

doi: 10.7690/bgzdh.2021.07.015

基于 ADAMS 的装甲车行进间射击动态特性分析

宋超, 贾亦卓, 王东军, 刘洪甜, 张建伟
(陆军装甲兵学院兵器与控制系, 北京 100072)

摘要: 为提高装甲车行进间射击时的命中率, 对装甲车行进间射击的动态特性进行分析。通过装甲车行进时射击进行动力学分析, 对其分析系统进行简化, 利用 ADAMS 动力学软件构建装甲车在行进间射击时的动力学模型, 采用虚拟现实技术对装甲车行进间射击进行模拟训练, 并进行准确性验证及行进间射击动态特性分析。结果表明: 该模型具有一定的准确性, 可为装甲车行进间射击的作战参数优化提供参考。

关键词: ADAMS; 装甲车; 行进间射击; 动力学分析

中图分类号: TJ811 **文献标志码:** A

Dynamic Characteristics Analysis for Armored Vehicle's Marching Fire Based on ADAMS

Song Chao, Jia Yizhuo, Wang Dongjun, Liu Hongtian, Zhang Jianwei

(Department of Weapons & Control, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to improving the hit rate of armored vehicle's marching fire, the dynamic characteristics of marching fire of armored vehicle are analyzed. Through the dynamic analysis of marching fire of armored vehicle, the analysis system is simplified, and the dynamic model of marching fire of armored vehicle is constructed by using ADAMS dynamics software. The simulation training of marching fire of armored vehicle is carried out by using virtual reality (VR) technology, and the accuracy is verified and the dynamic characteristics of marching fire are analyzed. The results show that the model is accurate, and it can provide reference for the optimization of operational parameters of armored vehicle marching fire.

Keywords: ADAMS; armored vehicles; marching fire; dynamic analysis

0 引言

装甲车是一个由多组件构成的复杂系统, 在进行行进间射击时, 机械系统会发生复杂的位移、弹性变形和载荷传递的过程^[1]。从物理学的角度分析, 装甲车是一个典型的多体动力学系统。装甲车在行进间的射击特性分析具有复杂性, 为了便于对装甲车行进时射击系统的受力情况进行分析, 需要对其进行简化和理想化。首先, 将装甲车的所有构件看作刚体, 不用考虑构件的弹性变形、构件间发生的非线性影响; 其次, 认为系统各部分之间的约束连接是理想性的, 不考虑射击时弹丸和身管之间的耦合作用, 认为履带式底盘履带板和路面之间的接触是刚性接触; 最后, 对于火控系统在装甲车行进时对身管的稳定作用不予考虑, 利用广义坐标、广义速度和机构尺寸的函数对装甲车的平衡机、驻退机和复进机等部分的载荷进行定义^[2]。

1 装甲车行进间射击的动力学分析

装甲车在行进时射击的动力学分析比静止时射

击更复杂: 不仅需要考虑装甲车火炮部分的动态特性, 而且要考虑其在实战环境中路面因素对装甲车底盘的振动影响; 此外, 为了保证分析的准确性和精确度, 还需要对装甲车的底盘系统进行准确分析。装甲车行进间射击的动态特性分析工作流程如图 1。

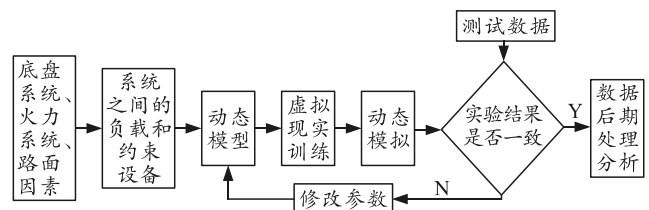


图 1 装甲车行进间射击动态特性分析流程

装甲车在行进时, 车轮是唯一和地面进行直接接触的构件, 装甲车在行进过程中进行射击时所受到的外力都是来自于轮胎和路面间的相互作用; 因此需要对装甲车的轮胎受力对于射击的影响进行分析, 从车辆动力学的角度可以将其归纳到行驶平顺性的研究范围中^[3]。在 ADAMS 软件中 View 环境下的 Tire Force 模块提供了多种用于车辆在不同行

收稿日期: 2021-04-29; 修回日期: 2021-05-20

基金项目: 陆军装甲兵学院自主立项科研项目

作者简介: 宋超(1982—), 男, 山东人, 硕士, 从事武器系统运用工程、兵器科学与技术研究。E-mail: andysong2010@qq.com。

驶状况下的轮胎模型，笔者利用该模块对装甲车的轮胎进行建模分析，将所有的构件都看作是刚性体，子系统之间通过理想约束的方式进行连接。

实际过程中装甲车会受到沿行驶方向的路面不平度而造成的俯仰振动，左右两侧车轮受到不同的地面作用造成的侧倾振动。目前，随着装甲车系统高低射角的增大，还需要对车辆受到的侧倾振动所导致炮口在水平方向的扰动影响进行考虑。两侧车轮所受到的路面激励的相干函数的表达方法如下：

$$r(n) = \begin{cases} e^{-pnd} & n \in (n_1, n_2) \\ 0 & n \in (n_1, n_2) \end{cases}$$

式中： $r(n)$ 为轨道宽度； pnd 为经验值，通常为 1； n_1, n_2 分别为路面空间频率的上下限。

2 ADAMS 软件

ADAMS 软件是利用多刚体系统动力学理论中的第一类拉格朗日方法来建立机械系统动力学方程的一种动力学分析方法^[4]，用刚体质心位置的笛卡尔坐标以及表示刚体方位的欧拉角建立广义坐标。在利用 ADAMS 软件进行动力学方程求解时，主要有微分-代数方程的求解算法和微分方程求解法 2 种^[5]。

在利用 ADAMS 软件进行动力学建模时，一般遵循从简单到复杂的原则，即先将能够进行仿真计算的模型进行计算的概况模型，然后根据实际需求，在概况模型上加入细节，对其进行优化^[6]。利用 ADAMS 软件进行动力学建模的流程如图 2 所示。

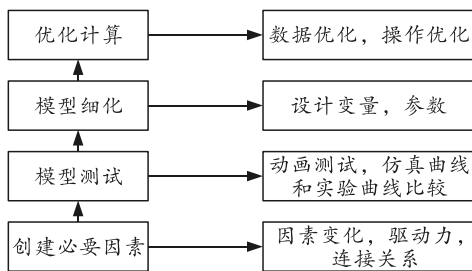


图 2 ADAMS 动力学建模流程

3 装甲车行进间射击动力学分析模型构建

装甲车进行射击时，发射荷载 p_{pt} 计算方法为：

$$p_{pt} = \begin{cases} 1/\psi_p(1+\omega/(2q))Sp & t < t_g \\ \chi P_g e^{-(t-t_g)/b} & t_g \leq t \leq t_k \\ 0 & t > t_k \end{cases}$$

其中： ψ_p 为次要功系数； ω 为火药的装药量； q 为弹丸质量； χ 为冲量特征量； P_g 为射击时弹丸出炮口瞬间时的炮膛合力； b 为火药气体的时间常数；

t_g 为弹丸离开炮口的瞬时时刻； t_k 为弹丸离开炮口的后效期结束时刻； S 为身管的横截面面积； p 为火药气体的平均压力^[7]。

对装甲车在行进间射击时的驱动力载荷进行计算，需要先计算出传递到车轮的驱动力矩 T_i ，计算方法如下：

$$T_i = T_{iq} i_0 \eta_T$$

其中： T_{iq} 为发动机的有效转矩； i_0 为主减速比； η_T 为装甲车底盘的传动系数效率^[8]。

在将地面和轮胎都看作是刚性体的状况下，计算出每个车轮驱动力 F_i 的方法为：

$$F_i = T_i / r = T_{iq} i_0 \eta_T / r$$

其中 r 为车轮的滚动半径。

本文中利用驱动力拟合方式进行计算分析，因此需要将其换算成作用在车体质心的封校牵引力 F_{is} 。换算方法如下：

$$F_{is} = F_{i0} - a_s u_a$$

其中： F_{i0} 为车的初始牵引力； a_s 为拟合系数， u_a 为车速。

4 模型准确性验证

对笔者建立的装甲车行进间射击动力学模型分析前，需要先验证该模型的准确性，以保证分析结果的准确度。利用装甲车行进间射击时的弹丸出炮口瞬间的测点垂向位移的模型计算结果和真实的测试值进行误差分析，分析结果如图 3 所示。

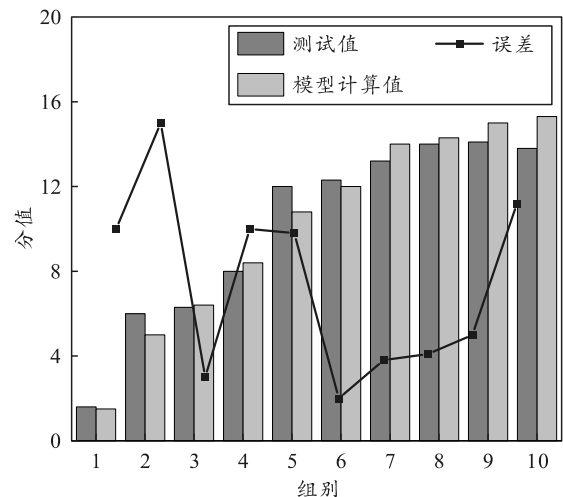


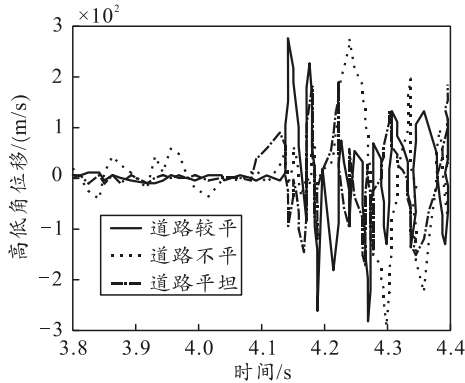
图 3 装甲车行进间射击动力学分析模型误差分析

从上图可以看出：笔者提出装甲车行进间射击的动力学分析模型与真实测试值的误差范围在 15% 以内，说明该方法具有一定的准确性，可以用来进行装甲车行进间射击动态性的分析。

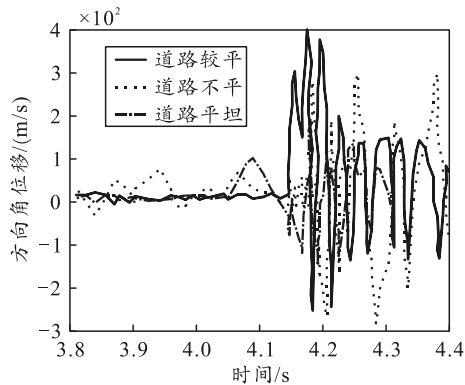
5 装甲车行进间射击动态特性分析

5.1 路面平度级不同时影响分析

通过对装甲车在不同路面行驶状态下的射击情况进行分析，主要通过对在不同行驶状况下的射击炮口的高低角位移和方向角位移进行分析^[9]，结果如图 4 所示。



(a) 不同行驶状况下射击炮口的高低角位移分析结果



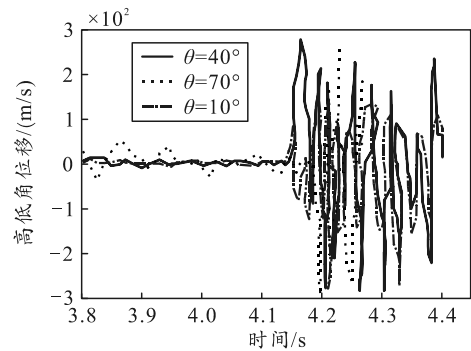
(b) 不同行驶状况下射击炮口方向角位移分析结果

图 4 不同行驶状况下射击炮口的高低角位移和方向角位移分析结果

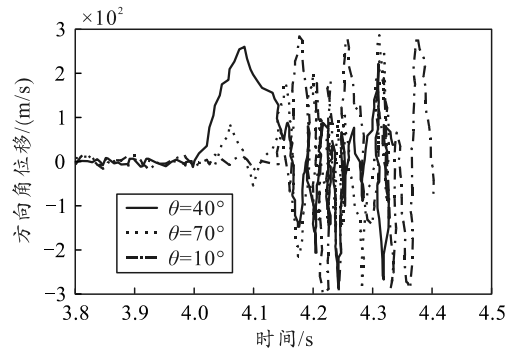
由图 4(a)可知：在较平坦的 2 种路面上行驶时，两者的炮口高低角位移的变化趋势具有一致性，而在平坦度较差的路面上行驶时，炮口高低角位移的变化幅度值较大，平整度较差导致装甲车底盘系统受到的冲击作用比较大，因此引起了比较剧烈的反应。由图 4(b)可知：射击载荷是导致炮口方向角位移的主要因素，在路面平坦度较差的路面上行驶时，方向角位移的变化幅度相对较小，这是由于此时路面不平度的影响已经超过了设计的载荷。

5.2 炮目高低角不同时影响分析

为了对不同空层的飞行目标进行射击，装甲车的炮目高低角变化范围也比较大^[10]。对不同炮目高低角的射击动态性进行分析，得出炮目高低角对射击炮口的影响。分析结果如图 5 所示。



(a) 不同炮目高低角下高低角位移分析结果



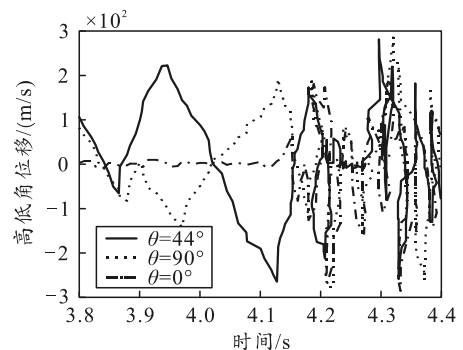
(b) 不同炮目高低角下方向角位移分析结果

图 5 不同炮目高低角下高低角位移和方向角位移分析结果

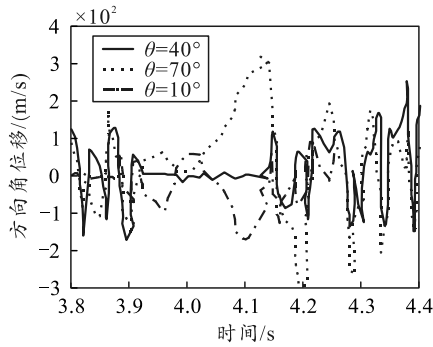
从上图可知：随着装甲车炮目高低角的增大，炮口高低角位移也随之增大，炮口扰动幅度也同时增大；在小射角范围下，身管自身的重力矩和炮口制退器惯性力矩对炮口振动有一定的抑制，当高低射角增大时，抑制作用随之减弱，导致炮口的扰动幅度变大；随着装甲车高低射角的增大，炮口方向角位移也随之增大，炮口扰动幅度也同时增大。这是因为在小射角范围内，炮口的方向角位移主要受到车体的偏航影响，因此炮口的扰动幅度不大，但由于高低射角的范围增大，车体侧倾则变为主要的方向角位移的影响因素，导致炮口扰动幅度变大。

5.3 方向射角不同时影响分析

对不同方向射角的射击动态性进行分析，得出方向射角对射击炮口的影响分析结果如图 6 所示。



(a) 不同方向射角下高低角位移分析结果



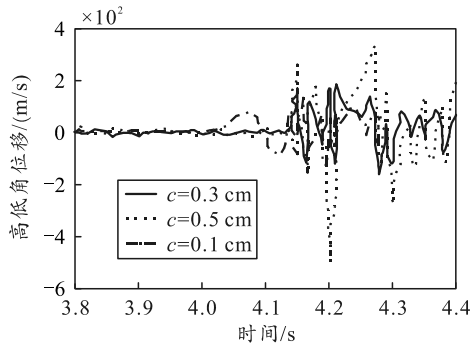
(b) 不同方向射角下方向角位移分析结果

图 6 不同方向射角下高低角位移和方向角位移分析结果

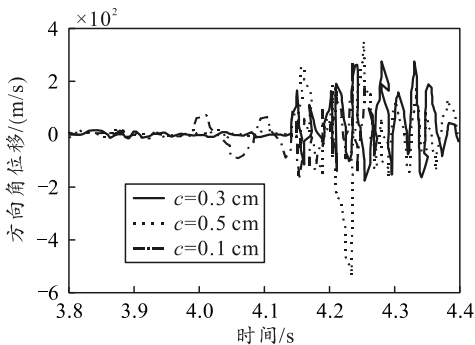
从上图可知：随着装甲车方向射角的增大，炮口高低角位移急剧增大；方向射角在从小变大的过程中，射击载荷的扰动作用从俯仰力矩变为侧倾力矩，车体在侧倾方向上的转动惯量比俯仰方向小得多，所以在相同载荷作用下，射击方向的偏移使得炮口高低角位移增大；随着装甲车方向射角的增大，车体的振动对炮口方向角位移影响也逐渐变大，这是因为方向射角的增大使得影响炮口方向角位移的主要因素从车体侧倾振动变成了俯仰振动。

5.4 耳轴间隙不同的影响分析

对不同耳轴间隙时的装甲车行进间射击动态性进行分析，得出耳轴间隙对射击炮口的扰动影响^[11]。分析结果如图 7 所示。



(a) 不同耳轴间隙下高低角位移分析结果



(b) 不同耳轴间隙下方向角位移分析结果

图 7 不同耳轴间隙下高低角位移和方向角位移分析结果

从上图可知：随着装甲车耳轴间隙的增大，其炮口高低角和方向角的位移都随之增大。在未进行射击时，几种间隙状况下的高低角位移范围基本保持一致；在射击开始后，随着耳轴间隙的增大，装甲车行进间射击的炮口方向角的位移也随之增大。这是因为在射击时，在耳轴间隙更大的条件下，耳轴在径向上存在更大的运动空间，两侧耳轴发生相对错动，导致炮口的高低角、方向角位移都随之增大；因此，在进行装甲车的结构设计时，小参数的耳轴间隙更利于装甲车保持行进间射击的稳定性。

6 结论

以上分析结果表明：动力学分析模型的误差范围在 15%以内，具有一定的准确性；在比较平坦的路面上行驶时，两者的炮口高低角位移的变化趋势具有一致性，而在平度等级较差的路面上行驶时，炮口高低角位移的变化幅度值较大；随着高低射角的增大，炮口高低角位移、方向角位移也随之增大，炮口扰动幅度也同时增大；方向射角的增大导致炮口高低角位移、方向角位移也逐渐变大；随着装甲车耳轴间隙的增大，其炮口高低角和方向角的位移都随之增大。

由于时间和空间的限制，笔者在进行装甲车行进间射击的动态特性分析过程中，只考虑了在理想状态下装甲车行进间射击的动态特性，但是在实战中情况要复杂得多；因此，希望在后续的研究分析中，可以依据实际状态下的作战环境进行分析，使其更具全面性和真实可靠性。

参考文献：

- [1] 刘全胜, 王帅帅, 高玉水, 等. 车载炮射导弹行进间射击精度[J]. 四川兵工学报, 2011(11): 14-16.
- [2] 宋泉良, 卢志刚, 王维, 等. 装甲车辆行进间炮口振动角度误差预测模型[J]. 火力与指挥控制, 2019(4): 121-125.
- [3] RUBINSTEIN D, HITRON R. A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicles[J]. Journal of terramechanics, 2004, 41(2-3): 163-173.
- [4] KUSHAIRI S, SCHMIDT R, OMAR A R, et al. Tractor-trailer modelling and validation[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2014, 21(1): 64.
- [5] CHEN L P, LIU S J, LI X F, et al. Comparative Study on the Arrangements of the Support Rolls of an Amphibious Armored Vehicle[C]. International Conference on Digital Manufacturing & Automation. IEEE, 2011.

- [6] 谢磊, 杜忠华, 王腾, 等. 独立转向与驱动无人装甲车操稳性分析[J]. 火力与指挥控制, 2019(2): 21-25.
- [7] RAU A V, KHISBULLAH H, ABD K Z, et al. Modeling, Validation, and Control of Electronically Actuated Pitman Arm Steering for Armored Vehicle[J]. International Journal of Vehicular Technology, 2016(6): 1-12.
- [8] 孙全兆, 杨国来, 易群智, 等. 密闭爆发器式火炮模拟后坐系统动力学研究[J]. 南京理工大学学报, 2013(5): 687-691.
- [9] 查启程, 芮筱亭, 于海龙, 等. 影响自行火炮发射因素的落点灵敏度研究[J]. 振动工程学报, 2017(6): 938-946.
- [10] 高潮, 杨晖, 苏艳, 等. 装甲车内部振动信号采集与分析[J]. 传感器与微系统, 2009(10): 895-912.
- [11] 沈均平, 刘建永, 胡登高, 等. 两栖装甲车辆对抗红外/毫米波复合制导方法研究[J]. 激光与红外, 2007(4): 366-369.

(上接第 48 页)

1.8 蓄电池

地理环境对蓄电池的影响主要集中在低气压和低温上。低压、低温将增大蓄电池的电解液黏度, 导致电阻率上升, 最终影响蓄电池的工作能力。

2 结束语

笔者采用文献萃取的方法, 综述了不同的地理环境要素对机电设备通用零部件的影响各异。总体来看, 高原环境是影响机电设备最主要的环境因素; 其次, 重要的地理要素主要有高海拔、低气压、低大气密度、低含氧量、极低温、高空气含沙量及复杂地形等。这些因素会影响到机电装备的发动机、雷达、挥发性润滑剂、蓄电池、机械系统等性能。沙漠环境也是影响机电设备的另一主要要素, 相关气候地理要素有极高温、沙尘和强太阳辐射等。

分析地理环境对机电设备的影响可提升地理环境对机电设备影响的认知, 同时对精准设计装备适应性的控制实验有较为重要意义。

参考文献:

- [1] 祝华远, 李军亮, 孙鲁青. 武器装备通用质量特性管理综述[J]. 兵工自动化, 2021, 40(2): 13-17.
- [2] 周家胜, 王慧, 周涛, 等. 炮弹在海洋环境下适应性分析及对策[J]. 兵工自动化, 2017, 36(3): 81-83.
- [3] 王立峰, 王慧, 蒋洪章, 等. 航空炮弹舰载环境适应性测试与设计[J]. 兵工自动化, 2019, 38(8): 46-18.
- [4] 杨玉萍, 字正华, 刘剑, 等. 微光像增强器在热带雨林中的环境适应性分析[J]. 兵工自动化, 2014, 33(11): 8-11.
- [5] 赵世宜, 胡立成, 吴娟等. 低气压环境对军用电工电子产品的影响[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 100-102.
- [6] 刘威, 薛雪东, 王品. 高原高寒战场环境下某型导弹武器系统保障研究[J]. 科技风, 2018(8): 191, 193.
- [7] 高强, 庞志兵, 魏赫. 高原高寒环境对武器装备的影响研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 118-122.
- [8] 张仁群, 王斌, 岳涛, 等. 浅析国军标 GJB150 与美军标 MIL-STD-810F 盐雾试验[J]. 环境技术, 2008(5): 42-45, 26.
- [9] 刘威, 郑源, 成坎. 沙漠戈壁战场环境下某型导弹武器系统保障研究[J]. 科技风, 2018(7): 189-190.
- [10] 俞一鸣, 赵广彤. 高原环境对防空武器装备的影响及改进措施[J]. 现代防御技术, 2011, 39(2): 172-175.
- [11] 王威, 张多林. 温度因素对地空导弹武器装备的影响及相关防护研究[J]. 装备环境工程, 2006(6): 41-44.
- [12] 林琳, 张熙川, 叶涛. MIL-STD-810F 低温试验方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2010, 28(2): 5-8.
- [13] 李超. 地理环境及气候对京唐电力设备的影响及应对[J]. 冶金动力, 2015(6): 14-17.
- [14] 孙立华, 何飞. 美军气候试验室研究解决高技术武器战场“中暑”问题[J]. 国防科技, 2007(11): 86-89.