

doi: 10.7690/bgzd.2025.06.004

水面舰船储弹机构传动系统动力学分析

张继鹏¹, 辛运胜²

(1. 中国船舶集团汾西重工有限责任公司设计研究所, 太原 030027;
2. 太原科技大学机械工程学院, 太原 030027)

摘要: 为提高舰炮供弹的可靠性和储弹机构的稳定性, 开展水面舰船的滚珠丝杆传动系统的动力学分析。利用有限元分析与刚柔耦合动力学仿真分析方法, 结合 6 级和 9 级综合海况, 对滚珠丝杠副应力、应变情况进行分析。研究表明: 启动时应力和应变均达到峰值, 可为水面舰船滚珠丝杠副的设计及强化工作提供参考。

关键词: ADAMS; 有限元; 刚柔耦合; 滚珠丝杠; 海况

中图分类号: TJ391; E925 **文献标志码:** A

Dynamic Analysis of Transmission System of Ammunition Storage Mechanism for Water Surface Ship

Zhang Jipeng¹, Xin Yunsheng²

(1. Design and Research Institute of Fenxi Heavy Industry Co., Ltd., China State Shipbuilding Corporation Limited, Taiyuan 030027, China; 2. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030027, China)

Abstract: In order to improve the reliability of ammunition feeding and the stability of ammunition storage mechanism of naval gun, the dynamics analysis of ball screw transmission system of surface ship was carried out. By using the finite element analysis and rigid-flexible coupling dynamic simulation analysis method, combined with the comprehensive sea conditions of grade 6 and grade 9, the stress and strain of the ball screw pair are analyzed. The results show that the stress and strain both reach the peak value when starting, which can provide a reference for the design and strengthening of the surface ship ball screw pair.

Keywords: ADAMS; finite element; rigid-flexible coupling; ball screw; sea state

0 引言

储弹机构是炮弹发射装置的重要组成部分, 也是航行战舰遇到紧急情况能否及时做出反击, 掌握战场主动权的重要因素。建立一套结构紧凑, 并且能够连续、快速供弹的储弹传动系统具有较高的实用价值。

已有部分学者对舰炮供弹、储弹系统进行了研究。唐文献等^[1]通过利用 PRO/E 和 ADAMS 对储弹系统进行了分析, 建立了零部件运动和受力动力学模型。李利等^[2]利用有限元分析与多体动力学分析理论相结合的分析方法, 对舰炮无链供弹系统进行了研究。葛杨等^[3]运用“黑箱”的模块设计方法对供弹方式展开了研究, 提出了凸轮带动齿轮与齿条进行供弹; 电机带动链条装置实现供弹; 凸轮带动链条进行供弹的设计方案。

滚珠丝杠副由于具有高速、高效、高精度的传动特点, 已成为机械进给系统中的关键元件, 并在各个领域的应用越来越广泛; 因此, 储弹机构采用

滚珠丝杠副进行传动。

当前, 针对滚珠丝杠的研究多集中于数控机床领域, 对用于复杂环境下传动系统的研究较少, 特别是水面舰船传动系统中的滚珠丝杠副。开展用于水面舰船的滚珠丝杠副的研究, 不仅要分析其直线运动力学特性, 而且需要考虑复杂的海浪情况。

对于海浪的研究, 目前已有大量学者对我国周边海域的海况问题进行调研, 其中傅圆圆等^[4]根据秦皇岛海洋站观测的海浪特征, 对黄海和渤海附近海域的海面情况进行了观察, 给出秦皇岛海洋站附近海况等级为 1~6 级; 郑祥靖等^[5]利用数值模拟方法分析得到了台湾海峡海浪变化特征; Zheng 等^[6]利用已有数据分析了中国附近海域海波能量及有效波高, 提供了中国近海范围波高的变化趋势。以上学者的研究为计算水面舰船滚珠丝杠传动副的运动状况提供了参考。

Li 等^[7]对滚珠丝杠模型研究现状进行了综述, 着重研究了滚珠丝杠进给系统的非线性动态刚度和振动响应; Altintas 等^[8]对机床进给传动系统进行了

收稿日期: 2024-08-11; 修回日期: 2024-09-07

第一作者: 张继鹏(1982—), 男, 山西人, 硕士。

综述,提出了基于滚珠丝杠和直线电机的机械传动及其柔性模型; Sobolewski 等^[9]通过对数控机床的研究,发现了冲击力与瞬态相位设计参数之间的关系与转速的函数关系; Brecher 等^[10]介绍了一种计算滚珠丝杠传动载荷分布和滚动体接触特性的方法; Zhen 等^[11]通过力学分析,建立了滚珠丝杠接触应力和疲劳寿命的计算模型; Zaeh 等^[12]提出了一种滚珠丝杠进给系统的有限元建模方法; Chen^[13]建立了考虑轴向载荷和倾覆力矩联合作用的双螺母预紧滚珠丝杠副接触特性分析模型,得出滚珠丝杠副的接触参数主要受轴向载荷和滚珠与滚道之间的接触状态的影响。Gao 等^[14]基于欧拉-伯努利梁理论,建立了考虑滚珠丝杠副、螺母位置和结合部弯曲振动的滚珠丝杠进给系统横向等效动力学模型,并利用粒子群算法对关节的动态参数进行辨识。以上学者对滚珠丝杠副展开了大量的研究,介绍了滚珠丝杠接触特性和动力学模型,却鲜有提及滚珠丝杠摇摆情况下的力学特点。

针对以上学者的研究以及当前存在的问题,笔者基于 ADAMS 动力学软件提出了一种考虑海浪情况的储弹机构滚珠丝杠副的刚柔耦合动力学模型,利用 SolidWorks 建立了储弹系统的装配模型,通过 ANSYS 对关键件进行柔性化,导入 ADAMS 结合海况特点对供弹运动机构进行动力学仿真。

1 模型建立及海况分析

1.1 模型构成及原理

储弹机构由外部框架、移动弹架、电机、滚珠丝杠副、导轨、滑块等配套零件组成,利用 3 维绘图软件 SolidWorks 对上述零部件分别进行建模,并在 SolidWorks 里对零部件添加配合关系完成装配工作,确保其与实际情况相一致。

储弹机构开始工作时,电机带动传动轴旋转,经由换向器改变方向后带动滚珠丝杠旋转,滚珠丝杠的旋转运动带动滚珠螺母的直线移动,使得弹架沿滚珠丝杠轴线方向运动。为准确研究用于水面舰船的滚珠丝杠传动系统,ADAMS 里储弹机构不仅会有平移运动,而且其整体还会伴随着不同的海况呈一定规律的摇摆,如图 1 所示。

1.2 海况分析及研究

依据中华人民共和国海浪等级标准^[15],6 级海况时,海浪波长较长,高大波峰随处可见,有效波高 4.0~6.0 m,1/10 大波波高 5.0~7.5 m。9 级海

况时,海面颠簸加大,有震动感,波峰长而翻卷,此时有效波高 ≥ 14.0 m,1/10 大波波高 ≥ 18.0 m。6 级和 9 级海况通常作为海面设备检验条件^[16],以确保海面设备在极端条件下也能正常工作,因此我们选择 6 级和 9 级海况作为边界条件。

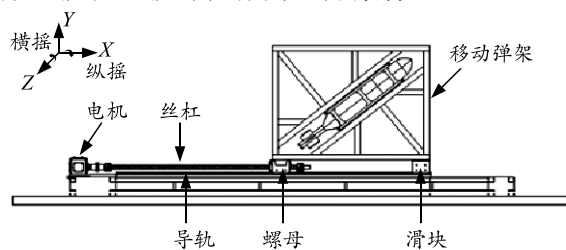


图 1 储弹机构

2 储弹机构刚柔耦合动力学设置

ADAMS 中有时断时续和连续不断 2 种类型的接触^[17],滚珠丝杠副中滚珠与丝杠属于连续不断的接触,这时系统会把这种接触定义成一种非线性弹簧的形式,构件材料的弹簧模量当成弹簧的刚度,阻尼当成能量损失。

计算接触力时,选用 Impact 冲激函数法,Impact 函数的格式为 $\text{Impact}(q, \dot{q}, q_1, k, e, c_{\max}, d)$,式中 q 为距离变量; $\dot{q}$ 为 q 对时间的导数; q_1 为 Impact 函数的阈值; k 为刚度系数; e 为力指数; $c_{\max}$ 为最大阻尼系数; d 为阻尼达到最大值时的切入量。

Impact =

$$\begin{cases} 0, & \text{当 } q > q_1, \\ k(q_1 - q)^e - c_{\max} \dot{q}^* \text{step}(q, q_1 - d, 1, q_1, 0), & \text{当 } q \leq q_1. \end{cases}$$

式中: $k(q_1 - q)^e$ 为弹性力; $c_{\max} \dot{q}^* \text{step}(q, q_1 - d, 1, q_1, 0)$ 为阻尼力。

2.1 滚珠丝杠副刚柔耦合模型建立

在获取相关零部件 3 维模型的基础上,对滚珠丝杠副中的丝杠 3 维模型进行网格划分,赋予相关的特征参数,将计算的模态结果通过数据转换,变成 ADAMS 可以读的 MNF 文件,如图 2 所示。

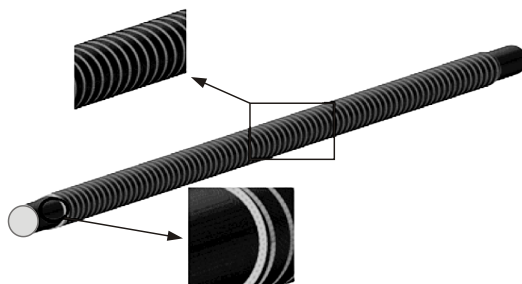


图 2 丝杠柔性体 MNF 文件

将储弹机构 SolidWorks 模型导入 ADAMS 软

件,利用柔性体替换方式将柔性体丝杠,MNF 文件导入 ADAMS 中。在完成上述工作之后,笔者赋予零部件间的约束、运动副和接触力,约束关系如表 1 所示。

表 1 储弹机构主要部件间的约束

相对运动件 1	相对运动件 2	数量	约束关系
柔性丝杠	外部框架	2	旋转副
移动弹架	外部框架	1	移动副
螺母	移动弹架	2	固定副
柔性丝杠	螺母滚珠	2	接触约束
外部框架	大地	1	旋转副

2.2 ADAMS 接触力设置及验证

在添加滚珠丝杠与滚珠之间的接触力时,需要考虑模型中滚珠与丝杠、滚珠与滚珠间都存在接触力。如果用手动依次添加它们之间的接触副,耗费时间太长,而且对接触副修改时还要重新依次修改,工作量太大,也有学者使用宏命令对其添加接触副工作量简化。在实践过程中,由于滚珠丝杠副中摩擦力很小,所以,在对此机构模拟时,可不必考虑滚珠与丝杠和滚珠间的摩擦力,且由于外部载荷在任意数量的滚珠上平均分配,为提高仿真效率,提出了在 SolidWorks 中将所有滚珠设置为一个整体,并进行验证了工作。

为了验证滚珠丝杠设置的合理性,利用 ADAMS 仿真绘制出螺母质心位移曲线和螺母质心速度曲线分别如图 3 和 4 所示。

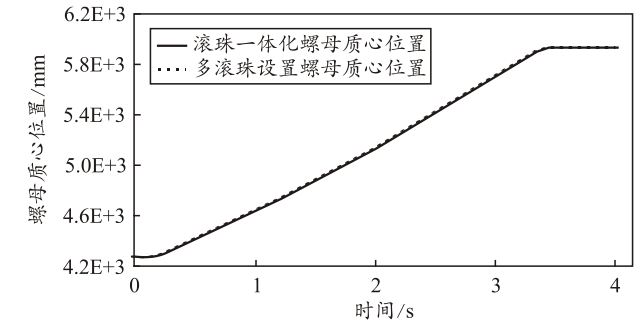


图 3 不同设置螺母质心位移

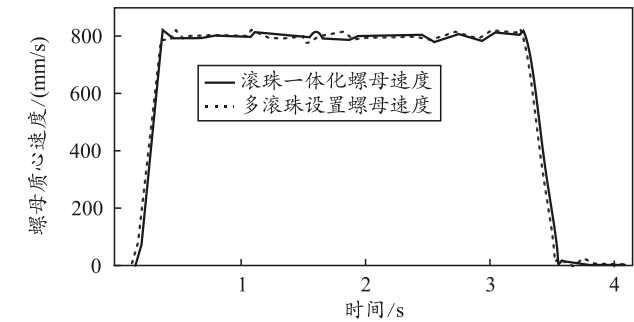


图 4 不同设置螺母质心速度

从图 3-4 可以看出:无论是位移曲线还是速度

曲线运动趋势都是相吻合的,从而可以判断如此的设置方式是可以采用的。

3 储弹机构多体动力学仿真分析

3.1 接触力参数分析

接触力参数设置是影响接触力的重要因素,研究表明接触力仿真要确定刚度系数、非线性力指数、阻尼系数等参数,其中刚度系数 k 是接触力仿真研究的关键,已有众多学者对此参数进行了研究,通常选取 10^5 为标准。为确保仿真的准确性,开展阻尼系数和力指数的研究是有必要的。

在 ADAMS 里分别选取常用的阻尼参数和力指数参数进行研究,得到了阻尼接触力曲线和力指数接触力曲线。

在 ADAMS 内选取 10、50、100 这 3 个常用阻尼系数进行仿真,仿真结果如图 5 所示。当阻尼参数设置为 10 和 50 时,滚珠和丝杠之间的接触力非常不平稳且有明显的突变;当阻尼设置 100 时,接触力的情况表现良好,没有剧烈突变,且接触力的大小满足滚珠丝杠副平稳运行的设计要求,最终选择 100 作为储弹机构滚珠丝杠副的接触力阻尼参数。

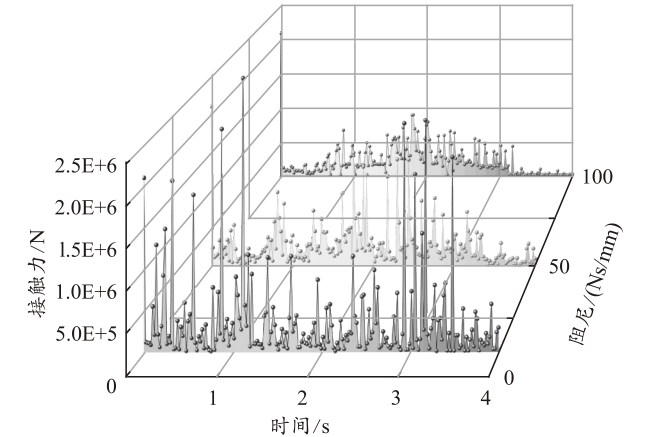


图 5 阻尼为 10、50、100 时接触力

在 ADAMS 内选取 1.0、1.5、2.0 这 3 个常用力指数进行仿真,仿真结果如图 6 所示。随着力指数的增加,滚珠和丝杠之间的接触力反而减小,当力指数为 1.0 时,力的波动幅度较大从 $10^5 \sim 10^7$ N,故不宜采用;力指数为 1.5 和 2.0 这 2 个参数时接触力表现较为良好,但参数为 2.0 时,接触力的数值相对较小,而力指数为 1.5 时接触力在 5×10^5 N 附近,不仅运行平稳,而且接触力大小也满足设计要求,最终选择力指数 1.5 作为储弹机构滚珠丝杠副的接触力参数。

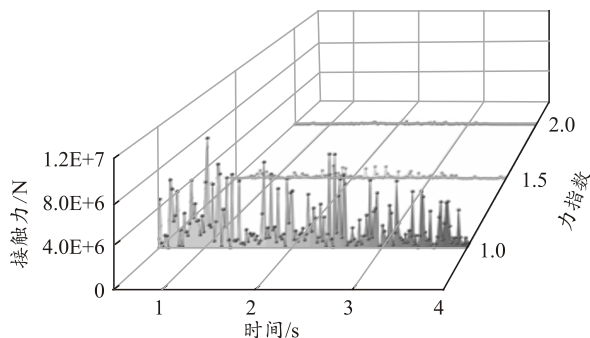


图 6 力指数为 1.0、1.5、2.0 时接触力

3.2 柔性丝杠应力分析

完成接触力参数选取后,开始对储弹机构整体进行结合海况的动力学仿真分析,利用 ADAMS 所得最大应力点数据绘制出不同海况下柔性丝杠的应力曲线如图 7 所示。在 6 级和 9 级综合海况下,丝杠应力变化趋势基本一致,均呈现启动初期应力迅速上升后缓慢下降最后趋于 0,且应力最大时刻发生在丝杠启动加速时期,这是由于在电机启动瞬间有一个很大的冲击,与实际情况相符;但 9 级综合海况下应力要明显比 6 级综合海况更为剧烈,最大值达到 580.868 MPa,这也符合海况等级高应力大的特点。

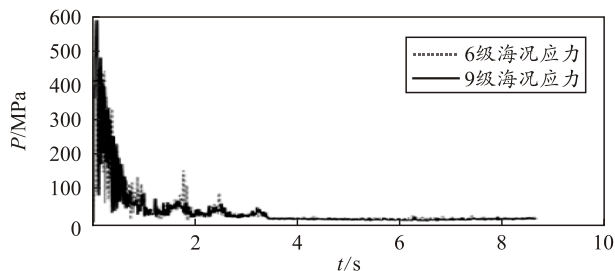


图 7 不同海况下丝杠应力

在知道应力变化趋势后,想要知道最大应力节点究竟发生在什么位置,于是利用 ADAMS 查看了柔性丝杠应力动画,发现 6 级和 9 级海况下最大应力区域均集中在左端靠近电机侧如图 8 和 9 所示。在滚珠丝杠副加速过程中其余部位应力值处于较低水平,由此可以为日后丝杠的强化工作提供参考。

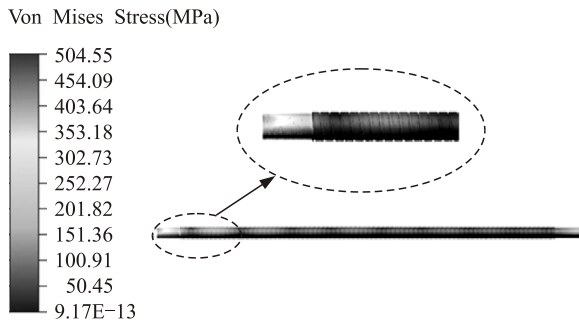


图 8 6 级海况下丝杠应力

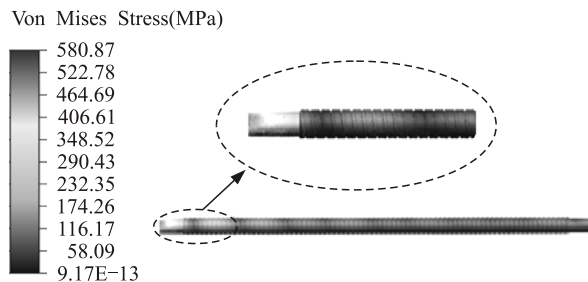


图 9 9 级海况下丝杠应力

3.3 柔性丝杠应变分析

绘制不同海况下柔性丝杠应变曲线如图 10 所示。发现不同海况下应变的变化趋势是相一致的,呈现迅速上升缓慢下降最后趋于 0,且此时 6 级和 9 级海况下应变大小相差不大,6 级和 9 级海况下应变最大值在 0.001 mm 左右。

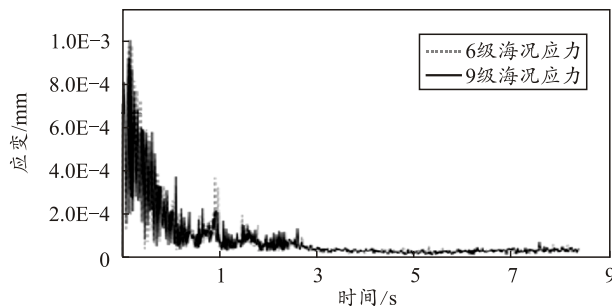


图 10 不同海况下丝杠应变

利用 ADAMS 查看了柔性丝杠应变动画,发现 6 级和 9 级海况下最大应变点出现在丝杠左侧滚珠与丝杠刚接触的区域如图 11 和 12 位置所示。其余滚珠与丝杠接触部分处于较稳定的应变范围。

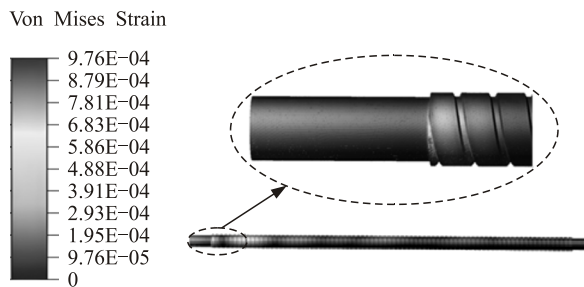


图 11 6 级海况下应变

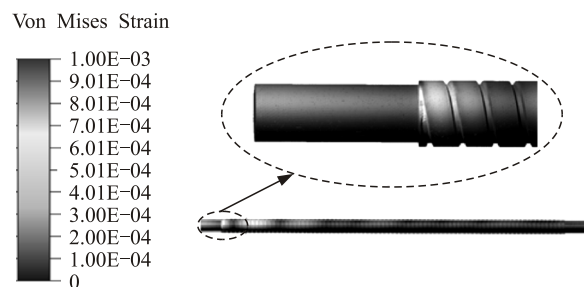


图 12 9 级海况下应变