

文章编号:1673-2049(2006)04-0038-06

## 结构远程协同试验研究进展

吕建民<sup>1</sup>, 郭玉荣<sup>1</sup>, 肖 岩<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 南加利福尼亚大学 土木系, 加利福尼亚 洛杉矶 CA90089)

**摘要:**针对各国结构远程协同试验研究的现状,通过调查研究,总结了几个极具代表性的研究成果,介绍了其各自用于远程协同拟动力试验的网络结构、数据通信模式及测试活动,分析了各个试验系统的异同点。结果表明:结构远程协同试验作为一种新型的结构试验系统和方法,具有资源共享、协同工作等优点,用其进行结构试验具有很强的可行性和有效性;中国自行开发的用于远程协同试验的 NetSLab 系统相比其他同类系统而言,在网络结构、通信模式上都具有一定的先进性。最后,结合中国目前的研究水平和网络现状提出了一些建议和设想。

**关键词:**远程协同;拟动力试验;网络结构;数据通信

**中图分类号:**TU317.1 **文献标识码:**A

## Research Advances of Structural Remote Collaborative Experiments

LU Jian-min<sup>1</sup>, GUO Yu-rong<sup>1</sup>, XIAO Yan<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

2. Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles CA90089, California, USA)

**Abstract:** In view of structural remote collaborative experiments, several representative research results were summarized by investigating the recent advances in this research field. The network structure, the data communication pattern and the testing activities in these researches were presented in detail. The similarities and differences in each experiment system were analyzed. The results show that as a new type of structural experiment system and method, the remote collaborative experiment has some good points, such as resources sharing, collaborative work, etc. This system has strong feasibility and validity; the system (NetSLab) that voluntarily developed in China is more advanced comparing with other similar systems. In the end, some proposals and ideas on remote collaborative pseudo-dynamic testing were put forward based on the level of the research and network situation in China.

**Key words:** remote collaboration; pseudo-dynamic testing; network structure; data communication

## 0 引言

随着结构抗震试验的大型化和复杂化,需要更为精确地模拟复杂的工作条件,单个的结构实验室资源已无法满足结构抗震试验要求。为了充分发挥有限的试验资源,把各地的大型结构实验室资源都利用起来进行相应的实验室模型协同试验,从而达

到资源共享,世界上许多国家已开始了关于结构远程协同试验方面的研究,并各自取得了很大的进展。中国的湖南大学联合清华大学、哈尔滨工业大学也正积极致力于这方面的研究。目前,各国研究学者主要将远程协同与拟动力试验结合起来,开展了大跨度、大尺寸结构地震作用下动力反应特性的研究,形成了几种典型的远程协同试验研究系统。

收稿日期:2006-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目(50339020)

作者简介:吕建民(1980-),男,河南焦作人,工学硕士研究生,E-mail:minjianlv@tom.com。

# 1 美国的 NEES

在网络协同试验研究方面,美国的 NEES<sup>[1]</sup> 开始时间最早,研究规模最大。它是在美国国家自然科学基金委员会 8 000 万美元的巨额研究经费资助下建立的地震工程网络模拟系统,简称 NEES。NEES 计划的目标,是建立一种网络化资源,这一资源是在地理上分布于各个地区并被共享的具有远程观测和远程控制能力的新一代试验研究系统。美国于 2004 年 10 月开始 NEES 的建造计划,预定在 2014 年完成,目前已经有 15 个试验站点建成使用。

NEES 系统由分布于美国各地的子实验室组成,每个实验室都致力于发展某一特定的试验设备和设施,并通过 NEESGrid<sup>[2]</sup> 这一网络系统联系起来,以达到资源共享,因此 NEESGrid 在整个系统中起着神经中枢的作用。远程协同拟动力试验只是其系统功能的一部分,它的发展主要经历了两个阶段。

## 1.1 MOST 试验阶段

在利用 NEES 进行远程协同拟动力试验中,主要使用 NEESGrid NTCP(Teleoperations Control Protocol)<sup>[3]</sup> 进行远程通信和数据传输。NTCP 是一种用于远程试验控制和计算机模拟的通信协议,通过该协议用户可以向远程试验设备或模拟计算机发送指令,远程试验设备在该指令下进行试验或运算并将结果返回给用户。2003 年 7 月,美国科罗拉多大学、伊利诺斯大学和国家计算机应用中心利用 NEES 系统进行了 MOST (Multi-sites On-Line Simulation Test) 试验,其网络结构如图 1 所示。

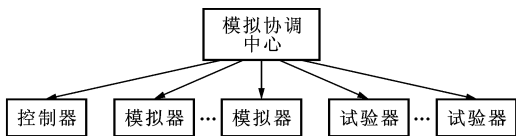


图 1 MOST 试验网络结构

Fig. 1 Network Structure of MOST Testing

用户在试验前可以设置试验参数。模拟协调中心为负责数据的储存和中转。控制器为整体分析并发布位移指令。模拟器为远程模拟站点,利用已知的恢复力模型对构件进行计算机模拟。试验器为远程试验站点,接受位移指令控制作动器运动。采集真实位移值和反馈力并将其返回给模拟控制中心。MOST 试验数据流程见图 2。

在 MOST 试验阶段,每进行一步拟动力试验各个模块间需要发生 6 次数据交换(图 3),且 NTCP

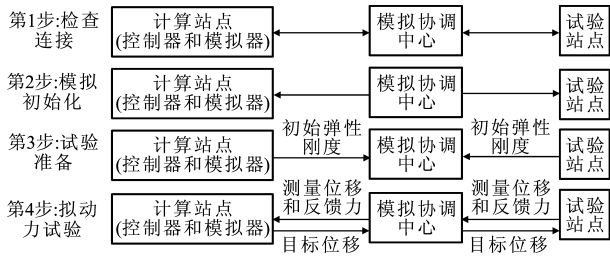


图 2 MOST 试验数据流程

Fig. 2 Data Flow Process of MOST Testing

中各个功能模块采用不同的语言编写,其中控制器程序部分采用 Java 语言编写,而模拟协调中心部分采用 Matlab 语言编写,这就在程序的接口上造成一定的麻烦,并且模拟协调中心在向远程站点发送目标位移时是单线程的,因此当有多个站点时,其完成每一步所花费的通信时间为所有站点所用时间的总和。测试试验显示,平均每步所用的时间大约为 13.2 s,而花在网络通信上的时间占了很大一部分,效率较低。

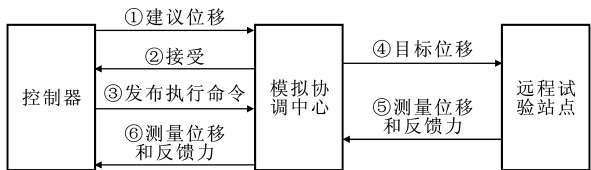


图 3 MOST 拟动力试验中进行一步的过程

Fig. 3 One Step Process in MOST Pseudo-dynamic Testing

## 1.2 Fast-MOST 试验阶段

在 MOST 试验中,存在许多不足之处,特别是试验过程中网络通信时间相对过长,因此对 NEES-Grid 作了如下改进:

(1)重新使用 Java 语言编写了模拟协调中心程序,将 Master 部分与模拟协调中心部分作为两个模块放在同一个程序中,把 Proposal 命令与 Execute 命令合并为一个 Proposal and Execute 命令,以减少控制器与模拟协调中心之间命令的循环次数。

(2)使用多线程通信模式与多个远程站点进行数据通信。使得模拟协调中心与远程站点之间所花费的通信时间由原来的各个站点通信时间总和变为花费时间最长的站点所用的时间,大大减少了这部分的网络通信时间。

(3)为了解决试验过程中因网络通信延时、停电等原因造成的试验暂停、中断等问题,引入了 Event-Driven Distributed Controller 机制,使这一问题得以改善。改进后的试验网络结构如图 4 所示。

2004 年 9 月,美国加利福尼亚大学伯克利分校联合布法罗大学、科罗拉多大学等 5 所大学利用改

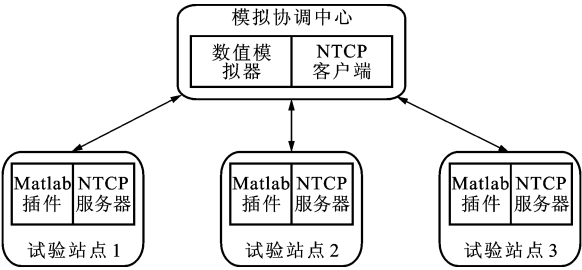


图 4 Fast-MOST 试验网络结构

Fig. 4 Network Structure of Fast-MOST Testing

进的 NEES 系统进行了 Fast-MOST 试验。使用改进了的系统进行 1 500 步试验所用的时间,由原来的 5.5 h 减少到 0.3 h,平均每步约为 0.66 s,大大提高了网络通信效率。

2 日本的并行拟动力测试系统

并行拟动力测试系统(The Parallel Pseudo-dynamic Testing System with the Internet)是日本研究人员基于远程协同的思想提出的一种测试系统,用以进行大尺寸结构的拟动力试验<sup>[4]</sup>,并通过试验验证了这一系统的可行性和有效性。

其网络通信基于客户端/服务器的概念设计,客户端通过控制数据交换管理整个系统,服务器通过控制当地的 PC 机提供各种服务。其中客户端与服务器之间采用 TCP/IP 协议进行通信,服务器与 PC 机之间则通过编写的 SAMBA 软件进行通信。日本京都大学和大阪城市大学利用该系统进行了远程拟动力试验<sup>[5]</sup>,其网络结构见图 5。

在这次试验中 EWS0 (Engineering Workstation) 与 EWS1 置于京都大学,EWS2 置于大阪城市大学。EWS0 作为客户端,EWS1 与 EWS2 作为两个服务器。其中,EWS1 与 EWS2 采用 UNIX 操作系统,而本地计算机采用 Windows 操作系统。EWS1、EWS2 与 EWS0 之间的通信协议为 TCP/IP,而 EWS1、EWS2 与本地计算机之间的通信则采用自己编写的 SAMBA 软件。当 EWS0 和本地计算机分别生成目标位移和反馈力时,均能主动地将所生成的数据写入 EWS1 和 EWS2 的共享磁盘中,并写入相对应的标记文件保存。共享磁盘再将此类文件分别转换成 EWS0 和本地计算机能够识别的读取标记文件,当 EWS0 和本地计算机在网络上监听到此类文件时就会主动读取,以此完成数据的交换。由于这一过程需要文件类型的转换,所以需要的通信时间相对较长。

目前,日本除利用该系统在京都大学与大阪城

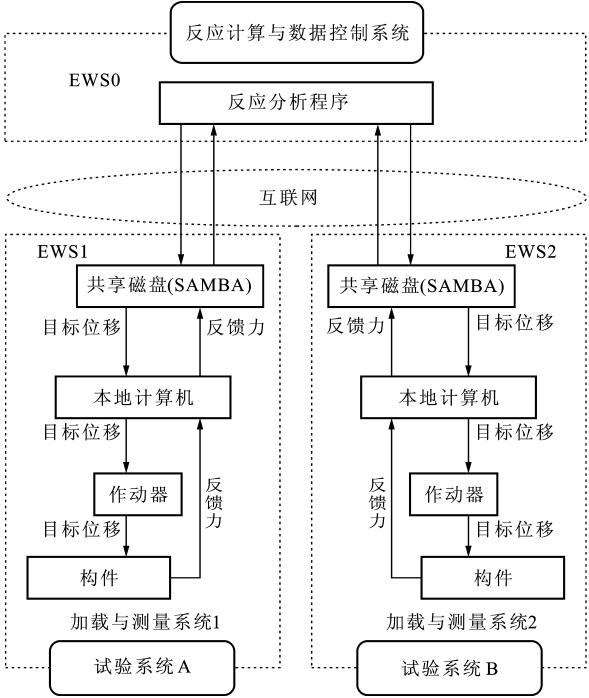


图 5 试验所用网络结构

Fig. 5 Network Structure of Testing

市大学间进行远程拟动力试验以验证其有效性外,还与韩国进行了跨国协同试验,并与韩国自行开发的系统进行了对比<sup>[6]</sup>。

3 韩国的网络拟动力试验系统

在韩国,远程协同试验的思想最早由 Watanbe 等提出,最近韩国科学技术院联合日本京都大学和大阪城市大学分别用各自开发的远程协同试验程序对一桥梁模型进了拟动力试验。在韩国所开发的网络拟动力试验系统(On-Line Pseudo-dynamic Network Testing)中,主要采用主控制器/本地服务器 PC 的网络结构,见图 6。其中主控制器由分析程序和客户端系统组成,对整个系统起控制作用;本地服务器直接控制加载设备进行试验。与日本的网络结构相比省去了中间用于存储和交换数据的计算机,数据不需要写入特殊文件就能被主控制器/本地服务器识别并获取。两部分均采用相同的 Windows 操作系统,通信协议均为 TCP/IP,避免了数据在两部分传输时的类型转换;同时该系统还采用了基于 C++ 的并行进程概念,将数据发送的时间由各个站点所用时间的总和减少为所有站点所用时间的最大值,这一点与美国改进的 NEES 系统相似,因此,相比而言韩国所采用的网络结构在数据通信方面要优于日本所采用的网络结构。

该试验结果显示,利用韩国开发的系统进行远

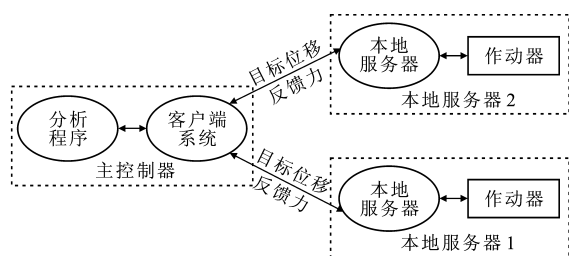


图 6 主控制器/本地服务器网络结构

Fig. 6 Network Structure of Main PC/Local Server

程协同拟动力试验,每一步用于网络通信的时间平均为0.2 s,相对于试验操作时间1~10 s而言能够满足试验的要求;同时通过对比试验,还得出用于同一国家不同城市间的试验通信时间与用于不同国家间的试验通信时间基本相同,这更加充分地说明了利用网络进行远程协同试验的可行性。此次试验中,韩国研究人员还提出了利用无线通信技术进行远程试验的构思,并指出这一方式可以避开现行网络通信中的防火墙等问题,从而能够为远程试验的数据传输提供更安全的网络环境。

## 4 中国台湾的 ISEE 系统

ISEE (Internet-Based Simulation for Earthquake Engineering)是中国台湾地震工程研究中心(NCREE)开发的用于大型结构远程协同试验平台。其主要由命令产生程序、设备控制程序和服务器程序 3 个部分组成,各部分间的数据通信均采用 TCP/IP 协议。采用一种应用协议 NSEP (Networked Structural Experiment Protocol)来定义试验的基本信息、事件、命令、所有程序的行为和通信规则。

### 4.1 PNSE

PNSE(Platform for Networked Structural Experiments)主要由 3 类模块组成:PNSE 服务器,CGM(Command Generation Module),FCM(Facility Control Module),其结构如图 7 所示。

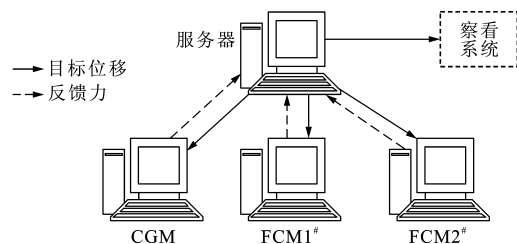


图 7 PNSE 结构

Fig. 7 Structure of PNSE

PNSE 结构中,CGM 与 FCM 又称为客户端模

块。PNSE 服务器是信息交换和数据传输的中枢,无论是 CGM 还是 FCM 都将所产生的数据发送给 PNSE 服务器且从 PNSE 服务器获取所需要的数据,任何两个客户端模块之间不能直接通信。当 PNSE 服务器与任一客户端模块通信时,双方能够在同一时间内相互发送数据和接收数据。PNSE 服务器只是此平台的信息中心,并不是整个试验的进程中心,CGM 才是起着决定和控制试验顺序的进程中心。

### 4.2 NSEP

NSEP<sup>[7-8]</sup>同 PNSE 服务器一起工作,为 PNSE 服务器的信息传输提供通信准则和数据包格式,并引入 Event-Driven 以解决试验过程中出现的中断、停止等突发事件。

目前一些研究人员已利用此系统将中国的台湾大学与中国台湾地震工程研究中心的结构实验室连接起来进行了多次协同拟动力试验,其中包括部分试件位于美国斯坦福大学与加利福尼亚大学圣地亚哥分校的测试,充分验证了该系统的有效性,并且最近正计划与加拿大合作,利用该系统对 1 座 5 跨的连续梁桥进行跨国性的远程协同拟动力试验。

## 5 中国的 NetSLab

湖南大学在中国率先提出了 E-Test<sup>[9]</sup>的构思,随后在实践中逐步形成了结构远程协同试验的研究思路,并将研究重心定位在子结构拟动力试验。由于子结构拟动力试验的加载路径依赖于所有子结构的反馈数据,并通过求解整体结构运动方程而得,所以从整合多个异地实验室进行联合试验以提高试验能力的角度来说,依赖实时数据交换和控制的远程协同子结构拟动力试验更具有实质上的协同研究意义,为此,肖岩提出了网络结构实验室的概念,简称 NetSLab<sup>[10]</sup>。

### 5.1 NetSLab 的通信协议和数据模型

#### 5.1.1 通信协议和数据流

NetSLab 数据模型中引入了 3 种类型的数据通信协议<sup>[11]</sup>:

集中式的串行通信。控制器逐个发送控制数据(请求)到每个试验机,而每个试验机只有在完成了该请求的情况下才能回应。这种数据传递顺序是预定的,并且在任一时刻只有一个试验机与控制器在进行通信。

集中式的并行通信。控制器同时向多个试验机

发送请求,然后等待它们的回应。一旦得到所有试验机的反馈,控制器决定开始下一步试验,发送下一轮请求。

分布式的并行通信。控制器发送开始试验指令和初始信息到某些试验机。当一个试验机获取了部分试验结果和请求,它执行完某个行为后就可以向其他的试验机发送请求或试验数据。在某些时候,试验机把试验结果反馈给控制器。

### 5.1.2 3 种类型的参与者

控制器。组织试验,控制试验进程和参与者之间的数据通信,并存储或公布试验结果。在目前的研究中只设一个控制器。

试验机。在试验的每一步中根据以前的结果执行具体的任务来产生新的数据。在一个试验中可有多个试验机。这些试验机可以分成两类:一类是虚拟试验机,它通过计算分析提供试验结果;另一类是真实试验机,它通过实际的试验装备得出试验结果。

观察者。分享试验结果,但不直接参与操纵试验过程。

从数据模型的观点来看,由控制器启动试验,并存储每一步的结果  $R$ ,指定数据流动,决定如何在试验机之间传递数据,并公布部分或是最后的  $R$ 。每个试验机读取一部分或整个  $R$  数据后,再把基于自己测试设备或运算程序下得出的数据向前传给下一个试验机(或控制器)。

## 5.2 NetSLab-SDOF

目前,笔者针对单层结构体系开发了一个结构远程试验平台 NetSLab-SDOF<sup>[12]</sup>,它包括控制中心、真实试验机、虚拟试验机和远程观察器 4 个程序。其试验平台的构架(图 8)只能有一个控制中心,可以有多个真实试验机、虚拟试验机、远程观察器。控制中心与试验机、观察器之间采用并行模式进行通信,即每一步试验开始,控制中心同时向各个试验机和观察器发送指令和数据,试验机与观察器可以并行工作。

### 5.3 应用测试

应用单层结构体系远程试验平台,笔者进行了大量的虚拟试验,同时还进行了网络传输速度测试<sup>[13]</sup>。这里的网络传输速度指的是从控制中心通过 NetSLab 发一个数据给试验机,试验机接收到该数据后立刻通过 NetSLab 返回一个数据到控制中心,这样一个来回所花费的时间。在某局域网(仅 1 个 HUB 连接 8 台计算机)中的多次测试结果显示,网络传输速度约为 20 ms,网络传输速度基本上非

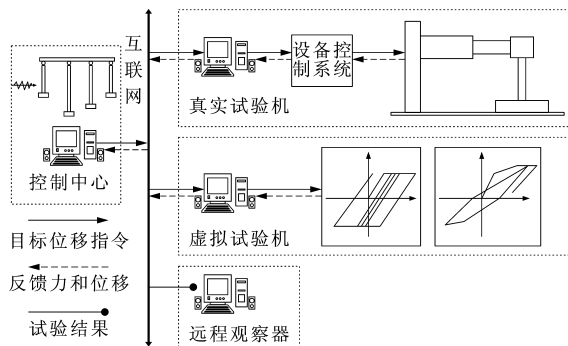


图 8 NetSLab-SDOF 结构

Fig. 8 Structure of NetSLab-SDOF

常平稳,但某些步的通信时间大大超过平均通信时间,这可能是由网络传输延时造成的。在湖南大学校园网中 2 台计算机之间的传输速度测试结果约为 30 ms,与局域网相比,通信速度减慢,网络延时发生也相对频繁。对于目前的低速拟动力试验来说,网络通信时间与实验室中试验加载花费的时间相比,是微不足道的。

利用本试验平台,在湖南大学结构实验室进行了钢管混凝土柱的拟动力试验<sup>[14]</sup>。模拟的结构是一个单层单跨框架,框架中需要模拟的构件是反弯点到端部的部分。试验参照 SAC 联合研究计划划分地震作用水平的标准,根据 3 个不同的超越概率分别选取 3 个具有代表性的地震波,顺利地进行了 5 次拟动力试验,直到试件破坏而结束。

## 6 结 语

笔者开发的 NetSLab 在网络拓扑结构上是较合理的,并行式的通信模式可以大大减少数据通信时间,数据传输的各个环节均采用简单且安全性好的 TCP/IP 协议,但相对于其他系统而言,目前开发的还仅仅是一个单自由度的试验平台,不能用来模拟多自由度结构和复杂的试验子结构边界条件及地震波的多点输入、行波效应等问题。在网络通信上,目前笔者所开发的网络通信平台能实现在公网中的计算机之间的数据通信或同级私网中的计算机之间的数据通信,但在开展远程协同结构试验时,如何建立不同级别网络内的计算机相互访问的方法是必须考虑的问题。在试验结果的查看和共享上,目前该试验平台中,有一个远程观察者程序,应用该程序可观察试验结果。从更加广泛应用的角度来说,通过浏览器直接查看试验网页更方便各类人员观察和讨论试验结果。在结构整体分析上,如何利用现有的分析软件(如有限元分析程序)对计算子结构进行分

析,再将分析结果与试验子结构所测得的试验数据一起用作整体分析还有待研究。对于试验过程中的网络延迟、中断等突发事件,还须借鉴其他系统的经验,找到适合本系统的处理方法。最后,由于各个系统均是独立开发,自成体系,因此如何实现不同系统间的数据通信和协同合作以开展更为广泛的远程协同试验还有待研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] PAUSCHKE J, ANDERSON T L, GOLDSTEIN S N, et al. Network for Earthquake Engineering Simulation[C]//Earthquake Engineering Research Institute. Proceedings of the 7th U. S. National Conference on Earthquake Engineering. Boston: Earthquake Engineering Research Institute, 2002: 9-19.
- [2] SPENCER B F. NEESGRID: a Distributed Laboratory for Advanced Earthquake Engineering Experiment and Simulation[C]//WCEE. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: Venue West Conference Services Ltd, 2004: 1 674.
- [3] GILBERTO M, BOZIDAR S, JASON H, et al. Fast Hybrid Simulation with Geographically Distributed Substructures[J]. Advances in Experimental Structural Engineering, 2005, 18(1): 449-456.
- [4] PENG P, MOTOHID T, MASAGOSHI N, et al. On-Line Hybrid Test by Internet Linkage of Distributed Test-Analysis Domains[J]. Earthquake Eng Struct, 2005, 34(1): 1 407-1 425.
- [5] TAKASHI Y, NAGATA. International Collaborative Pseudo-dynamic Testing Method for Continuous Elevated Bridges by Using Internet[J]. Advances in Experimental Structural Engineering, 2005, 18(1): 371-376.
- [6] PARK D, YUN C B, LEE J W, et al. On-Line Pseudo-dynamic Network Testing on Base-Isolated Bridges Using Internet and Wireless Internet[J]. Experimental Mechanics, 2005, 45(4): 331-343.
- [7] WANG S J, WANG K J, YANG Y S, et al. Networked Pseudo-dynamic Testing Part II: Application Protocol Approach[C]//WCEE. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: Venue West Conference Services Ltd, 2004: 1 548.
- [8] YANG Y S, WANG K J, WANG S J, et al. Networked Pseudo-dynamic Testing Part I: Database Approach[C]//WCEE. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: Venue West

Conference Services Ltd, 2004: 1 910.

- [9] 茹继平,肖岩.美国地震工程模拟网系统 NEES 计划及在我国实现远程协同结构试验的设想[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(6): 91-94.  
RU Ji-ping, XIAO Yan. The Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES) in America and the Imagination of Developing the Remote Collaborative Experiments in Our Country[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(6): 91-94.
- [10] 肖岩,易伟建,郭玉荣,等.结构远程协同试验的探讨[C]//全国结构工程学术会议编委会.第12届全国结构工程学术会议论文集.北京:清华大学出版社, 2003: 102-106.  
XIAO Yan, YI Wei-jian, GUO Yu-rong, et al. The Exploring of the Remote Collaborative Experiments [C]//National Structure Engineering Meeting Editorial Committee. The 12th National Structure Engineering Meeting Symposium. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 102-106.
- [11] XIAO Y, HU Q, GUO Y R, et al. Development of a Network Platform for Remote Hybrid Dynamic Testing[C]//WCEE. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: Venue West Conference Services Ltd, 2004: 3 048.
- [12] 肖岩,胡庆,郭玉荣,等.结构拟动力远程协同试验网络平台的开发研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 122-128.  
XIAO Yan, HU Qing, GUO Yu-rong, et al. Development of a Network Platform for Remote Hybrid Dynamic Testing [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 122-128.
- [13] 郭玉荣,范云蕾,肖岩,等.基于网络的结构非线性地震反应协同分析[C]//何星华.计算机技术在工程建设中的应用.北京:知识产权出版社, 2004: 36-40.  
GUO Yu-rong, FAN Yun-lei, XIAO Yan, et al. The Based-Internet Collaborative Analysis of Structures, Nonlinear Responses Under the Earthquake[C]//HE Xing-hua. The Application of the Computer Technique in Engineering. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2004: 36-40.
- [14] 郭玉荣,张国传,肖岩,等.单自由度结构远程分析及拟动力试验平台[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2006, 33(2): 18-21.  
GUO Yu-rong, ZHANG Guo-chuan, XIAO Yan, et al. A Platform for Remote Analysis and Pseudo Dynamic Testing of SDOF Structures[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2006, 33(2): 18-21.