

三自由度加载系统力-位移混合控制方法

许国山¹, 陈琦¹, 朱思宇¹, 王贞¹, 吴斌²

(1. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要 目的 研究一类考虑几何非线性的控制器设计问题, 改善三自由度加载系统的加载控制效果. 方法 在传统不考虑耦合作用的外环位移反馈控制基础上, 引入非线性变换和外环 PI 控制器, 利用力-位移混合控制的策略实现对试件的精确加载控制. 结果 笔者提出的考虑耦合作用的力-位移混合控制方法通过合理设置外环 PI 控制器的比例参数和积分参数可保证控制系统稳定, 且能够实现对试件水平位移、竖向力和转角的精确加载. 结论 该方法相比传统方法具有更好的加载控制精度, 在三自由度加载控制试验中有广阔的应用前景.

关键词 三自由度加载系统; 力-位移混合控制方法; 耦合作用; 非线性变换

中图分类号 TU317

文献标志码 A

Force-Displacement Mixed Control Method for 3-DOFs Loading System

XU Guoshan¹, CHEN Qi¹, ZHU Siyu¹, WANG Zhen¹, WU Bin²

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 150001; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, China, 430070)

Abstract: The problem of designing controllers for a class of nonlinear systems with considerable geometric deformation is concerned in order to improve the control performance of three degrees of freedom (3-DOFs) systems. Force-displacement mixed control method is proposed for loading system with 3-DOFs in this paper, which can realize accurate boundary conditions on specimens in terms of horizontal displacements, vertical forces and rotations. The proposed method improves experimental accuracy by the contributions of the nonlinear transformation and PI controller. It is shown that with proper proportional and integral controller gains, the newly developed method is stable and behaviors excellent performance on the simulations of boundary conditions in terms of horizontal displacements, vertical forces and rotations. Compared with the traditional external displacement feedback control method without considering the coupling action, the proposed method

收稿日期: 2017-10-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0701106, 2017YFC0703605); 国家自然科学基金项目(51778190); 黑龙江省自然科学基金项目(LC201423); 黑龙江省博士后科研启动基金项目(LBH-Q15059)

作者简介: 许国山(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构试验技术方面研究.

improves the experimental accuracy, and the proposed method will have broad application prospect on the loading control of system with 3-DOFs.

Key words: loading system with three degrees of freedom; force-displacement mixed control method; coupling action; nonlinear transformation

近些年,涌现一系列大型复杂结构,尤其阻尼器、防屈曲支撑等新型减振隔振装置在结构上得到了越来越多的应用. 如何研究这些结构的抗震性能也成了很重要的课题. 大比例尺甚至足尺试验能够更真实揭示试件的性能,因此对于大尺度试件试验加载方法的要求越来越高.

国内外学者对结构静、动力试验的加载控制方法,以及静力、动力试验方法做了很多研究^[1-4],并取得了一系列研究成果. 田石柱等^[5]研究了大刚度试件加载控制问题; Pan等^[6]提出了位移-力联合控制和位移-力转换控制两种控制方法; 赵刚等^[7]针对多自由度结构拟静力试验提出了三自由度体系混合控制算法,然而,这种方法本质上是单个作动器的单级控制模式,很难准确模拟复杂的边界条件; Nakata等^[8]针对多作动器耦合加载控制问题做了研究,提出了一种力-位移混合控制方法,该方法在外环级完成力-位移的转换,但是,六自由度加载系统的建设费用较高,推广应用受到一定限制; Shoraka等^[9]尝试用三自由度加载系统去模拟柱顶的轴力、弯矩和剪力等复杂边界条件,通过试验证实了所提方法的有效性; 谭晓晶等^[10-11]对大刚度试件加载控制问题做了理论、数值和试验研究,提出了一种外环位移与内环力控制的二级控制方法; 杨格等^[12]、王贞等^[13]、朱思宇^[14]研究了基于外接高精度LVDT位移传感器信号反馈的外环位移控制方法; 曾聪等^[15-16]提出了外环力控制内环位移控制加载的混合控制方法,两级控制均由作动器本身的传感器信号反馈实现; 文龙^[17]、贾德登^[18]、Xu等^[19]在此基础上提出了改进的力-位移混合控制方法,即水平方

向引入外位移传感器进行反馈控制,从而减小了水平方向由滑移所引起的误差,更好地模拟了复杂的边界条件.

笔者将在上述研究的基础上,对控制方法进行进一步的细化研究,考虑由加载装置间的间隙和滑移所引起的误差,即竖向引入外位移传感器对转角进行反馈控制,研究考虑各自由度间耦合作用以提高加载控制精度. 首先,针对三自由度加载系统以往的试验结果,分析传统控制方法存在的问题; 然后,为了解决该问题提出考虑耦合作用的力-位移混合控制方法,并进行稳定性和稳态误差分析; 最后,通过数值模拟分析验证考虑耦合作用的力-位移混合控制方法对试件水平位移、转角和竖向力的加载控制效果.

1 传统力-位移混合控制方法及试验结果分析

1.1 大型三自由度加载系统简介

笔者针对哈尔滨工业大学土木工程学院结构与抗震试验中心的三自由度加载系统展开研究. 该系统示意图如图1所示,主要包括: 竖向门式反力钢架、竖向作动器、水平作动器、L型加载梁、四连杆机构、反力墙等. 竖向门式反力架总高度为9.5 m. 水平作动器的反力由高5 m、厚3 m的反力墙承担. 可以拆掉该四连杆机构,由竖向作动器的加载控制实现目标转角. 该系统在水平方向布置1台电液伺服作动器,在竖向布置2台电液伺服作动器. 这些作动器的力量程均为-130~200 t,位移量程均为 ± 250 mm. 该系统的试验对象包括高度在4 m以内的钢、钢筋混凝土、砌体的墙、柱等试件的静力、拟静力、拟动力加载试验.

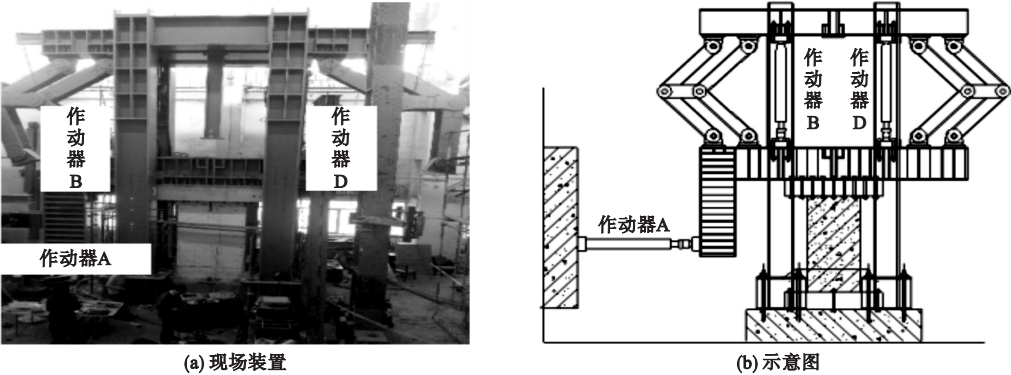


图1 三自由度加载系统

Fig. 1 The loading system with three degrees of freedom

水平作动器(作动器A)后端连接反力墙,前端连接L型加载梁的水平梁端;竖向作动器(作动器B、D)后端锚固在反力梁上,前端与L型加载梁螺栓连接. 试件顶梁预留锚孔,通过螺栓与L型加载梁锚固. 试件底座也预留锚孔,通过螺栓锚固在实验室台座上. 试验过程中通过三个作动器的协同工作来实现L型加载梁的水平位移和竖向位移. 如果要实现试件顶部转角,可以将四连杆拆除,通过三个作动器的协调控制实现水平位移、竖向位移及转角的加载.

1.2 传统力-位移混合控制方法

针对要求三自由度(即水平位移 d 、竖向

力 F 及转角 θ)加载的拟静力试验,贾德登^[18]、Xu等^[19]为了解决连接间隙与基地滑移问题,提出了利用高精度外位移计的实测值进行反馈控制的加载方法. 试验中水平方向,控制框图如图2所示. 需要指出的是,水平方向的外位移计为一端固接,另一端在试件接触面滑动的连接方法. 因此,这种位移计仅能测量单一水平方向的位移. 竖向利用作动器自身位移进行外环力内环位移的双环反馈加载控制,控制框图如图3所示,图中 C_F 为力-位移转换系数,即为试件初始轴向刚度的倒数,图中 C_F 为两竖向作动器之间距离的1/2.

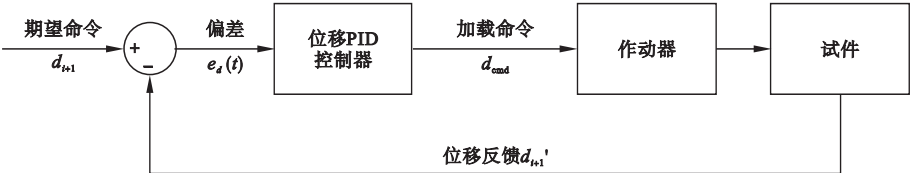


图2 水平外环控制框图

Fig. 2 The block diagram of outer displacement loop control

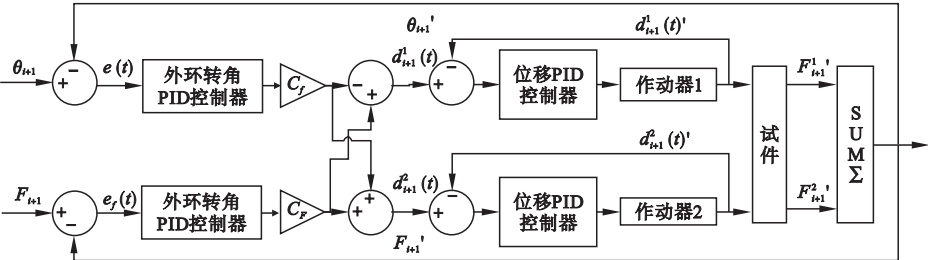


图3 竖向力-位移混合控制框图

Fig. 3 The block diagram of force-displacement mixed control method

1.3 试验结果及分析

具体试验工况和详细的试验结果参见文献[17]. 笔者在这里仅分析部分加载工况试验结果的加载控制误差. 纯剪试验试件 SCA2、SCA3 和弯剪试验试件 SCA5 的转角结果对比图如图 4 所示. 其中“目标转角”为期望实现试件顶部转角,“作动器所得转角”为由作动器位移信号值计算的试件顶部转角,“LVDT 测得的实际转角”为在试件顶部布置两个 LVDT 实测试件位移计算得到试件顶部转角.

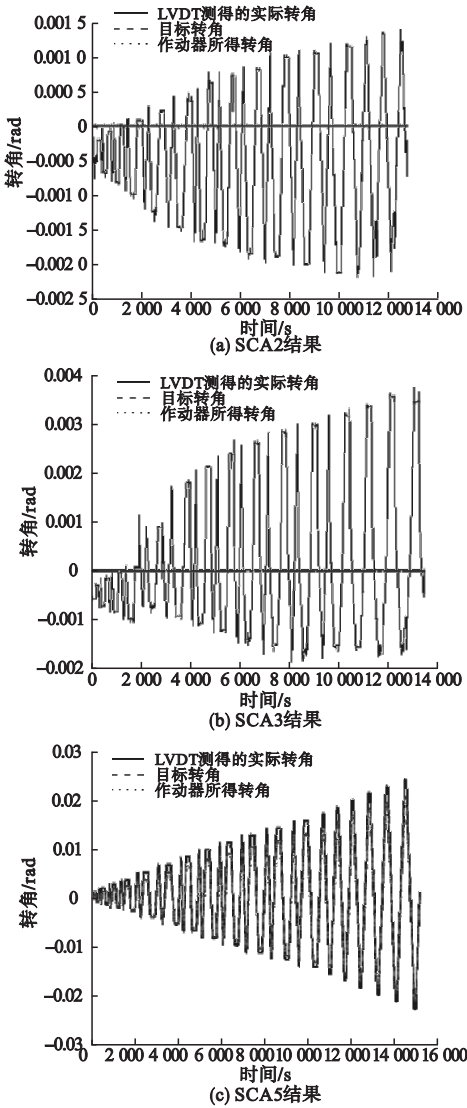


图 4 转角试验结果
Fig. 4 Test results of rotations

由图 4 可知,将作动器自身的位移作为反馈的方法能够实现对作动器所得转角控制,但是由 LVDT 实测试件顶部的转角与目标转角有一定的差别. 产生的原因是 L 型加载梁与作动器连接间隙以及 L 型加载梁与试件的连接间隙. 而这些连接间隙是不可避免的,也就是说由作动器自身位移所得转角与 LVDT 实测试件转角的误差是客观存在的. 所以研究以 LVDT 实测试件转角为加载控制目标的方法很有实际意义. 另外,当试件顶部有转角时,水平方向的 LVDT 测量结果也会受到转角的影响而导致试验误差,需要考虑耦合效应. 因此,笔者在基于外位移反馈控制的基础上提出考虑耦合作用时的力-位移混合控制方法,从而提高控制的精度.

2 考虑耦合作用力-位移混合控制方法

2.1 试验加载方案

LVDT 外位移传感器布置示意图和试验过程加载示意图如图 5 所示.

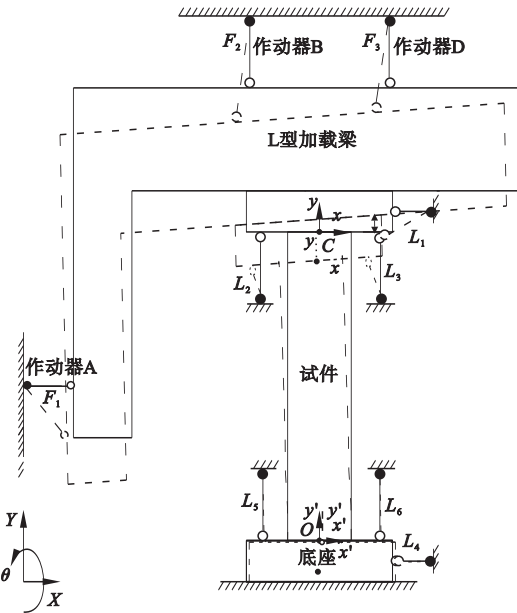


图 5 三自由度加载系统试验示意图
Fig. 5 The schematic diagram of 3-DOF loading system

试验中共布置 6 个 LVDT,每个 LVDT 的前后两端均为铰接.其中顶梁 3 个(编号为 L_1 、 L_2 、 L_3),用于测量试件顶部每个位置的位移,并以此计算试件顶部自由度上的变形;底梁 3 个(编号为 L_4 、 L_5 、 L_6),用于测量试件底部每个位置的位移,并以此计算试件底部自由度上的变形.

2.2 考虑耦合作用时的力 - 位移混合控制方法

控制方法框图如图 6 所示,控制框图的实现流程如下:对三自由度加载系统发出位移命令 d_c 、轴力命令 N_c 和转角命令 θ_c ,经过控制器及非线性变换 G_1 转化为作动器 A、B 和 D 各自的目标位移 d_{1c} 、 d_{2c} 和 d_{3c} 作用在 L 型梁上;L 型梁带动试件运动即可测得作动器 A、B 和 D 的实际出力,并通过非线性变

换 G_3 求得试件实际所受轴力 N' ,从而对轴力进行反馈控制;外位移传感器采集的位移通过非线性变换 G_2 得到试件的实际位移 d_1' 和转角 θ' ,从而对位移和转角进行反馈控制.其中,三个非线性变换 G_1 、 G_2 、 G_3 需要在实验前确定,为了简单可以假设在试验过程中 L 型加载梁、试件顶梁和底梁均为刚体.该假定产生的误差以及其他原因导致的误差由 PI 控制器调节消除.通过系统的 PI 控制器对误差不断修正,从而实现目标位移、轴力和转角.该方法相对于传统方法的优势在于:①轴向增加外位移反馈控制,能实现对试件的精确转角控制;②通过铰接位移计外环反馈的考虑耦合作用的力 - 位移混合控制方法,能实现对试件轴力、水平位移和转角的精确加载.

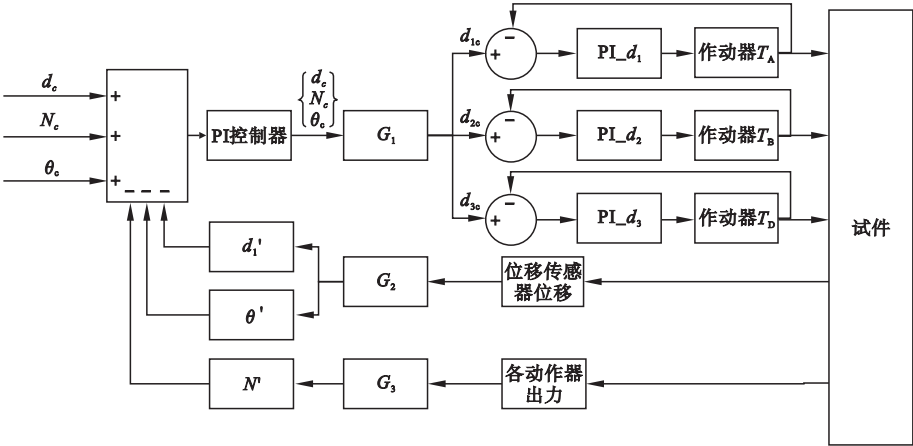


图 6 考虑耦合作用时力 - 位移混合控制方法框图

Fig. 6 The block diagram of force-displacement mixed control method considering the coupling action

2.3 非线性变换的确定

与参考文献[20 - 21]类似,利用坐标变换确定三个非线性变换 G_1 、 G_2 和 G_3 .

2.3.1 非线性变换 G_1

非线性变换 G_1 为从试件的顶部自由度的水平位移、转角和轴力目标到作动器 A、B 和 D 目标位移的变换.

作动器的目标伸长长度为

$$d_{ic} = \sqrt{(X_{Ai,s} - X_{Ai,f})^2 + (Y_{Ai,s} - Y_{Ai,f})^2} - d_{io} \quad (1)$$

式中: d_{ic} 为各作动器的目标位移, $X_{Ai,s}$ 为各作

动器与结构相连一端的横坐标, $X_{Ai,f}$ 为各作动器固定端的横坐标, $Y_{Ai,s}$ 为各作动器与结构相连一端的纵坐标, $Y_{Ai,f}$ 为各作动器固定端的纵坐标, d_{io} 为各作动器的初始长度.

其中,相应作动器与结构相连一端的坐标由下式求得:

$$\begin{bmatrix} X_{Ai,s} \\ Y_{Ai,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{co} \\ Y_{co} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_c \\ -N_c/K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta_c & -\sin\theta_c \\ \sin\theta_c & \cos\theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{Ai} \\ y_{Ai} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: X_{c0} 为控制点 C 的初始横坐标; Y_{c0} 为控制点 C 的初始纵坐标; K 为试件的轴向刚度; x_{Ai} 为各作动器与结构相连一端相对控制点 C 的横坐标; y_{Ai} 为各作动器与结构相连一端相对控制点 C 的纵坐标。

2.3.2 非线性变换 G_2

非线性变换 G_2 为从 LVDT 实测位移到试件的真实位移、转角的变换, 由于底座会有水平滑移和竖向压缩, 所以试件的真实位移为顶部控制点 C 与底部 O 点的相对位移。

对于控制点 C , 取出试件顶梁以及顶梁处的三个传感器进行几何分析, 如图 7 所示。

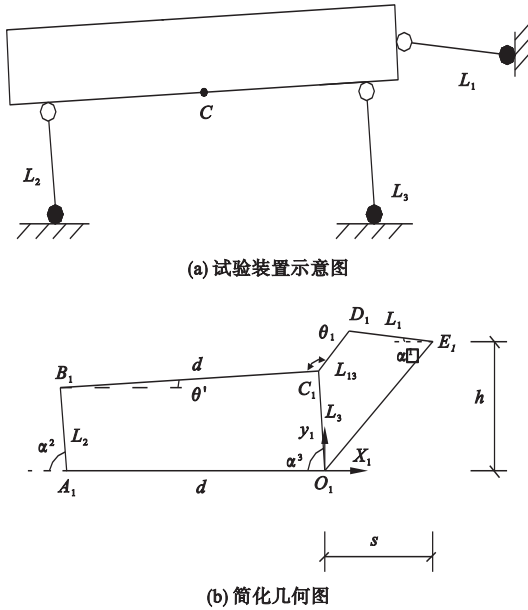


图 7 试件顶部几何分析

Fig. 7 The geometric analysis at the top of the specimen

在图 7 中, D_1E_1 、 A_1B_1 、 O_1C_1 分别代表 L_1 、 L_2 、 L_3 的外位移传感器位移。相应的向量为

$$\begin{aligned}\overrightarrow{C_1B_1} &= (L_3 \cdot \cos\alpha_3 - d - L_2 \cdot \cos\alpha_2, \\ &L_2 \cdot \sin\alpha_2 - L_3 \cdot \sin\alpha_3), \\ \overrightarrow{B_1A_1} &= (L_2 \cdot \cos\alpha_2, -L_2 \cdot \sin\alpha_2), \\ \overrightarrow{C_1D_1} &= (s - L_1 \cdot \cos\alpha_1 + L_3 \cdot \cos\alpha_3, \\ &h + L_1 \cdot \sin\alpha_1 - L_3 \cdot \sin\alpha_3), \\ \overrightarrow{B_1C_1} &= (d + L_2 \cdot \cos\alpha_2 - L_3 \cdot \cos\alpha_3,\end{aligned}$$

$$L_3 \cdot \sin\alpha_3 - L_2 \cdot \sin\alpha_2).$$

由于 C_1B_1 、 C_1D_1 长度为定值, 夹角也为定值, 则 $|\overrightarrow{C_1B_1}| = d$, $|\overrightarrow{C_1D_1}| = L_{13}$, $\overrightarrow{C_1B_1} \cdot \overrightarrow{C_1D_1} = d \cdot L_{13} \cdot \cos\theta_1$. 从而可求得 α_1 、 α_2 和 α_3 , 因此可以得到试件顶部的真实转角和试件顶部水平位移:

$$\begin{aligned}\theta' &= \arccos \frac{\overrightarrow{B_1A_1} \cdot \overrightarrow{B_1C_1}}{d \cdot L_2} - \alpha_2. \\ d'_c &= \frac{(X_{2,f} - L_2 \cdot \cos\alpha_2) + (X_{3,f} - L_3 \cdot \cos\alpha_3)}{2} - X_{c0}.\end{aligned}\quad (3)$$

式中: $X_{2,f}$ 为传感器 L_2 固定端的横坐标; $X_{3,f}$ 为传感器 L_3 固定端的横坐标。

同理可求得底座 O 点处的水平位移 d_o , 从而得到试件的真实水平位移:

$$d'_1 = d'_c - d_o. \quad (5)$$

2.3.3 非线性变换 G_3

非线性变换 G_3 为从作动器 A、B 和 D 的实际出力到试件真实轴力的变换矩阵。计算简图见图 8。

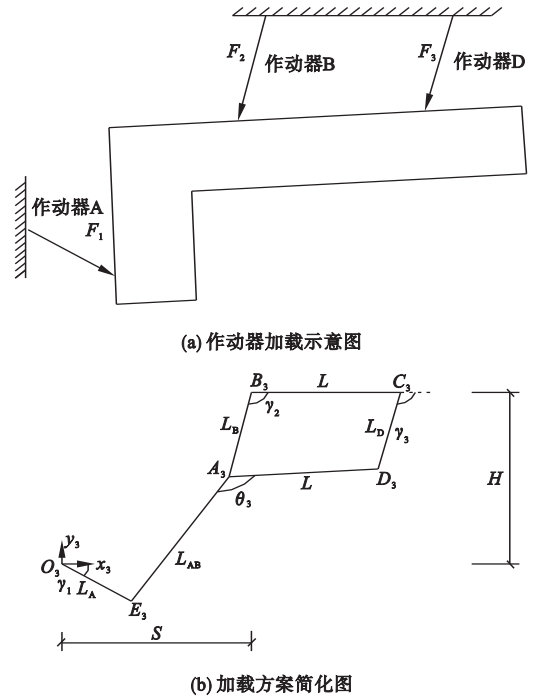


图 8 作动器加载简化几何分析

Fig. 8 The geometric analysis of the actuators and L type loading beam

图8中, O_3E_3 、 A_3B_3 和 C_3D_3 分别代表作动器 A、B 和 D 在试验中长度分别为 L_A 、 L_B 、 L_D ; E_3 、 A_3 、 D_3 为作动器与 L 型加载梁相连的移动铰接点, O_3 、 B_3 、 C_3 为作动器的固定铰接点端。

则相应的向量为

$$\begin{aligned} |\overrightarrow{A_3E_3}| &= (L_A \cdot \cos\gamma_1 - S - L_B \cdot \cos\gamma_2, \\ &L_B \cdot \sin\gamma_2 - H - L_A \cdot \sin\gamma_1), \\ |\overrightarrow{A_3B_3}| &= (-L_B \cdot \cos\gamma_2, L_B \cdot \sin\gamma_2), \\ |\overrightarrow{A_3D_3}| &= (L + L_D \cdot \cos\gamma_3 - L_B \cdot \cos\gamma_2, \\ &L_B \cdot \sin\gamma_2 - L_D \cdot \sin\gamma_3). \end{aligned}$$

由于 A_3D_3 、 A_3E_3 长度为定值, 夹角也为定值, 则 $|\overrightarrow{A_3D_3}| = L$, $|\overrightarrow{A_3E_3}| = L_{AB}$, $\overrightarrow{A_3D_3} \cdot \overrightarrow{A_3E_3} = L \cdot L_{AB} \cdot \cos\theta_3$. 从而可求得 γ_1 、 γ_2 和 γ_3 , 因此可以得到试件实际所受的竖向轴力:

$$N' = F_1 \cdot \sin\gamma_1 + F_2 \cdot \sin\gamma_2 + F_3 \cdot \sin\gamma_3. \quad (6)$$

式中: F_1 为作动器 A 的实际出力; F_2 为作动器 B 的实际出力; F_3 为作动器 D 的实际出力。

2.4 稳定性及稳态误差分析

假设系统为线性系统, 则控制系统框图如图9所示。

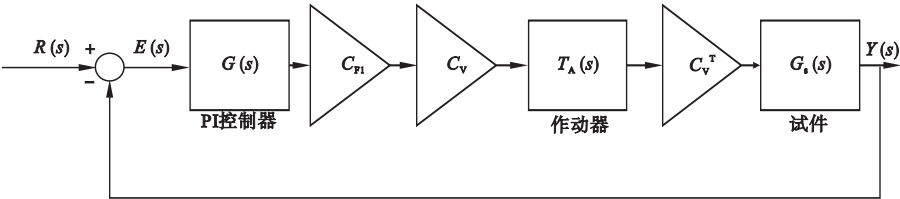


图9 控制系统框图

Fig. 9 The block diagram of the control system

图9中, $R(s)$ 为输入控制系统的目标值; $G(s)$ 为 PI 控制器的传递函数; $E(s)$ 为系统误差; C_{F1} 为力 - 位移转换矩阵。

$$\begin{aligned} C_{F1} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & K^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \\ G_s(s) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

因此, C_{F1} 和 $G_s(s)$ 互为逆变换。

2.4.1 控制系统的稳定性分析

稳定性是控制系统能够正常工作的首要条件。为了便于计算, 设 $G(s) = k_p + \frac{k_I}{s}$,

$T_A(s) = \frac{\omega_A^2}{s^2 + 2\zeta_A\omega_A s + \omega_A^2}$. 由图9可知, 控制系统的开环传递函数 $G_k(s)$ 为

$$\begin{aligned} G_k(s) &= G(s) C_{F1} C_v T_A(s) G_s(s) C_v^T = \\ G(s) T_A(s) &= \frac{(k_p s + k_I) \omega_A^2}{s^3 + 2\zeta_A\omega_A s^2 + \omega_A^2 s} \quad (7) \end{aligned}$$

从而得出控制系统的闭环传递函数为

$$\begin{aligned} \Phi(s) &= \frac{G_k(s)}{1 + G_k(s)} = \frac{G(s) T_A(s)}{1 + G(s) T_A(s)} = \\ &= \frac{(k_p s + k_I) \omega_A^2}{s^3 + 2\zeta_A\omega_A s^2 + \omega_A^2 (1 + k_p) s + k_I \omega_A^2} \quad (8) \end{aligned}$$

则闭环特征方程为

$$s^3 + 2\zeta_A\omega_A s^2 + \omega_A^2 (1 + k_p) s + k_I \omega_A^2 = 0. \quad (9)$$

列出对应的劳斯阵列如下:

$$\begin{array}{l} s^3 \left| \begin{array}{cc} 1 & \omega_A^2 (1 + k_p) \\ 2\zeta_A\omega_A & k_I \omega_A^2 \end{array} \right. \\ s^2 \left| \begin{array}{cc} 2\zeta_A\omega_A & k_I \omega_A^2 \end{array} \right. \\ s^1 \left| \begin{array}{cc} \frac{2\zeta_A\omega_A^2 (1 + k_p) - k_I \omega_A}{2\zeta_A} & 0 \end{array} \right. \\ s^0 \left| \begin{array}{cc} k_I \omega_A^2 & 0 \end{array} \right. \end{array} \quad (10)$$

根据劳斯稳定性判据, 则需满足条件为 $k_I < 2\zeta_A\omega_A (1 + k_p)$. (11)

因此, 在满足式(11)的前提下选择外环 PI 控制器的比例参数 k_p 和积分参数 k_I 则可使控制系统稳定。

2.4.2 稳态误差分析

选取阶跃输入信号进行分析,即取 $R(s)=A/s$,其中 A 为阶跃信号幅度,则系统的给定稳态误差为

$$e_{ssr} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G_k(s)} =$$
$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{s}{1 + G_k(s)} \cdot \frac{A}{s} = \frac{A}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} G_k(s)} =$$
$$\frac{A}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} \frac{(k_p s + k_i) \omega_A^2}{s^3 + 2\zeta_A \omega_A s^2 + \omega_A^2}} = 0.$$

(12)

由式(12)可以看出,该控制系统在阶跃

信号输入下的响应不存在稳态误差.

2.5 数值模拟仿真分析

利用 Simulink 对考虑耦合作用时基于外位移反馈的力-位移控制方法进行仿真分析,如图 10 所示.

模拟时取水平位移为往复加载命令,轴力为阶跃加载命令,转角为往复加载命令.设试件在竖直方向上力-位移关系为双线性模型,屈服前的刚度 K_{ini} 、屈服力 F_y 、第二刚度 K_y 分别为 2 000 kN/mm、600 kN、400 kN/mm.

采用二阶传递函数模型模拟作动器,取

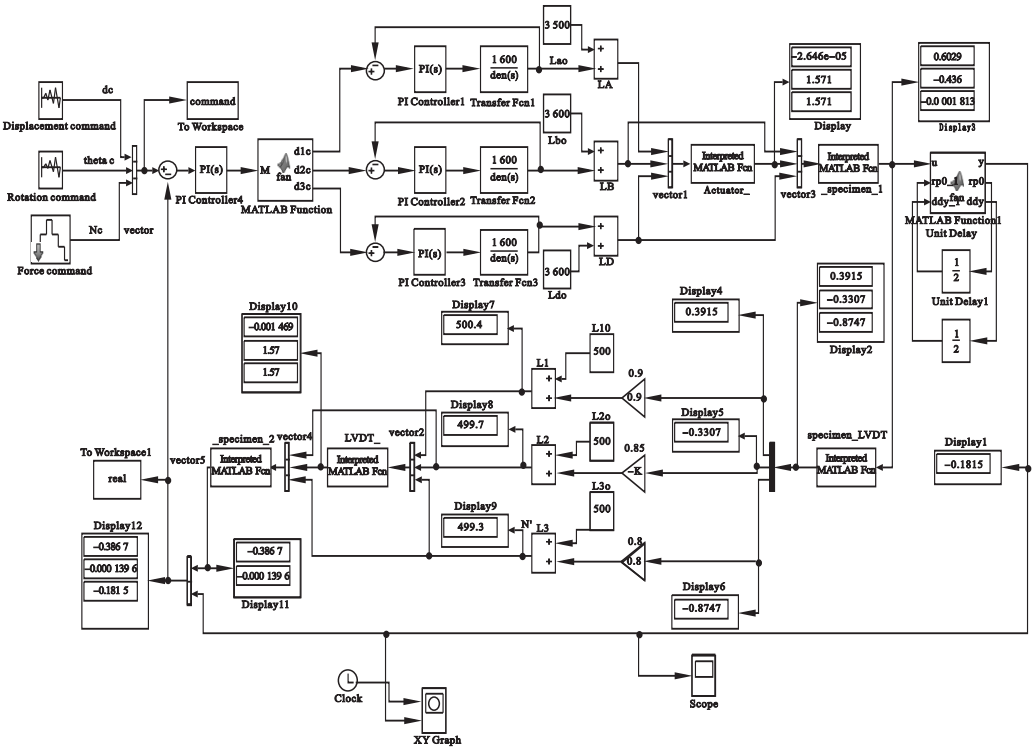


图 10 考虑耦合作用控制方法仿真分析框图

Fig. 10 The simulation analysis of the control method considering the coupling action

$\omega_A = 40, \zeta_A = 1.5$; 作动器的内部控制器参数: $k_p = 5.0, k_i = 1.0$. 作动器 A、B、D 的初始长度分别为 3 500 mm、3 600 mm、3 600 mm, LVDT 外位移传感器的初始长度均为 500 mm. 笔者引入误差模块考虑试件基底滑移和间隙所产生的影响,设传感器 L_1 的实测伸长量分别为理论伸长量的 0.9 倍, L_2 的实测伸长量分别为理论伸长量的 0.85 倍, L_3 的实测伸长量分别为理论伸长量的 0.8 倍.

另外,外环 PI 控制器参数: $k_p = 0.1, k_i = 35$. 图 11 为数值模拟结果. 其中,目标水平位移、目标转角和目标轴力分别为期望实现的试件水平位移、顶部转角和竖向轴力;实际水平位移、实际转角和实际轴力分别表示由 LVDT 实测值计算所得的实际的试件水平位移、顶部转角和竖向轴力. 由图 11 不难看出,该控制方法能够很好地实现目标水平位移、竖向力和转角.

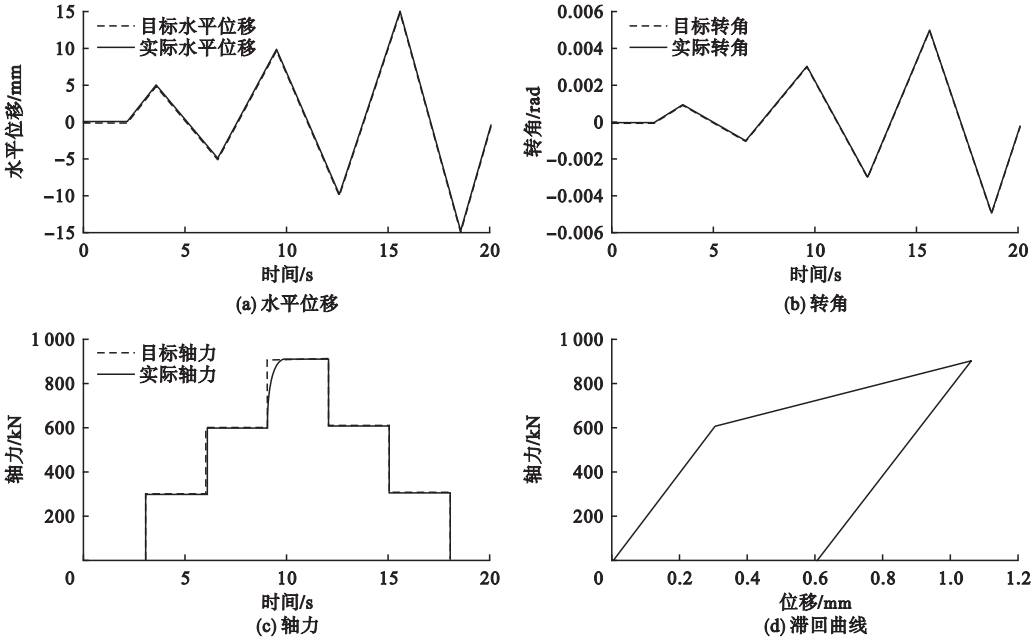


图 11 仿真分析结果

Fig. 11 Numerical simulation results

2.6 工程应用前景分析

由以上理论与数值模拟分析可知笔者研究的考虑耦合作用的力-位移混合控制方法能够很好地实现目标水平位移、竖向力和转角. 因此,该方法对于钢筋混凝土结构、钢结构等以柱、墙片为试件的拟静力试验具有广阔的应用前景. 另外,该方法也适用于钢筋混凝土结构、钢结构等以柱、墙片为试件的结构抗震拟动力试验.

3 结 语

笔者针对三自由度加载系统提出了考虑耦合作用的力-位移混合控制方法,分析了系统的稳定性和稳态误差,并进行了数值仿真分析. 研究表明,该方法通过合理设置外环 PI 控制器的比例参数和积分参数可保证控制系统稳定,在阶跃命令信号输入下无稳态误差,且能够实现对试件水平位移、竖向力和转角的精确加载. 该方法相比传统方法具有更好的加载控制精度,在三自由度加载控制试验中有广阔的应用前景.

参考文献

[1] CHEN Z,XU G,WU B,et al. Equivalent force control method for substructure pseudo-dynamic test of a full-scale masonry structure [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2014, 43 (7) : 969 - 983.

[2] CHANG C M, FRANKIE T M, SPENCER B F, et al. Multiple degrees of freedom positioning correction for hybrid simulation [J]. Journal of earthquake engineering, 2015, 19 (2) : 277 - 296.

[3] WU Bin, NING Xizhan, XU Guoshan, et al. Online numerical simulation: a hybrid simulation method for incomplete boundary conditions [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2017, 47 (1) : e2996.

[4] WANG Z, WU B, XU G, et al. An improved equivalent force control algorithm for hybrid seismic testing of nonlinear systems [J]. Structural control & health monitoring, 2017, 25 (7) : e2076.

[5] 田石柱,赵桐,赵雪峰. 位移保护下力-控制拟动力试验方法的原理 [J]. 地震工程与工程振动, 2002 (3) : 37 - 41.

(TIAN Shizhu, ZHAO Tong, ZHAO Xuefeng. Force-displacement compound control method for pseudo-dynamic test [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2002 (3) : 37 - 41.)

[6] PAN P, NAKASHIMA M, TOMOFUJI H. On-line test using displacement - force mixed control [J]. Earthquake engineering & structural

- dynamics, 2005, 34(34): 869-888.
- [7] 赵刚, 潘鹏, 聂建国, 等. 基于力和位移混合控制的多自由度结构拟静力试验方法研究[J]. 土木工程学报, 2012(12): 54-62.
(ZHAO Gang, PAN Peng, NIE Jianguo, et al. Force-displacement mixed control method for quasi-static tests of structures with multiple degrees of freedom[J]. China civil engineering journal, 2012(12): 54-62.)
 - [8] NAKATA N, SPENCER B F, ELNASHAI A S. Mixed load/displacement control strategy for hybrid simulation[C]. 4th International Conference on Earthquake Engineering; Taipei, 2006.
 - [9] SHORAKA M B, CHARLETA Y, ELWOOD K J, et al. Hybrid simulation of the gravity load collapse of reinforced concrete frames[C]. 18th Analysis and Computation Specialty Conference at Structures Congress, 2008.
 - [10] 谭晓晶, 吴斌. 外环位移控制与内环力控制拟动力试验方法[J]. 振动与冲击, 2012(14): 16-21.
(TAN Xiaojing, WU Bin. Pseudo-dynamic testing with control technique combining displacement outer loop and force inner loop[J]. Journal of vibration and shock, 2012(14): 16-21.)
 - [11] 谭晓晶, 王贞, 吴斌, 等. 基于位移正反馈的力与位移切换控制加载方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(24): 71-75, 81.
(TAN Xiaojing, WANG Zhen, WU Bin, et al. Switching control method between force control mode and displacement control mode based on positive displacement feedback[J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(24): 71-75, 81.)
 - [12] 杨格, 王贞, 吴斌, 等. 建筑结构混合试验平台 HyTest 开发研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(11): 149-156.
(YANG Ge, WANG Zhen, WU Bin, et al. Development of HyTest for structural hybrid simulation[J]. Journal of building structures, 2015, 36(11): 149-156.)
 - [13] 王贞, 王昭然, 许国山, 等. 工程结构混合试验软件 HyTest 的控制方法及应用[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017(2): 220-227.
(WANG Zhen, WANG Zhaoran, XU Guoshan, et al. The control methods in the software HyTest for hybrid tests of engineering structure and their applications[J]. Journal of Xi'an university of architecture & technology (natural science edition), 2017(2): 220-227.)
 - [14] 朱思宇. 双向混合试验方法及验证[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
(ZHU Siyu. Method and verification for bi-directional hybrid testing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.)
 - [15] 曾聪, 吴斌, 许国山, 等. 结构多轴抗震试验加载系统开发及控制策略研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 1-6.
(ZENG Cong, WU Bin, XU Guoshan, et al. Multi-axial dynamic structural testing system and its control strategies[J]. Journal of vibration and shock, 2014, 33(2): 1-6.)
 - [16] 曾聪, 许国山, 张树伟, 等. 力-位移混合控制方法在大型多功能试验加载系统拟静力试验中的应用[J]. 振动与冲击, 2016(7): 161-166.
(ZENG Cong, XU Guoshan, ZHANG Shuwei, et al. Application of force-displacement hybrid control method in quasi-static tests of a multi-functional testing system[J]. Journal of vibration and shock, 2016(7): 161-166.)
 - [17] 文龙. 预制装配式盒子结构试验与数值模拟分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
(WEN Long. Experimental test and numerical simulation of precast box-modularized structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.)
 - [18] 贾德登. 钢筋混凝土柱变轴力及转角拟静力试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
(JIA Dedeng. Quasi-static test of RC column with variable axial forces and rotations[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.)
 - [19] XU G, WU B, JIA D, et al. Quasi-static tests of RC columns under variable axial forces and rotations[J]. Engineering structures, 2018, 162: 60-71.
 - [20] MERCAN O, RICLES J M, SAUSE R, et al. Kinematic transformations for planar multi-directional pseudodynamic testing[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2009, 38(9): 1093-1119.
 - [21] CHANG C M, FRANKIE T M, SPENCER B F, et al. Multiple degrees of freedom positioning correction for hybrid simulation[J]. Journal of earthquake engineering, 2015, 19(2): 277-296.