

doi: 10.7690/bgzd.2019.09.011

刚柔耦合的火箭炮高低调炮动力学仿真

徐桐¹, 贺剑², 曹立军¹, 丁超¹

(1. 陆军工程大学石家庄校区火炮工程系, 石家庄 050003; 2. 陆军武汉军代局驻五一三七厂军代室, 武汉 430000)

摘要: 为准确描述火箭炮高低调炮中的动力学特性, 对其进行刚柔耦合的动力学仿真分析。以刚柔多体动力学理论为基础, 利用 SolidWorks、ANSYS 和 ADAMS 软件构建火箭炮高低随动装置刚柔耦合动力学模型, 通过对模型进行检验及参数设置, 并结合实际工况进行仿真对比, 确定了起落架应力集中区域。仿真结果表明: 该研究能准确反映火箭炮高低调炮时的动态性能, 可为进行调炮的运动精度及可靠性分析提供数据支持, 为高低随动装置的设计优化提供参考。

关键词: 高低调炮; 随动装置; 刚柔耦合; 动力学仿真

中图分类号: TJ393 **文献标志码:** A

High-low Modulated Dynamic Simulation of Rigid-flexible Coupled Rocket Launcher

Xu Tong¹, He Jian², Cao Lijun¹, Ding Chao¹

(1. Department of Artillery Engineering, Shijiazhuang Campus of PLA University of Army Engineering, Shijiazhuang 050003, China; 2. Military Representative Office in No. 5137 Factory, PLA Representation Bureau of Army in Wuhan, Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to accurately describe the dynamic characteristics of the rocket launcher high-low level adjustment, the dynamics simulation analysis of rigid-flexible coupling is carried out. Based on the theory of rigid-flexible multi-body dynamics, the rigid-flexible coupled dynamics model of rocket launcher was constructed by SolidWorks, ANSYS and ADAMS software. The model is tested and parameterized, and simulated and compared with actual working conditions. The landing gear stress concentration area was determined. The simulation results show that the study can accurately reflect the dynamic performance of the rocket's high-low profile guns, and provide data support for the motion accuracy and reliability analysis of the high and low follow-up, and provide reference for the design optimization of the high-low servo device.

Keywords: high and low follow-up; servo device; rigid-flexible coupling; dynamic simulation

0 引言

高低随动装置是火箭炮火力系统的重要组成部分, 主要用于驱动定向器束进行纵向角度调整。已知在火箭炮高低调炮的过程中, 起落架用于支撑定向器束完成高低调炮动作, 而定向器束与起落架等质量较大, 且定向器束是高低随动系统的负载力矩与不平衡力矩的主要来源; 因此, 在进行火箭炮高低调炮动力学分析时, 需考虑起落架的柔性特性, 建立能真实模拟实际工作状态的刚柔耦合多体动力学模型。

随着多体动力学研究的不断深入, 针对大型复杂设备的刚柔耦合动态特性研究取得了一系列进展。吴金林等^[1]利用 ADAMS 和 ANSYS 仿真软件建立了某型反铲液压挖掘机刚柔耦合动力学模型, 通过仿真得到了关键铰点的受力曲线图, 并对铲斗连杆机构的传动比进行了优化设计; 尚晓敏等^[2]以

某型轻卡为研究对象, 基于虚拟样机技术与有限元技术总结了驾驶室与车架刚度对汽车平顺性产生的影响; 周吉祥等^[3]利用 ADAMS 与 ABAQUS 软件建立了鼓式制动器刚柔耦合动力学模型, 分析得到了制动鼓与制动蹄在紧急制动工况下的应力云图, 确定了危险点位置。以上研究为大型复杂装备的可靠性分析与设计开发提供一定指导, 而笔者研究的某型火箭炮属于较新型的武器装备, 对其进行调炮动态特性的研究还不够深入, 且将其视为传统多刚体模型已不再满足实际需求。

笔者以某火箭炮高低随动装置为研究对象, 利用 SolidWorks 和 ADAMS 软件建立系统多刚体动力学模型, 运用 ANSYS 软件将起落架部分柔性化导入 ADAMS, 建立高低随动装置刚柔耦合动力学模型。通过与刚体模型仿真结果的对比, 明确了高低随动装置调炮动力学特性, 可为装置中部件设计优化提供参考。

收稿日期: 2019-04-13; 修回日期: 2019-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(51575523)

作者简介: 徐桐(1994—), 男, 甘肃人, 学士, 从事武器系统仿真与虚拟样机技术研究。E-mail: 17633261630@163.com。

1 高低随动装置刚柔耦合建模

1.1 多刚体虚拟样机模型的建立

火箭炮高低随动装置结构比较复杂，机械部分主要由回转机、三腔液压缸、起落架及定向器束等组成。根据各部件的实际尺寸及相应的技术参数，用 SolidWorks 进行实体建模，在保证不改变高低随动装置力学特性的前提下，需对部件做适当的简化处理，如忽略较小尺寸的倒角与圆角，部件上的螺纹连接孔、注油孔及对仿真结果无影响的工艺结构等，保留对仿真结果影响较大的尺寸及零件外形。

在 SolidWorks 软件中完成高低随动装置的装配，将其转换为 Parasolid 格式导入 ADAMS，根据实际装备部件间运动关系定义模型约束，各部件之间的约束关系如表 1 所示。如图 1 所示，在三腔液压缸外缸筒与活塞杆间添加的移动副上创建平移驱动，完成高低随动装置多刚体虚拟样机模型的建立。

表 1 高低随动装置各部件间的约束关系

序号	约束组件	约束类型	自由度数	备注
1	回转机、起落架	Revolute	1	转动
2	回转机、外缸筒	Revolute	1	转动
3	活塞杆、起落架	Revolute	3	转动
4	活塞杆、外缸筒	Translational	3	移动
5	起落架、定向器束	Fixed	0	固定
6	回转机、大地	Fixed	0	固定
7	活塞杆、外缸筒	Contact	0	接触
8	起落架、定向器束	Contact	0	接触



图 1 高低随动装置多刚体模型

1.2 起落架有限元模型的建立

1.2.1 柔性体的创建方法

考虑柔性体变形对火箭炮高低调炮动力学的影响，笔者首先将起落架 3 维模型在 SolidWorks 中另存为“Parasolid”文件格式，其次在有限元后处理软件 ANSYS 中选择“Parasolid”文件格式完成模型的导入。通过外部节点设置和模态计算，生成起落架模态中性文件(MNF)，导入动力学软件 ADAMS 中，利用模态叠加法计算其变形响应^[4]。

1.2.2 起落架模态中性文件的建立

在 ANSYS 中对起落架 3 维模型进行有限元分析时，设定单元材料为钢材，牌号 Q460，弹性模量为 206 GPa，泊松比为 0.3，密度为 7.85e-9 t/mm³，

采用四面体单元对其进行网格划分，对于关键点的划分采用 MASS21 质量点单元^[5]。完成网格划分后，需要在起落架与其他部件连接处建立刚性区域，刚性区域定义了柔性体关键点与刚体相关节点之间的力和位移关系，从而实现在 ADAMS 刚柔耦合仿真中的运动关系传递，其传递函数如下：

$$U_i = \sum_{j=1}^n k_j U_{ij}, i = x, y, z; \quad (1)$$

$$F_j = l_j F_i (i = x, y, z; j = 1, 2, \dots, n)。 \quad (2)$$

式中： U_i 为刚性节点总位移， U_{ij} 为 j 节点在 i 方向的位移； k_j 为 j 节点对 U_i 的影响因数(该因数与刚性节点与周围节点的位置有关)， i 为不同的坐标方向， j 为与刚性节点相连接的节点数； F_i 为刚性区域在 i 方向上的受力； l_j 为 j 节点对刚性节点受力的影响因数(该因数与刚性节点和周围节点的位置有关)。

对于起落架刚性区域的建立，要综合考虑起落架的约束关系及受力，刚性区域包括起落架与回转机耳轴的 2 个铰接处、起落架与活塞杆的铰接处。在 ANSYS 中建立的柔性体模型如图 2 所示。

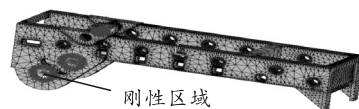


图 2 起落架柔性体及刚性区域模型

在导出模态中性文件时，由于 ANSYS 内部的单位制封闭，需通过自定义转换系数的方法进行单位换算，以保证与 ADANS 进行正确的数据交换^[6]。模态中性文件是独立的二进制文件，包括节点的位置、质量与转动惯量、各阶模态的质量、刚度信息等所有信息，可以在各系统中交换。

1.2.3 起落架的自由模态分析及验证

自由模态分析，即不考虑有限元模型的边界条件，分析起落架在无约束条件下计算出的模态。在进行有限元分析时，利用 ANSYS 分析起落架前 24 阶自由模态，确保生成的起落架模态中性文件保存了零件的网格化模型及模态分析结果等信息，导入 ADAMS 后，利用 ADAMS/Linear 模块计算起落架柔性体固有模态^[7]。由于对零件应力影响较大的为前几阶固有模态，而模态分析结果的前 6 阶模态为刚性模态，对柔性体进行刚性模态求解时会产生奇异解^[8]，故选取起落架模型的 7~12 阶模态，利用 ADAMS 软件计算出的自由模态值如表 2 所示。其中起落架的第 7、8、9 阶模态分别为扭转、横向弯曲、纵向弯曲模态，3 种典型的模态分析结果如图 3

-5 所示。

表 2 起落架柔性体自由模态值 Hz

分析软件	ADAMS
第 7 阶	64.968 1
第 8 阶	74.037 6
第 9 阶	83.550 4
第 10 阶	97.090 2
第 11 阶	140.885 5
第 12 阶	144.603 9



图 3 起落架扭转模态

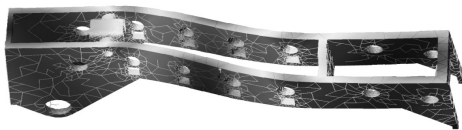


图 4 起落架横向弯曲模态

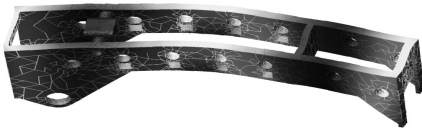


图 5 起落架纵向弯曲模态

导入模型正确后，利用起落架柔性体替换其刚性体。由于起落架模型的外形未发生变化，故可利用质心匹配快速将起落架柔性体定位，删除刚性体之后，与之相关的约束关系也一并删除，需重新添加柔性起落架与其他部件的约束副。为更接近实际工况，在刚体与柔体连接中，把柔性起落架通过哑物体与定向器束及回转机连接，哑物体是在 ADAMS 仿真分析中可以忽略质量及惯性为零的物体，这样处理不仅不改变原刚性条件下各组件的约束副，而且可以在刚性和刚柔耦合 2 种模型间切换实验，便于二者仿真结果的对比分析。最终建立的高低随动装置刚柔耦合模型如图 6 所示。

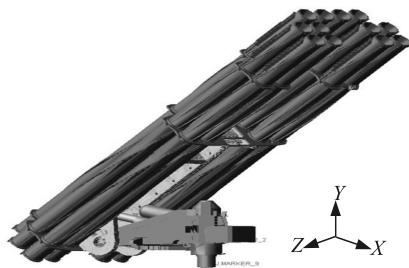


图 6 高低随动装置刚柔耦合模型

2 仿真实验方案

为保证仿真结果的可信度，需对刚柔耦合虚拟样机模型进行必要的检验及参数设置，主要从以下

3 个方面对模型进行初步校验，从而确保虚拟样机模型与实际装备的一致性。

2.1 仿真实验验证

首先验证虚拟样机各零部件的质量、质心及单位是否正确，其次利用 ADAMS 自检工具“Model Verify”检查样机约束及自由度是否与实际装备相一致，证明模型约束及运动关系正确。图 7 为高低随动装置刚柔耦合模型自由度的验证。

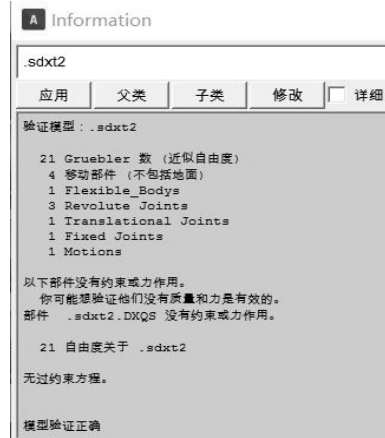


图 7 刚柔耦合模型自由度验证

2.2 实装实验方面

在对火箭炮进行多次自动调炮的基础上，确保装备性能良好的同时达到热机目的，当火箭炮起落部分回到 0 密位 ($360^\circ=6\ 000$ 密位) 时，进行 600 密位自动调炮与收炮的实验与测量。采用拉线位移传感器测量活塞杆位移量，以及信号采集仪测量调炮、停留、收炮所用时间。图 8 为实装测试时的仪器安装与布置。



(a) 拉线位移传感器安装 (b) 信号采集仪安装

图 8 测试仪器的安装与布置

2.3 仿真参数设置

根据实际调炮的时间测量结果，将火箭炮 600 密位高低调炮动作简化为 3 个阶段：0~3 s 为调炮阶段，3~5 s 为调炮停留阶段，5~8 s 为收炮阶段。结合拉线位移传感器的测量结果，设置驱动函数为 $STEP(time,0,0,3,28.4)+STEP(time,5,0,8,-28.4)$ ，仿真时长为 8 s，仿真步长为 0.001。

3 仿真结果分析

为分析刚柔耦合模型对火箭炮高低调炮动作的影响，在建立刚柔耦合模型时保留未柔性化处理的起落架刚性体，通过设定 2 种起落架体的有效和无效，可以分别计算和比较刚柔耦合模型与多刚体模型的仿真结果。

1) 定向器束质心的位移、速度与加速度。

定向器束在 Z 方向的运动学特性明显小于 X、Y 方向，故不予考虑，分析结果如图 9 所示。在开始调炮的 0~3 s，由于起落部分突然受到驱动力作用及重力加速度影响，刚柔耦合模型的定向器束质心的速度与加速度存在较大波动，且加速度波动明显大于其他调炮阶段；在调炮停留的 3~5 s，刚柔耦合模型的定向器束质心 X、Y 向速度较刚体模型存在一定振动；在收炮阶段的 5~8 s，由于开始下降瞬间存在重力加速度作用，刚柔耦合模型的定向器束质心的角速度仍存在一定振动；在整个调炮动作过程中，定向器束质心位移未出现明显波动。与多刚体动力学分析相比可知，刚柔耦合情况下构件的运动特性会更加准确真实。

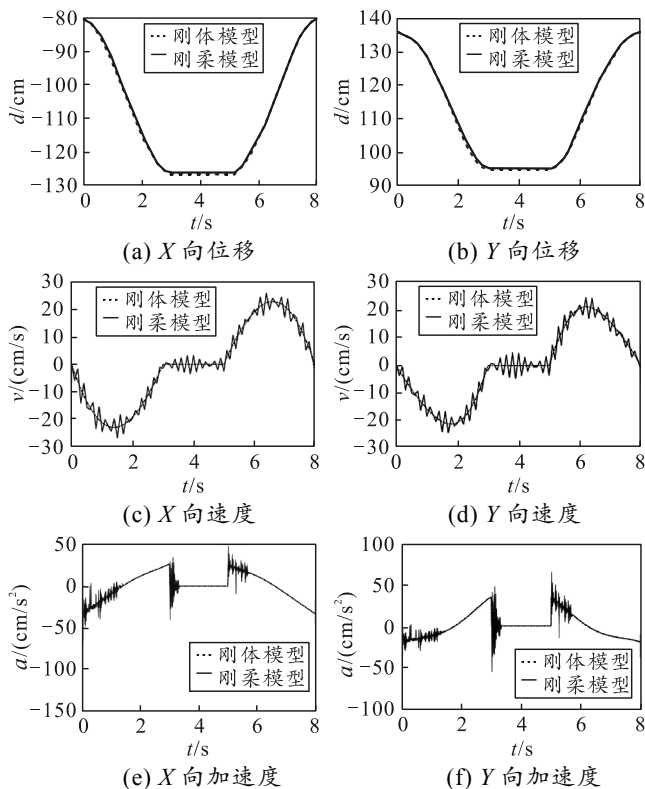


图 9 定向器束质心运动特性

2) 起落架连接轴受力变化。

图 10 为起落架与活塞杆在耳轴连接处的 X、Y 方向受力曲线，可知刚柔耦合模型在连接轴处的 X、

Y 方向受力均大于多刚体模型，且在各调炮动作开始时存在一定振动。开始调炮时，连接轴受力存在较大凸点，最大值为 $1.18 \times 10^6 \text{ N}$ ；在调炮停留阶段，连接轴各方向受力相比调炮到位时较大，这是由于存在重力加速度平衡力矩造成的。可知刚柔耦合模型较多刚体模型与实际情况更为相符。

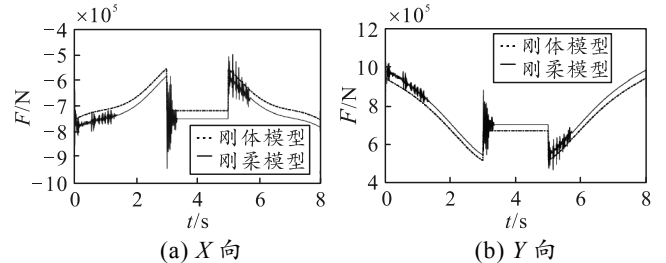


图 10 定向器束与起落架连接轴处 X、Y 方向受力

3) 起落架连接轴应力分布。

在火箭炮实际调炮过程中，关键部件受力随时间变化，且某些时刻甚至会产生冲击力的突变，而以往的静力学分析已不能满足实际需求^[9]。可在 ADAMS/View 中加载 Durability 模块，对起落架柔性体进行动力学状态下的应力应变分析。

进入后处理模块 ADAMS/Postprocessor 后，新建页面并右键点击“Load Animation”，选择刚柔耦合模型，在 Component 一栏右键选择起落架柔性体，点选 Contour Plot Type 下的 Von Mises Stress，显示柔性起落架体应力云图如图 11 所示；单击主菜单 Durability 下的 Hot Spots Table，可得柔性起落架体在调炮动作中 10 个最大应力节点信息如表 3 所示。

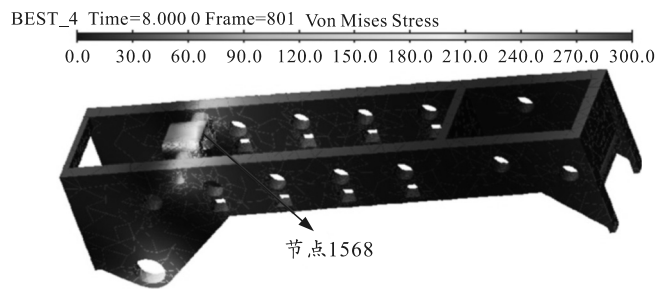


图 11 起落架体应力云图

表 3 起落架受力最大的 10 个节点

编号	压力/MPa	节点 ID	时间/s
1	281.564	1 568	0.019
2	273.875	1 570	0.022
3	251.624	1 563	0.124
4	248.543	1 566	0.095
5	195.788	1 093	0.143
6	188.525	474	0.074
7	185.664	1 090	0.082
8	177.632	602	3.143
9	172.824	468	7.991
10	161.631	616	0.164

由分析结果可知：当起落架受到动态载荷^[10]

作用时，在起落架连接轴处产生了非常明显的应力集中，在节点 1568 上出现最大应力值为 281.564 MPa，出现时间为 0.019 s，这是由于开始调炮时受到起落部分的惯性作用引起的。起落架节点应力较大部分还包括左右耳轴支座，这些部位为起落架结构的薄弱位置，在设计优化中应给予重视。

4 结束语

笔者利用 SolidWorks、ANSYS 和 ADAMS 联合建立了火箭炮高低随动装置刚柔耦合虚拟样机模型，结合模态分析及实际高低调炮工况对模型进行了校核，并进行了刚柔耦合动力学仿真分析，最后将结果与多刚体模型仿真结果进行对比，得出结论：

1) 刚柔耦合仿真条件下定向器束的质心位移保持了原有的运动规律，但对于质心的速度与加速度在调炮、停留与收炮阶段均具有明显的波动，证明起落架体在实际运动过程中存在一定变形，基于刚柔耦合的动力学分析更加接近实际工况。

2) 在整个调炮过程中，刚柔耦合仿真条件下起落架连接轴在 X、Y 方向受力的最大值均大于多刚体仿真条件下的最大值，且最大值出现在开始调炮阶段，通过 ADAMS/View 加载 Durability 模块，确定了高低调炮过程中产生应力集中的区域，为起落

架的设计及强度实验提供一定参考。

参考文献：

[1] 吴金林. 反铲液压挖掘机工作装置刚柔耦合仿真与优化[D]. 西安: 长安大学, 2015: 56-60.

[2] 尚晓敏. 基于刚柔耦合的轻卡平顺性仿真分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012: 51-53.

[3] 周吉祥. 基于刚柔耦合模型的鼓式制动器动力仿真及热性能分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2013: 74-76.

[4] 王冰冰, 林木, 王月婷. 基于刚柔耦合模型的卡扣机构动力学仿真分析[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(1): 103-106.

[5] 王超, 高秀华, 张小江, 等. 多轴车辆转向杆系刚柔耦合分析[J]. 机械设计与制造, 2011(11): 202-204.

[6] 陈立平. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 79-86.

[7] 祁燕燕. 基于刚柔耦合门式起重机静动态设计分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 34-40.

[8] 樊磊, 王亚平, 刘一鸣, 等. 超轻量化高射机枪刚柔耦合建模和仿真[J]. 弹道学报, 2009, 21(1): 67-70.

[9] 金朝, 秦俊奇, 狄长春, 等. 输弹机构件可靠性实验仿真研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2012(4): 22-25.

[10] 李荣丽. 基于刚柔耦合模型采样臂动态仿真研究[J]. 机械工程师, 2015(2): 124-126.

(上接第 34 页)

4 结束语

笔者提出了一种基于多源信息融合的火炮装填状态监测与故障诊断方法，并将其应用到火炮自动装填故障诊断系统中。该方法首先对火炮故障机构定位，应用模糊规则库的描述来确定故障诊断的辨识框架，提出改进型的模糊推理方法生成诊断证据，最后将融合后的证据进行故障决策，解决了故障诊断过程中故障特征的不确定性、故障模式多样性问题，具有重要的军事使用价值。

参考文献：

[1] 张卫峰, 惠俊军. 智能故障诊断技术的现状及展望[J]. 工业仪表与自动化装置, 2017(5): 21-24.

[2] 董炜, 陈卫征, 徐晓滨, 等. 基于模糊区间优化的模糊推理故障诊断方法[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(12): 1905-1912.

[3] 葛春晓. 基于案例推理的变压器故障诊断专家系统的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 8-9.

[4] XU X, ZHOU Z, WEN C. Data fusion algorithm of fault diagnosis considering sensor measurement uncertainty[J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent System, 2013, 6(1): 171-190.

[5] 王嘉轶, 闻新. 航天器故障诊断技术的研究现状与进展[J]. 航空兵器, 2016, 10(5): 71-76.

[6] 高学星. 弹药自动装填子系统动作可靠性与故障诊断[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.

[7] FENG L, HE S. A technical framework of PHM and active maintenance for modern high-speed railway traction power supply systems[J]. International Journal of Rail Transportation, 2017, 53(5): 114-116.

[8] 史健. 基于证据理论的动态融合方法研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.

[9] 吕王朋. 基于特种车的故障预测与健康管理系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.

[10] 王传双. 基于军事物联网技术的某型导弹智能故障预测方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.

[11] 徐晓滨, 张镇, 李世宝, 等. 基于诊断证据静态融合与动态更新的故障诊断方法[J]. 自动化学报, 2016, 42 (1): 107-121.