

文章编号:1673-2049(2005)04-0022-05

## 远程拟动力试验平台的开发

范云蕾<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:**介绍了一个可以进行远程监视及控制的抗震试验系统, 该系统主要用于拟动力试验方法的研究。为了实现远程控制的结构拟动力试验, 基于网络通讯平台 NetSLab, 采用 Visual Basic 语言开发了一个标准化的开放式单层结构远程拟动力试验平台。利用该平台进行了真实的拟动力试验, 试验结果验证了该平台的可行性。

**关键词:**远程监控; 拟动力试验; 网络平台; 数值积分

**中图分类号:**TU317 **文献标志码:**A

## Development of remote pseudo-dynamic test platform

FAN Yun-lei<sup>1</sup>, GUO Yu-rong<sup>1</sup>, XIAO Yan<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract:** A system for distance monitoring and a seismic experiment controlling was introduced. This system was used to develop the method of a remote pseudo-dynamic test. A network communication platform NetSLab was needed to realize the remote control of the pseudo-dynamic test. Authors used Visual Basic developing the standard open-end single layer structural remote pseudo-dynamic test platform. The pseudo-dynamic test was remotely executed using this program. The application of the program was verified well by test results.

**Key words:** remote monitor; pseudo-dynamic test; network platform; numerical integration

## 0 引 言

由于各国的研究设备不集中, 而是分散在各地; 大型的、昂贵的试验设备及其数据处理装置也是分散在各地, 因此研究者们不得不花费更多的时间和精力来寻求研究设备, 并且试图掌握这些设备的使用操作平台。为了改变这种状况, 类似的合作计划正在进行, 如美国国家科学基金委员会的地震工程模拟网络计划 (Network for Earthquake Engineering Simulation, NEES)<sup>[1,2]</sup>, 其目标是实现包括计算设备、现场观测设备等在内的资源高度共享和试验数据共享。另外, 中国有的研究中心正在建立基于

网络的地震工程模拟平台 ISEE, 试图通过数值模拟程序和设备控制程序实现世界范围内的网络化结构试验。通过试验数据的共享, 研究条件可以得到提高; 如果这种共享可以实现的话, 那么各子结构的试验研究和数据传输将形成一个巨大的网络, 为主体结构的地震安全提供重要的数据资料。

信息通讯技术和控制测量技术的一体化为试验设备的远程控制提供了可能, 也为试验数据的共享提供了可能。这种一体化技术整合了世界各地的试验设备资源, 达到了资源共享和提高试验能力的目的。湖南大学在中国率先提出 e-test 的构思, 随后逐步形成远程结构试验的研究思路<sup>[3~5]</sup>, 并将研究

收稿日期: 2005-09-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50338020)

作者简介: 范云蕾 (1982-), 女, 江西抚州人, 工学硕士研究生. E-mail: fanyunlei@163.com

重心定位在基于互联网的远程拟动力试验上。

# 1 远程拟动力试验平台

开发远程拟动力试验平台的原理是:首先为了实现远程控制的结构拟动力试验,需要一个网络通讯平台,该平台能够从远程试验的角度,提供方便的数据通讯功能,便于被高级计算机语言开发的试验程序应用;其次是选择拟动力试验的数值积分方法;最后是结构拟动力试验程序的开发,实验室的试验程序要适应不同的结构实验室情况,实现和具体实验室控制系统之间的连接及试验指令的发送,具有获取反馈数据的功能。

## 1.1 网络平台

网络结构实验室(Networked Structural Laboratories, NetSLab)是将异地分布的单一结构实验室通过互联网连接在一起,形成功能强大的网络结构实验室以进行结构远程协同拟动力试验,从而提高综合试验能力,达到资源共享的目的。现湖南大学研究人员协同美国远景(南昌)科技有限公司开发了结构远程拟动力试验网络通讯平台。该平台从结构远程试验的角度,提供了一个供异地计算机之间进行数据传输、反馈及操作的通讯平台。目前已经可以用初级平台进行两台计算机之间的协同计算。NetSLab 的基本结构如图 1 所示,作为一个分布式的网络数据处理系统,其功能分为前台和后台两部分。前台是用户界面,直接与各类用户打交道,接受用户的命令,显示用户所要求的结果;后台则具体处理用户的输入、输出,完成各种具体操作以及数据在网络上的交换与集成。因为功能的不同,NetSLab 的开发思路与工具也会有所不同。同时,最终 NetSLab 将运行在 Internet/Intranet 和 Web 环境上,也将尽可能地采用各种成熟的网络和分布数据处理的技术、方法。

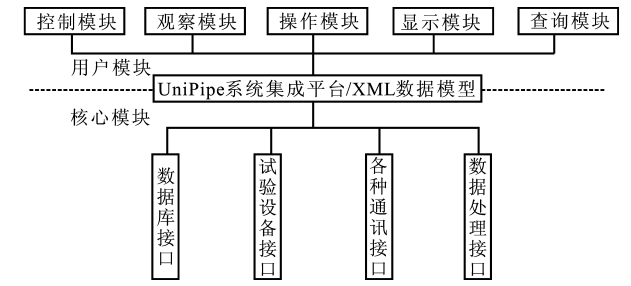


图 1 NetSLab 的基本结构

Fig. 1 Basic framework of NetSLab

### 1.1.1 NetSLab 的数据模型

NetSLab 定义的数据模型由 3 个部件组成:试

验结果、参与者、通讯协议和数据流。其中参与者包括:①控制器,负责组织试验,控制试验进程和参与者之间的数据通讯,并存储或公布试验结果,在目前的研究中只设一个控制器;②试验机,负责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。

#### 1.1.2 NetSLab 的执行

NetSLab 是否易于理解、便于进一步开发和维护是非常重要的。NetSLab 提供了标准 XML 格式的动态统一数据包和通用数据通讯代理来实现试验参与者之间的数据通讯。

##### (1) 动态的统一数据包(DUDP)

这个数据包包含所有相关部分的通讯:当前阶段的 TR 数据、控制器的请求、试验机的当前状况和通讯要求等。在这种概念下,如果系统简单、可靠的话,仅仅只需要一种数据包就可以在所有的参与者之间传递数据。DUDP 剖析器是用来解析一个给定 DUDP 的软件模块,帮助任何实体(控制器、试验机或观察者)正确有效地理解 DUDP。

##### (2) 通用的数据通讯代理(GDCA)

通用的数据通讯代理是 NetSLab 中独特的通讯部件,可以粘附在它的主实体上,如控制器、试验机或观察者。一方面,它从主实体处接收 DUDP,并把 DUDP 发送到指定的目的地,必要的话激活相应的实体;另一方面,任何传入的 DUDP 也通过这个代理来激活它的主实体。

在上述两种概念的基础上,试验过程中的数据通讯就变得简单明确了。任何实体,不管它是控制器、试验机或观察者,总是包含一个 DUDP 剖析器和一个 GDCA。对一个试验机而言,它总是在那等待,当接收到一个 DUDP 或用户命令就可以激活这个实体;然后通过解析 DUDP 来接受请求和数据,完成必要的操作后,选择目标实体,产生新的 DUDP 并提交给 GDCA。控制器和观察者的运作模式与试验机类似,但控制器需要实现更多的功能,如给试验参与者指派任务,组织通讯协议,指定初始条件,评估试验结果及决定试验的终止等。而观察者的功能则比试验机少一些。

为了实现分布式结构试验的任务,GDCA 有两个界面,分别是客户代理界面和控制中心界面。前者被所有试验机或观察者用来完成基本数据传输功能,而后者被控制器用来执行除基本通讯功能之外的系统配置等工作。这种界面可以被宿主应用程序通过标准 ActiveX 控件来调用,它通过预先定义的

事件接收机制把接收的信息发送给宿主应用程序。

### 1.1.3 NetSLab 的其他系统功能

#### (1) 数据库功能

在 NetSLab 中,数据库有着两种级别:①控制器建立并保存整个试验的数据库;②每个试验机建立并保存所指派任务的数据库。GDCA 提供了便于应用程序进入某些数据库系统存储当前试验结果和获取历史试验结果的数据库界面。

#### (2) 容错功能

GDCA 在两个方面为应用程序提供了容错功能:①接口引擎内置的通讯容错技术,利用当前 TCP/IP 网络可靠的通讯功能来最大可能地保证通讯中的可靠度;②完整的错误处理功能报告出精确的错误信息和错误来源,应用程序可以轻易地从最后的失败操作中恢复。

#### (3) 多媒体数据通讯

界面引擎提供了除 XML 数据和 GDCA 之外的辅助数据通讯渠道。在某些试验节点之间,可以根据应用程序的需要建立这种辅助的数据通讯渠道。这是个快速的二进制数据渠道,它支持巨大的二进制文件、DirectX 流数据和其他用户定义的数据。NetSLab 就是利用这种辅助数据通讯渠道在试验机和控制器之间传送 A/V 数据。同样,控制器也可以通过 Web 服务器把 A/V 数据发布到因特网。

#### (4) 通讯安全

NetSLab 是在接口引擎上建立安全保护功能的。目前,笔者采用 3 种方法来保护通讯数据的安全:①Windows 上 C3 级别的安全性,接口引擎完全支持 Windows 系统的本地安全功能,即像 Windows 用户一样使用密码作登陆的进入控制器,每类数据通讯都可以按照用户认证来设置;②标准 HT-TPS 安全渠道,除了常规的安全渠道,接口引擎还支持一种附加的 HTTPS 渠道来完成它的数据通讯,为了做到这一点,需要在公网下建立加密的网络服务器来作为数据通讯缓冲;③通过防火墙,借助 HTTP 或 HTTPS 数据缓冲功能,接口引擎还支持在不同防火墙内的通讯,利用这种功能,NetSLab 允许一些试验机置于不同的防火墙内。

### 1.2 数值积分方法

拟动力试验过程是通过数值计算与加载试验混合进行的,所以试验构件的位移指令要通过数值积分来确定。笔者只考虑单自由度结构体系的拟动力试验。由于低振型的误差积累影响可以忽略,所以程序中没有考虑由阻尼引起的能量耗散等误差修正。

且由于显示 NEWMARK 法的稳定性较好,可以避免反复迭代,所以程序中采用显式 NEWMARK 积分方法,如图 2 所示。

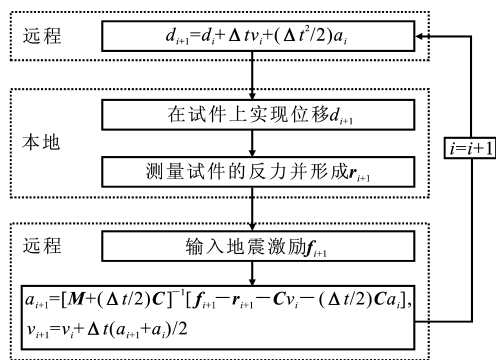


图 2 显式 NEWMARK 法

Fig. 2 NEWMARK explicit method

结构的整体运动方程为

$$M\ddot{a} + C\dot{v} + r = f$$

式中: $M$ 、 $C$  分别为质量矩阵和阻尼矩阵; $a$ 、 $v$  分别为相对加速度和速度; $r$  为整个结构的恢复力向量; $f$  为地震力向量。

第  $i+1$  步的运动微分方程为

$$M\ddot{a}_{i+1} + C\dot{v}_{i+1} + r_{i+1} = f_{i+1} \quad (1)$$

假设

$$d_{i+1} = d_i + \Delta t v_i + \frac{\Delta t^2}{2} a_i \quad (2)$$

$$v_{i+1} = v_i + \frac{\Delta t}{2} (a_{i+1} + a_i) \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),可得第  $i+1$  步的相对加速度为

$$a_{i+1} = (M + \frac{\Delta t}{2}C)^{-1} (f_{i+1} - r_{i+1} - C v_i - \frac{\Delta t}{2}C a_i) \quad (4)$$

### 1.3 远程拟动力试验程序

基于本节的 NetSLab 网络通讯平台及要求,就可以开发远程拟动力试验程序。NetSLab 提供给应用程序开发的是一个功能强大的 ActiveX 控件界面(称为 UPCtrlATX),该界面支持具有标准 ActiveX 控件功能的高级语言,如 VB、VC++、VJ 等。笔者采用 VB 语言开发的单自由度系统远程试验平台包括:控制中心、真实试验机、虚拟试验机和远程观察器 4 个模块,构架如图 3 所示。虽然目前的开发只是针对单自由度结构体系,但是开发的目标是尽量形成标准的构架模式,以使后续的多自由度结构远程协同拟动力试验系统可以方便地在此基础上进行扩充形成。

控制中心程序所在的计算机用于远程试验控制,负责整个试验进程的控制,计算试件的目标位移

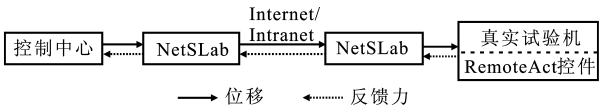


图 3 远程试验平台构架

Fig. 3 Frame of remote test platform

值。在每一步试验中,控制中心根据试验机反馈回来的力求解结构的运动微分方程,决定试件下一步的目标位移值,然后作为位移指令,发给试验机。

图 4、5 分别为控制中心程序的主界面及结构模型参数界面,它们可以在试验过程中动态地显示地面地震加速度记录、结构的位移时程曲线、滞回曲线、结构振动图;各种动态图形的视图范围会根据试验进程自动调整以显示整个图形,便于试验过程中用户观察试验结果。另外,控制中心程序还具有模拟功能。在进行真实试验之前,可以选择多种滞回曲线模型来进行线性和非线性反应模拟,如图 5 所示,这样在图 4 的位移时程曲线窗口,就可以动态地显示试验过程中真实试验结果与模拟试验结果的实时对比,方便用户查看试验模拟的准确性。

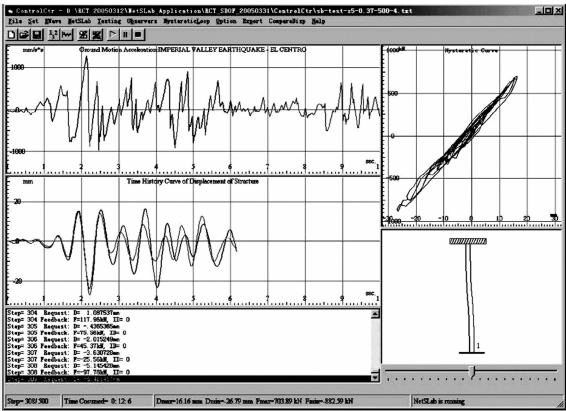
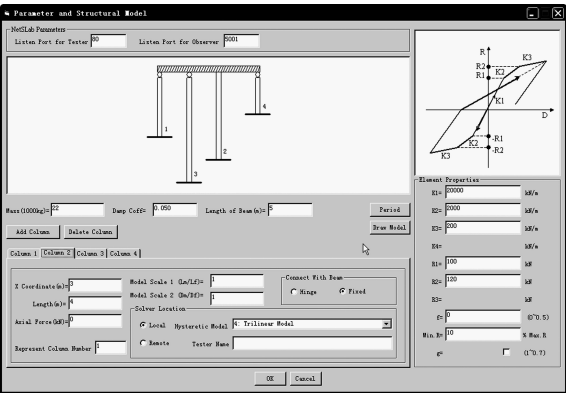


图 4 控制中心程序的主界面

Fig. 4 Main interface of control center program



坏而结束。图 8 为部分试验和模拟结果。

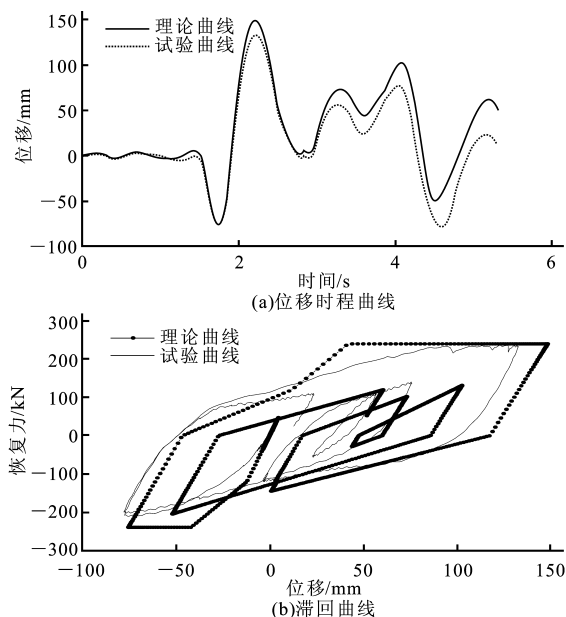


图 8 Northridge 波作用下的位移时程曲线和  
滞回曲线(峰值加速度为  $555 \text{ cm/s}^2$ )

Fig. 8 Displacement and hysteretic loop of specimen under  
Northridge earthquake(peak acceleration  $555 \text{ cm/s}^2$ )

试验结果初步验证了该程序的可行性,检验了程序实时显示地面地震加速度记录、结构的位移时程曲线、滞回曲线及结构振动图等功能,同时还确认了环境的独立性及 NetSLab 的通讯能力。

### 3 结 语

笔者介绍了一个通过互联网监控并远程控制

结构试验的系统。利用该系统,提出了一种远程拟动力试验方法;并且,基于网络通讯平台 NetSLab 开发了远程拟动力试验程序,利用该程序,进行了远程拟动力试验。试验结果验证了该程序的可行性。

#### 参考文献:

- [1] PAUSCHKE J, ANDERSON T L, GOLDSTEIN S N, NELSON P. Construction status of the George E. Brown, Jr. network for earthquake engineering simulation[A]. Proceedings of the Seventh U. S. National Conference on Earthquake Engineering [C]. Theme: Urban Earthquake Risk, 2002. 9—19.
- [2] BUCKLE L, REITHERMAN R. The consortium for the George E. Brown, Jr. network for earthquake engineering simulation[A]. 13th World Conference on Earthquake Engineering[C]. Vancouver: Venue West Conference Services Ltd, 2004. 4 016.
- [3] 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.
- [4] 肖 岩, 易伟建, 郭玉荣, 胡 庆. 结构远程协同试验的探讨[A]. 第 12 届中国结构工程学术会议论文集[C]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 102—106.
- [5] XIAO Y, HU Q, GUO Y R, ZHU P S, YI W J. Development of a network platform for remote hybrid dynamic testing[A]. 13th World Conference on Earthquake Engineering[C]. Vancouver: Venue West Conference Services Ltd, 2004. 3 048.

### 《工业建筑》2006 年征订通知

《工业建筑》由中国钢铁工业协会主管,中冶集团建筑研究院主办;为高学术水平高知名度的双高期刊、“首届国家期刊奖”获奖期刊、中国建筑科学类核心期刊、国际建筑数据库(ICONDA)收录期刊。多年来《工业建筑》一直本着指导性、针对性、实用性、创新性的办刊宗旨,重点报道建筑设计、建筑结构、地基和基础、建筑材料、施工技术等方面的应用研究成果及开发技术,突出工业建筑、钢结构、鉴定加固技术等特点,优先报道国家、省部级科学基金资助项目和重大工程建设项目;内容丰富翔实,理论结合实际;适于土木工程界广大科研、设计、教学、施工等专业技术人员及大专院校师生阅读。

《工业建筑》创刊于 1964 年,月刊,大 16 开本,彩色胶版印刷,每月 20 日出版,国内外公开发行人;每期定价 6.00 元,全年定价 72.00 元;兼营广告,收费合理,具有一定规模,是展示企业形象的理想舞台。全国各地邮局均可订阅,邮发代号 2-825,也可直接汇款到编辑部订阅。

地址:北京市海淀区西土城路 33 号

邮编:100088

电话:(010)82227239 82227236

E-mail:gyjz@public.sti.ac.cn