

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.036

基于 AMESim 的阀控液压蓄能系统优化设计与仿真

付锐, 郑凯

(西安交通工程学院, 陕西 西安 710300)

摘要:以补偿传统液压系统压力损失,提高液压系统负载能力及稳定性为目标,设计一种能够改善液压系统压力损失的阀控液压蓄能系统。阐述传统阀控液压蓄能系统结构,建立其工作原理模型并进行仿真分析。利用比例阀、传感器设计一种具有 PID 控制环节的自适应阀控液压蓄能系统。利用 AMESim 建立自适应阀控液压蓄能系统的仿真模型,并进行仿真实验。通过仿真结果的对比分析表明:在相同的工作压力下,自适应控制系统能对液压系统进行有效的压力损失补偿,保持工作系统的负载能力。

关键词:液压系统;蓄能器;压力损失;AMESim

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0192-05

Optimization Design and Simulation of Valve Controlled Hydraulic Energy Storage System Based on AMESim

FU Rui, ZHENG Kai

(Xi'an Traffic Engineering Institute, Xi'an 710300, China)

Abstract: A valve controlled hydraulic energy storage system improving the pressure loss of hydraulic systems was designed to compensate for the pressure loss of traditional hydraulic systems and improve the load capacity and stability of hydraulic systems. The structure of the traditional valve controlled hydraulic energy storage system was elaborated, and its working principle model was established and simulated for analysis. An adaptive valve controlled hydraulic energy storage system with PID control was designed using proportional valves and sensors. A simulation model of an adaptive valve controlled hydraulic energy storage system was established using AMESim, and simulation experiments were conducted. The comparative analysis of simulation results shows that the adaptive control system effectively compensates for pressure loss in the hydraulic system and maintains the load capacity of the working system under the same working pressure.

Keywords: hydraulic system; accumulator; pressure loss; AMESim

0 引言

工程机械被广泛应用于工业及生产建设的诸多领域,其作业特性普遍具有较大的质量或转动惯量,需要持续且稳定的液压驱动。在实际工作中,面对交变载荷的影响,系统不可避免地存在能量损失。秦泽^[1]通过在液压系统中引入多个蓄能装置的方式,以提高系统稳定性;扈凯等^[2]通过对液压控制阀的分析,优化非对称液压缸系统的动态特性,开展控制器优化设计研究,改善系统的动态特性等。这些方法虽然起到了一定的压力补偿作用,但被动的压力补偿方式存在较为明显的滞后性,降低了压力补偿的效果。因此,需要关注如何在不改变液压蓄能装置原有性能的同时,进一步降低压力损失对液压系统的影响。本文以载重车辆的回转机构为研究对象,针对传统的液压蓄能系统,设计了一种具有比例反馈环节的自适应

补偿系统,增强液压系统的负载能力及稳定性。

1 传统蓄能系统结构与工作原理

1.1 基本结构

传统阀控液压蓄能系统的基本结构^[3-4],如图 1 所示。

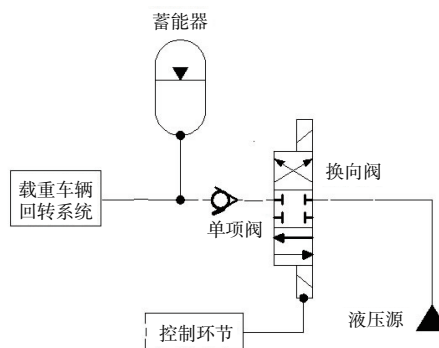


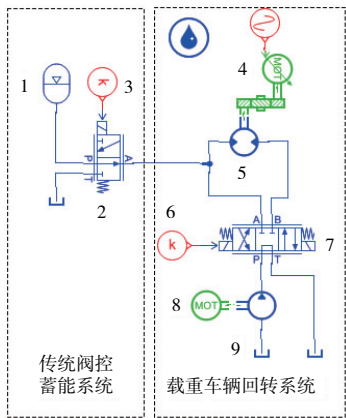
图 1 传统液压蓄能系统结构

第一作者简介:付锐(1983—),男,陕西西安人,副教授,硕士,研究方向为工业自动化及智能控制装置, furui202312@126.com。

1.2 工作原理

本文运用 AMESim 软件^[5-6],通过绘制系统草图、建立子模型、参数设置、运行仿真 4 个环节,以载重车辆的回转机构为实验对象,构建传统阀控液压蓄能系统的仿真模型,并设置仿真模型的基本参数。

1) 建立仿真模型,如图 2 所示



1—皮囊式蓄能器;2、7—控制阀;3、6—控制信号;
4—机械负载;5—液压马达;8—液压泵;9—油箱。

图 2 传统液压蓄能系统

载重车辆回转机构工作时,阀控液压蓄能系统向回转机构液压系统释放压力,进而补偿回转机构液压系统的压力损失,提高负载能力与稳定性。

2) 仿真模型参数,如表 1 所示。

表 1 传统蓄能系统仿真模型参数

序号	名称	参数	数值
1	皮囊式蓄能器	公称压力/MPa	60
		预压力/MPa	25
		容积/L	300
2、7	控制阀	默认值	
3、6	控制信号	工作电流/mA	40
4	机械负载	交变负载/(N/m)	1 200
5	液压马达	最大转速/(r/min)	1 000
8	液压泵	输出压力/MPa	80
9	油箱	默认值	

2 传统蓄能系统的压力分析

2.1 系统压力仿真实验

以图 2 模型及表 1 仿真模型参数,进行系统仿真,如图 3 所示。

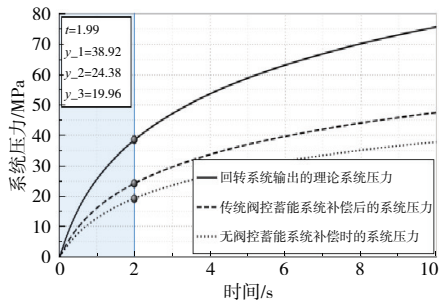


图 3 传统蓄能系统仿真

在 AMESim 的仿真环境下,进行仿真实验,发现液压蓄能补偿系统的引入,在一定程度上补偿了载重车辆回转机构液压系统压力,但依然和回转机构系统输出的理论压力有较大差距,证实回转系统在抵抗外部交变负载时存在一定的压力损失。

2.2 系统压力数据统计与分析

1) 系统压力数据统计

结合图 3 仿真实验结果,对传统阀控蓄能系统进行了压力数据的统计,压力偏差平均值为 21.285 MPa,如表 2 所示。

表 2 传统蓄能系统压力数据

时间/s	系统输出的理论压力/MPa	传统阀控蓄能系统压力/MPa	压力差/MPa
1	25.41	15.96	$\Delta P_0 = 9.45$
2	38.92	24.38	$\Delta P_1 = 14.54$
3	47.20	29.65	$\Delta P_2 = 17.55$
4	53.60	33.68	$\Delta P_3 = 19.92$
5	58.75	36.91	$\Delta P_4 = 21.84$
6	63.09	39.64	$\Delta P_5 = 23.45$
7	66.85	42.02	$\Delta P_6 = 24.83$
8	70.13	44.06	$\Delta P_7 = 26.07$
9	72.94	45.83	$\Delta P_8 = 27.11$
10	75.65	47.56	$\Delta P_9 = 28.09$

通过统计发现系统输出的理论压力与传统阀控蓄能系统压力两者整体的变化趋势相同,证明蓄能系统起到了一定的压力补偿作用。

2) 系统压力数据分析

对表 2 的压力偏差数据进行统计,绘制其特性曲线图,如图 4 所示。

可知压力偏差呈现一定连续变化的线性特征。即系统输出的理论压力(P)与压力偏差量(Δp)之间存在比例关系:

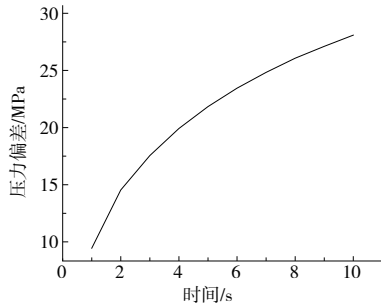


图4 压力偏差数据特性曲线图

$$p = k \cdot \Delta p \quad (1)$$

式中 k 为比例系数

以表 2 为基础,结合式(1)构建了比例系数(k)的数学模型,并利用 MATLAB 分析且得到了比例系数。

$$k = \frac{p_n + p_{n-1} + \dots + p_0}{\Delta p_n + \Delta p_{n-1} + \dots + \Delta p_0} \quad (n \leq 10) \quad (2)$$

可得: $k \approx 2.13$

3 阀控液压蓄能系统的优化

3.1 PID 控制系统

由文中 2.2 已知,传统蓄能系统与输出的理论压力之间存在较大的压力偏差,为了弥补了单一比例控制策略的不足,增强阀控液压蓄能系统的适应性,本文引入了单神经网络 PID 算法^[7-8]。其 PID 控制系统原理图如图 5 所示。

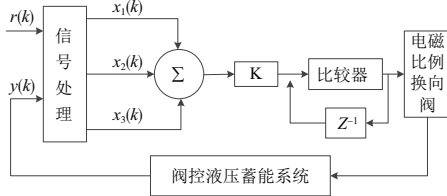


图5 PID 控制系统原理图

对期望值为 $r(k)$ 与实际输出 $y(k)$ 进行信号处理并得出单神经网络所需的 3 个状态变量 $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 、 $x_3(k)$ 。

$$\begin{cases} x_1(k) = r(k) - y(k) = e(k) \\ x_2(k) = \Delta e(k) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (3)$$

式中 k 为比例系数,取 $k=2.13$ 。

控制信号:

$$u(k) = u(k-1) + k \sum_{i=1}^3 \omega_i(k) x_i(k) \quad (4)$$

式中 $\omega_i(k)$ 为 $x_i(k)$ 的加权系数,主要通过加权系

数的调整实现 PID 参数自适应整定。

采用有监督 Hebb 学习算法。

$$\omega_i(k+1) = (1-c)\omega_i(k) + \eta \{ e(k) u(k) x_i(k) \} \quad (5)$$

式中: (k) 为误差信号; $e(k) = r(k) - y(k)$; c 为常数 $0 \leq c \leq 1$, c 取 0.1。

因此权值修正量 $\Delta \omega_i(k)$ 可由下式表示:

$$\Delta \omega_i(k) = \omega_i(k+1) - \omega_i(k) = -c \left(\omega_i(k) - \frac{\eta}{c} z(k) u(k) x_i(k) \right) \quad (6)$$

控制量 $u(k)$ 为:

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 \bar{\omega}_i(k) x_i(k) \quad (7)$$

$$\bar{\omega}_i(k) = \frac{\omega_i(k)}{\sum_{i=1}^3 |\omega_i(k)|} \quad (8)$$

$$\omega_1(k+1) = \omega_1(k) + \eta_p e(k) u(k) x_1(k) \quad (9)$$

$$\omega_2(k+1) = \omega_2(k) + \eta_i e(k) u(k) x_2(k) \quad (10)$$

$$\omega_3(k+1) = \omega_3(k) + \eta_d e(k) u(k) x_3(k) \quad (11)$$

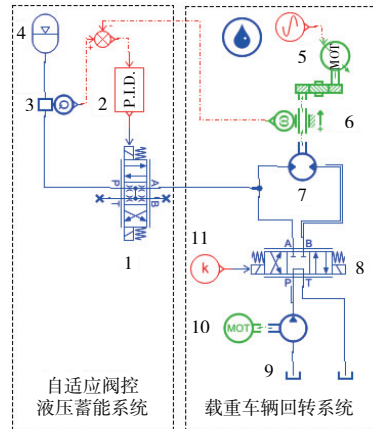
式中:比例环节学习速率 $\eta_p = 2.13$;积分环节学习速率 $\eta_i = 0.2$;微分环节学习速率 $\eta_d = 0.19$ 。

通过 PID 反馈环节,控制系统成比例释放蓄能系统压力,进而达到稳定系统压力,提高载重车辆回转机构稳定性的目的。

3.2 自适应液压蓄能系统

1) 建立仿真模型。

本文在图 2 传统阀控液压蓄能系统仿真模型的基础上,通过引入 PID 控制系统,构建了自适应阀控液压蓄能系统仿真模型,进行了优化设计,如图 6 所示。



1—电磁比例控制阀;2—PID 控制环节;3、6—传感器;
4—皮囊式蓄能器;5—机械负载;7—液压马达;
8—控制阀;9—油箱;10—液压泵;11—控制信号。

图6 自适应蓄能系统仿真模型

2) 设定子模型参数^[9-10],如表 3 所示。

表 3 自适应蓄能系统仿真模型参数

序号	名称	参数	数值
1	电磁比例控制阀	默认值	
		比例系数	2.13
2	PID 控制环节	积分系数	0.20
		微分系数	0.19
3、6	传感器	默认值	
		公称压力/MPa	60
4	皮囊式蓄能器	预压力/MPa	25
		容积/L	300
5	机械负载	交变负载/(N/m)	1 200
7	液压马达	最大转速/(r/min)	1 000
8	控制阀	默认值	
9	油箱	默认值	
10	液压泵	输出压力/MPa	80

3) 工作过程

载重车辆回转机构工作时,控制阀(8)换向系统工作,液压马达(7)转动,这时系统中的压力传感器(3、6)开始工作,将采集到的信号经比较器处理,若存在压力变化量(Δp)时,PID 控制环节(2)工作,并按照预定算法控制“自适应蓄能系统”中的电磁比例换向阀(1)输入相应比例的控制电流,向回转机构液压系统成比例输入压力,进而达到平衡系统压力,减少压力变化量的目的,提高载重车辆回转机构的稳定性。

3.3 自适应液压蓄能系统仿真与分析

1) 系统仿真

依据图 6 中的仿真模型,按照表 3 中的参数进行设置并进行仿真,得到相应的特性曲线。如图 7 所示。

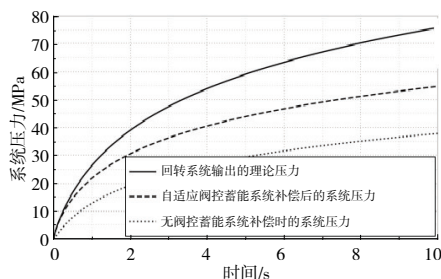


图 7 自适应液压蓄能系统仿真

在 AMESim 的仿真环境下,进行仿真实验,与图 3 所示的传统液压蓄能系统相比较,PID 控制环节的引入,进一步补偿了载重车辆回转机构液压系统压力,有效提高了其抗外部交变负载的能力。

2) 数据统计

本文结合图 7 中的仿真实验结果,对自适应阀控蓄能系统进行了压力数据的统计,如表 4 所示。

表 4 自适应液压蓄能系统压力数据

时间/s	系统输出的理论压力/MPa	自适应阀控蓄能系统压力/MPa	压力差/MPa
1	25.41	21.60	$\Delta P_0 = 3.81$
2	38.92	30.60	$\Delta P_1 = 8.32$
3	47.20	36.25	$\Delta P_2 = 10.95$
4	53.60	40.41	$\Delta P_3 = 13.19$
5	58.75	43.89	$\Delta P_4 = 14.86$
6	63.09	46.62	$\Delta P_5 = 16.47$
7	66.85	49.02	$\Delta P_6 = 17.83$
8	70.13	51.12	$\Delta P_7 = 19.01$
9	72.94	53.11	$\Delta P_8 = 19.79$
10	75.65	54.64	$\Delta P_9 = 21.01$

通过统计发现自适应液压蓄能系统压力偏差平均值为 14.524 MPa,产生的压力偏差更小,证明蓄能系统起到了较好的压力补偿作用。

3.4 仿真实验结果分析

依据表 2 与表 4 中的运行数据,对传统蓄能系统与自适应蓄能系统的仿真实验数据进行比较分析。如图 8 所示。

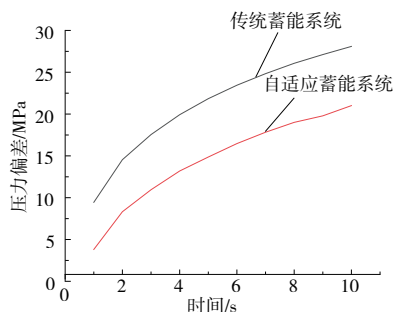


图 8 压力偏差对比分析

传统蓄能系统压力偏差平均值为 21.285 MPa。而自适应蓄能系统压力偏差平均值为 14.524 MPa。通过对数据进行比对分析,优化后的蓄能系统其压力偏差进一步减少。证明在相同时间段内,自适应蓄能系统进一步减小了执行系统(载重车辆回转机构)的压力损失。通过分析证明引入 PID 控制环节的自适应蓄能系统起到了较好的压力补偿作用,保持了执行机构所需压力的稳定供给。

4 结语

本文分析了阀控液压蓄能系统结构与工作原

理,通过分析与仿真发现执行系统因负载连续变化造成的系统压力损失。分析传统阀控液压蓄能系统产生较大压力偏差的原因,针对压力损失这一问题,文中以比例换向阀、传感器为硬件核心设计了一种具有PID控制环节的自适应蓄能系统,通过向液压执行系统成比例进行压力输入,进而达到压力补偿的作用。以AMESim为手段搭建了传统与自适应两种蓄能系统的仿真模型,并分别进行了仿真实验,通过数据统计与对比分析,表明自适应蓄能系统起到了较好的压力补偿作用,保持了液压执行系统的稳定性,具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 秦泽. 双皮囊蓄能器在挖掘机节能中的研究[D]. 太原:太原科技大学,2021.
- [2] 扈凯,张文毅,祁兵,等. 四通阀控非对称液压缸系统控制器优化设计[J]. 中国农机化学报,2023,44(7):140-146.
- [3] 马浩钦. 基于恒压蓄能器的挖掘机动臂能量再生研究[D]. 太原:太原科技大学,2021.

- [4] 武锟辉. 基于AMESim的压力可调控液压蓄能器节能仿真分析[D]. 太原:太原科技大学,2019.
- [5] 张松亭,陈新元,李邦,等. 基于AMESim的先导式比例压力阀仿真与试验[J]. 液压气动与密封,2023,43(12):59-63.
- [6] 李玉军. 基于UG和AMESim软件液压传动技术课程教学应用研究[J]. 农机使用与维修,2023(12):134-138.
- [7] 蒋爽,刘世纪,高礼科等. 基于神经网络PID的疏浚管道泥浆流速控制[J]. 计算机测量与控制,2023,31(11):198-203.
- [8] 赵晓雷. 基于BP神经网络与遗传算法的烘丝机干燥工艺参数优化[J]. 机械制造与自动化,2023,52(5):185-189.
- [9] 栾健洋,张明,高飞,等. AMESim液压仿真技术及其在液压缸性能分析中的应用[J]. 机电工程技术,2023,52(6):148-150.
- [10] 阮帅. 基于AMESim的6×4半挂牵引车气压制动系统建模与优化[D]. 济南:山东交通学院,2023.

收稿日期:2023-12-29

(上接第191页)

- [4] PRZYBYLKO S, ROCK S. Evaluation of a multivariable control design on a variable cycle engine simulation[C]//18th Joint Propulsion Conference. Cleveland, OH. Reston, Virginia: AIAA, 1982: 1077.
- [5] VDOVIK J W, KNOTT P, EBACKER J J. Aerodynamic/acoustic performance of YJ101/double bypass VCE with coannular plug nozzle [J]. Journal of Aircraft, 2025.
- [6] PATEL H R. Parametric cycle analysis of adaptive cycle engine[D]. Arlington, TX, USA: The University of Texas at Arlington, 2016.
- [7] 陈敏,张纪元,唐海龙,等. 自适应循环发动机总体设计技术探讨[J]. 航空动力学报, 2022, 37(10): 2046-2058.
- [8] RALLABHANDI S K, MAVRIS D N. Simultaneous airframe and propulsion cycle optimization for supersonic aircraft design[J]. Journal of Aircraft, 2008, 45(1): 38-55.
- [9] 黄锐,唐世建,董海滨,等. 变循环发动机建模及仿真分析[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(5): 144-148.
- [10] 苟学中,周文祥,黄金泉. 变循环发动机部件级建模技术[J]. 航空动力学报, 2013, 28(1): 104-111.
- [11] 张晓博,王占学,周红. FLADE变循环发动机模态转换过程特性分析[J]. 推进技术, 2018, 39(1): 14-22.
- [12] 周红,王占学,刘增文,等. 双外涵变循环发动机可变几何特性研究[J]. 航空学报, 2014, 35(8): 2126-2135.

- [13] ZHENG J C, CHEN M, TANG H L. Matching mechanism analysis on an adaptive cycle engine [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(2): 706-718.
- [14] ZHENG J C, TANG H L, CHEN M, et al. Equilibrium running principle analysis on an adaptive cycle engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 132: 393-409.
- [15] WADIA A R, TURNER A G, DZIECH A M, et al. FLADE fan with different inner and outer airfoil stagger angles at a shroud therebetween: US7758303 [P]. 2010-07-20.
- [16] 余秋霞,胡骏,王为丽,等. 变循环发动机模式转换对加减速性能的影响[J]. 推进技术, 2024, 45(10): 21-33.
- [17] 伊卫林,郑霆锴. 涡轮变几何技术的研究及应用进展[J]. 航空动力学报, 2024(9): 131-140.
- [18] 徐义皓,董芑呈,郑俊超,等. 自适应循环推进系统总体性能优化方法研究[J]. 航空学报, 2025(4): 1-27.
- [19] 于海涛,施磊,付垚,等. 变循环发动机后涵道引射器的研究现状与关键技术[J]. 航空发动机, 2024, 50(3): 1-8.
- [20] 朱鑫宇,徐思远,肖红亮,等. 基于贝叶斯优化的自适应循环发动机性能寻优控制[J]. 航空动力学报, 2024(11): 1-13.
- [21] 陈映雪,冯冠翔,蔡林峰,等. 基于智能算法的自适应循环发动机控制规律优化方法[J]. 推进技术, 2024(12): 1-27.

收稿日期:2024-01-02