

某车载炮上架刚度对弹丸起始扰动的影响

刘成柱, 顾克秋, 张鑫磊

(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘要:建立了某大口径车载炮弹耦合全炮动力学有限元模型, 考虑了带膛线身管与弹丸的接触碰撞, 通过数值计算得到了上架刚度对弹丸起始扰动的关系。分析结果表明, 上架刚度与弹丸起始扰动并非单一的线性关系, 且并非上架刚度越大对弹丸起始扰动越有利。

关键词:车载炮; 上架刚度; 弹丸起始扰动; 弹炮耦合射击动力学

本文引用格式:刘成柱, 顾克秋, 张鑫磊. 某车载炮上架刚度对弹丸起始扰动的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2016(6): 24-28.

Citation format: LIU Cheng-zhu, GU Ke-qiu, ZHANG Xin-lei. Impact of Top Carriage Stiffness of Vehicle-Mounted Gun on Initial Projectile Disturbance [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(6): 24-28.

中图分类号: TJ302

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2016)06-0024-05

Impact of Top Carriage Stiffness of Vehicle-Mounted Gun on Initial Projectile Disturbance

LIU Cheng-zhu, GU Ke-qiu, ZHANG Xin-lei

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Considering the contact collision between the rifled tube and projectile, a dynamic finite element model based on projectile-barrel coupling of a towed vehicle-mounted gun was established. The relationship of the stiffness of the top carriage with the initial disturbance of the projectile was obtained by numerical calculation. The results show that the stiffness of the top carriage and the initial disturbance of the projectile are not a linear relationship, and the higher the stiffness of the top carriage, the worse the initial disturbance of the projectile.

Key words: vehicle-mounted gun; top carriage stiffness; initial projectile disturbance; projectile-barrel coupling firing dynamics

弹丸起始扰动是影响车载炮射击精度的重要因素, 减小弹丸起始扰动有利于提高车载炮射击精度。弹丸起始扰动由弹丸出炮口时刻的初始角位移、角速度与速度3个变量组成, 影响弹丸起始扰动的因素有很多, 诸如后坐体质心偏心、架体刚度、土壤介质刚度及阻尼等。上架是车载炮的重要组成部分, 火炮发射过程中承受冲击载荷。上架刚度的大小决定着上架的变形大小, 同时上架的变形又会对车载炮整个起落部分产生影响, 从而影响弹丸起始扰动。

目前, 研究车载炮上架刚度对弹丸起始扰动影响的文献

很少。吴宏等^[1]用均匀设计方法通过回归分析研究随机因素对弹丸起始扰动的影响, 得到影响起始扰动的主要因素及其影响程度。李强等^[2]建立了某大口径轻型牵引炮弹炮耦合全炮动力学参数化有限元模型, 由弹丸起始扰动构建目标函数, 对火炮总体结构参数的影响程度进行灵敏度分析。蔡文勇等^[3]建立了车载火炮多柔体模型, 考虑身管、上架的变形, 研究了各个部件的弹性对火炮射击精度的影响程度。

本研究通过建立车载炮弹炮耦合全炮有限元动力学模型, 研究车载炮上架刚度对弹丸起始扰动的影响, 为车载炮

上架结构设计提供参考。

1 弹炮耦合全炮动力学有限元模型

1.1 弹炮耦合基本假设

弹丸与身管膛线之间的作用机理十分复杂,本研究在建立车载炮弹炮耦合有限元动力学模型时作如下假设^[4-12]:

- 1) 忽略挤进过程,初始状态弹带部分已完全挤入膛线,弹带不受挤进应力作用;
- 2) 弹丸在膛内运动受到摩擦阻力;
- 3) 忽略火药燃气高温对弹带的影响;
- 4) 考虑身管与弹丸所受重力场作用,即考虑身管预弯对弹丸起始扰动的影响。

1.2 弹丸与身管耦合的有限元模型

火炮发射过程中弹丸与身管膛线之间存在着复杂的接触/碰撞,如何建立带膛线的身管与弹丸耦合的有限元模型一直困扰着众多的火炮研究者,随着有限元软件功能的完善,建立带膛线的身管模型已经可以实现。在此,运用 Hypermesh 软件的 SolidMap 技术通过对带膛线身管的几何截面进行旋转扫略得到带膛线身管的有限元模型;根据弹炮耦合基本假设 1) 中忽略弹丸挤进过程,即弹带部分已经完全嵌入膛线,故弹带有限元模型已刻出弹丸挤进过程中形成的刻槽。建立好的带膛线身管与弹丸耦合的有限元模型如图 1 所示

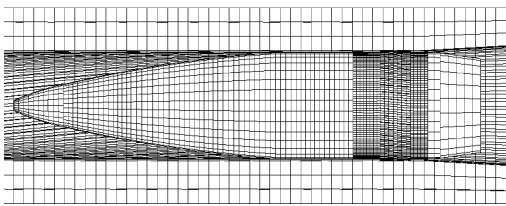


图 1 弹丸与身管耦合的有限元模型

弹丸在膛内受到身管膛线的导转作用,同时还存在着复杂的接触/碰撞问题。本研究通过建立前定心部、弹带与膛线之间的接触关系来模拟弹丸与膛线之间的相互作用关系,并定义前定心部、弹带与膛线之间的法向接触为硬接触。

1.3 弹带材料模型

本研究弹带材料为黄铜,弹丸在膛内运动过程中弹带材料会产生塑性变形,故采用 Johnson-Cook 本构模型进行模拟

$$\sigma_e = [A + B(\epsilon_e^p)^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - T^*m]$$

式中: σ_e 为 von Mises 流动应力; ϵ_e^p 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_e^p / \dot{\epsilon}_0$ 为相对等效塑性应变速率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变速率; A 为弹带材料屈服极限, B 为应变强化系数, C 为应变速率敏感度, m 反映热软化效应, n 反映应变强化效应; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为无量纲温度; T_m 与 T_r 分别为材料的熔点与室温。

将弹带材料本构模型参数如表 1 中所示。

表 1 弹带材料本构模型参数

参量	数值	参量	数值
E/MPa	127 000	m	1.09
A/MPa	90	n	0.31
B/MPa	292	T_m/K	298
C	0.025	T_r/K	1331

1.4 系统模型

根据车载炮三维结构图建立了较为合理的弹炮耦合有限元模型,建立弹带与身管膛线之间的接触关系,模拟弹丸在膛内运动过程,通过调整接触模型参数,计算得到弹丸出炮口轴向速度与实际内弹道修正数据一致。车载炮弹炮耦合全炮动力学有限元模型如图 2 所示,并选用在 0° 方向角、 51° 射角工况下进行分析。

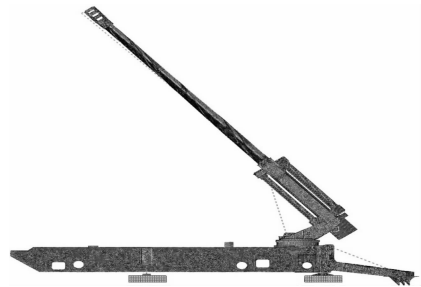


图 2 51° 射角车载炮弹炮耦合全炮有限元模型

车载炮由车架、驻锄、座盘、千斤顶、座圈、上架、摇架、复进机、制退机、炮口制退器、后坐体与弹丸组成。为了提高计算速度,车载炮弹炮耦合有限元模型采用壳单元与实体单元混合建模。炮口制退器、后坐体、弹丸、座圈采用实体单元模拟,摇架、复进机、制退机、上架、车架、驻锄、千斤顶、座盘用壳单元模拟;炮口制退器与后坐体采用绑定的方法进行约束;摇架与身管之间有沿身管轴线方向的平动,其他方向则用导向栓与摇架接触和衬瓦与身管接触加以约束;复进机与制退机采用单轴连接器并编写用户子程序模拟;摇架与上架通过耳轴及液体气压制高平机装置相连,采用施加等效刚度与阻尼的 Axial 连接器来模拟高平机受拉与受压过程,该方法简易可行;上座圈与下座圈之间的连接用施加六自由的等效刚度连接器模拟;运用 Lysmer 简化比拟法建立质量-阻尼-阻尼集总参数模型模拟驻锄与土壤之间的相互作用;千斤顶和座盘与土壤之间的作用关系采用 Drucker Prager 模型进行模拟;车载炮在发射过程中受到重力的作用,弹丸受到火药燃气产生的弹底压力,身管膛壁与膛底分别受到膛壁压力与膛底压力的作用,并将土壤进行全约束固定。

2 上架刚度对弹丸起始扰动的影响

2.1 弹丸起始扰动目标函数

本文拟用弹丸起始扰动来表征车载炮的射击精度,弹丸起始扰动由弹丸质心出炮口时刻的角位移、角速度与速度 3 个变量组成,为了便于研究,对弹丸起始扰动 3 个变量进行加权处理,构建针对弹丸起始扰动的目标函数^[3]

$$f = f_{VD} + f_{HD} \quad (1)$$

其中:

$$f_{VD} = \alpha_1 \left| \frac{\theta_z}{\theta_{z0}} \right| + \beta_1 \left| \frac{\omega_z}{\omega_{z0}} \right| + \gamma_1 \left| \frac{\varphi_z}{\varphi_{z0}} \right|$$

$$f_{HD} = \alpha_2 \left| \frac{\theta_y}{\theta_{y0}} \right| + \beta_2 \left| \frac{\omega_y}{\omega_{y0}} \right| + \gamma_2 \left| \frac{\varphi_y}{\varphi_{y0}} \right|$$

式(1)中: f_{VD} 为竖直方向目标函数, f_{HD} 为水平方向目标函数, θ_z 、 θ_y 为弹丸质心的竖直方向角位移和水平方向角位移, ω_z 、 ω_y 为弹丸质心的竖直方向角速度和水平方向角速度; φ_z 、 φ_y 为弹丸质心的竖直方向速度和水平方向速度; θ_{z0} 、 ω_{z0} 、 θ_{y0} 、 ω_{y0} 、 φ_{z0} 、 φ_{y0} 为相应的弹丸扰动参考值; α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 、 γ_1 、 γ_2 分别为各弹丸参量在归一化函数 f 中所占比值,且 $\alpha_1 + \beta_1 + \gamma_1 + \alpha_2 + \beta_2 + \gamma_2 = 1$ 。

2.2 上架刚度样本方案

刚度是材料或结构在受力时抵抗变形的能力,用来表征材料或结构弹性变形的难易程度,宏观弹性范围内,刚度是物体所受载荷与位移成正比的比例系数,即引起单位位移所需要的力值。

上架刚度与上架的结构尺寸和材料特性有关,本文仅是研究上架刚度变化对弹丸起始扰动的影响,故在已有上架结构情况下通过改变上架板厚的方法改变上架刚度。文献[5]中对上架结构做静力学分析,并以耳轴位移衡量上架刚度。将上架底面固定,通过在上架耳轴处施加水平方向载荷(5×10^4 N)和竖直方向载荷(2×10^5 N)计算得到耳轴中心竖直

方向与水平方向耳轴位移,并对它们进行矢量求和得到耳轴位移值。将耳轴位移看作是上架刚度的逆测度,当位移越大时,则其刚度越小,当位移越小时,则其刚度越大。

对上架板厚做灵敏度分析,得到上架侧板与蒙板对上架刚度变化较敏感,通过增加或减小这些板厚以改变上架刚度,得到上架刚度在一定范围内的样本方案,并将计算结果列于表 2。

在上架耳轴位置施加固定载荷,所以刚度与位移呈反比关系,将表中 14 个方案的耳轴位移做倒数进行比较,并选取方案 5 上架刚度作为上架刚度基准,得到方案 1 至方案 4 上架刚度分别减少 30%、减少 20%、减少 10%、减少 5%,方案 6 至方案 14,上架刚度分别增加 5%、增加 7.5%、增加 10%、增加 20%、增加 30%、增加 40%、增加 50%、增加 60%、增加 70%。

表 2 上架刚度样本

方 案	耳轴位 移/mm	位移倒 数/mm ⁻¹	方 案	耳轴位 移/mm	位移倒 数/mm ⁻¹
1	1.55	0.64	8	0.99	1.00
2	1.36	0.73	9	0.90	1.09
3	1.21	0.82	10	0.83	1.19
4	1.15	0.86	11	0.77	1.28
5	1.09	0.91	12	0.72	1.37
6	1.04	0.95	13	0.68	1.46
7	1.02	0.97	14	0.64	1.55

2.3 上架刚度对弹丸起始扰动的影响

在建立好的车载炮弹炮耦合有限元模型的基础上,将上述 14 个方案的上架结构尺寸进行替换,计算弹丸起始扰动数据,将计算好的数据列于表 3 所示。

表 3 弹丸起始扰动参数

方 案	上架 刚度	竖直方向 角位移/rad	水平方向 角位移/rad	竖直方向角速 度/(rad·s ⁻¹)	水平方向角速 度/(rad·s ⁻¹)	竖直方向速 度/(m·s ⁻¹)	水平方向速 度/(m·s ⁻¹)
1	减小 30%	-0.005 8	0.008 0	26.283	25.945	-3.542	-1.459
2	减小 20%	-0.006 3	0.003 8	-25.500	21.330	3.276	-2.346
3	减小 10%	-0.002 8	0.010 1	28.342	7.314	0.468 0	0.307 0
4	减小 5%	-0.004 9	0.001 7	-24.301	13.940	9.242	2.008
5	基准值	-0.003 2	0.004 7	-14.061	22.089	-6.88 4	0.840 0
6	增大 5%	-0.002 1	0.004 3	-28.001	15.012	0.468 0	1.645
7	增大 7.5%	-0.003 2	0.003 9	-25.485	7.828	0.491 0	2.011
8	增大 10%	-0.001 9	0.006 8	-24.460	18.940	0.936 0	1.045
9	增大 20%	-0.001 4	0.007 7	-32.171	4.210	-7.329	-0.707

表3(续)

方案	上架刚度	垂直方向角位移/rad	水平方向角位移/rad	垂直方向角速度度/(rad·s ⁻¹)	水平方向角速度度/(rad·s ⁻¹)	垂直方向速度度/(m·s ⁻¹)	水平方向速度度/(m·s ⁻¹)
10	增大30%	0.005 4	0.004 9	-32.500	4.465	0.936 0	-2.340
11	增大40%	-0.006 7	0.006 3	-26.012	15.320	4.096	-1.984
12	增大50%	-0.0027	0.010 0	-33.142	13.840	-8.426	-0.731 0
13	增大60%	-0.008 1	0.006 5	-23.243	21.621	-3.542	-2.082
14	增大70%	-0.0134	0.005 0	-27.010	-8.585	-4.795	-3.864

选取上架刚度基准方案、上架刚度减小30%方案、上架刚度增大70%方案3种情况下的弹丸起始扰动参数并绘制其膛内时期运动曲线,如图3~图8所示。

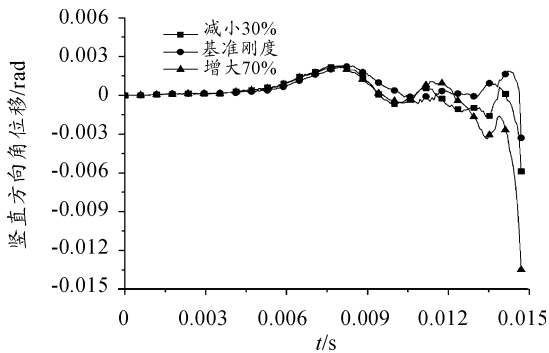


图3 垂直方向角位移

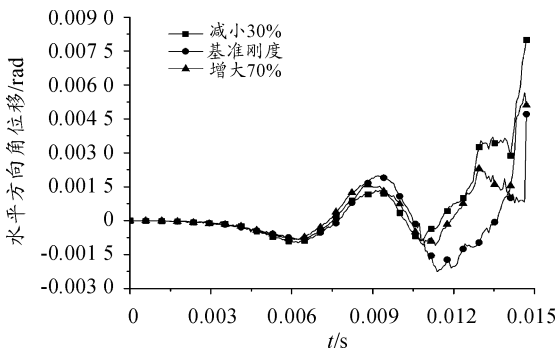


图4 水平方向角位移

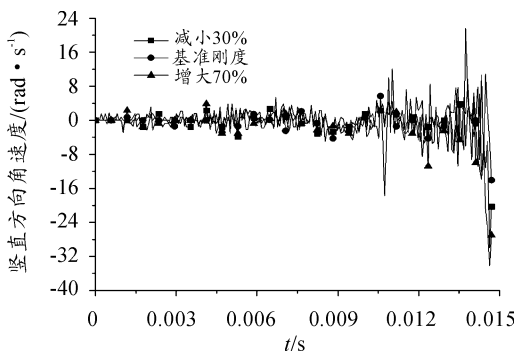


图5 垂直方向角速度

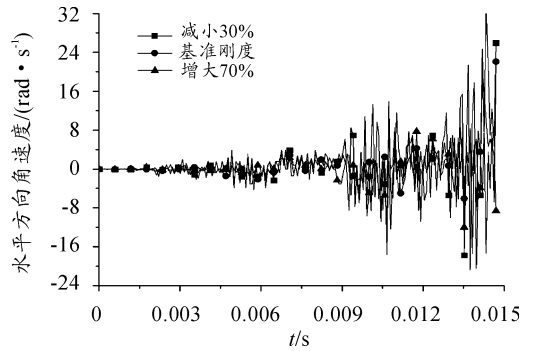


图6 水平方向角速度

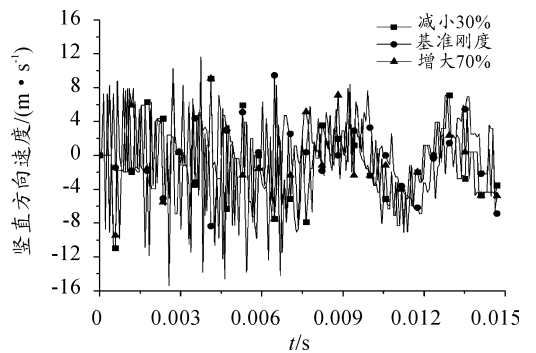


图7 垂直方向速度

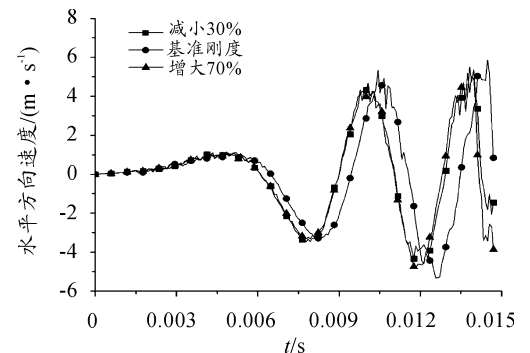


图8 水平方向速度

弹丸膛内运动过程十分复杂。由图3可知,上架刚度增大70%与上架刚度基准值相比,弹丸出炮口时刻的垂直方向角位移明显增大,使弹丸起始扰动增大。由图4可知,上架

刚度减小 30% 与上架刚度基准值相比,弹丸出炮口时刻的水平方向角位移增大,使弹丸起始扰动增大。由图 5 ~ 图 6 可知,弹丸起始扰动竖直方向与水平方向角速度曲线波动大。由于弹丸受到身管预弯与自身重力作用,弹丸竖直方向速度曲线规律不明显。如图 8 所示,弹丸水平方向速度时程曲线围绕着 0 上下波动,表明弹丸与身管接触碰撞,弹丸沿着弹丸质心左右摆动;与上架刚度基准值相比,减小上架刚度 30% 与增大上架刚度 70% 都使得弹丸出炮口时刻的水平方向速度增大,从而增大弹丸起始扰动。

将各方案计算好的弹丸起始扰动参量代入式(1)得到弹丸起始扰动归一化函数 f 值如表 4 所示。

表 3 目标函数 f

上架刚度	目标函数 f	上架刚度	目标函数 f
减小 30%	1.634	增大 10%	1.071
减小 20%	1.413	增大 20%	1.089
减小 10%	1.309	增大 30%	1.342
减小 5%	1.108	增大 40%	1.441
基准值	1.000	增大 50%	1.443
增大 5%	0.982	增大 60%	1.718
增大 7.5%	1.006	增大 70%	2.186

绘制上架刚度与目标函数 f 的曲线如图 9 所示。

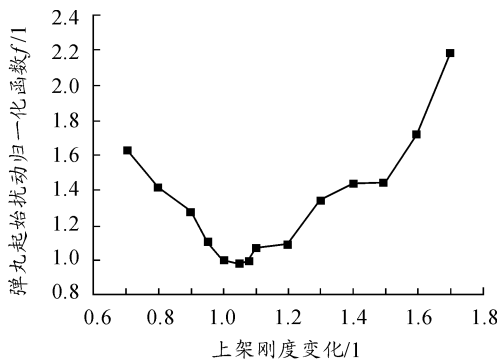


图 9 不同上架刚度下弹丸起始扰动变化曲线

由图 9 可知,本文所建立的车载炮模型中上架刚度与弹丸起始扰动之间呈非线性关系。以上架刚度基准值作为考核标准,随着上架刚度的减小,弹丸起始扰动归一化函数 f 增大。随着上架刚度的增大,弹丸起始扰动归一化函数 f 先减小后增大,即当上架刚度增大 5% 时,弹丸起始扰动归一化函数 f 值为 0.982;当上架刚度继续增大时,弹丸起始扰动归一化函数 f 均大于 1 且上架刚度越大弹丸起始扰动归一化函数 f 越大;得到上架刚度增大 5% 为 14 组刚度样本中的最优刚度。由表 3 数据可知,与上架刚度基准值相比,减小上架刚度 10% 与增大上架刚度 10% 弹丸起始扰动归一化函数 f 值分别为 1.309 与 1.071;同时减小上架刚度 20% 与增大上架刚度 20% 的 f 值分别为 1.413 与 1.089;减小上架刚度

30% 与增大上架刚度 30% 的 f 值分别为 1.634 与 1.342;通过对对比,得到在上架刚度基准值上弹丸起始扰动函数 f 对减小上架刚度更敏感。当上架刚度增大超过 50% 后,随着上架刚度的增大,弹丸起始扰动归一化函数 f 增大,且增大速率更明显。

3 结束语

针对某车载炮上架刚度对弹丸起始扰动影响的问题,在建立的车载炮有限元模型上,通过计算得到本文所建立的车载炮有限元模型中上架刚度与弹丸起始扰动之间的非线性关系。本文所选取的上架刚度样本基准值为上架刚度样本本次优点,上架刚度基准值增大 5% 为上架刚度样本最优点。与上架刚度最优点相比,增大与减小上架刚度都会使弹丸起始扰动增大;上架刚度设计中,上架刚度过小不利于弹丸起始扰动,但上架刚度也不能过大,上架刚度过大也不利于弹丸起始扰动。研究结果对提高车载炮射击精度具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 吴宏,赵有守. 随机因素对弹丸起始扰动影响的分析方法[J]. 火炮发射与控制学报,2001,13(4):64-68.
- [2] 李强,顾克秋,王力. 影响弹丸起始扰动的火炮结构参数灵敏度分析与优化研究[J]. 火炮发射与控制学报,2014,35(4):39-43.
- [3] 蔡文勇,陈云生,杨国来. 车载火炮动力学仿真[J]. 火炮发射与控制学报,2006(4):12-15.
- [4] 葛建立. 车载炮动态非线性有限元仿真研究[D]. 南京:南京理工大学,2007.
- [5] 孙全兆,杨国来,葛建立. 某火炮上架结构改进设计[J]. 兵工学报,2012,33(11):1281-1285.
- [6] 姜沐,郭锡福. 弹丸加速运动在身管中激发的振动[J]. 弹道学报,2002,14(3):57-62.
- [7] 曹宁. 车载炮射击精度分析[D]. 南京:南京理工大学,2012.
- [8] 葛建立,杨国来,陈运生,等. 基于弹塑性接触/碰撞模型的弹炮耦合问题研究[J]. 弹道学报,2008,20(3):103-106.
- [9] 曹宁. 车载式火炮武器总体技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.
- [10] 马吉胜,王瑞林. 弹炮耦合问题的理论模型[J]. 兵工学报,2004,25(1):73-77.
- [11] 刘雷,陈运生,杨国来. 基于接触模型的弹炮耦合问题研究[J]. 兵工学报,2006,27(6):984-987.
- [12] 杨国来,陈运生. 考虑土壤特性的车载榴弹炮射击稳定性研究[J]. 南京理工大学学报,2006,30(4):495-498.