

飞行模拟器操纵负荷系统内回路的逆模型控制

赵劲松¹, 叶正茂¹, 沈刚^{1,2}, 韩俊伟^{1,3}

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 150001, 哈尔滨; 2. 中国矿业大学机电工程学院, 221116, 江苏徐州;
3. 苏州菱云试验系统有限公司, 215163, 江苏苏州)

摘要: 为了改善基于力回路的飞行模拟器操纵负荷系统的力感模拟逼真度, 分析了内回路跟踪性能对力感模拟逼真度的影响; 在基于结构不变性原理抑制多余力的基础上, 提出了比例结合前馈逆模型补偿的复合控制策略, 在不影响内回路稳定性的前提下, 该复合控制策略能有效拓展内回路的频宽. 仿真结果显示, 该复合控制策略提高了内回路的跟踪性能. 在基于 RT-LAB 的快速原型控制实验平台上进行了半实物仿真实验, 结果表明该控制策略可以明显改善内回路的跟踪性能, 从而显著提高操纵负荷系统力感模拟的逼真度.

关键词: 飞行模拟; 操纵负荷; 电液伺服; 逆模型; 系统辨识; 半实物仿真

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)04-0038-07

Inverse Model Control for Inner Loop of Control Loading System on Flight Simulator

ZHAO Jinsong¹, YE Zhengmao¹, SHEN Gang^{1,2}, HAN Junwei^{1,3}

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
3. Suzhou Lingyun Test System Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215163, China)

Abstract: To improve force feel simulation fidelity of the control loading system on the flight simulator based on force loop, the effect of inner loop tracking performance on the fidelity of force feel simulation is analyzed. A controlling strategy combining proportion with feedforward inverse model compensation is put forward following the structure invariance principle for restraining surplus force. On the premise of loop stability, this strategy can expand inner loop bandwidth. Simulation and hardware-in-the-loop experiment on the RT-LAB based rapid prototype control platform show that the proposed control strategy improves the inner loop tracking performance, thus significantly enhances the force feel simulation fidelity of control loading system.

Keywords: flight simulation; control loading system; electro-hydraulic servo; inverse model; system identification; semi-physical simulation

飞行模拟器操纵负荷系统的主要功用是复现飞行员操纵驾驶机构时的操纵力感, 即真实飞机上驾驶机构的位移所对应的驱动力. 力感模拟的逼真度是飞行模拟器飞行训练水平的评定指标之一^[1]. 操纵负荷系统包括基于位置回路、速度回路和力回

路的 3 种实现方式. Gerretsen 等^[2]对这 3 种控制方式进行了研究. 基于力回路的实现方式应用最为广泛^[3].

在基于力回路的操纵负荷系统中, 作为内回路的力回路属于典型的被动加载系统. 力跟踪精度受

由强位置干扰产生的多余力和力回路频宽的影响,并且直接影响外回路的力感模拟逼真度。

国内外很多学者对多余力的抑制进行了深入研究^[4-6],采用的方法主要是根据结构不变性原理对作为干扰的多余力进行抑制。针对系统的跟踪性能,文献^[7]采用前馈补偿和改进的内模控制,以提高波形的复现精度;文献^[8-9]结合前馈补偿和自适应逆控制来提高电液伺服系统的跟踪性能。

本文以电液伺服加载系统作为内回路的操纵负荷系统为研究对象,对于内回路的多余力抑制,采用基于结构不变性原理的方法;对于改善内回路跟踪性能,采用比例结合前馈逆模型补偿的复合控制策略。针对辨识出的数学模型是非最小相位系统这一问题,首先对辨识出的系统模型进行分析,再采用零相位跟踪控制技术,即对数学模型进行改进后求取近似逆作为前馈逆控制器,以解决前馈逆模型的稳定性问题。本文提出的控制策略可以有效地补偿内回路频宽,达到增加力感模拟逼真度的效果。

1 操纵负荷系统建模及仿真分析

1.1 基于力回路的操纵负荷系统原理

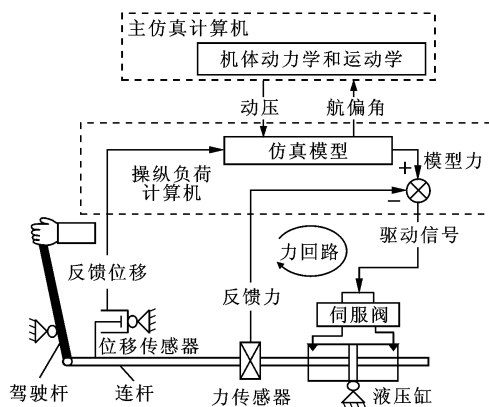
飞行模拟器操纵负荷系统的组成如图 1a 所示,它由内、外 2 个回路组成。作为内回路的被动加载系统是力回路,由伺服阀、液压缸、力传感器和数字控制器组成;外回路由驾驶机构、位移传感器、仿真模型和内回路组成。驾驶机构的外形与真实飞机一样,被动加载系统取代了真实飞机操纵系统的后段。除了特殊情况的差异外,如果飞行员操纵驾驶杆的感觉与操纵真实飞机驾驶杆的感觉一致,则从飞行员的感知角度来说这 2 套系统是基本等效的。

对于图 1a 中的操纵负荷系统,当驾驶员操纵驾驶杆时,操纵力使驾驶机构产生位移,位移传感器检测出当前的操纵位移,并将其传给计算机中的仿真模型,该模型根据位移反馈信号实时解算出当前操纵位移所对应的力,即模型力。模型力作为力指令信号驱动力回路跟踪模型力。力回路的执行机构为液压缸,其输出的力通过连杆机构反传给驾驶员,使驾驶员感受到与操纵位移相对应的操纵力感。整个操纵负荷系统以操纵力为输入,以操纵位移为输出,而系统本身作为一个力-位移的阻抗来实现对操纵力感的模拟。

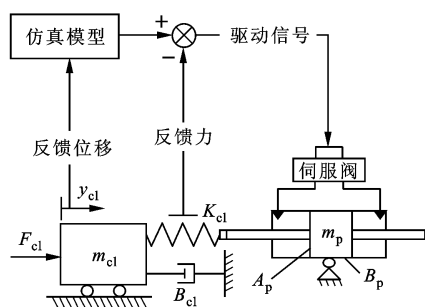
1.2 基于力回路的操纵负荷系统的建模

将图 1a 中的操纵机构参数折算到连杆处,并将力传感器视为柔性结构,其他机构视为刚性机构,得

到图 1b 所示的等效物理模型。



(a) 操纵负荷系统的组成



(b) 操纵负荷系统的简化物理模型

图 1 操纵负荷系统原理

液压缸活塞的力平衡方程为

$$F_{sc} + p_L A_p = m_p \ddot{y}_p + B_p \dot{y}_p \quad (1)$$

驾驶机构等效质量的力平衡方程为

$$F_{cl} - F_{sc} = m_{cl} \ddot{y}_{cl} + B_{cl} \dot{y}_{cl} \quad (2)$$

$$F_{sc} = K_{cl} (y_{cl} - y_p) \quad (3)$$

伺服阀流量方程为

$$Q_L = K_q x_v + K_c P_L \quad (4)$$

液压缸流量方程为

$$Q_L = A_p \dot{y}_p + C_{tc} P_L + \frac{V_t}{4\beta_e} \dot{P}_L \quad (5)$$

$$K_{ce} = K_c + C_{tc} \quad (6)$$

伺服阀传递函数为

$$G_{sv}(s) = \left(\frac{s^2}{\omega_{sv}^2} + \frac{2\xi_{sv}}{\omega_{sv}} s + 1 \right)^{-1} \quad (7)$$

以上各式中: A_p 为液压缸活塞的有效作用面积; y_p 为活塞位移; C_{tc} 为液压缸的总泄漏系数; V_t 为液压缸两腔的总容积; β_e 为等效弹性模量; K_q 为伺服阀流量增益; K_c 为流量-压力系数; Q_L 为伺服阀的负载流量; P_L 为伺服阀的负载压力; m_p 为活塞的质量; B_p 为液压缸与活塞之间的阻尼系数; F_{sc} 为力传感器检测的力; K_{cl} 为力传感器的刚度; y_{cl} 为等效在

力传感器处的操纵位移; F_{cl} 为等效在力传感器处的操纵力; m_{cl} 为驾驶机构等效在力传感器处的质量; B_{cl} 为驾驶机构等效在力传感器处的阻尼系数; ω_{sv} 、 ξ_{sv} 为伺服阀传递函数的转折频率和阻尼比系数。

操纵负荷系统一般采用多段式线性弹簧的模拟对象来实现操纵位移对应的操纵力的模拟, 为了研究方便, 这里只取其中的一段, 模拟对象的表达式为

$$\frac{F_{cl}}{y_{cl}} = -K \quad (8)$$

将式(1)~式(5)进行拉普拉斯变换, 得到图 2a 所示的方框图, 虚线框中是作为内回路的力回路, $-K$ 为仿真模型, $G_{cl}(s)$ 为力回路前向通道控制器。内回路为典型的被动加载系统, 其输出力包括跟踪模型力和由操纵位移产生的多余力 2 部分。

根据图 2a 中虚线框内的部分, 可以写出力回路的输出力表达式

$$F_{se} = F_m F(s) - y_{cl} G_l(s) \quad (9)$$

式中: F_m 为模型力; $F(s)$ 为图 2b 所示的内回路闭环传递函数, 其表达式为

$$F(s) = \frac{F_{op}(s)}{1 + F_{op}(s)} \quad (10)$$

$F_{op}(s)$ 为内回路的开环传递函数, 其表达式为

$$F_{op}(s) = \left[\frac{K_q A_p}{K_{ce} K_{cl}} G_{sv}(s) G_{sf}(s) \right] / N(s) \quad (11)$$

$$N(s) = \frac{m_p V_t}{4\beta_e A_p^2} s^3 + \left(\frac{K_{ce} m_p}{A_p^2} + \frac{V_t B_p}{4\beta_e A_p^2 K_{cl}} \right) s^2 + \left(1 + \frac{B_p K_{ce}}{A_p^2} + \frac{K_{cl} V_t}{4\beta_e A_p^2} \right) s + \frac{K_{cl} K_{ce}}{A_p^2}$$

$$G_l(s) = \frac{F(s) C(s)}{K_q G_{sv}(s) G_{sf}(s)}$$

$$C(s) = \frac{m_p V_t}{4\beta_e A_p^2} s^2 +$$

$$\left(\frac{K_{ce} m_p}{A_p^2} + \frac{V_t B_p}{4\beta_e A_p^2 K_{cl}} \right) s + \frac{K_{ce} B_p}{A_p^2} + 1$$

将图 2a 简化成图 2b 可以看出, 操纵负荷系统

实质上等效为一个以驾驶员操纵力为输入、操纵位移为输出的系统, 也可以将该系统看成关于力-位移的阻抗, 其表达式为

$$Z_{CLS} = \frac{y_l}{F_{cl}} = \frac{Z_{CLS}^*}{1 + Z_{CLS}^* G_l(s)} \quad (12)$$

式中: Z_{CLS}^* 为无多余力影响时的阻抗, 表达式为

$$Z_{CLS}^* = \frac{1}{m_{cl} s^2 + B_{cl} s + K F(s)} \quad (13)$$

若多余力在一定的频率范围内得到抑制, 则整个操纵负荷系统的阻抗特性就近似为式(13)。若内回路的频宽足够大, 式(13)可简化为

$$Z_{CLS}^* = K / \left(\frac{s^2}{\omega_{cl}^2} + \frac{2\xi_{cl}}{\omega_{cl}} s + 1 \right) \quad (14)$$

式中: $\omega_{cl} = (K/m_{cl})^{1/2}$; $\xi_{cl} = B_{cl}/(2(m_{cl} K)^{1/2})$ 。在操纵力的频率特性小于 ω_{cl} 的情况下, 整个操纵负荷系统就表现为一个弹簧的阻抗特性。

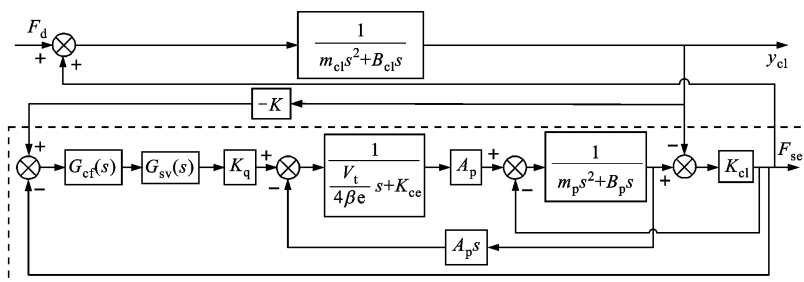
图 2b 中虚线框内的开环传递函数为

$$Z_{op}^* = \frac{K}{m_{cl} s^2 + B_{cl} s} F(s) \quad (15)$$

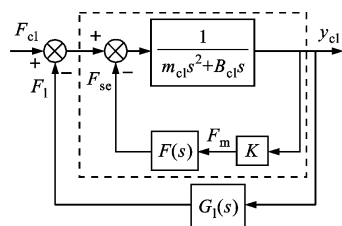
式(15)表明, 如果内回路的带宽小于该开环传递函数的第一个转折频率 $\omega_1 = B_{cl}/m_{cl}$, 则可能引起式(13)不稳定。可见, 内回路带宽不仅影响力感模拟精度, 而且还影响系统的稳定性。因此, 在驾驶机构质量不能设计得太大以保证 ω_{cl} 足够大的前提下, 内回路的带宽要足够大, 以保证系统的稳定性, 并保证力感阻抗特性在一定频率范围内接近所要模拟的力感特性。

2 操纵负荷控制策略

内回路带宽的拓展采用比例结合前馈逆模型控制器的复合控制策略, 如图 3a 所示, 图中虚线部分为内回路控制器, 其中: $K_v s$ 为多余力补偿控制器; $G_{cl}(s)$ 为内回路前向通道控制器, 采用比例控制器; $F^{-1}(s)$ 为前馈逆模型控制器。图 3b 采取了阻尼补偿的方法来抑制外回路的振荡。



(a) 系统方框图



(b) 系统简化方框图

图2 操纵负荷系统方框图

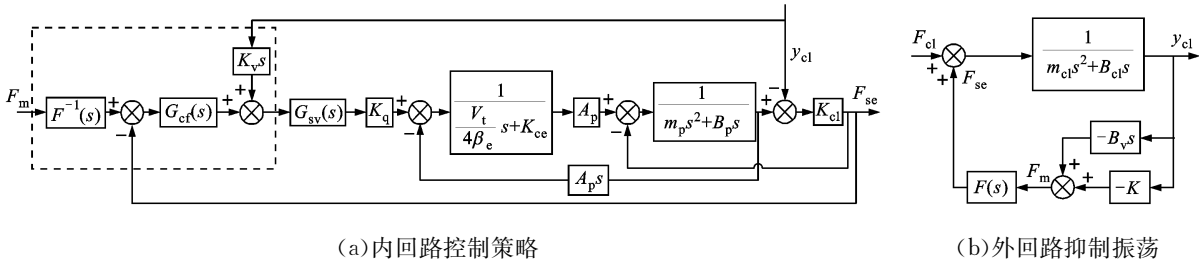


图3 操纵负荷系统的控制策略

逆模型控制器 $F^{-1}(s)$ 是通过对内回路闭环传递函数进行辨识,并对所得传递函数求逆的方法得到的.将图1中的驾驶杆移至一端,采取单一方向的主动加载,根据输入信号和所对应的输出信号进行内回路传递函数的辨识,辨识方法采用递推最小二乘法.

设内回路模型为

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) + \xi(k) \quad (16)$$

式中

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}$$

式(16)为CAR模型,其中 $\xi(k)$ 为白噪声信号.

根据文献[10],递推最小二乘算法可以表示为

$$\mathbf{K}(k) = \frac{\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)}{1 + \boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)} \quad (17)$$

$$\mathbf{P}(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\boldsymbol{\varphi}^T(k)]\mathbf{P}(k-1) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) &= \mathbf{P}(k)\boldsymbol{\Psi}_k^T \mathbf{Y}_k = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \\ &\mathbf{K}(k)[y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)] \end{aligned} \quad (19)$$

式中

$$\boldsymbol{\Psi}_k^T = [\boldsymbol{\Psi}_{k-1}^T \quad \boldsymbol{\varphi}(k)]; \quad \mathbf{Y}_k = [\mathbf{Y}_{k-1}^T \quad y(k)];$$

$$\boldsymbol{\varphi}^T(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n), \\ u(k), \dots, u(k-m)];$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n, \hat{b}_0, \dots, \hat{b}_m]$$

如果内回路的闭环传递函数 $F(s)$ 为最小相位系统,则只需取 $F(s)$ 的辨识传递函数 $\tilde{F}(s)$ 的倒数作为前馈逆模型即可.但是,由于计算机控制系统中含有采样保持器等环节,使实际的 $F(s)$ 往往含有非最小相位零点,因此辨识所得的 $\tilde{F}(s)$ 也含有非最小相位零点,其逆模型是不稳定的系统,如果能够满足 $F(s)\tilde{F}^{-1}(s)$ 在足够大的带宽内接近1,那么设计出的 $\tilde{F}^{-1}(z)$ 可以作为前馈逆模型.

设 $F(s)$ 离散化后的传递函数为

$$F(z) = \frac{N_+(z)N_-(z)}{D(z)} \quad (20)$$

式中: $N_+(z)$ 为所有零点都在单位圆内的分子因

式; $N_-(z)$ 为所有零点都在单位圆外或圆上的分子因式,含有 s 个根.假设辨识的 $\tilde{F}(s)$ 是准确的,即也具有式(20)的形式,现将 $\tilde{F}^{-1}(z)$ 改写为

$$\hat{F}^{-1}(z) = \frac{D(z)N_-(z^{-1})}{z^s N_+(z)N_-^2(1)} \quad (21)$$

分母中加入 z^s 的目的是为了使 $\hat{F}^{-1}(z)$ 可物理实现,并且不改变其幅频特性.由式(20)和式(21)推得

$$H(z) = F(z)\hat{F}^{-1}(z) = \frac{N_-(z)N_-(z^{-1})}{z^s N_-^2(1)} \quad (22)$$

将式(22)中的 z 用 $e^{j\omega T}$ 代换,其中 T 为采样周期,则式(22)分子中的 $N_+(z)$ 与 $N_-(z)$ 互为共轭复数,可以得到

$$\angle H(e^{j\omega T}) = 0 \quad (23)$$

$$|H(e^{j\omega T})|^2 = \text{Re}^2[H(e^{j\omega T})] + \text{Im}^2[H(e^{j\omega T})] \quad (24)$$

式(22)分子中的 $N_-(z)$ 在复数域内可分解成若干个一次因式的乘积,取其中一个,假设为

$$N_i(z) = z + a \quad (25)$$

若

$$H_i(z) = \frac{N_{i+}(z)N_{i-}(z)}{N_i(1)} \quad (26)$$

则

$$H(z) = \prod_{i=1}^m H_i(z) \quad (27)$$

将式(25)代入式(26),并将 z 用 $e^{j\omega T}$ 代换,结合欧拉公式有

$$H_i(e^{j\omega T}) = \frac{1 + 2a\cos(\omega T) + a^2}{1 + 2a + a^2} \quad (28)$$

由式(28)可知,在 ωT 接近0的情况下, $|H_i(e^{j\omega T})|$ 接近1,由于 T 很小(本文取0.001 s),因此在较大带宽内,可使得 $|H_i(e^{j\omega T})|$ 接近1,再由式(27),可使得 $|H(e^{j\omega T})|$ 接近1.由式(28)还可以看出, $N_-(z)$ 的阶数越小,在 ωT 一定时 $|H(e^{j\omega T})|$ 越接近1.然而,由于式(21)分母中 z^s 的引入,使逆补偿后的相位有所减小,采用 $e^{j\omega T}$ 的泰勒展开式进行补偿,有

$$\hat{F}^{-1}(z) = \hat{F}^{-1}(z)Z\left[\left(1 + Ts + \frac{(Ts)^2}{2!} + \dots\right)/L(s)\right]$$

(29)

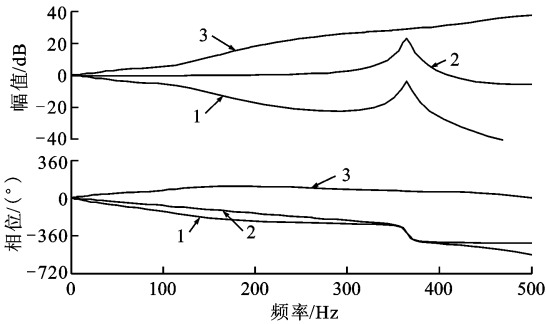
3 操纵负荷系统仿真分析

本文的研究对象是以液压缸为执行器的操纵负荷系统,结合实际系统,各仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

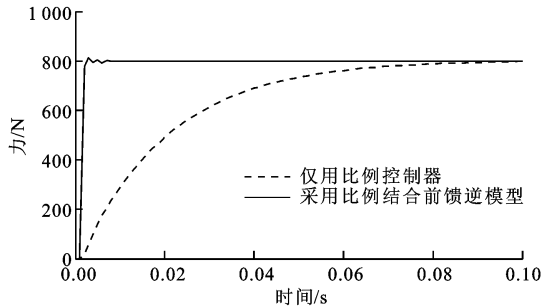
m_{cl}/kg	$B_{cl}/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	$k_{cl}/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	β_c/MPa	A_p/cm^2
40.65	55.75	5.52	690	5
$V_t/10^{-4}\text{ m}^3$	ξ_{sv}	$\omega_{sv}/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	$B_p/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	
7	0.5	400	50	
m_p/kg	$K_{cc}/10^{-12}\text{ m}^3\cdot(\text{s}\cdot\text{Pa})^{-1}$	$K/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$		
4	2	54		

内回路的前馈逆模型补偿效果如图 4a 所示,其中曲线 1、2 和 3 分别代表只有比例控制器的内回路闭环传递函数、前馈逆模型控制器的频率特性和使用比例结合前馈逆模型控制器的内回路的频率特性,可见其内回路频宽特性有了明显的改进. 图 4b 为基于比例结合前馈逆模型控制器的内回路和基于比例控制器的内回路分别进行主动加载的阶跃响应



1: 只有比例控制器的内回路闭环传递函数; 2: 前馈逆模型控制器的频率特性; 3: 基于比例结合前馈逆模型控制器的内回路的频率特性

(a) 频域效果



(b) 时域效果

图 4 内回路性能仿真结果

效果图,阶跃响应的主动力指令为 800 N. 图中比例控制器的参数经过反复调试,直到响应曲线上升过程刚好无波动,这样才能保证内回路有足够的稳定裕量,而前馈逆模型控制器不影响内回路的鲁棒性,只要比例控制器使内回路在一定范围内稳定即可,这也正是前馈逆模型控制器的优越性. 由仿真分析可知,在快速性方面,基于前馈逆模型的内回路远远优于基于传统比例控制器的内回路.

下面进一步研究比例结合前馈逆模型控制器拓宽内回路带宽对整个操纵负荷系统性能的改善. 内回路的前向控制器分别采用比例控制器和比例结合前馈逆模型控制器,力指令信号仍然为 800 N 的阶跃信号,并对外回路进行适当阻尼补偿,以减小外回路的振荡. 图 5 是外回路的操纵位移特性响应曲线,可以看出,在相同的操纵力下,内回路使用比例结合前馈逆模型的复合控制策略时,整个操纵负荷系统的操纵位移响应更接近理想的操纵位移曲线.

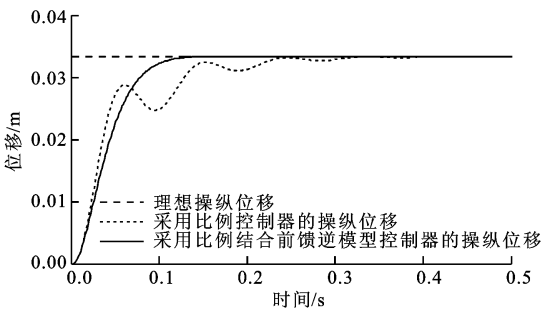


图 5 内回路带宽拓展对外回路操纵位移特性的改善

4 实验验证

本文在基于 RT-LAB 的快速原型控制半实物仿真平台上对所提出的控制策略进行了实验验证. 单节点模式快速原型的结构如图 6 所示. 上位机用于监视下位机的运行情况和对下位机发送指令,它通过以太网和下位机进行通信. 控制程序实时地在下位机中运行, A/D 和 D/A 板卡通过 I/O 接口与

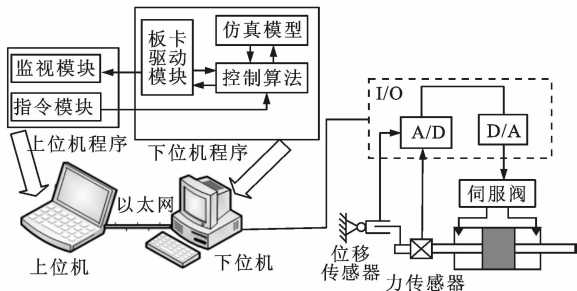


图 6 实验方案

外部传感器等电路进行通信,在下位机程序中,由板卡驱动程序模块与控制程序模块进行交互。

在内回路进行主动加载实验时进行前馈逆模型补偿.图 7 是实验结果曲线,其中图 7a~7d 为频域的实验结果,采用 H1 法辨识而得,为输入和输出信号的互功率谱与输入信号的自功率谱的比值.图 7a 和 7b 分别为基于比例控制器的内回路的幅频和相频特性图,可以看出内回路频宽大约为 7 Hz.图 7c 和 7d 分别为比例结合前馈逆模型控制器的幅频和相频补偿效果图,其中曲线 1、2、3 分别代表基于比

例控制器的内回路频率特性、前馈逆模型的频率特性和前馈逆模型补偿后内回路的频率特性.由图可知,前馈逆模型控制器能够将内回路的频宽拓展到约 30 Hz.图 7e 和 7f 分别为基于比例控制器和基于比例结合前馈逆模型控制器的内回路进行主动加载时的时域跟踪曲线,二者的力指令信号分别为随机信号经过通带为 10 Hz 和 14 Hz 的巴特沃斯滤波器后的信号,可见经过前馈逆模型补偿后,在一定带宽内,输出信号的幅值衰减和时滞均得到了改善。

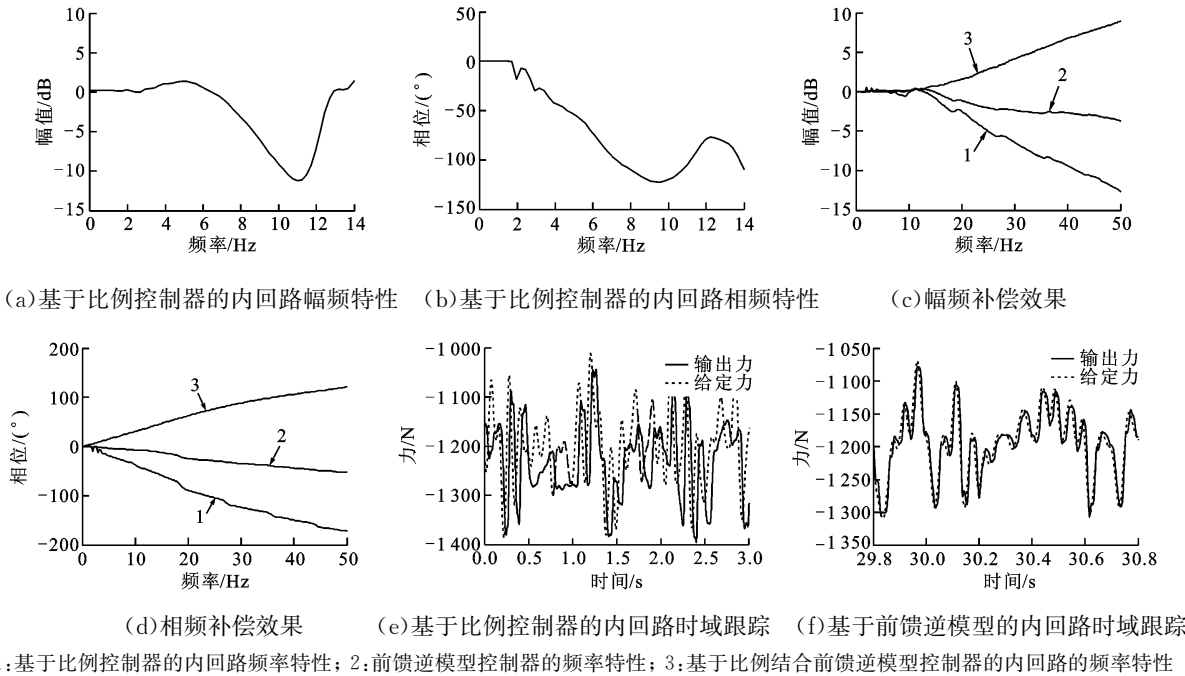


图 7 内回路性能的实验验证结果

为了研究基于本文复合控制策略的内回路性能改善对整个操纵负荷系统的影响,采取以下方法加以验证:以模型力作为力指令,将驾驶杆从中位推至某一位置,然后使其自由回到中位,观察操纵位移曲线的动态特性.在实验过程中,外回路分别加入适当的阻尼补偿,使外回路操纵位移没有振荡.图 8 为基

于比例控制器和基于比例结合前馈逆模型控制器补偿的外回路的操纵位移响应曲线,可以明显看出,前馈逆模型拓宽了内回路的带宽,能够使操纵位移特性更接近弹簧特性。

5 结 论

内回路的跟踪性能影响着整个操纵负荷系统的阻抗特性.为了提高内回路的跟踪性能,本文在利用结构不变性原理抑制多余力的基础上,提出了比例控制器结合前馈逆模型补偿的复合控制策略,在不影响内回路稳定性的前提下,拓展了内回路带宽.经过仿真分析和实验验证,上述改善内回路跟踪性能的控制策略对改善整个操纵负荷系统的性能是有效的.在本文中,模拟对象为多段线性弹簧中的一段,今后我们将对不同刚度弹簧段的过渡过程进行进一

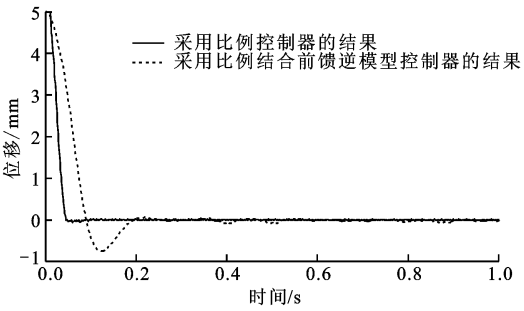


图 8 外回路性能的实验验证

步研究.

参考文献:

- [1] 齐潘国, 黄其涛, 姜洪洲, 等. 基于位置控制的液压操纵负荷系统[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(9): 128-133.
QI Pan-guo, HUANG Qi-tao, JIANG Hong-zhou, et al. Hydraulic control loading system based on position control [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(9): 128-133.
- [2] GERRETSEN A, MULDER M, VAN PAASSEN M M. Comparison of position-loop, velocity-loop and force-loop based control loading architectures [C] // Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2005: 50-59.
- [3] 王辉. 飞行模拟器操纵负荷系统关键技术及原理样机研制[D]. 天津: 天津大学, 2006: 38-41.
- [4] 邵俊鹏, 李建英, 王仲文, 等. 电液负载模拟器多余力抑制的结构补偿控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(4): 586-591.
SHAO Jun-peng, LI Jian-ying, WANG Zhong-wen, et al. Structure compensation control of eliminating superfluous force of electro-hydraulic load simulator [J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(4): 586-591.
- [5] 闫梁, 梁建民, 刘刚, 等. 电动操纵负荷系统多余力抑制研究[J]. 兵工自动化, 2010, 29(7): 63-67.

- YAN Liang, LIANG Jianmin, LIU Gang, et al. Research on eliminating extra force of electric control loading system based on complex control method [J]. Ordnance Industry Automation, 2010, 29(7): 63-67.
- [6] 汪首坤, 王军政. 导弹舵机动态加载技术[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(3): 247-250.
WANG Shou-kun, WANG Jun-zheng. Dynamic loading for missile actuator [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(3): 247-250.
- [7] SHEN G, LV G-M, YE Z-M, et al. Implementation of electrohydraulic shaking table controllers with a combined adaptive inverse control and minimal control synthesis algorithm [J]. IET Control Theory & Application, 2011, 5(13): 1471-1483.
- [8] SHEN Gang, ZHENG Shutao, YE Zhengmao, et al. Adaptive inverse control of time waveform replication for electrohydraulic shaking table [J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 17(11): 1611-1633.
- [9] SHEN Gang, ZHENG Shutao, YE Zhengmao, et al. Tracking control of an electro-hydraulic shaking table system using a combined controller for real-time testing [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part I Journal of Systems and Control Engineering, 2011, 225(5): 647-666.
- [10] 庞中华, 崔红. 系统辨识与自适应控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 28-34.

(编辑 葛赵青)

[文摘预登]

无线传感器网络节点协作的节能路由传输

李彬¹, 王文杰¹, 殷勤业¹, 杨荣², 杨小勇², 王慧明¹

(1. 西安交通大学智能网络与网络安全教育部重点实验室, 710049, 西安;

2. 国家无线电频谱管理研究所, 710061, 西安)

针对无线传感器网络(WSN)中数据传输低能耗的需求, 提出了一种节点协作的节能路由传输(ECGR)算法. 该算法由以下2个方面构成: 在物理层, WSN根据数据包循环冗余校验功能获得能够正确解包的节点, 然后利用竞争选取算法推举出簇头节点, 并通过与簇头节点进行信息交换, 形成协作节点簇, 从而进行协作发射信号, 最终实现多节点分集增益; 在网络层, 协作节点簇利用基于地理位置信息的路由算法, 促使数据包始终向目的节点路由, 避免了数据包路由向其他方向扩散. 与其他同类算法相比, ECGR算法不仅增加了节点簇的传输距离, 而且降低了网络整体能耗, 并将能耗均衡分布于诸多节点, 从而延长了网络寿命. 仿真实验表明, 当节点密度为0.03时, 历经400次仿真, ECGR算法的节点存活率比基于地理位置的路由算法提高了70%.