

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.03.008

某多管火箭炮支撑动力学分析

王松超¹, 王惠方², 于存贵¹

(1. 南京理工大学机械学院, 南京 210094; 2. 中国兵器工业集团 202 所, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 为降低火箭发射系统的静态载荷, 对某多管火箭炮支撑进行动力学分析。以某车载多管火箭炮为例, 以多刚体动力学和柔性动力学理论为基础, 建立刚柔耦合多系统动力学方程。采用 ANSYS 和 Recurdyn 软件, 通过 ANSYS 软件建立柔性化支撑架, 导入 Recurdyn 建立的模型中, 对千斤顶安装的 3 种位置进行发射动力学仿真分析。仿真结果表明: 千斤顶放置在中部效果较好, 该方法较真实地反映了实际情况。

关键词: 箱式火箭炮; 多体动力学; 柔性化; 初始扰动

中图分类号: TJ393 **文献标志码:** A

Dynamic Analysis the Support of Multiple Launch Rocket Systems

Wang Songchao¹, Wang Huifang², Yu Cungui¹(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;
2. No. 202 Institute of China Ordnance Industry Corporation, Xiayang 712099, China)

Abstract: To reduce the static load of the launch rocket systems, dynamic analysis the support of multiple launch rocket systems. According to a canister's multiply launch rocket system on vehicle platform, using rigid multi-body dynamics and flexible body dynamics theories, establishing the coupled rigid and flexible multi-body system. Using ANSYS and Recurdyn software, flexible carriages are established in ANSYS and imported in the model by the Recurdyn. Launch dynamics simulation and analysis of the model under three conditions where the hydraulic carriages were placed. The result of the simulation indicated: setting the hydraulic carriages in middle was more suitable and, which reflected the real condition.

Key words: canister's multiply launch rocket; multi-body dynamics; the flexible; initial disturbance

0 引言

提高射击精度是火箭武器改进的重要指标之一, 降低外载荷就是其中一种手段^[1]。发射轮式载体火箭武器时, 为了降低静态载荷, 提高射击精度, 经常采用千斤顶将车辆的轮子与地面脱离, 消除轮胎与地面之间的接触, 形成载体与地面的硬接触。千斤顶有 3 种放置方案: 1) 千斤顶放置在回转中心平面右侧车辆的尾部; 2) 千斤顶放置在火箭炮发射架回转中心平面平行位置; 3) 千斤顶放置在回转中心平面左侧。对于只采用后轮支撑方式的发射系统, 千斤顶的放置位置对火箭发射系统的静态载荷有重要影响。

由于采用工程类软件 ANSYS 和 Recurdyn 可以对需要进行柔性化处理的多体动力学方程进行显示计算, 其结果能较真实地反应实际系统的动力学特性。因此, 笔者采用 ANSYS 和 Recurdyn 软件, 通过刚柔耦合分析 3 种方案下, 对火箭武器在整个发射过程中的扰动影响。

1 系统建模

1.1 车辆模型

应用 Solidworks 三维软件建立 3 种方案下的模型, 然后采用结构动力学分析软件 Recurdyn 对其进行动力学分析^[2]。

由于发射该型火箭炮时, 车辆的前轮与底盘处于锁紧状态, 并与地面接触, 后轮与地面脱离, 因此将 2 个后轮进行简化去掉, 将重量加载在底盘的横梁两侧。然后将三维模型导入 Recurdyn 中。在 Recurdyn 中对部件进行合并, 合并后得到模型主要包括车体、回转体、上架、发射箱和千斤顶。

1.2 系统中刚体坐标系的建立

1) 车体坐标系(\vec{e}^1): 原点 o_1 为回转体几何中心, $o_1x_1z_1$ 为水平面, 汽车前进的负方向为 x_1 轴正方向, y_1 垂直于 x_1 向上, z_1 通过右手螺旋定则确定。固结在车体上随车运动。

2) 底座坐标系(\vec{e}^2): 原点 o_2 为底座几何中心,

收稿日期: 2011-10-13; 修回日期: 2011-11-11

作者简介: 王松超(1988—), 男, 江苏人, 工学硕士, 从事火箭、导弹发射理论与技术研究。

$o_2x_2z_2$ 为水平面, 汽车前进的负方向为 x_2 轴正方向, y_2 垂直于 x_2 向上, z_2 通过右手螺旋定则确定, 随底座运动。

3) 回转体坐标系 (\vec{e}^3): 原点 o_3 为回转体几何中心, $o_3x_3z_3$ 为水平面, 汽车前进的负方向为 x_3 轴正方向, y_3 垂直于 x_3 向上, z_3 通过右手螺旋定则确定。 (\vec{e}^3) 随回转体转动。

4) 起落架坐标系 (\vec{e}^4): 原点 o_4 为耳轴轴线与过起落架质心且垂直于耳轴的平面的交点, 射角为 50° 的射击方向为 x_4 轴正方向, y_4 垂直于 x_4 向上, z_4 通过右手螺旋定则确定, (\vec{e}^4) 随起落架绕耳轴转动。

2 柔性化处理

2.1 支撑杆柔性化

柔性模块采用模态来表示物体弹性, 它基于物体的弹性变形是相对于连接物体坐标系的弹性小变形, 并在假设经历了大的非线性整体移动和转动的情况下, 建立起物体坐标系。其基本思想是赋予柔性体一个模态集, 采用模态展开法, 用模态向量和模态坐标的线性组合来表示弹性位移, 通过计算每一时刻物体的弹性位移来描述其变形运动。柔性模块中的柔性体是用离散化的若干个单元的有限个结点自由度来表示物体的无限多个自由度。这些单元结点的弹性变形可近似地用少量模态的线性组合来表示。

该火箭炮发射箱与回转体之间采用 2 个可以自锁的支撑杆和 1 个液压高低机, 在实际发射过程中 2 个自锁支撑杆会发生明显变形, 这种变形对整个火箭炮发射装置的振动影响较大, 为能反映真实的动力学情况, 这 2 个支撑杆采用柔性化处理, 如图 1 所示。

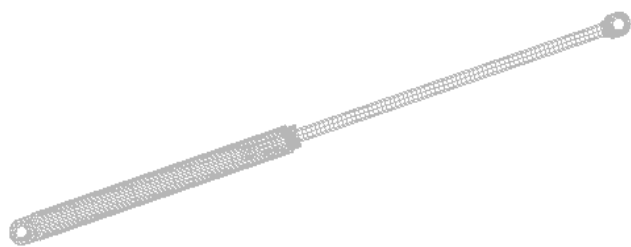


图 1 采用柔性处理的支架

在有限元软件 ANSYS 中赋予支撑杆材料属性, 并划分网格, 导入 Recurdyn 中 RFlex 模块创建 *. rfi

格式文件, 然后再由 Rflex body import 命令导入已打开模型中。

2.2 刚柔耦合多体动力学方程

对刚柔耦合多体系统进行动力学分析, 就必须运用多刚体动力学的基本理论和柔性多体运动学的理论。将柔性体的分析结果与多刚体的研究方法相结合, 最终得到刚柔耦合多体系统的动力学方程。根据拉格朗日乘子法建立第 i 个柔性体或刚体的方程表达式:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}^i} \right)^T + \left(\frac{\partial K}{\partial q^i} \right)^T + C_q^T \lambda = Q^i \quad (1)$$

式中: K 为动能表达式; Q^i 为广义力; λ 为拉式乘子, 对式 (1) 左边进一步推导得:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}^i} \right)^T + \left(\frac{\partial K}{\partial q^i} \right)^T = M^i \ddot{q}^i + M^i \dot{q}^i - \left[\frac{\partial}{\partial q^i} \left(\frac{1}{2} q^T M^i \dot{q}^i \right) \right]^T$$

令

$$Q_v^i = -M^i \dot{q}^i + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial q^i} \left(q^T M^i \dot{q}^i \right) \right]^T$$

$$Q^i = Q_v^i + Q_e^i$$

式中: Q_v^i 为速度二项式, 包含陀螺力合哥式力引起的力学效应, 带入式 (1) 得:

$$M^i \ddot{q}^i + \xi^i \dot{q}^i + C_q^T \lambda = Q_v^i + Q_e^i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

其中 n 为多体系统的构件数, 包含柔体单元个数。式 (2) 加上约束方程 $C(q,t) = 0$, 即是刚柔耦合多体系统的动力学方程。

3 系统添加约束和载荷

1) 在 Recurdyn 中添加各个部件的约束, 轮胎与地面之间添加 Bushing 力; 支撑架采用弹簧 spring 力代替液压力; 支撑底盘之间也采用 Bushing 力与地面接触。

2) 火箭弹与定向管内壁之间约束碰撞接触。

3) 柔性支架与回转机构和上架之间都采用 Revolute 约束; 液压支撑架采用弹簧 spring 力代替液压支撑力, 并与回转机构与上架之间采用 Revolute 约束。

4) 火箭弹在发动机点燃后不会立马发射出去, 因为弹要克服闭锁机构的闭锁力, 闭锁力为在弹与定向器之间添加的 Bushing 力, 该力各个自由度方

向上数值最大。添加火箭推力，以及火箭燃气流对发射装置的影响。其中火箭推力数值为实际测得数值。燃气冲击力作用与弹尾与管口的距离有关。火箭发动机燃气流冲击力数值见表 1。

表 1 火箭发动机燃气流冲击力数值

距离/m	冲击力/N	距离/m	冲击力/N
0.2	6 322	2	6 201
0.4	12 478	3	3 151
0.6	11 323	5	851
1.0	8 271	6	0

由于动力学分析数枚弹发射过程中扰动，因此采用 Recurdyn 中的 IF 语句来实现火箭弹的按序发射。火箭弹所受推力表达式：

$$IF(TIME**AKISPL(TIME**,0,Sp1),0,0);$$

其中插值函数 AKISPL 中的时间从第 1 发射时间开始依次递增值为发射间隔时间，Sp1 为火箭发动机推力曲线。

5) 火箭炮底座与回转体采用 Revolute 和 Rotational spring 约束。扭簧的参数设置如下：扭簧的刚度系数： $K=2.27 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}/(^{\circ})$ ；阻尼系数： $C=4.21 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{mm}/(^{\circ})$ 。发射时要实现高低方向瞄准，发射箱要绕耳轴旋转，由于采用 2 个自锁支撑和 1 个液压高低机，故在耳轴处只有 Revolute 约束。

4 动力学仿真及结果分析

所有约束和载荷添加后分别对 3 种方案下的模型进行动力学仿真分析^[3-4]，火箭炮方向瞄准角为 0° ，高低瞄准角为 50° ，发射间隔为 0.5 s，仿真发射 2 枚弹。3 种情况下发射水平方向和高低方向的相关参数比较，如图 2~图 6。高低和水平方向的角速度、角位移幅值越小，证明对火箭弹的初始扰动越小，射击精度越高。

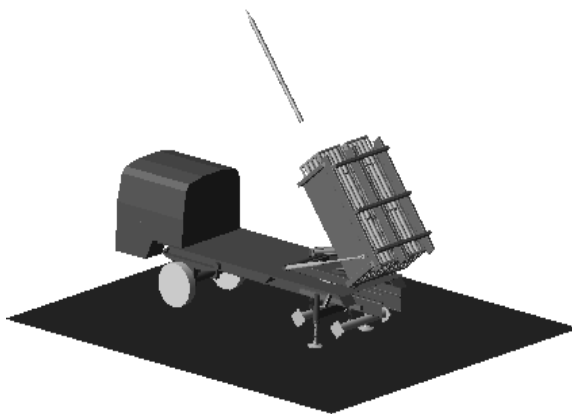


图 2 系统仿真图

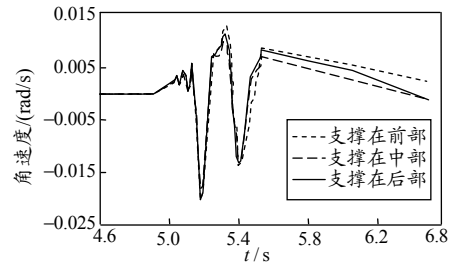


图 3 高低方向角速度

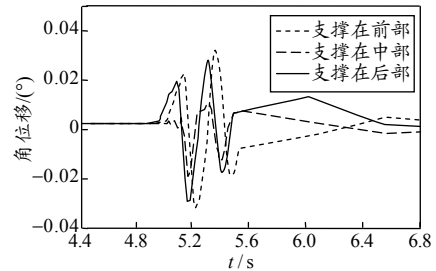


图 4 高低方向角位移

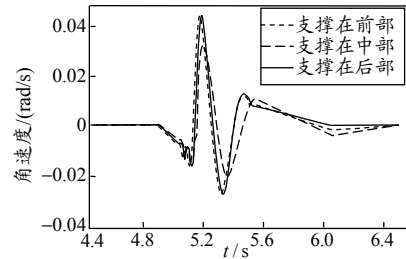


图 5 水平方向角速度

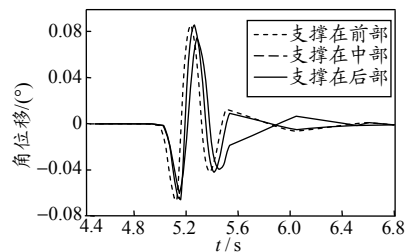


图 6 水平方向角位移

5 结论

仿真结果表明：千斤顶放置在中部效果较好，可为类似设计提供参考。同时，在建立物理模型时，对系统仿真影响较大的部分进行柔性处理，更能真实地反映实际情况。

参考文献：

- [1] 姚昌仁, 张波. 火箭导弹发射装置设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [2] 焦晓娟, 彭斌彬, 等. Recurdyn多体系统优化仿真技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [3] 冯永, 马大为, 等. 多管火箭炮刚柔耦合多体发射动力学仿真研究[J]. 兵工学报, 2006, 27(3): 545-548.
- [4] 王良明. 弹炮多体系统动力学[J]. 力学与实践, 1994, 16(5): 17-20.