Research on Influence Law of Missile Launching Dynamics Based on Motion Characteristics of Ship Platform

Maohua QU¹, Chengqian SU¹, Xueming PENG¹, Yuanji HAN², Chang QI²

¹Beijing Mechanic Equipment Institute, Beijing, China ² School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China Email:hanyuanji_dut@163.com

Abstract: Ship-based missiles are the main combat weapon for ships, and are the most important means for ships to attack and defend against enemy targets. In order to meet the requirements of the guidance system, the missile outlet parameters must be controlled within a certain range during the launching process. The outlet parameters of ship-based missiles depend not only on the motion state of the missile itself, but also on the characteristics of the ship's motion. This paper simulated and analyzed the vertical launch process of ship-based missile under high sea conditions and studied the influence of ship's rocking motion characteristics on missile launching parameters. This paper provides reference value for the research of shipborne missile vertical launch technology.

Keywords: ship-based missile; vertical launching technology; launch dynamic

基于舰船平台运动特性的导弹发射动力学影响规律研究

²大连理工大学,大连,中国,116024 Email: hanyuanji_dut@163.com

摘 要:舰载导弹是水面舰艇的主要作战武器,是舰艇能够对敌对目标实施攻击和防御的最主要手段。 导弹发射过程中,导弹出筒参数必须控制在一定的范围内,以满足制导系统要求。而舰载导弹的出筒 参数,不仅取决于导弹本身的运动状态,还和舰船运动特征有关。本文研究的是在高海情工况下,仿 真分析舰载导弹垂直发射过程,研究舰船摇摆运动特征对导弹发射出筒参数的影响规律,为舰载导弹 垂直发射技术研究提供参考价值。

关键词:舰载导弹;垂直发射;发射动力学

1 引言

舰载导弹是海战的主要武器是装备,是舰艇能够对敌对目标实施攻击和防御的最主要手段^[1]。舰载导弹武器 系统的发射运动学参数指标是衡量其作战水平的重要技术指标,尤其在高海情工况下,导弹是相对于舰船这样 一个运动的平台发射,受海浪影响,舰船的摇摆运动对导弹出筒时刻的运动学参数(包括导弹的出筒时间、出 筒速度、出筒角度和角速度,以下简称"出筒参数")具有较大影响^[2,3],因此有必要研究舰船运动特征对导弹出 筒参数的影响规律。

本文以舰船在六级海况下摇摆运动参数作为边界条件,采用动力学仿真软件 LS-dyna 对舰载导弹垂直发射 过程^[4, 5]进行仿真,对比多种工况的仿真结果,总结舰船运动特征对导弹出筒参数的影响规律。由于工况较多, 本文编写命令流文件进行批处理,搭建基于 MATLAB 调用 LS-dyna 在 DOS 环境下自动仿真流程。

项目资助信息:国防基础科研计划资助(JCKY2016204C007)

2 运动学模型

2.1 舰船运动模块

根据随机过程理论,海浪的运动是平稳的,是具备各态历经的随机过程,不同海况对应不同的功率谱密度 函数,舰船的运动可以看作一个线性系统在已知海况功率谱输入下的随机响应问题^[6,7]。在工程问题中,为 便于分析,通常近似采用简谐波的形式来表征舰船在不同海况下的运动情况^[8]。在海浪作用下,舰船摇摆运动表 述为绕摇摆中心的摇摆运动(如图1所示),各自由度的运动模型简化为简谐运动^[9],如公式(1)所示。



Figure 1. Ship motion coordinate system

图 1. 舰船摇摆运动坐标系^[10]

$$\begin{cases} X = X_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_X}t + t_X\right) \\ Y = Y_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_Y}t + t_Y\right) \\ Z = Z_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_Z}t + t_Z\right) \\ \theta_X = \theta_{X0} \sin\left(\frac{2\pi}{T_{\theta X}}t + t_{\theta X}\right) \\ \theta_Y = \theta_{Y0} \sin\left(\frac{2\pi}{T_{\theta Y}}t + t_{\theta Y}\right) \\ \theta_Z = \theta_{Z0} \sin\left(\frac{2\pi}{T_{\theta Z}}t + t_{\theta Z}\right) \end{cases}$$
(1)

式中,X、Y、Z分别代表纵荡、横荡、垂荡, θ_X 、 θ_Y 、 θ_Z 分别代表横摇、纵摇、艏摇^[11]。纵荡、横荡、艏 摇等对于舰载设备而言均是水平方向运动,在仿真模型中虽有周期值,但实际情况中不是典型的往复周期运动; 因而,在研究高海情舰船运动对舰载设备性能影响时,通常只关注横摇、纵摇、垂荡三个自由度^[12]。在六级海 况下,本文舰船运动模型为横摇幅值 18°,周期8s,纵摇幅值 4°,周期5s,垂荡幅值3m,周6s。计算得到120 秒内舰船摇摆运动曲线如图2和图3所示。

需要注意的是,在实际摇摆运动中,各个自由度的相位不同,可能出现任意组合情况,因此在分析计算时 应当考虑各种极值的组合情况,即各自由度位移幅值或速度幅值可能同时出现峰值的情况。



2.2 发射模块

式中:

舰船摇摆运动视为刚体运动,这种运动可以近似地表述为以舰船摇摆中心 O 为基点的平移运动与绕舰船摇摆中心 O 的旋转运动的合成运动,则发射模块底部中心点 A 作为舰船上的一固定点,必定随舰船做同样的空间运动,二者转动角度相同,平动位移不同^[13]。所以发射模块底部中心点 A 随舰船运动的位移响应可表示为:

$$\boldsymbol{r}_{\boldsymbol{o}\boldsymbol{A}} = \boldsymbol{T}_{\boldsymbol{m}} * \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{o}\boldsymbol{A}} + \boldsymbol{Z}$$
(2)
$$[\boldsymbol{d}_{\boldsymbol{X}}, \boldsymbol{d}_{\boldsymbol{Y}}, \boldsymbol{d}_{\boldsymbol{Z}}]^{T} = \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{o}\boldsymbol{A}} - \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{o}\boldsymbol{A}}$$
(3)
$$\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{m}} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{\boldsymbol{X}} & \sin\theta_{\boldsymbol{X}} & 0\\ -\cos\theta_{\boldsymbol{Y}}\sin\theta_{\boldsymbol{X}} & \cos\theta_{\boldsymbol{Y}}\sin\theta_{\boldsymbol{X}} & \sin\theta_{\boldsymbol{Y}} \\ \sin\theta_{\boldsymbol{Y}}\sin\theta_{\boldsymbol{X}} & -\sin\theta_{\boldsymbol{Y}}\cos\theta_{\boldsymbol{X}} & \cos\theta_{\boldsymbol{Y}} \end{bmatrix}$$
(4)
$$\boldsymbol{Z} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \boldsymbol{Z} \end{bmatrix}^{T}$$
(5)

其中, *T*_m为旋转变换矩阵(考虑横摇和纵摇引起坐标变换), *Z*为平移变换向量(考虑垂荡引起坐标变换), *roA*为发射模块底部中心点 A 相对于舰船摇摆中心点 O 的坐标向量, *d*_X, *d*_Y, *d*_Z分别表示发射模块底部中心点 A 在 X、Y、Z 方向的位移响应。本文中,发射模块底部中心点 A 相对于舰船摇摆中心的坐标向量 *roA* 取 [50.00m,5.00m,-1.80m]^T,计算得 120s 内发射模块底部中心点 A 位移响应曲线如图 4 所示。



Figure 4. Displacement response curve of the center point A at the bottom of the launch module 图 4. 发射模块底部中心点 A 位移响应

将图 2 和图 4 中的运动曲线进行微分,得到六级海况下发射模块的摇摆运动特征,如图 5 所示,共计五个自由度运动:绕 X、Y 轴转动;沿 X、Y、Z 方向的平动。



Figure 5. Motion curve (displacement, velocity, acceleration) at the center point A at the bottom of the launching module

图 5. 发射模块底部中心点 A 摇摆运动曲线(位移、速度、加速度)

从图 5 中各曲线中取其最大值(数值已取整),得到发射模块摇摆运动参数范围,如表 1 所示。以此作为简 弹发射模型的边界条件,分析舰船摇摆运动对导弹出筒参数的影响规律。

Table 1. The range of the main kinematic parameters of the launching module's motion

表 1. 发射模块摇摆运动主要运动学参数取值范围

横摇 θ_X	纵摇 θ_Y	垂荡 <i>D</i> z m	速度 V _X m/s	速度 Vy m/s	速度 Vz m/s	加速度 Az m/s ²
-18°~+18°	-4°~+4°	-8~+8	-1~+1	-1~+1	-8~+8	-8~+8

2.3 筒弹发射模型仿真

通过对舰载导弹发射系统进行运动学分析,将筒壁、导轨、支脚和导弹组合为筒弹仿真模型^[14]。本文主要 讨论舰船摇摆运动特征对导弹发射出筒参数影响,为缩减计算时间,本文将仿真材料模型均赋为刚体,不进行 柔性化处理,基于有限元前处理软件 Hypermesh 建立有限元仿真模型如图 6 所示,取舰船摇摆瞬时运动状态作 为导弹发射动力学仿真的初始条件,输出 k 文件到 LS-dyna 进行仿真计算。



gure 6. Missile launching mode 图 6. 筒弹发射模型

3 分析讨论

3.1 计算工况统计

本文分析舰船摇摆运动特性对导弹出筒参数的影响规律,仿真工况为以下两部分,共设置4种工况。在各 类工况中,将各自由度运动离散为若干个工况点,然后两两组合,每种组合进行一次动力学发射仿真,工况数 量如表2所示:

(a)分析摆动角度和角速度对出筒参数的变化规律;为便于分析研究,仅考虑横摇角度和角速度变化(单自由度转动,表中 case 1.1),角度和角速度按正弦规律变化。

(b)取 case_1.1 工况为基线工况,分别分析水平方向平动(2个方向)、垂直方向平动与横摇转动组合的情况,判断各个方向平动速度和加速度对出筒参数的影响。

Table 1. Calculation case

表 2. 计算工况统计								
序号	工况代号	工况说明	数量					
1	Case_1	分析单自由度转动变化						
1.1	Case_1.1	摇摆工况θ(-18°~+18°~-18°),ω由θ求导得出;dθ=1°	73					
2	Case_2	分析平移运动变化						
2.1	Case_2.1	摇摆工况θ(-18°~+18°~-18°);Vy(-1~+1m/s)dv=0.1m/s	803					
2.3	Case_2.2	摇摆工况θ(-18°~+18°~-18°);Vx(-1~+1m/s)dv=0.1m/s	803					
2.3	Case_2.3	摇摆工况θ(-18°~+18°~-18°);Vz(-8~+8m/s)dv=1m/s	1241					

由于工况较多,本文编写命令流文件进行批处理,搭建基于 MATLAB 调用 LS-dyna 在 DOS 环境下自动仿 真流程^[15]。

3..2 横摇运动影响分析

按照表 2 中 Case1.1 设置工况进行仿真计算,摆动角度取值为一个摆动周期(从-18°摆动到 18°,然后再摆动到-18°),摆动角度间隔为 1°,摆动角度按正弦规律变化,摆动角速度取值由摆动角度微分得到,共进行 73 次仿真计算。在一个摆动周期中,导弹的出筒参数变化趋势如图 7 所示(图中顺序分别为出筒时间、出筒速度、俯仰角、俯仰角速度、偏航角、偏航角速度、滚转角、滚转角速度)。



Figure 7. Influence of yaw angle on the outlet parameters

图 7. 横摆角度对出筒参数影响

3..3 平移运动影响分析

取 case_1.1 工况为基线工况,进一步分析三个平动自由度对发射出筒参数的影响。在 case_1.1 工况基础上,

分别叠加 X、Y、Z 三个平动自由度的运动参数,工况设置如表中 case_2.1、case_2.2、case_2.3, X、Y、Z 方向 速度间隔分别取 0.1m/s、0.1m/s和 1m/s,分别进行 73×11=803、73×11=803、73×17=1241次仿真计算。 (1) Y 方向速度变化对出筒参数的影响



Figure 8. Outlet parameters of the rocking condition (considering the speed change in the Y direction)

图 8. 摇摆工况出筒参数(考虑 Y 方向速度变化)

由图可知,在摇摆过程中,Y 方向速度变化对出筒参数的影响较小,相对于横摆角度的影响,Y 方向速度 变化影响可以忽略不计。

(2) X 方向速度变化对出筒参数的影响





由图可知,在摇摆过程中,X方向速度变化对出筒参数的影响较小,相对于横摆角度的影响,X方向速度变化影响可以忽略不计。

(3) Z方向速度变化对出筒参数的影响





图 10. 摇摆工况出筒参数(考虑 Z 方向速度变化)

由图可知,Z方向速度变化对出筒时间、出筒角度、出筒角速度的影响较小,相对于横摆角度和角速度的影响,Z方向速度变化影响可以忽略不计;Z方向速度变化对出筒速度的影响很大,原因在于发射方向与 Z方向基本一致,Z方向速度影响发射初始的整体速度,从而影响出筒速度。

4 总结与结论

本文对舰载导弹垂直发射过程做了详细的分析,分析了在六级海况下,舰船摇摆运动及发射模块运动规律, 通过多种工况的仿真分析,获得了舰船摇摆运动个自由度对导弹出筒参数的影响变化规律,具有较大的理论意 识和实际指导意义。

横摇运动对发射导弹出筒参数具有显著影响,为了避免导弹的初始扰动,导弹发射应选舰船位于平衡位置

进行发射; 垂荡对出筒速度的影响比较明显, 但是出筒速度的变化范围与垂荡运动幅值相当, 由惯性运动基本 原理可以准确识别其影响偏差; 水平方向自由度对导弹发射出筒参数的影响很小, 其对出筒参数的影响可以不 予考虑。

参考文献 (References)

- ZHANG Jianzhogn, YE Wen, TIAN Jianhai. Analysis of the Influence of Shipborne Environment on the Reliability of Missile Weapon Equipment and Countermeasures [J]. Quality and reliability. 2014(02): 5-9.
- [1] 赵建忠,叶文,田建海. 舰载环境对导弹武器装备可靠性的影响分析及对策[J]. 质量与可靠性. 2014(02): 5-9.
- [2] WANG Lihong, SONG jun. Hit Probability of Antimissile Naval Gun un High Sea State [J].Command Control & Simulation. 2016(01): 53-56.
- [2] 王立红, 宋军. 高海情对反导舰炮命中概率的影响[J]. 指挥控制与仿真. 2016(01): 53-56.
- [3] ZHANG Zhiyong, SUN Xiaofeng, HUANG Meng hong. Statistical Analysis of Ship-borne Missile Vertical Launching System [J]. Tactical Missile Technology. 2016(04): 39-42.
- [3] 张志勇,孙晓峰,黄梦宏,等. 舰载导弹垂直发射系统动力学特性统计研究[J]. 战术导弹技术. 2016(04): 39-42.
- [4] LI Weibo, XU Haifeng, CAO Yanjie. Research on Vertical Launch Technology and Development of Shipborne Missiles [J]. Aerodynamic Missile Journal. 2012(09): 66-70.
- [4] 李伟波,徐海峰,曹延杰,等. 舰载导弹垂直发射系统技术及发展研究[J]. 飞航导弹. 2012(09): 66-70.
- [5] LI Jinghai. Analysis and Research on Launching Mode of Shipborne Air Defense Missile [J]. Technology Foundation of National Defence. 2005(11): 40-42.
- [5] 李静海. 舰载防空导弹发射方式的分析与研究[J]. 国防技术基础. 2005(11): 40-42.
- [6] QIAO Yanmei. Research and Implementation of Ship Motion Control Platform and Wave Response Model [D] .Dalian Maritime University, 2016.
- [6] 乔艳梅. 船舶运动控制平台及海浪响应模型的研究与实现[D]. 大连海事大学, 2016.
- [7] SUN Jianhau, QIU Zhiqiang. Simulation of ship motion in virtual ocean environment [J]. Journal of East China Shipbuilding Institute(Natural Sciences) . 2001(04): 15-19.
- [7] 孙建华, 邱志强. 虚拟海洋环境中的舰船运动的仿真[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版). 2001(04): 15-19.
- [8] QIU Zheng, TONG Yude. The warship Six-degrees-of-freedom Movement Simulation Based on SIMULINK [J]. Electronic Test. 2013(13): 72-74.
- [8] 邱政, 童余德. 基于 SIMULINK 的舰船六自由度运动仿真[J]. 电子测试. 2013(13): 72-74.
- [9] Li Xiao, PENG Likun. Motion Simulation of Six Degrees of Freedom Ship Motion Simulator under Wind and Wave Conditions [J]. Automation Application. 2017(11): 54-57.
- [9] 李晓,彭利坤. 风浪条件下六自由度舰船运动模拟器运动仿真[J]. 自动化应用. 2017(11): 54-57.
- [10] SHENG Zhenbang. Ship Principle [M] Shanghai : Shanghai Jiao tong University Press, 2003.
- [10] 盛振邦. 船舶原理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- [11] XU Jizu. Dynamic Analysis of Offshore Engineering Structures [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1992.
- [11] 徐继祖. 海洋工程结构动力分析[M]. 天津: 天津大学出版社, 1992.
- [12] HUANG Limin. On-line Prediction of Non-stationary and Nonlinear Ship Motions at Sea [D]. Harbin Engineering University, 2016.
- [12] 黄礼敏. 海浪中非平稳非线性舰船运动在线预报研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2016.
- [13] WANG Guobin. The Simulation of Ship-based Missile Launch under Bad Ocean Conditions [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011.
- [13] 王国兵. 高海情条件下舰载导弹垂直弹射动力学仿真[D]. 北京: 北京理工大学, 2011.
- [14] YANG Jichao, Yang Yun. Simulation of Vertical Launch Process for Multi-Mode Ship-Based Missiles [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology
- [14] 杨继超,杨云.多工况舰载导弹垂直发射仿真分析[J].飞行器测控学报.2014(05):406-409.
- [15] LI Suqi. Research and experience on batch processing [J].Digital Technology & Application. 2016(10): 127.
- [15] 李素奇. 关于批处理的研究与经验[J]. 数字技术与应用. 2016(10): 127.