包装生产线输送碰撞仿真及分析

李 光，林 鹏
（湖南工业大学，株洲 412007）

摘要：以 ADAMS 的碰撞仿真理论为基础，在综合分析了碰撞参数物理意义的基础上，研究了块状刚性物体与柔性接触面的运动机构碰撞过程中的动力学特性，并采用柔性碰撞动力学进行了求解，运用拉格朗日碰撞动力学方法求出了碰撞时的运动状态，再用 IMPACT 碰撞理论求解其碰撞力，然后运用 ADAMS 软件对其运动进行了仿真分析，并根据仿真结果对包装输送线线上离线机构进行了参数优化选择。

关键词：柔性体；ADAMS；碰撞
中图分类号：TB488；TP391.9　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-3563(2013)19-0059-04

Delivery Collision Simulation and Analysis of Packaging Production Line

LI Guang, *LIN Peng*
(Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: The collision dynamics characteristic of massive rigid body on flexible body surface was studied based on collision simulation theory of ADAMS and analysis of physical significance. Flexible collision dynamics method was applied for solving and Lagrange collision dynamics method was applied solve the state of collision motion. The impact force was calculated with impact theory. ADAMS software was used for its dynamics simulation. Parameters optimization was carried out according to the simulation results of packaging machine and off-line mechanism.

Key words: flexible body; ADAMS; collision

近年来，随着当代机械系统的迅速发展，柔性机械系统动力学已成为机械工程中重要的动力学分析和设计工具。建立柔性体动力学方程，首先提出了罚函数法，它认为物体间碰撞可以有少量穿透，并根据穿透量来计算碰撞。在这之后提出了拉格朗日乘子法[1]，其基本思想就是通过引入拉格朗日乘子，将原多变量约束最优化问题转化为一个无约束最优化问题，从而采用成熟的无约束优化方法继续求解。

现在比较多采用动量平衡法和等效弹簧阻尼模型来对模拟柔性碰撞作出处理。动量平衡法[2]的主要观点是由于碰撞时间间隔极短，可以认为是瞬时完成的，因而不考虑摩擦作用。通过解微分-代数混合矩阵方程得到该系统的速度变化值，但该方法不能确定载荷的大小。等效弹簧阻尼模型[3]则认为碰撞是有时间历程的，不能当作瞬间的变化。该模型假设碰撞时接触处有变形，且变形限制在接触区的邻域内，那么弹簧接触力则根据 Hertz 接触规律确定，阻尼器与弹簧平行，用来吸收能量。与动量平衡法比较，该模型的优点是可以计算碰撞力。

ADAMS 采用目前广泛流行的动力学理论中的 Lagrange 乘子法，建立系统动力学方程，并采用等效弹簧阻尼模型计算其碰撞过程的受力情况。文中将运用 ADAMS 软件仿真块状刚性物体与待柔性接触面的运动机构碰撞过程，通过仿真结果来分析它们的运动学特性，从而对机体参数进行优化选择。

1　动力学计算原理分析

ADAMS 软件是目前世界上较具权威性的机械动力学仿真计算软件，利用 ADAMS 软件针对工程建立虚拟样机，再对该样机进行参数优化设计和仿真，通过该软件对运动性能进行高精度仿真，能够很好地再现工程中出现的实际情况。ADAMS 采用交互式图形环境和零件约束、力库等建立机械系统的三维参数化

收稿日期：2012-11-11
作者简介：李光(1963-)，男，湖南人，博士，湖南工业大学教授，主要从事包装机械的教学与研究工作。

模型。同时,在动力学分析方面,ADAMS 利用带拉格朗日乘子的第一类拉格朗日方程导出代数方程[4],计算具有系统多余坐标的完整约束以及非完整约束系统,从而得到以笛卡尔广义坐标为变量的动力学方程。

在包装生产线上(见图 1),块状刚体随皮带以速度 v 匀速运动,到达离线机构上方,由传感器发出指令,离线机构以角速度 ω 将块状刚体顶起,块状刚体与离线机构上的柔性体发生碰撞,在柔性体上滑移一段距离,最后停留在柔性体上。通过参数变化来分析滑移曲线的变化,最后优化该离线机构的参数设置。

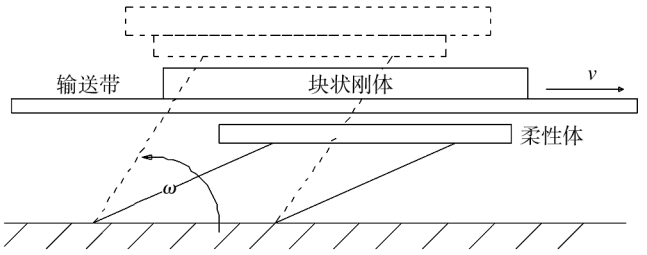


图 1 运动机构示意

Fig. 1 Motion mechanism

1.1 ADAMS 动力方程的建立与求解

ADAMS 采用目前世界上广泛流行的多刚体动力学理论中的拉格朗日方程的方法,建立系统动力学方程:

$$\mathrm{d}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}}\right)/\mathrm{d}t-\left(\frac{\partial T}{\partial q}\right)+\varphi_q^T\rho+\theta_q^T\mu=Q \tag{1}$$

参照图 1,式中:T 为整个运动系统的动能;q 为整个运动系统广义坐标;Q 为作用在系统上的广义力;ρ 为对应于完整约束的拉式乘子列阵;μ 为对应于非完整约束的拉式乘子列阵。

1.2 ADAMS 碰撞力的计算

ADAMS 中的接触力(Contact force)可用来描述运动物体接触时的相互作用力。ADAMS 中有 2 种计算接触力的方法:一种是补偿法(Restitution);另一种是冲击函数法(Impact)。笔者采用冲击函数法计算顶起机构与瓷砖的冲击力,其函数定义为:

$$F=\begin{cases}0 & q>q_0\\ k(q_0-q)^e-C_{\max}\left(\dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}\right)\cdot \mathrm{step}(q,q_0,-d,1,q_0,0) & q\leqslant q_0\end{cases} \tag{2}$$

式中:k 为刚度系数;e 为碰撞指数;$C_{\max}$ 为阻尼;d 为切入深度;q 为函数中的距离变量;q_0 为开关量,在函数计算中取确定值;d 为切入深度。

式(2)采用了 step 函数,其形式为 step(x,x_0,h_0,x_1,h_1),按式(3)进行计算:

$$\mathrm{step}=\begin{cases}h_0 & x<x_0\\ h_0+a\Delta^2(3-2\Delta\Delta) & x_0<x<x_1\\ h_1 & x>x_1\end{cases} \tag{3}$$

式中:$a=h_1-h_0$;$\Delta=(x-x_0)/(x_1-x_0)$。

2 算例分析

2.1 碰撞参数设置

为了方便表述,根据其原理将离线机构转化成 3 根杆相互铰接的铰链四杆机构。在杆与杆之间,杆与基架之间定义转动约束[6],定义中间顶起的杆为柔性体,刚度可变。同时将块状刚性体定义接触,刚性接触在皮带上。最后在块状刚性体与柔性杆之间定义柔性接触[7],碰撞参数见表 1。

表 1 设计参数的选取[7]

Tab. 1 Selection of design parameters

设计变量	取值
刚度系数/(N·mm^{-1})	2500
指数	2.5
阻尼/(N·s·mm^{-1})	2.5
静态系数/mm	0.9
动态系数	0.3
粘滞运动速度/(mm·s^{-1})	100
摩擦运动速度/(mm·s^{-1})	150

2.2 仿真步数与其它动力学参数[8]

1)仿真步数。仿真步数的设定在一定程度上影响了求解的结果,步数越多则结果越精确,但是太多的步数会导致仿真时间过长,所以步长需取合理的值,参数为 step。

2)积分步长。ADAMS 分别用参数 $H_{\max}$,$H_{\min}$,H_{init} 规定积分的最大时间步长、最小时间步长和初始时间步长,参数为 Time Step。

3)最大迭代次数。ADAMS 软件采用牛顿迭代收敛法控制迭代。线性方程组的迭代次数过大可能会引起累积误差的加人,导致产生错误的结果。参数为 Maxit,默认值为 10。

4)校正器。ADAMS 中有 2 种校正器 Original 和 Modified,其中 Modified 校正器的特点是对收敛的判

定比较宽松。系统默认的校正器是 Original，如果精度要求不高，可以选用 Modified 以提高仿真速度。

5）积分多项式阶数。在 ADAMS 中，积分多项式的最大阶数是由参数 K_{max} 控制的，刚性积分器的默认值为 6。当系统有非连续量的时候，如果将积分阶设置成 2，则能够提高计算速度，因为这样避免了多余的变阶计算。

2.3　仿真初始条件

仿真初始条件根据要求设定，文中所研究的块状刚性体以初速度为 1.5 m/s 跟随皮带水平移动，（为了简化模型，块状刚性体的移动速度可以看作相对速度，当作块状刚性体不动，将块状刚性体的移动速度加到柔性体上），与此同时顶起机构在气缸的恒定作用力下与块状刚性体碰撞，气缸的作用力为 3000 N，块状刚性体与柔性体碰撞前水平距离为 0.2 m，竖直距离为 0.45 m。

2.4　碰撞过程结果分析

由图 2 可知，在 0.03 s 前块状刚体与柔性体还未碰撞，在 0.03 s 时碰撞，碰撞后有一小段波动区域，而后趋于稳定。块状刚性体在 0.15 ~ 0.2 s 之间位移变化很大，这是由于顶起机构摆动副超过 90°引起的，应该避免这种情况发生。

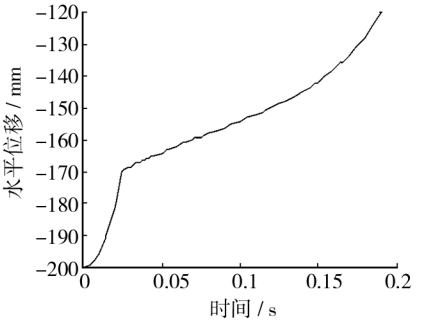


图 2　块状刚性体与柔性体相对滑移水平的位移

Fig. 2 The level relative displacement of massive rigid body and flexible body

从图 3 可以看出，块状刚性体与柔性体在碰撞时有一定的抖动，块状刚性体回弹后又落下，这将会影响块状刚性体最终在柔性体上滑移的距离。系统所要求的是这个滑移距离越小越好，所以为了进一步研究参数对该系统的影响，将变化几个参数，来分析曲线的变化程度。

2.4.1　改变块状刚性体的速度

由图 4 可知，改变速度后块状刚性体与柔性体相

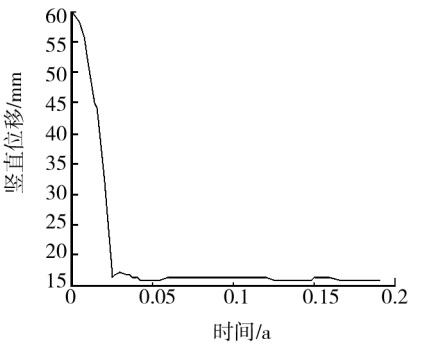


图 3　块状刚性体与柔性体之间竖直的距离

Fig. 3 The vertical relative displacement of massive rigid body and flexible body

对滑移的位移变化明显加剧，速度越快滑移的位移就越大，对于低速碰撞有一段较明显的稳定期，位移相对于时间不变化。由图 5 可知，速度加大使块状刚性体速度碰撞时候回弹的位移很大，波动也很剧烈，这样有可能出现块状刚性体掉出输送带的情况发生，导致损坏。

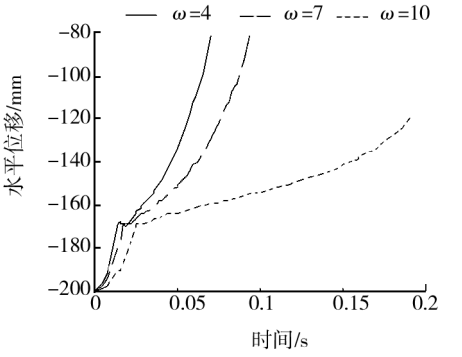


图 4　不同速度下块状刚性体与柔性体相对滑移水平的位移

Fig. 4 The level relative displacement of massive rigid body and flexible body in different speed

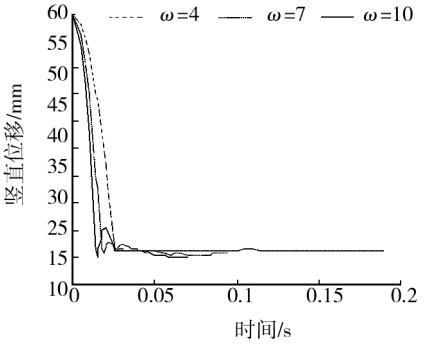


图 5　不同速度下块状刚性体与柔性体之间的竖直距离

Fig. 5 The vertical relative displacement of massive rigid body and flexible body in different speed

2.4.2 改变柔性体的刚度

由图 6 可知,改变柔性体的刚度后,块状刚性体与柔性体之间的水平位移也改变了,柔性越大位移越大,且在碰撞的时候波动也越大。由图 7 可知,改变柔性体的刚度后,刚度和块状刚性体与柔性体的相对跳动变小,刚度越大,位移越小,波动也越少。

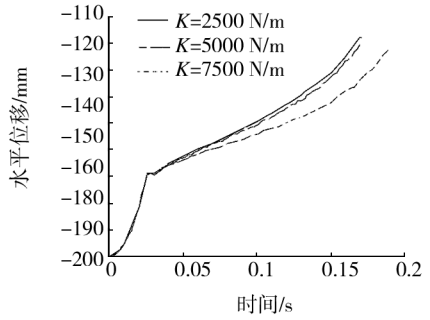


图 6 不同刚度下块状刚性体与柔性体相对滑移水平的位移

Fig. 6 The level relative displacement of massive rigid body and flexible body in different stiffness

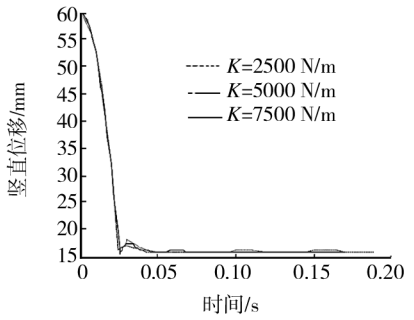


图 7 不同刚度下块状刚性体与柔性体之间竖直的距离

Fig. 7 The vertical relative displacement of massive rigid body and flexible body in different stiffness

3 结语

通过对柔性杆和块状刚性体碰撞的仿真,得到以下结论。

1) 通过柔性体与块状刚性体的碰撞仿真,块状刚性体在 0.35 ~ 0.4 之间位移变化很大,这是由于顶起机构摆动副超过 90°引起的,应该避免这种情况。由此要改变顶起机构的角度,使其不必达到 90°,就能完成预定的要求,从而减少瓷砖的滑动。

2) 速度快会导致水平滑移较远,但也不能一味追求慢速,这样效率会很低。经分析取角速度 4 ~ 7 rad/s 为宜。

3) 在块状刚性体不被破坏的情况下,应该将柔性体的刚度尽量提高,柔性越大位移越大,且在碰撞的时候波动也越大,刚度和块状刚性体与柔性体的相对跳动变小,刚度越大,位移越小,波动也越少。离线机构的接触材料刚度应取 2500 ~ 5000 N/m 为宜。

参考文献:

[1] BELYTSCHKO T, LIU W K, MORAN B. 连续体和结构的非线性有限元[M]. 庄茁,译. 北京:清华大学出版社,2002.

[2] 洪嘉振,蒋丽忠. 柔性多体系统刚柔耦合动力学[J]. 力学进展,2000,30(1):15-21.
HONG Jia-zheng, JIANG Li-zhong. Rigid-flexible Coupling Dynamics of Multi-body Flexible System[J]. Advance in Mechanics, 2000, 30(1): 15-21.

[3] 罗明聪. 柔性体与刚性地面碰撞动力学研究及仿真[D]. 南京:南京理工大学,2006.
LUO Ming-cong. Flexible Body and Rigid Ground Impact Dynamics Research and Simulation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.

[4] MSC 公司. Using ADAMS/Solver. (余不详)

[5] 范建成,熊光明,周明飞. 虚拟样机 MSC. ADAMS 应用与提高[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
FAN Jian-cheng, XIONG Guang-ming, ZHOU Ming-fei. MSC. ADAMS Virtual Prototype Application and Improve [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

[6] 刘义翔,高德,刘晔. 基于 ADAMS 软件瓦楞纸板缓冲性能的动力学仿真研究[J]. 包装工程,2002,23(4):127-130.
LIU Yi-xiang, GAO De, LIU Ye. Research on Dynamic Simulation of Buffering Characteristics of Corrugated Cardboard with ADMS Software[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(4): 127-130.

[7] 谢最伟,吴新跃. 基于 ADAMS 的碰撞仿真分析[C]//第三届中国 CAE 工程分析技术年会论文集,2007.
XIE Zui-wei, WU Xin-yue. Analysis Based on the Collision of ADAMS Simulation[C]//The Third China CAE Conference Proceedings of Engineering Analysis Technology, 2007.

[8] 魏衍侠. 基于 ADAMS 手抛式机器人碰撞动力学分析[J]. 机械工程与自动化,2011(2):82-85.
WEI Yan-xia. Analysis the Impact Dynamics of Throwing Type Robot Based on ADAMS[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2011(2): 82-85.

[9] 石明全. 基于 ADAMS 的多接触研究[J]. 计算机工程与应用,2004(29):220-222.
SHI Ming-quan. Multiple Contact Study Based on ADAMS [J]. Computer Engineering and Applications, 2004(29): 220-222.