DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0221-08

火炮立楔式炮闩抽筒系统的动态特性*

胡胜海,张满慧,富 威,刘秀莲
(哈尔滨工程大学机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对火炮立楔式炮闩抽筒系统中的卡壳和构件动态断裂等抽筒故障,以动力学理论为基础,将其转化为系统动态特性的定量研究。分析了抽筒系统的工作机理并建立了连续接触动力学模型,定量地推导出药筒及系统内接触构件的运动规律和碰撞载荷。建立了杠杆式抽筒子在抽筒过程中的弹性波动模型,采用该模型能够定量地得出抽筒子的动应力分布和力学参数的影响。进行了理想抽筒工况下理论模型的数值计算和实体模型的仿真模拟,同组比较结果验证了定量分析模型的合理性。所建模型可为解决抽筒故障提供理论依据,也可为抽筒系统的动力学和结构优化设计作铺垫。

关键词:动态特性;非线性动力学;连续接触;弹性波动;抽筒系统
中图分类号:O389;O313 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

在火炮射击过程中,负责抽出药筒的是炮闩装置中的抽筒系统[1]。由部队训练中的统计数据和现有文献[2-3]归纳可知,抽筒故障主要有两方面:一是卡壳,即药筒在抽筒系统产生的抽筒力与身管内抽筒阻力的综合作用下不能获得足够的抛射速度;二是抽筒系统构件发生塑性变形甚至动态断裂,导致抽筒失效。这将导致火炮工作停止,严重影响其战斗力的充分发挥。因此,有必要系统地对火炮抽筒系统进行分析,并着重研究其在抽筒过程中的动态特性。

由于抽筒系统的工作过程具有短周期和高频响应特征,且涉及多种物理场的相互作用,因此采用实体仿真模拟是主要的研究手段。侯保林等[2]在抽筒系统的仿真模型中计及构件间的摩擦、接触碰撞和复进速度等影响因素,提出克服抽筒故障的措施。卓晓琪[4]利用抽筒系统的动态响应研究抽筒故障,分别得出复进速度、抽筒阻力和开闩板参数的影响,并提出了改进抽筒性能的途径。杜中华等[5]建立了某型火炮的开闩模型用于研究其动力学特性,得出了开闩碰撞力即前端抽筒力的变化规律以及它对复进速度的影响。杨艳峰等[6]建立了炮闩冲击试验台的理论模型,模拟开闩抽筒力的各个冲击位置对抽筒过程的作用。张建等[7]和 Tang Wenxian 等[8]建立了抽筒功能部件的有限元模型,并分别利用瞬态和柔体动力学仿真方法研究其在抽筒过程中的动态响应。然而,现有文献中抽筒系统的仿真模拟极为依赖环境参数,对其定性计算结果无法进行强效检测,也缺乏对应的理论分析模型进行定量地验证。

本文中,基于动力学理论,以中小口径火炮立楔式炮闩的抽筒系统为对象,定量地研究其在抽筒过程中的动态特性。分析抽筒系统的工作机理,建立其工作状态下的连续接触动力学模型,并以弹性波动方法推导抽筒子(系统功能部件)结构的动应力分布。最后进行具体工况下理论模型的离散数值计算和实体模型的定性模拟,由两组结果验证定量模型的正确性和有效性。通过定量地分析抽筒系统的动态特性,为解决抽筒故障问题提供理论依据。

1 火炮抽筒系统的工作机理

以图 1 所示的 85 mm 加农炮的半自动立楔式炮闩[9]为对象,对其抽筒系统进行分析。其中,抽筒系统的主要结构部件有闩体、挂臂、杠杆式抽筒子和抽筒子轴等。功能部件抽筒子有两个,呈对称分布

* **收稿日期**:2015-09-17;**修回日期**:2015-12-16
基金项目:国家自然科学基金项目(51175099)
第一作者:胡胜海(1954—),男,教授,博士生导师;**通信作者**:张满慧,zhangmanhui@hrbeu.edu.cn。

安装于抽筒子轴上。对于单个杠杆式抽筒子,抽筒子爪用于抓住药筒底缘执行抽筒运动;挂钩勾住闩体上的挂壁,使炮闩保持开闩状态。

抽筒系统的平面运动工作机理[9]如图 2 所示。开闩时,闩体向下运动。闩体挂壁的下端高速撞击抽筒子的短臂,基于杠杆原理运动的长臂便猛烈沿逆时针方向转动,使抽筒子爪带动药筒运动。抽筒后,闩体在关闭机弹簧作用下略向上升,又使挂臂将抽筒子钩住。最后弹丸重新装填,药筒底缘推动抽筒子脱离闩体,抽筒子和关闩弹簧推动的闩体复回原位。至此,完成整周期抽筒过程。

对于中小口径火炮中的立楔式炮闩,抽筒过程中闩体作用于抽筒系统上的"撞击作用"随火炮射角的变化而变化,但火炮的闩体质量不大使得这种变化对抽筒系统无较大影响,可忽略射角因素。

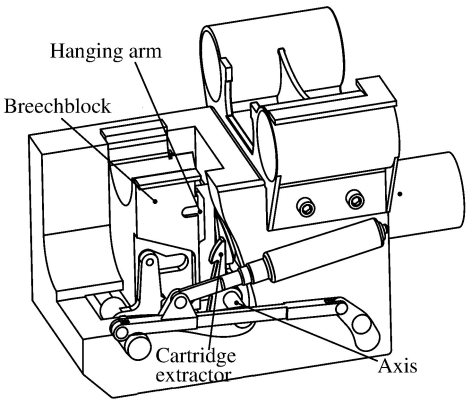


图 1 半自动立楔式炮闩

Fig. 1 Schematics of a semi-automatic vertical wedge breechblock

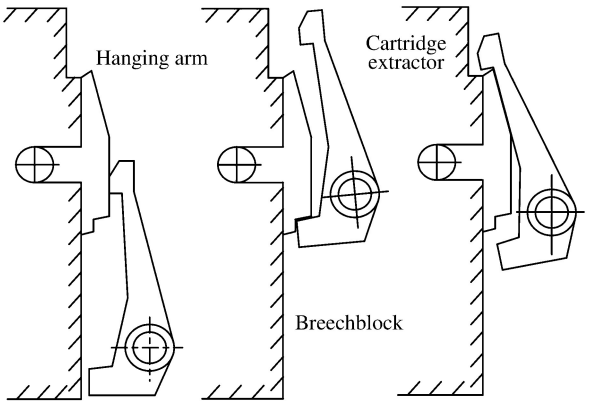


图 2 抽筒系统的平面运动机理

Fig. 2 Planar operational principle of the extractor system

2 火炮抽筒系统的动力学模型

基于抽筒系统的工作机理分析可知,抽筒过程是挂壁、抽筒子和药筒的动态连续接触碰撞过程。抽筒阻力的方向与抽筒子中性面平行,且在中转轴的结构限制下,抽筒子强制在平面内运动。计及接触区域内的局部微小变形,忽略重力场及射角的影响,对抽筒系统进行动力学建模。

如图 3 所示,分别以 Body1、Body2 和 Body3 表示抽筒系统的运动部件,并建立直角参考系 OXY 表示其平面运动。其中对药筒只考虑在 OX 方向上的平动,对抽筒子只考虑绕原点 O 的转动,对闩体只考虑沿 OY 方向上的平动。此时抽筒系统只有 3 个自由度,利用连续接触模型[10-11]即含双边约束的运动微分方程可建立系统的动力学表达式:

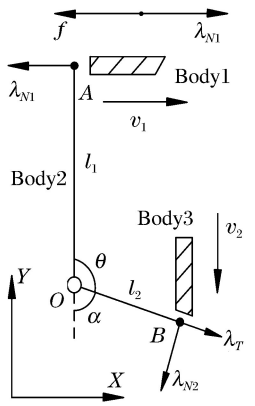


图 3 抽筒系统的力学模型

Fig. 3 Mechanics model of extractor system

$$\begin{cases} \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q},t)\,\boldsymbol{q}''(t)-\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q},\boldsymbol{q}',t)-[\boldsymbol{W}_N+\boldsymbol{H}_R,\boldsymbol{W}_T]\begin{bmatrix}\boldsymbol{\lambda}_N\\ \boldsymbol{\lambda}_T\end{bmatrix}=\boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{g}''_N=\boldsymbol{W}_N^{\mathrm{T}}\boldsymbol{q}''+\bar{\boldsymbol{w}}_N,\quad \boldsymbol{g}''_T=\boldsymbol{W}_T^{\mathrm{T}}\boldsymbol{q}''+\bar{\boldsymbol{w}}_T \end{cases} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{q}$ 为系统广义坐标,其显式表达式为 $\boldsymbol{q}(t)=[x(t),\alpha(t),y(t)]^{\mathrm{T}}=[q_1,q_2,q_3]^{\mathrm{T}}\in\mathbb{R}^{3\times1}$;$\boldsymbol{q}'$ 和 $\boldsymbol{q}''$ 为系统广义坐标的导数。其余各项详述如下:

(1)质量矩阵 $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q},t)\in\mathbb{R}^{3\times3}$ 为对应系统广义坐标的正定矩阵,利用矩阵对角算子 diag 可将其表

示为 $\boldsymbol{M}=\mathrm{diag}[m_1, J, m_2]$。其中，$m_1$ 为 Body1 的质量，J 为 Body2 关于坐标原点的转动惯量，其表达式为 $J=(m_{l_1} l_1^2 + m_{l_2} l_2^2)/3$，$m_{l_1}$，$m_{l_2}$ 为 Body2 长臂 l_1 段和短臂 l_2 段的质量，m_2 为 Body3 的质量。

(2)向量 $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \boldsymbol{q}', t) \in \mathbb{R}^{3\times 1}$ 包含陀螺力矩及所有主动力和主动力矩[10]。对于图 3 中的力学模型，将转动副考虑成理想约束，不存在摩擦阻力及间隙作用；忽略抽筒子长臂 l_1 段和短臂 l_2 段的柔性变形。此时抽筒系统所受外力只有作用于药筒上的抽筒阻力，其向量表达式为 $\boldsymbol{h}=[-f, 0, 0]^{\mathrm{T}}$。

(3)其余拉格朗日乘子形式的附加项是由接触力产生。在抽筒过程中，抽筒系统功能部件上包含 A 和 B 两个接触点。因为接触点处的切向接触力方向与抽筒子的运动方向垂直，所以可将其忽略而仅考虑法向接触力，即忽略式中 $\boldsymbol{H}_R$ 和含切向下标 T 的项。建立法向接触力 $\boldsymbol{\lambda}_N=[\lambda_{N1}, \lambda_{N2}]^{\mathrm{T}}$ 分别为：

$$\lambda_{N1}=\max\{0, k_1 \delta_{N1}^{\beta_A} + 3\alpha k_1 \delta_{N1}^{\beta_A} \dot{\delta}_{N1}/2\}, \quad \lambda_{N2}=\max\{0, k_2 \delta_{N2}^{\beta_B} + 3\alpha k_2 \delta_{N2}^{\beta_B} \dot{\delta}_{N2}/2\} \tag{2}$$

式中：第二项为描述接触面刚度特性和阻尼特性的函数表达式[12]。其中，α 为材料特性的函数；k_i 为接触面刚度系数；上标 β_A 和 β_B 为局部几何形状的函数因子；$\delta_{N1}=\max\{0, -g_{N1}(\boldsymbol{q})\}$，$\delta_{N2}=\max\{0, -g_{N2}(\boldsymbol{q})\}$ 和 $\delta'_{N1}=-g'_{N1}(\boldsymbol{q})$，$\delta'_{N2}=-g'_{N2}(\boldsymbol{q})$ 分别为接触点的法向变形及其导数(法向相对速度)。针对所建抽筒系统的力学模型，定义接触点间的法向渗透距离 $\boldsymbol{g}_N$ 为：

$$g_{N1}(\boldsymbol{q}, t)=l_1 \sin q_2 - q_1, \quad g_{N2}(\boldsymbol{q}, t)=q_3 \sin(\pi-\theta-q_2) - l_2 \sin q_2 \tag{3}$$

利用接触点的法向速度、加速度和相对加速度的计算模型，以集总式表示抽筒子的约束矢量：

$$\boldsymbol{W}_N=[\boldsymbol{w}_{N1}, \boldsymbol{w}_{N2}]=\begin{bmatrix} -1 & l_1\cos q_2 & 0 \\ 0 & -q_3\cos(\pi-\theta-q_2)-l_2\cos q_2 & \sin(\pi-\theta-q_2) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \bar{\boldsymbol{w}}_N=\begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{w}}_{N1} \\ \bar{\boldsymbol{w}}_{N2} \end{bmatrix}=\boldsymbol{0} \tag{4}$$

(4)法向接触的接触法则[11]建立如下。基于不可渗透性假设，系统两物体间的接触存在两种情况：保持接触或向分离过渡。利用许用接触变形 $\boldsymbol{\lambda}_N^*$ 及其集合 $\boldsymbol{C}_N$ 建立抽筒系统中的两个接触点的法向约束表达式为：

$$-\boldsymbol{g}_N^{\mathrm{T}\prime\prime}(\boldsymbol{\lambda}_N^* - \boldsymbol{\lambda}_N) \leqslant 0, \quad \boldsymbol{\lambda}_N \in \boldsymbol{C}_N \qquad \forall \boldsymbol{\lambda}_N^* \in \boldsymbol{C}_N; \quad \boldsymbol{C}_N=\{\boldsymbol{\lambda}_N^*; \boldsymbol{\lambda}_N^* \geqslant 0\} \tag{5}$$

至此，将上述各项代入式(1)并结合式(5)中的法向约束表达式，可完整建立抽筒系统功能部件的连续接触动力学模型，它能够描述抽筒过程中作用在系统上的力与运动的变化关系。

3　杠杆式抽筒子的动应力分布

基于抽筒系统工作机理和建立的连续接触动力学模型可知，杠杆式抽筒子的运动可归结为在极短的时间内发生高强度的加载和卸载过程。它是冲击载荷作用下的弹性动力学问题，冲击载荷引起的扰动不能立即引起远处的响应，且结构中每一点的响应也随时间变化，必须用弹性波动理论分析其动应力分布。

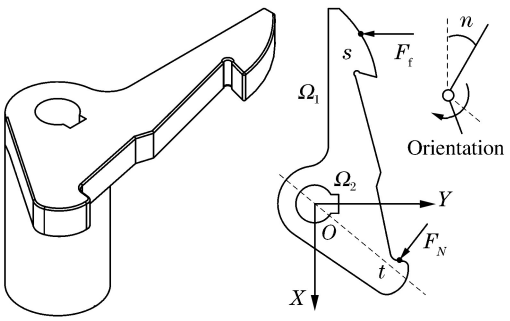


图 4　杠杆式抽筒子的三维及其简化平板结构

Fig. 4　Three-dimensional and flat plate structure of the level-type cartridge extractor

杠杆式抽筒子的结构模型如图 4 所示，当忽略偏置抽筒子爪时它为平板含孔结构。在中性面和中心孔处建立参考坐标系 OXY，则中性面上的平均应力[13]和平均位移分别为：

$$\sigma_{ij}^{\mathrm{e}}(x_1, x_2, t)=\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij}(x_1, x_2, x_3, t)\mathrm{d}x_3/h, \quad u_{ij}^{\mathrm{e}}(x_1, x_2, t)=\int_{-h/2}^{h/2} u_{ij}(x_1, x_2, x_3, t)\mathrm{d}x_3/h \tag{6}$$

式中：对于平均应力 σ_{ij}^{e}，当 $i=j$ 时，它为平面正应力；当 $i\neq j$ 时，它为平面剪应力；h 为均匀板厚。

因为在抽筒子运动过程中，重力场的作用与冲击载荷的作用相比可忽略不计。因此在忽略体力及

上标平均符号的情况下，采用平均过程[14]向二维简化的波动方程(广义平面应力方程)：

$$(\lambda'+\mu)\nabla\nabla\cdot\boldsymbol{u}+\mu\nabla^2\boldsymbol{u}=\rho\boldsymbol{u}'' \tag{7}$$

式中：∇为矢量微分算子符号，$\boldsymbol{u}=[u_x,u_y]^{\mathrm{T}}$；$\lambda=\upsilon E/[(1+\upsilon)(1-2\upsilon)]$和$\mu=E/[2(1+\upsilon)]$为抽筒子结构材料的 Lame 常数，$\lambda'=2\lambda\mu/(\lambda+2\mu)$；$E$ 为弹性模量，υ 为泊松比，ρ 为材料密度。

将式(7)沿直角坐标方向转化，可建立抽筒子平板含孔结构在抽筒过程的控制波动方程为：

$$\begin{cases}\sigma_{xx}=(\lambda'+2\mu)\dfrac{\partial u_x}{\partial x}+\lambda'\dfrac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \sigma_{yy}=(\lambda'+2\mu)\dfrac{\partial u_y}{\partial y}+\lambda'\dfrac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \sigma_{xy}=\mu\left(\dfrac{\partial u_x}{\partial y}+\dfrac{\partial u_y}{\partial x}\right)\\ \rho\dfrac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}=\dfrac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x}+\dfrac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y}, \quad \rho\dfrac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}=\dfrac{\partial\sigma_{xy}}{\partial x}+\dfrac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y}\end{cases} \tag{8}$$

在直角坐标系中建立包含运动过程中的运动转角的抽筒子边界条件[13]，其基本思想是利用包含应力边界条件和位移边界条件的混合边界条件，并将弹性输入冲击波的初始条件转化为力边界条件。

(1)抽筒子外形轮廓

此时边界条件的核心是在不受面力的各点，法向应力 σ_N 为零。根据平面任意点 p 处的外法线 $\boldsymbol{N}$ 方向余弦 $m_p=\cos\langle\boldsymbol{N},\boldsymbol{x}\rangle\sin\theta$ 与 $n_p=\cos\langle\boldsymbol{N},\boldsymbol{y}\rangle\cos\theta$ 和该点处的两项应力$\sigma|_{p_x}$与$\sigma|_{p_y}$，建立外形轮廓的边界条件 L_1：

$$\sigma_N|_{\Omega_1}=[m_p,n_p][\sigma|_{p_x},\sigma|_{p_y}]^{\mathrm{T}}=0 \tag{9}$$

(2)中心孔型轮廓

根据转动副的理想约束条件，得出其位移边界条件为法向位移 u_N 为零，应力边界条件为切向力 σ_T 为零；综合边界条件 L_2 的表达式为：

$$u_N|_{\Omega_2}=0, \qquad \sigma_T|_{\Omega_2}=0 \tag{10}$$

(3)连续接触区域

对于抽筒子在碰撞过程“储存”动能和变形能阶段，冲击载荷 F_N 为平板结构端部的弹性拉伸波，将其转化为力边界条件 L_3：作用点为(t_{ax},t_{ay})，正应力方向与弹性波输入方向相同。利用阶跃函数 δ 得出其表达式为：

$$\sigma_N=F_N\delta(x-t_{ax})\delta(y-t_{ay}) \tag{11}$$

抽筒阻力 F_{f} 对应的弹性压缩波作用点为(s_{bx},s_{by})，方向为 OY 的负向。包含转角方位 n 的力边界条件 L_4 为：

$$\sigma_N=F_{\mathrm{f}}\cos(n)\delta(x+s_{bx})\delta(y-s_{by}), \quad \sigma_T=F_{\mathrm{f}}\sin(n)\delta(x+s_{bx})\delta(y-s_{by}) \tag{12}$$

同时，根据动力学模型中的位移和速度初始值，可建立抽筒子的初始条件为$\boldsymbol{u}|_{t=0}=\boldsymbol{0}$ 和$\boldsymbol{u}'|_{t=0}=\boldsymbol{0}$。

至此，基于上述杠杆式抽筒子在抽筒过程中的弹性波动模型、混合边界和初始条件方程，可定量地推导出抽筒子的动应力分布，并确定各个介质力学参数变化对动应力的影响。

4 抽筒系统动态特性的数值计算和仿真验证

4.1 连续接触动力学模型的数值计算和实体仿真

针对建立的抽筒系统连续接触动力学方程，将广义坐标的导数项由差分形式代替，并以牛顿迭代法为基础在 MATLAB 中编写计算程序对该方程进行数值求解。给定系统功能部件质量参数为 $m_1=3$ kg，$J=175$ kg·mm^2 和 $m_2=7.6$ kg，结构参数为 $l_1=144$ mm 和 $l_2=84$ mm。设置抽筒过程总时间为 5.4 ms，将其离散为 100 个时间点。再以药筒在身管内的匀加速运动规律和根据非线性有限元分析得出的抽筒阻力[15]为已知量，由式(1)建立迭代关系式并设置计算精度为 10^{-5}，得出模型中的接触力。

图 6(a)表示抽筒系统中 A 点处的接触力λ_{N1}在抽筒过程中随时间变化的规律，相较于图 5 中的抽筒阻力变化规律，接触力 λ_{N1}的变化趋势与抽筒阻力的相同，但其数值较大。原因是当指定药筒的运动(施加的轴向位移)为匀加速过程时，接触力 λ_{N1}和抽筒阻力的合力是恒力且满足药筒的运动。图 6(b)表示 B 点处的接触力λ_{N2}随时间的变化规律，它描述了抽筒过程中的碰撞力变化趋势。两个接触力是

系统的主要外力且决定了抽筒子的运动，当假定药筒的运动满足均匀加速过程时，可得接触力 λ_{N2} 虽然与 λ_{N1} 的变化趋势差别不大，但是却呈现出振荡特性。原因是抽筒过程中，主动短臂段的接触变形相较于被动长臂段更加剧烈，即接触区的压缩和恢复 2 个阶段快速往复。

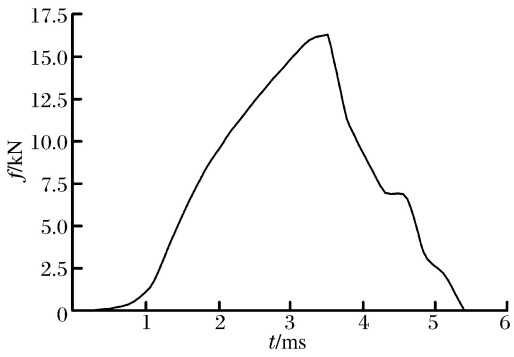


图 5　抽筒阻力的变化规律

Fig. 5　Extraction resistance varying with time

为验证抽筒系统动力学模型及数值计算的有效性，应用动力学分析软件 ADAMS 建立了省略炮闩支撑和复位结构等部件的抽筒系统实体仿真模型，如图 7(a)所示。再输入图 6 中的接触力计算结果，以实体间的接触碰撞方式进行动力学正向仿真。图 7(b)和 7(c)给出了药筒速度和加速度的动态响应，其结果大致符合施加于药筒上的匀加速运动状态，表明所建模型及数值计算结果的合理性和有效性。然而药筒的加速度响应也包含明显的振荡现象，其原因是实体仿真的接触碰撞区域不再约束在平面内，与理论模型的正碰形式不同；平面对称形式的两处接触变形在压缩、恢复阶段内并不一致，引起刚度激励使得作用于药筒上的合力不是恒定值；当抽筒后期接触区越来越趋近于点接触时，该合力的波动也越明显导致加速度响应的振荡。此外，该振荡现象也受到数值计算和实体仿真计算精度的影响，表明理论分析还不完善。

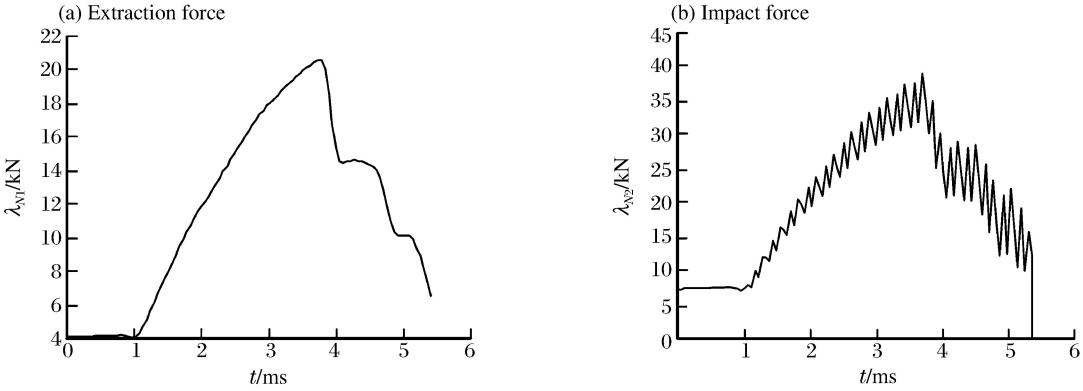


图 6　接触力的变化规律

Fig. 6　Contact forces varying with time

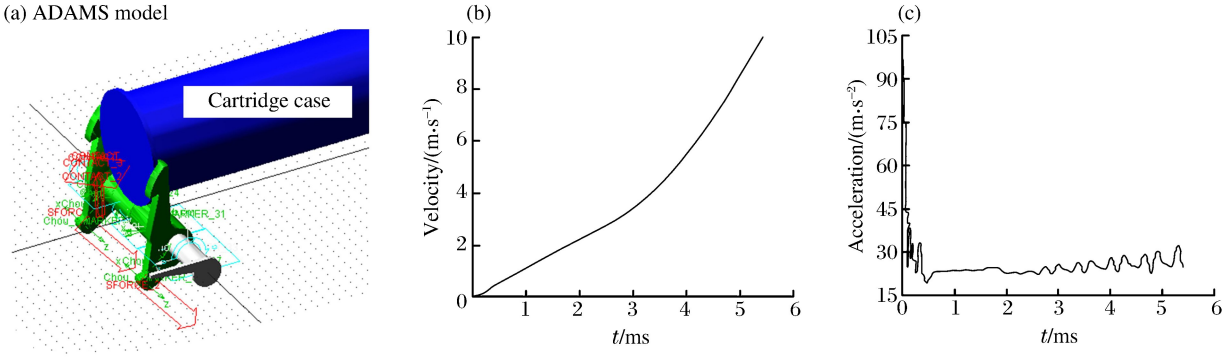


图 7　抽筒系统的实体仿真模型及药筒的动态响应

Fig. 7　Physical model of the extractor system and dynamic response of the cartridge case

通过上述分析可知,当得出药筒在身管内(满足其抛出所需的临界分离速度)运动的抽筒阻力后,基于所建的连续接触动力学模型,能够推导出药筒以“指定”规律运动时整个抽筒系统的动态响应。与现有文献中仅以实体模型仿真的处理方式相比,该模型具有理论应用价值,能够可靠地估算抽筒过程中闩体的最小撞击初始速度和接触碰撞力,对抽筒系统工作时物理模型的主要状态参量进行定量地研究。

4.2 抽筒子动应力分布的数值计算和实体仿真

限于杠杆式抽筒子实际轮廓边界的复杂性,根据其波动方程求解精确解析表达式难以实现。因此,基于时域有限差分方法[16]将二维波动方程转化为离散节点处的有限差分形式,再在 MATLAB 中编写运行程序进行数值计算。结合抽筒子结构轮廓的数学模型得出边界条件中所需的方向余弦项,再以矩形网格对平面计算域 XOY 进行剖分,利用炮钢材料的力学参数[4]设置能够满足数值稳定性的空间节点和步长分别为 $e_x=480$, $d_x=0.2$ mm 和 $e_y=700$, $d_y=0.3$ mm;时间节点和步长为 $k=1\ 350$, $d_t=4$ μs。同时建立完全匹配形式的吸收边界条件,它是将计算域向外扩展 10 个步长后,利用吸收层的衰减因子 $\beta_x=0.17$ 和 $\beta_y=0.18$将波动方程转换为位移和应力两方向分量实现。由于篇幅限制,在此省略计算域和吸收层内位移及应力分量的显式迭代表达式,直接给出弹性波动方程的数值计算结果。

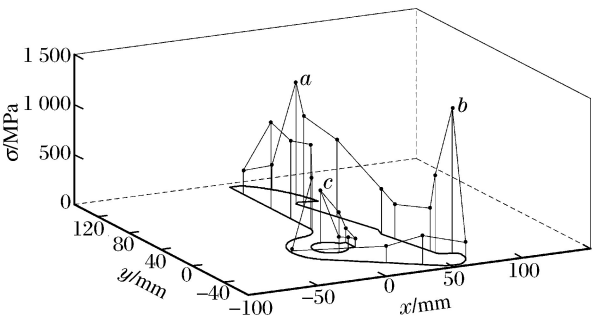


图 8 抽筒子轮廓边界的最大动应力分布

Fig. 8 Maximum dynamic stress in the contour boundary of the cartridge extractor

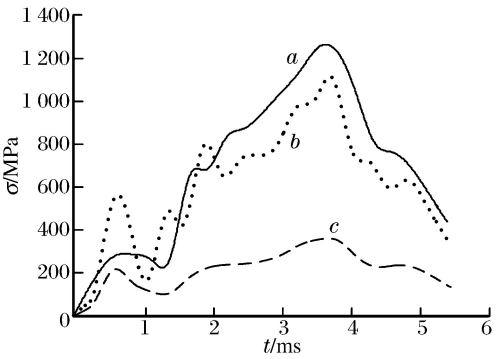


图 9 抽筒子上动应力幅值的变化规律

Fig. 9 Dynamic stress varying with time for the appointed positions in the cartridge extractor

图 8 给出了抽筒子轮廓边界上关键点处的最大动应力分布结果,它是以法向方向的数值直观表征抽筒子的动应力标量结果,但应力主方向仍在平面内。而且,各个数值点对应的是在整个抽筒过程中动应力可达到的最大值,而不是固定时刻的参数。在整周期抽筒过程中,虽然抽筒子的大部分区域的动应力都在屈服极限(炮钢材料 980 MPa)以下,但也有部分区域的动应力远大于屈服极限值,其为动应力集中的危险区域。它们易发生屈服破坏,或者出现循环冲击波作用下的疲劳破坏。

图 9 给出了抽筒过程中边界点 a、b 和 c 的动应力的变化,可以得出其幅值和波动随时间变化的总体趋势都大致相同,呈现先增大、再减小的走势,对应弹性冲击波和压缩波的变化。a 点处的最大极限动应力为 1 320 MPa,超过屈服极限应力的时间约为2 ms;b 点处为1 020 MPa,超出时间约为1.2 ms,它们附近是动应力集中较大的区域。c 点处为 345 MPa,小于材料的屈服极限,其边缘是安全区。

为了验证上述抽筒子动应力分析结果的有效性,运用有限元软件 ANSYS 进行杠杆式抽筒子的实体仿真。通过三角网格划分生成不均匀的计算模型,并在设置与数值计算相同的边界和初始条件后,进行瞬态动力学仿真计算。图 10(a)给出了抽筒周期内二维平板结构的最大动应力分布云图,与图 8 中的计算结果相比,虽然数值参数存在一些差异但总体分布趋势相似,而且得出的动应力集中危险区域基本一致。图 10(b)给出了抽筒子三维结构的最大动应力云图,可以看出除抽筒爪根部以及撞击根部,其他位置的动应力分布趋势和危险区域与二维结构基本一致。

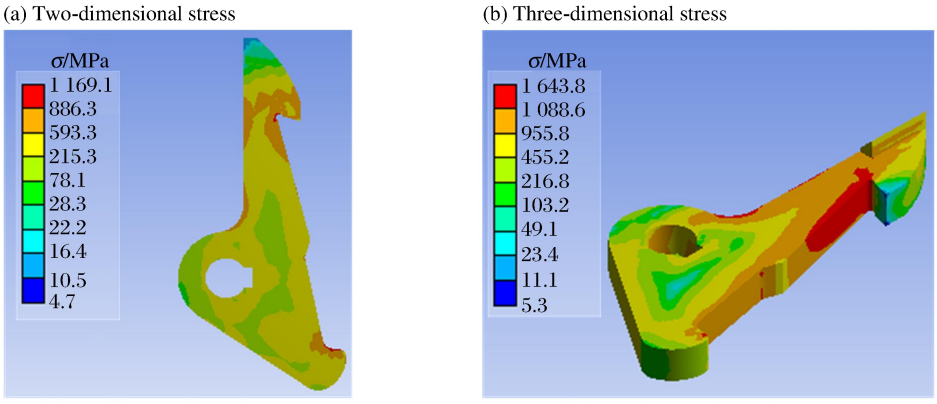


图 10　抽筒子二维和三维结构的最大动应力分布

Fig. 10　Maximum dynamic stress distributions for the two-dimensional and three-dimensional structures of the cartridge extractor

上述结果表明，将抽筒子简化为二维平板结构并应用波动方程计算其动应力分布是近似合理的，然而动应力分布的差异也表明还需进一步完善理论分析模型和数值计算过程。与现有文献中仅以实体仿真的分析方式相比，采用该理论模型能够找出抽筒子工作时的危险失效区域，并对物理模型的各个状态参量进行定量研究。

5　结　论

(1)建立了火炮立楔式炮闩抽筒系统在抽筒过程中的连续接触动力学模型。利用该模型能够推导出药筒在身管内以任意规律运动时，抽筒系统中各构件运动、内碰撞力和抽筒力的变化规律，为抽筒系统的动力学优化和动态强度设计提供较真实的冲击载荷。

(2)建立了杠杆式抽筒子在抽筒过程中的弹性波动方程、混合边界和初始条件模型。基于抽筒系统的动力学响应，利用该模型能够得出抽筒子的动应力分布和应力集中危险区域，定量地确定各个介质力学参数变化对动应力分布的影响，为其动态拓扑优化设计作铺垫。

(3)对抽筒系统实体模型的定性分析验证了所建模型定量分析及其数值计算的合理性和有效性。这不仅可为解决抽筒故障问题提供理论依据，也可为炮闩系统和抽筒系统的动力学研究提供借鉴。

参考文献：

[1]　谈乐斌，张相炎. 火炮概论[M]. 北京：北京理工大学出版社，2005：378-396.

[2]　侯保林，钱林方，于子平. 大口径火炮抽筒故障分析[J]. 弹道学报，2002，14(2)：52-56.
Hou Baolin, Qian Linfang, Yu Ziping. Failure analysis for the breech mechanism of a big caliber howitzer[J]. Journal of Ballistics, 2002, 14(2): 52-56.

[3]　傅建平，宋明明，吕世乐，等. 火炮抽筒故障机理研究[J]. 军械工程学院学报，2013，25(4)：20-23.
Fu Jianping, Song Mingming, Lü Shile, et al. Research on the fault principle analysis of artillery extraction cartridge[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2013, 25(4): 20-23.

[4]　卓晓琪. 火炮抽壳系统的动态弹塑性分析[D]. 南京：南京理工大学，2002：66-73.

[5]　杜中华，王兴贵，马吉胜. 基于虚拟样机技术的某型火炮开闩过程动力学特性研究[J]. 机械工程学报，2004，40(6)：123-126.
Du Zhonghua, Wang Xinggui, Ma Jisheng. Research on gun's breech-opening process dynamic characteristics based on prototype technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(6): 123-126.

[6]　杨艳峰，郑坚，狄长春，等. 基于虚拟样机技术的火炮炮闩冲击试验台理论设计[J]. 振动与冲击，2014，33(15)：180-183.
Yang Yanfeng, Zheng Jian, Di Changchun, et al. Theoretical design of shock test bed for a gun breech based on virtual prototype technology[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(15): 180-183.

[7] 张建,唐文献,徐省省,等.火炮炮闩抽筒子结构优化设计[J].兵工学报,2012,33(6):647-651.
Zhang Jian, Tang Wenxian, Xu Xingxing, et al. Structural optimization design for breechblock extractor[J]. Acta Armamentarii, 2012,33(6):647-651.

[8] Tang Wenxian, Zhang Jian, Zhang Pan. Cartridge-case extracting analysis of some breech mechanism based on flexible body dynamics method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011,43(10):338-341.

[9] 良青历.卫国功臣中国 1956 年式 85 毫米加农炮[J].现代兵器,2010,7:19-26.
Liang Qingli. Patriotic hero: China 1956 type 85mm cannon[J]. Modern Weapons, 2010,7:19-26.

[10] 洪嘉振.计算多体系统动力学[M].北京:高等教育出版社,1999:67-73.

[11] Schindler T, Acary V. Timestepping schemes for nonsmooth dynamics based on discontinuous Galerkin methods: Definition and outlook[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2014,95(1):180-199.

[12] Song P, Kraus P, Kumar V, et al. Analysis of rigid-body dynamic models for simulation of systems with frictional contacts[J]. Journal of Applied Mechanics, 2001,68(1):118-128.

[13] 鲍亦兴,毛昭宙.弹性波的衍射与动应力集中[M].刘殿魁,苏先诞,译.北京:科学出版社,1993:27-41.

[14] 赵嘉喜,刘殿魁,齐辉,等.弯曲波对含多圆孔薄板的散射与动应力集中[J].爆炸与冲击,2008,28(6):552-556.
Zhao Jiaxi, Liu Diankui, Qi Hui, et al. Dynamic stress concentration in multi-cutouts-contained thin plates subjected to flexural waves[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(6):552-556.

[15] 顾克秋,钱林方,常秀英,等.大口径火炮焊接药筒射击变形机理的启发式反演[J].爆炸与冲击,2004,24(6):553-557.
Gu Keqiu, Qian Linfang, Chang Xiuying, et al. Heuristic inversion of deforming mechanism in firing of welded steel cartridge case of large caliber cannon[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(6):553-557.

[16] Duru K, Kreiss G. A well-posed and discretely stable perfectly matched layer for elastic wave equations in second order formulation[J]. Communications in Computational Physics, 2012,11(5):1643-1672.

Dynamic characteristics of extractor system in artillery vertical wedge breechblock

Hu Shenghai, Zhang Manhui, Fu Wei, Liu Xiulian

(*College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin* 150001, *Heilongjiang, China*)

Abstract: Aimed at the faults such as cartridge jamming and component dynamic fracture in the extractor system of an artillery vertical wedge breechblock, this paper was focused on transforming the extracting fault analysis to the quantitative study of the system dynamic characteristics based on the nonlinear dynamics theory. The working mechanism of the extractor system was analyzed firstly, and then a continuous contact dynamics model was established for deriving out the motion law of any components and the impact loads quantificationally during the extraction process. Moreover, the elastic wave model of the lever-type extractor was established, which can both describe the dynamic stress distribution and achieve the influences of the mechanical parameters of the extractor by the quantitative form. The numerical calculation of those theoretical models and the simulations of the virtual prototype were both conducted on the ideal extracting condition. The comparison results of the same group show that the quantitative analysis dynamic models are reasonable and effective, which provides a theoretical basis for the solution of the extracting fault and the dynamics optimization of the extractor system.

Keywords: dynamic characteristics; nonlinear dynamics; continuous contact; elastic wave; extractor system

(责任编辑 张凌云)