

考虑时滞因素的负载口独立系统 模式切换平稳性研究

陈俊翔^{1,2} 姜宏达^{1,2} 孔祥东^{1,2} 艾超^{1,2*}

1.燕山大学起重机械关键技术全国重点实验室,秦皇岛,066004

2.燕山大学河北省重型机械流体动力传输与控制实验室,秦皇岛,066004

摘要:负载口独立阀在液压系统中实现进出节流口解耦控制,可支持多种控制模式,但由于切换时系统动态响应和控制器时延易导致系统模式与控制器模式异步,引发压力冲击和失稳问题。提出了一种基于负载口独立系统的稳定切换策略,该策略引入“慢切换”思想,考虑系统时延并结合 Lyapunov 稳定性理论,基于模态相关平均驻留时间提出异步切换系统动态驻留时间的边界值求解方法。相比于传统平均驻留时间方法,该方法得到了更短驻留时间,解决了线性切换系统异步切换下的稳定控制问题,既保证了切换瞬间的稳定性,又能减小驻留时间对系统响应的影响。基于抢险救援车斗杆挖掘动作进行控制策略仿真验证,结果表明,存在时滞情况下,模式切换前后液压系统压力冲击减小 80% 以上,执行器速度振荡幅值降低接近 20%,有效改善了抢险救援车执行机构的运行平稳性。

关键词:时滞系统;模式切换;负载口独立;压力/流量控制

中图分类号:TP601

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.03.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Smoothness of Mode Switch of Independent Metering Systems Considering Time-delay Factors

CHEN Junxiang^{1,2} JIANG Hongda^{1,2} KONG Xiangdong^{1,2} AI Chao^{1,2*}

1.State Key Laboratory of Crane Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

2.Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control,
Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

Abstract: The independent valve of the load port realized the decoupling control of the inlet and outlet orifices in the hydraulic systems, which might support a variety of control modes. However, due to the dynamic response and controller delay during switching, the system mode was easily asynchronous with the controller mode, causing pressure shock and instability problems. A stable switching strategy was proposed based on independent metering system. The strategy introduced the idea of "slow switching", considering system time-delay and combining Lyapunov stability theory, a boundary value solution method was proposed for the dynamic residence time of an asynchronous switching system based on mode correlation average residence time. The method obtains a shorter residence time than that of the traditional average residence time method. The stability control problem was solved under asynchronous switching of linear switching systems, which ensures the stability of switching instantaneously, and reduces the influences of residence time on system responses. Based on the excavation actions of bucket pole of rescue vehicles, the control strategy simulation verifies that under the conditions of time-delay, the pressure shock of hydraulic systems before and after mode switch is reduced by more than 80%, and the amplitude of the actuator speed oscillation is reduced by nearly 20%, which effectively improves the operation stability of the actuator of the rescue vehicles.

Key words: time-delay system; mode switch; independent metering; pressure/flow control

0 引言

液压传动系统由于功重比高、功率密度大,在

工程机械中发挥着重要作用^[1-2],随着时代发展,工程机械逐渐朝着智能化、无人化方向发展,这就对液压传动系统提出了更高的要求。传统液压传动系统中,控制执行机构的多路阀大多是进出口机械耦合^[3],在工程机械实际作业过程中,执行机构工况多变,传统多路阀只能进行位置控制,液压

收稿日期:2024-04-24

基金项目:燕山大学标志性专项培育项目(2022BZZD001);国家自然科学基金(U22A20178)

传动系统很难适应工况变化,进而导致执行机构灵活性差、控制精度低、能耗损失严重^[4]。负载口独立多路阀可构成一种新型液压控制系统,打破了传统阀控系统进、出阀口过流面积联动调节的限制,分别调节进、回油路阀口开度,对执行器两腔的压力与流量进行解耦控制,具有位置控制、压力控制、流量控制、压力流量复合控制等多种控制模式,可根据执行机构工况的变化而调整控制模式,因而能显著改善传统阀控制系统的节能性与操控性,对提高工程机械智能化水平有重要意义^[5-7]。

负载口独立系统可根据工况变化进行液压子系统的转换,为提高系统控制精度,不同液压系统转换时需进行对应模式切换^[8-11]。学者们已经对此作了大量的研究,研究重点是与传统阀门控制系统在不同工况下使用不同操作模式进行节能性能对比^[12]。然而模式切换瞬间包含液压回路的转变和控制模式的转换^[13-16],因此,模式切换有可能导致系统不稳定。基于上述思想,部分学者结合鲁棒控制、自适应控制、输出反馈控制等控制方法提出了一系列研究成果^[17-21]。文献^[22-23]设计了一种基于负载条件的差分动态补偿器,提出带边界层的 bang-bang 控制算法,采用参数选择方法提高了系统效率,保证了系统的稳定性能,并获得了良好的动态性能。文献^[24]针对传统控制器离散开关切换问题,为提高移动液压系统的能效,提出了一种无扰动传输策略,解决了离散开关的不稳定和不平滑问题。

在实际切换中,由于压力传感器、主控制器等存在时延,需要一定时间确定切换到哪个系统进而完成控制器控制模式切换^[25],即切换过程中系统模态和控制器存在异步切换现象,造成系统模态与控制非匹配导致系统产生压力冲击、失稳等问题。部分研究者已针对这一切换系统异步切换问题先后展开研究^[26-29]。目前研究中普遍要求所有子系统可镇定,文献^[30]利用多个 Lyapunov 函数证明了具有稳定子系统的切换线性系统在停留时间足够大时是指数稳定的,在最近的研究中也出现了一些计算停留时间下界以保证系统稳定性的成果。将“驻留时间”的概念扩展为“平均停留时间”的概念:平均停留时间在系统稳定性分析中更加灵活和有效,因此,现有文献的切换信号分析方法普遍基于平均驻留时间切换信号方法^[31-36]。自平均驻留时间方法提出以来,在分析切换系统“慢切换”下的稳定性中得到了广泛应用。然而,平均停留时间切换中系统模态无关的

特性仍未被考虑,文献^[37]已经很好地表明,可容许平均停留时间的最小值是由两个模式无关的参数计算的,即类 Lyapunov 函数在切换时刻的增加系数和类 Lyapunov 函数在子系统运行时间内的衰减率。很明显,以模式无关的方式设置所有子系统的两个共同参数所求得的驻留时间会有一些的时间裕度。因此,有学者在此基础上进行了改进,将所有子系统需满足的平均驻留时间条件细化至每个子系统单独需要满足的平均驻留时间,提出了基于模态的平均驻留时间方法^[38]。通过提供两个模态相关参数来扩展已有的关于平均停留时间切换系统的研究,从而得到一个模态相关的平均停留时间,得到更小的驻留时间。由此我们获得启发进而开展这项研究。

文献^[12]设计阻尼补偿器提高系统阻尼来抑制模式切换后系统的振荡,但这种方法会造成不必要的能量损失,违背了模式切换控制的初衷。文献^[22-23]的动态补偿器更加适用于传统的负载敏感系统。文献^[24]中设计的控制策略是用于解决离散电流开关的不稳定、不平滑问题,但这种离散开关问题在如今全电控工程机械上已经得到解决,并不需要设计额外的控制器来补偿,但是由于时滞因素的存在,系统模式切换后仍无法保持稳定^[28]。文献^[21,37-39]等通过理论证明,提出异步切换系统稳定的切换约束条件没有用于解决工程机械中存在的实际问题。

在本文中,为了通过负载口独立系统提高工程机械控制性能,同时改善系统模式切换带来的稳定性问题,提出一种基于负载口独立线性系统的稳定切换策略,该策略引入“慢切换”思想,同时考虑系统时延并结合 Lyapunov 稳定性理论。基于模态相关平均驻留时间提出异步切换系统动态驻留时间的边界值求解方法,得到了更短驻留时间,解决了线性切换系统异步切换下的稳定控制问题,既保证了切换瞬间的稳定性,又能减小驻留时间对系统响应的影响。

1 负载口独立系统问题描述

1.1 负载口独立双阀芯电液阀原理

本文对负载口独立切换系统的研究基于自主研发的双阀芯电液阀,原理如图 1 所示。由图 1 可知,工作联主阀芯右端与位移传感器通过螺纹连接固连,实现对位置变化的高精度感知。主阀芯分为高压阀芯与低压阀芯,可分别实现进油、回油节流口独立控制,同时进回油流道中安装温压传感器以感知容腔内温度与压力变化,为实现后

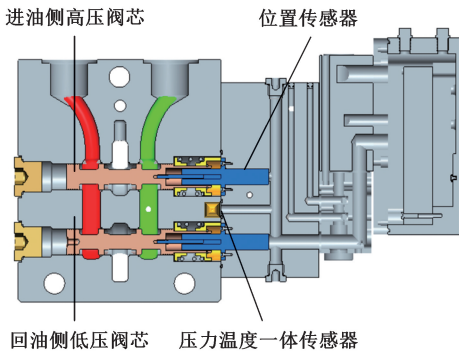


图 1 负载口独立电液阀工作联结构原理

Fig.1 Independent metering electro-hydraulic valve Work-link structure principle

续压力、流量的高精度控制提供精准状态感知信息。导阀频响不小于 35 Hz,主阀芯动态响应不大于 50 ms。

图 2 所示是基于负载口独立阀设计的液压与控制系统,工作联主要由两个三位四通高频响比例先导阀控制两个三位三通主阀实现进油口与出油口的独立控制。控制器接收的信号包括液压缸压力、位置及比例阀位置等信息,基于这些反馈信号,控制器提供最有效的控制策略来调节阀口开度和变量泵排量。

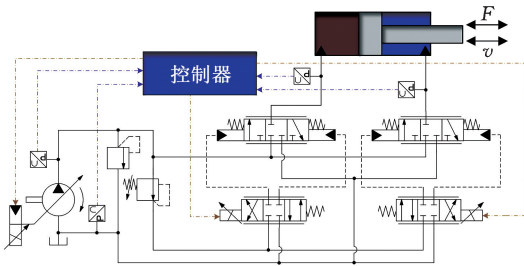


图 2 负载口独立系统液压原理图

Fig.2 Diagram of independent metering system

图 3 是对图 2 的简化,省略溢流阀、减压阀等辅件,为方便下文对系统控制策略原理的介绍,将比例先导阀控主阀结构等效成单独的比例方向阀。

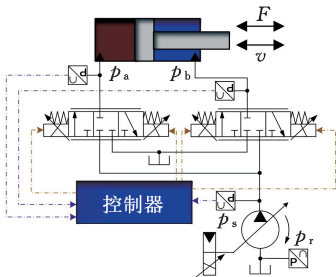


图 3 负载口独立系统液压原理简图

Fig.3 Schematic diagram of independent metering system

1.2 基于负载口独立阀的模式切换

以抢险救援车斗杆挖掘动作为例,如图 4 所示。在斗杆油缸伸出过程中,外负载力逐渐由驱动力转变为阻力,即系统工况由超越工况转变

为阻抗工况,出于节能考虑,在超越工况下液压系统进行回油再生,无需主泵供油,在阻抗工况下回油再生切断,主泵恢复供油。

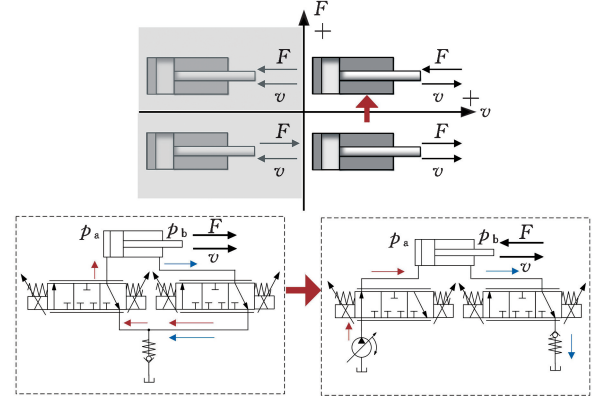


图 4 抢险救援车斗杆挖掘动作模式切换

Fig.4 Rescue vehicle stick digging action mode switch

执行机构工况多变,传统多路阀阀芯位置闭环难以实现对斗杆挖掘动作的精准控制,负载口独立双阀芯电液阀可实现对系统压力流量的高精度控制,如图 5、图 6 所示。在超越工况下液压系统进行回油再生时,对回油侧负载口独立阀进行流量控制,根据参考流量与实际流量的差值,经过控制器运算最终输出双阀芯电液阀控制信号;在阻抗工况下液压系统回油再生截止,泵头提供流量时,对回油侧负载口独立阀进行压力控制,根据参考压力与实际压力的差值,经过控制器运算最终输出双阀芯电液阀控制信号。这种反馈控制具有提高系统控制精度、抑制内外扰动的能力,但常存在时滞问题,即从检测偏差到纠正偏差到输出控制指令间有时间延迟。

流量闭环控制信号为

$$u_1 = K_p q_e + K_i \int_0^t q_e dt + K_d \frac{dq_e}{dt} \quad (1)$$

$$q_e = q_{b,ref} - q_{actual} \quad (2)$$

式中: K_p 、 K_i 、 K_d 分别为流量控制器的比例增益、积分增益、微分增益; $q_{b,ref}$ 为指令流量信号; q_{actual} 为实际流量信号; q_e 为指令流量信号与实际流量信号的误差; t 为时间。

基于压力反馈的流量计算公式如下:

$$q_{actual} = C_d A_2 \sqrt{\frac{2\Delta p_2}{\rho}} \quad (3)$$

式中: A_2 为回油阀口过流面积; Δp_2 为阀口压差; C_d 为流量系数; ρ 为液体密度。

压力闭环控制信号为

$$u_2 = K_p p_e + K_i \int_0^t p_e dt + K_d \frac{dp_e}{dt} \quad (4)$$

$$p_e = p_{b,ref} - p_b \quad (5)$$

式中: K_p 、 K_i 、 K_d 分别为压力控制器的比例增益、积分增益、微分增益; $p_{b,ref}$ 为指令压力信号; p_b 为实际压力信号; p_e 为指令压力信号与实际压力信号的误差。

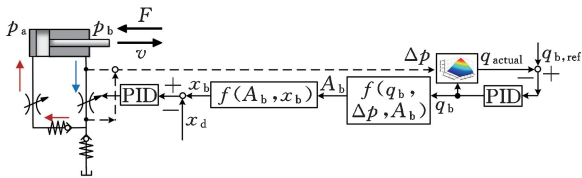


图5 流量闭环控制系统

Fig.5 Flow closed-loop control

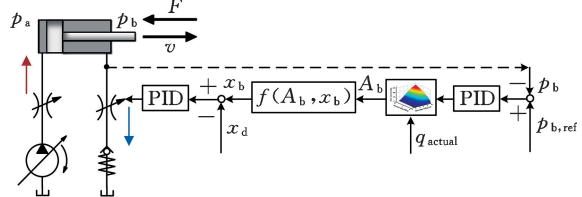


图6 压力闭环控制系统

Fig.6 Pressure closed-loop control

本文定义超越工况下具有回油再生的液压系统为子系统1，流量闭环控制模式为控制器模式1；阻抗工况下的液压系统为子系统2，压力闭环控制模式为控制器模式2。负载类型作为流量闭环与压力闭环的切换控制信号，负载力一旦超过零值就会发生模式切换。

1.3 现有模式切换下问题分析

现有针对抢险救援车斗杆挖掘切换系统的研究往往假设液压子系统与控制模式同步切换。然而，在实际斗杆挖掘中，随着系统模态由超越工况

过渡为阻抗工况，不同液压子系统随之进行切换，由于主阀芯动态响应且传感器、控制器等存在时延，需要一定时间进行模态识别来确定切换到哪个子系统进而完成控制模式的切换，因此控制模式的切换总是滞后于液压子系统的切换，即切换系统存在异步切换问题。如图7所示，超越工况下控制器控制模式1对应液压子系统1，切换后为阻抗工况，控制器控制模式2对应液压子系统2；随着工况转换，液压子系统1切换到液压子系统2，控制器需要花费时间进行模式识别才能从控制模式1切换为控制模式2，即控制模式由于存在时延无法及时进行切换，存在控制模式1控制液压子系统2的情况，从而造成液压子系统与控制模式不匹配，导致系统状态发散。

抢险救援车斗杆挖掘系统是子系统全都稳定的切换系统，但不合适的切换信号导致系统状态发散，进而在系统切换过程中产生压力冲击，如果切换过于频繁，当产生的压力冲击超出系统的最大吸收能力时，导致系统压力持续波动从而无法维持稳定，如图7所示。切换系统的异步切换瞬间产生压力波动，使负载力在零值附近波动，导致系统频繁进行模式切换，在液压系统中表现为负载口独立阀阀口频繁阶跃变化，从而造成执行器振荡。

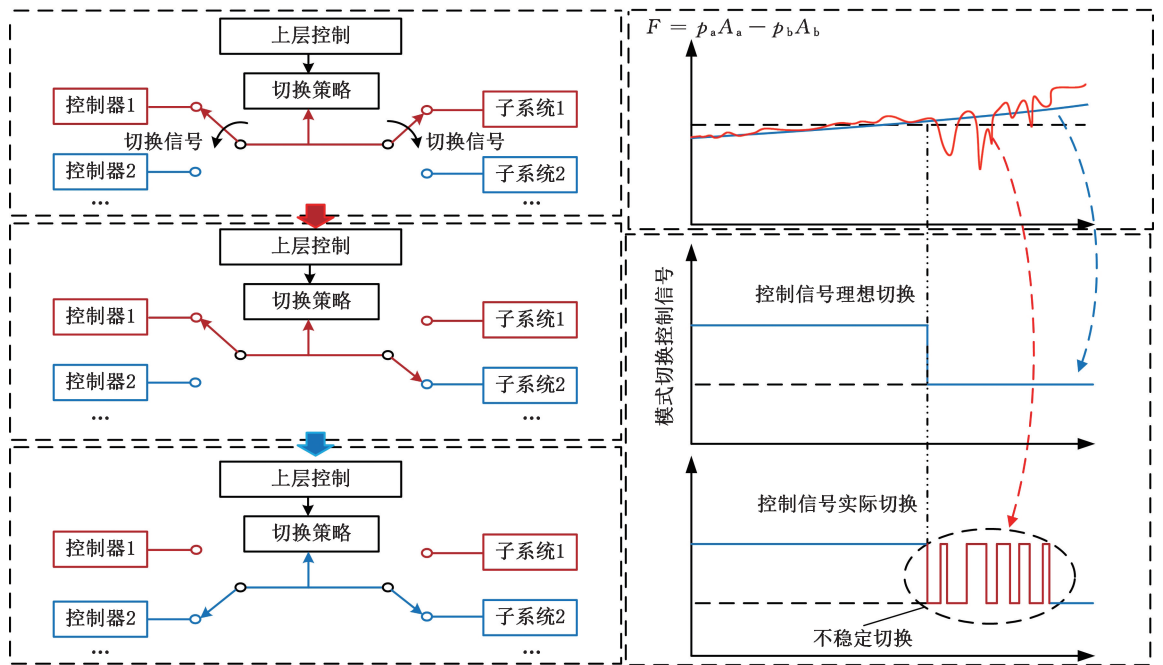


图7 异步切换系统稳定性分析

Fig.7 Analysis of asynchronous switching system and its instability causes

2 负载口独立系统稳定切换动态驻留时间求解

定义 对于一个大于零的常数 $\tau_a \in \mathbf{R}$ ，在区间 (τ, t) 内，如果一个切换信号 σ_i 的切换次数

$N_\sigma(\tau, t)$ 使得下式

$$N_\sigma(\tau, t) \leq N_0 + \frac{t - \tau}{\tau_a} \quad (6)$$

式中： N_0 为抖振界。

对任意的 $t > \tau \geq 0$ 和常数 N_0 均成立，则称 τ_a 为

切换信号 σ_i 的平均驻留时间。

根据式(6)定义,可得

$$\frac{t - \tau}{N_\sigma(\tau, t) - N_0} \geq \tau_a \quad (7)$$

表明任意两次连续切换之间“平均”的驻留时间都不小于常数 τ_a 。易知,如果一个切换系统的所有子系统都是稳定的,并且驻留时间足够大,那么该切换系统总是可以保持稳定的。

引理 1 在没有异步切换的情况下,考虑切换系统 $\dot{x} = A_{\sigma(t)}x(t)$ 。定义 $V_i(x(t)) = x^T(t)P_i x(t)$ ($x(t) \in \mathbf{R}^r$ 为系统状态向量),存在连续正标量函数 $V_i(x(t))$ 和正数 $\lambda_i > 0$ 满足: $\kappa_1(|x|) \leq V_i(x(t)) \leq \kappa_2(|x|)$, $V_i(\dot{x}(t)) \leq -\lambda_i V_i(x(t))$ (κ_1, κ_2 为 K 类函数)。假设系统在切换瞬间 t_k 由系统 i 切换到系统 j , 如果停留时间满足 $\tau > \frac{\ln \mu}{\lambda_i}$, 其中, $\mu = \frac{V_j(x(t_k))}{V_i(x(t_k))}$, 则切换系统渐近稳定。

基于上述定义和引理,本文考虑切换系统异步切换下系统镇定问题,提出了保证系统全局渐近稳定的充分条件,所提方法同时允许 Lyapunov 函数在异步切换过程有限时间区间增长,并给出了求解控制器增益的可解性条件。

2.1 基于动态驻留时间异步切换系统模型描述

本文提出一种针对异步切换系统的将驻留时间设计为在每个开关时刻动态变化的方法。首先,定义具有 h 个子系统的切换系统的状态空间方程为

$$\dot{x}(t) = f_{\sigma(t)}(x(t)) \quad (8)$$

对于有限的自然数集合 $H := \{1, 2, \dots, h\}$ (H 为切换子系统的个数),分段右连续函数 $\sigma(t): [0, +\infty) \rightarrow H$ 为切换信号。

引理 2 对于切换系统 $\dot{x}(t) = f_{\sigma(t)}(x(t))$, $\alpha > 0, \beta > 0$ 和 $\mu > 1$ 为给定常数,如果存在 K_∞ 类函数 $\kappa_1(\cdot), \kappa_2(\cdot)$ 以及 $V_{\sigma(t)} \in C^1: \mathbf{R}^r \rightarrow \mathbf{R}$ 使得

$$\kappa_1(|\xi|) \leq V_{\sigma(t)}(\xi(t)) \leq \kappa_2(|\xi|) \quad (9)$$

$$\dot{V}_{\sigma(t)}(\xi(t)) \leq \begin{cases} \beta V_{\sigma(t)}(\xi(t)) & t \in [t_i, t_i + \tau(t_i)) \\ -\alpha V_{\sigma(t)}(\xi(t)) & t \in [t_i + \tau(t_i), t_{i+1}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: t_i 和 t_{i+1} 表示 ξ_i 子系统开始运行和结束运行(或 ξ_{i+1} 子系统开始运行)的时刻; $\tau(t_i)$ 为相应的模式识别时间; $i \in h$ 。

同时,对于 $\forall (\sigma(t_i) = m, \sigma(t_i^-) = n) \in H \times H$, $m \neq n$, 如果存在

$$V_m(x(t_i)) \leq \mu V_n(x(t_i)) \quad (11)$$

则当切换信号满足平均驻留时间

$$\tau_a > \tau_a^* = [\ln \mu + \tau_d(\alpha + \beta)]/\alpha \quad (12)$$

其中, $\tau_d = \max_i \tau(t_i)$, 此时所考虑的切换系统全局渐近稳定。

从以上引理可知,现有文献关于异步切换镇定的研究,允许子系统在满足一定的平均驻留时间条件下,切换的时刻以及异步区间内 Lyapunov 函数增大,即系统有界发散。

考虑负载口独立系统的不同工作模式,可以使用以下标准方程进行线性化:

$$\dot{x} = A_{\sigma(t)}x(t) + B_{\sigma(t)}u(t) \quad (13)$$

其中,控制输入 $u(t)$ 用于实现系统稳定性或某些开关信号的性能。本文设计系统控制输入信号为

$$u(t) = K_{\sigma'(t)}x(t) \quad (14)$$

式中: K_i 为待设计的控制器增益, $i = \sigma'(t) \in H$; $\sigma'(t)$ 为控制器的切换信号, $\sigma'(t) = \sigma(t - \tau(t))$; $\tau(t)$ 为切换时延。

本文将区间 $[t_i, t_{i+1})$ 分为两部分,第一部分为子系统与控制器不匹配的异步切换阶段 $M_1 := [t_i, t_i + \tau(t_i))$, 又称模态识别阶段,即在这一阶段 $\sigma(t) \neq \sigma'(t)$; 第二部分为子系统与控制器匹配后的正常运行阶段 $M_2 := [t_i + \tau(t_i), t_{i+1})$, 即在这一阶段 $\sigma(t) = \sigma'(t)$ 。

将控制输入(式(14))代入系统模型(式(13)),可得闭环系统动态方程:

$$\dot{x}(t) = (A_{\sigma(t)} + B_{\sigma(t)}K_{\sigma(t-\tau(t))})x(t) \quad (15)$$

2.2 控制器增益求解

基于 2.1 节中系统模型,本节直接给出控制器增益的求解过程。

定理 考虑线性切换系统(式(13)),对于任意时间区间 $[t_i, t_{i+1}]$, 给定常数 μ, β_l, λ_n 使满足 $\mu > 1, \beta_l > 0, \lambda_n > 0$ 。对于 $\forall n \in H, (m, n) \in H \times H, m \neq n$, 如果存在矩阵 S_n 以及 U_n , 使得

$$A_n S_n + B_n U_n + S_n A_n^T + U_n^T B_n^T + \lambda_n S_n \leq 0 \quad (16)$$

$$A_n S_m + B_n U_m + S_m A_n^T + U_m^T B_n^T - \beta_l S_m \leq 0 \quad (17)$$

$$S_m \leq \mu S_n \quad (18)$$

则存在一组考虑异步延迟的模式相关稳定控制器可以保证闭环系统全局渐近稳定。定义 $S_n = P_n^{-1}, U_n = K_n S_n$, 则状态反馈控制器增益可通过下式获得:

$$K_n = U_n S_n^{-1} \quad (19)$$

证明过程见文献[15, 21, 39]。

3 仿真验证

3.1 仿真模型搭建

基于 AMESim 仿真软件对抢险救援车斗杆联液压系统进行仿真建模,如图 8 所示。抢险救援车斗杆联液压原理如图 2 所示, SC_1 和 SC_2

分别为两个三位四通高频响比例阀的位置闭环控制器。AMESim 软件可进行机械、液压、控制等学科分析,交互性强并且图形界面直观简洁,使用

者可根据元件真实结构、实际参数搭建仿真模型,通过其可视化界面查看仿真结果,操作方便。

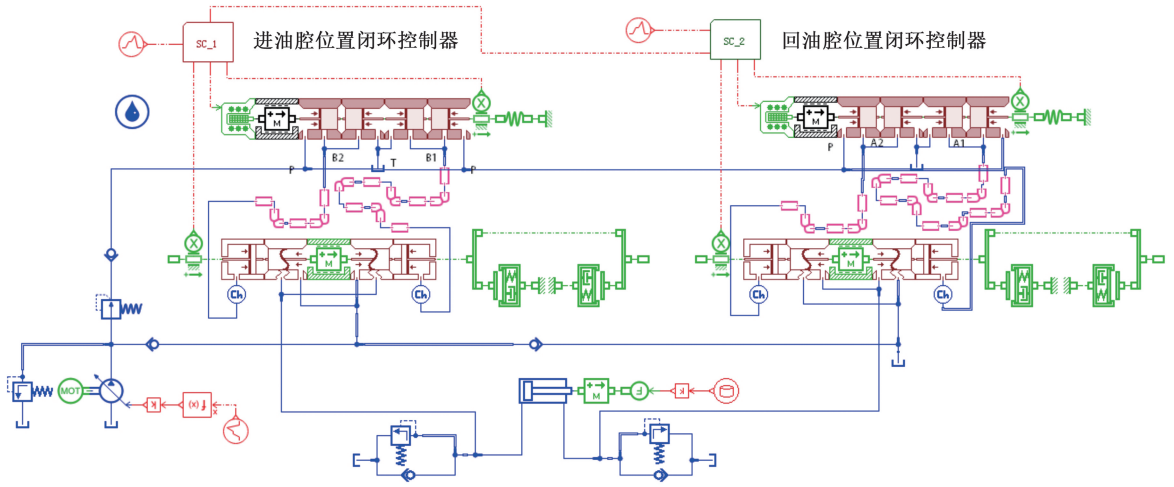


图 8 抢险救援车液压仿真建模

Fig.8 Hydraulic simulation modeling of rescue vehicles

采用 LMS Virtual. Lab Motion 仿真软件对抢险救援车机械系统进行仿真建模,如图 9 所示。LMS Virtual. Lab Motion 软件可以帮助工程师评价复杂机械系统的真实性能,为结构分析、耐久性和动力学研究提供精确载荷。其中对机械系统的校核分为运动学校核和动力学校核两部分。运

动学校核是将机械仿真模型中的齿尖运动包络线和真实抢险救援车的实际运动包络线进行对比。动力学校核是将抢险救援车各部件质量和质心与真实产品保持一致,保证斗杆挖掘动作下机械仿真模型执行机构运动时的负载曲线和真实测试负载曲线的一致性。

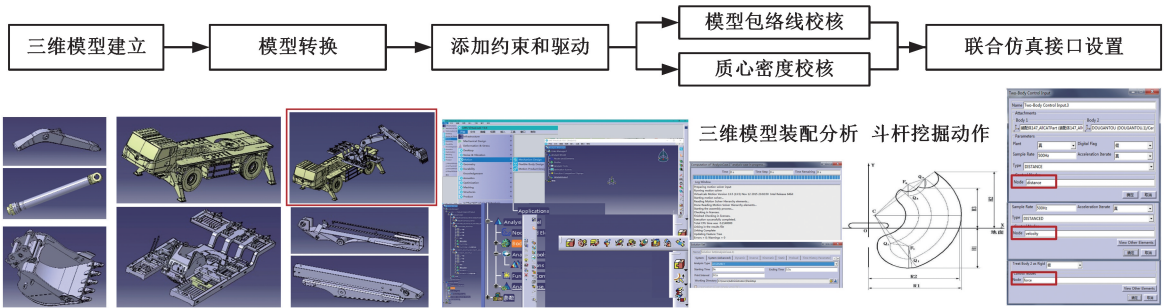


图 9 抢险救援车机械仿真建模

Fig.9 Mechanical simulation modeling of rescue vehicles

抢险救援车液压、机械模型完成建模后进行液压-机械联合仿真。AMESim 与 Motion 同时运行,各自求解模型,如图 10 所示。AMESim 液压仿真模型将液压缸产生的作用力传递给 Motion, Motion 中机械仿真模型将对应液压缸的负载以及作用力下产生的位移、速度反馈给 AMESim,形成闭环进行计算。

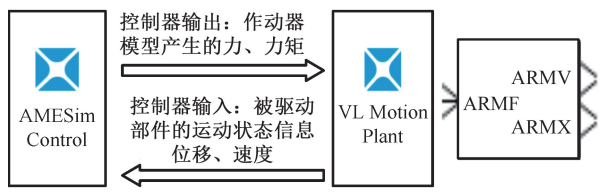


图 10 联合仿真接口设置

Fig.10 Co-simulation interface settings

抢险救援车机械-液压-控制联合仿真模型如图 11 所示,SC_3 和 SC_4 分别为流量闭环控制器和压力闭环控制器。

联合仿真模型下系统参数如表 1 所示。

3.2 不同时滞信号下切换系统稳定性分析

对抢险救援车斗杆挖掘动作进行仿真,以验

证本文所提控制策略的有效性。仿真研究分为两部分:①不同时滞信号下斗杆挖掘动作模式切换下系统稳定性分析;②基于动态驻留时间方法的斗杆挖掘动作时异步切换系统稳定性分析。

分别模拟 0(同步切换),0.1 s,0.2 s 三种不同时滞信号。通过联合仿真模型分析不同时滞下斗

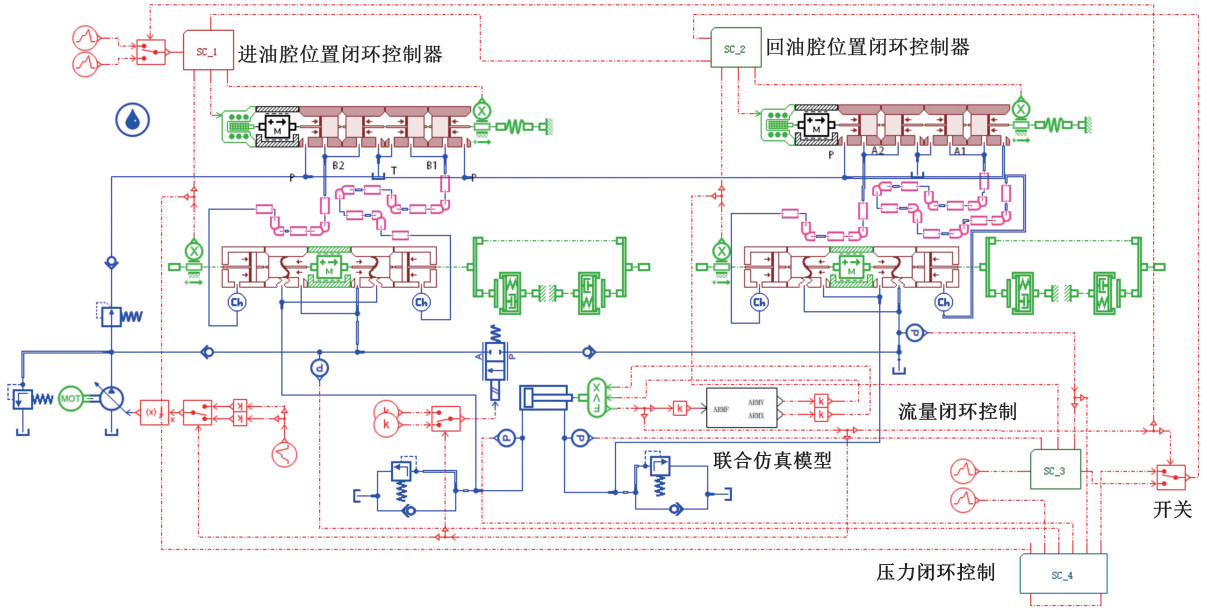


图 11 抢险救援车斗杆空载挖掘系统联合仿真模型

Fig.11 Co-simulation model of no-load excavation system of rescue vehicle arm

表 1 联合仿真模型参数

Tab.1 Co-simulation model parameters

参数	数值
泵排量/(mL · r ⁻¹)	220
斗杆液压缸大径/m	0.115
斗杆液压缸小径/m	0.075
斗杆液压缸行程/m	1.251
动臂液压缸大径/m	0.105
动臂液压缸小径/m	0.070
动臂液压缸行程/m	0.797
主阀弹簧刚度/(N · m ⁻¹)	155 800
主弹簧预紧力/N	78
主阀阀芯行程/m	±0.006
主阀阀芯质量/kg	0.072
先导阀阀芯质量/kg	0.025
先导阀阀芯行程/m	±0.0001
动臂总成质量/kg	914
斗杆(含伸缩臂)总成质量/kg	1933
铲斗总成质量/kg	344
动臂液压缸总成质量/kg	132 × 2
斗杆液压缸总成质量/kg	152
主阀阀芯行程/m	±0.006
主阀阀芯质量/kg	0.072
铲斗液压缸总成质量/kg	92
伸缩液压缸总成质量/kg	220
先导阀弹簧刚度/(N · m ⁻¹)	100 000
先导弹簧预紧力/N	11.8

杆挖掘动作切换系统的稳定性,如图 12~图 15 所示。仿真在 0~4.5 s 时,系统为超越工况,进行回油阀口流量闭环控制来控制执行器移动速度;仿真在 4.5 s 以后系统为阻抗工况,进行回油阀口压力闭环控制来调节系统自身压力;控制模式的切换基于负载力的正负进行,在仿真进行到 4.5 s 附近时系统发生切换,切换后由于负载力在零值附近波动,导致系统控制器频繁进行压力控制模

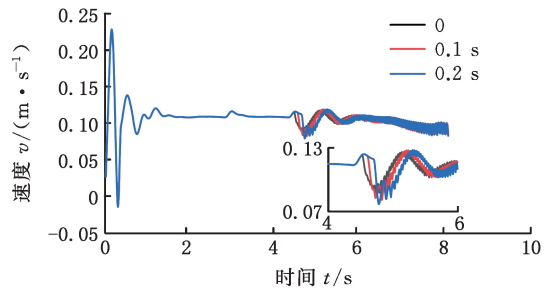


图 12 不同时滞下执行器速度

Fig.12 Actuator speed at different time-delays

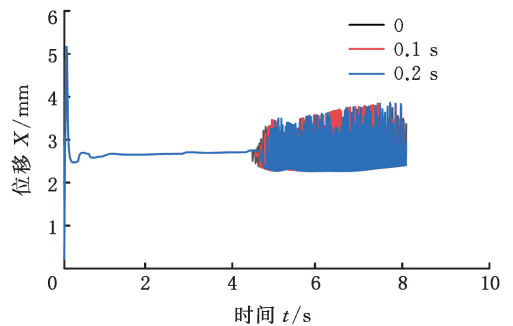


图 13 不同时滞下主阀阀芯位移

Fig.13 Main valve spool displacement at different time-delays

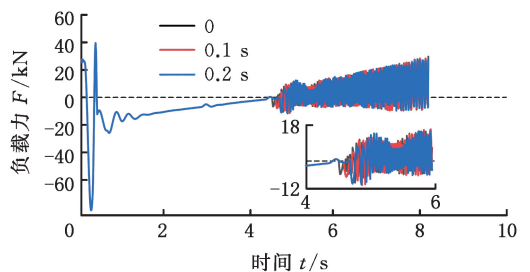


图 14 不同时滞下负载力

Fig.14 Load force at different time-delays

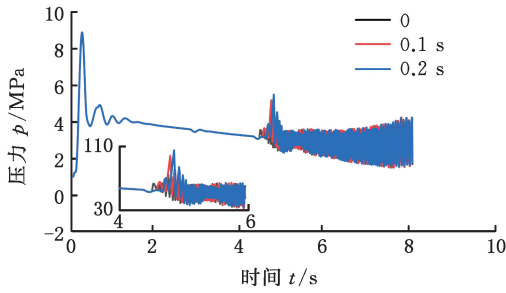


图 15 不同时滞下液压缸小腔压力

Fig.15 Small cavity pressure of hydraulic cylinder at different time-delays

式与流量控制模式的切换,时滞为 0 时执行器速度振荡幅度、系统压力冲击最小,随着时滞的延长,系统模态和控制器存在异步切换现象愈发明显,执行器速度振荡幅度及系统产生压力冲击显著增强,切换瞬间主阀阀芯位移亦产生更大波动,具体参数变化量见表 2。由此可知,系统时滞的存在对切换系统的稳定性有着不可忽略的影响。

表 2 不同时滞下切换时刻参数变化量

Tab.2 Parameter variation at the time of switching under different time-delays

参数变化量	时滞		
	0	0.1 s	0.2 s
执行器速度变化量/%	37.5	45.9	50.8
主阀阀芯位移变化量/%	63.6	63.9	64.4
负载力变化量/%	340.3	344.6	344.1
异步切换系统切换次数	172	173	167
执行器小腔压力变化量/%	110.7	164.4	178.3

3.3 基于动态驻留时间方法的异步切换系统稳定性分析

根据前文理论分析可以进行动态停留时间设计,但切换系统必须公式化为线性齐次系统。液压系统是一个典型的非线性系统,首先对负载口独立系统进行线性化。阻抗工况下进油阀口始终全开以节约能源,泵口流量为恒流源,使得进油口阀口的流量压力增益近似为 0。此时回油阀口采用压力控制,小腔压力近乎为定值,则阻抗工况下系统工作模式对应的微分方程如下:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \dot{v} &= A_a p_a - B_p v - F - F_{pb} \\ \frac{V_a}{\beta_c} \dot{p}_a &= Q_a - A_a v \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

考虑系统 $\dot{x}(t) = A_{\sigma(t)} x(t) + B_{\sigma(t)} u(t)$, 状态方程为

$$\dot{x}(t) = A_n x(t) + B_n u(t) \quad (21)$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} v \\ p_a \end{bmatrix}, \quad \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p}_a \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} Q_a \\ F \end{bmatrix}$$

$$A_n = \begin{bmatrix} -\frac{B_p}{m_1} & \frac{A_a}{m_1} \\ -\frac{A_a \beta_c}{V_a} & 0 \end{bmatrix}, \quad B_n = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1+\delta}{m_1} \\ \frac{\beta_c}{V_a} & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{pb} = \delta F$$

类似地,超越工况下,液压缸大小腔相连,考虑到此时回油阀口采用流量控制,小腔出口口流量 Q_b 近乎为定值,则超越工况下系统工作模式对应的微分方程如下:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \dot{v} &= A_c p_a - B_p v + F \\ \frac{V_c}{\beta_c} \dot{p}_a &= (1-\epsilon) Q_a - A_c v \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$A_c = A_a - A_b, \quad V_c = V_a + V_b$$

$$Q_c = Q_a - Q_b = (1-\epsilon) Q_a$$

$$\epsilon = \frac{A_b}{A_a}$$

超越工况对应的工作模式下,状态方程可以表示为

$$\dot{x}(t) = A_m x(t) + B_m u(t) \quad (23)$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} v \\ p_a \end{bmatrix}, \quad \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p}_a \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} Q_a \\ F \end{bmatrix}$$

$$A_m = \begin{bmatrix} -\frac{B_p}{m_1} & \frac{A_d}{m_1} \\ -\frac{A_a \beta_c}{V_a} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_m = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{m_1} \\ \frac{(1-\epsilon)\beta_c}{V_d} & 0 \end{bmatrix}$$

斗杆挖掘工况液压系统模式切换前后可用上述标准状态方程表示,切换系统参数见表 3。代入表 3 中的参数,得到各子系统矩阵:

$$A_m = \begin{bmatrix} -5.089 & 0.000 & 0.12 & 2 \\ -504.3 & 0 & & \end{bmatrix}$$

$$B_m = \begin{bmatrix} 0 & 0.0005 \\ 7395.8 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_n = \begin{bmatrix} -5.089 & 0.000 & 0.21 \\ -1453.2 & 0 & \end{bmatrix}$$

$$B_n = \begin{bmatrix} 0 & -0.0005 \\ 35000 & 0 \end{bmatrix}$$

表 3 切换系统参数

Tab.3 Parameters of switching system

参数	数值	参数	数值
m_1/kg	1965	$B_p/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	10 000
A_a/m^2	0.042	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.082
A_b/m^2	0.018	p_a/MPa	4.402
β_c/MPa	700	p_b/MPa	52.745
V_{a0}/m^3	0.0001	$Q_a/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	53.281
V_{b0}/m^3	0.0001	F/N	6430

设异步切换过程中最大时延为 τ_d , 观察子系统矩阵 A_m, B_m, A_n, B_n 可知,正常工作模式两个子系统稳定,令 $\lambda = 2$, 则通过 MATLAB 中 LMI 工具箱求解,可得控制器增益和正定矩阵:

$$K_m = \begin{bmatrix} -0.12 & 41.3069 \\ -0.0001 & -0.023 \end{bmatrix}$$

$$P_m = \begin{bmatrix} -0.1 & 2.9 \\ 2.9 & -619.6 \end{bmatrix} \times 10^{-6}$$

$$K_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.0003 & 0.03 \end{bmatrix} \times 10^4$$

$$P_n = \begin{bmatrix} 58.10 & -0.03 \\ -0.03 & 2.76 \end{bmatrix} \times 10^{-6}$$

同时可得 $\beta = 1, \mu = 1.5$, 代入式(12) 可得考虑时滞异步切换系统最小驻留时间。易知, 时延 $\tau_d = 0$ 时, 设计实时最小驻留时间为 0.203 s; 时延 $\tau_d = 0.1$ s 时, 设计最小实时驻留时间为 0.353 s; 时延 $\tau_d = 0.2$ s 时, 设计最小实时驻留时间为 0.503 s。

所提出的动态驻留时间设计方法用于图 4 中抢险救援车斗杆挖掘动作。

图 16~图 19、图 20~图 23 和图 24~图 27 分别对比了 0、0.1 s 和 0.2 s 时滞下优化前后执行器速度、主阀芯位移、系统外负载力和执行器小腔压力。通过上述指标更为全面地展现出切换前后

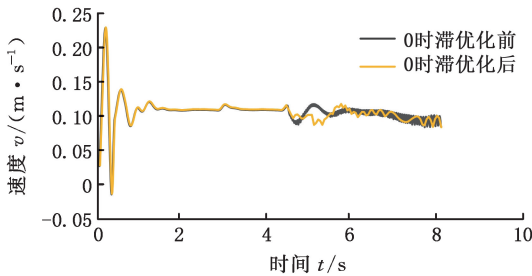


图 16 0 时滞下优化前后执行器速度
Fig.16 Post-actuator speed before and after optimization under 0 time-delay

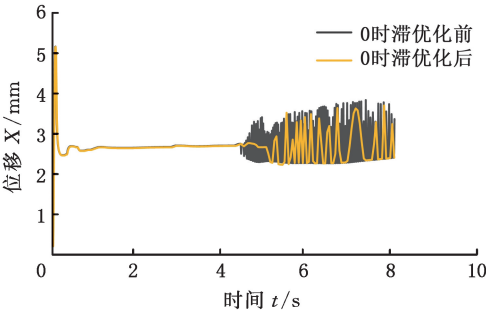


图 17 0 时滞下优化前后主阀位移
Fig.17 Main valve displacement before and after optimization under 0 time-delay

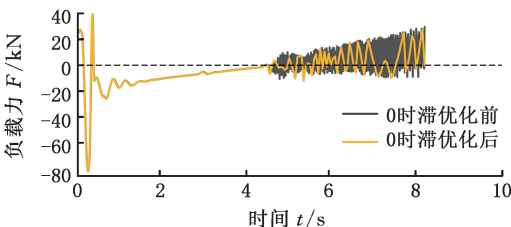


图 18 0 时滞下优化前后切换系统负载力
Fig.18 Switching system load force before and after optimization under 0 time-delay

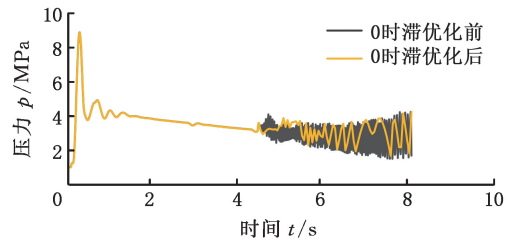


图 19 0 时滞下优化前后执行器小腔压力
Fig.19 Actuator cavity pressure based before and after optimization under 0 time-delay

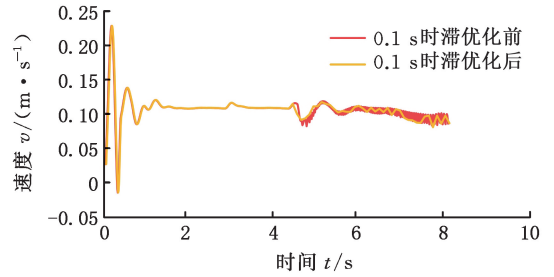


图 20 0.1 s 时滞下优化前后执行器速度
Fig.20 Post-actuator speed before and after optimization under 0.1 s time-delay

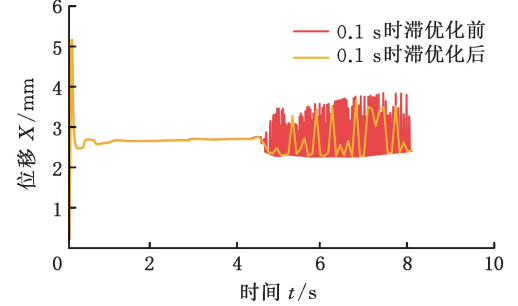


图 21 0.1 s 时滞下优化前后主阀位移
Fig.21 Main valve displacement before and after optimization under 0.1 s time-delay

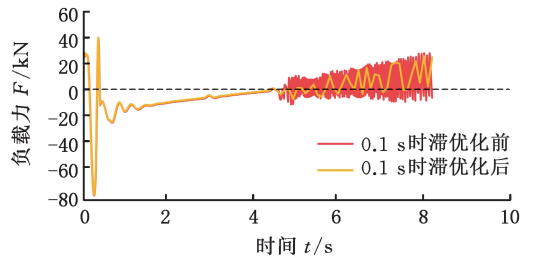


图 22 0.1 s 时滞下优化前后切换系统负载力
Fig.22 Switching system load force before and after optimization under 0.1 s time-delay

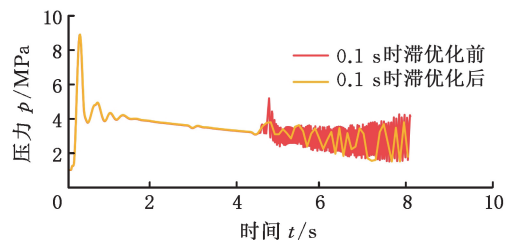


图 23 0.1 s 时滞下优化前后执行器小腔压力
Fig.23 Actuator cavity pressure before and after optimization under 0.1 s time-delay

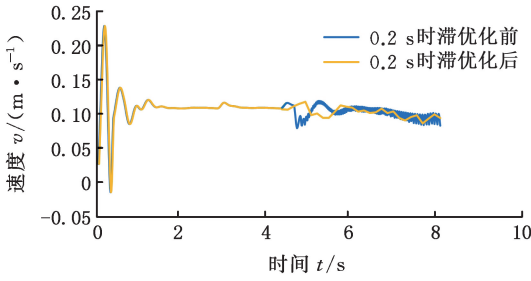


图 24 0.2 s 时滞下优化前后执行器速度

Fig.24 Post-actuator speed before and after optimization under 0.2 s time-delay

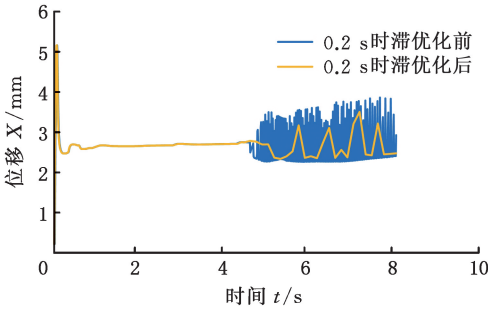


图 25 0.2 s 时滞下优化前后主阀位移

Fig.25 Main valve displacement before and after optimization under 0.2 s time-delay

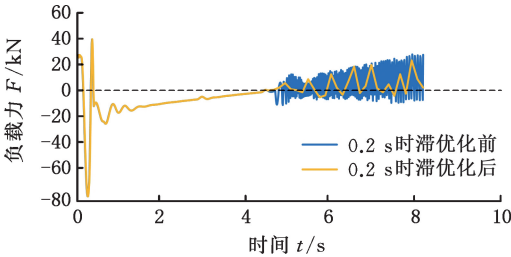


图 26 0.2 s 时滞下优化前后切换系统负载力

Fig.26 Switching system load force before and after optimization under 0.2 s time-delay

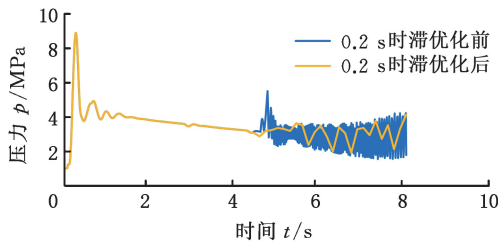


图 27 0.2 s 时滞下优化前后执行器小腔压力

Fig.27 Actuator cavity pressure before and after optimization under 0.2 s time-delay

系统的状态并根据曲线中的数据进行量化分析。

由图 16~图 27 的仿真结果可以看出,相较于压力流量直接切换的控制系统,采用本文所提出方法,液压缸的速度没有过度振荡或急剧下降,负载力曲线在零点处平滑过渡,显著减少了模式切换次数,避免了阀口开度的频繁开大或关小。

表 2 数据表示模式切换后系统性能产生的变化,表 4 数据表示通过动态驻留时间方法优化后

系统性能产生的变化。结合表 2 和表 4 中的数据易知,0 时滞下,模式切换前后液压系统小腔压力变化量减小 1.6%,执行器速度变化量减小 8.8%,系统切换次数减少了 141 次;0.1s 时滞下,模式切换前后液压系统小腔压力变化量减小 83.7%,执行器速度变化量减小 18.4%,系统切换次数减少了 156 次;0.2s 时滞下,模式切换前后液压系统小腔压力变化量减小 95.4%,执行器速度变化量减小 19.6%,系统切换次数减少了 151 次。仿真结果表明,所提出的基于动态驻留时间的控制策略有助于实现稳定模式切换,同时降低停留时间对系统响应的影响。

表 4 不同时滞下切换时刻参数优化后变化量

Tab.4 Parameter variation after optimization at the time of switching under different time-delays

参数变化量	时滞		
	0	0.1 s	0.2 s
执行器速优化后变化量/%	28.7	27.5	31.2
阀芯位移优化后变化量/%	56.4	59.3	55.1
负载力优化后变化量/%	340.1	294.5	248.6
系统优化后切换次数	31	17	16
小腔压力优化后变化量/%	109.1	80.7	82.9

4 结论

为提高抢险救援车斗杆执行机构控制性能,本文基于负载口独立双阀芯电液阀设计了阻抗工况下的液压系统与超越工况下的液压系统,考虑实际切换过程中系统模式和控制器控制模式存在异步切换现象带来的冲击、振动、失稳等问题,提出一种基于切换调节的负载口独立线性切换系统镇定控制策略。为最大程度减小该策略对系统响应的影响,本文基于模态相关的平均驻留时间,得到更小的异步切换系统驻留时间边界值,基于高精度抢险救援车机械-液压-控制仿真平台进行控制策略的仿真验证。

分析不同时滞信号对切换系统稳定性的影响可知,随着时滞的延长,切换系统状态变得愈发恶劣。对比采用动态驻留时间方法优化前后切换时刻系统执行器速度、主阀阀芯位移、液压缸小腔压力、模式切换次数等参数可知,优化后系统的模式切换更平稳,验证了合适的动态驻留时间在解决线性系统异步切换控制稳定性问题的有效性,提高了负载口独立系统的控制性能。

参考文献:

[1] ĆINKELJ J, KAMNIK R, ĆEPON P, et al., Closed-loop Control of Hydraulic Telescopic Handler[J]. Automation in Construction, 2010,19(7):

- 954-963.
- [2] SHI Hu, YANG Huayong, GONG Guofang, et al. Energy Saving of Cutterhead Hydraulic Drive System of Shield Tunneling Machine[J]. *Automation in Construction*, 2014, 37:11-21.
- [3] ERIKSSON B, PALMBERG J O. Individual Metering Fluid Power Systems:Challenges and Opportunities[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I:Journal of Systems and Control Engineering*, 2011, 225(2):196-211.
- [4] MINAV T A, VIRTANEN A, LAURILA L, et al. Storage of Energy Recovered from an Industrial Forklift[J]. *Automation in Construction*, 2012, 22: 506-515.
- [5] MINAV T A, LAURILA L I E, PYRHÖNEN J J. Analysis of Electro-hydraulic Lifting System's Energy Efficiency with Direct Electric Drive Pump Control[J]. *Automation in Construction*, 2013, 30: 144-150.
- [6] HEIKKILÄ M, LINJAMA M. Displacement Control of a Mobile Crane Using a Digital Hydraulic Power Management System [J]. *Mechatronics*, 2013, 23(4):452-461.
- [7] SHEN Wei, JIANG Jihai, SU Xiaoyu, et al. Control Strategy Analysis of the Hydraulic Hybrid Excavator[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, 352(2):541-561.
- [8] BENZAOUIA A. *Saturated Switching Systems*[M]. Berlin:Springer, 2012.
- [9] LIBERZON D. *Switching in Systems and Control* [M].Boston:Birkhäuser Boston, 2003.
- [10] LEVITIN G, XING Liudong, DAI Yuanshun. Mission Cost and Reliability of 1-out-of- N Warm Standby Systems with Imperfect Switching Mechanisms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2014, 44(9): 1262-1271.
- [11] LIAN Jie, LI Can, XIA Biao. Sampled-data Control of Switched Linear Systems with Application to an F-18 Aircraft[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(2):1332-1340.
- [12] XU Bing, DING Ruqi, ZHANG Junhui, et al. Pump/Valves Coordinate Control of the Independent Metering System for Mobile Machinery[J]. *Automation in Construction*, 2015, 57:98-111.
- [13] LIU Yang, XIAHOU Kaishun, WANG Lei, et al. Switching Control of GSC of DFIGWTs for Disturbance Rejection Based on Bang-Bang Control [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(6):3256-3259.
- [14] ZHAO Xudong, YIN Shen, LI Hongyi, et al. Switching Stabilization for a Class of Slowly Switched Systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(1):221-226.
- [15] ZHAO Xudong, ZHANG Lixian, SHI Peng, et al. Stability and Stabilization of Switched Linear Systems with Mode-dependent Average Dwell Time[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(7):1809-1815.
- [16] LONG Lijun, ZHAO Jun. Adaptive Output-feedback Neural Control of Switched Uncertain Nonlinear Systems with Average Dwell Time[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2015, 26(7):1350-1362.
- [17] LONG Lijun, ZHAO Jun. Decentralized Adaptive Fuzzy Output-feedback Control of Switched Large-scale Nonlinear Systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2015, 23(5):1844-1860.
- [18] TONG Shaocheng, LI Yongming. Adaptive Fuzzy Output Feedback Tracking Backstepping Control of Strict-feedback Nonlinear Systems with Unknown Dead Zones [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2012, 20(1):168-180.
- [19] HUA Changchun, LIU Guopin, LI Liang, et al. Adaptive Fuzzy Prescribed Performance Control for Nonlinear Switched Time-delay Systems with Unmodeled Dynamics [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 26(4):1934-1945.
- [20] DING Ruqi, ZHANG Junhui, XU Bing, et al. Programmable Hydraulic Control Technique in Construction Machinery: Status, Challenges and Countermeasures[J]. *Automation in Construction*, 2018, 95:172-192.
- [21] HUA Changchun, LIU Guopin, ZHANG Lin, et al. Cooperative Stabilization for Linear Switched Systems with Asynchronous Switching[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(6):1081-1087.
- [22] CHENG Min, XU Bing, ZHANG Junhui, et al. Valve-based Compensation for Controllability Improvement of the Energy-saving Electrohydraulic Flow Matching System [J]. *Journal of Zhejiang University:Science A*, 2017, 18(6):430-442.
- [23] XU Bing, CHENG Min, YANG Huayong, et al. A Hybrid Displacement/Pressure Control Scheme for an Electrohydraulic Flow Matching System[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(6):2771-2782.
- [24] DING Ruqi, XU Bing, ZHANG Junhui, et al. Bumpless Mode Switch of Independent Metering Fluid Power System for Mobile Machinery[J]. *Automation in Construction*, 2016,68:52-64.

- [25] WANG Yuee, ZHAO Jun, JIANG Bin. Stabilization of a Class of Switched Linear Neutral Systems under Asynchronous Switching[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(8):2114-2119.
- [26] LIBERZON D, MORSE A S. Basic Problems in Stability and Design of Switched Systems [J]. IEEE Control Systems Magazine, 1999, 19(5):59-70.
- [27] NIU Ben, KARIMI H R, WANG Huanqing, et al. Adaptive Output-feedback Controller Design for Switched Nonlinear Stochastic Systems with a Modified Average Dwell-time Method [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(7):1371-1382.
- [28] DING Zuohua, ZHOU Yuan, JIANG Mingyue, et al. A New Class of Petri Nets for Modeling and Property Verification of Switched Stochastic Systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2015, 45(7):1087-1100.
- [29] RICHARD J P. Time-delay Systems: an Overview of some Recent Advances and Open Problems [J]. Automatica, 2003, 39(10):1667-1694.
- [30] GOEBEL R, SANFELICE R G, TEEL A R. Hybrid Dynamical Systems [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2009, 29(2):28-93.
- [31] LI Xueling, LIN Xiangze, LI Shihua, et al. Globally Smooth Output Feedback Stabilization of a Class of Planar Switched Systems with Average Dwell Time [J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2017, 24:159-170.
- [32] HOU Yingxue, TONG Shaocheng. Adaptive Fuzzy Output-feedback Control for a Class of Nonlinear Switched Systems with Unmodeled Dynamics [J]. Neurocomputing, 2015, 168:200-209.
- [33] LONG Lijun, ZHAO Jun. Adaptive Output-feedback Neural Control of Switched Uncertain Nonlinear Systems with Average Dwell Time [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(7):1350-1362.
- [34] XIANG Weiming, XIAO Jian. Stabilization of Switched Continuous-time Systems with all Modes Unstable via Dwell Time Switching [J]. Automatica, 2014, 50(3):940-945.
- [35] WANG Qian, YU Haoyong, WU Zhengguang et al. Stability Analysis for Input Saturated Discrete-time Switched Systems with Average Dwell Time [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 51(1):412-419.
- [36] YUAN Chengzhi, WU Fen. Hybrid Control for Switched Linear Systems with Average Dwell Time [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(1):240-245.
- [37] ZHAO Xudong, ZHANG Lixian, SHI Peng, et al. Stability and Stabilization of Switched Linear Systems with Mode-dependent Average Dwell Time [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(7):1809-1815.
- [38] ZHANG Lixian, GAO Huijun. Asynchronously Switched Control of Switched Linear Systems with Average Dwell Time [J]. Automatica, 2010, 46(5):953-958.
- [39] 刘国聘. 基于约束切换信号设计的切换系统稳定性分析与控制 [D]. 秦皇岛:燕山大学, 2019.
- LIU Guopin. Stability Analysis and Control of Switched Systems Based on Constrained Switching Signal Design [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.

(编辑 王旻玥)

作者简介: 陈俊翔, 男, 1996年生, 博士研究生。研究方向为液压元件优化设计。发表论文 8 篇。E-mail: 462106469@qq.com。
艾 超* (通信作者), 男, 1982年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为液压元件优化设计、流体传动与控制。出版专著 3 部, 发表论文 70 余篇。E-mail: aichao@ysu.edu.cn。

本文引用格式:

陈俊翔, 姜宏达, 孔祥东, 等. 考虑时滞因素的负载口独立系统模式切换平稳性研究 [J]. 中国机械工程, 2025, 36(3): 414-425.

CHEN Junxiang, JIANG Hongda, KONG Xiangdong, et al. Research on Smoothness of Mode Switch of Independent Metering Systems Considering Time-delay Factors [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3): 414-425.