文章编号:1671-4598(2026)10-0071-09 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2026.10.010 中图分类号:TP751 文献标识码:A

一种分布式振动爆炸冲击测试系统的设计

张 荣,吴自佳,张中礼,王军评,毛勇建,
周继昆,李 翀,黄海莹
(中国工程物理研究院 总体工程研究所,四川 绵阳 621900)

摘要: 为满足试验件的局域与广域多工号分布式振动及爆炸冲击环境试验测试需求,开展 1 km 局域与 100 km 广域多试验场地测试信号同步采集与传输技术研究,构建相关分布式测试网络并完成试验验证;针对 1 km 内信号传输,提出模拟信号远程光纤实时传输与复现技术,研制振动、爆炸冲击两类模拟信号传输复现装置实现信号传输;针对 100 km 广域测试,提出基于客户/服务器架构的广域组网方案,采用软件虚拟 PTP 精确时间同步协议与跨网段静态 IP 识别技术,实现广域分布式振动信号同步采集传输,阐述 PTP 协议编程要点;试验表明,1 km 内振动模拟信号可实现幅值±10 V、频率 2 kHz、群延迟 10 μs 的实时传输,爆炸冲击模拟信号可实现幅值 0~3.3 V、频率 2 MHz 的无失真传输;广域测试系统同步精度优于 10 ms,数据传输速率不低于 12.8 Mbps;所提技术与装置有效适配某试验产品的跨地域多工号分布式环境试验需求,为其分布式综合测试提供了完整可靠的技术解决方案。

关键词: 振动;爆炸冲击;分布式测试;信号传输与复现;100 km 级传输;客户/服务器

Design of a Distributed Vibration and Explosion Shock Testing System

ZHANG Rong, WU Zijia, ZHANG Zhongli, WANG Junping, MAO Yongjian,
ZHOU Jikun, LI Chong, HUANG Haiying
(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: To meet the test requirements of distributed vibration and explosion shock environmental tests with local and wide-area multi-channel scenarios on test specimens, research is conducted on the synchronous acquisition and transmission technology of multi-channel test signals within a local range of 1 km and a wide range of 100 km, which constructs a distributed test network, achieving experimental verification. For a signal transmission of within 1 km, a remote real-time optical fiber transmission and reproduction technology for analog signals is proposed, which develops two kinds of analog signal transmission and reproduction devices for vibration and explosion shock, completing signal remote transmission. For a wide range testing of 100 km, a wide range networking scheme based on client/server architecture is presented, which adopts software virtual precision time protocol (PTP) and cross-network static IP identification technology, realizing the synchronous acquisition and transmission of wide-range distributed vibration signals and describing the key points of PTP protocol programming. Experimental results show that within a range of 1 km, the vibration analog signal can be transmitted in real time with an amplitude of ±10 V, a frequency of 2 kHz and a group delay of 10 μs, the explosion shock analog signal can be transmitted without distortion with an amplitude of 0~3.3 V and a frequency of 2 MHz, the wide-range test system achieves a synchronization accuracy of over 10 ms and a data transmission rate of no less than 12.8 Mbps, and the proposed technology and device effectively adapt to the cross-regional multi-channel distributed environmental test requirements of a certain test product, providing a complete and reliable technical solution for its distributed comprehensive testing.

Keywords: vibration; explosion shock; distributed testing; signal transmission and reproduction; 100 km-level transmission; client/server

收稿日期:2026-01-09; **修回日期:**2026-03-09。
基金项目:中国工程物理研究院总体工程研究所快响课题(2024KX01)。
作者简介:张 荣(1979-),男,硕士,高级工程师。
引用格式:张 荣,吴自佳,张中礼,等.一种分布式振动爆炸冲击测试系统的设计[J].计算机测量与控制,2026,34(10):71-79.

0 引言

试验产品的结构振动试验、爆炸冲击试验等力学试验是检验产品环境适应性的重要手段，通常通过独立的试验产品整体级试验与部组件环境试验完成。通过测试整体级和部组件级的振动与爆炸冲击响应信号，评估试验产品的综合力学响应性能。但独立开展的试验在不同时间段进行，试验效率较低，随着试验产品研制进程的加快，亟需提升试验效率，分布式试验[1]技术应运而生。

分布式试验使整体级试验和部组件试验并行同步开展，整体级产品和部组件分别分布在不同距离的试验场地（后文简称：工号）中。试验时，整体级与部组件级试验之间需进行数据实时交互，同时融入试验产品的动作时序功能等。由于分布式试验与测试设备分布在局域（距离≤1 km）和广域（距离≥100 km）的不同工号，整体级和部组件试验的结构实时响应测试需通过分布式测试组网完成，即各测试仪器分布在各个工号，且需实现统一数据管控和协同同步测试。

分布式测试的核心是解决分布在不同距离处测试仪器同步采集时间统一问题。文献［2］提出基于 GPS 授时的无线分布式测试同步方案；文献［3］介绍基于 ARM 的分布式同步触发技术，在 ARM 中嵌入 IEEE 1588 PTP 精确时间同步协议实现网络仪器同步；文献［4］提出 GPS 授时＋ FPGA＋光纤传输的主/客分布式同步延时测量技术；文献［5］设计一种延时链循环比较法网络分布式测试仪器相对时延测试方法。上述方法均基于硬件同步实现 μs～ms 级分布式同步测试。

本文研究的产品分布式振动与爆炸冲击测试，因产品试验过程不许使用无线器件，各测试仪器无法采用 GPS 统一授时，也不能使用 GPS 结合 ARM、FPGA 等硬件平台的无线同步方式建立时统。为此，提出一种适用于 1～100 km 的混合组网分布式测试方案：对于 1 km 内的各工号试验测试，采用光纤模拟信号远程传输与复现的方式，实现振动、爆炸冲击模拟信号的实时硬件远程传输与复现；对于 100 km 级的远距离分布式测试，采用客户/服务器模式的组网测试技术，通过软件虚拟的 IEEE 1588 PTP v2 精密时间同步协议实现客户机与服务器间的信号同步采集与传输。试验应用表明，1 km 内振动信号同步测试精度为 10 μs，爆炸冲击信号同步测试精度为 1 μs，100 km 级的振动信号测试时间同步精度可达 10 ms 。

1 分布式测试系统网络架构设计

1.1 分布式测试应用需求

某产品的整体级试验及部组件级试验分布在 A～E 共 5 个不同距离振动试验工号进行。其中，A、B 工号距离为 500 m，A、C 工号距离为 1 km，A、D 工号距离为 100 km，A、E 工号距离为 120 km。整体级振动试验位于 A 工号，部组件级振动试验位于 B、C、D、E 工号，爆炸冲击试验位于 C 工号。

A－B、A－C、A－D、A－E 工号均建立光纤通信骨干网络，各工号布置振动与冲击测试仪器，实现信号的采集。测试时要求 A 工号仪器能协同控制 B、C、D、E 工号仪器进行数据实时采集与上传，且能实现 C 工号爆炸冲击信号的触发与响应信号的回传采集，时延精度为 μs 级，爆炸响应信号的脉宽为 0.5 s～2 μs，各工号的振动信号采样频率为 10 kHz，爆炸冲击信号采集频率≥10 MHz，各工号振动信号测试同步性≤10 ms。

1.2 分布式测试网络架构设计

根据产品分布式系统测试需求，构建振动冲击混合网络分布式测试系统架构，如图 1 所示。

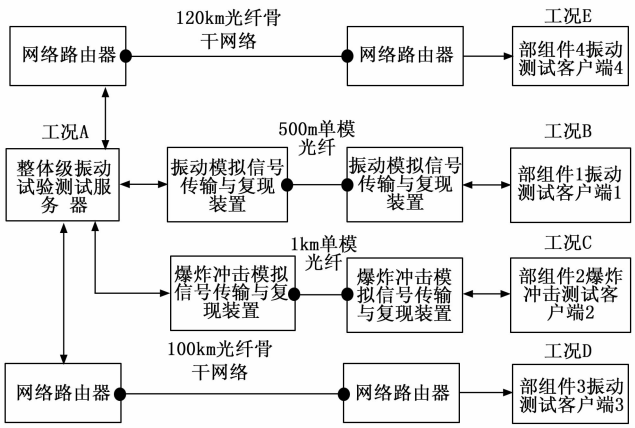

图 1 振动冲击混合网络分布式测试架构图

该架构由整体级振动试验测试服务器、部组件 1、部组件 3、部组件 4 振动测试客户端以及部组件 2 爆炸冲击测试客户端组成。

图 1 中，整体级振动试验测试服务器位于工号 A 中，为数据采集服务器，内含 100 kHz 采样频率多通道同步振动信号采集模块、40 MHz 采样频率的单通道爆炸冲击信号采集模块，1 000 Mbps 以太网卡，WIN10 操作系统。其功能包括：通过其内部 100 kHz 采样率数据采集卡负责整体级试验产品上各部位振动信号采集以及振动模拟信号传输与复现装置传递的工号 B 部组件 1 振动响应信号采集，通过 40 MHz 采集率采集卡完成爆炸冲击模拟信号传输与复现装置从工号 C 传来的部组件 2 爆炸冲击响应信号采集；并通过 1 000 Mbps 网卡连接网络路由器去发送数据采集控制命令控制 100 km 外的工号 D、工号 E 部组件振动测试客户端进行数据采集，该服务器内集成软件 PTP v2 精确时间同步协议实现服务器与远程测试客户端的时间 ms 同步。该测试服务器将产品的整体级振动试验各部位振动测试信号、分

布在远端的部组件振动信号、爆炸冲击信号进行汇集和统一存储。

图 1 中，各工号的振动测试客户端，为数据采集仪，内含 100 kHz 采样率多通道振动信号同步采集卡，含 1 000 Mbps 以太网卡，采用 WIN10 操作系统，内嵌软件 PTP v2 精确时间同步协议，通过网络路由器与整体级振动试验测试服务器相连，接收测试服务器的数据采集和时间对准命令，并将实时采集的部组件振动测试数据通过以太网传递至测试服务器中存储和分析。

图 1 中，振动模拟信号传输与复现装置，其功能是在部组件试验工号完成部组件振动信号的采集，并将采集的数字量通过单模光纤的高速串行传输至测试服务器安装工号的复现装置端，复现装置将数字量转化为模拟量后接入测试服务器进行部组件振动响应信号采集，采用全硬件模式远程传输和复现振动信号。

爆炸冲击模拟信号传输与复现装置，其功能是在部组件试验工号完成部组件 2 爆炸冲击响应信号的采集，并将采集的数字量通过单模光纤高速串行传输至测试服务器安装工号的复现装置接收端，复现装置将数字量转化为模拟量后接入测试服务器的 40 MHz 采集卡进行部组件爆炸冲击响应信号采集，采用全硬件模式远程传输和复现爆炸冲击信号。

针对不同工号距离，采用差异化传输方案：

对于 500 m～1 km 距离的信号测试，采用振动模拟信号传输与复现装置、爆炸冲击模拟信号传输与复现装置，通过光纤直连方式，将工号 A、C 的振动信号与爆炸冲击模拟信号直接传输至工号 A 的整体级振动试验测试服务器中进行采集、存储。该方案采用硬件直接传输模拟信号，不涉及网络路由器及 TCP/IP 网络协议，以 μs 级群延迟传输信号，确保采集实时性，避免网络同步授时开销。

对于 100 km 及 120 km 工号的振动信号采集与传输，各工号间以跨域光纤网为骨干网络，采用网络路由器和 TCP/IP 协议进行数据传输。工号 A 的测试服务器通过网络交换机向工号 D、E 的部组件振动测试客户端发送测控命令，并实时接收和存储测试客户端测试数据。测试服务器和测试客户端构建客户/服务器模式的广域通信网络，采用 软件虚拟 IEEE 1588 PTP v2 精密时间同步协议通过时钟校准实现分布式采集同步，同步精度不超过 10 ms。

2　振动、爆炸冲击模拟信号远程传输与复现分系统的设计

为解决短距离信号采集的同步性问题，对于短距离（≤1 km）各工号的客户端，采用模拟信号直接传输方式将振动信号、爆炸冲击信号发送至测试服务器进行采集，设计了相应的远程传输与复现分系统。

2.1　振动模拟信号传输与复现装置设计

振动模拟信号传输与复现装置技术指标如下：信号频率 0 Hz～2 kHz，信号幅值 ±10 V，输入阻抗≥1 MΩ，输出阻抗≤100 Ω，通道总数 8 个，通道同步精度≤10 μs。

振动信号远程传输与复现装置分为发送端和接收端两部分，发送端硬件构成如图 2 所示，接收端硬件构成如图 3 所示。

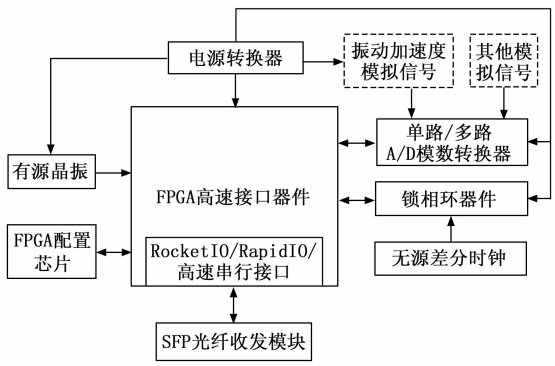

图 2　振动模拟信号传输与复现装置发送端构成图

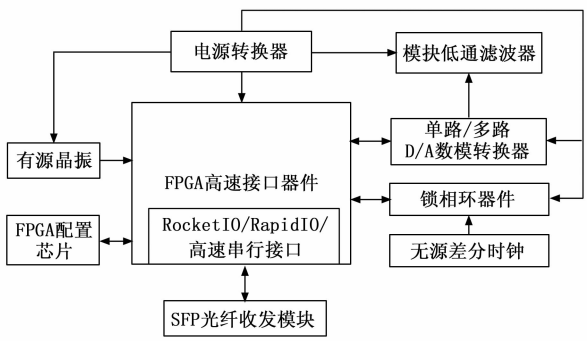

图 3　振动信号远程传输与复现装置接收端构成图

在发送端，A/D 转换器对幅值范围±10 V、－3 dB 频带 0.5 Hz～2 kHz 的振动加速度信号进行采集，将其转换为数字信号后送入 FPGA 的 FIFO 缓冲区。FPGA 将 FIFO 中的八路信号按一帧封装，添加帧头同步信号和非平衡 K 码后，并行送至 FPGA 的 ROCKETIO[6-10] 高速串行发送接口执行并串转换，转换后传输速率 2.5 Gbps，通过 LVDS 接口加载至 SFP 光纤收发模块向接收端发送。该装置振动信号的 A/D 采样频率为 100 kHz，A/D 器件的输入阻抗为 1 MΩ。

接收端的 FPGA 通过 ROCKETIO 的同源时钟检测，去除同步时钟码，对高速数字码流执行串并转换，去除自定义数据同步帧后，解码出 8 个通道的数字信号，并将其同时分发至 8 个高精度 D/A 转换器执行同步 D/A 转换，将数字信号还原为模拟信号。由于转换

后的模拟信号存在不连续台阶和偶次谐波现象，在其后增设高性能二阶 Sallen-Key[11-14]模拟低通滤波器，使复现后的模拟信号连续，实现八路模拟输入信号的光纤远距离传输与复现。

实际应用时，发送端作为工号 B 测试客户端，工号 A 测试服务器端作为接收端，客户端向服务器端传输延时可控制在 10 μs 左右（1 个采样点），满足短距离（≤1 km）分布式振动试验实时测控的技术需求。

SFP 光模块的收发采用单模光纤，波长 1 550 nm/1 310 nm，最长传输距离 20 km。

2.2 爆炸冲击模拟信号传输与复现装置设计

爆炸冲击模拟信号传输与复现装置技术指标如下：信号频率 1～2 MHz，信号幅度 0～3.3 V，输入输出阻抗 50 Ω，通道总数 1 个，通道同步精度≤1 μs。

爆炸冲击信号远程传输与复现装置分为发送端与接收端两部分，发送端硬件构成如图 4 所示，接收端硬件构成如图 5 所示。

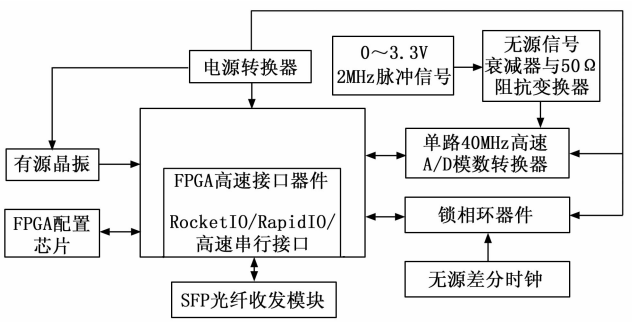

图 4 爆炸冲击信号远程传输与复现装置发送端构成图

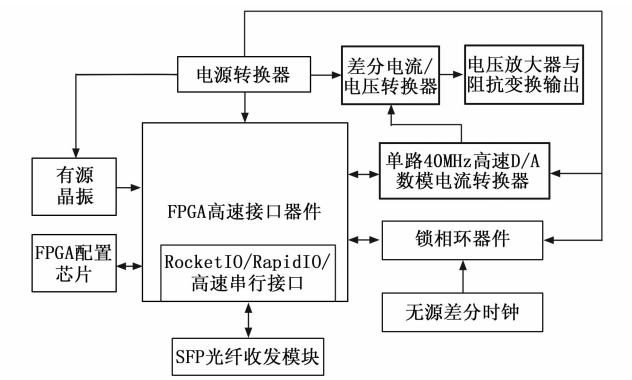

图 5 爆炸冲击信号远程传输与复现装置接收端构成图

发送端负责接收引爆装置输出的阻抗 50 Ω、幅值 0～3.3 V、频率 1～2 MHz 的脉冲信号，通过无源信号衰减器将信号幅值衰减至±1 V，适配 40 MHz 高速 A/D 模数转换器量程并进行量化。40 MHz 的 A/D 采样精度可确保完整获取 2 MHz 范围内的爆炸脉冲信号。无源信号衰减器采用纯 T 型电阻网络，衰减后信号阻抗仍保持在 50 Ω，不影响信号传输特性。

接收端主要通过光纤收发器接收始端发送的数字信号，按照 40 MHz 高速 DAC 模式将数字信号转换为差分电流输出。高频信号恢复未采用直接数字转电压的 DAC 模式，而是采用数字转电流的 DAC 模式。40 MHz 高速 DAC 输出脉冲电压对应的差分脉冲电流，通过差分脉冲电流转电压方式复现出幅值 0～0.4 V 的高频脉冲电压。由于该电压与始端发送的 0～3.3 V 幅值电压存在差异，增设电压放大器和阻抗变换器，将 0.4 V 电压放大至 3.3 V，完成爆炸冲击脉冲信号的幅值复现。

在分布式振动试验中，雷管引爆装置输出的衰减后引爆模拟信号（频率≤2 MHz）接入装置信号发送端。发送端的 FPGA 高速接口器件驱动单通道 40 MHz 高速 A/D 模数转换器对输入脉冲信号进行采样，形成数字信号并送入 FPGA 的 FIFO 缓冲区。FPGA 将 FIFO 数据按单通道信号为一帧，添加帧头同步信号和非平衡 K 码后，并行送至 FPGA 的 ROCKETIO 高速串行发送接口执行并串转换，转换后传输速率为 2.5 Gbps，通过 LVDS 接口加载至 SFP 光纤收发模块向远端发送。

在装置信号复现端，FPGA 通过 ROCKETIO 的同源时钟检测，去除同步时钟码，对高速数字码流执行串并转换，去除自定义数据同步帧后，解码出单通道数字信号并送入 40 MHz 高速 D/A 转换器执行 D/A 电压/电流转换，将数字信号转换为模拟电流信号。转换后的模拟电流信号通过电流/电压转换器转换为低电压信号，经放大跟随后形成阻抗 50 Ω、电压幅度 0～3.3 V 的脉冲电压信号，送入工号 A 中测试服务器采集，满足分布式试验振动台上的爆炸冲击应用测试需求。由于采用 40 MHz 时钟复现信号，高速 DAC 每个时钟周期更新数据，信号同步精度主要受限于光纤传输时间延迟，控制在 0.5 μs 量级。

3 客户/服务器的网络测试架构

针对 100 km 及 120 km 距离的工号 D、E 客户端测试，采用工号 A 的测试服务器和网络交换机，通过 TCP/IP 协议远程控制工号 D、E 的测试客户端，并采用软件虚拟 IEEE 1588 PTP v2 精确时间同步协议实现测试服务器主时钟与远程测试客户端副时钟的同步控制。

3.1 测试服务器/测试客户端功能划分

测试服务器内嵌软件 IEEE 1588 PTP v2 精确时间同步协议模块，主要功能包括：向测试客户端发送启动采集、启动传输、时钟校准等服务命令；执行远程测试数据存储与集中分析。

测试客户端同样内嵌软件 IEEE 1588 PTP v2 精确时间同步协议模块，核心功能为：接收测试服务器发送的 PTP 报文，对测试客户端副时钟进行动态校准，实

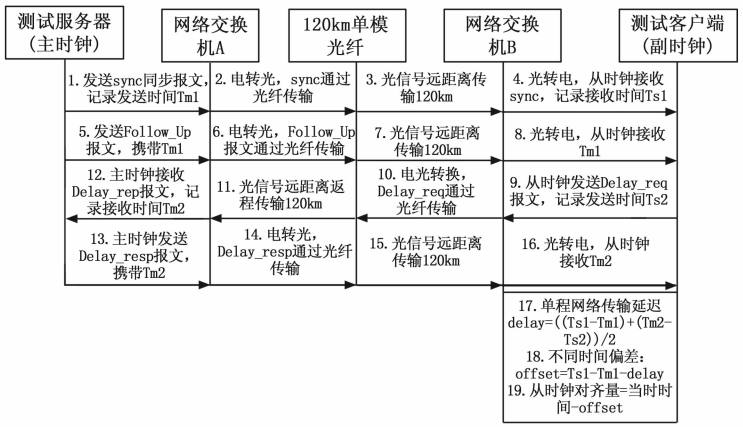

图 6　客户/服务器网络架构的 PTP 时间同步调整示意图

现与测试服务器主时钟的 ms 级对齐；被动侦听测试服务器发送的网络测控命令，执行多路振动信号的同步采集，并将采集数据通过跨网域网络上传至测试服务器保存。

3.2　测试服务器/测试客户端的时钟同步

测试服务器内部时钟作为网络主时钟，测试客户端内部时钟作为网络副时钟，主时钟通过 IEEE 1588 PTP v2 协议动态调整副时钟，实现主从时钟同步，PTP v2 协议调整算法如图 6 所示。

主系统通过光纤网络向从系统发送 Sync 同步报文、Follow _ Up 报文，获取发送时间 Tm1 和接收时间 Ts1，得到一次单向广域网络延迟时间 delay1；从时钟向主时钟发送 delay _ req 报文，主时钟收到后发送 Delay _ resp 报文，记录从时钟发送时间 Ts2 以及主时钟发送时间 Tm2，得到网络回程传输单向延迟 Delay2。通过 delay1 和 Delay2 计算出单次网络平均延迟 delay，进而得到副时钟与主时钟的偏差时间 offset，副时钟通过当前时间减去 offset 时间，即可调整至与主时钟同步。

理论上，采用硬件 IEEE 1588 PTP v2 协议可使测试服务器与测试客户端的时钟同步误差达到 μs 级，但这要求测试服务器、测试客户端、网络交换机等均需带有 IEEE 1588 PTP v2 协议功能，采用硬件时间戳得到精确主时钟对副时钟同步调整，而实际应用中测试服务器和交换机均未带硬件 PTP v2 协议模块，故要实现测试服务器和测试客户端网络时间同步，本文采用在 WIN10 系统中编写软件虚拟 IEEE 1588 PTP v2 协议完成，这种方法能实现 10 ms 内的分布式网络时间同步，满足振动分布式测试需求。实现方法：

第一步：测试服务器 IP：10.202.10.11，网关：10.202.10.254，工号 D 测试客户端 IP：10.203.72.10，网关：10.203.72.254；网络路由器开启三层转发功能，使测试服务器和测试客户端能 ping 通，同时设置路由器不拦截 UDP，放行 PTP v2 协议涉及通信端口，此处设置为事件端口 319，关闭防火墙，服务器与客户端均以管理员身份登录；

第二步：软件虚拟 PTP v2 程序流程：测试服务器软件虚拟 PTP 协议流程如图 7 所示。测试客户端软件虚拟 PTP 协议流程如图 8 所示。

第三步：编程实现，编程开发环境选择 VS2019，采用 C＋＋语言。测试服务器、测试客户端的本地软件时间戳采用 WINDOWS API 函数：获取 CPU 定时/计数器当前值 QueryPerformanceCounter 函数以及获取 CPU 主频 QueryPerformanceFrequency 函数，通过两函数获取软件时间戳；校准系统时间使用函数 SetSystemTimePreciseAsFileTime。



图 7　测试服务器软件虚拟 PTP 协议流程图



图 8　测试客户端软件虚拟 PTP 协议流程图

获取软件时间戳关键代码为：

```
uint64_t GetSoftwareTimestamp()
{ LARGE_INTEGER freq,cnt;
QueryPerformanceFrequency(&freq);
QueryPerformanceCounter(&cnt);
//获取 ns 级时间戳代码
return cnt.QuadPart * 1000000000/freq.QuadPart;}
```

客户端 PTP v2 协议设置系统时间采用 64 位设置系统时钟函数 SetSystemTimePreciseAsFileTime，其精度高于 100 ns，之间时间转换关键代码为：

```
viod SetSystemTimeFromPTP(uint64_t systime)
```

```
{ FILETIME ft;ULARGE_INTEGER ul;
ul.QuadPart=systime/100+116444736000000000;
ft=ul;
SetSystemTimePreciseAsFileTime(&ft);}
```

PTP v2 报文类型及报类型定义如下：

```
define PTP_SYNC 0
define PTP_FOLLOWUP 1
define PTP_DELAYREQ 2
define PTP_DELAYRESP 3
define PTP_PORT 319
Typedef struct{
Uint8_t type;uint16_t seq;uint64_t sec;uint32_t nsec;}
PTP_PKT;
```

采用上面关键代码结合 PTP v2 协议的时间同步流程完成测试服务器与远程测试客户机的时间对准，其他如初始化 Winsock 代码、网络点对点端口通信 sendto 代码等为网络通用代码，篇幅限制此处不赘述。受网络数据传输量变化影响，网络传输延迟并非固定值，因此测试时需不间断动态校准测试客户端的副时钟，本文按照 1 s 循环校准客户端副时钟。对于 100 km 级振动信号的跨域采集与传输测试，测试服务器与测试客户端的时间同步误差不超 10 ms。

3.3 测试服务器与客户端的网络寻址方案

本文采用测试服务器通过光端交换机（集成光端机与网络交换机功能）跨 100 km 光纤，实现对分布式跨网域测试客户机的主动访问，核心架构遵循“测试服务器主动发起寻址→光端机传输→测试客户机被动响应”的主动网络寻址逻辑进行网络互连，采用“三次握手”机制。

网络互连前，需设置各工号网络路由器打通广域网络物理连接，并配置测试服务器、光端交换机、客户机的静态 IP 地址、网关及静态路由地址；测试客户机通过 Socket 编程实现 8080 端口监听。

“三次握手”机制具体流程如下：

第一次握手：测试服务器采用 TCP 协议，按照广域测试客户机的 IP 地址依次向测试客户机发送“CONNECT”主动互连命令；测试客户机上电后持续监听 8080 端口，监听到互连请求后，向测试服务器发送“RESPONSE”命令。

第二次握手：测试服务器向测试客户机发送“数据采集板卡确认”指令；若测试客户机数据采集板卡正常，则向测试服务器发送“DAQ READY”指令确认。

第三次握手：测试服务器向测试客户机发送“PTP 时钟校准指令”；测试客户机接收指令后，按照 PTP 协议算法与测试服务器相互发送 UDP 报文，完成 PTP 报文分解和网络延迟计算后，向服务器发送“完成校准”指令。

三次握手机制完成后，测试服务器和测试客户机均进入网络数据采集等待状态。

4 分布式试验测试应用验证

为验证网络分布式测试效果，开展某试验产品的分布式振动爆炸冲击试验，在 5 个不同距离的工号进行振动和爆炸冲击试验，采用混合网络布局模式，如图 9 所示。

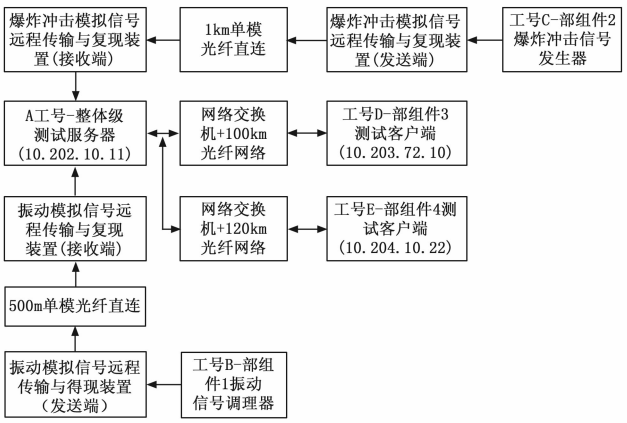

图 9 分布式试验混合测试网络实际布局图

图 9 中，某产品试验包括整体级振动试验、部组件 1～部组件 4 共 4 个部组件试验，分布在 5 个距离不同的工号同时进行，距离范围分布在 500 m～120 km 内。

在工号 A 中布置产品整体级振动试验测点及测试服务器、交换机、路由器、爆炸冲击模拟信号传输与复现装置（接收端）、振动模拟信号传输与复现装置（接收端），用于整体级振动信号测试以及分布式测控网络的主控数据采集与分析节点，其通过骨干光纤与工号 D、工号 E 的骨干光纤实现网络互连，测试服务器通过以太网和软件 PTP v2 协议控制远程工号部组件振动试验测试客户端的振动数据采集。同时，测试服务器直接采集由爆炸冲击模拟信号远程传输与复现装置（接收端）接收的工号 C 的部组件爆炸冲击模拟信号以及直接采集由振动模拟信号远程传输与复现装置（接收端）接收的工号 B 的部组件振动模拟信号。

在工号 B 中布置产品部组件 1 的振动试验测试设备，包括振动信号调理器，振动模拟信号远程传输与复现装置（发送端），该发送端通过 500 m 的单模光纤与工号 A 中的振动模拟信号远程传输与复现装置接收端相连，发送端采集振动信号调理器输出的部组件振动信号为数字信号后通过光纤传递至接收端作 D/A 转换和低通滤波后恢复发送端振动信号，送测试服务器采集。

在工号 C 中布置产品部组件 2 的爆炸冲击试验测试设备，爆炸冲击信号产生器、爆炸冲击模拟信号远程传输与复现装置（发送端），该发送端通过 1 km 的单模光纤与工号 A 中的爆炸冲击模拟信号远程传输与复现装

置接收端相连，发送端采集部组件爆炸冲击信号产生器的信号为数字信号后通过光纤传递至接收端作 D/A 转换和低通滤波后恢复出发送端爆炸冲击信号，送测试服务器采集。

在工号 D 中布置部组件 3 的振动试验测点及测试客户端、交换机、路由器、振动信号调理器，工号 D 通过 100 km 光纤骨干网络与工号 A 相连。测试客户端采集振动信号调理器的输出的振动信号，并接收测试服务器发送的 PTP v2 时间同步参数校准自身系统时间，并通过以太网将部组件 3 的振动测试数据发送到测试服务器中。

在工号 E 中布置部组件 4 的振动试验测点及测试客户端、交换机、路由器、振动信号调理器，工号 E 通过 120 km 光纤骨干网络与工号 A 相连。测试客户端采集振动信号调理器的输出的振动信号，并接收测试服务器发送的 PTP v2 时间同步参数校准自身系统时间，并通过以太网将部组件 4 的振动测试数据发送到测试服务器中。

A 工号测试服务器静态 IP：10.202.10.11，D 工号测试客户端静态 IP：10.203.72.10；工号 E 测试客户端静态 IP：10.204.10.22。

以测试服务器的系统时钟为主时钟，测试客户端的系统时钟为副时钟，测试服务器通过软件获取自身系统软件时间戳，并通过 PTP v2 协议对各测试客户端系统时间进行校准，从而实现分布式测试系统的时间统一。

4.1　分布式试验与测试流程

1）试验准备及测试初始化：测试服务器上电、测试客户端上电初始化等待、各网络初始化、爆炸冲击模拟信号传输与复现装置上电、振动模拟信号传输与复现装置上电初始化；

2）网络状态检测：设置测试服务器与测试客户网络 IP 及通信端口，工号 A 的测试服务器分别 ping 通工号 D 测试客户端、工号 E 测试客户端；

3）在测试服务器中运行主端 PTP v2 协议代码 master _ PTP，在各测试客户端中运行终端 PTP v2 协议代码 client _ PTP，每隔 1 s 由测试服务器系统时间校准测试客户端校准时间，直到程序中的 offset 时间偏差参数基本恒定后停止校时，此时测试服务器与测试客户端时间同步；

4）测试服务器通过网络向工号 D 测试客户端、工号 E 测试客户端发送数据采集与传输命令，测试客户端接收到采集命令执行数据采集并通过以太网向测试服务器发送振动试验数据（此时部组件振动台尚未启动）；测试服务器直接采集工号 C 中爆炸冲击模拟信号远程传输与复现装置发送来的部组件 2 爆炸冲击信号（此时部组件 2 爆炸冲击发生器尚未动作），测试服务器采集工号 B 中振动模拟信号远程传输与复现装置发送来的部组件 1 振动信号（此时部组件振动台尚未振动）；

5）整体级振动台启动开展随机振动试验、远程部组件振动台启动开展随机振动试验，测试服务器与测试客户端均处于正式试验振动数据采集过程，同时工号 B 的部组件爆炸冲击信号发生器持续监控振动台量级是否达到要求；

6）工号 B 部组件振动量级满足要求，爆炸冲击信号发生器产生引爆信号，并将引爆信号衰减后送爆炸冲击模拟信号远程传输与复现装置发送端，通过光纤传输至工号 A 中测试服务器进行采集存储；

7）振动试验结束，测试数据保存。

4.2　振动模拟信号传输与远程复现效果

试验中，将研制的振动模拟信号传输与复现装置接入振动信号调理仪的信号输出端，两套装置之间采用 100 m 单模光纤连接。为对比振动模拟信号的传输与复现效果，将振动信号调理器测量的部组件 1 轴向随机振动测点响应信号 A1 作为输入信号进入复现装置发送端，通过复现装置接收端恢复后的振动响应信号 A2，采用测试服务器软件对 A1 和 A2 信号进行采集和分析。A1 信号、A2 信号的 PSD 谱如图 10 所示。

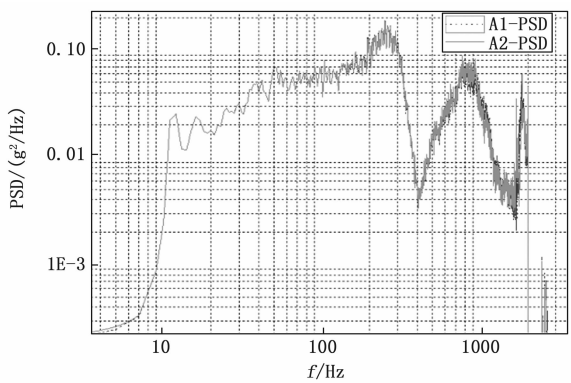

图 10　A1、A2 振动实测信号 PSD 谱图

多轮对部组件 1 轴向 A1 振动测点和远程传输复现的 A2 实测信号进行 PSD[17-18] 计算，在不同振动量级下的 *RMS*[19-20] 得到如表 1 所示的比对结果。

表 1　A1 振动信号及复现 A2 信号 PSD 谱 *RMS* 对比表

序号	信号	−9 dB *RMS*/g	−6 dB *RMS*/g
1	A1	3.890	5.480
	A2	3.890	5.470
2	A1	5.09	5.490
	A2	5.09	5.490
3	A1	—	5.930
	A2	—	5.930
4	A1	—	5.870
	A2	—	5.865

由图 10 和表 1 可知，振动测点 A1 信号与光纤远程传输复现至测试服务器端 A2 信号 PSD 谱高度一致，验证了远程传输与复现装置设计的正确性。同时，通过对比 A1、A2 时域信号的相位，发现信号 A2 相对信号 A1 的群滞后时间为 1 个采样点，传输与复现装置按照 100 kHz采样频率计算，500 m 光纤传输下信号采集同步时间控制在 10 μs（1 个采样点延迟）。

定义波形幅度给定值 $A_{真}$，实测幅值为 $A_{测}$，幅值相对误差 r_A 为：

$$r_A = \frac{A_{测} - A_{真}}{A_{真}} \times 100\% \tag{1}$$

定义波形频率给定值 $f_{真}$，实测幅值为 $f_{测}$，频率相对误差 r_f 为：

$$r_f = \frac{f_{测} - f_{真}}{f_{真}} \times 100\% \tag{2}$$

振动波形幅值相对误差 r_A 为 2%，频率相对误差 r_f 为 0.4%。

分析幅值误差产生原因：振动模拟信号远程传输与复现采用硬件模式为：发送端 A/D 采集器＋ROCKETIO＋单模光纤＋接收端 D/A 转换器＋Sallen _ Key 低通滤波模式。首先，光纤 ROCKETIO 直接传输数字信号，不存在传输数据失真，幅值误差出现在 A/D 采集器、D/A 转换器器件以及滤波器上。其中，A/D 采集器产生幅值误差来源：通道输入阻抗为 1 MΩ，振动信号调理器输出阻抗控制在 100 Ω 内，则阻抗带来的幅值误差可达 0.01%，另外 ADC 的内部参考电压因为温漂以及外部电压波动也会改变精度，直接导致 A/D 转换误差，ADC 的积分非线性 INL 以及微分非线性 DNL 也是幅值误差源；对于 D/A 部分，D/A 转换器的 DAC 增益误差、参考电压 REF 误差以及 DAC 非线性误差都带来信号复现失真；同时采用 Salley _ Key 低通滤波器在 2 kHz 带宽内也将产生幅频误差。几项因素综合作用导致振动模拟信号的幅度失真。

频率误差产生原因：A/D 采样时钟频率偏差是主要来源，包括晶振/时钟源本身频率偏差、温漂，时钟抖动造成的等效采样时刻偏移和非均匀采样，直接引起频率偏移；A/D 量化与非线性误差恶化信噪比与频谱纯度。D/A 重建误差也是误差来源，主要表现在 DAC 建立时间不足，输出波形不是理想阶梯波形，产生偶次谐波成分；输出级运放的压摆率和带宽限制造成谐波失真、频谱泄漏，同样造成频率误差与杂散；另外，重建滤波器群时延失真，部分频率分量出现衰减和相移畸变，表现为重建后信号频率不稳定。

4.3 爆炸冲击模拟信号远程传输与复现效果

工号 C 的爆炸冲击信号通过研制的爆炸冲击模拟信号传输与复现装置，经 1 km 光纤传输至测试客户机。在工号 C 发送频率 0.5～2 MHz 的爆炸冲击信号至工号 A，实测原始爆炸冲击波形与测试服务器端实测波形的幅值与频率对比结果如表 2 所示。

表 2 爆炸冲击信号远程复现幅值与频率性能表

爆炸波幅值/V	频率/MHz	复现幅值/V	复现频率/MHz	幅值误差/%	频率误差/%
1	0.5	1.005	0.498	0.5	−0.4
1	1	0.995	1.005	−0.5	0.5
2	2	1.978	1.998	−1.1	0.1
3.3	1	3.220	1.005	−2.42	0.5
3.3	2	3.198	1.997	−3.09	0.15

由表 2 可知，爆炸冲击信号传输与复现装置可实现最大频率 2 MHz、最大幅度 3.3 V 的爆炸脉冲波形复现，波形幅值相对误差 r_A 为 3.1%，频率复现相对误差 r_f 为 0.5%，验证了该装置设计的正确性和有效性。同时，通过对比输入与输出脉冲信号的相位，爆炸冲击信号的传输群延迟优于 1 μs（2 个采样点）。

信号幅值误差产品的原因：爆炸冲击模拟信号采用 T 型电阻衰减网络＋发送端 A/D 采集器＋RocketIO＋单模光纤＋发送端 D/A 转换器＋二次放大电路组成。对于幅值误差，其主要来源于 T 型电阻衰减网络的匹配电阻误差引起的幅频误差以及因与后级 A/D 阻抗不绝对匹配产生的幅度误差、高速 A/D 采集器件为 10 位低分辨率器件，其幅值量化误差大，信噪比仅 59.5 dB，器件精度低引起信号幅值误差；另外，在 D/A 方面，D/A 转换器的满量程误差以及增益误差均达±15 LSB，这些也是复现信号幅值失真主要因素；后续放大电路的增益误差以及积带宽限制也是幅值误差的主要来源，各环节综合作用得到信号幅值误差 3.1%结果。

频率误差主要来源：A/D 采集器的采样时钟出现频率误差引起全系统信号频偏和相移，造成非均匀采样，从而产生频率畸变、频偏、相位失真等，再通过 D/A 转换器对数字信号进行 D/A 输出，输出将保留并放大产生频率误差的信号，再叠加复线端的电压放大器和滤波器，各级均持续保留初级带频率误差的信号；甚至在高速信号传输线上出现信号阻抗未完全匹配时（通常采用 50 Ω 输出阻抗），也将产生波形频率畸变，这样综合在复现端检测到爆炸冲击信号的频率误差。

4.4 客户/服务器跨网振动试验实测效果

测试服务器选用浪潮某型数据服务器，测试客户端选择某型八通道振动信号数据采集仪，网络交换机和路由器均采用不带 PTP v2 协议的设备。连续 5 次实测 100 km 距离工号 D、120 km 距离工号 E 的网络延迟，并通过测试服务器校准测试客户端系统时间，时间同步精度测试数据如表 3 所示。

表 3　实测网络延迟与时钟同步校准表

测试次数	100 km 网络延时/ms	100 km 时钟校准/ms	120 km 网络延时/ms	120 km 时钟校准/ms
1	42.3	9.2	58.7	9.9
2	40.1	7.0	56.3	9.5
3	41.5	8.4	57.5	8.0
4	39.8	6.7	55.9	9.6
5	40.7	7.6	56.8	10.0

由表 3 可知，测试服务器通过软件虚拟 PTP v2 协议对测试客户机进行系统时间校准后，网络同步精度可控制在 10 ms 内。

由表 3 可知，采用软件时间戳而非硬件时间戳模式进行 PTP v2 协议的测试服务器对测试客户端系统时间校准，时间同步精度在 10 ms 级左右，时间同步精度主要受软件时间戳精度、WIN10 系统调度、网络延迟等影响。软件时间戳在内核/用户态打标，而非硬件打标，通过用户态→内核 socket→网卡驱动→MAC 层，越上层延迟越大，是时间同步最大误差源；由于采用常规网络交换机与路由器，不具备硬件 PTP v2 协议网络时间延迟修正功能，只是转发时间标签，这些设备将引入 1～2 ms 网络传输误差。

工号 D、E 测试客户机按 100 kHz 采集信号，每个测试客户机 8 通道，数据传输率为：8×100 k×16＝12.8 Mbps。实测按该传输率向测试服务器发送数据，网络未出现堵塞，通过总均方根 RMS 值和 PSD 谱判定，数据采集处理正确有效。

5　结束语

本文提出一种适用于试验产品分布式试验的混合网络测试架构：对于距离 1 km 内的振动信号测试，采用振动信号远程传输与复现装置直接传递振动模拟信号，测试实时性可保证在 10 μs 内；对于爆炸冲击信号测试，采用爆炸冲击信号远程传输与复现装置直接传递爆炸冲击模拟信号，测试实时性可保证在 1 μs 内；对于跨 100 km 的振动信号测试，采用客户/服务器组网模式并应用软件虚拟 PTP v2 协议进行网络时钟校正，确保跨广域网络的测试同步在 10 ms 内。实际试验测试表明，全系统工作稳定可靠，为试验产品的分布式试验提供了有力技术支撑。

参考文献：

[1] 严　侠，王军评，毛勇建，等. 连续振动载荷在线复现控制技术研究 [J]. 振动工程学报，2024，37 (10)：1679－1687.

[2] 张九宾，张丕状，杜坤坤. 无线分布式测试系统时间统一技术的研究 [J]. 核电子学与探测技术，2010，30 (3)：380－384.

[3] 王　旭，陈　晔，郑　斌. 基于 ARM 的分布式测试系统时钟同步研究及实现 [J]. 兵器装备工程学报，2019，40 (11)：97－102.

[4] 牟宗磊，宋　萍. 分布式测试系统时间同步技术的研究 [J]. 计算机测量与控制，2017，25 (5)：21－24.

[5] 牟宗磊，宋　萍，翟亚宇，等. 分布式测试系统同步触发脉冲传输时延的高精度测量方法 [J]. 吉林大学学报（工学版），2018，48 (4)：1274－1281.

[6] 曹健辉，周　刚，鲁占峰. 基于 RocketIO 可靠性传输改进方案的研究与实现 [J]. 通信技术，2019，52 (3)：766－772.

[7] 徐立升，张建春，孙　健. 基于 RocketIO 的高速光收发电路的设计实现 [J]. 光通信技术，2017，6：54－56.

[8] 张　沁. 星上交换测试设备的研究与开发 [D]. 西安：西安电子科技大学，2020.

[9] 张　涛. 高分辨 SAR/InSAR 实时信号处理通信系统及数据预处理设计与实现 [D]. 西安：西安电子科技大学，2022.

[10] 邵承启. 面向嵌入式系统的数据传输与交互技术 [D]. 杭州：浙江大学，2020.

[11] 刘　易，韦晓红，谢　欣，等. Sallen-Key 滤波器多参数仿真分析方法 [J]. 实验室研究与探索，2023，42 (5)：117－121.

[12] 颜苗苗. 数字 Sallen-Key 滤波器在核能谱数据处理中的应用研究 [D]. 上海：华东理工大学，2021.

[13] 张轩玮，闵富红，曹　弋，等. 基于混合二极管的 Sallen-Key 低通滤波电路振荡行为研究 [J]. 南京师范大学学报（工程技术版），2024，24 (2)：2－10.

[14] 刘　智，童耀南，崔建山，等. 高纯度脉搏信号处理电路的设计与实现 [J]. 湖南理工学院学报（自然科学版），2024，37 (3)：44－50.

[15] 蒋思宇，王　斌，余龙海，等. 基于 FPGA＋AD7606 的多通道数据采样系统设计与实现 [J]. 电子设计工程，2022，30 (22)：103－107.

[16] 武　柏，谭　歆，朱鸿熙，等. 基于 ZYNQ7020 的高速闪电信号采集系统设计 [J]. 集成电路应用，2024，41 (12)：28－29.

[17] 袁盛铭，吴兴文，赵明花. 随机振动疲劳寿命评估频域法模型适用性研究 [J]. 噪声与振动控制，2023，43 (2)：28－34.

[18] 朱红发，赵明利，程　热. 基于 PSD 法的船载雷达随机振动响应分析 [J]. 装备环境工程，2020，17 (10)：118－123.

[19] 何维令，魏煜锋，蒋祥增. 高柔塔风电机组塔筒振动特性分析 [J]. 振动与冲击，2023，42 (20)：172－179.

[20] 崔浩东，刘宝禄，许明明. 适用于大型空间载荷的微振动数据处理方法 [J]. 航天器环境工程，2025，42 (2)：128－135.