

挖掘机多路阀的载荷分类设计

陈源流, 王安麟, 李晓田

(同济大学机械与能源工程学院, 201804, 上海)

摘要: 为解决挖掘机不确定性非平稳随机载荷与确定性阀芯拓扑形态的匹配问题,提出了挖掘机多路阀的载荷分类设计。将挖掘机非平稳随机循环载荷近似地分解为由作业条件决定的趋势项和由力学特性决定的随机项;构建趋势项负载参数化模型,选择具有显著性影响的模型参数表达载荷变化;根据典型作业条件及机体机构确定负载模型参数变化域(负载变化范围),将负载模型参数变化域离散为若干类别,各类别在较小的载荷变化范围内设计对应阀芯,根据不同挖掘机的实际载荷变化范围选择恰当阀芯,以此实现机种作业载荷与其阀芯拓扑的匹配。以某 20 吨级液压挖掘机回转联阀芯与回转载荷的匹配为研究对象,验证了该设计方法的有效性。挖掘机多路阀的载荷分类设计,可实现面向不同机种、不同作业条件,满足多路阀节流特性要求的阀芯拓扑形态快速响应设计。

关键词: 挖掘机;多路阀;趋势项负载参数化模型;阀芯拓扑设计

中图分类号: TH137.52 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202009011 **文章编号:** 0253-987X(2020)09-0100-09



OSID 码

Load Classification Design of Excavator Multiway Valve

CHEN Yuanliu, WANG Anlin, LI Xiaotian

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

Abstract: To match the unfixed non-stationary random load of excavator and the fixed topological structure of valve spool, a load classification design of excavator' multiway valve is proposed. The non-stationary random cyclic load of excavator is approximately decomposed into trend terms and random terms, which are determined by working conditions and mechanical properties respectively. The trend term load parametric model is established, whose parameters with significant effects are selected to express the load variation. The load model' parameter variation domain (range of load variation) is determined according to the common working conditions and machine types. The domain is divided into several categories, each category covers a smaller range of load variation. Corresponding valve spools are designed for each category, respectively. Then, according to the actual load variation range of different excavators, proper valve spools are selected so that the match between the working load of a certain machine type and the topological structure of its valve spool is realized. The match between the swing circuit valve spool of a 20-ton-level hydraulic excavator and the rotation load is taken as the research object to verify the applicability of the design method. This load classification design of excavator' multiway valve can realize the rapid response design of valve spool topology for different machine types and working conditions so as to meet the requirements of multiway valve throttling characteristics.

Keywords: excavator; multiway valve; trend term load parametric model; valve topology design

挖掘机因其应用广泛、创造价值高在工程机械中占据着重要地位,在农田水利、建筑工程、交通建设、抢险救灾等领域有广泛应用^[1],而多路阀作为液压挖掘机核心控制枢纽,对整机性能有重大影响,其设计应适应于实际作业载荷。但是,挖掘机作业载荷属于非平稳随机载荷,变化复杂,且机型种类繁多,再加上多路阀设计机理研究不充分,使挖掘机整机与多路阀之间的匹配存在盲目性,新机型的开发往往需要大量的调试时间。如何实现挖掘机整机作业载荷与多路阀阀芯拓扑形态的快速匹配已成为亟待解决的问题。

多路阀优化设计的研究中,往往以恒定压力或流量作为边界条件^[2-4],其他类型的液压阀设计也多采用静态边界条件^[5-7],这与实际载荷情况不符。关于工程机械非平稳随机载荷的研究,多用于元件的疲劳寿命分析^[8-10],难以直接指导元件设计。王安麟等以反映试验数据的虚拟载荷为边界条件,探究了多路阀开启过程的液动力^[11],但是仅比较了3种不同尺寸节流槽的液动力大小,未实现实际载荷条件下满足一定性能要求的定制化设计。

为实现挖掘机不确定性非平稳随机载荷与确定性多路阀阀芯拓扑形态的快速匹配,本文提出了挖掘机多路阀的载荷分类设计。

1 作业载荷分析

1.1 作业载荷特性

在机器现场作业条件下,直接测定、记录其动态性能各参数随时间变化的函数,即现场试验^[12]。文献^[13]通过某型挖掘机现场试验得到其工作载荷数据,图1给出了空斗回转180°负载压力现场试验数据。

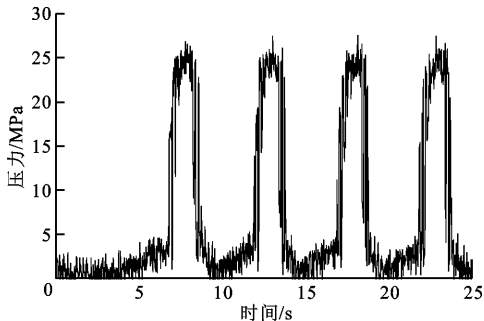


图1 空斗回转180°负载压力现场试验数据

该试验为空斗回转180°,回转过程重复4次,图1中压力为回转马达负载压力。多路阀压力载荷是

一个典型的非平稳随机信号,具有循环特征,可近似分解为由整机作业条件决定的趋势项和由力学特性决定的随机项^[14],如图2所示。

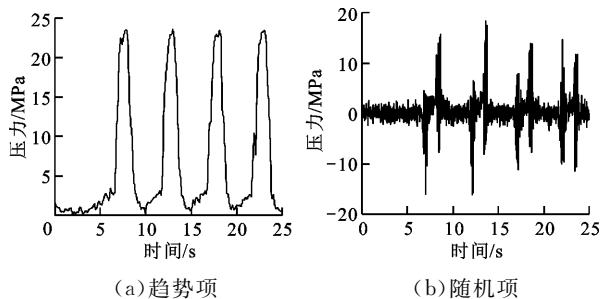


图2 多路阀压力载荷分解

1.2 作业载荷影响因素

基于现场试验的载荷表达可以反映实际作业条件下的载荷,但一次试验仅能得到某机型的部分载荷数据,当机体尺寸或作业条件改变时,需要重新试验,所以试验量大、成本高。随着计算机仿真技术的发展,研究者常建立整机系统模型研究挖掘机作业载荷^[15-17],极大地方便了对作业载荷影响因素的研究。

Li等通过VB编程搭建了挖掘机数字化分析平台^[18],可设置不同的机体机构及作业条件,仿真得到对应条件下的作业载荷。图3为3种不同仿真条件的回转负载压力。

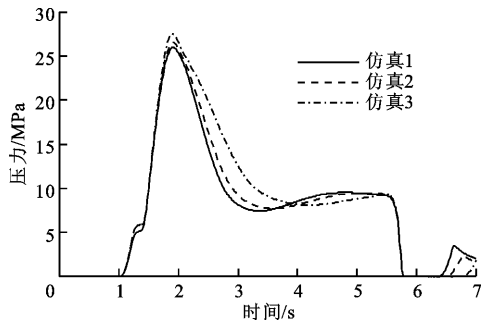


图3 3种不同仿真条件的回转负载压力

图3中,仿真1和仿真2分别对应不同机体尺寸的挖掘机空斗回转负载压力,仿真3为满斗回转负载压力,其机体尺寸与仿真2相同。不同机体尺寸示意图如图4所示。3组仿真先导控制信号相同。由此可知,机体机构及作业条件会影响挖掘机作业载荷。

2 作业载荷参数化表达

2.1 液压系统模型

系统模型建模与仿真在挖掘机、起重机等工程

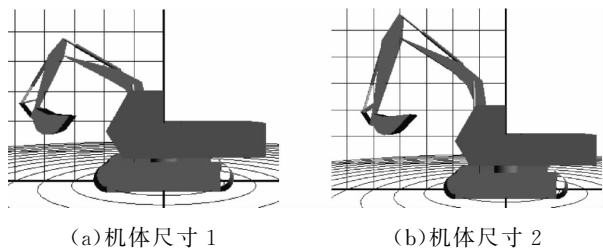
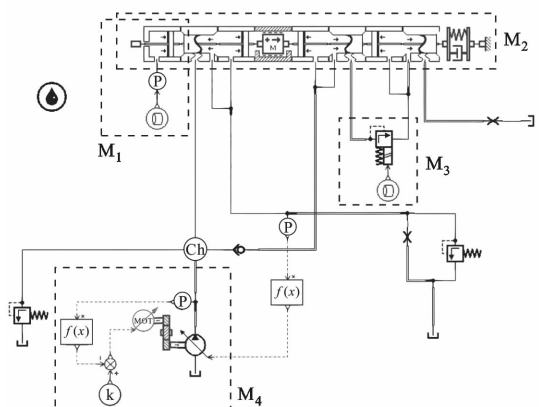


图4 不同机体尺寸示意图

机械,多路阀、变量泵等液压元件的研究中有广泛应用^[19-21],建立挖掘机液压系统模型如图5所示。



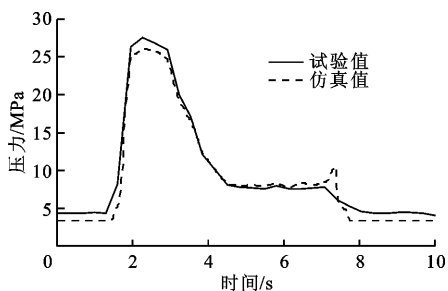
M₁—先导控制模块;M₂—多路阀阀芯模块;
M₃—模拟加载模块;M₄—发动机及变量泵模块。

图5 挖掘机液压系统模型

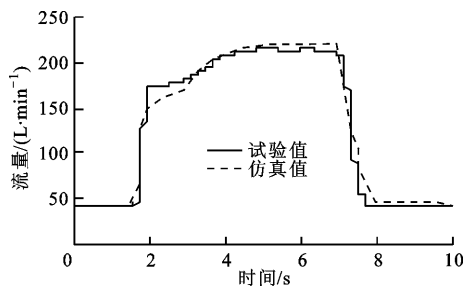
图5中:M₁模块可导入外部数据输出任意先导信号;M₂模块包括中位回油口及两工作阀口,其主要参数包括过流面积和流量系数,流量系数随流场结构、雷诺数等变化而变化^[22-24],且气穴现象的出现也会影响流量系数^[25],故导入流量数参数模型^[26]表征阀口节流特性;M₃模块可输入外部数据输出工作载荷;M₄模块可反映泵排量的负流量控制及发动机转速的改变。

当阀芯处于中位时,两工作阀口关闭,中位回油口直接与进油口相连,液压泵输出的油液经中位回油口进入油箱。随着先导压力逐渐增大,阀芯克服弹簧弹力产生位移,工作阀口逐渐开启而中位回油口逐渐关闭,在不同阀口开度下产生不同的流量分配关系,液压泵输出的油液经多路阀的分配流向执行元件或油箱,自执行元件返回的油液经另一工作阀口回到油箱。模拟加载模块使用溢流阀模拟执行元件的作业载荷,泵排量随中位回油口背压变化,实现负流量控制。为验证液压系统模型的正确性,在模块M₃中导入现场试验空斗回转360°载荷数据,在模块M₁中导入对应先导控制信号,模型参数按实际值设定或经标定得到,泵出口压力、流量及发动

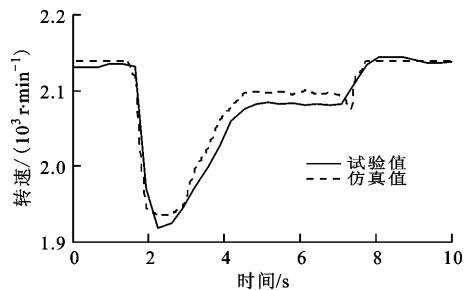
机转速试验值及仿真值的对比如图6所示。



(a) 泵出口压力



(b) 泵输出流量



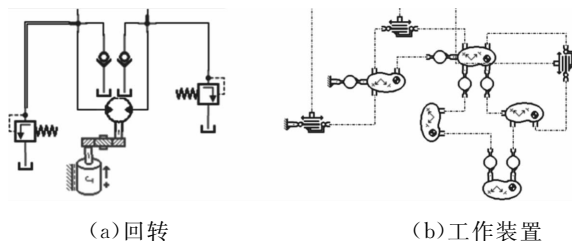
(c) 发动机转速

图6 空斗回转360°试验值及仿真值的对比

由图6可知,各变量仿真值与试验值误差均较小,说明了液压系统模型的正确性,该模型可以反映实际载荷下各元件的响应。

2.2 趋势项负载参数化模型

液压系统模型中的负载来自试验数据,需保证先导控制模块和模拟加载模块外部输入数据的对应性,且无法得到任意作业条件下各元件的响应。为便于负载表达,建立趋势项负载参数化模型,图7给出了回转及工作装置的趋势项负载参数化模型。



(a) 回转

(b) 工作装置

图7 回转及工作装置的趋势项负载参数化模型

为验证趋势项负载参数化模型的正确性,将图 5 中模块 M_3 替换为回转负载模型,液压马达排量、减速器减速比、溢流阀开启压力按实际参数设置,转动惯量 J 、黏性摩擦系数 b 、库伦摩擦转矩 T_c 、静摩擦转矩 T_s 由空斗回转 360° 现场试验数据标定得到,主要模型参数如表 1 所示。负载压力仿真值及试验值如图 8 所示。

表 1 空斗回转 360° 负载模型参数

参数	取值
$J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	108 651
$b/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	1 786
$T_c/(\text{N} \cdot \text{m})$	5 464
$T_s/(\text{N} \cdot \text{m})$	6 256

由图 8 可知,模型仿真值与试验值基本一致,说明回转负载模型可以表达空斗回转时的载荷。工作

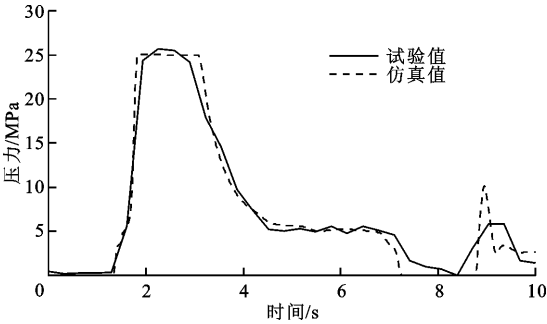


图 8 空斗回转 360° 负载压力仿真值及试验值的对比

表 2 4 参数 4 水平回转载荷正交试验

序号	$J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$b/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	$T_c/(\text{N} \cdot \text{m})$	$T_s/(\text{N} \cdot \text{m})$	E	f/MPa
1	99 00	1 624	5 000	5 670	1	12.33
2	99 00	1 719	5 225	5 985	2	12.48
3	99 00	1 815	5 500	6 300	3	12.64
4	99 00	1 910	5 775	6 615	4	12.84
5	104 500	1 624	5 225	6 300	4	11.83
6	104 500	1 719	5 000	6 615	3	11.76
7	104 500	1 815	5 775	5 670	2	12.27
8	104 500	1 910	5 500	5 985	1	12.23
9	110 000	1 624	5 500	5 985	2	12.23
10	110 000	1 719	5 775	6 300	1	12.52
11	110 000	1 815	5 000	5 985	4	11.91
12	110 000	1 910	5 225	5 670	3	12.20
13	115 500	1 624	5 775	5 985	3	13.73
14	115 500	1 719	5 500	5 670	4	13.48
15	115 500	1 815	5 225	6 615	1	13.23
16	115 500	1 910	5 000	6 300	2	13.04

装置负载模型同样可表达工作装置载荷,具体设置不再赘述,图 9 给出了铲斗单独动作时的负载压力。

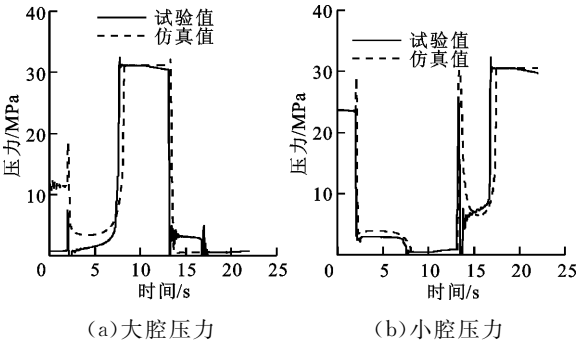


图 9 铲斗单独动作时的负载压力

由此可知,趋势项负载参数化模型可表达实际作业载荷的趋势项。

2.3 模型参数选择

使用趋势项负载参数化模型表达挖掘机作业载荷,选择负载模型中具有显著性影响的参数,即可将作业条件和机体机构等因素的影响反映到若干参数的变化。以回转载荷为例, J 、 b 、 T_c 、 T_s 4 个参数分别选择 4 个水平,建立正交试验表,如表 2 所示。

表 2 中, f 为不同模型参数对应负载压力仿真值与试验值的平均误差。假设仿真及试验有 n 个时间步,则 f 的表达式为

$$f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n | p_i - p_i^* |$$

(1)

式中 p_i 和 p_i^* 分别为第 i 个时间步负载压力的仿真值和试验值。

正交表第 5 列 E 为误差项,实际上是未被考察的交互作用和其他未知因素的综合列,同样分为 4 个水平,但各水平不做任何处理,可反映随机因素所引起的误差。

方差分析是检验两个或多个样本均值间差异是否具有统计意义的一种方法,将不同条件所引起的偏差与试验误差分解开来,按照一定的规则进行比较,以确定条件偏差的影响程度及其相对大小^[27]。对回转负载模型各参数进行方差分析,如表 3 所示, F 为因素均方差和误差均方差的比值。

表 3 回转负载模型各参数方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方差	F
J	4.267 7	3	1.422 6	175.63
b	0.011 3	3	0.003 8	0.47
T_c	0.758 9	3	0.253 0	31.23
T_s	0.021 6	3	0.007 2	0.89
E	0.024 4	3	0.008 1	

分析表 3 可知,转动惯量 J 的 F 值远大于其他参数的,即转动惯量 J 对负载压力的影响远比其他参数显著,故选择 J 表达回转载荷的变化。为验证参数选择的合理性,使用满斗回转 360° 试验数据进行验证。 b 、 T_c 、 T_s 均使用表 1 中取值,仅改变 J 进行标定,当 $J=230\,881\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 时,负载压力仿真值及试验值的对比如图 10 所示。

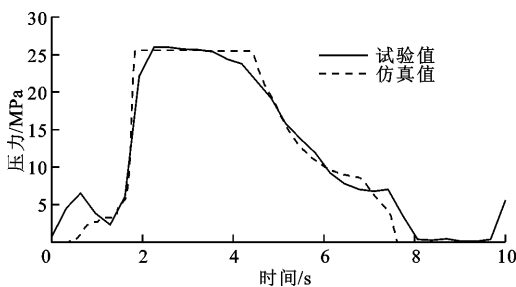


图 10 满斗回转 360° 负载压力仿真值及试验值的对比

由图 10 可知,负载压力试验值与仿真值基本一致,即仅改变转动惯量 J 即可反映回转载荷的变化。使用转动惯量 J 表达回转载荷,可将机体机构、作业条件等因素的影响集中反映在一个参数的变化,简化了载荷表达。

对于液压挖掘机的其他执行元件,可以按照类似的方法选择具有显著性影响的参数表达载荷的变化,从而实现作业载荷参数化表达。具有显著性影

响的模型参数可反映作业条件、机体机构等因素对作业载荷的影响。

3 作业载荷分类

3.1 负载模型参数变化域

挖掘机作业载荷受机体机构及作业条件等因素影响,研究作业载荷的变化范围,即是确定当机体机构及作业条件变化时负载模型参数的变化域。

对于通用典型的挖掘机,一般采用比拟法或经验公式计算法确定参数^[28]。二者均以相似理论为基础,认为性能完善的标准型通用挖掘机各参数几乎都与机体质量有一定的关系,各尺寸参数经验公式为

$$L_i = k_{li}G^{1/3} \tag{2}$$

$$S_i = k_{si}G^{2/3} \tag{3}$$

$$V_i = k_{vi}G \tag{4}$$

式中: L_i 、 S_i 、 V_i 分别为线尺寸参数、面积参数和体积参数; k_{li} 、 k_{si} 、 k_{vi} 分别为各种线性、面积、体积尺寸经验系数; G 为机体质量。

所以,对于某机体质量等级的液压挖掘机,根据经验系数的变化范围即可确定各参数变化范围。例如,对于标准臂挖掘机,其动臂长度经验系数取值范围为 $0.17\sim0.19\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$,故 20 吨级液压挖掘机动臂长度范围为 $4.6\sim5.2\text{ m}$ 。

类似地,确定各参数的变化范围,结合挖掘机数字化分析平台^[18],设定不同的机体机构及作业条件,仿真得到作业载荷,由不同的作业载荷标定得到负载模型参数,从而确定负载模型参数变化域。

以 20 吨级液压挖掘机回转负载为例,其不同机体机构、不同作业条件对应的负载模型参数 J 的变化域为 $50\,000\sim230\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

3.2 阀芯分类设计

由于应用场景和需求的不同,挖掘机的机体尺寸及常用作业条件变化繁多。对配件制造商而言,设计适应于各种作业载荷的多路阀阀芯是不现实的,对各种作业载荷分别设计对应的多路阀阀芯将大幅提高设计制造成本。针对上述问题,提出阀芯分类设计流程,如图 11 所示。

3.1 节得到不同机体机构及作业条件的液压挖掘机负载模型参数变化域,将其离散为若干类别。每个类别的模型参数经由趋势项负载参数化模型得到阀口的作业载荷,作为液压系统模型的边界条件;阀芯拓扑形态经由文献^[26]建立的流量数参数模型得到阀口流量数,作为液压系统模型的模型参数。

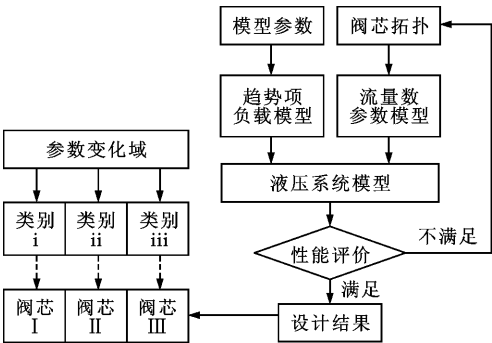


图 11 阀芯分类设计流程

由液压系统模型得到各元件的响应并进行性能评价,若满足性能要求,则将设计结果作为该类别对应的阀芯;否则调整阀芯拓扑形态,重复上述流程。

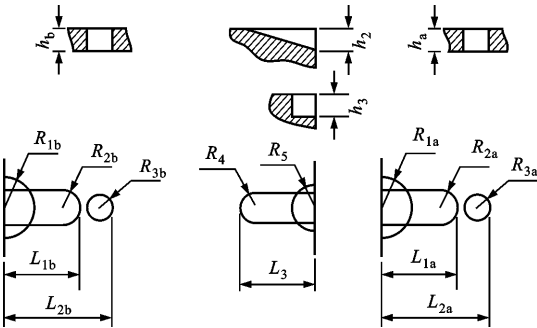
经过该设计流程可得各个类别对应的不同阀芯,将不同阀芯组成阀芯备选库,对于不同机型、不同应用场景的挖掘机,配件制造商只需根据其实际载荷变化范围,从阀芯备选库中选择适宜的阀芯,从而以较少的阀芯完成与各类作业载荷的匹配。

挖掘机多路阀的载荷分类设计将作业载荷可能变化范围离散为若干类别,分别设计对应的阀芯,从而将不确定性载荷的阀芯设计问题转化为各类别确定性载荷的阀芯设计,将整机作业载荷与多路阀阀芯拓扑的匹配问题转化为阀芯备选库中的选型,故有助于实现整机作业载荷与多路阀阀芯的快速匹配。

4 回转联阀芯分类设计

4.1 设计变量

以试验样机回转联阀芯为对象,验证阀芯分类设计的适用性。回转联阀芯节流槽结构如图 12 所示,其中,半径和长度尺寸中的下标 a 或 b 分别代表



R_{1a} 、 R_{1b} —半圆孔半径; R_{2a} 、 R_{2b} —U 形孔半径; R_{3a} 、 R_{3b} —圆孔半径;
 R_4 —斜坡 U 形槽半径; R_5 —半圆槽半径; L_{1a} 、 L_{1b} —U 形孔长度;
 L_{2a} 、 L_{2b} —圆孔边缘到阀芯台阶处的距离; L_3 —斜坡 U 形槽长度;
 h_a —工作阀口 A 各节流孔深度; h_b —工作阀口 B 各节流孔深度;
 h_2 —斜坡 U 形槽深度; h_3 —半圆槽深度。

图 12 回转联阀芯节流槽结构示意图

工作阀口 A 和 B 的节流孔。
上述 17 个结构参数中, L_{2b} 、 L_3 、 L_{2a} 的改变会直接影响阀口开度和阀芯位移的关系,改变后将造成某阀口提前或延迟关闭,故不将它们作为设计变量,剩余 14 个结构参数作为设计变量,设计变量约束范围如表 4 所示。

表 4 设计变量的约束范围							mm
设计变量	R_{1b}	R_{2b}	R_{3b}	L_{1b}	h_b	R_4	R_5
最小值	1.6	1.2	0.9	3.2	1.5	0.9	1.2
最大值	2.8	2.4	1.8	4.4	3.5	2.1	2.8
设计变量	h_2	h_3	R_{1a}	R_{2a}	R_{3a}	L_{1a}	h_a
最小值	1.5	0.9	1.6	1.2	0.9	3.2	1.5
最大值	3.5	2.0	2.8	2.4	1.8	4.4	3.5

4.2 目标函数

参考文献[4],以多工况综合性能评价作为优化设计的目标函数,将阀口不同开度分为微动段、比例调速段和全开口段,分别以流量分辨率 f_1 、线性度 f_2 和节流能量损失 f_3 作为评价指标,表达式如下

$$f_1 = \frac{q_1}{l_1} \tag{5}$$

$$f_2 = \frac{\max(|q_i - y_i|)}{q_{\max}} \tag{6}$$

$$f_3 = 1 - \frac{p_{\text{out}} q_{\text{out}}}{p_{\text{in}} q_{\text{in}}} \tag{7}$$

式中: q_1 、 l_1 分别为微动段的最大流量和最大阀口开度; q_i 为比例调速段中不同阀口开度下的工作口流量; y_i 为 q_i 的拟合值; $q_{\max}$ 为比例调速段最大工作口流量; p_{out} 、 q_{out} 分别为全开口时工作口的压力和流量; p_{in} 、 q_{in} 分别为全开口时进油口的压力和流量。图 13 为不同阀口开度时的稳态工作口流量。

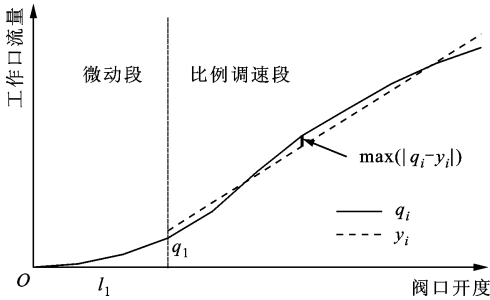


图 13 不同阀口开度时的稳态工作口流量

在微动段,工作口流量随阀口开度缓慢变化,在比例调速段,工作口流量随阀口开度增大而近似线性增加。流量分辨率表示微动段的斜率, f_1 越小,则工作口流量变化越平缓,流量控制精度越高,微动性能越好。线性度表示工作口流量与拟合直线间的

最大偏差与最大流量的百分比, f_2 越小, 则线性度误差越小, 比例调速性能越好。 f_3 表示多路阀节流口的能量消耗率, f_3 越小, 则能量浪费越少。

综上, 设定权重系数构造目标函数为式(8), 将多目标优化问题转化为单目标优化。

$$F = \alpha_1 f'_1 + \alpha_2 f'_2 + \alpha_3 f'_3 \tag{8}$$

式中: f'_1 、 f'_2 、 f'_3 由 f_1 、 f_2 、 f_3 归一化处理后得到, 以避免具有不同量纲及数量的 f_1 、 f_2 、 f_3 经计算机浮点运算产生舍入误差; α_1 、 α_2 、 α_3 为权重系数。

实际应用中, 权重系数的选取与机种、作业条件等关系密切, 应根据不同应用场景对各性能的不同需求确定权重系数。 本文采用线性加权法中的 α 方法确定权重系数。

权重系数由下式确定

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 f'_{11} + \alpha_2 f'_{21} + \alpha_3 f'_{31} &= c \\ \alpha_1 f'_{12} + \alpha_2 f'_{22} + \alpha_3 f'_{32} &= c \\ \alpha_1 f'_{13} + \alpha_2 f'_{23} + \alpha_3 f'_{33} &= c \\ \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 &= 1 \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

式中: f'_{11} 为 f'_1 的最小值; f'_{21} 和 f'_{31} 为 f'_1 取最小值时对应的 f'_2 和 f'_3 , 其他变量同理可得; c 为任意常数。 由式(9)可得, 权重系数 $\alpha_1 = 0.46$, $\alpha_2 = 0.22$, $\alpha_3 = 0.32$ 。

4.3 设计结果

在 3.1 节已得出 J 的参数变化域, 将其简单离散为 3 个类别, 表 5 为 J 的参数变化域载荷分类。

表 5 J 的参数变化域载荷分类

类别	$J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	
	空斗回转	满斗回转
i	50 000	15 000
ii	100 00	200 00
iii	150 00	230 00

本文仅做简单演示, 根据实际需要, 可划分不同的类别。 以式(8)为目标函数, 分别以类别 i、ii、iii 作为边界条件, 在设计变量的约束范围内进行优化设计, 表 6 为各类别对应阀芯 I、II、III 的设计结果。

如第 2 节所述, 试验样机空斗回转及满斗回转 J 分别为 108 651、230 881 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 故选择类别 ii 对应阀芯。 以试验样机回转载荷为边界条件, 阀芯 II 及原始阀芯各性能评价指标如表 7 所示。 两阀芯阀口开度-工作口流量特性的对比如图 14 所示。

对比表 7 中数据可知, 相比原始阀芯, 阀芯 II 各项性能评价指标均有下降。 而从图 14 可以看出, 在微动段阀芯 II 工作口流量变化更平缓, 流量控制精

表 6 各类别对应阀芯设计结果 mm

阀芯	R_{1b}	R_{2b}	R_{3b}	L_{1b}	h_b	R_4	R_5
原始阀芯	2.00	2.00	1.45	4.00	2.50	1.48	2.0
阀芯 I	2.65	2.29	0.95	3.45	2.36	1.85	1.89
阀芯 II	2.79	2.28	0.92	3.82	2.14	1.79	1.99
阀芯 III	2.73	2.13	0.91	3.65	2.50	1.58	1.97

阀芯	h_2	h_3	R_{1a}	R_{2a}	R_{3a}	L_{1a}	h_a
原始阀芯	2.50	1.42	2.00	1.50	1.45	4.50	2.50
阀芯 I	2.30	1.97	1.76	1.32	1.13	3.84	3.42
阀芯 II	2.45	1.72	1.66	1.23	0.97	4.02	3.48
阀芯 III	3.07	2.00	1.61	1.35	0.95	4.06	3.29

表 7 阀芯 II 及原始阀芯各性能评价指标

阀芯	f'_1	f'_2	f'_3	F
原始阀芯	0.377 0	0.292 4	0.636 5	0.442 8
阀芯 II	0.211 9	0.178 6	0.569 1	0.320 6

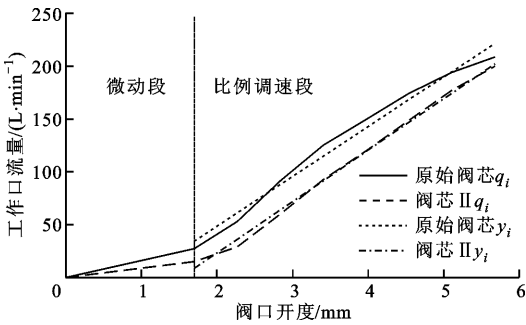


图 14 两阀芯阀口开度-工作口流量特性的对比

度更高; 而在比例调速段, 阀芯 II 线性度更好, 具有更好的比例调速性能。

综上, 对于试验样机, 阀芯 II 相比原始阀芯更加适应作业载荷, 具有更好的性能。

5 结 论

本文提出了挖掘机多路阀的载荷分类设计, 可实现整机载荷与多路阀阀芯的快速匹配, 主要结论如下:

- (1) 挖掘机作业载荷可分解为趋势项和随机项, 趋势项可通过趋势项负载参数化模型表达;
- (2) 具有显著影响的负载模型参数可反映机体尺寸、作业条件等因素对作业载荷的影响, 负载模型参数变化域可表达作业载荷的变化范围;
- (3) 挖掘机多路阀的载荷分类设计可实现整机作业载荷与多路阀阀芯的快速匹配, 有助于实现不同整机需求的多路阀快速响应设计, 对提升整机性

能、减少调试时间具有一定意义。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国筑路机械学术研究综述 • 2018 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(6): 1-164.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's road construction machinery research progress: 2018 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(6): 1-164.
- [2] 姜涛, 黄伟, 王安麟. 多路换向阀耦合阀口节流结构拓扑设计 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(8): 26-31.
JIANG Tao, HUANG Wei, WANG Anlin. Topological design method for coupling valve throttle structure of multi-way directional valves [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(8): 26-31.
- [3] 王安麟, 况龙, 张小路. 多路阀耦合节流槽结构的拓扑变量空间优化 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(6): 103-109.
WANG Anlin, KUANG Long, ZHANG Xiaolu. Optimization of topological variables space for multi-way valve coupling groove structure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(6): 103-109.
- [4] 王安麟, 唐姜炜, 张小路. 面向多路阀结构拓扑设计的多工况综合性能评价 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 9-16.
WANG Anlin, TANG Jiangwei, ZHANG Xiaolu. Comprehensive performance evaluation of multi-way valve for topological design of groove structure [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(9): 9-16.
- [5] LISOWSKI E, CZYZCKI W, RAJDA J. Three dimensional CFD analysis and experimental test of flow force acting on the spool of solenoid operated directional control valve [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 70: 220-229.
- [6] SIMIC M, HERAKOVLC N. Reduction of the flow forces in a small hydraulic seat valve as alternative approach to improve the valve characteristics [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 708-718.
- [7] BARBARYAN T, HOSEINZADEH S, HEYNS P S, et al. Developing a low-fluid pressure safety valve design through a numerical analysis approach [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2020, 30(3): 1427-1440.
- [8] WANG Jixin, ZHANG Jianhua, LIANG Yunlong, et al. A cyclic simulation approach for the generation of the non-stationary load histories of engineering vehicles [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(5): 1547-1554.
- [9] WANG Jixin, LI Yan, JIANG Zhuji. Non-parametric load extrapolation based on load extension for semi-axle of wheel loader [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(3): 1-12.
- [10] 陈鸿彬. 挖掘机液压系统压力载荷谱编制方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017: 1-8.
- [11] 王安麟, 王坚, 付志翼. 挖掘机虚拟载荷下换向阀开启过程的液动力分析 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(8): 1170-1174.
WANG Anlin, WANG Jian, FU Zhiyi. Analysis of flow forces during multi-valve's opening under excavator virtual load [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(8): 1170-1174.
- [12] 孙祖望, 张义甫, 郭德虎. 推土机动态性能试验的非平稳随机数据模型和处理方法 [J]. 工程机械, 1988, 19(10): 22-28, 52.
SUN Zuwang, ZHANG Yifu, GUO Dehu. Non-stable random data model of dynamic performance testing for bulldozers and data processing procedure [J]. Construction Machinery and Equipment, 1988, 19(10): 22-28.
- [13] 王安麟, 石世宁, 李晓田. 挖掘机动态性能试验及其数据的小波处理方法 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 115-123.
WANG Anlin, SHI Shining, LI Xiaotian. Dynamic performance test and wavelet processing method for non-stationary random data of hydraulic excavator [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(1): 115-123.
- [14] 姜涛, 付志翼, 王安麟. 一种非平稳随机循环工况下的参数化载荷模型 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 845-850.
JIANG Tao, FU Zhiyi, WANG Anlin. Parameterized load model under non-stationary random cyclic conditions [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(6): 845-850.
- [15] 王安麟, 石世宁. 基于响应面法的中型挖掘机模型参数标定 [J]. 机械设计, 2013, 30(7): 59-63.
WANG Anlin, SHI Shining. Parameter calibration for medium excavator model based on response surface methodology [J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(7): 59-63.
- [16] LEE S, CHANG P. Modeling of a hydraulic excavator based on bond graph method and its parameter estimation [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(1): 195-204.

- [17] CASOLI P, ANTHONY A. Gray box modeling of an excavator's variable displacement hydraulic pump for fast simulation of excavation cycles [J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(2): 483-494.
- [18] LI Xiaotian, WANG Anlin. Definitions of causality in bond graph model for efficient simulation mechanism [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 80(6): 112-124.
- [19] 江涛, 李维嘉, 彭勇, 等. 起重机液压换向阀建模及仿真研究 [J]. *计算机仿真*, 2014, 31(3): 261-265.
JIANG Tao, LI Weijia, PENG Yong, et al. Modeling and simulation study on hydraulic directional valve of crane [J]. *Computer Simulation*, 2014, 31(3): 261-265.
- [20] 罗艳蕾, 李渊, 邱雪, 等. 基于 AMESim 的挖掘机负荷传感器多路阀建模和仿真 [J]. *机床与液压*, 2012, 40(3): 142-144.
LUO Yanlei, LI Yuan, QIU Xue, et al. Modeling and simulation of hydraulic excavator load-sensing multi-passage valve based on AMESim [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2012, 40(3): 142-144.
- [21] IHN S C, JAE Y J. A study on flow control valve characteristics in an oil hydraulic vane pump for power steering systems [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29(6): 2357-2363.
- [22] 王安麟, 况龙, 张小路. 换向滑阀组合节流槽流量系数研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(2): 110-117.
WANG Anlin, KUANG Long, ZHANG Xiaolu. A study on flow coefficient of combined throttling groove in spool valves [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(2): 110-117.
- [23] 官通, 郭勇, 尹升, 等. 小型液压挖掘机动臂联阀口的流量特性 [J]. *机械设计与研究*, 2014, 30(2): 115-118.
GUAN Tong, GUO Yong, YIN Sheng, et al. The research on flow characteristic of orifice in the boom circuit of mini-hydraulic excavator [J]. *Machine Design and Research*, 2014, 30(2): 115-118.
- [24] VALDES J R, RODROGUEZ J M, SAUMELL J, et al. A methodology for the parametric modelling of the flow coefficients and flow rate in hydraulic valves [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 88: 598-611.
- [25] MOHAN B, YANG W, CHOU S K. Development of an accurate cavitation coupled spray model for diesel engine simulation [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 77: 269-277.
- [26] 陈源流, 王安麟, 张小路. 多路阀阀芯拓扑形态设计的流量数参数模型 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(5): 149-156.
CHEN Yuanliu, WANG Anlin, ZHANG Xiaolu. Flow-number parametric model for multiway valve spool topological design [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(5): 149-156.
- [27] 辛益军. 方差分析与实验设计 [M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2001: 3-4.
- [28] 同济大学. 单斗液压挖掘机 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 41-49.

[本刊相关文献链接]

- 李晓祥, 王安麟, 樊旭灿, 等. 面向离合器接合过程的比例电磁阀动态特性模型与设计. 2020, 54(5): 46-52. [doi:10.7652/xjtuxb202005007]
- 杨泰春, 陶建峰, 覃程锦, 等. 采用支持向量机的非对称阀控液压缸模型预测控制. 2020, 54(1): 93-100. [doi:10.7652/xjtuxb202001012]
- 陈源流, 王安麟, 张小路. 多路阀阀芯拓扑形态设计的流量数参数模型. 2020, 54(5): 149-156. [doi:10.7652/xjtuxb201905020]
- 陆倩倩, 阮健, 李胜, 等. 沉割槽对滑阀阀芯径向卡紧力的影响. 2018, 52(6): 76-83. [doi:10.7652/xjtuxb201806012]
- 刘瑞春, 张怀亮, 李卫. 基础振动下电磁换向阀压力流量特性研究. 2017, 51(11): 79-86. [doi:10.7652/xjtuxb201711012]
- 姜涛, 黄伟, 王安麟. 多路阀阀芯节流槽拓扑结构组合的神经网络模型. 2016, 50(6): 36-41. [doi:10.7652/xjtuxb201606006]
- 姜涛, 夏明杰, 王安麟. 液压挖掘机换向阀微动特性的健壮性评价. 2016, 50(2): 118-123. [doi:10.7652/xjtuxb201602020]
- 闵为, 冀宏, 王峥嵘, 等. 单级压力调节阀的阻尼孔射流响应特性分析. 2014, 48(6): 80-85. [doi:10.7652/xjtuxb201406014]
- 俞珏, 庄健, 于德弘. 模糊抗饱和补偿器的设计及应用. 2013, 47(1): 68-73. [doi:10.7652/xjtuxb201301014]

(编辑 武红江)