

刘洪波,刘洁.建筑抗震实时混合试验时滞补偿方法研究综述[J].地震工程学报,2020,42(6):1361-1368.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1361

LIU Hongbo,LIU Jie.Review of Delay Compensation Methods for Real-time Hybrid Testing of Earthquake-resistance of Buildings[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(6):1361-1368.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1361

建筑抗震实时混合试验时滞补偿方法研究综述

刘洪波,刘 洁

(郑州航空工业管理学院,河南 郑州 450015)

摘要: 时滞补偿是建筑抗震实时混合试验的重要问题。文章对时滞补偿方法的研究进行总结,将时滞补偿方法分为基于时间的位移预测时滞补偿方法、基于反馈力的位移预测时滞补偿方法、基于加载系统模型求逆的时滞补偿方法、基于控制理论的时滞补偿方法和基于集成理念的综合补偿方法。

关键词: 建筑抗震; 实时混合试验; 时滞补偿

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1361-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1361

Review of Delay Compensation Methods for Real-time Hybrid Testing of Earthquake-resistance of Buildings

LIU Hongbo, LIU Jie

(Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450015, Henan, China)

Abstract: Time-delay compensation is an important problem in the real-time hybrid seismic testing of buildings. In this paper, research on time-delay compensation methods are summarized and these methods are divided into time-based displacement prediction, displacement prediction based on the feedback force, methods based on loading system model inversion, methods based on control theory, and comprehensive compensation methods based on concept integration. All of these methods are introduced and described.

Keywords: earthquake-resistance of building; real-time hybrid test; time delay compensation

0 引言

近十几年来,建筑抗震实时混合试验(real-time hybrid testing, RTHT)在建筑抗震领域中越来越得到普遍接受。实时混合试验也称实时混合模拟(real-time hybrid simulation, RTHS)或者实时耦联动力试验(real-time dynamic hybrid testing, RT-

DHT)。理想状态下,实时混合试验数值子结构计算得到的目标位移应该在每一个时步实时传输给加载系统的控制器,然后由加载系统准确、准时地施加给物理子结构,并实时将交界面作用力反馈给数值子结构。但是实际试验中,加载系统不可避免地存在一定的响应滞后,无法准时实现物理子结构的加载目标。即在 t 时刻,本应对试件施加 $x(t)$ 的控制

收稿日期:2020-07-08

基金项目:国家自然科学基金(51508524);河南省科技研发项目(192102310018)

第一作者简介:刘洪波(1975-)男,博士,副教授,主要从事工程结构、结构抗震方向研究工作。E-mail:502923554@qq.com。

通信作者:刘 洁(1981-)女,博士,副教授,主要从事工程结构、结构抗震方向研究工作。E-mail:191823809@qq.com。

位移,并反馈交界面作用力 $T(t)$;但由于加载系统响应滞后,该位移将在时间 τ (加载系统时滞时间)后施加给试件。因此,实际施加给试件的位移为 $x(t-\tau)$,反馈给数值子结构的交界面作用力为 $T(t-\tau)$,这就是加载系统时滞问题。当位移或力信号发送至加载系统时,加载系统往往需要经过一段时间才能达到指令要求的位移或力,这一段时间称为时间滞后(time delay)^[1]。合理地进行时滞补偿是确保试验结果准确性的重要因素。关于时滞补偿方法,国内外学者进行了大量的研究,取得了丰富的研究成果。

1 基于时间的位移预测时滞补偿方法

1.1 基本原理

由于时滞的存在,加载系统的实测位移总是落后于其命令位移。最简单的时滞补偿方法就是提前发送位移命令,从而使得提前的时间与时滞相互抵消。位移预测时滞补偿方法将试验传递系统简化为纯延迟,这样系统的时滞就是一个常数 τ_a 。如果提前发送命令位移给加载系统的时间恰好等于加载系统时滞 τ_a ,那么在任一积分计算时刻加载系统的实测位移都恰好等于期望加载系统实现的位移(即数值计算得到的位移,称之为期望位移),消除了时滞影响,即需要在试验时间的 t_i 时刻将结构在 $(t_i + \tau_a)$ 时刻的位移响应作为位移命令发送给加载系统。但是,对于采用显式积分方法的实时混合试验,在当前 t_i 时刻仅有通过求解数值子结构运动方程得到的下一积分步结构期望位移 d_{i+1} ,结构在 $(t_i + \tau_a)$ 时刻的位移响应在当前 t_i 时刻是未知的,为了实现提前发送位移命令,需要通过其他方法预测结构在一个时滞 τ_a 之后的位移响应 $d_{i+1+\tau}$ ^[2]。

1.2 基于多项式插值预测位移

目前应用最广泛的时滞补偿方法是 Horiuchi 等^[3]提出的基于拉格朗日(Lagrange)多项式插值的方法,该方法适用于时滞 τ 是计算时步整数倍的情况。该方法根据当前步及前几步的计算位移 x 构建 t_i 时刻的 $x(t_i)$ 多项式数学模型,然后外插得到一个时滞 τ 之后的结构预测位移 $x(t_i + \tau_a)'$,并在当前时刻作为输入信号发送给加载系统,即提前一个时滞 τ 发送给加载系统,从而实现时滞补偿。

Wallace 等^[4]提出采用最小二乘法拟合多项式,选择多项式的阶数以及先前位移点的个数为参数。该方法不限制数据点个数,不要求时滞 τ 是步

长 Δt 的整数倍,可以消除一部分噪声和试验误差。

Bonnet 等^[5]采用拉盖尔(Laguerre)多项式,该算法以当前数据点作为输入,并且对当前子步的位移进行指数加权,外插出子步的预测位移。适用于数值积分时步较大的试验。

1.3 基于运动学加速度预测位移

Horiuchi 等^[6]进一步扩展了他的常数时间延迟的补偿方法。首先利用公式 $\ddot{x}' = 2\ddot{x}_0 - \ddot{x}_1$ 预测出 τ 时刻后的线性加速度,然后再根据 Newmark- β 法中的 $x' = x_0 + \tau\dot{x}_0 + (\tau^2\ddot{x}_0)/3 + (\tau^2\ddot{x}')/6$ 位移计算公式预测出 τ 时刻后的预测位移。这种方法提高了系统稳定性。

Ahmadizadeh 等^[7]提出了采用基于显式 Newmark 逐步积分算法下位移预测补偿算法(Newmark explicit prediction method, NEPM)。采用显式 Newmark 逐步积分算法($\beta=0, \gamma=1/2$)中的位移计算公式和上一时步的位移、速度和加速度 $x'_i = x_{i-1} + (\Delta t + \tau)\dot{x}_{i-1} + (\Delta t + \tau)^2\ddot{x}_{i-1}/2$ 进行位移预测,该方法可以降低高频噪声。

1.4 自适应在线预估时滞补偿

Darby 等^[8]提出了一种在线的过程来估计和补偿加载系统的延迟,在实时控制系统中,该公式假定时滞大小等于常数比例增益 C_p 乘以实际位移与目标位移的差值(同步误差),公式中引入了速度的双曲正切项。

Wallace 等^[9]提出了(Adaptive forward prediction, AFP)自适应前向补偿算法,算法中引入了初始预测参数 P 和自适应调整参数 ρ ,令时滞 $\tau = \Delta t(P + \rho)$, ρ 通过自适应增益系数 α 和同步误差 $e2$ (计算位移与实测位移)确定。

Bonnet 等^[5]对 Darby 等的公式进行了简化,将实时误差作为执行器速度和延迟的乘积,用振幅因子 A_{fac} 修正目标位移,用速度的倒数替代同步误差增益系数 C_p ,修正后的公式仅包含另一个增益系数 C_v 。

Ahmadizadeh 等^[7]研究了响应速度对时滞估计的影响,通过引入线性加速度外插格式和学习增益系数 G (考虑响应速度对时滞估计影响),调整时滞估算的收敛速度和振荡程度,来减小时滞量变化产生的误差,该法适用于低激励水平试验。

王贞等^[10]提出了基于最小二乘法的时滞实时在线估计方法。该方法假定液压伺服加载系统为纯

延迟环节,引入遗忘因子 d ,能较好地跟踪系统时滞的变化。最小二乘法在线时滞估计方法考虑响应位移 $y(t_i)$ 中的幅值误差因素 $\mu(t_i)$,利用泰勒级数建立命令位移 $y_c(t_i)$ 、响应位移和系统时滞 W_i 之间的近似关系,用参数 $\hat{\theta}$ 建立 W_i 的计算公式,采用渐消记忆递推最小二乘算法,引入遗忘因子 d ,进行迭代计算得到 $\hat{\theta}$,进而计算出时滞。

Chae 等^[11]提出了基于自适应时间序列(adaptive time series,ATS)的时滞补偿算法。加载系统的输入位移 $u(t)$ 是包括时滞 τ 的幂级数和 t 时刻的输出位移的时间序列表达式,表达式中的参数 a_j 通过采用最小二乘法使目标输入与输出之间的误差最小化而获得,并随着加载系统的响应自适应地改变。ATS 算法不需要自定义的增益参数,适应于时滞变化强和非线性伺服液压系统。

A.PBetancur 等^[12]提出了有条件自适应时间序列(conditional adaptive time series,CATS),通过两个低通滤波器降低噪声影响。

2 基于反馈力的位移预测时滞补偿方法

2.1 基于模型参数的位移预测

Carrion 等^[13]提出基于模型响应的位移预测时滞补偿方法。该方法通过引入质量矩阵 \mathbf{M} 、阻尼矩阵 \mathbf{C} 、外部激励 F 以及初始弹性刚度 K_e ,以未补偿目标位移 x_{i+1} 的系统模型(自由度较少时取完整的模型,自由度大时采用弹性振型模态叠加技术取几个低阶模态模型)为初始条件,通过测量的恢复力矢量 \mathbf{R}_i 和给定的刚度矩阵 \mathbf{K} 获得恢复力矢量 \mathbf{R}_{i+1} 后,利用中心差分法计算预测位移 $\hat{x}(k)_{i+1}$ ($k=1, 2, \dots, \lambda$), λ 是时滞和步长之间的比率($\lambda=\tau/\Delta t$),取 λ 为整数,最终的预测位移 $\hat{x}(\lambda)_{i+1}$ 作为命令发送给加载系统补偿时滞。该方法能够实现更大的预测范围和较好的稳定性,适用于更高固有频率或自由度的结构。

刘进进等^[2]提出基于结构参数的位移预测时滞补偿方法。该方法以当前步的试验子结构的反力作为初始状态,以试验系统的时滞作为积分步长,通过一次积分计算得到一个时滞后的结构的响应,在当前时刻将响应发送给加载系统。该方法基于结构的运动量及结构参数,可能具有更好的预测效果。

2.2 基于反馈力修正的时滞补偿方法

Zhao 等^[14]提出了等效力试验(effective force

testing,EFT)的相位超前补偿法(phase-lead compensation,PLC),利用相位超前网络对补偿信号进行相位调整,通过带相位调整的速度反馈补偿,进行反馈力补偿。其补偿公式为 $(T_d s + 1)/(\alpha T_d s + 1)$, α 是个常数 0.1, T_d 是相位超前网络的时间常数(EFT)。

Ahmadizadeh 等^[7]提出基于反馈力修正的时滞补偿方法。根据建立已知位移 $x(t)$ 和反馈力 $r(t)$ 的二阶多项式;然后根据位移多项式,求得目标位移 x_d 所对应的目标时间 t_d ;最后通过 $r(t)$ 的二阶多项式计算 t_d 下的目标反馈力 r_d ,作为真实反馈力进行下一步的计算。这个过程不需要精确估计时滞,可以在时滞达到实际值之前补偿跟踪误差,可以改善初始低振幅激励周期试验的稳定性。这个过程需要选择足够大的预估时滞以减少多项式外推误差。

2.3 基于最优回复力的时滞补偿

吴斌等^[15]提出基于时滞上限(upper bound delay,UBD)的时滞补偿算法,也称近完全时滞补偿算法(nearly complete compensation scheme for time delay)。其中位移通过预估的时滞上限 τ_e 进行过补偿,使得试验子结构超前于数值子结构,然后通过一个优化过程寻找理想位移 $d_{i+1,o}$ 对应的最优回复力(实测力)作为反馈力 $r_{i+1,o}$,进行下一步的计算。

2.4 基于恢复力的虚拟耦合时滞补偿

Christenson 等^[16]在大型试验中应用虚拟耦合(Virtual Coupling,VC)的补偿方法来提高系统的稳定性而不需要增加明显的计算阻尼,在物理子结构和数值子结构之间引入一个由弹簧和阻尼器组成的虚拟耦合单元,使得恢复力和外荷载之间的开环传递函数中增加了虚拟刚度项和虚拟阻尼项。根据恢复力的大小调整虚拟刚度和虚拟阻尼能够平衡系统的性能和稳定性,这种机制适用于试件出现强非线性行为的试验。

3 基于加载系统模型求逆的时滞补偿方法

3.1 振动台逆补偿

Sung-Kyung Lee 等^[17]研究利用逆传递函数补偿法来消除振动台响应时滞的影响。首先获得输入信号与测量的振动台加速度之间的传递函数 $G_e(s)$,然后利用 MATLAB 中的“invfreqs”函数,采用阻尼高斯-牛顿迭代搜索法求得逆传递函数的表达式;输入信号经过该逆函数后再提供给振动台,对振动台的动力学行为同时进行相位和幅值的补偿。

3.2 前馈控制逆补偿

Carrion 等^[18]提出了运用逆动力补偿的修正法作为前馈补偿器对系统动力延迟及时滞进行补偿。通过建立一个合适的系统(通过给传递函数增加极点使其至少等于该传递函数的零点)对逆动力进行修正。该方法给出了测试系统动态响应传递函数 G_{xu} 、前馈补偿器传递函数 $G_{FF}(s)$ 和补偿后测试系统传递函数 $G_{xd}(s)$ 三者的关系, $G_{xd}(s) = G_{FF}(s)G_{xu}(s)$, $G_{FF}(s)$ 位于 $G_{xu}(s)$ 之前, 前馈补偿器设计实质是动态系统逆的计算 $G_{FF}(s) = (G_{xu}(s))^{-1}$, 补偿后系统的传递函数变为期望的 $G_{xd} = 1$, 对象的逆必须是最小相位。进一步, 为了获得稳定的前馈控制器, 通过利用装置动力的逆与单位增益低通滤波器串联, 以及恰当的动态调整使控制器稳定, 这个方法自动调节能力有一定的局限性。随后, 将反馈控制增加到逆动力补偿过程中, 提出了前馈反馈的补偿方法, 并将该方法用来驱动带有 MR 阻尼器的实时控制系统, 建立了传递函数, 使得不同的传递函数在驱动 MR 阻尼器的不同的电流的驱动下可以无扰动切换。

Phillips 和 Spencer^[19-20]应用前馈反馈的补偿方法且同时运用无扰动的传递函数在实时控制系统中驱动大型的非线型的半主动控制装置。进一步提高了基于模型的前馈反馈补偿算法, 运用更加精确的模型的逆并且加入了 LQG 反馈控制。

3.3 单指数逆补偿

陈城等^[21]建立了一阶的简化的离散的传递函数, 并运用简化的逆补偿的方法来前馈补偿实时控制系统的延迟, 该逆补偿器的本质是描述加载系统运动特性的离散传递函数, 其中假定时滞为常量。由于加载系统存在时滞, 在 t_{i+1} 时刻, 加载系统实际测量位移仅为 $d_{i+1}^{m(j)}$, 而不是目标命令位移 $d_{i+1}^{c(j)}$, 加载系统达到目标命令位移的时间为 t_d , $t_d = \alpha \delta t$, α 是一个大于 1.0 的数。假设加载系统在第 $(i+1)$ 个积分时间步的第 $(j-1)$ 个子步结束时达到实际测量位移 $d_{i+1}^{m(j-1)}$, 使用线性执行器响应, 则第 $(i+1)$ 个时间步的第 j 个子步结束时测得的位移响应位移 $d_{i+1}^{m(j)} = d_{i+1}^{m(j-1)} + (d_{i+1}^{c(j)} - d_{i+1}^{m(j-1)})/\alpha$, 其中, t_d 表示从 $(j-1)$ 子步结束时刻到 j 子步加载系统测量位移达到计算位移时的持时, 即时滞。对 $d_{i+1}^{m(j)}$ 进行 z 变换得到离散传递函数 $G_d(z) = X^m(z)/X^c(z) = z/[\alpha \cdot z - (\alpha - 1)]$, z 是离散 z 域中的复变量,

$X^m(z)$ 和 $X^c(z)$ 分别是 $d_{i+1}^{m(j)}$ 和 $d_{i+1}^{c(j)}$ 的离散 z 变换。将 $G_d(z)$ 中的测量位移用预测位移 $d_{i+1}^{p(j)}$ 代替, 则逆补偿方法 $G_c(z) = X^p(z)/X^c(z) = [\alpha \cdot z - (\alpha - 1)]/z$, 其中 $X^p(z)$ 是发送给加载系统的预测位移 $d_{i+1}^{p(j)}$ 的离散 z 变换, 以校正执行器延迟。 α 是无量纲参数, 在数值上等于以 ms 为单位的预测时滞。进行 z 反变换, 得到预测位移 $d_{i+1}^{p(j)} = \alpha d_{i+1}^{c(j)} + (\alpha - 1)d_{i+1}^{c(j-1)}$ 。

陈城等^[22]提出了基于逆补偿的双补偿方案。采用估计加载系统延迟的逆补偿方法作为主补偿。加载系统控制误差 $e_{i+1}^{(j)}$ (也称为跟踪误差), 即指令位移 $d_{i+1}^{c(j)}$ 与加载系统测量位移 $d_{i+1}^{m(j)}$ 之差, 用作二次补偿, 以增强加载系统的跟踪能力。逆补偿法的预测位移 $d_{i+1}^{p(j)}$ 由跟踪误差 $e_{i+1}^{(j-1)}$ 乘以比例增益 k 进行调整。

3.4 自适应逆补偿

陈城等^[23]提出自适应逆补偿 (adaptive inverse compensation, AIC) 补偿方法, 通过引入跟踪误差指示参数来自适应地修正逆函数模型中的参数 α 。即使预估的时滞初始值与真实值之间的误差较大, 该算法也可消除时变时滞及参数估计误差带来的影响。采用基于同步子空间图来调整补偿参数, 以使伺服液压执行器响应的相位和幅度误差最小化。引入 TI 同步子空间图迟滞封闭区域的跟踪指示器 (tracking indicator), 通过减小执行器的跟踪误差和相关的能量误差, 进一步提高执行器的控制性能。随后, 其又对该方法进行了改进, 用 AI 同步子空间图迟滞封闭区域的幅度指示器 (amplitude indicator) 替代 TI。

3.5 无限脉冲逆补偿

Stehman 和 Nakata^[24]提出采用无限脉冲响应 (infinite-impulse-response, IIR) 补偿器来补偿实时混合试验中的时滞及控制器-结构相互作用 (controller-structure-interaction, CSI)。IIR 补偿器包含一个内环位移跟踪传递函数的逆模型 $(H_{x_m x_r}^{-1}(s))^{-1}$, 但对传递函数的多项式无阶次限制, 试验结果表明该补偿器在 CSI 效应明显时具有高效的补偿精度。

4 基于控制理论的时滞补偿方法

4.1 MCS 算法时滞补偿

Wagg 和 Stolen 等^[25]将自适应最小控制综合

MCS(minimal control synthesis)算法用于实时混合试验的时滞补偿。该方法用数值子结构替代 MCS 中的参考模型,控制信号 $U_t = K(t)x(t) + k_r(t)r(t)$ 。其中 $x(t)$ 是传递系统动力模型的状态向量, $r(t)$ 为参考信号, $K(t)$ 为反馈自适应增益, $K_r(t)$ 为前向自适应增益。该算法的优点是无需系统参数识别,缺点是不适用于高阶数值子结构的动力学行为描述。Lim 等^[26]2007 年提出了基于 MCS 算法的自适应外环控制算法,Bonnet 等^[5]2007 年提出了基于修正命令的 MCS 算法模型,利用 MCS 有利于物理对象之间耦合的特性,消除多线程策略的时滞误差。

4.2 H_∞ 回路法时滞补偿

高秀煜等^[27]提出了一种控制伺服液压加载系统运动的 H_∞ 回路成形设计策略,从而在试件界面节点处实现动态同步位移边界条件。 H_∞ 鲁棒控制法中,RTHS 试验系统包括:计算子结构;外环数字 H_∞ 运动跟踪控制器;试验部分包括物理子结构和内环模拟伺服执行器控制系统 $G(s)$ 。地震荷载 EQ 输入计算子结构,计算子结构输出期望位移 x_d 给外环数字 H_∞ 运动跟踪控制器 $H(s)$;外环数字 H_∞ 运动跟踪控制器输出指令位移集 x_c 给内环模拟伺服执行器控制系统,并由物理子结构输出测量的位移 x_m 和力 f_m ; x_m 直接反馈给内环模拟伺服执行器控制系统,并通过一个增益低通数字滤波器 $F(s)$ (降低较大测量噪声 n 的影响)反馈给外环数字 H_∞ 运动跟踪控制器, f_m 直接反馈给计算子结构。

5 基于集成理念的综合补偿方法

5.1 DHC

刘洁等^[28]将逆补偿的前馈补偿的能力与 Darby 方法的在线延迟估计融合 Horiuchi 的位移预测补偿的特点,相互补充并发挥各自的优势发展了一个新的补偿方 (Darby-Horiuchi-Carrion, 简称 DHC)。

5.2 PLC-RFC

Chen P 和 Tsai K^[29]提出了双重补偿方法——同时进行相位超前补偿法 (phase lead compensator, PLC) 和恢复力补偿 (restoring force nsator, RFC) 的双补偿策略。首先研究了由试件测得的结构恢复力的临界时滞,然后,针对低阻尼短周期单自由度结构,提出了一种双补偿策略,以获得更稳定、

更准确地实时混合仿真结果。该策略包括自适应二阶 PLC 和在线恢复力补偿器 RFC。利用加权线性外推法和逆模型原理建立了可编程控制器。此外,采用梯度自适应律以参数模型的形式估计执行器的延迟。理论上证明了时滞估计的稳定性和参数收敛性。RFC 基于运动方程的平衡,考虑了期望位移和测量位移之间的跟踪误差。利用移动平均切线刚度计算各步的 RFC,然后将补偿力反馈到运动方程中,修正结构响应。

5.3 APLC-PID

Junjie Tao 等^[30]设计组合式外环控制器。利用频域评价指 (frequency-domain evaluation index, FEI) 对跟踪误差进行实时量化,自此基础上,采用自适应相位超前 (adaptive phase lead compensator, APLC) 补偿器来消除辨识出的跟踪误差。在 FEI 中利用窗函数 (Window technique) 和快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 实现自适应性。由于自适应补偿的公式是基于单个 (主) 频率值的。在同时存在多个频率时会导致性能下降。为了缓解这一问题,采用比例积分微分 (a proportional-integral-derivative, PID) 控制器的形式进一步改善跟踪性能。

5.4 RLQG

周惠蒙等^[31]提出一种鲁棒线性二次高斯 (robust linear-quadratic-gaussian, RLQG) 控制器。该控制器包括一个线性二次型最优调节器 (linear-quadratic-optimal-regulator, LQR) 控制器和状态观测器 (state observer, SO), 利用回路传输恢复 (Loop Transfer Recovery, LTR) 提高状态观测器的性能,从而提高 LQG 的鲁棒性。为了进一步降低系统中的时滞效应,在数字子结构的输出被发送到 LQR 控制器之前,基于多项式的前馈预测 (FP) 算法对其进行补偿。

5.5 RIAC

Ge Ou 等^[32]提出鲁棒集成控制 (Robust integrated actuator control, RIAC) 策略。该策略集成了三个关键控制组件:基于 H_∞ 优化的回路成形反馈控制模块;一个线性二次估计 (Linear quadratic estimation, LQE) 模块、基于陈城的逆补偿算法的减少剩余延迟前馈控制模块。该策略提供了灵活的控制器设计以适应设置限制,同时保持 H_∞ 算法的稳定性。RIAC 采用 H_∞ 优化方法设计核心控制器,

H_∞ 允许在系统性能和鲁棒性之间进行权衡。为了进一步提高 RTHS 的控制性能,采用 LQE 模块来降低测量不确定度。在最终设置中,逆补偿前馈模块减少剩余延迟,同时既不影响反馈系统的稳定性,也不影响误差跟踪性能。 H_∞ 在连续 Laplace 域中设计,LQE 模块和逆补偿模块在离散域中设计。该控制算法具有设计灵活性、鲁棒性和跟踪精度。

宁西占等^[33]也提出了一个鲁棒集成控制。该策略包括三部分:基于混合灵敏度的 H_∞ 控制器,一个三阶多项式外推模块,一个基于模型的最小均方误差自适应卡尔曼滤波器。混合灵敏度包括系统的灵敏度函数、控制器灵敏度函数和补灵敏度函数。灵敏度函数 S 反映了系统的开环变化对闭环性能的影响程度,是参考输入 w 到误差信号 e 的传递函数;补灵敏度函数 T 反映了响应信号对命令信号的跟踪性能,是系统的参考输入 w 到测量输出 y 的传递函数;控制器灵敏度函数 R 是系统的参考输入 w 到控制器输出 u 的传递函数。

5.6 TDTA

李宁等^[34]利用 Darby 的在线延迟估计与陈城的单指数逆补偿方法进行组合提出基于时滞追踪的自适应补偿方法(Time-Delay Tracing Adaptive)。通过用加载系统实测位移和目标位移之间的误差来对时滞进行预估,其表达式如下:首先,通过加载系统实测位移和指令的误差对当前时滞进行预测,然后,将时滞预测的结果输入至逆补偿算法中,得到补偿后的位移指令,发送给加载系统以达到对时滞补偿的目的。该时滞补偿算法在试验过程中不需要物理子结构参数反馈,只需通过测量加载系统实际位移与指令位移的误差即可对时滞进行补偿。因此,该算法不受物理子结构具体情况影响,适用于各类子结构测试。

5.7 WFEI

徐伟杰等^[35]将逆补偿方法(IC)与频域评价指标(frequency-domain evaluation index, FEI)相结合。利用窗函数(Window technique)使 FEI 能够计算几乎瞬时的延时,然后对 IC 参数进行相应的调整以获得最佳补偿。WFEI 补偿不仅在初始估计时滞偏离实际值时提供精确的执行器控制,而且在伺服液压系统的不确定性下具有良好的鲁棒性。WFEI 补偿方法的自适应律是基于在每一个窗函数的末尾,由 FEI 直接计算时间延迟。

5.8 ADC

王贞等^[36]提出最小二乘逆补偿方法。采用差分模型建立基于加载系统参数 θ_c^j 和 θ_m^k 的伺服系统离散模型 $d_c^i = \sum_{j=1}^p d_c^{i-j} \cdot \theta_c^j + \sum_{k=1}^q d_m^{i+1-k} \cdot \theta_m^k = \varphi_i^T \theta$, d_c 与 d_m 分别为加载系统的命令位移与响应位移, $\varphi_i^T = [d_c^{i-1}, \dots, d_c^{i-p}, d_m^i, d_m^{i-1}, \dots, d_m^{i-q}]$, $\theta = [\theta_c^1, \dots, \theta_c^p, \theta_m^1, \dots, \theta_m^q]$;以离散模型的逆模型为基础计算系统命令,采用带遗忘因子 d 的渐消记忆递推最小二乘算法估计进行迭代计算得到加载系统参数 $\hat{\theta}$, 确定加载系统状态,实现对伺服系统在线时滞补偿。时滞补偿过程能够自动跟踪系统时滞变化,具有自适应特性,也称自适应时滞补偿方法(Adaptive Delay Compensation)。

王贞等^[37]在此基础上,采用三阶多项式外推和自适应逆策略建立两级延迟补偿方法,进行粗、精补偿,在自适应噪声滤波器中,采用最小二乘法自适应逆补偿,以获得优异的跟踪性能和鲁棒性。

6 结语

时滞补偿方法是实时混合试验的重要问题,从 RTHS 时滞补偿的发展来看,为了提高时滞补偿的精确度和鲁棒性,时滞补偿的方法正从单一方法补偿向综合集成方法补偿发展。综合补偿理念将会成为时滞补偿的主流理念。但是,综合补偿不是简单的方法累加,而是方法之间的优势互补和强强联合,需要在对各种方法的内涵和特点充分分析的前提下,明确各方法之间的联系,消除各方法之间的冲突,才能实现各种方法之间的充分耦合。

参考文献(References)

- [1] 王进廷,金峰,徐艳杰,等.实时耦联动力试验方法理论与实践[J].工程力学,2014,31(1):1-14.
WANG Jinting, JIN Feng, XU Yanjie, et al. Theory and Practice of Real-time Dynamic Hybrid Testing[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(1): 1-14.
- [2] 刘进进.近完全时滞补偿方法及其在实时混合试验中的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
LIU Jinjin. Nearly Complete Compensation Scheme for Time Delay and Its Application to Real-Time Hybrid Testing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [3] HORIUCHI T, INOUE M, KONNO T, et al. Real-time Hybrid Experimental System with Actuator Delay Compensation and Its Application to a Piping System with Energy Absorber[J].

- Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28 (10):1121-1141.
- [4] WALLACE M I, SIEBER J, NEILD S A, et al. Stability Analysis of Real-time Dynamic Substructuring Using Delay Differential Equation Models[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005, 34(15):1817-1832.
- [5] BONNET P A, WILLIAMS M S, BLAKEBOROUGH A. Compensation of Actuator Dynamics in Real-time Hybrid Tests[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2007, 221(2):251-264.
- [6] HORIUCHI T, KONNO T. A New Method for Compensating Actuator Delay in Real-Time Hybrid Experiments[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2001, 359(1786):1893-1909.
- [7] AHMADIZADEH M, MOSQUEDA G, REINHORN A M. Compensation of Actuator Delay and Dynamics for Real-time Hybrid Structural Simulation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37(1):21-42.
- [8] DARBY A P, WILLIAMS M S, BLAKEBOROUGH A. Stability and Delay Compensation for Real-Time Substructure Testing[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(12):1276-1284.
- [9] WALLACE M I, WAGG D J, NEILD S A. An Adaptive Polynomial Based Forward Prediction Algorithm for Multi-Actuator Real-Time Dynamic Substructuring[J]. Proceedings Of The Royal Society Of London Series A-Mathematical Physical And Engineering Sciences. 2005, 461(2064):3807-3826.
- [10] 王贞, 吴斌. 基于最小二乘法的时滞实时在线估计方法[J]. 振动工程学报, 2009, 22(6):625-631.
WANG Zhen, WU Bin. A Real-time Approach to Delay Estimation Based on the Least-Square Algorithm[J]. Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(6):625-631.
- [11] CHAE Y, KAZEMIBIDOKHTI K, RICLES J M. Adaptive Time Series Compensator for Delay Compensation of Servo-hydraulic Actuator Systems for Real-time Hybrid Simulation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(11):1697-1715.
- [12] ALEJANDRO PALACIO-BETANCUR, MARIANTONIE-TA GUTIERREZ SOTO. Adaptive Tracking Control for Real-Time Hybrid Simulation of Structures Subjected to Seismic Loading[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 134(2019):1-15.
- [13] CARRION J E, SPENCER B F. Real-Time Hybrid Testing Using Model-Based Delay Compensation[C]. the 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, 2006.
- [14] ZHAO J, FRENCH C, SHIELD C, et al. Considerations for the Development of Real-time Dynamic Testing Using Servo-hydraulic Actuation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2003, 32(11):1773-1794.
- [15] WU B, WANG Z, BURSI O S. Actuator Dynamics Compensation Based on Upper Bound Delay for Real-time Hybrid Simulation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(12):1749-1765.
- [16] CHRISTENSON R, LIN Y Z, EMMONS A, et al. Large-Scale Experimental Verification of Semiactive Control through Real-Time Hybrid Simulation[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(4):522-534.
- [17] LEE S K, PARK E C, MIN K W, et al. Real-time Hybrid Shaking Table Testing Method for the Performance Evaluation of a Tuned Liquid Damper Controlling Seismic Response of Building Structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302(3):596-612.
- [18] CARRION J E, SPENCER JR B F. Model-Based Strategies for Real-Time Hybrid Testing[R]. Urbana, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007.
- [19] PHILLIPS B M, SPENCER B F. Model Based Real-Time Hybrid Simulation Strategies for Large-Scale Testing[C]. 5th World Conference On Structural Control And Monitoring, Japan, 2010:1-15.
- [20] PHILLIPS B M, SPENCER JR B F. Model-Based Feedforward-Feedback Tracking Control for Real-Time Hybrid Simulation[R]. Urbana, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011.
- [21] CHEN C, RICLES J M. Stability Analysis of SDOF Real-time Hybrid Testing Systems with Explicit Integration Algorithms and Actuator Delay[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37(4):597-613.
- [22] CHEN C, RICLES J M. Improving the Inverse Compensation Method for Real-time Hybrid Simulation through a Dual Compensation Scheme[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2009, 38(10):1237-1255.
- [23] CHEN C, RICLES J M. Tracking Error-Based Servohydraulic Actuator Adaptive Compensation for Real-Time Hybrid Simulation[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(4):432-440.
- [24] STEHMAN M, NAKATA N. IIR Compensation in Real-Time Hybrid Simulation Using Shake Tables with Complex Control-Structure-Interaction[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2016, 20(4):633-653.
- [25] WAGG D J, STOTEN D P. Substructuring of Dynamical Systems via the Adaptive Minimal Control Synthesis Algorithm[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2001, 30(6):865-877.
- [26] LIM C N, NEILD S A, STOTEN D P, et al. Adaptive Control Strategy for Dynamic Substructuring Tests[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(8):864-873.
- [27] GAO X Y, CASTANEDA N, DYKE S J. RealTime Hybrid

- Simulation; From Dynamic System, Motion Control to Experimental Error[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(6): 815-832.
- [28] LIU J, DYKE S J, LIU H J, et al. A Novel Integrated Compensation Method for Actuator Dynamics in Real-time Hybrid Structural Testing[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, 20(7): 1057-1080.
- [29] CHEN P C, TSAI K C. Dual Compensation Strategy for Real-time Hybrid Testing[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(1): 1-23.
- [30] TAO J J, MERCAN O. A Study on a Benchmark Control Problem for Real-time Hybrid Simulation with a Tracking Error-based Adaptive Compensator Combined with a Supplementary Proportional-integral-derivative Controller[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 134: 106346.
- [31] Huimeng Zhou, Dan Xu, Xiaoyun Shao, et al. A Robust Linear-Quadratic-Gaussian Controller for the Real-Time Hybrid Simulation on A Benchmark Problem[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2019(133): 1-22.
- [32] OU G, OZDAGLI A I, DYKE S J, et al. Robust Integrated Actuator Control; Experimental Verification and Real-time Hybrid-simulation Implementation[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2015, 44(3): 441-460.
- [33] NING X Z, WANG Z, ZHOU H M, et al. Robust Actuator Dynamics Compensation Method for Real-time Hybrid Simulation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 131: 49-70.
- [34] 李宁, 周子豪, 李忠献. 基于时滞追踪的实时混合试验自适应补偿方法[J]. *工程力学*, 2019, 36(7): 38-47.
- LI Ning, ZHOU Zihao, LI (Zhong) (Suo | Xian). Time-delay Tracing Based Adaptive Compensation Algorithm for Real-time Hybrid Testing [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(7): 38-47.
- [35] Weijie Xu, Cheng Chen, Tong Guo, Menghui Chen. Evaluation of frequency evaluation index based compensation for benchmark study in real-time hybrid simulation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2019 (130): 649-663
- [35] XU W J, CHEN C, GUO T, et al. Evaluation of Frequency Evaluation Index Based Compensation for Benchmark Study in Real-time Hybrid Simulation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 130: 649-663.
- [36] 王贞, 李强, 吴斌. 实时混合试验的自适应时滞补偿方法[J]. *工程力学*, 2018, 35(9): 37-43.
- WANG Zhen, LI Qiang, WU Bin. Adaptive Delay Compensation Method for Real-time Hybrid Testing [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(9): 37-43.
- [37] WANG Z, NING X Z, XU G S, et al. High Performance Compensation Using an Adaptive Strategy for Real-time Hybrid Simulation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 133: 106262.