

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605017



# 液压挖掘机的两级平滑 挖掘规划方法

邵辉<sup>1</sup>, 叶贤成<sup>1</sup>, 孙祥云<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 信息与科学工程学院, 福建 厦门 361021;  
2. 邢台职业技术学院 科技发展中心, 河北 邢台 054000)

**摘要:** 针对挖掘机在挖掘过程中遇到大障碍物时无法及时进行动作调整导致挖掘机机械损耗增加的问题, 提出一种以满足挖土量为目标的轨迹规划方法. 利用原像规划及下层前向搜索的两级规划方法进行轨迹规划, 实现平滑挖掘, 并通过 Matlab 仿真实验进行验证. 仿真结果表明: 该方法能对挖掘过程中与障碍物的碰撞及时做出反应, 通过原像规划算法完成避障方向的判断, 运用前向搜索算法完成对挖掘动作的调整和再次轨迹规划, 完成避障; 整个规划过程轨迹平滑, 关节角度无大的突变.

**关键词:** 液压挖掘机; 轨迹规划; 大障碍物; 原像规划; 平滑挖掘

**中图分类号:** TU 621      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0610-05

## Research on Two-Level Planning Method of Smoothly Excavating for Hydraulic Excavator

SHAO Hui<sup>1</sup>, YE Xiancheng<sup>1</sup>, SUN Xiangyun<sup>2</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
2. Science and Technology Development Center, Xingtai Polytechnic College, Xingtai 054000, China)

**Abstract:** In excavating process, an excavator cannot adjust the action of the bucket timely when large obstacles showed up. This could cause an increase in energy consumption of the machine. To solve this problem, a trajectory planning method for satisfying excavation amount was raised, which used a two-level planning trajectory method of preimage planning and forward search of lower level to achieve a smooth excavation. By using Matlab, simulation tests are performed via this method. The results of the simulation show that this method could make a response timely when excavator collides with obstacles in the process of excavating. Avoiding obstacles by using preimage planning which judges directions for avoiding obstacles and forward search which completes the adjustments of excavating action and secondary trajectory planning. Through the process, not only the planned trajectory is smooth but also the joint angles have few mutation.

**Keywords:** hydraulic excavator; trajectory planning; large obstacle; preimage planning; smoothly excavating

挖掘机作为一种典型的工程机械, 被广泛地应用在交通运输、市政工程、矿业、建筑业等领域, 运用机器人技术的自动挖掘成为新的研究热点. 目前在相关领域, 许多学者在自动挖掘路径优化及自动挖掘运动控制方面取得了一定的研究成果<sup>[1-4]</sup>, 但都是基于土壤松散均匀, 无大障碍物条件下的均匀介质土

**收稿日期:** 2015-07-24

**通信作者:** 邵辉(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事机器人控制、运动规划及智能控制的研究. E-mail: shaohuihull@163.com.

**基金项目:** 福建省科技计划引导性项目(2015H0026); 福建省泉州市科技计划引导性项目(2013Z34); 华侨大学高层次人才科研启动项目(Z1534004)

壤环境. 对于存在大障碍物条件下的非均匀介质土壤环境, 并没有十分有效的自动挖掘轨迹规划解决方案. 传统的机器人在避障轨迹规划领域, 虽已有 A\* 算法、人工势场法、Dijkstra 算法及遗传算法寻优等<sup>[5-8]</sup>成熟的方法, 但挖掘机轨迹规划存在特殊性<sup>[9-11]</sup>, 有别于普通的机器人轨迹规划. 本文提出一种在不同土壤环境下均能满足单次挖土量, 并完成平滑挖掘动作的挖掘机轨迹规划方法.

# 1 单次挖土量的挖掘轨迹规划

## 1.1 轨迹规划方法及挖土量计算

轨迹规划是指根据作业任务要求, 对机械臂末端执行器的运动进行设计, 使之能够从初始状态沿着期望的轨迹运动到达最终状态. 以 JGM 915 型液压挖掘机为主要研究对象, 该型号挖掘机铲斗开口长度为 1 m, 铲斗容积为 0.6 m<sup>3</sup>, 单次满载挖土量约为铲斗容积的 1.5~1.8 倍<sup>[12]</sup>. 运用 D-H 法和拉格朗日方程法, 分别建立挖掘机的运动学与动力学方程, 用于分析挖掘机铲斗斗尖位置、各关节角度及挖掘过程中各关节角速度与关节驱动力之间的关系.

假设挖掘机某关节在运动开始和到达目标时的关节角度、速度和加速度均已知, 可确定关节角度的 5 次多项式变化表达式<sup>[13]</sup>, 即

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5. \tag{1}$$

对式(1)求一阶、二阶导数, 则可分别得到关节速度和加速度的变化表达式. 规划出的挖掘机的运动轨迹需要满足以下 3 个必要条件: 1) 规划出的轨迹必须在机械结构的可达范围内; 2) 运动过程中, 各关节角度的变化必须在给定的范围之内; 3) 挖掘姿态角满足一定条件<sup>[12,14]</sup>.

规划过程中, 需要对挖土量进行计算, 将规划轨迹按采样时间分成若干窄小曲边梯形, 用相应的窄小梯形近似代替窄小曲边梯形, 以窄小梯形的面积之和作为曲边梯形的近似值. 将求得的面积乘以铲斗的开口长度, 即可得挖土量的大小. 假设区间为  $[a, b]$ , 将区间  $n$  等分,  $x_0 = a, \dots, x_n = b$ , 规划轨迹拟合函数  $y = f(x)$  对应的各点函数值为  $y_0, y_1, \dots, y_n$ , 铲斗开口长度为  $h_b$ , 则单次挖土量 ( $V$ ) 的计算公式为

$$V = S \times h_b = \left( \int_a^b f(x) dx \right) \times h_b \approx \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_{i-1} + y_i}{2} \times \frac{b-a}{n} \right) \right] \times h_b. \tag{2}$$

## 1.2 挖掘机轨迹规划

在均匀介质条件下, 挖掘机的轨迹规划除了要满足各关节角度的限制, 也要保证按预定挖掘轨迹进行挖掘后, 能够得到与目标值相同的挖土量. 目标值以挖掘机单次满铲挖土量为基准. 挖掘机的实际挖掘过程分为两个阶段: 铲斗铲入土壤达到挖掘深度过程、到达挖掘深度后铲斗回转抬升过程. 根据操作工人的实际经验, 两个阶段得到的挖土量比例约为 1 : 1<sup>[12]</sup>. 满足单次挖土量的挖掘机轨迹规划, 如图 1 所示. 在得到挖掘起始点、挖掘中间点和挖掘末端点的同时, 通过 5 次多项式就可以得到铲斗斗尖的挖掘轨迹. 满足单次挖土量的铲斗斗尖挖掘轨迹效果图, 如图 2 所示.

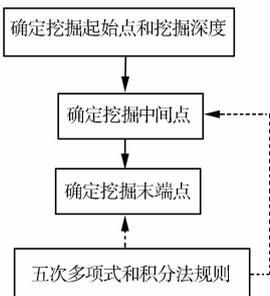


图 1 挖掘作业规划示意图

Fig. 1 Schematic chart of excavating planning

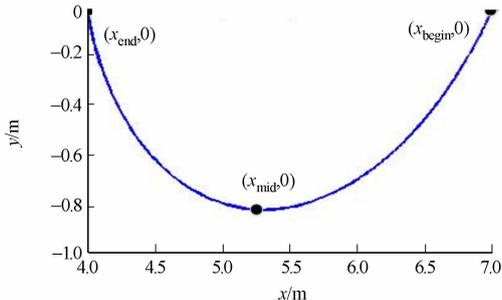


图 2 铲斗斗尖挖掘轨迹效果图

Fig. 2 Bucket tip trajectory of satisfying amount of one excavation

在确定挖掘起始点  $(x_{begin}, 0)$  和挖掘深度  $h$  后, 需要先通过规划得到挖掘中间点  $(x_{mid}, -h)$ , 得到挖掘中间点后, 用相同的方法可得满足条件的挖掘末端点  $(x_{end}, 0)$ . 具体有如下 3 个步骤.

**步骤 1** 单位步长为  $s$ , 循环次数为  $n$ , 初始时,  $n = 1$ . 从  $(x_{begin}, -h)$  开始, 以单位步长  $s$  沿挖掘机机

身方向依次规划挖掘中间点,令横坐标  $x' = x_{begin} - ns$ , 执行步骤 2.

**步骤 2** 利用 5 次多项式, 规划出从起始点  $(x_{begin}, 0)$  到规划好的挖掘中间点  $(x', h)$  之间的铲斗斗尖运动路径.

**步骤 3** 通过积分法, 计算搜索过程的挖土量  $V'$ , 若挖土量满足目标值  $0.5V$ , 则可确定该点为挖掘中间点, 坐标为  $(x_{mid}, -h)$ , 规划结束; 若不满足, 令  $n = n + 1$ , 继续执行步骤 1.

## 2 有障碍物条件下的两级挖掘轨迹规划

### 2.1 障碍物分析

土壤环境可分为均匀介质环境和非均匀介质环境, 节 1.2 提出的方法是基于均匀介质环境进行的讨论. 假定在非均匀介质环境下, 大障碍物出现在铲斗铲入的过程, 障碍物包络圆及原像规划示意图, 如图 3 所示. 图 3 中: obs 为障碍物, 大小超过铲斗容积 30% 的坚硬介质块. 如果障碍物存在以下 2 种情况, 则超出本文的讨论范围. 1) 在存在大障碍物的非均质介质环境下, 土壤介质环境超过挖掘机的挖掘能力. 2) 避障过程中, 当挖掘机关节角达到极限值时, 仍不能顺利完成避障动作, 完成平滑挖掘.

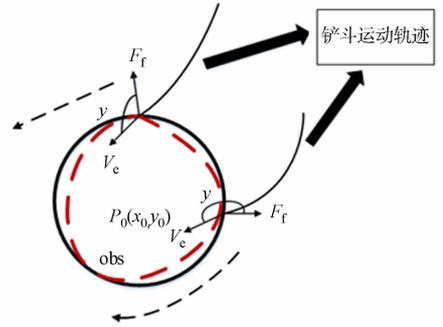


图 3 障碍物包络圆及原像规划示意图  
Fig. 3 Envelope circle of obstacle and schematic diagram of preimage planning

障碍物一般具有不规则的几何形状, 因此, 利用障碍物的规则体包络近似建模. 这种方法虽然扩大障碍物的大小, 但简化对障碍物的分析过程, 有效地提高轨迹规划的效率. 以障碍物 obs 为例, 包络圆为  $S(p_0, r_0)$ , 其中:  $p_0(x_0, y_0)$  为圆心在基坐标系中的坐标;  $r_0$  为圆的半径. 依照该方法, 障碍物在土壤环境中的平面域为

$$S = \{(x, y) \mid (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \leq r_0^2\}. \tag{10}$$

### 2.2 避障轨迹规划

避障轨迹规划的完整步骤, 如图 4 所示. 原像规划<sup>[15]</sup>主要用于分析存在不确定性情况下机器人的操作规划, 经常应用在机器人装配产品的制造业中. 铲斗在触碰到的较大介质块时, 受到障碍物 obs 产生的反作用力, 挖掘阻力会产生

突变(图 3). 假定遇到障碍物时, 铲斗斗尖受力方向是可测得的, 那么, 对铲斗斗尖运动  $V_c$  方向和碰到障碍物时受力  $F_f$  方向的夹角  $\gamma$  进行判断, 当  $\gamma$  为  $0^\circ \sim 180^\circ$  时, 挖掘机将沿着障碍物的上半部分进行避障规划; 当  $\gamma$  为  $180^\circ \sim 360^\circ$  时, 挖掘机将沿着障碍物的下半部分进行避障规划.

完成方向判断后, 剩余的避障轨迹规划由提出的一种前向搜索的轨迹规划方法完成, 设定点集  $P, Q$  保存可选路径点与不可选路径点. 铲斗斗尖的运动状态与路径点一一对应, 通过碰撞检测, 将“自由”或是“碰撞”的信息赋予点集  $P, Q$ , 轨迹规划问题就转化为求从初始位姿点到目标位姿点, 不与障碍点集合  $Q$  发生碰撞的轨迹规划问题.

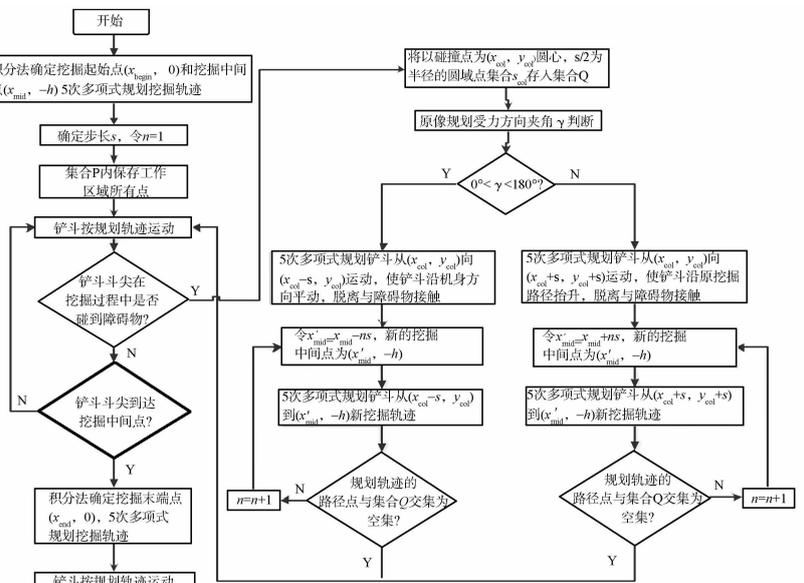


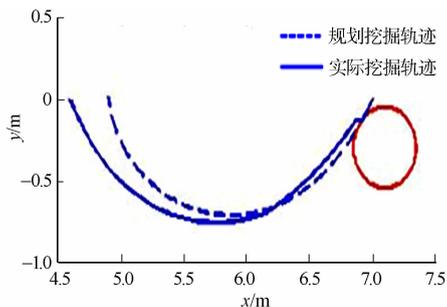
图 4 避障轨迹规划流程图

Fig. 4 Flow chart of obstacle avoidance trajectory planning

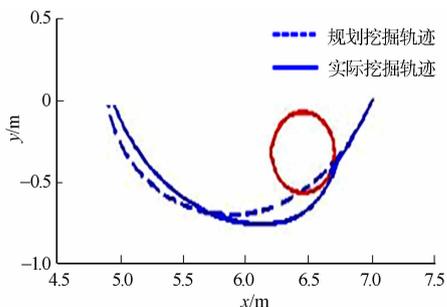
在运用前向搜索算法避开障碍物, 完成平滑挖掘后, 需要规划余下的挖掘轨迹. 将障碍物体积作为当前挖土量的一部分, 按节 1.2 的方法, 计算铲斗当前挖土量, 得到目标挖土量与当前挖土量的差值, 并以完成剩余挖土量为目标规划余下的挖掘路径.

### 3 仿真结果分析

利用 Matlab 软件进行编程验证, 选取挖掘起始点坐标为 (7, 0), 障碍物直径为 0.5 m, 挖掘深度为 0.7 m, 步长为 0.05 m, 规划单次挖土量为 0.9 m<sup>3</sup>. 避障的铲斗斗尖运动轨迹, 如图 5 所示. 挖掘过程中挖掘力变化及各关节角度变化, 如图 6 所示.



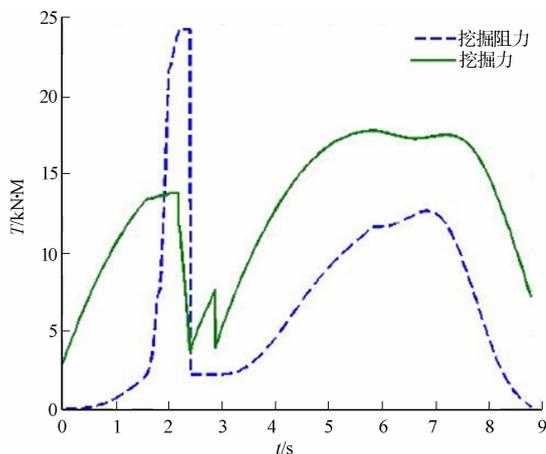
(a) 沿障碍物上半部分避障



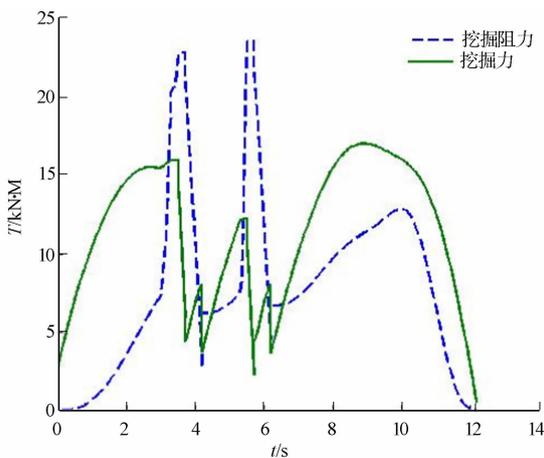
(b) 沿下半部分避障

图 5 避障的铲斗斗尖运动轨迹

Fig. 5 Bucket tip trajectory with obstacle avoidance



(a) 情况 1



(b) 情况 2

图 6 挖掘力和各关节角度

Fig. 6 Excavating force and joint angle

由图 5,6 可知:挖掘机铲斗斗尖分别在 1.6 s 左右(图 5(a))和 2.8,5.3 s 左右(图 5(b))与障碍物发生碰撞,此时挖掘阻力发生突变,系统能够对碰撞过程中的挖掘阻力突变做出反应.铲斗斗尖分别沿着障碍物的上半沿和下半沿运动,完成避障动作,并按照新的规划轨迹完成挖掘动作,实现挖掘机铲斗的平滑运动.经过积分法计算,两次轨迹规划后得到挖土量分别为 0.909,0.915 m<sup>3</sup>,与设定值差别不大.整个运动过程中,挖掘机各关节角度和挖掘姿态角变化均在合理范围内,挖掘轨迹平滑.通过以上两个仿真试验,证明提出的避障轨迹规划方法能够完成挖掘过程中的避障运动,并达到设定的挖土量.

## 4 结束语

以 JGM 915 型液压挖掘机为主要研究对象,针对挖掘机在挖掘过程中遇到大障碍物时无法及时进行动作调整,顺利完成挖掘作业的问题,提出一种基于原像规划和下层前向搜索的两级挖掘轨迹规划方法,并通过 Matlab 仿真验证.该规划方法为挖掘机自动挖掘和避障轨迹规划提供理论依据,能够为实际的挖掘作业提供指导.

### 参考文献:

- [1] ROWE P S. Adaptive motion planning for autonomous mass excavation[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1999:119-149.
- [2] SAEEDI P, LAWREBCE P D, LOWE D G, et al. An autonomous excavator with vision-based track-slippage control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(1): 67-84.
- [3] 冯培恩, 孙守迁, 杨毅, 等. 采掘机器人的规划级控制技术研究[J]. 自动化学报, 1995, 21(1): 33-39.
- [4] 孙祥云, 邵辉, 赵家宏. 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[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 498-502.
- [5] DUCHON F, BABINEC A, KAJAN M, et al. Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot[J]. Procedia Engineering, 2014, 96(96): 59-69.
- [6] PAN Zhou, LI Jiaqi, HU Kaimin, et al. Intelligent vehicle path planning based on improved artificial potential field method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 742: 349-354.
- [7] NI Kai, ZHANG Yaoting, MA Yueeng. Shortest path analysis based on dijkstra's algorithm in emergency response system[J]. Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2014, 12: 3476-3482.
- [8] LIU Fei, LIANG Shan, XIAN Xiaodong. Optimal robot path planning for multiple goals visiting based on tailored genetic algorithm[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2014, 7(6): 1109-1122.
- [9] 汤一平, 姜荣剑, 林璐璐. 基于主动式全景视觉的移动机器人障碍物检测[J]. 计算机科学, 2015, 42(3): 284-288, 315.
- [10] 陈胜奋, 谢明红. 工业机器人运动碰撞的仿真实现[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 137-141.
- [11] WANG Yao, HU Yanjuan, FAN Jiuchen, et al. Collision detection based on bounding box for NC machining simulation[J]. Physics Procedia, 2012, 24(1): 247-252.
- [12] 山元弘. IT 施工系统的原型制作(4): 建设机械的自动控制系统的改良与开发技术报告[R]. 茨城: 日本土木研究所, 2008: 3.
- [13] 李团结. 机器人技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 120-121.
- [14] 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.
- [15] LAVALLE S M. 规划算法[M]. 张庆雅, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2011: 468-473.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 吴逢铁)