

# 冷发射装备对地载荷作用下预设场坪的动力响应研究

张震东, 马大为, 任杰, 何强, 朱忠领

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了研究冷发射装备对地载荷作用下场坪的动力响应, 将对地载荷视为多圆均布动载荷, 基于赫兹接触理论获得对地载荷的表达式。以 Winkler 地基上双层板的控制微分方程为基础, 引入双参数地基模型中的地基反力, 给出双参数地基模型上双层板的运动微分方程。采用级数分解与傅里叶变换相结合的方法推导单个圆形载荷下场坪挠度的解析式, 利用线性叠加方法, 得到多个圆形均布动载荷下场坪下沉量的表达式。在 ADAMS 中建立含场坪的发射装备动力学模型与 Simulink 进行联合求解, 获得各个接触区域圆心处的场坪下沉量, 分析结果表明: 底座处的场坪下沉量较大且对后两个支撑盘处下沉量产生很大影响; 支撑盘之间下沉量的相互影响很小, 可忽略。

**关键词:** 兵器科学与技术; 发射装备; 多圆均布动载荷; 双参数地基上双层板模型; 联合求解; 场坪下沉量

中图分类号: TJ768

文献标志码: A

文章编号: 1000-1093(2015)02-0279-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.02.013

## Dynamic Response of Cold Launching Equipment to Prepared Launching Site Subjected to Loading

ZHANG Zhen-dong, MA Da-wei, REN Jie, HE Qiang, ZHU Zhong-ling

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to research the dynamic response of old launching equipment to prepared launching site subjected to loading, the loading is regarded as multi-circle distributed force, and the expression of force is derived based on Hertz contact theory. Based on the governing differential equation of Winkler foundation model, the differential equations of two-layer plate are improved by adding the subgrade reaction into the two-parameter foundation model. Then the expression of launching site deflection under single-circle distributed force is deduced by using Fourier integral transformation and triangular series methods. The analysis formula of settlement under multi-circle distributed force could be got by using linear superposition method. For the sake of settlement of launching site, a co-simulation dynamic model of launching equipment including site is built by ADAMS software and Simulink software. Analysis results of the settlement of circle center in every contact area show that the settlement of contact area at the base is larger and has great impact on the deflections of the latter two contact areas of support disk, the settlement interact between support disks should be ignored because of small order magnitude.

**Key words:** ordnance science and technology; launching equipment; multi-circle distributed dynamic force; two-layer plate model on two-parameter foundation; co-simulation; settlement of launching site

收稿日期: 2014-05-26

基金项目: 国防基础科研基金项目(B2620110005)

作者简介: 张震东(1988—), 男, 博士研究生。E-mail: zzd1157@163.com;

马大为(1953—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: ma-dawei@mail.njust.edu.cn

## 0 引言

冷发射装备对地载荷通过支撑盘、底座传递至发射场坪,场坪在动载荷下的响应又会影响到发射装备的稳定性,最终对导弹出筒姿态产生干扰,甚至可能导致导弹发射失败,由此可见场坪在动载荷下的响应具有很高的研究价值和实用价值。

对于预设导弹发射阵地,多为多铺层的水泥混凝土结构,可采用弹性地基上的矩形板理论分析其在动载荷下的响应。针对弹性地基上板的动力响应问题,国内外学者开展了许多研究,Fryba<sup>[1]</sup>分析了移动荷载作用下无限大板挠度的解析解;孙璐等<sup>[2]</sup>、蒋建群等<sup>[3]</sup>采用积分变换的方法研究了无限大板在移动荷载作用下的积分形式解,但只分析了单层板的动力响应;李皓玉等<sup>[4]</sup>将路面视为粘弹性地基上无限大双层板,从而获得了车辆荷载作用下路面动力响应解析解。上述文献中的研究均采用积分变换的方法推导 Green 函数,然后通过 Duhamel 积分求得板挠度的解析解,这种方法一方面比较复杂,很难实现工程应用,另一方面将道路视为无限大板与路面实际结构不符。为了弥补上述不足,颜可珍等<sup>[5]</sup>将路面视为无限长地基板,分析了运动常值均布荷载和简谐荷载作用下板的动力响应。在矩形板动力响应方面,郑小平等<sup>[6]</sup>、颜可珍等<sup>[7]</sup>采用级数分解的方法研究了粘弹性地基上矩形板运动荷载的动态响应问题。

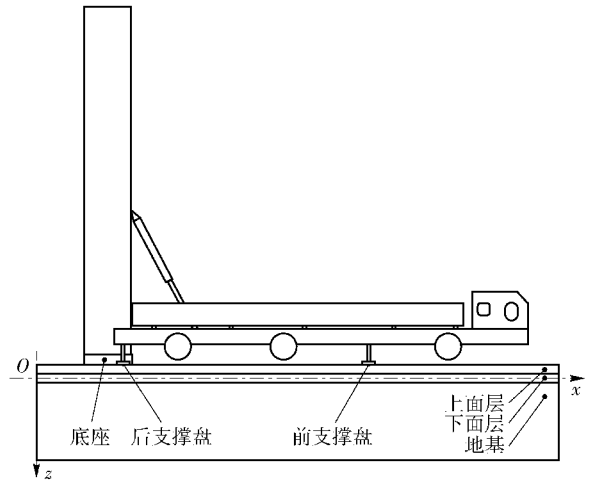
以上研究只分析了常幅值荷载或简谐激励荷载等特殊荷载作用下地基板的动力响应,均没有对多个任意幅值动荷载下场坪的动力响应进行分析。本文给出了双参数地基上的双层矩形板的运动微分方程,采用级数分解和傅里叶变换的方法,结合线性叠加理论,推导了多个圆形均布动荷载下场坪挠度的表达式。在 ADAMS 软件中建立了含场坪的发射装备动力学模型并与 Simulink 进行联合求解,实现了发射装备与场坪的耦合,得到弹射过程中接触面圆心处场坪的下沉量,讨论了各个对地载荷对下沉量的影响。

## 1 基本理论

### 1.1 板的运动微分方程

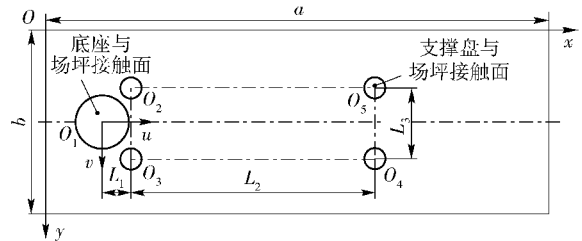
发射场坪采用粘弹性双参数地基上双层矩形板模拟。所建立的含场坪效应的发射装备仿真模型,如图 1(a) 所示。

发射装备对地载荷作用面,如图 1(b) 所示, $a$ 、 $b$



(a) 发射装备模型与场坪模型

(a) Launching equipment model and launching site model



(b) 多圆均布动载荷作用面

(b) Acting surface for multi-circle loads

图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calculation model

分别为矩形板的长度、宽度,用  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  确定各接触面的位置关系。

将场坪上、下面层简化为上、下两层 Kirchhoff 薄板并假设两层薄板之间的接触状态为完全连续。

文献[8]推导了 Winkler 地基上双层板的控制微分方程为

$$D \left( \frac{\partial^4}{\partial x^4} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right) W + 2(D_{xy} + 2D_k) \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + m_b \frac{\partial W^2}{\partial t^2} = F(x, y, t) - P(x, y, t), \quad (1)$$

式中: $W$  为地面的下沉量; $m_b = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2$  为双层板的单位面积质量, $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $h_1$ 、 $h_2$  分别为上、下板的密度与厚度; $P(x, y, t)$  为地基反力; $D$ 、 $D_{xy}$  为板的弯曲刚度, $D_k$  为板的扭转刚度,表达式<sup>[8]</sup>分别为

$$\begin{cases} D = \int_{h_0-h_1}^{h_0} \frac{E_1}{1-\nu_1^2} z^2 dz + \int_{h_0-h_1-h_2}^{h_0-h_1} \frac{E_2}{1-\nu_2^2} z^2 dz, \\ D_{xy} = \int_{h_0-h_1}^{h_0} \frac{E_1 \nu_1}{1-\nu_1^2} z^2 dz + \int_{h_0-h_1-h_2}^{h_0-h_1} \frac{E_2 \nu_2}{1-\nu_2^2} z^2 dz, \\ D_k = \int_{h_0-h_1}^{h_0} \frac{E_1}{2(1-\nu_1)} z^2 dz + \int_{h_0-h_1-h_2}^{h_0-h_1} \frac{E_2}{2(1-\nu_2)} z^2 dz, \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $E_1$ 、 $E_2$  分别为上下板的弹性模量;  $\nu_1$ 、 $\nu_2$  为上、下板的泊松比;  $h_0$  为双层板的中性层距板上表面的距离, 表达式<sup>[8]</sup>为  $h_0 = \frac{E_1 h_1^2 + E_2 (2h_1 + h_2) h_2}{2(E_1 h_1 + E_2 h_2)}$ .

对于双参数地基模型, 地基反力<sup>[9]</sup>为

$$P(x, y, t) = -H_b^2 K_h \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) W + K_v W, \quad (3)$$

式中:  $K_h$ 、 $K_v$  分别为水平、竖直方向的地基刚度;  $H_b$  为双层板底部至中性面的距离,  $H_b = h_1 + h_2 - h_0$ .

将(3)式代入(1)式并计入地基阻尼的影响, 得到双参数地基上双层板的运动微分方程为

$$D \left( \frac{\partial^4}{\partial x^4} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right) W + 2(D_{xy} + 2D_k) \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + m_b \frac{\partial W^2}{\partial t^2} + C \frac{\partial W}{\partial t} - H_b^2 K_h \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) W + K_v W = F(x, y, t), \quad (4)$$

式中:  $C$  为地基阻尼系数。

## 1.2 对地载荷数学模型

发射装备对地载荷通过圆形支撑盘、底座传递至发射场坪, 因此载荷作用面为圆形。为简化计算, 认为载荷在圆形区域内均匀分布。故本文视发射装备对地载荷为多圆形均布动载荷, 可用(5)式表示:

$$F^j(x, y, t) = f^j(t) H \{ r_j^2 - [(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2] \}, \quad j = 1, 2, \dots, 5, \quad (5)$$

式中:  $f^j(t)$  为均布载荷时变规律;  $H(x, y)$  为 Heaviside 阶跃函数;  $r_j$  为第  $j$  个圆的半径;  $x_j$ 、 $y_j$  为第  $j$  个圆的圆心坐标。

## 1.3 发射装备一场坪接触模型

根据赫兹非线性阻尼弹簧接触模型, 圆柱体与弹性半空间体相互接触的两个物体可用一个弹簧与一个非线性阻尼模型器模拟接触<sup>[10]</sup>:

$$F_N^j = F_K^j + F_C^j = K_N^j \delta_j^\eta + C^j(\delta) \dot{\delta}_j, \quad (6)$$

式中:  $F_N^j$  为第  $j$  个接触点法向接触力;  $F_K^j$  表示弹簧力;  $F_C^j$  为阻尼力;  $K_N^j$  为法向接触刚度;  $\delta_j$  为由接触力产生的接触点法向变形量;  $\eta$  为非线性弹簧幂指数;  $C^j(\delta)$  为与  $\delta$  有关的阻尼系数;  $\dot{\delta}_j$  为接触点的法向相对速度。  $K_N^j$ 、 $C^j(\delta)$  由(7)式确定<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} K_N^j = 2r_j E_{eq}, \\ C^j(\delta) = 0.75(1 - \varphi^2) K_N^j \delta_j^\lambda / \dot{\delta}_j, \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $r_j$  为第  $j$  个接触区域的半径;  $1/E_{eq} = (1 - \nu_0^2)/E_0 + (1 - \nu_1^2)/E_1$ ,  $E_0$ 、 $\nu_0$  分别为支撑盘和底座的弹性模量、泊松比;  $\varphi$  为恢复系数;  $\lambda$  为非线性阻尼幂指数。

为了简化计算, 假设支撑盘、底座与场坪完全接触且接触力在接触区域内均匀分布, 由(6)式可计算出第  $j$  个均布载荷时变规律  $f^j(t)$  为

$$f^j(t) = \frac{F_N^j}{A_j} = \frac{F_N^j}{\pi r_j^2} = \frac{2r_j E_{eq} \delta_j^\eta + 0.75(1 - \varphi^2) K_N^j \delta_j^\lambda}{\pi r_j^2}, \quad (8)$$

式中:  $A_j$  为第  $j$  个接触面的面积。

## 1.4 边界条件

将场坪视作四边简支地基板, 则边界条件可表示为

$$\begin{cases} W(x, y, t) = 0, & x = 0, a; \\ W(x, y, t) = 0, & y = 0, b; \\ \frac{\partial^2 W(x, y, t)}{\partial x^2} = 0, & x = 0, a; \\ \frac{\partial^2 W(x, y, t)}{\partial y^2} = 0, & y = 0, b. \end{cases} \quad (9)$$

## 2 微分方程求解

### 2.1 单圆均布动载荷下板的挠度

为满足边界条件, 文献[12]将第  $j$  个载荷引起的板的挠度  $W^j(x, y, t)$  表示为三角级数形式:

$$W^j(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn}^j(t) \sin(\alpha_m x) \sin(\beta_n y), \quad (10)$$

式中:  $q_{mn}(t)$  为展开系数;  $\alpha_m = \frac{m\pi}{a}$ ;  $\beta_n = \frac{n\pi}{b}$ .

将载荷函数同样展开成三角级数<sup>[12]</sup>:

$$F^j(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} f_{mn}^j(t) \sin(\alpha_m x) \sin(\beta_n y). \quad (11)$$

利用三角函数的正交性, 求得

$$f_{mn}^j(x, y, t) = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b F^j(x, y, t) \sin(\alpha_m x) \sin(\beta_n y) dx dy.$$

将(5)式代入(11)式, 根据 Heaviside 阶跃函数的性质进行简化得到:

$$f_{mn}^j(x, y, t) = \frac{4f^j(t)}{ab} G_{mn}^j(x, y), \quad (12)$$

式中,  $G_{mn}^j(x, y) = \iint_{D_j} \sin(\alpha_m x) \sin(\beta_n y) dx dy$ ,  $D_j$  为第  $j$  个圆围成的封闭区域。

将(10)式、(11)式代入(4)式, 得到下列微分方程:

$$m_b [q_{mn}^j(t)]'' + C [q_{mn}^j(t)]' +$$

$$D \left[ \alpha_m^4 + \frac{2(D_{xy} + 2D_k)}{D} \alpha_m^2 \beta_n^2 + \beta_n^4 + \frac{H_b^2 K_h (\alpha_m^2 + \beta_n^2) + K_v}{D} \right] q_{mn}^j(t) = f_{mn}^j(x, y, t), \quad (13)$$

令

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_{mn}^2 &= \frac{D}{m_b} \left[ \alpha_m^4 + \frac{2(D_{xy} + 2D_k)}{D} \alpha_m^2 \beta_n^2 + \beta_n^4 + \frac{H_b^2 K_h (\alpha_m^2 + \beta_n^2) + K_v}{D} \right], \\ \zeta_{mn} &= \frac{C}{2\omega_{mn} m_b}. \end{aligned} \right. \quad (14)$$

将(14)式代入(13)式,进一步简化得到:

$$[q_{mn}^j(t)]'' + 2\zeta_{mn} \omega_{mn} [q_{mn}^j(t)]' + \omega_{mn}^2 q_{mn}^j(t) = \frac{f_{mn}^j(x, y, t)}{m_b}. \quad (15)$$

对(15)式进行傅里叶变换,可得

$$s^2 q_{mn}^j(s) - 2s\zeta_{mn} \omega_{mn} i q_{mn}^j(s) + \omega_{mn}^2 q_{mn}^j(s) = \frac{f_{mn}^j(s)}{m_b}. \quad (16)$$

将(16)式进一步简化,得到:

$$q_{mn}^j(s) = \frac{f_{mn}^j(s)}{m_b (s^2 - 2\zeta_{mn} \omega_{mn} i s + \omega_{mn}^2)}, \quad (17)$$

式中:

$$\begin{aligned} f_{mn}^j(s) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f_{mn}^j(x, y, t) e^{-ist} dt = \\ &= \frac{4G_{mn}^j(x, y)}{ab} \int_0^{+\infty} f^j(t) e^{-ist} dt = \\ &= \frac{4G_{mn}^j(x, y)}{ab} f^j(s). \end{aligned} \quad (18)$$

将(18)式代入(17)式并进行逆傅里叶变换,得

$$q_{mn}^j(t) = \frac{2G_{mn}^j(x, y)}{ab\pi m_b} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f^j(s) e^{st}}{s^2 - 2\zeta_{mn} \omega_{mn} i s + \omega_{mn}^2} ds. \quad (19)$$

将(19)式代入(10)式可得第  $j$  个圆形均布动载荷作用下的板的挠度:

$$W^j(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sin(\alpha_m x) \sin(\beta_n y)}{ab\pi m_b} G_{mn}^j(x, y) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f^j(s) e^{ist}}{s^2 - 2\zeta_{mn} \omega_{mn} i s + \omega_{mn}^2} ds. \quad (20)$$

## 2.2 多圆均布载荷下板的挠度

板中某点处的挠度应是各个均布载荷下板的动力响应线性叠加的结果,采用线性叠加方法可得到某点的下沉量为

$$W_{\text{sum}}(x, y, t) = \sum_{j=1}^l W^j(x, y, t). \quad (21)$$

$W^j(x, y, t)$  为第  $j$  个对地载荷作用下某点的下沉量。由于本文为 5 个圆形均布动载荷,故取  $l=5$ 。作者在 Simulink 软件中分别求出各个载荷(5 个圆形均布动载荷)作用下某个圆心处场坪的下沉量,并在 Simulink 软件中添加求和模块,将每个时刻各个载荷引起的该圆心处的下沉量进行线性叠加,可得到每个时刻该圆心处总的下沉量。其余 4 个圆心处总的下沉量的求解方法与上述过程相似。

为计算方便进行坐标变换,新坐标系  $O_1uvw$  与原坐标系  $Oxyz$  坐标轴方向一致,原点位于圆心  $O_1$  处,则两坐标系间存在如下关系:

$$\begin{cases} u = x - x_1, \\ v = y - y_1, \\ w = z - z_1. \end{cases} \quad (22)$$

在新坐标系  $O_1uvw$  下,(22)式可化为

$$\begin{aligned} W_{\text{sum}}(u, v, t) &= \sum_{j=1}^l W^j(u + x_1, v + y_1, t) = \\ &= \sum_{j=1}^l \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sin[\alpha_m(u + x_1)] \sin[\beta_n(v + y_1)]}{ab\pi m_b} G_{mn}^j(u + x_1, v + y_1) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f^j(s) e^{ist}}{s^2 - 2\zeta_{mn} \omega_{mn} i s + \omega_{mn}^2} ds. \end{aligned} \quad (23)$$

## 3 算例分析

为了验证本文所推导的多圆动载荷下双层板挠度解析式的适用性,选取算例进行分析。

### 3.1 计算参数

本文所需的参数及其取值,如表 1 所示。

### 3.2 联合求解

由于对地载荷很难用解析式表示且挠度表达式解析求解困难,故采用 ADAMS 软件与 Simulink 软件联合求解的方法进行分析。图 2 中表示了圆心  $O_1$  处场坪下沉量的求解过程,其他 4 个圆心处的挠度求解过程与之类似。

本文在 ADAMS 软件中建立含场坪的冷发射装备动力学模型,4 个支撑盘、底座处分别建立场坪,并将每处场坪与 ADAMS 软件默认的固联坐标系间分别设置直线驱动器。调整发射装备与场坪的接触参数(接触刚度、接触阻尼),利用 ADAMS 求解发射装备与场坪的接触力,即对地载荷。在 Simulink 软件中建立所推导的挠度解析表达式(见(20)式),将 ADAMS 中 4 个支撑盘、底座与场坪的接触力输出至

表1 参数取值  
Tab.1 Parameter values

符号	参数名称	取值
$K_h$	地基水平刚度/( $N \cdot m^{-3}$ )	$8 \times 10^5$
$K_v$	地基竖直刚度/( $N \cdot m^{-3}$ )	$4 \times 10^7$
$C$	地基阻尼/( $N \cdot s \cdot m^{-3}$ )	0
$\rho_1$	上层板密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	2 600
$\rho_2$	下层板密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	2 000
$a$	板长度/m	25
$b$	板宽度/m	7
$h_1$	上层板厚度/m	0.15
$h_2$	下层板厚度/m	0.2
$E_0$	支撑盘、底座弹性模量/GPa	260
$E_1$	上层板弹性模量/MPa	1 500
$E_2$	下层板弹性模量/MPa	1 200
$\nu_0$	支撑盘、底座泊松比	0.3
$\nu_1$	上层板泊松比	0.15
$\nu_2$	下层板泊松比	0.2
$\eta$	非线性弹簧幂指数	1.5
$\varphi$	恢复系数	0
$\lambda$	非线性阻尼幂指数	1
$r_j$	第j个接触面半径/m	$r_2 = r_3 = r_4 =$ $r_5 = 0.3r_1$
$(x_1, y_1, z_1)$	圆心 $O_1$ 坐标	(5 m, 3.5 m, $-h_0$ )
$L_1 L_2 L_3$	接触面相对位置	$L_2 = 12L_1$ $L_3 = 2.5L_1$

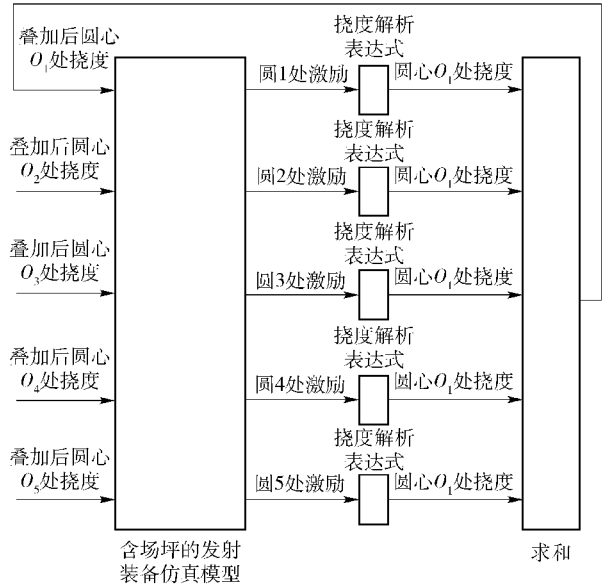


图2 联合仿真流程图

Fig.2 Flowchart of co-simulation

3.3.1 各圆处对地载荷

图3~图5给出了各个接触圆处发射装备对地载荷的时程曲线。

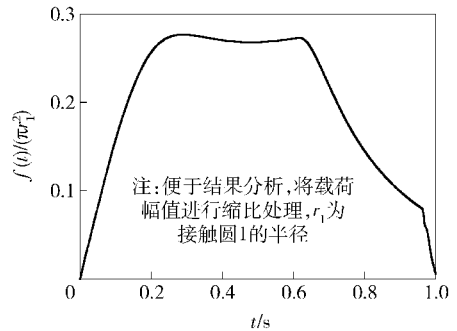


图3 圆1处对地载荷时程曲线

Fig.3 Time-history curve of load at circular region 1

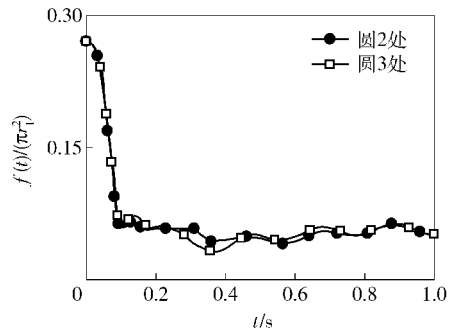


图4 圆2、圆3处对地载荷时程曲线

Fig.4 Time-history curves of loads at circular regions 2 and 3

Simulink 软件中,通过 Simulink 软件分别求出 5 个圆形动载荷作用下的每个接触面圆心处的挠度,然后将每个载荷下(本文共有 5 处)每个时刻某个圆心处的挠度进行叠加,就可得到该圆心处每个时刻总的下沉量(同理可得到其余 4 个圆心处总下沉量),最后将每个时刻的总下沉量反馈到含场坪的发射装备动力学模型中,具体是将下沉量输入到 ADAMS 软件的直线驱动器中,驱动场坪做直线运动,以模拟场坪的动力响应,这样就会产生新的接触力,利用新的对地载荷进行下一步求解,经过 ADAMS 与 Simulink 间不断的数据交换,可求解场坪在发射装备对地载荷下的响应。同时也可以看出,上述方法实现了发射装备与场坪的耦合。

3.3 结果分析

由于篇幅限制,本文只给出了圆心  $O_1$ 、圆心  $O_2$ 、圆心  $O_3$ 处场坪挠度变化规律,并未提供圆心  $O_4$ 、圆心  $O_5$ 处场坪下沉量时程曲线。

通过分析图3~图5可得出以下结论:

1)由图4可知,圆2、圆3处对地载荷在 0~0.1 s

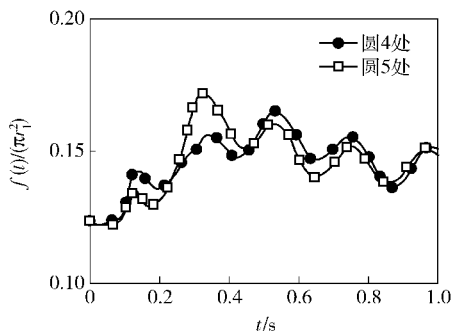


图 5 圆 4、圆 5 处对地载荷时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of loads at circular regions 4 and 5

区间内急剧下降,这是因为导弹起竖后待发射时,弹重基本上全部由后两个支腿承受,致使 0 s 时后两个支撑盘对地载荷很大,然而当导弹开始运动后弹重不再由支腿承受,故对地载荷很快就下降至较小值,此后载荷变化平稳且圆 2、圆 3 处对地载荷差别较小。

2) 由于发射装备结构的对称性,圆 4、圆 5 处对地载荷变化规律相近,在 0.2 ~ 0.4 s 区间内圆 5 处对地载荷变化比较剧烈,可能由发射装备建模时的误差引起。

### 3.3.2 圆心 $O_1$ 处场坪下沉量

图 6 ~ 图 8 分别是 5 个接触圆处发射装备对地载荷作用下圆心  $O_1$  处场坪下沉量,同时图 8 给出了 5 个对地载荷下  $O_1$  处 5 种下沉量叠加后的曲线。

由图 6 ~ 图 8 可得出以下结论:

1) 通过分析图 6 ~ 图 8,结合图 3 ~ 图 5 可知:场坪下沉量的变化规律与对地载荷变化规律一致;

2) 由于距离较远,圆 4、圆 5 处对地载荷作用下圆心  $O_1$  处场坪下沉量很小(3 ~ 7  $\mu\text{m}$ ),对  $O_1$  处的影响可以忽略;

3) 双参数地基模型中考虑了水平方向的地基反力,场坪发生弯沉时,在水平力作用下场坪有抬升的趋势,距离对地载荷较远处水平力对场坪的抬升量可能大于对地载荷引起的下沉量,故圆 4、圆 5 对地载荷作用下圆心  $O_1$  处场坪下沉量为负值,但抬升幅度很小;

4) 圆 1 处场坪下沉量最大值达到 6.2 mm,圆 2、圆 3 距圆心  $O_1$  较近,对地载荷对  $O_1$  处下沉量的贡献本应很大,但由于圆 2、圆 3 载荷幅值较小并且接触面积不大,影响有限,引起的最大下沉量仅为 0.46 mm.

### 3.3.3 圆心 $O_2$ 、圆心 $O_3$ 处下沉量

图 9 ~ 图 12 分别是 5 个接触圆处发射装备对地载荷作用下圆心  $O_2$ 、 $O_3$  处场坪下沉量变化规律,

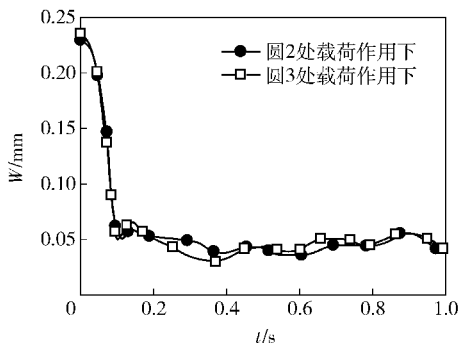


图 6 圆 2、圆 3 处载荷作用下圆心  $O_1$  处场坪下沉量

Fig. 6 Settlement of launching site at circle center  $O_1$

under loads 2 and 3

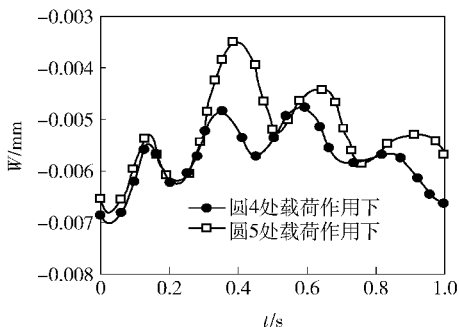


图 7 圆 4、圆 5 处载荷作用下圆心  $O_1$  处场坪下沉量

Fig. 7 Settlement of launching site at circle center  $O_1$

under loads 4 and 5

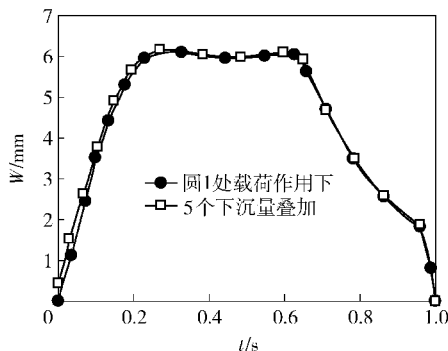


图 8 未叠加与叠加后圆心  $O_1$  处场坪下沉量对比

Fig. 8 Comparison of unsuperposed settlement and superposed settlement at circle center  $O_1$

并且图 11、图 12 中给出了 5 个对地载荷下圆心  $O_2$ 、 $O_3$  处 5 个下沉量叠加后的曲线。

分析图 9 ~ 图 12 可知:

1) 由于发射装备结构的对称性及支撑盘处对地载荷的对称性,圆心  $O_2$ 、圆心  $O_3$  处挠度变化规律相似;

2) 由图 11、图 12 得到:(1) 由于距离较近且圆

1 有较大半径,故圆 1 处对地载荷对接触圆 2、圆 3 处下沉量影响很大,最大值达到 2.1 mm;(2)圆 2、圆 3 各自区域内所承载荷产生下沉量只有 0.2 mm,支撑盘处圆形动载荷间距离较远,相互之间的影响较小,故可忽略;

3)图 9、图 10 中圆 5 处对地载荷作用下圆心  $O_2$  处场坪下沉量为负值,圆 4 处对地载荷作用下圆心  $O_2$  处场坪下沉量也为负值,其原因与 3.3.2 节中结论 3 相似;

4)由图 11、图 12 结合图 3、图 8 可知,虽然后两个支撑盘处的对地载荷变化规律初始幅值较大,但由于作用面积较小,产生的对地载荷亦较小,故下沉量并不明显,最大值仅为 0.7 mm 左右。

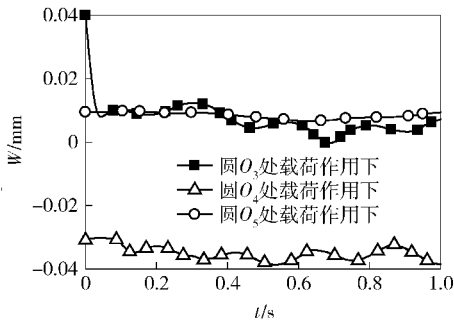


图 9 圆 3、圆 4、圆 5 载荷作用下圆心  $O_2$  处场坪下沉量

Fig. 9 Settlement of launching site at circle center  $O_2$  under loads 3, 4 and 5

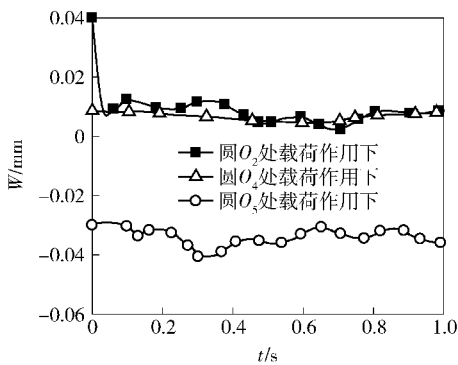


图 10 圆 2、圆 4、圆 5 载荷作用下圆心  $O_3$  处场坪下沉量

Fig. 10 Settlement of launching site at circle center  $O_3$  under loads 2, 4 and 5

### 4 结论

1)推导了多圆均布动载荷作用下双参数地基上双层弹性薄板的挠度解析式及发射装备对地载荷

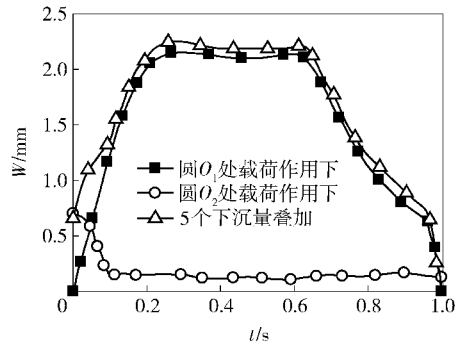


图 11 圆 1、圆 2 载荷作用下及叠加后圆心  $O_2$  处场坪下沉量

Fig. 11 Settlement of launching site at circle center  $O_2$  under loads 1 and 2 and superposed settlement

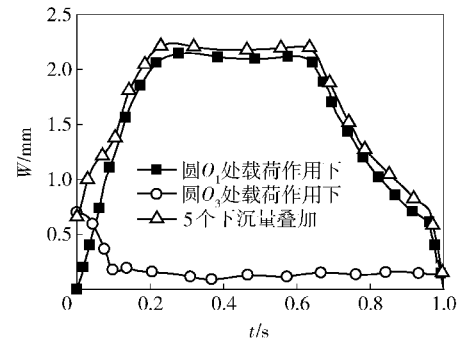


图 12 圆 1、圆 3 载荷作用下叠加后圆心  $O_3$  处场坪下沉量

Fig. 12 Settlement of launching site at circle center  $O_3$  under loads 1 and 3 and superposed settlement

的表达式,在 ADAMS 中建立了含场坪的发射装备仿真模型并与 Simulink 联合求解,实现了发射装备与场坪的耦合,为分析导弹发射动力学问题提供了良好的研究平台。

2)给出了发射装备对地载荷下场坪的下沉量,通过分析得到:

(1)相对于 4 个支撑盘对地载荷作用下场坪下沉量而言,底座处场坪下沉量最大,且底座对地载荷显著影响后两个支撑盘处的场坪弯沉;

(2)支撑盘间的距离较远,使得某个支撑盘的对地载荷在其余支撑盘处引起的场坪下沉量很小,可忽略;

(3)双参数地基模型中考虑了水平方向的地基反力,发生弯沉时在水平力作用下场坪有抬升的趋势,且距离对地载荷较远处,水平力对场坪的抬升量可能大于对地载荷引起的下沉量,最终使得场坪表现为微量抬升。

## 参考文献 (References)

- [1] Fryba L. Vibration of solids and structures under moving loads [M]. London: Thomas Telford, 1999.
- [2] 孙璐, 邓学钧. 弹性基础无限大板对移动荷载的响应[J]. 力学学报, 1996, 28(6): 756 - 760.  
SUN Lu, DENG Xue-jun. General theory for steady dynamic problem of infinite plate on an elastic foundation[J]. Acta Mechanica Sinica, 1996, 28(6): 756 - 760. (in Chinese)
- [3] 蒋建群, 周华飞, 张土乔. 移动荷载下 Kelvin 地基上无限大板的稳态响应[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(1): 27 - 32.  
JIANG Jian-qun, ZHOU Hua-fei, ZHANG Tu-qiao. Steady-state response of infinite plate on Kelvin foundation subjected to moving loads[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(1): 27 - 32. (in Chinese)
- [4] 李皓玉, 齐月芹, 刘进. 移动荷载下粘弹性半空间体上双层板的动力响应[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 28 - 34.  
LI Hao-yu, QI Yue-qin, LIU Jin. Dynamic responses of a two-layer plate on viscoelastic half-space foundation under moving loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 28 - 34. (in Chinese)
- [5] 颜可珍, 夏唐代, 周新民. 运动荷载作用下弹性地基无限长板动力响应[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(12): 1875 - 1879.  
YAN Ke-zhen, XIA Tang-dai, ZHOU Xin-min. Dynamic response analysis of slab on elastic foundation subjected to moving load[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(12): 1875 - 1879. (in Chinese)
- [6] 郑小平, 王尚文. 机场道面动态响应分析[J]. 航空学报, 1990, 11(3): A146 - A155.  
ZHENG Xiao-ping, WANG Shang-wen. Dynamic analysis of airport pavement[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1990, 11(3): A146 - A155. (in Chinese)
- [7] 颜可珍, 夏唐代. 粘弹性文克尔地基矩形板的稳态动力响应分析[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1077 - 1082.  
YAN Ke-zhen, XIA Tang-dai. Dynamic response of rectangular plate lying on viscous Winkler foundation to moving harmonic load[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1077 - 1082. (in Chinese)
- [8] Yang S P, Li S H, Lu Y J. Investigation on dynamical interaction between a heavy vehicle and road pavement [J]. Vehicle and System Dynamics, 2010, 48(8): 923 - 944.
- [9] Kim S M. Influence of horizontal resistance at plate bottom on vibration of plates on elastic foundation under moving loads[J]. Engineering Structures, 2004, 26(4): 519 - 529.
- [10] 何玲, 徐诚. 两构件冲击接触过程的理论与数值模拟[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(2): 195 - 201.  
HE Ling, XU Cheng. Theory and simulation of impact contact process of two components[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(2): 195 - 201. (in Chinese)
- [11] Lankarani H M, Nikravesh P E. Continuous contact force models for impact analysis in multibody systems[J]. Nonlinear Dynamics, 1994, 5(2): 193 - 207.
- [12] 颜可珍. 弹性地基上薄板的动力响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.  
YAN Ke-zhen. Study on dynamic response of thin plate on elastic foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)