

# 长距离数字化管输系统中精确时钟同步的设计方案

刘 睿

(中煤科工集团武汉设计研究院,湖北 武汉 430064)

**摘 要:**针对各个站场内单独装设 GPS 接收器或其他精确时钟源的独立对时同步方式不能达到微秒级精度,成本较高的问题,提出通过长距离全线网络进行精确时钟同步的设计方案.从常用的多种网络对时方式中选择资源消耗最少且精确度最高的 IEEE 1588 网络精确时钟同步协议(IEEE 1588 协议),实现从时钟偏移量的修正以及传输时延的修正,并通过一个精确的首端主时钟源周期性的对全线网络内所有从时钟进行校正.结合工程实际设计了时钟设备、交换设备和控制设备的具体架构、基本配置及其功能实现.通过德国赫斯曼公司的三层交换机 MACH1140 和美国罗克韦尔公司 ControlLogix 可编程逻辑控制器等行业内主流成熟设备的系统配置,完成整体架构对 IEEE 1588 协议的支持.在全线局域网络缓存负荷率不超过 50%的前提下,使长距离数字化管输系统全线的自动化设备能够作为从时钟,与首端的主时钟源在 100 ns 范围内实现精确时钟同步.

**关键词:**IEEE 1588 协议;网络时钟同步;自动化调度;工业以太网

**中图分类号:**TP273

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2013.02.018

## 0 引 言

管道运输是一种安全高效、节能省地、环保经济、供给稳定的运输方式,长距离大运量的管道运输在我国已经得到广泛应用,能够运输的物料包括原油、成品油、天然气、煤浆、矿浆、化学品等,在国民经济中发挥着愈来愈重要的作用.几百公里乃至上千公里的数字化管线项目中,由于地域跨度很大,对全线的数据采集和自动化监控提出了越来越高的时间同步要求.特别是为实现沿线泄漏检测、堵塞预警、水击保护等工艺要求,更需要高精度的时钟同步保障.

## 1 长距离管输系统时钟同步的现状和问题及方案选择

### 1.1 长距离管输系统时钟同步的现状

目前,在长距离管输系统中为保证稳定流速的密闭输送,沿线通常会均匀分布加压泵站、阀室及压力检测站,平均间隔在 30 km 左右.其时钟同步主要是在不同区域的各个站场单独装设全球定位系统(Global Position System,以下简称:GPS)接收器或其他精确时钟源,实行站场内独立对时同步.

### 1.2 长距离管输系统时钟同步目前存在的问题及分析

#### a. 未有效利用全线通信组网,各站场间的同

步精度不高:由于时钟同步主要是通过不同区域的各个站场内单独装设 GPS 接收器或其他精确时钟源独立对时同步来实现的,所以未能有效利用全线通信组网,造成各站场间的时钟同步精度不高.

b. 全线压力采样数据不能统一同步时标信息:有些工艺要求对长距离管道全线的压力,特别是高点和低点的压力进行实时的采集,以进行故障判断的保护,如堵塞预警、水击保护等,这就要求管道全线压力传感器采集的实时数据必须高精度同步且带有统一时标.但各站场如果独立同步,数据的时标信息就不易统一,而且当某一站场同步时钟丢失或故障时,会造成全线压力采集数据同步误差增大,导致保护不正确动作.尤其是泄漏位置的精确定位、堵塞位置的准确判断等,都必须建立在精确的时间轴基础上.

c. 过程设备层采样值对时间同步精度难以达到微秒级:按照数字化管道的发展趋势,从物理结构和逻辑层次上可以分为总调中心层、站场控制层、过程设备层,全线的信息交互实现数字化和网络化.不同层次对时间同步报文精度的需求不同,但对于过程设备层中涉及实时测量的采集数据,对时间同步精度的要求须达到微秒级.而目前,我国已建成长距离管输系统均没有达到微秒级的时钟同步的目标,因此对今后长输管道全线精确时钟同步的建设需求显得日益突出.

d. 全线范围内总体实现成本较高:虽然单台 GPS 时钟同步服务器成本较低,但由于需要稳定的电源供应和对安装环境的要求,目前主要在站场内应用较适宜.而对于长距离管线而言,沿线大量的阀室及压力检测站多达近百处,且大多地处偏远.故全部通过现场 GPS 时钟同步难以稳定实现,同时总体成本上与网络对时相比也毫无优势.

### 1.3 长距离管输系统对时方式的方案选择

常用的对时方式包括脉冲对时、串口报文对时、时间编码方式(串口+脉冲)和网络对时方式.前三种方式均需要设置单独的接口和专用的电缆连接,而长距离管输系统通信组网的发展方向是实现数字化,目前主流方案为全线同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy,以下简称:SDH)光纤主干网+各站场内以太环网接入的模式,因此选择网络对时方式可以复用已有的网络设施,与其它数据共网传输,实现较为方便,方式更加合理.

网络对时方式包括网络时间协议(Network Time Protocol,以下简称:NTP)、简单网络时间协议(Simple Network Time Protocol,以下简称:SNTP)和 IEEE 1588 精确时间协议(Precision Time Protocol,以下简称:PTP),原理都是通过以太网以数据包的形式将时钟源的时间信息传送到各个时钟信息的接收端.NTP 和 SNTP 是商业以太网领域实现计算机网络时钟同步的主流方式,由于主从时钟对同步报文的编码/解码、交换机对同步报文的存储转发均存在不确定的延迟,NTP 和 SNTP 的时钟同步精度一般只能达到 50 ms.而最新的 IEEE 1588 标准协议具有配置容易、收敛快速以及对网络带宽和资源消耗少等优点,它的主要原理是通过一个同步信号周期性地对网络中所有节点的时钟进行校正,可以使基于以太网的分布式系统时钟达到微秒级的精度同步<sup>[1]</sup>.因此将 IEEE 1588 协议运用于长距离管输系统的方案是满足长距离管输系统精确时钟同步需求的合理方式.

IEEE 1588 协议通过一个精确的主时钟周期性地对全线网络内所有从时钟进行校正.这一同步过程中包含了从时钟偏移量的修正以及传输时延的修正,期间需要用到同步报文 Sync、跟随报文 Follow\_Up、延时请求报文 Delay\_Req、延时回应报文 Delay\_Resp 四种报文<sup>[2]</sup>.

同步阶段分为偏移测量阶段和延迟测量阶段<sup>[3]</sup>,如图 1 所示.假设主时钟发往从时钟的消息与从时钟发往主时钟的消息往返为对称,则可确定主时钟与全线从时钟的时间偏差  $T_{\text{offset}} = [(T_2$

$-T_1) + (T_3 - T_4)]/2$ ,主时钟与全线从时钟之间的传输延迟  $T_{\text{Delay}} = [(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)]/2$ .全线从时钟接收主时钟的时间信息,如上所示进行相应的计算和补偿来达到与主时钟的同步.

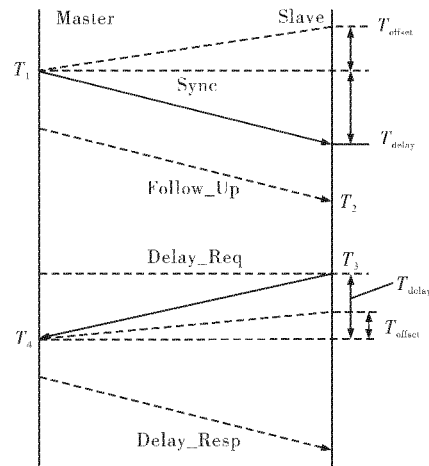


图 1 延时-请求响应机制

Fig. 1 Delay-Request response mechanism

## 2 在长距离管输系统中运用 IEEE 1588 协议实现精确时钟同步的具体方案

采用 IEEE 1588 协议实现长距离管输控制系统精确时钟同步的网络架构图如图 2 所示.本方案以典型的长距离管输项目为例,一般考虑只在管输线路的主控中心所在站场(一般为首端或末端场地)内设置一个对时主站以便同步全线其他站场,为保证时钟源的可靠性,要对对时主站的最高级时钟进行冗余配置.沿线其他站场均为对时从站,接入透明时钟,对以太网内的时间报文进行接收、再生并转发,并减少非对称性影响.对时主站负责同步系统内所有的对时从站.

通信组网分为以下两个层级:

a. 全线主干网:主控中心、管道沿线各站场和阀室的主干通信信道采用 SDH 同步光纤传输组网系统(155M/2.5G),同时租用运营商公网线路作为备用通信信道.

b. 站场局域网:所有站场内的工业以太网交换设备主要应用于主要站场内的数据采集与监控系统(Supervisory Control And Data Acquisition,以下简称:SCADA)、电力监控等系统数据存储/转发、虚拟局域网(Virtual Local Area Network,以下简称:VLAN)划分、时钟同步及主备路由冗余等功能,并保证与主干网光传输通道层中各通道的互通.

站场通信网络采用工业以太环网(100M/

1000M),其中站控层交换设备和可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller,以下简称:PLC)均必须选用支持IEEE 1588透明和边界时钟技术的产品,如德国赫斯曼公司的三层交换机MACH1140和美国罗克韦尔公司ControlLogix PLC。

过程设备层以太网环形网络为设备级环形(Device Level Ring,以下简称:DLR)网络(10M/100M),底层交换机选用美国罗克韦尔公司的1783-ETAP2F三端口带DLR技术的交换机,一个RJ45连接端口连接冗余控制站上的以太网模块1756-EN2T或者远程IO站上的以太网模块

1756-EN2T,另两个端口是LC接口的多模光纤接口,主要作为线性链路或者光纤环形链路的接口。底层的PLC控制器和I/O模块均直接接入DLR环网。

整个站场网络各级交换设备,包括PLC的以太网接口模块,都由上至下支持IEEE 1588协议的实现,在全线局域网络缓存负荷率不超过50%的前提下,使全线的自动化设备能够在100纳秒范围内实现时钟同步。

该方案中均采用行业内主流成熟的交换设备和控制设备,进一步支持了IEEE 1588网络精确时钟同步技术能够在长距离数字化管输领域中应用的可行性和适用性。

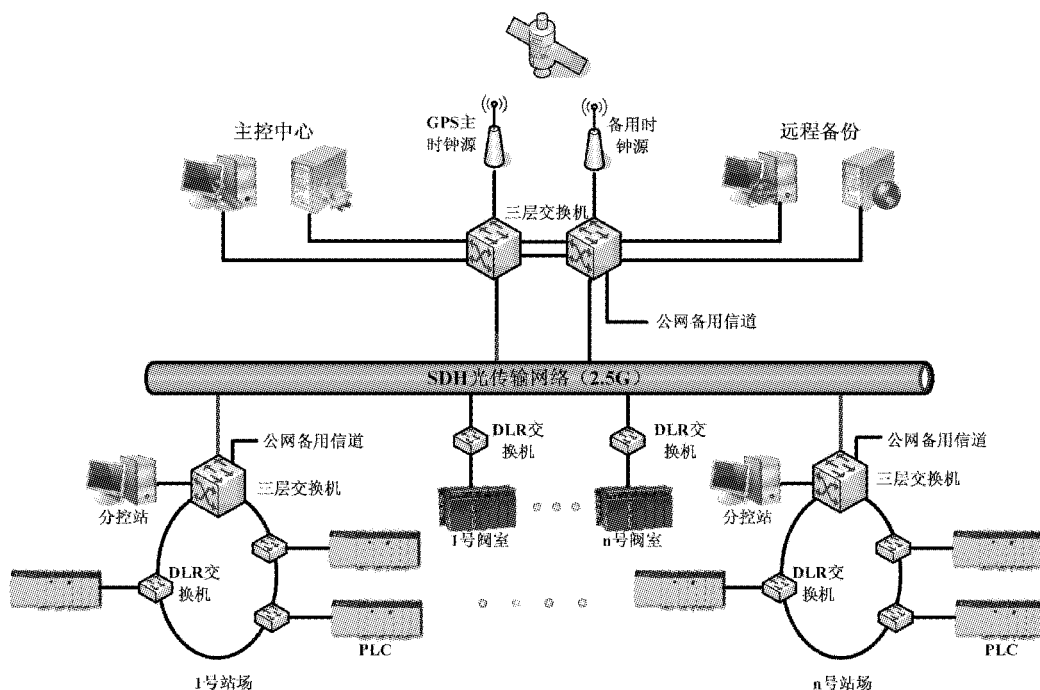


图2 长距离管输控制系统时钟同步网络架构图

Fig. 2 Network architecture diagram for long distance pipeline control system clock synchronization

### 3 IEEE 1588 协议在实施过程中的影响因素分析

IEEE 1588 协议在长距离管线的自动化网络方案实施过程中,还会受到以下因素的影响:

a. 在实际的以太网交换机组网中,绝对满足往返传输延时的对称是很难实现的. 因为以太网网络中存在一些交换设备,设备自身会存在缓存. 当网络负荷严重时,IEEE 1588 协议报文需要与其他类型的报文一样排队传输,而且当这些交换设备缓存空间有限时,就会发生冲突、丢包,都会影响 IEEE 1588 协议假设前提的成立<sup>[4]</sup>。

b. SDH 光纤主干网作为 IEEE 1588 协议数据包在各站场间的通信传输载体,其自身的对时精度及带宽分配也会对自动化系统的精确时钟同

步形成一定的影响。

c. 厂站中应用 IEEE 1588 协议的设备,如控制设备和交换设备等,必须均具有相关以太网 MAC 层标记时间戳的硬件支持,而目前实现这种硬件支持还比较复杂,能够选择的成熟交换设备还没有非常普及,在一定程度上也制约了 IEEE 1588 协议的发展与应用。

针对这些问题,在设计全线通信网络系统时,需要根据核算系统整体的数据传输负荷选择合理的通信网络设备和分配带宽,在系统各个交换环节建设中设置考虑必要的带宽裕量,尽量避免网络堵塞和延时的发生. 同时随着通信技术的进步,IEEE 1588 硬件支持的推广以及设备自身性能的提高,有效保证 IEEE 1588 协议在实施过程中得到更加可靠的应用。

## 4 结 语

高精度的时间同步对于长距离数字化管道输送系统中自动化控制和稳定运行具有十分重要的意义,应用 IEEE 1588 协议实现长距离管道输送系统的精确网络时钟同步是分布式网络时钟方式中最新的解决方案,实现了长距离管道输送系统高精度时间同步运行。

a. 高精度:将目前常用方案的毫秒级精度提高到微秒级,满足了长距离数字化管输系统高精度时钟同步的发展要求。

b. 低成本:由于 IEEE 1588 协议的应用不需要单独为时钟的传递布置特别的网络,而是利用通用的以太网,并且添加时钟同步报文也只占用少许的网络资源,可以和控制数据包、语音数据包或其他信息包共享网络,使之具有较低的网络开销。

c. 稳运行:在大跨越的地域上,确保了在管道输送系统沿线泄漏位置的精确定位、堵塞位置的准确判断等对全线的数据采集和自动化监控提出的高精度的时钟同步要求。特别是为实现沿线泄漏检测、堵塞预警、水击保护等工艺要求,提供了高精度的时钟同步保障,使该方案设计的长距离

数字化管输系统长效稳定运行。

尽管目前 IEEE 1588 协议尚处于初级试用阶段,还存在须解决的问题,但其高精度网络对时特点预示着其在长距离数字化管道输送领域广泛的应用前景。

## 致谢

中煤科工集团张建民教授在本文选题、设计等方面给予指导和协助,在此致以衷心的感谢!

## 参考文献:

- [1] 杨传顺,袁建,李国华. 分布式控制系统精确时钟同步技术[J]. 自动化仪表,2012,33(4):66-69.
- [2] IEEE Instrumentation and Measurement Society. IEEE 1588-2002 IEEE standard for a Precision clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems[S]. New York: The Institute of Electrical and EletronicsEngineers, Inc, 2002.
- [3] 李晓珍,苏建峰. 基于 IEEE1588 高精度网络时钟同步的研究[J]. 通信技术,2012,44(3):105-107.
- [4] 于鹏飞,喻强,邓辉,等. IEEE 1588 精确时间同步协议的应用方案[J]. 电力系统自动化,2009,33(13): 99-103.

# Design of precise clock synchronization in long distance digital pipeline system

LIU Rui

(Wuhan Design and Research Institute of China Coal Technology and Engineering Group, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** To solve the problem of difficult synchronization of all sample data under the condition that independent time tick synchronization method of global position system receivers or other accurate clock source can't reach microsecond precision and result in the high general cost, IEEE 1588 network precise clock synchronization protocol (IEEE 1588) was chosen to realize revision of clock offset as well as transmission delay, and to revise all clocks within the whole network by an accurate master clock source periodically. Combined with the clock equipment in the practical project, the concrete framework of switching equipment and control equipment and the realization of basic configuration functions were designed. Main trend mature equipments of system configuration in this field, such as MACH1140 of the three layer switches of Hirschmann and ControlLogix PLC of American Rockwell, were used to implement the support for IEEE 1588 protocol from the overall frame. Under the condition that cache load of the whole line LAN is less than 50%, the whole line automation equipment of long distance digital pipeline transportation system is taken as the slave clocks to realize accurate clock synchronization with the master clock source within the scope of 100 nanosecond.

**Key words:** IEEE 1588 protocol; network clock synchronization; automated scheduling; industrial ethernet

本文编辑:苗 变