

基于AMESim的工程机械臂架液压系统 稳定性分析

罗伟蓬, 袁晓静, 张 泽, 马驰骋, 刘浩宇
(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 为了克服工程机械工作过程中液压系统臂架抖动的问题, 利用形貌仪测量平衡阀的结构参数, 建立平衡阀的精确仿真模型, 并通过台架测试验证了该仿真模型的有效性。基于平衡阀精确仿真模型, 搭建臂架液压系统仿真模型, 重点分析泵排量、系统回油背压、平衡阀阀芯位移、阀芯锥角对臂架液压系统稳定性的影响。仿真结果显示: 适当增大泵排量和回油背压或减小阀芯位移和阀芯锥角都可以抑制臂架动作油缸的压力振荡; 当泵排量为35 L/min、回油背压为11.0 MPa、阀芯位移为1.5 mm、阀芯锥角为10°时, 臂架动作油缸的压力波动得到有效抑制。

关键词: 工程机械; 平衡阀; 臂架液压系统; AMESim仿真

中图分类号: TJ410

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)06-052-06

Stability Analysis of Hydraulic System of Construction Machinery Boom Based on AMESim

LUO Weipeng, YUAN Xiaojing, ZHANG Ze,
MA Chicheng, LIU Haoyu

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: To overcome the jitter of hydraulic driven boom during the operation of construction machinery, a precise simulation model of the balance valve was established based on structure parameters measured by the topography instrument. Additionally, the effectiveness of the simulation model was verified by the bench test. Furthermore, a simulation model of the boom hydraulic system was built based on the proposed precise simulation model of the balance valve. Thereby, the influence of pump displacement, oil return back pressure, balance valve spool displacement and cone angle of spool on the stability of the boom hydraulic system were analyzed. Simulation results showed that the pressure oscillation of the boom action cylinder can be simulated by appropriate increase of pump displacement and oil return back pressure, as well as reduction of spool displacement and spool cone angle. When the pump displacement is 35 L/min, the oil return back pressure is 11.0 MPa, the spool displacement is 1.5 mm, and the cone angle of the spool is 10°, the pressure fluctuation of the boom action cylinder was effectively simulated.

收稿日期: 2024-05-11

基金项目: 火箭军工程大学青年发展基金 (2021QNJJ020)

第一作者: 罗伟蓬 (1991—), 男, 讲师, 博士, 主要从事装备维修保障、增材制造研究。E-mail: luoweipengfkd@qq.com

引用格式: 罗伟蓬, 袁晓静, 张泽, 等. 基于AMESim的工程机械臂架液压系统稳定性分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (6): 52-57, 66.

KEYWORDS: construction machinery; balance valve; boom hydraulic system; AMESim simulation

工程机械是特殊车辆,通过液压系统驱动臂架回转、伸缩完成作业。但是在工作过程中,液压系统压力和负载的不断变化,会导致臂架出现抖动现象,严重影响臂架系统的稳定性,甚至带来施工事故^[1-2]。

AMESim 仿真平台已经成为液压系统优化设计的重要手段^[3-4]。牛轲磊等^[3]利用 AMESim 软件,采用线性频域分析为主、活性能量指数分析为辅的方法,建立了臂架变幅液压系统的仿真模型。李钱浩^[4]建立了卷扬系统的数字样机联合仿真模型,并通过改变液压阀控制口阻尼提升系统的稳定性。胡仕成等^[5]针对臂架振动、抖动问题,采用 PID 控制器对臂架液压控制系统进行优化,有效缩短液压缸活塞杆速度波动时间和降低速度波动幅度,提高了臂架的稳定性。董洪月^[6]通过改变平衡阀阻尼孔直径,克服了臂架双缸变幅系统回落抖动问题。王吉照^[7]建立电液比例位置控制系统传递函数模型,并采用 PID 和前馈控制复合校正的方式抑制抖动问题。张斌等^[8]采用电静液执行器代替臂架中的传统液压系统,并对比了 PID 控制、模糊 PID 控制与基于 S 曲线前馈补偿的模糊 PID 控制 3 种控制策略的有效性。江雷等^[9]采用拉格朗日方程构建伸缩臂的瞬态动力学方程,精准分析伸缩臂的瞬态应力。

虽然通过控制系统的设计可以有效提升液压系统的稳定性,但是工程机械运行过程中依然不可避免地产生抖动。而作为被控对象本身,液压系统的结构及参数优化设计是控制器设计的基础,对于提高工程机械的稳定性非常重要^[10-11]。肖培光等^[12]将深度学习技术应用于液压系统设计,系统的稳定性和响应速度均有显著提升。因此,研究工程机械液压系统的特性,提升工程机械自身的机械和液压稳定性至关重要。平衡阀作为工程机械液压系统的核心部件,直接影响臂架的稳定性和可靠性,其参数对于臂架液压系统的影响规律还有待进一步研究。

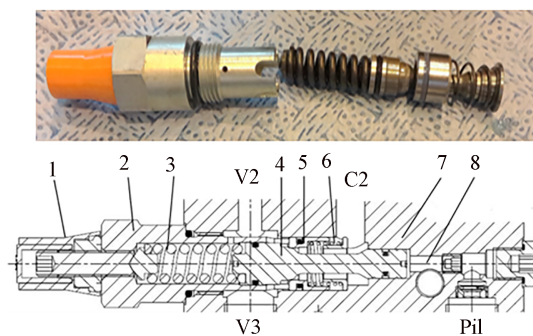
本文针对臂架液压系统的抖动问题,以某工程机械臂架液压系统为研究对象,重点分析平衡阀结构及其工作原理,搭建平衡阀的详细模型,构建臂架液压系统的仿真模型,研究液压系统关键参数对臂架液压系统动态特性的影响,为提升

臂架液压系统的稳定性提供技术支撑。

1 平衡阀结构

工程机械的执行机构一般由转台和臂架组成,平衡阀是臂架液压系统的核心控制元件。臂架展开时,油缸的负载方向与运动方向相反,即正负载,平衡阀作为顺序阀,使油液顺利进入油缸;臂架收回时,油缸的负载方向与运动方向相同,即负负载,平衡阀会在液压缸的回油路上形成背压,用于平衡负载,限制运动部件的速度以达到运动部件平稳动作的目的。平衡阀在控制压力与负载压力的作用下打开,其性能直接影响着工程机械工作性能和安全可靠性。但是在工程机械工作过程中臂架重心不断变化、工况复杂,导致负载压力、油缸腔内压力不断变化,平衡阀芯处于波动状态,臂架出现剧烈抖动。

如图 1 所示,平衡阀主要由调节螺杆、主阀阀套、主阀弹簧、主阀芯、单向阀、单向阀弹簧、阀体、控制腔组成。平衡阀上有连接油源的进油口 V2、V3,连接液压缸的负载口 C2,连接控制油路的控制油口 Pil。



1-调节螺杆, 2-主阀阀套, 3-主阀弹簧, 4-主阀芯, 5-单向阀, 6-单向阀弹簧, 7-阀体, 8-控制腔, V2、V3-进油口, C2-负载口, Pil-控制油口

图 1 平衡阀结构

Fig. 1 Structure of balance valve

平衡阀具有单向、液控节流功能,其工作原理如图 2 所示。单向功能是液压油从进油口 V2 流向主阀芯内腔,克服单向阀弹簧的预紧力,推动单向阀芯右移,开启主阀芯内腔至负载口 C2 的通道,进入液压缸。液控节流功能是液压油从负载

口 C2 流向主阀芯内腔, 单向阀关闭, 控制油口 Pil 的压力油经 D1、D2 后, 作用在主阀芯右端圆形面积, 当控制口压力与负载口压力之和达到一定值时, 主阀芯克服调压弹簧的预紧力向左运动, 液压油从进油口 V2 流出。

平衡阀控制油口设置有进油阻尼塞 D1, 控制活塞腔设置有排油阻尼塞 D2。当 D2 于零压下排油时, D1 和 D2 间控制腔中建立的稳定压力 p_r 取决于控制口 Pil 的压力和 D1 和 D2 的截面积。当 D1 的截面积与 D2 相等时, D1 和 D2 间先导腔中建立的稳态压力 p_r 是先导口 Pil 油压的 50%。

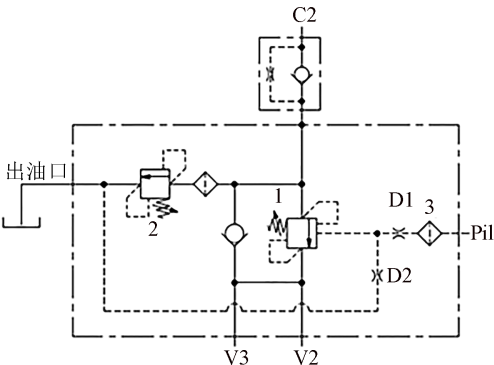


图 2 平衡阀工作原理
Fig. 2 Working principle of balance valve

2 平衡阀及臂架液压系统建模

2.1 平衡阀仿真模型

利用 AMESim 软件, 基于平衡阀元件的物理拓扑关系构建详细的元件级仿真模型。在给定不同外部边界(压力及流量)条件时, 能够分析平衡阀各阀口的受力情况、各端口的压力流量变化、阀芯位移等动态特性。

根据平衡阀工作原理及结构, 利用 AMESim 建立仿真模型, 如图 3 所示。主阀模型由质量块元件、阀门元件和带弹簧的阀门元件构成; 控制阀模型由质量块元件、阀门元件、带弹簧的阀门元件及锥形阀芯构成。平衡阀结构参数通过形貌仪测量。模型中各子模型参数依据实际测量的结构参数设定, 然后采用标准积分求解器进行动态仿真分析。

在液压试验台上进行平衡阀性能测试, 装置如图 4 所示。首先确定控制口压力分别为 15、18、20 MPa, 通过改变负载口 C2 的流量, 测量得到进油口 V2 和负载口 C2 的压力。仿真模型中, 设置

与试验相同的控制口压力、负载口 C2 的流量以及进油口 V2 的压力, 通过仿真得到负载口 C2 的压力。测试负载口 C2 压力与仿真负载口 C2 压力数据及两者相对误差如表 1 所示。

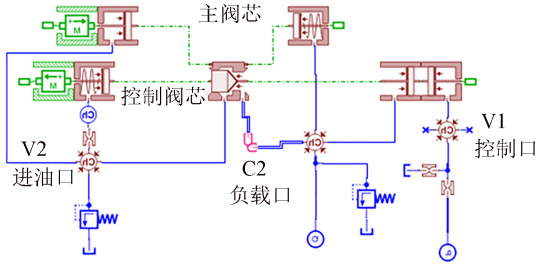


图 3 平衡阀模型
Fig. 3 Balance valve model

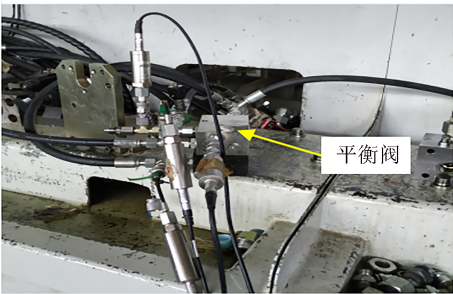


图 4 平衡阀测试装置
Fig. 4 Test device of balance valve

表 1 测试与仿真数据

Tab. 1 Test and simulation data					
Pil 控制口压力/MPa	C2 流量/(L·min ⁻¹)	V2 压力/MPa	C2 压力/MPa	仿真 C2 压力/MPa	误差/%
15	23.5	0.95	8.93	9.230 2	-3.36
	26.0	1.26	13.60	14.519 0	-6.75
	35.1	2.12	21.07	22.312 0	-5.90
	38.4	2.54	24.87	26.156 0	-5.17
18	18.0	0.65	3.15	3.140 3	0.31
	25.5	1.22	6.82	6.589 5	3.38
	32.4	2.00	12.87	12.988 0	-0.92
	41.5	2.90	21.05	21.271 0	-1.05
	46.5	3.72	26.68	27.944 0	-4.74
20	20.0	0.80	1.90	1.870 4	1.56
	29.5	1.62	6.72	6.370 1	5.21
	38.0	2.45	11.36	11.992 0	-5.56
	41.8	3.16	18.32	17.766 0	3.02
	47.8	3.96	23.67	23.007 0	2.80

可以看出, 由于在仿真模型中忽略了阀芯泄漏、摩擦等参数对阀芯运动的影响, 使得仿真与

测试结果存在误差，最大误差为-6.75%，验证了平衡阀模型的准确性较好。

2.2 臂架液压系统仿真模型

臂架系统由液压泵、多路阀、溢流阀、平衡阀、油缸、臂架组成，利用 AMESim 建立臂架液压系统的仿真模型，如图 5 所示。

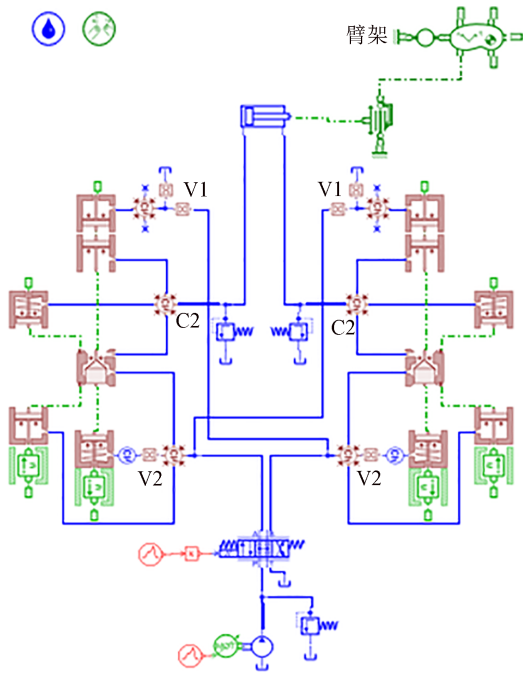


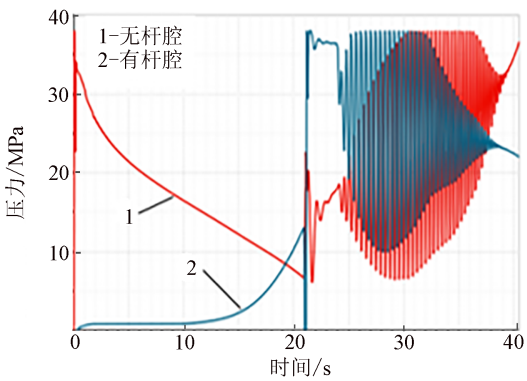
图 5 臂架系统仿真模型
Fig. 5 Simulation model of boom system

臂架运动过程中由于油路压力和负载的变化，臂架出现抖动现象。利用该仿真模型研究臂架在展开和收回时，泵排量、回油背压、平衡阀阀芯位移、平衡阀锥角对臂架系统稳定性的影响。

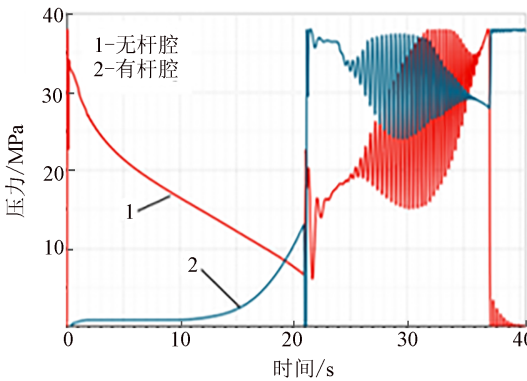
3 臂架系统仿真分析

3.1 泵排量对系统稳定性的影响

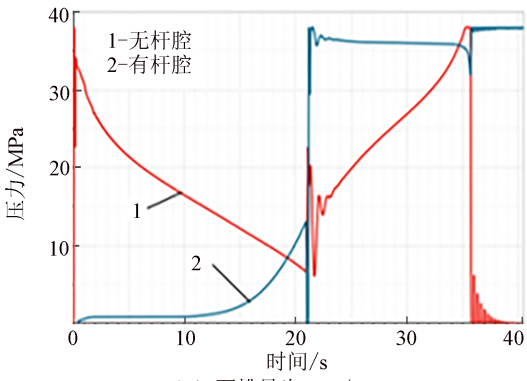
图 6 为不同泵排量时的臂架液压系统稳定性仿真结果。结果显示：臂架展开过程运行平稳，臂架收回过程油缸力剧烈波动，臂架抖动严重；当泵排量为 25 L/min 时，压力波动振幅达到数十 MPa，如图 6 (a) 所示；随着泵排量增大，压力波动幅值下降，振动减弱，如图 6 (b)、(c) 所示；当泵排量为 35 L/min 时，压力波动很快稳定，可以有效抑制液压缸伸缩和臂架抖动。这是因为泵排量增大，溢流阀可以有效稳定液压系统压力，减小平衡阀抖动。



(a) 泵排量为 25 L/min



(b) 泵排量为 30 L/min



(c) 泵排量为 35 L/min

图 6 泵排量对臂架液压系统稳定性的影响

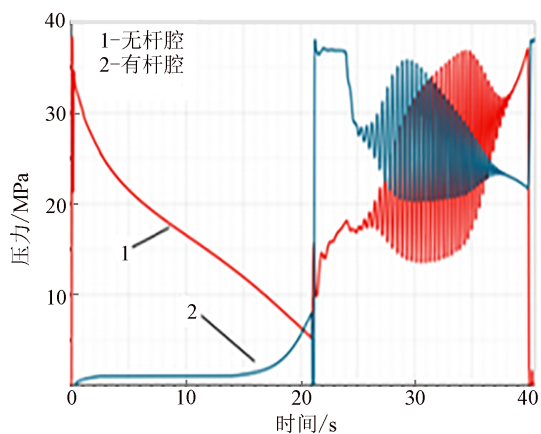
Fig. 6 Influence of pump displacement on the stability of boom hydraulic system

3.2 系统回油背压对系统稳定性的影响

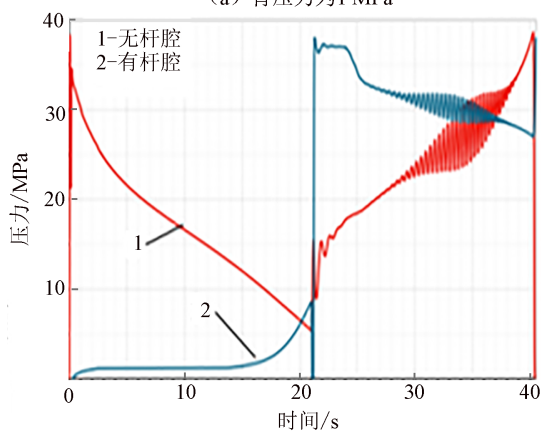
本文的臂架系统仿真模型没有考虑管路直径和摩擦情况，此时回油背压为零。在仿真过程中通过设置不同的回油压力，研究不同回油背压对液压系统稳定性的影响。

图 7 为不同回油背压时的臂架液压系统稳定性仿真结果。可知：臂架展开过程运行平稳，臂架收回过程油缸力剧烈波动，臂架抖动严重；当回油背压为 1 MPa 时，压力振荡振幅达到数十 MPa，如图 7 (a) 所示，将会导致臂架油缸的剧烈振荡；随着回油背压增大，压力波动幅值下降，振动减

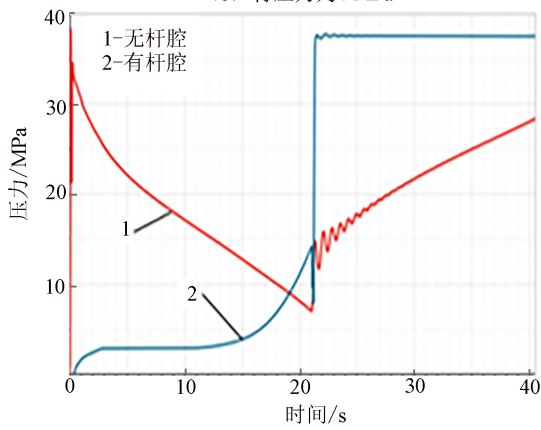
弱,如图 7 (b)、(c) 所示;当回油背压为 11 MPa 时,压力波动幅度很小,但此时回油背压较大,臂架收回过程有杆腔压力接近溢流压力,能耗高。这是因为回油背压增大,系统负载压力相应提高,平衡阀更容易打开,有效减小平衡阀抖动。



(a) 背压力为 1 MPa



(b) 背压力为 4 MPa



(c) 背压力为 11 MPa

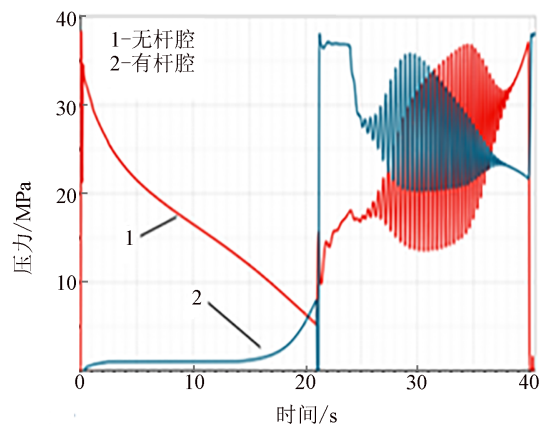
图 7 回油背压对臂架液压系统稳定性的影响

Fig. 7 Influence of oil return back pressure on the stability of boom hydraulic system

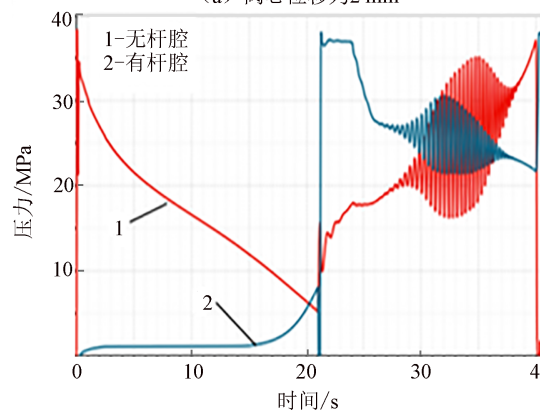
3.3 平衡阀阀芯位移对系统稳定性的影响

图 8 为不同平衡阀阀芯位移时的臂架液压系统稳定性仿真结果。结果显示:臂架展开过程运行

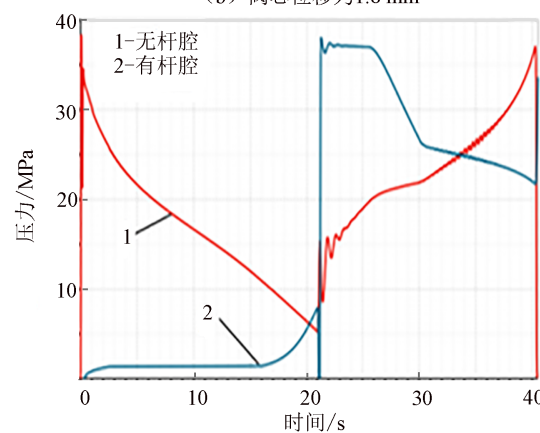
平稳,臂架收回过程油缸力剧烈波动,臂架抖动严重,如图 8 (a)、(b) 所示;随着阀芯位移降低,压力波动幅值下降,有效抑制压力波动,如图 8 (c) 所示。这是因为阀芯位移减小,过流面积减小,对平衡阀阀芯位移影响减弱,有利于臂架系统稳定。



(a) 阀芯位移为 2 mm



(b) 阀芯位移为 1.8 mm



(c) 阀芯位移为 1.5 mm

图 8 平衡阀阀芯位移对臂架液压系统稳定性的影响

Fig. 8 Influence of spool displacement on the stability of boom hydraulic system

3.4 平衡阀阀芯锥角对系统稳定性的影响

平衡阀阀芯锥角大小对阀芯的开闭有重要影

响。通过设置 14.6° 、 12° 、 10° 阀芯锥角, 研究其对液压系统稳定性的影响。

图 9 为不同平衡阀阀芯锥角的臂架系统仿真结果。结果显示: 臂架展开过程运行平稳, 臂架收回过程油缸压力剧烈波动, 臂架抖动严重, 如图 9 (a)、(b) 所示; 随着平衡阀锥角减小, 压力波动幅值迅速下降, 如图 9 (c) 所示。这是因为锥角变小, 过流面积减小, 对平衡阀阀芯位移影响减弱, 增大了液压缸活塞杆运动稳定性。

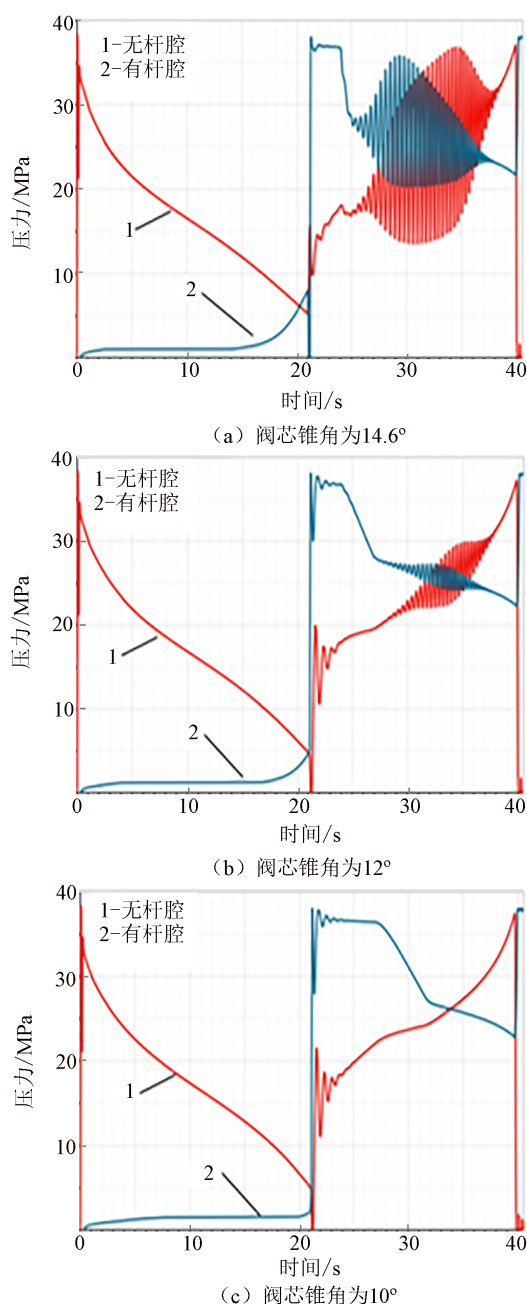


图 9 平衡阀阀芯锥角对臂架液压系统稳定性的影响

Fig. 9 Influence of the cone angle of spool on the stability of boom hydraulic system

4 结论

利用 AMESim 仿真软件, 建立了某工程机械液压系统关键元件平衡阀模型, 并通过台架试验验证了模型的有效性。分别研究了泵排量、系统回油背压、平衡阀阀芯位移及平衡阀锥角 4 个关键参数对臂架液压系统稳定性的影响。仿真结果显示: 适当提高泵排量, 增加回油背压, 减小阀芯位移和锥角可以减小液压系统的压力波动, 有利于避免臂架系统出现颤振现象。

参考文献:

- [1] 袁吉胜, 王娜娜, 段绪伟. 变工况下液压油缸抖动的原因分析及试验[J]. 机电设备, 2022, 39(3): 19-22.
YUAN J S, WANG N N, DUAN X W. Cause analysis and experimental on jitter of hydraulic cylinder under variable working conditions[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2022, 39(3): 19-22.
- [2] 朱春风, 白健信, 肖兴元. 平地机回转圈侧移液压缸爬行抖动现象的原因分析及其改进措施[J]. 工程机械与维修, 2022(3): 36-37.
- [3] 牛轲磊, 贺尚红, 杨庚, 等. 臂式高空作业平台变幅系统建模与模型降阶[J/OL]. 重庆大学学报: 1-10 [2024-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20230720.1612.002.html>.
NIU K L, HE S H, YANG G, et al. Modeling and model reduction of the luffing system for boom type aerial work platform[J/OL]. Journal of Chongqing University: 1-10 [2024-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20230720.1612.002.html>.
- [4] 李钱浩. 起重机卷扬系统数字样机建模及液压系统动态稳定性分析[D]. 长沙: 中南大学, 2023: 14-47.
LI Q H. Digital prototype modeling of crane winch system and dynamic stability analysis of hydraulic system[D]. Changsha: Central South University, 2023: 14-47.
- [5] 胡仕成, 陈志高, 黎新齐. 高空带电机器人臂架稳定性优化控制仿真研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(23): 7-12.
HU S C, CHEN Z G, LI X Q. Simulation research on optimal control of high-altitude charged robot boom stability[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(23): 7-12.
- [6] 董洪月. 基于 AMESim 的双缸变幅系统的分析[J].

- 机床与液压, 2019, 47(22): 185-187.
- DONG H Y. Analysis of double cylinder amplitude system based on AMESim[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(22): 185-187.
- [7] 王吉照. 伸缩臂高空作业车臂架变幅振动抑制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 3-5.
- WANG J Z. Research on vibration suppression for boom luffing of telescopic boom aerial work platform[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016: 3-5.
- [8] 张斌, 杨振环, 贺电, 等. 混凝土泵车臂架 EHA 系统控制策略研究[J]. 液压与气动, 2023, 47(11): 158-168.
- ZHANG B, YANG Z H, HE D, et al. Exploring control strategies for EHA system in Concrete pump truck boom[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47(11): 158-168.
- [9] 江雷, 辛鹏, 郭达明, 等. 液压旋转起重塔吊伸缩臂瞬态动力学研究[J]. 机械设计与制造工程, 2023, 52(10): 41-45.
- JIANG L, XIN P, GUO D M, et al. Transient dynamics study on the telescopic arm of hydraulic rotating crane tower crane[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2023, 52(10): 41-45.
- [10] 张亮. 一种高空作业平台控制系统设计[J]. 工程机械, 2023, 54(8): 1-8.
- ZHANG L. Design of a control system for aerial work platform[J]. Construction Machinery and Equipment, 2023, 54(8): 1-8.
- [11] 杨涛. 三臂凿岩台车臂架液压系统设计及试验[J]. 机电工程技术, 2022, 51(3): 267-270.
- YANG T. Design and test of boom hydraulic system of three arm rock drilling jumbo[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(3): 267-270.
- [12] 肖培光, 高彬. 基于深度学习的叉车臂架液压系统设计[J]. 中国机械, 2024(5): 34-37.