

TSN 网卡（TSNNic3.4）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	4
2. 项目概述	6
2.1. 设计目标	6
2.2. 设计指标	7
3. 总体设计	7
3.1. OpenTSN HCP	12
3.1.1. TSMP 代理总体设计	12
3.1.2. OpenSync 定时总体设计	20
3.1.3. TSMP 转发表总体设计	23
3.1.4. 循环控制总体设计	26
3.1.5. 报文交换总体设计	28
3.2. OpenSync MAC 总体设计	30
3.2.1. 内部功能划分	30
3.2.2. 处理流程	32
3.3. OpenTSN 时间敏感端 TSE 总体设计	34
3.3.1. 内部功能划分	34
3.3.2. TSE 处理流程	42
附录 A. 数据格式定义	48
A.1. 报文格式	48
A.2. TSN 标签格式	49
A.3. 报文描述符格式	49
附录 B. 读写信息说明	49
B.1. 硬件地址定义规范	49
B.2. OpenTSN HCP 读写信息	50

B.2.1. 寄存器.....	50
B.3. OpenSync MAC 读写信息.....	55
B.4. TSS 读写信息.....	56
B.4.1. 寄存器.....	56
B.4.2. 映射表 (0x61080000~0x610800ff)	58
B.4.3. 逆映射表 (0x61180000~0x6118003f)	60
B.4.4. 注入时刻表 (0x61100000~0x611003ff)	61
B.4.5. 门控列表 (6060_0000h-6060_03ffh)	62
附录 C. 网络管理报文格式	63
附录 D. Mbus 格式	65
附录 E. 配置与读取的详细处理流程	67
E.1. 配置过程.....	69
E.2. 读取过程.....	70
附录 F. PTP/PCF 协议格式.....	72
F.1. PTP 协议格式.....	72
F.2. PCF 协议格式.....	73
附录 G. OpenSync 协议格式.....	74
附录 H. IP 分片说明.....	74

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)网卡设计, 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 网卡。

2.2. 设计指标

- 支持 IEEE 802.1AS、802.1Qch、802.1Qbv、802.1Qcc 标准
- 支持报文逆映射，32 条逆映射表项
- 支持对 TCP（Transmission Control Protocol，传输控制协议）报文和 UDP（User Datagram Protocol，用户数据包协议）报文分片的映射，32 条映射表项
- 支持标准以太网报文传输
- 支持 2 个 GMII（Gigabit Media Independent Interface，千兆介质独立接口）接口（1 个网络交换接口，1 个主机接口）
- 硬件调度时间槽设置范围为[4 μ s，512 μ s]（ μ s:microsecond，微秒）
- 时间敏感流量最大支持 1024 个硬件调度时间槽的延迟

3. 总体设计

TSNNic3.4（Time-Sensitive Networking Network Interface Controller，时间敏感网络网卡，版本 3.4）的总体设计如**错误!未找到引用源。**所示，TSNNic3.4 包括 OpenTSN HCP（Hardware Control Point，硬件控制点）、时间敏感端 TSE 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 2 个 OpenSync 1GMAC 和 Mbus 解析与封装 3 个模块。

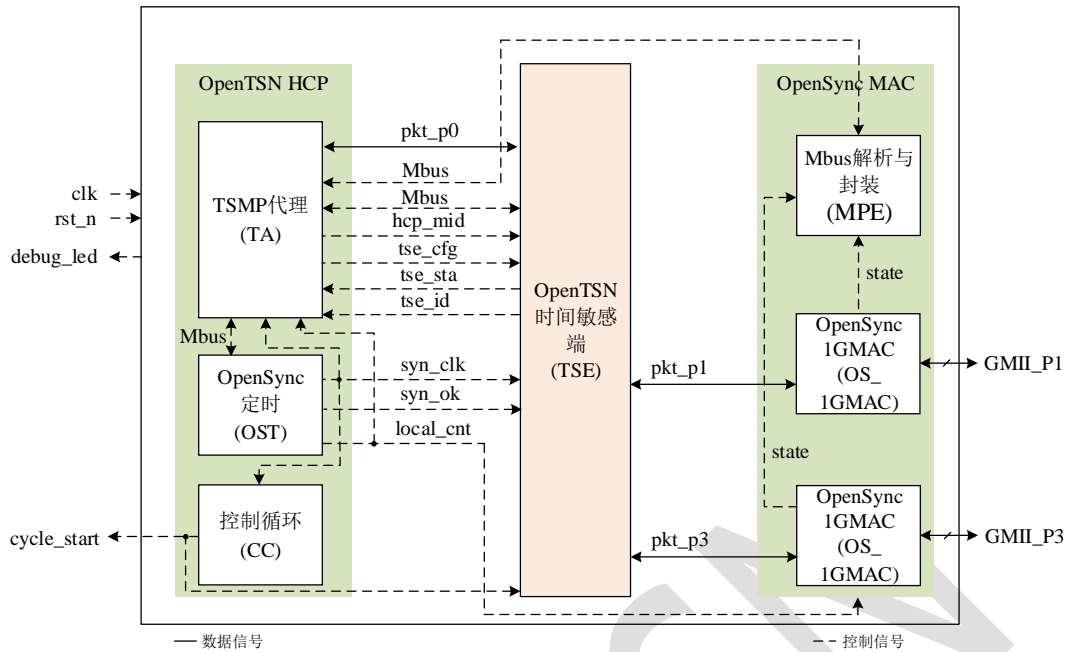


图 3-1 TSNNic3.4 总体架构

TSNNic3.4 总体架构图中的信号含义如表 3-1 所示。

表 3-1 TSNNic3.4 总体架构图中信号含义

信号	位宽 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	N 号网络接口 GMII 接收时钟信号，其频率为 125MHz，N=0、1、...、3
	gmii_rx_dv	N 号网络接口 GMII 接收数据有效信号，高有效，N=0、1、...、3
	gmii_rxd	N 号网络接口 GMII 接收数据，N=0、1、...、3
	gmii_rx_er	N 号网络接口 GMII 接收数据错误信号，高有效，N=0、1、...、3
	gmii_tx_clk	N 号网络接口 GMII 发送时钟信号，其频率为 125MHz，N=0、1、...、3
	gmii_tx_en	N 号网络接口 GMII 发送数据有效信号，高有效，N=0、1、...、3

信号		位宽 bit	含义
	gmii_txd	8	N 号网络接口 GMII 发送数据, N=0、1、...、3
	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、...、3
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 /pkt_ctr 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、...、3
	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、...、3
	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、...、3
	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、...、3
syn_clk		64	同步时钟, 单位为 ns。该时钟与 TSN 网络时钟进行同步
syn_ok		1	时钟同步是否正常完成, 1 表示完成, 0 表示未完成, SYN_CLK 无效
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
hcp_mid		12	HCP 发给 TSE 的自身的 MID 值
tse_cfg		512	HCP 发给 TSE 的配置信息
tse_sta		512	TSE 发给 HCP 的状态信息
tse_id		32	TSE 发给 HCP 的 ID 信息
cycle_start		1	周期初始调度脉冲信号
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

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。

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; 并且对时间敏感流量进行注入控制。

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。

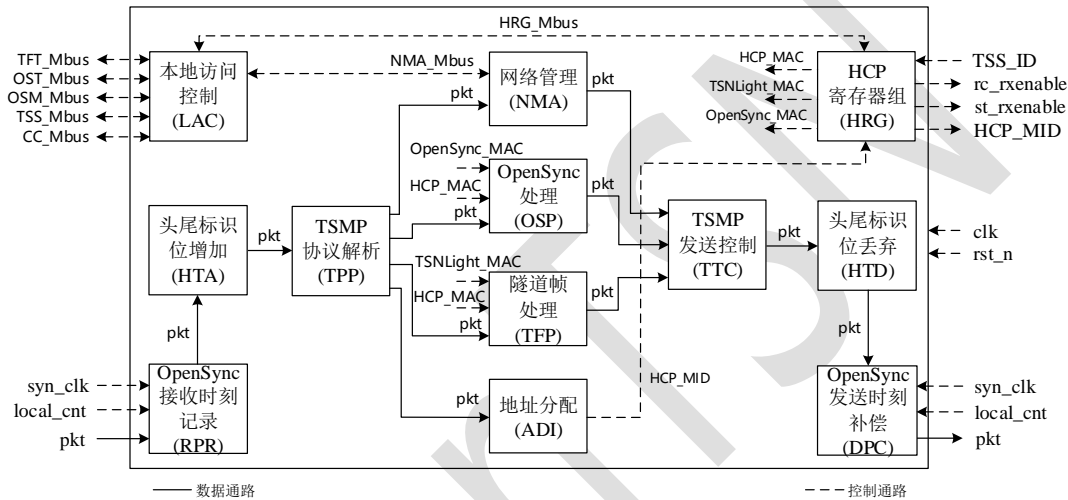


图 3-2 TSMP 代理内部功能划分

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 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： MAC[47:24]=0x662662; MAC[23:12]= HCP_MID; 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

信号		位宽 bit	含义
			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_ 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 $\text{receive_syn_clk} - \text{dispatch_pit}$ ，将该补偿量计算到 `receive_local_cnt` 中，即 $\text{receive_cnt} = \text{receive_local_cnt} - (\text{receive_syn_clk} - \text{dispatch_pit})$ ；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** 头中提取出接收时间 `receive_cnt`；计算报文在 **TSS** 中驻留时间为 $\text{current_local_cnt} - \text{receive_cnt}$ ，将该驻留时间计算到当前同步时钟值中，即 $\text{current_syn_clk} - (\text{current_local_cnt} - \text{receive_cnt})$ ，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。

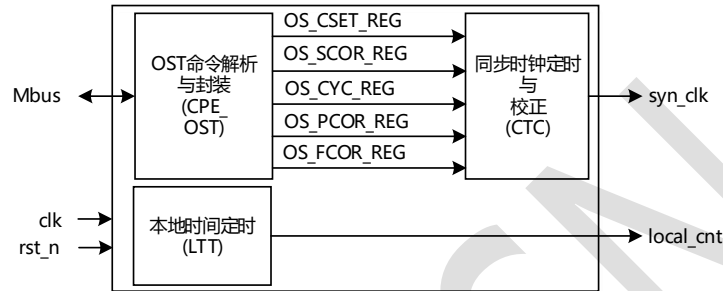


图 3-3 OpenSync 定时内部功能划分

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 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

信号		位宽 bit	含义
	ov_rdata	32	读出的寄存器/表项中数据
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“同步时钟相位校正参考值寄存器”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

$\text{current_synchronization_clock} + \text{OS_PCOR_REG} + \text{OS_FCOR_REG}$ 。

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值寄存器 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. 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。

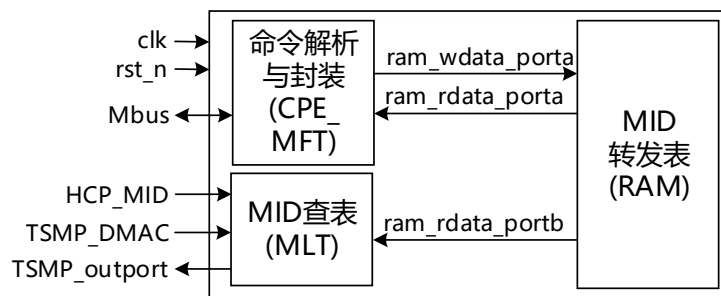


图 3-4 TSMP 转发表内部功能划分

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 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
	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 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
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 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
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

信号	位宽 bit	含义
		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，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。

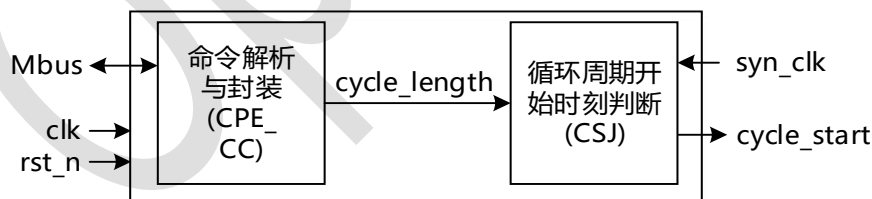


图 3-5 循环控制 CC 内部功能划分

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 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

信号		位宽 bit	含义
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
	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^n
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。

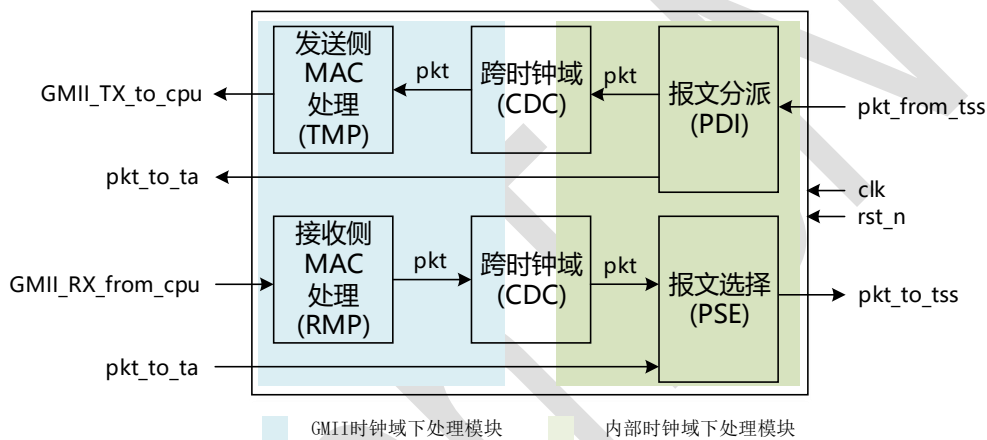


图 3-6 报文交换 PSW 内部功能划分

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 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_ 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_ 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

信号		位宽 bit	含义
	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。

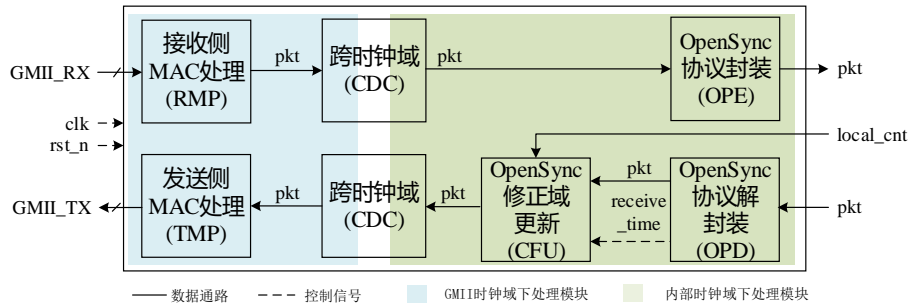


图 3-7 OpenSync 1GMAC 内部功能划分

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 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 $\text{current_local_cnt} - \text{receive_cnt}$ ，并将其累加到报文修正域中，即 $\text{correctionfield} = \text{correctionfield} + (\text{current_local_cnt} - \text{receive_cnt})$ ；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 时间敏感端 TSE 总体设计

3.3.1. 内部功能划分

时间敏感端 TSE 的内部功能划分如图 3-8 所示，，灰色底纹模块功能暂未开发。

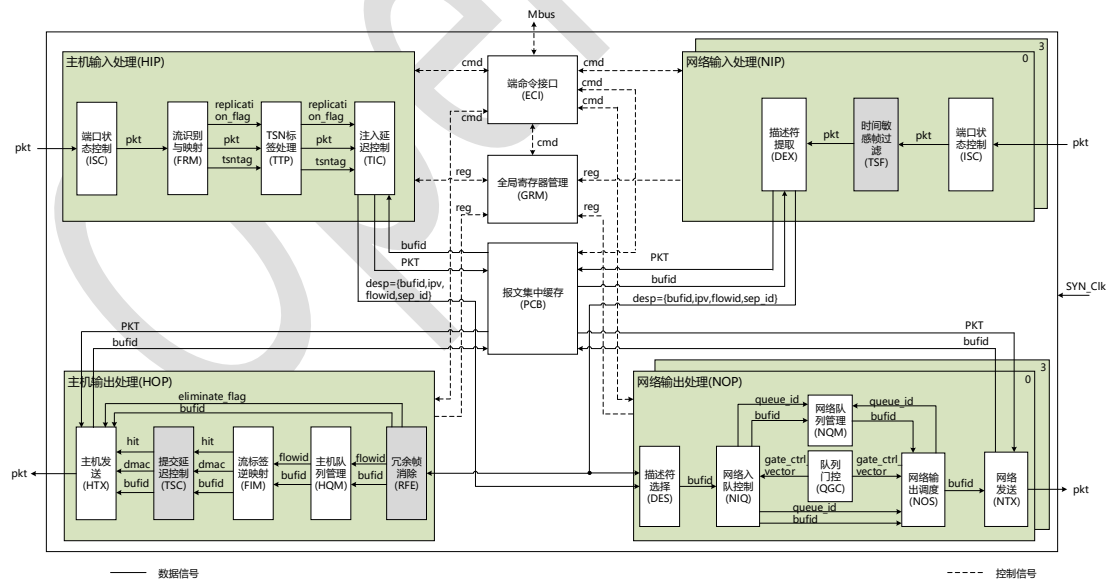


图 3-8 TSE 内部功能划分

时间敏感端 TSE 的内部功能划分图中信号描述如表 3-8 所示。

表 3-8 TSE 内部功能划分图中信号含义

信号	位宽	描述
PKT	134	输入缓存接口和报文集中缓存接收和发送的报文，具体格式参考附录 A
pkt	9	除输入缓存接口和报文集中缓存之外，其它模块接收和发送的报文，具体格式参考附录 A
bufid	9	报文在集中缓存区中缓存空间
tsntag	48	报文 TSN 标签，查表映射后的结果
flowid	12	TSN 报文的流 ID
replication_flag	1	帧复制标志位
seq_id	16	帧序列号（通过查表匹配计数自动生成，初始值 0 是无效序列号）
ipv	3	报文优先级，其中 3' b101、3' b110、3' b111 表示 ST 流量，3' b011、3' b100 表示 AV B 流量，3' b000、3' b001、3' b010 表示 BE 流量
reg	--	寄存器信号
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
queue_id	3	报文的 TSntag 和 bufid 缓存的队列
gcl_ctrl_vector	8	8 个队列的门控状态
dmac	48	报文目的 mac 地址
eliminate_flag	1	帧缓存地址释放信号
sync_clk	64	同步时钟，该时钟与 TSN 网络中时钟进行同步
cmd	65	读写命令，格式详见附录 D

ISC(Interface State Control, 端口状态控制)模块：主要功能是接收 OpenSync MAC 接口传来的报文，为每拍 8bit 数据增加 1bit 的头尾标识位；并在 TSE 的不同启动阶段来对不同类型报文进行选择传输；若 TSE 正在初始化 bufid，则丢弃所有报文；若 TSE 初始化 bufid 完成且处于配置阶段，则传输标准以太网报文和 TSMP 报文；若 TSE 初始化 bufid 完成且处于时钟同步阶段，则传输标准以太网报文、TSMP 报文和 TSN 报文中的非 ST(Scheduled Traffic, 预定流量)报文；若 TSE 初始化 bufid 完成且处于正常工作阶段，则传输所有报文。

FRM（Frame Resolution Mapping，流识别与映射）模块：主要功能是报文查表映射（映射表见下表）。报文查表映射是指 TCP 和 UDP 报文第一个分片（在报文不分片情形下，第一个分片即为完整的报文）用五元组去查找映射表，并更新命中表项的 16bit 标识 IP_ID，TCP 和 UDP 报文的非第一个分片用标识来获取查表结果，每查表映射成功，硬件会更新帧序列号 seq_id，同时将映射结果中 ipv、flowid、seq_id、inject_dbufid 构造成 TSNtag 输出；其它类型报文不查映射表。

表 3-9 缓存映射表的 RAM 格式

查表说明	表项内容	位置	字段	含义
逐个比对表项，依次读出地址 5'd0 到 5'd31 的表项内容进行比对，直至查表命中或表项无效）	表项有效位	[162]	entry_valid	标识该表项是否有效，其中 1'b1 表示该表项有效，1'b0 表示该表项无效
	TCP 报文或 UDP 报文的非第一个分片的查表关键字	[161:146]	identification	ip_id 标识，分片的查表关键字
	五元组掩码	[145:141]	fivetuple_mask	五元组的掩码，其中 1'b1 表示该位需关注，1'b0 表示该位不需关注
	TCP 报文或 UDP 报文的第一个分片的查表关键字	[140:133]	ip_protocol	五元组中 IP 协议
		[132:101]	src_ip	五元组中源 IP
		[100:69]	dst_ip	五元组中目的 IP
		[68:53]	src_port	五元组中源端口
		[52:37]	dst_port	五元组中目的端口
	查表结果	[36:34]	ipv	报文优先级，其中 3'h5、3'h6、3'h7 表示 ST 分组，3'h3、3'h4 表示 RC 分组，3'h0、3'h1、3'h2 表示 BE 分组
		[33:22]	flow_id	TSN 流标签，每条流的 ID 号都是唯一的
		[21:6]	seq_id	帧序列号（通过查表匹配计数自动生成，初始值 0 是无效序

				列号)
		[5]	replication_flag	帧复制标志位, 为 1 时表示帧需要复制, 为 0 表示不需要复制
		[4:0]	inject_dbufid	ST 报文描述符缓存地址, 针对其他类型报文, 该字段硬件不关注

TTP(TsnTag Process, TSN 标签处理)模块: 针对映射成功的报文用 TSNTag (格式见下表) 替换报文 DMAC 并修改以太网类型为 0x1800。

表 3-10TSNTag 格式

字段	位宽 bit	位置	描述
ipv	3	[47:45]	报文优先级, 其中 3'b000、3'b001、3'b010 表示 BE 流量, 3'b011、3'b100 表示 AVB 流量, 3'b101、3'b110、3'b111 表示 ST 流量
flow id	2	[44:43]	保留字段
	12	[42:31]	流标识
seq_id	16	[30:15]	帧序列号, 通过查表匹配计数自动生成
保留	5	[14:10]	保留字段
inject_dbufid	5	[9:5]	ST 流在 TSN 网卡发送端的缓存地址
submit_dbufid	5	[4:0]	ST 流在 TSN 网卡接收端的缓存地址, 本字段暂未使用

TIC(Time-sensitive Injection Control, 时间敏感注入延时控制)模块: 从 tsntag 中获取 inject_dbufid, 根据 inject_dbufid 对 ST 流量的描述符进行缓存; 同时根据节点当前所在的时间槽进行注入时刻表查表, 读取需要在当前时间进入输出队列的报文描述符; 根据帧复制标志位的状态判断是否需要帧复制, 帧复制报文发送到所有网络接口, 无需复制报文发送至默认网络端口; 报文位宽 9bit 转 134bit 后写入报文集中缓存。

表 3-11 注入时刻表格式

名称	位置	位宽	字段	含义	备注
注入时刻表	[15]	1	Valid	表项有效位	表项深度为
	[14:5]	10	send_slot	发送时间槽	1024，对应当
	[4:0]	5	dbufid	描述符缓存 ID	前所支持的时间槽数量

PCB(Packet Centralize Buffer, 报文集中缓存)模块：主要功能是对接口接收的所有报文进行集中缓存（报文缓存区的格式如表 3-12 所示），对缓存区的剩余 bufid 进行缓存管理（剩余地址缓存区的格式如表 3-13 所示）。每个 bufid 都需要设计一个计数器来对输出端口数量进行计数，bufid 每释放一次，将计数器减一；当报文的 bufid 使用完时需要检测该 bufid 对应计数器的值，只有当计数器值为 0 才能进行将 bufid 写入剩余地址缓存区中，当不为 0 意味着该 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 3-12 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 3-13 剩余地址缓存区数据格式

名称	含义	备注
bufid[8:0]	当前“报文缓存区”中剩余的报文缓存块 ID。	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 ack 信号 (输出为 1 时标识准备就绪) 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, 逆映射表格式见下表。查表成功后将 bufid、查表是否命中和查表命中时的查表结果 DMAC 输出; 如报文不需要查找逆映射表, 报文描述符直接输出。

表 3-14 逆映射表格式

索引地址	字段	位置	描述
1.从地址 8'd0 到 8'd31 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; 2.原则上逆映射表深度可以设置为 4K, 目前考虑实现和查表延时, 逆映射表的深度为 32,	FlowID	[59:48]	流标识
	DMAC	[47:0]	报文真实目的 MAC 地址

HTX(Host TX, 主机发送)模块: 主要功能是接收来自冗余帧消除模块的释放缓存信号和 bufid, 如果释放缓存信号有效, 释放对应的 bufid; 根据接收到的 bufid 从报文集中缓存区中读取报文并释放 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, 控制报文输出间隔在 22 拍。

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 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 bufid 输出给报文集中缓存模块；根据接收到的报文构造报文描述符。

DES(DESCRIPTOR Select, 描述符选择)模块：主要功能是对主机接口和网络接口传来的报文描述符进行选择（主机接口的报文描述符优先），并输出给网络入队控制模块。

NIQ(Network Input Queue, 网络入队控制)模块：主要功能是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；维护每个队列的尾地址；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；并且根据队列写入和调度输出的信息来统计每个队列中缓存的 bufid 数量。

NQM (Network Queue Manage, 网络队列管理) 模块：主要功能是对网络输出接口的 8 个队列进行集中缓存管理

QGC(Queue Gate Control, 队列门控)模块：主要功能是计算本地时钟处于一个调度周期的哪个时间槽，并将时间槽作为地址从门控列表（格式如表 3-15 所示）中读取 8 个队列的门控状态，并将门控状态输出给网络入队控制模块和网络输出调度模块。

表 3-15 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：主要功能是根据当前队列是否为空、队列优先级以及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 bufid 作为该队列新的首地址。

NTX(Network TX, 网络发送)模块：主要功能是根据接收到的 bufid 从报文缓存区中读取报文；将读出报文的位宽由 134bit 转换为 8bit；当最后一拍 134bit 数据被读出时，将此 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。

ECI(tsE Command Interface, 时间敏感端命令接口)模块：主要功能是将 OpenTSN HCP 传来的读写命令（命令格式见下表）进行解析，根据命令中携带的模块标识将命令中地址固定标识位、模块地址以及数据传输给对应模块；将 TSE 各模块传来的地址固定标识位、模块地址和读数据封装成命令响应，并在命令响应中增加读数据来自的模块的标识，输出命令响应给 HCP。

表 3-16 TSE 命令格式

位置	位宽	名称	说明
[63:62]	2	Opcode	2'h0: 写操作 2'h1: 保留 2'h2: 读操作 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_0000~0x7_ffff
[31:0]	32	data	寄存器或表项的读/写数据

GRM(Global Register Management, 全局寄存器管理)模块：主要功能是维护 TSE 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 TSE 版本号等状态寄存器）；解析 ECI 模块传来的

命令，配置或读取 TSE 的全局控制寄存器

3.3.2. TSE 处理流程

TSE 总体架构中包含 1 个主机接口、2 个网络接口（1 个网络交换接口和 1 个控制接口），网络交换接口逻辑和控制接口逻辑实例化为一套逻辑，主机接口与外部设备连接，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。

3.3.2.1. 主机接口进网络接口出的报文处理流程

主机接口的端口状态控制模块（ISC）接收 GMII 接口传来的报文，为每拍 8bit 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（以太网类型为 0x1800 和 0xff01）并根据 TSE 所处的不同启动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 报文中配置报文，丢弃其它类型报文；若 TSE 处于时钟同步阶段，传输标准以太网报文和 TSN 报文中非 ST 报文，丢弃 TSN 报文中 ST 报文；若 TSE 处于正常工作阶段，接收标准以太网报文和 TSN 报文。本模块将报文传输给流识别与映射模块（FRM）。

流识别与映射模块（FRM）接收到报文后，根据以太网类型识别 TCP 报文/UDP 报文（以太网类型为 0x0800，且 IP 协议为 0x6/0x11），提取报文的五元组，用带掩码的五元组去查找映射表，若查表命中，则获得查表结果组成 tsntag、replication_flag 信号输出，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 报文分组 000；

针对非 TCP/UDP 报文，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 报文分组 000；然后构造报文描述符。查表结束后将报文、查表成功信号和描述符 `tsntag`、`replication_flag` 传输到 TSN 标签处理模块。

TSN 标签处理模块根据查表成功信号判断，如果是查表成功的报文，将查表结果 `tsntag` 替换到报文的 DMAC 字段，同时修改以太网类型为 0x1800；如果查表不成功，则报文不做任何更改，传输至下注入延时控制模块。

注入延时模块接收到报文和描述符后，先判定报文是否是 TSN 报文，如果是再根据 `ipv` 字段识别报文是不是 ST 报文，如果不是 ST 报文，报文直接转换位宽然后写到集中缓存，报文输出描述符输出到网络输出处理侧，根据帧复制标志 `replication_flag` 判断报文是否需要复制；如果是 ST 报文，则根据描述符缓存地址将描述符进行缓存，对报文进行位宽转换后写入缓存；同时根据节点当前所在的时间槽进行注入时刻表查表，读取需要在当前时间进入 输出队列的报文描述符，送至网络输出处理侧，根据帧复制标志 `replication_flag` 判断报文是否需要复制。

描述符选择 DES 模块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来选择该报文描述符缓存的队列，将报文描述符传给网络队列管理模块进行缓存；并且用报文描述符中 `bufid` 来更新队列的尾地址。

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 **bufid** 作为该队列首地址。

网络发送模块根据报文描述符中 **bufid** 从报文集中缓存模块中读出报文，在网络发送模块内部设计两个 134bit 的 ping-pong 寄存器来循环缓存读出的报文，并将寄存器中数据位宽由 134bit 转换成 8bit，在接收到报文最后一拍 134bit 数据时，将 **bufid** 传给报文集中缓存模块进行释放。

3.3.2.2. 网络接口进主机接口出的报文处理流程

网络交换接口的端口状态控制模块 (ISC) 接收 opensync MAC 接口传来的报文，为每拍 8bit 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（以太网类型为 0x1800 和 0xff01）并根据 TSE 所处的不同启动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 报文中配置报文，丢弃其它类型报文；若 TSE 处于时钟同步阶段，传输标准以太网报文和 TSN 报文中非 ST 报文，丢弃 TSN 报文中 ST 报文；若 TSE 处于正常工作阶段，接收标准以太网报文和 TSN 报文。

描述符提取模块接收到帧过滤模块传来的报文后，将报文位宽由 9bit 转换成 134bit，并将 134bit 数据根据其分配的 **bufid** 输出给集中缓存模块；同时对 RC 报文和 BE 报文进行监管，若报文集中缓存模块 (PCB) 中剩余 **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（即将 RC 报文和 BE 报文丢弃），若报文集中缓存模块 (PCB) 中剩余 **bufid** 数量少于 BE 报文监管阈

值时，将 BE 报文描述符丢弃（即将 BE 报文丢弃）；同时提取报文的 DMAC 字段的 ipv、flowid、seq_id 数据，将提取的数据、报文集中缓存模块分配的 bufid 组成报文描述符；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（ipv、bufid）或经五元组映射后的 TSN 报文描述符传输给主机接口。

主机队列管理模块（HQM）将接收到描述符中的 bufid 和 FlowID（Flow Identification，流标识）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 bufid、FlowID 输出给帧逆映射模块。

帧逆映射模块根据报文是否查逆映射表标志信号来判定该报文描述符是否需要查找逆映射表，若需要，则用 FlowID 去查找逆映射表，并将 bufid、查表是否命中标识和查表命中时的查表结果（即目的 MAC）输出给主机发送模块（HTX）；若无需查找逆映射表，将 bufid 输出给主机发送模块（HTX）。

主机发送模块（HTX）接收帧逆映射模块传来的查表后的信息，若报文描述符需要查找逆映射表但查表未命中，则将 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；若报文描述符不需要查找逆映射表或需要查逆映射表且查表命中，则将接收到的 bufid 转化为报文在缓存区中基地址，从报文集中缓存模块（PCB）中读出报文，在接收到最后一拍 134bit 数据时，将 bufid 传给报文集中缓存模块进行释放；针对 TSN 报文，在读出第一拍 134bit 数据时，将查逆映射表的结果 DMAC 替换 TSNtag，将以太网类型由 0x1800 改为 0x0800；针对标准以太网报文，在读出第一拍 134bit 数据时，该拍数据无需修改。把从集中缓存区读出的报文每拍数据位宽由

134bit 转换为 8bit，并输出报文。

3.3.2.3. 网络交换接口进控制接口出的报文处理流程

网络交换接口的端口状态控制模块 (ISC) 接收 opensync MAC 接口传来的报文，为每拍 8bit 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（以太网类型为 0x1800 和 0xff01）并根据 TSE 所处的不同启动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 报文中配置报文，丢弃其它类型报文；若 TSE 处于时钟同步阶段，传输标准以太网报文和 TSN 报文中非 ST 报文，丢弃 TSN 报文中 ST 报文；若 TSE 处于正常工作阶段，接收标准以太网报文和 TSN 报文。

描述符提取模块接收到帧过滤模块传来的报文后，将报文位宽由 9bit 转换成 134bit，并将 134bit 数据根据其分配的 bufid 输出给集中缓存模块；同时对 RC 报文和 BE 报文进行监管，若报文集中缓存模块 (PCB) 中剩余 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（即将 RC 报文和 BE 报文丢弃），若报文集中缓存模块 (PCB) 中剩余 bufid 数量少于 BE 报文监管阈值时，将 BE 报文描述符丢弃（即将 BE 报文丢弃）；同时提取报文的 DMAC 字段的 ipv、flowid、seq_id 数据，将提取的数据、报文集中缓存模块分配的 bufid 报文描述符；然后根据报文以太网类型对报文描述符进行分派，将来自交换机的同步报文描述符或 TSMP 报文描述符传输给控制接口输出处理的描述符选择模块。

描述符选择 DES 模块将网络交换接口传来的描述符输出给网络入队控制 NIQ 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来选择该报文描述符缓存的队列，将报文描述符传给网络队列管理模块进行缓存；并且用报文描述符中 **bufid** 来更新队列的尾地址。

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 **bufid** 作为该队列首地址。

网络发送模块根据报文描述符中 **bufid** 从报文集中缓存模块中读出报文，在网络发送模块内部设计两个 134bit 的 ping-pong 寄存器来循环缓存读出的报文，并将寄存器中数据位宽由 134bit 转换成 8bit，在接收到报文最后一拍 134bit 数据时，将 **bufid** 传给报文集中缓存模块进行释放。

3.3.2.4. 控制接口进网络接口出的帧处理流程

与网络接口进控制接口出的帧处理流程一致。

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。

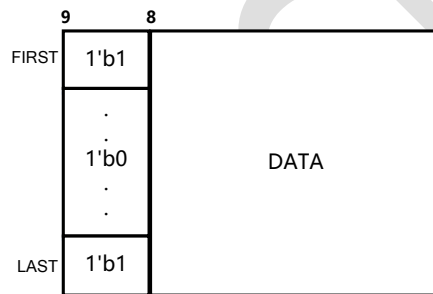


图 A-1 位宽为 9bit 的 pkt 格式

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。

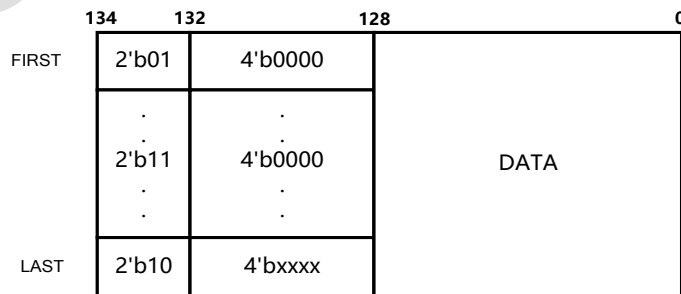


图 A-2 位宽为 134bit 的 pkt 格式

A.2. TSN 标签格式

表 A-2 TSNTag 格式

字段	位宽 bit	位置	描述
ipv	3	[47:45]	报文优先级，其中 3'b000、3'b001、3'b010 表示 BE 流量，3'b011、3'b100 表示 AVB 流量，3'b101、3'b110、3'b111 表示 ST 流量
flow id	2	[44:43]	保留字段
	12	[42:31]	流标识
seq_id	16	[30:15]	帧序列号，通过查表匹配计数自动生成
保留	5	[14:10]	保留字段
inject_dbufid	5	[9:5]	ST 流在 TSN 网卡发送端的缓存地址
submit_dbufid	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
bufid	9	[39:31]	报文集中缓存基地址
ipv	3	[30:28]	报文调度优先级，其中 3' b000、3' b001、3' b010 表示 BE 流量分组，3' b100、3' b011 表示 AVB 流量分组，3' b101、3' b110、3' b111 表示 ST 流量分组
flow_id	12	[27:16]	流量使用标签，每条流分配一个唯一 flowID。
seq_id	16	[15: 0]	帧序列号，通过查表匹配计数自动生成

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 bit	名称	说明
[31:30]	2	addr_space	地址空间，该字段编码如下 00: HCP 内部空间 01: TSS 的空间 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 其它: 保留	RO
31:16	0000h: OpenTSN 交换机 0001h: OpenTSN 网卡 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}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。 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.3. OpenSync MAC 读写信息

目前 OpenSync MAC 的读写信息如表 B-2 所示

表 B-2 OpenSync MAC 读写寄存器

硬件地址	名称	位宽 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

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-3 所示。

表 B-3 TSE 模块 ID 的分配

模块	控制接口端口状态控制 (ISC)	控制接口描述符提取 (DEX)	控制接口控制发送 (NTX)
模块 ID	0x0	0x1	0x4
模块	0 号网络接口端口状态控制 (ISC)	0 号网络接口描述符提取 (DEX)	0 号网络接口队列门控 (QGC0)
模块 ID	0x8	0x9	0xc
模块	1 号网络接口端口状态控制 (ISC)	1 号网络接口描述符提取 (DEX)	1 号网络接口队列门控 (QGC1)
模块 ID	0x10	0x11	0x14
模块	2 号网络接口端口状态控制 (ISC)	2 号网络接口描述符提取 (DEX)	2 号网络接口队列门控 (QGC2)
模块 ID	0x18	0x19	0x1c
模块	主机输入接口的端口状态控制 ISC	主机输入接口的流识别与映射 FRM	主机输入接口的注入延时控制 TIC
模块 ID	0x20	0x21	0x22
模块	主机输出接口的流标签逆映射 FIM	主机输出接口的主机发送 H TX	
模块 ID	0x23	0x24	
模块	报文集中缓存 (PCB)	全局寄存器管理 (GRM)	OpenSync 修正域更新
模块 ID	0x79	0x7a	0x7b

B.4.1. 寄存器

在 TSE 中支持 TSN 控制器配置/读取的寄存器如表 B-4 所示，R 表示该寄存器可读，W 表示该寄存器可写。

表 B-4 TSE 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
主机接口注入延时控制 (TIC)	6008_0000h	host_discard_pkt_cnt	32	RO	主机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
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	带宽预约报文监管阈值, 若该值小于硬件剩余 pkt_bufid 数量时, 则传输 RC 报文; 否则丢弃 RC 报文和 BE 报文
	63d0_0001h	be_police_threshold	9	R/W	尽力转发报文监管阈值, 若该值小于硬件剩余 pkt_bufid 数量时, 则传输 BE 报文; 否则丢弃 BE 报文

	63d0 0002h	standardeth_police_threshold	9	R/W	标准以太网报文监管阈值，若该值小于硬件剩余 pkt_bufid 数量时，则传输标准以太网报文；否则丢弃标准以太网报文
	63d0 0003h	qbv_or_qch	1	R/W	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
	63d0 0004h	schedule_period	11	R/W	调度周期，即门控列表周期，其值表示一个周期内时间槽的个数
	63d0 0005h	time_slot_length	11	R/W	时间槽长度，单位 us；取值范围为[4us,512us]且值必须为 2 ⁿ

B.4.2. 映射表（0x61080000~0x610800ff）

B.4.2.1. 含义

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。针对 TCP 报文/UDP 报文的第一个分片（在报文不分片情形下，第一个分片即为完整的报文），查表关键字为五元组，针对 TCP 报文/UDP 报文的中间分片或最后一个分片，查表关键字为分片标识，第一个分片和非第一个分片的查表结果相同。

在设计映射表时，将第一个分片和非第一个分片的查表关键字及其查表结果放在一个表项中，同时为每一个表项设计 1bit 的有效位来标识该表项是否有效。

映射表除了 IP 标识 IP_ID、帧序列号 seq_id 是由硬件进行维护，软件无需关注；其他内容均由软件进行配置，硬件不会对其进行修改。当前 TSNNic 只关注 3bit 的报文类型 ipv、12bit 的流标识 flowid、5bit 的 ST 报文注入地址 injection_dbufid 以及帧复制标志位 replication_flag，缓存映射表的 RAM 格式如表 B-5 所示。

表 B-5 缓存映射表的 RAM 格式

查表说明	表项内容	位置	字段	含义
逐个比对表项, 依次读出地址 5'd0 到 5'd31 的表项内容进行比对, 直至查表命中或表项无效)	表项有效位	[162]	entry_valid	标识该表项是否有效, 其中 1'b1 表示该表项有效, 1'b0 表示该表项无效
	TCP 报文或 UDP 报文的非第一个分片的查表关键字	[161:146]	identification	ip_id 标识, 分片的查表关键字
	五元组掩码	[145:141]	fivetuple_mask	五元组的掩码, 其中 1'b1 表示该位需关注, 1'b0 表示该位不需关注
	TCP 报文或 UDP 报文的第一个分片的查表关键字	[140:133]	ip_protocol	五元组中 IP 协议
		[132:101]	src_ip	五元组中源 IP
		[100:69]	dst_ip	五元组中目的 IP
		[68:53]	src_port	五元组中源端口
		[52:37]	dst_port	五元组中目的端口
	查表结果	[36:34]	ipv	报文优先级, 其中 3'h5、3'h6、3'h7 表示 ST 分组, 3'h3、3'h4 表示 RC 分组, 3'h0、3'h1、3'h2 表示 BE 分组
		[33:22]	flow_id	TSN 流标签, 每条流的 ID 号都是唯一的
		[21:6]	seq_id	帧序列号 (通过查表匹配计数自动生成, 初始值 0 是无效序列号)
		[5]	replication_flag	帧复制标志位, 为 1 时表示帧需要复制, 为 0 表示不需要复制
		[4:0]	dbufid	ST 报文描述符缓存地址, 针对其他类型报文, 该字段硬件不关注

映射表用一个真双端口的 RAM 来缓存, 该 RAM 参数如表 B-6 所示。

表 B-6 缓存映射表的 RAM 参数设置

位宽 (bit)	深度	占用资源 (bit)
----------	----	------------

163	32	4736
-----	----	------

B.4.2.2. 硬件地址

在 TSE 中需要 TSN 控制器配置/读取的映射表硬件地址如表 B-7 所示，表中的数值均采用十进制表示。

表 B-7 映射表地址

模块	名称	硬件地址					说明
		对象 [31]	固定 标识 [30]	HCP/TSS/ TSE 标识 [29:26]	模块 标识 [25:19]	模块 地址 [18:0]	
帧映射 与分派 (FRM)	映射表 基地址	1	1	0	33	0-255	映射表表项为 32，每个映射 表表项为连续 的 8 个地址

B.4.3. 逆映射表（0x61180000~0x6118003f）

B.4.3.1. 含义

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，表项数量为 32 条，表项内容为 12bit 的 FlowID、48bit 的 DMAC，逆映射表的描述详见表 B-8。

表 B-8 逆映射表格式

索引地址	字段	位置	描述
1.从地址 8'd0 到 8'd31 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； 2.原则上逆映射表深度可以设置为 4K，目前考虑实现和查表延时，逆映射表的深度为 32，	FlowID	[59:48]	流标识
	DMAC	[47:0]	报文真实目的 MAC 地址

帧逆映射模块采用 RAM 来缓存逆映射表，RAM 参数如表 B-9 所示。

表 B-9 缓存逆映射表的 RAM 参数设置

位宽	深度	占用资源（bit）
60bit	32	1920bit

B.4.3.2. 硬件地址

在 TSE 中需要 TSN 控制器配置/读取的逆映射表硬件地址如表 B-10 所示，表中的数值均采用十进制表示。

表 B-10 逆映射表地址

模块	名称	硬件地址					说明
		对象 [31]	固定 标识 [30]	HCP/TSS/ TSE 标识 [29:26]	模块 标识 [25:19]	模块 地址 [18:0]	
帧逆 映射 (FIM)	逆映射 表	1	1	0	35	0-63	逆映射表最多支持 32 条表项，每个表 项占用连续的 2 个 地址

B.4.4. 注入时刻表（0x61100000~0x611003ff）

B.4.4.1. 含义

注入时刻表的表项数目为 1024，每条表项的描述如表 B-13 所示。

表 B-13 注入时刻表描述

名称	位置	位宽	字段	含义	备注
注入 时刻 表	[15]	1	Valid	表项有效位	表项深度为 1024 ，对应当 前所支持的时 间槽数量
	[14:5]	10	send_slot	发送时间槽	
	[4:0]	5	dbufid	描述符缓存 ID	

采用 RAM 来缓存注入时刻列表，该 RAM 参数设置如表 B-14 所示。

表 B-14 缓存门控列表的 RAM 参数设置

位宽	深度	占用资源
16bit	1024	16Kbit

B.4.4.2. 硬件地址

在 TSE 中需要 TSN 控制器配置/读取的门控列表硬件地址如表 B-15 所示，表中的数值均采用十进制表示。

表 B-15 门控列表地址

模块	名称	硬件地址					说明
		对象 [31]	固定 标识 [30]	HCP/TSS/ TSE 标识 [29:26]	模块 标识 [25:19]	模块 地址 [18:0]	
注入延时 控制	注入 时刻 表	1	1	0	34	0-1023	注入时刻表最 大支持 1024 条 表项

B.4.5. 门控列表（6060_0000h-6060_03ffh）

TSN 网卡为了实现 802.1Qbv 调度模型，在网络交换输出接口设计一个门控列表，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
QGC	6060_0 000h-6 060_03 ffh	gate_table_en try	[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

硬件地址	名称	位置	描述
		[4]	第 4 个队列的门控状态，其中 0 表示门控关闭，1 表示门控开启
		[3]	第 3 个队列的门控状态，其中 0 表示门控关闭，1 表示门控开启
		[2]	第 2 个队列的门控状态，其中 0 表示门控关闭，1 表示门控开启
		[1]	第 1 个队列的门控状态，其中 0 表示门控关闭，1 表示门控开启
		[0]	第 0 个队列的门控状态，其中 0 表示门控关闭，1 表示门控开启

队列门控模块采用 RAM 来缓存门控列表，RAM 位宽为 8bit，深度为 1024，该 RAM 格式如表 B-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 (0xff01)				类型 (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 配置/读取数据			
第一个寄存器/表项 配置/读取数据				第二个寄存器/表项 配置/读取数据			
...							
第n个寄存器/表项 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。 ①地址分配：地址分配（0x01）。 ②网络管理：读请求（0x01）；写请求（0x02）；读响应（0x03）。 ③隧道：隧道解封装（0x01）；隧道封装（0x02）。 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 bit	名称	说明
[65:64]	2	Opcode	操作，该字段编码如下 2'h0: 写操作 2'h1: 保留 2'h2: 读操作 2'h3: 读响应
[63:62]	2	addr_space	地址空间，该字段编码如下 00: HCP 内部空间 01: TSS 的空间 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 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 2'h0: 写操作 2'h1: 保留 2'h2: 读操作 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
valid	1	传给	读出的寄存器/表项的有效信号,高有效

名称	位宽	方向	说明
module_addr	19	第二 层级 Mbus 处理 模块	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。

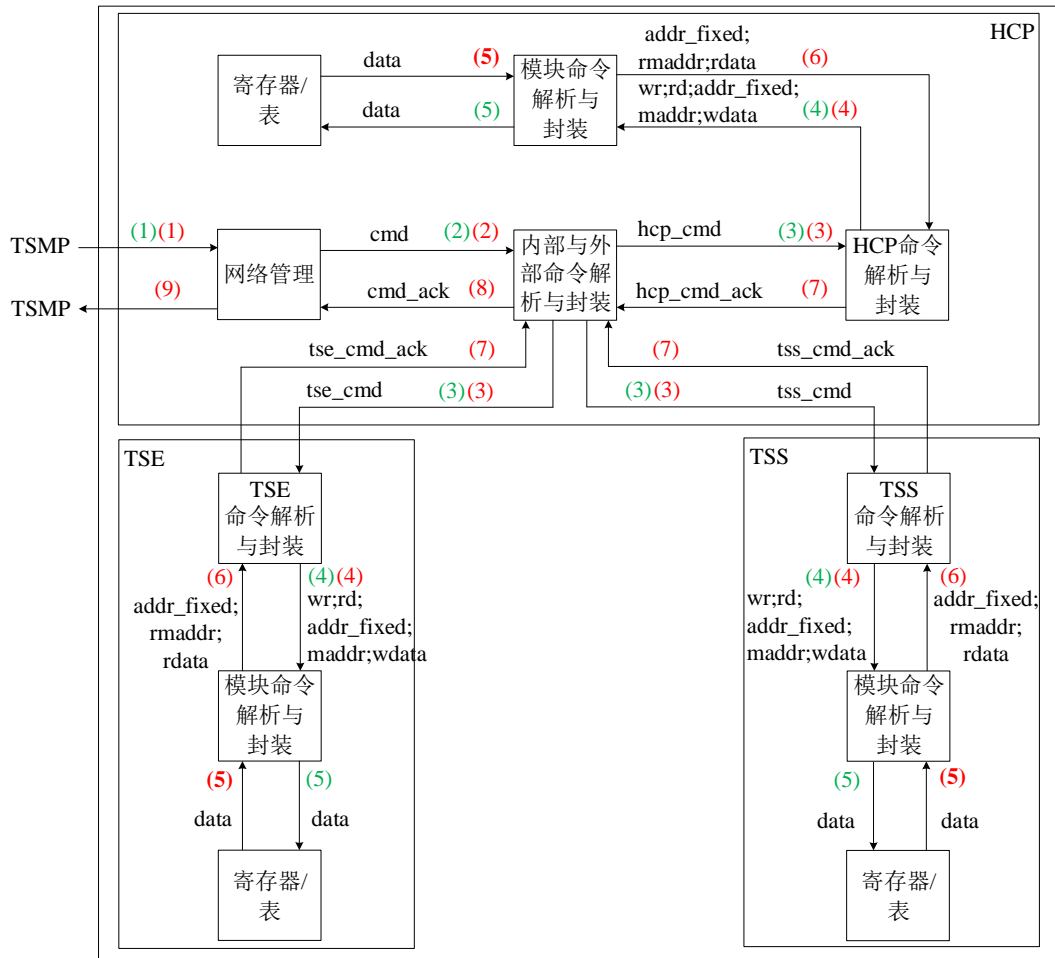


图 E-1 TSN 交换机/TSN 网卡读写过程

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 B.4.5，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 `rmaddr` 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 `rmaddr` 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 `rmaddr` 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 `rmaddr` 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 `rmaddr`、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 相关	消息 类型	保留	版本
长度	域号	保留	标志域	修正域			保留			
保留	源端口 标识符		源端口标识符			序列号	控制域		时间间隔	
时间戳 (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。
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. IP 分片说明

在 IP 首部有 4 个字节是用于分片的，前 16 位是 IP 数据包的标识 identification，同一个数据包的各个分片的标识是一样的，目的端会根据这个标识来判断 IP 分片是否属于同一个 IP 数据报；中间 3bit 为是标志位，其中 1bit 的 dont_fragment 用来表示 IP 报文能否分片，如果该 IP 报文不能分片，该标志位为 1'b1，否则为 1'b0，另外 1bit 的 more_fragment 用来表示是否有更多的分片，如果是最后一个分片，该标志位为 0，否则为 1；后面 13 位的 frag_offset 用来表示分片在原始数据的偏移，这里的原始数据是 IP 层收到的传输的 TCP 或 UDP 数据，不包含 IP 首部。

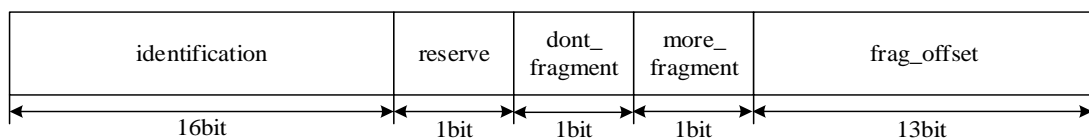


图 G-1 IP 首部中分片相关字段格式

OpenTSN