

# TSN 交换机（TSNSwitch3.4）设计方案

## （版本 1.0）

OpenTSN

OpenTSN 开源项目组

2022 年 05 月

## 版本历史

| 版本  | 修订时间   | 修订内容 | 文件标识       |
|-----|--------|------|------------|
| 1.0 | 2022.5 | 初版编制 | OpenTSN3.4 |
|     |        |      |            |
|     |        |      |            |
|     |        |      |            |
|     |        |      |            |
|     |        |      |            |
|     |        |      |            |
|     |        |      |            |
|     |        |      |            |

## 目录

|        |                          |    |
|--------|--------------------------|----|
| 1.     | 缩略语 .....                | 5  |
| 2.     | 项目概述 .....               | 7  |
| 2.1.   | 设计目标 .....               | 7  |
| 2.2.   | 设计指标 .....               | 8  |
| 3.     | 总体设计 .....               | 8  |
| 3.1.   | OpenTSN HCP .....        | 13 |
| 3.1.1. | TSMP 代理总体设计 .....        | 13 |
| 3.1.2. | OpenSync 定时总体设计 .....    | 21 |
| 3.1.3. | TSMP 转发表总体设计 .....       | 25 |
| 3.1.4. | 循环控制总体设计 .....           | 28 |
| 3.1.5. | 报文交换总体设计 .....           | 29 |
| 3.2.   | OpenSync MAC 总体设计 .....  | 32 |
| 3.2.1. | 内部功能划分 .....             | 32 |
| 3.2.2. | 处理流程 .....               | 34 |
| 3.3.   | OpenTSN 时间敏感交换总体设计 ..... | 36 |
| 3.3.1. | 内部功能划分 .....             | 36 |
| 3.3.2. | 处理流程 .....               | 45 |
| 附录 A.  | 数据格式定义 .....             | 50 |
| A.1.   | 报文格式 .....               | 50 |
| A.2.   | TSN 标签格式 .....           | 51 |
| A.3.   | 报文描述符格式 .....            | 51 |
| 附录 B.  | 读写信息说明 .....             | 52 |
| B.1.   | 硬件地址定义规范 .....           | 52 |
| B.2.   | OpenTSN HCP 读写信息 .....   | 52 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| B.2.1. 寄存器.....             | 52 |
| B.2.2. TSMP 转发表 .....       | 57 |
| B.3. OpenSync MAC 读写信息..... | 58 |
| B.4. TSS 读写信息.....          | 60 |
| B.4.1. 寄存器.....             | 61 |
| B.4.2. 转发表.....             | 63 |
| B.4.3. 门控列表.....            | 65 |
| 附录 C. 网络管理报文格式 .....        | 66 |
| 附录 D. Mbus 格式 .....         | 68 |
| 附录 E. 配置与读取的详细处理流程 .....    | 70 |
| E.1. 配置过程.....              | 72 |
| E.2. 读取过程.....              | 74 |
| 附录 F. PTP/PCF 协议格式 .....    | 76 |
| F.1. PTP 协议格式 .....         | 76 |
| F.2. PCF 协议格式.....          | 77 |
| 附录 G. OpenSync 协议格式.....    | 78 |
| 附录 H. RAM/FIFO 使用情况 .....   | 78 |

## 1. 缩略语

本文包含以下缩略语：

**BE** (Best Effort) 尽力转发流量

**CRC** (Cyclic Redundancy Check) 循环冗余校验

**delay\_req** (delay request) 在 IEEE 1588 时钟同步过程中，从时钟节点发给主时钟节点的延迟请求报文

**DMAC** (Destination Media Access Control) 目的物理地址

**FIFO** (First Input First Output) 先进先出队列

**FlowID** (Flow Identification) 流标识

**FPGA** (Field Programmable Gate Array) 现场可编程门阵列

**Gbps** (GigaBit Per Second) 每秒 1000 兆位

**GMII** (Gigabit Media Independent Interface) 千兆媒体独立接口

**HCP** (Hardware Control Point) 硬件控制点

**IEEE 802.1AS** (IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks) 时间敏感应用的定时和同步

**IEEE 802.1Qcc** (IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks Amendment 31: Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements) 流保留协议增强和性能改进

**IEEE 802.1Qbv** (IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Bridges and Bridged Networks Amendment 25: Enhancements for Scheduled Traffic) 预定流量的增强

**IEEE 802.1Qch** (IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 29: Cyclic Queuing and Forwarding) 循环队列和转发

**LID** (Local IDentification) 本地标识

**Syn\_clk** (Synchronization clock) TSN 交换机同步时钟，该时钟与网络时钟进行同步

**Local\_cnt** (Local time) TSN 交换机本地时间，该时间只在 TSN 交换机中被使用，用于计算 PTP/PCF 报文在 TSN 交换机中驻留时间

**IP** (Internet Protocol) 网络协议

**K** (Kilo) 千，1 千=1024

**MAC** (Media Access Control) 媒体访问控制，或称物理地址、硬件地址

**MHz** (Mega Hertz) 兆赫兹，时钟频率单位

**ms** (millisecond) 毫秒

**NMAC** (Network Management Access Control) 网络管理访问控制

**ns** (nanosecond) 纳秒

**OpenTSN** (Open Time-sensitive Networking) 开源时间敏感网络项目

**OpenSync** (Open Synchronization) 开源同步协议

**PCF** (Protocol Control Frame) 协议控制帧

**PKT** (PacKeT) 报文

**PTP** (Precision Time Protocol) 精准时间协议

**RAM** (Random Access Memory) 随机访问存储器

**RC** (Resource Constraint) 资源约束流量

**s** (second) 秒

**SMAC** (Source Media Access Control) 源物理地址

**ST** (Scheduled Traffic) 预定流量，即时间敏感流量

**sync** (synchronization) 主时钟节点发送给从时钟节点的同步报文

**TC** (Transparent Clock) 透明时钟

**TSMP** (Time Sensitive Management Protocol) 时间敏感管理协议, 详见文档“OpenTSN 时间敏感管理协议 (TSMP) 简介”

**TSN** (Time-Sensitive Networking) 时间敏感网络

**TSNSwitch** (Time-Sensitive Networking Switch) 时间敏感网络交换机

**TSntag** (Time-Sensitive Networking tag) 时间敏感网络标签

**TSS** (Time-Sensitive Switch) 时间敏感交换

**μs** (microsecond) 微秒

## 2. 项目概述

本文档是介绍 OpenTSN (Open Time-Sensitive Networking, 时间敏感网络开源项目)(版本 3.4)中的 TSN(Time-Sensitive Networking, 时间敏感网络)交换机设计, 主要分为缩略语、项目概述、总体设计。

### 2.1. 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 3.4) 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。

## 2.2. 设计指标

- 支持 IEEE 802.1AS、AS6802、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
- 支持标准以太网报文转发
- 支持 8 个 GMII (Gigabit Media Independent Interface, 千兆介质独立接口) 接口
- 硬件调度时间槽范围为 $[2^{12}\text{ns}, 2^{19}\text{ns}]$  (ns:nanosecond, 纳秒)
- 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 (GigaBit Per Second, 每秒 1000 兆位)
- 交换延迟小于  $30\mu\text{s}$
- 支持 16K (Kilo, 千) 条流的转发配置
- 集中式报文交换缓存管理

## 3. 总体设计

TSNSwitch3.4 (Time-Sensitive Networking Switch, 时间敏感网络交换机, 版本 3.4) 的总体设计如图 3-1 所示, TSNSwitch3.4 分为 OpenTSN HCP (Hardware Control Point, 硬件控制点)、OpenTSN 时间敏感交换和 OpenSync MAC 三部分, 其中 OpenTSN HCP 包括 TSMP 代理、TSMP 转发表、OpenSync 定时和循环控制多个模块,



OpenSync MAC 包括 8 个 OpenSync 1GMAC 和 Mbus 解析与封装 9 个模块。

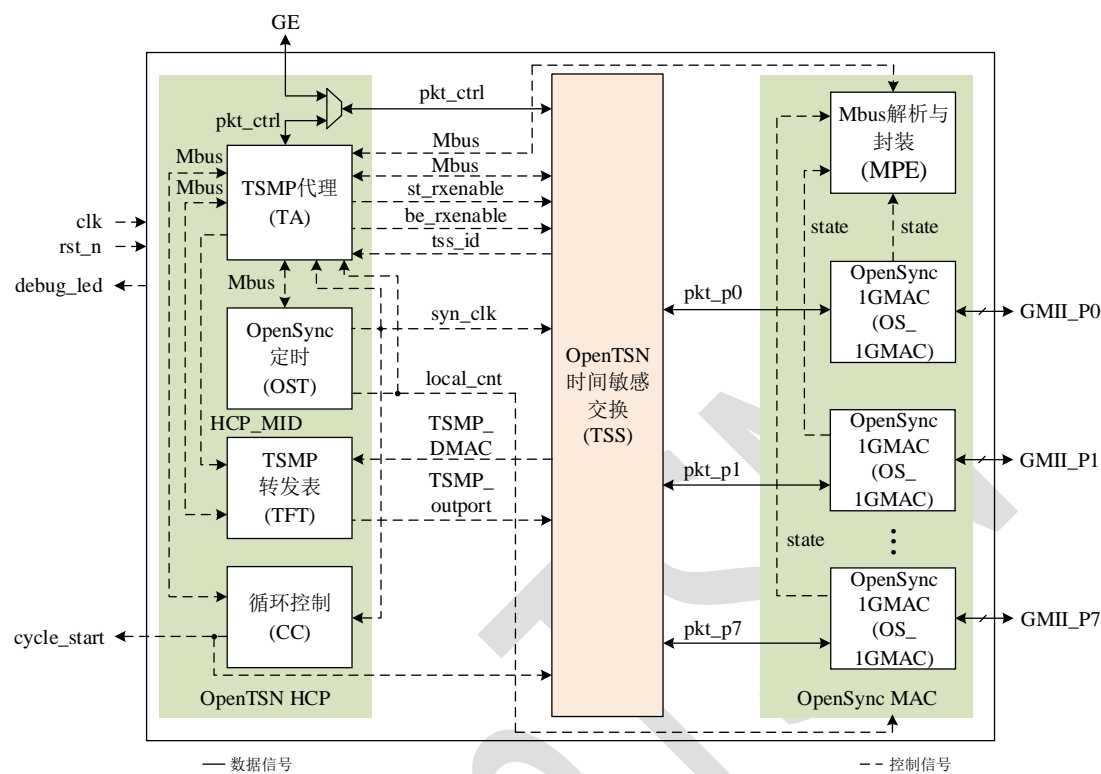


图 3-1 TSNSwitch3.4 总体架构

TSNSwitch3.4 总体架构图中的信号含义如表 3-1 所示。

表 3-1 TSNSwitch3.4 总体架构图中信号含义

| 信号        |                | 位宽<br>bit | 含义   |
|-----------|----------------|-----------|--|
| clk       |                | 1         | TSN 交换机内部时钟，其频率为 125MHz  |
| rst_n     |                | 1         | TSN 交换机内部时钟域下的复位信号，低有效   |
| debug_led |                | 5         | 连接到 FPGA 板卡上的 5 个 LED 灯，LED 灯在低电平时亮，在高电平时灭；该 5 个信号可用于显示 FPGA 加载的硬件（TSN 交换机、TSN 网卡和 TSN 测试仪等）逻辑以及硬件状态 |
| GMII_PN   | gmii_rx_clk_pN | 1         | N 号网络接口 GMII 接收时钟信号，其频率为 125MHz，N=0、1、...、7  |
|           | gmii_rx_dv     | 1         | N 号网络接口 GMII 接收数据有效信号，高有效，N=0、1、...、7  |
|           | gmii_rxd       | 8         | N 号网络接口 GMII 接收数据，N=0、1、...、7  |

| 信号                      |                | 位宽<br>bit | 含义   |
|-------------------------|----------------|-----------|--|
|                         | gmii_rx_er     | 1         | N 号网络接口 GMII 接收数据错误信号，高有效，N=0、1、...、7  |
|                         | gmii_tx_clk    | 1         | N 号网络接口 GMII 发送时钟信号，其频率为 125MHz，N=0、1、...、7                                      |
|                         | gmii_tx_en     | 1         | N 号网络接口 GMII 发送数据有效信号，高有效，N=0、1、...、7  |
|                         | gmii_txd       | 8         | N 号网络接口 GMII 发送数据，N=0、1、...、7  |
|                         | gmii_tx_er     | 1         | N 号网络接口 GMII 发送数据错误信号，高有效，N=0、1、...、7  |
| Mbus                    | cmd            | 64        | 写/读命令，其格式详见附录 D  |
|                         | cmd_wr         | 1         | 写/读命令写信号，高有效   |
|                         | cmd_ack        | 64        | 命令响应，其格式详见附录 D   |
|                         | cmd_ack_wr     | 1         | 命令响应写信号，高有效  |
| pkt_pN<br>/pkt_ctr<br>l | rx_data        | 8         | TSS 接收来自 N 号网络接口或控制接口的数据，该数据不包括前导码、帧开始符和 CRC，N=0、1、...、7                         |
|                         | rx_data_wr     | 1         | TSS 接收来自 N 号网络接口或控制接口的数据有效信号，高有效，N=0、1、...、7                                     |
|                         | tx_data        | 8         | TSS 发送给 N 号网络接口或控制接口的数据，该数据不包括前导码、帧开始符和 CRC，N=0、1、...、7                          |
|                         | tx_data_wr     | 1         | TSS 发送给 N 号网络接口或控制接口的数据有效信号，高有效，N=0、1、...、7                                      |
| TSMP_<br>DMAC           | TSMP_DMAC      | 48        | TSS 传输给 TSMP 转发表的 TSMP 报文查表关键字，即 TSMP 报文的目的 MAC                                  |
|                         | TSMP_DMAC_v    | 1         | TSS 传输给 TSMP 转发表的 TSMP 报文查表关键字有效信号，高有效   |
| TSMP_<br>outport        | TSMP_outport   | 32        | TSMP 帧输出接口的 bitmap   |
|                         | TSMP_outport_v | 1         | 查表结果输出有效信号，高有效   |
| syn_clk                 |                | 64        | 同步时钟，单位为 ns。该时钟与 TSN 网络时钟进行同步  |
| local_cnt               |                | 64        | 本地时间，单位为 ns。该时钟用于计算 PTP/PCF 报文在本交换机中驻留时间   |
| rc_rxenable             |                | 1         | 用于控制网络接口是否接收 RC 帧。信号初始化为 0，丢弃所有接收的 RC 帧。只有完成相关映射表，速测表和整形表配置后才将该信号置 1，打开 RC 帧接收使能 |
| st_rxenable             |                | 1         | 用于控制网络接口是否接收 ST 帧。信号   |

| 信号          | 位宽<br>bit | 含义  |
|-------------|-----------|---|
|             |           | 初始化为 0，只有完成相关映射表，门控表以及相关寄存器配置，以及时间同步后，才将该信号置 1，打开 ST 接收使能 |
| hcp_mid     | 12        | HCP 的管理标识，用于判断 TSMP 报文是否传输给本地 HCP                         |
| tss_id      | 32        | TSS 发给 HCP 的 ID 信息  |
| cycle_start | 1         | 循环周期开始时刻指示信号，高有效  |
| state       | /         | OpenSync 1GMAC 接收/发送的报文个数统计信息，每个统计信息的位宽为 32bit，详见 B.3 章节  |

**TA (Time\_sensitive\_management\_protocol Agent, 时间敏感管理协议 TSMP 代理) 模块：**主要功能是接收并解析来自 OpenTSN 控制器和 OpenSync 控制器的 TSMP (Time Sensitive Management Protocol, 时间敏感管理协议) 报文，获取 OpenTSN 控制器为 HCP 分配的 ID、修改来自/发往 OpenSync 控制器的 OpenSync (Open Synchronization, 开源时钟同步协议) 报文的 MAC 地址以及子类型、将网络管理报文转化为管理总线 Mbus (Management bus, 管理总线) 来实现对本交换机的配置和状态读取；将查转发表未命中报文封装到 TSMP 协议中传输给 OpenTSN 控制器；在接口发送端，对发往主/从时钟节点的 OpenSync 报文的发送时刻进行补偿（补偿结果存放在 OpenSync 头中）；在接口接收侧，计算本交换机接收到来自主/从时钟节点的 PTP/PCF 报文接收时刻，并存放在 OpenSync 头中。

**OST (Open Synchronization circuit, OpenSync 定时) 模块：**主要功能是解析 Mbus，对时钟同步相关寄存器进行配置或读取；维护一个同步时钟，并根据 OpenSync 控制器配置的信息来对同步时钟进行赋值、相位校正和频率校正；同步时钟每经过一个调度周期，输出一拍脉冲（用来判断同步时钟与 TSN 网络时钟的同步精度以及硬件调度周期开始时刻）；维护一个本地时间，将该时间输出给接收侧

OpenSync MAC 处理和发送侧 OpenSync MAC 处理模块，用于计算 PTP/PCF 报文在本交换机驻留时间。

**TFT (Time\_sensitive\_management\_protocol Forward Table, TSMP 转发表) 模块：**主要功能是维护一个 TSMP 报文转发表；解析 Mbus，对 TSMP 转发表进行配置和读取；接收时间敏感交换 TSS 传来的查表关键字，将查表结果输出给 TSS。

**CC (Cycle Control, 循环控制) 模块：**主要功能是根据循环长度寄存器产生循环周期开始指示 cycle\_start，用于网络中不同交换设备和网卡上开始时刻对齐。

**PSW (Packet Switch, 报文交换) 模块：**主要功能是接收来自 TA 和 CPU 的报文，并汇聚输出给 TSS；接收来自 TSS 报文，根据 MID 来判定将报文传输给 TA 还是 CPU。

**MPE(Management\_bus Parse and Encapsulation, 管理总线解析与封装)模块：**主要功能是接收并解析来自 TA 的命令，根据命令中地址来对 OpenSync 1GMAC 模块中状态进行读取，并将命令响应输出给 TA。

**OS\_1GMAC (OpenSync 1Gigabit\_Media\_access\_control, OpenSync 1GMAC) 模块：**主要功能是在 MAC 接收端，去掉报文前导码、帧开始符和 CRC (Cyclic Redundancy Check, 循环冗余校验)，并控制报文长度 (不包括 CRC) 在 60B (包括该值) ~1514B (包括该值) 之间；将报文传输时钟域由 GMII 接收时钟域切换为 TSS 内部时钟域；对来自/发往 TSN 控制器的 OpenSync 报文进行传输，记录接收 PTP (Precision Time Protocol, 精确时间同步) /PCF (Protocol Control Frame, 协议控制帧) 报文的时间戳 (当前本地时间值)，将 PTP/PCF 报文封装在 OpenSync 协议中，并将接收本地时间值存放在

OpenSync 头中。在 MAC 发送端，将发往主/从时钟节点的 OpenSync 报文解封装为 PTP/PCF，计算 PTP/PCF 报文在本交换机中的驻留时间，并将其累加到报文的修正域中；将报文传输时钟域由 TSS 内部时钟域切换为 GMII 发送时钟域；在报文以太网头前面增加前导码和帧开始符；计算报文 CRC，在报文末尾新增 4B 用于存放 CRC。

**TSS(Timing Sensitive Switch, 时间敏感交换)模块:** 主要功能是接收 TA 传来的管理总线 Mbus, 对 TSS 进行配置和状态读取; 在不同的硬件启动阶段对不同类型 ST、RC 报文进行过滤; 从标准以太网报文中学习 MAC 地址; 对 TSN 报文和标准以太网报文进行查表转发; 基于 IEEE 802.1Qch/IEEE 802.1Qbv 调度模型对流量进行整形。

### 3.1. OpenTSN HCP

### 3.1.1. TSMP 代理总体设计

#### 3.1.1.1. 内部功能划分

TSMP 代理的内部功能划分如图 3-2 所示,下面对模块的功能进行描述。

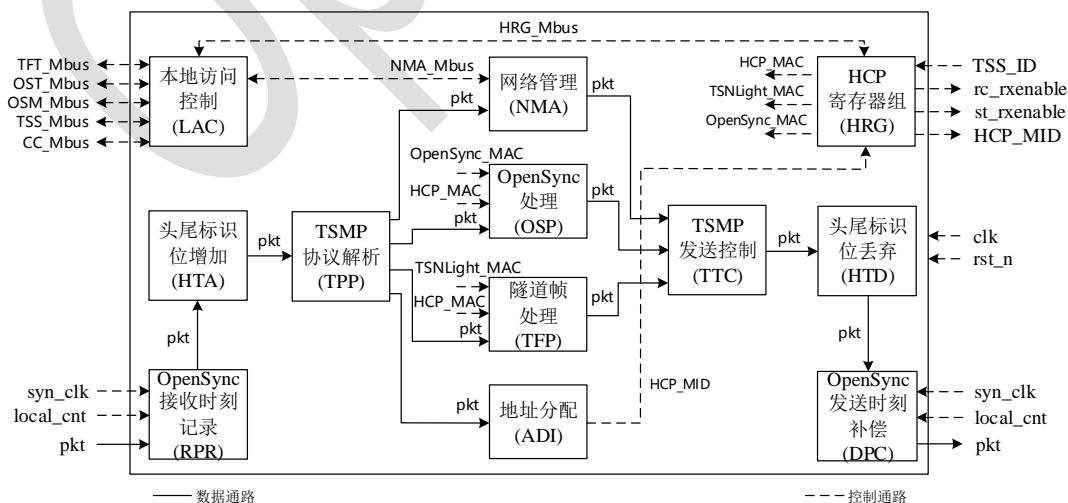


图 3-2 TSMP 代理内部功能划分

TSMP 代理内部功能划分图中的信号格式含义如表 3-2 所示。

表 3-2 TSMP 代理内部功能划分图中信号含义

| 信号           | 位宽<br>bit  | 含义   |
|--------------|------------|--|
| clk          | 1          | HCP 内部时钟，其频率为 125MHz   |
| rst_n        | 1          | HCP 内部时钟域下的复位信号，低有效  |
| HCP_MID      | 12         | HCP 的管理标识。HCP 使用 MID 标识生成自己的 MAC 地址。规则为：<br>MAC[47:24]=0x662662；<br>MAC[23:12]= HCP_MID；<br>MAC[11:0]=0x000； |
| rc_rxenable  | 1          | 用于控制网络接口是否接收 RC 帧。信号初始化为 0，丢弃所有接收的 RC 帧。只有完成相关映射表，速测表和整形表配置后才将该信号置 1，打开 RC 帧接收使能                             |
| st_rxenable  | 1          | 用于控制网络接口是否接收 ST 帧。信号初始化为 0，只有完成相关映射表，门控表以及相关寄存器配置，以及时间同步后，才将该信号置 1，打开 ST 接收使能                                |
| TSS_ID       | 32         | TSS 逻辑的 ID，通常用于标识功能和版本号  |
| pkt          | data       | 8/9 每拍传输的数据  |
|              | data_wr    | 1 每拍传输的数据有效信号，高有效  |
| xxx_<br>Mbus | cmd        | 64 HCP 输出给 xxx 模块的读写命令，其中 xxx 指时间敏感交换 TSS、OpenSync 定时、TSMP 转发表、OpenSync MAC 和控制循环                            |
|              | cmd_wr     | 1 HCP 输出给 xxx 模块的读写命令有效信号，其中 xxx 指时间敏感交换 TSS、OpenSync 定时、TSMP 转发表、OpenSync MAC 和控制循环                         |
|              | cmd_ack    | 64 xxx 模块返回给 HCP 的命令响应，其中 xxx 指时间敏感交换 TSS、OpenSync 定时、TSMP 转发表、OpenSync MAC 和控制循环                            |
|              | cmd_ack_wr | 1 xxx 模块返回给 HCP 的命令响应有效信号，其中 xxx 指时间敏感交换 TSS、OpenSync 定时、TSMP 转发表、OpenSync MAC 和控制循环                         |
| HCP_MAC      | 48         | HCP 的 MAC 地址   |
| TSNLight_MAC | 48         | OpenTSN 控制器的 MAC 地址  |
| OpenSync_MAC | 48         | OpenSync 控制器的 MAC 地址   |

**RPR(Receive Pit Record, 接收时钟记录)模块:** 主要功能是识别来自主/从时钟节点的 OpenSync 报文, 记录接收到该报文时的当前同步时钟值和本地时间值, 将当前本地时间值与网络接口接收该报文的本地时间值做差值来计算报文在 TSS 中驻留时间, 将该驻留时间计算到当前同步时钟值中, 将修正后的同步时钟值存放在 OpenSync 报文头中; 直接转发输出其它报文。

**HTA (Head and Tail bit Add, 头尾标识位增加) 模块:** 主要功能是为报文每拍数据增加 1bit 的头尾标识位。

**TPP (Time-sensitive-management-protocol Protocol Parse, TSMP 协议解析) 模块:** 主要功能是识别报文类型, 将网络管理类型的 TSMP 报文传输给网络管理模块, OpenSync 类型的 TSMP 报文传输给 OpenSync 处理模块, 地址分配类型的 TSMP 报文传输给地址分配模块, 查转发表未命中的帧和隧道封装 TSMP 帧传输给隧道帧处理模块。

**ADI (Address DIstribute, 地址分配) 模块:** 主要功能是接收并解析来自 OpenTSN 控制器的地址分配类型的 TSMP 报文, 获取 HCP 管理标识, 并将其传输给 HCP 寄存器组模块。

**TFP (Tunnel Frame Process, 隧道帧处理) 模块:** 主要功能是接收在本交换机查转发表未命中报文, 将其封装到 TSMP 协议中传输给 OpenTSN 控制器; 接收来自 OpenTSN 控制器的隧道封装类型的 TSMP 报文 (当前设计方案中暂无该类报文), 并将其解封装后输出给 TSS 中。

**OSP (OpenSync Process, OpenSync 处理) 模块:** 主要功能是接收来自 OpenTSN 控制器的 OpenSync 类型的 TSMP 报文, 将其目的 MAC 和源 MAC 替换为 (被封装在 TSMP 协议中的) PTP/PCF 报

文的目的 MAC 和源 MAC；接收来自主/从时钟节点的 OpenSync 报文，将其目的 MAC 和源 MAC 替换为 OpenTSN 控制器的 MAC 和 HCP 的 MAC。

**NMA (Network MAnagement, 网络管理) 模块：**主要功能是接收并解析来自 OpenTSN 控制器的网络管理类型的 TSMP 报文，将其转换为管理总线 Mbus 来对本交换机进行配置和状态读取；在接收到 Mbus 的响应后，构造网络管理响应类型的 TSMP 报文传输给 OpenTSN 控制器，报文携带 Mbus 响应中的地址和数据信息。

**LAC (Local Access Control, 本地访问控制) 模块：**主要功能是接收网络管理模块传来的 Mbus，并将其传输给对应的模块进行寄存器和表的配置与读取；接收各模块传来的 Mbus 响应，并将其传输给网络管理模块。

**HRG (Hardware-control-point Register Group, HCP 寄存器组) 模块：**主要功能是根据 MID 来生成 MAC 地址，管理 HCP 相关寄存器，包括 HCP/OpenTSN 控制器/OpenSync 控制器的 MAC 地址和 ST/RC 报文接收使能等；解析接收到的命令来实现对寄存器的读写。

**TTC (Time-sensitive-management-protocol Transmit Control, TSMP 发送控制) 模块：**主要功能是对网络管理模块、OpenSync 处理模块、隧道帧处理模块和地址分配模块传来的报文进行调度输出，并控制报文与报文之间的输出间隔。

**HTD (Head and Tail bit Discard, 头尾标识位丢弃) 模块：**主要功能是去掉报文的头尾标识位。

**DPC(Dispatch Pit Compensate, OpenSync 发送时刻补偿)模块：**主要功能是记录发往主/从时钟节点的 OpenSync 的接收同步时钟和本地时间，计算 HCP 接口接收 OpenSync 报文时的同步时钟与控制器



发送 OpenSync 报文的时钟的差值，并将该差值计算到 HCP 接口接收 OpenSync 报文的本地时间中，把修正后的本地时间存放在 OpenSync 头中；直接转发输出其它报文。

#### 3.1.1.2. 处理流程

TSMP 代理的报文处理包括地址分配报文处理、隧道报文处理、来自 OpenSync 控制器并发往主/从时钟节点的 OpenSync 报文处理、来自主/从时钟节点并发往 OpenSync 控制器的 OpenSync 报文处理和网络管理报文处理，下面详细介绍其处理流程。

##### 3.1.1.2.1. 地址分配报文处理流程

在硬件启动后，OpenTSN 控制器为 TSN 网络中每个节点分配 HCP 标识。下面介绍其处理流程。

**OpenSync 接收时刻记录**模块接收并识别报文不是来自主/从时钟节点的 OpenSync 报文后直接输出给**头尾标识位增加**模块。

**头尾标识位增加**模块接收到报文后，为每拍数据增加 1bit 的头尾标识位，传输报文给 **TSMP 协议解析**模块。

**TSMP 协议解析**模块接收到报文后，根据长度/类型、TSMP 协议类型和子类型来识别地址分配报文，并从报文中提取 HCP 标识并传输给 **HCP 寄存器组**模块。

##### 3.1.1.2.2. 隧道报文处理流程

TSMP 代理接收在本交换机中查转发表未命中的报文，将其封装后传输给 OpenTSN 控制器；接收来自 OpenTSN 控制器的隧道封装类

型的 TSMP 报文，并将其解封装后输出给 TSS 中。下面介绍其处理流程。

隧道报文在 **OpenSync** 接收时刻记录、头尾标识位增加模块的处理与地址分配报文相同。

**TSMP 协议解析**模块接收到报文后，根据长度/类型来识别隧道报文，将隧道报文传输给**隧道帧处理**模块。

**隧道帧处理**模块接收到报文后，根据以太网类型来识别在本交换机中查转发表未命中报文和来自 **OpenTSN** 控制器的报文。针对在本交换机中查转发表未命中的报文，将报文封装在 TSMP 协议中，其中 TSMP 的目的 MAC 地址为 TSN 控制器的 MAC，源 MAC 地址为 HCP 的 MAC 地址；传输封装后的报文给 **TSMP 发送控制**模块。针对来自 **OpenTSN** 控制器的报文（目前暂无该类型报文），将该报文解封装后传输给 **TSMP 发送控制**模块。

**TSMP 发送控制**模块轮询调度地址分配、隧道帧处理、**OpenSync** 处理和网络管理模块传来的报文并输出给**头尾标识位丢弃**模块；在输出报文时，控制报文与报文之间的输出间隔。

**头尾标识位丢弃**模块接收到报文后，将报文传输时钟域由 HCP 内部时钟域切换到 GMII 发送时钟域，去掉报文的头尾标识位后输出给 **OpenSync 发送时刻补偿**模块。

**OpenSync 发送时刻补偿**模块接收并识别该报文不是发往主/从时钟节点的 **OpenSync** 报文后，直接转发输出给 TSS。

### 3.1.1.2.3. 来自 OpenSync 控制器并发往主/从时钟节点的 OpenSync 报文处理流程

HCP 会对来自 OpenSync 控制器并发往主/从时钟节点的 OpenSync 报文进行处理。下面介绍其处理流程。

OpenSync 报文在 **OpenSync** 接收时刻记录、头尾标识位增加模块的处理与隧道报文相同。

**TSMP 协议解析**模块接收到报文后，根据长度/类型、TSMP 协议类型和子类型来识别 OpenSync 报文，将 OpenSync 报文传输给 **OpenSync 处理**模块。

**OpenSync 处理**模块接收到报文后，针对来自 OpenSync 控制器的 OpenSync 类型的 TSMP 报文，将其目的 MAC 和源 MAC 替换为（被封装在 TSMP 协议中的）PTP/PCF 报文的目的 MAC 和源 MAC；输出报文给 **TSMP 发送控制**模块。

OpenSync 报文在 **TSMP 发送控制**和**头尾标识位丢弃**模块的处理与 Packet-in 报文相同。

**OpenSync 发送时刻补偿**模块接收到报文后，记录发往主/从时钟节点的 OpenSync 报文的接收同步时钟 `receive_syn_clk` 和本地时间 `receive_local_cnt`，从 OpenSync 头中提取出 OpenSync 控制器发送 OpenSync 报文的时刻 `dispatch_pit`；计算发送时刻的补偿量为 `receive_syn_clk - dispatch_pit`，将该补偿量计算到 `receive_local_cnt` 中，即 `receive_cnt = receive_local_cnt - (receive_syn_clk - dispatch_pit)`；将 `receive_cnt` 存放在 OpenSync 头中；针对其它报文则直接输出。

#### 3.1.1.2.4. 来自主/从时钟节点并发往 OpenSync 控制器的 OpenSync 报文处理流程

TSMP 代理会对来自主/从时钟节点并发往 OpenSync 控制器的 OpenSync 报文进行处理。下面介绍其处理流程。

**OpenSync 接收时刻记录**模块接收到报文后，识别来自主/从时钟节点的 OpenSync 报文，记录接收到该报文时的当前同步时钟值 `current_syn_clk` 和本地时间值 `current_local_cnt`，从 OpenSync 头中取出接收时间 `receive_cnt`；计算报文在 TSS 中驻留时间为 `current_local_cnt - receive_cnt`，将该驻留时间计算到当前同步时钟值中，即 `current_syn_clk - (current_local_cnt - receive_cnt)`，把该计算结果存放在 OpenSync 报文头中。针对其它报文则直接输出。

来自主/从时钟节点的 OpenSync 报文在**头尾标识位增加**和**TSMP 协议解析**模块的处理与来自 OpenSync 控制器的 OpenSync 报文相同。

**OpenSync 处理**模块接收到报文后，针对来自主/从时钟节点的 OpenSync 报文，将其目的 MAC 和源 MAC 替换为 TSN 控制器的 MAC 和 HCP 的 MAC；输出报文给**TSMP 发送控制**模块。

来自主/从时钟节点的 OpenSync 报文在**TSMP 发送控制**和**头尾标识位丢弃**模块的处理与来自 OpenSync 控制器的 OpenSync 报文相同。

**OpenSync 发送时刻补偿**模块接收并识别该报文不是发往主/从时钟节点的 OpenSync 报文后，直接转发输出给 TSS。

### 3.1.1.2.5. 网络管理报文处理流程

TSMP 代理将网络管理报文转换为管理总线 Mbus 来实现对本交换机的配置与状态读取, 将读取信息携带在网络管理响应报文中传输给 TSN 控制器。下面介绍其处理流程。

网络管理报文在 **OpenSync** 接收时刻记录、头尾标识位增加、**TSMP** 发送控制、头尾标识位丢弃和 **OpenSync** 发送时刻补偿模块的处理与 Packet-in 报文相同。

**TSMP** 协议解析模块接收到报文后, 根据长度/类型、TSMP 协议类型和子类型来识别网络管理报文, 将网络管理报文传输给**网络管理**模块。

**网络管理**模块接收到报文后, 解析报文, 从报文中提取配置/读取数据个数、配置/读取基地址以及读写类型, 并生成 Mbus 输出; 在接收到 Mbus 响应后, 将响应中的地址和数据写到 FIFO 中进行缓存, 在 FIFO 中存满本次响应的所有寄存器/表项时, 本模块开始生成并输出网络管理响应报文给 TSN 控制器, 从 FIFO 中读出地址和数据, 并携带在网络管理响应报文中。

## 3.1.2. OpenSync 定时总体设计

### 3.1.2.1. 内部功能划分

**OpenSync** 定时 OST 的内部功能划分如图 3-3 所示, 下面对模块的功能进行描述。

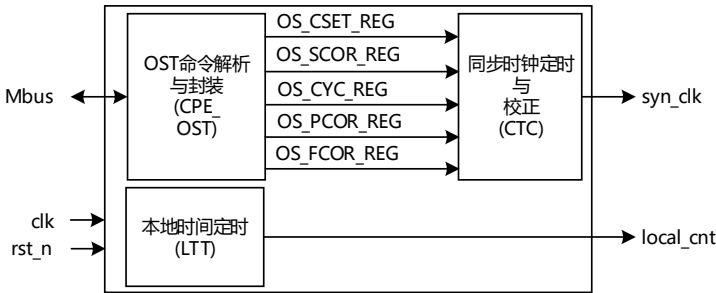


图 3-3 OpenSync 定时内部功能划分

OST 内部功能划分图中的信号含义如表 3-3 所示。

表 3-3 OpenSync 定时内部功能划分图中信号含义

| 信号          |              | 位宽<br>bit | 含义  |
|-------------|--------------|-----------|---|
| clk         |              | 1         | TSS 内部时钟，其频率为 125MHz  |
| rst_n       |              | 1         | TSS 内部时钟域下的复位信号，低有效   |
| Mbus        | iv_addr      | 19        | 寄存器或表项的读写模块地址，该信号为读写地址复用信号；当寄存器/表项写使能 i_wr 有效时，该信号表示写地址，当寄存器/表项读使能 i_rd 有效时，该信号表示读地址，                               |
|             | i_addr_fixed | 1         | 地址固定信号，其中 1'b0 表示寄存器或表项地址已固定，不可更改，1'b1 表示寄存器或表项地址可灵活修改，用户可自定义其地址  |
|             | iv_wdata     | 32        | 配置寄存器/表项的数据   |
|             | i_wr         | 1         | 配置寄存器/表项的写使能信号，高有效  |
|             | i_rd         | 1         | 读取寄存器/表项的读使能信号，高有效  |
|             | o_wr         | 1         | 读出的寄存器/表项的有效信号，高有效  |
|             | ov_addr      | 19        | 读出的寄存器/表项的模块地址  |
|             | o_addr_fixed | 1         | 读出的寄存器/表项的地址固定信号，其中 1'b0 表示寄存器或表项地址已固定，不可更改，1'b1 表示寄存器或表项地址可灵活修改，用户可自定义其地址  |
| OS_CSET_REG |              | 64        | OpenSync 控制器对硬件同步时钟进行赋值，单位为 ns。该寄存器在 1588 P2P 每轮时钟同步过程以及 AS6802 冷启动过程被使用到，在 1588 E2E 时钟同步过程中不需要被使用                  |
| OS_SCOR_REG |              | 32        | OpenSync 控制器对定时电路时钟设置的 32 位校准值（Clock Set Correction），单位为 ns。该寄存器在 1588 P2P 每轮时钟同步过程以及 AS6802 冷启动过程被使用到，在 1588 E2E 时 |

| 信号          | 位宽<br>bit | 含义  |
|-------------|-----------|---|
|             |           | 钟同步过程中不需要被使用。   |
| OS_CYC_REG  | 32        | AS6802 时钟同步模式下同步周期（集成周期）的长度。单位为 ns。Syn_clk 值等于该寄存器时，重置为零。该寄存器在 AS6802 时钟同步模式下被使用。   |
| OS_PCOR_REG | 32        | OpenSync 控制器校正 OpenTSN 网络中从时钟节点与主时钟节点的硬件同步时钟在相位上的偏移量，其中高 1bit 数值表示相位偏差校正值的正负号（1'b0 表示正，1'b1 表示负），低 31bit 数值表示相位偏差校正值，单位为 ns |
| OS_FCOR_REG | 32        | 同步时钟频率校正值寄存器用于 OpenSync 控制器对 OpenTSN 网络中从时钟节点的硬件同步时钟的频率进行校正。  |
| syn_clk     | 64        | 与 OpenTSN 网络时钟同步后的时钟，单位为 ns   |
| local_cnt   | 64        | 本节点内部维护并使用的时间，单位为 ns，该时间用于计算 PTP/PCF 报文在本节点的驻留时间  |

**CPE\_OST(Command Parse and Encapsulate OpenSynchronization\_Timing, OpenSync 定时)模块：**主要功能是接收并解析命令，实现 OpenSync 定时中寄存器配置与读取。

**CTC(synchronization\_Clock Timing and Correcting, 同步时钟定时与校正)模块：**主要功能是对同步时钟进行定时，根据 OpenSync 控制器配置值来对同步时钟进行赋值、相位校正和频率校正，并将校正后的同步时钟输出。

**LTT(Local Time Timing, 本地时间定时)模块：**主要功能是维护一个本地时间，在内部时钟域下进行定时，并输出给 OpenSync MAC 和 TSMP 代理模块用于透明时钟的计算。

### 3.1.2.2. 处理流程

#### 3.1.2.2.1. 同步时钟校正处理流程

OpenSync 定时支持 OpenSync 控制器对硬件同步时钟进行赋值、相位校正和频率校正。在 1588 P2P 时钟同步模式下，OpenSync 控制器通过对硬件同步时钟进行赋值来实现硬件同步时钟与 OpenTSN 网络时钟进行同步；在 AS6802 时钟同步模式下，OpenSync 控制器通过对硬件同步时钟进行赋值、相位校正和频率校正来实现硬件同步时钟与 OpenTSN 网络时钟进行同步。下面介绍其处理流程。

在对硬件同步时钟进行赋值时，需要“同步时钟赋值寄存器”和“同步时钟赋值校正参考值寄存器”来共同参与实现。OpenSync 定时解析 Mbus 得到 OpenSync 控制器下发的“同步时钟赋值寄存器”配置值 OS\_CSET\_REG 和“同步时钟赋值校正参考值寄存器”配置值 OS\_SCOR\_REG 时，记录当前硬件同步时钟  $current\_synchronization\_clock$ ，若同步时钟频率校正值为 OS\_FCOR\_REG，则将硬件同步时钟校正为  $OS\_CSET\_REG + (current\_synchronization\_clock - OS\_SCOR\_REG) + OS\_FCOR\_REG$ 。

在对硬件同步时钟进行相位校正时，OpenSync 定时解析 Mbus 获得 OpenSync 控制器下发的“同步时钟相位校正值寄存器”配置值 OS\_PCOR\_REG 时，记录当前硬件同步时钟为  $current\_synchronization\_clock$ ，若同步时钟频率校正值为 OS\_FCOR\_REG，则将硬件同步时钟校正为  $current\_synchronization\_clock + OS\_PCOR\_REG + OS\_FCOR\_REG$ 。

在对硬件同步时钟进行频率校正时，OpenSync 定时解析 Mbus 获得 OpenSync 控制器下发的“同步时钟频率校正值寄存器”配置值 OS\_FCOR\_REG；硬件同步时钟在每个时钟周期累加值为



OS\_FCOR\_REG。（在硬件上电复位时，根据硬件晶振频率来对同步时钟频率校正寄存器 OS\_FCOR\_REG 赋初值（例如在晶振频率为 125MHz 时，将 OS\_FCOR\_REG 赋初值为 8ns））。

3.1.2.2.2. 本地时间定时处理流程

在 OpenSync 定时中维护一个 64bit 的本地时间 local\_cnt，其数值单位为 ns；在系统时钟下，每经过一个时钟周期，将本地时间 local\_cnt 加 8ns（在当前设计中晶振频率为 125MHz）；当 local\_cnt[63:0]计满时，将 local\_cnt 从 0 开始重新计数。

3.1.3. TSMP 转发表总体设计

3.1.3.1. 内部功能划分

TSMP 转发表 TFT 的内部功能划分如图 3-4 所示，下面对模块的功能进行描述。

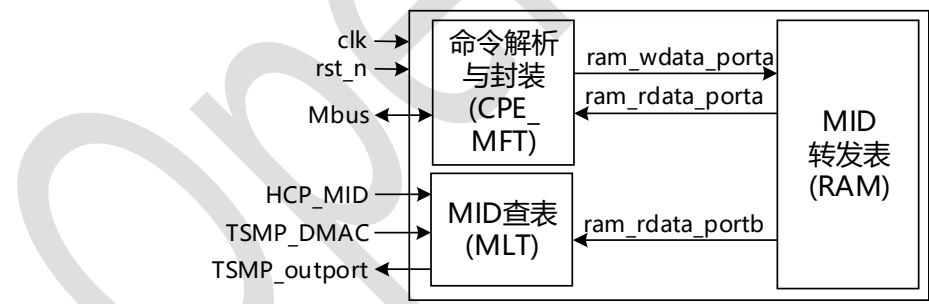


图 3-4 TSMP 转发表内部功能划分

TFT 内部功能划分图中的信号含义如表 3-4 所示。

表 3-4 TSMP 转发表内部功能划分图中信号含义

| 信号    |         | 位宽<br>bit | 含义                                       |
|-------|---------|-----------|--|
| clk   |         | 1         | TSS 内部时钟，其频率为 125MHz                     |
| rst_n |         | 1         | TSS 内部时钟域下的复位信号，低有效                      |
| Mbus  | iv_addr | 19        | 寄存器或表项的读写模块地址，该信号为读写地址复用信号；当寄存器/表项写使能 i_ |

| 信号              |              | 位宽<br>bit | 含义   |
|-----------------|--------------|-----------|--|
|                 |              |           | wr 有效时, 该信号表示写地址, 当寄存器/表项读使能 i_rd 有效时, 该信号表示读地址,   |
|                 | i_addr_fixed | 1         | 地址固定信号, 其中 1'b0 表示寄存器或表项地址已固定, 不可更改, 1'b1 表示寄存器或表项地址可灵活修改, 用户可自定义其地址   |
|                 | iv_wdata     | 32        | 配置寄存器/表项的数据  |
|                 | i_wr         | 1         | 配置寄存器/表项的写使能信号, 高有效  |
|                 | i_rd         | 1         | 读取寄存器/表项的读使能信号, 高有效  |
|                 | o_wr         | 1         | 读出的寄存器/表项的有效信号, 高有效  |
|                 | ov_addr      | 19        | 读出的寄存器/表项的模块地址   |
|                 | o_addr_fixed | 1         | 读出的寄存器/表项的地址固定信号, 其中 1'b0 表示寄存器或表项地址已固定, 不可更改, 1'b1 表示寄存器或表项地址可灵活修改, 用户可自定义其地址   |
|                 | ov_rdata     | 32        | 读出的寄存器/表项中数据   |
| ram_wdata_porta |              | 34        | OpenTSN 控制器配置的 MID 转发表表项内容, 即输出接口的 bitmap, 其第 0bit、第 1 bit、...、第 31bit 和第 32bit 分别对应 0 号网络接口、1 号网络接口、...、31 号网络接口和控制接口。注: 第 33bit 表示表项有效位, 高有效 |
| ram_rdata_porta |              | 34        | OpenTSN 控制器读取的 MID 转发表表项内容, 即输出接口的 bitmap, 其第 0bit、第 1 bit、...、第 31bit 和第 32bit 分别对应 0 号网络接口、1 号网络接口、...、31 号网络接口和控制接口。注: 第 33bit 表示表项有效位, 高有效 |
| ram_rdata_portb |              | 34        | TSMP 报文查表时从 MID 转发表中读取的表项内容, 即输出接口的 bitmap, 其第 0bit、第 1bit、...、第 31bit 和第 32bit 分别对应 0 号网络接口、1 号网络接口、...、31 号网络接口和控制接口。注: 第 33bit 表示表项有效位, 高有效 |
| HCP_MID         |              | 12        | HCP 管理标识, 用于判断 TSMP 报文是否传输给本地 HCP  |
| TSMP_DMAC       |              | 48        | TSMP 报文目的 MAC, 用于查找 TSMP 转发表   |
| TSMP_outport    |              | 33        | TSMP 报文查表结果, 即输出接口的 bitmap,  |

| 信号 | 位宽<br>bit | 含义   |
|----|-----------|--|
|    |           | 其第 0bit、第 1bit、...、第 31bit 和第 32bit 分别对应 0 号网络接口、1 号网络接口、...、31 号网络接口和控制接口 |

**CPE\_MFT(Command Parse and Encapsulation time\_sensitive\_Management\_protocol\_Forward\_Table, MFT 命令解析与封装)模块:** 主要功能是接收并解析来自 TSMP 代理的 Mbus, 实现对 MID 转发表的配置与读取。

**RAM(Random Access Memory, 随机访问缓存)模块:** 主要功能是设计一个真双端口 RAM 来缓存 MID 转发表, RAM 位宽为 34bit, 深度为 4096。

**MLT(Management\_identification Lookup Table, MID 查表)模块:** 主要功能是接收时间敏感交换 TSS 传来的查表关键字; 在接收到 OpenTSN 控制器发来的第一个配置报文时, 不用将关键字去查找转发表, 而直接将查表结果设置为传输给 HCP, 并输出查表结果给 TSS; 在接收到 OpenTSN 控制器发来的后续配置报文时, 先判断该查表关键字中 MID 是否等于 HCP 的 MID, 若等于, 则将查表结果设置为传输给 HCP 并输出查表结果的 TSS; 若不等于, 则用该关键字去查找 TSMP 转发表, 并输出查表结果给 TSS。

### 3.1.3.2. 处理流程

在本模块设计一个位宽为 34bit, 深度为 4096 的真双端口 RAM 来缓存 MID 转发表。TSMP 转发表模块接收并解析来自 TSMP 代理的 Mbus, 实现对 MID 转发表的配置与读取。本模块在接收到 OpenTSN 控制器发来的第一个配置报文时, 不用将关键字去查找转发表, 而直接将查表结果设置为传输给 HCP, 并输出查表结果给 TSS; 在接收到 OpenTSN 控制器发来的后续配置报文时, 先判断该查表关

键字中 MID 是否等于 HCP 的 MID，若等于，则将查表结果设置为传输给 HCP 并输出查表结果的 TSS；若不等于，则用该查表关键字中 MID 作为地址去读取 TSMP 转发表中数据（在两个时钟周期后获得数据），将读出的数据，即输出接口 TSMP\_outport，输出给 TSS。

3.1.4. 循环控制总体设计

3.1.4.1. 内部功能划分

循环控制 CC 的内部功能划分如图 3-5 所示，下面对模块的功能进行描述。

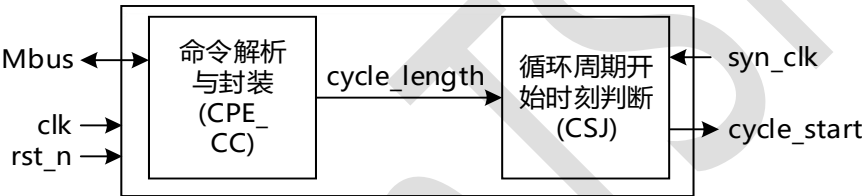


图 3-5 循环控制 CC 内部功能划分

CC 内部功能划分图中的信号含义如表 3-5 所示。

表 3-5 循环控制内部功能划分图中信号含义

| 信号    |              | 位宽<br>bit | 含义  |
|-------|--------------|-----------|---|
| clk   |              | 1         | HCP 内部时钟，其频率为 125MHz  |
| rst_n |              | 1         | HCP 内部时钟域下的复位信号，低有效   |
| Mbus  | iv_addr      | 19        | 寄存器或表项的读写模块地址，该信号为读写地址复用信号；当寄存器/表项写使能 i_wr 有效时，该信号表示写地址，当寄存器/表项读使能 i_rd 有效时，该信号表示读地址， |
|       | i_addr_fixed | 1         | 地址固定信号，其中 1'b0 表示寄存器或表项地址已固定，不可更改，1'b1 表示寄存器或表项地址可灵活修改，用户可自定义其地址                      |
|       | iv_wdata     | 32        | 配置寄存器/表项的数据   |
|       | i_wr         | 1         | 配置寄存器/表项的写使能信号，高有效  |
|       | i_rd         | 1         | 读取寄存器/表项的读使能信号，高有效  |

| 信号           |              | 位宽<br>bit | 含义   |
|--------------|--------------|-----------|--|
|              | o_wr         | 1         | 读出的寄存器/表项的有效信号，高有效   |
|              | ov_addr      | 19        | 读出的寄存器/表项的模块地址   |
|              | o_addr_fixed | 1         | 读出的寄存器/表项的地址固定信号，其中 1'b0 表示寄存器或表项地址已固定，不可更改，1'b1 表示寄存器或表项地址可灵活修改，用户可自定义其地址 |
|              | ov_rdata     | 32        | 读出的寄存器/表项中数据   |
| cycle_length |              | 1         | 循环长度，单位 ns；当前该寄存器取值只能为 2 <sup>n</sup>                                      |
| syn_clk      |              | 64        | 同步后的时钟，单位为 ns  |
| cycle_start  |              | 1         | 循环周期开始指示信号   |

**CPE\_CC(Command Parse and Encapsulation Cycle\_Control, CC 命令解析与封装)模块：**主要功能是接收并解析来自 TSMP 代理的 Mbus，实现对 CC 中寄存器的配置与读取。

**CSJ(Cycle Start Judge, 循环周期开始时刻判断)模块：**主要功能是根据循环长度寄存器产生循环周期开始指示 cycle\_start，用于网络中不同交换设备和网卡开始时刻对齐。

#### 3.1.4.2. 处理流程

循环控制 CC 接收并解析来自 TSMP 代理的 Mbus，实现对循环长度寄存器的配置与读取；同步后的时钟每经过一个循环长度，则产生一拍的循环周期开始指示 cycle\_start，用于网络中不同交换设备和网卡开始时刻对齐。

#### 3.1.5. 报文交换总体设计

##### 3.1.5.1. 内部功能划分

报文交换 PSW 的内部功能划分如图 3-6 所示，下面对模块的功能进行描述。

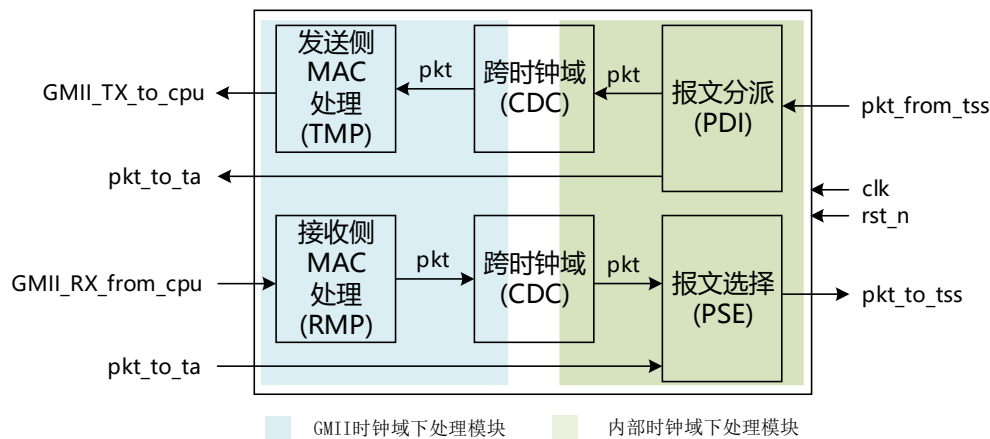


图 3-6 报文交换 PSW 内部功能划分

OpenSync 1GMAC 内部功能划分图中的信号含义如表 3-7 所示。

表 3-6 OpenSync 1GMAC 内部功能划分图中信号含义

| 信号  |             | 位宽<br>bit | 含义                              |
|---|-------------|-----------|---------------------------------|
| clk   |             | 1         | HCP 内部时钟，其频率为 125MHz            |
| rst_n   |             | 1         | HCP 内部时钟域下的复位信号，低有效             |
| GMII_TX_<br>to_cpu                                | gmii_tx_clk | 1         | GMII 发送时钟                       |
|   | gmii_tx_en  | 1         | GMII 发送数据有效信号，高有效               |
|   | gmii_txd    | 8         | GMII 发送数据，该数据包括前导码、帧开始符和 CRC    |
|   | gmii_tx_er  | 1         | GMII 发送数据错误信号                   |
| GMII_RX_<br>from_cpu                              | gmii_rx_clk | 1         | GMII 接收时钟                       |
|   | gmii_rx_dv  | 1         | GMII 接收数据有效信号，高有效               |
|   | gmii_rxd    | 8         | GMII 接收数据，该数据包括前导码、帧开始符和 CRC    |
|   | gmii_rx_er  | 1         | GMII 接收数据错误信号                   |
| pkt/pkt_from_ta/pkt_to_ta/pkt_from_tss/pkt_to_tss | data        | 8         | 每个时钟周期传输的数据，该数据不包括前导码、帧开始符和 CRC |
|   | data_wr     | 1         | 每个时钟周期传输的数据有效信号，高有效             |

**RMP（Receiving-side Media-access-control Process，接收侧**

**MAC 处理）模块：**主要功能是接收 GMII 数据，去掉报文中前导码、帧开始符和 CRC；控制接收到的报文长度（不包括 CRC）在 60B（包

括该值)~1514B (包括该值) 之间; 控制 IP 帧的 IP 首部中长度字段值与 IP 帧实际长度一致。

**CDC (Clock Domain Cross, 跨时钟域) 模块:** 主要功能是将报文传输时钟域由 GMII 接收时钟域切换为 TSS 内部时钟域。

**PDI (Packet Dispatch, 报文分派) 模块:** 主要功能是接收来自 TSS 报文, 将目的 MAC[47:24]为 24'h662662 且 MAC[23:12]不是 12'h000 的报文传输给 CPU, 其它报文传输给 TA。

**PSE (Packet Select, 报文选择) 模块:** 主要功能是接收来自 TA 和 CPU 的报文并汇聚输出给 TSS。

**TMP (Transmitting-side Media-access-control Process, 发送侧 MAC 处理) 模块:** 主要功能是为报文增加前导码、开始符; 计算报文 CRC, 并在报文末尾增加 4B 用于存放 CRC。

### 3.1.5.2. 处理流程

#### 3.1.5.2.1. 来自 CPU 和 TA 的报文传输给 TSS 处理流程

**接收侧 MAC 处理模块**接收来自 CPU 的 GMII 接口传来的报文, 去掉报文的前导码、帧开始符和 CRC。控制接收到的报文长度 (不包括 CRC) 在 60B (包括该值)~1514B (包括该值) 之间, 若报文长度小于 60B, 则在报文末尾新增数据 0, 直至报文长度为 60B; 若报文长度超过 1514B, 则丢弃超出的部分; 若报文长度在 60B (包括该值)~1514B (包括该值) 之间, 则说明报文长度在合理范围内, 不需对报文长度进行处理。输出报文给**跨时钟域**模块。

**跨时钟域**模块接收到报文后, 将报文传输时钟域由 GMII 接收时钟域切换为 HCP 内部时钟域, 将该报文输出给**报文选择**模块。

报文选择模块接收来自 CPU 和 TA 报文，分别用一个 FIFO 来缓存报文；对两个 FIFO 中报文进行轮询调度，并汇聚输出报文给 TSS。

### 3.1.5.2.2. 来自 TSS 报文分派给 CPU 和 TA 处理流程

报文分派模块接收到来自 TSS 报文后，若该报文目的 MAC[47:24] 为 36'h662662，且目的 MAC[23:12] 不是 12'h00，则将该报文传输给 CPU；否则将该报文传输给 TA。

跨时钟域模块接收到需要传输给 CPU 的报文后，将报文传输时钟域由 HCP 内部时钟域切换为 GMII 发送时钟域；输出报文给发送侧 MAC 处理模块。

发送侧 MAC 处理模块接收到报文后，为报文增加前导码、开始符；计算报文 CRC，并在报文末尾增加 4B 用于存放 CRC；从 GMII 接口输出报文。

## 3.2. OpenSync MAC 总体设计

### 3.2.1. 内部功能划分

OpenSync MAC 中每个千兆接口 OpenSync 1GMAC 的内部功能划分如图 3-7 所示，下面对模块的功能进行描述。

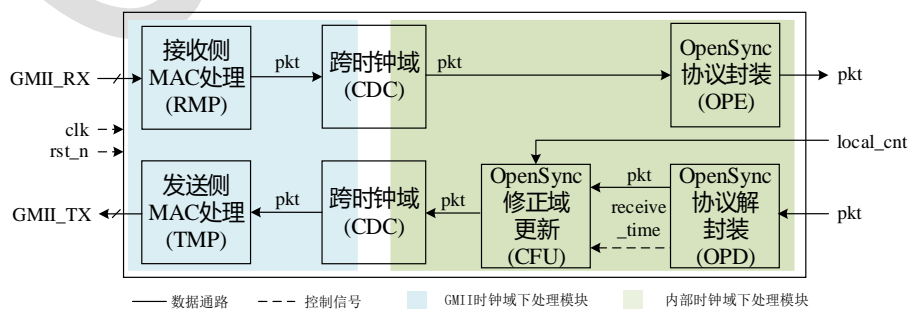


图 3-7 OpenSync 1GMAC 内部功能划分

OpenSync 1GMAC 内部功能划分图中的信号含义如表 3-7 所示。



表 3-7 OpenSync 1GMAC 内部功能划分图中信号含义

| 信号           |             | 位宽<br>bit | 含义  |
|--------------|-------------|-----------|---|
| clk          |             | 1         | TSS 内部时钟，其频率为 125MHz  |
| rst_n        |             | 1         | TSS 内部时钟域下的复位信号，低有效   |
| GMII_TX      | gmii_tx_clk | 1         | GMII 发送时钟   |
|              | gmii_tx_en  | 1         | GMII 发送数据有效信号   |
|              | gmii_txd    | 8         | GMII 发送数据   |
|              | gmii_tx_er  | 1         | GMII 发送数据错误信号   |
| GMII_RX      | gmii_rx_clk | 1         | GMII 接收时钟   |
|              | gmii_rx_dv  | 1         | GMII 接收数据有效信号   |
|              | gmii_rxd    | 8         | GMII 接收数据   |
|              | gmii_rx_er  | 1         | GMII 接收数据错误信号   |
| pkt          |             | 8         | 每个时钟周期传输的数据   |
| receive_time |             | 64        | 交换机网络接口的 OpenSync 协议封装模块接收到 PTP/PCF 报文时记录的时间或 HCP 接口的发送时刻补偿模块接收到 OpenSync 报文时计算的时间，单位为 ns |
| local_cnt    |             | 64        | 本地时间，单位为 ns。该时间用于计算 PTP/PCF 报文在交换机中的驻留时间  |

**RMP (Receiving-side Media-access-control Process, 接收侧 MAC 处理) 模块:** 主要功能是接收 GMII 数据，去掉报文中前导码、帧开始符和 CRC；控制接收到的报文长度（不包括 CRC）在 60B（包括该值）~1514B（包括该值）之间；控制 IP 帧的 IP 首部中长度字段值与 IP 帧实际长度一致。

**CDC (Clock Domain Cross, 跨时钟域) 模块:** 主要功能是将报文传输时钟域由 GMII 接收时钟域切换为 TSS 内部时钟域。

**OPE(Opensync Protocol Encapsulation, OpenSync 协议封装)模块:** 主要功能是将 PTP 和 PCF 封装到 OpenSync 协议中，并将接收本地时间存放在 OpenSync 头中；直接转发输出非 PTP 和 PCF 报文。

**OPD(Opensync Protocol Decapsulation, OpenSync 协议解封装)模块:** 主要功能是将 OpenSync 协议解封装为 PTP 报文或 PCF 报文，

并从 OpenSync 协议头中提取出该报文在 TSS 网络接收接口/HCP 发送接口存放的时间信息；直接转发输出其它报文。

**CFU(Correct Field Update, 修正域更新)模块：**主要功能是识别 PTP 或 PCF，记录接收到 PTP 或 PCF 时当前本地时间值，将该值与 TSS 网络接收接口/HCP 发送接口存放的时间信息做差值来计算报文在 TSS 中驻留时间，并将其累加到报文修正域中；直接转发输出其它报文。

**TMP (Transmitting-side Media-access-control Process, 发送侧 MAC 处理) 模块：**主要功能是为报文增加前导码、帧开始符；计算报文 CRC，并在报文末尾增加 4B 用于存放 CRC。

### 3.2.2. 处理流程

#### 3.2.2.1. OpenSync 1GMAC 接收处理流程

**接收侧 MAC 处理模块**接收 GMII 接口传来的报文，去掉报文的前导码、帧开始符和 CRC。控制接收到的报文长度（不包括 CRC）在 60B（包括该值）~1514B（包括该值）之间，若报文长度小于 60B，则在报文末尾新增数据 0，直至报文长度为 60B；若报文长度超过 1514B，则丢弃超出的部分；若报文长度在 60B（包括该值）~1514B（包括该值）之间，则说明报文长度在合理范围内，不需对报文长度进行处理。输出报文给**跨时钟域**模块。

**跨时钟域**模块接收到报文后，将报文传输时钟域由 GMII 接收时钟域切换为 TSS 内部时钟域，将该报文输出给 **OpenSync 协议封装**模块。

网络接口的 **OpenSync 协议封装**模块接收到报文后，根据长度/类型域来识别 PTP 和 PCF，并将其封装到 OpenSync 协议中，OpenSync

协议的目的 MAC 和源 MAC 填充为 PTP 和 PCF 报文的目的 MAC 和源 MAC；记录 PTP 和 PCF 的接收本地时间值，即 `receive_cnt`（用于在 TSS 网络发送接口/HCP 接收接口计算 PTP 和 PCF 在本交换机中的驻留时间），并将其存放在 OpenSync 头中。针对其它报文则直接输出。

#### 3.2.2.2. OpenSync 1GMAC 发送处理流程

OpenSync 1GMAC 发送端接收到 OpenTSN 时间敏感交换 TSS 传来的报文后，将该报文传输给 **OpenSync 协议解封装和修正域更新**模块进行处理。

**OpenSync 协议解封装**模块接收到报文后，将 OpenSync 协议解封装为 PTP 报文或 PCF 报文，从 OpenSync 协议头中提取出该报文在 TSS 网络接收接口/HCP 发送接口存放的时间信息 `rx_time`；将 PTP 报文或 PCF 报文、时间信息传输给**修正域更新**模块；针对其它报文则直接传输给**修正域更新**模块。**修正域更新**模块识别 PTP 或 PCF，记录接收到 PTP 或 PCF 时当前本地时间值 `current_local_cnt`，计算报文在 TSS 中驻留时间为 `current_local_cnt - receive_cnt`，并将其累加到报文修正域中，即 `correctionfield = correctionfield + (current_local_cnt - receive_cnt)`；针对其它报文则直接输出。

**跨时钟域**模块接收到报文后，将报文传输时钟域由 TSS 内部时钟域切换为 GMII 发送时钟域；输出报文给**发送侧 MAC 处理**模块。

**发送侧 MAC 处理**模块接收到报文后，为报文增加前导码、开始符；计算报文 CRC，并在报文末尾增加 4B 用于存放 CRC；从 GMII 接口输出报文。

3.3. OpenTSN 时间敏感交换总体设计

3.3.1. 内部功能划分

OpenTSN 时间敏感交换 TSS 的内部功能划分如图 3-8 所示，下面对模块的功能进行描述。

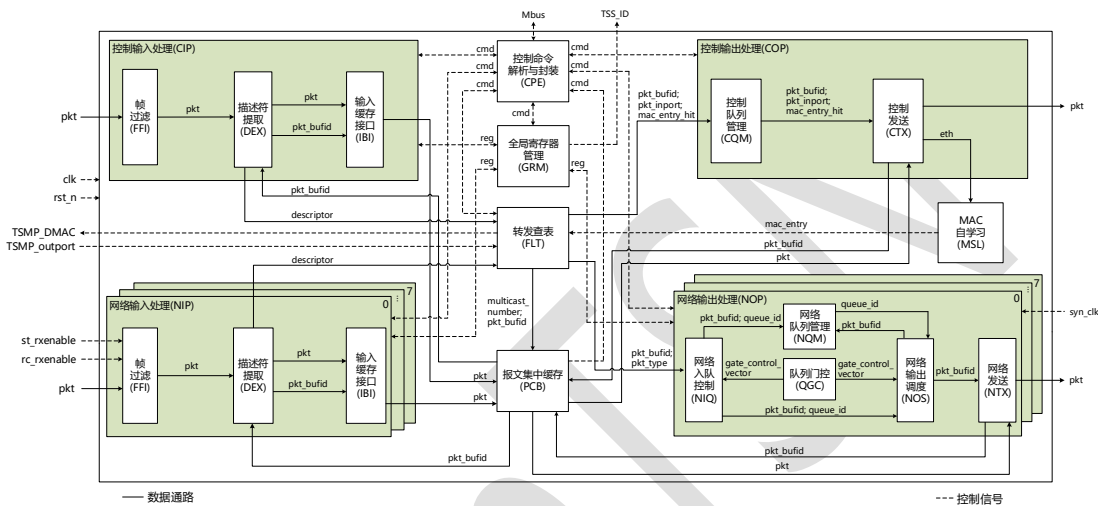


图 3-8 OpenTSN 时间敏感交换内部功能划分

TSS 内部功能划分图中的信号含义如表 3-8 所示。

表 3-8 TSS 内部功能划分图中信号含义

| 信号             |             | 位宽<br>bit   | 含义                                   |
|----------------|-------------|-------------|--------------------------------------|
| clk            |             | 1           | TSS 内部时钟，其频率为 125MHz                 |
| rst_n          |             | 1           | TSS 内部时钟域下的复位信号，低有效                  |
| Mbus           | cmd         | 64          | 写/读命令，其格式详见附录 D                      |
|                | cmd_wr      | 1           | 写/读命令写信号，高有效                         |
|                | cmd_ack     | 64          | 命令响应，其格式详见附录 D                       |
|                | cmd_ack_wr  | 1           | 命令响应写信号，高有效                          |
| TSS_ID         |             | 32          | TSS 发给 HCP 的 ID 信息，通常用于标识功能和版本号      |
| pkt            |             | 8/9/<br>134 | 每个时钟周期传输的数据，其格式详见附录 A                |
| eth            |             | 9           | 以太网报文                                |
| descri<br>ptor | dmac/tsntag | 48          | 标准以太网报文的目的 MAC 或者 TSN 报文的 TS<br>N 标签 |

| 信号               |                             | 位宽<br>bit | 含义  |
|------------------|-----------------------------|-----------|---|
|                  | standardpkt_t<br>snpkt_flag | 1         | 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   |
|                  | pkt_inport                  | 4         | 报文输入 TSN 交换机的接口号  |
|                  | lookup_en                   | 1         | 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         | 报文在不查转发表情况下的输出接口号, 只有在 1'lookup_en 为 1'b0 时, 该字段才被使用  |
|                  | pkt_bufid                   | 9         | 报文在集中缓存区中的缓存标识, 每个缓存标识对应位宽为 134bit、深度为 128 的缓存空间  |
| TSMP_DMAC        |                             | 48        | TSMP 报文查表关键字, 即目的 MAC   |
| TSMP_outport     |                             | 33        | TSMP 报文查表命中时的结果, 即输出接口的 bit map, 其第 0bit、第 1bit、...、第 31bit 和第 32bit 分别对应 0 号网络接口、1 号网络接口、...、31 号网络接口和控制接口   |
| rc_rxenable      |                             | 1         | 用于控制网络接口是否接收 RC 帧。信号初始化为 0, 丢弃所有接收的 RC 帧。只有完成相关映射表, 速测表和整形表配置后才将该信号置 1, 打开 RC 帧接收使能   |
| st_rxenable      |                             | 1         | 用于控制网络接口是否接收 ST 帧。信号初始化为 0, 只有完成相关映射表, 门控表以及相关寄存器配置, 以及时间同步后, 才将该信号置 1, 打开 ST 接收使能  |
| pkt_type         |                             | 3         | 报文类型, 其中 3'h0、3'h1 和 3'h2 表示 ST 报文类型, 3'h3 表示 RC 报文类型, 3'h4 表示 PTP 报文类型, 3'h5 表示 TSMP 报文类型, 3'h6 和 3'h7 表示 BE 报文类型  |
| queue_id         |                             | 3         | 网络输出接口中 8 个队列的标识, 用于标识报文描述符缓存在 8 个队列中的哪个队列  |
| multicast_count  |                             | 4         | 组播 (包括广播) 报文的输出端口数量   |
| gate_ctrl_vector |                             | 8         | 8 个队列的输入门控状态和输出门控状态。针对 802.1Qch 调度模型, 非时间敏感报文的输入队列和输出队列的门控状态固定为开, 若时间敏感报文的奇数队列的门控状态为“开”、偶数队列的门控状态为“关”, 则将时间敏感报文描述符写到奇数队列中进行缓存, 并且可从偶数队列中调度输出时间敏感报文描述符; 若时间敏感报文的偶数队列的门控状态为“开”、奇数队列门控状态为“关”, 则将时间敏感报文描述符写到偶数队列中进行缓存, 并且可从奇数队列中调度输出时间敏感报文描述符; 针对 802.1Qbv 调度模型, 输入门控状态固定为开, 输出门控状态从门控列表中获取, 若队列门 |

| 信号            | 位宽<br>bit | 含义  |
|---------------|-----------|---|
|               |           | 控状态为“开”。则可从队列中调度输出报文描述符；否则不可从队列中调度输出报文描述符   |
| mac_entry_hit | 1         | 查静态 MAC 转发表和动态 MAC 转发表是否命中信号，其中 1'b1 表示查表命中，1'b0 表示查表未命中；该信号用于 MAC 自学习模块确定是否从标准以太网报文中学习其 MAC 地址 |
| mac_entry     | -         | MAC 自学习模块从标准以太网报文中学习到的 MAC 地址和输出接口号   |
| syn_clk       | 64        | 与 TSN 网络时钟同步后的同步时钟，单位为 ns   |

现将 TSS 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，下面对此五部分逻辑进行逐一介绍。

### 3.3.1.1. 网络输入处理逻辑

网络输入处理 NIP 的内部功能划分如图 3-9 所示。

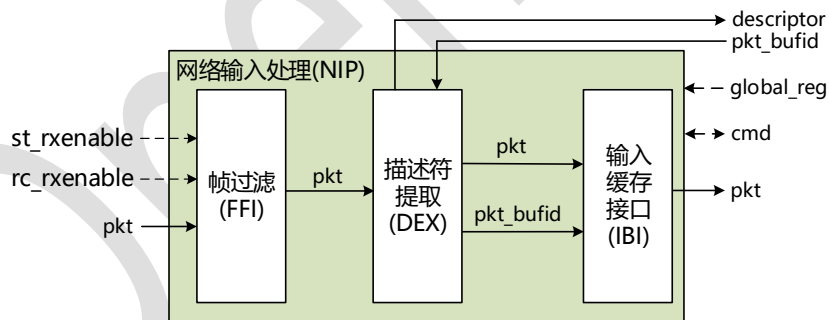


图 3-9 NIP 模块内部功能划分

**FFI(Frame Filter, 帧过滤)模块：**主要功能是接收接口传来的报文，为报文每拍数据增加 1bit 的头尾标识位；根据报文以太网类型来识别标准以太网报文和 TSN 报文，并对 ST、RC 报文进行过滤。若 ST 接收使能为高，则才能接收 ST 报文；否则丢弃 ST 报文。若 RC 接收使能为高，则才能接收 RC 报文；否则丢弃 RC 报文。

**DEX(Descriptor EXtract, 描述符提取)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 `pkt` (`packet`, 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描述符, 对 RC (`Resource Constraint`, 资源约束) 报文、BE (`Best Effort`, 尽力转发流量) 报文和标准以太网报文进行监管。若监管通过, 则将其描述符输出给转发查表模块; 在配置阶段, 指定 TSMP 报文的输出接口为控制接口; 在时钟同步阶段和正常工作阶段, 不指定 TSMP 报文的输出接口; 若监管不通过, 则丢弃其描述符。

**IBI(Input Buffer Interface, 输入缓存接口)模块:** 主要功能是将报文写到报文集中缓存模块进行缓存。本模块接收 DEX 模块传来的每拍数据位宽为 134bit 的报文, 并使用两个 134bit 的 `ping-pong` 寄存器来循环存储报文, 只要其中任何一个寄存器中存有数据便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。

### 3.3.1.2. 网络输出处理逻辑

网络输出处理 NOP 的内部功能划分如图 3-10 所示。

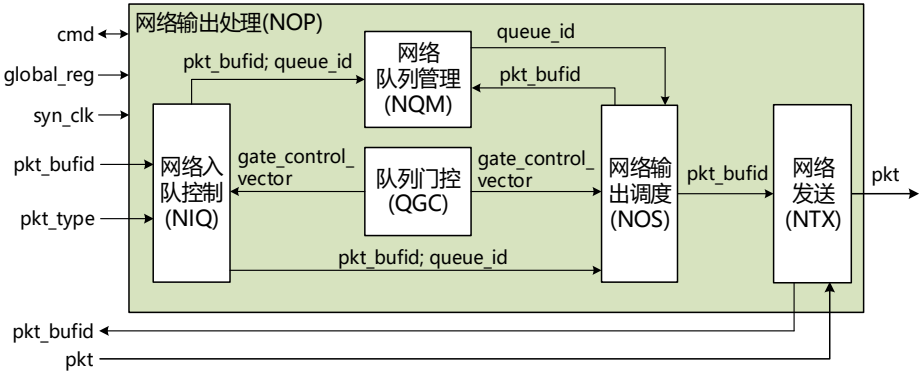


图 3-10 NOP 模块内部功能划分

**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的队列中进行缓存。本模块需要根据接收到的报文类型 `pkt_type`、队列门控模块传来的门控状态 `gate_control_vector` 来选择 `pkt_bufid` 缓存的队列, 并将 `pkt_bufid` 及其缓存的队列标识 `queue_id` 发送给网络队列管理模块; 根据 `pkt_bufid` 及其缓存的 `queue_id` 来对每个队列的尾地址来进行管理; 将 `pkt_bufid` 与 `queue_id` 发送给网络输出调度模块, 用于网络输出调度模块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 (`pkt_bufid` 与 `queue_id`) 与网络输出调度模块传来的队列调度的信号来对每个队列的状态 (队列中缓存的 `pkt_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 8 个队列进行集中缓存管理。

**QGC(Queue Gate Control, 队列门控)模块:** 主要功能是对本模块的门控列表进行写入或读取; 从门控列表(其格式如表 3-9 所示)中读出当前同步时钟的 8 个队列门控状态, 并将门控状态传输给网络入队控制 NIQ 模块和网络输出调度 NOS 模块。

表 3-9 门控列表数据格式



| 名称                    | 含义   | 备注                         |
|-----------------------|--|----------------------------|
| gate_ctrl_vector[7:0] | 门控向量, gate_ctrl_vector[0]、...、gate_ctrl_vector[7]分别表示队列 0、...、队列 7 的门控状态 | 使用 RAM 来进行缓存, RAM 深度为 1024 |

**NOS(Network Output Schedule, 网络输出调度)模块:** 主要功能是根据 8 个队列状态(是否为空)、队列门控状态(“开”还是“关”)和队列的优先级来对队列进行调度,从网络队列管理模块的对应队列中读出 pkt\_bufid 并输出给网络发送模块,以及更新对应队列首地址。

**NTX(Network TX, 网络发送)模块:** 主要功能是从报文集中缓存 PCB 模块中读取报文,将报文每拍数据的位宽由 134bit 转换为 8bit,并将 pkt\_bufid 传输给报文集中缓存 PCB 模块进行释放;控制报文与报文之间输出间隔。

### 3.3.1.3. 控制输入处理逻辑

控制输入处理 CIP 的内部功能划分如图 3-11 所示。

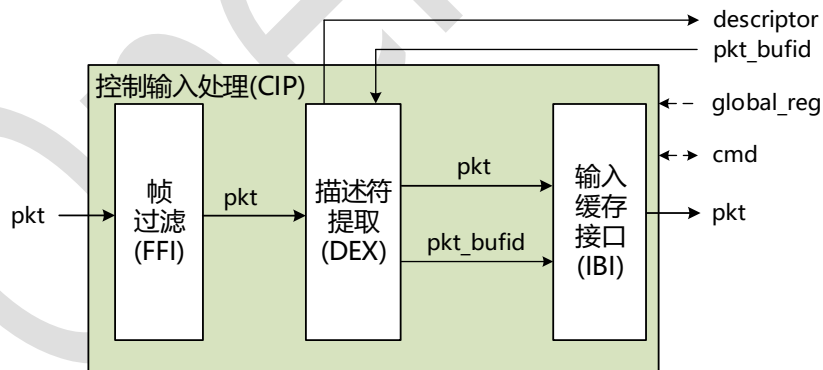


图 3-11 CIP 模块内部功能划分

**FFI(Frame Filter, 帧过滤)模块:** 主要功能详见 3.3.1.1 章节。

**DEX(Descriptor EXtract, 描述符提取)模块:** 主要功能详见 3.3.1.1 章节。

**IBI(Input Buffer Interface, 输入缓存接口)模块:** 主要功能详见

### 3.3.1.1 章节。

#### 3.3.1.4. 控制输出处理逻辑

控制输出处理 COP 的内部功能划分如图 3-12 所示。

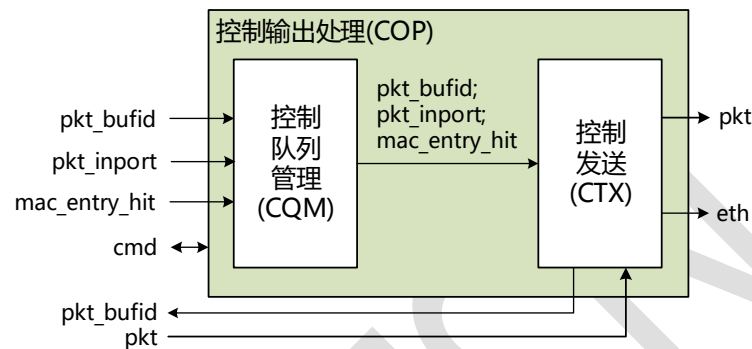


图 3-12 COP 模块内部功能划分

**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，从报文集中缓存 PCB 模块中读取报文，将报文每拍数据位宽由 134bit 转换为 9bit；将标准以太网报文分派给 MAC 自学习模块，其它报文从控制接口输出；在报文以太网帧头前面添加帧前导符和帧开始符，并控制报文与报文之间输出间隔；将 pkt\_bufid 传输给报文集中缓存 PCB 模块进行释放；识别标准以太网报文和 TSN 报文，并将 mac\_entry\_hit 和 pkt\_inport 存放在标准以太网报文的 DMAC (Destination Media Access Control, 目的物理地址) 字段。

#### 3.3.1.5. 内部处理逻辑

**FLT(Forward Lookup Table, 转发查表)模块：**主要功能是根据

接收到的读写类型以及读写地址，对本模块的 FlowID 转发表进行配置或读取；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 TSN 报文描述符、TSMP 报文描述符和标准以太网报文描述符，输出 TSMP 报文的目的 MAC 去查 TSMP 转发表并接收查表结果；用标准以太网报文的目的 MAC 去查找动态 MAC 转发表；用 TSN 报文的 FlowID（Flow Identification，流标识）去查找 FlowID 转发表；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 3-10 FlowID 转发表数据格式

| 关键字                          | 值   | 备注                                |
|------------------------------|---|-----------------------------------|
| FlowID[13:0]<br>（TSN 报文的流标识） | outport[8:0]（输出端口号，outport[0]、...、outport[7]、outport[8]分别表示 0 号网络输出接口、...、7 号网络输出接口、控制输出接口） | 使用 RAM 来缓存 FlowID 转发表，RAM 深度为 16K |

表 3-11 动态 MAC 转发表数据格式

| 关键字                              | 值   | 备注  |
|----------------------------------|---|---|
| MAC[47:0]<br>（标准以太网报文的目的 MAC 地址） | outport[8:0]（输出端口号，outport[0]、...、outport[7]、outport[8]分别表示 0 号网络输出接口、...、7 号网络输出接口、控制输出接口） | 使用 RAM 来缓存静态 MAC 转发表/动态 MAC 转发表，每个 RAM 深度为 32 |

**PCB(Pkt Centralize Buffer, 报文集中缓存)模块:** 主要功能是根据接收到的读类型以及读地址, 对本模块的剩余 pkt\_bufid 数量进行读取; 将接口接收到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; 为了支持报文组播和广播, 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; 当网络发送模块/控制发送模块传来 pkt\_bufid 时需要检测该 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, 当计数器值不为 0 意味着该 pkt\_bufid 对应的报文还未从所有需要输出的接口输出; 报文缓存区 (容量为 1024KB) 被划分成 512 个报文缓存块, 每个报文缓存块最多能缓存一个长度为 2KB 的报文。

表 3-12 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”中空闲报文缓存块标识 | 使用 RAM 进行缓存, RAM 深度为 512 |

表 3-13 报文缓存区数据格式

| pkt_bufid[8:0] | 报文缓存地址[15:0]        | 内容 (位宽为 134bit) |
|----------------|---------------------|-----------------|
| 9'd0           | 16'd0-16'd127       | 第 1 个报文缓存块      |
| 9'd1           | 16'd128-16'd255     | 第 2 个报文缓存块      |
| ...            | ...                 | ..              |
| 9'd511         | 16'd65408-16'd65535 | 第 512 个报文缓存块    |

**CPE(Command Parse and Encapsulation, 命令解析与封装)模块:** 主要功能是接收并解析来自 TSMP 代理的 command, 根据 command 中模块标识信息将数据、地址和读写使能分派给 TSS 中对应模块; 根据 TSS 中各模块的模块标识以及各模块传来的数据和地址, 构造命令响应, 并将命令响应输出给 TSMP 代理。

表 3-14 TSS 与 TAMP 代理交互的命令格式

| 位置 | 位宽 | 名称 | 说明 |
|----|----|----|----|
|----|----|----|----|

| 位置      | 位宽 | 名称     | 说明  |
|---------|----|--------|---|
| [63:62] | 2  | Opcode | 2'h0: 写操作<br>2'h1: 保留<br>2'h2: 读操作<br>2'h3: 读响应     |
| [61]    | 1  | fixed  | 地址固定标识, 其中 1'b0 表示地址已固定, 不可更改; 1'b1 表示用户可自定义地址      |
| [60:58] | 3  | fixed  | 地址固定标识, 其中 1'b0 表示地址已固定, 不可更改; 1'b1 表示用户可自定义地址      |
| [57:51] | 7  | mid    | TSN 交换机中内部模块标识, 即模块 ID                              |
| [50:32] | 19 | maddr  | TSN 交换机的内部模块中的地址, 即模块地址; 模块地址范围为 0x0_000 0~0x7_ffff |
| [31:0]  | 32 | data   | 寄存器或表项的读/写数据  |

**MSL(Mac\_address Self Lerning, MAC 地址自学习)模块:** 主要功能是维护动态 MAC 转发表中表项内容; 从接收的标准以太网报文中提取 SMAC (Source Media Access Control, 源物理地址) 及其输入 TSN 交换机接口号, 更新 MAC 转发表中原有表项内容或者新增 MAC 转发表表项, 暂不支持 MAC 转发表表项老化功能。

**GRM(Global Register Management, 全局寄存器管理)模块:** 主要功能是维护 TSS 的全局寄存器 (包括需要配置的寄存器, 厂商标识、设备标识和 TSS 版本号等状态寄存器); 解析 CPE 模块传来的命令, 配置或读取 TSS 的全局控制寄存器。

### 3.3.2. 处理流程

#### 3.3.2.1. 网络接口进网络接口出的报文处理流程

网络接口输入的报文有 TSMP 报文、TSN 报文和标准以太网报文, 报文经过查表转发和调度整形后从网络接口输出, 下面对报文的

详细处理流程进行介绍。

**帧过滤**模块接收来自接口的报文，为每拍数据增加 1bit 的头尾标识；对 ST、RC 报文进行过滤：若 ST 接收使能为高，则才能接收处理 ST 报文，否则丢弃 ST 报文；若 RC 接收使能为高，则才能接收处理 RC 报文，否则丢弃 RC 报文。

**描述符提取**模块收到**帧过滤**模块传来的报文后，识别报文是标准以太网报文还是 TSN 报文，根据剩余 pkt\_bufid 数量与报文监管阈值的大小关系来对报文进行监管：若剩余 pkt\_bufid 数量小于 RC 报文监管阈值时，将 RC 报文和高/低优先级 BE 报文均丢弃；若剩余 pkt\_bufid 数量小于高优先级 BE 报文监管阈值时，将高/低优先级 BE 报文丢弃；若剩余 pkt\_bufid 数量小于低优先级 BE 报文监管阈值时，将低优先级 BE 报文丢弃。提取报文的特征信息，将其与报文集中缓存模块分配的 pkt\_bufid 构造成报文描述符，输出报文描述符给**转发查表**模块；同时将每拍 9bit 数据转换成每拍 134bit 数据，并将其与 pkt\_bufid 传输给**输入缓存接口**模块。

**输入缓存接口**模块用两个 134bit 的 ping-pong 寄存器来循环存储接收到的数据，当某个寄存器中存储了数据时，将该数据输出给**报文集中缓存**模块，写使能一直维持为高，当接收到**报文集中缓存**模块返回的响应信号后，才将写使能置低，完成一拍数据的写入；当报文最后一拍数据写入到**报文集中缓存**模块时，等待下一个报文的到来。

**转发查表**模块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 TSMP 报文描述符、标准以太网报文描述符和 TSN

报文描述符：输出 TSMP 报文目的 MAC 去查 TSMP 转发表并接收查表结果；用标准以太网报文目的 MAC 去查找动态 MAC 转发表；用 TSN 报文的 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输出接口；

输出接口中的**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报文描述符中报文类型 `pkt_type` 进行队列的选择，并将选择的 `queue_id` 与 `pkt_bufid` 一起发送给**网络队列管理**模块进行缓存；本模块维护每个队列的尾地址，每接收到一个 `pkt_bufid`，便更新对应队列的尾地址；本模块需要根据描述符入队和出队情况来维护每个队列中缓存描述符的个数。

**网络输出调度**模块根据队列门控模块的传来的门控状态（“开”还是“关”）以及每个队列的状态（是否为空）得到最优先调度的队列，并将此队列中的首地址（即该队列中第一个 `pkt_bufid`）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 `pkt_bufid` 读取出来，将该队列首地址发送给**网络发送**模块，并用从**网络队列管理**模块读取出来的 `pkt_bufid` 去更新该队列的首地址。

**网络发送**模块将 `pkt_bufid` 转换成基地址，从报文集中缓存模块中读出报文，在本模块内部维护两个 134bit 的 ping-pong 寄存器来缓存读出的数据，将每拍 134bit 的数据转换成每拍 9bit 的数据后输出，当一个寄存器中数据输出后再往**报文集中缓存**模块进行下一拍 134bit 数据的读取，直到报文全部读取完成；在输出报文时，需要控制报文与报文之间的输出间隔。

### 3.3.2.2. 网络接口进控制接口出的报文处理流程

网络接口进控制接口出的报文包括 TSMP 报文和标准以太网报

文，下面介绍其处理流程。

报文在**网络输入处理**的处理流程与在 3.3.2.1 章节的**网络输入处理**的处理流程不同之处是本交换机在配置阶段，识别到地址分配类型的 TSMP 报文后，在其描述符中指定其输出接口为控制接口，该描述符在**转发查表模块**不查转发表。

报文在**转发查表模块**的处理流程与在 3.3.2.1 章节的**转发查表模块**的处理流程不同之处是若 TSN 报文查表未命中，则默认将 TSN 报文描述符输出给控制接口。

**控制队列管理**模块接收到报文描述符后，将其存储在 FIFO 中，在控制接口空闲时，将 FIFO 中报文描述符读出并输出给**控制发送模块**。

**控制发送模块**将接收到的 pkt\_bufid 转换成基地址，从**报文集中缓存模块**中读出报文，在本模块内部维护两个 134bit 的 ping\_pong 寄存器来缓存读出的数据，将每拍 134bit 的数据转换成每拍 9bit 的数据后输出，当一个寄存器中数据输出后再往**报文集中缓存模块**进行下一拍 134bit 数据的读取，直到报文数据全部读取完成。根据以太网类型来识别报文，传输标准以太网报文给 MAC 自学习模块；同时将报文描述符中查动态 MAC 转发表命中标识和报文输入接口号存放在标准以太网报文目的 MAC 中；其它报文从控制接口输出，在输出报文时，控制报文与报文之间的输出间隔。



### 3.3.2.3. 控制接口进网络接口出的报文处理流程

控制接口进网络接口出的报文处理流程和网络接口进网络接口出的报文处理流程相同。

OpenTSN

# 附录A. 数据格式定义

## A.1. 报文格式

在 TSNSwitch 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 的格式如图 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 表示报文中间拍数据。

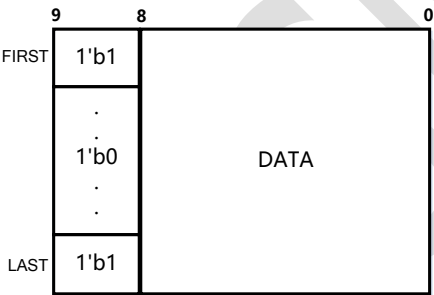


图 A-1 位宽为 9bit 的 pkt 格式

每拍数据位宽为 134bit 的 pkt 的格式如图 A-2 所示，134bit 数据包含 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。

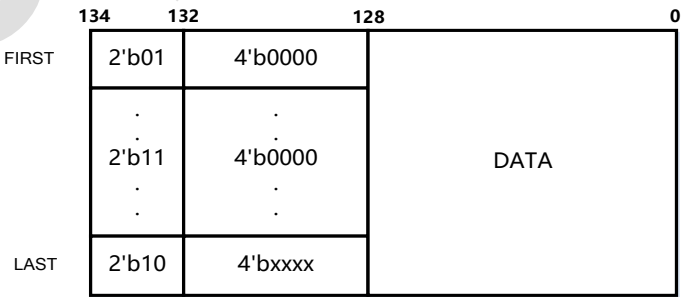


图 A-2 位宽为 134bit 的 pkt 格式

## A.2. TSN 标签格式

表 A-2 TSNTag 格式

| 字段          | 位宽 bit | 位置      | 描述   |
|-------------|--------|---------|--|
| pkt type    | 3      | [47:45] | 报文类型，其中 3'b000/3'b001/3'b010 表示 ST 报文，3'b011 表示 RC 报文，3'b100 保留，3'b101 表示 TSMP 报文，3'b110/3'b111 表示 BE 报文 |
| flow id     | 14     | [44:31] | 流标识  |
| reserve     | 21     | [30:10] | 保留字段   |
| inject addr | 5      | [9:5]   | ST 流在 TSN 网卡发送端的缓存地址，本字段暂未使用   |
| submit addr | 5      | [4:0]   | ST 流在 TSN 网卡接收端的缓存地址，本字段暂未使用   |

## A.3. 报文描述符格式

TSNSwitch3.4 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/tsntag             | 48     | [71:24] | 标准以太网报文的 DMAC 或 TSN 报文的 TSN 标签                      |
| standardpkt_tsnpkt_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. 读写信息说明

### B.1. 硬件地址定义规范

TSN 控制器需配置 TSN 交换机或 TSN 网卡的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，TSN 控制器可根据硬件地址来对 TSN 网卡或 TSN 交换机中不同控制寄存器或表项进行配置。硬件地址为 32bit，其格式详见表 B-1 所示，

表 B-1 控制寄存器和表的硬件地址格式

| 位置      | 位宽<br>bit | 名称          | 说明   |
|---------|-----------|-------------|--|
| [31:30] | 2         | addr_space  | 地址空间，该字段编码如下<br>00: HCP 内部空间<br>01: TSS 的空间<br>其它: 保留 (在 HCP 控制多个 TSS 或 TSE 情况下，需要使用该保留字段进行编码) |
| [29]    | 1         | addr_fixed  | 地址固定标识，其中 1'b0 表示寄存器或表项地址已固定，不可更改，1'b1 表示寄存器或表项地址可灵活修改，用户可自定义其地址                               |
| [28:26] | 3         | /           | 保留   |
| [25:19] | 7         | module_id   | HCP 或 TSS 或 TSE 内部模块的标识，即模块 ID，其范围为 7'h0~7'h3f   |
| [18:0]  | 19        | module_addr | HCP 或 TSS 或 TSE 内部模块中的地址，即模块地址；模块地址范围为 19'h0_0000~19'h7_ffff                                   |

### B.2. OpenTSN HCP 读写信息

RO 代表外部控制器只读不可写，RW 代表可读写。

#### B.2.1. 寄存器

##### B.2.1.1. HCP\_ID\_REG (0000\_0000h, RO)

ID\_REG 标识厂商 ID 和设备 ID。

| Bit 位置 | 含义  | 属性 |
|--------|---|----|
| 15:0   | 0000h:OpenTSN 项目<br>其它:保留                       | RO |
| 31:16  | 0000h: OpenTSN 交换机<br>0001h:OpenTSN 网卡<br>其它:保留 | RO |

#### B.2.1.2. HCP\_VER\_REG (0000\_0001h, RO)

HCP 硬件逻辑的版本号。

#### B.2.1.3. HCP\_MID\_REG (0000\_0002h, RW)

| Bit 位置 | 含义                         | 属性 |
|--------|----------------------------|----|
| 11:0   | 本地管理标识 LocalMID            | RW |
| 12:23  | TSNlight 所在节点的管理标识 CtrlMID | RW |
| 31:24  | 保留                         | RW |

HCP 使用 MID 标识生成自己的 MAC 地址。规则为:

MAC[47:24]=0x662662;

MAC[23:12]=LocalMID

MAC[11:0]=0x000;

#### B.2.1.4. HCP\_TSSVER\_REG (0000\_0003h, RO)

TSS 逻辑的版本号。

#### B.2.1.5. HCP\_CFG\_REG (0000\_0004h, RW)

用于控制网络接口的接收状态，只有完成相关映射表，速测表和整形表配置后才打开 RC 帧接收使能；

只有完成映射表，门控表以及相关寄存器配置，并完成时间同步后，才打开 ST 接收使能。

只有控制器完成对 TSMP 转发表配置后，才将 TSMP 转发使能位置 1。

| Bit 位置 | 含义                       | 属性 |
|--------|--------------------------|----|
| 0      | RC_RxEnable, 1 为使能，默认为 0 | RW |
| 1      | ST_RxEnable, 1 为使能，默认为 0 | RW |
| 31:2   | 保留                       | RW |

#### B.2.1.6. TSS\_NTI\_REG (0000\_0010h~0000\_001fh, RW)

16 个 TSS 配置寄存器（共 512 位），值直接输出给 TSS。

#### B.2.1.7. TSS\_NTR\_REG (0000\_0020h~0000\_002fh, RO)

16 个 TSS 遥测寄存器（共 512 位），值由 TSS 提供。

#### B.2.1.8. OS\_VER\_REG (0008\_0000h, RO)

[31]: 同步模式，0 为 AS6802，1 为 PTP；

[30:16]: 保留

[15:8]: OpenSync 定时逻辑版本；

[7:0]: OpenSync MAC 版本号；

## B.2.1.9. OS\_CID\_REG (0008\_0001h, RW)

OpenSync 控制器的管理 ID。

| Bit 位置 | 含义                       | 属性 |
|--------|--------------------------|----|
| 11:0   | OpenSync 控制器的管理 ID (MID) | RW |
| 31:12  | 保留                       | RW |

OpenSync 控制器的 MAC 地址可由其 MID 生成。

## B.2.1.10. OS\_CSET0\_REG (0008\_0002h, RW)

OS 控制器对 64 位定时电路时钟设置 (Clock set) 的高 32 位。

## B.2.1.11. OS\_CSET1\_REG (0008\_0003h, RW)

OS 控制器对 64 位定时电路时钟设置 (Clock set) 的低 32 位。

## B.2.1.12. OS\_SCOR\_REG (0008\_0004h, RW)

OS 控制器对定时电路时钟设置的 32 位校准值 (Clock Set Correction)，单位为 ns。

## B.2.1.13. OS\_CYC\_REG (0008\_0005h, RW)

AS6802 时钟同步模式下同步周期 (集成周期) 的长度。单位为 ns。Syn\_clk 值等于该寄存器时，重置为零。

## B.2.1.14. OS\_PCOR\_REG (0008\_0006h, RW)

同步时钟相位校正寄存器用于 OpenSync 控制器校正 OpenTSN 网络中从时钟节点与主时钟节点的硬件同步时钟在相位上的偏移量。

| Bit 位置 | 含义                 | 属性 |
|--------|--------------------|----|
| 30:0   | 相位校正值, 单位为 ns      | RW |
| 31     | 相位校正值得符号, 0:正, 1:负 | RW |

#### B.2.1.15. OS\_FCOR\_REG (0008\_0007h, RW)

同步时钟频率校正值寄存器用于 OpenSync 控制器对 OpenTSN 网络中从时钟节点的硬件同步时钟的频率进行校正。

| Bit 位置 | 含义  | 属性 |
|--------|---|----|
| 23:0   | 硬件同步时钟在每个时钟周期累加值的小数部分, 单位为 $2^{-24}\text{ns}$                           | RW |
| 31:24  | 硬件同步时钟在每个时钟周期累加值的整数部分, 单位为 ns。<br>最大支持硬件同步时钟周期为 256ns (不包括 256ns) 的频率校正 | RW |

#### B.2.1.16. CC\_BaseTime/H\_REG (0010\_0000h, RW)

调度周期开始时刻寄存器。在全局时间同步后, 控制器通过设置该寄存器指示第一次 cycle\_start 信号有效的时刻。当 syn\_clk 等于该寄存器的值时, cycle\_start 信号有效。

#### B.2.1.17. CC\_BaseTime/L\_REG (0010\_0001h, RW)

调度周期开始时刻寄存器。在全局时间同步后, 控制器通过设置该寄存器指示第一次 cycle\_start 信号有效的时刻。当 syn\_clk 等于该寄存器的值时, cycle\_start 信号有效。



## B.2.1.18. CC\_CycleLen\_REG (0010\_0002h, RW)

门控调度的循环周期长度寄存器，单位为 ns。

## B.2.1.19. CC\_CFG\_REG (0010\_0003h, RW)

循环控制配置寄存器。

[31:1]: 保留

[0]: 为 1 表示启动 cycle\_start 信号产生，0 为禁止。

## B.2.1.20. CC\_ERR\_REG (0010\_0004h, RW)

循环控制错误寄存器。

[31:1]: 保留

[0]: CC\_BaseTime 设置错误，小于当前时间。

## B.2.2. TSMP 转发表

## B.2.2.1. 表项定义

TSMP 转发表支持 4K 表项，每项为 34bit，占两个地址。

| 地址   | 定义   |
|------|--|
| 地址 0 | [31:0]: 对应 32 个输出接口的 bitmap                |
| 地址 1 | [31]: valid<br>[30:1]: 保留<br>[0]: ToHCP 标志 |

TSMP 的 DMAC 是 TSNlight 动态分配的, DMAC[47:24] 为定值。

HCP 使用 TSMP DMAC[23:12] 进行查表转发。

DMAC[11:0] 指示设备控制平面的实体类型：

- 0x000: HCP
- 0x001: TSNlight
- 0x002: Opensync 控制器
- 0x003-0xfff: 保留

B.2.2.2. 地址空间

TSMP 转发表的地址分配如下所示。

| Bits            |    | Address    |
|-----------------|----|------------|
| 31              | 23 | 15         |
|                 |    | 7          |
|                 |    | 0          |
| 第0条表项[63:32]    |    | 0018_0000h |
| 第0条表项[31:0]     |    | 0018_0001h |
| 第1条表项[63:32]    |    | 0018_0002h |
| 第1条表项[31:0]     |    | 0018_0003h |
| ...             |    | ...        |
| 第4095条表项[63:32] |    | 0018_1FFEH |
| 第4095条表项[31:0]  |    | 0018_1FFFh |

B.2.2.3. TSMP 转发表的初始化

由于 TSMP 存储在 RAM 中，因此系统启动后，控制器需要对 RAM 中表项的 Valid 位进行初始化。配置的表项将 Valid 设置为 1，否则设置为 0。

B.3. OpenSync MAC 读写信息

目前 OpenSync MAC 的读写信息如表 B-1 所示

表 B-1 OpenSync MAC 读写寄存器

| 硬件地址       | 名称         | 位宽<br>bit | 属性 | 描述  |
|------------|------------|-----------|----|---|
| 0020_0000h | tsn_or_tte | 1         | RW | 时钟同步模式；1'b0 表示 TTE（AS6802）时钟同步模式，1'b1 表示 TSN（IEEE 1588）时钟同步模式 |

|            |                           |    |    |                          |
|------------|---------------------------|----|----|--------------------------|
| 0020_0001h | asynfifo_overflow_cnt_rx  | 32 | RO | 所有接口接收端异步 FIFO 出现上溢错误总个数 |
| 0020_0002h | asynfifo_underflow_cnt_rx | 32 | RO | 所有接口接收端异步 FIFO 出现下溢错误总个数 |
| 0020_0003h | asynfifo_overflow_cnt_tx  | 32 | RO | 所有接口发送端异步 FIFO 出现上溢错误总个数 |
| 0020_0004h | asynfifo_underflow_cnt_tx | 32 | RO | 所有接口发送端异步 FIFO 出现下溢错误总个数 |
| 0020_0005h | inpkt_cnt_p0              | 32 | RO | 0 号接口接收报文个数              |
| 0020_0006h | outpkt_cnt_p0             | 32 | RO | 0 号接口发送报文个数              |
| 0020_0007h | inpkt_cnt_p1              | 32 | RO | 1 号接口接收报文个数              |
| 0020_0008h | outpkt_cnt_p1             | 32 | RO | 1 号接口发送报文个数              |
| 0020_0009h | inpkt_cnt_p2              | 32 | RO | 2 号接口接收报文个数              |
| 0020_000ah | outpkt_cnt_p2             | 32 | RO | 2 号接口发送报文个数              |
| 0020_000bh | port3_input_pkt_cnt       | 32 | RO | 3 号接口接收报文个数              |
| 0020_000ch | port3_output_pkt_cnt      | 32 | RO | 3 号接口发送报文个数              |
| 0020_000dh | inpkt_cnt_p4              | 32 | RO | 4 号接口接收报文个数              |
| 0020_000eh | outpkt_cnt_p4             | 32 | RO | 4 号接口发送报文个数              |
| 0020_000fh | inpkt_cnt_p5              | 32 | RO | 5 号接口接收报文个数              |
| 0020_0010h | outpkt_cnt_p5             | 32 | RO | 5 号接口发送报文个数              |
| 0020_0011h | inpkt_cnt_p6              | 32 | RO | 6 号接口接收报文个数              |
| 0020_0012h | outpkt_cnt_p6             | 32 | RO | 6 号接口发送报文个数              |
| 0020_0013h | inpkt_cnt_p7              | 32 | RO | 7 号接口接收报文个数              |
| 0020_0014h | outpkt_cnt_p7             | 32 | RO | 7 号接口发送报文个数              |

## B.4. TSS 读写信息

目前在 TSS 中支持 TSN 控制器配置/读取相关寄存器的模块及其模块标识如表 B-6 所示。

表 B-6 TSS 模块 ID 的分配

| 模块    | 控制接口<br>帧过滤<br>(FFI)    | 控制接口<br>描述符提取<br>(DEX)    | 控制接口<br>控制发送<br>(CTX)     |
|-------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 模块 ID | 0x0                     | 0x1                       | 0x4                       |
| 模块    | 0 号网络接口<br>帧过滤<br>(FFI) | 0 号网络接口<br>描述符提取<br>(DEX) | 0 号网络接口<br>队列门控<br>(QGC0) |
| 模块 ID | 0x8                     | 0x9                       | 0xb                       |
| 模块    | 1 号网络接口<br>帧过滤<br>(FFI) | 1 号网络接口<br>描述符提取<br>(DEX) | 1 号网络接口<br>队列门控<br>(QGC1) |
| 模块 ID | 0x10                    | 0x11                      | 0x13                      |
| 模块    | 2 号网络接口<br>帧过滤<br>(FFI) | 2 号网络接口<br>描述符提取<br>(DEX) | 2 号网络接口<br>队列门控<br>(QGC2) |
| 模块 ID | 0x18                    | 0x19                      | 0x1b                      |
| 模块    | 3 号网络接口<br>帧过滤<br>(FFI) | 3 号网络接口<br>描述符提取<br>(DEX) | 3 号网络接口<br>队列门控<br>(QGC3) |
| 模块 ID | 0x20                    | 0x21                      | 0x23                      |
| 模块    | 4 号网络接口<br>帧过滤<br>(FFI) | 4 号网络接口<br>描述符提取<br>(DEX) | 4 号网络接口<br>队列门控<br>(QGC4) |
| 模块 ID | 0x28                    | 0x29                      | 0x2b                      |
| 模块    | 5 号网络接口<br>帧过滤<br>(FFI) | 5 号网络接口<br>描述符提取<br>(DEX) | 5 号网络接口<br>队列门控<br>(QGC5) |
| 模块 ID | 0x30                    | 0x31                      | 0x33                      |
| 模块    | 6 号网络接口<br>帧过滤<br>(FFI) | 6 号网络接口<br>描述符提取<br>(DEX) | 6 号网络接口<br>队列门控<br>(QGC6) |
| 模块 ID | 0x38                    | 0x39                      | 0x3b                      |
| 模块    | 7 号网络接口<br>帧过滤<br>(FFI) | 7 号网络接口<br>描述符提取<br>(DEX) | 7 号网络接口<br>队列门控<br>(QGC7) |
| 模块 ID | 0x40                    | 0x41                      | 0x43                      |
| 模块    | 转发查表<br>(FLT)           | 报文集中缓存<br>(PCB)           | 全局寄存器                     |

|       |                |      |          |
|-------|----------------|------|----------|
|       |                |      | 管理 (GRM) |
| 模块 ID | 0x78           | 0x79 | 0x7a     |
| 模块    | OpenSync 修正域更新 | /    | /        |
| 模块 ID | 0x7b           | /    | /        |

#### B.4.1. 寄存器

在 TSS 中支持 TSN 控制器配置/读取的寄存器如表 B-5 所示，R 表示该寄存器可读，W 表示该寄存器可写。

表 B-5 TSS 中支持 TSN 控制器配置/读取的寄存器

| 模块                 | 硬件地址       | 名称                    | 位宽 bit | 属性 | 描述                  |
|--------------------|------------|-----------------------|--------|----|---------------------|
| 控制接口描述符提取 (DEX)    | 6008_0000h | ctrl_discard_pkt_cnt  | 32     | RO | 控制输入接口因流量监管而丢弃报文个数  |
| 0 号网络接口描述符提取 (DEX) | 6048_0000h | port0_discard_pkt_cnt | 32     | RO | 0 号输入接口因流量监管而丢弃报文个数 |
| 1 号网络接口描述符提取 (DEX) | 6088_0000h | port1_discard_pkt_cnt | 32     | RO | 1 号输入接口因流量监管而丢弃报文个数 |
| 2 号网络接口描述符提取 (DEX) | 60c8_0000h | port2_discard_pkt_cnt | 32     | RO | 2 号输入接口因流量监管而丢弃报文个数 |
| 3 号网络接口描述符提取 (DEX) | 6108_0000h | port3_discard_pkt_cnt | 32     | RO | 3 号输入接口因流量监管而丢弃报文个数 |

|                    |            |                               |    |     |   |
|--------------------|------------|-------------------------------|----|-----|---|
| 4 号网络接口描述符提取 (DEX) | 6148_0000h | port4_discard_pkt_cnt         | 32 | RO  | 4 号输入接口因流量监管而丢弃报文个数   |
| 5 号网络接口描述符提取 (DEX) | 6188_0000h | port5_discard_pkt_cnt         | 32 | RO  | 5 号输入接口因流量监管而丢弃报文个数   |
| 6 号网络接口描述符提取 (DEX) | 61c8_0000h | port6_discard_pkt_cnt         | 32 | RO  | 6 号输入接口因流量监管而丢弃报文个数   |
| 7 号网络接口描述符提取 (DEX) | 6208_0000h | port7_discard_pkt_cnt         | 32 | RO  | 7 号输入接口因流量监管而丢弃报文个数   |
| 报文集中缓存 (PCB)       | 6278_0000h | free_pkt_bufid_num            | 9  | RO  | TSS 的报文集中缓存区中剩余 pkt_bufid 数量, 最大支持 512 个 pkt_bufid                              |
| 全局寄存器管理 (GRM)      | 63d0_0000h | rc_police_threshold           | 9  | R/W | 带宽预约流量报文监管阈值, 若该值小于硬件剩余 pkt_bufid 数量时, 则传输 RC 流量报文; 否则丢弃 RC 流量报文和高/低优先级 BE 流量报文 |
|                    | 63d0_0001h | hpriority_be_police_threshold | 9  | R/W | 高优先级 BE 流量报文监管阈值, 若该值小于硬件剩余 pkt_bufid 数量时, 则传输高优先级 BE 流量报文; 否则丢弃高/低优先级 BE 流量报文  |
|                    | 63d0_0002h | lpriority_be_police_threshold | 9  | R/W | 低优先级 BE 流量报文监管阈值, 若该值小于硬件剩余 pkt_bufid 数量时, 则传输低优先级 BE 流量报文; 否则丢弃低优先级 BE 流量报文    |

|  |               |                  |    |     |   |
|--|---------------|------------------|----|-----|---|
|  | 63d0<br>0003h | qbv_or_qch       | 1  | R/W | 802.1Qbv 或 802.1Qch<br>调度模型的选择信号，<br>其中 1'b0 表示 802.1Qb<br>v 调度模型，1'b1 表示 8<br>02.1Qch 调度模型 |
|  | 63d0<br>0004h | schedule_period  | 11 | R/W | 调度周期，即门控列表<br>周期，其值表示一个周<br>期内时间槽的个数  |
|  | 63d0<br>0005h | time_slot_length | 11 | R/W | 时间槽长度，单位 us；<br>取值范围为[4us,512us]<br>且值必须为 2 <sup>n</sup>                                    |

#### B.4.2. 转发表

在 TSS 维护的转发表包括静态 MAC 转发表和 FlowID 转发表，用于实现对 TSN 报文和标准以太网报文的转发。静态 MAC 转发表由 OpenTSN 交换机通过自学习获得，其格式如表 B-8 所示；FlowID 转发表由 OpenTSN 控制器配置，其格式如表 B-9 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 报文转发表的表项数目为 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。用于缓存 TSN 报文转发表的 RAM 位宽为 9bit，深度为 16384。

静态 MAC 转发表和 FlowID 转发表均采用 RAM 来独立进行缓存，其中静态 MAC 转发表的 RAM 位宽为 57bit，深度为 32；FlowID 转发表的 RAM 位宽为 9bit，深度为 16384。

表 B-8 静态 MAC 转发表格式

| 查表方式 | 表项内容    |                 |      |  |
|------|---------|-----------------|------|--|
|      | 位置      | 含义              |      |  |
| 逐项查表 | [56:48] | 查表结果<br>outport | [56] | 控制接口输出使能位，1'b1 表示<br>报文从该接口输出，1'b0 表示报 |

|  |        |              |              |   |
|--|--------|--------------|--------------|---|
|  |        |              |              | 文不从该接口输出  |
|  |        |              | [55]         | 7 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|  |        |              | [54]         | 6 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|  |        |              | [53]         | 5 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|  |        |              | [52]         | 4 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|  |        |              | [51]         | 3 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|  |        |              | [50]         | 2 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|  |        |              | [49]         | 1 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|  |        |              | [48]         | 0 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|  | [47:0] | 查表关键字<br>MAC | 报文的目的 MAC 地址 |   |

表 B-9 FlowID 转发表格式

| 硬件基地址                   | 查表索引/<br>查表关键字         | 表项内容  |                 |     |   |
|-------------------------|------------------------|-------|-----------------|-----|---|
| 63c04000h-<br>63c0403fh | 将 FlowID<br>作为索引<br>地址 | 位置    | 含义              |     |   |
|                         |                        | [8:0] | 查表结果<br>outport | [8] | 控制接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出      |
|                         |                        |       |                 | [7] | 7 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|                         |                        |       |                 | [6] | 6 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文                         |



|  |  |  |  |     |   |
|--|--|--|--|-----|---|
|  |  |  |  |     | 从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出                          |
|  |  |  |  | [5] | 5 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|  |  |  |  | [4] | 4 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|  |  |  |  | [3] | 3 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|  |  |  |  | [2] | 2 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|  |  |  |  | [1] | 1 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |
|  |  |  |  | [0] | 0 号网络交换接口输出使能位, 1'b1 表示报文从该接口输出, 1'b0 表示报文不从该接口输出 |

B.4.3. 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, 该门控列表的表项数目为 1024, 每条表项的描述如表 B-11 所示。

表 B-11 门控列表描述

| 硬件地址 |                       | 名称               | 位置  | 描述                                |
|------|-----------------------|------------------|-----|-----------------------------------|
| QGC0 | 6060_0000h-6060_03ffh | gate_table_entry | [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 |
| QGC1 | 60a0_0000h-60a0_03ffh |                  | [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 |
| QGC2 | 60e0_0000h-60e0_03ffh |                  | [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 |
| QGC3 | 6120_0000h-6120_03ffh |                  | [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 |
| QGC4 | 6160_0000h-6160_03ffh |                  | [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 |
| QGC5 | 61a0_0000h-61a0_03ffh |                  | [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 |
| QGC6 | 61e0_0000h-61e0_03ffh |                  | [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 |
| QGC7 | 6220_0000h-6220_03ffh |                  | [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-12 所示。

表 B-12 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. 网络管理报文格式

OpenTSN/OpenSync 控制器通过在网络管理报文中指定读写类型、配置/读取的基地址、配置/读取的个数以及在配置时的配置内容，来实现对某个寄存器/表项或地址连续的多个寄存器/表项进行配置和读取，OpenTSN/OpenSync 控制器接收到的网络管理响应报文与其下发的网络管理报文格式相同，OpenTSN/OpenSync 控制器与 TSN 硬件通过 TSMP 协议进行交互，网络管理报文格式如图 C-1 所示，图 C-1 中 TSMP 协议中各字段说明如表 C-1 所示。

| bit                     |    |    |    |                      |     |   |   |
|-------------------------|----|----|----|----------------------|-----|---|---|
| 31                      | 24 | 23 | 16 | 15                   | 8   | 7 | 0 |
| 目的MAC[47:16]            |    |    |    |                      |     |   |   |
| 目的MAC[15:0]             |    |    |    | 源MAC[47:32]          |     |   |   |
| 源MAC[31:0]              |    |    |    |                      |     |   |   |
| TSMP协议长度/类型<br>(0xff01) |    |    |    | 类型<br>(0x02)         | 子类型 |   |   |
| 寄存器/表项配置/读取数量n          |    |    |    | 寄存器/表项配置/读取基地址       |     |   |   |
| 寄存器/表项配置/读取基地址          |    |    |    | 第一个寄存器/表项<br>配置/读取数据 |     |   |   |
| 第一个寄存器/表项<br>配置/读取数据    |    |    |    | 第二个寄存器/表项<br>配置/读取数据 |     |   |   |
| ...                     |    |    |    |                      |     |   |   |
| 第n个寄存器/表项<br>配置/读取数据    |    |    |    | 循环冗余校验CRC            |     |   |   |
| 循环冗余校验CRC               |    |    |    |                      |     |   |   |

图 C-1 网络管理报文格式

表 C-1 网络管理报文各字段说明

| 名称              | 位宽 | 说明  |
|-----------------|----|---|
| 目的 MAC          | 48 | /   |
| 源 MAC           | 48 | /   |
| TSMP 协议长度/类型    | 16 | 0xff01  |
| 类型              | 8  | 包括地址分配（0x01）、网络管理（0x02）、网络遥测（0x03 保留）、隧道（0x04）、时间通告（0x05 保留）、OpenSync（0x06）等  |
| 子类型             | 8  | 每种 TSMP 类型中的子类型。<br>①地址分配：地址分配（0x01）。<br>②网络管理：读请求（0x01）；写请求（0x02）；读响应（0x03）。<br>③隧道：隧道解封装（0x01）；隧道封装（0x02）<br>④OpenSync：来自控制器的请求报文（0x01）；发往控制器的响应报文（0x02）；来自主/从时钟节点发往主/从时钟节点的报文（0x03）。 |
| 寄存器/表项配置/读取数量 n | 16 | 寄存器/表项配置和读取复用该字段，当该 TSMP 报文用于寄存器/表项配置时，   |

| 名称                 | 位宽 | 说明  |
|--------------------|----|---|
|                    |    | 该字段表示寄存器/表项配置数量；当该 TSMP 报文用于寄存器/表项读取时，该字段表示寄存器/表项读取数量   |
| 寄存器/表项配置/读取基地址     | 32 | 其格式详见附录 B 的 B.1.1 章节  |
| 第 n 个寄存器/表项配置/读取数据 | 32 | 当该 TSMP 报文是用于对寄存器/表项进行配置时，该字段表示地址为（基地址+n-1）的写数据；当该 TSMP 报文是用于对寄存器/表项进行读取时，该字段无意义，默认为 32'b0；当该 TSMP 报文是寄存器/表项的读响应报文时，该字段表示地址为（基地址+n-1）的读数据 |
| 循环冗余校验 CRC         | 32 | 对 TSMP 报文内容正确性进行校验  |

## 附录D. Mbus 格式

在 TSN 交换机中 Mbus 解析逻辑采用分层解析的方式来实现，每个层级的 Mbus 解析逻辑关注 Mbus 中的不同字段并丢弃下一个层级 Mbus 解析逻辑不需要关注的字段。第一层级处理的 Mbus 格式如表 D-1 所示，第二层级处理的 Mbus 格式如表 D-2 所示，第三层级处理的 Mbus 格式如表 D-3 所示。

表 D-1 第一层级处理的 Mbus 格式

| 位置      | 位宽<br>bit | 名称         | 说明  |
|---------|-----------|------------|---|
| [65:64] | 2         | Opcode     | 操作，该字段编码如下<br>2'h0: 写操作<br>2'h1: 保留<br>2'h2: 读操作<br>2'h3: 读响应                                 |
| [63:62] | 2         | addr_space | 地址空间，该字段编码如下<br>00: HCP 内部空间<br>01: TSS 的空间<br>其它: 保留（在 HCP 控制多个 TSS 或 TSE 情况下，需要使用该保留字段进行编码） |
| [61]    | 1         | addr_fixed | 地址固定标识，其中 1'b0 表示寄存器或表项地址已固定，不可更改，1'b1 表示寄存器或表项地址可灵活修改，用户可自定义其地址                              |

| 位置      | 位宽<br>bit | 名称          | 说明   |
|---------|-----------|-------------|--|
| [60:58] | 3         | /           | 保留   |
| [57:51] | 7         | module_id   | HCP 或 TSS 或 TSE 内部模块的标识, 即模块 ID, 其范围为 7'h0~7'h3f               |
| [50:32] | 19        | module_addr | HCP 或 TSS 或 TSE 内部模块中的地址, 即模块地址; 模块地址范围为 19'h0_0000~19'h7_ffff |
| [31:0]  | 32        | data        | 寄存器或表项的写/读数据   |

表 D-2 第二层级处理的 Mbus 格式

| 位置      | 位宽 | 名称          | 说明   |
|---------|----|-------------|--|
| [63:62] | 2  | Opcode      | 操作, 该字段编码如下<br>2'h0: 写操作<br>2'h1: 保留<br>2'h2: 读操作<br>2'h3: 读响应       |
| [61]    | 1  | addr_fixed  | 地址固定标识, 其中 1'b0 表示寄存器或表项地址已固定, 不可更改, 1'b1 表示寄存器或表项地址可灵活修改, 用户可自定义其地址 |
| [60:58] | 3  | /           | 保留   |
| [57:51] | 7  | module_id   | HCP 或 TSS 或 TSE 内部模块的标识, 即模块 ID, 其范围为 7'h0~7'h3f                     |
| [50:32] | 19 | module_addr | HCP 或 TSS 或 TSE 内部模块中的地址, 即模块地址; 模块地址范围为 19'h0_0000~19'h7_ffff       |
| [31:0]  | 32 | data        | 寄存器或表项的写/读数据   |

表 D-3 第三层级处理的 Mbus 格式

| 名称          | 位宽 | 方向               | 说明   |
|-------------|----|------------------|--|
| module_addr | 19 | 来自第二层级 Mbus 处理模块 | 寄存器或表项的读写模块地址, 该信号为读写地址复用信号; 当寄存器/表项写使能 i_wr 有效时, 该信号表示写地址, 当寄存器/表项读使能 i_rd 有效时, 该信号表示读地址, |
| addr_fixed  | 1  |                  | 地址固定信号, 其中 1'b0 表示寄存器或表项地址已固定, 不可更改, 1'b1 表示寄存器或表项地址可灵活修改, 用户可自定义其地址                       |
| wdata       | 32 |                  | 寄存器/表项的配置数据  |
| wr          | 1  |                  | 寄存器/表项的写使能信号, 高有效  |
| rd          | 1  |                  | 寄存器/表项的读使能信号, 高有效  |

| 名称          | 位宽 | 方向                                 | 说明   |
|-------------|----|------------------------------------|--|
| valid       | 1  | 传给<br>第二<br>层级<br>Mbus<br>处理<br>模块 | 读出的寄存器/表项的有效信号，高有效   |
| module_addr | 19 |                                    | 读出的寄存器/表项的模块地址   |
| addr_fixed  | 1  |                                    | 读出的寄存器/表项的地址固定信号，其中 1'b0 表示寄存器或表项地址已固定，不可更改，1'b1 表示寄存器或表项地址可灵活修改，用户可自定义其地址 |
| rdata       | 32 |                                    | 读出的寄存器/表项中数据   |

## 附录E. 配置与读取的详细处理流程

本节介绍 TSN 交换机或 TSN 网卡内部寄存器/表项的配置与读取的详细处理流程，如图 E-1 所示。

硬件控制点（HCP）为运行在 OpenTSN 设备中的硬件控制逻辑单元，负责处理网络管理类型的 TSMP 帧；时间敏感端（TSE）为运行在 TSN 网卡中的端处理逻辑单元，负责实现帧映射、逆映射等功能；时间敏感交换（TSS）为运行在 TSN 交换机中的交换逻辑单元，负责实现帧交换功能。TSN 网卡由 TSE+HCP+OS\_MAC 几部分逻辑组成；TSN 交换机由 HCP+TSS+OS\_MAC 几部分逻辑组成。

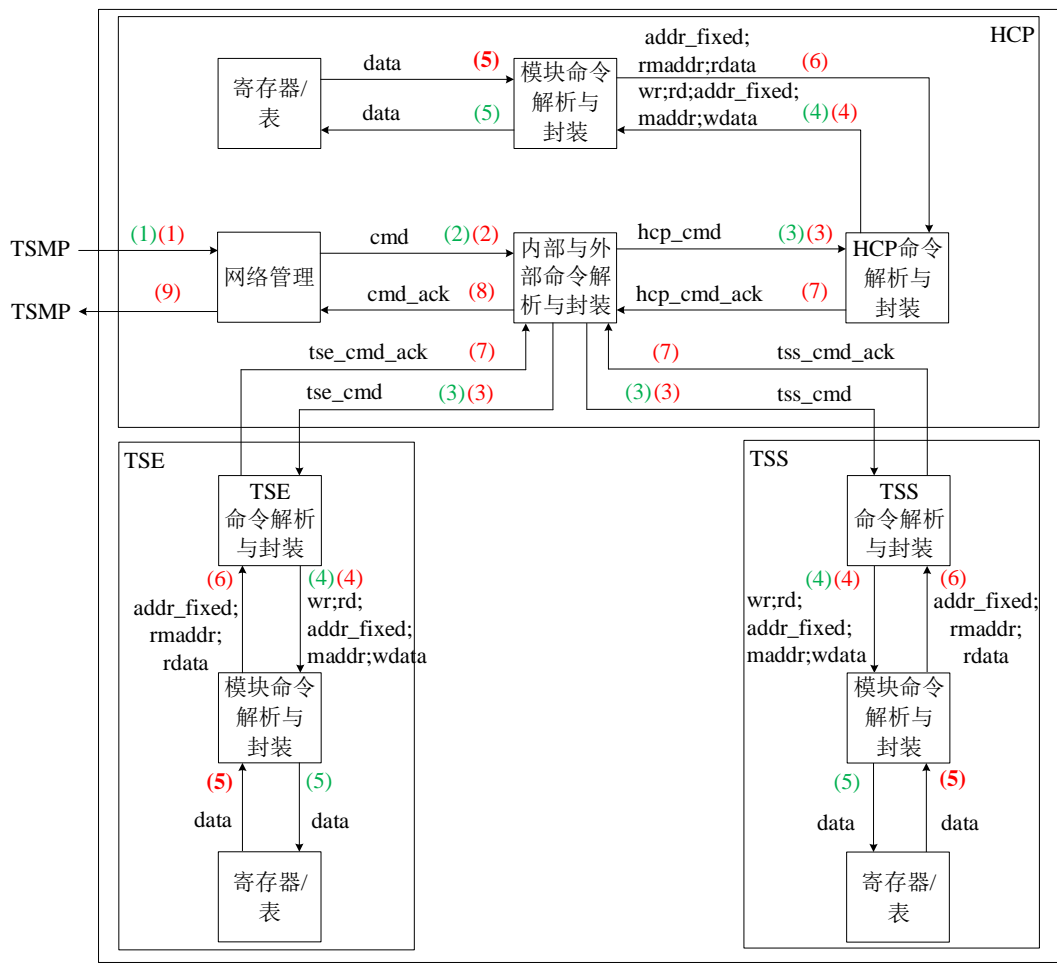


图 E-1 TSN 交换机/TSN 网卡读写过程

图 E-1 中信号描述如下表 E-1 所示。

表 E-1 图 E-1 中信号描述

| 信号          | 位宽 bit | 描述  |
|-------------|--------|---|
| TSMP        | /      | 网络管理类型的 TSMP 帧，其格式详见附录 C，该帧携带配置/读取信息          |
| cmd         | 66     | 寄存器或表项的写/读命令，其格式详见附录 D                        |
| cmd_ack     | 66     | 寄存器或表项的写/读响应，目前只设计读响应，未设计写响应，其格式详见附录 D        |
| hcp_cmd     | 64     | HCP 写/读命令，用于对 HCP 的寄存器或表项进行配置或读取，其格式详见附录 D    |
| hcp_cmd_ack | 64     | HCP 写/读命令响应，目前只设计读响应，未设计写响应，其格式详见附录 D         |
| tss_cmd     | 64     | 时间敏感交换写/读命令，用于对时间敏感交换的寄存器或表项进行配置或读取，其格式详见附录 D |
| tss_cmd_ack | 64     | 时间敏感交换写/读命令响应，目前只设计读响应，未设计写响应，其格式详见附录 D       |

| 信号          | 位宽 bit | 描述   |
|-------------|--------|--|
| tse_cmd     | 64     | 时间敏感端写/读命令, 用于对时间敏感端的寄存器或表项进行配置或读取, 其格式详见附录 D  |
| tse_cmd_ack | 64     | 时间敏感端写/读响应, 目前只设计读响应, 未设计写响应, 其格式详见附录 D  |
| wr          | 1      | 写使能信号, 高有效   |
| rd          | 1      | 读使能信号, 高有效   |
| addr_fixed  | 1      | 地址固定信号, 其中 1'b0 表示寄存器或表项地址已固定, 不可更改, 1'b1 表示寄存器或表项地址可灵活修改, 用户可自定义其地址   |
| maddr       | 19     | (写/读) 模块地址。若写使能有效, 则表示写地址; 若读使能有效, 则表示读地址  |
| wdata       | 32     | 写数据。若寄存器或表项的位宽不足 32bit, 则将寄存器或表项存放在低位 (比如某个寄存器的位宽为 3bit, 则该 3bit 存放的位置为 wdata[2:0]); 若寄存器或表项的位宽超过 32bit, 则将该寄存器或表项拆分成多个 32bit 进行传输 |
| rmaddr      | 16     | (寄存器或表项的) 读模块地址  |
| rdata       | 32     | 寄存器或表项的读数据   |
| data        | -      | 写/读寄存器/表项的数据   |

图 E-1 中(1)~(5)表示配置过程, (1)~(9)表示读取过程, 下面对照图 E-1 来对 TSN 交换机或 TSN 网卡的配置过程和读取过程进行说明。

### E.1. 配置过程

(1): OpenTSN 控制器发送网络管理类型的 TSMP 帧, 网络管理帧经 TSN 网络转发给目的 TSN 交换机或 TSN 网卡, 然后进入 TSN 交换机或 TSN 网卡的 HCP 逻辑, 由 HCP 中的网络管理模块进行处理;

(2): 网络管理模块解析网络管理帧, 一个网络管理帧可能携带多个寄存器/表项的配置信息, 将网络管理帧中携带的每个寄存器/表



项的配置信息转化为写命令 `cmd`（格式详见表 D-1 所示），每个写命令 `cmd` 只携带一个寄存器/表项配置信息，输出写命令 `cmd` 给内部与外部命令解析与封装模块；

(3): 内部与外部命令解析与封装模块根据写命令 `cmd` 中 2bit 的地址对象 `addr_space`（表 D-1 中的 `cmd[65:64]`）来确定该写命令 `cmd` 是用于配置内部 HCP 的还是用于配置外部 TSS 或 TSE 的，在判断完成后丢弃该 2bit 的地址对象 `addr_space`，生成 HCP 写命令 `hcp_cmd`（格式详见表 D-2 所示）给 HCP 命令解析与封装模块，或生成外部写命令 `tss_cmd/tse_cmd`（格式详见表 D-2 所示）给 TSS/TSE 命令解析与封装模块；

(4): HCP 命令解析与封装模块根据 `hcp_cmd` 中 1bit 的地址固定标识 `addr_fixed`（表 D-2 中的 `hcp_cmd[61]`）以及 7bit 的模块标识 `module_id`（表 D-2 中的 `hcp_cmd[57:51]`）来确定 `hcp_cmd` 是用于配置 HCP 中的哪个模块，在判断完成后丢弃该 7bit 的模块标识 `module_id`，生成写接口信号（包括 1bit 的地址固定标识 `addr_fixed`、19bit 的模块地址 `maddr`、32bit 的写数据 `wdata` 以及 1bit 的写使能 `wr`），输出写接口信号给对应模块命令解析与封装；TSS 命令解析与封装模块/TSE 命令解析与封装模块根据 `tss_cmd/tse_cmd` 中 1bit 的地址固定标识 `addr_fixed`（表 D-2 中的 `hcp_cmd[61]`）以及 7bit 的模块标识 `module_id`（表 D-2 中的 `hcp_cmd[57:51]`）来确定 `tss_cmd/tse_cmd` 是用于配置 TSS 或 TSE 中的哪个模块，在判断完成后丢弃该 7bit 的模块标识 `module_id`，生成写接口信号（包括 1bit 的地址固定标识

addr\_fixed、19bit 的模块地址 maddr、32bit 的写数据 wdata 以及 1bit 的写使能 wr)，输出写接口信号给对应模块命令解析与封装；

(5): 模块命令解析与封装根据 1bit 的地址固定标识 addr\_fixed 以及 19bit 的模块地址 maddr，将写数据 wdata 赋值给对应的寄存器或表项，配置过程结束，目前暂未设计配置响应机制。

## E.2. 读取过程

(1): OpenTSN 控制器发送网络管理类型的 TSMP 帧，网络管理帧经 TSN 网络转发给目的 TSN 交换机或 TSN 网卡，然后进入 TSN 交换机或 TSN 网卡的 HCP，由 HCP 中的网络管理模块进行处理；

(2): 网络管理模块解析网络管理帧，网络管理帧可能携带多个寄存器/表项的读取信息，将网络管理帧中携带的每个寄存器/表项的读取信息转化为读命令 cmd (格式详见表 D-1 所示)，每个读命令 cmd 只携带一个寄存器/表项读取信息，输出读命令 cmd 给内部与外部命令解析与封装模块；

(3): 内部与外部命令解析与封装模块根据读命令 cmd 中 2bit 的地址空间 addr\_space (表 D-1 中的 cmd[65:64]) 来确定该读命令 cmd 是用于读取 HCP 还是用于读取外部 TSS 或 TSE 的寄存器/表项，在判断完成后丢弃该 2bit 的地址 addr\_space，生成 HCP 读命令 hcp\_cmd (格式详见表 D-2 所示) 给 HCP 命令解析与封装模块，或生成外部读命令 tss\_cmd/tse\_cmd (格式详见表 D-2 所示) 给 TSS/TSE 命令解析与封装模块；

(4): HCP 命令解析与封装模块根据 hcp\_cmd 中 1bit 的地址固定标识 addr\_fixed (表 D-2 中的 hcp\_cmd[61]) 以及 7bit 的模块标识 module\_id (表 D-2 中的 hcp\_cmd[57:51]) 来确定 hcp\_cmd 是用于读取 HCP 中的哪个模块, 在判断完成后丢弃该 7bit 的模块标识 module\_id, 生成读接口信号 (包括 1bit 的地址固定标识 addr\_fixed、19bit 的读模块地址 raddr 以及 1bit 的读使能 rd), 输出读接口信号给对应模块命令解析与封装; TSS/TSE 命令解析与封装模块根据 tss\_cmd/tse\_cmd 中 1bit 的地址固定标识 addr\_fixed (表 D-2 中的 hcp\_cmd[61]) 以及 7bit 的模块标识 module\_id (表 D-2 中的 hcp\_cmd[57:51]) 来确定 tss\_cmd/tse\_cmd 是用于读取 TSS 或 TSE 中的哪个模块, 在判断完成后丢弃该 7bit 的模块标识 module\_id, 生成读接口信号 (包括 1bit 的地址固定标识 addr\_fixed、19bit 的读模块地址 raddr 以及 1bit 的读使能 rd), 输出读接口信号给对应模块命令解析与封装;

(5): 模块命令解析与封装根据 1bit 的地址固定标识 addr\_fixed 以及 19bit 的读模块地址 raddr 读出对应的寄存器或表项中数据;

(6): 模块命令解析与封装将 1bit 的地址固定标识 addr\_fixed、19bit 的读模块地址 raddr 以及读出的寄存器/表项数据输出给 TSS/TSE/HCP 命令解析与封装模块;

(7): TSS/TSE/HCP 命令解析与封装模块根据接收到的 1bit 的地址固定标识 addr\_fixed、19bit 的读模块地址 raddr、读出的寄存器/表项数据及其模块标识 module\_id 来生成 TSS/TSE/HCP 读响应

tss\_cmd\_ack/tse\_cmd\_ack/hcp\_cmd\_ack（格式详见表 D-2），输出 tss\_cmd\_ack/tse\_cmd\_ack/hcp\_cmd\_ack 给 HCP 中的内部与外部命令解析与封装模块；

(8)：内部与外部命令解析与封装模块在接收到的 tss\_cmd\_ack/tse\_cmd\_ack/hcp\_cmd\_ack 中添加 2bit 的 addr\_space，生成 cmd\_ack（格式详见表 D-1），输出 cmd\_ack 给网络管理模块；

(9)：HCP 中的网络管理模块将接收到的 cmd\_ack 中的数据和地址存储在一个 FIFO 中，当 FIFO 中存储了本次读取的所有数据时，开始从 FIFO 中读出读地址和读数据，生成网络管理响应类型的 TSMP 报文，该报文经 TSN 网络转发给控制器。

附录F. PTP/PCF 协议格式

F.1. PTP 协议格式

TSN 交换机接收/发送的 PTP 报文（包括 Sync，Delay\_req，Delay\_resq）格式如图 F-1 所示，PTP 报文中关键字段的说明如表 F-1 所示。

|            |            |    |        |        |  |            |          |          |      |    |
|------------|------------|----|--------|--------|--|------------|----------|----------|------|----|
| 目的TSN标签    |            |    |        | 源TSN标签 |  | 长度/类型      | 长度<br>相关 | 消息<br>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<br>标识符 |    | 源端口标识符 |        |  |            | 序列号      | 控制域      | 时间间隔 |    |
| 时间戳(t1/t3) |            |    |        |        |  | 时间戳(t2/t4) |          |          |      |    |

图 F-1 PTP 报文格式

表 F-1 PTP 报文中关键字段说明

| 名称   | 位宽 bit | 说明  |
|------|--------|---|
| 类型   | 16     | 未经映射的 PTP 协议报文以太网类型为 0x88f7，经过映射后的 PTP 协议报文以太网类型为 0x98f7；目前在 TSN 交换机中接收/发送的 PTP 协议报文为未经映射后的报文     |
| 消息类型 | 4      | 4'd1 表示 sync 消息，4'd3 表示 delay_req 消息，4'd4 表示 delay_resq 消息，其它数值保留                                 |
| 长度   | 16     | 整个 PTP 协议报文的长度，单位为字节，在目前设计中，PTP 协议报文的长度固定为 64 字节  |
| 修正域  | 64     | 用于记录 PTP 协议报文在 TSN 硬件中传输的驻留时间，其低 16bit 数值单位为 $2^{-16}$ ，高 48bit 数值单位为 ns；控制器在构造 PTP 协议报文时将该字段填为 0 |
| 时间戳  | 80     | 该字段用于存放 IEEE 1588 时钟同步过程中的 t1 和 t3  |
| 其它字段 | /      | 在目前设计中无需关注，默认填 0  |

F.2. PCF 协议格式

TSN 交换机接收/发送的 PCF 报文格式如图 F-2 所示，PCF 报文中关键字段的说明如表 F-2 所示。

|     |                   |             |      |          |  |
|-----|-------------------|-------------|------|----------|--|
|     | 0-15              |             |      | 16-31    |  |
| 0   | Integration_cycle |             |      |          |  |
| 32  | Membership_new    |             |      |          |  |
| 64  | Reserved          |             |      |          |  |
| 96  | Sync_priority     | Sync_domain | Type | Reserved |  |
| 128 | Reserved          |             |      |          |  |
| 160 | Transparent_clock |             |      |          |  |
| 192 |                   |             |      |          |  |

图 F-2 PCF 报文（不包括以太网头）格式

表 F-2 PCF 报文中关键字段说明

| 名称                | 位宽 bit | 说明   |
|-------------------|--------|--|
| Integration_Cycle | 32     | 集成周期，标识设备在时间上位于当前集群周期中的第几个集成周期，系统未同步时值为 0。当集成周期到达配置的上限值后会从 0 重新计数。 |

| 名称                | 位宽 bit | 说明  |
|-------------------|--------|---|
| Membership_New    | 32     | 对应于 SM 的成员向量，每个比特位标识一个 SM 设备的同步情况，当为“1”时代表对应的 SM 设备完成了同步。                                     |
| Sync_priority     | 8      | 同步优先级，标识网络中设备参与同步过程的优先级，CM 设备只处理与其相同同步优先级的 PCF 帧，SM 设备会处理与其相同以及更高同步优先级的 PCF 帧。                |
| Sync_Domain       | 8      | 同步域，网络中处于相同的同步域的设备才可能进行 PCF 帧通信，不同同步域设备发来的 PCF 帧会被丢弃。   |
| Type              | 4      | 标识 PCF 帧的具体类型，CS 帧的值为 0x4，CA 帧的值为 0x8，IN 帧值为 0x2。   |
| Transparent Clock | 64     | 透明时钟，用于记录 PCF 帧在转发过程中的时延；其低 16bit 数值单位为 $2^{-16}$ ，高 48bit 数值单位为 ns；控制器在构造 PCF 协议报文时将该字段填为 0。 |

## 附录G. OpenSync 协议格式

OpenSync 采用 Mac-in-Mac 的方式，

确保 OpenSync 帧能够在交换模块中能够根据 MAC 地址进行正常转发。OpenSync 帧类型用 TSMP 的类型标识。

32 个字节的 Sync 头包含 16 字节的 MAC/TSMP 头，以及 16 字节的时间信息。格式定义见 OpenTSN 的定义，主要包含以下几个域：

| 偏移量   | 名称         |   |
|-------|------------|---|
| 0-5   | 目的 MAC     | 与时间同步帧的目的 MAC 一致  |
| 6-11  | 源 MAC      | 与时间同步帧的源 MAC 一致   |
| 12-13 | 长度/类型      | TSMP 协议的类型 (ff01)   |
| 14-15 | TSMP 类型    | 标识 OpenSync 的 TSMP 子类型                                    |
| 16-23 | 接收/发送 PIT  | 使 Syn_clk 标记的 64 位帧在网络接口接收 (Rx_pit) 和发送 (Dispatch_pit) 时刻 |
| 24-31 | 接收发送时间戳 TS | 使用 local_cnt 标记的 64 位时间戳                                  |

## 附录H. RAM/FIFO 使用情况

TSNSwitch3.4 中的 RAM 和 FIFO 使用情况如表 H-1 所示

表 H-1 TSNSwitch3.4 中 RAM 和 FIFO 使用情况

| 模块名                              | 类型                  | 位宽<br>bit | 深度    | 说明                      |
|----------------------------------|---------------------|-----------|-------|-------------------------|
| 转发查表<br>Forward_Lookup_Table     | FIFO                | 61        | 32    | 缓存标准以太网报文描述符            |
|                                  | 真双端口 RAM            | 57        | 32    | 缓存 DMAC 转发表             |
|                                  | 真双端口 RAM            | 9         | 16384 | 缓存 FlowID 转发表           |
| 9*帧过滤<br>Interface_RX            | 伪双端口 RAM(用以生成 FIFO) | 9         | 16    | 报文跨时钟域                  |
| 8*网络队列管理<br>Network_Queue_Manage | 伪双端口 RAM            | 9         | 512   | 用于缓存报文描述符               |
| 8*网络发送<br>Network_TX             | 伪双端口 RAM(用以生成 FIFO) | 8         | 16    | 报文跨时钟域                  |
| 控制队列管理<br>Ctrl_Queue_Manage      | FIFO                | 14        | 16    | 用于缓存报文描述符               |
| 控制发送<br>Ctrl_TX                  | 伪双端口 RAM(用以生成 FIFO) | 8         | 16    | 报文跨时钟域                  |
| 9*队列门控<br>Queue_Gate_Control     | 真双端口 RAM            | 8         | 1024  | 用于缓存门控列表                |
| 报文集中缓存<br>Pkt_Centralized_Buffer | 伪双端口 RAM(用以生成 FIFO) | 9         | 512   | 用于缓存 pkt_bufid          |
|                                  | 真双端口 RAM            | 4         | 512   | 用于缓存每个 pkt_bufid 输出接口数量 |
|                                  | 真双端口 RAM            | 134       | 65536 | 用于缓存报文                  |
| TSMP 协议封装<br>TSMP_Encapsulation  | 伪双端口 RAM            | 9         | 256   | 用于缓存报文                  |
|                                  | FIFO                | 35        | 4     | 用于缓存报文描述符               |
| HCP 接收<br>HCP_RX                 | 伪双端口 RAM(用以生成 FIFO) | 9         | 16    | 报文跨时钟域                  |
| HCP 发送<br>HCP_TX                 | 伪双端口 RAM(用以生成 FIFO) | 8         | 16    | 报文跨时钟域                  |
| MAC 自学习<br>MAC_Self_Learning     | 伪双端口 RAM(用以生成 FIFO) | 9         | 16    | 报文跨时钟域                  |