

IEEE 1588同步技术

在电力系统中的应用

继电保护
分册

东电网公司电力科学研究院 黄 曙 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

IEEE 1588同步技术 在电力系统中的应用

继电保护分册

广东电网公司电力科学研究院 黄 曙 主编



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

IEEE 1588 作为一种在通信领域成熟应用的网络时间同步标准,在电力系统中也得到越来越广泛的应用。本书在概述 IEEE 1588 技术在国内外研究和应用现状,以及电力系统时间同步技术、体系结构及方案的基础上,阐述了 IEEE 1588 协议的基本原理、技术实现、通信机制等内容。在详细介绍数字化变电站继电保护及同步系统的基础上,深入分析了 IEEE 1588 技术在继电保护中的应用。最后给出了全站采用 IEEE 1588 同步的应用方案,并给出某变电站的工程实施方案。

本书主要供从事 IEEE 1588 网络时间同步技术标准研究的工程技术人员参考,也可作为 IEEE 1588 协议培训用书及一般工程技术人员自学使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

IEEE 1588 同步技术在电力系统中的应用. 继电保护分册 / 黄曙主编. —北京: 中国电力出版社, 2013. 4

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2622 - 4

I. ①I… II. ①黄… III. ①网同步—应用—电力系统—继电保护 IV. ①TM7 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 082445 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 11 月第一版 2013 年 11 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 9.5 印张 158 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

编 委 会

主 编 黄 曙

副主编 高新华 刘 玮

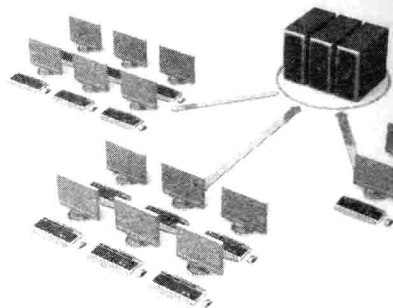
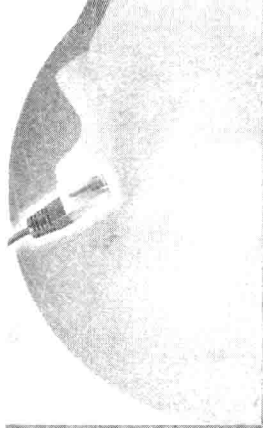
编 委 梁晓兵 陈炯聪 余南华 刘 杰

马 凯 谈树峰 禰文健 杨颖安

王红星 代仕勇 胡春潮 杨桂盛

段宏达 洪旻锦 李 波 陈宏辉

邓 浩 张晓悦 曹丽娟



前 言

随着电网规模的不断扩大,大机组、超高压输电和自动化逐渐成为国内电网的重要特征。而变电站作为电网的重要节点,电网对变电站的安全、稳定运行提出了更为严格的要求。及时准确地判断系统异常、预测其发展趋势并采取措施避免、控制乃至消除电网故障成为电力系统安全运行的重点。同时,掌握实时信息也便于事后进行分析,分析各类事件特别是系统故障的发生、发展过程,为优化保护和控制、防止灾难性事故发生提供依据。统一的时间基准是进行处理和分析的基础,这使得信息同步问题显得尤为重要。

在与数字化变电站密切相关的以太网通信技术和时钟同步技术方面,欧美国家的相关研究已走在前列。同步通信和工业自动化的迅速发展促成了 IEEE 1588 标准的诞生。IEEE 1588 标准定义了一种精确时间协议 PTP (Precision Time Protocol), 该协议为分布式测控应用而设计, 基于报文流加时间戳的思想, 采用软、硬件结合的实现方式, 旨在实现亚微秒级的同步精度。协议完全兼容以太网技术, 协议报文均是基于 UDP/IP 多播报文发送, 特别适合基于局域网的分布式应用。

当前, 国内外对 IEEE 1588 在计算机、自动化领域已经展开更深入的研究, IEEE 1588 协议的高精度和以太网兼容特性使之能够无障碍的使用到数字化变电站通信网络中。IEEE 1588 的优越特性预示着其在数字化变电站时钟同步系统特别是过程层同步中的良好前景。IEEE 1588 具有良好的开放性和灵活性, 对于不同网络环境和精度要求的系统, 允许不同的实现方式。面对数字化变电站纯以太网通信模式和亚微秒级的同步精度需求, 其面向站内应用的实现方式, 特别是面向过程层网络的应用方式、安全稳定性能、产生同步误差的原

因及解决方案都值得更加深入、具体的研究。

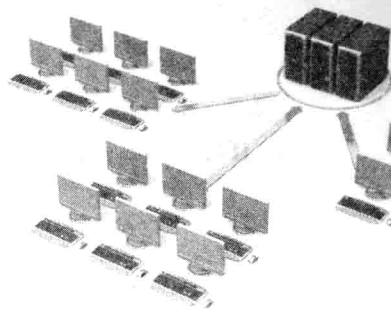
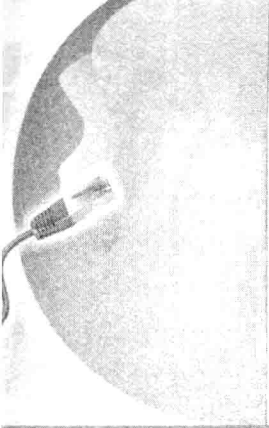
本书以 IEEE 1588 技术在数字化变电站继电保护中的应用为主线，共分 7 章。第 1 章主要介绍时钟同步的基本概念、IEEE 1588 研究背景及国内外研究现状；第 2 章主要介绍电力系统的主要时间同步技术；第 3 章详细介绍 IEEE 1588 标准、相关规约、通信机制；第 4 章介绍电力系统自动化技术和继电保护技术的发展及同步系统；第 5 章主要介绍全数字化保护及其同步的实现；第 6 章主要介绍 IEEE 1588 同步技术的其他应用，包括广域测量系统、双端测距以及故障录波上的应用；第 7 章主要介绍 IEEE 1588 在变电站内的应用分析。

IEEE 1588 技术的发展将是一个渐进而漫长的过程。本书仅是对现有研究和实践成果的总结，随着 IEEE 1588 技术的深入研究和应用，必将会有大量的新成果不断涌现，需要我们密切跟踪和深入研究。

由于编写时间仓促，书中难免有疏漏，一定存在以偏概全、理解含混甚至错误之处，对书中谬误之处，恳请广大读者予以批评指正。

编 者

2012 年 9 月



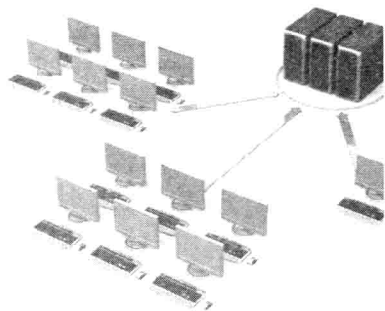
目 录

前言

1 概述	1
1.1 时间尺度	1
1.1.1 世界时 (UT)	2
1.1.2 历书时 (ET)	2
1.1.3 原子时 (AT)	3
1.1.4 协调世界时 (UTC)	3
1.1.5 脉冲星时间尺度	4
1.2 同步技术	4
1.2.1 时钟同步协议	6
1.2.2 IEEE 1588 精确时间协议分析	8
1.3 国内外研究现状	10
1.3.1 国外研究现状	10
1.3.2 国内研究现状	11
2 电力系统同步时钟技术	12
2.1 电力系统同步时钟系统简介	12
2.1.1 电力系统同步时钟的意义	12
2.1.2 电力系统对同步时钟的需求	13
2.1.3 电力系统时间比对系统	13
2.1.4 电力自动化设备的对时方式	17
2.2 电力系统同步时钟体系结构及方案	18
2.2.1 电力系统同步时钟体系结构	18
2.2.2 电力系统同步时钟体系方案	20

2.3 电力系统同步时钟技术应用实例	23
3 IEEE 1588 同步技术的基本原理	25
3.1 IEEE 1588 简介	25
3.1.1 IEEE 1588 同步协议概述	25
3.1.2 IEEE 1588 产生的背景	25
3.1.3 PTP 协议的基本原理	26
3.2 IEEE 1588 同步时钟技术的实现	27
3.2.1 高精度实现同步精度分析	27
3.2.2 NTP 时间同步技术	27
3.3 IEEE 1588 时钟同步技术研究	31
3.3.1 IEEE 1588 标准规范	31
3.3.2 最佳主时钟算法	37
3.3.3 PTP 时钟端口状态管理	39
3.3.4 PTP 报文管理	44
4 数字化变电站继电保护及同步系统	59
4.1 变电站自动化系统	59
4.2 继电保护技术的发展	62
4.2.1 继电保护的基本概念	64
4.2.2 继电保护的构成及作用	64
4.2.3 未来继电保护技术的发展前景	65
4.3 数字化变电站的概念	67
4.3.1 IEC 61850 概述	68
4.3.2 数字化变电站的过程总线通信关键技术	72
4.3.3 数字化变电站的继电保护的结构特点	76
4.4 数字化变电站时钟同步系统	79
4.4.1 时钟同步的意义	79
4.4.2 数字化变电站对时钟同步的要求	79
4.4.3 对时方式及结构	81
4.4.4 数字化变电站采样同步	83
5 数字化保护装置时钟同步的实现	87
5.1 全数字化保护	87
5.2 继电保护对时网络	88

5.2.1	不同对时网络时钟源分析	88
5.2.2	时钟误差分析	90
5.3	数字化变电站中的差动保护同步	92
5.3.1	光纤纵差保护的应用环境	93
5.3.2	合并单元同步	94
5.3.3	数字化变电站保护装置和合并单元同步	98
5.3.4	变电站间的时间同步	99
5.3.5	数字化变电站与传统变电站间的同步	101
6	IEEE 1588 协议在电力系统的其他应用	104
6.1	IEEE 1588 在同步相量测量中的应用	104
6.1.1	广域相量测量系统的结构	105
6.1.2	相量测量在电力系统的应用方向	108
6.1.3	广域同步技术的研究	109
6.1.4	基于 FPGA 的 IEEE 1588 协议的实现	111
6.2	IEEE 1588 在故障录波中的应用	114
6.3	IEEE 1588 在故障测距中的应用	117
7	IEEE 1588 在变电站内的应用分析	121
7.1	基于 IEC 61850 的变电站全站应用方案	121
7.1.1	网络结构	121
7.1.2	IEEE 1588 的全站应用方案	121
7.1.3	IEEE 1588 误差分析	124
7.2	IEEE 1588 的全网应用分析	125
7.3	鹤壁 220kV 淇县变电站时间同步系统方案	126
7.3.1	工程方案	126
7.3.2	对时网络	128
7.3.3	设置及指标	130
7.3.4	同步时钟系统	131
附录	时钟同步在数字化变电站中的应用方案	138
参考文献		140



“时间”是一个既古老又现代的概念。远古的时候，人们的生活遵循日出而作、日落而息，这完全是根据太阳的升起与落下安排自己的工作与生活的，可以说这是最古老的“时间统一系统”，随着社会生产力的不断提高，人类的生产活动和社会活动对时间的精度要求越来越高。我国宋朝的天文学家苏颂在1088年发明的用水作动力的水运仪象台，它每天的误差小于100s，是那个年代世界上最准的钟。欧洲在14~17世纪较广泛使用的重锤式机械钟，其误差每天可达15min。1675年荷兰人惠更斯利用单摆运动的等时性原理制成了世界上第一台受周期性重复的单摆运动控制的摆钟，该钟的误差每天只有10s。随后由于航海等人类活动的需求，对时间统一提出了越来越高的要求。1759年英国人哈利森采用温度补偿等办法制造了精密的航海钟，它每天的误差小于0.1s，1920年英国人肖特作的双百天文钟，每天的误差只有0.001s，达到了周期的机械钟精度的顶峰。

到了近代，社会生产力的迅速提高和科学技术的飞速发展，人们对时间及由时间的基本单位秒导出的物理量——频率的准确度提出了越来越高的要求，1927年美国人发明了第4代钟表——石英钟，每天的误差已经小于0.1ms。在石英钟不断改进的同时，1949年出现了第5代钟表——原子钟。

1.1 时间尺度

从古代的沙漏、日晷等简单的计时工具到现在各式各样的钟表等现代的计时工具，中间经过了很长的发展过程。时间已经成为人们日常生活中不可缺少的一种概念。广义的时间包含两层含义：时间（time）和时间间隔（time interval）。它们都可以用时、分、秒的形式来表达。但它们是两个不同的概念。时间标注的是某件事的发生时刻，而时间间隔则标注的是某件事的持续时间长度。

在时间测量的发展史上,时间基准有着很大的变化。按照时间基准的不同可以把时间尺度分成不同的几部分:世界时(UT)、历书时(ET)、原子时(AT)、协调世界时(UTC)、脉冲星时间尺度。

1.1.1 世界时(UT)

世界时在1960年以前曾被广泛应用。它是以地球的绕轴自转为标准的。地球绕轴自转这种运动是唯一的,它的复现性是显然的。在实际测量中,它是

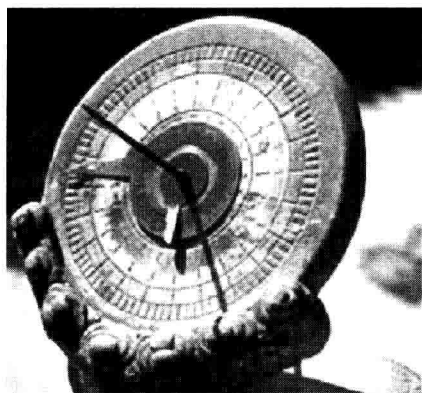


图1-1 古老的世界时测量仪

在地球以外寻找与地球自转无关的一个不动点作为观察标,测量地球上的观察者相对于观察标的转动角度来计时,随观察标的不同,以地球自转为基础的世界时系统就出现了几种不同的时间尺度。图1-1为古老的世界时测量仪。

(1) 恒星时。恒星连续两次通过地方子午圈的时间间隔为1个恒星日,它是地球相对“固定”的恒星旋转一周的时间。

(2) 平太阳时。由于地球绕太阳运动,使得按太阳在天空中的位置确定的“真太阳时”是不均匀的,取其平均值,就得到平太阳时。

世界时属于平太阳时,将某一地方的恒星时格林尼治子午圈换算为平太阳时,即世界时 UT_0 ,它是世界时粗略值。在 UT_0 中加极移改正得到 UT_1 , UT_1 的数值在地球的任何地方都是相同的,它代表地球的自转角位置,对于导航是相当重要的。

在 UT_1 中加入地球自转的速率季节性变化改正,得到 UT_2 ,由于地球自转速率存在着不可预测的变化。因此在较长的时间间隔内 UT_2 并不显得比 UT_1 更均匀。

1.1.2 历书时(ET)

历书是一种均匀的时间尺度,用于测量天体的位置。它以地球绕太阳的周期运动为基础。1历书时秒定义为1900年1月0日12时回归年长度的 $1/31\,556\,925.974\,7$ 。实际上,ET根据月球绕地球的轨道运行求得的。在改良月历表中,月球相对于恒星的计算位置是以ET为引数列表的。因此,通过观测求得月球的位置以后,就可以利用改良月历表反求出观测的历书时。从

1952 年 6 月起, 美国海军天文台便利用双速月亮位置照相机测定历书时。

尽管历书时在理论上是均匀的, 但要经过长期仔细的天文观测, 即使这样, 历书时的准确度也只能达到 10^{-9} 量级。随着科学的发展, 人们对时间精度的要求也越来越高, 例如导弹、火箭的发射、制导、运动目标的精密定位、大地测量等领域, 不仅要求时间标准具有很高的准确度, 而且要求它具有良好的稳定性和均匀性。以天体运行行为基础的世界时和历书时已经不能满足这个精度, 这就促使人们转而寻求更高精度的时间基准, 这就是原子钟。

1.1.3 原子时 (AT)

按照定义, 从 1967 年 10 月起, 原子时 (AT) 由 SI 秒连续记数求得。SI 秒的定义为“铯原子钟 Cs^{133} 基态的两个超精细能级间跃迁辐射振荡 9 192 631 770 个周期所持续的时间为 1 秒。”

根据国际协定, 原子时尺度的起点取为 1958 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒。为了得到一个比任一个地方时间尺度更均匀、更能为大家共同承认的时间尺度, 守时工作需要国际协调。国际权度局 (BIPM) 时间分部就是负责建立国际原子时尺度 (TAI) 这一重要任务的部门。图 1-2 是早期的铯原子钟。

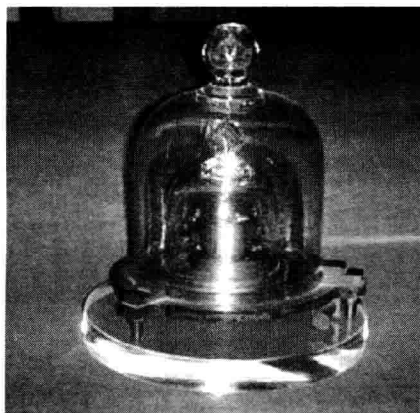


图 1-2 早期的铯原子钟

1.1.4 协调世界时 (UTC)

不管名称如何, UTC 是由原子钟产生的时间尺度。因为在导航中的广泛应用, 仍然要求时间尺度接近于 UT, 所以必须在 AT 与 UT 之间找到一个折衷的办法, 既保持原子时尺度均匀性好的优点, 又能反映地球自转的变化。这就产生了协调世界时 UTC。

UTC 的发展分为两个阶段。在 1966 ~ 1971 年期间 UTC 以两种改正量为基础首选, 对钟的基本频率实施调偏, 备选 0.1s 的时刻跳跃。对原子钟频率调偏同时刻跳跃相配合是十分复杂的, 它会给实际工作带来很多困难, 因此, 经过讨论, 从 1972 年 1 月 1 日起决定不再实行频率调偏仅作时刻跳跃调整。图 1-3 为协调世界时分区。

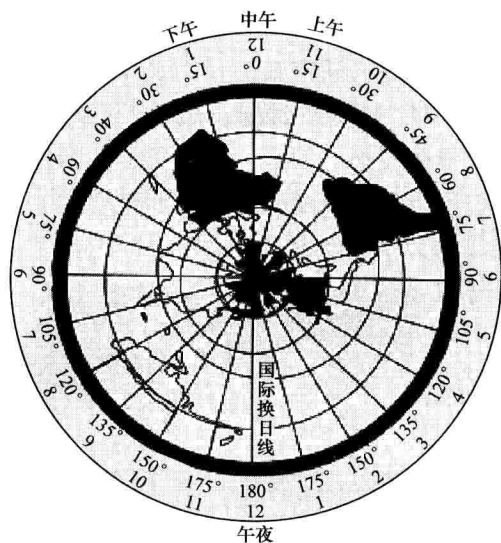


图 1-3 协调世界时分区

1.1.5 脉冲星时间尺度

利用原子钟来守时，与以前人们利用天文观测到自然界物质的基本运动来守时不同，也不符合人们的习惯，人们总想在天文观测中找到合适的物质的运行来守时。

然而，由于原子钟守时的精度均无高于其他频率标准，这种目标不宜于实现。直到 1982 年，Backer 等人发现第一颗毫秒脉冲星：测量以毫秒脉冲星（SR1932 + 21）旋转周期的相对误差为 10^{-14} ，这个精度要远高于地球

自转计时的精度，也不差于原子钟的精度，其稳定度是非常好的，这就给人们提供了利用一种天文观测实现高精度计时的手段。毫秒脉冲星是自然界唯一可与量子频标相媲美的一种天然的频率源，它无须维护，不会由于人为的原因而停止，它是一个天然的时钟，是最有希望和地面原子时系统进行比对的频率基准。脉冲星时间尺度有可能成为原子时尺度以后的一种新时间标准。

1.2 同步技术

当代，随着航天事业的发展，对时间的精度提出了更高的要求。为了实现对飞行器的测量（位置、速度、加速度和飞行姿态）和控制（控制飞行姿态），最早提出了现代时间统一系统的概念和要求。时间统一系统是向国防科研实验提供标准时间和频率信号，以实现整个试验系统时间和频率的统一，由各种电子设备组成的一套完整的系统。它由授时和用户两大部分组成。授时部分有国家时间频率基准，它产生标准时间和标准频率信号，通过授时台，用无线电方式发播至各地。用户部分由根据国防科研试验的需要而设于各地的用户设备组成，各地的用户设备由定时较频接收机、频率标准、时间码（时码）产生器、时码分配放大器 and 用户等部分组成。时间统一系统的组成见图 1-4。

在通信领域，“同步”概念是指频率的同步，即网络各个节点的时钟频率

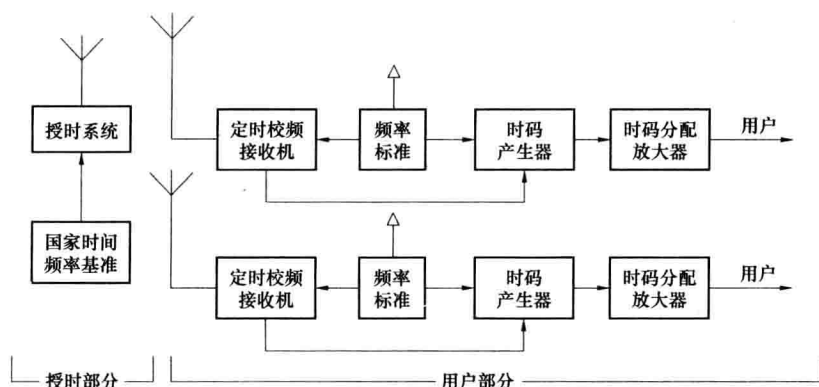


图 1-4 时间统一系统

和相位同步，其误差应符合标准的规定。目前，在通信网中，频率和相位同步问题已经基本解决，而时间的同步还没有得到很好的解决。时间同步是指网络各个节点时钟以及通过网络连接的各个应用界面的时钟的时刻和时间间隔与协调世界时（UTC）同步。随着网络技术的不断发展，计算机系统之间的交互越来越频繁，而时间是数据交互的绝对必要项。不同的时间标准造成的时间偏差，不仅可能使数据延迟，严重时甚至将导致数据反转。时间同步网络是保证时间同步的基础，构成时间同步网可以采取有线方式，也可以采取无线方式。

时间的基本单位是秒，它是国际单位制（SI 单位制）的 7 个基本单位之一。1967 年以前，秒定义均建立在地球的自传和公转基础之上。1967 年的国际计量大会（CGDM）给出了新的秒定义：“秒是铯¹³³原子基态的 2 个超精细能级间跃迁辐射振荡 91 926 311 770 个周期所持续的时间”，目前常用的协调世界时实际上是经过闰秒调整的原子秒。

时钟可以使我们和其他人或事情保持一致，而不同的应用领域对时间精度的要求也是不同的。为了赶上火车，我们需要不时看手表确保准确的时间。在百分之一秒成为制胜关键的竞技性运动项目中，也要求微秒级的同步精度。通过这样的方法和其他人或事实现同步，虽然同步精度不高，但却能满足要求。后来钟表的出现使时间更加的准确，也使人们能够在对时间精度要求较高的领域进行研究。很多电子通信系统和时间都有密切的联系。系统如果没有实际的时钟和定时功能，将会有有一个经过硬件和软件处理过的固定的时钟，称为系统时钟，这在很多系统中很常见。例如，通过对每一个用户周期性的事件触发（该触发象征着时间单元的起点，用户一旦收到此触发信号，将会执行相应的

操作) 来实现系统时间的应用。

1.2.1 时钟同步协议

时钟同步协议是以太网系统的重要组成部分。目前可以用于网络对时的协议主要有时间协议 (Time Protocol, TP)、日期时间协议 (Daytime Protocol, DP)、网络时间协议 (Network Time Protocol, NTP)、简单网络时间协议 (Simple Network Time Protocol, SNTP) 以及 IEEE 1588 标准定义的精确时间协议 (Precision Time Protocol, PTP)。时间协议和日期时间协议都只能表示到秒, 而且没有估算网络延时, 同步精度较低, 目前在工程中应用较少。应用最广泛的是 NTP 协议和 IEEE 1588 协议。

1.2.1.1 NTP 协议

NTP/SNTP 是各行业中应用最普遍的网络时间协议。通过 NTP 协议建立的网络时间同步系统在电信领域得到很好的应用, 但要满足电力系统保护、测量及其他自动化技术的精度要求还存在困难, 需要做一些技术改进, 来进一步提高同步精度。

NTP 最早是由美国 Delaware 大学的 David L. Mills 教授于 1985 年提出的, 是设计用来使 Internet 上的计算机保持时间同步的一种通信协议。NTP 协议可以估算出数据包在 Internet 上的往返延迟, 并可独立地估算计算机时钟偏差, 从而实现网络上计算机间可靠和精确的时间同步。NTP 以 GPS 时间代码传送的时间消息为参考标准, 采用了客户端/服务器 (Client/Server) 结构, 具有相当高的灵活性, 可以适应各种 Internet 环境, 在无序的 Internet 环境中提供精确和健壮的时间服务, 把计算机的时间同步到某些时间标准。当前几乎所有的授时网站都是基于 NTPv3 (NTP 的版本号) 的, 它提供的时间精确度在广域网上为数十毫秒, 在局域网上则为亚毫秒级或者更高, 在专用的时间服务器上可能达到更高的精确度。

NTP 协议可以在多播模式、客户端/服务器模式以及对称模式下工作, 这可以根据需要进行选择。在客户端/服务器模式中, 一对一连接, 客户端可以被服务器同步, 服务器不能被客户端同步。在对称模式中, 与客户端/服务器模式基本相同, 但双方均可同步对方或被对方同步, 先发出申请建立连接的一方工作在主动模式下, 另一方工作在被动模式下。广播/多播模式是一对多的连接, 服务器主动发出时间信息, 客户端由此信息调整自己的时间。由于忽略网络时延, 精度较低, 适合用于高速局域网上。其中最典型的操作模式是客户端/服务器模式。在这个模式中, NTP 的客户端提供了复杂的算法, 这些算法



可以从多个服务器的响应包中判断出最接近真实时间的偏移值。所以客户端/服务器模式在 NTP 各个模式中的对时精度是最高的, 适用于大型的分布式网络。

NTP 发展的另一分支是 SNTP, 即简单网络时间协议。SNTP 适用于时间精确度低于 NTP 的客户机, 并最好仅限于使用在时间同步网的终端位置。在 1992 年 8 月, RFC - 1361 简单网络时间同步协议 SNTP 问世, 它的精确度为秒级。在 1995 年 3 月, 提出了 RFC - 1769, 它取代了 RFC - 1361, 时间精确度为数百毫秒级。SNTP 的最新规范是 1996 年的 RFC - 2030, 并被冠以简单网络时间协议 SNTP v4.0。SNTP 的实现比较简单, 特别是在客户端的实现。一些商用的操作系统, 如 Windows 操作系统, 直接支持客户端的 SNTP 协议。

SNTP 基于 NTP, 两者之间的主要差别在于 NTP 提供了错误管理和复杂的过滤系统, 而 SNTP 没有, 所以 SNTP 可达的精度不及 NTP 高, 适用于对时间要求不是十分严格的网络。

在 SNTP 协议中, 用于同步的时间戳都是在客户端/服务器内的应用层“加盖”的, SNTP 协议的实现是假定客户端和服务端之间的报文传输时延相等。而报文传输延迟不仅包括报文在网络传输的时延, 还包括报文在节点内部处理时间 (如协议封装或分解、系统中断、进程调度), 由于客户端和服务端处理能力不同, 故客户端和服务端之间的报文传输时延实际上并不严格相等, 从而带来时间误差, 使得 SNTP 的时间同步精度只达到毫秒级。

1.2.1.2 NTP 的同步对时协议

在客户端/服务器模式下, 客户端以周期性地向服务器发送 NTP 包的方式向服务器请求时间信息, 该包中包含了离开客户端时的时间戳 T_1 。当服务器接收到该包时, 依次填入该包到达的时间戳 T_2 、交换包的源地址和目的地址、填入该包离开时的时间戳 T_3 , 然后立即把包返回给客户端。客户端在接收到响应包时再填入包回到客户端的时间戳 T_4 。客户端用这 4 个时间戳就能够计算出两个关键的参数: 数据包交换的往返延迟 Delay 和客户端与服务端之间的时间偏移 (Offset)。服务器和客户端的对时过程如图 1-5 所示。

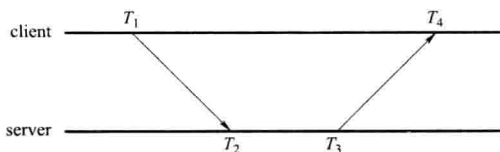


图 1-5 服务器和客户端对时过程

这里可以假设服务器的时钟是准确的，服务器和客户端时钟的时间偏移量是 O ，从客户端发送报文到服务器端的路径延迟是 D_1 ，从服务器到客户端的路径延迟是 D_2 ，路径延迟总和是 D 。那么可以列出三个方程式：

$$T_2 - T_1 = O + D_1 \quad (1-1)$$

$$T_4 - T_3 = D_2 - O \quad (1-2)$$

$$D_1 + D_2 = D \quad (1-3)$$

如果假设从客户端到服务器的路径延迟和从服务器到客户端的路径延迟相等，即 $D_1 = D_2 = D/2$ ，以上三个方程式变成：

$$T_2 - T_1 = O + \frac{D}{2} \quad (1-4)$$

$$T_4 - T_3 = \frac{D}{2} - O \quad (1-5)$$

可以求出服务器和客户端时钟的时间偏移：

$$O = \frac{(T_2 - T_1) + (T_3 - T_4)}{2} \quad (1-6)$$

时间偏移和网络延迟见图 1-6。

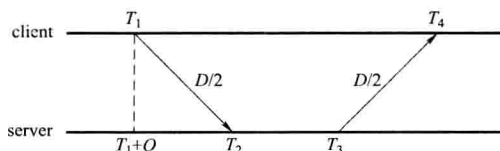


图 1-6 时间偏移和网络延迟

1.2.2 IEEE 1588 精确时间协议分析

鉴于 NTP 无法满足许多有更高时间同步精度要求的应用领域，因此，国际上提出了 IEEE 1588 对时标准，标准定义了精确时间协议 PTP。PTP 协议借鉴了 NTP 技术，该协议对内存及 CPU 性能没有特殊的要求，只需要最小限度的网络带宽。从国外目前的原型实验和应用来看，PTP 协议可以达到微秒级的同步精度，并且在采取某些补偿措施的情况下，有可能实现更高的精度。

IEEE 1588 协议的全称为“网络测量和控制系统精密时钟同步协议标准” (Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Network Measurement and Control System)，最初由安捷伦实验室 (Agilent Laboratories) 的 John Eidson 以及来自其他公司和组织的 12 名成员开发，后得到 IEEE 的赞助，并于 2002 年 11 月得到 IEEE 批准成为正式标准。IEEE 1588 设计初期是用于测