

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.02.005

剪叉式高空作业平台举升机构参数匹配研究^{*}

刘吉超¹, 张伟康¹, 郑自冲¹, 李怀义¹, 刘治军², 常 奎²

(1. 江苏汇智高端工程机械创新中心有限公司, 江苏 徐州 221000; 2. 徐工消防安全装备有限公司, 江苏 徐州 221100)

摘要:剪叉式高空作业平台通常利用液压油缸驱动剪叉机构的伸缩,以此来控制平台的升降,但是这种方式存在液压油泄漏和能量利用率低的问题,为此,对基于电推杆驱动的举升机构动力参数进行了匹配研究。首先,以某型剪叉式高空作业平台为载体,构建了其举升机构的动力学模型,确定了电推杆在平台升降过程中的动力参数;然后,采用铰点优化方法对电推杆铰点安装位置进行了优化设计,并结合举升机构的性能指标要求,对电推杆相应的动力参数进行了匹配;最后,为了验证电推杆动力参数匹配的有效性,将电推杆与剪叉式高空作业平台的原始液压系统进行了性能对比实验。研究结果表明:在平台举升性能不变的情况下,经参数匹配后的电推杆可有效地完成油缸的动作要求,且其能量利用率比采用液压油缸举升方式提升约 81.3%,可有效地满足举升机构的性能要求,在解决油缸液压油泄漏问题的同时,还可通过提高电能利用率来降低整车电池装机容量,从而达到有效降低整车制造成本的目的。

关键词:剪叉式高空作业平台;举升机构;电推杆;参数匹配

中图分类号:TH211.6

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)02-0173-07

Parameter matching of lifting mechanism of scissors aerial work platform

LIU Ji-chao¹, ZHANG Wei-kang¹, ZHENG Zi-chong¹, LI Huai-yi¹, LIU Zhi-jun², CHANG Kui²

(1. Jiangsu Advanced Construction Machinery Innovation Center Ltd, Xuzhou 221000, China;

2. XCMG Fire-fighting Safety Equipment Co., Ltd, Xuzhou 221100, China)

Abstract: The scissors aerial working platform (SAWP) usually uses the hydraulic cylinder to drive the expansion and contraction of the scissor mechanism to control the lifting and lowering of the platform, but this method has the problems of hydraulic oil leakage and low energy utilization. Therefore, the dynamic parameter matching of the lifting mechanism driven by an electric linear actuator (ELA) was studied. Firstly, taking a SAWP as a research object, its lifting mechanism model was established to determine the dynamic parameters of the ELA in the lifting process of the platform. Then, the hinge point optimization method was used to optimize the installation position of the hinge point of the ELA. According to the lifting performance, the dynamic parameters of the ELA were matched. Finally, in order to verify the effectiveness of the dynamic parameter matching of the electric push rod, the performance comparison experiment was carried out between the electric push rod and the original hydraulic system of the scissor overhead working platform. The results show that the matching ELA after parameter matching can effectively complete the action requirements of the oil cylinder under the condition that the lifting performance of the platform remains unchanged, and the energy utilization rate of the ELA is about 81.3% higher than that of the hydraulic cylinder, which shows that the ELA can effectively meet the performance requirements of the lifting mechanism, and it can not only overcome the hydraulic oil leakage, but also reduce the installed capacity of the battery by improving the power utilization efficiency, so as to effectively reduce the manufacturing cost of the whole vehicle.

Key words: scissors aerial work platform(SAWP); lifting mechanism; electric linear actuator (ELA); parameter matching

收稿日期:2021-08-09

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(6210020816)

作者简介:刘吉超(1986-),男,江苏东海人,博士,主要从事新能源工程机械系统设计、能源管理策略方面的研究。E-mail:m18501046354@

0 引 言

剪叉式高空作业平台^[1,2] (SAWP) 利用液压油缸^[3,4]驱动剪叉机构的伸缩,实现对平台的升降控制,以此满足操作者对不同高度的作业需求。

但是液压油缸存在液压油泄漏及能量利用率低的弊端,使其难以满足未来电子厂、超市等场所对 SAWP 绿色节能的作业要求^[5]。近年来,得益于电推杆^[6] (又称电动线性执行器)的发展,为解决 SAWP 这一问题提供了可行途径。

与常用的液压油缸不同,电推杆在驱动举升机构时,它将电机的旋转运动通过丝杆转换成直线运动,以此控制油缸的伸缩动作。由于整个过程无液压油的介入,不存在液压油泄漏的情况,且其能量利用率更高。

然而,电推杆的刚性特点使其无法通过溢流阀适应举升过程的负载变化,这对电推杆驱动的举升机构动力参数匹配提出了更高的要求。

目前,在 SAWP 举升机构动力参数匹配的研究方面,研究者们主要关注的是对剪叉臂结构和油缸铰点位置的相关研究^[7-11]。其中,牛文欢等人^[8]在分析了斜置式和水平式铰点受力特点的基础上,得出了斜置式安装位置更符合举升油缸受力分配的结论。刘伟^[9]建立了举升油缸的受力模型,利用人工智能算法对油缸安装铰点进行了优化,并利用 ANSYS 软件对其优化结果进行了验证。龚建球^[10]以减少油缸最大推力为目标,利用梯度下降算法对油缸安装位置进行了优化,并利用 AMESim 软件对铰点受力过程进行了仿真验证。HE S 等人^[11]针对举升油缸提出了基于虚功原理的油缸动力参数匹配方法,使匹配后的油缸峰值推力和稳态推力分别减小了 12% 和 20%。

综上所述,现有举升机构动力参数匹配方法主要聚焦举升油缸,鲜有对电推杆驱动的举升机构动力参数进行匹配的研究。

为此,笔者以某型 6 m SAWP 为载体,围绕其举升机构的电动化问题,通过建立举升机构模型,对电推杆铰点位置进行优化,以及对机构动力参数进行匹配验证,开展对 SAWP 举升机构的电动参数匹配研究。

1 举升机构建模

笔者以某型 6 m SAWP 的剪叉机构为研究对象,采用空间位置分析法^[12]对剪叉机构进行建模。

6 m SAWP 的剪叉机构结构原理如图 1 所示。

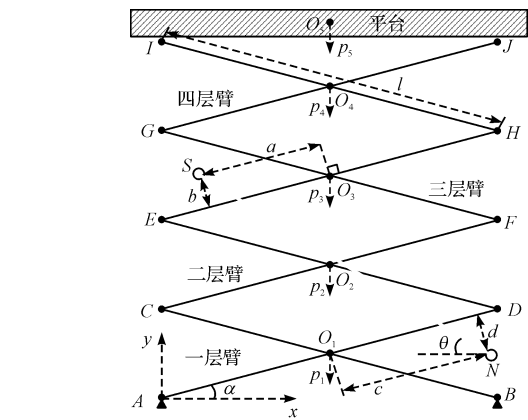


图 1 SAWP 剪叉机构原理

在图 1 中:SN 表示举升机构的电推杆,点 A ~ 点 J 为铰点,点 A 和点 B 分别与车辆底盘机械连接;点 O_i 为 4 层剪叉臂的质心, $i=1,2,3,4$,均与各层剪叉臂的几何中心点重合,点 O_5 为平台质心。

该举升机构电推杆的总成结构如图 2 所示。

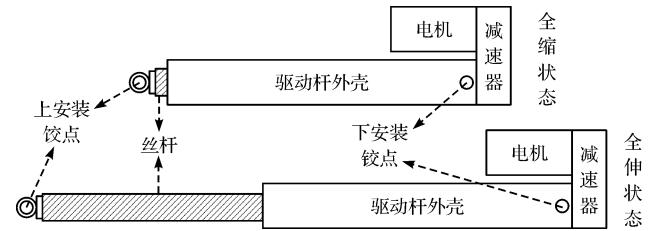


图 2 电推杆总成结构

6 m SAWP 剪叉机构的具体参数如表 1 所示。

表 1 剪叉机构参数

参数	数值	单位
剪叉臂长度	1.456 4	m
一层剪叉臂质量	83.5	kg
二层剪叉臂质量	69.9	kg
三层剪叉臂质量	88.5	kg
四层剪叉臂质量	60.9	kg
平台质量	200	kg
额定举升负载	230	kg
最小举升角度	4.07	°
最大举升角度	62.85	°
平台举升目标高度	5.18	m
平台升降时间	24 ~ 26	s
平台最大升降速度	≤0.4	m/s

1.1 运动学建模

在图 1 中,笔者根据空间位置分析法,构建了以 A 点为坐标原点,以 AB 和 AI 方向为轴和轴正方向的剪叉机构二维空间坐标系。

点 S 和点 N 的空间位置与举升角 α 之间的关系为:

$$\begin{aligned} S \text{ 点: } & \begin{cases} S_x = (0.5l - a) \cos \alpha - b \sin \alpha \\ S_y = (2.5l - a) \sin \alpha + b \cos \alpha \end{cases} \\ N \text{ 点: } & \begin{cases} N_x = (0.5l + c) \cos \alpha + d \sin \alpha \\ N_y = (0.5l + c) \sin \alpha - d \cos \alpha \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: a —点 S 距离点 O_3 的水平垂直长度; b —点 S 距离臂 EH 的垂直长度; c —点 N 距离臂 AD 的垂直长度; d —点 N 距离点 O_1 的水平垂直长度; l —剪叉臂的长度; α —剪叉臂与轴正方向的水平夹角, $\alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ 。

同理,可以得到点 $O_1 \sim$ 点 O_5 的空间位置与的关系,即式(2):

$$\begin{cases} v_p(t) = \frac{dH}{dt} = 4l\dot{\alpha} \cos \alpha \\ v_l(t) = \frac{dl_{SN}}{dt} = \frac{[\chi \cos \alpha + \delta \sin \alpha][\delta \cos \alpha - \chi \sin \alpha]\dot{\alpha} + [(2l - \chi) \sin \alpha + \delta \cos \alpha][(2l - \chi) \cos \alpha - \delta \sin \alpha]\dot{\alpha}}{\sqrt{[\chi \cos \alpha + \delta \sin \alpha]^2 + [(2l - \chi) \sin \alpha + \delta \cos \alpha]^2}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\dot{\alpha}$ —举升角速度, $a + c = \chi$, $d + b = \delta$ 。

1.2 动力学模型

根据虚功原理^[13]可知,升降过程中的驱动杆推力 F_l 的做功与剪叉机构的势能之间满足以下关系:

$$\frac{g[(p_5 + p_m) \partial O_5 + \sum_{i=1}^4 p_i \partial O_i]}{\partial \alpha} = \frac{F_l(\sin \theta [\partial S_y - \partial N_y] + \cos \theta [\partial N_x - \partial S_x])}{\partial \alpha} \quad (5)$$

式中: p_i —图1中第 i 层剪叉臂的中心质量, $i = 1, 2, 3, 4$; p_5 —平台的质量; p_m —负载质量; g —重力加速度。

α 与电推杆和 x 轴负方向的夹角关系可表示为:

$$\tan \theta = \frac{(2l - a - c) \sin \alpha + (b + d) \cos \alpha}{(b + d) \sin \alpha + (a + c) \cos \alpha} \quad (6)$$

式中: θ —电推杆与 x 轴负方向的夹角, $\theta \in [0^\circ, 90^\circ)$ 。

根据式(1,2),由 α 变化引起的点 S 、点 N 以及点

$$F_l(t) = \frac{gl \cos \alpha(t) \left(4(p_5 + p_m) + \frac{7}{2}p_4 + \frac{5}{2}p_3 + \frac{3}{2}p_2 + \frac{1}{2}p_1 \right)}{\sin \theta(t) [(2l - a - c) \cos \alpha(t) - (b + d) \sin \alpha(t)] + \cos \theta(t) [(b + d) \cos \alpha(t) - (a + c) \sin \alpha(t)]} \quad (9)$$

$$P_l(t) = \frac{F_l(t)v_l(t)}{1\,000} \quad (10)$$

式中: P_l —电推杆输出端功率。

则电推杆电机输出功率 P_m 可表示为:

$$P_m(t) = \frac{P_l(t)}{i_1} = \frac{T_m(t)n_m(t)}{9\,550} \quad (11)$$

式中: i_1 —电推杆总成能量传输效率; T_m —电机输出扭矩; n_m —电机输出转速。

基于上述机理分析,笔者利用 AMESim 软件构建了举升机构仿真模型,如图3所示。

当平台举升速度、升降高度、平台负载、电推杆长

$$\begin{cases} O_1: (0.5l \cos \alpha, 0.5l \sin \alpha) \\ O_2: (0.5l \cos \alpha, 1.5l \sin \alpha) \\ O_3: (0.5l \cos \alpha, 2.5l \sin \alpha) \\ O_4: (0.5l \cos \alpha, 3.5l \sin \alpha) \\ O_5: (0.5l \cos \alpha, 4l \sin \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

所以平台底端距离铰点 A 的垂直高度 H 以及电推杆两个铰点间的长度 l_{SN} 与 α 的关系为:

$$\begin{cases} H = 4l \sin \alpha \\ l_{SN} = \sqrt{(S_x - N_x)^2 + (S_y - N_y)^2} \end{cases} \quad (3)$$

在 α 空间域内,平台升降速度 v_p 与电推杆伸缩速度 v_l 随时间 t 变化的运动学表达式为式(4):

$O_1 \sim$ 点 O_5 的空间位置变化量,可进一步表示为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial \alpha}: & \left(\begin{array}{c} ((a - 0.5l) \sin \alpha - b \cos \alpha), \\ ((2.5l - a) \cos \alpha - b \sin \alpha) \end{array} \right) \\ \frac{\partial N}{\partial \alpha}: & \left(\begin{array}{c} (-(0.5l + c) \sin \alpha + d \cos \alpha), \\ ((0.5l + c) \cos \alpha + d \sin \alpha) \end{array} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial O_1}{\partial \alpha}: & (-0.5l \sin \alpha, 0.5l \cos \alpha) \\ \frac{\partial O_2}{\partial \alpha}: & (-0.5l \sin \alpha, 1.5l \cos \alpha) \\ \frac{\partial O_3}{\partial \alpha}: & (-0.5l \sin \alpha, 2.5l \cos \alpha) \\ \frac{\partial O_4}{\partial \alpha}: & (-0.5l \sin \alpha, 3.5l \cos \alpha) \\ \frac{\partial O_5}{\partial \alpha}: & (-0.5l \sin \alpha, 4l \cos \alpha) \end{aligned} \quad (8)$$

故有:

度等参数确定后,可利用式(4,9-11)确定电推杆的总动力参数。

1.3 优化问题模型

由式(9)可知,在剪叉臂结构确定的情况下, α 由 $\alpha_{\min}$ 增加到 $\alpha_{\max}$ 的过程中,驱动杆最大推力 $F_{l_{\max}}$ 的大小取决于4个值,即 a 、 b 、 c 、 d 。也就是说,在保证平台举升性能不变的情况下,选择合适的点 S 、点 N 可实现 $F_{l_{\max}}$ 的最优化选择,从而达到优化电推杆动力参数的目的。

为此,可构建电推杆推力静态优化问题模型:

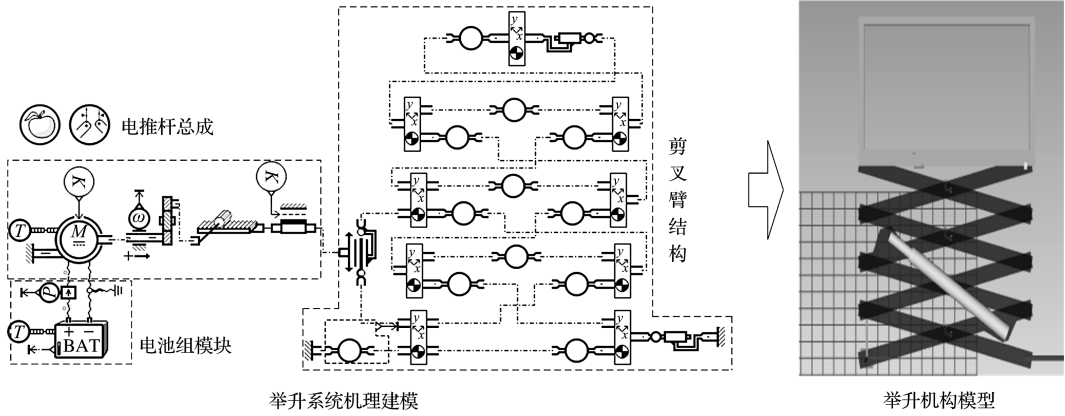


图 3 举升机构仿真模型

$$\begin{cases} \min F_{l_{\max}}(a, b, c, d)' \\ \text{s. t. } a \in [0, 0.5l] \\ b \in [0, 0.5l \sin(2\alpha_{\max})] \\ c \in [0, 0.5l] \\ d \in [0, 0.5l \sin(2\alpha_{\max})] \\ \sqrt{a^2 + b^2} \in [0, 0.5l] \\ \sqrt{c^2 + d^2} \in [0, 0.5l] \\ S_x - N_x \leq 0 \\ S_y - N_y \geq 0 \\ l_{SN}(\alpha_{\max}) - l_{SN}(\alpha_{\min}) \in (0, \Delta l_{SN_{\max}}] \\ \theta(\alpha_{\max}) \in [0^\circ, 90^\circ] \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\Delta l_{SN_{\max}}$ —电推杆的最大伸缩量。

式(12)中给出的剪叉机构铰点优化问题属于单目标、多变量、非线性静态优化问题。

笔者将从全局优化、人工智能寻优以及梯度下降寻优 3 个角度设计铰点优化方法, 以此确定出最佳铰点信息。

2 铰点位置优化

2.1 基于全局优化的优化方法

全局优化是指从符合条件的可行解中找出最优的一组解, 其中遍历法^[14]是全局优化方法的典型方法之一。

针对式(12)所述的静态非线性离散优化问题, 笔者采用遍历法进行最优解的求取, 其实现过程如图 4 所示。

2.2 基于人工智能寻优的优化方法

人工智能寻优是根据自然规律或生物行为设计的寻优方法, 基典型特征是求解过程不需要遵循严格的解析机理, 可以很好地应对复杂问题的求解。其中, 粒子群算法^[15]是一种典型的人工智能算法, 可有效解决带约束条件的、离散非线性最优问题。相较于现有工

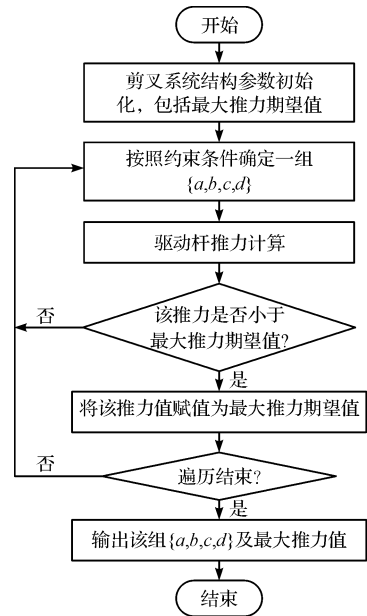


图 4 基于遍历法的铰点优化流程图

作提出的遗传算法^[16], 该算法收敛速度快, 降低了算法落入局部极小值点的概率。

根据粒子群算法的求解机制, 可将问题模型式(12)中的变量定义为由 m 个个体组成的种群 X :

$$\begin{cases} X = (X_1, X_2, \dots, X_m) \\ X_i = (a_i, b_i, c_i, d_i), i \in \{1, 2, \dots, m\} \end{cases} \quad (13)$$

其中, 种群 X 中的每一个个体的信息都是潜在的可行解。

由此, 可根据式(12)得出算法的适应度函数:

$$F_{it} = F_{l_{\max}}(X_i), i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

$F_{it}(X_i)$ 的值越小, 表明对应的个体 i 的信息 X_i 越优。为此, 个体 i 根据自身空间位置信息、移动速度以及种群中适应度值最优的个体的空间位置信息, 按以下规则更新自身移动速度和位置信息:

$$\begin{cases} V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_{p1} r_{p1} (P_i^k - X_i^k) + c_{p2} r_{p2} (P_g^k - X_g^k) \\ X_i^{k+1} = X_i^k + \beta V_i^{k+1} \end{cases} \quad (15)$$

式中: V_i^k —第 k 次迭代时个体 i 的移动速度; X_i^k —第 k 次迭代时个体 i 的位置信息; P_i^k —个体 i 在第 k 次迭代过程中适应度值最优的位置信息; P_g^k —第 k 次迭代时种群中适应度值最优的个体的位置信息; c_{pj} —非负加速因子, $j=1,2$; r_{pj} —分布于 $[0,1]$ 之间的随机数, $j=1,2$; β —分布于 $[0,1]$ 之间的随机数; ω —权重因子。

根据粒子群算法可得到问题式(12)的求解过程,如图5所示。

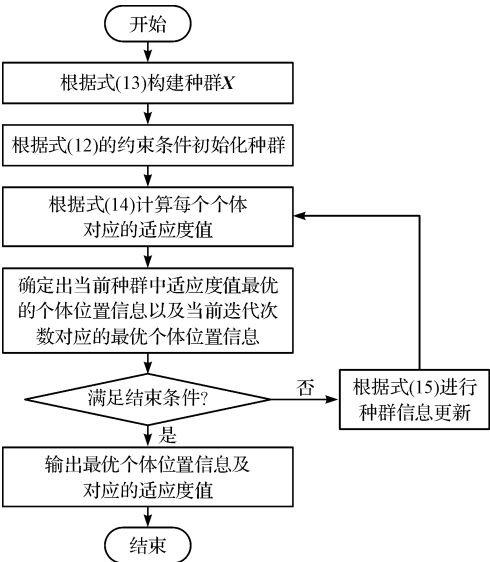


图5 基于粒子群算法的铰点优化流程图

2.3 基于梯度下降寻优的优化方法

梯度下降方法是典型的、通过解析手段求解非线性函数极值问题的方法径之一。其中, `fmincon` 函数是 MATLAB 函数工具箱中提供的一种常用的利用梯度下降原理求解极值的方法^[17,18], 尤其适用于具体多约束条件的优化问题求解。

根据 `fmincon` 函数的语法规则, 有:

$$[x_{\text{opt}}, f_{\text{opt}}] = \text{fmincon} \left(\begin{matrix} fun, x_0, A_1, b_1, Aeq, beq, \dots \\ lb, ub, \text{nonlcon}, options \end{matrix} \right)$$

(16)

由此可得式(12)的对应元素内容, 即:

$$\begin{cases} x_{\text{opt}} = (a_{\text{opt}}, b_{\text{opt}}, c_{\text{opt}}, d_{\text{opt}}) \\ f_{\text{opt}} = F_{l_{\text{max}}}(a_{\text{opt}}, b_{\text{opt}}, c_{\text{opt}}, d_{\text{opt}}) \\ fun: F_{l_{\text{max}}}(a, b, c, d) \\ x_0 = (a_0, b_0, c_0, d_0) \\ A_l = [], b_l = [], Aeq = [], beq = [] \\ lb = [0, 0, 0, 0]^T \\ ub = [0.5l, 0.5l\sin(2\alpha_{\text{max}}), 0.5l, 0.5l\sin(2\alpha_{\text{max}})]^T \\ options = [] \end{cases}$$

(17)

$$\text{nonlcon}: \begin{cases} \sqrt{a^2 + b^2} \in [0, 0.5l] \\ \sqrt{c^2 + d^2} \in [0, 0.5l] \\ S_x - N_x \leq 0 \\ S_y - N_y \geq 0 \\ l_{SN}(\alpha_{\text{max}}) - l_{SN}(\alpha_{\text{min}}) \in (0, \Delta l_{SN_{\text{max}}}] \end{cases}$$

(18)

式中: x_{opt} —最优解; f_{opt} —最小推力; fun —求解函数; x_0 —变量初始值; $[A_l; b_l; Aeq; beq]$ —线性约束; ub 、 lb —变量的上、下边界; nonlcon —非线性向量函数约束; $options$ —默认优化参数。

根据上述语法定义好对应的元素内容后, 即可在 MATLAB 中完成其最优解的求取。

3 性能对比实验

为了验证电推杆参数匹配的有效性, 笔者以上述举升机构模型为平台, 利用以上3种优化方法来确定电推杆的最优铰点位置; 随后采用剪叉式高空作业平台的举升性能指标, 对电推杆动力参数进行具体匹配; 最后将以上操作获得的结果与液压驱动结果进行对比分析。

3.1 铰点位置优化实验

为有效分析所述3种优化方法在铰点优化效果方面的差异, 实验将在相同的计算平台上完成。计算条件如下: 处理器 Intel(R) Core(TM) i5-4210U CPU @ 2.39 GHz, 内存 12 GB, 操作系统 Windows 10 64bits。

所述优化算法的初始条件设置如下:

$$\begin{cases} r_{p1} = r_{p2} = \beta = \omega = 1 \\ c_{p1} = c_{p2} = 1.5 \\ m = 10 \\ k \leq 50 \\ x_0 = (0.000\ 1, 0.000\ 1, 0.000\ 1, 0.000\ 1) \end{cases}$$

(19)

采用3种优化方法得出了铰点位置信息以及对应的优化结果, 如表2所示。

表2 铰点优化结果

分析 参数	采用的方法			
	初始结构	遍历法	粒子群算法	fmincon 函数法
a [m]	0.726 3	0.539 8	0.431 9	0.520 8
b [m]	0.053 5	0.058 7	0.056 5	0.107 6
c [m]	0.348 8	0.501 8	0.609 8	0.520 9
d [m]	0.147 8	0.156 6	0.158 8	0.107 7
$F_{l_{\text{max}}}$ [N]	50 444	45 923	45 926	45 929
H [m]	5.184	5.184	5.184	5.184
$\Delta l_{SN_{\text{max}}}$ [m]	0.886	0.775	0.775	0.775
计算时间 [s]	—	613.75	41.2	12.3
优化程度	—	8.96%	8.96%	8.95%

在不同的铰点位置下,电推杆的推力变化曲线如图 6 所示。

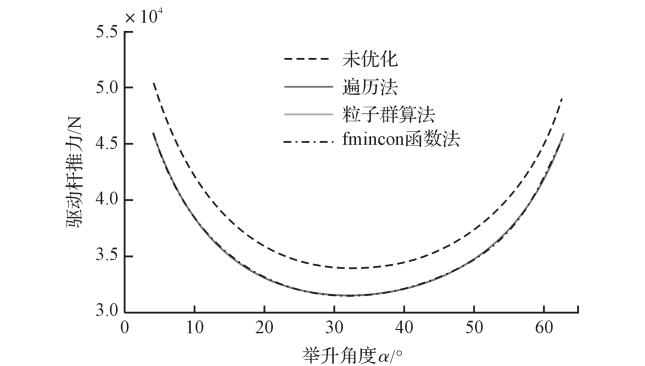


图 6 不同铰点位置下电推杆推力变化曲线

图 6 给出了举升角度 α 由 $\alpha_{\min}$ 增加到 $\alpha_{\max}$ 的过程中,利用 3 种优化方法得出的铰点,仿真出的电推杆推力变化曲线。

结合表 2 和图 6 分析可知:(1)虽然 3 种优化方法在同一计算平台上完成优化需要的时间不尽相同,但是优化出的最大推力值近乎一致,且 3 种优化方法得出的推力变化曲线高度重合;(2)相较于未进行铰点优化的电推杆来说,经过铰点优化后的电推杆在保证平台举升高度不变,在满足电推杆伸缩长度限制的情况下,还可以有效降低电推杆的最大推力,进一步缩短电推杆的伸缩长度;(3)3 种优化方法优化后的电推杆对应的最大推力均降低了约 8.96%,伸缩长度均降低了 0.111 m。

由此可见,3 种优化方法均可通过铰点优化来降低电推杆的最大推力和伸缩长度。同时,考虑到 3 种优化算法的优化效果近乎相当,故在对举升系统进行实际参数匹配时,可以根据实际计算条件选择合适的优化算法。

下面以表 2 中的遍历法所得到的优化结果为基础,按表 1 所选研究对象的举升性能指标进行电推杆参数的具体匹配。

3.2 动力参数匹配及实验验证

笔者根据表 2 确定的铰点位置以及表 1 所述的设计参数要求,分别利用式(3,4,9,10)计算电推杆所需要的动力参数。

最后匹配出的电推杆动力参数如表 3 所示。

表 3 电推杆动力参数

参数类别	参数数值	单位
F_1	31 531 ~ 45 923	N
S_1	1.11 ~ 1.885	m
v_1	0.03 ~ 0.033	m/s
v_p	0.168 ~ 0.269	m/s
P_1	0.946 ~ 1.379	kW

根据表 3 参数,笔者选择某型电推杆作为举升机

构仿真模型的驱动杆,同时将其与剪叉式高空作业平台的原始液压系统进行对比实验。

实验选择的电池组参数为 24 V—80 Ah,电池荷电状态 (state of charge, SoC) 在常温下的使用范围为 30% ~ 80%。

实验后得到了两种驱动方式对应的驱动性能对比结果,如图 7 所示。

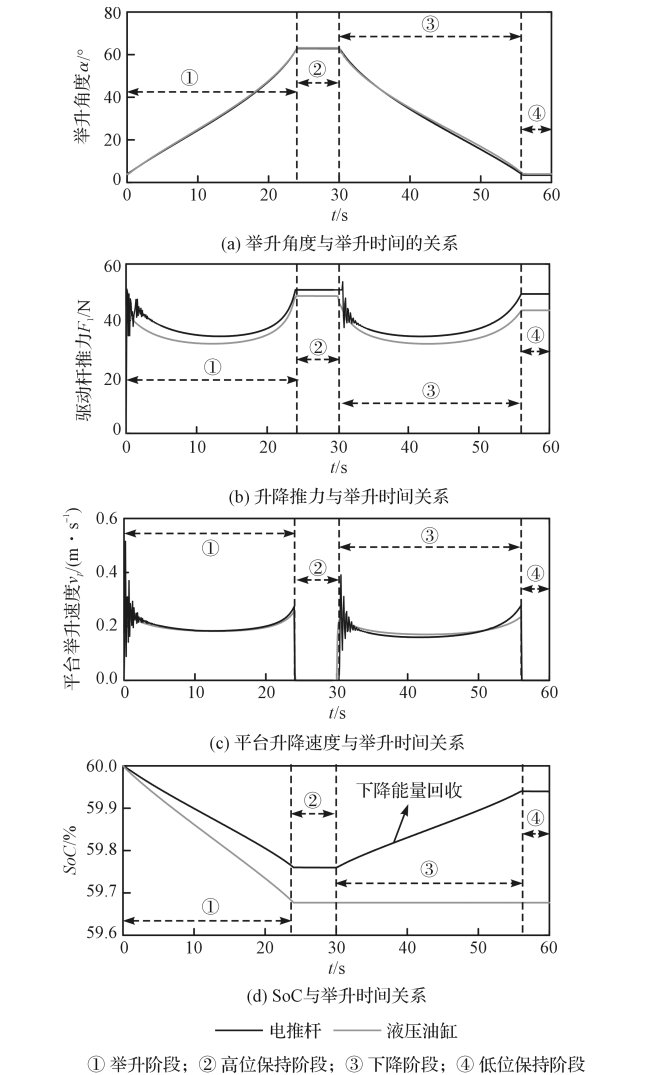


图 7 两种驱动方式对应的驱动性能对比

其中:举升角度随举升时间变化的曲线如图 7(a) 所示,随举升时间变化的推力曲线如图 7(b) 所示,随举升时间变化的平台升降速度曲线如图 7(c) 所示,两种驱动系统完成一个升降动作对应的电池 SoC 随时间变化的曲线如图 7(d) 所示。

由图 7(a) 可知:两种驱动方式在举升角度 α 由 $\alpha_{\min}$ 增加到 $\alpha_{\max}$ 的过程中,所用时间近乎一致,举升和下降时间分别约为 24.5 s 和 26 s,满足表 1 所示升降时间的设计要求;

由图 7(b) 可知:在完成相同举升动作的前提下,电推杆的推力变化范围为 31 733.4 N ~ 48 699.1 N,液压油

缸的推力范围为 34 356.4 N ~ 53 721.7 N, 前者的最大推力比后者小 5 022.6 N, 平顺性也要比后者更突出, 尤其在举升、下降动作起始阶段, 后者的推力波动明显;

由图 7(c) 可知: 液压油缸在举升及下降起初的 2 s 内, 平台速度波动范围明显大于电推杆的速度变化范围; 此外, 当两种驱动方式速度稳定后, 液压油缸对应的平台速度范围为 0.16 m/s ~ 0.278 m/s, 电推杆对应的平台速度范围为 0.17 m/s ~ 0.274 m/s, 满足表 1 所述的升降速度 ≤ 0.4 m/s 的要求;

由图 7(d) 可知: 由于电推杆的机械传输效率要比液压油缸的高, 在举升阶段时, 电推杆的电能消耗量比油缸小; 且在平台下降过程中, 电推杆同样可以依托电机, 将平台的部分势能以能量回收的方式存储在电池组中, 使电池组处于充电状态, 液压油缸则不具备该功能。

具体来说, 一个升降循环后, 电推杆和液压油缸对应的 SoC 下降值分别为 0.06% 和 0.323%, 这说明电推杆的电能利用率要比液压油缸提高约 81.3%。

由以上分析可得: 在保证平台推力和升降速度与液压油缸相当的情况下, 电推杆比液压油缸的电能利用率提高约 81.3%, 说明举升系统的电动化不仅可以克服液压油泄漏的问题, 还可以通过势能回收提高电能的利用率, 从而降低电池组的总装机容量, 为降低整机制造成本提供可能。

4 结束语

为了解决剪叉式高空作业液压驱动机构的液压油泄漏和能量利用率低的问题, 笔者对基于电推杆驱动的举升机构动力参数进行了匹配研究; 以某型 6 m SAWP 为载体, 围绕其举升机构的电动化问题, 通过建立举升机构模型, 对电推杆铰点位置进行优化, 以及对机构动力参数进行匹配验证, 完成了对电推杆参数的匹配验证。

主要研究结论如下:

(1) 铰点优化方法通过对电推杆空间安装位置进行寻优, 实现了对电推杆最大推力和几何长度的参数优化, 提升了电推杆动力参数的匹配效果;

(2) 在平台举升性能不变的情况下, 电推杆可有效完成液压油缸的动作要求, 并且其能量利用率比液压油缸提高约 81.3%, 有效解决了油缸液压油泄漏和能量利用率低的问题。

在后续研究中, 笔者将利用 ProE 软件和整车试验平台, 对电推杆参数的有效性做进一步验证, 从而实现电推杆的实车应用。

参考文献 (References):

- [1] 李颖, 杨健, 邹炳燕, 等. 全液压驱动自行式高空作业车[J]. 制造业自动化, 2014, 36(2): 119-122.
- [2] HELMI R, MOHD K A M A, MOHD H M N, et al. Design review of scissors lifts structure for commercial aircraft ground support equipment using finite element analysis[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 41: 1696-1701.
- [3] 刘志, 纪爱敏, 张磊, 等. 剪叉式高空作业平台上车液压系统的稳定性研究[J]. 机电工程, 2020, 37(6): 600-606.
- [4] ZHANG L, LI Y. Synchronous control of double hydraulic cylinders of scissors aerial work platform based on fuzzy PID[C]. *Proceedings of 2020 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation*. China: Nanchang, 2020.
- [5] 刘吉超, 詹东安, 徐小东. 一种全电动剪叉式高空作业平台: 中国, 202110179998. 6[P]. 2021-02-08.
- [6] 贾米娜, 郭锋. 实用电动推杆[J]. 机械管理开发, 2006, 2: 58-59.
- [7] PAN G, CHEN S. Research on the electric scissor aerial work platform steering system optimization[C]. *2012 3rd International Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization*. China: Chengdu, 2012.
- [8] 牛文欢, 尚德波, 王晓军. 一种 6 m 自行走剪叉式高空作业平台设计研究[J]. 职大学报, 2018, 6: 69-72.
- [9] 刘伟. 剪叉式高空作业平台升降装置结构优化设计[D]. 河北: 燕山大学, 2017: 11-14.
- [10] 龚建球. 剪叉式高空作业平台力学分析与油缸安装铰点位置优化[D]. 湖南: 长沙理工大学, 2017: 34-36.
- [11] HE S, OUYANG M, GONG J, et al. Mechanical simulation and installation position optimisation of a lifting cylinder of a scissors aerial work platform[C]. *19th International Conference of Fluid Power and Mechatronic Control Engineering 2018*. China: Heshan, 2019.
- [12] 付昱. 剪叉式高空作业平台双液压缸驱动动力学分析[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2015.
- [13] 王铎, 王尚斌, 李超, 等. 基于虚功原理剪叉机构驱动力计算[J]. 锻压装备与制造技术, 2020, 55(2): 36-38.
- [14] 王爱法, 杨梅梅, 福春霞. 二叉树及其遍历算法的应用[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2018, 32(11): 194-198.
- [15] 冯茜, 李擎, 全威, 等. 多目标粒子群优化算法研究综述[J]. 工程科学学报, 2021, 43(6): 745-753.
- [16] PAN G. Electric scissor aerial work platform solenoid valve research[C]. *2013 International Conference on Vehicle and Mechanical Engineering and Information Technology*. China: Zhengzhou. *Applied Mechanics and Materials*, 2013.
- [17] 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.
- [18] 刘海洋, 张征浩, 李广超. 三通道特斯拉阀门结构设计与优化[J]. 轻工机械, 2020, 38(3): 59-64.

[编辑: 雷敏]

本文引用格式:

刘吉超, 张伟康, 郑自冲, 等. 剪叉式高空作业平台举升机构参数匹配研究[J]. 机电工程, 2022, 39(2): 173-179.

LIU Ji-chao, ZHANG Wei-kang, ZHENG Zi-chong, et al. Parameter matching of lifting mechanism of scissors aerial work platform[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39(2): 173-179.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>