

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.017

# 林区智能作业车臂架动力学建模及优化设计

翁天浩, 邓旻涯\*, 李科军

(中南林业科技大学 材料科学与工程学院, 长沙 410004)

**摘要:**针对林区作业环境复杂等问题,设计一款面向林区作业的林区智能作业车。建立作业车臂架系统的运动学和动力学模型并进行三维软件仿真和优化设计。首先,采用解析几何法与拉格朗日动力学方程结合,建立臂架系统的动力学模型。其次,利用软件NX1899的机构动力学仿真工具Simcenter 3D Motion对臂架系统进行分析,得到臂架系统各油缸驱动力和行程随时间变化曲线。最后,基于响应面BBD(Box-Behnken design)设计响应面试验,对变幅油缸前后两铰点位置进行优化。结果表明,在油缸行程仅增加0.00004%情况下,油缸驱动力减小2.33%,BBD所提供的试验设计可靠。因此,该动力学模型可为油缸选型和油缸受力优化提供理论依据。

**关键词:**林区智能作业车;臂架系统;动力学建模;油缸驱动力;优化

中图分类号:S776.34

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)02-0159-09

## Dynamic Modeling and Optimization Design of the Boom of Intelligent Work Vehicles in Forest Areas

WENG Tianhao, DENG Minya\*, LI Kejun

(College of Materials Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:**To address the complex working environment in forest areas, a forest intelligent work vehicle was designed for forest operations. The kinematic and dynamic models of the boom system of the work vehicle was established and the 3D software simulation and optimization design were carried out. Firstly, a dynamic model of the boom system was established by combining analytical geometry with Lagrangian dynamic equations. Secondly, the mechanism dynamics simulation tool Simcenter 3D Motion of software NX1899 was used to analyze the boom system, and the time-dependent curves of the driving force and stroke of each cylinder in the boom system was obtained. Finally, response surface experiments were designed based on Box Behnken design (BBD) to optimize the positions of the front and rear hinge points of the variable amplitude oil cylinder. The results showed that when the cylinder stroke only increased by 0.00004%, the driving force of the cylinder decreased by 2.33%, and the experimental design provided by BBD was reliable. Therefore, this dynamic model can provide a theoretical basis for cylinder selection and force optimization of the cylinder.

**Keywords:**Intelligent work vehicle in forest areas; boom system; dynamic modeling; cylinder driving force; optimization

## 0 引言

现代林区作业包括林木集材、林木情况监测和林木病虫害防治等<sup>[1-4]</sup>。人工作业存在效率低、劳

动强度大和危险系数高等问题,采用机械手结合其他智能设备技术后可显著提高作业质量和进度。林区智能作业车由于其工作时小巧灵敏、适应能力强等优点广泛应用于林区作业场景。

臂架系统是林区智能作业车的关键部件之一,其设计直接影响作业车的工作性能<sup>[5-6]</sup>。

在作业车臂架动力学模型建立中,La等<sup>[7]</sup>采用机器人运动学建模和牛顿法得到动力学模型。蒙树立等<sup>[8]</sup>采用柔性多体动力学理论和拉格朗日方程得到动力学模型。郑文等<sup>[9]</sup>采用平面机构运动分析和虚功原理法得到动力学模型。本研究在建立作业车臂架动力学模型时,采用解析几何法与拉格朗日动力学方程建立动力学解析式。

在作业车臂架动力学仿真分析中,Mateo等<sup>[10]</sup>运用Labview编程制作仿真工具,进行仿真。沈嵘

收稿日期:2023-08-27

基金项目:湖南省自然科学基金面上项目(2022JJ31015)。

第一作者简介:翁天浩,硕士研究生。研究方向为森林生态采伐与工程装备。E-mail: 20211200195@csuft.edu.cn

\*通信作者:邓旻涯,硕士,副教授。研究方向为林业装备及工程装备的结构优化。E-mail: diumy@163.com

引文格式:翁天浩,邓旻涯,李科军,等.林区智能作业车臂架动力学建模及优化设计[J].森林工程,2024,40(2):159-167.

WENG T H, DENG M Y, LI K J, et al. Dynamic modeling and optimization design of the boom of intelligent work vehicles in forest areas[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):159-167.

枫等<sup>[11]</sup>使用软件 Solidworks 建立三维模型,导入 ADAMS 软件,进行动力学仿真。胡仕成等<sup>[12]</sup>使用软件 PRO/E 建立三维模型,运用其内部机构动力学仿真工具,进行动力学仿真。本研究在作业车臂架动力学仿真分析时,选用动力学仿真软件 NX/Simcenter 3D Motion,选择一个工况进行动力学仿真分析,得到该工况下各驱动油缸驱动力与行程随时间变化情况。分析可知变幅油缸受力情况最为复杂,研究意义明显,为后续变幅油缸铰点位置优化提供理论依据。

在作业车臂架铰点位置优化中,舒志鹏等<sup>[13]</sup>基于信噪比的满意度函数对得到的 Pareto 优化解集进行决策。高崇仁等<sup>[14]</sup>运用拉丁超立方抽样试验法和 Kriging 插值法建立响应面模型对优化结果进行选择。本研究结合动力学模型,基于响应面 BBD (Box-Behnken design) 设计响应面试验,以变幅油缸前后两铰点位置为设计变量,以油缸最大驱动力值和油缸最大行程值经权重计算所拟定的“综合系数”最低值为优化目标。结果表明,BBD 所提供的试验设计可靠。因此,该动力学模型为油缸选型和油缸受力优化提供了理论依据。

## 1 作业车的基本结构

作业车基本结构如图 1 所示,主要由履带、转台、升降臂、铰支座、伸缩臂、飞臂、液缸和夹具总成等组成。

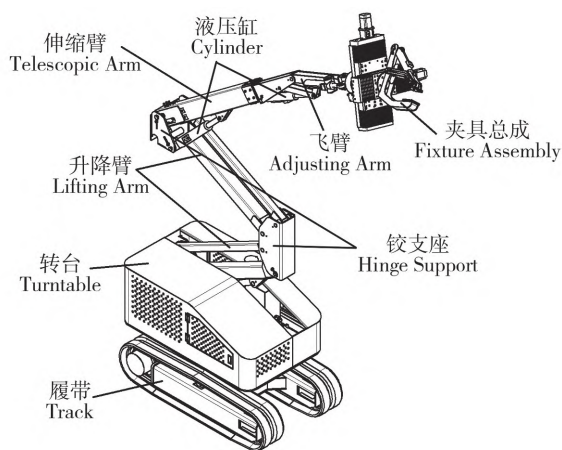


图 1 一种林区智能作业车

Fig. 1 An intelligent work vehicle in forest areas

本研究主要针对该作业车的臂架部分,即将末端夹具总成与飞臂视为同一杆件。不考虑回转台的转动与作业车的移动,视转台与履带为固定基座

杆件。

为简化运算,忽略铰点摩擦力,油缸等效为活塞杆沿着缸筒运动的简易移动副,内外两节伸缩臂分别与伸缩油缸活塞杆和伸缩油缸缸筒铰接,伸缩臂内臂与伸缩油缸活塞杆视为同一构件,伸缩臂外臂与伸缩油缸缸筒视为同一构件。该臂架系统的自由度( $f$ )为

$$f = 3N - 2P_L - P_H = 3 \times 18 - 2 \times (19 + 4 + 2) - 0 = 4. \quad (1)$$

式中: $N$ 为杆件数(活动构件数为 18); $P_L$ 为低副数(旋转副数量为 19;移动副数量为 4;因在飞臂处下方存在一四连杆机构,即复合铰链数量为 1,相当于 2 个低副); $P_H$ 为高副数(高副数量为 0)。

因该机构原动件为起升、变幅、伸缩和调平 4 个油缸,所以该机构满足具有确定相对运动的条件<sup>[15]</sup>。

## 2 臂架数学模型建立

牛顿法、拉格朗日法和虚功原理法是 3 种最常用的动力学建模方法。在本研究中,使用解析几何法与拉格朗日方程建立数学模型<sup>[16]</sup>。臂架系统的结构如图 2 所示,图中字母的意义会在下文中逐一介绍。

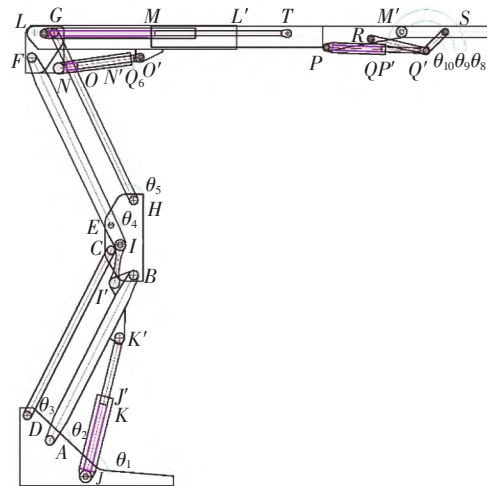


图 2 臂架系统结构简图

Fig. 2 Structural diagram of boom system

该臂架系统的参数和部分常量值见表 1。

根据平面解析几何计算,可求得杆件转角  $\theta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 11$ ) 与油缸行程  $b_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 4$ ) 的函数关系,即

$$\theta_i = f(b_1, b_2, b_3, b_4), i = 1, 2, \dots, 11. \quad (2)$$

式中: $b_1$ 为起升油缸行程; $b_2$ 为变幅油缸行程; $b_3$ 为

伸缩油缸行程; $b_4$  为调平油缸行程。

表 1 臂架系统参数

Tab. 1 Boom system parameters

参数 Parameters	长度/mm Length	质量/kg Quality
连杆 1(AB) Connecting rod 1 (AB)	1 200	28. 86
连杆 2(CD) Connecting rod 2 (CD)	1 200	12. 76
连杆 3(EF) Connecting rod 3 (EF)	1 200	25. 53
连杆 4(GH) Connecting rod 4 (GH)	1 200	12. 76
中间连接杆(II') Intermediate connecting rod (II')	249	
铰支座 1 Hinge support 1		
铰支座 2 Hinge support 2		
起升油缸缸筒(JJ') Lifting cylinder barrel (JJ')	532	20. 04
起升油缸活塞杆(KK') Lifting cylinder piston rod (KK')	520	10. 83
伸缩臂外臂+缸筒(LL') Telescopicarm outer arm and barrel (LL')	1 345	48. 66
伸缩臂内臂+活塞杆(MM') Telescopicarm inner arm and piston rod (MM')	1 670	34. 45
飞臂(M'S) Fly jib (M'S)	290	60. 46
四连杆 1(RQ') Fourbar linkage 1 (RQ')	375	3. 25
四连杆 2(SQ') Fourbar linkage 2 (SQ')	178	1. 51
调平油缸缸筒(PP') Leveling cylinder barrel (PP')	395	5. 36
调平油缸活塞杆(QQ') Levelingcylinder piston rod (QQ')	345	2. 75
变幅油缸缸筒(NN') Luffing cylinder barrel (NN')	491	10. 96
变幅油缸活塞杆(OO') Luffing cylinder piston rod (OO')	470	5. 65

拉格朗日函数(L)被定义为机械系统的总动能

$$F_j = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{b}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial b_j} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{b}_j} \right) + \sum_{i=1}^{11} \left[ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_i} \right) \cdot \frac{\partial \dot{\theta}_i}{\partial \dot{b}_j} + \frac{\partial K}{\partial \theta_i} \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \dot{\theta}_i}{\partial \dot{b}_j} \right) \right] - \left( \frac{\partial K}{\partial b_j} - \frac{\partial P}{\partial b_j} \right) - \sum_{i=1}^{11} \left( \frac{\partial K}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial \theta_i}{\partial b_j} - \frac{\partial P}{\partial \theta_i} \cdot \frac{\partial \theta_i}{\partial b_j} \right) \quad (7)$$

式(7)即应用拉格朗日法所建立出的臂架动力学模型。从应用拉格朗日法所建立的动力学模型可看出,油缸驱动力的大小与油缸行程和各杆件转

(K)和总势能(P)之间的差<sup>[17]</sup>,即

$$L = K - P = \sum_{k=1}^{15} K_k - \sum_{k=1}^{15} P_k = \sum_{k=1}^{15} \left( \frac{1}{2} m_k v_{ck}^2 + \frac{1}{2} I_{ck} \dot{\theta}_k^2 \right) - \sum_{k=1}^{15} m_k g y_{ck} = \sum_{k=1}^{15} \left[ \frac{1}{2} m_k (\dot{x}_{ck}^2 + \dot{y}_{ck}^2) + \frac{1}{2} I_{ck} \dot{\theta}_k^2 \right] - \sum_{k=1}^{15} m_k g y_{ck} \quad (3)$$

式中: $x_{ck}$ 为杆件k的质心横坐标; $y_{ck}$ 为杆件k的质心纵坐标; $m_k$ 为杆件k的质量; $v_{ck}$ 为杆件k的运动速度; $g$ 为重力加速度; $I_{ck}$ 为杆件k的转动惯量。根据图2,得各杆件质心位置坐标

$$\left. \begin{aligned} x_{ck} &= x_k \left( \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9, \right. \\ &\quad \left. \theta_{10}, \theta_{11}, b_1, b_2, b_3, b_4 \right), \\ y_{ck} &= y_k \left( \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \right. \\ &\quad \left. \theta_9, \theta_{10}, \theta_{11}, b_1, b_2, b_3, b_4 \right), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$k = 1, 2, \dots, 15$ 。

式中: $\theta_1$ 为JK'转角; $\theta_2$ 为AB转角; $\theta_3$ 为CD转角; $\theta_4$ 为EF转角; $\theta_5$ 为GH转角; $\theta_6$ 为NO'转角; $\theta_7$ 为LM'转角; $\theta_8$ 为PQ'转角; $\theta_9$ 为RQ'转角; $\theta_{10}$ 为SQ'转角; $\theta_{11}$ 为M'S转角。

将式(2)代入式(4),并将式(4)对时间求导带入式(3),得

$$\left. \begin{aligned} L(b_1) &= L \left( b_1, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \right. \\ &\quad \left. \theta_8, \theta_9, \theta_{10}, \theta_{11} \right), \\ L(b_2) &= L(b_2, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9, \theta_{10}, \theta_{11}), \\ L(b_3) &= L(b_3), \\ L(b_4) &= L(b_4, \theta_8, \theta_9, \theta_{10}, \theta_{11}). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由拉格朗日动力学方程,可知

$$F_j = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{b}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial b_j} \quad (6)$$

式中: $t$ 为时间; $F_j$ 就是杆件j的力。

将式(5)代入式(6),简化求得油缸驱动力解析式

角息息相关,同时臂架结构的设计又与油缸最大行程和各杆件转角有着密切联系,此动力学模型可为后续臂架结构设计提供理论基础。

### 3 臂架模型仿真

根据所建立的动力学模型,利用软件 NX1899 建立臂架三维实体模型,应用其动力学仿真工具 Simcenter 3D Motion 进行仿真。

#### 3.1 臂架仿真过程

作业车的工作过程是将地面上目标物体夹取并将其运送至目标位置。作业车需完成调平、起升、变幅和伸缩等运动,如图 3 所示。

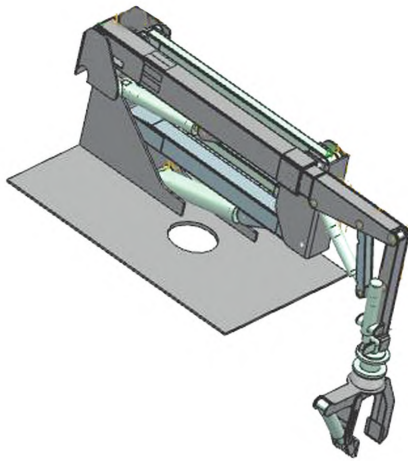


图 3 臂架初始状态示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the initial state of the boom

首先,先定义运动体,设置运动副。运动副设置情况见表 3。其次,定义驱动副及驱动函数。驱动副即为 4 个油缸所对应的 4 个移动副,作业车具体运动步骤如图 4 所示。驱动函数则按照以下运动步骤拟定:1)调平油缸驱动,带动飞臂运动,使夹具处于水平状态;2)起升油缸驱动,带动升降臂运动,使得夹具运动到目标下方附近高度。即连杆 1 与水平方向夹角  $60^\circ$ ;3)变幅油缸与调平油缸联合驱动,即变幅油缸伸出的同时调平油缸缩回。使得夹具始终处于水平上升状态,微调夹具运动到目标准确高度。即伸缩臂与水平方向夹角  $50^\circ$ ;4)伸缩油缸驱动,带动伸缩臂运动,使得夹具运动到目标位置。

根据运动学解析式,拟定末端工作装置位置,通过逆运动学计算得知各臂架转动角度,再拟定各步骤运动时间,继而完成驱动函数。

#### 3.2 臂架仿真分析

为验证作业车臂架动力学模型的正确性,在工况、初始值和各参数相同的前提下,根据油缸行程解析式(2)及油缸驱动力解析式(7),计算得到各油

表 3 运动副设置情况

Tab. 3 Setting of the kinematic pair

构件 1 Member 1	构件 2 Member 1	运动副类型 Type of kinematic pair
转台 Turn table	起升油缸缸筒	旋转副
起升油缸活塞杆 Lifting cylinder piston rod	连杆 1	旋转副
转台 Turn table	连杆 1	旋转副
转台 Turn table	连杆 2	旋转副
连杆 1 Connecting rod 1	铰支座 1	旋转副
连杆 2 Connecting rod 2	铰支座 1	旋转副
连杆 3 Connecting rod 3	铰支座 1	旋转副
连杆 4 Connecting rod 4	铰支座 1	旋转副
连杆 1 Connecting rod 1	中间连接杆	旋转副
中间连接杆 Intermediate connecting rod	连杆 3	旋转副
连杆 3 Connecting rod 3	铰支座 2	旋转副
连杆 4 Connecting rod 4	铰支座 2	旋转副
铰支座 2 Hinge support 2	变幅油缸缸筒	旋转副
铰支座 2 Hinge support 2	伸缩臂外臂+缸筒	旋转副
变幅油缸活塞杆 Luffing cylinder piston rod	伸缩臂外臂+缸筒	旋转副
伸缩臂内臂+活塞杆 Telescopic arm inner arm and piston rod	飞臂	旋转副
伸缩臂内臂+活塞杆 Telescopic arm inner arm and piston rod	四连杆 1	旋转副
伸缩臂内臂+活塞杆 Telescopic arm inner arm and piston rod	调平油缸缸筒	旋转副
调平油缸活塞杆 Leveling cylinder piston rod	四连杆 1	旋转副
四连杆 1 Fourbar linkage 1	四连杆 2	旋转副
四连杆 2 Fourbar linkage 2	飞臂	旋转副
起升油缸缸筒 Lifting cylinder barrel	起升油缸活塞杆	移动副
变幅油缸缸筒 Luffing cylinder barrel	变幅油缸活塞杆	移动副
伸缩臂外臂+缸筒 Telescopic arm outer arm and barrel	伸缩臂内臂+活塞杆	移动副
调平油缸缸筒 Leveling cylinder barrel	调平油缸活塞杆	移动副

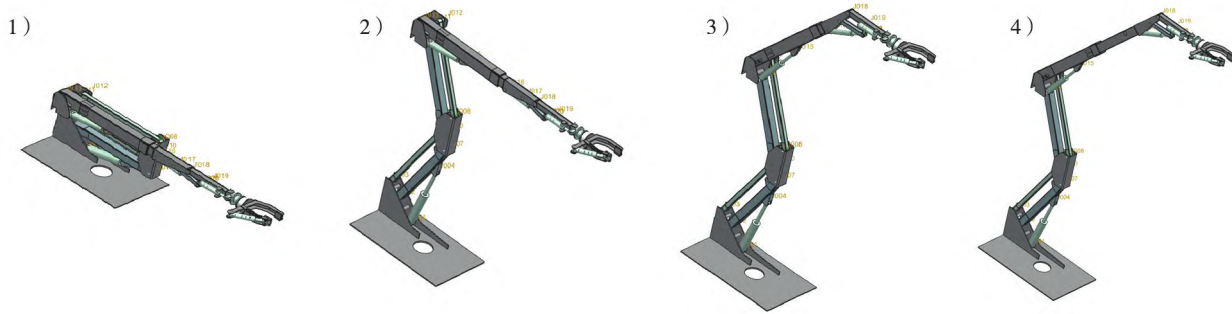


图 4 仿真各步骤示意图

Fig. 4 Schematic diagram of simulation steps

缸行程及驱动力随时间变化的值,并同时用 NX1899 建立好的三维模型运用其内部机构动力学仿真工具,进行动力学仿真。分析可知,动力学模型所得到的结果与 NX 运动仿真所得到的结果基本吻合。结果如图 5 和图 6 所示。

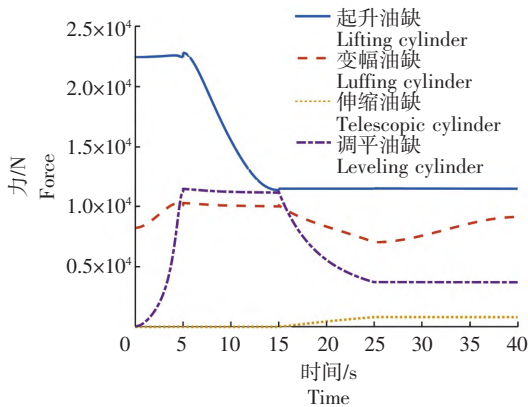


图 5 各油缸驱动力随时间变化曲线

Fig. 5 Curve of force of each oil cylinder over time

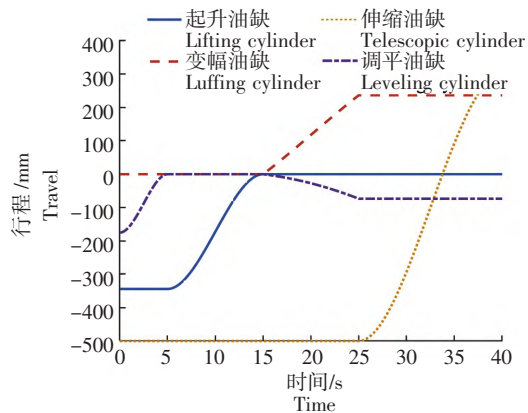


图 6 各油缸行程随时间变化曲线

Fig. 6 Curve of travel of each oil cylinder over time

由仿真结果分析可知,在拟定工况下,变幅油缸受力情况最为复杂,在每种运动状态下均发生了受力变化,行程变化也较大,研究成果具有普遍性,故本研究仅对变幅油缸铰点位置进行优化。

#### 4 变幅油缸铰点位置优化

研究显示,减少驱动油缸的最大驱动力和行程,可以提高作业车的工作寿命。BBD 法是一种基于响应面设计理论对指定的设计点集合进行试验,得到目标函数和约束函数的响应面模型,来预测试验点响应值的方法<sup>[18]</sup>。本研究将结合上述研究得到的动力学模型与仿真结果,联合使用软件 NX1899 与 Design-Expert 12.0 分析油缸铰点位置对油缸驱动力和行程的影响。

##### 4.1 BBD 试验设计

本研究选取作业车变幅油缸前后两铰点的二维坐标  $N(X_1, Y_1)$ 、 $O'(X_2, Y_2)$  作为试验数值因子。拟定两坐标浮动范围为  $(-5, 5)$ 。选取作业车变幅机构变幅油缸驱动力和变幅油缸行程(变幅油缸活塞杆相对于变幅油缸缸筒位移)两目标值进行优化。在上述介绍的工况下,改变铰点位置,尽可能使变幅油缸驱动力最小,油缸行程也最短,以达到优化目的。

为了方便计算,拟定参数“综合系数  $Y$ ”一项。权重系数的分布为变幅油缸驱动力 60%,变幅油缸行程 40%。即  $Y$  最低者为最优解。计算公式如下。

$$Y = \left( \frac{0.6W_1}{W_{1max}} + \frac{0.4W_2}{W_{2max}} \right) \times 100\% \quad (8)$$

式中: $W_1$  为变幅油缸驱动力取值; $W_{1max}$  为变幅油缸驱动力中最大值; $W_2$  为变幅油缸行程取值; $W_{2max}$  为变幅油缸行程中最大值。

4.2 BBD 试验分析

根据 Box-Behkcn 响应面试验设计原理,得出

29 个试验方案,代入 NX1899 仿真模块进行参数化建模,设计结果见表 4。

表 4 响应面试验数据

Tab. 4 Response surface experimental data

$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	驱动力 $W_1/N$ Force $W_1$	行程 $W_2/mm$ Travel $W_2$	综合系数 $Y$ Comprehensive coefficient $Y$
570	2 666	25	2 741	10 269. 92	236. 67	98. 049
575	2 666	25	2 736	10 342. 86	236. 67	98. 462
575	2 666	30	2 731	10 384. 36	236. 67	98. 696
...						
570	2 666	30	2 736	10 311. 44	236. 67	98. 284
570	2 666	30	2 736	10 311. 44	236. 67	98. 284

采用 Design-Expert 12.0 软件对结果进行二次拟合,基于其最小二乘回归法进行数据拟合,得到综合系数  $Y$  关于设计变量的二阶响应面回归方程式为  $Y=98.28+0.2000A+1.4400B-0.0339C-0.2762D-0.0041AB+0.0017AC+0.0112AD+0.0006BC-0.0157BD-0.0021CD-0.0381A^2+0.0002B^2-0.0074C^2-0.0055D^2$ 。该回归方程  $R^2=0.9999$ 。方差分析结果见表 5。

表 5 响应面回归方程方差分析

Tab. 5 Response surface regression equation analysis of variance

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 DF	均方 Mean square	$F$	$P$
模型 Model	26.210 0	14	1.870 0	6 788.72	<0.000 1
$A-X_1$	0.480 0	1	0.480 0	1 740.50	<0.000 1
$B-Y_1$	24.790 0	1	24.790 0	89 890.23	<0.000 1
$C-X_2$	0.013 8	1	0.013 8	49.87	<0.000 1
$D-Y_2$	0.915 6	1	0.915 6	3 320.16	<0.000 1
$AB$	0.000 1	1	0.000 1	0.245 1	0.628 2
$AC$	0	1	0	0.043 1	0.838 4
$AD$	0.000 5	1	0.000 5	1.820 0	0.198 6
$BC$	$1.41 \times 10^6$	1	$1.41 \times 10^6$	0.005 1	0.944 1
$BD$	0.001 0	1	0.001 0	3.550 0	0.080 3
$CD$	0	1	0	0.066 8	0.799 8
$A^2$	0.009 4	1	0.009 4	34.140 0	<0.000 1
$B^2$	$3.55 \times 10^7$	1	$3.55 \times 10^7$	0.001 3	0.971 9
$C^2$	0.000 4	1	0.000 4	1.290 0	0.275 9
$D^2$	0.000 2	1	0.000 2	0.702 9	0.415 9
残差 Residual	0.003 9	14	0.000 3		
失拟项 Lack offit	0.003 9	10	0.000 4		
误差 Pure error	0	4	0		
总变异 Cor total	26.210 0	28			

注: $P>0.05$  表示差异不显著; $0.01<P<0.05$  表示差异性显著; $P<0.01$  表示差异极显著。

Note: $P>0.05$  means no significant difference;  $0.01<P<0.05$  means significant difference;  $P<0.01$  means extremely significant difference.

根据方差结果分析,模型整体与失拟项  $P<0.05$ ,显著,表示该试验设计是正确的。 $A、B、C、D、A^2$  5 项  $P<0.01$ ,极显著,表示是重要的模型项。余项  $P>0.05$ ,不显著,表示是不重要的模型项<sup>[19]</sup>。

4.3 BBD 试验结果

响应面优化变幅油缸两铰点位置的三维响应面如图 7 所示。

三维响应面图 7 底部的投影是一个等高线图,等高线图的形状反映这 2 个因素之间的相互作用。当底部的投影为圆形时,表明两因素交互作用不显著;当底部的投影为曲线时,表明两因素交互作用显著。根据图 7 可知投影等高线均为曲线, $X_1、X_2、Y_1、Y_2$  与综合系数  $Y$  之间交互性是显著的。

4.4 优化结果

结合 BBD 所预测最优铰点位置,代入 NX1899 中仿真,得到铰点位置优化后变幅油缸驱动力和行程变化情况如图 8 所示。

综上分析,基于 BBD 所优化铰点位置,优化前后位置对比图如图 9 所示,变幅油缸各参数前后变化情况对比见表 6。

由图 9 可知,因变幅油缸前后两铰点位置对油缸行程与油缸驱动力的交互影响明显,所以 BBD 试验设计依据前后两铰点位置坐标的因素进行交互运算所预测的铰点位置可以使油缸行程与油缸驱动力发生显著改变。

由表 6 可知,因 BBD 试验设计得到的综合系数预测值 96.553 与优化后铰点位置代入 NX1899 中仿真所得到的综合系数实际值 96.923 近似一致,认为 BBD 试验设计所得到的结果是可靠的。优化前变幅油缸最大驱动力约为 10 311.44 N,优化后变幅油缸最大驱动力约为 10 070.61 N,减小了 23.3%;

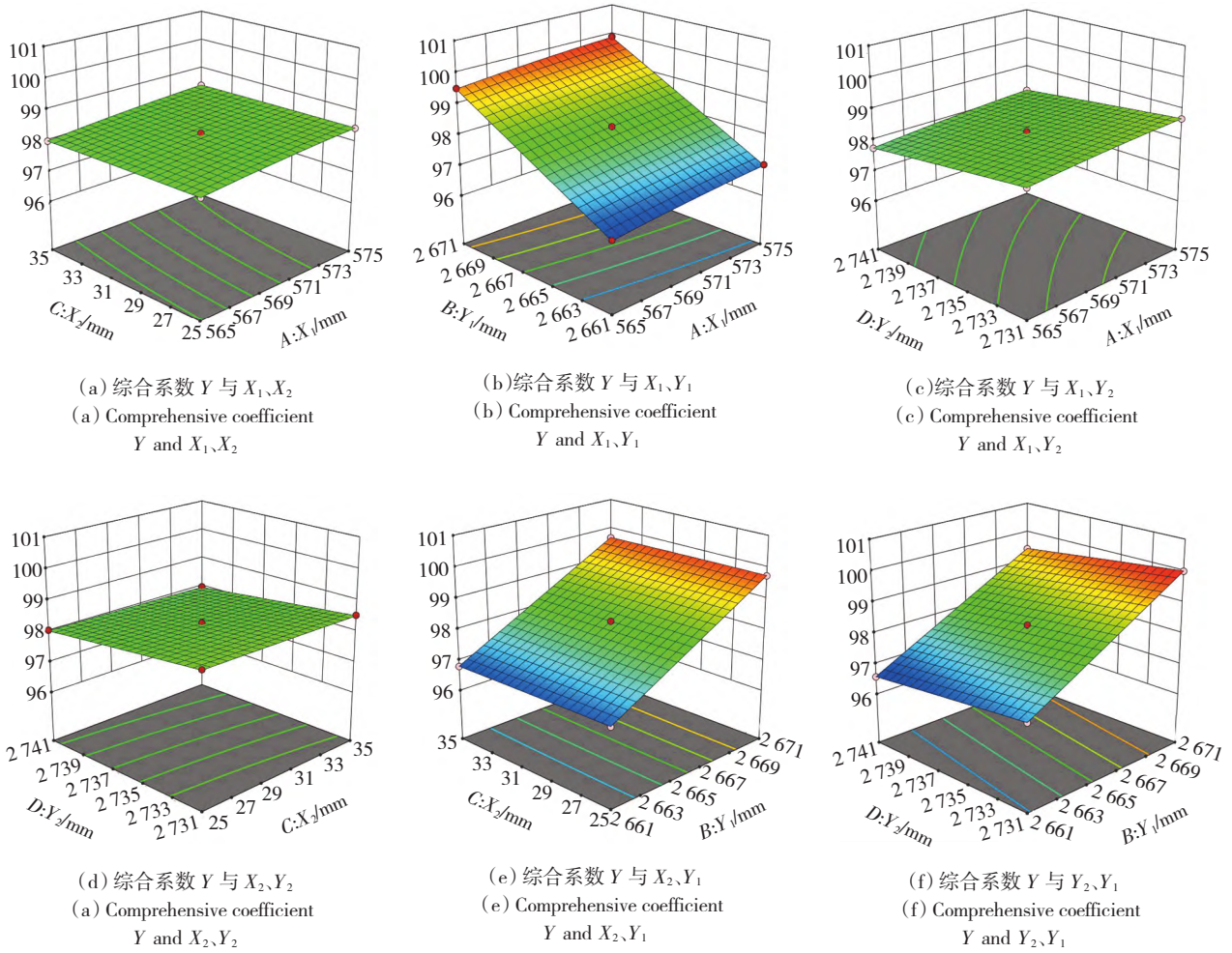


图 7 响应面试验结果

Fig. 7 Response surface experimental results

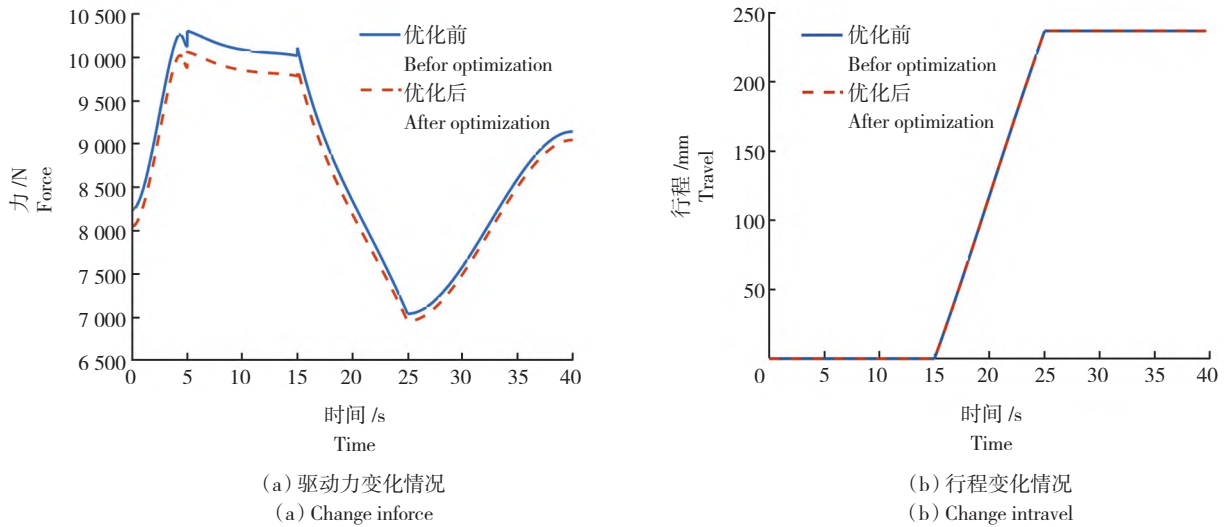


图 8 优化结果及分析

Fig. 8 Optimal results and analysis

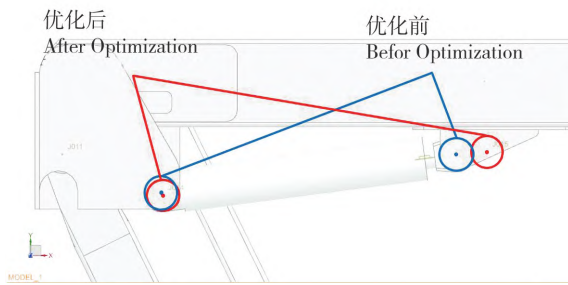


图 9 优化前后铰点位置

Fig. 9 Hinge point position before and after optimization

优化前变幅油缸最大行程 236.665 863 mm, 优化后变幅油缸最大行程 236.665 973 mm, 减小了 0.000 04%。优化后的铰点位置在变幅油缸行程仅增加 0.000 04% 情况下, 油缸驱动力减小 2.33%, 综合系数降低 1.38%, 达到优化目的。

## 5 结论

本研究针对一种林区智能作业车, 建立臂架数学模型, 并通过 NX1899 的机构动力学仿真工具

表 6 优化前后各参数对比

Tab. 6 Comparison of various parameters before and after optimization

参数 Parameter	优化前 Before optimization	优化后 After optimization	变化率(%) Rate of change
$X_1$	570	566.45	0.62
$X_2$	30	26.58	11.4
$Y_1$	2 666	2 661.38	0.17
$Y_2$	2 736	2 740.77	0.17
驱动力 $W_1/N$ Force $W_1$	10 311.441 35	10 070.610 51	2.33
行程 $W_2/mm$ Travel $W_2$	236.665 863	236.665 973	0.000 04
综合系数 $Y$ Comprehensive coefficient $Y$	预测值 Predictive value	\\	96.553
	实际值 Actual value	98.284	96.923

注: 变化率计算公式为(优化后-优化前)/优化前。

Note: The formula for calculating the rate of change is (After optimization-Before optimization) / After optimization.

Simcenter 3D Motion 对臂架系统进行仿真分析, 最后基于 BBD 设计响应面法对变幅油缸铰点位置进行优化。结果表明, 优化方法简单高效。在提高作业车工作效率的同时, 延长变幅油缸使用寿命, 为后续作业车其他油缸铰点位置优化提供理论依据。

## 【参 考 文 献】

- [1] 孙丽萍, 谭少亨, 周宏威, 等. 基于 YOLOv5 的林业有害生物检测与识别[J]. 森林工程, 2022, 38(5): 104-109, 120.  
SUN L P, TAN S H, ZHOU H W, et al. Forestry pests detection and identification based on YOLOv5[J]. Forest Engineering, 2022, 38(5): 104-109, 120.
- [2] 杨春梅, 侯玉宁, 刘九庆. 基于森林火灾数据的余火清理机器人模块化设计[J]. 森林工程, 2022, 38(2): 105-111.  
YANG C M, HOU Y N, LIU J Q. Modular design of em-

bers clearing robot based on forest fire data[J]. Forest Engineering, 2022, 38(2): 105-111.

- [3] 战丽, 张志文, 杨春梅, 等. 履带式林间剩余物集材机关键部件设计与试验研究[J]. 森林工程, 2023, 39(3): 131-139.  
ZHAN L, ZHANG Z W, YANG C M, et al. Design and experimental study on key components of crawler forest residue skidder[J]. Forest Engineering, 2023, 39(3): 131-139.
- [4] 刘永刚, 胡光辉, 陈伟, 等. 思茅松纸浆用材林初植密度与合理采伐年龄分析[J]. 西部林业科学, 2022, 51(5): 1-8.  
LIU Y G, HU G H, CHEN W, et al. Preliminary study on initial density and rational cutting age of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* pulpwood plantation[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(5): 1-8.
- [5] 沈嵘枫, 张小珍. 采伐机工作臂油缸的设计及其运动分析[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2017, 46(1): 115-120.

- SHEN R F, ZHANG X Z. Design and dynamical simulation of the harvester boom cylinder[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 46(1): 115-120.
- [6] 李世强,王霞.工业机械手自动化控制系统设计[J].自动化技术与应用,2022,41(10):1-3,14.
- LI S Q, WANG X. Design of industrial manipulator automation control system[J]. Techniques of Automation and Applications, 2022, 41(10): 1-3, 14.
- [7] LA HERA P, MORALES D O, MENDOZA-TREJO O. A study case of dynamic motion primitives as a motion planning method to automate the work of forestry cranes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 183: 106037.
- [8] 蒙树立,熊静琪,吕志刚.折叠式高空作业车臂架系统的动力学建模[J].噪声与振动控制,2012,32(4):63-67.
- MENG S L, XIONG J Q, LÜ Z G. Modeling of arm system of folding-boom aerial platform vehicle[J]. Noise and Vibration Control, 2012, 32(4): 63-67.
- [9] 郑文,许东京,周忠尚.剪叉高空平台运动学与动力学分析及铰点优化[J].建筑机械,2015(11):86-90.
- ZHENG W, XU D J, ZHOU Z S. The kinematic and dynamics analysis of scissors air-working platform and parameters optimization[J]. Construction Machinery, 2015(11): 86-90.
- [10] MATEO SANGUINO T J, ANDUJAR MARQUEZ J M. Simulation tool for teaching and learning 3D kinematics workspaces of serial robotic arms with up to 5-DOF[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2012, 20(4): 750-761.
- [11] 沈嵘枫,张小珍,林煜川,等.林业起重机工作臂起重仿真与优化[J].森林工程,2022,38(3):70-76.
- SHEN R F, ZHANG X Z, LIN Y C, et al. Simulation and optimization of working arm of forestry crane[J]. Forest Engineering, 2022, 38(3): 70-76.
- [12] 胡仕成,宋晶晶,王祥军.混凝土湿喷机臂架系统的动力学建模与分析[J].工程设计学报,2014,21(3):227-234.
- HU S C, SONG J J, WANG X J. Dynamics modeling and analysis on boom system of wet spraying machine[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2014, 21(3): 227-234.
- [13] 舒志鹏,雷正保,郭方云.飞机除冰车变幅机构铰点位置多目标优化设计[J].机械设计,2020,37(10):35-40.
- SHU Z P, LEI Z B, GUO F Y. Multi-objective optimization design of hinge-point position of the aircraft de-icing vehicle's luffing mechanism[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(10): 35-40.
- [14] 高崇仁,孙迪,王余贤,等.运用响应面法的高空作业车臂架变幅三铰点位置优化[J].机械设计与制造,2019(12):84-88.
- GAO C R, SUN D, WANG Y X, et al. Optimization of three hinge point position of the aerial working vehicle boom with response surface method[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(12): 84-88.
- [15] 王浩.混合驱动型腿部机构的设计与实验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014.
- WANG H. The design and experimental study of leg mechanism based on hybrid-driven[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [16] 韩建海.工业机器人[M].武汉:华中科技大学出版社,2009.
- HAN J H. Industrial robot[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2009.
- [17] WANG H B, LIN M S, YAN Y G, et al. Dynamics analysis and simulation of a new 6-DOF lower limb rehabilitation robot[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 490: 062035.
- [18] 黄华,张树有,刘晓健,等.基于响应面模型的广义空间切削稳定性研究[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(7):1215-1223.
- HUANG H, ZHANG S Y, LIU X J, et al. Research on cutting stability of generalized manufacturing space based on response surface mode[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(7): 1215-1223.
- [19] 韩月,李占君,李梦媛,等.响应面优化油桦中三萜类化合物提取工艺[J].森林工程,2021,37(2):79-85.
- HAN Y, LI Z J, LI M Y, et al. Optimization of the extraction process of triterpenoids from *Betula ovalifolia* by response surface[J]. Forest Engineering, 2021, 37(2): 79-85.