

DOI: 10.3901/JME.2009.07.029

装载机铲掘作业的轨迹规划*

龚 捷 崔玉鑫

(吉林大学机械科学与工程学院 长春 130022)

摘要: 为给装载机的铲掘作业寻找一条能耗较小的铲掘轨迹, 根据经验及有关文献给出的较理想的直线和曲线两种铲掘作业的轨迹方程, 经过对装载机铲掘作业的轨迹规划及运动学建模, 实现铲掘轨迹由直角坐标空间向关节空间转换以及由关节空间向驱动空间转换, 得到动臂油缸和转斗油缸的驱动方程, 并给出铲斗在实现铲掘轨迹的过程中所受的作用力。对在 ADAMS 环境下 ZL40 装载机仿真模型进行仿真, 结果表明, 装载机在同样时间内完成同样的作业量下, 直线铲掘轨迹所作的总功小于曲线铲掘轨迹。

关键词: 装载机 铲掘作业 轨迹规划 节能 仿真

中图分类号: TH243

Track Planning for a Wheel Loader in a Digging

GONG Jie CUI Yuxin

(Institute of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022)

Abstract: To seek a track which consumes less energy for a wheel loader in a digging process, the track equations of two kinds of ideal tracks, a beeline and a curve, are given according to experience and relevant literature. The tracks are transformed from right-angle-space coordinate to joint-space coordinate, and from joint-space coordinate to drive space through track planning and kinematics modeling for the type of ZL40 wheel loader in a digging process. The drive equations of the lift cylinder and tilt cylinder are obtained. The force acting on the bucket in a digging process is given. A simulation for the ZL40 wheel loader model is presented in ADAMS software. The simulation result shows that the beeline track consumes less energy than the curve track does while the same load is completed in the same time.

Key words: Wheel loader Digging process Track planning Saving energy Simulation

0 前言

装载机是循环作业的机器, 每个作业循环主要由铲掘、运输、卸料等三个工况组成, 其中, 铲掘工况所消耗功率最大。目前, 世界上许多国家生产的装载机已经实现了遥控作业, 并且已经进入了实用化阶段; 而国内生产的装载机的铲掘作业仍是由操作者操纵动臂手柄或铲斗手柄来完成的。由于装载机的作业形式是它围绕着作业对象在移动, 而作业对象复杂多变, 具有很大的随机性, 因而, 就使得装载机的铲掘作业的效率很大程度上取决于操作者的经验、技能和意愿^[1-3]。

目前, 国内外在装载机自动控制方面的一些主

要研究成果如下: 文献[4]对装载机工作装置的电液比例控制、远程定位控制、铲斗持平进行了研究。文献[5]给出了装载机铲取区间水平等阻线的概念, 并建立了基于水平等阻线的铲取区间控制策略。文献[6]给出了装载机理想铲掘轨迹的特性。而目前对装载机作业的轨迹规划研究得较少。

为了节约能源, 降低操作者的劳动强度, 提高我国工程机械产品的竞争力, 本文针对与装载机自动铲掘控制密切相关的铲掘作业的轨迹规划问题, 以 ADAMS 环境下的 ZL40 装载机为仿真模型, 针对在同样时间内完成同样的作业量时, 两种不同轨迹下的动臂油缸和转斗油缸施加的作用力和做功的情况进行了仿真研究。

装载机自动铲掘控制的目标是: 为了实现高效节能, 要求装载机在尽可能短的时间内, 以尽可能小的能耗, 获得较大的铲斗装载率。

* 吉林大学青年教师基金资助项目。20080714 收到初稿, 20090309 收到修改稿

根据上述装载机自动铲掘控制的目标, 确定本文的研究目的: 为装载机在均质的料堆进行铲掘时, 找一条铲掘轨迹, 使铲掘过程消耗的能量较小。

本文根据经验及有关文献给出理想的铲掘轨迹, 在 ADAMS 环境下的 ZL40 装载机三维仿真模型上, 使铲斗斗尖实现规定的轨迹, 再根据装载机在该轨迹下铲斗所受的作业阻力, 求得装载机工作装置的动臂油缸和转斗油缸在该轨迹下需要施加的作用力和输出功率, 最后根据所作总功的情况, 确定理想的铲掘轨迹, 为以后进一步研究装载机铲掘作业的自动控制打下技术基础。

1 装载机铲掘作业的轨迹规划

1.1 装载机的铲掘作业的机理及作业方式

根据装载机铲掘作业的特点^[7], 在铲掘作业的工况下, 可以将装载机视做平面运动机构。该平面运动机构有 3 自由度, 分别是车体的平移、动臂的举升以及铲斗的翻转。其中, 动臂的举升是通过动臂油缸来实现的, 铲斗的翻转是通过转斗油缸驱动摇臂及连杆来实现的, 其工作原理如图 1 所示。

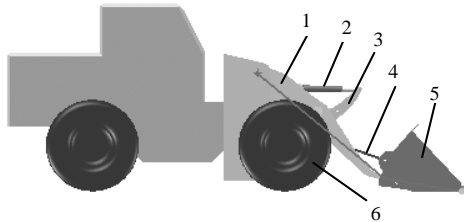


图 1 装载机铲掘作业的工作原理

1. 动臂 2. 转斗油缸 3. 摇臂 4. 连杆 5. 铲斗 6. 车轮

装载机铲掘物料有四种方法: 一次铲掘法、分段铲掘法、挖掘法、配合铲掘法。在这些铲掘方法中, 配合铲掘法能够使铲斗在铲掘过程中所受的铲掘阻力最小。它具体实现的方法是: 装载机前进, 把铲斗插入物料一定深度, 然后, 在装载机前进的同时, 还配合以铲斗翻转及动臂的提升。下面, 本文将以配合铲掘法来规划铲掘作业轨迹。

1.2 铲掘轨迹的确定

根据上述配合铲掘法的特点, 确定作业轨迹由两部分构成: ① 插入区间。铲斗底部平行于地面, 水平地插入物料, 如图 2 所示的 AB 段; ② 铲取及提升区间。车辆在前进的同时, 通过操纵动臂油缸和转斗油缸完成铲斗的铲取及提升, 如图 2 所示的 BC 段。在铲取及提升区间, 铲斗斗尖轨迹既可以是直线, 也可以是曲线, 具体轨迹形式可由轨迹规划给出。

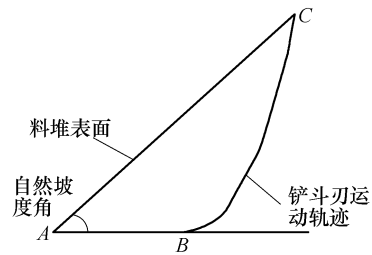


图 2 料堆模型与铲斗铲掘轨迹区间划分示意图

下面设定装载机的作业条件。根据 ZL40 装载机的铲斗斗容 1.8 m^3 , 铲斗宽度为 2.75 m , 而得到的铲斗截面积 $0.654 545 \text{ m}^2$, 文中设定装载机在一次铲掘作业铲斗截面积为 $0.579 0 \text{ m}^2$, 料堆坡度角为 45° 。

为了描述铲掘轨迹方程, 文中以装载机在行进中铲斗斗尖刚好接触料堆时刻的车体与动臂的铰点为坐标原点 O_0 , 以车体向前运动方向为 x_0 轴, 垂直地面向上方向为 y_0 轴, 建立如图 3 所示坐标系。在该固定坐标系中, 铲斗斗尖 O_3 的坐标为 $(3.286 87, -1.934 23)$, 单位为 m 。

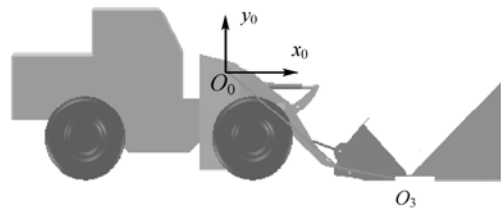


图 3 料堆坐标系

下面根据经验及有关文献, 给出两种理想的铲掘作业轨迹方程, 并将在后面的仿真结果中比较动臂油缸和转斗油缸在两种作业轨迹下施加的作用力和输出功率的情况。

首先, 根据配合铲掘法的特点及操作经验可知, 当使铲斗斗尖的轨迹与料堆坡度的表面线大致平行时, 铲掘作业的能耗较小^[7]。根据上述条件, 并在同时满足插入深度及铲取物料的截面积为 $0.579 0 \text{ m}^2$ 等条件下, 给出在坐标系 $O_0x_0y_0$ 中的铲掘轨迹为直线时的轨迹方程为

$$y = \begin{cases} -1.934 23 & 3.286 87 \leq x \leq 3.996 87 \\ x - 5.931 102 & 3.996 87 < x \leq 4.311 035 \\ 3.475 904x - 16.612 239 & 4.311 035 < x \leq 4.600 80 \end{cases} \quad (1)$$

另外, 根据文献[6]提出的较理想的铲掘作业轨迹条件, 即为确保铲掘作业在最少的时间内完成同样的铲斗装载率, 铲掘轨迹应连续光滑。据此条件, 并同时满足插入深度及铲取截面积为 $0.579 0 \text{ m}^2$ 等条件下, 给出在坐标系 $O_0x_0y_0$ 中的铲掘轨迹为曲

线时的轨迹方程为

$$y = \begin{cases} -1.934\ 23 & 3.286\ 87 \leq x \leq 3.946\ 87 \\ 3.084\ 2x^2 - 24.381x + 46.255\ 6 & 3.946\ 87 < x \leq 4.600\ 80 \end{cases} \quad (2)$$

式(1)、(2)的图形如图 4 所示。

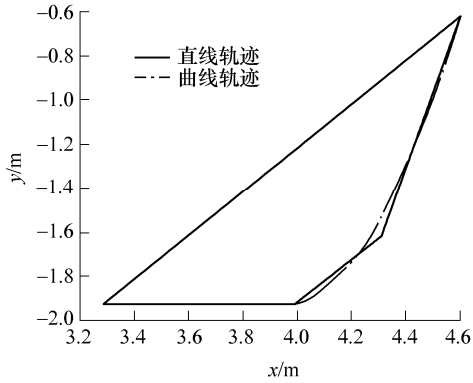


图 4 规划的铲掘轨迹

1.3 铲掘作业的轨迹规划

根据配合铲掘法的特点及操作经验，对铲掘作业的轨迹进行如下规划：水平插入时，将轨迹规划为动臂和铲斗不动，车辆匀速前进；铲取及提升区间时，将轨迹规划为车辆匀速前进，并同时满足动臂不断提升及铲斗不断翻转的姿态条件，则得到两种轨迹下的车速条件。

铲斗斗尖沿直线轨迹运动时，车速条件为

$$v = \begin{cases} 0.437\ 976\ 3\ \text{m/s} & 3.286\ 87 \leq x \leq 3.996\ 87 \\ 0.416\ 445\ 85\ \text{m/s} & 3.996\ 87 < x \leq 4.600\ 80 \end{cases} \quad (3)$$

铲斗斗尖沿曲线轨迹运动时，车速条件为

$$v = \begin{cases} 0.437\ 976\ 3\ \text{m/s} & 3.286\ 87 \leq x \leq 3.946\ 78 \\ 0.417\ 163\ 535\ 7\ \text{m/s} & 3.946\ 78 < x \leq 4.600\ 80 \end{cases} \quad (4)$$

1.4 铲掘轨迹的描述空间转换

为了得到动臂油缸和转斗油缸的驱动方程，需要将上述铲掘轨迹实现由直角坐标空间向关节空间转换以及由关节空间向驱动空间转换。

1.4.1 直角坐标空间向关节空间转换

根据图 5 所建立的装载机铲掘作业的运动学模型及 D-H 坐标系，通过求运动学方程的逆解，可得到如下铲掘轨迹由直角坐标空间向关节空间转换模型^[4,8]

$$\begin{cases} \theta_2 = \arctan \frac{y}{x-s} - \arccos \frac{(x-s)^2 + y^2 + l_2^2 - l_3^2}{2l_2 \sqrt{(x-s)^2 + y^2}} \\ \theta_3 = \arccos \frac{(x-s)^2 + y^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3} \end{cases} \quad (5)$$

式中 θ_i ——从 x_{i-1} 轴到 x_i 轴的转角，绕 z_{i-1} 轴正向转动为正， $i=2,3$

x, y ——铲掘轨迹点对应的坐标值

s ——车体的水平位移

l_2, l_3 —— O_1O_2, O_2O_3 的长度

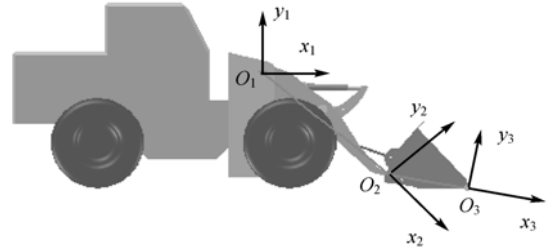


图 5 装载机铲掘作业的运动学模型及 D-H 坐标系

1.4.2 关节空间向驱动空间转换

根据装载机工作装置的连杆机构尺寸，通过求解三角形，可得到动臂油缸和转斗油缸的位移变化量随 θ_2 、 θ_3 的变化关系。由于篇幅关系，具体过程在此不再详述。在此仅给出求解结果，即动臂油缸和转斗油缸分别在直线轨迹和曲线轨迹下的驱动方程。

在规划的轨迹上均匀取 60 个点，经直角坐标空间向关节空间转换和关节空间向驱动空间转换，得到 60 个与其对应的动臂及转斗油缸所在连杆的长度，再将动臂及转斗油缸所在连杆的长度与各自的初始值比较，经曲线拟合，得到动臂油缸及转斗油缸的驱动方程。结果如下。

直线轨迹动臂油缸驱动方程

$$y = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq 1.621\ 092\ 28 \\ 167.775\ 3t - 271.979\ 2 & 1.621\ 092\ 28 < t \leq 1.65 \\ -10.685\ 4t^3 + 89.872\ 8t^2 - 230.925\ 2t + 189.165\ 1 & 1.65 < t \leq 2.35 \\ -296.609\ 0t + 701.221\ 2 & 2.35 < t \leq 2.375\ 488\ 1 \\ 179.096\ 7t - 428.812\ 0 & 2.375\ 488\ 1 < t \leq 2.4 \\ 139.094\ 9t^2 - 598.959\ 7t + 637.109\ 6 & 2.4 < t \leq 2.8 \end{cases} \quad (6)$$

式中 y ——动臂油缸相对于其初始位置的活塞杆位移

t ——时间，其基准是以铲斗斗尖与料堆接触为 0 时刻开始计时

直线轨迹转斗油缸驱动方程

$$y' = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq 1.621\ 092\ 28 \\ -22.900\ 5t + 37.123\ 8 & 1.621\ 092\ 28 < t \leq 1.65 \\ -19.315\ 1t^2 + 146.254\ 6t - 189.193\ 4 & 1.65 < t \leq 2.35 \\ 44.726\ 8t - 56.792\ 9 & 2.35 < t \leq 2.375\ 488\ 1 \\ 440.602\ 3t - 997.190\ 6 & 2.375\ 488\ 1 < t \leq 2.4 \\ -24.893\ 1t^2 - 24.893\ 1t - 447.556\ 1 & 2.4 < t \leq 2.8 \end{cases} \quad (7)$$

式中 y' 为转斗油缸相对于其初始位置的活塞杆位移。

曲线轨迹动臂油缸驱动方程

$$y = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq 1.506931 \\ 92.4099t - 139.2553 & 1.506931 < t \leq 1.55 \\ 66.1616t^3 - 365.3940t^2 + 662.5181t - 391.4379 & 1.55 < t \leq 2.5 \\ 186.1t^2 - 866.9t + 1019.3 & 2.5 < t \leq 2.8 \end{cases} \quad (8)$$

曲线轨迹转斗油缸驱动方程

$$y' = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq 1.506931 \\ -27.4676t + 41.3917 & 1.506931 < t \leq 1.55 \\ 112.4286t^2 - 344.1486t + 262.1100 & 1.55 < t \leq 1.85 \\ 25.7209t^2 - 8.3728t - 63.1305 & 1.85 < t \leq 2.8 \end{cases} \quad (9)$$

2 装载机铲掘作业的受力

下面给出装载机在实现上述铲掘轨迹的铲掘过程中, 铲斗所受的作用力。根据配合铲掘法的特点, 可认为装载机在铲掘过程中, 水平阻力和垂直载荷同时作业在铲斗上, 垂直载荷需要加上铲斗内所装物料的重力^[7]。下面分别求装载机在铲掘过程中铲斗所受的水平阻力、垂直阻力和铲斗内物料的重力。

2.1 水平阻力

在铲掘过程中, 铲斗所受的水平阻力^[7]

$$F_x = 9.8Kbd^{1.25} \quad (10)$$

式中 F_x —— 铲斗插入阻力

K —— 与物料性质有关的影响系数

b —— 铲斗宽度

d —— 铲斗插入料堆的深度

2.2 垂直阻力

在铲掘过程中, 铲斗所受的垂直阻力^[7]

$$F_z = 2.2\sigma bd \quad (11)$$

式中 F_z —— 铲起阻力

σ —— 开始提升时物料的切应力

b —— 铲斗宽度

d —— 铲斗插入料堆的深度

2.3 物料重力

在铲掘过程中, 铲斗所受的物料重力即为铲斗中物料的重力

$$G = \gamma b \int_a^x [f_1(x) - f_2(x)] dx \quad (12)$$

式中 G —— 铲斗中物料的重力

$f_1(x)$ —— 在坐标系中的料堆表面方程

$f_2(x)$ —— 在坐标系 $O_0x_0y_0$ 中的铲掘轨迹方程

x —— 铲斗插入料堆的深度

b —— 铲斗宽度

γ —— 物料重度

3 装载机铲掘作业的仿真

3.1 建立装载机仿真模型

由于 ADAMS 软件的三维实体建模功能相对较弱, 故选择建模功能较强的 Solidworks 软件建立 ZL40 装载机的三维仿真模型^[9], 得到如图 6 所示的仿真模型。

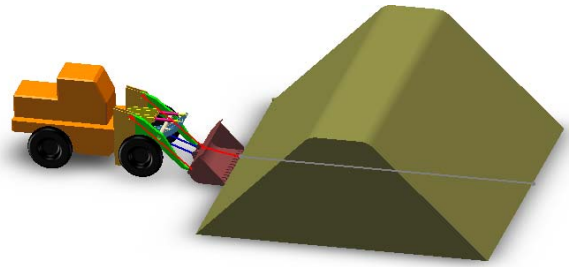


图 6 装载机的三维仿真模型

再将 Solidworks 软件建立的 ZL40 装载机三维模型导入 ADAMS 进行参数设置, 添加相应的运动约束、驱动及力^[10], 最后得到 ZL40 装载机在 ADAMS 环境下的仿真模型。

3.2 仿真条件

在 ADAMS 环境下, 设置如下仿真条件: 仿真时间设为 $t=2.8$ s, 对于直线轨迹, 按照式(10)添加水平阻力, 式(11)添加垂直阻力, 式(12)添加物料重力, 式(3)添加车速, 式(6)添加动臂油缸驱动, 式(7)添加转斗油缸驱动; 对于曲线轨迹, 按照式(4)添加车速, 式(8)添加动臂油缸驱动, 式(9)添加转斗油缸驱动, 其余的与直线轨迹相同。

3.3 仿真结果

在上述仿真条件下, 得到如下仿真结果。图 7、8 分别为两种铲掘轨迹下动臂油缸和转斗油缸的作用力。由图 7、8 可知, 因直线轨迹和曲线轨迹的差异而产生的对动臂油缸和转斗油缸的作用力的影响较小。

下面比较在两种铲掘轨迹下动臂油缸和转斗油缸输出功率的情况。由于直线轨迹在拐点处存在极大的冲击, 文中的直线轨迹输出功率是按照采用圆滑曲线过渡的情况给出的。图 9、10 分别为两种铲掘轨迹下动臂油缸和转斗油缸的输出功率, 图 11 为装载机的动臂油缸和转斗油缸在两种铲掘轨迹下

输出总功率的情况。由图9~11可知，曲线轨迹功率变化总体上较直线轨迹平滑。

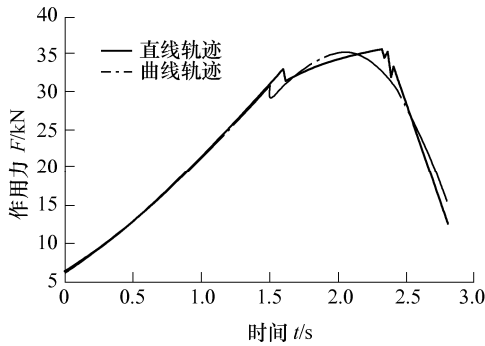


图7 动臂油缸作用力

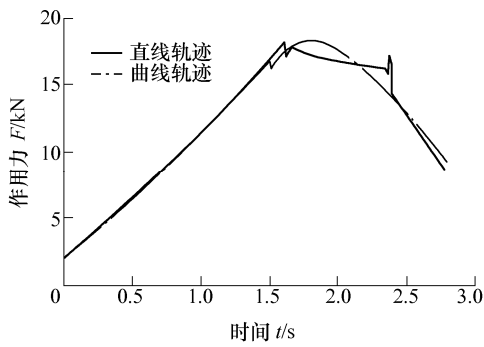


图8 转斗油缸作用力

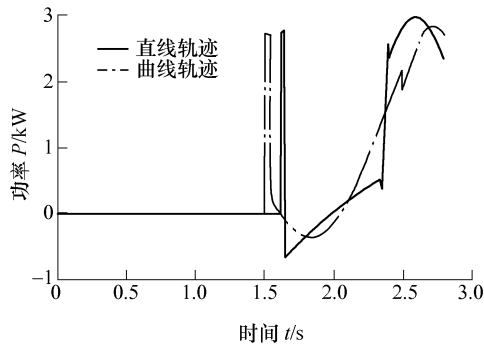


图9 动臂油缸的输出功率

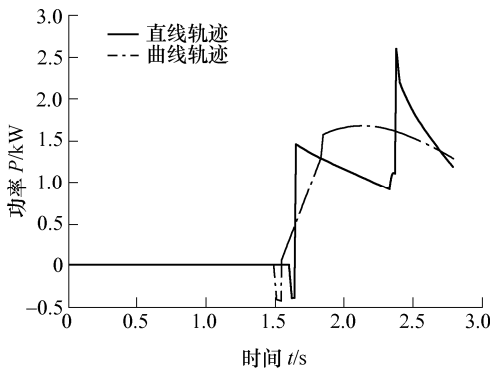


图10 转斗油缸消耗的功率

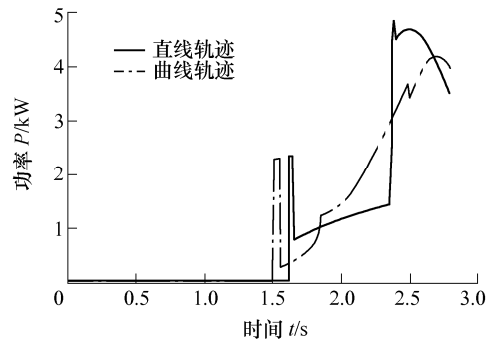


图11 工作装置输出的总功率

下面比较两种铲掘轨迹下动臂油缸和转斗油缸做功情况。分别对动臂油缸和转斗油缸在两种铲掘轨迹下的输出功率进行积分，得到下表所示两种铲掘轨迹下做功比较表。

	表 两种铲掘轨迹下做功比较		总功 W_a
	功 W		
	动臂油缸	转斗油缸	
直线轨迹	1.232 266 8	1.549 503 8	2.781 770 6
曲线轨迹	1.218 393 9	1.680 966 0	2.899 359 9
比较结果	0.013 872 9	-0.131 462 2	-0.117 589 3

由表可知，动臂油缸在曲线铲掘轨迹时所作的功小于直线轨迹，转斗油缸在直线铲掘轨迹时所作的功小于曲线轨迹，动臂油缸和转斗油缸在直线铲掘轨迹所作总功小于曲线轨迹。

4 结论

(1) 当两种铲掘轨迹差异很小时，不同轨迹下的动臂油缸和转斗油缸所施加的作用力的差异也很小。

(2) 动臂油缸和转斗油缸在直线轨迹下，在拐点处存在极大的冲击；曲线轨迹下，动臂油缸和转斗油缸在运动过程中无冲击现象。

(3) 两种铲掘轨迹下动臂油缸和转斗油缸输出功率的起伏变化主要由动臂油缸和转斗油缸的速度要求变化引起的。曲线轨迹输出功率变化总体上较直线轨迹平滑。

(4) 忽略直线轨迹下动臂油缸和转斗油缸冲击时，动臂油缸在曲线铲掘轨迹时所作的功小于直线轨迹，转斗油缸在直线铲掘轨迹时所作的功小于曲线轨迹，动臂油缸和转斗油缸在直线铲掘轨迹所作总功小于曲线轨迹。

参 考 文 献

[1] 黄宗益. 工程机械机电一体化、机器人化[J]. 中国机械

- 工程, 1996, 7(3): 64-66.
- HUANG Zongyi. Mechatronics and robotization on construction machinery and equipment[J]. China Mechanical Engineering, 1996, 7(3): 64-66.
- [2] 王世明, 杨为民, 李天石, 等. 国外工程机械新技术新结构和发展趋势[J]. 工程机械, 2004 (1): 61-66.
- WANG Shiming, YANG Weimin, LI Tianshi, et al. New technology and construction and developing trend on construction machinery and equipment abroad[J]. Construction Machinery and Equipment, 2004 (1): 61-66.
- [3] 杨力夫, 高晔, 陈向东, 等. ZL50G 机器人化装载机[J]. 吉林大学学报(工学版), 2002, 32(2): 59-63.
- YANG Lifu, GAO Ye, CHEN Xiangdong, et al. Study on roboticized loader ZL50[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2002, 32(2): 59-63.
- [4] 王青松. 机器人化装载机的控制系统研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2000.
- WANG Qingsong. Control system of a robotic wheel loader[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [5] 张海, 张以都, 曹淑娟. 装载机自主铲装作业控制策略[J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 46-49.
- ZHANG Hai, ZHANG Yidu, CAO Shujuan. Study on autonomous scooping control strategy of wheel loader[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 46-49.
- [6] WU Long. A study on automatic control of wheel loaders in rock/soil loading[D]. Tucson: The University of Arizona, 2003.
- [7] 徐希民, 黄宗益. 铲土运输机械设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- XU Ximin, HUANG Zongyi. Design for earth moving machinery[M]. Beijing: China Machine Press, 1989.
- [8] JOHN J, CRAIG. 机器人学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- JOHN J, CRAIG. Introduction to robotics mechanics and control[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [9] 江洪, 陆利锋, 魏峥. SolidWorks 动画演示与运动分析实例解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- JIANG Hong, LU Lifeng, WEI Zheng. An example and resolution on cartoon demonstrate and movement analysis in solid works[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [10] 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.
- ZHENG Jianrong. A primer and advanced virtual prototyping technology on ADAMS[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
-
- 作者简介: 龚捷 (通信作者), 女, 1967 年出生, 副教授。主要研究方向为车辆自动变速及机器人技术。
- E-mail: gongjie@jlu.edu.cn