

文章编号: 1001-1455(2006)02-0188-05

爆炸地冲击作用下浮放设备滑移抛离分析*

周 峰, 唐德高, 贺虎成, 杨建超

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 从基础和设备间的接触力特点出发, 采用 Matlab/SIMULINK 仿真软件建立了爆炸地冲击作用下浮放设备的滑移抛离模型, 并验证了该模型的正确性。通过输入实测爆炸地冲击加速度波得出在真实爆炸环境中浮放设备的运动历程可分为相对静止、滑移、抛离、滑移减速等四个阶段。并根据其特点, 提出了合理简化加速度波, 采用该加速度波形, 分析得到了浮放设备运动响应与动摩擦系数、爆炸地运动参数的关系。

关键词: 爆炸力学; 运动响应; 仿真计算; 浮放设备; 爆炸地冲击

中图分类号: O383.1; TB535.1

国标学科代码: 130 · 3520

文献标志码: A

1 引言

国防工程在受到核武器和常规武器攻击时, 其内部将产生强烈震动, 置于水平地板上的浮放设备会产生滑移、抛离甚至倾倒, 在运动过程中, 设备之间、设备与结构内壁可能发生碰撞, 从而导致设备损坏。所以, 估计和控制设备在爆炸环境中的运动响应是爆炸冲击隔震研究的一个重要方面。爆炸产生地冲击不同于自然地地震作用, 具有峰值高、作用时间短的特点, 在爆炸冲击环境中的浮放设备的运动有其特殊的规律。本文中对浮放设备在爆炸地冲击作用下的滑移抛离问题进行分析, 根据浮放设备与基础之间接触力的特点、滑移条件、抛离条件建立其滑移抛离分析模型; 采用合理简化的爆炸地冲击加速度波形, 分析浮放设备在爆炸地冲击环境中的运动响应规律, 为浮放设备隔震研究提供依据。

2 浮放设备运动过程分析计算模型

2.1 假设

为简化浮放设备的运动问题做以下假设:

(1) 将浮放设备与基础简化为图 1 所示的模型, 并忽略浮放设备摇晃运动。假定浮放设备为质量为 m 的矩形刚体, 基础的刚度和质量无限大。

(2) 水平和竖直地冲击加速度分别为 $a_{gh}(t)$ 、 $a_{gv}(t)$, 且 $a_{gv}(t) = \gamma a_{gh}(t)$, γ 为折减系数。

(3) 浮放设备与地面之间的摩擦力为 F , 且服从库仑摩擦模型。

(4) 浮放设备处于抛离状态时, 其水平运动为匀速平移运动, 当与基础发生碰撞时表现出完全非弹性, 且碰撞后的竖向速度 $v_v(\tau)$ 与基础速度 $v_{gv}(\tau)$ 保持一致。

2.2 分析模型

如图 1 所示, 设基础对设备的支持力为 $N(t)$ 。设备和基础之间的最大静摩擦系数和滑动摩擦系数分

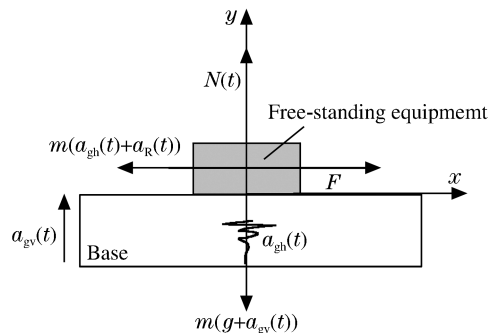


图 1 浮放设备分析模型

Fig. 1 The simplified model of the free-standing equipment

* 收稿日期: 2005-01-18; 修回日期: 2005-12-26

作者简介: 周 峰(1980—), 男, 硕士研究生。

别为 μ_s, μ_d 。浮放设备与基础的相对加速度为 $a_{hR}(t)$, 根据平衡条件得^[1]
水平方向

$$F - m(a_{gh}(t) + a_{hR}(t)) = 0 \tag{1}$$

竖直方向

$$N(t) - m(g + a_{gv}(t)) = 0 \tag{2}$$

滑移条件为

$$\begin{aligned} a_{gh} &\geq \Psi_1 g & a_{gh} &\geq 0 \\ a_{gh} &< \Psi_2 g & a_{gh} &< 0 \end{aligned} \tag{3}$$

式中: $\Psi_1 = \mu_s(1 - \gamma\mu_s)^{-1}, \Psi_2 = -\mu_s(1 + \gamma\mu_s)^{-1}$ 。

当加速度引起的惯性力小于最大静摩擦力时, 浮放设备受到的摩擦力和惯性力大小相等, 方向相反; 当惯性力大于或等于最大静摩擦力时, 浮放设备受到的摩擦力为滑动摩擦力^[2], 数学描述为

$$F = \begin{cases} -\text{sgn}(v_R)\mu_d N(t) & v_R \neq 0 \\ ma_{gh}(t) & v_R = 0, \Psi_2 g < a_{gh}(t) < \Psi_1 g \\ \text{sgn}(a_{gh}(t))\mu_d N(t) & v_R = 0, a_{gh}(t) \geq \Psi_1 g \text{ or } a_{gh}(t) < \Psi_2 g \end{cases} \tag{4}$$

式中: v_R 为浮放设备相对于基础的瞬时相对速度。

抛离条件为^[3]

$$a_{gv}(t) \leq -g \tag{5}$$

从抛离状态回到接触状态的条件为

$$a_{gv}(t) > -g, \quad d_{gv} = d_v(t) \tag{6}$$

式中: $d_{gv}(t), d_v(t)$ 分别为基础与浮放设备的竖直位移。

浮放设备未发生抛离时的竖向加速度与基础竖向加速度保持一致: $a_v(t) = a_{gv}(t)$ 。假设在 t_0 时刻发生抛离, 则浮放设备以初速度 $a_h(t_0), a_v(t_0)$ 作斜上抛运动, 此时竖向加速度 $a_v(t) = -g$ 。

由假设 1~4 以及式(1)~(6)可以综合描述设备滑移抛离的运动过程。

2.3 仿真模型

浮放设备滑移抛离运动问题涉及不同状态的跳转、多种临界条件的判断, 采用常规理论分析的方法不可取, 且研究范围也因为必须采用简化地冲击加速度波形而受到限制。因此借助动态仿真软件 SIMULINK 的模拟计算功能, 对(1)~(6)式所描述的浮放设备运动过程进行仿真(见图 2)。

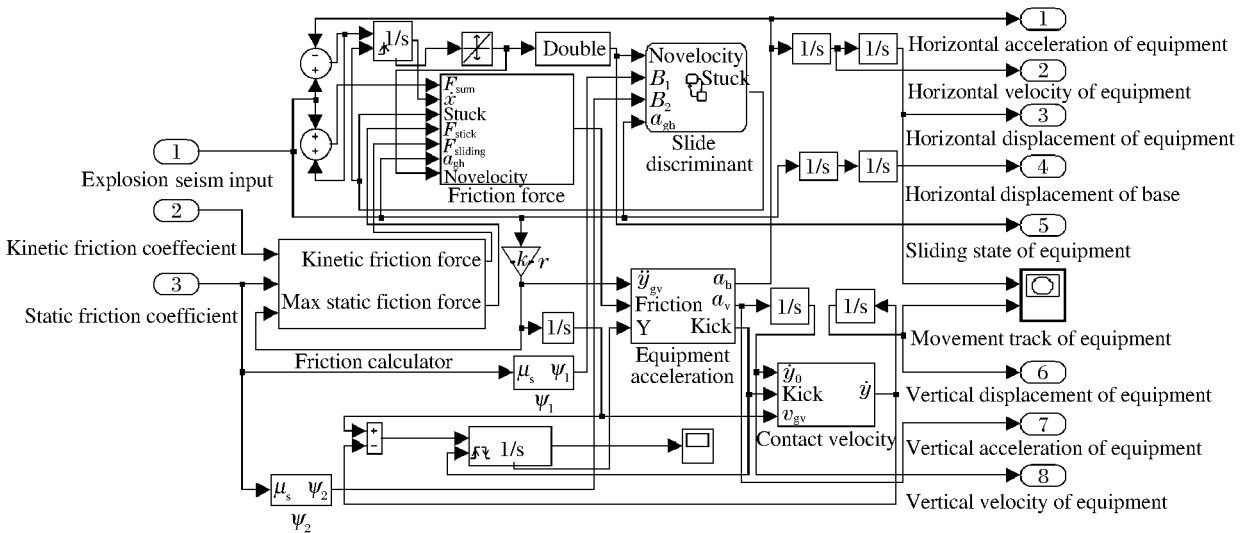


图 2 地冲击作用下浮放设备仿真模型

Fig. 2 SIMULINK model of free-standing equipment under explosion seism impact

浮放设备滑移仿真模型由输入输出端口、计算模块、判断模块以及信号线组成。输入端口用以输入地冲击加速度信号 $a_h(t)$ 、设备与基础摩擦因数 μ_s 和 μ_d (见图 2 中端口 1~3)。Friction calculator 子系统模块通过输入 μ_s 和 μ_d 以及竖向地冲击 $a_v(t)$ 得到实时的最大静摩擦力和动摩擦力, 等效于式(4)。Friction force 子系统模块通过输入滑移状态信号 stuck、 v_R 、 $a_h(t)$ 等信号计算出设备每一时刻的真实加速度 $a_h(t)$ 。该加速度被送入 Equipment acceleration 子系统模块, 该模块通过判断设备是否处于抛离状态, 进而重新调整 $a_h(t)$: 若浮放设备处于未抛离状态, 则 $a_h(t)$ 不变, 竖向加速度 $a_v(t)$ 置为 $a_{gv}(t)$; 若正在或即将抛离, 则设备水平加速度将被置零, 且竖向加速度 $a_v(t)$ 为重力加速度 $-g$, 该模块计算出浮放设备最终的加速度响应。通过积分模块分别得出设备水平速度、位移、竖向速度、竖向位移。其中, 浮放设备的竖向速度需通过 Contact velocity 子系统模块进一步调整, 该模块等效于假设 4。每一仿真步结束后, 通过输出端口将设备的各种运动参数输出模型 (见图 2 右所示 1~8 端口)。

3 仿真计算

3.1 仿真结果

采用某核试验实测加速度波形, 取 $\gamma=0.5, \mu_d=\mu_s=0.3$ 。所得仿真结果见图 3~4。

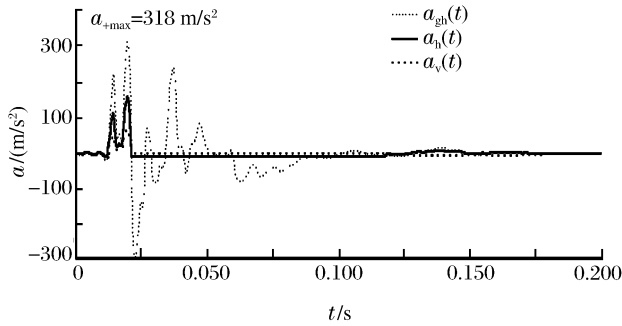


图 3 浮放设备加速度曲线

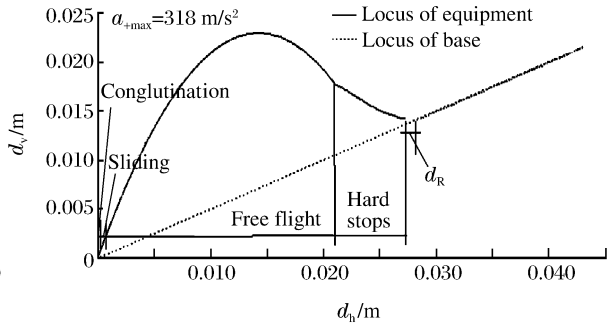


图 4 浮放设备运动轨迹

Fig. 3 Acceleration response of the free-standing equipment

Fig. 4 Trajectory of the free-standing equipment

从图 3~4 中可以看出, 浮放设备在真实爆炸环境中的运动经历四个阶段。(1) 相对静止阶段 (Conglutination): 设备与基础粘结在一起, 该阶段发生在爆炸波开始作用到第一个正主脉冲来临; (2) 滑移阶段 (Sliding): 设备与基础之间发生滑移, 水平惯性力大于最大摩擦力, 而设备竖向运动和基础保持一致, 该阶段发生在正向主脉冲持续的期间; (3) 抛离阶段 (Free flight): 设备脱离基础作斜上抛运动, 该阶段从在负主脉冲绝对值大于 g 开始持续到脉冲基本作用完毕; (4) 滑移减速阶段 (Hard stops): 设备残余水平速度的存在将使它在基本静止的基础上产生滑移, 随着动能的消耗, 设备最终停止运动。

从浮放设备的运动历程来看, 设备的运动响应主要取决于爆炸冲击波中首先来临的正主脉冲部分, 当负脉冲开始作用时, 设备已经处于抛离状态, 且该状态持续到地冲击作用基本完毕。从该特点出发, 可以采用式(7)所示的简化爆炸地冲击波形。波形的物理意义是, 地运动在 $3t_1$ 时刻速度为 0, 便于求出最终时刻浮放设备与基础的相对位移。其数学表达式为

$$a_{gh}(t) = \begin{cases} \alpha_{+max} \sin(\omega_c t) & 0 \leq t \leq t_1 \\ -\alpha_{-max} \sin(0.5\omega_c(t - t_1)) & t_1 < t < 3t_1 \\ 0 & 3t_1 \leq t \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\alpha_{+max} = 2\alpha_{-max}$, t_1 为主脉冲作用时间, $\omega_c = \pi/t_1$ 。

3.2 仿真结果检验

利用式(7)所示简化地冲击波对仿真结果进行检验。由式(3)所给出的滑移条件可知, 设备开始滑移的时刻

$$t_0 = t_1 \pi^{-1} \xi^{-1} \arcsin \Psi_1 \quad (8)$$

式中: $\xi = a_{+max}/g$ 。

由式(5)所给出的抛离条件可知,开始抛离时刻

$$t_k = t_1 + 2t_1 \pi^{-1} \arcsin(2\xi^{-1}) \quad (9)$$

水平加速度峰值

$$|a_h(t)|_{\max} = \mu_d (g + 0.5 |a_{+\max}|) \quad (10)$$

设峰值加速度为 40 m/s²,主脉冲持续 0.5 s,

$\mu_d = \mu_s = 0.3$,通过式(8)~式(10)计算可得到 $t_0 = 0.11$ s, $t_k = 0.79$ s, $|a_h(t)|_{\max} = 10.44$ m/s²,该值

与仿真结果(见图 5)完全吻合。利用简化波形得出的

加速度响应更直观地展现出浮放设备滑移抛离的

四个阶段,所以使用该简化波形来研究浮放设备滑

移抛离规律是可行的。

4 滑移影响因素

处于地下的国防工程受到核武器和现代高技术

常规武器攻击时,通常发生顶爆和侧爆,由现有某军用规范可知, $\gamma < 1$ 且在结构未产生破坏的前提下,

工程内部震动加速度通常达到 $10 \sim 10^3$ m/s²,持续时间通常为 $30 \sim 500$ ms,主脉冲时间为 $1 \sim 50$ ms^[4]。

在该范围内,通过改变不同参数值得到不同因素对浮放设备的影响见图 6~图 9。

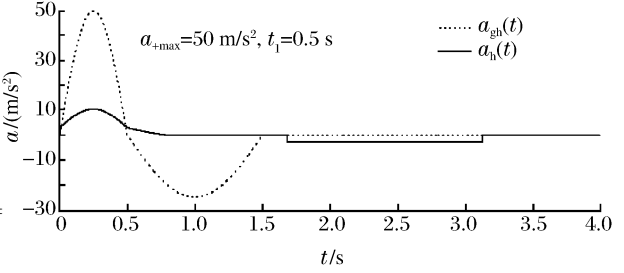


图 5 浮放设备加速度曲线

Fig. 5 Horizontal acceleration response of the free-standing equipment

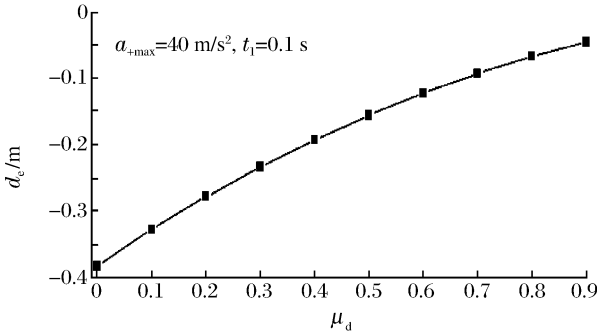


图 6 最终位移随动摩擦因数的变化

Fig. 6 Relation of final displacement and μ_d

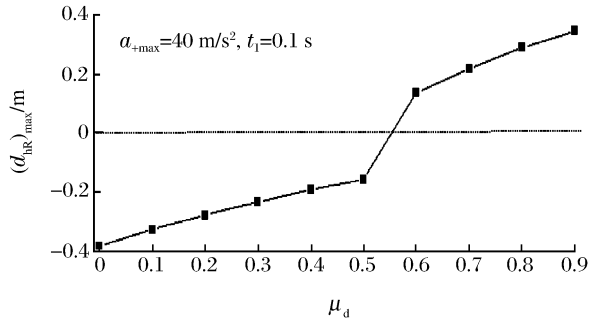


图 7 $(d_{hR})_{\max}$ 随动摩擦因数的变化

Fig. 7 Relation of maximum relative displacement and μ_d

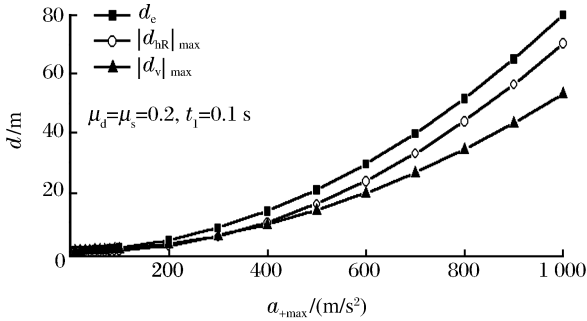


图 8 位移响应随 $a_{+\max}$ 的变化

Fig. 8 Relation of displacement response and $a_{+\max}$

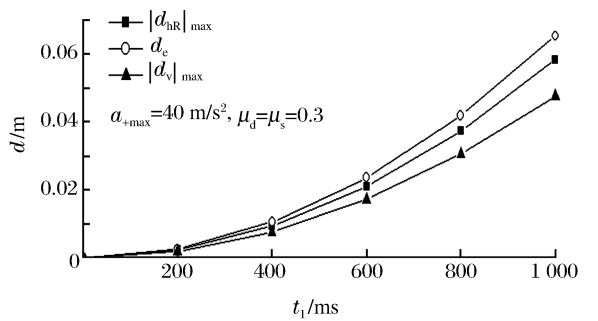


图 9 位移响应随 t_1 的变化

Fig. 9 Relation of displacement response and t_1

当 $\gamma < 1$ 时,在爆炸产生的地冲击环境中,浮放设备的运动响应和动摩擦因数 μ_d 、爆炸地运动参数的关系描述为:(1)设备水平最终位移 d_e 随动摩擦因数 μ_d 的增大而减小,但抛离运动的存在减小了 μ_d 对设备水平位移的影响。在运动过程中,浮放设备相对基础的最大位移 $(d_{hR})_{\max}$ 随 μ_d 的变化规律见图 7。

竖直最大位移 $|d_v|_{\max}$ 与 μ_d 无关。(2)地冲击加速度波对浮放设备响应运动的影响随主脉冲持续时间 t_1 、 $a_{+\max}$ 的增大而增大,这一点可以从图 8~9 中曲线的斜率变化看出。设备的 d_e 、 $(d_{hR})_{\max}$ 、 $|d_v|_{\max}$ 等

参数随 t_1 、 $a_{+\max}$ 的增大而增大。可以说, 随地震动能量的增大, 浮放设备由于滑移抛离产生的损伤急剧加重。(3) 在运动过程中, 设备最大水平速度 $|v_h|_{\max}$ 与 μ_d 、 t_1 、 $a_{+\max}$ 都呈正比。

5 结论

在折减因数 $\gamma < 1$ 的情况下:

(1) 浮放设备在爆炸产生地冲击作用下的运动可分为相对静止、滑移、抛离、滑移减速等四个阶段。

(2) 浮放设备运动响应主要取决于爆炸冲击波中首先来临的正主脉冲部分, 当负脉冲开始作用时, 设备几乎已经处于抛离状态, 且该状态持续到地冲击作用基本完毕。

(3) 在地冲击作用过程中, 浮放设备与基础之间的最大相对位移受滑动摩擦因数、地冲击加速度峰值和主脉冲作用时间等因素的影响, 而与质量无关。设备水平最终位移随动摩擦因数的增大而减小。设备的最大水平速度与滑动摩擦因数、主脉冲作用时间、地冲击加速度峰值都呈正比。随地震动能量的增大, 浮放设备由于滑移抛离产生的损伤急剧加重。

SIMULINK 模拟仿真技术在浮放设备运动问题研究中是可靠的, 而且对于任意输入的加速度波形都适用, 且思路明确, 结果输出方便, 值得推广。

参考文献:

- [1] 毛利军, 李爱军. 基于 SIMULINK 的基础滑移隔震机构仿真计算分析[J]. 东南大学学报, 2001, 32(5): 804-808.
MAO Li-jun, LI Ai-qun. Seismic simulation of a sliding structure based on SIMULINK[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2001, 32(5): 804-808.
- [2] 吕西林, 周得源, 李思明. 房屋结构抗震设计理论与实例[M]. 上海: 同济大学出版社, 1995: 303-304.
- [3] 王彦林. 爆炸冲击震动下浮放设备动力分析[D]. 南京: 解放军理工大学, 2004.
- [4] 陈妙峰. 爆炸冲击震动下人员隔震研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2004.

Sliding-kicking up analysis of free-standing equipment impacted by explosion seism

ZHOU Feng*, TANG De-gao, HE Hu-cheng, YANG Jian-chao

(Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science & Technology,
Nanjing 21007, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the contact force characteristics in the interface between the free-standing equipment and base, a sliding-kicking up model for free-standing equipment under explosion seism impact is proposed by Matlab/SIMULINK software, and its correctness is verified. The dynamics equations and the critical conditions of different motion states are solved out. The motion process of the free-standing equipment in the real explosion environment can be divided into four stages including conglutination, sliding, free flight, hard stops by inputting the real explosion acceleration wave to this model. A reasonable simplified acceleration is developed, and by which variation of the motion response of the free-standing equipment with the kinetic friction coefficient and explosion seism parameters is obtained.

Key words: mechanics of explosion; movement response; simulation calculation; free-standing equipment; explosion seism

* Corresponding author: ZHOU Feng

E-mail address: Ash_zhou@yahoo.com.cn

Telephone: 025-80821675