

矿山运输卡车在装载过程中的动力学响应分析*

常宗瑜¹ 丁寿滨¹ S. Frimpong²

(1. 中国海洋大学工程学院, 青岛 266071)

(2. 阿尔伯特大学采矿与石油学院, Canada T6G 2G7)

摘要 对矿山运输卡车在装载过程中所产生的冲击力对于卡车结构损坏和驾驶员的健康问题进行了较全面的分析,建立了包括材料倾倒的冲击、人体的振动和卡车悬挂系统的动力学模型,并利用数值积分的方法对整个系统的动力响应进行了仿真.

关键词 矿山运输卡车,动力学模型,人体振动模型,模拟

简介

挖掘机-卡车系统在地面采矿中有着很广泛的应用.随着对开采效率要求的提高,挖掘机和卡车的容量变得越来越大.这样,矿石在从挖掘机铲斗倾倒到卡车的时候,会产生巨大的冲击力,这对卡车结构的寿命和驾驶员的健康都有很大的影响.因此研究卡车装载过程中卡车和驾驶人员的动力学响应有重要的意义.

随着多体动力学理论和计算机技术的发展,车辆动力学的研究取得了很多成果.其中大多数车辆系统所受到的外在激励来自于地面,这相当于位移激励.在本文的研究对象中,外在激励来自于矿物下落所导致的重大撞击.同时,在装载过程中,卡车的质量又是在时刻变化,这加大了模型的复杂程度.

本文根据卡车装载的实际状况,建立了矿物坠落的冲击力模型、卡车的平面振动模型和人体的生物动力学模型.并组合这些模型建立了矿物-卡车-乘员的整体动力学模型,并用数值积分的方法得到了系统的仿真结果.该问题的深入研究对于深入理解装载过程中振动机理以及系统参数和响应的关系具有重要价值.

1 矿物倾倒过程中的冲击模型

装载过程中卡车振动主要是由矿物下落过程中产生的巨大撞击力决定的.而准确确定撞击力的大

小却并不容易.它受到矿物的性质、倾倒过程的操作等等因素的影响.前者包括了矿物的密度、颗粒大小、含水量等等;后者包括倾倒过程中铲斗距卡车的垂直距离、倾倒时间等等.如果我们假设这个过程是一个碰撞过程,那么冲量定理可以用来确定卡车所受到的冲击力,如方程(1)所示

$$\int_0^t F_{imp}(t)dt = m_m(t) \cdot v_0 \quad (1)$$

其中 t 是倾倒的总时间;

F_{imp} 是倾倒矿物产生的冲击力;

m_m 是倾倒矿物的质量;

v_0 是矿物接触到卡车前的速度.

将方程(1)微分,得到

$$F_{imp}(t) = \frac{\partial m_m(t)}{\partial t} v_0 \quad (2)$$

因此,从方程(2)可以看到,撞击力取决于质量的变化率和矿物的撞击速度.前一个参数是由矿物的质量和倾倒的操作决定;后者主要是由铲斗和卡车之间的垂直距离决定,如方程(3)所示.

$$v_0 = \sqrt{2gh} \quad (3)$$

其中 g 为重力加速度;

h 为铲斗和卡车之间的垂直距离.

这一模型基本上反映了矿物倾倒的特征,并比较容易操作.本文即采用这一模型以得到冲击力的数值.图1显示了质量变化率均匀时的情况.当然,实际情况不会如此理想,需要大量实验对模型进行

2004-04-08 收到第1稿,2004-05-10 收到修改稿.

* 山东省优秀中青年科学家奖励基金项目(02BS002)

进一步修正.

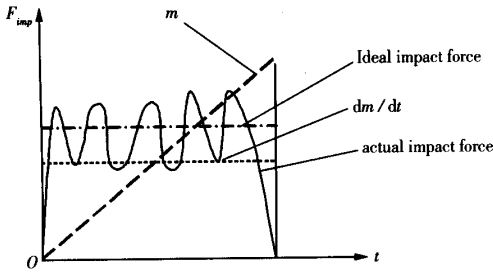


图 1 材料的装载模型

Fig. 1 Impact force model of dumping material

2 卡车-乘员的整体动力学模型

卡车-乘员的整体动力学模型由人体的坐姿振动模型和卡车的悬挂模型所组成. 下面我们分别就这两个方面建立响应的动力学方程.

2.1 人体的生物动力学模型

现在仅有少数模型被用于估计坐姿人体的全身振动. 很多学者用不同方法开发的人体的动力模型^[1,2,5,7]. 本文的人体模型是根据 ISO 5982:2001 国际标准和其他文献得到的^[1,5,7]. 该模型具有模型简单, 呈线性特征, 而且考虑了体重的影响. 模型的结构如图 2 所示. 对于不同重量的人, 只需要修改的质量 m_3 . 应该指出的是各个模型质量和不同的人体部分并没有直接的联系. 这也就是说该模型不具解剖意义. 这一模型在模型质量和头的振动传递函数上吻合. 由该模型得到的动力学方程如下所示

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1(x_1 - x_0) + b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + k_2(x_1 - x_2) + b_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0 \quad (4a)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (4b)$$

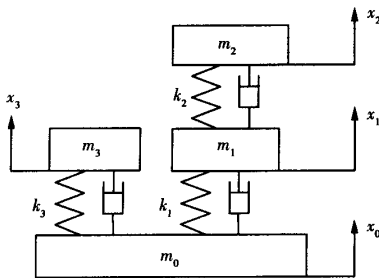


图 2 呈坐姿的乘员的振动模型

Fig. 2 Vibration model of seated human

$$m_3 \ddot{x}_3 + k_3(x_3 - x_0) + b_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_0) = 0 \quad (4c)$$

考虑到座椅的性能, 我们可以通过带有刚度和阻尼的弹簧将人体模型和卡车模型联系起来.

2.2 卡车-乘员的整体动力学方程

卡车的振动模型与文献^[3,8,9,10]中的模型类似, 仅仅参数有所变化. 组合卡车模型、人体模型和装载模型, 可以得到整个系统的动力学模型, 其简图如图 3 所示. 进而可以得到其运动方程

$$m_{1f} \ddot{x}_{1f} + k_{1f}(x_{1f} - x_{0f}) + k_{2f}(x_{1f} - x_{2f}) + b_{2f}(\dot{x}_{1f} - \dot{x}_{2f}) = 0 \quad (5a)$$

$$m_{1r} \ddot{x}_{1r} + k_{1r}(x_{1r} - x_{0r}) + k_{2r}(x_{1r} - x_{2r}) + b_{2r}(\dot{x}_{1r} - \dot{x}_{2r}) = 0 \quad (5b)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_{2f}(x_{2f} - x_{1f}) + b_{2f}(\dot{x}_{2f} - \dot{x}_{1f}) + k_{3d}(x_{2d} - x_{2d}) + b_{3d}(\dot{x}_{2d} - \dot{x}_{3d}) + k_{2r}(x_{2r} - x_{1r}) + b_{2r}(\dot{x}_{2r} - \dot{x}_{1r}) = F_{imp} \quad (5c)$$

$$I_2 \ddot{\varphi}_2 + k_{2f} d_f(x_{2f} - x_{1f}) + b_{2f} d_f(\dot{x}_{2f} - \dot{x}_{1f}) + k_{3d} d_d(x_{2d} - x_{3d}) + b_{3d} d_d(\dot{x}_{2d} - \dot{x}_{3d}) + k_{2r} d_r(x_{2r} - x_{1r}) + b_{2r} d_r(\dot{x}_{2r} - \dot{x}_{1r}) = 0 \quad (5d)$$

$$m_{3d} \ddot{x}_{3d} + k_{3d}(x_{3d} - x_{2d}) + b_{3d}(\dot{x}_{3d} - \dot{x}_{2d}) + k_{4d}(x_{3d} - x_{4d}) + b_{4d}(\dot{x}_{3d} - \dot{x}_{4d}) + k_{5d}(x_{3d} - x_{5d}) + b_{5d}(\dot{x}_{3d} - \dot{x}_{5d}) = 0 \quad (5e)$$

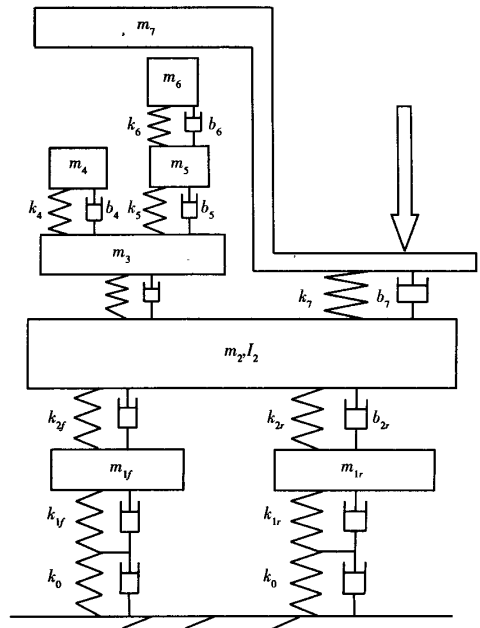


图 3 整个系统的动力模型

Fig. 3 Dynamic model of whole system

$$m_{4d}\ddot{x}_{4d} + k_{4d}(x_{4d} - x_{3d}) + b_{4d}(\dot{x}_{4d} - \dot{x}_{3d}) = 0 \quad (5f)$$

$$m_{5d}\ddot{x}_{5d} + k_{5d}(x_{5d} - x_{3d}) + b_{5d}(\dot{x}_{5d} - \dot{x}_{3d}) + k_{6d}(x_{5d} - x_{6d}) + b_{5d}(\dot{x}_{5d} - \dot{x}_{6d}) = 0 \quad (5g)$$

$$m_{6d}\ddot{x}_{6d} + k_{6d}(x_{6d} - x_{5d}) + b_{6d}(\dot{x}_{6d} - \dot{x}_{5d}) = 0 \quad (5h)$$

$$m_7\ddot{x}_7 + k_7(x_7 - x_{2l}) + b_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_{2l}) + k_7(x_7 - x_{2l}) + b_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_{2l}) + f_d = 0 \quad (5i)$$

其中

x_7 是车斗的垂直位移响应,

x_{2r} 是底盘前悬挂的垂直位移响应

$$x_{2rf} = x_2 + d_{2rf}\varphi,$$

x_7 是底盘前悬挂的垂直位移响应

$$x_{2f} = x_2 + d_{2f}\varphi,$$

x_{2d} 是底盘上驾驶员位置的垂直位移响应

$$x_{2d} = x_2 + d_{2d}\varphi,$$

x_{2l} 是底盘上倾倒位置的垂直位移响应

$$x_{2l} = x_2 + d_{2l}\varphi,$$

d_{2d} 是底盘上驾驶员位置的坐标,

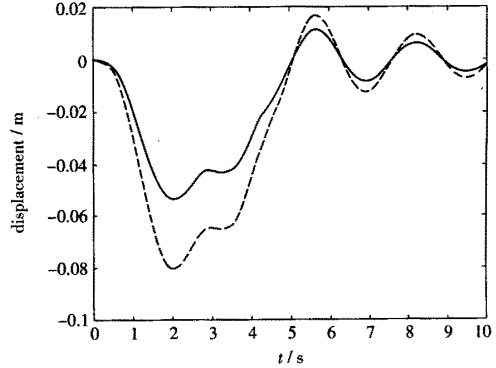
d_{2l} 是底盘上倾倒位置的坐标.

在上述方程中, (5a), (5b), (5c)~(5d) 和 (5i) 代表前轮、后轮、底盘和车斗. (5e)~(5h) 代表人体的振动方程.

3 动力学模型的求解和分析

在这一节,我们对系统的动力学响应进行了仿真.利用数值积分的方法来求解系统的动力方程.其结果如图4所示.图4(a)给出了车轮和底盘处的响应;而车斗和人体的响应如图4(b)所示.从结果上看,车轮处的响应较其他响应为小.前后轮处响应的差异表明底盘存在着转动.同时,人体的振动响应同

底盘的振动的相似,这表明座椅没有充分发挥其隔振性能.因此椅垫等的优化设计对于降低人体的振动有重要价值.



(b) 人体和车斗的动力学响应

—人体 —车斗

(b) Dynamic response of human body and truck bowl

—human body —车斗 truck bowl

图4 振动模型的动力学响应

Fig. 4 Dynamic response of model

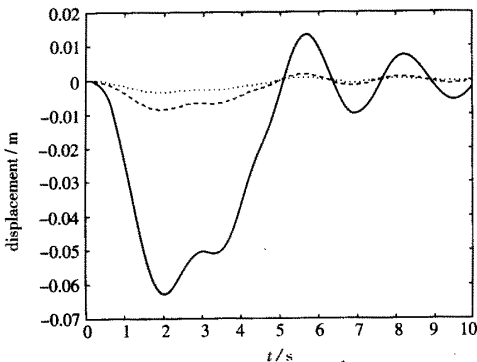
4 结论

本文根据矿山用大型卡车在装载过程中的实际情况建立了矿石倾倒入的冲击模型、卡车模型和乘员的生物动力学模型.并在这些模型的基础上开发的其整体的动力学模型,利用数值积分的方法对动力学方程进行求解.本文的工作为矿石倾倒入过程中卡车和乘员的振动研究提供了基础.

但是,本文的模型对这个过程进行了很多简化和假设.这需要大量的实验工作对模型进行验证和修正,以建立更为准确和细致的动力模型

参 考 文 献

- 1 Griffin MJ. Handbook of Human Vibration, London: Academic Press, 1990
- 2 Perrone N. Dynamic Response of Biomechanical Systems, New York: ASME, 1970
- 3 Genta G. Motor Vehicle Dynamics: Modeling and simulation. Singapore: World Scientific, 1997
- 4 Katsuhiko Ogata. Modern Control Engineering. (fourth edition) Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002
- 5 Stein GJ, Mucka P. Theoretical investigation of a linear planar model of a passenger car with seated people. Proc Instn Mech Engrs. *J of Automobile Engineering*, 2002,



(a) 车轮和底盘的动力学响应

... 前轮 ... 后轮 — 底盘

(a) Dynamic response of wheels and chassis

... front wheel ... rear wheel — chassis

217(D4);257~268

seat testing, *Journal of Sound and Vibration*, 2002, 253

6 Boleau PE, Rakheja S, Xu X. A body mass dependent mechanical impedance model for applications in vibration

(1);243~264

ANAYSIS ON DYNAMIC RESPONSE OF MINING TRUK DURING THE LOADING*

Chang Zongyu¹ Ding Shoubin¹ S. Frimpong²

(1. *Engineering College, Ocean University of China, Qingdao 266071, China*)

(2. *School of Mining and Petroleum, University of Alberta, Edmonton T6G 2G7, Canada*)

Abstract The shovel-truck mining system is widely used in surface mining operations for material excavation and haulage. The impact force due to the load under gravity causes huge vibrations, wear and tear of the dump truck, which is severe for the first load. This paper built an integrated dynamic model including impact model, truck model and human vibration model. Numerical method was applied to solve the differential equation.

Key words mining truck, dynamic model, human vibration model, simulation