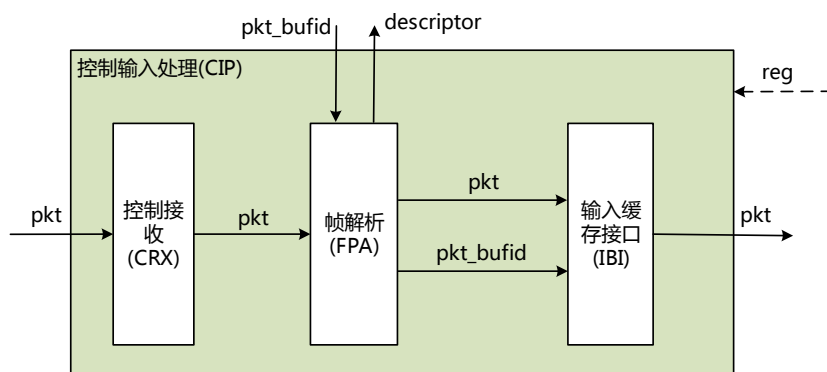


图 2-5 NIP 模块内部功能划分

**CRX(Control RX, 控制接收)模块：**主要功能是接收网络接口传来的报文，将报文传输时钟域从 GMII 接口接收时钟域切换到 TSS 内部时钟域；记录本模块接收时间同步报文的时间，并将其存放在 TSNTag 中；识别标准以太网报文和 TSN 报文并根据 TSS 所处的阶段来决定是否传输报文：若 TSS 处于初始化阶段，丢弃所有报文；若 TSS 处于配置阶段，传输标准以太网报文和 TSN 报文中的配置报文；若 TSS 处于时钟同步阶段，传输标准以太网报文和 TSN 报文中的非时间敏感报文；若 TSS 处于正常工作阶段，传输标准以太网报文和 TSN 报文。

**FPA(Frame Parse, 帧解析)模块：**主要功能是接收报文集中缓存模块分配的 pkt\_bufid，将报文每拍数据位宽由 9bit 转换为 134bit，并将位宽转换后的报文和 pkt\_bufid 输出给输入缓存接口模块；根据接收到的报文构造报文描述符，并将其输出给转发查表模块进行查表；识别报文类型，并对 RC 流量、BE 流量和标准以太网流量进行监管。

**IBI(Input Buffer Interface, 输入缓存接口)模块：**主要功能是将报文数据发送给报文集中缓存模块进行缓存。本模块接收帧解析模块

传来的 134bit 数据，并使用两个寄存器进行缓存，其中任何一个寄存器有数据则往报文集中缓存模块发出写请求，在接收到报文集中缓存模块传来的响应后，才完成一拍数据的写入；并将帧解析模块传来的数据写入另一个寄存器中。

#### 2.1.1.4. 控制输出处理逻辑

控制输出处理逻辑的内部组成框图如图 2-6 所示。

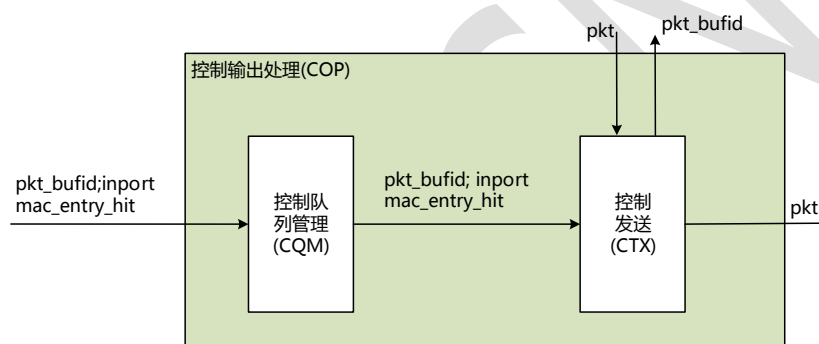


图 2-6 NIP 模块内部功能划分

**CQM(Control Queue Management, 控制队列管理)模块：**主要功能是将报文描述符写入到队列中进行缓存，在控制接口空闲时，将队列中的描述符读出并传输给控制发送模块。

**CTX(Control TX, 控制发送)模块：**主要功能是根据接收到的 pkt\_bufid，从集中缓存区中读取报文，把报文的位宽由 134bit 转换为 8bit 并添加帧前导符和帧开始符，同时释放 pkt\_bufid；识别标准以太网报文和 TSN 报文，并将 mac\_entry\_hit 和 inport 存放在标准以太网报文的 DMAC 字段；计算 PTP 报文的透明时钟并将其累加到 PTP 报文透明时钟域，将报文传输时钟域由系统时钟域切换到 GMII 发送时钟域。

### 2.1.1.5. 内部处理逻辑

**FLT(Forward Lookup Table, 转发查表)模块:** 主要功能是对每个接口传来的描述符进行延时处理, 避免描述符过快传输到网络发送模块/控制发送模块 (但报文还未写入到报文集中缓存区中) 而导致网络发送模块/控制发送模块从报文集中缓存区中读空问题; 基于时分复用技术接收 9 个接口传来的描述符, 并进行串行传输; 识别标准以太网报文描述符和 TSN 报文描述符, 将标准以太网报文描述符用 DMAC 查找 MAC 转发表, 将 TSN 报文描述符用 FlowID 去查找 FlowID 转发表, 并根据查表结果将报文描述符输出给对应接口; 根据描述符查转发表的结果, 计算每个描述符输出接口数量, 并将该数量及其对应的 pkt\_bufid 输出给报文集中缓存模块, 报文集中缓存模块将该信息作为 pkt\_bufid 释放条件。

表 2-4 转发表数据格式

名称	含义	备注
outport[8:0]	输出端口号(bitmap), 总共 8 个网络接口与 1 个主机接口。	使用 RAM 进行实现, 深度为 16K

**PCB(Pkt Centralize Buffer, 报文集中缓存)模块:** 主要功能是对架构需要转发的所有报文进行集中缓存, 对空闲地址缓存区 pkt\_bufid 进行缓存管理。每个 pkt\_bufid 都需要设计一个计数器来对输出端口数量进行计数, pkt\_bufid 每释放一次, 将计数器减一; 当 pkt\_bufid 使用完进行释放的时候需要检测该 pkt\_bufid 对应计数器的值, 只有当计数器值为 0 才能进行将 pkt\_bufid 写入空闲地址缓存区中, 当不为 0 意味着该 pkt\_bufid 存着一个组播报文并且该报文还未从所有需要输出的端口输出。报文缓存区将 1024KB 的空间划分成 512 个报文

缓存块，每个报文缓存块能缓存一个 2KB 的报文。

表 2-5 报文缓存区数据格式

地址[8:0]	内容[133:0]
0-127	第 1 个报文缓存块
128-255	第 2 个报文缓存块
...	..
65408-65535	第 512 个报文缓存块

表 2-6 空闲地址缓存区数据格式

名称	含义	备注
pkt_bufid[8:0]	当前“报文缓存区”中空闲的报文缓存块 ID 号。	使用 RAM 进行实现，深度为 512。

**CPA(Command Parse, 命令解析)模块：**负责将接收到 HCP 的 command 命令进行解析，来实现对本地寄存器、转发表、门控列表的配置；根据接收到的读命令，将读数据封装在响应中输出给 HCP 模块。

表 2-7 wr\_command/rd\_command/rd\_command\_ack 命令格式

位置	位宽	名称	说明
[203:196]	8	node_id	该字段用来标识对哪个节点进行读写。每个 TSE 或 TSS 都有一个唯一的节点 ID。该字段在 TSN 网卡+TSN 交换机模式下使用到。
[195:188]	8	dest_module_id	该字段用来标识对一个节点内的哪个模块进行控制。TSE 或 TSS 内部每个子模块都有一个唯一的模块 ID
[187:184]	4	type	4'b0001:寄存器或表项的写命令； 4'b0010:寄存器或表项的读命令； 4'b0110:寄存器或表项的读响应。
[183:152]	32	addr	寄存器或表项的读/写地址
[151:0]	152	data	寄存器或表项的读/写数据



## 2.1.2. TSS 的处理流程

### 2.1.2.1. 网络口进网络口出的处理流程

每个网口配置的端口类型皆为合作类型,网口进入的报文有 TSN 报文和标准以太网报文,且都是通过查表去确认输出端口,报文的详细处理流程如下:

报文由网口 (GMII\_RX) 进入网络接收模块,完成 GMII 时钟域到架构内部处理时钟域的转换,并记录报文接收时间戳;会识别报文是标准以太网还是 TSN 报文,然后根据交换处理逻辑所处的阶段来决定是否传输报文:如果是标准以太网报文,只要交换处理逻辑完成初始化,所有标准以太网报文都可以进行传输。如果是 TSN 报文,若交换处理逻辑处于初始化阶段,丢弃所有报文,若交换处理逻辑处于配置阶段,只传输配置报文;若交换处理逻辑处于时钟同步阶段,传输非时间敏感报文;若交换处理逻辑处于正常工作阶段,传输所有报文。将报文往帧解析模块发送;

帧解析模块收到报文后,对报文进行解析,首先识别报文是标准以太网报文还是 TSN 报文,并提取报文的特征信息与报文集中缓存模块分配的 pkt\_bufid 构造成描述符,然后根据 bufid 剩余数量与报文阈值的大小关系来对报文进行监管:若 bufid 剩余数量少于 RC 报文阈值时,将 RC 报文和 BE 报文均丢弃,若 bufid 剩余数量少于 BE 报文阈值时,将 BE 报文丢弃。将报文描述符发送到转发查表模块;同时帧解析模块将 8bit 的数据写入到 134bit 的寄存器中,当一个寄存器写满了 134bit 便将寄存器中的数据传输到输入缓存接口模块,完成报文的位宽转换;

输入缓存接口模块接收 134bit 的分组数据, 因报文集中缓存区是采用分时复用的方式进行数据的写入, 因此输入缓存接口模块需要等到报文集中缓存模块返回一个确认信号之后才能进行下一次的数据写入。当其中一个寄存器写满, 且还未收到报文集中缓存模块返回的确认信号时, 后续传来的数据就写入到另一个寄存器, 每个寄存器写满再发送给报文集中缓存模块进行报文的缓存, 以此轮询, 直到报文全部写入完成;

转发查表模块会识别标准以太网报文描述符和 TSN 报文描述符, 将标准以太网报文描述符用 DMAC 查找 MAC 转发表, 将 TSN 报文描述符用 FlowID 去查找 FlowID 转发表, 并根据查表结果将报文描述符输出给对应网络接口;

输出端口逻辑中的网络入队控制模块接收到 pkt\_bufid 与 pkt\_type 后, 根据队列门控模块的门控信息与 pkt\_type 进行缓存队列的选择, 并将选择好的 queue\_id 与 pkt\_bufid 一起发送给网络队列管理模块进行缓存。

网络输出调度模块根据队列门控模块的门控信息以及每个队列的状态信息计算出最优先调度的 queue\_id, 并将此 queue\_id 中的第一个 pkt\_bufid 缓存的地址发送给网络队列管理模块, 等待网络队列管理模块将对应的队列中的数据读取出来, 将第一个 pkt\_bufid 的地址作为 pkt\_bufid 发送给网络发送模块, 并根据读取出来的数据更新此 queue\_id 中第一个 pkt\_bufid 所缓存的地址。

网络输出调度模块接收到 pkt\_bufid 之后发送给网络发送模块, 网络发送模块根据 pkt\_bufid 往报文集中缓存模块进行报文的提取。网络发送模块内部维持两个寄存器, 依次将 134bit 的数据转换成 8bit 的数据往后发送, 跨时钟域处理后往接口 (GMII\_TX) 输出; 当一个

寄存器读空之后再往报文集中缓存模块进行下一个 134bit 数据的读取，直到报文数据全部读取完成。

2.1.2.2. 网络口进控制口出的处理流程

网络口进控制口出的处理流程和网络口进网络口出的处理流程唯一的不同是在转发查表模块，针对报文查表不命中，如果是标准以太网报文，报文会广播到除报文进入端口以外的所有端口进行输出，如果是 TSN 报文，查表不命中就直接从控制口进行输出。针对查表报文命中，只有在报文时 TSN 报文的时候，报文才会往控制口输出。

2.1.2.3. 控制口进网络口出的处理流程

控制口进网络口出的处理流程和网络口进网络口出的处理流程一致。

2.2. HCP 总体设计

2.2.1. HCP 内部功能划分

硬件控制点 HCP 的内部功能划分如图 2-7 所示，下面对模块的功能进行描述。

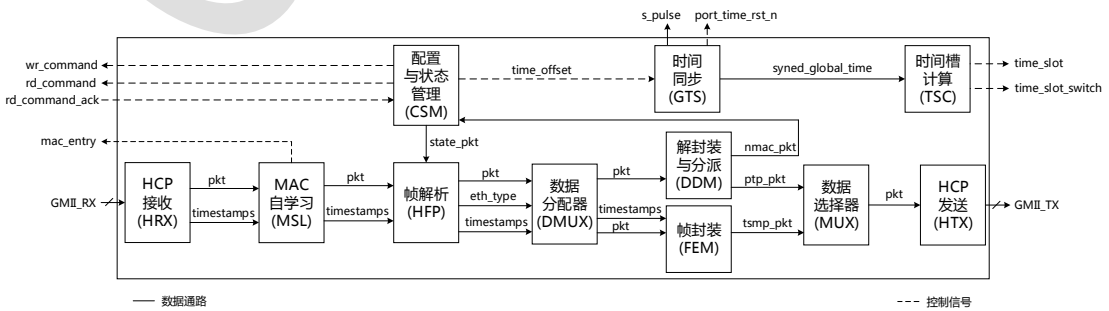


图 2-7 硬件控制点 HCP 内部功能划分

HCP 总体架构图中的信号格式含义如表 2-8 所示。

表 2-8 HCP 总体架构图中信号含义

信号	位宽	含义
pkt_9 (非报文集中缓存模块的信号)	9	报文体数据, 具体格式参考附录 A
timestamps	19	接收时间戳信号
mac_entry	-	MAC 转发表
eth_type	16	报文类型
nmac_pkt	9	配置报文
ptp_pkt	9	同步报文
state_pkt	8	状态报文
tsmp_pkt	9	封装报文
s_pulse	1	同步脉冲信号
port_time_rst_n	1	端口复位信号
time_offset	49	时钟偏移值
syned_global_time	48	全局时钟信号
time_slot	11	时间槽信号
time_slot_switch	1	时间槽切换信号
GMII_RX	8	GMII 接口接收信号
GMII_TX	8	GMII 接口发送信号
command	204	读、写命令
command_ack	204	读命令响应

**HRX (HCP RX, hcp 接收) 模块:** 主要功能是接收控制接口传来的报文, 将报文传输时钟域从 GMII 接收时钟域切换到架构内部时钟域, 以及记录控制接口接收时间同步报文的时间, 并存放在 TSNTag 中。根据硬件控制点逻辑所处的阶段来决定是否传输报文: 若硬件控制点逻辑处于初始化阶段, 丢弃所有报文; 若硬件控制点逻辑处于配置阶段, 只传输配置报文; 若硬件控制点逻辑处于时钟同步阶段, 传输非时间敏感报文; 若硬件控制点逻辑处于正常工作阶段, 接收所有报文。

**MSL(Mac-address Self Learning, MAC 自学习)模块:** 主要功能是维护 MAC 转发表中表项内容; 识别并丢弃查 (MAC 转发) 表未匹配命中报文, 从查 MAC 转发表未命中报文中提取出 SMAC 和输入接口号 inport, 当 MAC 转发表中不存在该表项{SMAC,inport}时, 将该表项{SMAC,inport}直接写到 MAC 转发表中。

**HFP(Hcp Frame Parse, 帧解析)模块:** 主要功能是从报文中提取以太网类型, 将以太网类型和接收时间戳组成报文描述符; 对控制接口传来的报文和状态上报报文进行选择, 将控制接口传来的报文及其描述符先缓存在队列中, 在硬件控制点无上报请求时, 将队列中的报文及其描述符读出并输出给下一级模块, 若硬件控制点有上报请求且控制接口传来的报文未进行传输时, 将状态上报报文输出给下一级模块。

**DMUX (DeMultipleXer, 数据分配器) 模块:** 主要功能是根据以太网类型对报文进行分派, 并根据硬件控制点所处的阶段决定是否丢弃报文。本模块在初始化阶段将所有报文丢弃, 在配置阶段/时钟同步阶段/正常工作阶段将接收到的 TSMP 报文 (交换机配置帧、PTP 封装帧、ARP 封装帧) 及其描述符分派给解封装与分派模块, 在时钟同步阶段/正常工作阶段将接收到的非 TSMP 报文 (标准以太网非 IP 报文、PTP 报文、NMAC 状态上报报文) 分派给帧封装模块进行封装处理。

**DDM (Decapsulation\_Dispatch\_Module, 解封装与分派) 模块:** 将接收到的交换机配置帧、PTP 封装帧、ARP 封装帧分别解封装成 NMAC 配置帧、PTP 帧、ARP 响应帧, 并将 NMAC 配置帧分派至配

置与状态管理模块，记录 PTP 帧发送的时间戳，将其和 ARP 响应帧分派至数据选择器模块。

**FEM (Frame\_Encapsulation\_Module, 帧封装) 模块：**主要功能是将接收到的 ARP 请求帧、PTP 帧、NMAC 状态上报帧封装到 TSMP 报文中，针对 PTP 帧，会记录其接收时间戳、计算透明时钟并累加到透明时钟域。

**MUX (MultipleXer, 数据选择器) 模块：**主要功能是对封装后的帧和解封装后的帧进行选择，并输出到控制发送模块。

**CSM (Configuration and State Manage, 配置与状态管理) 模块：**主要功是对接收到的 NMAC 报文进行解析，生成写命令；根据接收到的报文接收/发送/丢弃脉冲进行计数；以及周期性上报状态。

**GTS (Global\_Time\_Sync, 全局时钟同步) 模块：**主功能是维护一个 48bit 的全局时钟并根据接收到的本地时钟与主时钟的偏移值 offset 对全局时钟进行修正；维护一个局部时钟，将局部时钟传给其它模块，用于记录时间同步报文在硬件控制点的接收/发送时钟，进而计算时间同步报文在硬件控制点中传输的透明时钟；维护一个上报周期计数器，当每经过一个上报周期输出一个上报脉冲信号。

**TSC (Time\_Slot\_Calculation, 时间槽计算) 模块：**根据全局时间、时间槽长度和周期，计算当前时刻处于一个周期内的哪个时间槽。

**HTX (HCP TX, hcp 发送) 模块：**主要功能是计算时间同步报文的透明时钟并更新透明时钟域、将报文传输时钟域从内部处理时钟域切换到 GMII 发送的时钟域、增加帧前导符和帧开始符后将报文从控制接口输出。

### 2.2.2. HCP 的处理流程

硬件控制点逻辑的处理流程包括报文的封装与解封装、配置报文的解析、状态报文的上报和 MAC 自学习。

#### 2.2.2.1. 配置报文解析

HCP 会对交换机配置报文进行解析,实现对 HCP 和 TSE 或 HCP 和 TSS 中寄存器、表的配置。

控制接收模块接收到交换机配置报文后,将报文每拍数据的位宽由 8bit 转换为 9bit 后,对报文进行跨时钟域(从 GMII 接收时钟域到 HCP 内部逻辑工作时钟域)转换,并根据 HCP 所处的阶段来对报文进行丢弃或传输:若 HCP 处于初始化阶段/配置阶段,丢弃交换机配置报文;若 HCP 处于时钟同步阶段/正常工作阶段,传输 TSMP 报文。

帧解析模块从交换机配置报文中提取以太网类型,将以太网类型和接收时间组成报文描述符,现将报文及其描述符写到 fifo 中,在 HCP 无上报请求时,将 fifo 中的报文和描述符读出并输出给数据分配器。

数据分配器根据报文的以太网类型为 0xff01 判定该报文为 TSMP 报文(交换机配置报文属于 TSMP 报文中的一种类型),在 HCP 处于初始化阶段时,将交换机配置报文丢弃,在 HCP 处于配置阶段/时钟同步阶段/正常工作阶段,将交换机配置报文输出给解封装与分派模块。

在解封装与分派模块对交换机配置报文进行解封装与分派。将交换机配置帧解封装为 NMAC 配置帧,并分派给配置与状态管理模块

进行解析。

配置与状态管理模块解析 NMAC 报文，从 NMAC 报文提取该报文中携带的配置数据个数，并根据配置的基地址，将每个配置数据封装都封装到写命令中并输出给端处理逻辑 TSE 或交换处理逻辑 TSS。

#### 2.2.2.2. 状态报文上报

HCP 会对端处理逻辑 TSE 和硬件控制点逻辑 HCP 的状态，或交换处理逻辑 TSS 和硬件控制点逻辑 HCP 的状态进行周期性上报。

本地时钟每经过一个上报周期，时钟同步模块会输出一个上报脉冲给配置与状态管理模块，配置与状态管理模块检测到上报脉冲后，向帧解析模块发送上报请求，在接收到帧解析模块传来的响应信号后，会根据上报类型，向端处理逻辑 TSE 或交换处理逻辑 TSS 发送读命令，读命令中包含需读取数据的地址；当接收到端处理逻辑 TSE 或交换处理逻辑 TSS 发来的读响应后，从读响应中解析出读数据并将其作为状态报文中的数据输出给帧解析模块。

帧解析模块在监测到配置与状态管理模块传来的上报请求后，当本模块无报文输出时，发送响应给配置与状态管理模块，然后开始将配置与状态管理模块传来的状态报文输出给数据分配器。

数据分配器根据报文的以太网类型为 0x1662 判定该报文为状态上报报文，在 HCP 处于时钟同步阶段/正常工作阶段，将状态上报报文输出给帧封装模块。

帧封装模块将状态上报报文封装到 TSMP 报文中并输出给数据



选择器。

数据选择器对解封装后的报文和封装后的报文进行选择，在封装后的报文有传输请求时，将该路报文输出给控制发送模块。

控制发送模块将报文传输时钟域从内部处理时钟域切换到 GMII 发送的时钟域、增加帧前导符和帧开始符后将报文从控制接口输出。

### 2.2.2.3. PTP 封装报文解封装

HCP 会对 PTP 封装报文进行解封装。

HCP 接收模块接收到 PTP 封装报文后，将报文每拍数据的位宽由 8bit 转换为 9bit 后，对报文进行跨时钟域（从 GMII 接收时钟域到 HCP 内部逻辑工作时钟域）转换，并记录 HCP 接口接收报文的时间，根据 HCP 所处的阶段来对帧进行丢弃或传输：若 HCP 处于初始化阶段/配置阶段，丢弃 PTP 封装报文；若 HCP 处于时钟同步阶段/正常工作阶段，传输 PTP 封装报文。

帧解析模块从 PTP 封装报文中提取以太网类型，将以太网类型和接收时间组成报文描述符，先将报文及其描述符写到 fifo 中，在 HCP 无上报请求时，将 fifo 中的报文和描述符读出并输出给数据分配器。

数据分配器根据报文的以太网类型为 0xff01 判定该报文为 TSMP 报文（PTP 封装报文属于 TSMP 报文），在 HCP 处于初始化阶段时，将 PTP 封装报文丢弃，在 HCP 处于配置阶段/时钟同步阶段/正常工作阶段，将 PTP 封装报文输出给解封装与分派模块。

在解封装与分派模块对 PTP 封装报文进行解封装与分派。将 PTP 封装报文解封装为 PTP 报文、，并分派给数据选择器，同时记录 PTP 报文发送时间戳。

数据选择器对解封装后的报文和封装后的报文进行选择，在解封装后的报文有传输请求时，将该路报文输出给控制发送模块。

HCP 发送模块将报文传输时钟域从内部处理时钟域切换到 GMII 发送的时钟域、增加帧前导符和帧开始符后将报文从控制接口输出，其中针对 PTP 报文，会计算 PTP 报文的透明时钟并更新透明时钟域。

#### 2.2.2.4. PTP 报文报文封装

HCP 会对 PTP 报文进行封装，下面对控制接口接收的 PTP 报文的封装处理流程进行介绍。

HCP 接收模块接收到 PTP 报文后，将报文每拍数据的位宽由 8bit 转换为 9bit 后，对报文进行跨时钟域（从 GMII 接收时钟域到 HCP 内部逻辑工作时钟域）转换，并记录控制接口接收报文的时间，根据 HCP 所处的阶段来对帧进行丢弃或传输：若 HCP 处于初始化阶段/配置阶段，丢弃 PTP 报文；若 HCP 处于时钟同步阶段/正常工作阶段，传输 PTP 报文。

帧解析模块从 PTP 报文中提取以太网类型，将以太网类型和接收时间组成报文描述符，先将报文及其描述符写到 fifo 中，在 HCP 无上报请求时，将 fifo 中的报文和描述符读出并输出给数据分配器。

数据分配器根据报文的以太网类型为 0x98f7 判定该报文为 PTP

报文，在 HCP 处于初始化阶段/配置阶段时，将 PTP 报文丢弃，在 HCP 处于时钟同步阶段/正常工作阶段，将 PTP 报文输出给帧封装模块。

帧封装模块将状态上报报文封装到 TSMP 报文中并输出给数据选择器，其中针对 PTP 报文，会计算 PTP 报文在 HCP 中传输的透明时钟并更新透明时钟域。

数据选择器对解封装后的报文和封装后的报文进行选择，在封装后的报文有传输请求时，将该路报文输出给控制发送模块。

控制发送模块将报文传输时钟域从内部处理时钟域切换到 GMII 发送的时钟域、增加帧前导符和帧开始符后将报文从控制接口输出。

#### 2.2.2.5. MAC 自学习

控制接收模块接收到标准以太网报文后，将报文每拍数据的位宽由 8bit 转换为 9bit 后，对报文进行跨时钟域（从 GMII 接收时钟域到 HCP 内部逻辑工作时钟域）转换，根据 HCP 所处的阶段来对帧进行丢弃或传输：若 HCP 处于初始化阶段，丢弃标准以太网报文；若 HCP 处于配置阶段/时钟同步阶段/正常工作阶段，传输标准以太网报文。

MAC 自学习模块根据以太网类型为 0x0800 来识别标准以太网报文，从标准以太网报文的 DMAC 中提取输入接口号 inport 和源 MAC；丢弃查 MAC 转发表未命中报文；在本模块记录 MAC 转发表中已有表项内容及其地址，并检查接收的（查表未命中报文）SMAC 和输入接口号 inport 在 MAC 转发表是否已存在，若已存在，则不用将 SMAC

和 inport 写入到 MAC 转发表；若不存在，则将 {SMAC,inport} 及其地址写入到 MAC 转发表。

## 附录A. 数据格式定义

### A.1. TSN 标签格式

表 A-1 时间同步报文的 TSNTag

字段	位宽 bit	位置	描述
pkt type	3	[47:45]	报文类型，其中 3'b100 表示时间同步报文（其他报文类型见表 A-2）
flow id/local id	14	[44:31]	流标识或者内部 MAC 地址，其中静态流量使用 flowID，每条静态流有唯一一个 flowID，动态流使用 local id
reserve	12	[30:19]	保留
rx_timestamps	19	[18:0]	接口接收到时间同步报文的本地时间，用于计算 PTP 报文在设备中的透明时钟

表 A-2 非时间同步报文的 TSNTag

字段	位宽 bit	位置	描述
pkt type	3	[47:45]	报文类型，其中 3'b000 表示 ST 报文，3'b001 表示 ST 报文，3'b010 表示 ST 报文 3'b011 表示 RC 报文，3'b101 表示 NMAC 分组，3'b110 表示 BE 分组，3'b111：需重组的分组
flow id/local id	14	[44:31]	流标识或者本地标识，其中静态流量使用 flowid 来标识，每条静态流有唯一一个 flowid，动态流使用 localid 来标识
sequence id	16	[30:15]	用于标识每条流中报文的序列号
frag flag	1	[14]	分片标识位，该字段在报文分片情况下会被使用到，用于标识报文最后一个分片，其中 1'b0 表示报文非最后一个分片，1'b1 表示报文最后一个分片
frag id	4	[13:10]	分片编号，该字段在报文分片情况下会被使用到，用于为报文的每个分片进行编号
inject addr	5	[9:5]	ST 流在 TSN 网卡发送端的缓存地址

submit addr	5	[4:0]	ST 流在 TSN 网卡接收端的缓存地址
-------------	---	-------	----------------------

## A.2. 报文描述符格式

TSNSwitch3.2 中报文描述符格式如下表 A-3 所示。

表 A-3 报文描述符格式

字段	位宽 bit	位置	说明
dmac	48	[71:24]	标准以太网报文/TSN 报文 DMAC 字段 48bit 数据
standeth_tsn_flag	1	[23]	标准以太网报文和 TSN 报文标识位, 其中 1'b1 表示标准以太网报文, 1'b0 表示 TSN 报文
inport	4	[22:19]	报文输入 TSN 交换 IP 的接口号
lookup_en	1	[18]	查转发表使能信号, 其中 1'b1 表示报文需要查找转发表, 1'b0 表示报文不需要查找转发表
outport	9	[17:9]	报文在不查转发表情况下的输出接口号, 只有在 lookup_en 为 1'b0 时, 该字段才被使用
pkt_bufid	9	[8:0]	报文在集中缓存区中的缓存空间

## 附录B. 配置说明

### B.1. 硬件地址

TSN 交换机需配置内容包括控制寄存器和表, 每个控制寄存器和每条表项都有唯一的一个硬件地址, 控制器可根据硬件地址来对 TSN 网卡中不同控制寄存器或表项进行配置。硬件地址为 27bit, 其格式详见表 B-1 所示, 其中高 7bit 用于标识控制寄存器或表项所在模块的编号, TSN 网卡中每个模块都有唯一的一个编号(简称“模块 ID”), 低 20bit 用于标识控制寄存器或表项在模块中的地址(简称“模块地址”), 每个控制寄存器或表项在模块中的地址是唯一的。

表 B-1 控制寄存器和表的硬件地址格式

/	位置	描述
硬件地址	[26:20]	控制寄存器或表项所在模块的编号，即模块 ID；模块 ID 的分配详见表 B-2
	[19:0]	控制寄存器或表项在模块中的地址，即模块地址；模块地址范围为 0x0_0000~0xf_ffff

表 B-2 TSN 网卡中模块 ID 的分配

模块	CSM	TIS	TSS	QGC_P0	QGC_P1	QGC_P2	QGC_P3	QGC_P4
模块 ID	0x0	0x1	0x2	0x3	0x4	0x5	0x6	0x7
模块	QGC_P5	QGC_P6	QGC_P7	GTS	FLT	PMD	FIM	FMA_P0
模块 ID	0x8	0x9	0xa	0xb	0xc	0xd	0xe	0xf
模块	FMA_P1	FMA_P2	FMA_P3	FMA_P4	FMA_P5	FMA_P6	FMA_P7	-
模块 ID	0x10	0x11	0x12	0x13	0x14	0x15	0x16	-

## B.2. 配置内容

TSN 交换机需配置内容包括控制寄存器和表，其中表包括映射表、转发表和门控表。

### B.2.1. 控制寄存器

控制寄存器包括 TSN 硬件状态寄存器、时间同步寄存器、报文调度寄存器、接口类型寄存器、报文监管寄存器和状态上报寄存器，控制寄存器的描述详见表 B-3 所示。

表 B-3 控制寄存器描述

分类	硬件地址		名称	位宽 bit	描述
	模块 ID	模块地址			
TSN 硬件状态	7'h0	20'h3	hardware_state	2	TSN 硬件所处的状态，其中 2'd0 表示 TSN 硬件处于初始化阶段，不接收处理任何报文；2'd1 表示 TSN 硬件处

					于配置阶段，只接收处理配置报文；2'd2 表示 TSN 硬件处于时间同步阶段，接收处理非 ST 报文；2'd3 表示 TSN 硬件处于正常工作阶段，接收处理所有报文
时间同步		20'h1	time_offset_h	17	time_offset_h[16]为 1'b0 表示从时钟与主时钟偏移值为负值，time_offset_h[16]为 1'b1 表示从时钟与主时钟偏移值为正值；time_offset_h[15:0]表示从时钟与主时钟偏移值的高 16bit，{time_offset_h[15:0], time_offset_l[31:7]}单位为 us
		20'h0	time_offset_l	32	从时钟与主时钟偏移值的低 32bit，{time_offset_h[15:0], time_offset_l[31:7]}单位为 us，{time_offset_l[6:0]}单位为 8ns
		20'hb	time_offset_period	24	从时钟与主时钟偏移值的补偿周期；TSN 硬件每经过一个补偿周期，会对本地时钟进行一次补偿，单位为 8ns
报文调度		20'h2	time_slot_length	10	时间槽长度，单位 us；取值范围为[4us,512us]且值必须为 2 <sup>n</sup>
		20'h5	qbv_or_qch	1	802.1Qbv 或 802.1Qch 调度模型的选择信号，其中 1'b0 表示 802.1Qbv 调度模型，1'b1 表示 802.1Qch 调度模型
		20'h8	inject_slot_period	11	注入周期，单位为时间槽
		20'h9	submit_slot_period	11	提交周期，单位为时间槽
接口类型		20'h4	port_type	8	接口类型，其中 1'b0 表示接口为合作类型，1'b1 表示接口为非合作类型
报文监管		20'hc	rc_regulation_value	9	rc 报文监管阈值，当 TSN 硬件中空闲 pkt_bufid 个数少于 rc 报文监管阈值时，丢弃 rc 报文和 be 报文
		20'hd	be_regulation_value	9	be 报文监管阈值，当 TSN 硬件中空闲 pkt_bufid 个数少于 be 报文监管阈值时，丢

状态 上报					弃 be 报文
		20'he	unmap_ regulation_ value	9	未经映射报文监管阈值，当 TSN 硬件中空闲 pkt_bufid 个数少于未经映射报文监管阈值时，丢弃未经映射报文
		20'h6	report_type	16	上报类型
		20'h7	report_en	1	上报使能，其中 1'b0 表示上报功能开启，1'b1 表示上报功能关闭
		20'ha	report_period	12	上报周期，TSN 硬件只支持两种配置数值，分别是 12'd1 和 12'd1000，其中 12'd1 表示上报周期为 1024us，12'd1000 表示上报周期为 1024*1024us

### B.2.2. TSN 报文转发表

TSN 报文转发表用于实现对 TSN 报文的转发，其格式如表 B-5 所示。TSN 报文转发表设计在转发查表（FLT）模块，FLT 模块会从接收到的报文描述符中提取出 flowid，将 flowid 作为查表地址来查找 TSN 报文转发表，查表结果为输出端口号，输出端口号中某位为高则表示报文需要从对应端口输出，本模块根据查表结果将描述符内容转发给对应的输出端口。TSN 报文转发表的深度为 16K，即 TSN 交换机组成的整个网络最多能够支持 16K 条流的转发。

表 B-4 TSN 报文转发表格式

名称	含义	备注
outport[8:0]	输出端口号(bitmap)，总共 8 个网络交换接口与 1 个控制接口。	使用 RAM 进行实现，深度为 16K



B.2.3. 门控列表

TSN 交换机为了实现 802.1Qbv 调度模型，在每个网络交换输出接口均设计一个门控列表，该门控列表最多支持 1024 条表项，每条表项的描述如表 B-5 所示。

表 B-5 门控列表描述

硬件地址		名称	位置	描述
模块 ID	模块地址			
7'h3~7'ha(0 号接口~7 号接口队列门控)	20'h000000 - 20'h0003FF	gate_table_entry_N	[7]	第 7 个队列的门控状态，其中 0 表示门控关闭，1 表示门控开启
			[6]	第 6 个队列的门控状态，其中 0 表示门控关闭，1 表示门控开启
			[5]	第 5 个队列的门控状态，其中 0 表示门控关闭，1 表示门控开启
			[4]	第 4 个队列的门控状态，其中 0 表示门控关闭，1 表示门控开启
			[3]	第 3 个队列的门控状态，其中 0 表示门控关闭，1 表示门控开启
			[2]	第 2 个队列的门控状态，其中 0 表示门控关闭，1 表示门控开启
			[1]	第 1 个队列的门控状态，其中 0 表示门控关闭，1 表示门控开启
			[0]	第 0 个队列的门控状态，其中 0 表示门控关闭，1 表示门控开启

队列门控模块采用 RAM 来缓存门控列表，RAM 位宽为 8bit，深度为 1024，该 RAM 格式如表 B-6 所示。

表 B-6 缓存门控列表的 RAM 格式

索引地址	位宽（bit）	深度	占用资源（Kbit）
时间槽	8	1024	8

附录C. 配置/上报报文格式

C.1. 配置报文格式

TSN 交换机的控制寄存器和表的配置内容是通过以太网报文携带的，用户通过在配置报文中指定配置的基地址、配置的个数和配置

的内容，来实现对某个寄存器/表项或地址连续的多个寄存器/表项进行配置。

配置报文的格式详见图 C-1，配置报文 TSMP 以太网头和 NMAC 以太网头的目的 MAC 和源 MAC 均为 TSNtag 语义（源 MAC 也设计为 TSNtag 语义原因在于硬件在将 NMAC 上报报文和 PTP 报文等封装到 TSMP 协议中时，可以直接将配置报文 TSMP 以太网头中 SMAC 作为报文封装的 TSMP 以太网头中的 DMAC，并且在构造 NMAC 上报报文时，可以直接将配置报文 NMAC 以太网头中 SMAC 作为 NMAC 上报报文以太网头中的 DMAC，TSN 网络可识别处理 TSMP 报文和 NMAC 上报报文），配置报文的以太网类型为 0xff01，子类型为 0x2，配置报文内部还包含 NMAC 协议，其以太网类型为 0x1662，配置报文中第 30B 表示报文中携带的配置数据个数，第 32B~第 35B 表示该报文所有配置数据的基地址，为每个配置数据预留 32bit 的存放位宽。当配置数据个数为 N（十进制）个时，第一个配置寄存器/表项的地址为基地址+0，第二个配置寄存器/表项的地址为基地址+1，第 N 个配置寄存器/表项的地址为基地址+(N-1)。

		bit							
		31	24	23	16	15	8	7	0
Byte	0 3	目的TSN标签[47:16]							
	7	目的TSN标签[15:0]				源TSN标签[47:32]			
	11	源TSN标签[31:0]							
	15	长度/类型（0xff01）				子类型（0x2）		接口号	
	19	目的TSN标签[47:16]							
	23	目的TSN标签[15:0]				源TSNtag[47:32]			
	27	源TSNtag[31:0]							
	31	长度/类型（0x1662）				寄存器/表项配置个数n		保留	
	35	寄存器/表项配置基地址							
	39	第一个寄存器/表项配置数据							
	67~123	...							
	71~127	第n个寄存器/表项配置数据							
	79~131	CRC							

图 C-1 配置报文格式

### C.2. 上报报文格式

在 HCP 的配置与状态管理模块构造的上报报文为 NMAC 协议报文（其报文格式如下图 C-3 所示），该报文在 HCP 的帧封装模块会被封装到 TSMP 协议（在封装时去掉 NMAC 协议前 16B，在报文末尾新增 2B 用于放置上报类型）中。

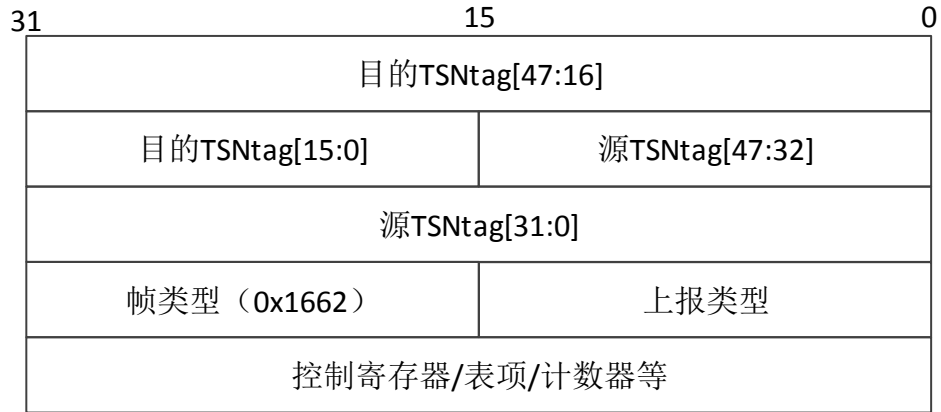


图 C-3 NMAC 上报报文格式

表 C-2 上报类型格式

上报类型 (16bit)		含义
高 6bit	低 10bit	
6'd0	10'd0	(控制器配置的) 单个寄存器, 包含配置完成寄存器、端口状态寄存器、时间槽长度寄存器、时间偏移寄存器、上报周期寄存器、上报类型寄存器、应用周期寄存器。
6'd1	n (十进制)	第 32n 条到第 32n+31 条转发表表项, $0 \leq n \leq 511$ (十进制), 且 n 取整数
6'd2	n (十进制)	第 32n 条到第 32n+31 条注入时刻表表项, $0 \leq n \leq 31$ (十进制), 且 n 取整数。(暂无)
6'd3	n (十进制)	第 32n 条到第 32n+31 条提交时刻表表项, $0 \leq n \leq 31$ (十进制), 且 n 取整数。(暂无)
6'd4	n (十进制)	0 号输出接口的第 32n 条到第 32n+31 条门控表表项, $0 \leq n \leq 31$ (十进制), 且 n 取整数
6'd5	n (十进制)	1 号输出接口的第 32n 条到第 32n+31 条门控表表项, $0 \leq n \leq 31$ (十进制), 且 n 取整数
6'd6	n (十进制)	2 号输出接口的第 32n 条到第 32n+31 条门控表表项, $0 \leq n \leq 31$ (十进制), 且 n 取整数
6'd7	n (十进制)	3 号输出接口的第 32n 条到第 32n+31 条门控表表项, $0 \leq n \leq 31$ (十进制), 且 n 取整数
6'd8	n (十进制)	4 号输出接口的第 32n 条到第 32n+31 条门控表表项, $0 \leq n \leq 31$ (十进制), 且 n 取整数
6'd9	n (十进制)	5 号输出接口的第 32n 条到第 32n+31 条门控表表项, $0 \leq n \leq 31$ (十进制), 且 n 取整数
6'd10	n (十进制)	6 号输出接口的第 32n 条到第 32n+31 条门控表表项, $0 \leq n \leq 31$ (十进制), 且 n 取整数
6'd11	n (十进制)	7 号输出接口的第 32n 条到第 32n+31 条门控表表项, $0 \leq n \leq 31$ (十进制), 且 n 取整数
6'd12	10'd0	上报状态寄存器

上报类型 (16bit)		含义
高 6bit	低 10bit	
6'd13	n (十进制)	TSN 网卡中报文映射与分派模块中第 2n 条和第 2n+1 条映射表表项, $0 \leq n \leq 15$ (十进制), 且 n 取整数
6'd14	n (十进制)	TSN 网卡中帧逆映射模块中第 4n 条到第 4n+3 条逆映射表表项, $0 \leq n \leq 63$ (十进制), 且 n 取整数
6'd15	n (十进制)	0 号输入接口的帧映射模块中第 2n 条和第 2n+1 条映射表表项, $0 \leq n \leq 15$ (十进制), 且 n 取整数
6'd16	n (十进制)	1 号输入接口的帧映射模块中第 2n 条和第 2n+1 条映射表表项, $0 \leq n \leq 15$ (十进制), 且 n 取整数
6'd17	n (十进制)	2 号输入接口的帧映射模块中第 2n 条和第 2n+1 条映射表表项, $0 \leq n \leq 15$ (十进制), 且 n 取整数
6'd18	n (十进制)	3 号输入接口的帧映射模块中第 2n 条和第 2n+1 条映射表表项, $0 \leq n \leq 15$ (十进制), 且 n 取整数
6'd19	n (十进制)	4 号输入接口的帧映射模块中第 2n 条和第 2n+1 条映射表表项, $0 \leq n \leq 15$ (十进制), 且 n 取整数
6'd20	n (十进制)	5 号输入接口的帧映射模块中第 2n 条和第 2n+1 条映射表表项, $0 \leq n \leq 15$ (十进制), 且 n 取整数
6'd21	n (十进制)	6 号输入接口的帧映射模块中第 2n 条和第 2n+1 条映射表表项, $0 \leq n \leq 15$ (十进制), 且 n 取整数
6'd22	n (十进制)	7 号输入接口的帧映射模块中第 2n 条和第 2n+1 条映射表表项, $0 \leq n \leq 15$ (十进制), 且 n 取整数

C.2.1. 单个寄存器上报报文格式

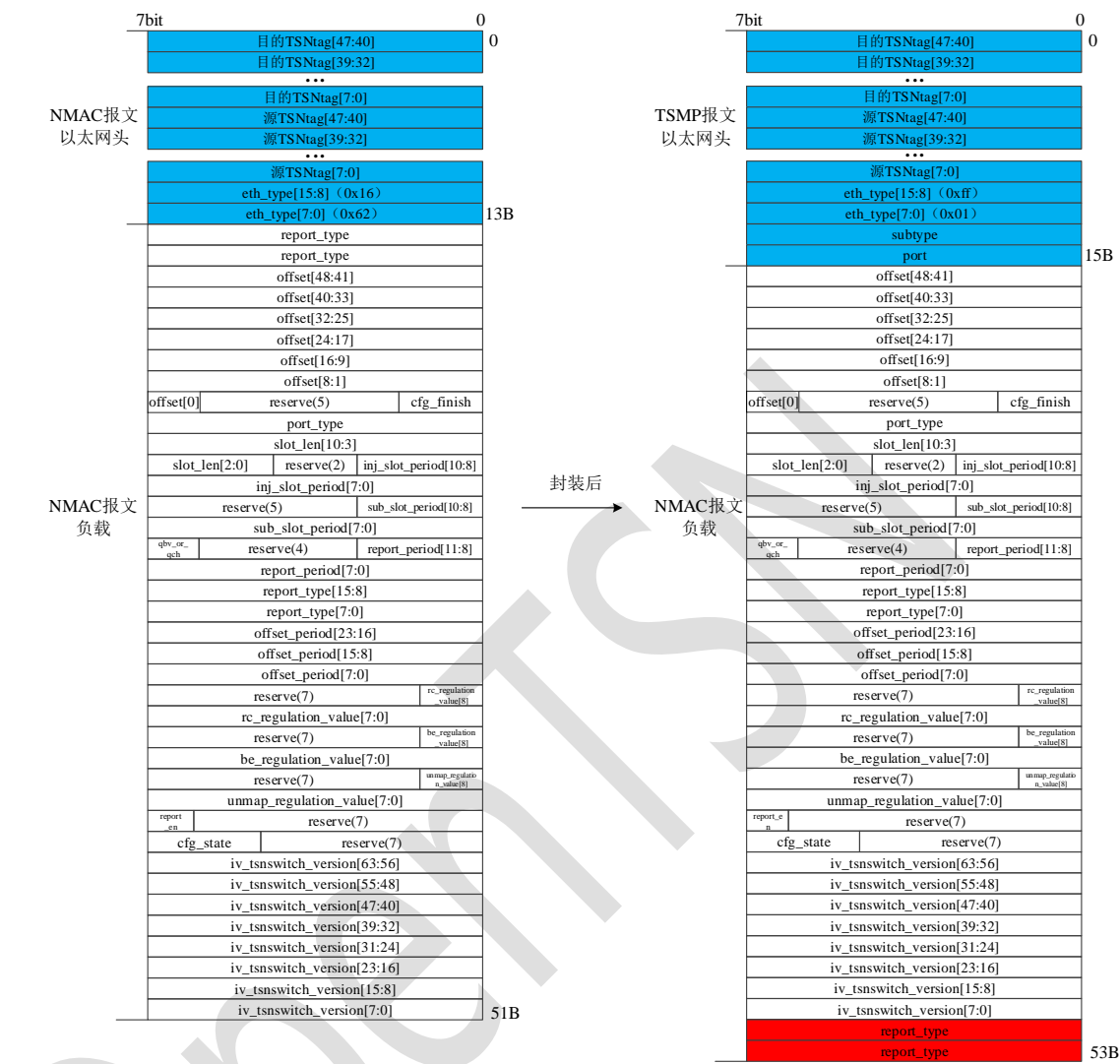


图 C-4 上报单个寄存器的 NMAC 报文格式

C.2.2. 硬件状态上报报文格式

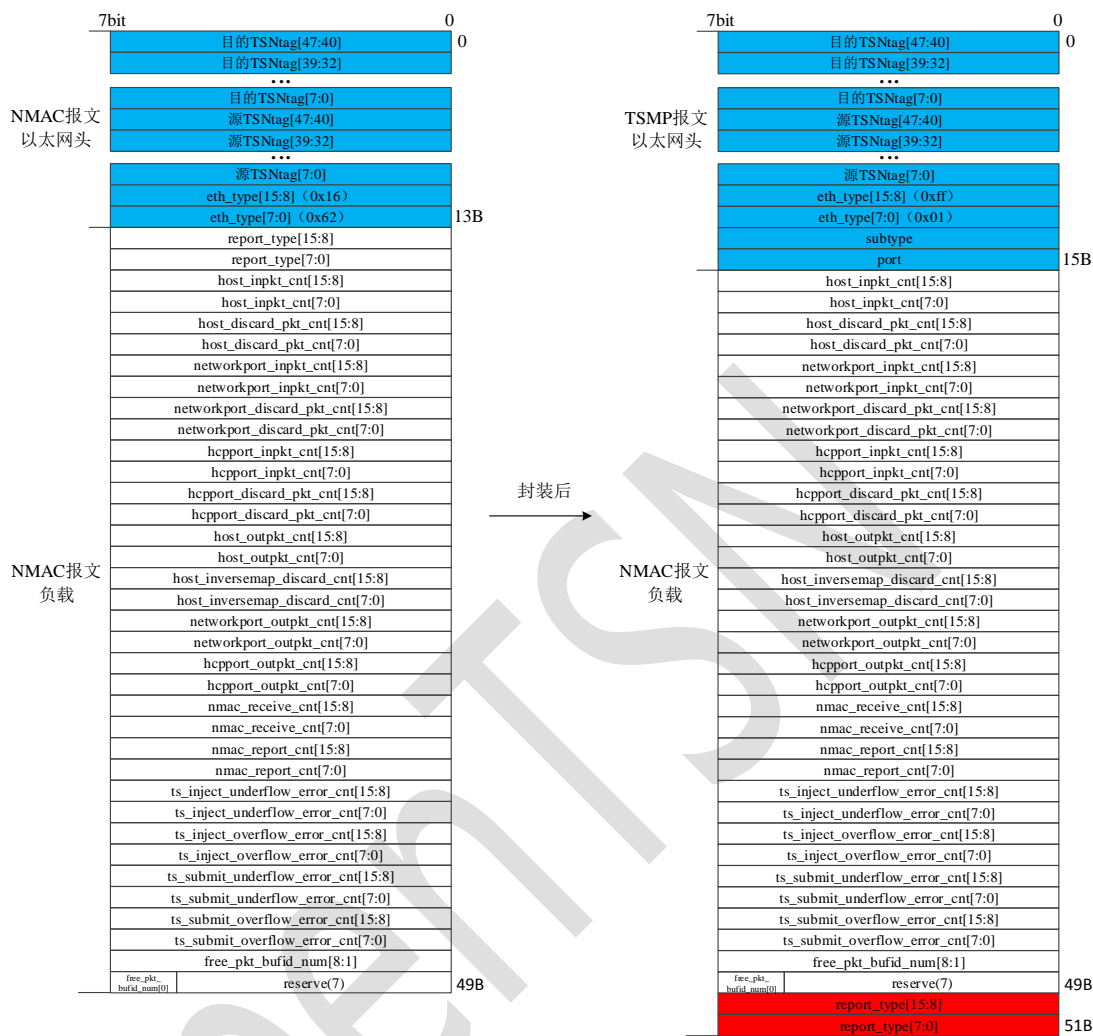


图 C-5 硬件状态上报报文格式

表 C-3 硬件上报计数器说明

名称	位宽	含义
ctrlport_inpkt_cnt	16	控制接口接收报文个数计数器
ctrlport_discard_pkt_cnt	16	控制接口流量监管丢弃的报文个数计数器
port0_inpkt_cnt	16	0 号网络口接收报文个数计数器
port0_discard_pkt_cnt	16	0 号网络口流量监管丢弃的报文个数计数器
port1_inpkt_cnt	16	1 号网络口接收报文个数计数器
port1_discard_pkt_cnt	16	1 号网络口流量监管丢弃的报文个数计数器
port2_inpkt_cnt	16	2 号网络口接收报文个数计数器
port2_discard_pkt_cnt	16	2 号网络口流量监管丢弃的报文个数计数器
port3_inpkt_cnt	16	3 号网络口接收报文个数计数器
port3_discard_pkt_cnt	16	3 号网络口流量监管丢弃的报文个数计数器

port4_inpkt_cnt	16	4 号网络口接收报文个数计数器
port4_discard_pkt_cnt	16	4 号网络口流量监管丢弃的报文个数计数器
port5_inpkt_cnt	16	5 号网络口接收报文个数计数器
port5_discard_pkt_cnt	16	5 号网络口流量监管丢弃的报文个数计数器
port6_inpkt_cnt	16	6 号网络口接收报文个数计数器
port6_discard_pkt_cnt	16	6 号网络口流量监管丢弃的报文个数计数器
port7_inpkt_cnt	16	7 号网络口接收报文个数计数器
port7_discard_pkt_cnt	16	7 号网络口流量监管丢弃的报文个数计数器
ctrlport_outpkt_cnt	16	控制接口发送报文个数计数器
port0_outpkt_cnt	16	0 号网络口发送报文个数计数器
port1_outpkt_cnt	16	1 号网络口发送报文个数计数器
port2_outpkt_cnt	16	2 号网络口发送报文个数计数器
port3_outpkt_cnt	16	3 号网络口发送报文个数计数器
port4_outpkt_cnt	16	4 号网络口发送报文个数计数器
port5_outpkt_cnt	16	5 号网络口发送报文个数计数器
port6_outpkt_cnt	16	6 号网络口发送报文个数计数器
port7_outpkt_cnt	16	7 号网络口发送报文个数计数器
nmac_receive_cnt	16	CSM 模块接收到的 NMAC 报文个数计数器
nmac_report_cnt	16	CSM 模块上报的 NMAC 报文个数计数器
ts_inj_underflow_error_cnt	16	时间敏感报文注入调度时出现下溢错误次数 (暂无时间敏感报文注入控制功能)
ts_inj_overflow_error_cnt	16	时间敏感报文注入调度时出现上溢错误次数 (暂无时间敏感报文注入控制功能)
ts_sub_underflow_error_cnt	16	时间敏感报文提交调度时出现下溢错误次数 (暂无时间敏感报文提交控制功能)
ts_sub_overflow_error_cnt	16	时间敏感报文提交调度时出现上溢错误次数 (暂无时间敏感报文提交控制功能)
free_pkt_bufid_num	16	硬件空闲 pkt_bufid 数量
总计	/	34 个



C.2.3. 门控列表/转发表表项上报报文格式

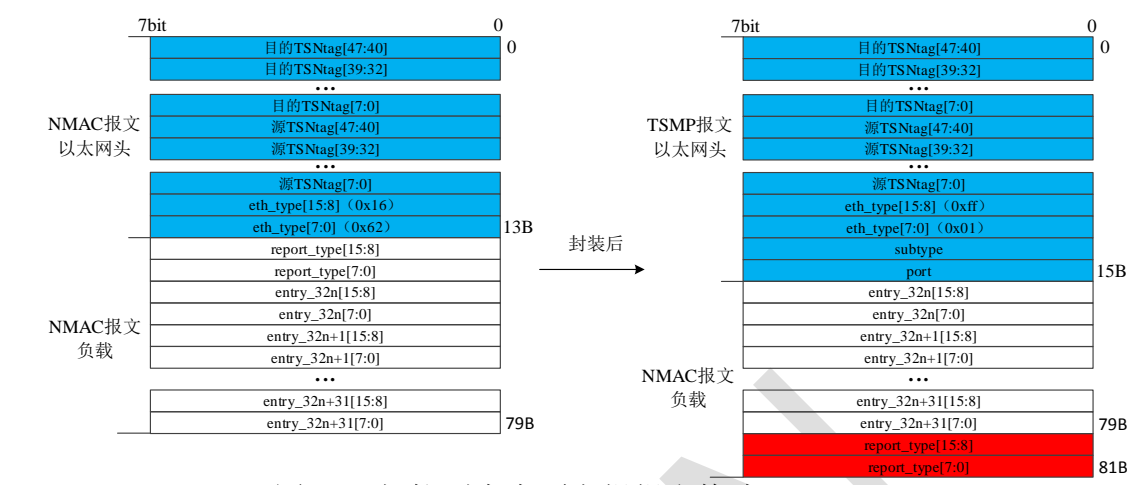


图 C-6 门控列表表项上报报文格式

附录D. wr\_command/rd\_command/rd\_command\_ack 命令格式

表 D-1 wr\_command/rd\_command/rd\_command\_ack 命令格式

位置	位宽	名称	说明
[203:196]	8	node_id	该字段用来标识对哪个节点进行读写。每个 TSE 或 TSS 都有一个唯一的节点 ID。该字段在 TSN 网卡+TSN 交换机模式下使用到。
[195:188]	8	dest_module_id	该字段用来标识对一个节点内的哪个模块进行控制。TSE 或 TSS 内部每个子模块都有一个唯一的模块 ID
[187:184]	4	type	4'b0001:寄存器或表项的写命令； 4'b0010:寄存器或表项的读命令； 4'b0110:寄存器或表项的读响应。
[183:152]	32	addr	寄存器或表项的读/写地址
[151:0]	152	data	寄存器或表项的读/写数据

附录E. PTP 协议格式

Sync, Delay\_req, Delay\_resq 与 test 报文格式如图 E-1 所示。

0			32			48			64			96			112			128		
目的MAC地址						源MAC地址						类型			长度 相关	消息 类型	保留	版本		
长度		域 号	保留	标志域		修正域								保留						
保留		源端口 标识符		源端口标识符								序列号			控制 域		时间 间隔			
时间戳											填充0									

图 E-1 PTP 报文格式

类型为：16'h88F7；

消息类型：sync 为 4'd1，delay\_req 为 4'd3，delay\_resq 为 4'd4，  
delay\_test 为 4'd5；

长度为：16'd64 字节；

修正域:透明时钟，起始时，该域为 0；

时间戳：为时间戳（其他无需关系的 PTP 字段填充 0）

附录F. TSMP 消息协议格式

TSMP（时间敏感消息协议）是 TSN 控制器进行网络拓扑探测、对 TSN 交换机和 HCP 进行配置以及对帧进行封装的协议。

F.1. TSMP 帧设计原则

- （1）PTP 帧是 TSMP 帧的一种子类型；
- （2）TSNtag 是帧映射后的结果，在 TSN 网络中根据 TSNtag 对帧进行逻辑处理（包括查表转发，入队，调度优先级，ST 流的按时注入、按时提交、输出门控等）；
- （3）在 TSMP 帧头中设计相关字段用来标识不同类型的 TSMP 帧。

F.2. TSMP 帧格式

TSMP 帧的格式设计如下图 F-1 所示。

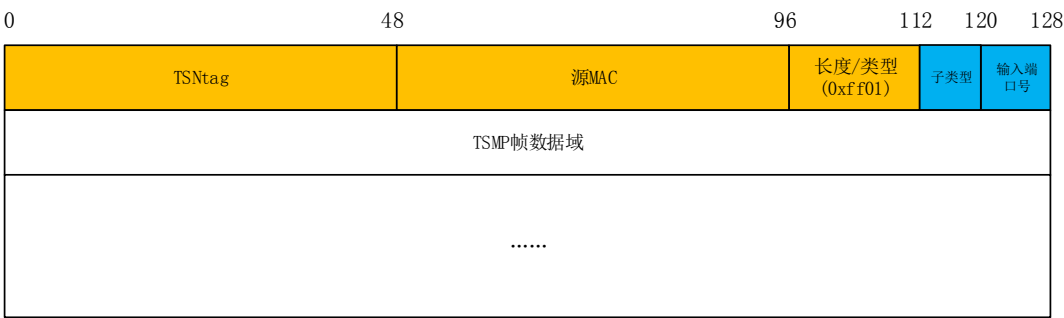


图 F-1 TSMP 帧的格式

图中黄色字段为以太网帧头，蓝色字段为 TSMP 帧头，白色字段为 TSMP 帧数据域。TSMP 帧以太网头和 TSMP 帧头中各字段的含义详见表 F-1、表 F-2 所示。

表 F-1 TSMP 帧头各字段的含义

字段	位宽	说明
TSNtag	48	TSMP 帧经映射 2 射所得的结果。
源 mac	48	暂未使用
长度/类型	16	TSMP 帧类型为 0xff01（自定义）。
子类型	8	用来标识不同类型的 TSMP 帧，目前包含 6 种类型：ARP 封装帧、Beacon 帧、交换机配置帧、HCP 配置帧、ICMP 封装帧、Probe 帧。
输入端口号	8	主机发给 TSN 交换机的帧进入 TSN 交换机的端口号

表 F-2 TSMP 帧类型

帧类型	子类型的值	含义
ARP 封装帧	8'h0	ARP 帧封装到 TSMP 帧中在网络中进行传输，将 ARP 帧完整地存放在 TSMP 数据域
Beacon 帧	8'h1	交换机、网卡上报到控制器的状态帧，将交换机、网卡的状态上报帧完整地存放在 TSMP 数据域
交换机配置帧	8'h2	控制器对交换机、网卡进行配置的帧，控制器将 NMAC 配置帧封装到 TSMP 帧中，其中 NMAC 配置帧完整地存放在 TSMP 数据域
HCP 配置帧	8'h3	控制器对 HCP 进行配置的帧；配置信息存放在 TSMP 数据域。
HCP 状态上报帧	8'h4	HCP 上报的状态信息存放在 TSMP 数据域

PTP 封装帧	8'h5	将 PTP 帧 (sync 帧、delay_req 帧、delay_resp 帧) 封装到 TSMP 帧中, 其中 PTP 帧完整地存放在 TSMP 数据域
---------	------	--

OpenTSN