

抓斗式卸船机自动作业的性能优化

孙 斌, 王旭昶

(上海 ABB 工程有限公司, 上海 200001)

摘要: 为了提高卸船机自动作业的性能, 对抓斗的摆动控制和抓斗的路径进行了优化。在分析抓斗摆动规律的基础上, 对周期性加、减速的摆动控制方法进行了改进, 在加减速阶段用分段加速的方法消除抓斗摆动, 在料斗上方卸料时使抓斗向前摆动并保持一定摆角, 产生甩斗卸料的效果, 可以有效缩短循环时间。路径优化将作业区域进行划分并采取相应的小车控制策略, 根据抓斗的当前位置找出安全高度, 在此高度以上, 小车和起升同时运动, 使得抓斗的飞行轨迹是一条能避开所有障碍物的最短安全路径。实际运行结果表明, 抓斗式卸船机自动作业的效率在优化后得到了有效提高。

关键词: 抓斗式卸船机; 摆动控制; 路径优化

中图分类号: TH215; TH112

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)06-0689-04

Performance optimization of automatic ship unloading for GSU

SUN Bin, WANG Xu-chang

(ABB Engineering (Shanghai) Limited, Shanghai 200001, China)

Abstract: In order to improve the performance of automatic ship unloading of GSU (grab ship unloader), grab sway control and load path optimization was carried out. Based on the law of grab sway, sway control was optimized to improve the periodical acceleration/deceleration method. During acceleration and deceleration, two-step acceleration/deceleration method was adopted to eliminate load sway. When the grab approaching the hopper, fly unloading was achieved by controlling the grab sway forward and keep a constant angle, and unloading cycle time was effectively shortened with the proposed method. Grab path was optimized by applying different trolley control strategy to different working areas. An optimal safe level was found out for each grab position. When the grab is above the safe level, trolley and hoist move simultaneously, obtaining a shortest safe grab path that goes over all obstacles. Site test results indicate that efficiency of auto unloading was greatly improved after optimization.

Key words: grab ship unloader(GSU); sway control; path optimization

0 引 言

近年来,随着煤炭、矿石贸易的快速增长,越来越多的用户采购抓斗式卸船机,以提高散货卸船的能力。用户对高效率的追求推动着卸船机不断向大型、高速的方向发展。更高的速度和更快的加速度带来了更短的循环时间,但同时也对司机的操作技能提出了更高的要求。要充分发挥起重机的设计能力,降低司机的劳动强度,自动化卸船作业功能就显得非常重要。

自动化卸船作业应该能够像熟练的司机一样控制起升、开闭和小车协调运动,自动完成卸船循环。自动化作业功能应该具有以下特征:

(1) 充分利用电机和传动系统的最大能力,使起升、开闭和小车能按照最大速度和最大加速度运行;

(2) 控制起升和小车同时运动,使抓斗按照最短的路径在船舱和料斗之间运动;

(3) 控制抓斗的运行轨迹避开船舱、接料板等障碍物,确保货物和起重机的安全;

(4) 有效地控制抓斗的摆动,并能利用抓斗的摆动进行卸料;

(5) 平滑起升、开闭和小车的运动,避免机械冲击,降低维护需求。

安全、高效是自动化卸船作业的目标,抓斗的摆动控制和路径优化是达到此目标的两项关键技术。最容易实现控制抓斗摆动的是周期性加/减速方法^[1],模糊控制^[2,4]利用附加的点动消除负载在终点的摆动,时间不是最优的。文献[5-6]提出摆动控制的 Bang-Bang 控制方法,指出兼顾最优消摆和最优时间的需要。文献[7-10]研究了时间最优控制,仅考虑了抓斗

在起点和终点均静止的情况。

上述研究均限于路径的优化,未考虑路径的安全约束。本研究从实际应用出发,兼顾卸船循环的效率和安全问题,对抓斗摆动和路径优化的方法进行探讨,并以一台卸船机为例,分析效率提高的效果。

1 抓斗摆动控制

抓斗摆动控制是实现卸船自动化的必要前提。抓斗不必要的摆动会对卸船机产生机械冲击,影响抓取和卸料的准确性,容易产生碰撞事故。由于抓斗与小车之间采用柔性的钢丝绳连接,使得抓斗的运动无法直接控制,但通过控制小车的运动速度,可以消除抓斗的摆动。

1.1 摆动模型

抓斗摆动可以简化为如图 1 所示的单摆模型。

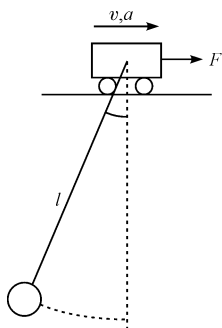


图 1 抓斗摆动模型

本研究忽略钢丝绳的重量和长度变化,以及空气阻力等因素,在小摆角的前提下,抓斗的摆动角度符合以下规律^[2-3]:

$$l \ddot{\theta}(t) + g\theta(t) + a(t) = 0 \quad (1)$$

卸船机作业时,小车通常以恒定的加速度 a 作加速、减速运动或作匀速运动,当加速度恒定时,上述方程的解为:

$$\begin{cases} \theta(t) = \theta_0 \cos \omega t + \dot{\theta}_0 \sin \omega t - A(1 - \cos \omega t) \\ \dot{\theta}(t) = -\theta_0 \omega \sin \omega t + \dot{\theta}_0 \omega \cos \omega t - \omega A \sin \omega t \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_0 —初始摆角; $\dot{\theta}_0$ —初始摆动速度; ω —摆动频率, $\omega = \sqrt{g/l}$; A —摆动幅值, $A = a/g$ 。

当小车从抓斗无摆动状态开始加、减速时, $\theta_0 = 0$, $\dot{\theta}_0 = 0$, 抓斗摆动的角度和速度为:

$$\begin{cases} \theta(t) = A(1 - \cos \omega t) \\ \dot{\theta}(t) = -\omega A \sin \omega t \end{cases} \quad (3)$$

抓斗产生周期 $T = 2\pi \sqrt{l/g}$ 的周期性摆动,摆动的幅值与加速度成正比。

卸船自动化作业过程中的摆动控制包括两个问

题:一是小车加速启动和减速停止时,消除抓斗的摆动,另一个是如何利用抓斗的摆动进行卸料。

1.2 抓斗消摆

1.2.1 周期加速方法

从公式(1)可以看出,无论小车以何种方式运动,经过一个周期后,抓斗的摆动角度和速度都为零,只要小车在这一时刻停止加减速,抓斗将保持无摆动状态。这是一种最简单也是最容易实现的消除摆动的方法^[1]。采用该方法时,加速度的大小随着目标速度和摆长而变化,因此需要随时修改小车运动的加速度。若小车的目标速度为 v_i ,则加速度大小为 $a = v_i/T$,加速时间为一个周期 T 。

1.2.2 两次加速方法

技术熟练的司机通常采用跟车的方法消除抓斗的摆动,当抓斗超前小车时,小车加速跟上,当抓斗落后小车时,小车匀速或减速等待抓斗跟上,当抓斗与小车的同一垂直位置上时,小车停止或匀速运行,抓斗与小车的同一位置而无摆动。这是一种分段加速的方法。采用分段加速实现自动消摆的关键是找出加速度切换的时间点。

若小车以“加速—匀速—加速”的方法从静止加速到目标速度 v_i ,加速度为 a ,加速—匀速—加速的切换时间分别为 t_1 、 t_2 和 t_3 ,3 个阶段抓斗摆动状态可以根据公式(2)来计算。经过第 3 段加速运动后摆动角度和速度均为零,且小车速度达到 v_i :

$$a(t_1 + (t_3 - t_2)) = v_i \quad (4)$$

求解一系列方程组,得到:

$$\begin{cases} t_1 = v_i / (2a) - n\pi / \omega \\ t_2 = (2n + 1)\pi / \omega \\ t_3 = n\pi / \omega + v_i / (2a) \end{cases} \quad (5)$$

可见,小车经过第一次加速,抓斗产生摆动,半个周期后再经过一次同样的加速,即可消除抓斗的摆动,这就是两次加速消除摆动的原理。

本研究分别采用周期加速和分段加速方法消摆的效果比较如图 2 所示。小车速度 180 m/min,小车最大加速度 0.8 m/s^2 。料斗上方的摆长 18 m。本研究采用周期加速方法消摆,加速度 $a = 0.35 \text{ m/s}^2$,所需时间为 $t = 8.5 \text{ s}$,采用分段加速方法,加速度 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$,所需时间为 $t = 6.1 \text{ s}$,时间缩短 2.4 s。

可见,周期加速方法在一个周期内完成加速,以时间为代价消除负载摆动,加速度受到摆长的限制,摆长越大,加速度越小,小车的运动能力越得不到发挥。采用两次加速方法可以充分利用小车的最大加速能力,

在较短的时间内完成加速并消除负载摆动。该方法采用 PLC 程序实现后,可以达到熟练司机的水平,并有效地避免人工操作带来的不确定性,可以大大减轻司机的劳动强度。

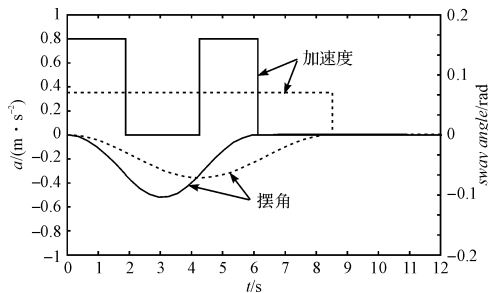


图2 两种消摆方法的比较

1.3 甩斗控制

从上述分析可见,采用周期减速方法,可以控制抓斗无摆动地停在料斗上方,减速时间也为一个周期。一般情况下卸船机司机在接近料斗时,会采用这种方法控制抓斗无摆动地停在卸料点,再打开抓斗卸料。

技术高超的司机会采用一种甩斗卸料技术,在抓斗到达卸料点之前,控制小车减速,使抓斗向前摆动,利用摆动产生的角度和加速度将物料甩到料斗中,可有效地提高生产效率,该方法对于粘性较大的物料效果非常明显。

根据抓斗的摆动规律, $T/2$ 后抓斗的摆角达到最大值 $\theta_m = -2a/g$,摆动速度为零,甩斗的效果是使抓斗始终保持最大的摆角,即:

$$\begin{cases} \theta_m = \theta_m \cos \omega t - A(1 - \cos \omega t) = a/g \\ \dot{\theta}_m = -\theta_m \omega \sin \omega t - \omega A \sin \omega t = 0 \end{cases}$$

只有当 $A = 2a/g$ 时,上式始终成立。由此可以得到实现自动甩斗的控制方法,首先控制小车以最大加速度的一半减速运行,半个周期后以最大加速度减速。当小车速度降到零时,以相反的次序加速,可以使抓斗回到无摆动的状态。

周期减速卸料和甩斗卸料的速度和摆角曲线如图3所示。周期减速耗时 $t = 8.5$ s,甩斗卸料耗时 $t = 5.9$ s,节省 2.6 s。

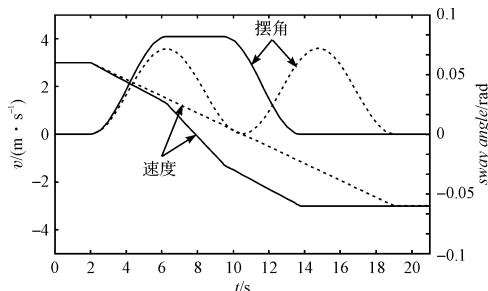


图3 两种卸料方法的比较

甩斗卸料时,小车不需要在料斗上方停顿即可返回,与周期减速相比,小车的行程缩短 1.5 m,又可以节省时间 0.5 s。本研究采用该方法,在卸船机控制程序中实现自动卸载功能后,卸载的准确性、重复性和一致性都得到有效提高。长期运行表明,自动卸载的效率高于熟练司机。

卸船机从抓取点到卸料点再返回抓取点为一个作业循环。如果在离开和返回抓取点时采用分段加速方法消除摆动,在接近卸料点时利用甩斗卸料,可以大大缩短循环时间。与采用周期加减速方法相比,一个作业循环共可节省时间 10 s。

2 抓斗路径优化

抓斗路径优化的目标是:抓斗以最短的时间从船舱内运行到料斗上方并返回,同时避免与船舱、接料板和料斗发生碰撞。

为了确保抓斗运行过程中不会碰到船舱、接料板和料斗,起升应以最大速度运行,使抓斗在尽可能高的位置上运行,以避开障碍物。小车则需要根据距离料斗中心的距离、距离前方障碍物(船舱和接料板)的位置,控制小车的最大运行速度,使得最终形成的抓斗轨迹能绕过障碍物。

为方便程序实现,将作业的区域进行划分,在不同的区域内采取不同的控制方法。将卸船作业的区域划分为 3 部分(如图 4 所示)。在最外侧的区域内,抓斗在任意起升高度上上升时,都可以允许小车以最大速度向料斗运动,抓斗不会碰到船舱或接料板。在中间的区域,只有当起升高速运行时,允许小车运动,而抓斗不会碰到障碍物。最内侧的区域靠近船舱内侧和接料板,在这个区域内,只允许起升运动,不允许小车运动。这种控制方法既能确保抓斗安全运行,又可兼顾效率。

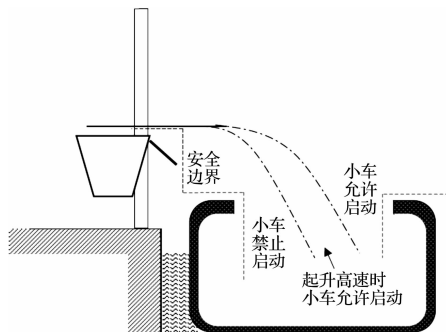


图4 抓斗路径优化

自动化程序根据抓斗的实际位置,实时计算出安全高度,当起升高于此安全高度时,自动循环开始运

行,小车按照前述两步加速方法和甩斗方法向料斗运动,既能保证抓斗的路径安全越过船舱和接料板,又能有效地控制抓斗摆动。实际运行表明抓斗的运行轨迹是一条兼顾安全和效率的抛物线。

某 1 250 t/h 的卸船机采用经过优化的自动卸船功能,对其效率进行考核,考核的位置为小车 24.0 m、起升轨下 1.5 m,在该位置上小车和起升可以同时运动的安全高度为 12.07 m(向料斗方向运行时)和 11.14 m(返回船舱时)。在上述考核位置上连续做 10 个自动循环,测得平均循环时间为 46.759 s,比设计循环时间 49 s 缩短了 2.241 s。抓斗的容量为 19.8 t,按照 90% 的抓取效率,该卸船机的实际效率可以达到 1 372 t/h,比额定效率高 9.75%。

3 结束语

抓斗式卸船机的摆动控制采用分段加速的方法消除抓斗摆动,并在料斗上方利用摆动进行卸载,与周期性消摆方法相比,可以有效地缩短循环时间。路径优化在不同的作业区域采用不同的控制策略,计算一条安全越过障碍物的最短抓斗路径,确保安全的同时又兼顾了效率。采用优化技术的卸船机经过多年的运行,深受市场欢迎,创造了良好的效益。

(上接第 647 页)

本研究通过查看 ANSYS/PDS 输出文件,得到电主轴随机参数灵敏度数值,如图 9 所示。从电主轴随机参数的灵敏度数值表可以看出,电主轴的转矩载荷 T 、转轴外径 D_1 和转轴长度 L 的灵敏度为正,说明这 3 个参数增大时,转轴变形量增大,可靠度降低。其他灵敏度为负。此外,从影响程度来看,转轴外径 D_1 的改变对电主轴的可靠性影响比例为 44.69%,转矩 T 为 32.97%,轴承内径 D_0 为 22.34%,这说明转轴外径 D_1 的改变对电主轴的可靠性影响最大。

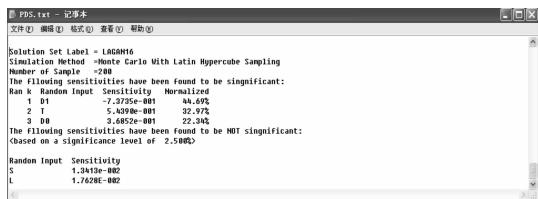


图 9 电主轴随机参数灵敏度数值

4 结束语

本研究利用 ANSYS 软件的 PDS 模块,将蒙特卡罗方法和有限元法结合起来,把电主轴的各种参数均看作随机输入变量,并编制 APDL 命令流对高速电主

参考文献(References):

- [1] KAWAKAMI M. The automatic control system of refuse grabbing crane [C]//IECON, 1984. Tokyo:[s.n.],1984: 679-684.
- [2] OMAR F, KARRAY F, BASIR O, et al. Autonomous overhead crane system using a fuzzy logic controller [J]. **Journal of Vibration and Control**,2004 (10):1255-1270.
- [3] LIANG Y C, KOH K K. Concise anti-swing approach for fuzzy crane control [J]. **IEEE Electrical Letters**,1997,33 (2):167-168.
- [4] GUTIERREZ M, SOTO R. Fuzzy control of a scale prototype overhead crane [C]//Proceedings of IEEE Conference on Decision & Control, 1998. Tampa:[s.n.],1998:4266-4268.
- [5] 邹军,陈志坚. 桥式起重机水平运行及抓斗防摆规律研究[J]. 山东大学学报:自然科学版,1998,33(4):393-397.
- [6] 邹军,陈志坚. 桥式起重机抓斗的防摆控制[J]. 山东大学学报:自然科学版,1999,34(1):58-62.
- [7] AUERNING J W, TROGER H. Time optimal control of overhead crane with hoisting of load [J]. **Automatica**,1987, 23(4):437-447.
- [8] MANSON G A. Time optimal control of an overhead crane model [J]. **Optimal Control Applications & Methods**, 1992,3(2):115-120.
- [9] SAKAWA Y, SHINDO Y. Optimal control of container cranes [J]. **Automatica**,1982,18(3):257-266.
- [10] ONG C, HU G S, TEO C L. Minimum Time Control of Crane with Simultaneous Traverse and Hoist [C]//Proceedings of the ASME: Dynamic Systems and Control Division. Nashville:[s.n.],1999:125-132. [编辑:李辉]

轴进行可靠性分析,通过分析得到了各随机参数对高速电主轴可靠性的影响,为改进高速电主轴设计,提高高速电主轴可靠性提供参考,具有一定的现实意义。

参考文献(References):

- [1] 陈燕林,段志善,熊万里. 高速电主轴技术的研究现状与发展[J]. 机械研究与应用,2004(4):7-11.
- [2] 姚华. 数控机床高速电主轴的研究进展[J]. 机床与液压,2004(2):5-6.
- [3] MA P, LIAO C X. Analysis of Step Interference Fit of the High Speed Motorized Spindle with Finite Element Method [C]//11th International Manufacturing Conference. Shanghai: Shanghai University Press,2004:844-849.
- [4] WEI D, RAHMAN S. Structural reliability analysis by uncertainty decomposition and American integration [J]. **Probabilistic Engineering Mechanics**,2007(22):27-38.
- [5] 栾景美,黄红武,熊万里. 超高速电主轴结构综述[J]. 精密制造与自动化,2002(3):4-8.
- [6] 张伯霖,黄晓明. 高速电主轴设计制造中若干问题的探讨[J]. 制造技术与机床,2001,51(7):122-133.
- [7] 段进,倪栋,王国业. ANSYS10.0 结构分析从入门到精通[M]. 北京:兵器工业出版社,2006.
- [8] 王强,刘刚. 基于 Monte Carlo 法和有限元的结构可靠性研究[J]. 武汉理工大学学报,2003,27(5):702-704. [编辑:张翔]