

doi: 10.7690/bgzd.2016.11.001

动能弹模拟发射装置俯仰门架有限元设计

刘 亚, 关世玺

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 针对动能弹发射过程中易对整个装置各构件的强度造成破坏的问题, 研发一种模拟发射装置。分析动能弹发射器装置组成及俯仰门架受力, 运用有限元的方法, 对模拟装置的俯仰门架进行静/动态的设计及分析。通过静态分析(刚度和强度分析)得到俯仰门架在静载荷作用下产生的最大位移及最大应力, 并通过动态分析了解其动态性能。分析结果表明: 该设计能使俯仰门架满足动能弹模拟发射装置需要, 并为其他构件的设计提供了有益的参考。

关键词: 动能弹发射器; 俯仰门架; 有限元方法; 静态分析; 动态分析

中图分类号: TJ306 **文献标志码:** A

Finite Element Design of Pitch Gantry for Kinetic Energy Projectile Simulation

Liu Ya, Guan Shixi

(School of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In view of the problem that the strength of each component of the whole device is easy to be destroyed during the launch of the kinetic energy projectile, so a kind of simulation launching device is developed. Through the analysis of kinetic energy projectile Launcher device and pitching force, and using the finite element method simulation of static and dynamic device pitch frame design and analysis. Through static analysis (stiffness and strength analysis), the maximum displacement and maximum stress of the pitch door frame under static load are obtained, and the dynamic performance is obtained through the dynamic analysis. The analysis results show that the design can satisfy the needs of the launch device of the kinetic energy projectile, and provide a useful reference for other components.

Keywords: kinetic energy projectile launcher; pitch gantry; finite element method; static analysis; dynamic analysis

0 引言

在动能弹发射过程中, 发射装置受多种载荷及冲击, 会对整个装置各个构件的强度造成重复性的破坏, 甚至是不可逆的破坏; 所以, 需要研发一种可以模拟真实情况的模拟发射装置。但是, 由于该装置属于非标设备, 在国内没有专门的生产厂家和供应商, 需要专门设计与制造; 因此, 笔者经过分析动能弹发射装置发射时的受力, 研发一种可以模仿发射时的冲击载荷及缓冲的模拟装置。此装置可以根据动能弹的不同型号进行模拟, 同时可以调整发射时的姿态。该装置模拟的可靠性主要由关键构件的静态和动态的刚度以及强度决定; 因此, 在设计模拟装置的过程中, 必须对这些关键部件进行静态和动态的分析。笔者主要分析刚度、强度、震动特性, 并根据分析结果进行拓扑优化。

在以往的机构设计中, 刚度和强度分析采用材料力学的基本知识, 分别计算那些危险断面上的应力^[1]。运用这种方法有很大的局限性, 不但计算量大, 而且有时甚至会计算错误。随着计算机技术的发展, 有限元技术得到广泛应用, 使得静态设计及分析在机构设计中得到了广泛的发展^[2-4], 这样不

仅省去很多人力, 而且也避免了出现错误的可能性, 还可以很大程度地提高机构的性能。笔者以动能弹模拟发射装置的俯仰门架为例, 运用 ABAQUS 有限元分析软件进行静态及动态分析。通过分析的数据了解方案 1 的薄弱和冗余, 并且针对这些缺点进行改进得到方案 2, 同时对方案 2 再分析, 使得该门架满足项目的要求。

1 装置组成及俯仰门架受力分析

1.1 模拟装置的结构组成

动能弹发射模拟装置主要由托架、升降齿弧、俯仰门架、平移滑轨、缓冲器、快速锁定装置以及模拟供弹机来代替冲击作用的冲量发生器几部分组成。模拟供弹机放置在俯仰门架的中间部位, 其左端与快速锁定装置连接, 右端与缓冲器相连。

1.2 俯仰门架的受力分析

俯仰门架是动能弹模拟装置的一个重要的基础部件。它是起落部分的主要载体和模拟供弹机、缓冲器、快速锁定装置的导向部件, 同时其绕升降轴回转, 为整个模拟装置提供枢轴, 在动能弹模拟发射时起到将载荷传递给托架的作用。

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-08-20

基金项目: 山西省科技攻关项目(20140321008-03)

作者简介: 刘 亚(1990—), 男, 河南人, 在读硕士, 从事飞行器及航炮设计方面的研究。

对动能弹发射进行模拟,主要是模拟发射时发射器可能会受到的各种载荷,然而,动能弹发射过程是一个复杂的发射器受力过程;所以,受力分析可为该模拟装置的俯仰门架提供设计的理论依据。根据内弹道学的知识可知:动能弹发射时炮膛主要受力情形为其受到的合力引起的发射后坐力^[5-7]。虽然受力过程非常复杂,但是如果将装置的俯仰架和托架作为一个整体考虑的话,俯仰齿轮和升降齿弧之间的作用力,升降轴和升降轴孔之间的作用力就都变为内力,大大简化了受力过程。

射击时模拟供弹机在火药燃烧时产生的气体压力作用下向后滑动,缓冲器则阻止其后座,产生反后坐力。反后坐力包括缓冲器液压阻力 F_{zh} 以及快速锁定装置产生的复进抗力 F_{ff} ,缓冲器中由压紧构件产生的摩擦力(笔者将此力与缓冲器液压产生的阻力融为一体考虑)和导轨上的摩擦力 F_{N1} 、 F_{N2} 组成。同时还受到由于动力偶等作用施加在导轨上的法向反力 N_1 、 N_2 。如图 1 为模拟装置俯仰架的受力示意图。 X 轴正方向为沿模拟供弹机后坐的方向; Y 轴正方向为竖直向上; Z 轴按右手定则确定。

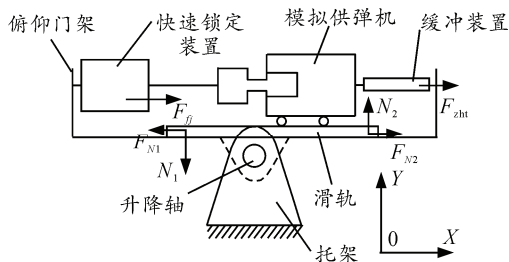


图 1 俯仰门架受力分析

2 方案比较以及有限元模型建立

2.1 方案 1 和方案 2 的对比

任何机构的设计都要经历原始设计再到改进设计的过程,该俯仰门架也不例外。其初始设计(即方案 1)是根据以往的经验得到的,根据有限元分析结果可知:此门架虽然满足项目需要,但依然存在一些薄弱和冗余之处,使得整个门架的质量大大增加;因此,非常有必要对门架进行结构和尺寸优化。方案 1 使用的板材较厚,这就使得其冗余较大。方案 2 则是在削减了板材厚度的同时,对俯仰门架与快速锁定装置连接端、缓冲器连接端以及升降轴的部位,加入了工字梁,使两侧板与底板连接为一体,起到了增加薄弱地方刚度和强度的目的,同时增大了俯仰门架的曲率半径,以达到改变俯仰门架力学性能的目的。2 种方案的对比见表 1。

表 1 2 种方案对比

方案	指标			质量/kg
	板材厚度/mm	加强筋	加强筋厚度/mm	
原方案	30	无	—	670
改进方案	20	加强筋布置较为合理	15	518

2.2 有限元模型的建立

对于俯仰门架有限元模型的建立是通过 ABAQUS 这款有限元软件来实现的。为了便于分析时进行网格划分,笔者对俯仰门架进行了简化。在保证俯仰门架整体结构不变和质量分布均匀的前提下,为了使有限元分析达到预期的效果,对模型中非重要的结构采取了抑制,并删除了一些对实际问题研究没有影响的特征,达到简化的目的^[8]。利用几何模型数据接口把俯仰门架模型导入到 ABAQUS 中,并选择单元类型为 C3D4,控制单元尺寸为 20 mm,为了分析准确,将升降轴孔处的单元尺寸设置为 10 mm。通过划分后,方案 1 共产生了 21 688 个节点,87 081 个单元;方案 2 中的模型共产生了 19 442 个节点,72 210 个单元。俯仰门架所使用的材料是 ZG35;密度为 $\rho=7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;泊松比为 0.25;弹性模量为 $E=2.1 \text{ E}+11 \text{ Pa}$;图 2 为方案 2 划分网格后俯仰门架的有限元模型。

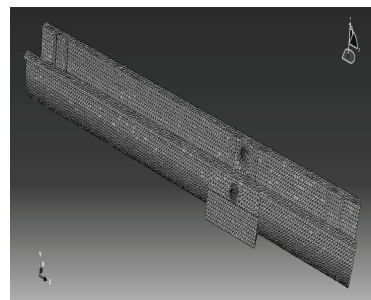


图 2 方案 2 俯仰门架有限元模型

3 静态刚强度分析计算

在对俯仰门架静态刚强度分析时,取快速锁定装置产生的复进抗力、缓冲器产生的反后座力、模拟供弹机对导轨动力偶等作用施加在导轨上的法向反力和摩擦力这 4 种力的最大值施加在俯仰门架的相应作用点上^[9]。这些力通过 FORTEAN 语言编程计算出来,约束了升降轴孔处除了绕升降轴中心连线转动的自由度之外的其余 5 个自由度以及升降齿弧沿轴线方向的自由度。

静态分析是为了找出俯仰门架上载荷最大值的的地方。由于俯仰门架的受力是射角和后坐行程的函数,所以应该改变射角和后坐行程的值来计算俯仰门架的载荷,以此来分析其强度。根据一般分析可知,俯仰门架导轨的最大反力可能出现在 3 种射角

的情况(即 $\varphi=0^\circ$ 、 $\varphi=\varphi_c$ 中间射角、 $\varphi=\varphi_{\max}$)中的一种^[10]；因此，笔者分析了 $\varphi=0^\circ$ 、 $\varphi=40^\circ$ 、 $\varphi=80^\circ$ (此装置最大射角)3 种典型情况。表 2 是射角 $\varphi=40^\circ$ 时方案 1 和方案 2 的对比结果。

表 2 射角 $\varphi=40^\circ$ 时 2 种方案的对比结果

方案	指标			
	最大应力值/ MPa	最大位移值/ mm	最大位移 出现位置	耳轴孔位移/ mm
1	384	299	右侧缓冲器 固定端	右侧缓冲器 固定端
2	5.23	2.87	左: 2.887 右: 3.628	左: 1.742 右: 2.185

根据以上的分析结果以及变形云图可以得出：原始设计方案最大应力出现在底部与两侧连接的地方。最大的应力值达到 384 MPa，左升降轴孔位移为 2.887 mm，右升降轴孔位移为 3.628 mm，升降轴孔相位差为 0.741 mm，出现这样的结果主要原因是由于俯仰门架的曲率半径较小，使得力学性能不好。同时，从云图上还可看出：该门架变形主要体现在竖直面，最大位移出现在俯仰门架前端(即缓冲器固定端)，并且最大位移为 5.23 mm，这是因为此端的冲击载荷较大但是刚度不足的缘故。修改后的方案增大了曲率半径，合理地布置了加强筋，克服了一些刚性差的不足，减少了冗余地方的板材厚度：使得最大应力值减小了 22.1%，最大位移减小了 45.1%，左升降轴孔位移减小了 39.7%，右升降轴孔减小了 39.8%，相位差缩小了 40.2%。通过以上数据的对比，改进后的方案不但使质量降低了，而且刚度也有所提升，同时力学性能也得到了改进。

4 动态分析

4.1 模态分析

笔者通过 ABAQUS 有限元分析软件分别对方案 1 和方案 2 进行模态分析，同时提取前 30 阶的模态(频率)和振型。表 3 是对 2 种方案前 10 阶固有频率的对比。图 3、图 4 是方案 1 的第 1 阶和第 2 阶变形云图；图 5、图 6 是方案 2 的第 1 阶和第 2 阶的变形云图。从变形云图可以看出原方案中的第 1 阶振型主要表现为在 X 轴方向向外变形；第 2 阶振型主要是沿 Y 轴弯曲变形；第 3 阶振型表现为绕 X 轴扭转变形；第 4 阶振型表现为绕 Z 轴扭转变形；第 5 阶主要表现为绕升降轴扭转变形；第 6 阶主要为沿俯仰门架的轴线的扭转。虽然方案 2 的振型和方案 1 基本一致，但是震动幅度有所减小。由此可以看出：改进后的方案相对于原方案来说刚度有所提升，力学性能有所改进。同时从表 3 也可知道改

进后的方案频率要高于原模型，这也反映出改进后的模型各个方向上单位质量的刚度也有所提升。

表 3 2 种方案的固有频率

模态阶数	方案 1 固有频率/Hz	方案 2 固有频率/Hz
1	40.842	48.779
2	56.331	70.180
3	86.153	145.47
4	122.57	164.64
5	163.21	196.46
6	201.88	247.28
7	210.97	261.48
8	260.11	311.74
9	283.48	329.32
10	357.98	408.09

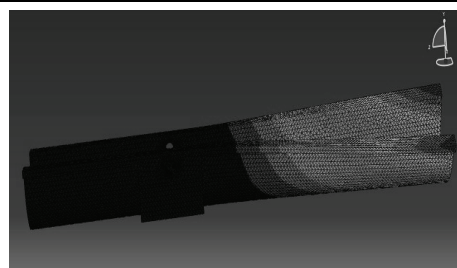


图 3 原方案俯仰门架的 1 阶振型

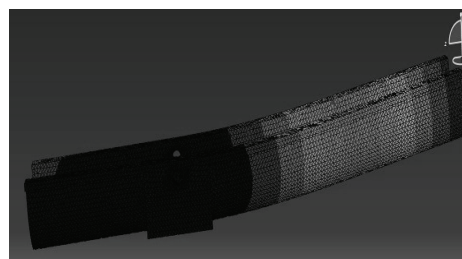


图 4 原方案俯仰门架的 2 阶振型

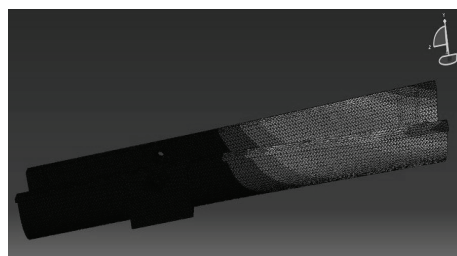


图 5 改进方案俯仰门架的 1 阶振型

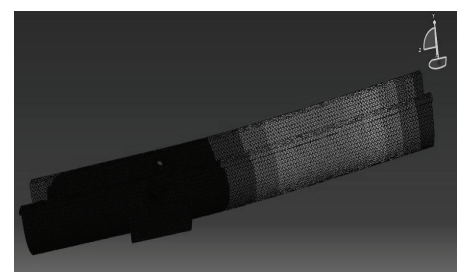


图 6 改进方案俯仰门架的 2 阶振型

4.2 瞬态分析

根据左右升降轴孔的相位差及俯仰门架前端的位移变形，可反映出此俯仰门架变形的程度；