

DOI: 10.7652/xjtub201907008

高负压液压油缸系统流量再生液压阀 再设计和能效分析

李晓祥, 王安麟, 樊旭灿

(同济大学机械与能源工程学院, 201804, 上海)

摘要: 为解决高负压液压油缸系统存在的机器作业效率低与能量损耗大的问题,提出了高负压液压油缸系统流量再生液压阀再设计的方法。首先,以某土方机械油缸用常用液压阀为研究对象,通过析因分析可知,非再生流量回路的固定液阻参数对液压阀流量再生供油率的效应显著;其次,对液压阀最大流量再生供油率较低的问题,提出将非再生流量回路固定液阻设计为可变液阻、且与再生流量回路可变液阻差动联控的方法;最后,在所提方法的基础上,借助试验设计和响应面方法,实现以阀结构参数为设计变量、液压阀流量再生供油率最大化为优化目标的阀结构再设计。通过对2 000 h以上的小样本整机进行试验验证,结果表明,流量再生液压阀的供油率和工作装置快降作业效率分别提高了29%、27%以上,非再生流量理论能量损失减少了90%以上。该方法有效解决了油缸无杆腔高负压及其能量损耗问题,同时所提面向液阻差动联控的液压阀再设计理念与流程,对解决同类高负压液压油缸系统设计问题具有一定的工程意义。

关键词: 高负压油缸;流量再生;能效分析;响应面方法;液阻

中图分类号: TU623.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)07-0052-08

Energy Efficiency Analysis and Redesign of Flow Regenerating Hydraulic Valve for High Negative Pressure Hydraulic Cylinder System

LI Xiaoxiang, WANG Anlin, FAN Xucan

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To solve the problem of low working efficiency and high energy loss caused by high negative pressure hydraulic cylinder systems, this paper proposes a method for redesigning the flow regenerating hydraulic valve in high negative pressure hydraulic cylinder system. Taking the common hydraulic valve used in a common type of earthmoving mechanical cylinder as the research object and using factorial analysis approach, it was found that the fixed liquid resistance parameter of the non-regenerative hydraulic circuit has a significant effect on the efficiency of flow regenerating hydraulic valve. To solve the problem of low oil supply efficiency, a novel method was proposed, which can change the fixed liquid resistance of the non-regenerative hydraulic circuit to a variable liquid resistance and hence forming a differential control combined with the variable liquid resistance of the regenerative hydraulic circuit. Based on the method, the structural redesign of the hydraulic valve, with four structural variables as the design variables and the maximum efficiency of the hydraulic valve as the optimization target, was realized by

收稿日期: 2019-01-11。 作者简介: 李晓祥(1984—),男,博士生;王安麟(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0810200-03)。

网络出版时间: 2019-04-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190410.0956.012.html>

means of design of experiment (DOE) and response surface methodology (RSM). Through the small sample tests for more than 2000 hours, the efficiency of flow regenerating hydraulic valves and the working efficiency of the working device descending process were increased by 29% and 27%, respectively, and the theoretical energy loss of the non-regenerative flow was reduced by more than 90%. The method can effectively solve the problems of high negative pressure in the rodless chamber of the cylinder and system energy loss. The concept and process of hydraulic valve redesign based on hydraulic resistance differential control proposed in this paper provide an engineering reference for the design of similar high negative pressure hydraulic cylinder system.

Keywords: high negative pressure cylinder; flow regeneration; energy efficiency analysis; response surface methodology; liquid resistance

随着不可再生能源的日益枯竭和对环境的重视,钢铁、内燃机和动力机械等行业开始通过各种途径回收浪费的能量或提高能源利用率^[1-7]。液压油缸广泛应用于挖掘机、推土机和装载机等土方机械,机器工作装置在下降过程中通过油缸将势能释放,油缸无杆腔形成高负压,影响机器作业精度与效率。同时,工作装置快降过程中的能量再利用被关注,对降低机器的能耗具有重要意义。

目前,用于工作装置势能的方法有电力式、液压式和流量再生式。Lin等通过液压马达与电机的结合实现油缸势能的回收与转换^[8-9],Lu等通过蓄能器作为储能单元进行油缸势能回收^[10-12],王庆丰等提出了带蓄能器的电力式势能回收系统^[13-16],吴文海等利用节流阀控制回油流量与马达的结合实现对油缸势能的利用^[17-18]。在土方机械领域,油缸动作较为缓慢时,对流量再生式的势能利用多采用调节回油背压的方法^[19];油缸动作较快时,多采用油缸与流量再生液压阀直接相连实现流量再生的方法,研究多集中在对油缸用流量再生阀功能及原理的阐述和使用过程中阀的性能测试及故障解决方法上^[20-22]。油缸用流量再生液压阀机理及相关理论的研究较少,采用N-S方程对流量再生液压阀阀芯与阀体之间配合间隙的理论进行了分析^[23]。李晓祥等对多路阀流量特性系数对流量再生液压阀的性能影响程度进行了理论计算及改进,有效降低了非再生油液的压力损失^[24]。

本文以推土机用流量再生液压阀为研究对象,采用将非再生流量回路固定液阻改为可变液阻、并与再生流量回路可变液阻差动联控的方法,对液压阀进行再设计。通过小样本2 000 h以上试验验证,液压阀流量再生供油率和工作装置快降作业效率分别提升29%和27%以上,降低了油缸无杆腔负压,减少了能耗损失。

1 流量再生液压阀性能分析

1.1 阀结构和原理

高负压油缸液压系统原理简图和阀结构图如图1所示,完整的液压系统由操控手柄、工作泵、多路阀、油箱、两个流量再生液压阀、两个油缸和连接的管路组成,通过多路阀控制油缸进出油来实现工作装置上升与下降,图中 a 为再生回路节流孔直径, b 、 d 为非再生回路节流孔直径, k 为阀芯复位弹簧刚度。工作原理如下:通过操作多路阀实现多路阀换向,当油液通过多路阀由 P_2 经 P_0 流向油缸有杆腔、无杆腔油液由 P_1 经多路阀流向油箱时,工作装置上升;多路阀相反方向操作时,工作装置在重力作用下快速下降,当液压阀流量再生功能开启后,油缸有杆腔的油液一部分由 P_0 流向 P_1 (再生回路),剩余部分由 P_0 经 P_2 回油箱(非再生回路)。

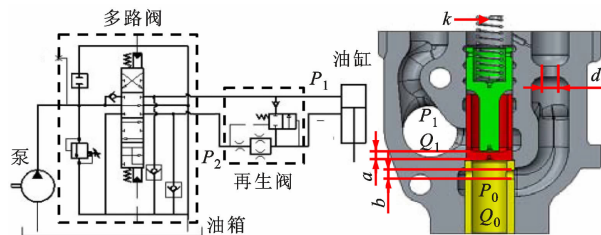


图1 液压系统原理简图和阀结构图

增加油缸无杆腔再生油液可降低其负压,通过理想条件状态方程来说明,即

$$PV = nRT \quad (1)$$

式中: P 为无杆腔内压力; V 为无杆腔体积; n 为物质的量; R 为物质常数; T 为无杆腔温度。假设 T 无变化,油缸无杆腔密封性良好。当液压阀流量再生功能未开启时, PV 等于常数,工作装置在自身重力的作用下快速下降至地面, V 增大, P 减小。当液压阀流量再生功能开启后,再生油液进入油缸无杆

腔, n 增加, V 受油缸行程限制保持不变, P 增大使负压减少, 通过增加油缸无杆腔再生油液可降低其负压。

1.2 阀性能分析

油缸与流量再生液压阀直接连接, 再生流量难以直接测量, 可通过间接测量与计算的方法获得, 再生流量供油体积、供油率和非再生油液能量损失的计算式为

$$V_{in} = \frac{n_e V_g \eta_v t}{60i} \tag{2}$$

$$\eta = \frac{V_1 - V_{in}}{V_0} \times 100\% \tag{3}$$

$$E_{loss} = \int_{t_0}^{t_f} P_2 Q_2 dt = \sum_{i=t_0}^{t_f} P_i Q_i \Delta t_i \tag{4}$$

式中: V_{in} 为泵供油体积; n_e 为发动机转速; $V_g = 117 \text{ mL/r}$ 为泵的排量; $\eta_v = 0.9$ 为泵容积效率; $i = 0.855$ 为传动比; t 为快降时间; η 为流量再生供油率; $V_1 = 19.905 \text{ L}$ 为油缸无杆腔体积; $V_0 = 12.13 \text{ L}$ 为油缸有杆腔体积; E_{loss} 为非再生油液能量损失; t_0 为生成非再生油液开始时间; t_f 为生成非再生油液结束时间; P_2 、 Q_2 为非再生油液的压力、流量。

测试仪器为 Hydrotechnik5060 和 HT-PD 压力传感器, 以发动机转速 $n_e = 800, 1\,900 \text{ r/min}$ 、油温为 $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ 、工作装置于最高位置快速下降为测试条件。不同转速下油缸无杆腔压力曲线如图 2 所示, 在此基础上的计算结果如表 1 所示。由图 2 可知: 流量再生液压阀供油率约为 58%, 再生油液少; 非再生流量能量损失和无杆腔负压较高, 同时发动机转速对液压阀流量再生性能影响非常小。

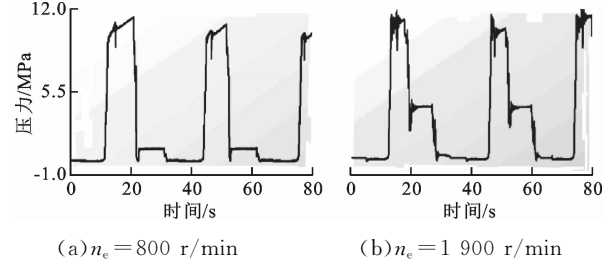


图 2 不同转速下油缸无杆腔压力曲线

表 1 计算结果

$n_e / \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	V_{in} / L	t / s	$\eta / \%$	P_{min} / MPa	E_{loss} / J
800	12.808	7.8	58.5	-0.061 6	3 925
1 900	12.87	3.3	58	-0.063 0	3 974

为更好地对液压阀流量再生性能进行分析, 建

立了系统仿真模型并标定, 如图 3 所示。通过析因分析, 各因子和因子组合对流量再生供油率的影响权重 β 如图 4 所示。由图 4 可知, 非再生流量回路的固定液阻参数 b 、 d 以及两者交互作用对液压阀流

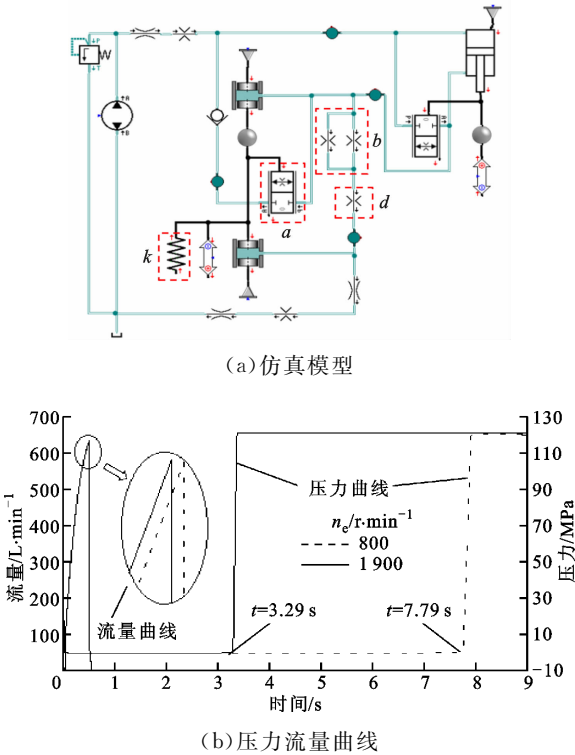


图 3 仿真模型和压力流量曲线

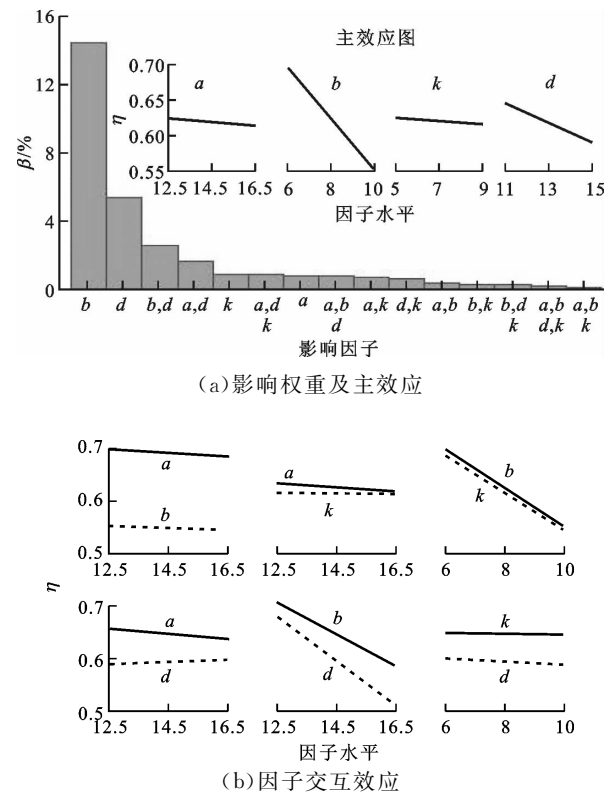


图 4 改进前各项效应的显著性分析

量再生供油率为显著负相关效应,减小 b 、 d 能有效提高液压阀流量再生供油率,同时增加工作装置上升时非再生回路中的能量损失。

对流量再生液压阀进行结构优化,4 个结构参数的约束条件为: $6.5\text{ mm} \leq a \leq 8.5\text{ mm}$, $6\text{ mm} \leq b \leq 10\text{ mm}$, $5\text{ N/mm} \leq k \leq 9\text{ N/mm}$, $11\text{ mm} \leq d \leq 15\text{ mm}$ 。优化后数据 $a = 6.5\text{ mm}$, $b = 6\text{ mm}$, $k = 5\text{ N/mm}$, $d = 11\text{ mm}$, 最大流量再生供油率 $\eta_{\max} = 72.86\%$, 相对偏低,同时液阻参数 b 、 d 的减小增加了非再生回路液阻和工作装置上升时的能量损失。

2 液阻差动联控液压阀的设计思路

高负压液压油缸系统简图如图 5 所示,油缸有杆腔液压回路由可变液阻再生回路和固定液阻非再生回路 Q_0 、 Q_1 、 Q_2 组成,非再生回路固定液阻 R_2 由 b 、 d 组成。为更好地提高液压阀流量再生供油率,降低非再生油液和工作装置提升时的能量损失,对流量再生液压阀进行再设计。本文所提液压系统将非再生流量回路固定液阻 R_2 设计为可变液阻,并与再生油路可变 R_1 差动联控。通过液压阀结构的设计使液阻 R_1 、 R_2 反方向变化,位置 0 为阀芯初始位置,位置①表示液阻 R_1 增大同时液阻 R_2 减小,位置②表示液阻 R_1 减小同时液阻 R_2 增大。工作装置自重压力 P_0 、 P_2 形成的压差驱动阀芯运动,调节液阻 R_1 、 R_2 大小,从而控制再生流量与非再生流量的分配。再设计的液压阀可实现工作装置下降时非再生油路可变液阻 R_2 的最大化,同时减少工作装置上升时的能量损失。

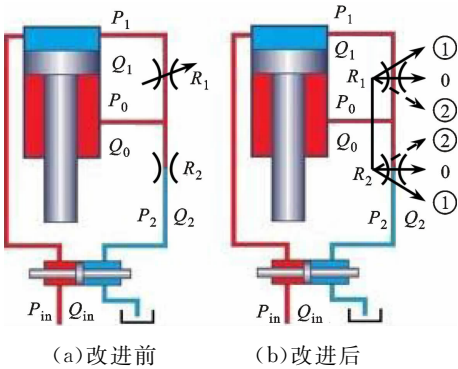
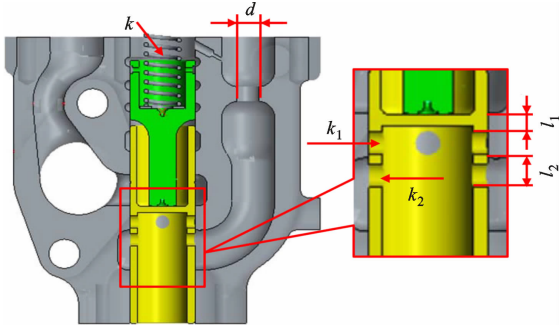


图 5 改进前、后的液压系统

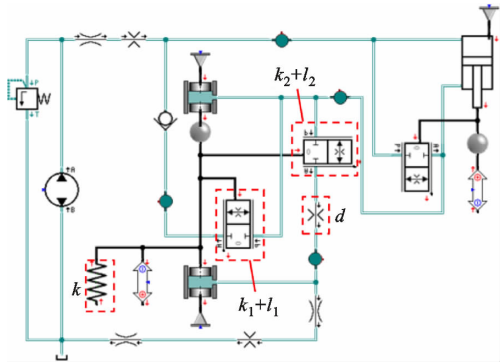
3 液阻差动联控液压阀再设计

再设计的流量再生液压阀结构图和仿真模型如图 6 所示。阀芯结构整体化,可实现再生回路可变液阻和非再生回路可变液阻的差动联控。在再设计

阀中原结构参数 k 、 d 保持不变,再设计结构参数为 k_1 、 k_2 、 l_1 、 l_2 , 其中 k_1 与再生流量可变液阻直接相关, k_2 与非再生流量可变液阻直接相关, l_1 为再生流量开启尺寸且与液压阀密封性有关, l_2 为非再生流量控制参数。



(a)再设计阀结构



(b)仿真模型

图 6 再设计阀结构和仿真模型

为更好地分析液压阀流量再生供油率与其结构参数之间的关系以及优化该阀的流量再生性能,首先对流量再生液压阀阀芯和流道结构进行参数化建模,使试验目标与影响因素明确化;然后通过试验设计方法,分析各项效应的显著性,采用响应面方法建立响应面模型,解决自由度多、计算量大的问题;最后在响应面模型基础上对其性能优化。再生阀再设计流程如图 7 所示,通过建立阀结构与流量再生性能的数理模型,使阀使用性能和结构性能得到了综

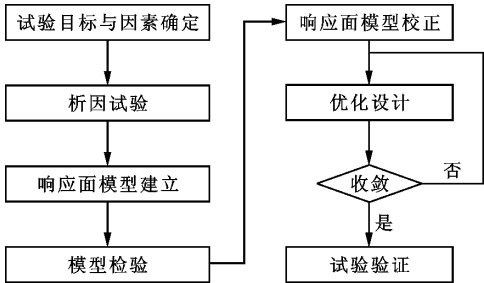


图 7 流量再生阀再设计流程图

合优化。

3.1 试验设计及参数敏感性

发动机转速 n_e 对流量再生供油率影响甚微,通过仿真模型 $n_e=1\,900\text{ r/min}$ 时获取试验设计数据。选取结构参数 k_1 、 k_2 、 l_1 、 l_2 作为试验设计的 4 个因子,进行全因子析因设计,以液压阀流量再生供油率作为响应,试验设计数据如表 2 所示。

表 2 试验设计数据

序号	k_1/mm	k_2/mm	l_1/mm	l_2/mm	$\eta/\%$
1	8.00	8	2.0	12.0	99.27
2	10.50	8	2.0	12.0	99.02
3	8.00	12	2.0	12.0	99.00
4	10.50	12	2.0	12.0	98.94
5	8.00	8	5.0	12.0	99.23
6	10.50	8	5.0	12.0	99.56
7	8.00	12	5.0	12.0	99.21
8	10.50	12	5.0	12.0	99.29
9	8.00	8	2.0	25.0	54.49
10	10.50	8	2.0	25.0	56.12
11	8.00	12	2.0	25.0	47.56
12	10.50	12	2.0	25.0	49.24
13	8.00	8	5.0	25.0	54.36
14	10.50	8	5.0	25.0	56.02
15	8.00	12	5.0	25.0	47.37
16	10.50	12	5.0	25.0	48.96
17	9.25	10	3.5	18.5	63.90
18	9.25	10	3.5	18.5	63.90
19	9.25	10	3.5	18.5	63.90

基于 Pareto 图的各因子和因子组合对流量再生供油率的影响权重如图 8 所示,可知 l_2 、 k_2 为显著负相关主效应, k_2 、 l_2 为显著负相关 2 阶交互效应。

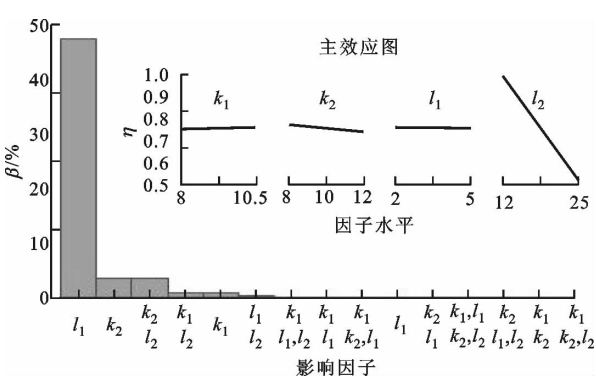
3.2 流量再生供油率响应面模型

通过析因设计及分析,结合响应面方法,建立了流量再生供油率响应面模型,并选用 15 组数据对其进行校正。响应面模型和系数 R^2 的计算公式为

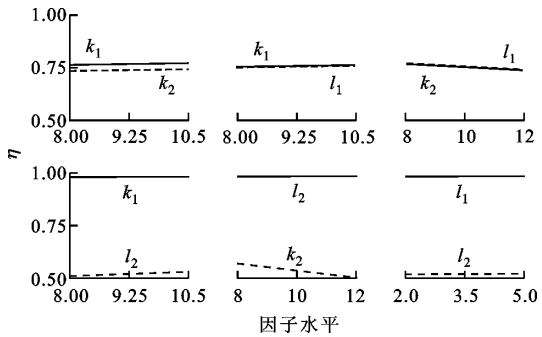
$$\eta = m_0 + \sum_{i=1}^z m_i X_i + \sum_{i=1}^z \sum_{j=1}^z n_{ij} X_i X_j \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [y_{rm}(i) - y(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [y(i) - \bar{y}]^2} \quad (6)$$

式中: m_0 、 m_i 、 n_{ij} 为待定系数; X 为结构参数变量; z 为结构参数变量数; $y_{rm}(i)$ 、 $y(i)$ 为各点的响应面函数值、仿真数值; $\bar{y}$ 为各点仿真值的均值; N 为检验点数。判定系数 R^2 反映响应面模型与仿真值之间的差异程度,数值越接近 1,近似表达精度越高。



(a) 影响权重及主效应图



(b) 因子交互效应图

图 8 改进后各项效应的显著性分析

通过试验设计和响应面方法相结合得到的再设计液压阀流量再生供油率响应面模型为

$$\eta = 1.324\,34 - 0.006\,056k_1 + 0.015\,415k_2 + 0.002\,108l_1 - 0.027\,647l_2 + 0.000\,505k_1l_2 - 0.001\,313k_2l_2 - 0.000\,108l_1l_2 \quad (7)$$

通过式(6)可得 $R^2=0.999\,8$,说明响应面模型与仿真模型基本一致。使用响应面模型作为优化目标函数,能有效解决自由度多、计算量大的问题。

3.3 结构优化及分析

设计变量 $\mathbf{X}=[k_1\ k_2\ l_1\ l_2]^T$,各变量取值范围考虑如下因素:流量再生供油率和非再生流量能量损失;在工作装置上升时非再生回路的能量损失;再生回路中阀芯与阀体遮盖量与密封性;液压阀空间结构的限制。优化模型为

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{X}) &= 1 - \eta \\ \text{s. t.} \quad &\begin{cases} 8 \leq k_1 \leq 10 \\ 8 \leq k_2 \leq 12 \\ 3 \leq l_1 \leq 5 \\ 15 \leq l_2 \leq 18 \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

使用 minitab 响应优化器进行优化,再设计流量再生液压阀结构参数优化结果和加工尺寸如表 3 所示,流量再生供油率 $\eta_{\max}$ 约为 88.45%。

表 3 优化前后数值对比

状态	k_1/mm	k_2/mm	l_1/mm	l_2/mm	$\eta/\%$
优化前	10.50	8	5.0	25.0	56.02
优化后	9.997 4	10.000 09	4.999 18	15.000 01	88.446 3
加工值	10	10	5	15	88.446 5

4 试验及讨论

4.1 试验分析

再设计液压阀在同一台推土机上进行验证测试,该机以满载、短距离作业工况进行验证,工作装置升降频繁,液压阀流量再生性能验证频次增加。前 500 h 内每 100 h 测试 1 次,500 h 后每 300 h 测试 1 次,每次采集 10 组数据。选取的一段油缸无杆腔压力曲线如图 9 所示,测试以及通过式(2)~(4)计算的数据结果如表 4 所示。由表 4 可知:再设计阀的供油率与响应面函数最大误差为 1%,符合设计要求;工作装置快降过程作业时间 t 、无杆腔负压 $P_{\min}$ 和非再生油液能量损失 E_{loss} 均减少;受时间 t 减少影响,泵供油体积 V_{in} 减小;在 $n_e=800,1\,900\text{ r/min}$ 时, V_{in} 、 $P_{\min}$ 、 E_{loss} 和 η 值基本一致。

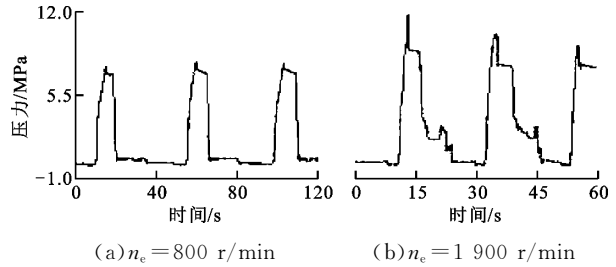


图 9 不同发动机转速下油缸无杆腔压力曲线

表 4 式(2)~(4)的计算结果

$n_e/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	V_{in}/L	t/s	$\eta/\%$	$P_{\min}/\text{MPa}$	E_{loss}/J
800	9.28	5.65	87.6	-0.04	39.9
1 900	9.24	2.37	87.9	-0.040 8	39.2

不同发动机转速下流量再生液压阀再设计前后系统性能指标提升百分比如图 10 所示。由图 10 可知:再设计流量再生液压阀使工作装置下降过程作业效率提高 27% 以上,流量再生油液体积 $\Delta(V_1-V_{\text{in}})$ 、供油率 η 分别增加 47%、29% 以上,油缸无杆腔负压降低约 35%,非再生流量油液的能量损失减少 99%,进一步验证了流量再生液压阀的再设计能有效提高工作装置快降作业效率、降低油缸无杆腔负压和减少非再生油液的能量损失。

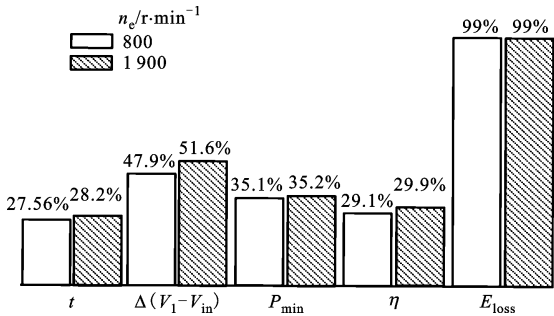
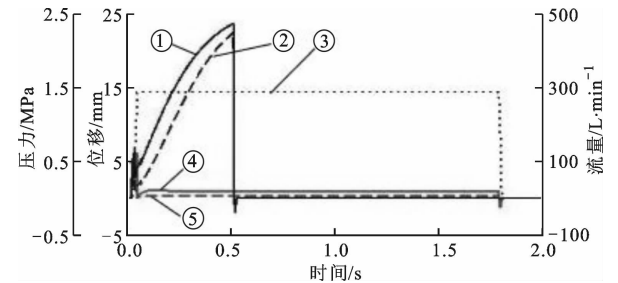


图 10 不同发动机转速下系统性能指标提升百分比

4.2 讨论

$n_e=1\,900\text{ r/min}$ 时液压阀再设计前后非再生油液的压力和流量时间历程如图 11 所示。由图 11 可知:工作装置快降开始阶段,阀再设计前后非再生油液的压力和流量比较接近;随着阀芯运动,非再生流量回油可变液阻快速减小,使得压力和流量迅速下降。与原阀相比,再设计阀非再生流量和压力均非常小,故非再生油液的能量损失显著减少。



①:原液压阀非再生油液流量曲线;②:原液压阀非再生油液压力曲线;③:再设计阀阀芯位移曲线;④:再设计液压阀非再生油液流量曲线;⑤:再设计液压阀非再生油液压力曲线

图 11 非再生油液能效分析图

采用本文再设计方法的理念和流程,对某土方机械油缸用流量再生液压阀进行再设计,液压阀再设计前、后剖视结构如图 12 所示。经过试验测试与验证,流量再生供油率和快降作业效率分别提高了

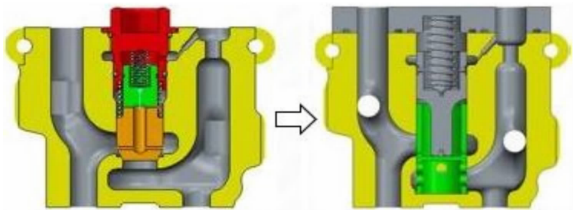


图 12 液压阀再设计前后剖视结构

20%、15%以上,进一步验证了本文方法的可行性。

5 结 论

(1)高负压液压油缸系统中流量再生液压阀的再设计能够提高机器工作装置快降作业效率和降低非再生回路的能量损失,使工作装置的部分势能得到利用。

(2)液压回路中液阻差动联控的设计理念扩展了工作装置势能利用中流量再生式的方法。

(3)对于液压阀流量再生供油率与结构参数之间的复杂关系,借助试验设计与响应面方法,可使复杂映射关系的理论表达更直观,有利于再设计分析。

(4)目前,对再设计阀的验证已超过 2 000 h 以上,再生供油率等性能稳定,证明本文方法在一定程度上能有效解决高负压带来的问题。

参考文献:

- [1] DAL M F, MENEGHETTI A, NARDIN G, et al. Enhancing energy recovery in the steel industry: matching continuous charge with off-gas variability smoothing [J]. *Energy Convers Manage*, 2015, 104: 78-89.
- [2] VALE S, HEBER L, COELHO P J, et al. Parametric study of a thermoelectric generator system for exhaust gas energy recovery in diesel road freight transportation [J]. *Energy Convers Manage*, 2017, 133: 167-177.
- [3] TABATABAEIKIA S, GHAZALI N, CHONG W T, et al. Computational and experimental optimization of the exhaust air energy recovery wind turbine generator [J]. *Energy Convers Manage*, 2016, 126: 862-874.
- [4] FU J Q, LIU J P, DEND B L, et al. An approach for exhaust gas energy recovery of internal combustion engine: steam-assisted turbocharging [J]. *Energy Convers Manage*, 2014, 85: 234-44.
- [5] SCIUBBA E, TOCCI L, TORO C. Thermodynamic analysis of a Rankine dual loop waste thermal energy recovery system [J]. *Energy Convers Manage*, 2016, 122: 109-118.
- [6] ASWIN K R, GREGORY M S, CODY M A, et al. Utilizing low airflow strategies including cylinder deactivation, to improve fuel efficiency and aftertreatment thermal management [J]. *International Journal of Engine Research*, 2017, 18(10): 1005-1016.
- [7] THYAGESWARAN S. Regeneration in an internal combustion engine: thermal-hydraulic modeling and analysis [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 174-191.
- [8] LIN T L, CHEN Q, REN H L, et al. Boom energy recovery system with auxiliary throttle based on hybrid excavator [J]. *Journal Mechanical Engineering Science*, 2017, 231(22): 4250-4262.
- [9] 林添良, 叶月影, 付胜杰. 工程机械动臂势能回收节能技术研究 [J]. *流体传动与控制*, 2014, 63: 8-14.
LIN Tianliang, YE Yueying, FU Shengjie. Research on the boom energy regeneration system based on construction machinery [J]. *Fluid Power Transmission and Control*, 2014, 63: 8-14.
- [10] LU L, YAO B. Energy-saving adaptive robust control of a hydraulic manipulator using five cartridge valves with an accumulator [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(12): 7046-7054.
- [11] 夏德政, 刘志奇, 刘晓莲. 液压挖掘机动臂动作节能研究 [J]. *液压气动与密封*, 2012, 32(9): 56-58.
XIA Dezheng, LIU Zhiqi, LIU Xiaolian. Research on energy saving about boom hydraulic circuit of hydraulic excavator [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2012, 32(9): 56-58.
- [12] 杨晓磊, 丁海港, 李科锋, 等. 液压挖掘机动臂节能方案分析与新方案设计 [J]. *建筑机械*, 2018, 504(2): 51-54.
YANG Xiaolei, DING Haigang, LI Kefeng, et al. Energy saving scheme analysis and new scheme design of boom for hydraulic excavators [J]. *Construction Machinery*, 2018, 504(2): 51-54.
- [13] LIN T L, WANG Q F. Hydraulic accumulator-motor-generator energy regeneration system for a hybrid hydraulic excavator [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(6): 1121-1129.
- [14] WANG T, WANG Q F. Design and analysis of compound potential energy regeneration system for hybrid hydraulic excavator [J]. *Journal of Systems and Control Engineering*, 2012, 226(10): 1323-1334.
- [15] WANG T, WANG Q F, LIN T L. Improvement of boom control performance for hybrid hydraulic excavator with potential energy recovery [J]. *Automation in Construction*, 2013, 30: 161-169.
- [16] 王庆丰. 油电混合动力挖掘机的关键技术研究 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(20): 123-129.
WANG Qingfeng. Research on key technology of oil-electric hybrid excavator [J]. *Journal of Mechanic Engineering*, 2013, 49(20): 123-129.
- [17] 吴文海, 柯坚, 李培, 等. 液压挖掘机动臂节能系统分析 [J]. *机床与液压*, 2013, 41(1): 45-50.
WU Wenhai, KE Jian, LI Pei, et al. Analysis about boom energy saving system of hydraulic excavator [J].

- Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(1): 45-50.
- [18] 柯坚, 李培, 于兰英, 等. 混合动力挖掘机动臂节能系统研究 [J]. 机械设计与研究, 2011, 27(6): 109-112.
- KE Jian, LI Pei, YU Lanying, et al. Research on experimental system of boom energy recovery in hybrid drive excavator [J]. Machine Design and Research, 2011, 27(6): 109-112.
- [19] 王永进, 权龙, 李爱峰, 等. 大型矿用液压挖掘机动臂升降控制方案研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(12): 161-166.
- WANG Yongjin, QUAN Long, LI Aifeng, et al. Boom lifting control scheme of large mining hydraulic excavator [J]. Journal of Mechanic Engineering, 2013, 49(12): 161-166.
- [20] 汪大鹏, 唐瑞祥, 林海, 等. 对 5 m³ 斗容量液压装载机铲斗轻载快降阀的改进 [J]. 机床与液压, 2016, 44(8): 89-91.
- WANG Dapeng, TANG Ruixiang, LIN Hai, et al. Improvement to the light load quick-falling valve for the bucket of 5 m³ loader [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(8): 89-91.
- [21] 归少雄, 马丽英, 曹源文. TY180 推土机工作装置液压系统常见故障及诊断 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(3): 481-484.
- GUI Shaoxiong, MA Liying, CAO Yuanwen. Common fault diagnosis and removal of TY180 bulldozer working member hydraulic system [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(3): 481-484.
- [22] 董庆建, 李倩, 王萌. SD16 型推土机掉缸故障的分析与解决 [J]. 工程机械, 2018, 3: 39-40.
- DONG Qingjian, LI Qian, WANG Meng. Cause analysis and remedy of failed cylinder for model SD16 bulldozer [J]. Construction Machinery and Equipment, 2018, 3: 39-40.
- [23] 张振敏. 410 推土机铲刀提升油缸泄漏量控制 [J]. 建设机械技术与管理, 2009, 22(2): 111-112.
- ZHANG Zhenmin. Control of 410 bulldozer blade hoisting fuel tank leakage [J]. Construction Machinery Technology & Management, 2009, 22(2): 111-112.
- [24] 李晓祥, 李国鹏, 王生波, 等. 多路阀流量特性与快降阀再生功能关联性的研究与分析 [J]. 液压与气动, 2013, 9: 49-50.
- LI Xiaoxiang, LI Guopeng, WANG Shengbo, et al. Research and analysis on relevance between flow characteristics of multi-way valve and regeneration of quick-drop valve [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2013, 9: 49-50.

(编辑 赵炜)

(上接第 22 页)

- [14] KERDOUSS F, BANNARI A, PROULX P, et al. Two-phase mass transfer coefficient prediction in stirred vessel with a CFD model [J]. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32(8): 1943-1955.
- [15] 贺靖峰, 赵跃民, 骆振福, 等. 基于 Euler-Euler 模型的空气重介质流化床密度分布特性 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1277-1282.
- HE Jingfeng, ZHAO Yuemin, LUO Zhenfu, et al. Density distribution characteristics of air heavy medium fluidized bed based on Euler-Eulerian model [J]. Journal of Coal, 2013, 38(7): 1277-1282.
- [16] 田飞, 施卫东. 潜水搅拌机理论、设计及工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 74-79.
- [17] 段晓霞, 程荡, 程景才, 等. 搅拌槽反应器内宏观和微观混合及过程强化 [J]. 化学反应工程与工艺, 2013, 29(3): 238-246.
- DUAN Xiaoxia, CHENG Dang, CHENG Jingcai, et al. Macroscopic and microscopic mixing and process strengthening in a stirred tank reactor [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2013, 29(3): 238-246.
- [18] 栾德玉, 周慎杰, 陈颂英. 错位六弯叶搅拌罐内假塑性流体的混合特性 [J]. 高校化学工程学报, 2012, 26(5): 787-792.
- LUAN Deyu, ZHOU Shenjie, CHEN Songying. Mixing characteristics of pseudoplastic fluid in a misaligned six-bend mixing tank [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2012, 26(5): 787-792.
- [19] 张建伟, 程龙, 冯颖, 等. 水平三向撞击流反应(混合)器内湍流数值模拟研究 [J]. 沈阳化工大学学报, 2015, 29(3): 263-267.
- ZHANG Jianwei, CHENG Long, FENG Ying, et al. Numerical simulation of turbulent flow in a horizontal three-way impinging stream reaction (mixer) [J]. Journal of Shenyang University of Chemical Technology, 2015, 29(3): 263-267.
- [20] 张国娟. 搅拌槽内混合过程的数值模拟 [D]. 北京: 北京化工大学, 2004: 20-23.

(编辑 赵炜)