

# 开放式网络化测控系统中的同步控制技术

Synchro-Control Technology in Open Networked Measurement & Control System

中国航空工业集团公司第一飞机设计研究院 支超有 李霞



支超有

研究员。从事飞机飞行控制系统与液压系统试验及其测试工作。在《测控技术》等 10 余种杂志发表学术论文 60 余篇。其中,两篇论文被 2007 年、2008 年国际测试大会(AUTOTESTCON)录用。出版技术专著《机载数据总线技术及其应用》。

现代测控系统的测量对象越来越复杂、越来越分散,信号采集和控制终端节点呈现开放式、网络化分布式发展趋势。各个终端节点常由小巧、灵活,具有丰富数据处理能力、易于实现控制和性价比很高的计算机系统构成,并配置功能强大、软件编

现代测控系统的测量对象越来越复杂、越来越分散,信号采集和控制终端节点呈现开放式、网络化分布式发展趋势。

程简单、界面友好的虚拟仪器平台。在这些应用系统中,对时钟同步的需求日益迫切,要求也越来越高,同步采集是这类分布式数据采集系统的一个基本要求,系统应用的便捷性和高效性则要求整个系统能进行实时数据通信。随着以太网技术的发展,网络化测试应用得越来越广泛,这使得分布式环境中的同步操作和实时数据通信变得更加迫切和重要。

网络化测量与控制的关键是要实现不同设备之间的同步与数据的实时传输——这也是网络化测试的难点,精确时钟同步协议 IEEE 1588 的提出,为实现不同设备之间精密时钟同步找到了方法。在深入分析 IEEE 1588 同步单元的体系结构、软硬件组成、精密时钟同步实现的基础上,分别针对网络化测量和控制系统中的具有时间标记数据同步获取、随机事件触发和定时周期事件触发 3 种基本模型,研究了同步和触发的实现原理及其在分布式测控系统中的

应用方法。

## IEEE 1588 体系结构及其实现原理

### 1 IEEE 1588 体系结构

在测控领域中,定时一直是测量的关键因素,对于大多数测量设备,定时是测量和控制的基准。在示波器、逻辑分析仪、频率计数器、频谱分析仪和信号源等设备中,定时被看作是设备本身内部的因素。在机架堆叠式环境中,对希望将 2 个或更多设备集成到一起的系统集成者来说,在现有的结构中,如果 2 种设备必须共享一个公共时间基准,由一台设备内部振荡器提供时钟输出,另一台设备则接收该信号,这些信号通常使用 BNC 电缆连接,保证多台设备之间的频率定时一致。上述方法所建立的时间精度误差大,如果在多仪器的测控系统中需要更精确的时间参考,目前应用的机制是软件、硬件触发技术。如 IEEE-488 系统中执行的成

组触发,由于控制器协议栈和设备消息分发的限制,定时精度并不是非常精确。

随着计算机网络的发展,许多应用领域对时钟同步的需求日益迫切,要求也越来越高。目前,有2种重要的时间同步技术,即网络时间协议(NTP)和直接连接时间传输。其中,NTP的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,如基于全球定位系统(GPS)接收模块,虽然有较高的同步准确度,但其实现需依靠单独的硬接线,故其在分布式网络系统中的应用有局限性。

2004年9月,Agilent公司和VXI科技公司联合推出了LXI(LAN Based Extensions for Instruments),这是一种适用于测控系统的新一代基于LAN的模块化平台标准。LXI总线不受带宽、软件和计算机背板体系结构的限制,而且能利用日益增长的Ethernet吞吐能力。

LXI是一种基于网络的仪器接口规范,为实现各种终端设备之间的同步控制,采用了以太网的精密时间协议(Precision Time Protocol, PTP),即IEEE 1588。IEEE 1588定义了一个在测量和控制网络中,与网络交流、本地计算和分配对象有关的精确同步时钟协议(PTP),能够达到亚微秒(sub microsecond)级的同步精度。协议中定义的各类同步报文均是基于用户数据报协议与网络

协议(UDP/IP)多播报文发送的,因此尤其适合在以太网上实现。

一个IEEE 1588精密时钟(PTP)系统包括多个节点,每一个节点都代表一个时钟,时钟之间由网络连接。按工作原理的不同,时钟可以分为普通时钟和边界时钟2种。二者的区别在于普通时钟只有一个PTP端口,而边界时钟包括多个PTP端口。在网络中,每一个时钟都可能处于以下3种状态:从属时钟(SLAVE)、主时钟(MASTER)和原主时钟(PASSIVE)。每个时钟所处的状态是由最优化的时钟算法决定的。

## 2 IEEE 1588 同步实现原理

IEEE 1588实现了分布式系统中设备之间更为精密的实时时钟同步,该同步是通过交换同一网络中带有定时的消息来实现的。在这种网络中,设备之间使用相同的网络通讯媒介,LXI总线中实现的IEEE 1588使用以太网作为通讯网络。

通常,IEEE 1588在所有参与通讯的设备之间定时,建立了高度一致的定时分辨率,所有的定时具有相同的时间起始点和时间间隔。IEEE 1588实现了主-从层次的时钟结构,在这种结构中,如果主时钟与如GPS这样标准定义的时钟源(UTC)同步,那么,IEEE 1588的时间刻度对准到UTC。这样,就要消除2种因素引起的定时源之间的误差,以提

供更为精确的同步定时。引起误差的原因有2个:本地的振荡器的不稳定和漂移和时钟之间通讯的反应。IEEE 1588声明了通讯反应波动的影响,振荡器的稳定主要在于选择的实现方面。

在IEEE 1588中,同步过程分为2个阶段:偏移测量和延迟测量。

### (1) 偏移测量。

偏移测量阶段用来修正主时钟和从属时钟的时间差。在这个偏移修正过程中,主时钟周期性地发出一个确定的同步信息(简称Sync信息,一般为每2秒一次),它包含了一个时间标记(time stamp),精确地描述了数据包发出的预计时间。

### (2) 延迟测量。

延迟测量阶段用来测量网络传输造成的延迟时间。为了测量网络的传输延时,IEEE 1588定义了一个延迟请求信息包(Delay Request Packet, 简称Delay\_Req)。

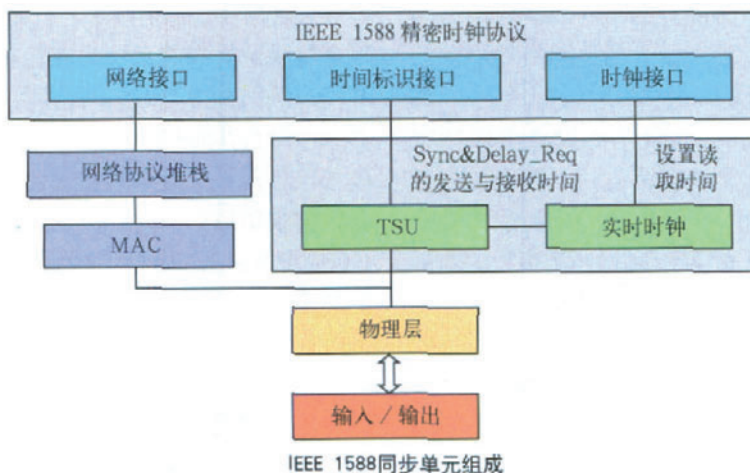
与偏移测量阶段不同的是,延迟测量阶段的延迟请求信息包是随机发出的,并没有时间限制。需要说明的是,在这个测量过程中,假设传输介质是对称均匀的。

## 开放式测控系统中同步实现

在基于公用定时的开放式测控系统中,实现设备同步有3种基本类型:具有时间标记的数据传输;随机事件触发;定时周期事件触发。

### 1 具有时间标记的数据传输

测控系统中,经常遇到控制设备与测量设备的定时同步问题,对基于LXI总线的测控系统而言,可以通过使激励信号或采样数据产生时间标记来保证定时同步的实现。控制器时间标记线路监视控制设备A和测量设备B信号发生的时间,捕捉信号的时间标记,或者捕捉其他与控制、采样过程及应用程序相联系的事件。这些事件的时间标记应用于基于定时的时间,以及与数据相关的采



集,涵盖了应用程序、典型的信号发生器和数据采集器,维持事件和数据的顺序等。

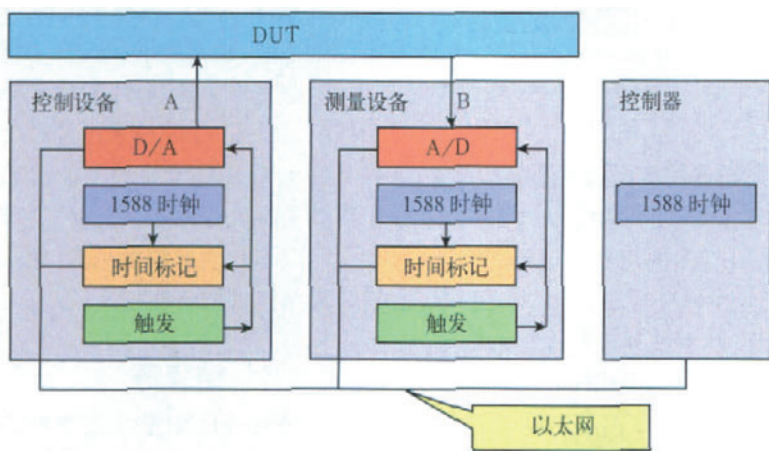
对于那些需要产生并且发送时间标记数据的事件而言,时间标记值是与数据一起传输的,这些时间之间需要保证一种相互关系,其相互关系受到产生数据设备的同步时钟精度

设备的细节。

- 测试描述。这类标识符指出所有测试仪器和测试过程的公共事件,包括了测试过程的开始、完成或校准完成。

- 应用描述。这类标识符仅仅对特定的应用具有意义。

设备接收到事件消息后,将准备



具有时间标记的数据传输

的限制。上述情况下所传输的数据是具有时间序列的数值,并且仅用于时间标记的开始和数值序列的间隔中,这种时间序列编码的缺点是难以识别数值的丢失。从上述分析可以看到,进行时间标记数据传输是 IEEE 1588 技术的基本功能,它能保证在分布式系统中实现相关事件和数据的精确顺序定时。

## 2 随机事件触发

在测控系统中经常要求检测事件的发生,例如检测一个设备的状态变化事件,并使用该事件驱动其他设备,这种情况可归纳为随机事件的触发。

随机事件触发过程中,设备 D 检测事件的申请,捕捉时间标记,记录其发生的时间,并发布包含有事件标识的时间标记消息,事件标识可以是:

- 仪器描述。这类标识符可以是设备 D 的内部状态变化。实际应用中仪器描述识别比较困难,这是因为为了翻译消息必须了解所有的接收

下一步的动作,采取基于标识符或是时间标记的动作,在传统的定时系统中,定时之类的动作仅仅是与接收消息的事件联系在一起的,可能会有暂时的抖动和延迟。而在基于 LXI 总线定时系统中,这些动作是基于事件实际发生时间的,传递消息的反应时间和抖动就非常重要,如果在接收消息之前就产生动作,就会因果倒置,发生不希望的结果。

设备 A 和设备 B 均有可设置的定时触发线路,为了实现两者之间的

同步操作,可以采取如下 2 种方式:

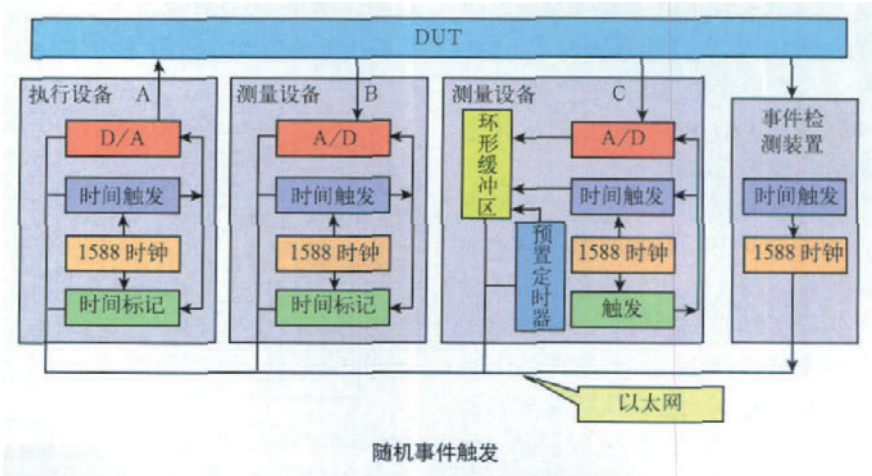
- 设置到预定的时间,以便在接收消息时间之前触发事件;

- 设置与事件的时间标记相关时间,保证应用程序所需要的高精度定时。

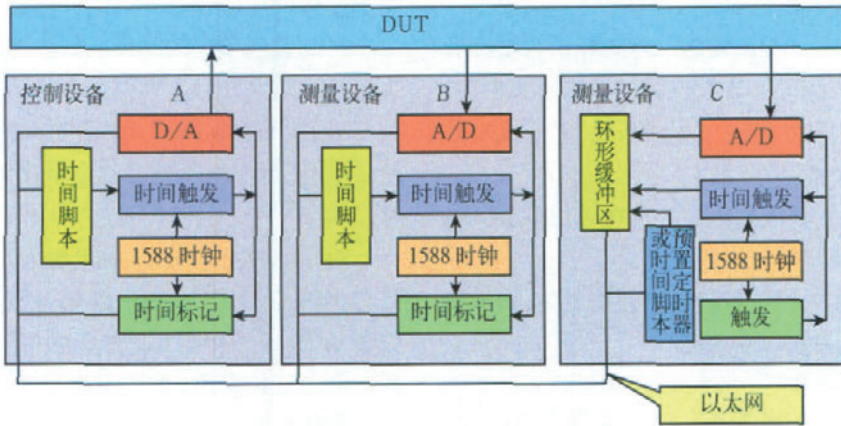
对定时动作控制可用于触发线路和本地的 IEEE 1588 时钟,例如设备 A 的 A/D 触发。在许多应用程序消息的传递中,虽然没有必要准确控制传递时间,但仍会有反应时间存在,这就必须保证因果关系不能倒置,即使在消息太迟传递或不能采取动作时,也不能因果倒置。

为了克服测量设备在消息传递中的反应时间,可以采用设备 C 所示的方法。在设备 C 中,测量的触发可以使用多种方法,例如快速周期性的采样,以及存储在环形缓冲区时间标记的结果数值。当接收到事件消息后,缓冲区保持不变,这时,通过比较事件的时间标记和缓冲区的时间标记就可以得到感兴趣的数据,在最大消息传输的反应时间、缓冲区大小和临时测量解决方案之间做出权衡。在上述情况中,事件和结果反应时间之间定时的精度是由同步时钟的精度和设备本身所决定,但消息的传递是独立的,不受其影响。

上述模型可用于复杂的工业控制系统中,如果系统中出现某种类型的故障,如通讯链路中断时,可通过执行指令对组成部件控制。允许



随机事件触发



时间确定性事件触发

“脚本程序”在缺少通讯链路情况下断定其它设备的工作状态。在测试应用中,这种模型的控制常常是围绕DUT的状态变化完成测试的。

### 3 确定性事件触发

测控系统中并不是所有事件都是随机发生的,许多动作都有确定的规律。这些确定事件可以是基于绝对时间、周期或相对于预先定义的事件。

基于时间的确定性事件中,应用控制程序通过时间脚本预配置每台设备,规定设备在确定的时间将要执行的动作,这些动作不仅包括像A/D、D/A触发这样一些简单的动作,而且还包括了像冻结缓冲区、发送事件消息,或传输数据块这样一些复杂的动作。这种方法在不同的应用中实现简单,但对多设备系统而言,其缺点是不够精确。

这种插入式事件模型广泛应用在测控系统中,用于创建大型试验中的试验执行顺序,许多情况下,这些脚本预先放置在分布式的设备中,在不需要主控制器参与的情况下,优化测量和测量的顺序。

对这种简单的调度模型的扩展就能实现基于时间的脚本程序周期性执行。在这里,基于时间的脚本程序指明了动作、原始动作时间,以及附加重复的间隔,此外,这些基于时间的脚本程序还允许执行复杂的定时关系,以实现精确的定时控制。比

如,它允许重复编程由不同频率发生器所产生的线性调频信号,对这些线性调频信号的使用和修改通过基于时间的脚本程序完成。

确定性事件触发的另一情况是周期性模型,常常应用在连续或长时间的监控中,分布式设备独立运行,但要保持它们之间的同步。要求任何结果数据都要带有时间标记,以便应用于稍后的相关处理中,大规模的工业系统中经常应用这种形式。

周期性模型除时间脚本的编写依照将来事件的时间外,与插入式模型完全一样。这种情况下开始时间不是绝对时间,这就为应用程序设计人员提供了更为灵活的功能,以创建包括分层关系在内的非常复杂的定时关系,时间脚本本身包含事件时间标记在内的事件消息和来自于原始消息的标识符。

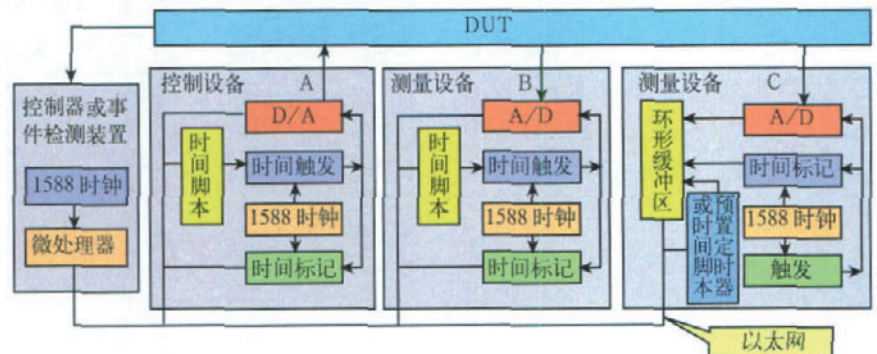
周期事件分层调度模型的复杂测控系统中,包含许多分支节点,每个分支节点在实际运行前并不知道

下个测量的动作顺序,该模型用于像工业控制应用场合、捕捉复杂运动剖面等情况时,必须执行周期性或基于事件的操作。常见的情况也出现在飞机功能系统试验中,必须实现对试验支持设备的调度控制、多通道的数据采集和试验激励信号的产生,以及像打印、基于WEB数据管理、现场监控等功能。使用该模型的时钟同步控制系统,常常应用在大型工程试验和工业生产中,除非用户需要标准的控制,IEEE 1588技术已经被接收并且在大型工程试验和工业自动化中得到了深入的应用。此外,这项技术也可以与其他如触发总线、硬件触发等成熟技术结合使用。

### 结束语

实现网络化测量与控制中不同设备之间的同步与数据实时传输具有重要的意义,是组建、集成大型工程试验测控系统的基础和关键。探索开放式自动测控系统的新技术、新方法,不但能满足像飞机飞行控制系统和液压系统这样综合试验中,对分布在多点的传感器的信号采集、信号激励和加载等同步测量与控制的要求,还可推广到飞机环控系统、燃油动力系统、航电系统等飞机功能系统试验中,以及飞机发动机、静力试验等方面。此外,形成融合多种测试总线的未来分布式测试新技术,有助于带动飞机功能系统试验测试技术的跨越式发展。

(责编 淡蓝)



周期事件的分层调度模型