

TSN 网卡（TSNNic3.2）设计方案

（版本 1.0）

OpenTSN

OpenTSN 开源项目组

2021 年 10 月

版本历史

版本	修订时间	修订内容	文件标识
1.0	2021.10.7	将 HCP 以及 TSE 的逻辑进行整理，整合所有的更改设计，使文档逻辑代码保持一致	OpenTSN3.2

目录

1. 项目概述	5
1.1. 设计目标	5
1.2. 设计指标	5
2. 总体架构	6
2.1. TSE 总体设计	8
2.1.1. TSE 内部功能划分	8
2.1.2. TSE 的处理流程	14
2.2. HCP 总体设计	21
2.2.1. HCP 内部功能划分	21
2.2.2. HCP 的处理流程	24
附录 A. 数据格式定义	28
A.1. 报文格式	28
A.2. TSN 标签格式	29
A.3. 描述符格式	30
附录 B. 配置说明	30
B.1. 硬件地址	30
B.2. 配置内容	31
B.2.1. 控制寄存器	31
B.2.2. 映射表	33
B.2.3. 逆映射表	34
B.2.4. 门控列表	35
附录 C. 配置/上报报文格式	36
C.1. 配置报文格式	36
C.1.1. 配置控制寄存器/门控列表的报文格式	36

C.1.2. 配置映射表/逆映射表的报文格式	37
C.2. 上报报文格式.....	38
C.2.1. 单个寄存器上报报文格式.....	40
C.2.2. 硬件状态上报报文格式.....	41
C.2.3. 门控列表表项上报报文格式	42
C.2.4. 映射表表项上报报文格式.....	43
C.2.5. 逆映射表表项上报报文格式	44
附录 D. wr_command/rd_command/rd_command_ack 命令格式 .	44
附录 E. PTP 协议格式	45
附录 F. TSMP 消息协议格式.....	45
F.1. TSMP 帧设计原则.....	46
F.2. TSMP 帧格式.....	46

1. 项目概述

本文档是介绍 OpenTSN（版本 3.2）开源项目中的 TSN 网卡设计，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 网卡。TSN 网卡通过提取 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
- 支持报文映射与逆映射
- 支持标准以太网报文传输
- 支持 4 个千兆以太网接口（3 个网络接口，1 个主机接口）
- 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
- 支持 32 条映射表项
- 支持 256 条逆映射表项

2. 总体架构

TSNNic3.2 的总体设计如图 2-1 所示，TSNNic3.2 包括时间敏感端 TSE 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。

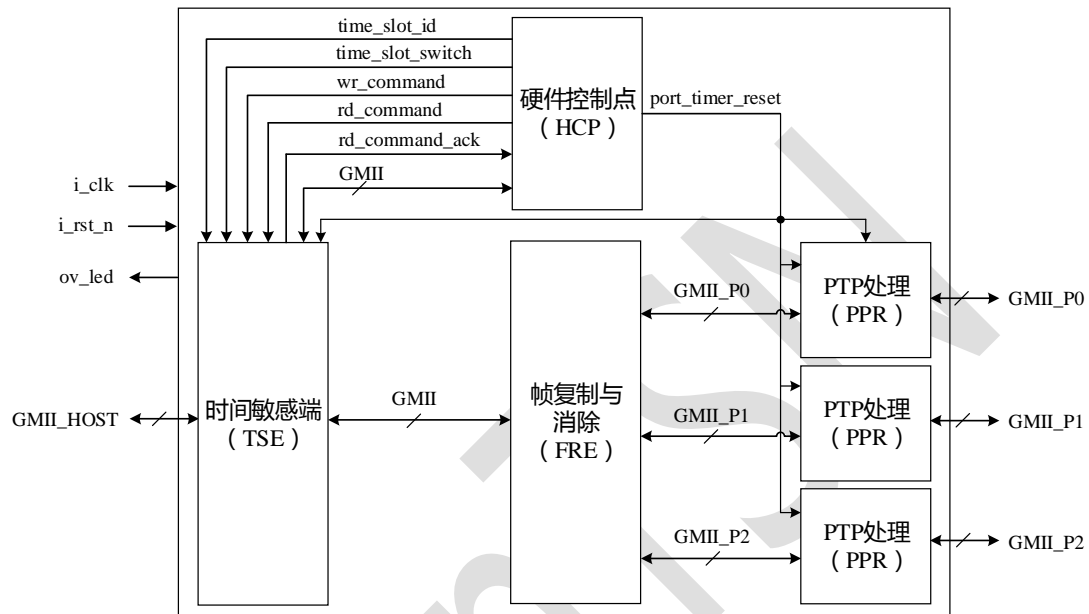


图 2-1 TSNNic3.2 总体架构

TSNNic3.2 总体架构图中的信号含义如表 2-1 所示。

表 2-1 TSE 总体架构图中信号含义

信号	位宽 bit	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
ov_led	5	连接到子板上 LED 灯的信号
GMII_HOST/ GMII/ GMII_P0/ GMII_P1/ GMII_P2	gmii_rx_clk	GMII 接收时钟
	gmii_rx_data	GMII 接收数据
	gmii_rx_dv	GMII 接收数据有效信号
	gmii_rx_er	GMII 接收数据错误信号
	gmii_tx_clk	GMII 发送时钟
	gmii_tx_data	GMII 发送数据
	gmii_tx_en	GMII 发送数据有效信号
	gmii_tx_er	GMII 发送数据错误信号

信号		位宽 bit	含义
o_s_pulse		1	秒脉冲或毫秒脉冲（可配置）
wr_command	wr_command	204	写命令
	wr_command_wr	1	写命令有效信号
rd_command	rd_command	204	读命令
	rd_command_wr	1	读命令有效信号
rd_command_ack		204	读响应
port_timer_reset		1	接口定时器复位信号，高有效
time_slot		10	当前所处的一个周期中的时间槽
time_slot_switch		1	时间槽切换信号，高有效

TSE(Timing Sensitive End, 时间敏感端)模块：主要功能是将标准以太网报文映射为 TSN 报文，将 TSN 报文逆映射为标准以太网报文；基于 802.1Qbv/Qch 对时间敏感流量进行整形。

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，生成写命令并传输给 TSE，向 TSE 发送读命令来收集 TSE 状态并周期性进行上报；以及在 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。

FRE (Frame Replication and Elimination, 帧复制与消除) 模块：主要功能是对接收到的数据报文（包括时间敏感报文、带宽预约报文等）复制三份并从 3 个接口输出，帧消除功能正在开发中。

PPR (Precision_time_protocol Process, PTP 处理) 模块：主要功能是记录接口接收到 PTP 报文的时间戳以及接口发送 PTP 报文的时间戳，计算 PTP 报文在 TSE 和 FRE 中传输的透明时钟并将其累加到透明时钟域中。

2.1. TSE 总体设计

2.1.1. TSE 内部功能划分

时间敏感端 TSE 的内部功能划分如图 2-2 所示。

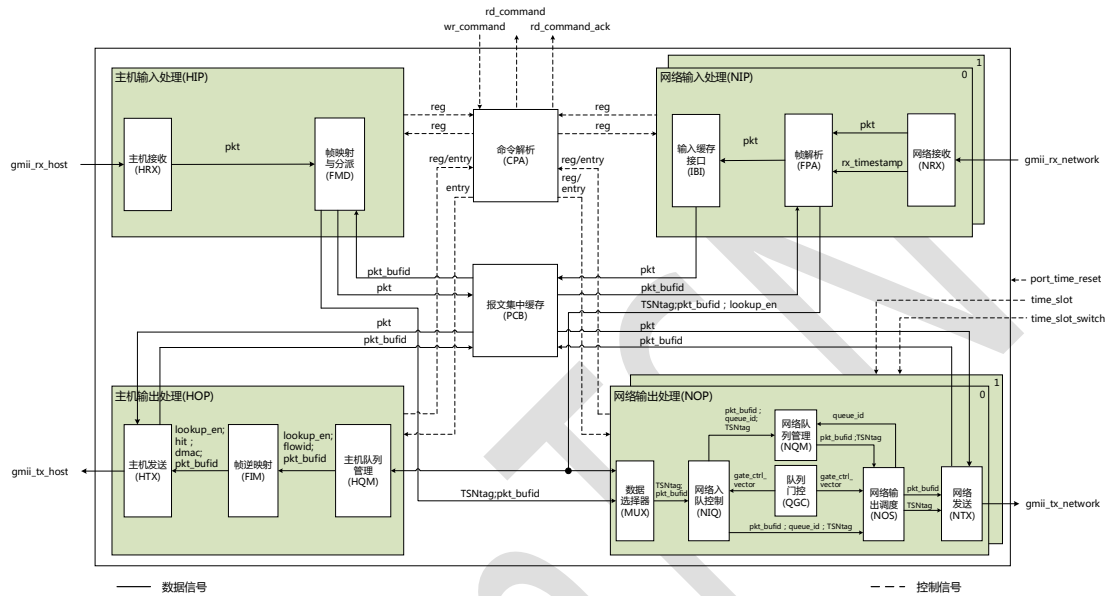


图 2-2 TSE 内部功能划分

时间敏感端 TSE 的内部功能划分图中信号描述如表 2-2 所示。

表 2-2 TSE 内部功能划分图中信号描述

信号	位宽	描述
pkt (报文集中缓存接收或发送的信号)	134	位宽为 134bit 的数据，具体格式参考附录 A
pkt (非报文集中缓存模块接收或发送的信号)	9	位宽为 9bit 的数据，具体格式参考附录 A
pkt_bufid	9	报文在集中缓存区中缓存空间
TSNtag	48	报文查表映射后的结果
flowid	14	TSN 报文的流 ID
lookup_en	1	报文描述符查逆映射表使能信号，其中 1'b1 报文描述符查逆映射表，1'b0 表示报文描述符不查逆映射表
hit	1	报文描述符查逆映射表是否命中信号，其中 1'b1 报文描述符查逆映射表命中，1'b0 表示报文描述符查逆映射表不命中

信号	位宽	描述
queue_id	3	报文的 TSntag 和 pkt_bufid 缓存的队列
gcl_ctrl_vector	8	8 个队列的门控状态
rx_timestamp	19	网络交换接口/控制接口接收到 PTP 报文的 19bit 时间戳，用于计算 PTP 报文的透明时钟。
dmac	48	报文目的 mac 地址
reg	xx	配置/上报的寄存器
entry	xx	配置/上报的表项
time_slot	10	当前（同步后的）时间所在的时间槽
time_slot_switch	1	时间槽切换信号
port_time_reset	1	接口时间复位信号，高有效
wr_command	204	写命令，格式详见附录 D
rd_command	204	读命令，格式详见附录 D
rd_command_ack	204	读命令响应，格式详见附录 D

HRX(Host RX, 主机接收)模块：主要功能是接收主机接口传来的报文，将报文传输时钟域由 GMII 接收时钟域切换为 TSE 内部时钟域，并在端处理逻辑初始化时，丢弃所有的报文；在初始化完成后，才传输所有的报文。

FMD(Frame Mapping and Dispatching, 报文映射与分派)模块：主要功能是实现报文位宽转换，报文监管，报文缓存，查表映射。报文位宽转换是将报文每拍数据位宽由 9bit 转换为 134bit；报文监管是指在报文集中缓存模块中剩余 pkt_bufid 个数小于 BE 报文监管阈值时，将 BE 报文丢弃，在报文集中缓存模块中剩余 pkt_bufid 个数小于 RC 报文监管阈值时，将 RC 报文和 BE 报文丢弃；报文缓存是指将报文集中缓存模块分配的 bufid 转换为报文缓存基地址，将报文写入到集中缓存区中；查表映射是指 TCP/UDP 报文用五元组去查找映射表，将 pkt_bufid 和查表结果 TSntag 传输给网络交换接口；非 TCP/UDP 报文不查映射表，直接将 pkt_bufid 和 DMAC 字段数值（即 TSntag 语义）传输给网络交换接口。

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(报文缓存区的格式如表 2-3 所示),对空闲地址缓存区 pkt_bufid 进行缓存管理(空闲地址缓存区的格式如表 2-4 所示)。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 2-3 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 2-4 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。

HQM(Host Queue Manage, 主机队列管理)模块: 主要功能是对从网络接口传来的报文描述符进行缓存管理, 在接收到帧逆映射模块传来的准备就绪信号后, 将队列中报文描述符读出。

FIM(Frame Inverse Mapping 帧逆映射) 模块: 主要功能是对需要查找逆映射表的报文描述符进行查表, 将 pkt_bufid、查表是否命中标识位和查表命中时的查表结果输出; 对不需要查找逆映射表的报文描述符直接输出。

HTX(Host TX, 主机发送)模块: 主要功能是从报文集中缓存区中读取报文并释放 `pkt_bufid`, 将查逆映射表命中的 TSN 报文修改为标准以太网报文、将查逆映射表未命中的 TSN 报文丢弃以及将无需查映射表的标准以太网报文直接输出, 在输出报文时, 将报文位宽由 134bit 转换为 8bit, 在报文以太网头前面增加前导码和帧开始符并控制报文输出间隔, 以及将报文传输时钟域由 TSNNic 内部时钟域转换为 GMII 发送时钟域。在读取报文时, 将 `pkt_bufid` 映射成报文在缓存区中缓存的基地址, 并根据此地址从报文集中缓存区中读出报文, 在接收到报文第一拍数据时, 将查逆映射表命中的 TSN 报文的 TSNTag 还原为 DMAC 并将报文以太网类型由 0x1800 改为 0x0800, 若该报文未查逆映射表, 则无需修改报文内容; 在接收到报文最后一拍数据时, 将 `pkt_bufid` 传给报文集中缓存模块进行释放, 以便后续进入 TSE 的报文使用。

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 TSE 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 TSE 所处的阶段来决定是否传输报文: 若 TSE 处于初始化阶段, 丢弃所有报文; 若 TSE 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 TSE 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 TSE 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 报文和 BE 报文进行监管。

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。

NIQ(Network Input Queue, 网络入队控制)模块：主要功能是将报文描述符写入到网络队列管理模块中进行缓存。本模块根据接收到的报文描述符中报文类型、队列门控模块传来的门控状态将报文描述符写入对应队列中；同时将报文描述符与队列 ID 发送给网络输出调度模块，以便网络输出调度模块对队列首地址进行管理；并且根据写入队列的信息与网络输出调度模块传来的被调度的队列 ID 来对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进行集中缓存管理

QGC(Queue Gate Control, 队列门控)模块：主要功能是根据全局时钟来读取门控列表中对对应门控状态，并将门控列表（门控列表的格式如表 2-5 所示）中 8 个队列的门控状态发送给网络入队控制模块和网络输出调度模块。

表 2-5 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报文描述符。本模块需要根据当前队列是否为空、队列优先级以及队列门控模块传来的门控状态来得出一个最优先调度的队列，将该队列首地址作为读地址，从网络队列管理模块中读出报文描述符，将队列首地址对应的报文描述符输出给网络发送模块，并且将读出的报文描述符中 `pkt_bufid` 作为该队列新的首地址。

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`、将报文传输时钟域从 TSNNic 内部时钟域切换到 GMII 发送时钟域、构造帧前导符和帧开始符并控制报文输出的间隔。在读取报文时，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，并根据报文描述符中信息来对被映射成 TSN 报文的 DMAC 和以太网类型做修改；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 TSE 的报文使用。

CPA(Command Parse, 命令解析)模块: 负责将接收到 HCP 的写命令(写命令数据格式见附录 D)进行解析，来实现对本地寄存器、映射表、逆映射表的配置；根据接收到的读命令(读命令数据格式见附录 D)来读取对应寄存器或表项，并将读数据封装在读响应(读响应数据格式见附录 D)中输出给 HCP 模块。

2.1.2. TSE 的处理流程

TSE 总体架构中包含 1 个主机接口、1 个网络交换接口和 1 个控制接口，主机接口与外部设备（需接入 TSN 网络中）连接，网络交换接口与外部 TSNSwitch 连接，控制接口与 TSNNic 内部的 HCP 连接。下面详细介绍帧的处理流程。

2.1.2.1. 主机接口进网络交换接口出的帧处理流程

主机接口输入的帧在主机接收模块（HRX）进行跨时钟域处理，并在每拍数据中增加 1bit 的头尾标识位，然后根据 TSE 所处的阶段决定是否传输报文，即 TSE 处于初始化 pkt_bufid 阶段时，丢弃所有的报文；TSE 在初始化 pkt_bufid 完成后，才传输所有的报文给帧映射与分派模块（FMD）。

帧映射与分派模块（FMD）接收到报文后，将报文每拍数据位宽由 9bit 转换为 134bit，并将报文集中缓存模块（PCB）分配的 pkt_bufid 转化为报文缓存的基地址，将报文写到报文集中缓存区中；同时对报文进行映射：针对 TCP/UDP 报文（以太网类型为 0x0800，且 IP 协议为 0x6/0x11），本模块先提取报文五元组，用五元组去查找映射表，若查表命中，则将该报文映射为 TSN 报文，获得查表结果 TSntag，若查表未命中，则判定该报文为标准以太网报文，其报文类型固定为 BE 报文类型；针对非 TCP/UDP 报文，该报文不用去查表映射，判定该报文为标准以太网报文，其报文类型固定为 BE 报文类型；然后构造报文描述符，并根据报文集中缓存模块中剩余 pkt_bufid 个数对 RC 报文和 BE 报文进行报文监管，在报文集中缓存模块中剩余 pkt_bufid 个数小于 BE 报文监管阈值时，将 BE 报文丢弃，在报文集中缓存模块中剩余 pkt_bufid 个数小于 RC 报文监管阈值时，

将 RC 报文和 BE 报文丢弃；在报文监管后，将报文描述符传给网络交换输出接口的数据选择器。

数据选择器对主机接口和控制接口传来的描述符进行选择，并输出给网络入队控制模块。

网络入队控制模块接收到报文描述符后，根据队列门控模块传来的门控状态与描述符中报文类型进行队列选择，并将报文描述符传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传来的门控状态、队列优先级以及队列状态（是否为空）得到最优先调度的队列 ID，并将此队列 ID 中首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队列中的报文描述符读取出来，将当前队列首地址输出给网络发送模块，并将读出的报文描述符中 `pkt_bufid` 作为链表首地址。

网络发送模块根据报文描述符中 `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 134bit 的乒乓寄存器，从报文集中缓存区中读出的报文依次缓存在此两个寄存器中，在接收到报文第一拍数据时，对比第一拍数据中 DMAC 字段数值与报文描述符中 TSntag/DMAC 信息是否相等，若相等，则判定该报文为标准以太网报文，无需修改该报文内容；若不相等，则判定该报文被映射为 TSN 报文，将报文描述符中 TSntag 存放在报文第一拍数据中 DMAC 字段，并将报文以太网类型由 0x0800 改为 0x1800；然后将寄存器中数据位宽由 134bit 转换成 8bit，报文在跨时钟域后从 GMII 接口输出，在接收到报文最后一拍数据时，将 `pkt_bufid` 传给报文集中缓存模块进行释放。

2.1.2.2. 网络交换接口进主机接口出的帧处理流程

网络交换接口的网络接收模块 (NRX) 在接收的报文每拍数据中增加 1bit 的头尾标识位并进行跨时钟域处理, 根据报文以太网类型来识别标准以太网报文和 TSN 报文 (以太网类型为 0x1800、0x98f7 和 0xff01) 并根据端处理逻辑所处的阶段来决定是否传输报文: 若端处理逻辑处于初始化阶段, 丢弃所有报文; 若端处理逻辑处于配置阶段, 传输标准以太网报文和 TSN 报文中配置报文; 若端处理逻辑处于时钟同步阶段, 传输标准以太网报文和 TSN 报文中非时间敏感报文; 若端处理逻辑处于正常工作阶段, 接收标准以太网报文和 TSN 报文。

帧解析模块 (FPA) 接收到网络接收模块 (NRX) 传来的报文后, 将报文位宽由 9bit 转换成 134bit, 并将 134bit 数据及其 pkt_bufid 输出给输入缓存接口模块; 同时提取报文的 DMAC 字段数据, 并将该 134bit 数据、报文集中缓存模块分配的 bufid 和查逆映射表使能位组成报文描述符; 然后对 RC 报文和 BE 报文进行监管, 若报文集中缓存模块 (PCB) 中剩余 pkt_bufid 数量少于 RC 报文监管阈值时, 将 RC 报文描述符和 BE 报文描述符均丢弃, 若报文集中缓存模块 (PCB) 中剩余 pkt_bufid 数量少于 BE 报文监管阈值时, 将 BE 报文描述符丢弃; 然后根据报文以太网类型对报文描述符进行分派, 将标准以太网报文描述符或映射后的 IP 报文描述符传输给主机接口。

输入缓存接口模块 (IBI) 将 pkt_bufid 转换为报文在集中缓存区中缓存基地址, 将报文写到集中缓存区中, 每接收到一拍 134bit 数据时, 便向报文集中缓存模块输出写请求, 在收到报文集中缓存模块的响应后, 完成一拍数据的写入。

主机队列管理模块 (HQM) 将接收到的 pkt_bufid、查逆映射表使能位和 TSNtag 中流 ID 写到队列中进行缓存, 在接收到帧逆映射

模块 (FIM) 传来的准备就绪信号后, 将 `pkt_bufid`、查逆映射表使能位和 `TSNtag` 中流 ID 输出给帧逆映射模块。

帧逆映射模块根据查逆映射表使能位来判定该报文描述符是否需要查找逆映射表, 若查逆映射表使能位为高, 则用流 ID 去查找逆映射表, 并将 `pkt_bufid`、查表是否命中标识、查表命中时的查表结果 DMAC 输出给主机发送模块 (HTX); 若查逆映射表使能位为低, 则无需查找逆映射表, 将 `pkt_bufid` 以及报文未查逆映射表信息输出给主机发送模块 (HTX)。

主机发送模块 (HTX) 判断报文描述符查逆映射表是否命中以及 DMAC 是否需要替换, 若报文描述符查表未命中, 则将 `pkt_bufid` 释放给报文集中缓存模块, 但无需从报文集中缓存模块中读出报文; 若报文描述符查表命中, 则将接收到的 `pkt_bufid` 转化为报文读取的基地址, 从报文集中缓存模块 (PCB) 的缓存区中读出报文, 在接收到最后一拍数据时, 将 `pkt_bufid` 传给报文集中缓存模块进行释放; 在读出报文第一拍数据时, 将查逆映射表的结果 DMAC 替换报文 TSNtag, 将以太网类型由 0x1800 改为 0x0800; 若报文描述符未查找逆映射表, 则将接收到的 `pkt_bufid` 转化为报文读取的基地址, 从报文集中缓存模块 (PCB) 的缓存区中读出报文, 在接收到最后一拍数据时, 将 `pkt_bufid` 传给报文集中缓存模块进行释放。把从集中缓存区读出的报文每拍数据位宽由 134bit 转换为 8bit, 将报文传输时钟域由 TSE 内部处理时钟域转换为 GMII 发送时钟域, 并输出报文。

2.1.2.3. 网络交换接口进控制接口出的帧处理流程

网络交换接口的网络接收模块 (NRX) 在接收的报文每拍数据中增加 1bit 的头尾标识位并进行跨时钟域处理, 根据报文以太网类型来

识别标准以太网报文和 TSN 报文（以太网类型为 0x1800、0x98f7 和 0xff01）并根据端处理逻辑所处的阶段来决定是否传输报文：若端处理逻辑处于初始化阶段，丢弃所有报文；若端处理逻辑处于配置阶段，传输标准以太网报文和 TSN 报文中配置报文；若端处理逻辑处于时钟同步阶段，传输标准以太网报文和 TSN 报文中非时间敏感报文；若端处理逻辑处于正常工作阶段，接收标准以太网报文和 TSN 报文。针对 PTP 报文，需要记录接口接收 PTP 报文的时间戳，并存放在 TSNTag 中。

帧解析模块 (FPA) 接收到网络接收模块 (NRX) 传来的报文后，将报文位宽由 9bit 转换成 134bit，并将 134bit 数据及其 pkt_bufid 输出给输入缓存接口模块；同时提取报文的 DMAC 字段数据，并将该 134bit 数据、报文集中缓存模块分配的 pkt_bufid 和查逆映射表使能位组成报文描述符；然后对 RC 报文和 BE 报文进行监管，若报文集中缓存模块 (PCB) 中剩余 pkt_bufid 数量少于 RC 报文监管阈值时，将 RC 报文描述符和 BE 报文描述符均丢弃，若报文集中缓存模块 (PCB) 中剩余 pkt_bufid 数量少于 BE 报文监管阈值时，将 BE 报文描述符丢弃；然后根据报文以太网类型对报文描述符进行分派，将来自交换机的 PTP 报文描述符或 TSMP 报文描述符传输给控制接口输出处理逻辑。

输入缓存接口模块 (IBI) 将 pkt_bufid 转换为报文在集中缓存区中缓存基地址，将报文写到集中缓存区中，每接收到一拍 134bit 数据时，便向报文集中缓存模块输出写请求，在收到报文集中缓存模块的响应后，完成一拍数据的写入。

数据选择器将网络交换接口传来的描述符输出给网络入队控制模块。

网络入队控制模块接收到报文描述符后,根据队列门控模块传来的门控状态与描述符中报文类型进行队列选择,并将报文描述符传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传来的门控状态、队列优先级以及队列状态(是否为空)得到最优先调度的队列 ID,并将此队列 ID 中首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队列中的报文描述符读取出来,将当前队列首地址输出给网络发送模块,并将读出的报文描述符中 `pkt_bufid` 作为链表首地址。

网络发送模块根据报文描述符中 `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 134bit 的乒乓寄存器,从报文集中缓存区中读出的报文依次缓存在此两个寄存器中,在接收到报文第一拍数据时,对比第一拍数据中 DMAC 字段数值与报文描述符中 TSntag/DMAC 信息是否相等,若相等,则判定该报文为标准以太网报文,无需修改该报文内容;若不相等,则判定该报文被映射为 TSN 报文,将报文描述符中 TSntag 存放在报文第一拍数据中 DMAC 字段,并将报文以太网类型由 0x0800 改为 0x1800;然后将寄存器中数据位宽由 134bit 转换成 8bit,报文在跨时钟域后从 GMII 接口输出,在接收到报文最后一拍数据时,将 `pkt_bufid` 传给报文集中缓存模块进行释放。

2.1.2.4. 控制接口进网络交换接口出的帧处理流程

控制接口的网络接收模块(NRX)在接收的报文每拍数据中增加 1bit 的头尾标识位并进行跨时钟域处理,根据报文以太网类型来识别标准以太网报文和 TSN 报文(以太网类型为 0x1800、0x98f7 和 0xff01)并根据端处理逻辑所处的阶段来决定是否传输报文:若端处理逻辑处

于初始化阶段，丢弃所有报文；若端处理逻辑处于配置阶段，传输标准以太网报文和 TSN 报文中配置报文；若端处理逻辑处于时钟同步阶段，传输标准以太网报文和 TSN 报文中非时间敏感报文；若端处理逻辑处于正常工作阶段，接收标准以太网报文和 TSN 报文。

帧解析模块 (FPA) 接收到网络接收模块 (NRX) 传来的报文后，将报文位宽由 9bit 转换成 134bit，并将 134bit 数据及其 pkt_bufid 输出给输入缓存接口模块；同时提取报文的 DMAC 字段数据，并将该 134bit 数据、报文集中缓存模块分配的 bufid 和查逆映射表使能位组成报文描述符；然后对 RC 报文和 BE 报文进行监管，若报文集中缓存模块 (PCB) 中剩余 pkt_bufid 数量少于 RC 报文监管阈值时，将 RC 报文描述符和 BE 报文描述符均丢弃，若报文集中缓存模块 (PCB) 中剩余 pkt_bufid 数量少于 BE 报文监管阈值时，将 BE 报文描述符丢弃；然后根据报文以太网类型对报文描述符进行分派，将来自 HCP 的 PTP 报文描述符或 TSMP 报文描述符传输给网络交换接口输出处理逻辑。

输入缓存接口模块 (IBI) 将 pkt_bufid 转换为报文在集中缓存区中缓存基地址，将报文写到集中缓存区中，每接收到一拍 134bit 数据时，便向报文集中缓存模块输出写请求，在收到报文集中缓存模块的响应后，完成一拍数据的写入。

数据选择器将控制接口传来的描述符输出给网络入队控制模块。

网络入队控制模块接收到报文描述符后，根据队列门控模块传来的门控状态与描述符中报文类型进行队列选择，并将报文描述符传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传来的门控状态、队列优先级以及队列状态（是否为空）得到最优先调度的队列 ID，并将此队

列 ID 中首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队列中的报文描述符读取出来，将当前队列首地址输出给网络发送模块，并将读出的报文描述符中 `pkt_bufid` 作为链表首地址。

网络发送模块根据报文描述符中 `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 134bit 的乒乓寄存器，从报文集中缓存区中读出的报文依次缓存在此两个寄存器中，在接收到报文第一拍数据时，对比第一拍数据中 DMAC 字段数值与报文描述符中 TSntag/DMAC 信息是否相等，若相等，则判定该报文为标准以太网报文，无需修改该报文内容；若不相等，则判定该报文被映射为 TSN 报文，将报文描述符中 TSntag 存放在报文第一拍数据中 DMAC 字段，并将报文以太网类型由 0x0800 改为 0x1800；然后将寄存器中数据位宽由 134bit 转换成 8bit，报文在跨时钟域后从 GMII 接口输出，在接收到报文最后一拍数据时，将 `pkt_bufid` 传给报文集中缓存模块进行释放。

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 2-3 所示。

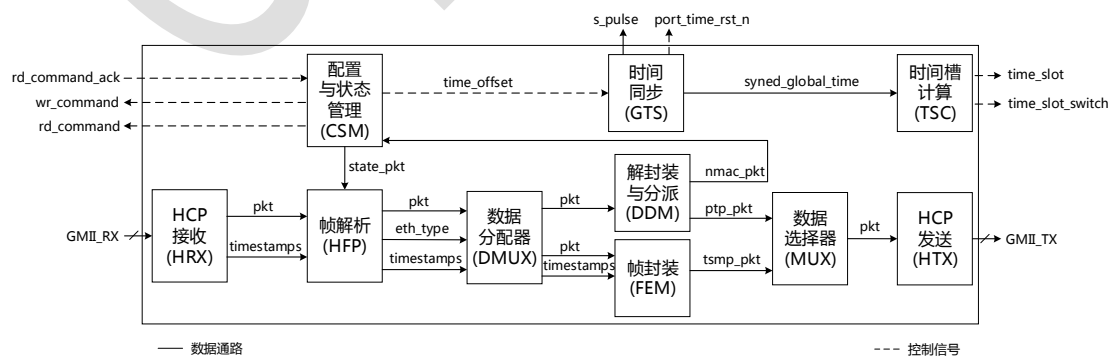


图 2-3 HCP 内部功能划分

HCP 内部功能划分图中的信号含义如表 2-6 所示。

表 2-6 HCP 内部功能划分中信号定义

信号	位宽	含义
pkt/ptp_pkt/tsmp_pkt/nmac_pkt	9	报文，具体格式参考附录 A
state_pkt	8	状态上报报文
wr_command	204	写命令，格式见附录 B
rd_command	204	读命令，格式见附录 B
rd_command_ack	204	读命令响应，格式见附录 B
timestamps	19	HCP 接收模块接收 PTP 报文的时间戳
eth_type	16	报文以太网类型
time_offset	49	本地时钟与主时钟的时钟补偿值，其中高 1bit 表示时钟补偿值的正负
synded_global_time	48	同步后的时钟
time_slot	10	当前（同步后的）时间所在的时间槽
time_slot_switch	1	时间槽切换信号
s_pulse	1	时钟同步脉冲信号，可配置成秒脉冲或毫秒脉冲
port_time_reset	1	接口时间复位信号，高有效

下面将对 HCP 中内部模块功能逐一进行介绍。

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 HCP 内部时钟域，以及记录控制接口接收时间同步报文的时间。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。

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（芯片配置帧、PTP 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 TSNNic 配置帧、PTP 封装帧分别解封装成 NMAC 配置帧、PTP 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 PTP 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 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 HCP 发送模块。

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。

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。

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。

2.2.2.1. 配置报文解析

HCP 会对芯片配置报文进行解析, 实现对 HCP 和 TSE 中寄存器、表的配置。

HCP 接收模块接收到芯片配置报文后, 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, 丢弃芯片配置报文; 若 HCP 处于时钟同步阶段/正常工作阶段, 传输 TSMP 报文。

帧解析模块从芯片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（芯片配置报文属于 TSMP 报文中的一种类型），在 HCP 处于初始化阶段时，将芯片配置报文丢弃，在 HCP 处于配置阶段/时钟同步阶段/正常工作阶段，将芯片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芯片配置报文进行解封装与分派。将芯片配置帧解封装为 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。

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 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 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 HCP 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。

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 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, 记录 PTP 报文发送时间戳, 并将 PTP 报文分派给数据选择器。

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

附录A. 数据格式定义

A.1. 报文格式

在 TSNNic 内部传输的报文每拍数据位宽有两种，一种位宽为 9bit；另一种位宽为 134bit。下面对不同位宽的报文格式进行介绍。

每拍数据位宽为 9bit 的 pkt 的格式如下表 A-1 所示，9bit 数据包含 1bit 头尾标识位和 8bit 报文有效数据，其中头尾标识位中的 1'b1 表示报文第一拍或最后一拍数据，1'b0 表示报文中拍数据。

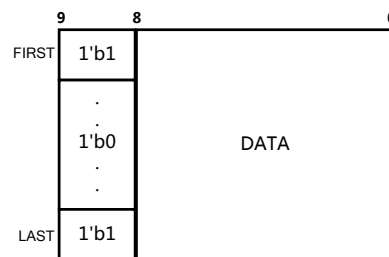


图 A-1 位宽为 9bit 的 pkt 格式

每拍数据位宽为 134bit 的 pkt 的格式如下表 A-2 所示，134bit 数据包包含 2bit 头尾标识、4bit 无效字节数和 128bit 报文有效数据，其中头尾标识中的 2'b01 表示报文第一拍数据，2'b11 表示报文中间拍数据，2'b10 表示报文最后一拍数据；无效字节数用于标识报文每拍数据中无效的字节数。

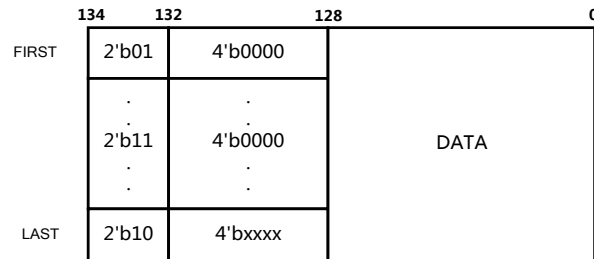


图 A-2 位宽为 134bit 的 pkt 格式

A.2. TSN 标签格式

表 A-3 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-4）
flow id/local id	14	[44:31]	流标识或者本地标识，其中时间敏感流量、带宽预约流量等静态流量使用 flow id，管理控制报文、时间同步报文等使用 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-4 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：需重组的分片
flow id/	14	[44:31]	流标识或者本地标识，其中时间敏感流

local id			量、带宽预约流量等静态流量使用 flow id，管理控制报文、时间同步报文等使用 local id
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]	时间敏感流在 TSN 网卡发送端的缓存地址
submit addr	5	[4:0]	时间敏感流在 TSN 网卡接收端的缓存地址

A.3. 描述符格式

表 4-5 描述符数据格式

字段	位宽 bit	位置	说明
TSNtag	48	[56:9]	TSN 报文的 TSN 标签
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 网卡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	GTS	FLT	PMD	FIM
模块 ID	0x0	0x1	0x2	0x3	0xb	0xc	0xd	0xe

B.2. 配置内容

TSN 网卡需配置内容包括控制寄存器和表，其中表包括映射表、逆映射表、注入时刻表、提交时刻表和门控表。

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。

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 ⁿ
	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
	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
状态 上报		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. 映射表

映射表用于对主机接口接收到的标准以太网报文进行映射，映射表的描述详见表 B-4。

表 B-4 映射表描述

硬件地址		名称	位宽 (bit)	描述
模块 ID	模块 地址			
7'hd (帧映射与分派模块)	20'h000000 - 20'h00001F	map_table_entry_N	[151:144]	五元组中 IP 协议
			[143:112]	五元组中源 IP
			[111:80]	五元组中目的 IP
			[79:64]	五元组中源端口
			[63:48]	五元组中目的端口
			[47:45]	TSNtag 中的报文类型 pkt_type
			[44:31]	TSNtag 中的流编号 flow_id/内部 mac 地址 imac
			[30:15]	TSNtag 中的报文序列号 sequence_id; 在硬件 ram 中不存储该字段。
			[14]	TSNtag 中的分片标识位 frag_flag; 在硬件 ram 中不存储该字段。
			[13:10]	TSNtag 中的分片编号 frag_id; 在硬件 ram 中不存储该字段。
			[9:5]	TSNtag 中的 ST 报文注入地址 injection_addr
			[4:0]	TSNtag 中的 ST 报文提交地址 submit_addr

由于控制器配置映射表表项内容包含整个 48bit 的 TSNTag 信息，但当前 TSNNic 只关注 TSNTag 中报文类型 pkt_type、流编号 flowid/内部 mac 地址 imac、ST 报文注入地址 injection_addr 和 ST 报文提交地址 submit_addr，所以帧映射与分派模块中缓存映射表的 RAM 只缓存五元组和 TSNNic 关注的 TSNTag 信息，缓存映射表的 RAM 格式如表 B-5 所示，该 RAM 的位宽为 131，深度为 32。

表 B-5 缓存映射表的 RAM 格式

索引地址	表项内容	位置	字段	含义
从地址 5'd0 到 5'd31 依次查找，直至读出的表项内容中五元组与帧五元组命中或表项无效	5tuple	[130:123]	ip_protocol	五元组中 IP 协议
		[122:91]	src_ip	五元组中源 IP
		[90:59]	dst_ip	五元组中目的 IP
		[58:43]	src_port	五元组中源端口
		[42:27]	dst_port	五元组中目的端口
	TSNtag 中关注字段	[26:24]	pkt_type	报文类型，其中 3'h0、3'h1 和 3'h2 表示 ST 分组，3'h3 表示 RC 分组，3'h4 表示 PTP 分组，3'h5 表示 NMAC 分组，3'h6 表示 BE 分组，3'h7 表示需重组分组
		[23:10]	flow_id/imac	流编号/内部 mac 地址
		[9:5]	injection_addr	时间敏感报文在源端等待发送调度时缓存地址
		[4:0]	submit_addr	时间敏感报文在终端等待接收调度时缓存地址

B.2.3. 逆映射表

逆映射表用于将需要从主机接口发送的 TSN 报文逆映射为标准以太网报文，逆映射表最多支持 256 项，表项内容为 14bit 的 flowid、48bit 的 dmac 和 9bit 的 outpost，逆映射表的描述详见表 B-6。

表 B-6 逆映射表描述

硬件地址	名称	位置	描述
------	----	----	----

模块 ID	模块地址			
7'df (帧 逆映 射模 块)	20'h00 0000 - 20'h00 00FF	regroup_ table_entry _N	[77:64]	流编号
			[63:16]	报文真实目的 MAC 地址
			[15:9]	保留
			[8:0]	报文输出接口号, 采用 bitmap

帧逆映射模块采用 RAM 来缓存逆映射表, RAM 位宽为 71bit, 深度为 256, 该 RAM 格式如表 B-7 所示。

表 B-7 缓存逆映射表的 RAM 格式

索引地址	字段	位置	描述
从地址 8'd0 到 8'd255 依次读出表项内容, 当读出的表项中 flowid 和报文中 flowid 相同时, 说明查表命中, 查表结束	flowid	[70:57]	流编号
	dmac	[56:9]	报文真实目的 MAC 地址
	outport	[8:0]	报文输出接口号, 采用 bitmap

B.2.4. 门控列表

TSNNic 为了实现 802.1Qbv 调度模型, 在网络输出接口设计一个门控列表, 该门控列表最多支持 1024 条表项, 每条表项的描述如表 B-8 所示。

表 B-8 门控列表描述

硬件地址		名称	位置	描述
模块 ID	模块地址			
7'd3 (队 列门 控模 块)	20'h00 0000 - 20'h00 03FF	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

硬件地址		名称	位置	描述
模块 ID	模块地址			
			[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-9 所示。

表 B-9 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

C.1.1. 配置控制寄存器/门控列表的报文格式

TSNNic 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
0	目的TSN标签[47:16]							
3								
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.1.2. 配置映射表/逆映射表的报文格式

映射表和逆映射表的配置内容是通过标准以太网报文来携带的，配置映射表和逆映射表的报文的格式详见图 C-2，配置报文的以太网类型为 0xff01，子类型为 0x2，配置映射表和逆映射表每条表项

需要包含 3 部分信息（详见表 C-1）：配置有效位，配置地址，配置表项。为每个映射表表项预留 224bit 的位宽，为每个逆映射表表项预留 96bit 的位宽。

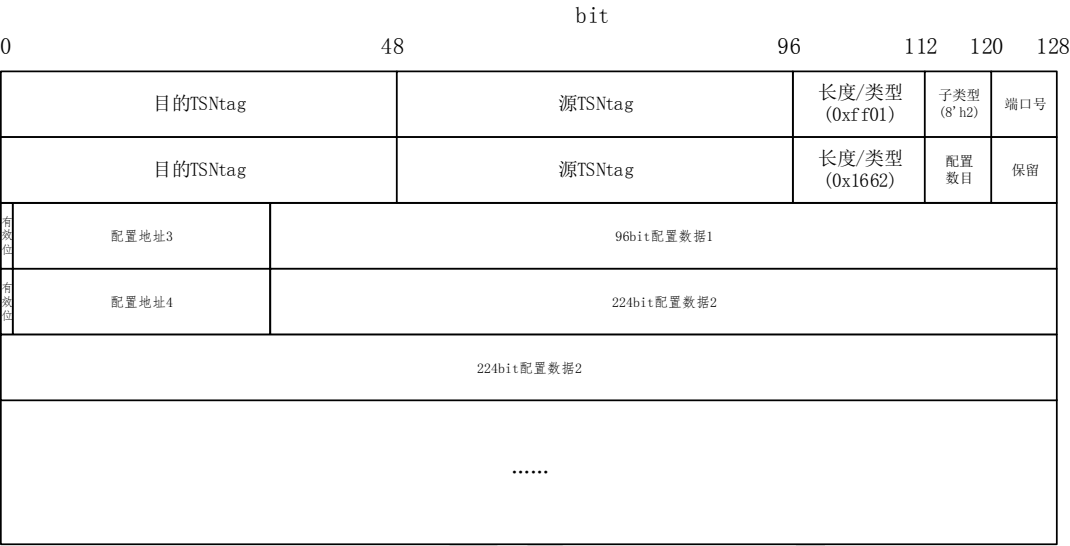


图 C-2 配置映射表和逆映射表的报文格式

表 C-1 配置每条表项所包含信息的描述

字段	位宽 (bit)	描述
配置的有效位 Valid	1	1 表示寄存器/表项配置有效；0 表示寄存器/表项配置无效；
配置的地址 addr	31	高 7bit(addr[30:24])表示该寄存器/表项所在的硬件模块号 MID，最大支持 128 个硬件模块； 低 24bit(addr[23:0])表示该寄存器/表项在硬件模块中被分配的地址。
配置的表项	/	针对映射表（每项为 152bit），该字段为 224bit； 针对逆映射表（每项为 57bit），该字段为 96bit。

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。

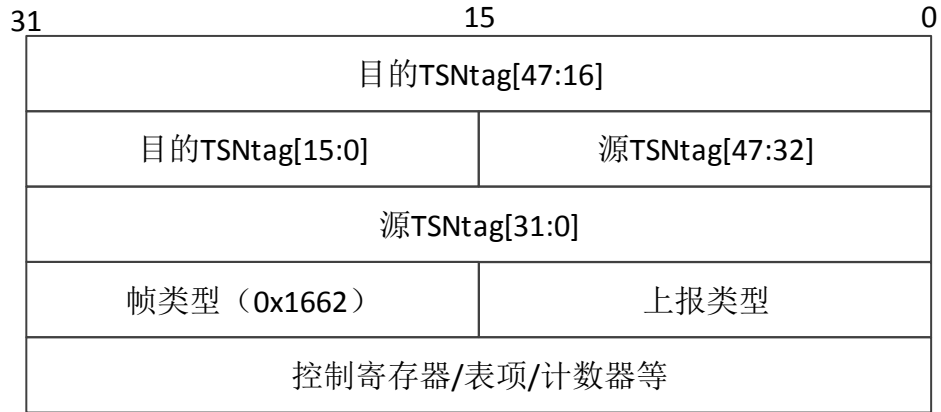


图 C-3 NMAC 上报报文格式

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'd2	n (十进制)	第 32n 条到第 32n+31 条注入时刻表, $0 \leq n \leq 31$ (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, $0 \leq n \leq 31$ (十进制), 且 n 取整数。(暂无)
6'd4	n (十进制)	第 32n 条到第 32n+31 条门控表, $0 \leq n \leq 31$ (十进制), 且 n 取整数
6'd12	10'd0	上报状态寄存器
6'd13	n (十进制)	第 2n 条和第 2n+1 条映射表, $0 \leq n \leq 15$ (十进制), 且 n 取整数
6'd14	n (十进制)	第 4n 条到第 4n+3 条映射表, $0 \leq n \leq 63$ (十进制), 且 n 取整数

C.2.1. 单个寄存器上报报文格式

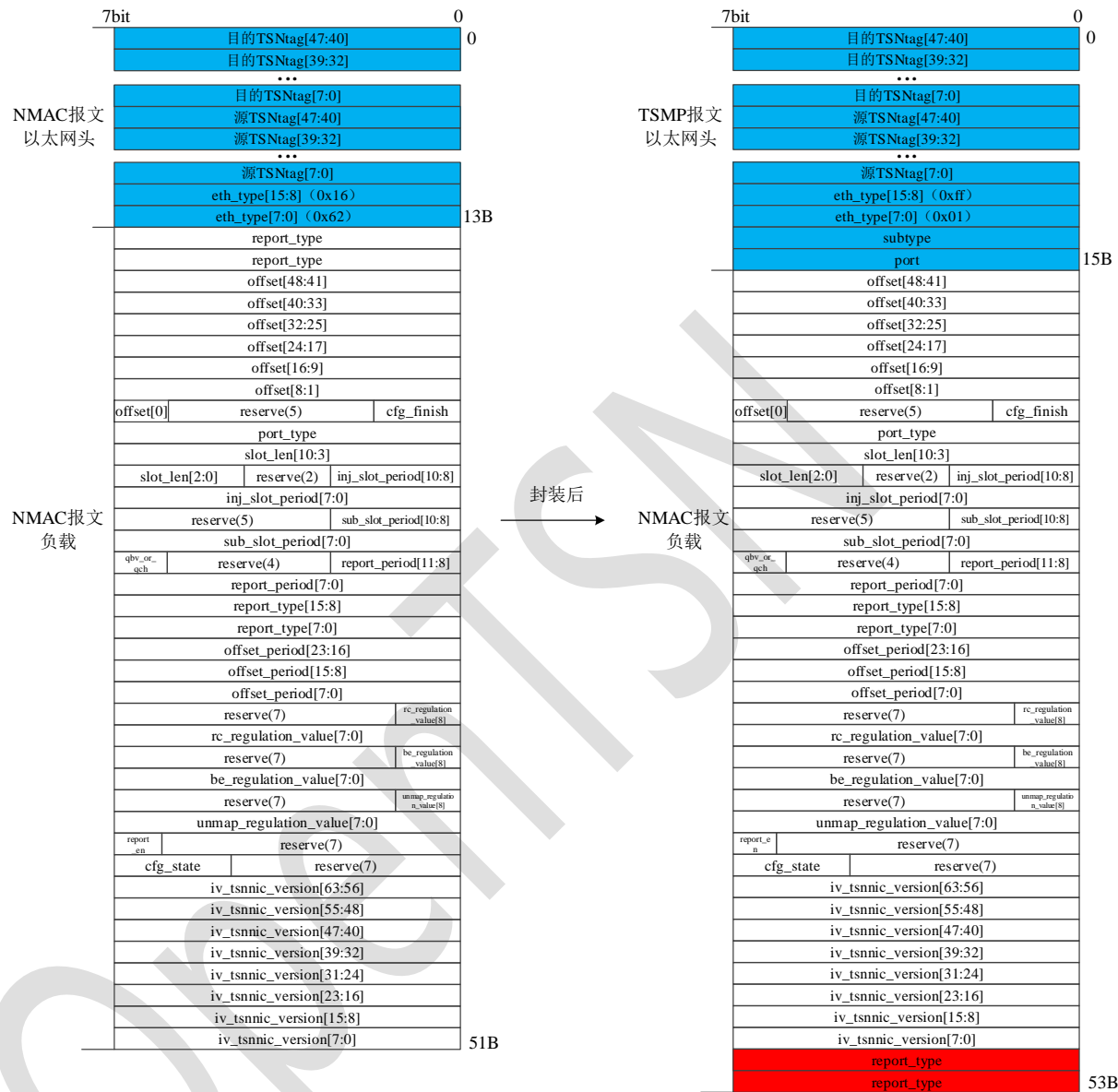


图 C-4 上报单个寄存器的 NMAC 报文格式

C.2.2. 硬件状态上报报文格式

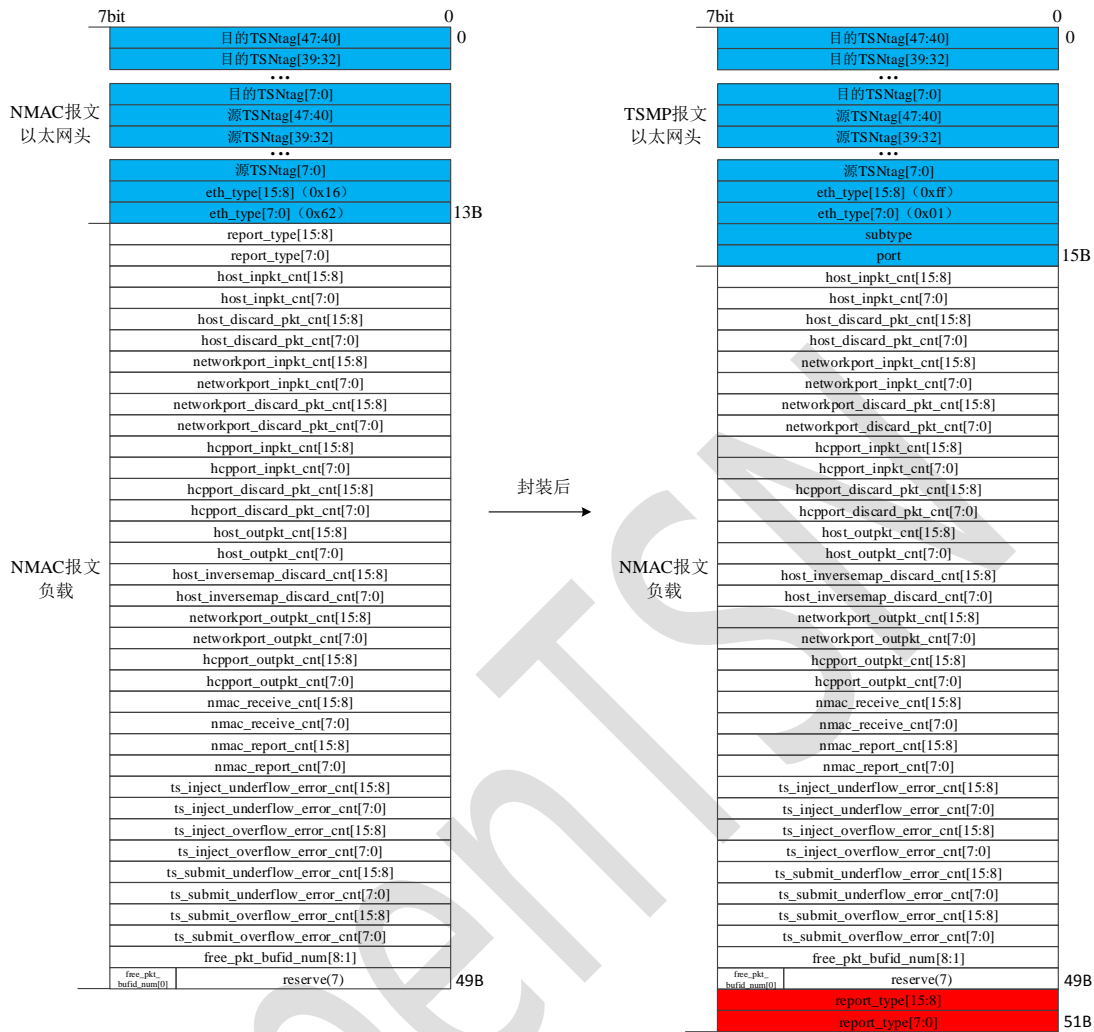


图 C-5 硬件状态上报报文格式

表 C-3 硬件上报计数器说明

名称	位宽	含义
host_inpkt_cnt	16	主机接口接收报文个数计数器
host_discard_pkt_cnt	16	主机接口接收后丢弃的报文个数计数器
networkport_inpkt_cnt	16	网络接口接收报文个数计数器
networkport_discard_pkt_cnt	16	网络接口接收后丢弃的报文个数计数器
hcport_inpkt_cnt	16	控制接口接收报文个数计数器
hcport_discard_pkt_cnt	16	控制接口接收后丢弃的报文个数计数器
host_outpkt_cnt	16	主机接口发送报文个数计数器
host_inversemapped_discard_cnt	16	主机输出接口逆映射未命中报文个数计数器
networkport_outpkt_cnt	16	网络接口发送报文个数计数器
hcport_outpkt_cnt	16	控制接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	ST 报文注入下溢错误计数器（暂无时间敏感报文注入控制功能）
ts_inj_overflow_error_cnt	16	ST 报文注入上溢错误计数器（暂无时间敏感报文注入控制功能）
ts_sub_underflow_error_cnt	16	ST 报文提交下溢错误计数器（暂无时间敏感报文提交控制功能）
ts_sub_overflow_error_cnt	16	ST 报文提交上溢错误计数器（暂无时间敏感报文提交控制功能）
总计	/	35 个

C.2.3. 门控列表表项上报报文格式

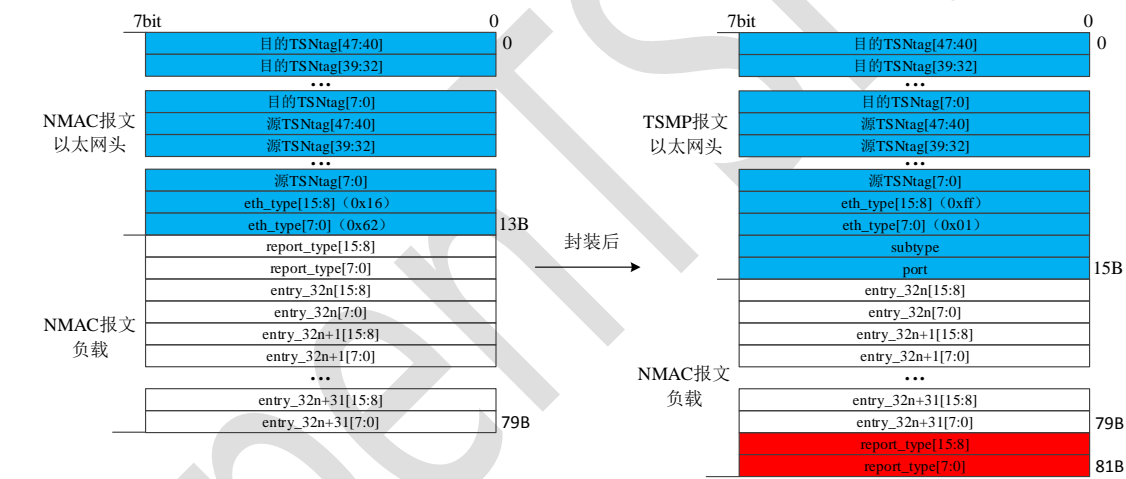


图 C-6 门控列表表项上报报文格式

C.2.4. 映射表表项上报报文格式

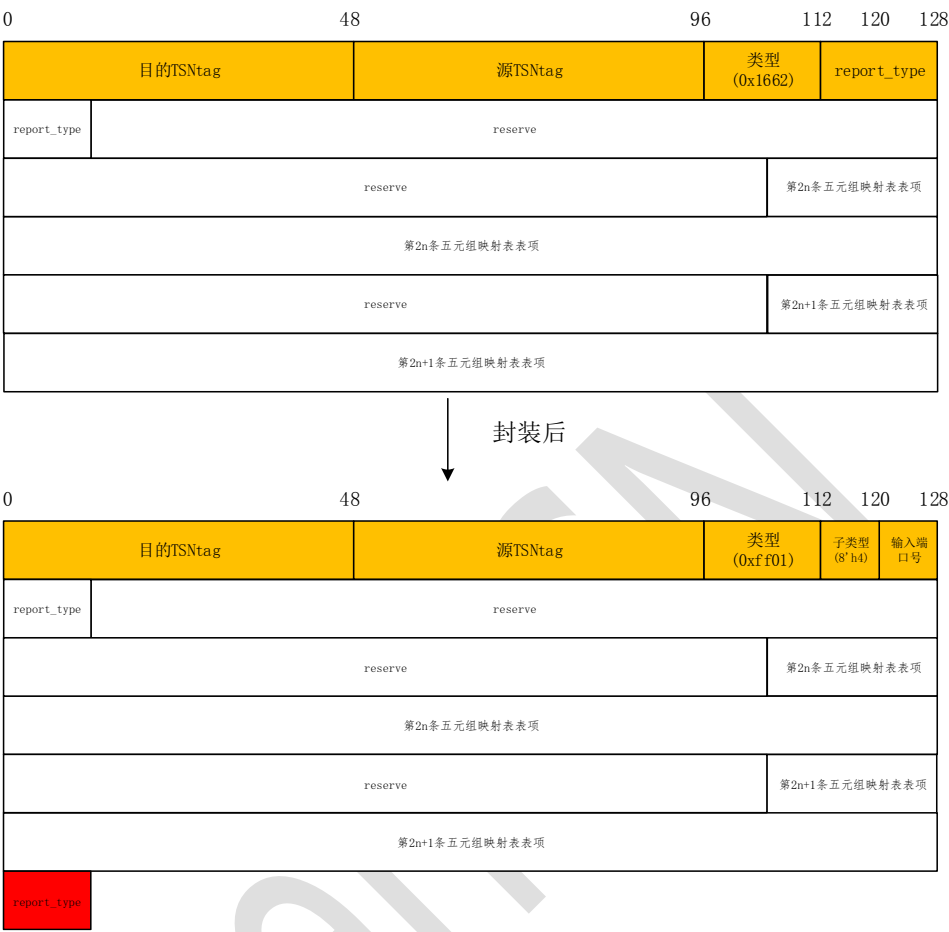


图 C-7 映射表表项上报报文格式

C.2.5. 逆映射表表项上报报文格式

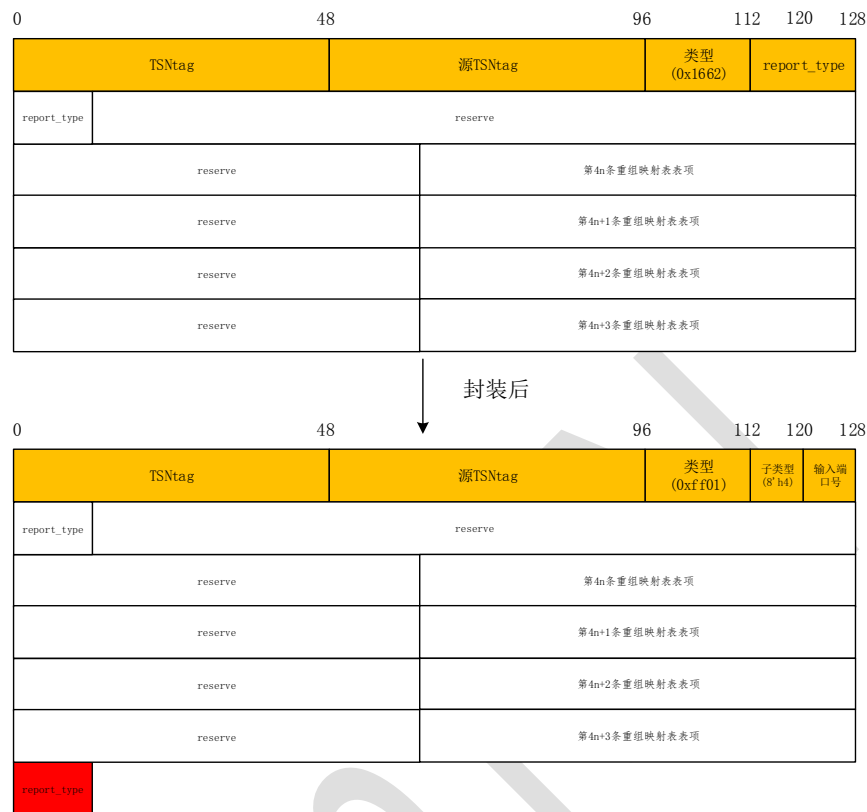


图 C-8 逆映射表表项上报报文格式

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；

位置	位宽	名称	说明
			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 和 Delay_resq 报文格式如下图所示。

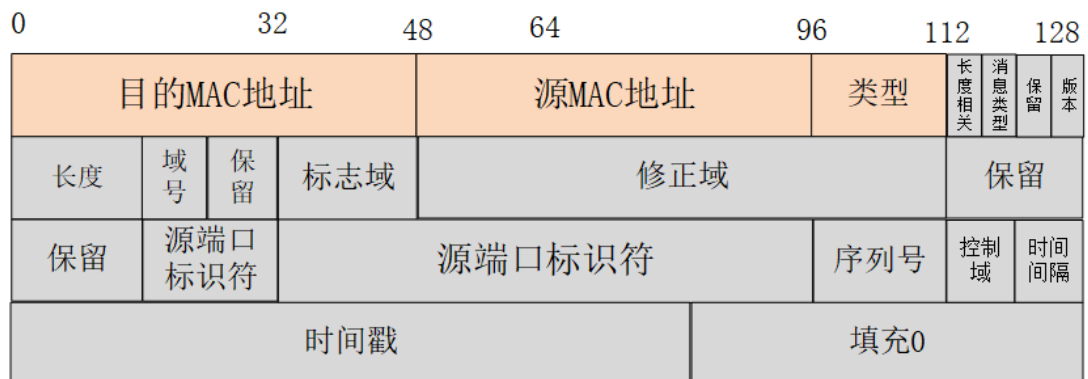


图 E-1 Sync、Delay_req 和 Delay_resq 报文格式

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 芯片和 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下表。

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/网卡配置帧、HCP

		配置帧、ICMP 封装帧、Probe 帧。
输入端口号	8	主机发给 TSN 芯片的帧进入 TSN 芯片的端口号

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
交换机/网卡状态上报 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/网卡配置帧	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 Beacon 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