doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.05.059

交变配流泵控液压激振系统偏移调控方法研究

葛　正[1]　任　宇[1]　李　翔[1]　王鲜艳[2]

(1.浙江理工大学信息科学与工程学院(网络空间安全学院),杭州 310018;
2.瑞立集团瑞安汽车零部件有限公司,温州 325200)

摘要:交变配流泵可通过内置旋转配流盘连续转动直接输出交变液流,驱动液压缸形成激振运动。由于交变配流泵及泵控液压缸内部泄漏、摩擦等非线性因素会导致泵输出的双向液流不完全对称,泵控液压缸位移中心值会随振动过程发生偏移,影响实用性。为了消除非对称液流导致的激振偏移,本文在交变配流泵与液压缸之间串联伺服阀,形成泵-阀-缸串级偏移调控系统,以及基于配流盘相位的半周期分段纠偏控制策略。基于泵、阀动力特性建立 AMESim-Simulink 联合仿真模型,辨识系统参数,分析控制性能。搭建试验平台,验证泵-阀联合偏移控制方法的有效性。结果表明,该方法可控制交变配流泵控激振液压缸位移中心值,且伺服阀芯基本处于较大开口位置,节流损失小,在保证泵控激振系统高效性的同时,提高了系统实用性。

关键词:交变配流泵;伺服阀;偏移调控;泄漏;模糊 PID

中图分类号:TH137　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)05-0608-09　　**OSID**:

Deviate Regulation Method of Hydraulic Excitation System Controlled by Alternating Flow Distribution Pump

GE Zheng[1]　REN Yu[1]　LI Xiang[1]　WANG Xianyan[2]

(1. *School of Information Science and Engineering* (*School of Cyber Science and Technolgy*), *Zhejiang Sci-Tech University*, *Hangzhou* 310018, *China*
2. *Ruili Group Ruian Auto Parts Co.*, *Ltd.*, *Wenzhou* 325200, *China*)

Abstract: The alternating flow distribution pump can directly output alternating fluid flow through the continuous rotation of its built-in rotating valve plate, driving the hydraulic cylinder to generate excitation motion. Due to nonlinear factors such as internal leakage and friction within the alternating flow distribution pump and pump-controlled hydraulic cylinder, the bidirectional fluid flow generated by the pump may not be entirely symmetrical. As a result, the displacement center of the pump-controlled hydraulic cylinder may shift during the excitation process, thereby affecting its practicality. To address above problem caused by asymmetric fluid flow, a pump-valve-cylinder cascaded deviate regulation system was designed by placing a servo valve in series between the alternating flow distribution pump and the hydraulic cylinder. Additionally, a half-cycle piecewise deviate regulation control strategy based on the phase of the rotating valve plate was proposed. Based on the dynamic characteristics of the pump and valve, an AMESim-Simulink co-simulation model was established. System parameters were identified by experiment. The control performance was analyzed through simulation. A test platform was constructed to verify the effectiveness of the deviate regulation method. The research result showed that this method can effectively control the displacement center of excitation hydraulic cylinder controlled by the alternating flow distribution pump. Moreover, the servo valve remained mostly at a large opening, minimizing throttling losses. This approach ensured the high efficiency of the pump-controlled excitation system while improving its practicality.

Key words: alternating flow distribution pump; servo valve; deviate regulation; leakage; fuzzy PID

收稿日期:2024-12-24　修回日期:2025-01-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51905488)、浙江省自然科学基金项目(LTGS23E050002)和浙江省“尖兵”研发攻关计划项目(2024C01015)

作者简介:葛正(1986—),男,讲师,博士,主要从事电液振动控制技术研究,E-mail:gezheng01@126.com

0　引言

电液激振系统因其功率密度高能实现大输出力高频激振，成为了最常见的激振方式之一[1-4]。当前，电液激振系统依据原理主要分为阀控激振和无阀激振[5-7]。阀控激振系统即采用滑阀或转阀实现液流方向切换[8-9]。滑阀主要用于低频场景，通过控制滑阀阀芯往复输出交变液流实现电液激振[10]。转阀则通过阀芯旋转实现交变液流，适用于高频振动领域，是当前高频激振研究的热点之一[11]。滑阀和转阀相结合的 2D 阀，则能够使得振动幅度和频率独立可控[12]。阀控系统因结构简单、控制精度高，广泛应用于工程振动领域，但节流和溢流损耗增加了系统能耗[13-14]。无阀液压激振系统在节能性上具有优势，但通过液压泵旋转方向反复切换实现的无阀激振系统较难实现高频激振[15-16]。

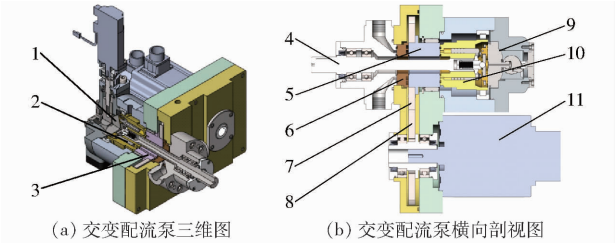
交变配流泵内置连续旋转配流盘，能够直接输出交变液流驱动激振系统，从而实现新式无阀泵控激振[17-19]。但试验结果表明，交变配流泵控激振系统振动中心会随着时间逐渐偏移，影响其使用效果。同样的问题也出现在转阀控制激振系统中，学者们从流体特性、加工精度、温度变化等方面展开研究，提出了一系列改善偏移现象的方法[20-25]。

针对泵控激振系统中心偏移问题，本文提出一种将交变配流泵、伺服阀与液压缸串级布置的泵控激振纠偏系统方案，设计基于配流盘相位的半周期间歇控制策略和模糊 PID 控制器，搭建仿真模型和试验平台，通过仿真和试验验证方法有效性，以期为具有更高效率的泵控激振系统的可靠应用提供新方法。

1　交变配流泵控激振系统原理和偏移现象

1.1　交变配流泵结构原理

交变配流泵结构如图 1 所示[17]，主轴在主电机带动下驱动柱塞缸体模块旋转，使紧贴斜盘的缸体内柱塞沿着轴线作往复运动，吸入或排出油液，形成相位固定的高压油液和低压油液。交变配流模块包括旋转配流盘和固定配流盘。其中旋转配流盘结构如图 2 所示，一侧与缸体相接触，另一侧与固定配流盘相接触。旋转配流盘在配流电机和主动、从动齿轮带动下转动，在一个周期内 A 槽和 B 槽交替地同柱塞缸体高压油液和低压油液接触。固定配流盘结构如图 3 所示，由于其Ⅰ槽和Ⅱ槽分别与旋转配流盘 A 和 B 两槽相连通，会在液压缸进油口上产生方向交替变化的液流，使液压缸连续循环往复形成激振运动。交变配流泵实物如图 4 所示。

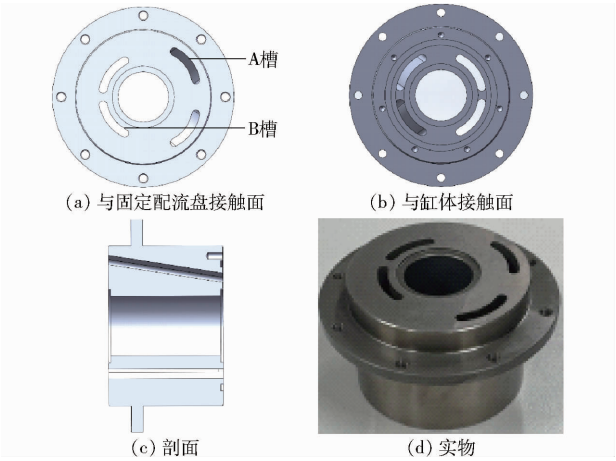


(a) 交变配流泵三维图　(b) 交变配流泵横向剖视图

图 1　交变配流泵结构

Fig. 1　Structure diagrams of alternating flow distribution pump

1、9. 斜盘　2. 柱塞缸体模块　3. 交变配流模块　4. 主轴　5. 旋转配流盘　6. 固定配流盘　7. 从动齿轮　8. 主动齿轮　10. 缸体　11. 配流电机

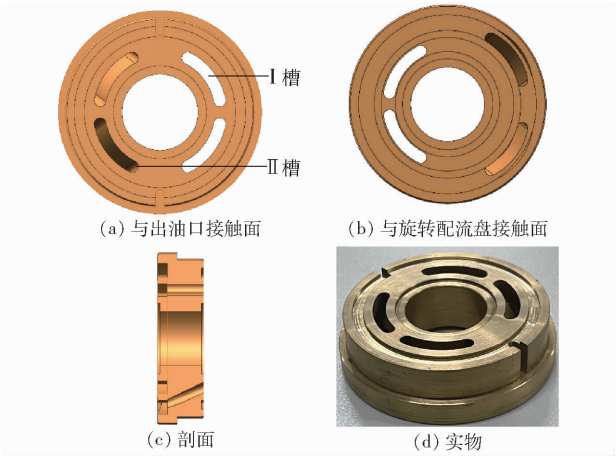


(a) 与固定配流盘接触面　(b) 与缸体接触面

(c) 剖面　(d) 实物

图 2　旋转配流盘结构

Fig. 2　Structure diagrams of rotating valve plate



(a) 与出油口接触面　(b) 与旋转配流盘接触面

(c) 剖面　(d) 实物

图 3　固定配流盘结构

Fig. 3　Structure diagrams of fixed valve plate



图 4　交变配流泵工程样机

Fig. 4　Prototype of alternating flow distribution pump

1. 配流电机　2. 斜盘电机　3. 交变配流泵　4. 主电机

前期研究表明，当旋转配流盘转速与缸体转速

相同时,奇数柱塞交变配流泵理想流量 q 为[17]

$$q = Ar\omega\tan\beta\frac{\sin(\Omega t)}{2\sin\frac{\pi}{2z}} \tag{1}$$

式中 A——柱塞横截面积

r——柱塞分布半径

ω——缸体角速度

β——斜盘角

Ω——旋转配流盘速度

z——柱塞数量

由式(1)可得,在理想状态下,交变配流泵输出流量是规律的准正弦曲线形态。其中输出的交变液流频率与旋转配流盘转速成正比,输出的交变液流幅值与缸体转速以及斜盘角正切成正比。交变配流泵输出的准正弦交变液流直接接入液压缸两腔,则可驱动液压缸完成激振加载。

1.2 交变配流泵控缸系统偏移现象

在实际工程应用中,交变配流泵和液压缸内部泄漏、摩擦等非线性因素会破坏双向液流的对称性。这种不对称性导致泵控液压缸在双向运动时速度不完全匹配,进而引起液压缸位移中心值在激振过程中出现偏移。图 5 为实际交变配流泵控缸位移曲线,随着时间推移,液压缸振动中心逐渐偏移。

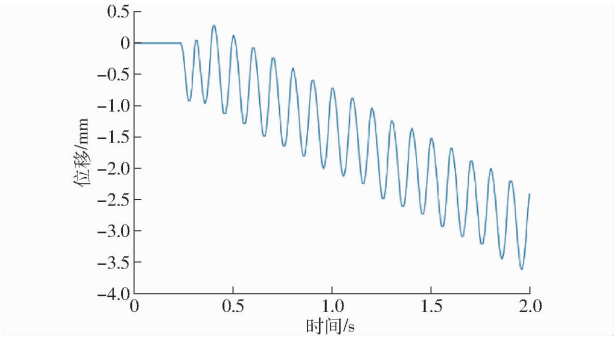


图 5 液压缸位移偏移现象

Fig. 5 Hydraulic cylinder displacement with deviate phenomenon

2 泵-阀-缸串级偏移调节系统设计

交变配流泵控激振系统通过调节配流盘转速、缸体转速和斜盘角来控制激振波形频率和幅值。由于交变配流泵控激振系统特性,不能以传统的电液激振器通过叠加直流分量方式来实现振动输出偏移。为调节非对称液流导致的液压缸偏移,提出了在交变配流泵控激振系统中串联一个伺服阀的泵-阀-缸串级偏移调节系统,其原理如图 6 所示。

由图 6 可知,在液压缸与交变配流泵之间串联伺服阀,伺服阀 P、T 口连接交变配流泵两个出油口,而 A、B 口连接液压缸两端。通过调节伺服阀控制电流,可改变流向双作用液压缸双向液流,即控制 A、B 口流量。伺服阀具有动态响应快、控制精度高等特点,通过控制器将实际位移信号与目标位移信号进行比对,得到两者之间偏差并生成相应的控制信号。依据该控制信号调节伺服阀电流,从而调整阀口开度,同步调节交变配流泵通过伺服阀输入液压缸的双向流,达到对液压缸位移偏移补偿。

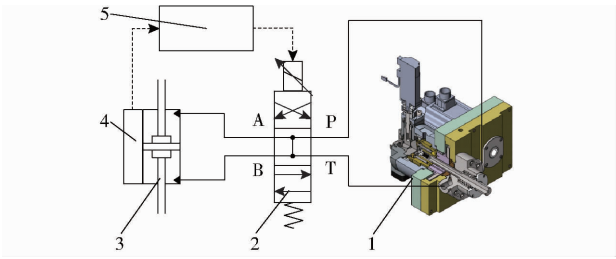


图 6 泵-阀-缸串级偏移调节系统

Fig. 6 Pump - valve - cylinder cascade deviate regulation system

1. 交变配流泵 2. 伺服阀 3. 双作用液压缸 4. 位移传感器 5. 控制器

3 液压激振偏移调节控制系统控制策略

3.1 面向激振中心调节的分段控制策略

交变配流泵能够产生准正弦交变液流,激振幅值和频率分别由缸体转速、斜盘角和配流盘转速决定。对偏移调节,即等效于对激振中心位置进行调节。流入液压缸流量计算式为

$$q_v = C_d A_1 x_v\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \tag{2}$$

式中 q_v——流入液压缸流量

C_d——流量系数

A_1——伺服阀口横截面积

x_v——阀口开度

Δp——伺服阀出入口压差

ρ——油液密度

当与液压缸串联的伺服阀开度达到最大时,系统等效于无阀激振系统。当伺服阀开度减小时,系统节流效应增强,进出液压缸双向液流同时减小。因此,应当在液压缸朝向偏移方向运动的阶段,减小伺服阀开度以期减小偏移速度;而在液压缸背向偏移方向运动阶段,全开伺服阀避免节流损失。

如图 7 所示,将液压缸运动过程分为正向运动和负向运动的两个半周期,当液压缸振动中心值正向偏移时(图 7a),在正半周期中,伺服阀阀口开度应当减小,负半周期伺服阀阀口全开。同理当液压缸振动中心值负向偏移时(图 7b),在正半周期伺服阀阀口全开,负半周期中,伺服阀阀口开度应当减小。伺服阀阀口开度 x_v 分段控制策略为

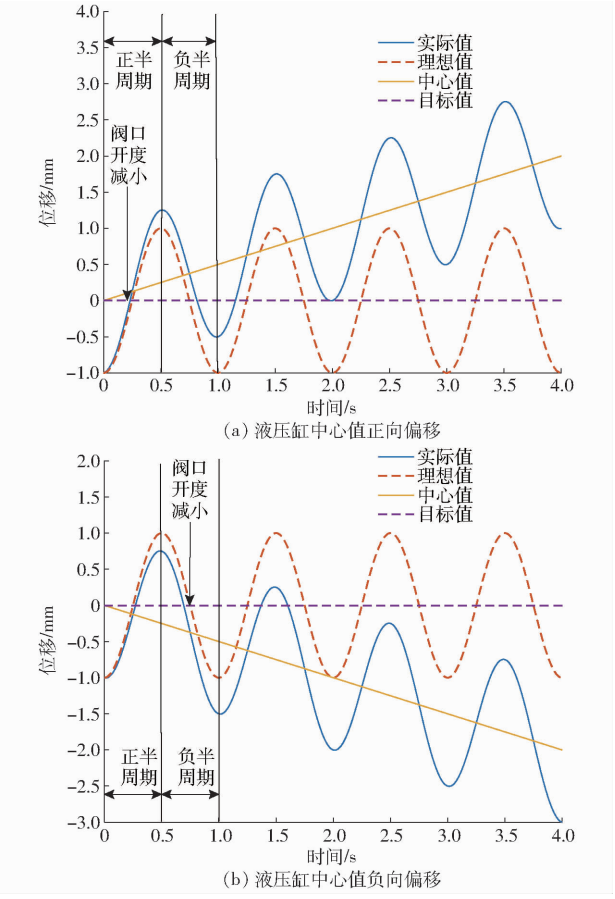


图 7　交变配流泵控液压缸运动特性

Fig. 7　Motion characteristics of alternating distribution pump-controlled hydraulic cylinder

$$x_v=\begin{cases}f(y_{\text{center}}-y_0) & (v(y_{\text{center}}-y_0)\geqslant 0)\\ 1 & (v(y_{\text{center}}-y_0)<0)\end{cases} \tag{3}$$

式中　y_{center}——液压缸激振位移中心值

y_0——液压缸激振位移目标中心值

v——液压缸速度

$f(y_{\text{center}}-y_0)$——伺服阀阀口开度控制函数

液压缸激振位移中心值 y_{center} 可以通过计算 1 个周期内液压缸位移 y 平均值得到，即

$$y_{\text{center}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}y_i \tag{4}$$

式中　N——1 个周期内数据点数量

y_i——1 个周期内第 i 个点的值

实际系统中，通过位移传感器采集的液压缸位移信号会被干扰，用此信号计算液压缸速度则会导致速度方向失真。考虑对交变配流泵来说，液压缸速度由液流流量决定。而根据式(1)液流流量同旋转配流盘相位关系符合

$$q=Ar\omega\tan\beta\frac{\sin(\Omega t)}{2\sin\dfrac{\pi}{2z}}\quad(0\leqslant\theta\leqslant 2\pi) \tag{5}$$

式中　θ——旋转配流盘相位

伺服阀阀口开度 x_v 分段控制策略可表达为

$$x_v=\begin{cases}f(y_{\text{center}}-y_0) & ((\theta-\pi)(y_0-y_{\text{center}})\geqslant 0)\\ 1 & ((\theta-\pi)(y_0-y_{\text{center}})<0)\end{cases} \tag{6}$$

最终形成泵-阀联合偏移调节控制策略如图 8 所示。交变配流泵输出交变液流量由旋转配流盘角速度、缸体角速度以及斜盘角共同控制。该交变液流作为伺服阀输入液流，经阀调节后输送至液压缸。

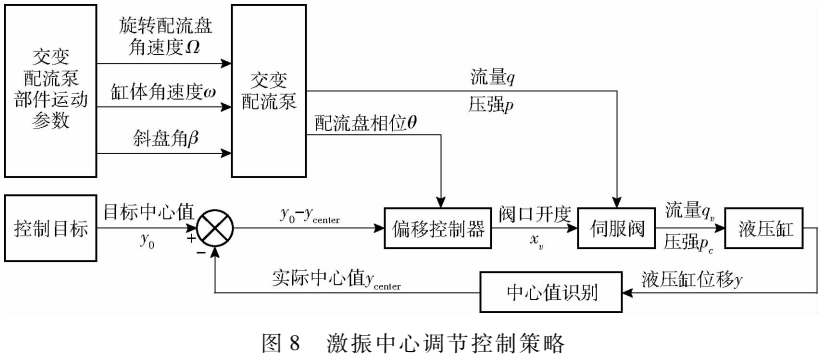


图 8　激振中心调节控制策略

Fig. 8　Excitation center adjustment control strategy

位移传感器实时监测液压缸实际位移，经计算得到中心值。中心值与目标值偏差作为控制信号输入到偏移控制器。控制器根据偏差信号和配流盘相位，动态调节伺服阀控制电流，实现对液压缸振动中心值精确控制。

3.2　分段模糊 PID 偏移控制器设计

考虑泵控缸系统存在非线性，针对伺服阀阀芯设计控制参数不同的模糊 PID 控制器，以实现位移偏差补偿，其结构如图 9 所示。模糊控制规则如表 1 所示。

4　系统建模与控制性能仿真

4.1　仿真模型建立及参数辨识

根据交变配流泵控激振系统的数学模型，建立基于 AMESim－Simulink 的联合仿真模型，如图 10 所示。AMESim 模型中间具有柱塞泵模型(略去式样相同的 5～7 号柱塞)，主要结构参数如表 2 所示。由缸体相位和旋转配流盘相位计算柱塞腔与配流腔

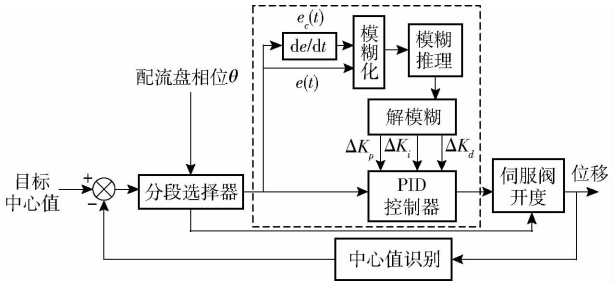


图 9 分段模糊 PID 控制器

Fig. 9 Piecewise fuzzy PID controller

导通面积,能够反映交变配流泵基本流量特性,左侧为伺服阀和液压缸,位移传感器信号接入 Simulink 模型供控制器使用。上述交变配流泵的基础模型输出为对称流量,为反映系统偏移特性,在交变配流泵仿真模型中增加滑靴与斜盘、缸体与旋转配流盘、柱塞与缸体之间等泄漏因素。基于试验数据辨识此类泄漏参数,参数如表 3 所示。

图 11 为斜盘角 10°、主电机转速 1 000 r/min、配流盘转速 600 r/min 时模型和试验装置中液压缸

表 1 模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy control rules

e_c	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/PS	PM/NB/ZO	PM/NM/ZO	PS/NM/ZO	PS/ZO/PB	ZO/ZO/PB
NM	PB/NB/NS	PB/NB/NS	PM/NM/NS	PM/NM/NS	PS/NS/ZO	ZO/ZO/PM	ZO/ZO/PM
NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NM	PS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	NS/PS/PM	NM/PS/PM
ZO	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/ZO	NM/PS/PM	NM/PM/PM
PS	PS/NS/NB	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO	NM/PM/PS	NM/PM/PS
PM	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/NS	NS/PM/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO	NM/PB/PS	NB/PB/PS
PB	ZO/ZO/PS	NS/PS/ZO	NS/PM/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO	NB/PB/ZO	NB/PB/PB

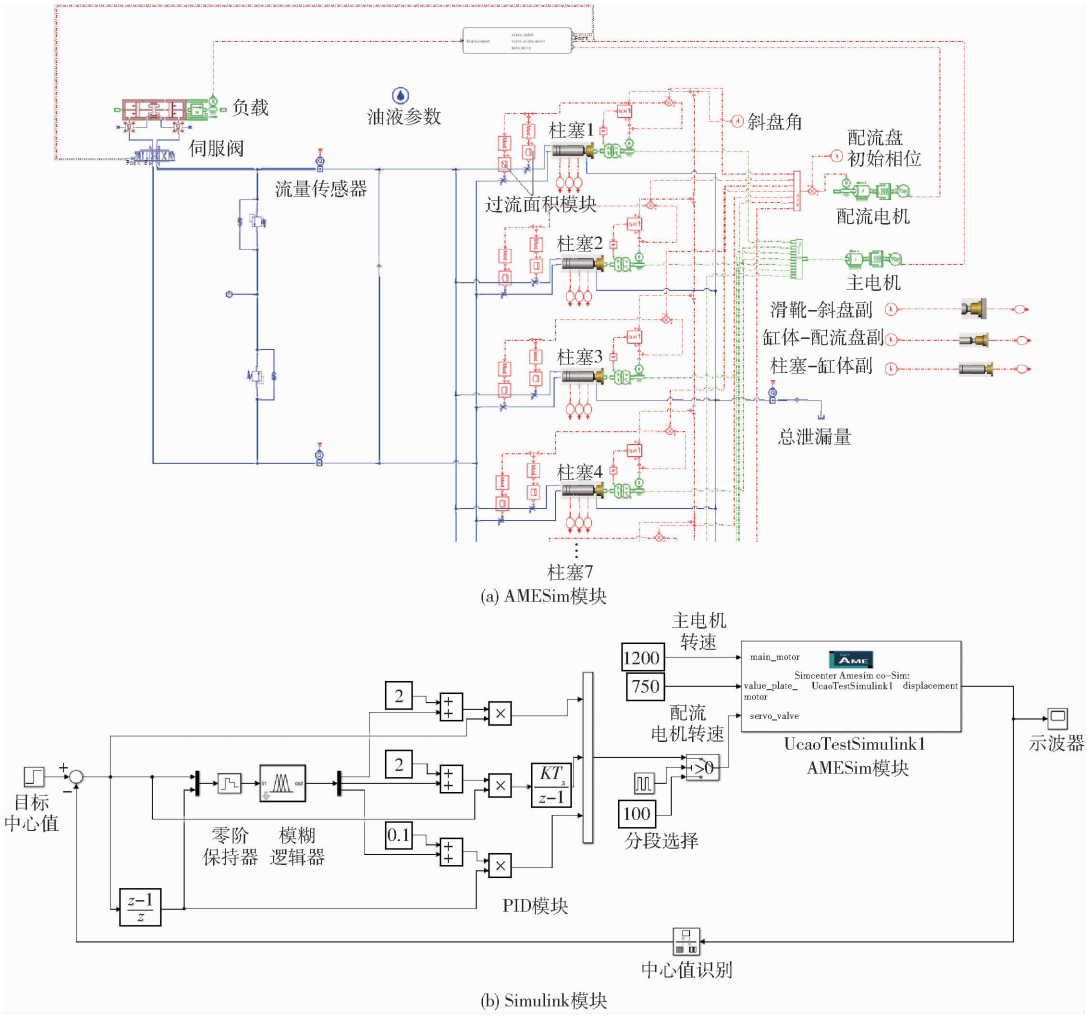


图 10 交变配流泵控液压激振系统联合仿真模型

Fig. 10 Co-simulation model of alternating flow distribution pump controlled hydraulic excitation system

表 2　交变配流泵主要结构参数

Tab. 2　Main structural parameters of alternating flow distribution pump

参数	数值
柱塞腔卵形槽分布半径/mm	22.75
柱塞直径/mm	12
柱塞数量	7
柱塞径向间隙/mm	0.04
柱塞分布圆半径/mm	21
柱塞腔长度/mm	30.94
配流盘腰型槽宽/mm	4

表 3　交变配流泵主要泄漏参数

Tab. 3　Main leakage parameters of alternating distribution pump　　mm

项目	等效最大泄漏开度间隙	等效长度	等效宽度
滑靴-斜盘副	0.01	1	0.5
柱塞-缸体副	0.02	1	0.5
缸体-配流盘副	0.05	1	0.6

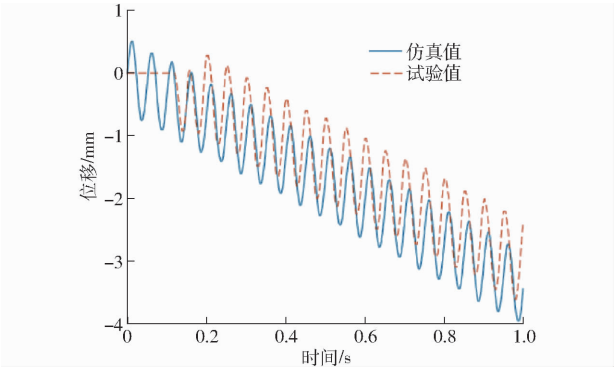


图 11　液压缸位移仿真与试验位移对比

Fig. 11　Simulation and experimental comparison of hydraulic cylinder displacement

位移。由图 11 可得，交变配流泵控激振系统在开环状态下的位移波形近似为正弦曲线，幅值、频率和偏移特性仿真结果与试验结果基本一致，表明仿真模型能够反映系统实际特性，满足验证泵-阀联合偏移调节装置控制性能需求。

4.2　液压缸位移中心值控制效果验证

Simulink 模型如图 10b 所示，包含液压缸位移反馈、中心值识别、分段状态判断、分段控制算法等模块。Simulink 模型提供控制器输出伺服阀开度、主电机转速、配流盘转速信号，形成面向激振幅度、频率和中心位置的完整闭环控制系统。

为了验证模糊 PID 控制算法对液压缸位移中心值控制性能，将其与传统 PID 控制进行对比试验，设定液压缸位移中心值为 0 mm，PID 参数为 $K_p=3$，$K_i=2$，$K_d=0.1$，同时将该参数设为模糊 PID 控制器初始参数，得到不同控制方式下液压缸位移如图 12 所示。

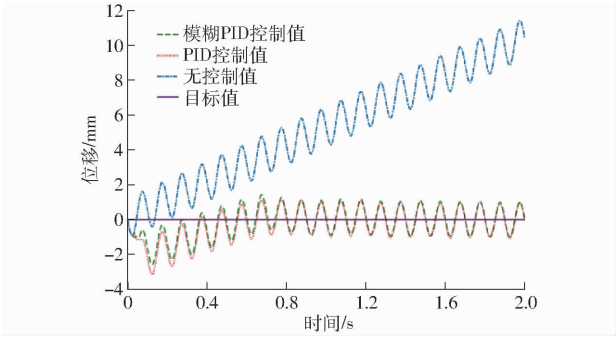


图 12　不同控制方法下的液压缸位移

Fig. 12　Hydraulic cylinder displacement under different control methods

由图 12 可得，PID 和模糊 PID 均可以较好地完成激振偏移调节，但模糊 PID 超调量和调整时间均小于 PID 控制。

如图 13 所示，随着系统运行，主电机扭矩同液压缸位移呈相同频率周期波动性。除泄漏影响外，当旋转配流盘两个油液通道处于高压区与低压区切换位置时会引起较大的流量脉动[17]，引起主电机驱动扭矩瞬时冲击，因此在实际装置中需要采取缓冲结构。

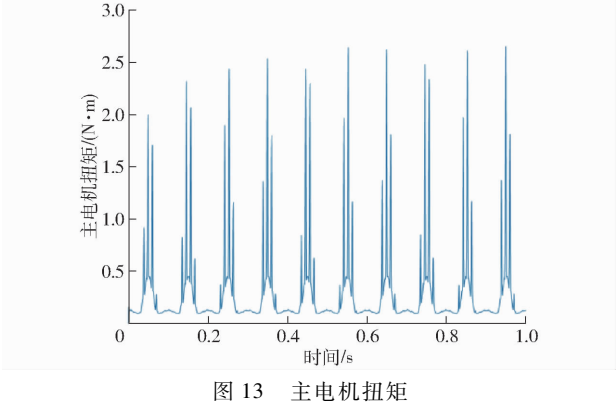


图 13　主电机扭矩

Fig. 13　Torque of main motor

5　试验

交变配流泵控激振系统试验平台由课题组自主设计完成，交变配流泵和泵控缸主要参数同仿真模型一致，伺服阀选用 ATOS 公司 DLHZO-TEB-SN-NP-040-L73 型比例伺服阀。使用 NI CompactRIO 控制器及其配套控制模块作为控制核心，结合 LabVIEW 软件进行数据采集与系统控制程序的开发，实现对系统流量、压力及液压缸位移等参数的监测并生成伺服阀控制信号，试验原理图如图 14 所示。试验台实物如图 15 所示。

设置斜盘角为 10°，缸体转速为 1 000 r/min，配流盘转速为 300、600 r/min，即激振频率为 5、10 Hz，在 2 种不同配流盘转速下记录纠偏控制前后液压缸

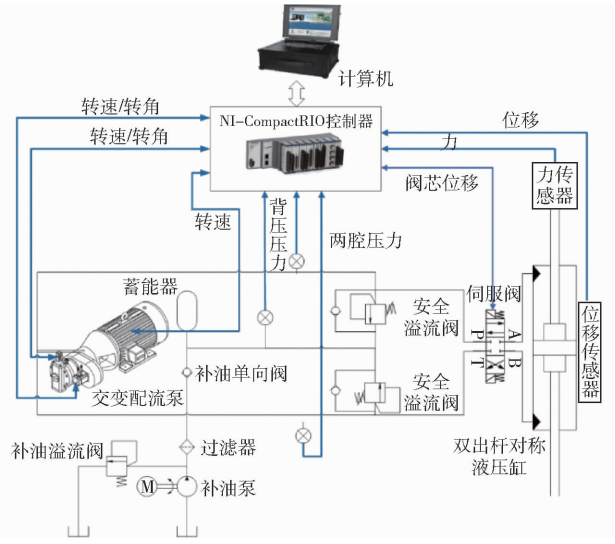


图 14 交变配流泵综合试验平台原理图

Fig. 14 Schematic of test platform for alternating flow distribution pump



图 15 交变配流泵综合测控试验平台

Fig. 15 Photograph of test platform for alternating flow distribution pump

位移,如图 16 所示。

与此同时,增加偏移调节控制后伺服阀阀芯位移占全行程百分比如图 17 所示。伺服阀阀芯基本处于 50% 以上的较大开度,阀口位置不经过零点换向,因此交变液流主要通过交变配流泵发生,系统总体节流损失比阀芯工作于零位附近纯阀控激振系统小。

分析试验数据能够发现,在所述分段控制方法作用下,液压缸位移经过一定时间调整后,偏移中心逐渐稳定,从而实现了偏移调节,证明了提出的控制方法可行。

6 结论

(1)设计了在交变配流泵与液压缸之间串联伺服阀的泵-阀-缸串级偏移调控系统,在激振中心发生偏移时,以间歇调整伺服阀阀口开度的方式,实现了对泵控激振系统激振中心的纠偏控制。

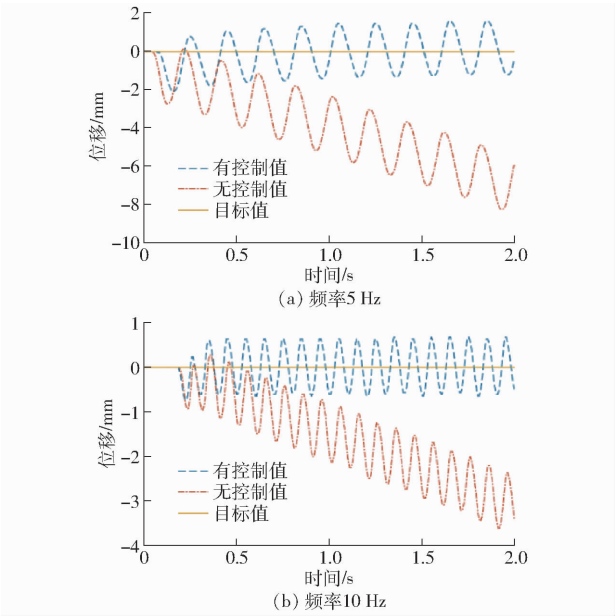


图 16 液压缸位移

Fig. 16 Hydraulic cylinder displacement obtained

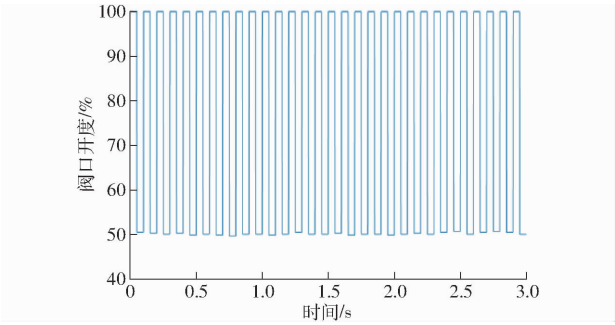


图 17 伺服阀开度

Fig. 17 Servo valve opening

(2)提出了基于配流盘相位的半周期分段纠偏控制策略,并设计了面向激振中心控制的分段模糊 PID 控制器,依据配流盘相位分段,根据目标和实际激振中心决定伺服阀阀口开度,纠正激振中心偏移。

(3)搭建了 AMESin - Simulink 联合仿真模型,在 AMESim 模型中设置了滑靴-斜盘副、柱塞-缸体副、缸体-配流盘副等泄漏模块,基于试验数据辨识了相关模型参数,令仿真模型有效反映实际泵控激振系统特性。在 Simulink 中搭建了控制系统,通过仿真对比验证了控制策略有效性。搭建了含纠偏系统的交变配流泵控缸综合测控试验平台,测试了不同频率下泵控激振系统输出特性和控制策略作用效果。

(4)提出的泵-阀-缸串级偏移调控系统配合基于配流盘相位的半周期分段纠偏控制策略能够有效调节泵控缸激振中心,且纠偏调节过程中阀芯基本处于较大开度位置,伺服阀节流损失较小,在保证泵控激振系统高效性的同时,克服了激振中心偏移问题,提高了系统实用性。

参 考 文 献

[1] ZHAO G, YIN S, ZHOU G, et al. Study on vibration characteristics of electro-hydraulic excitation system controlled by alternating flow distribution rotary valve[J]. IEEE Access, 2023, 11: 132380 – 132388.

[2] WEI Z H, CRISS J, WANG R, et al. A new generation low-frequency seismic vibrator[J]. Geophysics, 2022, 87(4): 29 – 38.

[3] WANG J K, LIU A W, LI X J, et al. Effect assessment for the interaction between shaking table and eccentric load[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 15349.

[4] 韩明兴, 徐琨, 廖宜涛, 等. 液电混动履带底盘电液系统联合仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 396 – 408, 418.
HAN Mingxing, XU Kun, LIAO Yitao, et al. Co-simulation and test of electro-hydraulic system of novel hybrid track[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 396 – 408, 418. (in Chinese)

[5] ZHANG J, PAN X, GUO J, et al. Analysis of the static and dynamic characteristics of the electro-hydraulic pressure servo valve of robot[J]. Scientific Reports, 2023,13(1):15553.

[6] LI W J, GONG G F, ZHANG Y K, et al. Development and parameters analysis of hydraulic controlled rotary valve excitation system[J]. Energies, 2020, 13(15): 3905.

[7] 汤庆, 吴俊, 蒋兰, 等. 油菜耕整移栽联合作业机液压仿形系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 95 – 102.
TANG Qing, WU Jun, JIANG Lan, et al. Design and test of hydraulic profiling system for rape seedling combined transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 95 – 102. (in Chinese)

[8] DUAN Z, SUN C, LI J, et al. Research on servo valve-controlled hydraulic motor system based on active disturbance rejection control[J]. Measurement and Control, 2024, 57(2): 113 – 123.

[9] MILECKI A, JAKUBOWSKI A, KUBACKI A. Design and control of a linear rotary electro-hydraulic servo drive unit[J]. Applied Sciences, 2023, 13(15): 8598.

[10] ZHANG Z, LIANG Y, ZHAO K, et al. Research on the vibration characteristic of a seawater hydraulic piston pump system and vibration reduction approach[J]. IEEE Access, 2021, 9: 90212 – 90230.

[11] DU Yuanying, CHEN Bojian, CAO Qinxin, et al. Lubrication and leakage characteristic research of aviation plunger pump considering plunger deflection[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2024, 238(5): 559 – 568.

[12] 周新建, 郭维年, 肖乾, 等. 液压激振伺服控制系统的模型辨识[J]. 机床与液压, 2021, 49(17): 85 – 88.
ZHOU Xinjian, GUO Weinian, XIAO Qian, et al. Model identification of hydraulic excitation servo control system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(17): 85 – 88. (in Chinese)

[13] 左希庆, 刘国文, 江海兵, 等. 2D 电液伺服流量阀特性研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 400 – 406, 399.
ZUO Xiqing, LIU Guowen, JIANG Haibing, et al. Characteristics of airborne 2D electro-hydraulic servo flow valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 400 – 406, 399. (in Chinese)

[14] 刘新强, 王聪, 冀宏, 等. 液压伺服滑阀工作边冲蚀行为及影响因素[J]. 液压与气动, 2024, 48(9): 47 – 53.
LIU Xinqiang, WANG Cong, JI Hong, et al. Erosion behavior and influence factors of hydraulic servo spool valve working edge[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2024, 48(9): 47 – 53. (in Chinese)

[15] 张祝新, 孙辉亮, 王立新, 等. 基于噪声抑制的电液位置伺服系统自抗扰控制方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 450 – 458.
ZHANG Zhuxin, SUN Huiliang, WANG Lixin, et al. Active disturbance rejection control of electro-hydraulic position servo system based on noise suppression[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 450 – 458. (in Chinese)

[16] 丁孺琦, 姜佑鹏, 李刚, 等. 分布式独立二次调压电液控制系统设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 481 – 490.
DING Ruqi, JIANG Youpeng, LI Gang, et al. Design and research of distributed independent secondary-pressure-regulating electro-hydraulic control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 481 – 490. (in Chinese)

[17] 葛正, 许全周. 交变配流泵的流量特性[J]. 液压与气动, 2023, 47(8): 76 – 83.
GE Zheng,XU Quanzhou. Flow characteristic of alternating flow distribution pump[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47(8): 76 – 83. (in Chinese)

[18] 钱爽, 张傲, 任宇, 等. 交变配流泵的旋转配流盘减振结构设计与参数影响研究[J]. 轻工机械, 2024, 42(3): 60 – 65.
QIAN Shuang, ZHANG Ao, REN Yu, et al. Structural design and parameter influence study on vibration damping of rotating distributor disk for alternating flow distribution pump[J]. Light Industry Machinery, 2024, 42(3): 60 – 65. (in Chinese)

[19] 张傲, 许全周, 钱爽, 等. 交变配流泵性能测试系统设计[J]. 轻工机械, 2023, 41(6): 66 – 70, 75.
ZHANG Ao, XU Quanzhou, QIAN Shuang, et al. Design of test system for alternating flow distribution pump[J]. Light

Industry Machinery, 2023, 41(6): 66 - 70, 75. (in Chinese)

[20] 郝云晓, 夏连鹏, 葛磊, 等. 液电混合直线驱动系统位置控制特性研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 379 - 385.
HAO Yunxiao, XIA Lianpeng, GE Lei, et al. Position control performance of hydraulic electric hybrid linear drive system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 379 - 385. (in Chinese)

[21] 郭媛, 熊戈, 曾良才, 等. 基于神经网络的液压缸微小内泄漏数据分析及预测的研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(20): 1 - 5.
GUO Yuan, XIONG Ge, ZENG Liangcai, et al. Research on data analysis and prediction of small leakage in hydraulic cylinder based on neural network[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(20): 1 - 5. (in Chinese)

[22] WANG H, QUAN L, HUANG J, et al. Reduction of steady flow torques in a single-stage rotary servo valve[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2019, 233(4): 718 - 727.

[23] JIA Wenhua, YIN Chenbo, LI Guo, et al. Study of flow pressure characteristics of improved rotary valve[J]. Mechanics, 2021, 27(6): 498 - 504.

[24] XU C, REN Y, TANG H, et al. Investigation on a novel high frequency two-dimensional (2D) rotary valve variable mechanism for fluid pulse-width-modulation application[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(2): 757 - 765.

[25] 张超, 汪世益, 王子威, 等. 温度对转阀内泄漏影响的研究[J]. 机械工程与自动化, 2022(3): 41 - 43.
ZHANG Chao, WANG Shiyi, WANG Ziwei, et al. Effect of temperature on leakage in rotary valve[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2022(3): 41 - 43. (in Chinese)