

结构抗震拟动力试验中的数据遥控 同步采集技术及其实现

郭 昕,白国良,刘 煦,朱丽华

(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘 要:土木结构抗震实验系统由电液伺服加载设备与数据采集仪两部分组成.加载实验机的控制数据保存在其控制器中,其它测试数据则保存在数据采集仪中.电液伺服试验机中加入数字命令控制模块,联机遥控触发数采仪的试验系统,将信号采集、程序计算和命令控制同步完成,加快了实验进程,解决了实验数据采集记录的不同步问题.以火电厂框排架混合结构拟动力实验为例,详细说明了基于数字命令控制实验系统联机运行的建立方法和试验流程.

关键词:地震模拟;数据同步采集;遥控触发;拟动力联机实验

中图分类号: TU317

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)04-0474-06

大型土木结构抗震实验(包括拟动力试验与多点加载的拟静力试验)必须有电液伺服试验控制与加载系统的硬件支持,以实现对其试件的加载与反馈控制.还必须配置高性能的静态数据采集系统测量试件的相关参数,这两种类型的仪器设备通常都是完全独立运行.试验中有两类信号,一类是通过传感器反馈到伺服控制器的位移、荷载等实时采集信号,另一类是试件上各类传感器测量的应变、倾角、变形参数,如何实现两类数据的同步采集记录是联机实验必须要解决的一个重要问题.

一般的数据采集仪都具有手动测量记录的功能,通过仪器的短路开关或键盘按钮,用户可随时触发数采进行采集;但其缺点是:①需要一位测试人员手动操作,对于大型结构实验,记录次数多达几百次甚至上千次,且试验时间长达数小时,将消耗较大的人力资源;②对静力实验,其加载历程可以预先估计,不需要从试件上反馈任何试验参数;而拟动力实验的加载历程未知,当加载达到误差控制限值,需由主控制器主动发出命令,同时开始采集数据,而人为干预的手动操作则无法实现数采与主控制器之间的精确同步.

因此,在开展联机类型的实验中,由计算机控制加载与遥控触发采集^[1],自动完成各类大型结构抗震实验将是结构试验方法研究领域的主要发展方向.本文以拟动力实验为例,提出数据同步采集与遥控触发在联机实验中的建立方法与试验流程,并结合一混合结构体系的拟动力实验,提出实现这种数据同步采集所必需的硬件设施,为各种类型的结构抗震联机实验提供参考建议.

1 拟动力实验的基本原理与实现

拟动力实验技术是 20 世纪 60 年代末由日本的高梨晃一教授创立^[2],通过计算机和伺服作动器联合实现,又称为计算机一加载试验机联机实验(On-line Test).该方法不需要事先假定结构的恢复力特性,将计算机分析和恢复力实测结合,将离散化的地震波模拟为一步步的地震输入,由计算机求解非线性结构动力微分方程,计算下一步的地震反应,使加载作动器作用于试件上,通过荷载传感器记录其恢复力,并参与下一步的地震反应分析,如此循环直至完成整个地震反应全过程.该方法能够真实地再现地震动和结构反应,整个实验过程相对于一次真实的地震,持续时间较长,有利于实验者观察结构破坏

收稿日期:2012-03-19 修改稿日期:2012-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978216,51178383);国家自然科学基金青年基金资助项目(50908186);教育部高校博士学科点专项科研基金资助项目(20096120110003);陕西省科技计划国际合作项目资助项目(2008KW-13)

作者简介:郭 昕(1977-),女,陕西西安人,硕士,工程师,主要从事建筑结构抗震理论及其试验方法研究.

状态,是具有广泛发展前途的抗震实验方法.图 1 为拟动力联机实验^[3]的硬件示意图.

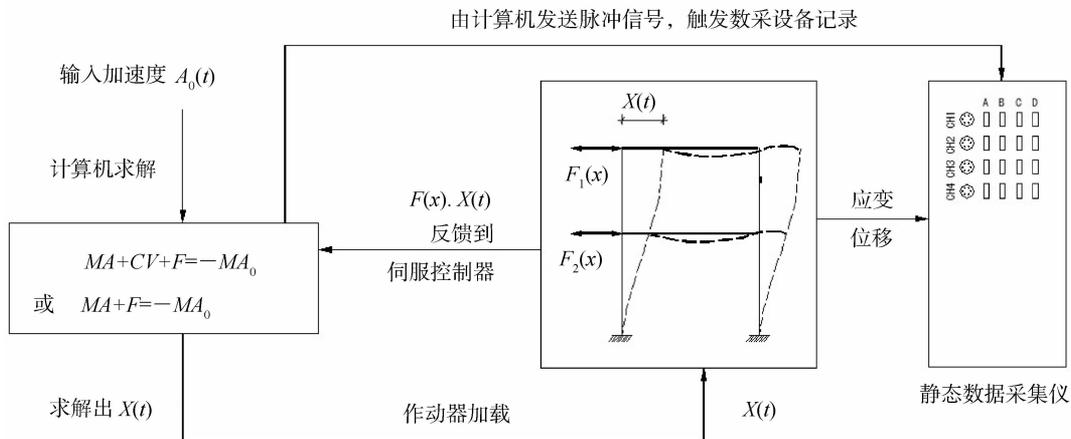


图 1 拟动力联机实验的硬件示意图

Fig.1 Hardware schematics in pseudo dynamic on-line test

拟动力实验过程是一个计算—加载—记录—计算的反复迭代过程^[4-5],整个实验过程是自动完成的,其加载进程需一步步求解结构动力方程得到加载目标值 $X(t)$. 实验中每一步加载达到控制精度后,需要同时记录当前步的试验数据,包括:一部分为结构实时反馈的位移 $X(t)$ 、恢复力 $F(x)$ 和加速度等;另一部分为试件上的应变与变形数据. 其中位移、恢复力将通过伺服加载系统内置的传感器测量、反馈并存储在主控制机中,作为计算参数参与下一步的地震时程分析;其它测点的应变、变形等数据则存储在静态数据采集仪中. 因此,联机实验中必须解决上述两部分数据记录的同步问题,即保证所有数据在时间和记录号上一一对应. 为此,需要完成以下两方面的工作:①通过主控计算机遥控触发外部数采设备记录数据;②在记录数据期间保持伺服加载设备处于动态稳定状态,待数据记录完成后再进行下一步加载,这需要在计算机控制程序中加入适当的延时等待时间.

2 数据同步记录的实现方法

2.1 数字信号遥控法

要实现数据同步采集,必须通过主控制器与数采设备的联机^[6]实现数据的自动采集记录.

首先,数据采集仪必须具备可接受外部数字信号触发的功能(如日本东京测器生产的 TDS 系列仪器后面板有“EXT. ST”的外部触发启动接口),用户可查询数据采集仪的使用说明书,查找相应的外部触发脉冲信号图^[7](见图 2),该脉冲信号图具体规定了外部触发所要求的脉冲极性、高低电平及脉冲宽度,根据此信号图编写外部触发子程序.

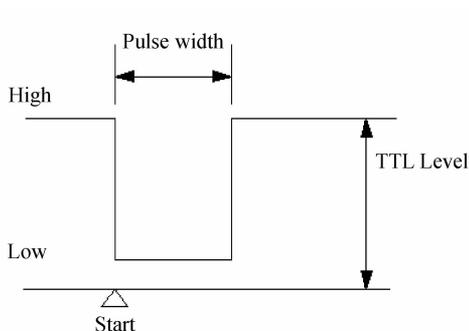


图 2 外部触发脉冲信号图

Fig.2 External trigger pulse signal

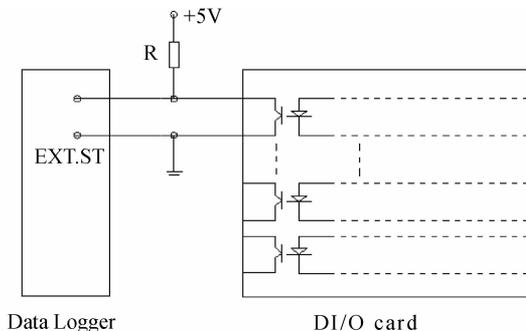


图 3 具有光电隔离的 DI/O 输出连接方式

Fig.3 DI/O output with optical isolation

在电液伺服试验机的主控制器中,须配置一块数字输入输出 DI/O 卡,利用其中的一个数字输出通

道发送数字信号,接入“EXT. ST”端口触发外部设备.相应的,在控制软件中要有发送数字信号的命令,发出必要的触发脉冲.实验控制软件根据商用软件与自编软件的不同有所区别.自行设计开发的软件可以在主控程序中编写一个触发外部设备的子程序,实验过程中每发送一个脉冲信号,则激活外部数采设备采集记录;记录结束后,利用DI/O卡中的一个数字输入通道返回一个结束脉冲,主控程序接收到该结束脉冲后就可以开始下一步的加载.如果仪器没有返回结束脉冲的功能,也可在遥控触发后,加入一定时间的延时等待,保证伺服试验机在数据记录期间处于动态稳定状态,待记录结束后再进行下一步加载.这样就确保了所有数据的同步性与稳定性.延时等待的时间取决于测点的数量及数据采集仪的记录速度,可在实验前预估计.而商用软件因为不提供源代码,只能要求其软件必须提供可发送脉冲信号的功能,设置脉冲宽度与延时等待时间.

数字DI/O卡可另外加装配置,若其主机箱中预留有各种类型板卡的插槽,在其商用软件中都有相应的功能.为了设备安全起见,一般应选择具有光电隔离的数字DI/O卡,其输出电路如图3所示.光电耦合器是以光为媒介传输电信号的一种电→光→电的转换器件,可以起到隔离电路的作用,一般隔离电压可达数千伏.该输出为集电极开路门,用户必须外接一电路,在其输出端通过一个电阻接到+5V电源上,并适当选择外接电阻值,以保证外部数采设备的触发脉冲信号要求的TTL电平电压.

2.2 D/A转换记录法

上述方法虽然能达到数据同步记录采集的目的,但是实验数据是分别记录在数采设备与主控计算机中的,分别形成两个数据文件.

数据采集仪除了测量应变信号外还能测量直流电压信号.在伺服程控加载试验机中,为了提高数据的传输速度与稳定性,其位移、荷载传感器都是模拟电路输出形式.如果能将这些模拟直流电压信号直接接入数据采集仪的电压通道,与应变等数据同时采集,所有的实验数据都存储在静态数据采集仪中,不仅可达到数据的同步,而且对实验数据的保存与后期处理更加方便.

早期的伺服控制器多为模拟控制方式,即伺服控制器反馈的位移、荷载信号以模拟电压方式输出,可直接接入数据采集仪的电压通道进行测量并存储.随着计算机技术的发展,现代化、高性能的电液伺服控制器均采用全数字控制模式,各种反馈信号先转化成数字信号后再输出.若要将这些信号接入数采设备,必须在伺服试验机中配置相应的D/A转换卡,将数字信号再转换成模拟电压信号,输出至外部数据采集仪器(见图4).

这一操作要求:

- ①数据采集仪器必须具有测量直流电压的功能.
- ②伺服控制器中的数字信号转换成模拟电压信号后,须控制在数采电压测量的量程范围内.
- ③D/A转换卡的通道数量取决于伺服控制器中传感器实时反馈的信号数量.
- ④所有数据输出至静态数据采集仪中,记录过程中要保证加载试验机动态稳定不加载.

经过以上方法,所有拟测量信号均输出至静态数据采集仪,试验时由伺服控制器控制加载精度,由主控计算机发出遥控触发命令,由静态数据采集仪负责记录所有数据,形成一个完整的数据文件,实现了联机实验数据同步记录的目的.

3 应用实例

基于西安建筑科技大学结构与抗震实验室的现有设备(日本鹭宫电液伺服程控试验机、TDS系列数据采集仪),应用本文2.1介绍的数字信号遥控法,对大型火电厂主厂房混合结构体系^[8-9]开展拟动力联机实验.该模型为大容量火电厂1000MW机组主厂房结构,A列排架柱为钢筋混凝土结构,B列框架柱为型钢混凝土结构,C、D列框架柱在煤斗大梁以下为型钢混凝土结构,煤斗大梁以上为钢筋混凝

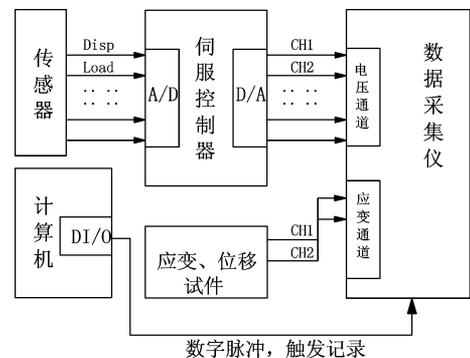


图4 全数字伺服控制模式的数据记录方法

Fig. 4 Data recording method with digital servo control mode

土结构;B、C、D 柱列布置横向和纵向剪力墙,煤斗大梁采用型钢混凝土结构,其余纵横梁和所有楼板采用钢筋混凝土结构.平面布置图如图 5 所示.

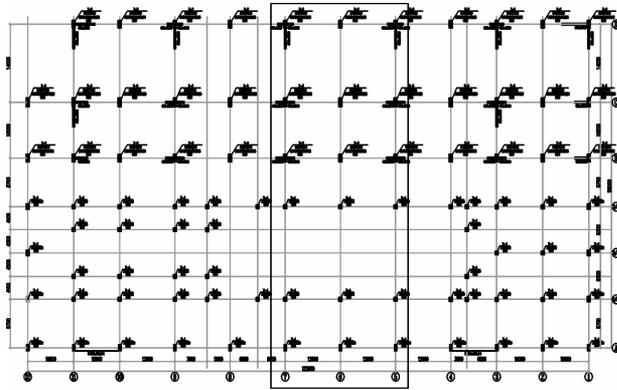


图 5 结构平面布置图

Fig. 5 Layout plan of hybrid structure



图 6 现场试验模型图

Fig. 6 Experimental model

模型试验缩尺比为 1 : 7,因主厂房原型结构尺寸巨大,根据结构布置特点,只选取含有汽机跨、除氧间、煤仓间的三跨三榀框排架结构(图 5 中方框所示)进行空间模型试验.根据相似关系确定模型结构平面轴线尺寸为 3 400 mm×5 000 mm,高度为 7 340 mm,图 6 为现场试验模型图,图 7 为模型与加载装置布置图.模型质量矩阵 M (单位 kg)、初始刚度矩阵 K (单位 kN/mm)、振型 U 如下:

$$M = \begin{bmatrix} 5.42 & 0 & 0 \\ 0 & 19.31 & 0 \\ 0 & 0 & 22.86 \end{bmatrix} \times 10^3 \quad U = \begin{Bmatrix} 1.000 \\ 0.792 \\ 0.364 \end{Bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} -12.9 & 29.5 & 76.5 \\ 29.5 & 33.6 & 80.4 \\ 76.5 & 80.4 & 103.9 \end{bmatrix}$$

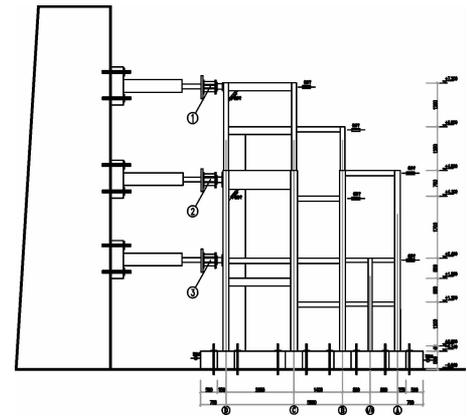


图 7 模型试验加载装置布置图

Fig. 7 Loading device arrangement

因模型结构配重不足,根据文献[10]地震时程分析中加速度峰值的规定,拟动力试验工况(PDT-1~PDT-6)分别输入 EL-Centro 波峰值加速度 250 gal、500 gal、1 000 gal、1 500 gal、2 000 gal、3 000 gal,换算为理想(满配重)模型分别对应 50 gal、100 gal、200 gal、300 gal、400 gal、600 gal.

表 1 模型结构试验内容与试验现象

Tab. 1 Content and phenomenon of PSD test

试验编号	试验内容	试验现象
PDT-1	250 gal(满配重 50 gal)	弹性阶段,无裂缝
PDT-2	500 gal(满配重 100 gal)	结构出现细微裂缝,满足 8 度设防小震不坏
PDT-3	1 000 gal(满配重 200 gal)	柱根、煤斗大梁局部出现水平裂缝,刚度开始下降
PDT-4	1 500 gal(满配重 300 gal)	裂缝继续发展
PDT-5	2 000 gal(满配重 400 gal)	部分构件裂缝贯通,满足大震不倒
PDT-6	3 000 gal(满配重 600 gal)	构件裂缝大量开展,结构刚度下降较大

应用 2.1 介绍的数字信号遥控法,整个拟动力试验中,参照图 1 所示硬件配置,每一步地震反应计算、加载完成后,由主控制器负责记录结构的地震反应(包括各加载顶处的内位移、荷载、MTS 外位移),并通过 DI /O 卡发出数字脉冲命令,遥控触发 TDS 记录其它实验数据(包括外置 TDS 位移计、应变等),

在确保三个作动器处于动态稳定的状态下,延时等待一定时间后,进入下一步的地震反应计算,如此循环直至整个拟动力试验自动完成。

为了验证伺服控制器与 TDS 数采仪之间的同步性,将存储在两种不同设备、主控制加载顶位置处的位移数据进行分类(见表 2)与对比。图 8 为不同位移测点随拟动力试验进程的时程曲线。

表 2 实验记录数据分类

Tab. 2 Classification of data recorded in serve controller and TDS

数据存储设备	伺服控制器	TDS 数采仪
图 8(a)	作动器内位移	TDS 内位移
图 8(b)	外置 MTS 外位移	外置 TDS 外位移

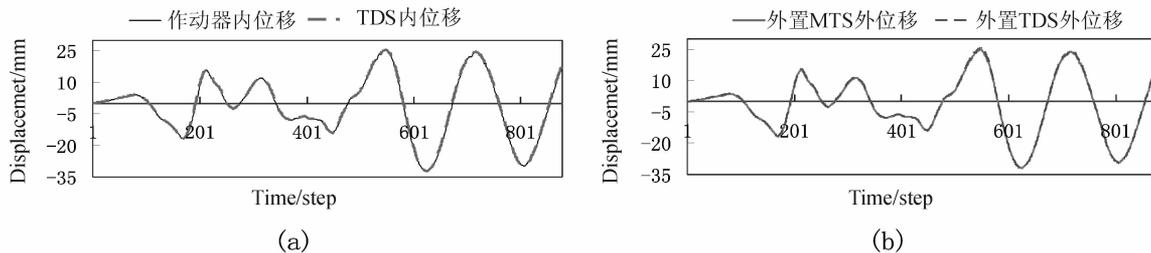


图 8 主控制器与 TDS 数采记录的各位移时程曲线对比图

Fig. 8 Contrasts of displacements recorded in serve controller and the data logger

根据图 8 图形曲线可以验证,由主控制器记录的结构地震反应(内位移、MTS 外位移)与 TDS 记录的数据(内、外位移)在时间上保持了非常精确的同步性与准确性。此次拟动力实验完成 900 步的时间为 $4\frac{1}{6}$ h,较之前缩短了 40%;更重要的是该方法不需要人为干预启动数采仪,在保证实验安全运行的前提下,试验者可以积极投入到观察试验现象的工作中,而不必担心整个加载记录系统的正常运行,有效地节约了人力与试验等待时间。

4 结论与建议

(1)本文介绍了普通数采设备与实验加载设备联机触发的实现方法,对于不同厂家不同型号的静态数据采集仪均是可行的,但前提是数采仪器必须具有外部触发接口,并可在加载试验机的伺服控制器中配置数字 DI/O 卡及相应的控制程序。实验的两部分数据虽然保存在不同的仪器中,但是其记录时间是同步的。

(2)第二种方法是在第一种方法的基础上,在伺服控制器中再配置多通道 D/A 转换卡,将荷载、位移等数字信号从主控制器中输出并转变成模拟信号,由数据采集仪的电压通道测量并记录,与其它测量信号一起存储在数据采集仪中,所有数据完全同步。这种处理方式在数据分析时会更加便利。而联机遥控触发记录的命令仍需 DI/O 卡发出。

(3)不论是拟动力试验还是低周反复加载的伪静力试验,不论是单点加载还是多点同步加载试验,都应尽可能地利用仪器之间的遥控通讯功能,将其发展为全自动或半自动控制的联机实验,以提高实验控制的自动化程度。

(4)该联机通讯方法适用于相互独立的加载与数据采集设备,解决了很多实验室新旧设备相互配合使用的一大难题,节约了采购新型设备的经费,是计算机技术在土木工程抗震联机试验中的有效尝试与成功应用。

参考文献 References

- [1] 王大鹏,张洪涛,田石柱,等.基于 MTS 计算命令控制的试验系统[J].建筑科学与工程学报,2007,24(1):12-16.
WANG Da-peng, ZHANG Hong-tao, TIAN Shi-zhu, et al. Testing system based on calculation command control of MTS [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering. 2007,24(1):12-16.
- [2] HAKUNO M, SHIDOWARA M, HARA T. Dynamic destructive test of a cantilevers beam controlled by an analog

- computer [J]. Transactions of the Japan Society of Civil Engineering, 1969(171): 596-608.
- [3] 郭昕. 地震作用下多自由度结构拟动力实验方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2005. 5.
GUO Xin. Pseudo-dynamic testing method for MDOF structures [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology. 2005. 5.
- [4] 邱法维, 国明超, 李暄. 采用微机开发的拟动力实验[J]. 地震工程与工程振动, 1994. 14(3):91-96.
QIU Fa-wei, GUO Ming-chao, LI Xuan. Pseudo-dynamic experiment method with computer control [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994. 14(3):91-96.
- [5] 李青宁, 李晓蕾, 阎艳伟. 结构动力方程精细时程积分法的几种改进[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2009, 41(1):6-10.
LI Qing-ning, LI Xiao-lei, YAN Yan-wei. Improvements on the structural dynamic equation precise time-integration [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. ;Natural Science Edition, 2009, 41(1): 6-10.
- [6] 王秉钧, 孙学军, 王少勇, 等. 现代通信系统原理[M]. 天津:天津大学出版社, 2003.
WANG Bing-jun, SUN Xue-jun, WANG Shao-yong, et al. Principles of modern communication systems [M]. Tianjing: Tianjin University Press.
- [7] TOKYO Sokki. Operation Manual of Data Logger TDS-602 [G]. Tokyo: Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. 2010. 6.
- [8] 白国良, 康灵果, 李红星, 等. 大型火力发电厂钢筋混凝土框排架结构抗震性能拟动力试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2005, 37(4): 496-500.
BAI Guo-liang, KANG Ling-guo, LI Hong-xing, et al. Pseudo-dynamic study on seismic behavior of R. C. frame-bent structures in thermal power plants [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. ;Natural Science Edition, 2005, 37(4): 496-500.
- [9] 白国良, 李红星, 白涌滔, 等. 火电厂 RC 分散剪力墙- SRC 框排架滞回性能试验研究与分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(8):59-65.
BAI Guo-liang, LI Hong-xing, BAI Yong-tao, et al. Experimental study and analysis of the hysteretic behavior of the RC scattered shear wall- SRC frame-bent structures for thermal power plant [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8):59-65.
- [10] 郑山锁. 动力试验模型在任意配重条件下与原型结构的相似关系[J]. 工业建筑, 2000, 30(3): 35-39.
ZHENG Shan-suo. Analogical ratio between scales models with less ballast and their prototypes under shaking table test [J]. Industrial Construction, 2000, 30(3): 35-39.

Implementation of data collection simultaneously in seismic PSD test

GUO Xin, BAI Guo-liang, LIU Xu, ZHU Li-hua

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Civil experimental system consists of electric-hydraulic servo-controlled testing machine and the data logger with the test data stored respectively. With the digital command control module in servo controller, a exterior trigger signal is used to remote control the data logger, and the data recording synchronously were solved by on-line processing, which quickened the testing speed by making program calculation and command control completed simultaneously. The operation establishment method and test process based on digital command control for on-line test for hybrid structure of thermal power plant were described, which realizes the pseudo-dynamic test automatically.

Key words: seismic simulation; data simultaneously recording; exterior trigger; pseudo dynamic on-line test