

# 工程结构混合试验软件 HyTest 的控制方法及应用

王 贞<sup>1,2</sup>, 王照然<sup>3</sup>, 许国山<sup>1,2</sup>, 吴 斌<sup>1,2</sup>

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 黑龙江 哈尔滨, 150090;

2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨, 150090;

3. 中国建筑股份有限公司技术中心, 北京 101300)

**摘要:** 混合试验通过模拟与试验的结合, 大大降低了对设备的要求及试验成本, 得到了较快发展. 为了提高试验的可靠性并降低试验难度, 试验的加载控制误差需要得到有效控制, 并把相关方法集成到试验软件平台. 本文以混合试验软件 HyTest 的控制方法为中心, 综述了外环控制、外环位移-内环力控制、三自由度控制方法及相关试验. 试验数据检验了方法的有效性, 并表明不同方法的特点. 多种控制策略可供选择是 HyTest 突出特点之一.

**关键词:** HyTest; 混合试验; 控制方法

中图分类号: TU317<sup>+</sup>.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)02-0220-08

## Control methods in the software HyTest for hybrid tests of engineering structure and their applications

WANG Zhen<sup>1,2</sup>, WANG Zhaoran<sup>3</sup>, XU Guoshan<sup>1,2</sup>, WU Bin<sup>1,2</sup>

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior & Control (Harbin Institute of Technology

Ministry of Education, Harbin 150090, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. China State Construction Engrg. Corp. Ltd. Technical Center, Beijing 101300, China)

**Abstract:** Hybrid testing has been developed rapidly since it combines numerical simulation and physical experiment, which can greatly reduce the cost of tests and demands for equipment. In order to improve the reliability of hybrid tests, loading errors should be effectively controlled. Meanwhile, the corresponding schemes should be incorporated into testing software to reduce complexity of conducting hybrid testing. This paper reviews several outer loop control methods implemented on a platform for hybrid tests called HyTest and test results with these methods. These control strategies include the outer loop control method, the outer displacement — inner force control method and the three-DOF control method. Test results validated the effectiveness of different methods and showed different features. Several control strategies are available for users of HyTest, which is concluded as one of the outstanding features of HyTest.

**Key words:** HyTest; hybrid testing; control method

结构抗震性能研究方法主要有三种: 拟静力试验、地震模拟振动台试验、拟动力试验(有时也称混合试验)<sup>[1]</sup>. 其中, 混合试验是一种模拟与试验相结合的试验方法, 由数值计算得到惯性力和阻尼力, 通过对试件实际加载得到全部或部分结构恢复力, 而后通过动力数值求解得到地震作用下结构响应<sup>[1]</sup>. 混合试验通过对试件进行实际加载获取真实的恢复力, 试验结果更加可信; 同时该方法对试验设备要求不高, 得到快速发展与应用<sup>[1-4]</sup>.

为了推广和研究混合试验方法与技术, 各国学者开发了几种混合试验软件平台<sup>[5-7]</sup>. 这些平台常常以完善解决了加载控制问题为前提, 很少包含控制策略. 而控制策略的实现, 对非专业人士难度较大. HyTest 是哈尔滨工业大学吴斌教授等人近年开发的一款混合试验软件<sup>[8]</sup>. 该软件目前可以完成多种类型的混合试验, 包括全结构混合试验、基于静力子结构的混合试验、基于网络的混合试验<sup>[4]</sup>等. 为了提高试验数据的精度和可靠性, 还开发了多种外环控制方法.

收稿日期: 2016-06-23

修改稿日期: 2017-03-23

基金项目: 自然科学基金国际合作项目(51161120360); 青年科学基金资助项目(51408157); 中国博士后科学基金资助面上项目(2013M531046); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HIT. NSRIF. 2014102); 黑龙江省自然科学基金资助项目(LC201423)

作者简介: 王贞(1983—), 男, 讲师, 博士. 主要从事结构抗震试验方法研究与教学. E-mail: zhenwang@hit.edu.cn

加载控制是混合试验的重要环节<sup>[1]</sup>。目前混合试验加载方案有位移控制加载、力控制加载、力位移混合加载等。位移控制加载是在混合试验中由计算机进行运动方程求解,得出试验子结构位移,而后将该位移作为命令发送给作动器,由作动器将结构加载到目标位移,最后通过传感器采集试件恢复力信息发送给计算机完成下一步的计算。而力控制与上述过程类似,所不同之处在于计算机得到试验子结构位移之后,通过一定算法将该位移转换为力,而后作为命令交给作动器进行执行。为了实现更好的控制效果,常需要采用外环控制<sup>[9]</sup>。截止目前,HyTest 软件能够采用位移控制、位移外环控制、位移外环-力内环控制等控制方法等<sup>[10]</sup>。

## 1 混合试验软件 HyTest<sup>[8-11]</sup>

HyTest 主要分为协调器、数值子结构、试验子结构三个部分,如图 1 所示。协调器的主要任务是保证子结构之间运动协调、控制试验进程等,具有求解整体结构运动方程的功能,支持多种数值积分方法,目前包括中心差分法、算子分解(OS)法、Newmark- $\beta$  法;试验子结构(MTS Connector)的主要任务是与试验控制系统进行连接,驱动试验系统更好实现目标,接收协调器位移控制设备加载,而后采集数据并返给协调器用于下一步动力分析;数值子结构部分不但集成有恢复力模型,还提供有限元软件接口,目前支持 OpenSEES 与 Abaqus。近来又开发了双向混合试验方法及功能。采用 HyTest 能完成试件刚度估计、全结构混合试验、有限元混合试验以及网络混合试验等。

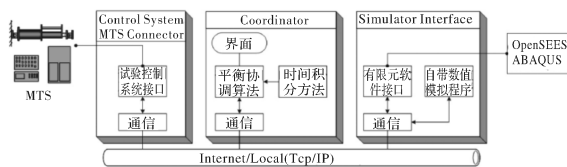


图 1 HyTest 功能模块

Fig. 1 Module of HyTest

## 2 混合试验的外环控制

### 2.1 基于 PI 算法的外环控制方法<sup>[9]</sup>

在混合试验中,如何减小该试验控制误差,降低误差的累积效应,对提高试验数据可靠性以及正确评价结构抗震性能具有重要意义。HyTest 可采用基于 PI 位移外环控制补偿误差,如图 2 所

示。在试件上外接高精度位移传感器,使用该传感器所测试件位移  $d^{LVDT}$  作为外环反馈信息,通过该位移与期望命令  $d^{desired}$  的对比得出偏差  $e$ ,再通过控制算法计算得出新命令  $d^{cmd}$ ,而后将该命令发给作动器进行执行。如此循环,最终使作动器不断逼近目标位移。

### 2.2 外环控制在 HyTest 中的实现<sup>[9-11]</sup>

MTS Connector 是采用 MTS 提供的 VB 软件接口开发的用于 HyTest 试验平台与 MTS 控制系统通信的模块,具备发送命令、保存数据、坐标变换、网络通信等功能。MTS Connector 采用 MTS 系统的软件接口开发,不需要额外的硬件、软件投入,即可实现与 MTS 系统通信。外环控制功能也被融合到该模块。

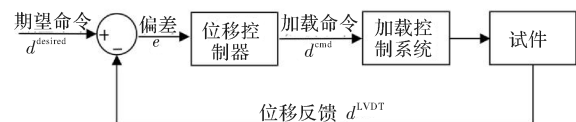


图 2 外环控制流程图

Fig. 2 Flow chart of outer loop control

外环控制的主要步骤是数据采集、计算命令及发送命令,实现方法如下:

(1)数据采集:数据采集就是读取 MTS 控制系统提供的反馈信号,从而在下一步中计算作动器命令。代码如下, LVDT\_Channel 即外环反馈信息通道名称。

```
Dim floatSignals As ObjectCollection
Dim Contr_Signal As RtFloatSig
Set floatSignals = Station.FloatSignals

Contr_Signal =
floatSignals.Find(LVDT_Channel)
LVDT_Signal = Contr_Signal.Value
```

(2)计算命令:代码如下, Contr\_kp 和 Contr\_ki 是控制参数,  $D_{\text{desire}}$  代表期望位移, Samptime 为名义采样时间, Intgl 则是积分累积项。

```
Intgl = Intgl +
(D_desire - LVDT_Signal) * Samptime

Disp_temp =
Contr_kp * (D_desire - LVDT_Signal) +
Contr_ki * Intgl
```

(3)发送命令:即把上一步得到的作动器命令赋给对应的作动器信号。代码如下, Disp\_temp 是发送给作动器的命令, Ramptime 代表斜坡时

间。Thread 代表当前线程, 利用成员函数 Sleep 实现线程的睡眠, 保证作动器的加载时间。

```
Dim Channel As RtChannel
Dim CtrlMode As MTS793Rt. RtCtrlMode
Set Channel = Station.channels

CtrlMode = Channel.ActiveMode
CtrlMode.SetSetpToValue (Disp _ temp, ramp-
time)
Thread.Sleep(Samptime)
```

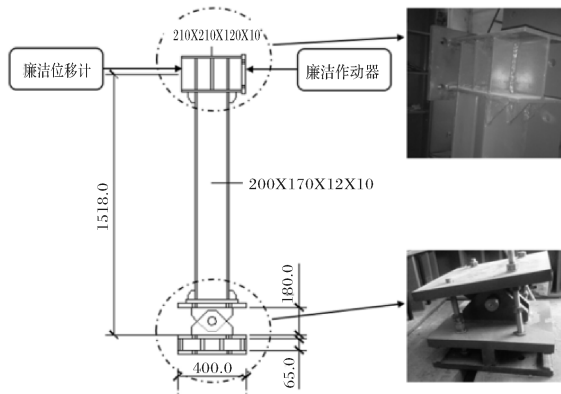
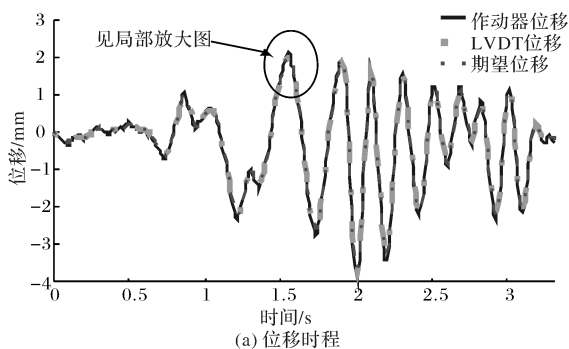


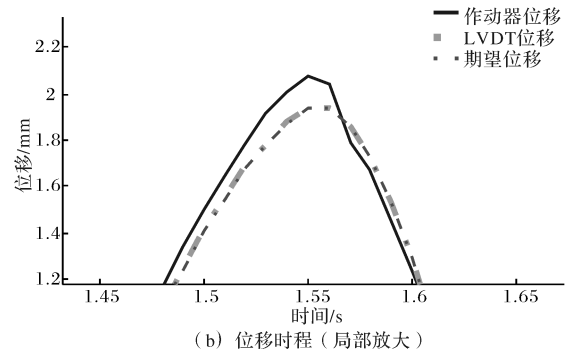
图3 试件  
Fig. 3 Specimen

### 2.3 单自由度位移外环控制混合试验<sup>[10]</sup>

为了检验程序的性能, 完成了单自由度混合试验。其试验原型结构为一单自由度模型, 质量为 1 000 kg, 阻尼比为 0.05。试件如图 3 所示, 由 H 型钢柱和四根螺栓构成, 钢柱截面尺寸为 200 mm×170 mm×12 mm×10 mm, 高为 1 518 mm, 钢柱底部中心铰接, 周边四根螺栓承受荷载, 等效结构水平刚度为 1 kN/mm 左右。试验采用 MTS 作动器进行加载, 作动器最大出力 100 kN。同时使用量程为 10 mm 的高精度 LVDT 测量试件位移用于外环控制。由于接头处为螺栓, 其刚度较小, 试验中试件的变形主要发生在螺栓之上。积分方法选用显式中心差分法, 地震记录为 El Centro (NS 1940)。试验结果见图 4。



(a) 位移时程



(b) 位移时程 (局部放大)

图4 混合试验结构位移时程

Fig. 4 Structural displacement time history of hybrid testing

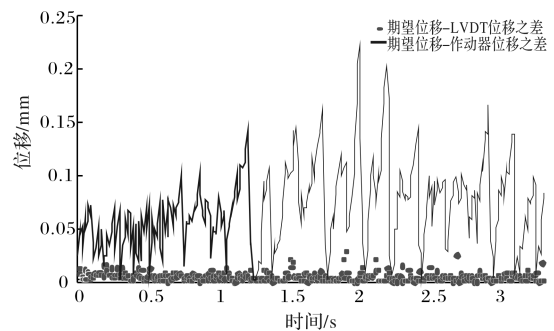


图5 混合试验结构位移偏差

Fig. 5 Structural displacement error of hybrid testing

图 4 位移时程表明, 作动器位移与期望位移之间存在一定差距, 间隙、弹性变形等导致加载误差的因素确实存在; 而期望位移与 LVDT 位移基本重合, 说明作动器将试件准确地加载到了期望位置, 可以认为测得的恢复力是准确的。图 5 中离散点代表 LVDT 位移与期望位移之差的绝对值, 实线代表作动器位移与期望位移之差的绝对值。图中结果能直观地看出作动器与期望位移的偏差在 0.1 mm 上下, 最大为 0.23 mm, 而 LVDT 位移与期望位移偏差则在 0.01 mm 上下, 最大为 0.03 mm。外环位移控制大大地提高了试验加载精度, 降低了加载误差。

### 2.4 多作动器位移外环控制混合试验<sup>[10]</sup>

完成了 6 层预制钢筋混凝土剪力墙盒子结构混合试验, 子结构划分、试件及作动器布置分别见图 6 和图 7。结构数值模型选用层模型, 选取结构底部两层足尺模型作为试验子结构, 上部四层作为数值子结构进行子结构混合试验。地震选取 El Centro (NS 1940) 地震动, 峰值加速度调为 120 gal, 积分方法选取中心差分法, 积分步长为 0.005 s。

与单个作动器加载不同, 多个作动器同步加载涉及作动器间的协调问题。每层结构仅具有水平自由度, 鉴于结构两侧刚度非常不同, 为避免

出现扭转每层采用两个作动器进行加载. 同层的两个作动器, 具有相同的期望位移, 分别进行反馈控制.

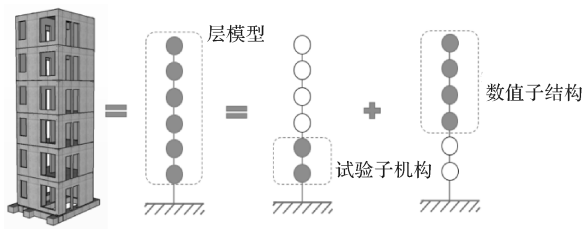


图6 试验原型及子结构划分

Fig. 6 Prototype and substructuring

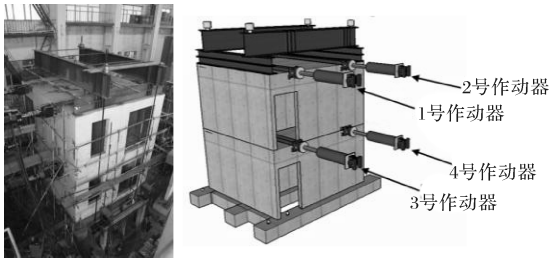
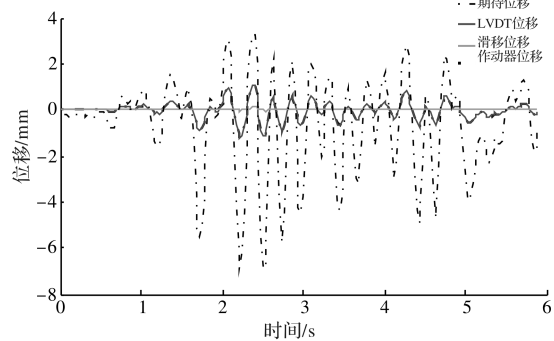


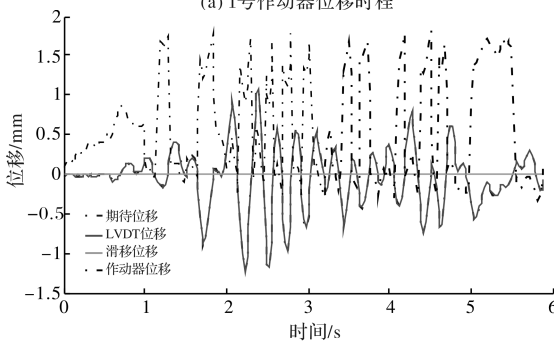
图7 试件及作动器布置

Fig. 7 Specimen and actuator arrangement

试验子结构的位移时程见图8, 限于篇幅, 仅绘制了和1号、3号作动器相关的位移时程. 由图可见, LVDT位移与作动器位移有较大的差距, 这是由间隙、滑移以及连接件变形等因素引起的. 代表期望位移的粗虚线与代表LVDT位移的细实线吻合良好, 表明位移外环控制起到了应有的作



(a) 1号作动器位移时程



(b) 3号作动器位移时程

图8 位移时程

Fig. 8 Displacement time history

用, 提高了加载精度. 同时绿线有轻微波动, 说明结构的底部在试验中发生了一定的滑移. 进一步分析表明, 四个作动器同步加载, 保证了结构水平运动而不发生扭转.

### 3 外环位移-内环力控制<sup>[10]</sup>

作动器一般有两种加载方式, 即位移控制加载与力控制加载. 试件刚度较大时, 较小的位移加载误差可能会引起较大的试件反力误差. 相反, 若试件刚度较小, 较小的力加载误差也可能引起较大的位移响应误差. 因此, 大刚度试件倾向于采用力控制加载, 小刚度试件倾向于采用位移控制加载.

外环位移-内环力控制, 在作动器内环力控制之外, 增加外接位移传感器来采集试件位移信息, 进而反馈给PI控制器调整作动器力命令, 使结构最终准确地达到期望位置, 如图9所示. 从位移控制器出来的信号, 需经转换系数换算成力, 再由作动器以力控制模式实现. 显然, 最优的转换系数就是试件刚度; 事实上, 该方法并不要求准确估计试件刚度, 因为反馈控制能逐步调节使真实位移跟上期望位移. 该方法适用于大刚度试件, 若试件刚度发生明显变化, 还可设置为切换控制.

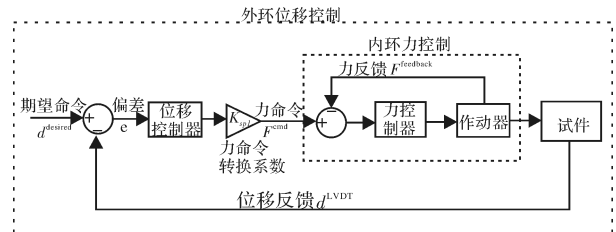


图9 外环位移-内环力控制框图

Fig. 9 Control diagram of outer loop displacement-inner loop force strategy

完成了单自由度全结构混合试验. 结构质量设为2000 kg, 阻尼比假定为0.05, 试件如图3所示, 选取El Centro(NS 1940)地震记录, 加速度峰值调为350 gal. 逐步积分方法选取中心差分法, 积分步长取0.01 s. 控制参数选择  $K_P = 0.11$ ,  $K_I = 2/s$ , 转换刚度设为1.6 kN/mm. 试验结果见图10.

图中两条虚线在每个积分步的最后重合, 说明结构在每个积分步中均达到了预期位置. 实线与较细虚线表现出的差距, 表明作动器位移与结构位移不同, 试验中存在加载误差. 两条虚线吻合较好, 表明外环位移-内环力控制方法得到有效实施.

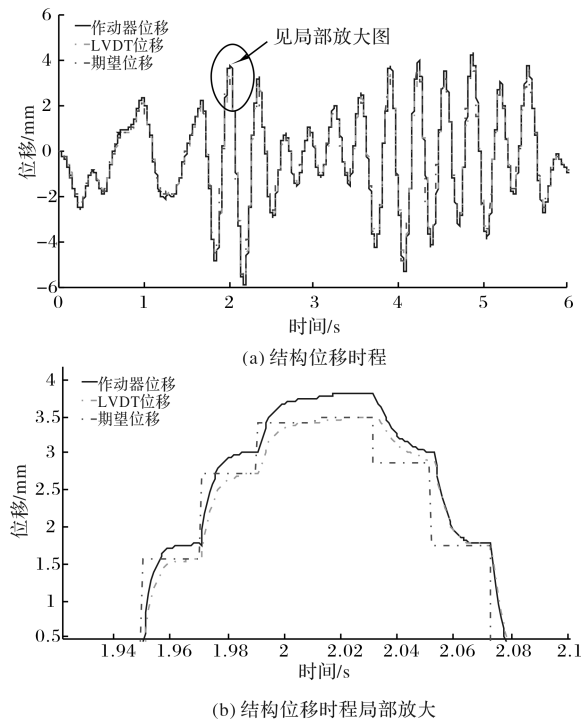


图 10 混合试验结果

Fig. 10 Results of hybrid testing

#### 4 三自由度加载控制<sup>[10]</sup>

对于复杂的混合试验,同时控制的多个位移不仅存在数量级的差异,还可能相互影响,使得控制品质大打折扣.平面节点具有两个平动、一个转动三个自由度,若均能准确物理再现,能解决框架结构、剪力墙结构等子结构试验的加载控制问题,有利于得到准确的试验结果以及正确评估结构抗震性能,具有重要意义.

三自由度加载的常见布置方案如图 11 所示.由于加载设备不能直接加载转角,结构转角需转化为作动器轴向位移进行加载.该试验的难点包括:(1)加载的相互影响:如试件发生一定转动后,水平作动器轴线不再通过加载点,使水平位移的加载受到影响;(2)竖向位移量值较小,试件竖向刚度较大,与水平方向具有明显差异,实现起来难度较大;尽管转角本身可能也较小,转化后的轴向位移可能并不小.(3)间隙、滑移、连接件弹性变形等的影响.需要明确的是,本文仅是初步探索这些问题,并没有彻底解决.

##### 4.1 水平外环控制

对该三自由度加载控制,一种方案是水平方向采用外环,而竖向与转角仅采用加载设备提供的反馈控制回路.这种重点关注水平方向、放松竖向(甚至转角)的控制方案是比较常见的,比如

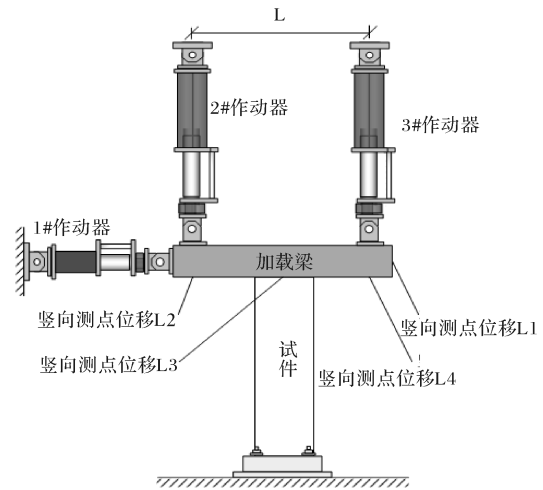


图 11 三自由度加载的作动器布置方案

Fig. 11 Arrangement of actuators for 3 DOF loading

竖向采用千斤顶加载恒定竖向力或者甚至不考虑.事实证明,这么做会存在很大的误差.图 12 是该方法的框图,其中转换函数  $G$  是为了实现转角向竖向作动器位移的转换.若考虑线性变换,有

$$\begin{pmatrix} d_2^{\text{cmd}} \\ d_3^{\text{cmd}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L/2 & 1 \\ L/2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta^{\text{desired}} \\ d_v^{\text{desired}} \end{pmatrix} = G \begin{pmatrix} \theta^{\text{desired}} \\ d_v^{\text{desired}} \end{pmatrix}$$

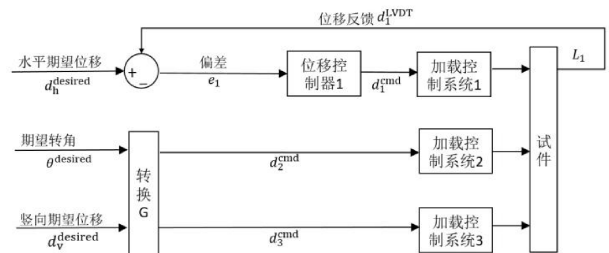


图 12 水平外环控制三自由度加载框图

Fig. 12 Horizontal outer loop control diagram for 3 DOF loading

##### 4.2 完整外环控制

为了实现对竖向位移和转角的更高精度控制,也需引入外环控制回路,如图 13 所示.为了实现方便,假定分配梁刚度很大且转角不大,即转换矩阵  $G$  总是有效的,可把转换矩阵  $G$  前移.结合水平位移的反馈控制,三自由度的完整加载控制框图如图 14 所示.尽管目标是实现三个自由度的反馈控制,在该假定前提下,转换为三个作动器的各自外环反馈控制.

##### 4.3 基于力的完整外环控制

三自由度完整反馈控制,需要高精度测量竖向位移响应,对位移计的精度及安装均要求较高.考虑到一般竖向加载是为了对试件施加一定竖向荷载,保证一定轴压比,试件往往处于弹性阶段,可采用竖向荷载与试件弹性刚度计算试件竖向位

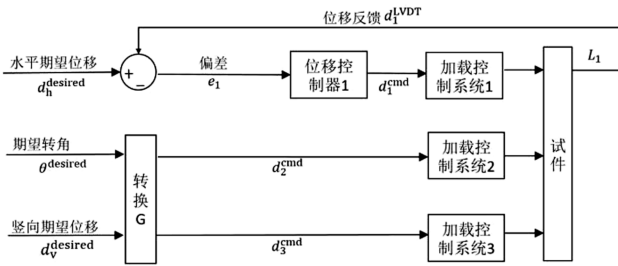


图 13 转角与竖向位移的外环控制框图

Fig. 13 Outer loop control diagram for rotation and vertical displacement

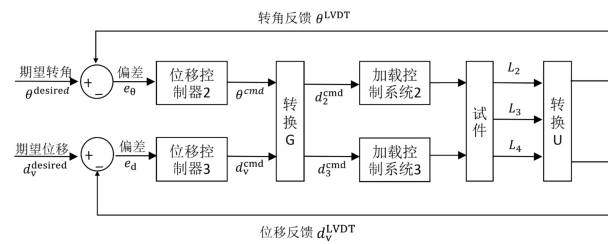


图 14 三自由度加载的完整外环控制

Fig. 14 Complete outer loop control for 3 DOF loading

移, 即竖向位移等于竖向外荷载除以其竖向刚度。这样, 在进行反馈的时候, 可以采用计算的竖向位移取代图中实测的竖向位移, 控制框图转变为图 15。

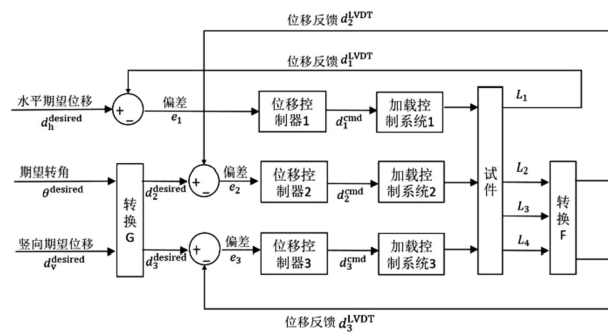


图 15 基于力的完整外环控制

Fig. 15 Complete outer loop control based on force

其优点是, 避免了小位移的高精度测量; 缺点是, 需要估计试件竖向刚度, 若试件进入明显非线性阶段, 方法不再适用。

## 5 缩尺桥墩混合试验

在哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 通过缩尺桥墩子结构混合试验检验了三种三自由度位移边界条件加载方案。试验原型为某高墩桥, 如图 16 所示。左侧桥墩底部四分之一作为试验子结构, 其余部分作为数值子结构, 并采用 OpenSEES 进行模拟。试件为 1 : 12

的缩尺模型, 加载方案见图 17 所示。

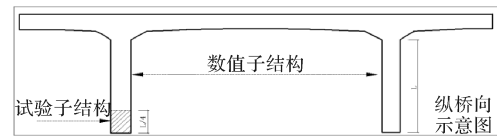


图 16 全结构示意图

Fig. 16 Schematic of the whole structure

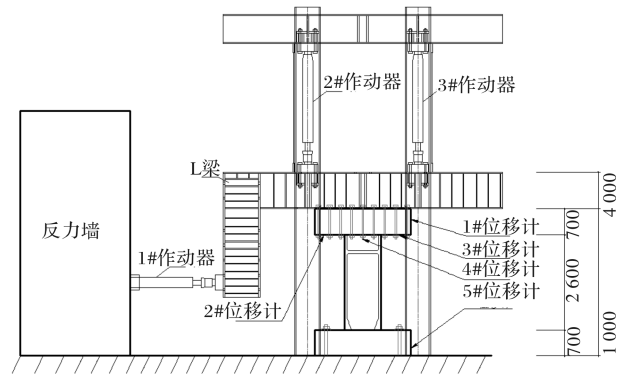


图 17 试验子结构加载方案

Fig. 17 Loading methods for experimental substructure

### 5.1 水平外环控制

水平、竖向以及转角的时程曲线见图 18, 图中虚线代表结构实际响应, 实线代表运动方程计算出的期望响应。由图可见, 结构水平位移与期望水平位移整体吻合, 竖向位移、转角位移均与对应期望位移偏差较大。外环控制下的水平位移有较高的加载精度; 竖向作动器采用原生闭环控制, 导致竖向位移与转角存在较大的加载误差, 不满足试验要求。另外, 该图表明竖向位移不足 0.2 mm, 转角不足 0.0007 rad, 控制难度非常大。

### 5.2 完整外环控制

图 19 是完整外环控制试验结果。由图可见, 水平位移、竖向位移、转角均实现较高精度实现; 实测数据中有些毛刺, 为测量噪声所致。与图 18 的水平位移控制效果相比较, 图(a)水平位移控制精度略差, 表明竖向与转角的外环控制对水平位移控制产生一定影响。另外, 需要说明的是, 试验意外超界停机, 没有完成整个试验。不过, 针对本文关心的控制问题, 已经达到了目的。

### 5.3 基于力的完整外环控制

图 20 是基于力的完整外环控制试验结果。可见, 结构水平位移、转角与对应期望位移吻合较好, 实际竖向合力与期望竖向合力也基本吻合。实际竖向合力定义为两个竖向作动器出力之和, 期望竖向合力定义为竖向位移与竖向刚度的乘积。

鉴于竖向作动器加载能力较大(200 t), 实际出力相对较小, 噪声比较明显, 能够得到这样的试验结果已经较为理想。

总结以上三例试验, 当结构对竖向位移及转角要求不高时, 考虑到可操作性及试验效率, 采用水平外环较为合适; 若在弹性阶段, 对转角及精度均要求较高, 优先采用基于力的完整外环控制; 而弹塑性阶段, 结构位移响应较大, 且准确测量结构刚度存在困难, 优先采用完整外环控制。

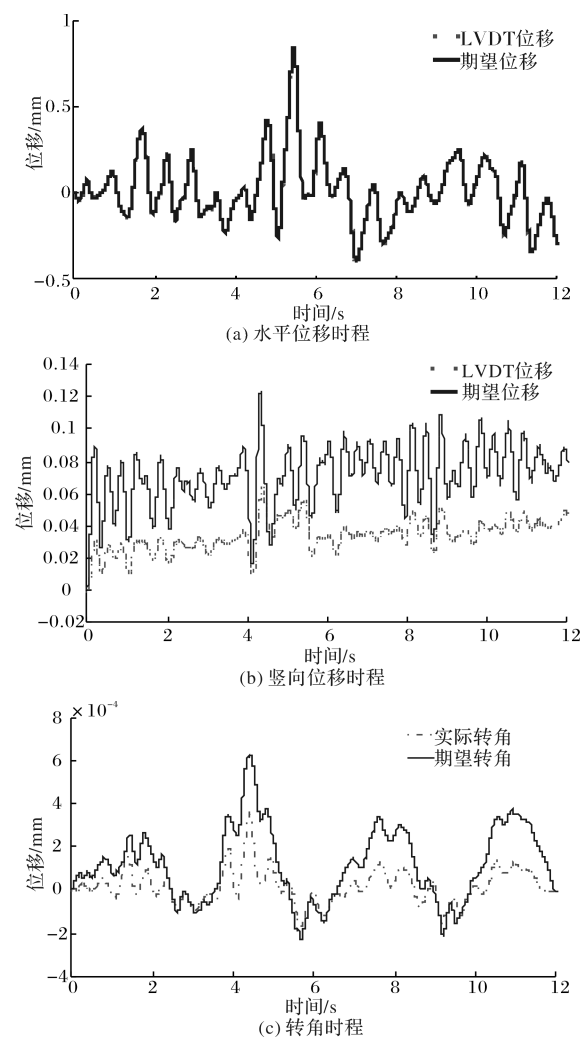
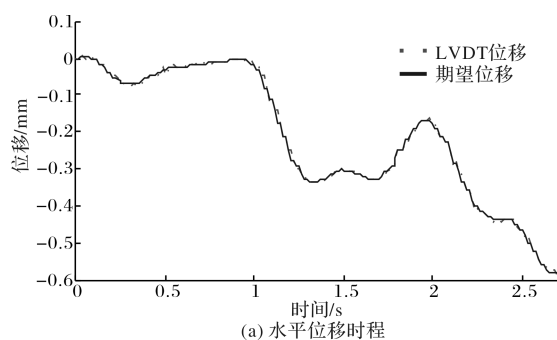
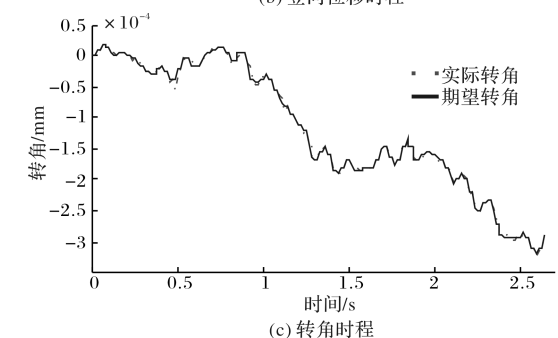


图 18 水平外环控制结果

Fig. 18 Results of horizontal outer loop control



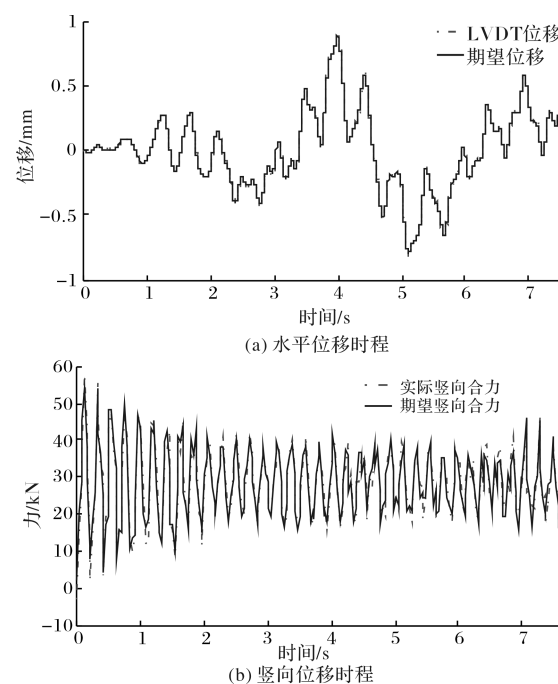
(b) 竖向位移时程



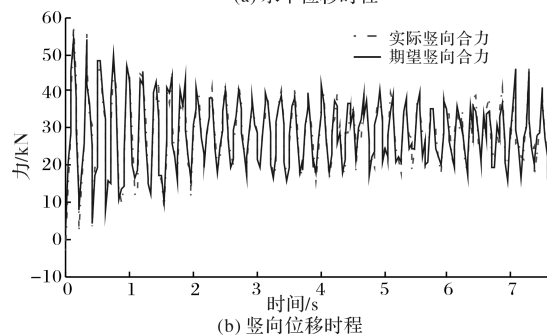
(c) 转角时程

图 19 完整外环控制结果

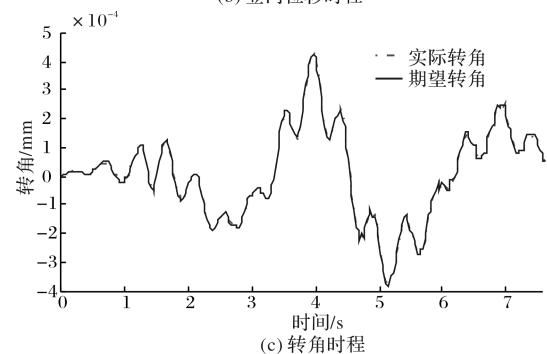
Fig. 19 Results of complete outer loop control



(a) 水平位移时程



(b) 竖向位移时程



(c) 转角时程

图 20 基于力的完整外环控制结果

Fig. 20 Results of complete outer loop control based on force

## 6 结论

主要综述了混合试验软件 HyTest 的位移外环控制及实现、位移外环-力内环控制以及三自由度加载控制,并介绍了多例验证试验.主要结论如下:

(1) 位移外环控制、位移外环-力内外控制能大幅提高加载控制精度,提高试验数据及结论的可靠性;

(2) 三种三自由度控制方案各有特点,宜根据实际需要酌情选择;

(3) HyTest 融合了多种控制策略,方便实施,是该试验软件的特色之一.

## 参考文献 References

- [1] 邱法维,钱稼茹,陈志鹏. 结构抗震实验方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
QIU Fawei, QIAN Jiaru, CHEN Zhipeng. Seismic test methodology for structures [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [2] 苏宇坤,潘鹏,邓开来,等. 子结构拟动力试验方法在老旧住宅外套式加固改造工程中的应用[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(2): 8-14.  
SU Yukun, PAN Peng, DENG Kailai, et al. Application of pseudo-dynamic substructure tests to old residential buildings retrofitted by exterior strengthening method [J]. Journal of Building Structures. 2014, 35 (2): 8-14.
- [3] 许国山,吴斌. 采用等效力控制方法的非线性结构实时子结构试验[J]. 振动工程学报, 2010, 23(3): 237-242.  
XU Guoshan, WU Bin. Real-time substructure testing of nonlinear structures with equivalent force control method [J]. Journal of Vibration Engineering. 2010, 23(3): 237-242.
- [4] 王大鹏,田石柱,蔡新江. 网络化协同结构拟动力试验方法与技术[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 118(6): 910-921.  
WANG Dapeng, TIAN Shizhu, CAI Xinjiang. Networked Collaborative Structural Pseudo-dynamic Testing Method and Technology [J]. Journal of Basic Science and Engineering. 2010, 118(6): 910-921.
- [5] KWON Oh Sung, NAKATA Narutoshi, ELNASHAI Amr. A framework for multi-site distributed simulation and application to complex structural systems[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005, 9(5): 741-753.
- [6] SCHELLENBERG A, MAHIN S A, FENVES G L. Application of an experimental software framework for international hybrid simulation[C]//Proceedings of 4th International Conference on Earthquake Engineering. Taipei: Tobias Dalton, 2006,.
- [7] 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): 122-129.  
XIAO Yan, HU Qing, GUO Yurong, et al. A network platform for remote pseudo-dynamic testing [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 122-129.
- [8] 杨格,王贞,吴斌,等. 建筑结构通用混合试验平台的开发研究. 建筑与结构学报[J], 2015(11): 149-156.  
YANG Ge, WANG Zhen, WU Bin, et al. Development of a general-purpose structural hybrid testing platform [J]. Journal of Building Structures, 2005 (11): 149-156.
- [9] 王贞,王照然,吴斌. 采用位移外环控制的拟动力试验方法及验证[J]. 地震工程与工程振动, 2016(1): 9-15.  
WANG Zhen, WANG Zhaoran, WU Bin. Outer displacement loop control in pseudo-dynamic tests and its verification. [J] Earthquake Engineering and Engineering Dynamics. 2016(1): 9-15.
- [10] 王照然. 混合试验的外环控制方法及其在 HyTest 软件中的实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
WANG Zhaoran. Outer loop control methods for hybrid test and their implementation in software of HyTest [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [11] 王贞,王照然,杨婧,等. MTS 控制系统的二次开发及其在混合试验中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2015(2): 22-29.  
WANG Zhen, WANG Zhaoran, YANG Jing et al. Secondary development of MTS control system and its application to Hybrid tests [J]. Earthquake Engineering and Engineering, 2015(2): 22-29.

(编辑 沈波)