



# IEEE1588 协议在 NT6000 分散控制系统中的应用

陈 闯

(南京科远智慧科技集团股份有限公司,江苏 南京 211102)

**摘 要:**分析目前时间同步技术现状,阐述 IEEE1588 时间同步原理,为了满足分散控制系统对时钟高精度的要求,给出 IEEE1588 在分散控制系统中的应用方案,详细介绍系统中对时的具体实施方法。实践证明,该对时方案精度高、成本低。

**关键词:**IEEE1588;时间同步;PTP;DP83640;NT6000

中图分类号: TP273;TP393.04 文献标识码: B 文章编号: 1671-931X (2019) 06-0099-05

## 一、IEEE1588 协议概述

目前,应用较为广泛的时间同步技术主要有两种:网络时间协议(NTP)和直接连接时间传输。其中,NTP 或者 SNTP 采用软件取时、网络传输的方式,时间同步准确度一般只能达到毫秒级;而直接连接时间传输,最有代表性的就是基于全球定位系统(GPS)接收模块,其精度较高,但实现需要依靠单独的硬接线,而且在分散控制系统中具有使用成本高,布线复杂的局限。

事件顺序记录(SOE)在分散控制系统中占有重要地位,而 SOE 的精度取决于整个分散控制系统的绝对时间准确度。绝对时间的准确度取决于整个系统的对时精度,因此提高系统对时精度才能保证 SOE 的精度,而分散控制系统中 SOE 的精度一般要求 1ms 以内。

2002 年底发布的 IEEE1588 标准(网络化测量和控制系统的精确时钟同步协议,称为 Precision Time Protocol,PTP)在时钟同步方面取得了重大进展,IEEE 1588 标准采用软、硬件结合的方式进行时钟同步,能够达到亚微秒级的同步精度,而且不需要额外的资源,利用现有以太网即可实现对时通讯,网

络协议使用(UDP/IP)多播报文协议,非常适合在分散控制系统中使用。2008 年发布的 IEEE1588 V2 版本和 V1 版本相比,不仅报文长度有所精简、报文类型也有所增加,解决了 V1 版本中非对称网络传播延时问题,而且还支持以太网以外的总线传输协议,如 CAN 总线、DeviceNET,非常适合在具有现场总线的分散控制系统中使用。

## 二、IEEE1588 同步原理

### (一)对时原理

IEEE 1588 系统中的时钟在结构上分为普通时钟、边界时钟和透明时钟,功能上分为主时钟与从时钟。普通时钟为只有一个 PTP 端口的对时源端或终端设备,边界时钟和透明时钟为有多个 PTP 端口的交换机或路由器。系统中的源时钟称为根时钟。

IEEE 1588 采用分层的主从模式进行时钟同步,主要定义了 4 种多点传送的时钟报文类型:同步报文,简称 Sync;跟随报文,简称 Follow\_Up;延时请求报文,简称 Delay\_Req;延时响应报文,简称 Delay\_Resp;具体对时过程如下:

第一,主时钟按照所设定的时间间隔周期性地发出同步报文 Sync,在报文中包含了报文发出的估计

收稿日期:2019-11-03

作者简介:陈闯(1984-),男,安徽宿州人,南京科远智慧科技集团股份有限公司,研究方向:智能控制系统。

时间,从时钟记录收到同步报文 Sync 的时间  $t_2$ ,经过一定时间的延时,主时钟接着发出跟随报文 Follow\_Up,在跟随报文中带有之前 Sync 报文发出的精确时间  $t_1$ ,这样,从时钟得到了 Follow\_Up 报文中的 Sync 实际发出时间  $t_1$  和 Sync 接收时间  $t_2$ 。

第二,从时钟发出延迟请求报文 Delay\_Req,并记录发送时间为  $t_3$ ,当 Delay\_Req 到达主时钟时,主时钟记录其到达时间为  $t_4$ ,主时钟再用延迟响应报文 Delay\_Resp 将时间  $t_4$  发送给从时钟。这样,从时钟得到 Delay\_Req 报文的实际发出时间  $t_3$  和 Delay\_Req 报文的实际接收时间  $t_4$ 。

假设主从时钟之间的报文交互延时是对称的,则从时钟与主时钟之间的时钟偏差和传输延时分别为:

$$\text{时间偏差: } t_{\text{offset}} = ((t_2 - t_1) + (t_3 - t_4)) / 2$$

$$\text{传输延时: } t_{\text{delay}} = ((t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)) / 2$$

主从时钟偏差为主从时间偏差-传输延时,从时

钟根据这个偏差修正自身的时钟。

从上述的同步原理可以看到,在计算偏移时需要用到传输延时,这个延时是之前得到的测量值计算的结果,如果延时是稳定的,能够代表当次测量的延时,偏移的测量就准确。反之延时的起伏将直接影响同步的精度。点对点连接可提供最高的精度,带路由器会增加网络抖动,在 PTP 系统内通过交换机连接时,由于交换机在传送报文时需要存储和排队,不可避免出现传递的延迟,而且这个延迟随排队报文的多少,报文的大小而变。而在分散控制系统中,系统正常运行过程中,网络负荷基本是稳定的,对时服务器与系统节点间的中间交换机数量很少,对系统对时精度的影响较小。

### (二) 时间戳标记

IEEE1588 的同步过程中的时间均采用硬件打时间戳的方式,需要相应的硬件支持,即打时间戳的时机是在报文发送出去的那一刻或者报文接收到的

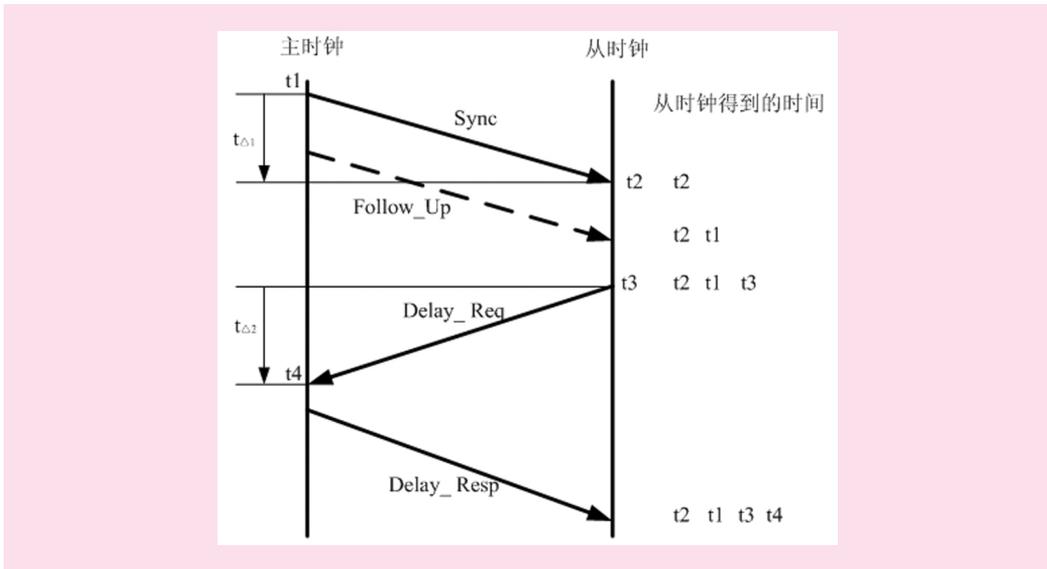


图 1 报文交互过程图

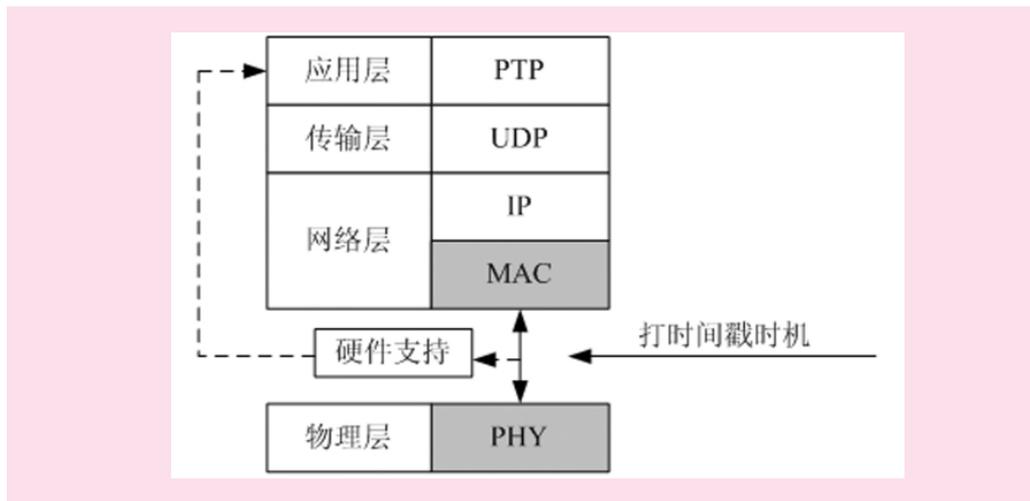


图 2 硬件打时间戳时机

那一刻。而不像 NTP 采用软件打时间戳的方式,避免了操作系统和协议栈的延迟。打时间戳的时机如图 2 所示,目前市场上许多带有 IEEE1588 功能的网卡芯片,MAC 层带有打时间戳的功能,而有的物理层芯片 PHY 带有 IEEE1588 的功能,其打时间戳的时机在 PHY 层,但都在数据发送或接收的底层。大大降低了软件打时间戳带来的误差。

### (三) 报文格式

以太网协议中 PTP 报文在网络通讯协议中的位置如图 3 所示,PTP 报文处在 UDP 数据段中,其中 UDP 端口为 319 和 320,319 端口对应的为事件报文,320 端口对应的为普通报文,PTP 报文头有 34 字节,报文头中有长度字节,指示 Body 的长度。

## 三、IEEE1588 在 NT6000 系统中的实现

虽然 IEEE1588 协议没有特别规定具体的通讯方式,但大多数的通讯方式都是采用以太网进行通讯,IEEE1588 协议也非常适合以太网通讯,而 NT6000 系统中的上层控制器网络和下层远程 IO 网络都是采用以太网通讯方式,即可以利用现有的通讯网络进行时钟同步,不需要额外布线。

### (一) 对时总体方案

NT6000 分散控制系统的对时系统结构如图 4 所示,具有 IEEE1588 功能的时间服务器接收 GPS 时钟后,校准自身时间。时间服务器作为系统中 IEEE1588 协议的主时钟,分散控制器系统中的各个控制器(DPU)作为从时钟,各个 DPU 与时间服务器

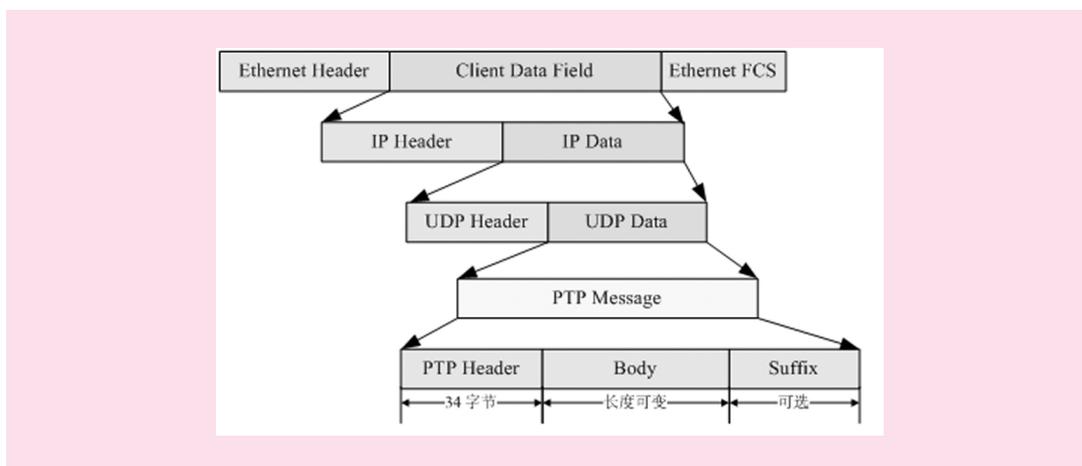


图 3 以太网协议中 PTP 报文格式

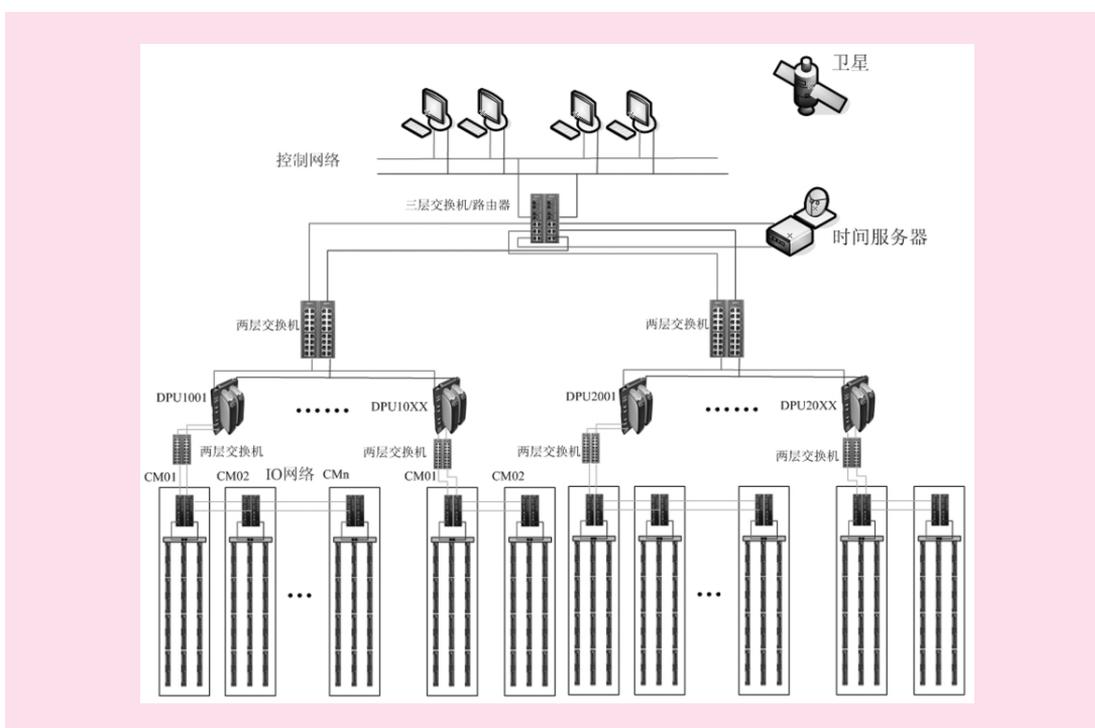


图 4 系统对时方案

之间形成主、从时钟对时关系,各个 DPU 接收到时间服务器的时钟后,修正自身时钟,并作为主时钟给与之相连的各个通讯接口模块对时,各个通讯接口模块修正自己的时钟后,以广播的方式给 IO 模块对时,最终实现整个系统的时钟同步。

为了使上层控制网络与下层 IO 网络隔离,系统中对时采用串行方式,即时间服务器给 DPU 对时,DPU 给通讯接口模块对时,通讯接口模块给各个卡件对时。

由于 IEEE1588 协议采用硬件打时间戳的方式,需要硬件的支持,系统中使用的 DP83640 物理层芯片和 Kinetis 系列中 K60 芯片实现 IEEE1588 的硬件打时间戳的功能,如图 5 所示,时间服务器通过控制网络给各个控制器对时,各个控制器通过网络物理层芯片 DP83640 进行硬件时间校正,各个控制器通过 IO 通讯处理器给通讯接口模块对时,每个通讯接口模块的处理器为 K60 芯片,通过 MAC 层进行时钟校正。具体方案如图所示:

控制器和各个时钟节点的应用层软件中需实现端口为 319 和 320 的 UDP 服务器,来实现对协议中事件报文和普通报文的处理,同时软件需要实现 IEEE1588 协议中各类报文的构造。具体 PTP 数据包的格式参考 IEEE1588 V2 协议。

(二)DP83640 芯片对时实现

DP83640 是一款基于 IEEE1588 标准物理层芯片,芯片中的 PHYTER 实现了 PTP 的时钟关键部分,芯片提供了一个同步时钟信号给外部设备使用。输出时钟信号可配置为 250MHz 除以 N 之后的任意频率,N 从 2 到 255。提供频率从 125MHz 到 980.4KHz。时钟精度可以达到 8ns。IEEE1588 PTP 逻辑依靠一个由内部相位发生模块 (PGM) 产生的 125MHz 名义参考时钟操作。芯片内部时钟秒(32 位),纳秒(30 位),亚纳秒 (单位是 2-32ns)构成。时间值的直接设置可以通过设定一个新的时间值完成,以纳秒为单位的步进调整值可以加到当前值。

当网络上有数据包进来时,IEEE1588 接收解析器监视接收包数据以检测 IEEE1588 V1 和 V2 事件消息。接收解析器检测在物理层传输的以太网数据包以及 UDP/IPv4 和 UDP/IPv6 数据包 PTP 事件消息。当检测到 PTP 事件消息时,器件将捕获接收时间戳并且提供给软件。

在 NT6000 分散控制系统中,DP83640 为从时钟,分布在每个控制器中,在软件层实现对接收到各类 PTP 数据包的解析处理及 Delay\_Req 数据包的构造及发送。

(三)Kinetis 芯片对时实现

在 NT6000 分散控制系统中远程通讯接口模块与控制器之间采用飞思卡尔 Kinetis 系列芯片 K60

表 1 对时误差(单位:us)

对时方式	最大值	最小值	平均值
Sntp	1018	386	663
IEEE1588	200	10	58

注:测试时时间服务器与控制器直接相连,控制器与通讯接口模块直接相连,排除了交换机在系统中的影响。

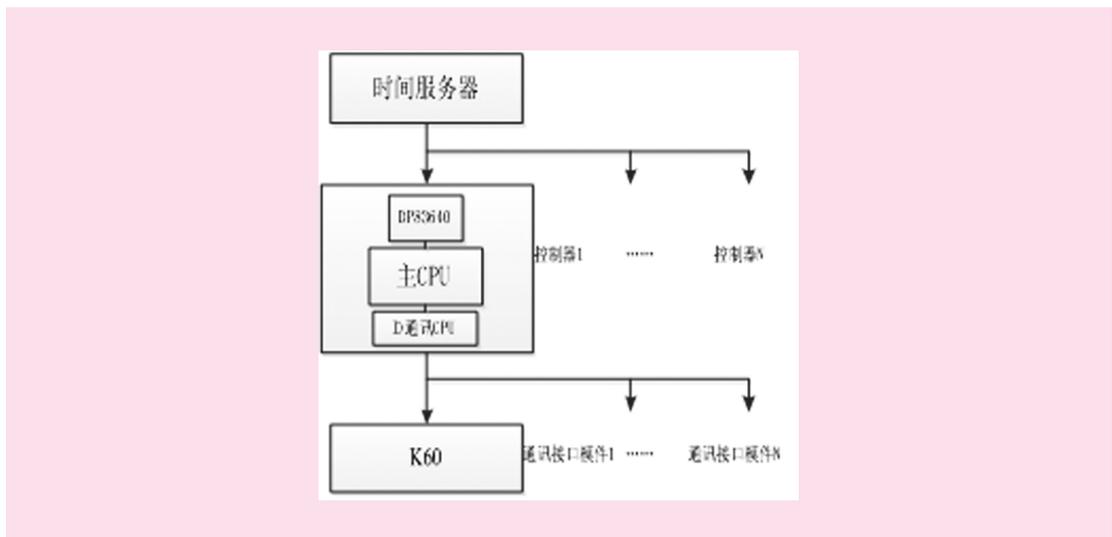


图 5 系统对时流程

进行网络通讯,K60 芯片自带 IEEE1588 功能的 MAC 网卡控制器,软件驱动提供了对 IEEE1588 对时协议的驱动支持,在应用层实现通过 UDP 通讯报文的解析,实现对各种对时报文的解析。

DPU 侧的 IO 处理器 K60 的应用层软件中主要实现主时钟节点的功能,即实现各类 PTP 报文的构造和发送,通讯接口模件的应用软件中实现从时钟节点的功能,应用层软件中需实现端口为 319 和 320 的 UDP 服务器,对协议中事件报文和普通报文的处理。

#### (四)对时精度测试

使用 SNTP 对时和使用 IEEE1588 对时方式,进行对比测试,测试 100 组数据进行对比,测试数据如下:

通过测试可以看出,IEEE1588 对时抖动更小,精度更高,特别适合在使用精确时间记录的系统中。

本文给出了 IEEE1588 对时协议在 NT6000 分

散控制系统的应用方案和具体实施方法。测试验证证明该方案可行、精度更高。IEEE1588 协议在分散控制系统中的应用使得系统中的 SOE 对时精度得到大大提高,而且为分散控制系统在精密控制和精确控制方面的进一步发展奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] 刘双,刘桂敏. IEEE 1588 协议在数字化变电站中的应用[J].电气化铁道,2004,(5).
- [2] 王相周,陈华婵. IEEE1588 精确时间协议的研究与应用[J].计算机工程与设计,2009,(8).
- [3] 关松青,肖昌炎.IEEE1588 在工业以太网中的实现[J].计算机工程,2011,(3).
- [4] Implementing an IEEE 1588 V2 Node on the Kinetis K60 Using the Freescale MQX IEEE 1588 Communication Library AN4332 2011.08.

[责任编辑:刘 骋]

## Application of IEEE1588 protocol in NT6000 distributed control system

CHEN Chuang

(Hubei Province skilled personnel training research center, Wuhan430071, China)

**Abstract:** This paper analyzes the current state of time synchronization technology, expounds the principle of IEEE1588 time synchronization, and in order to meet the requirements of high-precision clocks for decentralized control systems, gives the application scheme of IEEE1588 in decentralized control systems, and details the specific timing of the system method of execution. Practice has proved that the time synchronization scheme has high accuracy and low cost.

**Key words:** IEEE1588; time synchronization; PTP; DP83640; NT6000