

文章编号:1671-6833(2009)02-0071-04

基于 ADAMS 仿真技术的挖掘机铰点受力分析

周宏兵^{1,2}, 胡雄伟¹, 孙永刚¹, 王惠科¹

(1. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南山河智能机械股份有限公司, 湖南 长沙 410100)

摘要: 为了获得挖掘机工作时主要铰接点处的连续受力变化值, 利用 Pro/E 4.0 和 ADAMS 2005 两种软件, 建立了 SWE90U 液压反铲挖掘机的虚拟样机。在虚拟环境中, 分别模拟了该挖掘机的铲斗挖掘、斗杆挖掘和平整操作 3 种典型工作状态, 并针对该挖掘机的 4 个主要铰接点的受力情况进行了分析研究, 得到了一系列相应的铰接点受力变化曲线。结果表明, 动臂与斗杆铰接点的受力情况变化最为剧烈, 而摇杆与斗杆铰接点的受力情况变化最为平缓。

关键词: ADAMS; 液压挖掘机; 仿真; 铰点

中图分类号: TU 621 **文献标识码:** A

0 引言

由于液压挖掘机工作状况的复杂性, 其工作装置的受力情况也相当复杂。过去, 人们往往只能按照由经验所确定的工作位置来研究挖掘机各铰接点的受力情况, 得到仅是一些离散的、特定位置的受力值, 难以完整地反映实际情况, 且其正确性尚值得商榷^[1-2]。随着计算机辅助设计技术的发展, 虚拟样机技术已广泛应用于各个领域^[3]。但目前针对挖掘机铰点受力的仿真研究还比较少, 且还停留在单一工况研究上。笔者采用 ADAMS 的多刚体动力学模型^[4], 其数学形式为一系列以各刚体运动位置、姿态、速度和加速度为变量的非线性微分动力学方程, 以及由各个约束所形成的非线性代数方程。对这些方程进行联立数值积分求解即可获得各离散时刻各刚体运动的位移、速度和加速度等运动物理量以及各铰接点处的约束反力等信息。

1 虚拟样机的建立

1.1 Pro/E 三维实体模型的建立

挖掘机的主要结构包括机身、动臂装置、斗杆装置、铲斗装置, 其机构拓扑图如图 1 所示。

根据 SWE90U 挖掘机的设计图纸, 采用三维实体造型软件 Pro/E, 逐一建立上述构件的实体模型, 并使用自底向上的装配方法完成整个挖掘

机的实体模型。为了提高在 ADAMS 中的计算效率, 在建立模型时对实物进行了必要的简化, 如省略了与研究无关的推土板和销钉、卡环等细小构件。

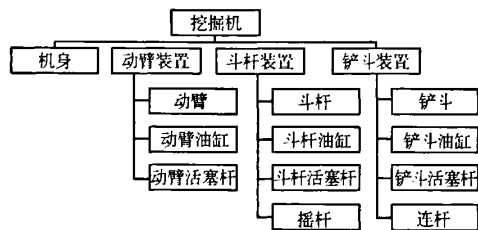


Fig. 1 Topological graph of the excavator mechanism

1.2 ADAMS 虚拟样机的建立

在 Pro/E 环境中, 将建立的挖掘机整机模型保存为 Parasolid 格式的文件, 然后进入 ADAMS 环境, 在 File 菜单选择 Import 命令将之导入。

导入到 ADAMS 中的模型很好地继承了原来 Pro/E 模型的各种属性, 包括位置关系、质心位置、转动惯量和质量信息, 但是模型中原有的装配关系已不复存在, 各零件只是按原来的位置关系独立地存在于 ADAMS 环境中^[6], 因此必须通过添加约束来将它们重新装配起来。

所添加的具体约束情况如下: 在机身与 Ground 之间添加固定副, 在各连接铰点处添加转动副, 在各油缸和其活塞杆之间添加移动副。在各

收稿日期: 2008-09-27; 修订日期: 2008-12-11

作者简介: 周宏兵(1967-), 女, 湖南湘阴人, 中南大学副教授, 博士, 主要从事工程机械机电液一体化技术方面的研究, E-mail: zhbjcr@yahoo.com.cn.

移动副上添加驱动,并将动臂油缸移动副驱动、斗杆油缸移动副驱动、铲斗油缸移动副驱动分别重命名为 dongbiqudong、douganqudong 和 chandouqudong. 设置长度单位为 m,力的单位为 N;设置重力的方向为 -Y 向,即竖直向下的方向,大小为 $-9.806\ 65\text{ m/s}^2$. 完成后的虚拟样机模型如图 2 所示.

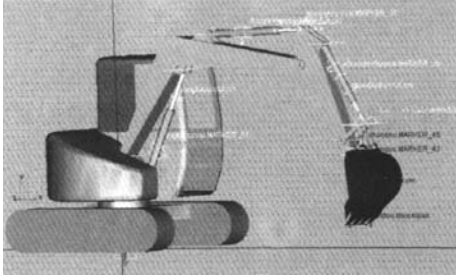


图 2 虚拟样机模型
Fig.2 Virtual Prototype

2 工作状况仿真与分析

液压反铲挖掘机用途广泛,不仅可以进行基坑挖掘,还可以进行针对施工面的平整、压实等操作.下面将针对挖掘机的 3 种工作状况进行仿真与分析.

2.1 铲斗挖掘工况仿真

由文献[1]知,当挖掘机采用铲斗挖掘方式工作时,铲斗挖掘阻力的最大切向分力可用下式表示:

$$F_{i\max} = C[R(1 - \cos\phi_{\max})]^{1.35} BAZX + D \quad (1)$$

式中: C 为土壤的硬度系数; R 为铲斗切削半径, cm; ϕ_{\max} 为挖掘过程中铲斗总转角的一半; B 为切削刃宽度影响系数, $B = 1 + 2.6b$; b 为铲斗平均宽度, m; A 为切削角变化影响系数,一般取 $A = 1.3$; Z 为斗齿影响系数,有齿时, $Z = 0.75$; X 为斗侧壁厚度影响系数, $X = 1 + 0.03s$, 其中 s 为侧壁厚度, cm; D 为切削刃挤压土壤的力,根据斗容量的大小在 $D = 10\ 000 \sim 17\ 000\text{ N}$ 的范围内选取.

对于 SWE90U 挖掘机,取 $\phi_{\max} = 55^\circ$, $R = 105\text{ cm}$, $b = 0.68\text{ m}$, $Z = 0.75$, $s = 2\text{ cm}$, $D = 10\ 100\text{ N}$,由式(1)可得, $F_{i\max} = 48\ 866.3\text{ N}$.

铲斗挖掘阻力的法向分力 F_n 数值较小,一般 $F_n = 0 \sim 0.2F_i$,土质越均匀, F_n 数值越小.在此,取 $F_{n\max} = 0.2F_{i\max} = 9\ 733.26\text{ N}$.

这种工作方式下,铲斗对土壤的切削方式为大曲率切削,挖掘阻力与挖掘深度基本上成正比.由于挖掘的前半过程的切削角不利,会产生较大的阻力,因此挖掘阻力的最大值将出现在挖掘过

程中间偏前的位置.

根据 SWE90U 挖掘机的工作情况按位移方式设置各液压缸的驱动函数如表 1 所示,它们将使虚拟样机完成从图 2 所示姿态开始采用铲斗挖掘方式进行基坑挖掘,满斗后提升至装车高度的一系列动作.

表 1 铲斗挖掘的驱动及阻力函数

Tab.1 Functions of motions and resistances in bucket digging

项目	函数表达式
Dongbiqudong	step(time,0.8,0,1.6,-0.19) + step(time,6.3,0,9,0.4207)
Douganqudong	step(time,0,0,0.5,-0.118) + step(time,6.3,0,9,0.429)
Chandouqudong	step(time,0,0,1.6,-0.31) + step(time,1.6,0,6.3,0.68)
F_i	step(time,1.6,0,3.25,48866.3) + step(time,3.25,0.5,-48866.3)
F_n	step(time,1.6,0,3.25,9733.26) + step(time,3.25,0.5,-9733.26)
G_w	step(time,2.3,0,6.3,4802)

根据前述原因和油缸驱动过程,相应地设置铲斗挖掘阻力的切向分力 F_i 的函数、法向分力 F_n 的函数和挖掘过程中铲入铲斗的物料重力 G_w 的函数如表 1 所示.其中,切向分力的方向始终垂直于铲斗切削半径 R ,法向分力始终沿着铲斗切削半径 R ,它们的具体方向将随铲斗位置的变化而变化,而物料重力的方向则总是竖直向下的.

采用以上设置进行仿真,得到各铰接点受力的变化曲线如图 3(a) 所示.

1.6 s 时,铲斗活塞杆由原来的回缩状态开始转向外伸状态,推动铲斗进行挖掘,速度变化较大,因此各铰点受力曲线都出现了一个较小的峰值;3.25 s 左右,挖掘阻力达到峰值,各铰点也基本处于最大受力状态,其中动臂与斗杆铰接点的受力高达 290 150 N;5.6 s 后,铲斗挖掘基本结束,机构运动仅受挖入铲斗的物料重力的影响,各铰点受力都维持在一个较小值.

2.2 斗杆挖掘工况仿真

由文献[1]知,当挖掘机采用斗杆挖掘方式工作时,斗杆挖掘的切向阻力可按下式计算:

$$W_i = \frac{K_0 q}{0.01745 r \phi K_s} \quad (2)$$

式中: K_0 为挖掘比阻力; q 为铲斗容量; r 为斗杆挖掘时的切削半径,即动臂与斗杆铰点至斗齿尖的距离; K_s 为土壤松散系数; ϕ 为斗杆在挖掘过程中的总转角.

这种工况下,斗齿对土壤的切削行程比较长,切土厚度在挖掘过程中可以看作常数,因此斗杆挖掘阻力也可以当作常数处理。一般,切削厚度较小,所以斗杆挖掘阻力比铲斗挖掘阻力小得多。

对于 SWE90U 挖掘机, $q = 0.28 \text{ m}^3$, 当 $r = 2.5719 \text{ m}$ 时, 取 $K_0 = 13 \times 10^4 \text{ N/m}^2$, $K_1 = 1.14$, $\varphi = 73^\circ$, 由式(2)可得, $W_t = 9747 \text{ N}$ 。根据经验公式 $W_n = \psi W_t$, ψ 为常数, 在此取 $\psi = 0.62$, 得 $W_n = 6043.15 \text{ N}$ 。

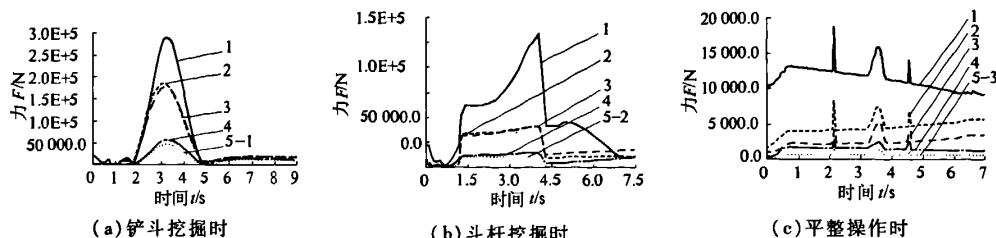


图3 3种情况铰点的受力曲线

Fig.3 curves of force acted on hinged joints in bucket digging

表2 斗杆挖掘的驱动及阻力函数

Tab.2 Functions of motions and resistances in arm digging

项目	函数表达式
Dongbiqudong	$\text{step}(\text{time}, 0.5, 0, 1.3, -0.19) + \text{step}(\text{time}, 4.8, 0, 7.5, 0.4207)$
Douganqudong	$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 0.5, -0.1117) + \text{step}(\text{time}, 1.3, 0, 4.0, 0.5704)$
Chandouqudong	$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 0.3, -0.0517) + \text{step}(\text{time}, 4.0, 0, 4.8, 0.1168) + \text{step}(\text{time}, 4.8, 0, 7.5, 0.2542)$
W_t	$\text{step}(\text{time}, 1.2, 0, 1.3, 9747) + \text{step}(\text{time}, 4.0, 4.3, -9747)$
W_n	$\text{step}(\text{time}, 1.2, 0, 1.3, 6043.1) + \text{step}(\text{time}, 4.0, 4.3, -6043.1)$
G'_s	$\text{step}(\text{time}, 1.5, 0, 4.8, 4802)$

1.3 s至4.0 s,斗杆活塞杆外伸推动斗杆进行挖掘,由于挖掘阻力的作用,各铰点受力都处于较大值,其中动臂与斗杆铰接点受力最为复杂,最大值达到134 180 N;4.8 s时,为防止铲入斗内的物料撒出,铲斗液压缸进行了速度的调整,因此各铰点受力都出现了一个较小的波动。

2.3 平整操作工况仿真

当挖掘机进行施工面平整操作时,一般要求挖掘角恒定,铲斗在平整面上做平动,铲斗末端速度保持匀速,但为防止冲击,一般在起始阶段匀加速,而终止阶段匀减速^[7]。此时铲斗的斗齿所受到的阻力主要是切向的碎土旁移阻力,其数值很

与铲斗挖掘时类似,设置各液压缸的驱动函数如表2所示,它们将使虚拟样机完成从图2所示姿态开始采用斗杆挖掘方式进行基坑挖掘,满斗后提升至装车高度的一系列动作。相应设置斗杆挖掘阻力的切向分力 W_t 的函数、法向分力 W_n 的函数和挖掘过程中铲入铲斗的物料重力 G'_s 的函数如表2所示。仿真后得到各铰接受力的变化曲线如图3(b)所示。

小。当遇到小石块等障碍物时,阻力值可能会瞬时增大。因此,设置阻力函数为:

$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 0.7, 600) + \text{step}(\text{time}, 2.1, 0, 2.15, 1200) + \text{step}(\text{time}, 2.15, 0, 2.2, -1200) + \text{step}(\text{time}, 3.2, 0, 3.6, 800) + \text{step}(\text{time}, 3.6, 0, 3.8, -800) + \text{step}(\text{time}, 4.5, 0, 4.55, 600) + \text{step}(\text{time}, 4.55, 0, 4.6, -600)$

平整操作属于精细作业,我们无法估计其各驱动油缸的具体运动,但铲斗的运动却非常简单,因此可以通过在铲斗尖施加点驱动带动各驱动油缸运动,利用 ADAMS 强大的测量功能得到它们的运动曲线,然后在后处理模块中将得到的运动曲线转化为驱动油缸运动的样条函数,用这些函数定义各油缸的驱动函数。本次仿真中用到的点驱动函数和转换后得到的各油缸驱动函数如表3所示。

表3 平整操作的驱动函数

Tab.3 Functions of motions in smooth operation

项目	函数表达式
点驱动 (速度方式)	$\text{TraX}: \text{step}(\text{time}, 0, 0, 0.7, -0.2) + \text{step}(\text{time}, 6.3, 0, 7.0, 0.2)$ $\text{TraY}: 0 * \text{time}$ $\text{RotZ}: 0 * \text{time}$
Dongbiqudong	$\text{AKISPL}(\text{time}, 0, \text{SPLINE}_1, 0)$
Douganqudong	$\text{AKISPL}(\text{time}, 0, \text{SPLINE}_2, 0)$
Chandouqudong	$\text{AKISPL}(\text{time}, 0, \text{SPLINE}_3, 0)$

仿真后得到各铰接点受力的变化曲线如图3(c)所示。在2.15 s、3.6 s、4.55 s时,由于阻力的突变,各铰点受力曲线也表现出了相应的突变,受力最大的铰点依然是动臂与斗杆铰接点,但其最大值也仅18 825 N。总的来说,这种工况下各铰点受力比较平稳,动臂与斗杆铰接点的受力和摇杆与斗杆铰接点的受力有减小的趋势,而斗杆与铲斗铰接点的受力和连杆与铲斗铰接点的受力有增大的趋势。

由图3可知,发现液压挖掘机在上述3种工况下工作时主要铰点的受力具有如下共同规律:

(1)各铰点的受力情况跟随挖掘阻力的变化而变化,其峰值也几乎与阻力的峰值出现在同一时刻。

(2)动臂与斗杆铰接点受力情况变化最为剧烈,且峰值最大。因此,设计时可考虑采取相应加固措施,如适当增加此处连接销的直径、增厚连接处的钢板等。

(3)摇杆与斗杆铰接点的受力曲线较平缓,其峰值也仅超出主要阻力一个较小值。

3 结束语

将三维造型软件 Pro/E 和系统运动学/动力学分析软件 ADAMS 相结合,建立了液压挖掘机

的虚拟样机模型,弥补了 ADAMS 在实体建模能力上的不足,使系统模型的修改更加方便和直观。利用虚拟样机技术对挖掘机的工作状况进行仿真分析,能够得到各铰接点处连续的受力变化情况,更接近实际,克服了传统计算方法的不足。

参考文献:

- [1] 同济大学. 单斗液压挖掘机[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [2] 朱志辉, 周志革, 王金刚, 等. 液压挖掘机工作装置的建模及动力学仿真[J]. 机械设计与制造, 2006, (8): 158 - 159.
- [3] 石明全, 薛运锋, 陈维义, 等. 某发动机的参数化动态仿真分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2005, 26(3): 79 - 82.
- [4] 王国强, 张进平. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.
- [5] 张卧波, 杨俊峰. 挖掘机工作及运动状态的仿真与应用研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 149 - 151.
- [6] 秦 成, 史淑玲. 挖掘机摇臂机构的虚拟样机研究[J]. 机械工程师, 2008, (3): 133 - 134.
- [7] 张大庆. 液压挖掘机工作装置运动控制研究[D]. 长沙: 中南大学机电工程学院, 2007: 38 - 41.

Calculation of the Force Acted on Hinged Joints of the Hydraulic Excavator Based on ADAMS

ZHOU Hong - bing^{1,2}, HU Xiong - wei¹, SUN Yong - gang¹, WANG Hui - ke¹

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Intellectual Faculties Mechanical Co. Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract: In order to obtain the continuous value of the force acted on key hinged joints in a working excavator, this paper uses Pro/E4.0 and ADAMS 2005 to build up the virtual prototype of the hydraulic backhoe excavator SWE90U. In the virtual environment, the simulation of three typical working (bucket digging, arm digging and smooth operation) and the study of the force acted on four key hinged joints of this excavator are accomplished, then, a series of corresponding curves of the force acted on the hinged joints is got. The results show that the change of the force acted on the joint between boom and arm is the most violent, but the change of the force acted on the joint between rocker and arm is the flattest.

Key words: ADAMS; hydraulic excavator; simulation; hinged joints