

舰炮抽壳系统柔体动力学分析方法研究

张 建¹ 唐文献¹ 张 攀²

1 江苏科技大学 江苏 镇江 212003;

2 澳汰尔工程软件(上海)有限公司 上海 200082

摘要: 抽壳系统的动态特性直接影响到舰炮的可靠性, 由于在实际工作工程中存在多重非线性, 难以用传统方法研究抽壳机构的力学特性。为此, 基于现代设计理论与方法, 提出一种抽壳系统柔体动力学分析方法。应用显式积分法求解非线性方程组, 三维非协调实体单元离散几何模型, 通用接触算法模拟部件之间的动态接触, Rayleigh 阻尼和 Mises 屈服面定义材料特性, 失效连接单元模型弹壳抽壳特性。为了检验此分析方法的正确性, 以某舰炮的抽壳系统为实际案例, 使用 CAD 软件建立实体模型, HyperMesh 软件进行网格划分, 电子拉伸试验机测试材料的力学性能, 并对其数值计算, 最后通过动应力测试验证模型的正确性。结果表明, 本文所提出的方法有效可靠, 可以为舰炮抽壳系统的研究提供理论基础。

关键词: 舰炮, 抽壳系统, 柔体动力学分析方法, 有限元分析, HyperMesh

0 前言

舰炮抽壳系统的主要作用是抽出药筒(弹壳), 其质量状况的好坏直接影响抽壳过程和后续炮弹的进膛。在对某新开发的舰炮物理样机进行试验时, 抽壳系统各部件存在很多问题, 如抽筒子时常发生塑性变形甚至断裂, 抽壳模板部位磨损比较严重导致无法抽出药筒, 从而失去战斗力。因此, 有必要研究抽壳系统的力学特性。

试验方法用于研究舰炮的力学特性, 是一种最直接且最准确的方式, 但测试周期比较长且耗费的经费大。随着计算机技术、先进计算方法以及力学理论的发展, 计算机辅助工程(Computer Aided Engineering)应用于预测舰炮系统的力学特性成为可能, 这种基于虚拟技术的现代设计理论与分析方法在军工行业的广泛应用^{[1][2][3]}, 可发现及早结构设计缺陷, 减少物理样机的试制次数, 有效地缩短产品开发周期及降低开发费用。然而, 大多数研究仅局限于静态有限元分析、多刚体动力学分析以及单个零件动应力校核上, 而对舰炮进行系统性多柔体分析的研究很少, 因为存在如下三个难点: (1) 由于系统的大位移和大转动引起的几何非线性; (2) 在工作过程中, 材料会产生塑性变形, 存在明显的物理非线性; (3) 系统各部件之间存在非线性接触。整个系统的多柔体有限元分析模型只有充分考虑这些因素才能有效可靠。

本文针对这些关键问题所涉及动力学方程理论、材料本构、阻尼、接触等问题展开分

析, 提出抽壳系统柔性体动力学分析方法。为了验证该方法的可行性, 以某的抽壳系统为工程实例, 根据结构尺寸用 PROE 软件建立三维实体模型, 用 HyperMesh 软件划分网格, 测试了的炮钢材料的力学特性, 最后定义载荷和边界条件进行数值计算, 并通过动态应力试验验证了模型的正确性。结果表明, 本文提出的多柔性体动力学分析方法是切实可行的, 为舰炮抽壳机构的研制开发提供了一种较为经济实用的分析方法。

1 柔性体动力学分析理论

1.1 柔性体动力学方程

柔性体的动力学运动方程是建立在广义坐标基础上, 它不仅要能够反映柔性体的大范围或非线性刚体位移, 而且还需体现柔性体微小弹性变形。运用广义坐标推导的基于拉格朗日方程的控制性动力微分方程的形式如下:

$$M\ddot{\zeta} + \dot{M}\dot{\zeta} - \frac{1}{2} \left[\frac{\partial M}{\partial \dot{\zeta}} \dot{\zeta} \right]^T \dot{\zeta} + K\zeta + f_g + D\dot{\zeta} + \left[\frac{\partial \Psi}{\partial \zeta} \right]^T \lambda = F \quad (1)$$

式中: ζ 、 $\dot{\zeta}$ 、 $\ddot{\zeta}$ 是自由体广义坐标及其对时间的导数, M 是柔性体的质量矩阵, \dot{M} 是柔性体质量矩阵一阶导数, $\partial M / \partial \dot{\zeta}$ 是质量矩阵关于广义坐标偏导数, K 是广义刚度矩阵, f_g 是广义重力, D 是模态阻尼矩阵, Ψ 是代数约束方程, λ 是约束的拉格朗日乘子, F 是广义的激励力^{[4][5]}。

1.2 方程解法探讨

在数学上, 式 1 是一个二阶微分方程组, 矩阵的阶数很高, 使用求解一般微分方程组的方法可能费用很高。因此, 在实用有限元分析中, 主要采用直接积分法和振型叠加法求解。当计算短时间响应时, 直接积分法更为有效^{[6][7]}。常用的直接积分法包括: 中心差分法(显式算法)、Houbolt 法、Wilson 法和 Newmark 法, 其中显式积分算法适用于瞬态动力学, 可以有效解决严重不连续的问题。抽壳系统有效工作时间仅为 8ms, 且为多接触对分析, 故采用显式算法更为有效。然而, 使用显式求解器求解方程组时, 时间增量必须足够小, 为了提高计算效率, 需控制单元最小尺寸。

2 抽壳系统柔性体分析的建模方法

2.1 单元分析

抽壳系统是由抽筒子、抽筒子轴、摇臂、摇臂轴、抽壳模板等组成复杂系统。对抽壳系统进行有限元建模时, 传统做法采用结构单元来离散这些部件, 这必然要对结构作较大简化, 并为了使不同类型单元边界处相互协调, 需要进行较多的人工干预, 劳动量大且很

难反映系统的真实情况；对抽壳系统采用统一的三维实体单元来划分网格，单元的一致性较好，网格质量较高，分析工程师的劳动量也大为减少。

实体单元可分为普通单元和非协调单元，目前，CAE 软件中大都采用等参单元，而改善等参单元性能的一个重要步骤是引入非协调模式，此时单元位移模式就产生了附加自由度，可以使用较少单元得到较高的分析精度。在三维分析中的某些情况下，利用非协调模式可以大大减少分析的成本^[8]。综上所述，使用六面体非协调单元对抽壳系统进行显式动力学分析是一个比较经济的办法。

2.2 材料分析

抽壳过程仅有几毫秒就完成，属于瞬态碰撞问题。在进行动力学响应分析时，阻尼是不可缺少的一个重要方面^{[6][8][9]}。抽壳系统中所用的材料为炮钢，一般采用 Rayleigh 阻尼，把比例阻尼矩阵添加到系统中，见式 2：

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (2)$$

其中 α 是质量比例阻尼系数， β 是刚度比例系数。当系统固有频率低时，质量比例阻尼起主导作用；当系统固有频率高时，刚度比例阻尼起主导作用。具体数值可通过实验或经验类比来确定。但增加阻尼将减小动力学计算的稳定时间增量。为此，对于抽壳系统分析， α 设为 0， β 设为 0.00303。瞬时碰撞会导致材料屈服，炮钢为各向同性材料，故采用 Mises 屈服面来模拟其塑性状态。

2.3 接触分析

在进行显式积分计算时，一般 CAE 软件支持两种接触算法---通用接触算法和接触对接触算法。通用接触允许使用一个相互作用来定义模型中的大部分或者全部区域之间的接触^[8]，具有定义方便、对接触面类型限制少、自动消除过盈以及计算速度快等优点；而接触对接触则是描述两个面之间的接触，工作量比较大，对面的类型限制较多，计算速度也比较慢。故在进行抽壳系统柔体动力学分析时，选用通用接触算法。

接触约束采用罚函数法，其中罚刚度与接触面材料特性、穿透距离和接触压力等因素有关，一般取默认设置，这样对时间增量影响很小而且具有较高计算精度。

2.4 弹壳抽出简化模型

弹壳抽出过程非常复杂，首先炸药在炮弹内爆炸，弹头脱离弹壳和弹膛，弹壳在高压和高温的作用下，发生塑性变形，紧贴膛体内壁；然后，抽壳系统工作，与抽壳模板发生剧烈碰撞，强行把弹壳抽出。在进行柔体动力学分析，完全考虑弹壳的变形抽出过程，非常困难。有必要找出一种等效模型，为抽壳机构动力学分析的提供合理的边界条件。

为此，根据实验测出的抽壳变化规律（如图所示 1），采用连接单元来模拟弹壳抽出过程，可为抽壳系统的动力学分析提供合理的载荷边界条件。原理如图 2 所示，但两点受力低于 50000N 时，单元呈现弹性行为，当超过 50000N 时，两点脱离，单元失效。

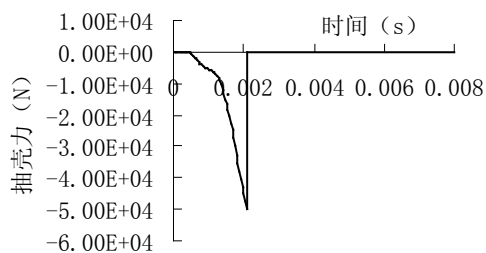


图 1 抽壳变化曲线

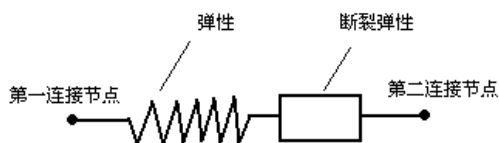
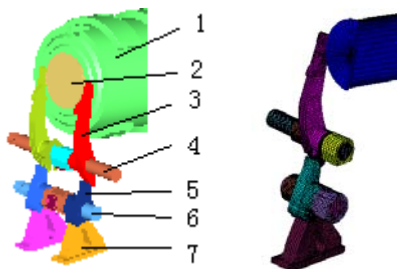


图 2 失效连接单元

3 实例分析

3.1 建立抽壳系统的柔体动力学模型

为了验证本文提出的柔体动力学建模方法的可行性,以某型舰炮抽壳系统为研究对象,用 CAD 软件 PROE 建立三维模型,如图 3(a)所示(1-炮门、2-药筒、3-抽筒子、4-抽筒子轴、5-摇臂、6-摇臂轴、7-抽壳模板)。把模型导入 HyperMesh 中划分三维实体网格,设置单元类型为三维六面体非协调单元。考虑到结构的对称性,只取一般进行分析计算,抽壳系统模型共有 45793 单元, 57055 个节点组成,最小单元尺寸为 2.5mm。如图 3(b)所示。计算时,按照试验所得的速度(约 3m/s,单位提供)定义速度载荷和初始速度,定义分析时间为 8ms。



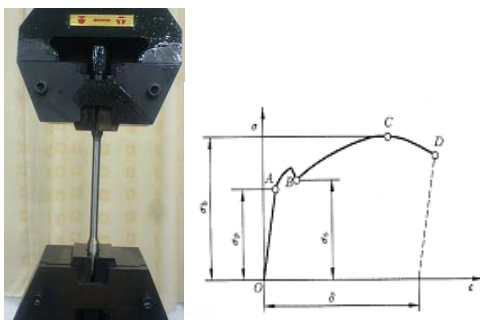
(a)几何模型 (b)网格模型

图 3 抽壳系统模型

3.2 测定炮钢的材料参数

根据 GB/T228-2002《金属材料 室温拉伸试验方法》,应用电子拉伸试验机测试炮钢

的力与变形的关系（如图4(a)所示），对其力学特性进行分析，从而为抽壳系统柔性体动力学分析提供了重要数据。图4(b)为在电子拉伸试验机上测试所得的材料应力应变曲线，炮钢的屈服极限为980MPa。



(a) 测试试样 (b)测试曲线

图 4 材料性能试验

3.3 模型验证

为了验证建模方法的正确性，对抽壳系统进行了实际工况应力测试，采用smart office为数据采集软件，EI9237为数据采集板卡。根据抽壳系统的试验现场情况，在碰撞块上贴上（如图5所示）的应变花。试验结果和理论计算结果对比如图6所示，通过柔体动力学仿真得到的应力数据能较好地反映出抽壳机构在实际工作条件下的力学特性，同时说明本文论述的建模方法可靠有效。

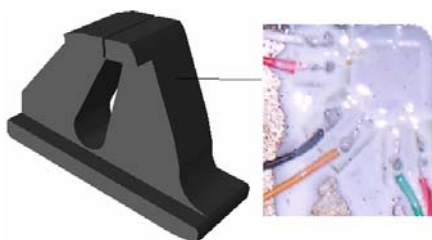


图 5 应力测试示意图

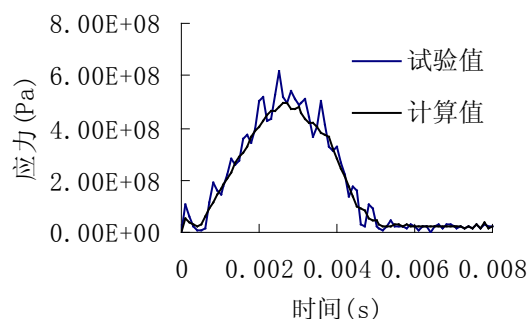


图 6 结果比较

4 结论

(1) 针对抽壳系统工作中出现的几何非线性、材料非线性、阻尼、接触非线性等难点,从动力学方程建立及求解、单元特性、材料本构及阻尼、接触算法、失效连接单元等角度,论述了舰炮抽壳系统柔体动力学分析方法。

(2) 应用此方法,对某舰炮抽壳系统进行了瞬态柔体动力学仿真,测试了材料的力学性能,并进行相应的应力测试,试验结果和计算结果具有良好的一致性。

(3) 结果表明,文中提出的分析方法有效可靠,研究成果为舰炮动态特性分析提供参考。

5 参考文献

- [1] 陈永才,李鹏,熊宜光.炮闩闩体击针孔强度仿真计算与结构改进[J]. 军械工程学院学报, 2009, 21(2):38-40
- [2] 杨红燕,中口径舰炮供弹系统的设计及仿真分析[D]. 哈尔滨工程大学, 2009
- [3] 邓镜勇.某型号火箭发射车动力学仿真分析与优化设计[D]. 电子科技大学, 2009
- [4] 郭磊,郝志勇,林琼.柴油机曲轴与气缸体系统动力学仿真研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007,41(5):780-784
- [5] Tuanjie Li, Yao Wang. Deployment dynamic analysis of deployable antennas considering thermal effect[J]. Aerospace Science and Technology, 13 (2009) 210-215.
- [6] Bathe, K.J. 工程分析中的有限元法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [7] K.S. Na, J.H. Kim, Deployment of a multi-link flexible structure, Journal of Sound and Vibration[J], 294 (2006) 298-313.
- [8] Kennedy, J. M., T. Belytschko, J. I. Lin, Recent Developments in Explicit Finite Element Techniques and Their Applications to Reactor Structures[J]. Nuclear Engineering and Design, vol. 96, pp. 1-24, 1986.