

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200738

# 电力系统 SDH 网络非对称路径 PTP 对时策略

赵忠明, 韩亮, 胡炯, 王华

(北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100084)

**摘要:** 为了解决电力系统 SDH 通信链路延时非对称性引起的 PTP 网络对时精度较差的问题, 根据 SDH 网络的特征以及 IEEE1588 对时标准, 介绍了 SDH 网络如何选择合适的 PTP 对时模式, 提出一种新的非对称路径下 PTP 路径延时补偿策略。根据该策略, 并相应研发了一套对时装置, 给出了应用方案。进行三天拷机测试, 对时精度  $1 \mu\text{s}$  以内。测试结果证明, SDH 网络通信路径不对称延时补偿之后, PTP 对时精度提高很多, 满足智能变电站设备对时要求。

**关键词:** SDH 网络; PTP; IEEE1588; 网络时间同步; 非对称路径; 路径延时

## PTP strategy for asymmetric path in the SDH network of a power system

ZHAO Zhongming, HAN Liang, HU Jiong, WANG Hua

(Beijing Sifang Automation Corporation Limited, Beijing 100084, China)

**Abstract:** There is a problem of poor timing accuracy on a PTP network caused by the asymmetry of SDH communication delay in a power system. Adopting the characteristics of an SDH network and the IEC-61588 standard, this paper introduces a method to choose the appropriate PTP time synchronization mode for the SDH network, and presents a new PTP path delay compensation strategy for asymmetric paths. Using this strategy gives the application scheme with the PTP clock devices. After a three-day test, the time synchronization accuracy is within  $1 \mu\text{s}$ . As is shown in the test results, the PTP timing accuracy on PTP network is much improved, and meets the time synchronization requirements for an intelligent substation.

This work is supported by the National Social Sciences Foundation of China “Research on Bi-punishment Quantile Regression Modeling Method for High-dimensional Complex Panel Data” (No. 17BJY210).

**Key words:** SDH network; PTP; IEEE1588; network time synchronization; asymmetric path; path delay

## 0 引言

同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy, SDH)是一种可靠、先进、经济的光纤通信技术, 该技术在电力系统通信网络中已经得到了广泛的应用。随着智能电网的飞速发展, 电力系统通信网也加快了建设的步伐, 电网的规模也越来越大, 电网管理的自动化水平也不断提高, 接入电力系统 SDH 网络中需要高精度对时的变电站或现场设备也不断增多。电网中各个设备上送数据所携带时间戳的准确性, 直接影响电力自动化系统的信息品质。电力设备高精度时间同步, 对智能电网信息化、数字化

管理有重要作用。对于某些电力子系统, 如同步向量系统<sup>[1]</sup>、广域保护<sup>[2]</sup>, 高精度时间同步更为重要。智能变电站传统的对时方案是现场配置与北斗或 GPS 系统进行卫星对时的时钟同步装置, 此方案对时成本较高; 在卫星信号较弱或者地面下隧道中没有卫星的环境下, 会发生对时不可靠或对时失败。

PTP(Precision Time Protocol)是时间精度最高的一种网络对时协议, 对应的国际标准为 IEEE1588(IEC-61588), 因此又称 IEEE1588 精确时钟同步协议, 也是目前国内外一种成熟的网络对时技术, 具有成本低、精度高、距离远等特点<sup>[3]</sup>。但是电力系统 SDH 网络往返通信的路径延时是非对称的, 在这种情况下, PTP 对时精度较差, 而且对时不稳定。为了解决 SDH 网络非对称路径导致的 PTP 对时精度问题<sup>[4]</sup>, 下文提出一种 PTP 路径延时

**基金项目:** 国家社科基金项目资助“高维复杂面板数据的双惩罚分位回归建模方法研究”(17BJY210)

测量方法和非对称路径延时补偿方法,改进对时策略。根据该策略研发了一套 PTP 时间同步装置,并提供 IEC61850 MMS 接口和 ICD 模型,参与智能变电站统一通信建模<sup>[5-6]</sup>,将时间同步装置状态接入自动化监控系统。并按照工程应用环境,提供两种应用方案,搭建测试环境,进行测试验证。

## 1 SDH 网络特征

SDH 光纤通信网是一种将复接、线路传输及交换功能融为一体,并由统一网管系统操作的综合信息传送网络,是美国贝尔通信技术研究所提出来的同步光网络(SONET)。SDH 技术实现了网络有效管理、实时业务监控、动态网络维护、不同厂商设备间的互通等多项功能,能大大提高网络资源利用率、降低管理及维护费用<sup>[7]</sup>。

SDH 网络最大的两个显著特征:自愈机制<sup>[7]</sup>、同步机制。自愈机制就是 SDH 网络中某一节点故障时,SDH 在无需人为干扰的情况下,依靠自身的恢复机制和路由选择能力,在很短的时间内恢复正常通信。同步机制指 SDH 通信系统中,各个网络节点进行数据传输和交换时具有趋于相同的时钟频率和相位,从而保证数据传输的有效性和时间稳定性。

SDH 网络的一个隐含特点是“非对称路径”<sup>[8]</sup>。在通信过程中,SDH 网络中数据往返的通信线路差异、数据量的大小等不同,将导致数据往返的路径延时(即通信链路上消耗的时间)不对称,往返路径延时相差较大,即为“非对称路径”。“非对称路径”对数据通信业务没有任何影响,但对网络对时的精度影响非常大。

## 2 电力系统 SDH 网络对时协议的选择

网络对时协议<sup>[9]</sup>主要有两种:简单网络时间协议(SNTP)和精确时间协议(PTP)。SNTP 对时的精度约为 10 ms,PTP 的对时精度为亚微秒级<sup>[10-11]</sup>,约为 1 μs。根据电力系统设备对时要求,显然采用高精度网络对时协议 PTP 更合适<sup>[12]</sup>。

PTP 对时协议分为一步法和两步法、端到端延时模式(E2E)和对等延时模式(P2P)。

一步法要求设备在发送数据的同时能将高精度的发送时标  $t_1$  放入数据包中,对硬件要求比较高。两步法则发送数据时记录发送时间  $t_1$ ,然后采用 Follow\_Up 报文,将  $t_1$  发给对方,两步法更容易实现,而且时标  $t_1$  更准确,对时精度也会更高。

端到端延时模式(E2E)只需要两个对时设备之间通过乒乓通信测量路径延时,而对等延时模式(P2P)需要两个对时设备之间经过的所有设备(SDH

设备或交换机)都具备透明时钟<sup>[13]</sup>的功能,目前的 SDH 设备不支持 IEEE1588 标准,不能作为透明时钟。

因此,SDH 网络推荐采用 PTP 对时协议,且采用两步法、端到端延时模式(E2E)。

## 3 SDH 网络非对称路径 PTP 对时设计方案

采用网络对时协议的前提是进行时间同步的两个设备之间的网络通信延时相对确定。电力系统中,电力装置通过 E1 链路接入 SDH 网络,PTP 对时的通信线路由 E1 链路和 SDH 网络组成,而 E1 链路的通信延时是确定的,因此,SDH 网络通信延时相对确定后,才能采用 PTP 对时方案。当 SDH 网络频率同步时,各个网络节点进行数据传输和交换时具有趋于相同的时钟频率和相位,PTP 对时报文具有相对确定的路径延时,再重点研究非对称路径下的链路延时非对称差值的测量方法,根据非对称差值进行路径补偿<sup>[14-15]</sup>,最后根据 PTP 对时机制,可实现网络高精度对时<sup>[16]</sup>。

因此,进行 PTP 对时之前,先保证 SDH 网络频率同步<sup>[17-18]</sup>,确保同步机制有效。

### 3.1 非对称路径 PTP 对时算法

本方案采用二步法、端到端延时模式(E2E)实现 PTP 对时算法。E2E 对时模式的前提是“路径对称”。在“非对称路径”情况下,需要调整 PTP 对时算法。PTP 两步法 E2E 对时模型见图 1。

$t_1$ : PTP 主时钟发送 Sync 报文的时间戳,通过 Follow\_Up 报文随后发回给从时钟。

$t'_1$ : PTP 主时钟发送 Sync 报文的时刻,假设此时从时钟的时间戳。

$t_2$ : PTP 从时钟接收 Sync 报文的时间戳。

$t_3$ : PTP 从时钟发送 Delay\_Req 报文的时间戳。

$t'_3$ : PTP 从时钟发送 Delay\_Req 报文的时刻,假设此时主时钟的时间戳。

$t_4$ : PTP 主时钟接收 Delay\_Req 报文的时间戳,通过 Delay\_Resp 报文发回给从时钟。

$T_{ms}$ : 主时钟发报文到从时钟的路径延时(路径延时,即通信链路上消耗的时间)。

$T_{sm}$ : 从时钟发报文到主时钟的路径延时。

根据图 1 PTP 两步法 E2E 对时模型:

$$t'_1 - t_1 = t_2 - (t_1 + T_{ms}) \quad (1)$$

$$t_3 - t'_3 = (t_3 + T_{sm}) - t_4 \quad (2)$$

从时钟相对主时钟的时间偏差为

$$offset = t'_1 - t_1 = t_3 - t'_3 \quad (3)$$

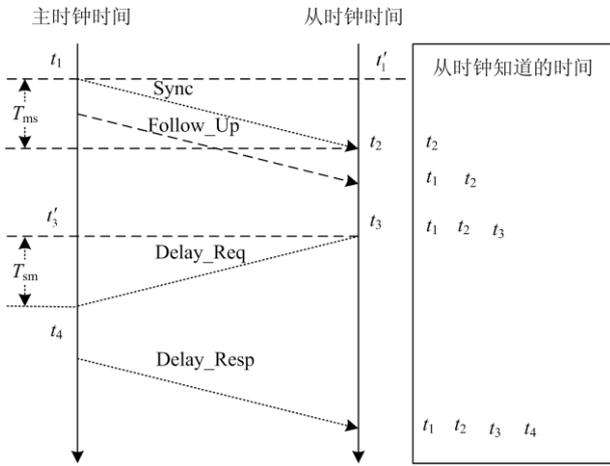


图 1 PTP 两步法 E2E 对时模型

Fig. 1 Two step and E2E time synchronization model

根据 IEEE1588 PTP 国际标准，从时钟相对主时钟的时间偏差等于  $(t_2 - t_1)$ ，减去路径延时平均值，再减去 Sync 报文的 CorrectionField。由此公式可知，主钟到从钟的路径延时对 PTP 对时精度影响更大。因此，优先应选择主时钟到从时钟的路径延时  $T_{ms}$  为路径延时的参考基准，从时钟到主时钟的路径延时加上“路径不对称差值(补偿值)”后，再按照 PTP 对时原理计算平均路径延时和从时钟相对主时钟的时间偏差。

路径延时不对称的情况下， $T_{sm}$  与参考基准  $T_{ms}$  不相等，则定义如下。

路径延时的非对称差值(补偿值)为

$$Diff = T_{ms} - T_{sm} \quad (4)$$

主机到从机的路径延时(参考基准)为

$$delay = T_{ms} = T_{sm} + Diff \quad (5)$$

将式(2)一式(4)代入到式(1)中，解方程可得

$$offset = (t_2 - t_1) / 2 + (t_3 - t_4 - Diff) / 2 \quad (6)$$

$$delay = (t_2 - t_1) / 2 + (t_4 - t_3 + Diff) / 2 \quad (7)$$

从时钟校正后的时间(等于主时钟时间)为

$$t_1 = t'_1 - offset \quad (8)$$

式(6)一式(8)中  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  都是已知的，当测出  $Diff$  后，可求出  $offset$ 、 $delay$ ，进而求出从机需要校正的时间  $t_1$ 。

### 3.2 路径非对称路径差值测量方案

为了提高 PTP 对时精度，所有发送和接收时标都是通过物理层 FPGA 接口提供的高精度时标计数值-转化所得的高精度时标，FPGA 频率为 125 MHz，因此时标精度约为 8 ns。

根据非对称路径 PTP 对时算法，测量路径非对称差值  $Diff$  参数，是 PTP 高精度对时的关键，下面给出一种策略，测量  $Diff$  参数，制定对时策略。

路径非对称差值  $Diff$  是通信路径的固有属性，可以在调试阶段，通过测量得出往返的路径延时差值。调试阶段测量  $Diff$  的方法如图 2 所示。

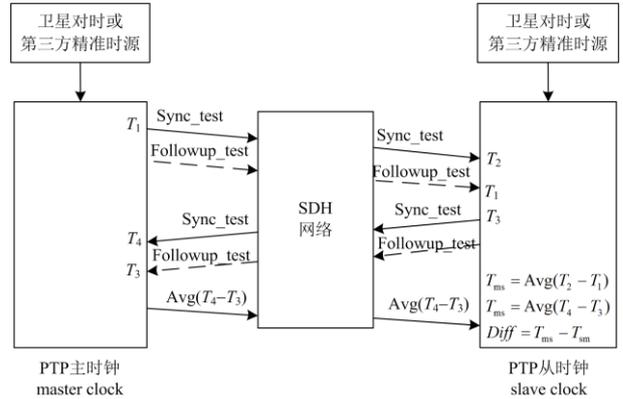


图 2 新增报文测量非对称路径差值(Diff)

Fig. 2 New message measuring the asymmetric path difference ( $Diff$ )

根据图 2，测量和计算路径延时的非对称差值  $Diff$  的方法如下：

$$T_{ms} = Avg(T_2 - T_1) \quad (9)$$

$$T_{sm} = Avg(T_4 - T_3) \quad (10)$$

$$Diff = T_{ms} - T_{sm} \quad (11)$$

PTP 两步法 E2E 模式下的对时报文有 Announce、Sync、Followup、DelayReq、DelayResp。为了实现路径延时非对称差值测量功能，主要增加了 Sync\_test、Followup\_test 报文，为了方便 PTP 主钟和从钟的数据交互，增加测试启动报文 Diff\_Test\_Start、Diff\_Result 报文，分别用于启动路径延时差值测试和发送路径延时测试结果。新增报文与原来 PTP 报文都是从通信链路物理层取高精度时标，但是时标获取方法不一样。原来 PTP 报文从 PTP 时间同步系统中取时标，而路径延时测量报文从本地时钟体系取时标，即 PTP 对时未成功且未作为基准时钟时，路径延时测量报文的时标为第三方标准时间源的时标，从而确保路径延时测量的准确性。

在 SDH 网络通信稳定后，路径非对称差值  $Diff$  也趋于稳定，PTP 协议正常运行，此时 PTP 从机对时成功，可以向现场设备提供 B 码对时信号，PTP 对时报文通信如图 3 所示。

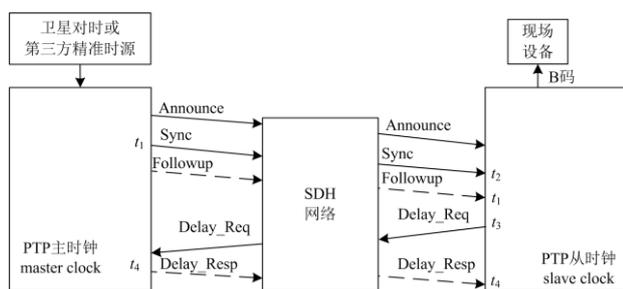


图 3 PTP 通信报文

Fig. 3 PTP communication message

### 3.3 PTP 运行时路径延时突变应对策略

PTP 协议正常运行后, PTP 从时钟保持高精度对时时钟体系运转。在 SDH 网络正常通信的情况下, PTP 对时报文的线路传输时延趋于稳定<sup>[19-20]</sup>。但是如果网络出现大的变化, 如网络故障引起路由变化, 可能导致路径延时变化, 这时路径延时差值  $Diff$  也可能发生变化。

下面给出一种自动检测路径延时突变的方法和应对策略。

当 PTP 协议正常运行, 从时钟和 PTP 主时钟对时成功后, 可以近似认为

$$T_{ms} = t_2 - t_1 \quad (12)$$

$$T_{sm} = t_4 - t_3 \quad (13)$$

$$Diff = T_{ms} - T_{sm} \quad (14)$$

程序运行中, 对  $T_{ms}$ 、 $T_{sm}$  异常路径延时进行滤波的同时进行路径延时突变检测, 发现突变后, PTP 从时钟进入“守时状态”, 并且依然正常进行 Announce、Sync、Followup、DelayReq、DelayResp 报文交互, 测量突变后的  $T_{ms}$ 、 $T_{sm}$ 、 $Diff$  值, 然后调整  $Diff$  值, 进入新的对时运行状态。

## 4 PTP 时钟同步装置设计

### 4.1 时钟同步装置设计方案

时间同步装置采用标准 4U 机箱, 符合国家电网“四统一”相关标准, 装置功能及性能遵照中国电力科学研究院的《具备监测功能的时钟同步检测方案》和《Q\_CSG 1203023-2017 南方电网数字及时间同步系统技术规范》执行, 且已经通过国家电网和南方电网的时钟检测认证。

装置输入基准信号包括: GPS 卫星信号、北斗二代卫星信号、IRIG-B 码、PTP(IEC-61588); 输出授时信号包括: IRIG-B 码信号、脉冲信号、串口报文信号、SNTP 报文、PTP 报文。主 CPU 插件与信号接收插件组合配置, 信号接收插件通过组件方式同时装配 GPS、北斗信号组件或选配其一; 装置配

置用于人机操作的 MMI 显示面板。

时钟同步装置机箱背面示意图如图 4 所示。

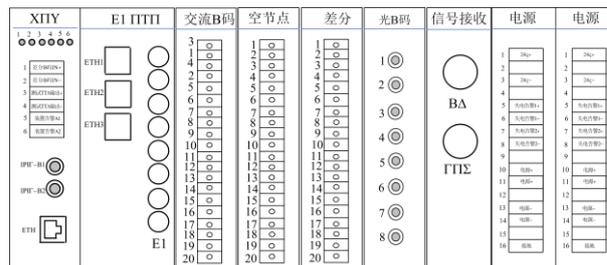


图 4 时钟同步装置硬件设计

Fig. 4 Hardware design for time synchronization device

主 CPU 插件可配置 2 路光纤 IRIG-B 码输入接口、6 针信号端子、1 个电以太网调试网口。6 针信号端子包括 1 组差分 IRIG-B 码接收、1 组 TTL 类型测试信号输出、1 组常开告警节点; 电以太网口用于人机配置工具。

输出信号单插件类型包括: ST 光纤(4 路/8 路)、空节点(10 路)、差分/串口报文/TTL(10 路)、交流 B 码、SNTP、以太网 PTP 报文、E1 链路 PTP 报文。装置支持双电源配置方式。

本装置设计了两种 PTP 对时插件: 一种基于以太网的 PTP 对时网络通信插件, 一种是基于 E1 链路的 PTP 对时插件, 又称“E1 PTP 对时插件”, 是本文介绍的重点。

装置正面为液晶显示面板 MMI, 方便用户配置参数和查看运行状态。装置也提供调试网口和配置工具, 方便用户通过电脑进行配置, 查看日志, 查看运行状态。装置提供了 104 规约, 兼容老的变电站改造应用, 也提供了 61850 MMS 规约和 ICD 模型, 可参与通信建模, 方便接入智能变电站监控系统, 实时监测装置的运行状态。

装置内硬件之间的逻辑关系如图 5 所示。

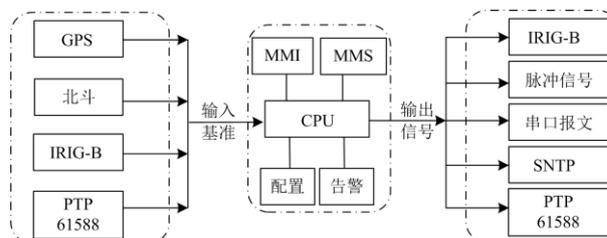


图 5 装置内硬件之间的逻辑关系

Fig. 5 Logical relationship between hardware modules

### 4.2 E1 链路 PTP 对时插件软件设计

时钟同步装置 E1 链路 PTP 对时插件软件主要功能如下:

- 1) PTP 参数配置功能
- 2) E1 链路数据收发功能
- 3) 收发数据 FPGA 计数转换纳秒级时标
- 4) 最佳主钟选择算法
- 5) PTP 高精度时钟运转功能
- 6) PTP 主钟运行逻辑
- 7) PTP 从钟运行逻辑
- 8) PTP 守时算法
- 9) 路径延时非对称差值测量算法
- 10) PTP 对时偏差统计分析及改进算法
- 11) 闰秒处理功能

E1 链路 PTP 对时插件主要的数据流设计如图 6 所示。

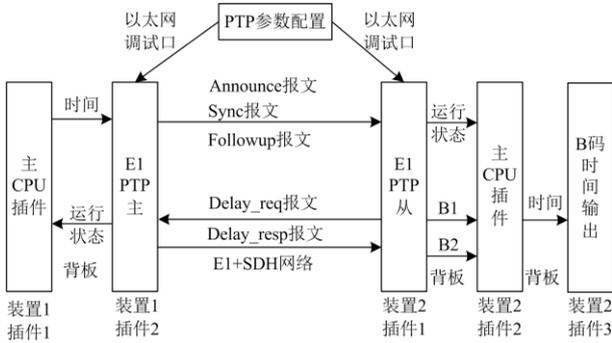


图 6 E1 PTP 插件数据流设计  
Fig. 6 PTP module data stream design

图 6 中，E1 链路 PTP 对时插件通过参数配置可分别作为 PTP 主钟和从钟；左边 E1 链路 PTP 插件配置为主钟，接收主 CPU 插件的时间，并将自己的运行状态及诊断信息实时传给主 CPU 插件；左边 PTP 插件通过 E1 链路接入 SDH 网络，在远方另一端，再通过 E1 链路连接另一台时钟同步装置的 E1-PTP 插件；右边 E1-PTP 插件通过 PTP 对时成功后，通过背板的 B 码通道，将高精度时间给右边的主 CPU 插件，然后由主 CPU 插件将时间发送给其他各种输出插件，如电 B 码、光 B 码、串口报文等。

E1+SDH 网络中 PTP 对时方案中，关键做好路径非对称差值的测量和补偿。

在 IEEE1588 PTP 标准中，只规定了 PTP 对时报文及基本的对时算法。为了进一步提高 PTP 对时精度和对时稳定性，本方案对路径延时计算结果建立数学模型，进行统计分析，改进对时偏差校正算法。

首先，路径延时按照 IEC-61588 标准计算出来后，如果立即进行对时偏差计算，会导致对时偏差曲线抖动幅度较大。本方案改进为：启动 PTP 算法前，先测量路径非对称差值，并进行补偿；然后启

动 PTP 对时逻辑，在前 1 min 内进行路径延时统计分析，去掉最大值和最小值，反复计算平均值，并反复迭代，根据平均值过滤不合理的路径延时值，最终统计分析出最佳平均值，在第一次算出路径延时平均值后，才进入时间偏差计算算法，然后进行滑动统计，过滤掉不合理的路径延时值，持续更新路径延时平均值，并持续检测路径延时是否出现突变抖动，是否需要重新进入路径非对称差值测量算法。当进入路径非对称差值测量状态时，本地 PTP 从时钟，将结合 FPGA 高精度计数器，进入守时算法。守时性能：在 1 h 内，时钟运转偏差远小于 1 μs。

第二，对时偏差计算算法改进。路径延时平均值计算出来后，下一秒开始计算对时偏差，对前几秒的对时偏差进行统计分析，求出最佳对时偏差，然后纠正本地时间；接下来采用滑动统计算法，不断纠正本地时间，同时过滤掉抖动较大的对时偏差计算值。

在 PTP 对时过程中，路径延时测量准确了，对时偏差才能计算更准确。路径延时波动的同时，计算出来的路径偏差也会抖动，两种相互影响，逐步收敛，从而提高对时精度。

### 5 电力系统 E1+SDH 网络 PTP 对时应用方案

根据电力系统现场应用环境的不同，本文推荐两种应用方案。

天地互备方案：在有卫星信号，但是卫星信号可能不稳的情况，采用卫星对时和 SDH 网络 PTP 对时热备对时方案。

PTP 双冗余对时方案：在没有卫星信号的应用环境下，可采用两路 E1+SDH 网络热备对时方案。

#### 5.1 天地互备方案

天地互备方案如图 7 所示。本应用方案中，右侧从时钟同时配置了卫星信号处理插件，进行北斗/GPS 卫星对时，同时配置了 E1 PTP 插件，与远方的主时钟通过 SDH 网络进行 PTP 对时，两种对时信号热备冗余。

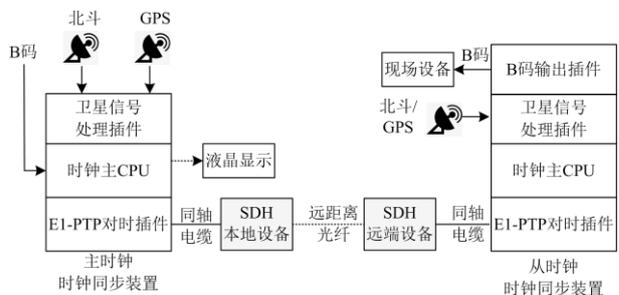


图 7 SDH 网络 PTP 应用方案一  
Fig. 7 First PTP solution in SDH network

主时钟配置卫星对时信号接收插件,主 CPU 对时成功后,通过 E1-PTP 对时插件,将时间信息通过 E1 电路发给同轴电缆,传递给 SDH 网络,从钟同样通过 E1-PTP 对时插件处理 E1 电路上的 PTP 对时报文,实现 PTP 时间同步,将时间传递给从时钟主 CPU,主 CPU 通过 B 码输出插件,向现场设备或测试仪提供对时信号。

在调试阶段,先将卫星对时接入从时钟主 CPU,作为基准时源。将经过 SDH 网络的 PTP 对时信号作为从时钟的第二时源,当两路输入时源都对时成功后,从时钟液晶上显示的通道差值,即为 PTP 时源与基准时源的精度偏差,在路径不对称的情况下,精度偏差较大,需要测量路径延时和不对称差值  $D_{diff}$ 。将不对称差值  $D_{diff}$  补偿在  $T_{sm}$  路径上,使精度缩小到 1 000 ns 以内。进行拷机测试三天以上,PTP 对时最大精度偏差 676 ns,平均精度 390 ns。

### 5.2 PTP 双冗余对时方案

PTP 双冗余对时方案中,从时钟配置双路 PTP。本次设计研发的 E1 PTP 对时插件上可同时提供四路 PTP 主时钟 E1 接口和两路 PTP 从时钟 E1 接口。因此主时钟和从时钟,都只需要配置一块 E1 PTP 对时插件可实现 PTP 双路冗余对时方案。

本方案应用如图 8 所示,主时钟采用双冗余配置,E1 链路也采用双冗余配置,从而进一步提高对时的可靠性。

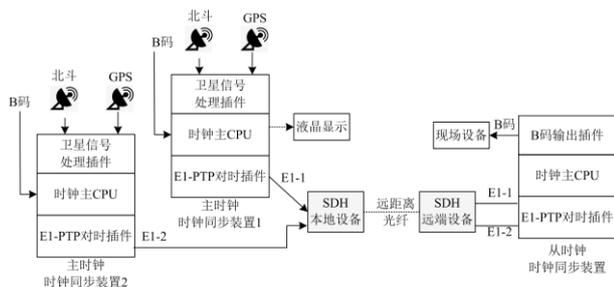


图 8 SDH 网络 PTP 应用方案二

Fig. 8 Second PTP solution in SDH network

## 6 E1+SDH 网络 PTP 对时测试结果

根据第 5 节的应用方案,搭建类似工程现场 E1+SDH 网络的测试环境,制定相应的测试方案,主要测试 E1+SDH 网络路径不补偿的 PTP 对时精度、路径延时参数、统计分析路径延时补偿值、测量补偿前后的 PTP 对时精度。

测试方案采用 2 台 PTP 主时钟和 4 台 PTP 从时钟,每台主钟分别对两台从时钟进行对时,测试环境网络架构如图 9 所示。

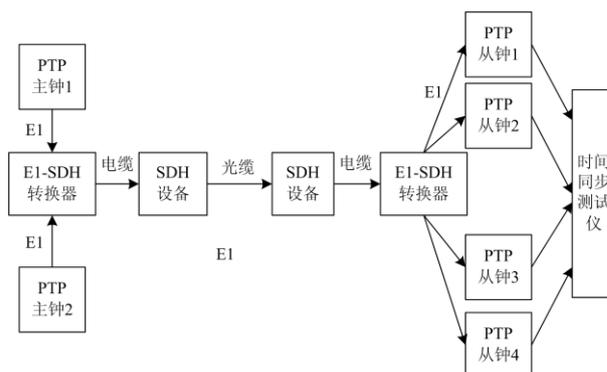


图 9 SDH 网络 PTP 对时测试

Fig. 9 PTP test in SDH network

路径参数测量 3 天,每秒测一次,共测 259 200 次,测量统计结果如表 1、表 2 所示(单位, ns),M 表示主钟,S 表示从钟。

表 1 主钟到从钟的路径延时

Table 1 Path delay from master clock to slave clock

延时测试	主钟到从钟的 SDH 路径延时		
	最大值	最小值	平均值
M1-S1	2 047 255	2 047 095	2 047 172
M1-S2	2 047 203	2 047 098	2 047 160
M2-S3	2 047 483	2 047 386	2 047 437
M2-S4	2 047 516	2 047 268	2 047 373

表 2 从钟到主钟的路径延时

Table 2 Path delay from slave clock to master clock

延时测试	从钟到主钟的 SDH 路径延时		
	最大值	最小值	平均值
S1-M1	2 039 213	2 039 125	2 039 163
S2-M1	2 039 085	2 038 997	2 039 033
S3-M2	2 038 994	2 038 906	2 038 936
S4-M2	2 038 991	2 038 951	2 038 975

经过三天以上的测试验证,每秒做一次测试记录,累计二十多万次的测试数据,对路径延时补偿前后的对时精度,统计分析如表 3 所示。

表 3 补偿前后各 72 h 对时精度对比

Table 3 Time synchronization accuracy of 72 hours before and after path delay compensation

精度测试	补偿前对时精度/ns	补偿值/ns	补偿后对时精度/ns
M1-S1	4 024	8 047	350
M1-S2	4 190	8 163	430
M2-S3	4 307	8 531	450
M2-S4	4 290	8 422	380

表 3 测试数据表明:SDH 网络 PTP 对时策略中,进行非对称路径补偿后,对时精度有了大幅提高,

从 4  $\mu\text{s}$  级别可提高到小于 1  $\mu\text{s}$  的精度水平。

## 7 结语

对于卫星信号弱的地区、地面下或隧道中没有卫星信号的变电站<sup>[21]</sup>, PTP 网络对时将是实现低成本、高精度、远距离对时的最佳选择<sup>[22-23]</sup>。随着 SDH 设备及通信技术的提升, SDH 通信链路将更加稳定可靠, PTP 高精度网络对时将可能在更多领域替换“北斗/GPS”卫星对时方案<sup>[24-25]</sup>, 或者作为传统卫星对时方案中一种最佳的天地互备、热备冗余方案。

综上所述, 该方案提出的路径延时测量方法、非对称路径延时补偿及 PTP 对时策略可作为 SDH 网络或其他非对称路径网络对时的一种很好的参考方案。

## 参考文献

- [1] HUANG C, LI F, ZHOU D, et al. Data quality issues for synchrophasor applications part I: a review[J]. *Modern Power System and Clean Energy*, 2016, 4(3): 342-352.
- [2] Bo Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [3] 张鹏平. 基于 IEEE1588 协议的智能配电网高精度时间同步系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.  
ZHANG Pengping. Research on high precision time synchronization system of smart grid based on IEEE1588 protocol[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [4] 梅军, 徐迅, 钱超, 等. 应用于配电网的时钟偏移估计的 IEEE 1588 改进方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(9): 83-89.  
MEI Jun, XU Xun, QIAN Chao, et al. An improved IEEE 1588 synchronization scheme on the clock offset estimation applied in distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(9): 83-89.
- [5] 戴观权, 蔡泽祥, 蔡煜, 等. 基于 IEC 61850 的配电网网络化保护通信建模与实时性可靠性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(20): 97-103.  
DAI Guanquan, CAI Zexiang, CAI Yu, et al. Modeling and real-time reliability analysis of communication network for networked protection of distribution network based on IEC 61850[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(20): 97-103.
- [6] 席禹, 陈波, 郭晓斌, 等. 基于 IEC61850 配电系统自动化可靠性评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(16): 129-135.  
XI Yu, CHEN Bo, GUO Xiaobin, et al. Reliability assessment of distribution automation based on IEC61850[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(16): 129-135.
- [7] 温亦浔, 马静. 数字同步网统一建模的区域电网数据同步策略[J]. *浙江电力*, 2019, 38(1): 86-91.  
WEN Yixun, MA Jing. Data synchronization strategy of regional power grid based on unified modeling of digital synchronous network[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(1): 86-91.
- [8] 张武洋, 赵振宇, 于同伟. 基于 SDH 通道的 PTP 同步对时研究[J]. *东北电力技术*, 2011, 32(1): 37-38.  
ZHANG Wuyang, ZHAO Zhenyu, YU Tongwei. Study on PTP time synchronization based on SDH channel[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2011, 32(1): 37-38.
- [9] 钱超. 基于 IEEE 1588 同步技术的配电网时间同步系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
QIAN Chao. Research on time synchronization system of distribution network based on IEEE 1588 synchronization technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [10] 吕雅婧, 滕玲, 邢亚, 等. 北斗卫星导航系统在电力行业的应用现状[J]. *电力信息与通信技术*, 2019, 17(8): 70-74.  
LÜ Yajing, TENG Ling, XING Ya, et al. Application status of beidou satellite navigation system in power industry[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2019, 17(8): 70-74.
- [11] 闫生超, 李金. 基于 TMU 及 IEC61850 的电力时间同步综合监测系统研究及应用[J]. *电力信息与通信技术*, 2020, 18(5): 35-40.  
YAN Shengchao, LI Jin. Research and application of integrated monitoring system of power time synchronization based on TMU and IEC61850[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2020, 18(5): 35-40.
- [12] 贺春, 陈光华, 张道农. IEEE Std 1588-2008 精确时间同步协议行业规范在电力系统的应用研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(17): 133-138.  
HE Chun, CHEN Guanghua, ZHANG Daonong. Research on standard profile for use of IEEE Std 1588-2008 precision time protocol in power system applications[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(17): 133-138.
- [13] 潘丁, 谢梦雪, 王志立, 等. IEEE1588 协议在智能变电站应用的模型分析及测试研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(19): 140-146.  
PAN Ding, XIE Mengxue, WANG Zhili, et al. Model analysis and testing of IEEE1588 protocol applied in smart substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(19): 140-146.

- 2013, 41(19): 140-146.
- [14] 陈蕾, 章毅, 黄红兵. 基于 SDH 传送 PTP 协议实现全网时间同步系统[C] // 中国电机工程学会电力通信专业委员会学术会议, 2013 年 1 月 1 日, 中国, 长沙: 681-686.  
CHEN Lei, ZHANG Yi, HUANG Hongbing. Realization of time synchronization system of whole network based on SDH transmitting PTP protocol[C] // Chinese Society for Electrical Engineering Professional Committee of Electric Power Communication Academic Conference, January 1, 2013, Changsha, China: 681-686.
- [15] 管晓权. 一种基于 SDH-E1 网络实现 PTP 纳秒级精度传输的方法: 中国, CN105119678A[P]. 2015-12-02.  
GUAN Xiaquan. A method of nanosecond transmission of PTP based on SDH-E1 network: China, CN105119678A[P]. 2015-12-02.
- [16] 李红亮. 基于 PTP 协议的高精度网络时间同步系统的设计与实现[D]. 天津: 天津大学, 2012.  
LI Hongliang. Design and implementation of high precision network time synchronization system based on PTP protocol[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [17] 王栋, 竹瑞博, 邱祖雄, 等. 基于 PTP 的高精度频率同步恢复技术研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(10): 144-147, 150.  
WANG Dong, ZHU Ruibo, QIU Zuxiong, et al. Research on high precision frequency synchronous recovery technology based on PTP[J]. Automation & Instrumentation, 2017(10): 144-147, 150.
- [18] 史睿, 周鸿喜, 李皎, 等. 电力时频融合同步网组网与管理研究[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(9): 30-34.  
SHI Rui, ZHOU Hongxi, LI Jiao, et al. Research on networking and management system of power time-frequency fusion synchronous network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(9): 30-34.
- [19] 李中满, 卓越. 基于 SDH 地面链路传送的全网时间同步技术研究[J]. 信息通信, 2014(12): 4-5.  
LI Zhongman, ZHUO Yue. Research on time synchronization technology of whole network based on SDH terrestrial links transmission[J]. Information & Communications, 2014(12): 4-5.
- [20] 吴淑琴, 张道农, 杨玉清, 等. 基于 SDH 地面链路传递高精度时间的应用研究[C] // 2012 年中国电机工程学会年会, 2012.  
WU Shuqin, ZHANG Daonong, YANG Yuqing, et al. The research and application of high-precision timing based on SDH terrestrial link[C] // Chinese Society for Electrical Engineering Annual Meeting, 2012.
- [21] 刘卫华. 基于 SDH 地面链路传输的 PTP 时间同步系统[J]. 山东电力技术, 2010(5): 36-39.  
LIU Weihua. PTP synchronization system based on SDH transmission terrestrial links[J]. Shandong Electric Power, 2010(5): 36-39.
- [22] 王家林, 杨宣访, 刘蕾. 一种改进 IEEE 1588 协议的时钟同步方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(20): 129-133, 140.  
WANG Jialin, YANG Xuanfang, LIU Lei. An improved clock synchronization method based on IEEE 1588 protocol[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(20): 129-133, 140.
- [23] 潘俊涛, 郭小璇, 陈俊, 等. 考虑费控电能表信息安全交互的 IPTP 时钟同步技术[J]. 电测与仪表, 2018, 55(22): 147-152.  
PAN Juntao, GUO Xiaoxuan, CHEN Jun, et al. Time synchronization of cost control electricity meter considering the information security interaction mode[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(22): 147-152.
- [24] 吴春红, 韩伟, 杨海晶, 等. 计及链路传输时延的智能变电站精准时间同步技术[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(4): 34-39.  
WU Chunhong, HAN Wei, YANG Haijing, et al. Research on precise time synchronization technology considering transmission delay for smart substation[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(4): 34-39.
- [25] 南东亮, 王维庆, 任祖怡, 等. 基于 AS6802 的安控测试系统时钟同步技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(5): 1-7, 16.  
NAN Dongliang, WANG Weiqing, REN Zuyi, et al. Research on clock synchronization technology of testing system of security and stability control system based on AS6802 protocol[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(5): 1-7, 16.

收稿日期: 2020-06-28; 修回日期: 2020-10-29

作者简介:

赵忠明(1980—), 男, 硕士, 副高级工程师, 研究方向为电力二次系统; E-mail: zhaozhongming@sf-auto.com

韩亮(1981—), 男, 本科, 中级工程师, 研究方向为电力通信系统; E-mail: hanliang@sf-auto.com

胡炯(1976—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为继电保护装置硬件平台开发。E-mail: hujiong@sf-auto.com

(编辑 许威)