

基于广义既约梯度算法的反铲工作装置优化设计

卜祥建¹, 侯亮^{1*}, 郭涛², 钱尧一¹, 林森泉¹

(1. 厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门厦工机械股份有限公司, 福建 厦门 361023)

摘要: 为了提高挖掘机反铲工作装置的作业性能, 对反铲工作装置进行分析, 确定影响工作装置性能的关键参数. 利用 ADAMS 软件, 通过参数化点坐标的方法建立工作装置虚拟样机模型. 将反铲工作装置分解为 2 组: 铲斗机构和动臂、斗杆机构. 先优化铲斗机构, 然后在铲斗机构最大传动比位置上对动臂、斗杆机构进行优化. 将反铲工作装置的力学性能优化目标通过线性加权和法构造为单目标函数, 工作范围优化目标转化为约束函数, 并以铰点的位置坐标作为优化变量, 利用广义既约梯度 (GRG) 算法, 完成了工作装置的多目标优化设计. 优化后的模型, 其挖掘力、提升力及工作范围等性能均优于原设计方案.

关键词: ADAMS; 广义既约梯度法; 工作装置; 优化

中图分类号: TH 122

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2014)03-0368-05

挖掘机反铲工作装置由铲斗、斗杆、动臂、连杆机构以及 3 组液压缸组成, 如图 1 所示, 通过 3 组油缸的组合运动, 配合快换装置可以完成挖掘、装载、破碎等多种作业. 挖掘机反铲工作装置的优化设计是一个复杂的非线性多目标优化问题, 它对于提高整机的工作效率、改善整机作业性能具有重要的意义^[1].

目前, 反铲工作装置的优化大致可分为 2 类: 1) 基于计算机编程的优化设计. 蒋炎坤等^[1]基于遗传算法进行编程, 以挖掘机的挖掘力为优化目标, 完成了工作装置的优化设计, 具有较高的计算效率. 于国飞等^[2]运用 MATLAB 构造了工作装置的动力学方程. 卢青^[3]则编制了斗杆优化设计的 C 语言程序, 通过搜索得到斗杆新铰点的位置坐标; 2) 基于虚拟样机的参数化优化设计. 郭晓宁^[4]研究了利用 ADAMS 建立工作装置系统参数化模型的方法, 提出挖掘机工作装置可以被视为由一系列有序的 RRR 二级杆组单元组成. 潘玉安等^[5]利用 ADAMS, 以油缸作用力最小为优化目标, 根据不同工况对铲斗机构、斗杆机构、动臂机构的构造点进行了优化. Ward 等^[6]开发了一款专门针对液压挖掘机的优化设计软件. Frimpong 等^[7]建立了正铲挖掘机虚拟样机模型模拟露天采矿作业.

基于虚拟样机的优化设计相比计算机编程的优化设计, 具有建模简单、控制容易、可视性强、分析全面、编程量少的优点^[8], 更适合工程设计人员. 本文基于 ADAMS 技术, 通过将工作装置分解为 2 组机构: 铲斗机构和动臂、斗杆机构, 分别进行优化, 完成了工作装置的优化设计.

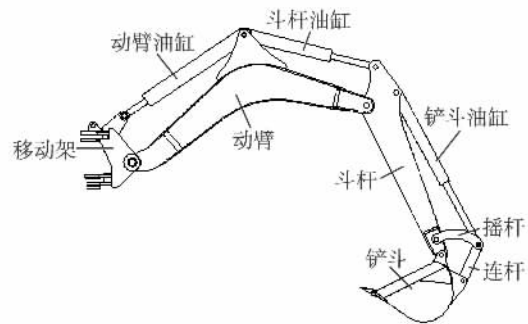


图 1 挖掘机工作装置

Fig. 1 Excavator working device

1 多目标优化

1.1 多目标规划

工程设计、规划和管理中的很多问题都是多目标优化问题. 多目标优化问题的数学描述由目标函数、决策变量、约束条件组成. 一般多目标优化数学描述如下:

收稿日期: 2013-07-18

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAF07B04)

* 通信作者: hliang@xmu.edu.cn

$$\begin{cases} \min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_i(x)]^T, \\ g(x) = [g_1(x), g_2(x), \dots, g_i(x)] \leq 0, \\ l \leq x \leq u, l, u \in E^n. \end{cases} \quad (1)$$

较为常用的多目标优化方法有主要目标法和统一目标法等. 主要目标法是一个目标作为主要目标, 将其他目标转化成约束条件. 统一目标法则将多个目标通过一定的方法转化为单目标, 又分为线性加权和法、极大极小法、分目标乘除法等.

反铲工作装置的优化设计中主要目标有: 1) 力学性能目标, 主要包括铲斗挖掘力、斗杆挖掘力、斗杆提升力、动臂提升力等; 2) 工作尺寸目标, 主要包括铲斗转角、最大卸料高度、最大挖掘深度等. 通过对多个目标函数的试验分析可知, 反铲工作装置工作尺寸目标相对于力学性能更容易达到设计要求. 为了降低目标函数的复杂程度, 提高计算效率, 本文将线性加权和法和主要目标法相结合来构造评价函数. 以力学性能目标作为优化设计的目标函数, 并采用线性加权和法, 通过选取合适的加权因子构造为单目标优化函数, 而将工作尺寸目标函数转化为约束函数. 构造新的多目标优化数学模型如下:

$$\begin{cases} \min f(x) = \omega_1 f_1(x) + \omega_2 f_2(x) + \dots + \omega_i f_i(x), \\ g(x) = [g_1(x), g_2(x), \dots, g_i(x)] \leq 0, \\ l \leq x \leq u, l, u \in E^n. \end{cases} \quad (2)$$

1.2 广义既约梯度 (GRG) 算法

ADAMS 中提供了 2 种优化算法: 序列二次规划 (SQP) 算法和 GRG 算法. SQP 算法通过在每个迭代点构造一个二次规划子问题, 并以该子问题的解作为一维搜索的迭代方向, 逼近约束优化问题的最优解. SQP 算法求解非线性规划问题时, 常采用罚函数作为其效益函数, 使迭代点常常不可行, 得到的近似解不能满足要求严格可行的实际问题^[9]; 在迭代过程中产生的二次规划子问题可能无解, 使运算过程中断.

GRG 算法可以很方便地求解式 (2) 中描述的问题^[10]. 它将变量区分为基变量 (m 个) 和非基变量 ($n - m$ 个), 基变量和非基变量之间的关系由隐式确定, 将基变量用非基变量表示, 并从目标函数中消去基变量, 得到以非基变量为自变量的简化目标函数, 进而利用此函数的负梯度构造下降可行的方向. GRG 算法是目前求解非线性规划问题最有效的方法之一, 其通过消去某些变量在降维空间中运算, 能够较快确定最优解, 可用来求解大型问题^[11].

2 反铲工作装置分析

铲斗机构如图 2 所示, 不考虑各构件的自重、液压系统等因素的影响, 铲斗的理论挖掘力为:

$$F_Q = F_{CD} \times \frac{r_1 \times r_2}{L_{QV} \times r_3} = F_{CD} \times \frac{L_{KQ} \times \sin \angle GMN \times \sin \angle MKQ}{L_{QV} \times \sin \angle NMK} = A_{CD} \times p \times i, \quad (3)$$

其中, F_Q 为铲斗的理论挖掘力, F_{CD} 为铲斗液压缸的理论推力, A_{CD} 为铲斗液压缸作用面积, p 为液压系统工作压力, i 为铲斗机构的传动比.

在系统工作压力不变的情况下, 铲斗的理论挖掘力 F_Q 与铲斗机构的传动比 i 成正比. 根据 Q 、 N 点的力矩平衡, 可得到铲斗挖掘时铲斗液压缸的理论挖掘力.

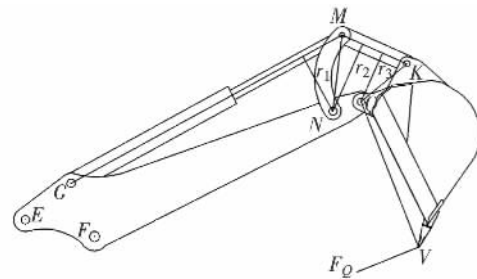


图 2 铲斗机构

Fig 2 Bucket mechanism

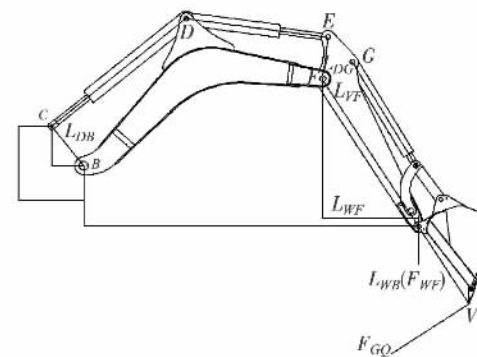


图 3 反铲工作装置简图

Fig 3 Backhoe working device

如图 3 所示, 以斗杆和铲斗机构组成的整体为研究对象, 不考虑各构件的自重、液压系统等因素的影响, 在动臂力臂最大时, 对 F 点取力矩平衡:

$$F_{DG} \times L_{DF} \times \sin \angle EDF = F_{GQ} \times L_{VF} =$$

$$F_{WF} \times L_{WF}, \tag{4}$$

式中, F_{GQ} 是作用在铲斗尖的切向挖掘阻力, L_{VF} 是作用在铲斗尖的切向挖掘阻力对 F 点的力臂, F_{WF} 是斗杆提升力, L_{WF} 是斗杆提升力对 F 点的力臂, F_{GQ} 、 F_{WF} 可用下列方程表示:

$$F_{GQ} = \frac{F_{DG} \times L_{DF} \times \sin \angle EDF}{L_{VF}}, \tag{5}$$

$$F_{WF} = \frac{F_{DG} \times L_{DF} \times \sin \angle EDF}{L_{WF}}. \tag{6}$$

以整个工作装置为研究对象, 不考虑各构件的自重、液压系统等因素的影响, 对 B 点取力矩平衡, 有:

$$F_{DB} \times L_{BD} \times \sin \angle BDC = F_{WB} \times L_{WB}, \tag{7}$$

因此, 动臂提升力:

$$F_{WB} = \frac{F_{DB} \times L_{BD} \times \sin \angle BDC}{L_{WB}}. \tag{8}$$

3 工作装置的优化设计

机械系统的设计是一个不断反复的过程, 为了达到最优化的设计目标, 需要对系统中的关键变量进行优化. 在 ADAMS 中, 用户可以通过其参数化设计功能自动进行参数的分析计算^[12]. 本文利用参数化坐标点的方法建立工作装置参数化虚拟样机模型. 由于各构件的具体形状对设计影响很小, 因此建立虚拟样机模型时, 在保证各铰点坐标的条件下, 采用简单的图形来表示各构件.

在反铲工作装置中, 铲斗机构挖掘力的大小与铲斗机构传动比以及动臂油缸、斗杆油缸的闭锁力矩等有关. 铲斗机构挖掘时, 只要保证动臂油缸、斗杆油缸有一定的闭锁力矩, 就能充分发挥铲斗机构的挖掘力. 因此, 动臂、斗杆的主要铰点 C 、 D 、 E 、 F 对铲斗机构优化的影响较小; 同样, 在动臂、斗杆提升以及斗杆挖掘时, 铲斗机构位置一定, 铲斗机构主要铰点 G 、 M 、 N 、 K 、 Q 对挖掘机斗杆提升力、挖掘力、动臂提升力的影响较小. 为了进一步降低工作装置优化设计的复杂程度, 提高计算效率, 可以将工作装置分解为 2 组机构: 铲斗机构和动臂、斗杆机构, 先对铲斗机构进行优化, 然后在铲斗机构最大传动比工作位置上完成动臂、斗杆机构的优化, 通过对 2 组机构的优化完成工作装置的整体优化设计.

3.1 铲斗机构的优化设计

由公式 (3) 可知, 传动比是关于 L_{KQ} 、 L_{QV} 、 $\angle GMN$ 、 $\angle MKQ$ 、 $\angle NMK$ 的函数, 即与 M 、 N 、 K 、 Q 、 G 铰点的位置有关. 为了保证铲斗的通用性, K 、

Q 、 V 3 点的相对位置关系保持不变, 分别对铰点坐标参数化, 建立 DV_1-DV_6 的设计变量. 此外, 铲斗的转角范围与铲斗油缸的总行程相关, 将铲斗油缸行程参数化, 建立设计变量 DV_7.

铲斗优化的目标为增大铲斗机构的传动比, 保证铲斗的转角范围大于 178° , 采用主要目标函数法, 将铲斗机构的传动比作为优化目标, 铲斗的转角作为约束函数.

根据优化目标, 铲斗的转角大于 178° , 建立第 1 个约束. 为保证铲斗油缸的制造, 铲斗油缸的最小安装尺寸和行程之差需大于等于 300 mm, 建立第 2 个约束. 为确保铲斗油缸全伸时铲斗油缸和斗杆不会发生干涉, N 、 Q 点到铲斗油缸中线的垂直距离需大于等于 120 mm.

将优化目标和优化变量、约束函数提交计算机进行优化计算, 优化方法选择 GRG 算法, 经多次迭代后得到传动比和铲斗转角的优化结果, 如表 1、图 4 所示.

表 1 铲斗机构优化结果

Tab. 1 Optimization results of bucket mechanism

铰点	坐标	设计变量	初值/mm	优化值/mm
M	X	DV_1	-317.71	-301.83
	Y	DV_2	1 578.96	1 598.85
N	X	DV_3	70.96	73.86
	Y	DV_4	1 853.76	1 878.52
G	X	DV_5	737.92	757.33
	Y	DV_6	3 342.09	3 370.36
油缸行程		DV_7	877.00	880.00

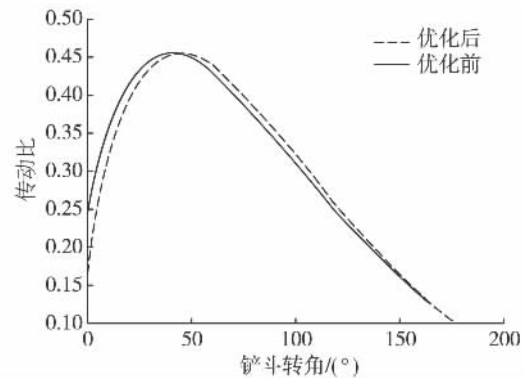


图 4 铲斗机构优化结果

Fig. 4 Optimization results of bucket mechanism

优化后铲斗机构的最大传动比由原来的 0.453 2 提高到 0.453 7, 铲斗最大转角由 169° 提高到 179° , 铲

斗的最大传动比和铲斗转角都满足要求.

3.2 动臂、斗杆机构的优化设计

动臂、斗杆的优化设计的目标是提高工作装置的提升力、挖掘力以及最大挖掘深度、最大卸料高度等. 为保证铲斗机构的挖掘力,在铲斗最大传动比工作位置对动臂斗杆进行优化,并以挖掘力、提升力的线性加权目标函数为目标函数. 由于挖掘机工作时斗杆挖掘、斗杆提升以及动臂提升性能都很重要,权重系数均选取为 1/4,工作尺寸优化目标作为约束函数处理. 最终的优化目标定义如下:

$$f = \frac{F_{WB}}{15\,000} \times \frac{1}{4} + \frac{F_{GQ}}{30\,000} \times \frac{1}{4} + \frac{F_{WF}}{15\,000} \times \frac{1}{4} + \frac{F_Q}{60\,000} \times \frac{1}{4}. \tag{9}$$

3.2.1 工作尺寸约束

在动臂油缸全缩,斗杆油缸全缩时,Q、V 连线垂直于地面时,工作装置有最大卸料高度,最大卸料高度应大于 3 650 mm. 在动臂油缸全伸,F、Q、V 3 点共线且垂直于地面时,工作装置有最大挖掘深度,最大挖掘深度大于 4 450 mm. 为了运输的方便,工作装置的高度方向的运输尺寸不超过 3 650 mm. 考虑到在斗杆和动臂油缸伸长时,油缸和铰接销轴不发生干涉,必须限制斗杆油缸和动臂油缸的最小力臂大于 120 mm.

3.2.2 制造参数约束

考虑到油缸的制造参数,斗杆油缸最小安装尺寸和油缸行程之差应大于等于 325 mm,动臂油缸的最小安装尺寸和油缸行程之差应大于等于 350 mm.

选择铰点 C、D、E、F 的坐标和斗杆油缸行程、动臂油缸行程为优化变量,建立 DV_11-DV_20 的设计变量. 将优化目标和优化变量、约束函数提交计算机

进行优化计算,优化方法选择 GRG 算法,经多次迭代后得到动臂、斗杆的优化结果,如表 2、图 5 所示.

表 2 动臂、斗杆优化结果

Tab. 2 Optimization results of boom and arm				
铰点	坐标	变量	初值/mm	优化值/mm
C	X	DV_11	1 529.6	1 935.7
	Y	DV_12	1 330.3	1 147.1
D	X	DV_13	1 441.6	2 323.4
	Y	DV_14	2 671.9	2 419.3
E	X	DV_15	1 048.6	1 480.9
	Y	DV_16	3 564.3	3 154.2
F	X	DV_17	910.5	1 070.9
	Y	DV_18	3 176.7	3 266.3
斗杆油缸行程		DV_19	720.0	775.0
动臂油缸行程		DV_20	968.0	980.0

优化后动臂油缸行程变化较小,工作装置最大挖掘深度为 4 480 mm,最大卸料高度为 3 685 mm,斗杆最大挖掘力提高到 32 653 N,大于原来的 30 647 N,斗杆提升力、动臂提升力均大于 14 700 N(1 500 kg). 满足设计要求,且优于原来的设计方案.

4 结 论

本文通过对反铲工作装置的分析,确定了影响工作装置性能的关键参数. 然后利用 ADAMS,通过参数化坐标点的方法建立工作装置参数化虚拟样机模型. 通过将反铲工作装置分解为 2 组机构,及对优化目标函数和约束函数的合理规划,利用 ADAMS 完成了工

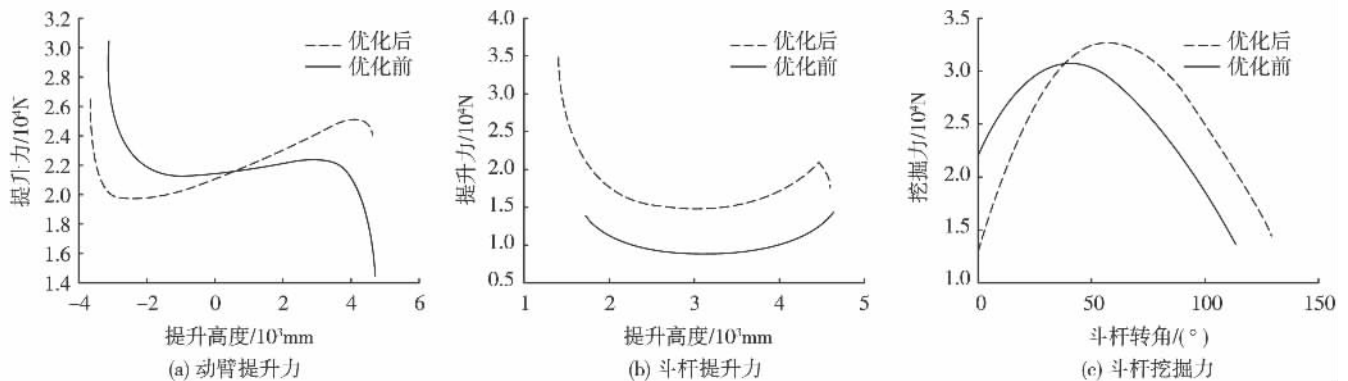


图 5 动臂、斗杆优化结果

Fig 5 Optimization results of boom and arm

作装置的优化设计. 结果表明, 优化后的工作装置在保证铲斗挖掘力的同时铲斗转角达到 179° , 斗杆提升力提高 6.1%, 动臂提升力、斗杆提升力均大于 14 700 N(1 500 kg), 优于原工作装置. 与传统的设计方法相比, 利用 ADAMS 的优化设计方法, 更容易获得较优的设计方案.

参考文献:

- [1] 蒋炎坤, 刘刚强, 李宗, 等. 基于遗传算法的挖掘机工作装置铰点位置优化[J]. 华中科技大学学报, 2011, 39(3): 22-25.
- [2] 于国飞, 宋文荣, 许纯新. 基于 MATLAB 的挖掘机工作装置动力学方程[J]. 农业机械学报, 2003, 34(2): 93-95.
- [3] 卢青. 液压挖掘机工作装置铰点优化设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [4] 郭晓宁. 基于 ADAMS 的液压挖掘机机械系统参数化模型[J]. 中国工程机械学报, 2008, 6(4): 433-437.
- [5] 潘玉安, 程洪涛, 姜迪友, 等. 基于 ADAMS 的挖掘机工作装置的仿真与优化设计[J]. 煤矿机械, 2009, 30(3): 15-17.
- [6] Ward P, Wakeling A, Weeks R, et al. Design of an excavator arm using optimization techniques [M]. [S. l.]: SAE, 1987.
- [7] Frimpong S, Li Y. Virtual prototype simulation of hydraulic shovel kinematics for spatial characterization in surface mining operations [J]. International Journal of Surface Mining Reclamation and Environment, 2005, 19(4): 238-250.
- [8] 戴文跃, 梁昊. 装载机工作装置的动力学仿真与综合优化设计[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2004, 34(4): 602-605.
- [9] 景书杰, 张志荣. 一种新的求解非线性规划的 SQP 方法[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2007, 26(2): 221-224.
- [10] Sancibrian R. Improved GRG method for the optimal synthesis of linkages in function generation problems [J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(10): 1350-1375.
- [11] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [12] 郑建荣. ADAMS——虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

Optimization Design of Backhoe Working Device Based on Generalized Reduced Gradient Algorithm

BU Xiang-jian¹, HOU Liang^{1*}, GUO Tao², QIAN Yao-yi¹, LIN Sen-quan¹

(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Xiamen Xiangong Machinery Company Limited, Xiamen 361023, China)

Abstract: For the objective of improving operating performance of excavator working device, the analysis about device was carried out to find key permanents that influence the performances. Then virtual prototype of the working device was built under the ADAMS software by parameterized coordinates. The working device was simplified into two groups: bucket mechanism and boom arm mechanism, optimizing bucket mechanism at first, then boom arm mechanism was optimized in the maximum transmission ratio position of bucket mechanism. A single objective function was constructed by linear weighted sum method using the mechanical properties optimization objectives of the backhoe working device, and working scope optimization objectives were converted to constraint optimization objectives function. The optimization of the working device was finished using the generalized reduced gradient method with the hinge point coordinates as variables. Performances of the proposed device, such as lifting force, digging force and working scope of the optimal model prove better than those of the old design.

Key words: ADAMS; generalized reduced-gradient method; working device; optimization