

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.03.005

非平稳工况下闭式泵控马达 液压系统的稳定性分析*

张 德, 谷立臣*, 耿宝龙, 程冬宏, 刘佳敏
(西安建筑科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:针对液压系统在极端工况下非线性特性明显,运行稳定性差的问题,采用了 AMESim 多学科仿真软件,对多能域耦合闭式液压系统进行了物理建模,通过对典型闭式泵控马达液压系统模型的仿真分析,研究了在不同油液含气量及温度工况下,油液粘度与有效体积弹性模量的变化对闭式泵控马达液压系统稳定性的影响规律;同时,进一步设计了机电液一体化实验平台,对不同含气量、温度工况下,负载阶跃上升与转速阶跃下降激励时的系统稳定特性进行了验证。研究表明:油液含气量和温度对闭式液压系统输出稳定性的影响较为明显,随着含气量增加,液压马达转速的超调量随着负载阶跃上升与电机转速阶跃下降,分别增加 0.12% 和 0.18%,系统稳定性减弱;随着温度升高,液压马达转速的超调量分别减小 0.09% 和 4.68%,稳定性增强。

关键词:闭式液压系统;AMESim;体积弹性模量;超调量;系统稳定性

中图分类号:TH137

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)03-0300-06

Stability analysis of closed loop pump control motor hydraulic system under non-stationary condition

ZHANG De, GU Li-chen, GENG Bao-long, CHENG Dong-hong, LIU Jia-min
(School of Mechatronic Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Aiming at the problem of the obvious nonlinear characteristic of hydraulic system and the poor operation stability under the extreme working condition, AMESim multi-disciplinary simulation software was used to model the multi-energy domain coupling closed loop hydraulic system, a typical closed pump control motor hydraulic system was simulated and analyzed. The influence of oil viscosity and effective bulk modulus on the stability of closed pump-controlled motor hydraulic system was studied under different oil gas content and temperature conditions. At the same time, the mechatronics test platform was further designed, the stability characteristics of the system were verified under different gas and temperature conditions when the load step up and the speed step down. The results indicate that the influence of oil gas content and oil temperature on the output stability of the closed pump control motor hydraulic system is quite obvious. With the increase of gas content, the overshoot of hydraulic motor speed increases by 0.12% and 0.18% with the increase of load step and the decrease of motor speed step respectively, and the system stability is weakened. With the increase of temperature, it decreases by 0.09% and 4.68% respectively, and the stability is enhanced.

Key words: closed loop hydraulic system; AMESim; bulk modulus; overshoot; system stability

收稿日期:2020-07-23

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51675399)

作者简介:张德(1992-),男,河南三门峡人,硕士研究生,主要从事机电液一体化、流体传动与控制方面的研究。E-mail:1341599417@qq.com

通信联系人:谷立臣,男,教授,博士生导师。E-mail:gulichen@126.com

0 引言

液压传动系统因具有输出功率大、结构紧凑的特点,在船舶、航空、车辆等大型机械设备中得到了广泛应用。但由于液压设备的工作环境恶劣,液压系统的稳定性容易受到环境的影响^[1-3]。因此,对液压系统在极端工况下的工作稳定性进行分析具有重要意义。

针对液压系统工作稳定性的问题很多学者进行了研究。刘志等^[4]通过在液压回路中添加节流阀、蓄能器等元件,并更换动力源为变频调速电机,有效地提高了液压系统的稳定性;任晓军等^[5]利用 AMESim 仿真软件对液压转向系统建模,研究了液压系统中主要液压元件的参数对系统动态特性的影响;吴振松等^[6]利用 MATLAB/Simulink 软件建模,通过不同负载元件进行了模拟加载,研究了系统压力的动态响应速度,结果表明,加载方式的不同,系统的压力动态响应速度也不同。目前,针对在极端工况下,油液含气量、温度变化对液压系统稳定性的影响的研究仍然存在不足。

考虑油液含气量、温度等环境因素与液压油粘度、有效体积弹性模量的关系,笔者进一步研究以上环境变量对液压系统动态性能的影响;通过 AMESim 对闭式泵控马达液压系统进行建模,分析不同含气量及不同温度时,液压系统在负载阶跃上升的极端工况下马达输出转速动态特性,通过实验对比,验证模型的正确性;并进一步对转速阶跃下降工况进行仿真,为液压系统在非平稳工况下的稳定性研究提供参考。

1 理论分析

1.1 影响液压油粘度的因素

1.1.1 含气量对液压油粘度的影响

油液粘度与含气量之间存在非线性的关系,在不考虑温度等环境因素对液压油粘度影响的情况下,油液的粘度随含气量的增加而增加。

油液粘度与含气量的对应关系为^[7]:

$$\mu_{\beta} = \mu_0(1 + 0.157\beta + 4.445\beta^2) \quad (1)$$

式中: μ_{β} —油液含气量为 β 的实际粘度,Pa·s; μ_0 —含气量为零时的油液粘度,Pa·s; β —油液含气量。

1.1.2 温度、压力对液压油粘度的影响

当液压油中的含气量一定时,油液粘度主要与油液温度、系统压力有较大关系。

根据 Roeland,46# 油液粘度与温度、压力的关系如下^[8-10]:

$$\mu(P, T) = 0.0457 \exp \left\{ 6.58 \times (1 + 5.1 \times 10^{-9} P)^{2.3 \times 10^{-8}} \times \left(\frac{T - 138}{303 - 138} \right)^{-1.16} - 1 \right\} \quad (2)$$

式中: $\mu(P, T)$ —实际油液的粘度,Pa·s; P —液压系统压力,MPa; T —液压油温度,℃。

油液粘度随温度、压力变化曲线如图 1 所示。

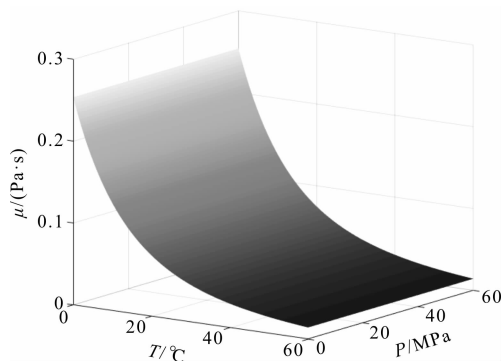


图 1 油液粘度随温度、压力变化曲线

由图 1 可知,油液粘度随着温度的升高而变化较快,压力对液压油粘度的影响较小。

1.2 液压油有效体积弹性模量

液压油有效体积弹性模量的变化对液压传动系统稳定性影响不容忽视。液压油有效体积弹性模量作为反映油液压缩性的主要指标,随外界环境及工况变化而变化。根据 IFAS 对液压油的研究结论,油液温度、含气量、系统压力三者共同决定液压油有效体积弹性模量大小。

液压油有效体积弹性模量 IFAS 模型如下^[11,12]:

$$K_{ef}(P, T, \beta) = \frac{(1 - \beta) \left(1 + \frac{a(P - P_0)^{\frac{1}{a}}}{K_0} \right) + \beta \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{k}}}{\frac{1}{K_0} (1 - \beta) \left(1 + \frac{a(P - P_0)^{\frac{1}{a}}}{K_0} \right)^{-\frac{a+1}{a}} + \frac{\beta}{k \cdot P_0} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k+1}{k}}} \quad (3)$$

式中: $K_{ef}(P, T, \beta)$ —液压油有效体积弹性模量,MPa; K_0 —液压油体积弹性模量,MPa; P_0 —大气压力,MPa; a —与系统压力有关的系数,取定值 11.4。

其中: $K_0 = 1550 + aP - 8T$,MPa。

油液有效体积弹性模量与温度、压力及含气量的关系如图 2 所示。

由图 2 可知:当液压油含气量为定值时,随系统压力增大,油液的有效体积弹性模量变化较大,温度升高,有效体积弹性模量变化不显著;当液压油温度为定值时,随油液含气量变大,油液弹性模量减小;随系统压力增大,有效体积弹性模量变化显著。

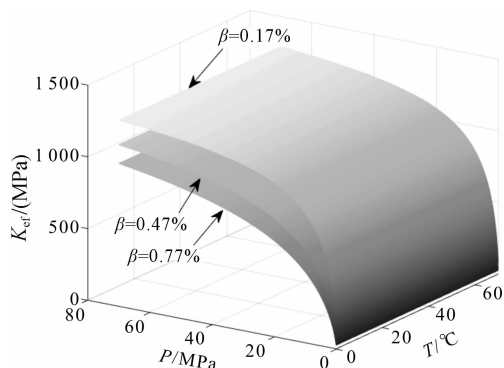


图2 油液体积弹性模量与含气量、温度、压力的关系

2 机电液一体化实验平台

机电液一体化实验平台如图3所示。



图3 机电液一体化实验平台

图3中,该机电液一体化系统由3部分组成,分别为:(1)变频器与三相异步电机组成动力源部分;(2)变量泵和变量马达组成的闭式回路为传动部分;(3)齿轮泵所在的负载部分。

在实验过程中,通过齿轮泵可以改变液压系统负载扭矩大小;通过旋转截止阀圈数 N 可以改变开口大小,以此来改变管路油液含气量的大小;通过 ACT-201 温度数字表测量温度高低。

3 闭式液压系统模型建立

根据该机电液一体化实验平台,笔者在 AMESim 液压仿真软件中,搭建闭式泵控马达系统模型。

在闭式泵控马达液压系统建模过程中,采用 HCD 库元件建模^[13-16],模拟在极端工况下,油液含气量和油液温度变化对液压系统动态特性的影响。

闭式泵控马达液压系统仿真模型如图4所示。

在 AMESim 参数设置模式下,笔者根据流体性质类型选择 advanced using table,将式(3)得到不同含气

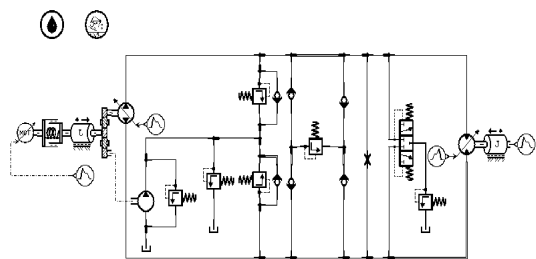


图4 闭式泵控马达液压系统仿真模型图

量、不同温度下的油液有效体积弹性模量值保存,并将其载入 advanced using table 控制模式;通过自动查表以及线性插值,在仿真过程中,AMESim 会自动根据含气量和温度参数,确定合理的有效体积弹性模量,然后进行仿真。

根据机电液一体化实验平台参数,笔者分别设置以下各个参数:

电机的额定转速为 1 480 r/min;

变排量柱塞泵最大排量为 55 ml/r;

变排量柱塞马达的最大排量为 105 ml/r,传动部分回路之间的比例溢流阀最大溢流压力为 35 MPa;

变量泵的最大溢流压力为 40 MPa;

节流阀的泄漏系数为 0.1。

在仿真过程中,通过信号库元件改变电机转速,并通过信号库原件设置变量泵和变量马达的排量分别为 55 ml/r。

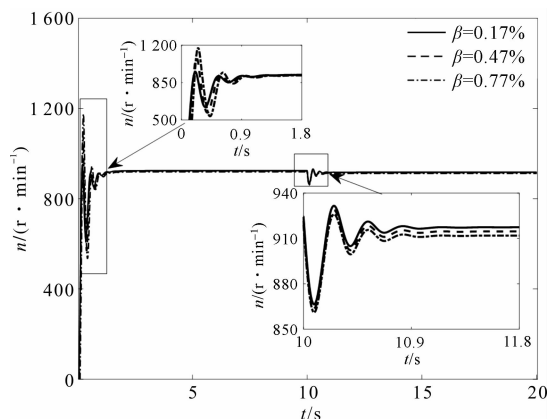
4 系统稳定性实验及结果分析

4.1 负载阶跃时系统稳定性仿真与实验

仿真过程各参数设定如下:

三相异步电机转速为 1 000 r/min,负载转矩 $70 \text{ N} \cdot \text{m} \sim 100 \text{ N} \cdot \text{m}$ 阶跃上升;仿真时间 t 为 20 s;液压系统油液温度为 $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$,含气量分别为 0.17%、0.47%、0.77%。

不同含气量马达转速 n 响应曲线如图5所示。



(a) 不同含气量马达转速响应仿真曲线

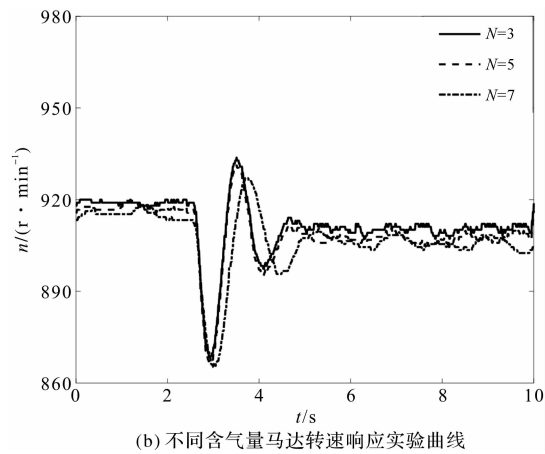


图5 不同含气量马达转速响应曲线

由图5可知:系统在不同含气量下运行,随着负载阶跃激励,马达转速出现了不同程度的振荡和跌落;并随着系统含气量的不同,表现出不同的响应特性。

负载阶跃时马达转速仿真结果如表1所示。

表1 负载阶跃时马达转速仿真结果

含气量	最低转速	稳态转速	超调量	调整时间
/%	$/(r \cdot \min^{-1})$	$/(r \cdot \min^{-1})$	/%	/s
0.17	876.539	913.794	4.07	1.28
0.47	875.484	912.861	4.1	1.31
0.77	873.721	911.934	4.19	1.36

由表1可知:随着系统含气量从0.17%增加到0.77%,马达输出转速稳态值下降了1.86 r/min,转速超调量增加了0.12%,调整时间增加了0.08 s;随着含气量增加,马达输出转速响应时间增加,马达转速调整的时间变长,稳态转速略有下降,马达转速超调量增加。

负载阶跃时马达转速实验结果如表2所示。

表2 负载阶跃时马达转速实验结果

节流口旋转	最低转速	稳态转速	超调量	调整时间
圈数/圈	$/(r \cdot \min^{-1})$	$/(r \cdot \min^{-1})$	/%	/s
3	869.007	910.153	4.52	2.0
5	866.160	907.441	4.55	2.7
7	864.313	906.396	4.64	3.1

由表2可知:随着含气量增加,马达转速稳态值下降了3.75 r/min,超调量增加了0.12%,调整时间增加了1.1 s,这些结果均与仿真结果变化规律一致。由此可见,随着含气量的增加,液压系统稳定性变弱。

实际上,油液中气体较多导致油液弹性模量降低,从而使系统刚度降低,在负载冲击下液压系统更容易振动,稳定性变差。同时,含气量增大导致油液粘度增加,会造成系统阻尼增加,容易造成油液温度上升,缩短液压系统的使用寿命。

因此,为了在负载阶跃冲击下保持系统稳定性,系统的含气量越小越有利。

不同温度马达转速响应曲线如图6所示。

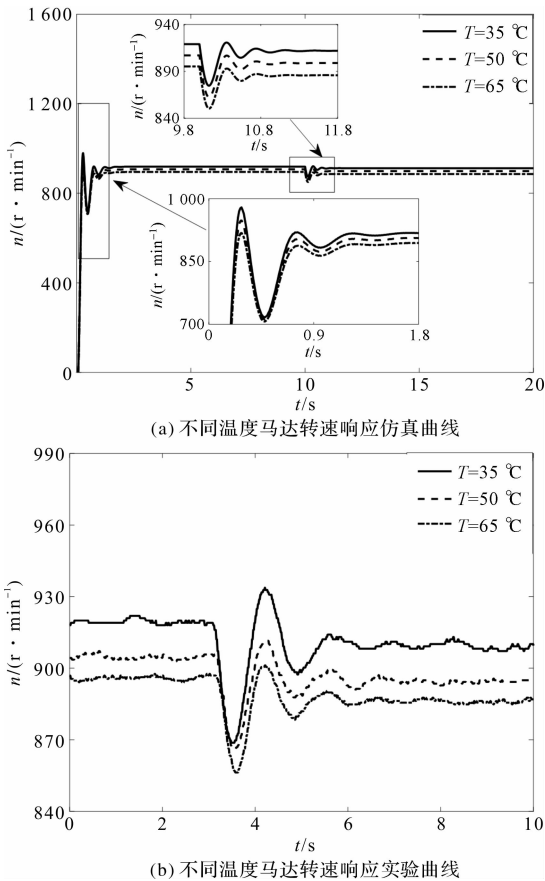


图6 不同温度马达转速响应曲线图

由图6可知:在不同运行温度下,液压系统随着负载阶跃上升,马达输出转速出现不同程度振荡和跌落,并随着系统温度的升高,转速响应特性不同。

负载阶跃时马达转速仿真结果如表3所示。

表3 负载阶跃时马达转速仿真结果

温度	最低转速	稳态转速	超调量	调整时间
/℃	$/(r \cdot \min^{-1})$	$/(r \cdot \min^{-1})$	/%	/s
35	874.709	911.952	4.09	1.12
50	862.531	898.891	4.04	1.09
65	850.417	885.884	4.0	1.08

由表3可知:在负载阶跃上升过程中,随着油液温度从35℃升高到65℃,变量马达转速稳态值下降了26.068 r/min,转速超调量减小0.09%,调整时间减小了0.04 s。

负载阶跃时马达转速实验结果如表4所示。

表4 负载阶跃时马达转速实验结果

温度	最低转速	稳态转速	超调量	调整时间
/℃	$/(r \cdot \min^{-1})$	$/(r \cdot \min^{-1})$	/%	/s
35	868.770	908.103	4.32	2.7
50	866.160	895.734	3.44	2.3
65	858.313	883.515	2.85	2.0

由表 4 可知:在负载阶跃上升过程中,随着油液温度从 35 ℃ 升高到 65 ℃,变量马达转速稳态值下降了 24.59 r/min,转速超调量减小了 1.47%,调整时间减小了 1.7 s,这些与仿真结果变化规律一致。

随着温度的增加,马达输出转速响应时间增加,但马达转速调整的时间变短,稳态转速下降明显,转速超调量减小。由于温度升高,油液粘度减小,油液分子之间的内摩擦减小,系统稳定性增强。但油液粘度减小,导致系统泄漏增加,马达及柱塞泵容积效率下降。

为了在负载冲击下保证液压系统的稳定性,在液压系统的正常工作范围内,可以合理地提升系统的温度。

4.2 转速阶跃时系统稳定性分析

设定三相异步电机转速从 1 000 r/min ~ 600 r/min 阶跃下降,负载转矩为 60 N · m,时间为 20 s。

不同含气量下马达转速动态响应曲线如图 7 所示。

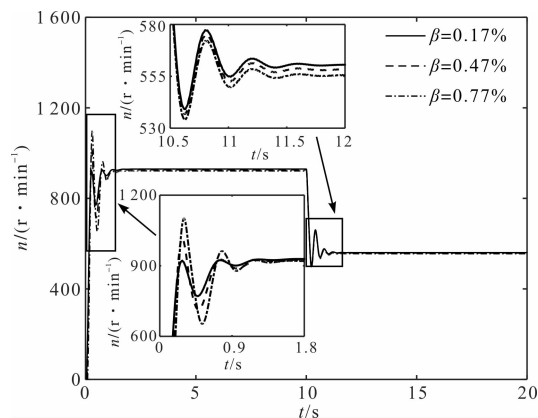


图 7 不同含气量马达转速动态特性曲线图

由图 7 可知:含气量不同时,随着转速阶跃,马达转速出现了不同程度振荡,并随着系统含气量的不同,马达转速的响应特性不同。

电机转速阶跃时马达转速分析结果如表 5 所示。

表 5 电机转速阶跃时马达转速分析结果

含气量 /%	最低转速 /(r · min ⁻¹)	稳态转速 /(r · min ⁻¹)	超调量 /%	调整时间 /s
0.17	498.063	560.459	11.13	1.37
0.47	495.596	558.227	11.20	1.44
0.77	492.651	555.451	11.31	1.49

由表 5 可知:在电机转速阶跃过程中,随着含气量从 0.17% 增加到 0.77%,变量马达转速稳态值下降了 5.008 r/min,转速超调量增加了 0.18%,调整时间增加了 0.12 s。随着含气量的增加,马达输出转速响应时间增加,转速调整时间变长,稳态转速略有下降,转速超调量增加。

由于含气量的增加,使油液弹性模量降低,从而导

致系统刚度降低,在转速冲击下,系统容易产生振动,使马达输出转速波动增加。与此同时,含气量的增大导致油液粘度增加,在转速突变时容易造成油液温度上升,大大缩短了液压系统的使用寿命,使系统稳定性进一步减弱。

因此,为了在转速阶跃冲击下保证液压系统的稳定性,油液中的含气量越小越有利。

不同温度马达转速动态响应曲线如图 8 所示。

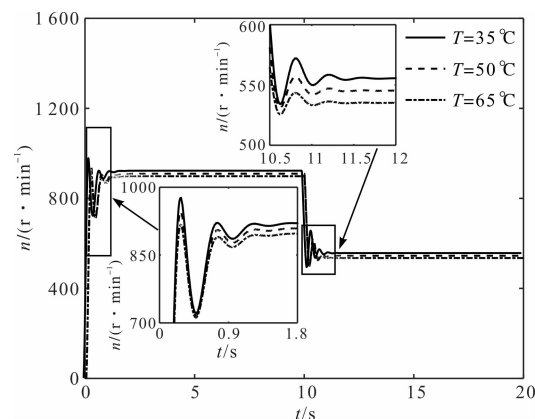


图 8 不同温度马达转速动态特性曲线图

由图 8 可知:随着温度的变化,在转速阶跃时,马达转速出现了不同程度的振荡,并随着系统温度的变化,马达转速响应特性发生改变。

电机转速阶跃时马达转速分析结果如表 6 所示。

表 6 电机转速阶跃马达转速分析结果

温度 /℃	最低转速 /(r · min ⁻¹)	稳态转速 /(r · min ⁻¹)	超调量 /%	调整时间 /s
35	493.291	555.461	11.19	1.16
50	499.118	545.327	8.47	1.14
65	500.520	535.183	6.51	1.12

由表 6 可知:在电机转速阶跃过程中,随着油液温度从 35 ℃ 增加到 65 ℃,变量马达转速稳态值下降了 20.278 r/min,转速超调量减小了 4.68%,调整时间减小了 0.04 s。随着温度的升高,马达转速响应时间增加,但调整时间缩短,达到稳态时转速下降明显,马达转速超调量减小。

由于温度的增加,油液粘度减小,泄漏增加,导致稳态转速下降。同时油液粘度减小使油液分子内摩擦减小,转速阶跃冲击时,振动随着温度的增加而减弱。

因此,为了在转速阶跃下降冲击时保证液压系统的稳定性,在液压系统正常工作的温度范围内,需要适当地提升液压系统的温度。

5 结束语

针对液压油液含气量、温度对封闭式泵控马达液压

系统稳定性影响机理问题,笔者建立了闭式液压泵控马达系统模型,研究了转速阶跃上升、负载阶跃下降等极端工况下液压系统的稳定性,并对负载阶跃上升工况进行实验验证,得出如下研究结论:

(1)随着含气量的增加,在负载和转速的极端工况下,马达转速响应时间变长,超调量增加,液压系统稳定性减弱;

(2)合理的温度范围内,在转速和负载的极端工况下,超调量增加,调整时间变短,液压系统稳定性增强;

(3)通过研究油液含气量、温度在转速冲击、负载冲击下液压系统动态性能的影响,为液压系统在非平稳工况下的稳定性研究提供参考。

参考文献(References):

- [1] 白国伟,丁维星,贾传震.掘进机摇臂升降液压系统性能分析及优化[J]. 液压与气动,2016(9):82-86.
- [2] 高峰,吴庆,詹保平,等.蠕动式石油井下爬行者液压系统的设计与研究[J]. 机电工程,2019,36(3):257-261.
- [3] 余洁平,吴汪洋.基于AMESim的船用液压系统管道压力波动研究[J]. 液压与气动,2019(11):119-124.
- [4] 刘志,纪爱敏,张磊,等.剪叉式高空作业平台上车液压系统的稳定性研究[J]. 机电工程,2020,37(6):600-606.
- [5] 任晓军,虞鸿基,尤旺,等.智轨电车液压转向系统动态响应特性研究[J]. 液压与气动,2020(2):58-63.
- [6] 吴振松,蔡向朝,谷立臣,等.基于不同加载元件下机电液系统压力响应研究[J]. 内燃机与配件,2019(14):135-137.
- [7] 刚立,许唯临,邓军,等.含气量对液体粘度的影响[J]. 科学技术与工程,2004(5):394-396.
- [8] 王双.负载口独立控制可编程阀及其在智能挖掘机控制中的应用[D]. 浙江:浙江大学机械工程学院,2017.
- [9] WEI X Y, WANG H Y. The influence of cross angle on the flow ripple of axial piston pumps by CFD simulation[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2012(220-223):1675-1678.
- [10] 吴振松,蔡向朝,谷立臣,等.三相永磁同步电机拖动的液压系统性能仿真研究[J]. 机床与液压,2019,47(11):142-146,79.
- [11] 李贾宝,谷立臣,孙昱.油液体积弹性模量对柱塞泵转速波动影响机理的仿真分析[J]. 机械设计与制造,2020(3):47-50.
- [12] KIM S, MURRENHOFF H. Measurement of effective bulk-modulus for hydraulic oil at low pressure[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2012,134(2):021201.
- [13] 梁全,谢基晨,聂利卫.液压系统AMESim计算机仿真进阶教程[M].2版.北京:机械工业出版社,2016.
- [14] 左美燕.轻量化臂架液压缸设计[J]. 液压气动与密封,2019(10):75-77,81.
- [15] 左美燕.轮式起重机控制驾驶室俯仰液压系统AMESim的仿真与优化[J]. 液压气动与密封,2019(5):85-87,91.
- [16] 付永领,齐海涛.LMSIMAGINE.LAB AMESIM系统建模和仿真[M].北京:北京航空航天大学出版社,2011.

[编辑:杨骏泽]

本文引用格式:

张 德,谷立臣,耿宝龙,等.非平稳工况下闭式泵控马达液压系统的稳定性分析[J]. 机电工程,2021,38(3):300-305.

ZHANG De, GU Li-chen, GENG Bao-long, et al. Stability analysis of closed loop pump control motor hydraulic system under non-stationary condition[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021,38(3):300-305.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>