

采用粒子群优化算法的液压挖掘机 高效空中运动轨迹规划方法

孙祥云¹, 邵辉¹, 赵家宏²

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建晋工机械有限公司, 福建 晋江 362261)

摘要: 以铲斗姿势角为约束,利用三次多项式插值法进行轨迹规划,以铲斗尖运动的最短路径为目标,并以各关节的最大运动速度为约束,用粒子群优化(PSO)算法对各关节的运动时间进行优化.实验数据和仿真结果表明:经过粒子群算法优化后的轨迹规划方法可大幅度提高挖掘机空中运动的工作效率,并保证各关节运动的平稳性,实现运动路径最优的目标.

关键词: 液压挖掘机; 轨迹规划; 粒子群优化算法; 时间优化

中图分类号: TU 621; TP 271.31 **文献标志码:** A

液压挖掘机广泛应用于水利工程、交通运输、电力工程、矿山采掘等机械施工和救灾现场中.在施工过程中,由于液压系统的高度非线性常使挖掘机出现短时间的停顿,甚至出现抖动,运动的不连续给挖掘机司机的操作带来不便^[1-2].目前,机器人运动轨迹规划算法^[3]已经有了较全面的研究,主要针对工业机器人和分散式机器人,且多以时间最优和系统能量最优为性能指标进行轨迹规划^[4-9].然而,无论是挖掘机器人还是机械臂,都没有同时以轨迹最短为目标进行规划研究^[10-11].因此,本文提出基于粒子群算法(PSO)的液压挖掘机空中运动的轨迹规划方法.

1 系统概述

图 1 为反铲斗液压挖掘机的结构,其结构可分为工作装置、上部转台和行走装置 3 个部分.其中,工作装置(由动臂、斗杆和铲斗铰接组成)直接完成挖掘任务,动臂的起落、斗杆的摆动和铲斗的转动则由液压缸驱动完成^[12].文中采用福建晋工机械有限公司生产的 JG915 型挖掘机,其结构参数如表 1 所示.表 1 中: L 为长度; s 为行程; ψ 为转角范围; L_{\max} 为最长缸长; L_{\min} 为最短缸长; v_{\max} 为最大速度.

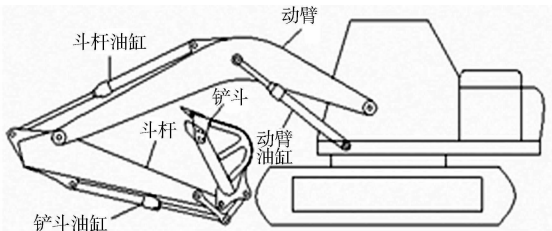


图 1 液压挖掘机结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of hydraulic excavator

表 1 液压挖掘机性能参数
Tab. 1 Parameters of hydraulic excavator

名称	L/mm	s/mm	$\psi/(\text{^\circ})$	L_{\max}/mm	L_{\min}/mm	$v_{\max}/(\text{^\circ})\cdot\text{s}^{-1}$
动臂	4 500	990	$-64\sim48$	2 490	1 500	21
斗杆	2 500	1 175	$28\sim151$	2 875	1 700	37
铲斗	1 300	885	$-42\sim143$	2 262	1 377	28

收稿日期: 2013-12-10

通信作者: 邵辉(1973-),女,讲师,主要从事机器人控制、运动规划、智能控制、非线性系统 LPV 建模的研究. E-mail: shaohuihu11@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61203040);福建省泉州市科技计划项目(2013Z34);华侨大学引进人才科研启动项目(12Y0306)

研究液压挖掘机的空中运动, 即假定机体与底座之间无相对转动, 且铲斗从空中的任意一点运动到挖掘起始点. 因此, 挖掘机的运动学模型与平面三自由度机械臂相似. 取动臂和车身的链接点 (x_1, y_1) 为坐标原点, 挖掘机的平面坐标系, 如图 2 所示. 图 2 中: $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别为动臂、斗杆和铲斗的关节角度; 铲斗的角度 θ_3 由铲斗姿势角 $\theta_{1,2,3}$ 确定, $\theta_{1,2,3} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$ [5].

2 挖掘机轨迹规划

2.1 轨迹规划方法

机器人某关节在运动开始时刻 $t_0 = 0$ 时的关节角度值为 θ_0 , 在 t_f 时刻运动到目标值 θ_f . 设该关节在运动开始点和到达目标点时的速度均为 0, 则可确定唯一的三次多项式通式 [13], 即

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3. \quad (1)$$

挖掘机的运动轨迹需要满足两个必要条件 [6-7]: 1) 规划出的轨迹必须在机械结构的可达范围内; 2) 随着铲斗尖运动轨迹的变化, 铲斗姿势一定要是可行的. 因此, 采用的轨迹规划方法是结合铲斗姿势角约束的三次多项式法, 即

$$\theta_1 = a_{1,0} + a_{1,1} t + a_{1,2} t^2 + a_{1,3} t^3, \quad (2)$$

$$\theta_2 = a_{2,0} + a_{2,1} t + a_{2,2} t^2 + a_{2,3} t^3, \quad (3)$$

$$\theta_3 = \theta_{1,2,3} - \theta_1 - \theta_2, \quad (4)$$

$$\theta_{1,2,3} = \theta_{1,2,3,\max} - a_{1,2,3} t. \quad (5)$$

式(4)中: $\theta_{1,2,3}$ 的范围因挖掘点到机身的距离不同而有所变化, 从实际操作的经验数据中选取, 有

$$\left. \begin{aligned} a_{1,0} &= \theta_{1,0}, \\ a_{1,1} &= 0, \\ a_{1,2} &= 3 \frac{(\theta_{1,f} - \theta_{1,0})}{t_{f,1}^2}, \\ a_{1,3} &= -3 \frac{(\theta_{1,f} - \theta_{1,0})}{t_{f,1}^3}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{2,0} &= \theta_{2,0}, \\ a_{2,1} &= 0, \\ a_{2,2} &= 3 \frac{(\theta_{2,f} - \theta_{2,0})}{t_{f,2}^2}, \\ a_{2,3} &= -3 \frac{(\theta_{2,f} - \theta_{2,0})}{t_{f,2}^3}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$a_{1,2,3} = \frac{(\theta_{1,2,3,\max} - \theta_{1,2,3,\min})}{t_{f,3}}. \quad (8)$$

式(6)~(8)中: $\theta_{1,0}, \theta_{1,f}$ 分别为动臂在起始点与目标点的关节角度; $\theta_{2,0}, \theta_{2,f}$ 分别为斗杆在起始点与目标点的关节角度; $t_{f,1}, t_{f,2}, t_{f,3}$ 分别为动臂、斗杆、铲斗的运动时间. 由于三次多项式法可以满足液压挖掘机在空中运动时对于平稳性的要求, 并可以有效地结合挖掘姿势角来进行规划, 所以没有再选用高次多项式法来规划轨迹.

2.2 时间最优求解

式(6)~(8)为三次多项式规划方法中未知系数的解, 是以各个关节运动时间为前提条件的. 为了使挖掘机的动臂、斗杆和铲斗在最短的时间内完成空中运动得到最优轨迹, 需要以轨迹最短为目标, 以最大关节速度为约束来优化各个关节的运动时间. 其约束方程为

$$\left. \begin{aligned} f(t) &= \min L(t), \\ \text{s. t. } \max\{|v_1|\} &\leq v_{1,\max}, \quad \max\{|v_2|\} \leq v_{2,\max}, \quad \max\{|v_3|\} \leq v_{3,\max}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

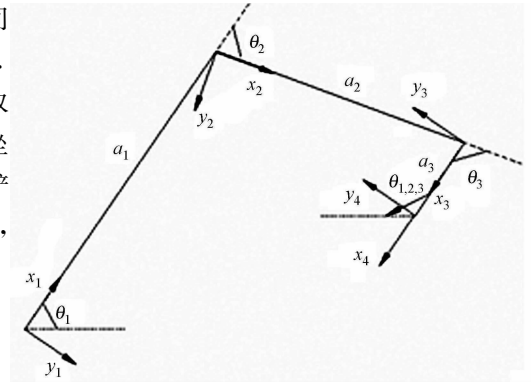


图 2 液压挖掘机的平面坐标系图

Fig. 2 Plane coordinate system of hydraulic excavator

式(9)中: $L(t)$ 为铲斗尖完成运动的路径长度,通过运动学方程使其转换成为与运动时间相关的函数; $|v_1|, |v_2|, |v_3|$ 分别为动臂、斗杆和铲斗在各个运动时间点的速度集合; $v_{1,\max}, v_{2,\max}, v_{3,\max}$ 分别为动臂、斗杆和铲斗的最大关节速度.三次多项式法不具备优化算法的性质,因此,这里采用粒子群优化算法^[9,14]对各关节的运动时间同时进行优化以得到最优的运动轨迹.

粒子群优化算法(PSO)是一种基于群体智能的优化方法,该算法模拟鸟群飞行觅食的行为来达到最优.在 PSO 中,种群的每个成员称为粒子,每个粒子在多维空间内进行飞行,每个粒子的初始位置和速度是随机产生的,并不断地根据粒子本身的经验、整个种群的经验来更新自己位置的速度.优化对象抽象为粒子 i ,并延伸到 N 维空间,粒子 i 在 N 维空间的位置表示为矢量 x_i ,飞行速度表示为矢量 v_i ,每个粒子 i 都有一个由目标函数决定的适应值(fitness value),每个粒子的最优位置为 pBest,整个群体中所有粒子的最优位置为 gBest.基本粒子群算法粒子 i 的进化方程可描述为

$$v_{i,j}^{k+1} = \omega \times v_{i,j}^k + c_1 \times r_1 \times (p_{i,j} - x_{i,j}^k) + c_2 \times r_2 \times (p_{g,j} - x_{i,j}^k), \tag{10}$$

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1}. \tag{11}$$

式(10)~(11)中: $v_{i,j}^k$ 为第 i 个粒子在第 k 次迭代时的飞行速度的第 j 维分量; $x_{i,j}^k$ 为第 i 个粒子在第 k 次迭代时的飞行位置的第 j 维分量; $p_{g,j}$ 为群体最好位置 gBest 的第 j 维分量; $p_{i,j}$ 为粒子 i 最好位置 pBest 的第 j 维分量; r_1, r_2 为随机数; c_1, c_2 为权重因子; ω 为惯性权重.

对挖掘机的动臂、斗杆和铲斗的运动时间进行优化,优化的目标函数为式(9), $t_{f,1}, t_{f,2}$ 和 $t_{f,3}$ 是待优化的未知量,即粒子 i 的 $x_{i,j}^k$;同时,系数 $a_{1,0}, a_{1,1}, a_{1,2}, a_{1,3}, a_{2,0}, a_{2,1}, a_{2,2}, a_{2,3}$ 和 $a_{1,2,3}$ 也是待求解的未知数,即以 $t_{f,1}, t_{f,2}$ 和 $t_{f,3}$ 为因变量的函数.

为了使关节速度尽快收敛到约束条件内,只选择符合约束条件的粒子进行迭代寻优.通过优化出的各个关节运动时间可得到空中运动中每一个关节变量的表达式,再通过挖掘机的运动学方程得到对应时间内各个关节的位姿,然后计算每次迭代优化出的粒子对应斗尖运动的路径长度,长度最小所对应的那组粒子即为各个关节的最优运动时间.具体有以下 8 个步骤.

步骤 1 初始化种群,即在 3 个关节运动时间的搜索空间中随机产生 $m \times 3$ 个粒子,粒子的最大迭代速度为 v_{\max} ,最大迭代次数为 k_{\max} ,迭代次数为 k .

步骤 2 根据产生的 m 组粒子,即 $[t_{f,1}, t_{f,2}, t_{f,3}]$ 代入式(6)~(8)中,求解出系数 $a_{1,0}, a_{1,1}, a_{1,2}, a_{1,3}, a_{2,0}, a_{2,1}, a_{2,2}, a_{2,3}, a_{1,2,3}$.

步骤 3 将系数代入式(2)~(5)中,求解出各个关节变量的三次多项式,并对时间求导,得到各个关节的速度函数,留下符合最大速度约束的函数对应的 $n(n \leq m)$ 组粒子.

步骤 4 对符合最大速度约束条件的每组粒子代入式(2)~(5)进行求解,再根据逆运动学公式求出各个关节运动的位置,从而得到每组粒子对应的各关节运动轨迹长度,取所有组中轨迹长度的最小值来设置 $p_{i,j}$ 和 $p_{g,j}$.

步骤 5 对步骤 3 留下的 n 组粒子进行迭代更新,使每个关节的运动时间尽量减小,并通过步骤 4 不断更新 $p_{i,j}$ 和 $p_{g,j}$.

步骤 6 根据式(10)~(11)迭代更新每组粒子 i 的速度和位置,如果 $p_{g,j}$ 的适应度值比 $p_{i,j}$ 的适应值高,则用 $p_{g,j}$ 取代 $p_{i,j}$;反之,则用 $p_{i,j}$ 取代 $p_{g,j}$.

步骤 7 满足终止条件则算法结束,否则转入步骤 2 继续迭代优化.

步骤 8 完成各关节的运动时间优化,3 个关节的整体运动时间取 $t_{f,1}, t_{f,2}, t_{f,3}$ 中的最大值,各关节的运动时间达到各自优化的运动时间就停止运动,可同时满足其运动学和关节变量的约束. PSO 的初始化过程由随机数开始,在计算步骤 3 时,若无符合条件的粒子留下,需要重新调整粒子的取值范围.

2.3 仿真结果分析

选取初始点 $(5, 5.2, 70^\circ)$ 和终点 $(7.5, -1.5, 30^\circ)$,采用晋工机械 JG915 型挖掘机的参数进行仿真验证.用有挖掘姿势角约束的三次多项式法规划出运动轨迹,再经过 PSO 迭代优化出的各关节运动时间 $t_{f,1}, t_{f,2}, t_{f,3}$ 分别为 4.961 6, 4.004 6, 4.774 9 s,与优化前的运动时间相比分别缩短了 0.038, 0.995, 0.225 s.优化之后的各关节位置和速度曲线,如图 3~4 所示.由图 3~4 可知:各关节运动的最大速度分别趋近 $v_{1,\max}, v_{2,\max}, v_{3,\max}$,同时各关节的位置变化无起伏、较平滑.

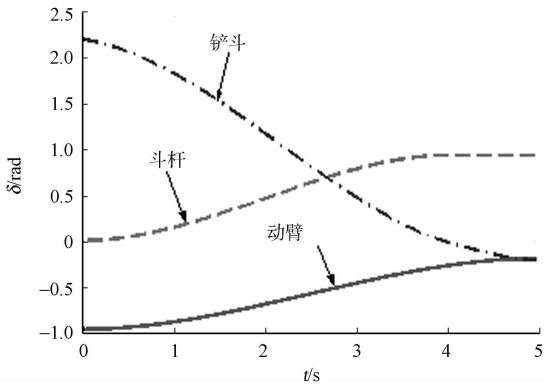


图 3 各关节位置曲线

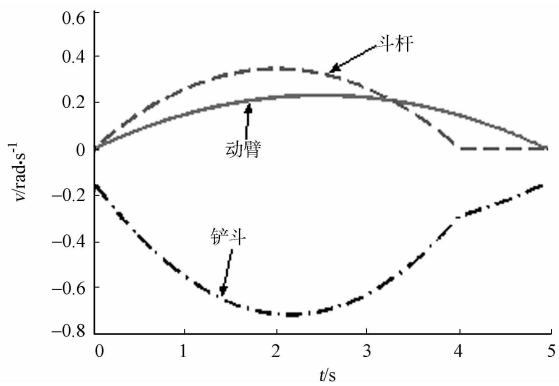


图 4 各关节速度曲线

Fig. 3 Position curves of hydraulic excavator joints Fig. 4 Velocity curves of hydraulic excavator joints

优化后的铲斗运动轨迹的长度为 7.345 6 m,比优化前的运动轨迹的长度减少了 0.184 5 m. 经过粒子群算法优化后的各关节的运动轨迹对比,如图 5 所示. 斗杆和铲斗的运动轨迹有明显的缩短,由于动臂的运动时间优化前后变化不大,所以运动轨迹几乎没有变化.

各关节的缸长曲线,如图 6 所示. 由图 6 可知:铲斗缸的缸长曲线只出现了 1 次轻微波动(图 6 右下角的放大图),这是在铲斗姿势角的约束下无法避免的,但动臂缸和斗杆缸的缸长曲线均没出现起伏变化.

液压挖掘机从空中起始点运动到挖掘目标点的动态图,如图 7 所示. 由图 7 可知:3 关节在整个空中运动中没有往复运动,即运动过程中各关节没有抖动出现.

实验数据和仿真图表明:在铲斗姿势角约束下的轨迹规划法经过粒子群算法的优化后可以大幅度提高挖掘机空中运动的工作效率,并保证各关节运动的平稳性,实现运动路径最优的目标.

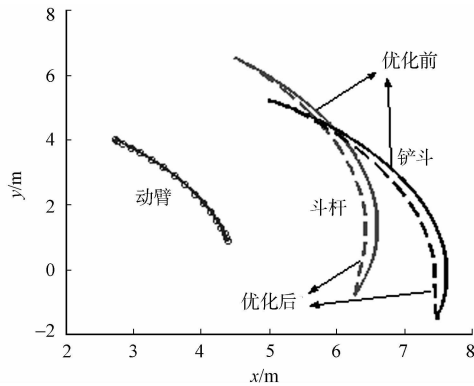


图 5 优化前后的轨迹对比曲线
Fig. 5 Trajectory comparison before and after optimization

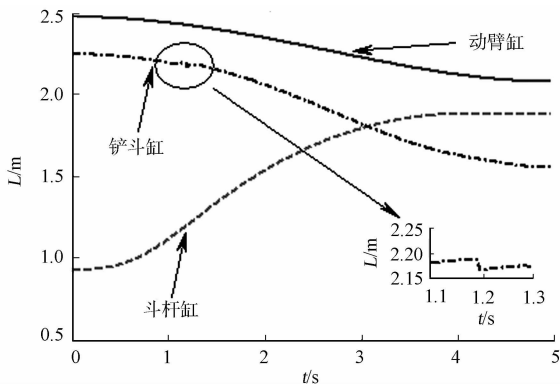


图 6 各关节的缸长曲线

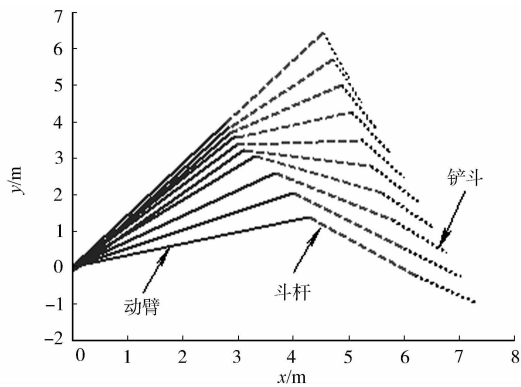


图 7 3 关节的动态图

Fig. 6 Length curves of hydraulic excavator joints' cylinders

Fig. 7 Motion dynamics of 3 joints

3 结束语

提出一种符合铲斗姿势约束条件的液压挖掘机空中运动的轨迹规划方法,可以满足其在作业过程中的平稳性,并能够提高其空中运动的效率. 从仿真结果可以看出:液压挖掘机在运动时间达到最优的同时,各关节的运动轨迹是平稳的,并且各关节的液压缸缸长变化能够证明其作业过程中没有出现往复运动. 该方法是单纯以运动学分析为基础的,鉴于挖掘机液压系统存在强非线性特性,还需要结合挖

掘机液压模型的研究和仿真分析,并合理地加入一些非线性控制方法^[15].

参考文献:

[1] 华靖. 液压挖掘机反铲斗杆回摆运动问题分析及解决方法[J]. 矿山机械, 2006, 34(5): 63-64.

[2] SHAO Hui, YAMAGUCH T, YAMAMOTO H. Bucket trajectory planning of hydraulic excavator[C]//12th Robotics Symposium. Hakone: [s. n], 2007: 354-359.

[3] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000: 265-280.

[4] 肖文皓, 白瑞林, 许凡, 等. 基于信赖域算法的机械臂时间最优轨迹规划[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(6): 77-80.

[5] 黄钢, 李德华, 杨捷. 机械臂最优运动规划问题的混合粒子群算法[J]. 计算机科学, 2009, 36(11): 232-234.

[6] LIAO Yi-huan, LI Dao-kui, TANG Guo-jin. Motion planning for vibration reducing of free-floating redundant manipulators based on hybrid optimization approach[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(4): 533-540.

[7] 潘双夏, 季炳伟, 童永峰. 基于操作平稳性的液压挖掘机轨迹规划方法[J]. 浙江大学学报: 自然科学版, 2006, 10(8): 1311-1314.

[8] 任志贵, 陈进, 贺康生, 等. 基于运动学分析的挖掘机器人轨迹规划新方法[J]. 中国工程机械学报, 2012, 10(2): 150-155.

[9] 付荣, 居鹤华. 基于粒子群优化的时间最优机械臂轨迹规划算法[J]. 信息与控制, 2011, 40(6): 802-808.

[10] 邵辉, 胡伟石, 罗继亮, 等. 自动挖掘机的动作规划[J]. 控制工程, 2012, 19(4): 594-597.

[11] SHAO Hui, YAMAMOTO H, SAKAIDA Y, et al. Automatic excavation planning of hydraulic excavator[C]//International Conference of Intelligent Robot and Application. Wuhan: [s. n.], 2008: 1201-1211.

[12] 林慕义, 史青录. 单斗液压挖掘机构造与设计[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 23-25.

[13] 李团结. 机器人技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 116-119.

[14] 李士勇. 智能优化算法原理与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2012: 82-86.

[15] 邵辉, 胡伟石, 罗继亮. 基于 LPV 模型的鲁棒 PI 控制方法[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(12): 1761-1765.

Efficient Air Motion’s Trajectory Planning Method
of Hydraulic Excavator Based on
Particle Swarm Optimization Algorithm

SUN Xiang-yun¹, SHAO Hui¹, ZHAO Jia-hong²

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Jingong Machinery Company Limited, Jinjiang 362261, China)

Abstract: Satisfying the constraint condition of bucket attitude, cubic polynomial interpolation method is used for the trajectory planning on hydraulic excavators. Furthermore, particle swarm optimization (PSO) algorithm is employed to optimize the time of joint motion with the maximum joints’ velocity constraints, ensuring a shortest motion trajectory of bucket tip. The experimental data and simulation results show that the proposed trajectory planning algorithm greatly improves the working efficiency of excavator motion, guarantees the smooth movement of each joint, and obtains the optimal motion path in free space.

Keywords: hydraulic excavator; trajectory planning; particle swarm optimization algorithm; time optimization

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)