

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.001

剪叉升降平台液压缸的安装位置优化研究*

何雪泓, 鲁文佳, 殷其阵, 胡智勇

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:针对五层双液压缸布置的剪叉升降平台,起升阶段剪叉机构受力和平台运动平稳性存在的问题,利用 Matlab 的局部优化函数 fmincon,以液压缸的安装位置为优化变量,根据剪叉结构的布置要求和液压缸安装铰点的位置关系,建立了合理的优化变量约束条件,以起始位置液压缸推力和平台速度变化率达到最小为目标,确定了多目标优化函数,从而建立了五层双液压缸布置的剪叉升降平台液压缸安装位置优化方法。并将其应用于某型剪叉升降平台油缸安装铰点布置。优化结果表明,液压缸推力值减小了 13.3%,危险铰点受力减小了 10.5%,平台起升速度变化率减小了 14.8%,达到了“减小起始位置液压缸推力以改善剪叉机构受力,同时降低起始位置平台起升速度变化率以提高平台运动平稳性”的目的。

关键词:剪叉升降平台; Matlab; 液压缸推力; 平台速度变化率; 液压缸安装位置; 多目标优化

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)10-1159-05

Installing position optimization of hydraulic cylinder of scissors lift platform

HE Xue-hong, LU Wen-jia, YIN Qi-zhen, HU Zhi-yong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Aiming at the force of the scissors and platform motion stability of the shear fork lift platform with five layers of double hydraulic cylinders, the local optimization function was used, which called fmincon from Matlab. The installation position was regarded as the optimization variable. According to the arrangement of the shear fork structure and the position of the hinge point of the hydraulic cylinder, reasonable constraint conditions of optimization variable were set up. The minimum value of the thrust and lifting acceleration at the initial position was regarded as the target, multiple objective optimization function was determined, the optimization method of installing position with five layers of double hydraulic cylinders was established, and it was applied to a certain fork lift platform of installing position. The results indicate that hydraulic cylinder thrust value decreases by 13.3%, the dangerous hinge point reduces by 10.5%, the lifting acceleration reduces by 14.8%. The goal that reduces the starting position of hydraulic cylinder thrust to improve stress of shear fork structure and the speed change rate of the starting position platform is attained.

Key words: scissors lift platform; Matlab; hydraulic cylinder thrust; lifting acceleration; installing position of hydraulic cylinder; multiple objective optimization

0 引言

剪叉升降平台是一种以平稳性和安全性为基础、并把操作者自由升降至某一高度为目的的机械设备^[1]。减小升降机构受力直接影响着整机的力学性

能,甚至直接关系到操作者的操作安全与人身安全。

目前,学者们针对降低液压缸推力、优化平台结构、减小机构受力等问题做了相应研究,高希功等人^[2]进行了剪叉升降机的结构设计与优化,通过对结构的合理改进以改善机构受力情况;杨杰等人^[3]建立

收稿日期: 2016-05-13

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAF08B01)

作者简介: 何雪泓(1965-),女,辽宁沈阳人,副教授,硕士生导师,主要从事材料的疲劳和断裂、可靠性理论和应用、现代设计与分析方法等方面的研究。E-mail: xhhe@me.neu.edu.cn

了剪叉机构的数学模型,利用 Matlab 软件中提供的优化函数分析了剪叉机构的参数对液压缸推力的影响,为剪叉式升降平台液压缸安装位置的确定提供了数据基础;刘治才等人^[4]进行了剪叉升降平台的运动学和动力学分析,并从动力学角度对不同液压缸布置方式进行了对比分析。目前研究主要针对于结构简单、低层数剪叉机构的优化分析,对于结构较为复杂、层数相对较多的剪叉机构优化研究较少。

本研究将以剪叉层数相对较高的五层双液压缸布置的升降平台为研究对象,以液压缸推力和平台速度变化率为多目标函数,以液压缸的安装位置为优化变量,通过优化寻求更合理的液压缸安装位置。

1 液压缸安装位置优化方法

本研究利用虚位移原理求解剪叉机构的液压缸推力,建立液压缸推力和液压缸安装位置的函数关系,同时利用速度瞬心法建立平台速度与液压缸安装位置函数关系,再对平台速度求导建立平台速度变化率与液压缸安装位置函数关系;起始位置是液压缸推力最大的位置,也是剪叉机构受力最大位置^[5],同时起升阶段产生瞬时加速度,也是运动最不平稳的阶段^[6],故笔者对起始位置液压缸推力和平台速度变化率为目标进行优化^[7]。

在优化变量合理的约束条件范围内,本研究利用 Matlab 的局部优化函数 fmincon 函数,建立优化方法和分析流程,对液压缸安装位置进行优化,达到减小起始位置液压缸推力、改善剪叉机构受力,降低起升位置平台速度变化率,提高升降平台运动平稳性的目的。

1.1 多目标函数的求解

1.1.1 目标函数液压缸推力的求解

根据虚位移原理:作用于质点系的所有主动力在任何虚位移中所作虚功的和等于零^[8],即:

$$\sum (X_i \delta x_i + Y_i \delta y_i + Z_i \delta z_i) = 0 \quad (1)$$

式中: X_i, Y_i, Z_i —机构在 x, y, z 方向所受外力; $\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i$ —机构在 x, y, z 方向的虚位移。

$$F = \frac{G \cdot \cos \alpha \sqrt{(L_1 + L_2)^2 + 4L^2 \sin^2 \alpha - 4L \sin^2 \alpha (a + b) + (a + b)^2 + 2L \sin 2\alpha (L_1 + L_2)}}{4[(L_1 + L_2) \cos 2\alpha + (L - a - b) \sin 2\alpha]} \quad (7)$$

式中: L —每根剪叉臂杆长, a — RO_1 的长度, b — SO_3 的长度, L_1 — MR 的长度, L_2 — NS 的长度, α —剪叉臂轴向与水平面之间的夹角, β —液压缸轴向与水平面之间的夹角。

$$G = 5W + 0.5W_1 + 1.5W_2 + 2.5W_3 + 3.5W_4 + 4.5W_5 \quad (8)$$

由式(7)得到了液压缸推力 F 和 a, b 的函数关系

剪叉机构的受力分析图如图 1 所示。

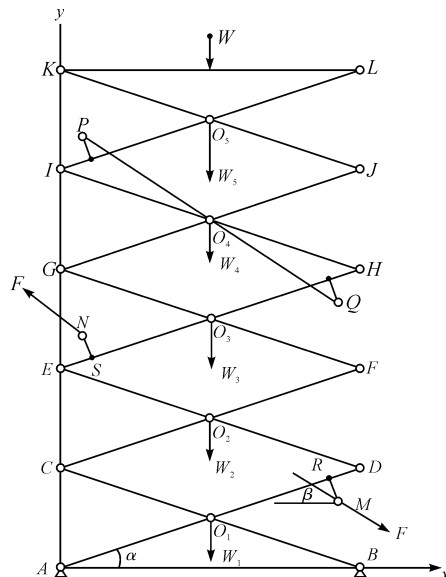


图 1 剪叉臂简化模型的受力图

P, Q 和 M, N —上、下液压缸的安装铰点;以 $O_1 \sim O_5$ 为中心的相交线段—五层剪叉臂; KL —剪叉机构平台

解开液压缸 MN, PQ 与剪叉臂的约束,并用一对力 F 代替,根据虚位移原理公式(1)得:

$$2(-FM_x \cdot \delta x_M - FM_y \cdot \delta y_M + FN_x \cdot \delta x_N + FN_y \cdot \delta y_N - W \cdot \delta y_W - \sum_{i=1}^5 W_i \cdot \delta y_{O_i}) = 0 \quad (2)$$

式中: F —液压缸推力; W_i —各层剪叉臂重力, $i = 1 \sim 5$; W —额定载荷; FM_x, FM_y, FN_x, FN_y — M, N 点在 x 和 y 向的分力; $\delta x_M, \delta y_M, \delta x_N, \delta y_N$ — M, N 点在 x 和 y 向的虚位移。

$$FM_x = FN_x = F \cos \beta \quad (3)$$

$$FM_y = FN_y = F \sin \beta \quad (4)$$

$$\delta x_i = \frac{\partial x_i}{\partial \alpha} \delta \alpha \quad (5)$$

$$\delta y_i = \frac{\partial y_i}{\partial \alpha} \delta \alpha \quad (6)$$

式中: x_i, y_i ——各受力点的 x 和 y 坐标值。

把式(3 ~ 6)代入式(2)得:

(a, b 即是确定液压缸安装位置的安装参数)。

1.1.2 目标函数平台起升速度变化率的求解

液压缸安装铰点 M, N 的速度与液压缸安装位置直接关联,因此通过建立液压缸安装铰点 M, N 速度与平台的速度关系,即可建立任意位置平台速度与液压缸安装位置的函数关系。

本研究利用速度瞬心法对剪叉机构进行运动分

析,分别作出各剪叉臂的瞬心,剪叉升降平台运动分析如图 2 所示。

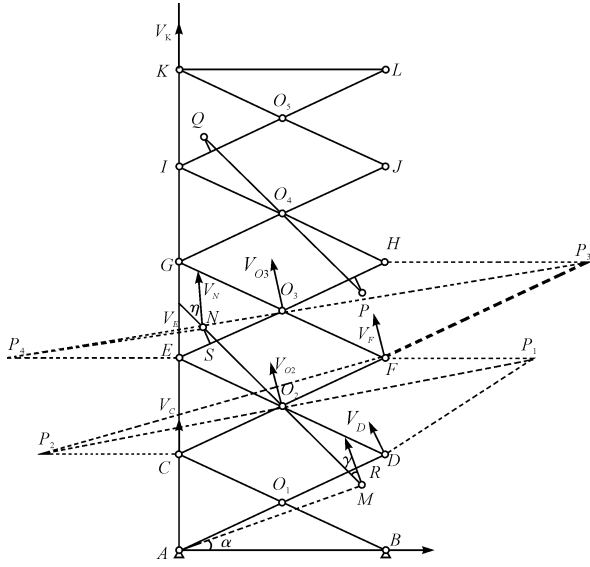


图 2 剪叉升降平台运动分析

$P_1 \sim P_4$ —剪叉臂 ED、CF、GF、EH 的瞬心

设各剪叉臂转动角速度为 ω , 则:

$$V_C = |P_2C| \omega = \omega L \cos \alpha \quad (9)$$

$$V_E = |P_4E| \omega = 2\omega L \cos \alpha \quad (10)$$

$$V_G = |P_3E| \omega = 3\omega L \cos \alpha \quad (11)$$

$$V_K = \frac{V \cdot 5L \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{(L_1 + L_2)^2 + 4L^2 \sin^2 \alpha} - 4L(a + b) \times \sin^2 \alpha + 2L \sin 2\alpha (L_1 + L_2) + (a + b)^2}{2L(L_1 + L_2) \cos 2\alpha - \left[\frac{7}{8}(a + b)^2 + \frac{1}{4}L^2 \right] \sin 2\alpha} \quad (20)$$

式中: V_i —各铰点速度 (i 代表各个铰点对应字母)。

根据公式(20)得到的平台速度 V_K 表达式, 令:

$$\phi(\alpha) = \frac{5L \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{(L_1 + L_2)^2 + 4L^2 \sin^2 \alpha} - 4L(a + b) \times \sin^2 \alpha + 2L \sin 2\alpha (L_1 + L_2) + (a + b)^2}{2L(L_1 + L_2) \cos 2\alpha - \left[\frac{7}{8}(a + b)^2 + \frac{1}{4}L^2 \right] \sin 2\alpha} \quad (21)$$

则:

$$V_K = \phi(\alpha) V \quad (22)$$

显然,平台速度 V_K 是升角 α 的函数,只需将 $\phi(\alpha)$ 对 α 求导,即可得到平台在任意起升高度速度变化率的关系式^[9],再将平台最低起升角 α_{\min} 代入,得到平台速度变化率 $f(a, b)$ 与液压缸安装位置 a, b 的函数关系,即目标函数速度变化率 $f(a, b)$ 为:

$$f(a, b) = \left[\frac{\partial \phi(\alpha)}{\partial \alpha} \right]_{\alpha = \alpha_{\min}} \quad (23)$$

1.2 优化变量的确定

位置参数为液压缸上、下铰点与剪叉臂中间铰点在平行于剪叉臂方向上的距离 a 和 b ,液压缸安装位置示意图如图 3 所示。

由液压缸推力表达式(7)可知, a, b 总是以 $(a + b)$ 的形式出现,因此把 $(a + b)$ 看作一个整体变量 x, x 即为此次设计变量。

同理:

$$V_I = 4\omega L \cos \alpha \quad (12)$$

$$V_K = 5\omega L \cos \alpha \quad (13)$$

点 N 为剪叉臂 EH 上的点, 则:

$$V_N = |P_4N| \omega \quad (14)$$

由式(13)和式(14)得:

$$V_N = \frac{|P_4N|}{5L \cos \alpha} \cdot V_K \quad (15)$$

点 M 为剪叉臂 AD 上的点, 则:

$$V_M = |AM| \omega \quad (16)$$

由式(13)和式(16)得:

$$V_M = \frac{|AM|}{5L \cos \alpha} V_K \quad (17)$$

设活塞运动速度为 V , 由活塞和液压缸安装铰点 M, N 速度关系得:

$$V = V_N \cos \eta - V_M \cos \gamma \quad (18)$$

式中: η —液压缸轴向与 N 点速度方向之间的夹角, γ —液压缸轴向与 M 点速度方向之间的夹角。

把式(15)和式(17)代入式(18)得:

$$V_K = \frac{V \cdot 5L \cdot \cos \alpha}{|P_4N| \cos \eta - |AM| \cos \gamma} \quad (19)$$

根据图 2 中几何关系计算平台速度 V_K 得:

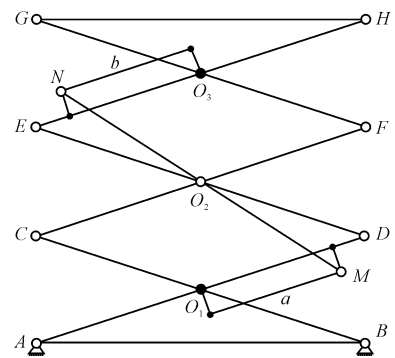


图 3 液压缸安装位置示意图

1.3 约束条件的设定

由剪叉升降平台的结构可知:

$$0 \leq a + b \leq L \quad (24)$$

又由液压缸的结构尺寸可知,根据几何关系得液压缸长度:

$$|\overrightarrow{MN}| = \sqrt{\frac{(L_1 + L_2)^2 + 4L^2 \sin^2 \alpha - 4L(a + b) \sin^2 \alpha + 2L \sin 2\alpha (L_1 + L_2) + (a + b)^2}{(a + b)^2 + 2L \sin 2\alpha (L_1 + L_2)}} \quad (25)$$

液压缸的最小安装尺寸为 L_0 , 则有:

$$L_0 - \sqrt{\frac{(L_1 + L_2)^2 + 4L^2 \sin^2 \alpha - 4L \sin^2 \alpha (a + b) + 2L \sin 2\alpha (L_1 + L_2)}{(a + b)^2 + 2L \sin 2\alpha (L_1 + L_2)}} \leq 0 \quad (26)$$

1.4 优化计算过程及分析流程

在液压缸安装位置的优化过程中, 本研究运用 Matlab 软件中的局部优化函数 fmincon 函数, 该函数可以利用目标函数与约束函数的导数信息, 从给定的起点出发, 找到满足所给的约束条件下的最优解^[10]。

通过 Matlab 对剪叉升降平台的液压缸安装位置优化主要步骤如下:

(1) 建立目标函数。建立液压缸推力 F 和液压缸安装位置 $(a + b)$ 的函数关系, 并以起始位置 (当剪叉

臂升角 α 最小时) 液压缸推力最小为目标;

(2) 确定设计变量。通过给定设计变量确定液压缸的安装位置;

(3) 明确约束条件。局部优化函数 fmincon 是给定相应的约束范围, 在其约束条件下搜索最优解;

(4) 优化分析计算。在约束范围内从小到大循环选取设计变量初始值, 利用局部优化函数求解直至结果收敛, 从而得到最优解。

(5) 优化结果分析。根据优化计算结果, 结合液压缸位置安装工程实际, 分析计算优化后液压缸推力较优化前减小的百分比, 并对优化结果作出综合评判。

2 液压缸安装位置优化案例分析

2.1 优化计算及结果分析

本研究以某型五层双液压缸布置的剪叉升降平台为例进行优化分析, 现有结构相关参数如表 1 所示。

表 1 剪叉臂现有结构参数表

额定载荷 W/N	第一层剪叉臂重 W_1/N	第二层剪叉臂重 W_2/N	第三层剪叉臂重 W_3/N	第四层剪叉臂重 W_4/N	第五层剪叉臂重 W_5/N	剪叉臂杆长 L/mm	液压缸最小安装尺寸 L_0/mm	液压缸下伸出端 MR 长 L_1/mm	液压缸上伸出端 NS 长 L_2/mm
4 200	1 600	2 008	1 500	2 000	1 300	1 800	1 300	200	63

(1) 目标函数。起始位置时 $\alpha = 3.5^\circ$, 把表 1 中关于剪叉升降平台参数代入式 (7) 和式 (23) 分别得液压缸推力 $F(a, b)$ 和平台速度变化率 $f(a, b)$ 与安装位置 $(a + b)$ 的函数关系, 并以其最小值为优化目标, 即:

$$F(a, b) = \frac{41\,310.6 \times \sqrt{264\,688 - 35.22(a + b) + (a + b)^2}}{2\,046.4 - 0.558(a + b)} \quad (27)$$

$$f(a, b) = \left[\frac{\partial \phi(\alpha)}{\partial \alpha} \right]_{\alpha=3.5^\circ} \quad (28)$$

(2) 优化变量。由于 a, b 总是以 $(a + b)$ 的形式出现, 因此把 $(a + b)$ 看作一个整体设计变量 x 进行优化。

(3) 约束条件。剪叉臂长度为 $L = 1\,800\text{ mm}$, 液压缸最小安装 $L_0 = 1\,300\text{ mm}$, 则:

$$0 \leq a + b \leq 1\,800 \quad (29)$$

$$1\,300 - \sqrt{264\,688 - 35.22(a + b) + (a + b)^2} \leq 0 \quad (30)$$

(4) 优化计算。本研究利用 Matlab 中的局部优化函数 fmincon 对液压缸安装位置进行优化。首先建立主函数 M 文件, 然后通过式 (29) 和式 (30) 建立的变量约束条件对优化变量进行约束, 把 $(a + b)$ 作为整体

优化变量, 限定在约束条件范围内; 以 4 mm 为间隔, 从小到大循环选取设计变量初始值, 迭代求解直至整个约束范围内结果收敛, 从而得到最优解。

(5) 结果分析。根据优化结果知: ① 当 $a + b = 1\,212\text{ mm}$ 时, 目标函数 F 达到最小, $\text{Min } F = 39\,228\text{ N}$; ② 当 $a + b = 1\,220\text{ mm}$ 时, 目标函数平台速度变化率 f 达到最小, $\text{Min } f = 122.09$; 此时对应的液压缸推力 $F = 39\,586\text{ N}$, 仅比推力最小值大 0.91%;

因此, 本研究综合取优化结果 $a + b = 1\,220\text{ mm}$, 根据工程经验, 一般取 $a \leq b$, a, b 具体数值需要考虑液压缸与剪叉机构的尺寸干涉问题和安装空间具体调整和确定。现有剪叉臂设计, $a = 650\text{ mm}$, $b = 700\text{ mm}$, $650 + 700 = 1\,350\text{ mm}$, 现有设计液压缸推力 $F = 45\,653\text{ N}$, 通过优化液压缸推力减小了 13.3%; 现有设计平台速度变化率 $f = 143.28$, 通过优化速度变化率减小了 14.8%。

2.2 优化前后剪叉铰点受力对比分析

本研究通过优化降低了液压缸推力值, 进而比较分析液压缸安装位置优化对剪叉机构铰点受力的影响。

根据剪叉臂受力平衡建立力学平衡方程: $\sum X =$

$0, \sum Y = 0, \sum M_i = 0$ 求解各铰点受力。

以剪叉臂 BC 为例建立平衡方程,受力分析图如图 4 所示。

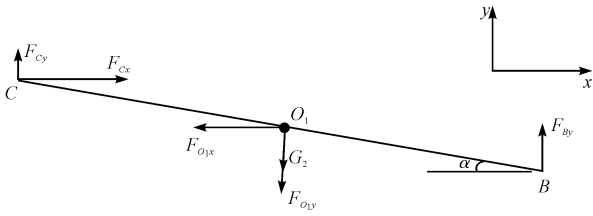


图 4 剪叉臂 BC 受力分析图

F_C, F_{O1}, F_B —对应的铰点力; G_2 —该剪叉臂自重

$$F_{Cx} - F_{O1x} = 0 \tag{31}$$

$$F_{Cy} - F_{O1y} + F_{By} - G_2 = 0 \tag{32}$$

$$F_{Cx} \cdot \frac{L}{2} \cdot \sin\alpha + F_{Cy} \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos\alpha - F_{By} \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos\alpha = 0 \tag{33}$$

同理,本研究对其他剪叉臂建立平衡方程,通过解平衡方程计算各个剪叉臂铰点力值。

优化前后各铰点受力对比如图 5 所示。

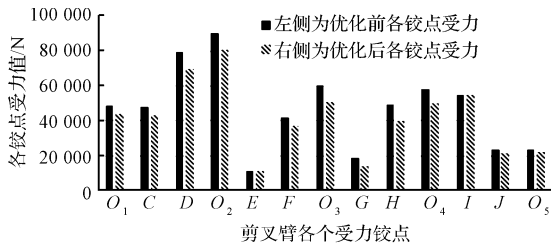


图 5 优化前、后各剪叉铰点受力对比

通过对比可知优化后各个铰点受力值均减小,其中 O_2 和 D 点受力较大属于危险铰点,铰点力值分别减小 10.5% 和 11.8%。优化后剪叉铰点受力情况得到改善。

3 结束语

本研究针对五层双液压缸布置的剪叉升降平台,建立了液压缸安装位置的优化方法。笔者分别利用虚位移原理和速度瞬心法,建立了液压缸推力和平台速度变化率与液压缸安装位置的函数关系,并以起始位置液压缸推力和平台速度变化率达到最小为目标、液

压缸的安装位置为优化变量,通过 Matlab 的局部优化函数 fmincon 函数建立优化步骤和分析流程,对液压缸安装位置进行了优化。

液压缸安装位置的优化分析案例中,当 $a + b = 1\ 220\ \text{mm}$ 时,目标函数液压缸推力和平台速度变化率达到最优。通过优化液压缸推力减小了 13.3%,平台速度变化率减小了 14.8%,降低了液压缸推力的同时,有效提高了平台的运动平稳性。通过铰点力对比计算,优化后各铰点受力均减小,危险铰点受力减小了 10.5%,有效改善了剪叉机构受力情况。

该优化方法针对五层双液压缸布置的剪叉升降平台,有效减小了液压缸推力值并改善了剪叉机构受力情况,同时有效提高了平台的运动平稳性;对其他布置形式的剪叉升降平台同样具有参考意义和工程实用价值。

参考文献 (References):

- [1] 白 日. 高空作业机械发展与展望[J], 建筑机械, 2009, 29(9): 20-23, 4.
- [2] 高希功. 剪叉式液压升降机的结构设计与优化[D]. 济南: 济南大学机械工程学院, 2014.
- [3] 杨 杰, 强 盛, 唐珑骅. 基于 Matlab 剪叉式液压升降平台的参数优化方法设计[J], 中小企业管理与科技, 2012 (1): 227-228.
- [4] 刘治才. 剪叉式升降台液压缸布置的运动学及动力学分析[J]. 山东交通学院学报, 2014, 22(3): 71-74.
- [5] 孙磊博. 剪叉式液压升降平台结构优化[D]. 济南: 齐鲁工业大学机械与汽车工程学院, 2015.
- [6] 齐文虎. 液压缸双梁铰接式剪叉升降平台布置方式优化设计[D]. 甘肃: 兰州理工大学机电工程学院, 2011.
- [7] 赵艳平, 马利平. 基于 FluidSIM 的剪叉式升降台液压系统设计[J]. 液压气动与密封, 2014, 34(12): 17-19.
- [8] 李 近. 浅谈虚功原理的应用[J], 中国科技信息, 2009: 21(24): 25 + 30.
- [9] CAO Min, ZHANG Yong-chao, YU Fan. Optimizing design of mechanical. self-centering device for suspension height [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(6): 69-75.
- [10] 龚 纯, 王正林. 精通 Matlab 最优化计算[M], 北京: 电子工业出版社, 2011.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

何雪宏, 鲁文佳, 殷其阵, 等. 剪叉升降平台液压缸的安装位置优化研究[J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1159 - 1163.

HE Xue-hong, LU Wen-jia, YIN Qi-zhen, et al. Installing position optimization of hydraulic cylinder of scissors lift platform[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(10): 1159 - 1163.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>