

基于模型跟随自适应控制的电液位置伺服系统重构控制



王灿¹, 杨忠¹, 张钊², 刘舒畅¹, 陈爽³, 张小恺³

1. 南京航空航天大学, 江苏 南京 211106

2. 浙江大学, 浙江 杭州 310058

3. 航空机电综合航空科技重点实验室, 江苏 南京 211106

摘要: 航空机电系统中电液位置伺服系统(EHPSS)组件故障易引发连锁反应, 对此, 本文提出了一种基于模型跟随自适应控制的重构控制器。首先, 根据电液位置伺服系统的组成结构、工作原理以及典型组件故障机理, 分别建立其标称模型与故障模型; 然后, 结合模型跟随理论与 Lyapunov 稳定性理论, 设计了模型跟随自适应重构控制器, 该控制器不需要故障先验信息, 仅根据故障系统的状态与参考模型状态之间的广义误差, 在线调整自适应控制器参数, 使得当时间趋向无穷大时, 广义误差信号逐渐收敛于零, 不仅可以保证系统的稳定性, 还具有自适应速度快的优点; 最后, 通过多种故障情况下的位移跟踪试验, 验证了该重构控制方法的重构控制能力和鲁棒性。本文所提出的建模与控制方法对于机电系统重构控制的未来研究具有参考价值。

关键词: 电液位置伺服系统; 模型跟随自适应控制; 组件故障; 重构控制; 故障建模

中图分类号: TP273

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.03.012

作为典型的航空机电系统, 电液位置伺服系统(EHPSS)已广泛应用于大型飞机舵面控制, 以及飞行模拟器控制等安全关键系统上^[1]。EHPSS具有响应速度快、系统刚度高、力重比高、信号处理灵活且易于控制等特点^[2]。随着微电子、传感检测、新型航空材料以及飞行控制技术的蓬勃发展, 航空工业对飞机性能的要求不断提高, 使得EHPSS所承担的任务越来越重, 精密复杂程度越来越高, 分布于飞机各部位的EHPSS, 包含大量的控制器、传感器、执行器、连接器等组件协同工作, 其性能、可靠性和使用寿命都受到组件的制约。在执行飞行任务过程中, EHPSS的组件不可避免地会存在故障隐患, 轻则影响系统工作效率、增加能耗、影响机组人员舒适度等, 重则引发连锁反应, 如在大型飞机操纵面的驱动中, EHPSS一旦发生故障, 就会造成期望和实际运动之间出现差异^[3], 这可能会导致灾难性的后果。因此, 需要提高EHPSS的可靠性, 同时针对其突发故障进行容错设计。

传统方法是通过可靠性设计及余度技术来降低故障发生的概率^[4-5], 然而, 考虑到生产因素的约束, 飞机组件冗余

度有限, 其可靠性很难提高; 另一方面, 可靠性仅说明了故障发生后系统仍能保持可接受性能的概率, 高可靠性并不意味着不发生故障^[6]。鉴于此, 亟须提高EHPSS对组件故障的自主处理能力。

为了克服传统反馈控制设计在面对组件故障时性能差且可能导致系统不稳定的缺点, 研究者们通过设计能够容忍潜在故障的控制系统, 来提高可靠性和可用性, 同时提供期望的性能。这种控制思想被称为容错控制^[7]。重构控制技术作为容错控制的一个热门分支, 目前已经被广泛应用于安全关键控制系统设计^[8-9]。模型跟随自适应控制(MFAC)因其对未知的、突发的故障具有强大的自适应能力而受到重构控制研究者的关注。MFAC通过设置理想的参考模型, 根据被控对象状态与参考模型状态之间的广义误差信号, 实时调整控制律, 使被控对象的状态尽可能跟踪参考模型的状态, 使得当时间趋于无穷大时, 广义误差信号逐渐收敛于零^[10]。Kim^[11]设计了基于MFAC的重构飞行控制系统, 使飞机可以在出现故障情况下拥有更强的生存能

收稿日期: 2023-08-12; 退修日期: 2023-12-27; 录用日期: 2024-01-26

基金项目: 航空科学基金(201928052006)

引用格式: Wang Can, Yang Zhong, Zhang Zhao, et al. Model following adaptive control based on reconfiguration control for electro-hydraulic position servo system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(03): 103-110. 王灿, 杨忠, 张钊, 等. 基于模型跟随自适应控制的电液位置伺服系统重构控制[J]. 航空科学技术, 2024, 35(03): 103-110.

力。胡寿松^[12]在MFAC框架上利用神经网络补偿故障引起的非线性因素影响。柴树梁^[13]针对大型民机操纵面故障问题,利用基于MFAC的重构控制方法保证了飞行品质。

基于上述分析,针对EHPSS组件故障易引发连锁反应的问题,本文提出了一种基于MFAC的重构控制器。根据EHPSS的组成结构、工作原理以及典型组件故障机理,建立了其标称模型和故障模型。利用模型跟随理论与Lyapunov稳定性理论推导出了控制器中增益阵的更新律,并证明了所设计的闭环重构系统是渐近稳定的。通过多种故障情况下的位移跟踪仿真,验证了该重构控制方法的性能。

1 EHPSS 数学建模

1.1 系统组成

EHPSS 闭环结构如图 1 所示,闭环的工作原理是利用控制器将期望输出信号和传感器测量信号的误差转化为可控电压,经过放大器放大后转化为输出电流,以控制电液伺服阀的阀芯运动^[14]。通过伺服阀输出的压力油推动液压缸活塞杆移动,进而带动工作台的移动。

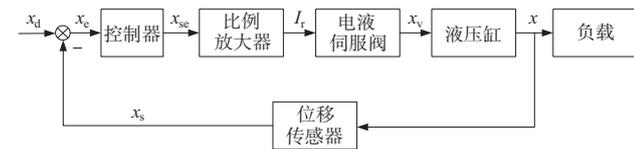


图1 EHPSS 结构图

Fig.1 EHPSS structure diagram

1.2 数学模型

1.2.1 液压缸数学模型

阀控液压缸具体结构如图 2 所示,图中液压缸、电液伺服阀和负载分别用虚线标记。 Q_1 和 p_1 分别为左侧液压缸的流量和压力, Q_2 和 p_2 分别为右侧液压缸的流量和压力, I_r 为输入电流。

液压缸的物理特性由以下方程描述

$$\begin{cases} Q_L = K_q x_v - K_c p_L \\ Q_L = A_1 \dot{x} + C_{tp} p_L + \frac{V_t}{4\beta_e} \dot{p}_L \\ A_h p_L = m\ddot{x} + B_v \dot{x} + kx + F_L \end{cases} \quad (1)$$

式中,变量 Q_L 为负载流量; x_v 为伺服阀阀芯位移; x 为活塞杆的位移;其他符号描述与参考值,见表 1。

根据式(1)可以通过消除中间变量得到液压缸状态空间方程

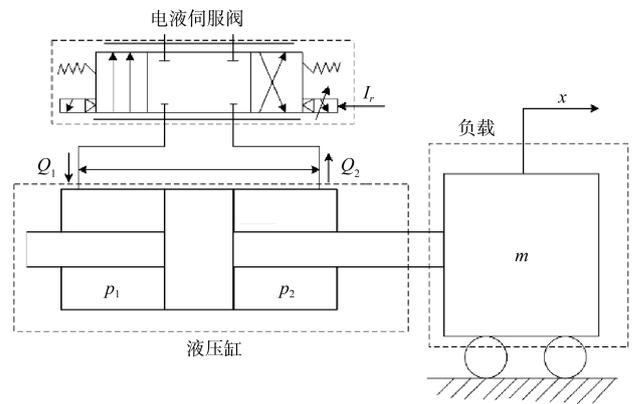


图2 阀控液压缸结构图

Fig.2 Valve controlled hydraulic cylinder

表1 液压缸数学模型参数

Table 1 Hydraulic cylinder mathematical model parameters

符号/单位	物理意义	数值
$K_q/(m^2/s)$	流量增益	7.25×10^{-4}
K_c	流量-压力系数	0.004
P_L	电液伺服阀的负载压力	—
C_{tp}	液压缸的等效泄露系数	0.004
A_t/m^2	液压缸有效作用面积	2.206×10^{-4}
V_t/m^3	液压缸的总压缩容积	0.01
β_e	油液的等效体积弹性模量	4.776×10^5
m/kg	负载等效质量	0.53
B_v	活塞和负载的黏性阻尼系数	0
k	活塞上的负载弹簧刚度	0
F_L/N	外负载力	0
$K_{ce}(m^5/(N \cdot s))$	伺服阀流量-压力系数	0.008
ω_h/Hz	液压缸固有频率	891.72
ζ_h	液压缸阻尼比	0.23

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1/m & -4\beta_e K_{ce}/mV_t & 4\beta_e K_q A_t/mV_t \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_L \\ F_L \\ x_v \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, A_{11} 为 $\frac{4\beta_e K_{ce} + B_v V_t}{mV_t}$, A_{12} 为 $\frac{KV_t + 4\beta_e A_t^2 + 4\beta_e B_v K_{ce}}{mV_t}$, A_{13} 为 $\frac{4\beta_e k K_{ce}}{mV_t}$ 。

在实际应用系统中,弹性负载和黏性阻尼系数通常很小,可不纳入计算^[15],因此式(2)可进一步简化为

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\zeta_h \omega_h & -\omega_h^2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_q \omega_h^2 / A_h \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} x_v \quad (3)$$

式中, $\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_c A_t^2}{mV_t}}$ 为液压固有频率, $\zeta_h = \frac{K_{cc}}{A_t} \sqrt{\frac{\beta_c m}{V_t}}$ 为液压阻尼比。

1.2.2 电液伺服阀的数学模型

可将电液伺服阀视为二阶振荡环节,其工频接近频率 ω_h ,在状态空间方程中可以表达为

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_v \\ \dot{x}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\zeta_{sv}\omega_{sv} & -\omega_{sv}^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ x_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{sv}\omega_{sv}^2 \\ 0 \end{bmatrix} I_r \quad (4)$$

式中,符号描述与参考值见表2。

表2 电液伺服阀数学模型参数

Table 2 Electro hydraulic servo valve mathematical model parameters

符号	物理意义	数值
K_{sv}	伺服阀增益	16.5
ζ_h	伺服阀阻尼比	0.7
ω_{sv}/Hz	伺服阀固有频率	386.94

电液伺服阀被广泛应用于EHPSS中作为执行器,然而很难避免使用过程中存在的隐患。本文引入了效率损失(LOE)的概念,用以代表EHPSS中典型的执行器故障情况。这类故障的主要特征是使执行器的增益值下降,导致伺服阀阀芯的位移与控制期望的指令输出存在偏差,即

$$x'_v = k_{LOE} x_v \quad (5)$$

式中, x'_v 为伺服阀阀芯的实际位移; k_{LOE} 为LOE故障增益; $k_{LOE} \in (0, 1]$ 。

$n\%$ LOE等同于LOE故障增益 $k_{LOE} = 1 - n/100$, $k_{LOE} = 1$ 表示执行器无故障。因此,液压缸的数学模型可以改写如下

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\zeta_h\omega_h & -\omega_h^2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_q\omega_h^2/A_h \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} x'_v \quad (6)$$

在建立故障模型时,不能简单地假设EHPSS中各组件(以下简称组件)可以始终具备与无故障状态相同的特性。相反,需要考虑到组件可能出现故障的情况。通过建立准确的故障模型,可以清楚地描述如何将故障加入系统,并为后续模型跟随自适应控制器设计提供准确的故障模型。

1.2.3 位移传感器数学模型

位移传感器视为比例环节

$$x_s = k_f x \quad (7)$$

式中, x_s 为传感器测量位移, k_f 为传感器反馈增益。

类似于执行器故障,传感器的典型故障如增益漂移和失效等也会对系统性能产生严重影响,使系统控制性能下降。传感器故障可以表示为

$$x'_s = k_{DFT} x_s \quad (8)$$

式中, x'_s 为传感器的实际输出; k_{DFT} 为传感器漂移系数; $k_{DFT} \in [0, 2]$ 。当 $k_{DFT} = 1$ 时,传感器处于无故障状态, $k_{DFT} = 0$ 时,传感器处于失效状态。

1.2.4 伺服放大器数学模型

伺服放大器方程如下

$$I_r = K_a u_{se} \quad (9)$$

式中, K_a 为伺服放大器增益。

1.2.5 控制器数学模型

为了保证EHPSS的基本跟踪性能,本文设计了相应的PI控制器,其传递函数如下

$$u_{se} = K_p x_e + K_i \int x_e dt \quad (10)$$

式中, u_{se} 为控制器输出电压; K_p 为比例增益; K_i 为积分增益;

$x_e = x_d - x'_s$ 为位移误差。

2 重构控制器设计

2.1 问题描述

根据上述建模,无故障EHPSS的数学模型可描述如下

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ 为状态矢量; $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^m$ 是控制输入矢量, $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^q$ 为输出矢量。

为了进行重构控制器的设计,将故障系统进行统一表示如下

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_p(t) = \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p(t) + \mathbf{B}_p \mathbf{u}_p(t) \\ \mathbf{y}_p(t) = \mathbf{C}_p \mathbf{x}_p(t) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \mathbf{A}_p = \mathbf{A} + \sigma \mathbf{A} \\ \mathbf{B}_p = \mathbf{B} + \sigma \mathbf{B} \\ \mathbf{C}_p = \mathbf{C} + \sigma \mathbf{C} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\mathbf{x}_p(t) \in \mathbb{R}^{n_p}$; $\mathbf{u}_p(t) \in \mathbb{R}^{m_p}$; $\mathbf{y}_p(t) \in \mathbb{R}^{q_p}$; $\mathbf{A}_p(t) \in \mathbb{R}^{n_p \times n_p}$; $\mathbf{B}_p(t) \in \mathbb{R}^{n_p \times m_p}$; $\mathbf{C}_p(t) \in \mathbb{R}^{q_p \times n_p}$; $\{\sigma \mathbf{A}, \sigma \mathbf{B}, \sigma \mathbf{C}\}$ 是由故障引起的具有适当维数的有界参数扰动矩阵。

结合模型跟随理论,选取如下参考模型

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_m(t) = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{B}_m \mathbf{r}(t) \\ \mathbf{y}_m(t) = \mathbf{C}_m \mathbf{x}_m(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\mathbf{x}_m(t) \in \mathbb{R}^{n_m}$; $\mathbf{r}(t) \in \mathbb{R}^{m_m}$; $\mathbf{y}_m(t) \in \mathbb{R}^{q_m}$; $\mathbf{A}_m(t) \in \mathbb{R}^{n_m \times n_m}$; $\mathbf{B}_m(t) \in \mathbb{R}^{n_m \times m_m}$; $\mathbf{C}_m(t) \in \mathbb{R}^{q_m \times n_m}$ 。

本文控制器设计的目标是设计 $\mathbf{u}_p(t)$ 来使得闭环系统中所有信号均有界,同时使系统的输出 $\mathbf{y}_p(t)$ 渐进跟踪参考模型的输出 $\mathbf{y}_m(t)$ 。

2.2 MFAC重构控制器

本文设计的MFAC重构控制器结构如图3所示。根据

控制结构可得如下自适应控制器

$$u_p = K_1 r + K_1 K_2 x_p + K_1 \lambda + K_1 K_3 x_m \quad (15)$$

式中, $K_1 \lambda$ 是用来低效故障输入影响的核心项。

定义输出误差

$$e_y = y_p - y_m = C_p x_p - C_m x_m \quad (16)$$

定理1在自适应控制器 u_p 中, 当自适应增益阵和增益矢量的更新律为

$$\begin{cases} \dot{K}_1 = -\Gamma_1 K_1 B_m^T C_m^T P e_y u_p^T K_1 \\ \dot{K}_2 = -\Gamma_2 B_m^T C_m^T P e_y x_p^T \\ \dot{\lambda} = -\Gamma_3 B_m^T C_m^T P e_y \end{cases} \quad (17)$$

整个闭环重构控制系统是渐进稳定的。其中 $(\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3)$ 为自适应增益矩阵, P 为满足如下方程的正定对称矩阵

$$A_c^T P + P A_c = -Q \quad (18)$$

式中, A_c 是和 A_m 同维数的任意稳定矩阵; Q 为正定对称阵。

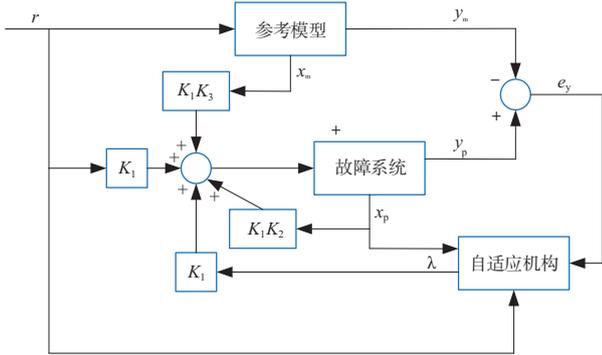


图3 MFAC重构控制器结构图

Fig.3 Structure diagram of MFAC reconstruction controller

证明根据故障系统(12)、参考模型(14)和自适应控制器(15), 对输出误差进行微分, 可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_y = & (C_p A_p + C_p B_p K_1 K_2) x_p + (C_p B_p K_1 K_3 - C_m A_m) x_m + \\ & (C_p B_p K_1 K_3 - C_m A_m) x_m + (C_p B_p K_1 K_3 - C_m B_m) u_m + \\ & C_p B_p K_1 \lambda \end{aligned} \quad (19)$$

为保证输出误差的渐近收敛, 需满足下式

$$\begin{cases} C_p A_p + C_p B_p K_1^* K_2^* = A_c C_p \\ C_m A_m - C_p B_p K_1^* K_3^* = A_c C_m \\ C_m B_m - C_p B_p K_1^* K_3^* = 0 \\ C_p B_p K_1^* \lambda^* = 0 \end{cases} \quad (20)$$

由于故障信息未知, $(K_1^*, K_2^*, \lambda^*)$ 分别表示对 (K_1, K_2, λ) 的估计。

由自适应控制器(15)、输出误差微分(19)和式(20)可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_y = & A_c e_y + C_m B_m (K_2 - K_2^*) x_p + \\ & C_m B_m (\lambda - \lambda^*) + C_m B_m (K_1^{*-1} - K_1^{-1}) u_p \end{aligned} \quad (21)$$

定义误差矩阵和误差矢量

$$\begin{cases} \Delta K_1 = K_1^{*-1} - K_1^{-1} \\ \Delta K_2 = K_2 - K_2^* \\ \Delta \lambda = \lambda - \lambda^* \end{cases} \quad (22)$$

将式(22)代入式(21)可得

$$\dot{e}_y = A_c e + C_m B_m \Delta K_2 x_p + C_m B_m \Delta \lambda + C_m B_m \Delta K_1 u_p \quad (23)$$

选择如下 Lyapunov 函数^[11]

$$V = e_y^T P e_y + \text{tr} \left[\frac{\Delta K_1^T \Delta K_1}{\Gamma_1} \right] + \text{tr} \left[\frac{\Delta K_2^T \Delta K_2}{\Gamma_2} \right] + \frac{\Delta \lambda^T \Delta \lambda}{\Gamma_3} \quad (24)$$

根据方程(19)、式(23), 对 Lyapunov 函数(24)两端求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -e_y^T Q e_y + 2 \text{tr} \left[\frac{\Delta K_1^T (\Gamma_1 B_m^T C_m^T P e_y u_p^T + K_1^{-1} \dot{K}_1 K_1^{-1})}{\Gamma_1} \right] + \\ & 2 \text{tr} \left[\frac{\Delta K_2^T (\Gamma_2 B_m^T C_m^T P e_y x_p^T + \dot{K}_2)}{\Gamma_2} \right] + \\ & \frac{2 \Delta \lambda^T (\Gamma_3 B_m^T C_m^T P e_y + \dot{\lambda})}{\Gamma_3} = -e_y^T Q e_y + \Delta \end{aligned} \quad (25)$$

将自适应律(17)代入式(25)可得

$$\dot{V} = -e_y^T Q e_y \leq 0 \quad (26)$$

因此整个闭环重构控制系统是渐进稳定的。

3 仿真分析

3.1 仿真参数与故障情况设置

系统的主要参数见表1~表3。根据本文前述建模部分, 系统可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) \\ y(t) = C x(t) \end{cases} \quad (27)$$

其中, $x(t) = [\ddot{x}, \dot{x}, x, \dot{x}_v, x_v, u_{se}]$, $y(t) = [x]$, $u(t) = [x_d]$,

$$A = \begin{bmatrix} -2576 & -3.14 \times 10^7 & 0 & 0 & 1.03 \times 10^8 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4.26 \times 10^8 & -3402 & -5.91 \times 10^6 & 6.71 \times 10^6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -63.56 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 4.263 \times 10^8 \\ 0 \\ 63.55 \end{bmatrix}, C = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0].$$

为了使控制跟踪效果更符合实际,将无故障的系统模

型作为参考,即
$$\begin{cases} A_m = A \\ B_m = B \\ C_m = C \end{cases}$$

相关自适应控制器参数取值为 $\Gamma_1=1, \Gamma_2=3, \Gamma_3=1$ 。参考输入 $r(t)=\sin 5(t)$, 外部扰动 $\omega(t)=0.1+0.1\sin(10t)$ 。设置基本控制器,即传统模型参考自适应控制^[8]为对照组,通过以下三种组件故障情况来测试MFAC重构控制方法的有效性、鲁棒性以及抗扰性。

情况1(执行器故障): $t < 0.5s$, 无故障; $0.5s \leq t < 1.5s$, 执行器 20%LOE; $1.5s \leq t < 2.5s$, 执行器 50%LOE; $t \geq 2.5s$, 执行器 80%LOE。情况2(传感器故障): $t < 0.5s$, 无故障; $0.5s \leq t < 1.5s$, 位移传感器漂移 $k_{DFT} = 0.3$; $1.5s \leq t < 2.5s$, 位移传感器漂移 $k_{DFT} = 0.5$; $2.5s \leq t < 3.5s$, 位移传感器漂移 $k_{DFT} = 0.8$; $t \geq 3.5s$, 位移传感器失效 $k_{DFT} = 0$ 。情况3(抗扰测试): $t < 0.5s$, 无故障; $0.5s \leq t < 1.5s$, 执行器 20%LOE 混合外部扰动; $1.5s \leq t < 2.5s$, 执行器 50%LOE 混合外部扰动; $t \geq 2.5s$, 执行器 80%LOE 混合外部扰动。

表3 模型参数

Table 3 Model parameters

K_f	位移传感器放大系数	12.71
K_p	比例增益	10
K_i	积分增益	5
K_a	伺服放大器增益	0.0344

3.2 情况1仿真结果

组件故障情况1仿真结果如图4所示,可以看出,面对执行器LOE故障,本文提出的MFAC重构控制方法鲁棒性强,故障瞬间产生的位移差小,而且瞬态性能好,在故障发生后能够相对快速地渐近跟踪期望位移,使得EHPSS在执行器故障状态下仍具有令人满意的工作性能,大大提升了

系统的安全性与任务可靠性。

3.3 情况2仿真结果

组件故障情况2无重构控制与加入MFAC后的仿真结果分别如图6和图7所示。面对位移传感器恒增益漂移故障时,MFAC相比于基本控制器,性能有很大提升,在故障后能够实现对期望位移的渐近跟踪,可以有效地补偿传感器故障带来的不利影响,并能很好地跟踪参考输入,提升了EHPSS的安全性与任务可靠性。但在位移传感器失效的情况下,系统参数产生巨大跳变,MFAC无法平稳跟踪期望位移,位移差较大并伴有大幅度振荡,这在一些安全需求较高的应用中是不被接受的。

3.4 情况3仿真结果

图9、图10展示了故障-扰动情况3下MFAC重构控制性能仿真结果,与图4对比可以看出,扰动使得重构控制的效果变差,重构控制的难度增加。试验结果显示,即使在面临干扰时MFAC仍然能够可靠地实现系统输出追踪期望值,并且瞬态误差相对较小,表现出较强的鲁棒性和抗扰性。与无干扰时相比,它的控制效果基本相当。总体而言,重构控制的效果是令人满意的。

4 结束语

针对EHPSS组件故障易引发连锁反应的问题,本文提出了一种基于MFAC的重构控制器。建立了EHPSS的标称模型和故障模型。利用模型跟随理论与Lyapunov稳定性理论推导出了控制器中增益阵的更新律,并证明了所设计的闭环重构系统是渐近稳定的。通过多种故障情况下的位移跟踪仿真结果分析,可以得出结论:MFAC重构控制器满足了在组件故障条件下EHPSS增加的安全性、稳定性与任务可靠性的要求。

AST

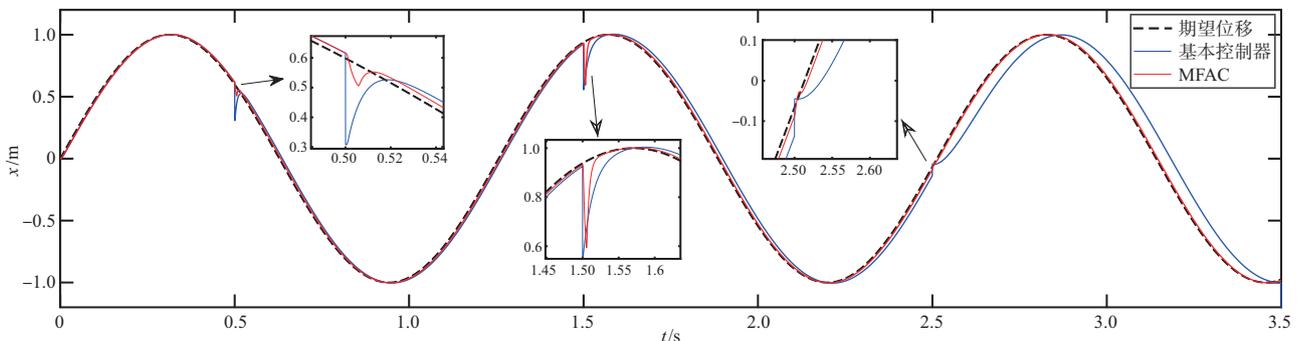


图4 情况1系统响应

Fig.4 System response in case 1

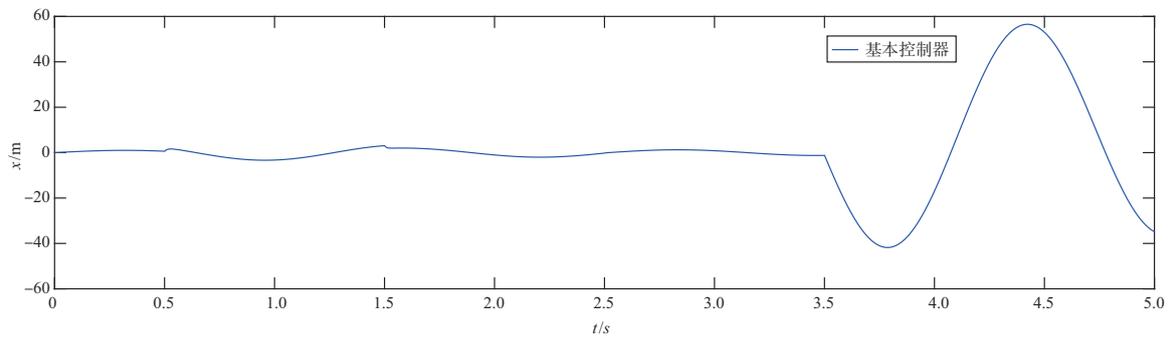


图5 情况1 MFAC控制输入

Fig.5 MFAC control input in case 1

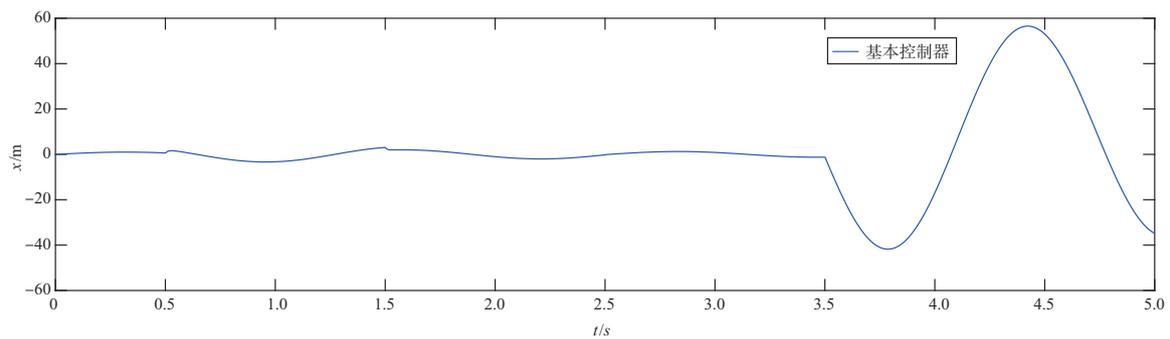


图6 情况2无重构控制的系统响应

Fig.6 System response without reconfigurable control in case 2

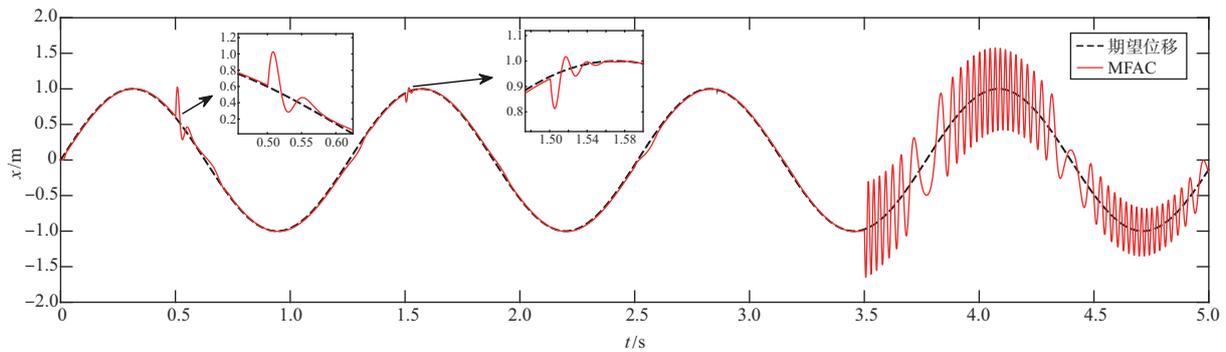


图7 情况2加入重构控制的系统响应

Fig.7 System response with reconfigurable control in case 2

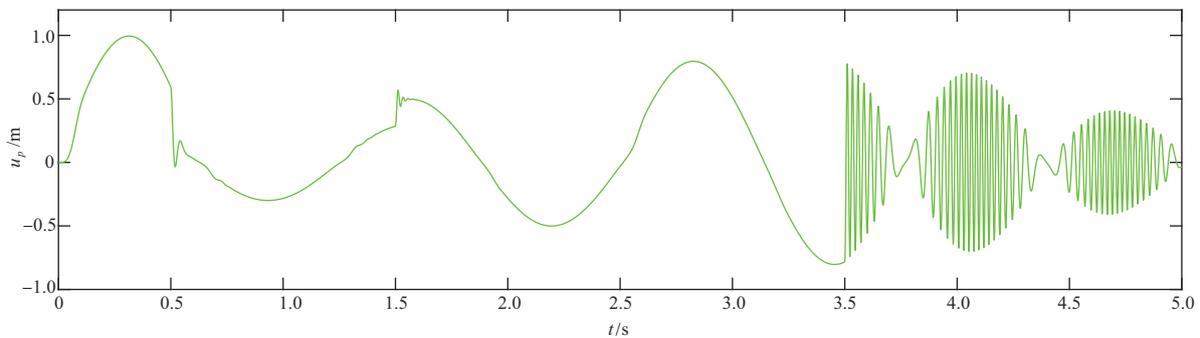


图8 情况2 MFAC控制输入

Fig.8 MFAC control input in case 2

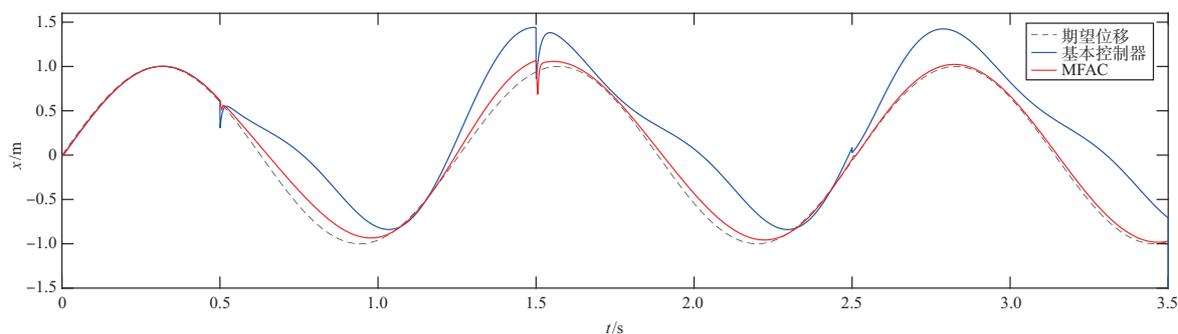


图9 情况3系统响应

Fig.9 System response in case 3

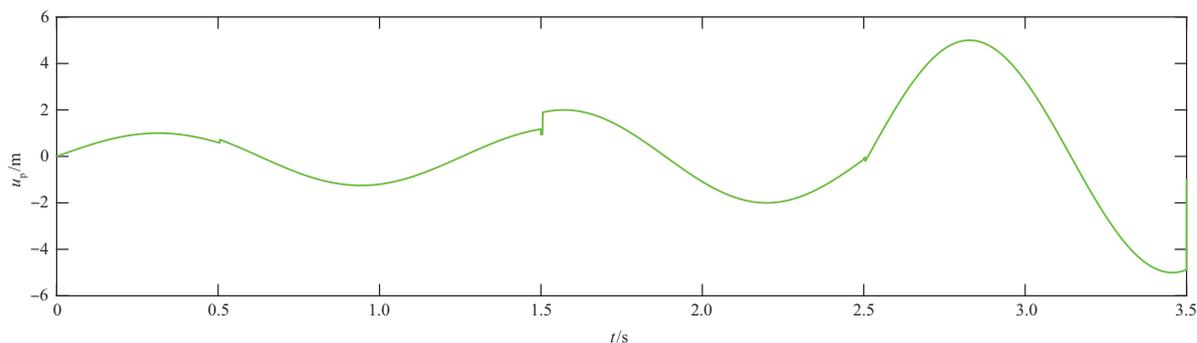


图10 情况3 MFAC控制输入

Fig.10 MFAC control input in case 3

参考文献

- [1] Salleh S, Rahmat M F, Othman S M, et al. Review on modeling and controller design of hydraulic actuator systems[J]. International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems, 2015, 8 (1):338-367.
- [2] Manring N D, Fales R C. Hydraulic control systems[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2019.
- [3] Zhang Youmin, Jin Jiang. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems[J]. Annual Reviews in Control, 2008, 32(2):229-252.
- [4] 李天为, 石鹏飞, 刘宏明. 基于适航安全的民用飞机电传飞控系统架构设计考虑[J]. 航空科学技术, 2021, 32(3):21-28.
Li Tianwei, Shi Pengfei, Liu Hongming. Design considerations for civil aircraft flyby flight control system architecture based on airworthiness safety [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32 (3): 21-28. (in Chinese)
- [5] 姚一平. 可靠性及冗余度技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991.
Yao Yiping. Reliability and redundancy technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1991. (in Chinese)
- [6] 王大轶, 屠园园, 刘成瑞, 等. 航天器控制系统可重构性的内涵与研究综述[J]. 自动化学报, 2017, 43(10): 1687-1702.
Wang Dayi, Tu Yuanyuan, Liu Chengrui, et al. The connotation and research review of reconfigurability in spacecraft control systems [J]. Journal of Automation, 2017, 43 (10): 1687-1702. (in Chinese)
- [7] 周东华, Ding X. 容错控制理论及其应用[J]. 自动化学报, 2000, 26(6): 788-797.
Zhou Donghua, Ding X. Fault tolerant control theory and its application [J]. Journal of Automation, 2000, 26 (6): 788-797. (in Chinese)
- [8] Calise A J, Lee S, Sharma M. Development of a reconfigurable flight control law for tailless aircraft[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2001, 24(5): 896-902.
- [9] 金楠, 王嵩, 崔磊, 等. 基于子控制器最优组合的Youla参数化容错控制器设计[J]. 航空科学技术, 2022, 33(5):97-102.
Jin Nan, Wang Song, Cui Lei, et al. Design of Youla parameterized fault-tolerant controller based on optimal combination of sub controllers [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33 (5): 97-102. (in Chinese)
- [10] 柴天佑, 岳恒. 自适应控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.

- Chai Tianyou, Yue Heng. Adaptive control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese)
- [11] Kim K S, Lee K J, Kim Y. Reconfigurable flight control system design using direct adaptive method[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2003, 26(4): 543-550.
- [12] 胡寿松, 周川, 胡维礼. 基于径向基函数神经网络的模型跟随自修复控制[J]. 南京航空航天大学学报, 1998, 30(5): 19-23.
Hu Shousong, Zhou Chuan, Hu Weili. Model following self-healing control based on radial basis function neural networks [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 30 (5): 19-23. (in Chinese)
- [13] 柴树梁, 刘世前, 范跃杰, 等. 基于模型跟随直接自适应控制的大型民机故障控制重构设计[J]. 信息与控制, 2013, 42(5): 639-644.
- Chai Shuliang, Liu Shiqian, Fan Yuejie, et al. Reconstruction design of fault control for large civil aircraft based on model following direct adaptive control [J]. Information and Control, 2013, 42 (5): 639-644. (in Chinese)
- [14] 王海杰. 电液位置伺服系统自适应滑模控制策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
Wang Haijie. Research on adaptive sliding mode control strategy for electrohydraulic position servo system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
- [15] 司国雷, 神英淇, 王嘉磊, 等. 电液位置伺服系统自抗扰控制研究[J]. 液压与气动, 2020(12): 19-26.
Si Guolei, Shen Yingqi, Wang Jialei, et al. Research on autodisturbance rejection control of electrohydraulic position servo system [J]. Hydraulic and Pneumatic, 2020(12): 19-26. (in Chinese)

Model Following Adaptive Control Based on Reconfiguration Control for Electro-hydraulic Position Servo System

Wang Can¹, Yang Zhong¹, Zhang Zhao², Liu Shuchang¹, Chen Shuang³, Zhang Xiaokai³

1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

2. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

3. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Elec-tromechanical System Integration, Nanjing 211106, China

Abstract: Aiming at the problem of chain reaction caused by component faults of electro-hydraulic position servo system, a reconfiguration controller based on model following adaptive control is proposed in this paper. According to the structure, working principles and typical component fault mechanisms of electro-hydraulic position servo system, its nominal model and fault model are established respectively. A model following adaptive reconfiguration controller is designed based on Lyapunov stability theory and model following theory. It does not need any advanced fault information, and only adjusts the parameters of the adaptive controller online according to the generalized error between the state of the fault system and the reference model, so that when the time tends to infinity, the generalized error signal gradually converges to zero. It can not only ensure the stability of the system, but also has the advantage of fast adaptive speed. The robustness and reconfiguration control capability of the method are verified by displacement tracking simulation under various fault cases. The modeling and control method proposed in this article has reference value for future research on reconfigurable control of electromechanical systems.

Key Words: electro-hydraulic position servo system; model following adaptive control; component faults; reconfiguration control; fault modeling

Received: 2023-08-12; **Revised:** 2023-12-27; **Accepted:** 2024-01-26

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(201928052006)