

doi: 10.7690/bgzd.2015.12.017

## 某多管火箭炮支撑方式分析

詹晶晶<sup>1</sup>, 于存贵<sup>1</sup>, 边鹏<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 北方华安工业集团有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

**摘要:** 为研究支撑方式对发射系统动态特性的影响, 对某多管火箭炮支撑方式进行分析。采用 ADAMS 和 ANSYS 软件, 在 ADAMS 中建立刚柔耦合模型, 利用虚拟样机技术分别对半刚性支撑和轮胎支撑 2 种方式进行发射动力学仿真分析, 研究 2 种支撑方式下定向管管口的振动规律, 并对其起始扰动计算结果进行比较。分析结果表明, 半刚性支撑发射方式优于轮胎支撑发射方式。

**关键词:** 多管火箭炮; 支撑方式; 发射动力学; 起始扰动

**中图分类号:** TJ393 **文献标志码:** A

## Research on Supporting Way of Multiple Rocket Launcher

Zhan Jingjing<sup>1</sup>, Yu Cungui<sup>1</sup>, Bian Peng<sup>2</sup>(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;  
2. North Huaan Industrial Group Co., Ltd., Qiqihar 161006, China)

**Abstract:** For researching on influence of different supporting way on dynamic characteristics of launch system, analyze certain type multiply launch rocket system supporting way. Use ANSYS and ADAMS software, establish coupled rigid and flexible model in ADAMS, use virtual prototype technology to carry out launch dynamic simulation analysis for semi-rigid support and tire support. Research on vibration rule direction pipe orifice in 2 supporting ways, and compare the initial disturbance results in 2 supporting ways. The result indicated: semi-rigid support is better than tire support.

**Keywords:** multiple launch rocket; supporting way; launching dynamics; initial disturbance

### 0 引言

火箭炮发射时, 要用适当的方式支撑于地面, 支撑系统设计的主要目的是降低载体中弹性结构对发射过程的影响, 从而减小起始扰动<sup>[1]</sup>。目前火箭炮的支撑方式有刚性支撑、弹性支撑和半刚性支撑 3 种, 常用支撑装置有千斤顶装置、板簧固定器和制冲钩等<sup>[2]</sup>。现火箭炮动力学建模, 在考虑千斤顶与地面的连接、轮胎与地面的接触时主要应用动力学软件中的弹性约束与轮胎模块模拟其支撑方式, 与实际情况有差异。笔者利用 ANSYS 和 ADAMS 软件, 在考虑土壤承压特性与轮胎变形特性的基础上, 建立了更符合文献[1-2]中所述实际情况的某多管火箭炮刚柔耦合发射动力学仿真模型, 分析比较 2 种支撑方式下火箭炮定向管管口振动规律及起始扰动计算结果。

### 1 火箭炮支撑方式

笔者只针对某多管火箭炮的半刚性支撑方式与弹性支撑方式进行研究。半刚性支撑方式是指发射平台用前后轮和后千斤顶支撑于地面, 形成前弹性后刚性的支撑, 在火箭发射的过程中, 后千斤顶承受了发射系统的大部分外部激励, 载体的后轮胎承

受较小的力或不受力; 轮胎支撑方式也可称为弹性支撑方式, 是指在多管火箭发射过程中, 千斤顶不起作用, 仅靠轮胎支撑来完成车体与地面的接触, 发射时的载荷通过前后车轮传递给地面, 车体上的悬挂可以锁死, 只要有轮胎支撑, 也可以不锁住, 由轮胎和悬挂弹性串联支撑<sup>[2-3]</sup>。

### 2 发射动力学模型的建立

#### 2.1 千斤顶与地面之间的连接

##### 2.1.1 土壤承压特性

土壤承压特性与剪切特性是与车辆行驶有关的 2 个基本力学特性, 而土壤的剪切特性是影响汽车松软地面通过性的特性, 这里暂不研究<sup>[4]</sup>。

土壤在负荷的作用下发生沉陷, 沉陷包括弹性变形和塑性变形及永久变形 2 个部分。在负荷去掉后, 沉陷部分的恢复取决于它的弹性变形值。从弹性变形到非弹性(永久)变形的转变不是突然发生的, 变形是由负荷表面逐渐向全部土壤扩展; 因此, 对于这样中间状态的应力应变关系进行计算是十分复杂的。目前在研究汽车地面力学时多采用简化模型, 且其中用得最多的是 Bekker 模型, 它表示土壤支撑面积上的压力和下陷量之间有下式关系:

收稿日期: 2015-07-17; 修回日期: 2015-08-19

作者简介: 詹晶晶(1989—), 女, 内蒙古人, 硕士, 从事火箭系统发射动力学研究。

$$p = Kz^n \quad (1)$$

式中： $K$  为土壤变形模量； $n$  为土壤变形系数； $p$  为压板下法相平均单位压力； $z$  为压板下陷量<sup>[4]</sup>。

### 2.1.2 千斤顶与地面连接的虚拟样机模型

以往常用 ADAMS 中的轴套力，通过定义一个 3 方向上的力和 3 方向上的力矩，以柔性力的形式模拟液压支撑与地面之间的连接。但实际上根据土壤承压特性可知，土壤对千斤顶的阻力等价于有限刚性带在半无限弹性土壤介质间的接触碰撞运动，土壤提供的阻力则是支撑运动位移和速度的函数。因此，可通过 ADAMS 中的接触碰撞 CONTACT 来定义千斤顶与地面之间的连接。

CONTACT 在 ADAMS 中的计算模型分为正压力和摩擦力 2 个部分。ADAMS 中使用 IMPACT 函数计算接触正压力，IMPACT 函数的一般表达式为

$$\text{IMPACT} = \begin{cases} \max(0, k(x_1 - x))^e & x < x_1 \\ -\text{step}(x, x_1 - d, c_{\max}, x_1, 0) \cdot \dot{x} & \\ 0 & x \geq x_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $x$  是两接触物体的距离； $\dot{x}$  是两接触物体的相对速度； $x_1$  是  $x$  的自由距离，当  $x < x_1$  时表示两接触物体发生接触，此时产生接触压力，反之，两物体不接触； $e$  是一个非负实数，是力的指数，对于刚度比较大的接触面，应该定义成  $e > 1$ ，反之  $e < 1$ ； $c_{\max}$  是非负实数，指接触过程中的最大阻尼系数； $d$  是接触表面的临界相互渗透<sup>[5]</sup>。

由土壤承压特性 Bekker 模型及 IMPACT 函数表达式，可以将千斤顶与地面之间的接触碰撞阻力函数近似表示为

$$F = \begin{cases} \max\{0, Kz_i^n - \text{step}(z_i, 0, 0, z_{\max}, c_{\max}) \cdot \dot{z}_i\} & z_i < 0 \\ 0 & z_i \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

参考文献 [3] 取土壤接触刚度  $K=5\ 036\ \text{N} \cdot \text{mm}^{-0.824}$ ，取土壤接触变形指数  $n$  在  $0.722 \sim 0.98$  之间。

## 2.2 轮胎与地面的接触模型

### 2.2.1 轮胎变形参数

轮胎的弹性包括径向（垂直方向）弹性、侧向（横向）弹性和切向（圆周方向）弹性，相应的刚度称为径向刚度、侧向刚度和切向刚度<sup>[6]</sup>。

G.Komandi 用不同尺寸的轮胎和不同气压在混凝土路面上进行了大量试验，并据此提出了轮胎径

向变形  $\delta(\text{cm})$  经验公式：

$$\delta = c_1 \frac{W^{0.85}}{S_0^{0.7} D^{0.43} p^{0.6}} k_0 \quad (4)$$

式中： $c_1$  是轮胎设计相关参数（斜交轮胎  $c_1=1.15$ ，子午线轮胎  $c_1=1.5$ ）； $W$  是轮胎上的载荷； $S$  是充气轮胎断面宽度， $\text{cm}$ ； $D$  是轮胎外径， $\text{cm}$ ； $p$  是轮胎内气压， $k_0 = 15 \times 10^{-3} \times S_0 + 0.42$ <sup>[6]</sup>。

某多管火箭炮底盘采用重型越野汽车，轮胎为高花纹大直径宽断面国内重型军用车通用轮胎，由以上轮胎径向变形经验公式可以得到轮胎受力与轮胎径向变形的关系式：

$$W = \left( \frac{B_0^{0.7} D^{0.43}}{K c_1} \right)^{1.1765} p_i^{0.7059} \cdot \delta^{1.1765} \quad (5)$$

进而可得到轮胎载荷与径向变形模量之间的表达式： $F_y = 97.08 \times p_i^{0.7059} \cdot \delta^{1.1765}$ ，取  $K_y = 97.08 \times p_i^{0.7059}$  为轮胎径向变形模量，则在悬挂闭锁和充气压力  $480\ \text{kPa}$  的情况下，可以得到单位当量计算下轮胎径向变形模量  $K_y = 293.777\ \text{N} / \text{mm}^{1.1765}$ 。

根据文献[6]可知，轮胎内气压是影响轮胎径向刚度和侧向刚度的主要因素，径向刚度  $G_y$ 、侧向刚度  $G_z$ 、切向刚度  $G_x$  与轮胎内气压  $p$  有大致如下的线性关系：

$$\begin{cases} G_y = p(\text{N} / \text{mm}) \\ G_z = 0.5p(\text{N} / \text{mm}) \\ G_x = 0.6p(\text{N} / \text{mm}) \end{cases}$$

由以上关系可知，侧向变形模量  $K_z$ 、切向变形模量  $K_x$  与径向变形模量  $K_y$  有如下关系：

$$\begin{cases} K_z = 0.5K_y \\ K_x = 0.6K_y \end{cases}$$

得单位当量计算下轮胎侧向变形模量为  $146.888\ 5\ \text{N} / \text{mm}^{1.1765}$ ，单位当量计算下轮胎切向变形模量为  $176.266\ 2\ \text{N} / \text{mm}^{1.1765}$ 。

### 2.2.2 轮胎与地面接触的虚拟样机模型

笔者查阅相关发射动力学文献<sup>[3,5]</sup>，可知动力学仿真中的轮胎模型主要有以下几种，现将各模型优缺点总结如下：

1) 刚体/有限元法：将轮胎和地面处理为刚体，在两者之间施加 Bushing 约束来模拟二者之间的柔性效应，或者用有限元方法将轮胎和地面处理为柔性体。前者没有考虑轮胎结构和轮胎材料的复杂性，

处理为刚体会有一定的误差；后者的柔性体可以较好地模拟非线性和各向异性，但是会加大软件的计算量。

2) 弹簧-阻尼模型：模型相对比较简单，可采用分段函数及样条函数来模拟轮胎的非线性刚度和阻尼；但是不能反映出发射过程中轮胎和地面之间的接触碰撞。

3) Fiala 模型：是经典的弹性圆环梁模型，轮毂简化为刚性圆板，胎体由支撑于圆板上的弹簧表示，胎冠简化为圆环梁并由弹簧支撑，轮胎实际上采用的是线性变形，不能反映出发射过程中轮胎的径向刚度值随火箭弹个数的变化和随燃气射流冲击力的变化。

4) UA 模型：在 Fiala 的基础上发展而来，在轮胎侧偏特性中考虑了外倾和纵向力的综合平衡，不能较真实地反映出轮胎与地面之间的相互作用对武器系统动态特性和发射精度的影响。

5) VFORCE+IMPACT：可以反映出 3 个方向上轮胎与地面之间的接触碰撞问题，较真实地反映了轮胎与地面之间周期性的动载作用，但是需要计算及查找的参数较多。

综合考虑发射过程中轮胎的径向刚度值随火箭弹个数变化、随燃气射流冲击力变化、发射过程中轮胎和地面的接触碰撞问题，最终笔者选用在 ADAMS 中定义 VFORCE+IMPACT 的方法来模拟计算轮胎与地面 3 个方向上的接触力。

1) 径向接触力：选用 ADAMS 中的单侧碰撞力函数 IMPACT 来表达，用只压缩的非线性弹簧阻尼方法来近似计算出单边碰撞力，该函数用来生成一个用户自定义的单侧碰撞返回碰撞力，在 ADAMS 中的函数格式<sup>[5]</sup>为

$$\text{IMPACT}(V_d, v_v, T_d, K, e, c, d)。(6)$$

式中： $V_d$ 是实时位移变化量； $v_v$ 是实时速度变化量； $T_d$ 是激发碰撞力的位移测量值； $K$ 是系统刚度； $e$ 是非线性弹簧力指数； $c$ 阻尼系数； $d$ 是当碰撞力被激发阻尼逐渐增大的位移值。这里通过 IMPACT 函数来定义轮胎与地面的径向接触力，在 ADAMS 中的函数表达式为

$$\text{IMPACT}(\text{DY}(\text{MARKER\_lun1}, \text{MARKER\_dl}, \text{MARKER\_dl}), \text{VY}(\text{MARKER\_lun1}, \text{MARKER\_dl}, \text{MARKER\_dl}), 0, K_y, \beta_y, C_{y\max}, \sigma_{y\max})。(7)$$

式中： $\beta_y$ 为非线性指数； $C_{y\max}$ 为阻尼系数最大值； $\sigma_{\max}$ 为轮胎径向变形量最大值<sup>[6]</sup>。

2) 切向和侧向接触力：选用 ADAMS 中的双侧碰撞函数 BISTOP 来表达，与 IMPACT 函数类似，只是 BIOTOP 函数的触发是由 2 个边界条件确定的，该函数用来生成一个用户自定义的双侧碰撞返回碰撞力，在 ADAMS 中的函数格式<sup>[5]</sup>为

$$\text{BISOTOP}(V_d, v_v, T_{Ld}, T_{Hd}, K, e, c, d)。(8)$$

式中  $T_{Ld}$  和  $T_{Hd}$  均为位移变量，其余各个参数与 IMPACT 中的参数相似。这里通过 BISTOP 函数来定义轮胎与地面的切向和侧向接触力。切向接触力的计算表达式为

$$\text{IF}(\text{DY}(\text{MARKER\_lun1}, \text{MARKER\_dl}, \text{MARKER\_dl}), \text{BISTOP}(\text{DX}(\text{MARKER\_lun1}, \text{MARKER\_dl}, \text{MARKER\_dl}), \text{VX}(\text{MARKER\_lun1}, \text{MARKER\_dl}, \text{MARKER\_dl}), 0, 0, K_x, \beta_x, C_{x\max}, \sigma_{x\max}), 0, 0)。(9)$$

侧向接触力表达式类似于切向接触力。

### 2.3 其他约束和载荷的添加

某多管火箭炮，主要由定向管、火箭弹、左右储运发射箱、起落部分、回转部分和车体等部分组成，其系统结构拓扑如图 1 所示。

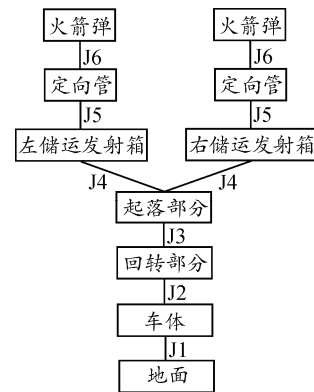


图 1 火箭炮系统结构拓扑

1) J1：车体和地面之间分别按照半刚性支撑与轮胎支撑 2 种方式进行约束。半刚性支撑方式下，千斤顶缸体与汽车底盘之间通过固定副连接，千斤顶顶杆与千斤顶缸体之间以移动副模拟二者之间的相对运动，以弹簧模拟支撑力，弹簧参数参考文献[7]。在液压缸完全封闭条件下和稳态工作时，根据压缩工况与拉伸工况导出，弹簧刚度为 5.0E+04 N/mm，弹簧阻尼为 100 N·s/mm，千斤顶顶杆与地面之间定义接触碰撞；轮胎支撑方式下，车体与地

面通过轮胎连接，轮胎与地面之间定义VFORCE+IMPACT连接。

2) J2: 回转部分与车体之间以转动副模拟回转运动，以扭簧模拟发射时回转部分的制动效果，扭簧参数参考文献[3]，取扭簧刚度为  $9.65\text{E}+09$  N·mm/rad，扭簧阻尼为  $9.17\text{E}+07$  N·mm·s/rad。

3) J3: 起落部分与回转部分之间通过耳轴以转动副连接，通过高低机及左、右两锁杆支撑起落部分。高低机活塞杆与起落架之间和高低机缸体与回转体之间以转动副连接，高低机活塞杆与缸体之间以移动副模拟二者之间的相对运动，以弹簧模拟支撑力，弹簧相关参数根据文献[7-8]导出，弹簧刚度为  $4.5\text{E}+04$  N/mm，弹簧阻尼为  $650$  N·s/mm；锁杆采用柔性化处理，将锁杆导入 ANSYS，在 ANSYS 中选择单元类型、赋予单元材料属性、划分网格、建立外连点和生成 MNF 中性文件，最终导入 ADAMS 中，在锁杆上、下端分别与起落部分和回转部分添加转动副。

4) J4、J5: 储运发射箱与起落架之间以固定副连接，定向管与储运发射箱之间以固定副连接。

5) J6: 未发射时，火箭弹与定向管之间以固定副连接，在火箭弹前定心部、中定心部、后定心部、定向钮与定向管导向槽之间分别添加接触碰撞；当火箭发动机推力超过闭锁力时，通过在 ADAMS 中设置传感器来控制固定副解锁，火箭弹一方面沿定向管作直线运动，另一方面沿螺旋导槽做旋转运动。

6) 闭锁力: 闭锁力的大小范围通常取火箭弹质量的  $1.8\sim 13.1$  倍，文中采用的火箭弹质量为  $67.68$  kg，这里暂取闭锁力为  $7$  kN，在 ADAMS 中利用传感器、固定副和仿真脚本共同模拟。

7) 火箭发动机推力: 某  $122$  mm 火箭弹推力-时间曲线如图 2，在 ADAMS 中通过 AKISPL 配合 if 函数施加，第  $i$  发火箭弹推力函数表达式如下：

$$\begin{aligned} & -\text{IF}(\text{TIME} - (\text{T\_sta} + \text{T\_jge} \times (i-1)): 0, 0, \\ & \text{IF}(\text{TIME} - (\text{T\_sta} + \text{T\_jge} \times (i-1) + \text{T\_last}): \\ & \text{AKISPL}(\text{TIME} - (\text{T\_sta} + \text{T\_jge} \times (i-1)), \\ & 0, \text{tuili}, 0, 0, 0)). \end{aligned}$$

8) 燃气流冲击力: 某  $122$  mm 火箭弹通过数值模拟方法得到的燃气流冲击力曲线如图 3 所示，按区域划分，将其施加于定向管前端中心。

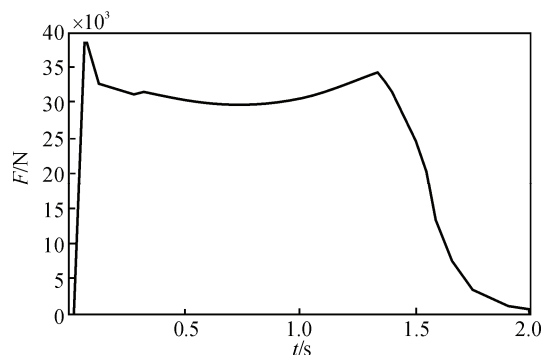


图2 推力-时间曲线

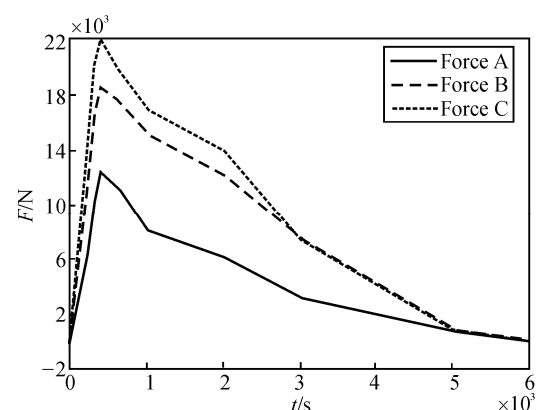


图3 燃气流冲击力曲线

### 3 动力学仿真及结果分析

约束及载荷施加后，取多管火箭炮方向射角  $0^\circ$ ，高低射角  $53^\circ$ ，发射时间间隔  $0.5$  s，分别对半刚性支撑与轮胎支撑的模型进行  $40$  枚火箭弹仿真发射，其中半刚性支撑方式下刚柔耦合动力学仿真模型如图 4 所示。

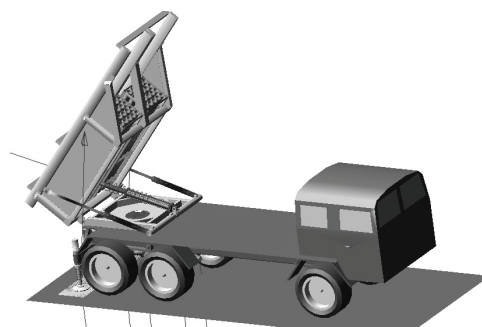


图4 火箭炮动力学仿真模型

图 5~图 6 为火箭弹发射过程中定向管管口在高低方向和回转方向的角速度变化曲线。由 2 种支撑方式下的曲线差异可以看出：轮胎支撑方式下定向管的方向振动角速度和高低角振动角速度均比半刚性支撑方式下的强烈，说明半刚性支撑方式对系统的振幅和减振效果要好。

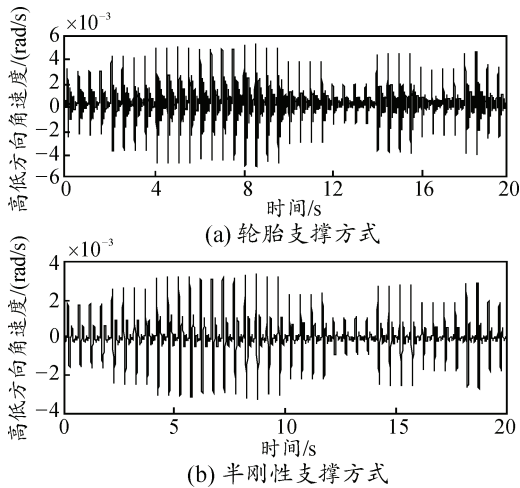


图 5 定向管管口高低方向角速度

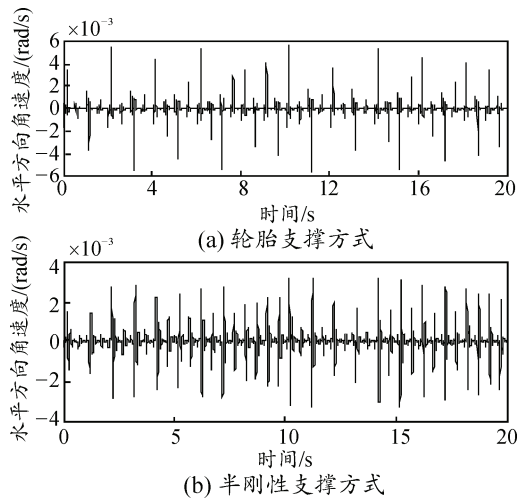


图 6 定向管管口水平方向角速度

为进一步分析 2 种支撑方式对火箭弹起始扰动的影响, 分别提取 2 种支撑方式下半约束期起始、结束时刻在高低和回转方向上定向器管口的振动角速度、角位移、线速度, 火箭弹线速度, 计算出火箭弹的起始扰动参数<sup>[1,9]</sup>, 因篇幅限制现只列出前 10 发弹的起始扰动参数对比, 如表 1 所示。

表 1 不同支撑方式下起始扰动参数

支撑方式	半刚性支撑		轮胎支撑		
	Y	X	Y	X	
初始扰动/ (rad/s)	1	-0.004 5	-0.011 2	-0.004 2	-0.010 7
	2	0.003 7	-0.007 9	0.004 2	-0.006 9
	3	-0.003 1	-0.010 8	-0.002 3	-0.009 2
	4	0.002 0	-0.006 4	0.003 1	-0.004 3
	5	-0.002 9	-0.013 4	-0.001 6	-0.010 8
	6	0.002 8	-0.009 8	0.004 4	-0.006 7
	7	-0.001 1	-0.016 2	0.000 8	-0.012 6
	8	0.002 1	-0.013 1	0.004 2	-0.008 9
	9	-0.001 1	-0.015 8	0.001 3	-0.011 1
	10	0.004 9	-0.015 3	0.007 6	-0.010 1

由 40 发火箭弹的起始扰动参数可以得到 2 种

支撑方式下火箭弹高低方向与水平方向的中间偏差<sup>[1]</sup>, 如表 2 所示。

表 2 不同支撑方式下中间偏差

支撑方式	高低方向	水平方向
半刚性支撑	0.004 401	0.002 072
轮胎支撑	0.004 997	0.005 147

对于多管连发的一组弹, 以中间偏差来体现密集度, 中间偏差越小密集度越好, 越容易击中目标。由以上起始扰动计算结果可知: 半刚性支撑方式下的中间偏差小于轮胎支撑方式, 且半刚性支撑方式下的水平方向中间偏差要明显小于轮胎支撑方式, 这是由于发射系统受到方向扭矩冲击力时土壤侧向和切向刚度大于轮胎侧向和切向刚度造成的。

#### 4 结束语

笔者在以往火箭炮动力学模型的基础上, 对千斤顶与地面连接和轮胎与地面接触的虚拟样机模型分别进行了探索。由对某多管火箭炮的研究过程和动力学仿真结果可知: 文中对千斤顶与地面连接和轮胎与地面接触的虚拟样机模型探索是可行的, 可为其他相似的动力学分析提供借鉴。通过对 2 种支撑方式下某多管火箭炮的发射动力学分析以及起始扰动计算结果的对比表明, 采用半刚性支撑方式要优于轮胎支撑方式。

#### 参考文献:

- [1] 李军. 火箭发射系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 18-22.
- [2] 于存贵, 李志刚. 火箭发射系统分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 185-192.
- [3] 徐振钦. 多管火箭发射系统虚拟样机建模与动力学仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006: 41-49.
- [4] 庄继德. 计算汽车地面力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 19-28.
- [5] MSC. Software Corporation. MSC. ADAMS User's Reference Manual[S]. New York: MSC. Software Corporation, 2010.
- [6] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 109-130.
- [7] 李士军, 朱孙科, 乐贵高. 在全行程位置处液压起竖油缸的结构动力学建模与仿真[J]. 机床与液压, 2010, 38(1): 88-89.
- [8] 程永强. 某型地空导弹发射装置动力学分析与导弹出筒速度的控制仿真[J]. 西安: 西北工业大学, 2005: 18-21.
- [9] 赵岗, 马大为, 方帆. 基于起始扰动仿真的火箭炮动力学因素匹配研究[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(19): 4743-4746.