

IEEE 1588 同步技术

在电力系统中的应用

自动化
分册

广东电网公司电力科学研究院 陈炯聪 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

自动化分册

广东电网公司电力科学研究院 陈炯聪 主编



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

IEEE 1588 作为一种成熟的网络时间同步标准,在总结之前各种各样的异步通信模式下同步时钟的方法的同时,开创性地解决了总线网络下的同步时钟问题以及跨网段的同步时钟问题,同时提出了在不同层次实施该协议可得到不同等级的同步时钟精度。本书在分析现有的时钟同步技术优缺点的基础上,介绍了 IEEE 1588 标准、相关规约、通信机制;阐述了 PTP 协议的实用性研究和开发及基于 DP 83640 的软硬件的实现方法。IEEE 1588 在电力系统中目前主要应用于数字化变电站,本书对数字化变电站的时间同步方案也做了介绍。最后介绍了 IEEE 1588 测试的方法和测试一致性平台的研制,并对 IEEE 1588 测试精度进行了分析。

本书主要供从事 IEEE 1588 网络时间同步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. 自动化分册/陈炯
聪主编. —北京: 中国电力出版社, 2012. 1

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2621 - 7

I. ①I… II. ①陈… III. ①网同步 - 应用 - 电力系统 - 自
动化 IV. ①TM7 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 017750 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

*

2012 年 1 月第一版 2012 年 1 月北京第一次印刷

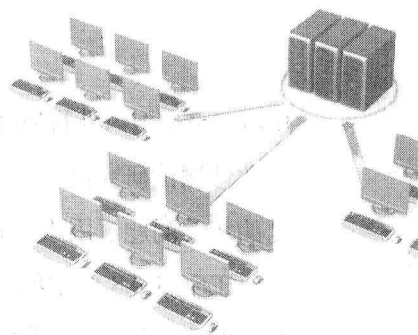
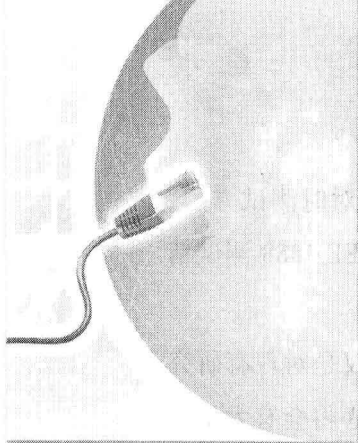
710 毫米×980 毫米 16 开本 11.5 印张 195 千字

印数 0001—3000 册 定价 35.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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



前言

长期以来,异步通信模式下不能实现精确的时间同步,一直是制约现场总线方式下的全分布式控制系统全面广泛应用的一个重要因素。在传统的各种需要分散控制节点之间有严格同步时钟应用中,如在传动控制、运动控制以及分布式需要带时标的数据采集系统等,大多数都保留了各种各样的同步通信网络接口或专用的同步时钟脉冲接口。这种方式不仅价格昂贵、性价比低,而且接口的不统一导致互连、互通困难,更重要的是很难在一个下至传感器/执行机构、上至主控制器/服务器的异构平台下全面实施,从而阻碍了现场总线控制系统的进一步推广应用。但是,IEEE 1588 在总结之前各种各样的异步通信模式下同步时钟的方法的同时,开创性地解决了总线网络下的同步时钟问题以及跨网段的同步时钟问题,同时提出了在不同层次实施该协议可得到不同等级的同步时钟精度。

本书以 IEEE 1588 技术为主线,共分 8 章。第 1 章主要介绍 IEEE 1588 的研究背景及国内外研究现状、时钟同步的基本概念以及现有的几种时钟同步技术;第 2 章主要介绍 IEEE 1588 标准、相关规约、通信机制,并对历史上两种不同版本进行了比较;第 3 章详细介绍基于数字化变电站的时钟同步技术的基本理论、设计原则、同步模型和同步方式,从而阐述了 PTP 协议的实用性研究和开发,并进一步阐明合并单元的理论、功能和接口技术;第 4 章主要介绍 DP 83640 软硬件的实现方法、实现方案以及实现模式;第 5 章主要介绍基于 IEEE 1588 的相关产品,如时钟服务器、以太网交换机、时间同步主时钟等;第 6 章主要介绍数字化变电站时间同步方案、基于 IEEE 1588 精确时间同步方案、同步方案新技术以及 PTP 数字化变电站全站同步方案;第 7 章主要介绍

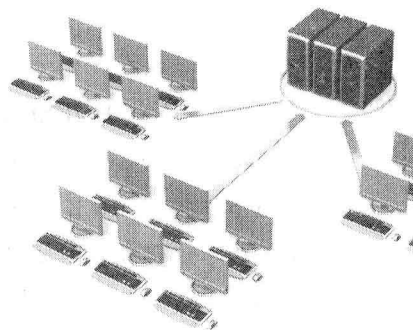
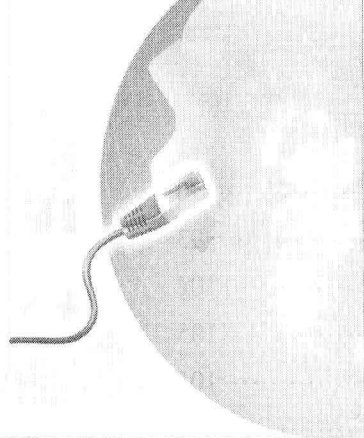
IEEE 1588 国内外视频测试现状和厂商、PTP 协议测试方法、对时测试方法、一致性测试研究以及一致性测试平台研制；第 8 章主要介绍 IEEE 1588 测试精度的相关问题、因素分析，进而提出相应的补偿方法和措施。

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，恳请广大读者予以批评指正。

编 者

2011 年 11 月

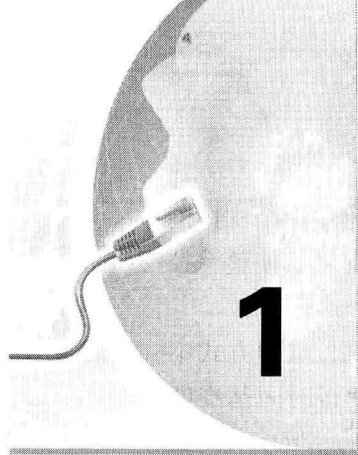


目 录

前言

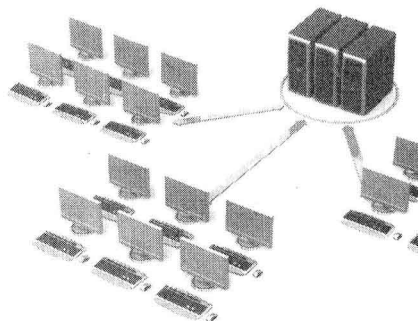
1 IEEE 1588 概述	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 时钟同步的概念	4
1.4 现有的几种时钟同步技术	4
2 IEEE 1588 标准	14
2.1 IEEE 1588 标准介绍	14
2.2 IEEE 1588 相关规约	29
2.3 IEEE 1588 通信机制	31
2.4 IEEE 1588 两个版本的异同	34
3 数字化变电站时间同步及合并单元	37
3.1 时钟同步概述	37
3.2 PTP 实用性研究和开发	45
3.3 合并单元时钟同步的理论和技術	48
4 DP 83640 软硬件实现	58
4.1 DP 83640 软硬件介绍	58
4.2 DP 83640 实现标准网络 IEEE 1588 的同步方法	61
4.3 DP 83640 实现时钟同步的软硬件实现方案	67
4.4 DP 83640 实现同步以太网模式	75
5 产品	85
5.1 XLi - 1588 Grandmaster	85
5.2 Sync Switch TC100	89

5.3	ZH-503 IEEE 1588 时间同步系统	90
5.4	K807B-IEEE 1588 (PTP) 时钟	93
5.5	兆越 MIER-6426 IEEE 1588 工业以太网光纤交换机	102
6	数字化变电站时间同步	105
6.1	数字化变电站同步方法	105
6.2	IEEE 1588 精确时间同步协议的方案分析	110
6.3	IEEE 1588 实现数字化变电站全站方案的新技术	118
6.4	PTP 数字化变电站全站方案分析	124
6.5	IEEE 1588 时钟同步方案	128
6.6	实际案例分析	132
7	IEEE 1588 协议测试方法	135
7.1	国内外 IEEE 1588 时频测试现状和厂商介绍	135
7.2	PTP 协议测试方法	139
7.3	IEEE 1588 对时测试方法	146
7.4	IEEE 1588 一致性测试研究	148
7.5	IEEE 1588 一致性测试平台研制	151
8	精度影响与校正	162
8.1	IEEE 1588 精度影响的相关问题分析	162
8.2	影响网络时钟同步精度的因素分析及补偿方法	166
	参考文献	177



1

IEEE 1588概述



1.1 引言

目前,许多系统都离不开时间同步的概念,比如测试与测量系统、电力系统、工业自动化以及分布式系统。而随着系统范围的扩大以及分散控制的发展,使得各个控制节点之间的时间同步变得越来越重要,特别是在分布式网络化的控制系统中,考虑到调度和控制的实时性,对时间同步的精度要求就更为严格。根据分析得出,影响分布式测控系统实时性差的主要根源在于各个测控设备之间的时钟差异和测控数据在网络中的传输延迟。由于这些问题是分布式系统的固有问题,因此,很难用现有技术加以解决或抑制。为此,必须寻求一种更加有效的时间同步技术用于解决在分布式系统中存在的问题,提高系统中各个站点之间的时间同步精度。

电力系统信息化的完善以及电网调度自动化的实现,使得工程人员可以通过计算机和各种仪器设备,采用时间同步技术,对系统中的各个站点和设备进行集中控制与管理,从而提高电力系统的运行效率和可靠性。然而,电力系统的现场设备由于温度变化、电磁干扰、振荡器老化,甚至还包括计算机负载等多种原因,多数设备的时钟是不精确的,而且时间误差是累积的,随着时间的推移,设备之间的时间同步问题也凸显出来,特别是在一些对时间精度要求比较严格的领域,如变电站、电力监控系统等,使得这一问题更加突出。因此,目前电力系统采用的时钟同步技术,由于其特定的应用环境以及系统中其他各方面的影响,使其同步精度达不到很高的要求。另外,电力系统中的某些子系统,比如变电站工业现场的机械、气候(包括温度、湿度)、尘埃等条件非常恶劣,对设备的可靠性也提出了更高的要求。因此,为了进一步提高电力系统运行管理水平,满足系统快速发展的要求,并提高对系统的控制能力和故障分析能力,采用统一的技术方案建设一个完善的时间同步网络,就成为电力系统

的一个选择和努力的方向，而建成的时间同步网络也将成为电网中一个支撑网络的重要基础。要做到这一点，首先必须提供一个统一的系统时钟，使整个控制系统内部各个站点的时钟保持同步。

目前，现有电力系统的时钟大多由 GPS 精密时钟系统提供，这种方式不仅存在一定的安全隐患，而且大量使用 GPS 装置和设备，也使得时间基准的更换或升级变得困难和昂贵；而网络时间协议 NTP（Network Time Protocol）虽然通过一定的硬件配合和算法优化，可以尝试应用到电力系统之中，但是网络时钟协议 NTP 只能达到毫秒级的同步精度要求，对于那些要求微秒级或更高同步精度要求的场合并不适合。

2002 年出现的 IEEE 1588 协议，特别是它可能达到的高精度和较低的开销为人们实现特定场所的应用提供了现实可行的途径。实现 1588 协议只需在原有网络上添加时间同步报文，这些报文占用少量的网络资源，它们只是和控制数据包或其他信息包共享网络。与前两种对时方式相比，该协议不仅成本低，而且独立于操作系统之外，适应性强，安装简单，无需做复杂的配置工作，理论上其同步精度可以达到纳秒级，使整个网络的定时同步指标有显著的改善，因此具有广泛的应用前景。

1.2 国内外研究现状

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。目前，工业控制的领先厂商 Rockwell、Siemens 等已经投入产品研究和开发，相关产品正在逐步推出。

IEEE 1588 的优越特性为数字化变电站实现网络化的时钟同步提供了一个理想的选择。IEC（国际电工委员会）已将它转化为 IEC 61588:2004 标准，IEC TC57WG10 计划在 IEEE 1588 有成熟的应用后将其引入 IEC 61850。在国内，IEEE 1588 标准在电力系统，特别是在数字化变电站中的相关应用研究工作起步较晚，但发展较快。主流的二次设备生产厂家都在不断推出支持 IEEE

1588 的产品；时钟源和交换机方面也不断有新产品推出。国内已主持了多次 IEEE 1588 的测试工作，在改善一致性方面取得了较好的效果。浙江绍兴 110kV 大侣、河南鹤壁淇县 220kV 变电站率先采用了 IEEE 1588 技术进行建设，起到了很好的示范作用。

IEEE 1588（网络测控系统精确时钟同步协议）最初由 Agilent Laboratories（安捷伦实验室）的 John Edison 以及来自其他公司和组织的 12 名成员开发，后来得到 IEEE 的赞助，并于 2002 年 11 月得到 IEEE 批准。IEEE 1588 设计初期是用于测量和控制系统，后来受到自动化领域尤其是分布式运动控制领域的关注，而且其军事应用的初始计划也已经起步，远程通信和电力系统等相关组织也对其表现出浓厚的兴趣。IEEE 1588 的典型应用领域是实验室或产品测量和控制系统、工业自动化、电力系统或远程通信系统以及包含多个传感器、执行器、仪器仪表和控制器的分布式运动控制系统。国外方面，许多组织都已决定将该协议用于其基于现场总线的以太网网络。

当前，国内外对 IEEE 1588 在具体技术实现上更深入的研究在计算机、自动化领域已经展开，在协议的软、硬件模块结构、核心算法、应用方法、不同应用环境下的稳定性能以及协议扩展等方面的研究都取得了一定的成果。这些成果为协议在分布式系统中的实现奠定了基础。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去。

2003 年 ODVA（开放式网络设备供应商协会）计划在其实时控制应用的通用工业协议 CIP（Common Industrial Protocol）中加入时间同步服务，称为 CIP Sync，作为对 Ethernet/IP - CIP 的实时扩展。测试表明，如果采用 100Mbps 交换式以太网系统，CIP Sync 可以在设备间传递小于 500ns 的时间同步精度，符合最严格的实时应用的要求。EPSG（Ethernet Power Link 标准联盟）已经计划将该协议作为 EPL（Ethernet Power Link）第三版规范的固定内容。在第三版中，IEEE 1588 将用在跨越多个实时段的同步通信上，提供分布式的 EPL 应用。EPL 只需要标准以太网硬件，不需要专用的 ASIC，但必须通过网桥或路由器将实时通信与非实时通信分离。西门子公司也致力于用 IEEE 1588 修改其 PROFI net 的实时工业以太网解决方案，Ether CAT 也研究采用该协议或类似的方法来保证时间同步。这两种方案都需要专用的 ASIC。

综上所述，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。

1.3 时钟同步的概念

时钟同步包括频率同步（Frequency Synchronization）和时间同步（Phase Synchronization）两个方面。

1.3.1 频率同步

频率同步是指信号间的频率保持某种严格意义的特定关系。比如，有效瞬间表现为同一平均速率，以此维持通信网络中所有的节点以相同的速率运行。

数字通信中传递的信号是对原始信息进行编码后得到的 PCM（脉冲编码调制）离散脉冲。假如通信网中某两个节点之间的时钟频率不同，或者由于数字比特流在传输中因噪声干扰而叠加了相位漂移和抖动，便会在接收节点的缓冲存储器中产生码元的丢失或重复，最终导致比特流出现滑码。

1.3.2 时间同步

通常所说的“时间”有两种含义，即时刻与时间间隔。时刻是指连续流逝时间的某一瞬间，时间间隔是指两个时刻之间的间隔长度。

时间同步的定义便是根据接收到的时间来调节通信网络中节点的时钟和时钟所显示的时刻。时间同步与频率同步既有联系又有区别，它既调节时钟的频率同时也调节时钟的相位。由于相位和时间都是对频率的积分，所以又称时间同步为相位同步。同时，将时钟的相位（时间）进行量化，赋予数值表示，就是时刻。与频率同步不同的是，时间同步接受离散的时间信息，离散地调节节点时钟。

时间同步完成两个重要功能，即对时和守时。对时就是“对表”，通过不定期的对表操作，将本地节点的时刻与远端节点的标准时刻进行相位同步；守时就是频率同步，即在对表的间隙里，保证本地节点时刻与远端节点的标准时刻之间的偏差在一个允许的范围之内。

1.4 现有的几种时钟同步技术

现有的电信网中时钟同步技术，除了传统的 GPS、SDH/PDH 之外，还有同步以太网、电路仿真和包时钟三种技术，下面分而述之。

1.4.1 GPS 对时技术

电力系统规模的扩大以及电力系统控制技术的发展,对各调度系统以及发电厂和变电站的时间基准都提出了新的要求。实际上,电力系统内部信息交换量大、状态改变快,只有满足一定的时钟同步精度,才能对相位比较、故障记录、事件顺序启动等功能给予保障。因此,为了进一步提高电力系统运行管理水平,满足电力系统快速发展的要求,并提高对系统的控制能力和故障分析能力,首先必须提供一个统一的系统时钟,使整个控制系统内部各个站点的时钟保持同步。2002 年出现的 IEEE 1588 精确时间同步协议,特别是它可能达到的高精度和较低的开销为人们实现特定场所的应用提供了现实可行的途径。

随着国民经济的快速发展,电力系统对时间统一的要求越来越迫切,尤其是一些超高压变电站,对时间的同步精度要求越来越高,变电站运行人员对电网运行实时监视,发生事故后进行故障分析,这些都需要统一的时间基准。超高压变电站系统包括计算机监控系统,保护信息子站,功角测量系统以及众多的微机保护装置、测控装置、线路行波故障测距装置,要让这些安装在不同地点的电力设备装置和系统在同一时间基准下,必须接收同一的时钟信号。在这种形势下,变电站自动化系统必须选用可靠的 GPS 对时装置。

一、GPS 对时装置介绍

变电站常用的时间同步系统以全球定位系统 GPS 为时间基准, GPS 可以同时跟踪太空中的 24 颗 GPS 卫星,自动选择最佳星座进行定位、定时,可以满足电力系统时间同步要求。

以 220kV 变电站为例,一般重要的变电站均配置两台标准同步钟本体,可以通过切换装置互为备用,扩展装置能输出各种类型的对时编码信号,包括 IRIG-B(DC) 时间码、脉冲码以及串口时间报文等类型时间同步信号。对时系统在主控室组成一面屏,如果变电站有多个小室,对时系统通过光纤把主控室的对时设备与小室的对时设备连接起来。

主时钟与扩展单元之间、扩展单元与需要对时的各种智能装置之间,根据位置不同采用不同介质,在同一屏柜上采用扁平电缆。如果是小室变电站,主时钟与扩展装置之间采用光纤,扩展装置与需要对时的各种智能装置之间一般采用双绞线。

以常用的 SZ 系列 GPS 时钟为例, GPS 时钟由主时钟、切换装置和时间信号输出(扩展)单元组成。

- (1) 主时钟时钟：接收并处理 GPS 卫星信号。
- (2) 切换装置：当主时钟接收对时信号发生故障时，备用时钟能自动切换为主时钟。
- (3) 时间信号输出（扩展）单元：时间同步系统配置的 GPS 主时钟及时间同步信号扩展装置用于实现变电站自动化系统设备的时间同步，能提供满足这些设备需要的各种时间同步信号。

二、常见对时技术

由于对时技术在变电站自动化系统内占有举足轻重的地位，经济、可靠的对时实现方式成为广大电力系统技术人员追求的目标。最初，对时方式大多采用软件对时方式，然而在使用过程中发现系统时间会因通信过程而造成时间偏差，特别是当通信线路发生故障时，更加不能保证时间合格。随着厂家生产的系统逐步完善，就有了硬件对时方式，逐步实现站内智能设备的精确时间同步。下面对各种对时技术的实现方式作一下比较。

（一）串行通信接口方式

(1) 结构特点：GPS 通过通信报文将时间发送至总控通信单元，总控通信单元通过现场总线或串行总线，以对时广播报文的形式将时间信号发送给各个保护装置、测控装置和第三方智能设备，实现软件对时，系统一分钟发一次对时报文。

(2) 优点：省去了专用硬件设备，不需要单独敷设电缆，降低了成本。

(3) 缺点：由于对时总线经过多个环节，对时存在一定的时延，可能造成不同装置的时间会相差 1s 以上。

（二）脉冲对时方式

(1) 结构特点：GPS 装置通过脉冲扩展板将同步脉冲扩展、放大、隔离后输出，通过通信电缆与保护装置、测控装置和第三方智能设备连接，脉冲对时方式分有源和无源两种，常用空接点方式输入，一般脉冲信号有 1PPS 和 1PPM 两种。

(2) 优点：秒脉冲信号每秒钟发一个同步脉冲，装置接收到秒脉冲后，装置时钟清毫秒，在下一个秒脉冲到来之前，装置按内部时钟，保持一定的走时准确度。分脉冲在整分时发一个同步脉冲，脉冲对时能保证秒和毫秒的准确度。

(3) 缺点：需要敷设大量的对时电缆，且不能保证装置时间信息年、月、日、时、分信息的准确性。

(三) 脉冲对时方式和串行通信相结合的方式

(1) 结构特点：当前变电站普遍采用脉冲和串行通信相结合的对时方式，也是比较常用的对时方式，脉冲方式一般选取分脉冲。

(2) 优点：软件对时系统 1min 发一次对时报文，装置取其报文中的年、月、日、时、分、秒信息，脉冲对时能保证秒和毫秒的准确度。两者结合，能保证变电站智能设备时间同步。

(3) 缺点：也需要敷设大量的对时电缆，且对时方式相对来说比较复杂，需要两种方式相互配合。

(四) IRIG - B 码对时方式

(1) 结构特点：全变电站可以采用单一的 GPS 系统，GPS 可以通过光纤给各个小室下发 B 码对时信号。

(2) 优点：IRIG - B 码每秒发送一帧时间报文，其时间信息包含秒、分、小时、日期，并在整分或整秒时发出脉冲信号，装置收到脉冲信号和时间报文后，即可进行时间同步。采用 B 码对时，可以简化对时回路设计，提高对时的可靠性和准确性，B 码对时方式也越来越受到国内用户的欢迎。

(3) 缺点：需在智能装置上选用专用的 B 码解析芯片。

1.4.2 电路仿真技术

近年来，传统的电信网络正加速向以 IP 为中心的下一代网络演进。然而，在向全 IP 网络迈进的过程中，仍然有大量的传统电路交换线路存在，并继续承载着语音业务和部分数据业务的传输。传统电路交换线路尚有生命力，IP 网络还在不断发展之中，这些就导致了传统电路交换线路和 IP 网络必将长期共存，基于 IP 网的电路仿真（Circuit Emulation）技术也就应运而生。

该技术用分组交换网络，尤其是 IP 网络传输电路业务，延伸传统的 TDM 网络，要求 IP 网络对 TDM 线路数据实现透明传输，因此必须保证传输线路的服务质量，尤其是传输的语音质量、时延、时钟同步等指标能够做到和传统 TDM 线路可比拟。和 VoIP 相比，此项技术的复杂度和成本更低，在保留传统 TDM 设备的同时，实现向全 IP 网络的平滑过渡。基于分组的 TDM 传输技术已经出现一段时间了，根据传输模式的不同可分为 CESOIP（基于 TDM 结构的电路仿真）和 SATOIP（忽略 TDM 结构的电路仿真）。

忽略 TDM 帧结构的传输模式 SATOIP 技术在 TDM 线路与 IP 网络交接处安置 IWF（互联设备），并在 PSN 端（分组交换网端）通过 IWF 将 TDM 线路的连续比特流数据封装为固定长度的 IP 分组并发往 IP 网络，这些载有 TDM 数

据的 IP 分组通过 IP 网络到达 CE 端（客户设备端）互联设备，通过一定的机制将 IP 分组承载的有效数据恢复成连续比特流，最终发往该互联设备连接的 TDM 线路，如图 1.1 所示。

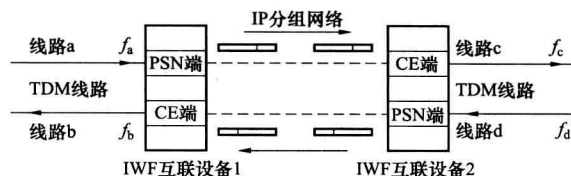


图 1.1 SATOIP 的技术原理

由于 TDM 线路往往是双向通信，因此在图 1.1 中，对于 TDM 线路 a 到线路 c 的传输方向而言，IWF1 是 PSN 端，IWF2 是 CE 端；对于 TDM 线路 d 到线路 b 的传输方向而言，IWF2 是 PSN 端，IWF1 是 CE 端。下面以线路 a 到线路 c 的传输方向为例进行分析。

目前对基于 IP 网络的电路仿真技术研究的焦点集中在时钟恢复机制上，这也是 SATOIP 系统达到性能要求的难点和关键。下面对较为成熟的时钟恢复机制进行阐述。

第一种时钟恢复的方法是使用环回时钟（Loop Timing）。环回时钟方法的应用范围十分有限，只有明确两端 TDM 线路的主从关系时，与 TDM 局端交换机相连的 IWF 才能使用环回时钟的方法；或已知两端 TDM 交换机已经被同步，两端 IWF 才能用环回时钟的方法来确定发往 TDM 线路的数据率。

第二种方法是差分时钟恢复（Differential Clock Recovery）。如图 1.2 所示，PSN 端和 CE 端能够得到公共的参考时钟 $f_{\text{reference}}$ ，PSN 端将 $f_{\text{reference}}$ 和 f_a 之间的差分信息以某种形式，如时间戳，通过 IP 网络传递给 CE 端。CE 端根据从

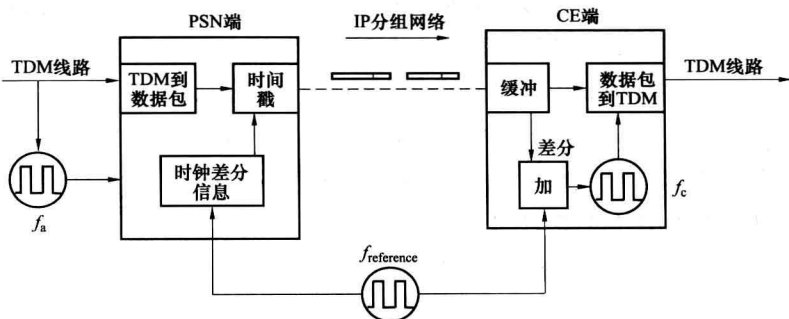


图 1.2 差分时钟恢复

PSN 端得到的时钟差分信息, 以及拥有的参考时钟信息, 就可以精确恢复时钟使得 $f_c = f_a$ 。差分时钟恢复机制所获得的恢复时钟精确度非常高, 和环回时钟方法相比, 无需知晓两端 TDM 线路的主从关系, 具有较广的应用范围。其局限性在于要求 PSN 端和 CE 端必须具有公共的参考时钟源, 例如两端 IWF 利用 GPS 设备以从卫星接收全球同步的时钟, 或都能得到来自同一 TDM 时钟域的参考时钟, 但这将大幅提高系统和设备的开销。

第三种方法是基于消抖缓存区占满率的自适应时钟恢复。这种方法无需两端 IWF, 具有相同的参考时钟源, CE 端依据接收到 IP 分组的平均到达率来恢复时钟。如图 1.3 所示, 数据从缓存区左边进入, 从右边读

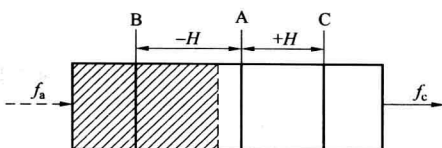


图 1.3 基于消抖缓存区占满率的
自适应时钟恢复机制

出。当满足 $f_c = f_a$ 时, 缓存区的平均占满率将保持不变, 依照前面提出的平均意义上 50% 的占满率, 设此时缓存区的占满率在刻度 A 处。若有 $f_c > f_a$, 显然缓存区平均占满率将降低, 图 1.3 中的阴影部分将慢慢向左方退去。当到达门限刻度 B 时, 对 f_c 进行频率减小校正, 因此可以根据观测缓存区的平均占满率来判断 f_c 和 f_a 的大小关系。可见, 消抖缓存区不但使 CE 端在接收 IP 分组数据时能够克服 IP 网络时延抖动的影响, 还实现了在频率恢复过程中对于瞬时收发频差造成数据累积的容忍。

因此基于缓存区占满率的自适应频率恢复机制可以确保频率 f_c 以频率 f_a 为中心小幅度波动。其优点在于两端 IWF 无需具有相同参考时钟源, 但缺点在于该机制需要较长的收敛时间, 恢复的时钟频率抖动也偏高。

第四种方法是基于时间戳的自适应时钟恢复, 与第三种方法类似, 都无需同步时钟源, 并依靠 CE 端接收到的 IP 分组平均到达率来恢复时钟, 不过, 该方法不再以缓存区的平均占满率作为频率校正的依据, 而是使用了精度更高的时间戳来完成, CE 端收到来自 PSN 端的 IP 分组的同时, 根据本地高频时钟赋予每个分组一个接收时间戳值, 并依靠有效的时钟恢复算法来对 f_a 做频率估计, 制订相应的调整策略。与基于缓存区占满率的自适应时钟恢复相机制比, 基于时间戳的自适应时钟恢复机制具有更高的频率恢复精确度, 性能也更为稳定。但这种方法却无法实现由于收发频率不一致而造成的数据偏移的容忍, 由于时钟的漂移会导致接收缓存区数据的溢出或者读空。

由此可见, 基于缓存区占满率以及基于时间戳的自适应时钟恢复机制具有

广阔的应用范围，无需知晓两端 TDM 线路的主从关系，也无需公共时钟源的存在，而频率恢复性能的优劣也就成了自适应时钟恢复机制的研究重点。因此，电路仿真技术一般采用联合的自适应时钟恢复机制，结合以上两种自适应恢复方法的优点，设计一套有效的算法和保障机制，恢复时钟性能达到 TDM 业务接口的指标要求，而且便于系统的全数字电路实现。

表 1.1 列出了几种时钟恢复机制的比较，从而可以直观地看出各算法的优势。

表 1.1 几种时钟恢复机制的比较

电路仿真方式	是否需要参考时钟	上下行主从关系	系统开销	恢复时钟的精确度	应 用 特 点
差分	是	不需要	高	高	设备代价大
缓存区	否	不需要	低	低	实现了对收发频差造成的数据偏移的容忍，但时钟抖动频率高
时间戳	否	不需要	低	高	频率恢复较稳定，但缓存区容易溢出或读空
自适应	否	不需要	低	高	时钟恢复精确度高，克服了 IP 时延抖动，实现了对数据偏移的容忍

1.4.3 同步以太网技术

通过以太网链路的码流提取时钟信息，从而达到上下行链路的同步，同步以太网（Carrier Ethernet）正是采用了这个技术。

众所周知，以太网从一开始就被设计成一个异步网络，因此它无需高精度的时钟亦能正常工作，所以大多数以太网设备都不配置高精度的本地时钟。但是这并不说明以太网不能提供高精度时钟信息。事实上，以太网在物理层（PHY）与 SDH 一样采用串行码流方式进行传送。因此，相应的接收端必须提供时钟恢复业务，否则仍然会出现滑码现象。也就是说，以太网本身具备了传递时钟信息的功能，只是平时我们没有充分利用罢了。

更进一步分析，借助特有的 PHY 层编码规则，以太网通过 PHY 层提取时钟信息的精确度甚至优于 SDH 的。众所周知，现代通信技术是基于数学统计原理的，码流中要是出现连续的长 1 或者长 0，将不会提供任何信息熵。换句话说，从上行链路的码流中提取时钟信息的前提是该码流必须包含足够多的时