

文章编号:1671-6833(2011)04-0038-04

伸缩臂式叉装车调平机构铰点位置优化

何清华^{1,2}, 王石林¹, 贺继林^{1,2}

(1. 中南大学 现代复杂装备设计与极端制造教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083;

2. 湖南山河智能机械股份有限公司, 湖南 长沙 410100)

摘要: 提高伸缩臂式叉装车在装卸货物或铲掘作业时的整机性能, 调平机构的总传动力臂成为制约其性能发挥的关键因素, 利用 MATLAB 遗传算法工具箱, 以提高传动力臂和降低油压波动为目标, 建立了优化数学模型, 对调平机构的结构尺寸和铰点位置进行优化, 仿真表明优化后的尺寸能大大提高叉装车的作业性能的。

关键词: 伸缩臂式叉装车; 调平机构; 传动力臂; MATLAB 遗传算法工具箱

中图分类号: TH602; TP39

文献标志码: A

0 引言

伸缩臂式叉装车 (Telescopic Handler) 是传统叉车的延续和发展, 它将汽车起重机的伸缩臂式结构、传统叉车的叉装功能、装载机快速移动及铲装物料的装卸功能有机地结合到一起, 充分利用伸缩臂式结构伸得高、伸得远的特点, 配合应用各种作业附具, 扩大了作业功能和作业范围, 提高了对作业场地的适应性^[1-2]。在装卸货物的过程中, 要求操作平稳、安全可靠。所以在实际装卸货物的过程中, 要求能提供足够大的作用力。一般来讲提高油缸作用力矩有 3 种方式: 增大液压系统的工作压力 P 、增大油缸大腔面积 A 和增大油缸的作用力臂^[3]。前两者势必要求有较大的功率储备, 是以提高制造成本和加大能耗为代价的, 而后者则是通过优化连杆机构关键构件的尺寸和铰点位置, 改变油缸的作用力臂达到增大力矩的效果, 则避免了上述不足; 同时也能降低油缸的压力波动, 提高作业效果和避免压力波动所带来的振动冲击。但连杆机构的设计和工作又都受到一些限制, 选择一个最佳的设计方案, 显然会大大提高作业质量和工作效率。笔者通过分析叉装车在装卸货物和铲掘作业时的运动特点, 采用 MATLAB 及其遗传算法工具箱对机构进行优化设计, 提高叉装车实际作业的性能。

1 问题分析

伸缩臂式叉装车的工作装置由伸缩臂、调平装置、工作附具及举升油缸、主动调平油缸、从动调平油缸 (铲斗油缸) 等组成。结构关系如图 1 所示。调平机构是一个六连杆机构, 主要由从动调平油缸 (铲斗油缸) 驱动, 是一个有 5 个运动杆件, 7 个低副的单自由度六连杆机构, 它能够根据不同的工作需要更换不同的工作附具, 同时它具有四连杆结构, 能实现附具在较大范围内运动的优点。在装卸货物或铲掘作业时, 由手柄控制的液压阀调节油缸的伸缩, 带动平面连杆机构运动, 以完成作业任务。

调平机构作为叉装车工作装置的核心, 是一个非常重要的传力机构, 但其铰点较多, 故其运动求解相对比较复杂。对于这样一个六连杆机构来说, 在从动调平油缸理论驱动力确定的情况下, 六连杆机构的结构形式直接决定了自动调平油缸的传动力臂和工作附具的工作范围, 机构的结构参数选用不同, 将影响其作业性能。因此我们以油缸对工作附具的传动力臂大小作为衡量工作附具力传动性能的好坏更为确切。

参照图 1, 利用几何关系, 结合余弦定理、正弦定理可依次求得以下参数之间的关系:

$$L_{DC} = \sqrt{L_{DF}^2 + L_{FC}^2 - 2 \cdot L_{DF} \cdot L_{FC} \cdot \cos \angle DFC} \quad (1)$$

收稿日期: 2011-02-17; 修订日期: 2011-04-28

作者简介: 何清华 (1946-), 男, 湖南岳阳人, 中南大学教授, 博导, 主要从事液压工程机械、特种机器人、机械电子工程的研究与技术应用; 王石林 (1986-), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事工程机械化电泳一体化研究。

$$\angle DEG = \arccos[(L_{DE}^2 + L_{EG}^2 - L_{DG}^2)/(2 \cdot L_{DE} \cdot L_{EG})] \quad (2)$$

$$\angle FDE = \angle FDG + \angle EDG = \arcsin(L_{FG} \sin \angle DFG / L_{DG}) + \arcsin(L_{EG} \sin \angle DEG / L_{DG}) \quad (3)$$

$$\angle EGF = \angle DGE + \angle DGF = \arcsin(L_{DF} \sin \angle DFG / L_{DG}) + \arcsin(L_{DE} \sin \angle DEG / L_{DG}) \quad (4)$$

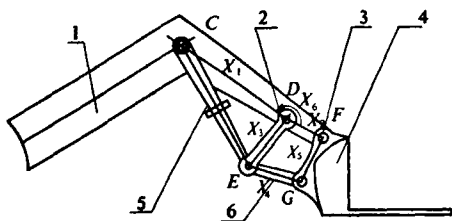
$$L_{CE} = \sqrt{L_{CD}^2 + L_{DE}^2 - 2 \cdot L_{CD} \cdot L_{DE} \cdot \cos \angle CDE} \quad (5)$$

$$\angle CED = \arccos[(L_{DE}^2 + L_{CE}^2 - L_{CD}^2)/(2 \cdot L_{DE} \cdot L_{CE})] \quad (6)$$

根据D、F点的力矩平衡方程 $F \cdot l_1 = F' \cdot l_2$, $F' \cdot l_3 = F_{Load} \cdot l_{Load}$, 故六连杆机构的总传动力臂为:

$$l_o = \frac{l_1 \cdot l_3}{l_2} = \frac{L_{FG} \cdot \sin \angle EGF \cdot \sin \angle CED}{\sin \angle DEG} \quad (7)$$

式中:从动调平油缸对D点的作用力臂 $l_1 = L_{DE} \cdot \sin \angle CED$; 连杆EG对D点的作用力臂 $l_2 = L_{DE} \cdot \sin \angle DEG$; 连杆EG对F点的作用力臂 $l_3 = L_{FG} \cdot \sin \angle EGF$; l_{Load} 为负载阻力的力臂; F_{Load} 为负载力。



1 - 伸缩臂; 2 - 摇杆; 3 - 快换装置; 4 - 货叉
5 - 从动调平油缸(铲斗油缸); 6 - 连杆

图1 伸缩臂式叉装车调平机构结构简图

Fig. 1 The configuration of leveling mechanism for telescopic handler

由总传动力臂计算式可知,传动力臂的表达式是一个比较复杂的非线性函数,且调平机构在理论上存在死点,即传动力臂为零或者无穷大的点。这种奇异点若处理不好,会直接影响到工作装置的工作性能发挥和工作寿命。解决问题的关键在于铰点的合理布局及连杆长度的选定^[4-5]。

2 优化模型

优化设计的数学模型包括优化设计的三要素,即设计变量、约束条件及目标函数。根据叉装车的特点,希望自动调平油缸在液压系统的额定工作压力给定的前提下产生更大的输出力矩,也希望在实际作业时避免油压波动给液压元器件带来的损坏。

由上面的分析可以看出,伸缩臂式叉装车调

平机构的优化设计,属于双目标多约束优化问题,利用遗传算法在反求工程方面的应用^[6],对一些不易确定设计参数和工艺参数,利用遗传算法和计算机仿真技术^[7],把这些参数作为参变量进行编码,获得性能更好的参数组合,以实现对其进行优化。其数学模型可表示如下^[8]:

$$\begin{cases} \min \{f_1(X), f_2(X)\}, X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, X \in E^n \\ \text{sub } g_j(X) \geq 0, j = 1, 2, \dots, J \\ h_l(X) = 0, l = 1, 2, \dots, L \\ a_i \leq x_i \leq b_i, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (8)$$

2.1 设计变量

为了保证有效的作业范围,以快换装置的关节角 $\angle DFG$ 为驱动量。如图1所示,其中 L_{CD} 、 L_{DE} 、 L_{DF} 、 L_{EG} 、 L_{FG} 分别表示铰点C与D、D与E、D与F、E与G、F与G的最短距离,选择这5个要素尺寸参数和 $\angle CDF$ 作为设计变量,则优化问题的设计变量为:

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T \\ = [L_{CD}, L_{DF}, L_{DE}, L_{EG}, L_{FG}, \angle CDF]^T \quad (9)$$

2.2 优化约束条件的确定

根据机构的各要素尺寸的设计要求,只有边界约束和不等式非线性约束,没有等式约束。对于边界约束,为缩小寻优范围,可给出变量适当的下限和上限。由此建立12个边界约束:

$$\begin{cases} g_{2i-1}(X) = x_i^l - x_i \leq 0 \\ g_{2i}(X) = x_i - x_i^u \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: x_i^l 是 x_i 的下限; x_i^u 是 x_i 的上限, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

机构除在任何状态下都必须保证三角形互容之外,且为了避免出现死点,机构的传动角范围在区间 $[40^\circ, 140^\circ]$, 因此应保证以下关系:

$$\begin{cases} g_{13}(X) = \angle CED - 140^\circ \leq 0 \\ g_{14}(X) = 40^\circ - \angle CED \leq 0 \\ g_{15}(X) = \angle EGF - 140^\circ \leq 0 \\ g_{16}(X) = 40^\circ - \angle EGF \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

为避免构件在运动过程中不产生碰撞,从动调平油缸在伸缩过程中不能与伸缩臂相碰, $\angle CED$ 的大小必须满足以下关系:

$$g_{17}(X) = \beta - \angle CED \leq 0 \quad (12)$$

β 的大小随油缸的安装位置和缸套的外径结构不同而不同,此为 3.8° 。此外,根据叉装车的实际工作特点,附具摆动角度 $\angle DFG$ 的值一般在 $70^\circ \sim 170^\circ$ 之间。

2.3 优化设计目标函数

2.3.1 子目标函数确定

多目标优化中存在两个优化目标,分别是传动力臂的优化和油压波动值的优化.因此目标函数由两个子目标函数组成,即传动力臂优化目标函数和油压波动值优化目标函数.

(1)传动力臂优化目标函数

为了使叉装车在装卸货物或进行铲掘作业过程中,以较小的输入力输出尽可能大的作用力矩,同时又不提高制造成本,可以通过改变结构尺寸的方式达到.因此该目标在恒定的液压缸输入力的前提下,通过结构尺寸的优化,使输出力矩达到最大.即在附具摆动角度范围移动确定的情况下,以最小作用力使力臂最大作为目标函数,为统一形式,可取其倒数作为目标函数,从而取其最小值:

$$\min f_1(X) = \frac{1}{(l_e)_{\min}} \tag{13}$$

(2)油压波动值优化目标函数

在实际作业时避免油压波动给液压元器件带来的损坏,快换机构要求近恒力输出,即在输入力一定的前提下,∠DFG变化时,能够输出近似稳定的作用力.在优化模型的建立中,目标函数都是求函数的最小值,则在∠DFG变化范围移动确定的情况下,以最大的输出作用力与最小的输出作用力之比最小作为目标函数.

$$\min f_2(X) = \frac{(l_e)_{\max}}{(l_e)_{\min}} \tag{14}$$

式中:(l_e)_{max}为快换机构∠DFG变化时的最大作用力臂;(l_e)_{min}为快换机构∠DFG变化时的最小作用力臂.

2.3.2 多目标函数确定

多目标函数优化一般都比较复杂,因此一般将多目标函数通过函数模型的处理转化为单目标函数模型.一般方法有统一目标函数法,主要目标函数法,功效系数法和全数的确定法^[9].

由于此多目标为双目标优化,相对比较简单.因此采用统一目标函数法中的线性加权和法求解该双目标优化,其思想即根据各子目标的重要程度给予相应的权数,然后用各子目标函数分别与各自对应权数相乘,再相加后构造为一个综合目标函数,即:

$$\min F(X) = \omega_1 \cdot f_1(X) + \omega_2 \cdot f_2(X) \tag{15}$$

式中: ω_1, ω_2 分别对应传动力臂优化目标函数 $\min f_1(X)$ 及油压波动值优化目标函数 $\min f_2(X)$

的权数,各权数满足归一性和非负性条件:

$$\sum_{i=1}^2 \omega_i = 1, \omega_i \geq 0 (i = 1, 2) \tag{16}$$

笔者最后得到的目标函数为:

$$\min F(X) = \frac{0.9896}{(l_e)_{\min}} + \frac{0.0104 \times (l_e)_{\max}}{(l_e)_{\min}} \tag{17}$$

3 设计验证

六连杆机构的可行解空间的确定是经过反复的单个参变量变化及人工经验得出的数据,搜索的初值定为叉装车的实际参数,因为该结构也是较为成熟的设计.

表1为某公司伸缩臂式叉装车调平机构铰点相对位置参数及其可行域,通过MATLAB遗传算法工具箱获得的6个参数的优化结果如表2所示,并且优化前后两个性能参数如下,优化前: $\frac{(l_e)_{\max}}{(l_e)_{\min}} = 1.5456, (l_e)_{\min} = 128.6775$,优化后: $\frac{(l_e)_{\max}}{(l_e)_{\min}} = 1.4062, (l_e)_{\min} = 153.4635$.从数据可以得出,相对于初始设计值,力臂的最大比值降低了10%,最小作用力臂提高了19%.

表1 某公司伸缩臂式叉装车调平机构铰点相对位置参数及可行域

Tab. 1 The relative position of the paramaters and the feasible region of leveling mechanism in a compang

变量	CD /mm	DF /mm	DE /mm	EG /mm	FG /mm	∠DFG /(°)
初始值	755.0	278.0	301.0	310.0	200.446	180
最小值	698.0	257.0	278.0	287.0	186.0	165
最大值	812.0	299.0	324.0	333.0	216.0	195

表2 六连杆机构设计变量优化结果

Tab. 2 The eptimal result of design variables for six-bar mechanism

变量	CD /mm	DF /mm	DE /mm	EG /mm	FG /mm	∠DFG /(°)
优化值	755.0	257.0	320.0	310.0	216	195

图2为优化前后调平机构传动力臂与∠DFG的曲线关系关系,从图2可以看出,作用力臂明显提高,且力臂变化趋势更为平缓.可见,优化后的结构尺寸能较大幅度提高叉装车的作业性能.

4 结论

由优化结果可以看出,伸缩臂式叉装车工作

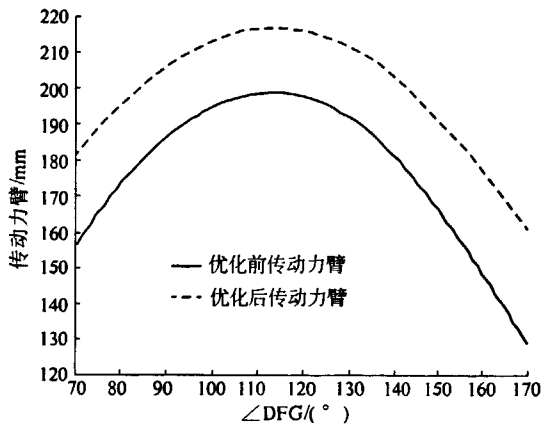


图2 优化前后调平机构传动力臂与的关系

Fig. 2 The curviline relationship of the arm of leveling mechanism and $\angle DFG$ before and after optimization

装置调平机构经过优化以后,即在满足各约束条件下,取得一个比较合适的值,达到了增大输出力臂和降低油缸的油压波动的目的,提高了叉装车的工作性能,提升了工作效率。

参考文献:

[1] 曾立斌,侯忠明.伸缩臂叉装车发展概述[J].物流

技术,2000,2:13-14.

- [2] 王志,闰洪峰,陈文科,等.伸缩臂叉装车设计思想浅析[J].农业装备与车辆工程.2009,4:5-10.
- [3] 陈育仪.工程机械优化设计[M].北京:中国铁道出版社,1987.
- [4] 何清华,张大庆,郝鹏,等.液压挖掘机工作装置仿真研究[J].系统仿真学报.2006,18(3):735-738.
- [5] 薛渊,吕广明,陆念力.复合形法在液压挖掘机铲斗连杆机构优化设计中的应用[J].现代制造工程,2006(3):114-116.
- [6] 张思才,张方晓.一种改进遗传算法及在结构优化设计中的应用[J].机械强度,2005,27(6):766-769.
- [7] 陈伦军,罗延科,陈海红,等.机械优化设计遗传算法[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [8] 梁尚明,殷国富.现代机械优化设计方法[M].北京:化学工业出版社,2005.5
- [9] 孙靖民.机械优化设计[M].北京:机械工业出版社,1999.

Optimization of Hinge Point Position of Leveling Mechanism for The Telescopic Handler

HE Qing-hua^{1,2}, WANG Shi-lin¹, HE Ji-lin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Complex Equipment Design and Extreme Manufacturing of Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Sunward Intelligent Machinery CO., Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract: The transmission force arm of the leveling mechanism is a key factor that restricts the telescopic exertion capability during the loading and unloading of goods or shovel operations. In this paper, a mathematical model of optimization is established, using the genetic algorithm toolbox of MATLAB to improve the transmission arm and reduce the oil pressure fluctuations, then the dimension and the hinge point position of the structure is optimized. The simulation shows that the optimized result can enhance the performance of the telescopic.

Key words: telescopic; leveling mechanism; transmission force arm; genetic algorithm toolbox of MATLAB