

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2023.04.010

压缩空气发射球形焰火弹仿真分析

金 涌¹, 张祚炜², 朱健平³

(1. 常州大学 石油与天然气工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 北京北方车辆集团有限公司, 北京 100072; 3. 南京骏威创新精工机械有限公司, 江苏 南京 211599)

摘要: 为改善传统焰火的燃烧随机性和提高发射稳定性, 尝试利用压缩空气驱动焰火弹丸来代替传统的火药燃烧驱动发射过程。建立了压缩空气发射球形焰火弹丸的仿真模型和 C++ 计算程序, 模拟了高压气体驱动下球形弹丸在发射管内加速和在空气中自由飞行的过程。研究表明, 建立的模型能够有效反映高压气体驱动球形弹丸的运动特征和规律, 针对直径 50 mm, 质量 105 g 的球形焰火弹, 可以采用 50 mL 初始体积, 弹丸行程 1 m 的发射管, 设置发射角度为 65°, 初始气体压力分别为 2.65 MPa 和 3.85 MPa 时, 焰火弹丸可达 150 m 和 200 m 预定高度。研究结果可为压缩空气驱动球形焰火弹丸发射系统的研发提供有效的理论支撑。

关键词: 压缩空气; 球形焰火弹丸; 等熵流动; 弹道模拟

中图分类号: TH 411

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2023)04-0070-07

Simulation analysis of a spherical firework projectile launched by compressed air

JIN Yong¹, ZHANG Zuowei², ZHU Jianping³

(1. School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Beijing North Vehicle Group Co., Ltd., Beijing 100072, China; 3. Nanjing Junwei Innovation Precision Machinery Co., Ltd., Nanjing 211599, China)

Abstract: To improve the combustion randomness and enhance the launch stability of traditional fireworks, the compressed air was introduced to drive the firework projectile instead of the traditional gunpowder combustion process in this paper. A simulation model and C++ program of the compressed air launching the spherical firework projectile were established to simulate both the acceleration process of the spherical projectile in the barrel and its free flight process in the air. Results

收稿日期: 2023-03-08。

基金项目: 常州大学自然科学基金资助项目(ZMF22020066)。

作者简介: 金涌(1986—), 男, 江苏江阴人, 博士, 讲师。E-mail: kingdeyu@cczu.edu.cn

引用本文: 金涌, 张祚炜, 朱健平. 压缩空气发射球形焰火弹仿真分析[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2023, 35(4): 70-76.

showed that the simulation model can effectively reflect the motion characteristics and laws of the spherical projectile driven by the compressed air. For a spherical firework projectile with a diameter of 50 mm and a mass of 105 g, a barrel with an initial volume of 50 mL and a projectile trip of 1 m can be employed. This spherical firework projectile can reach the desired altitude of 150 m and 200 m, when the launching angle was set at 65° and the initial gas pressure is 2.65 MPa and 3.85 MPa respectively. The research results can provide effective theoretical support for the research and development of the spherical firework projectile launching system driven by compressed air.

Key words: compressed air; spherical firework projectile; isentropic flow; ballistic simulation

在盛大的典礼或表演中,人们经常会燃放焰火产生声光色的娱乐视听效果,烘托节日气氛^[1-2]。为了达到好的视觉表演效果,焰火和礼花弹中填充了大量用于发射以及爆炸的固体火药^[3-4]。其发射方式通常采用黑火药等作为推进剂,利用火药燃烧产生的高温高压气体推动焰火弹丸升空到预定高度,再爆燃抛洒发光剂和发色剂形成预定的美丽图案^[5-6]。引线和固体火药受环境温湿度影响较大,其燃烧过程具有很大的不确定性,导致弹道一致性差,初速和射高均存在较大散布,不利于焰火造型和图案的稳定展现。同时,固体火药燃烧所产生的大量含硫含氮化合物还会对环境造成一定的污染^[7-8]。

目前压缩空气驱动系统已广泛应用于海、陆、空等武器系统领域,包括鱼雷发射、导弹与火箭的冷发射、火箭弹冷发射及无人机弹射等^[9]。压缩空气驱动系统采用常温压缩空气作为工质,发射过程中避免了火工品和含能发射药燃烧的弊端,具有无高温、无有毒有害气体、系统原理简单、通用性好、环境影响小、安全性高、成本低、无污染、发射时间短、能量功率密度较大、发射初始速度一致性高等优点。

压缩空气驱动作用时间很短,气源压力较高,瞬时流量大。压缩空气驱动系统的总体方案选取与内弹道匹配设计是一个技术难点,关系到整个系统的发射性能、发射安全性及发射效率等,是制约压缩空气驱动系统工程化应用的主要因素之一。因此,在压缩空气驱动过程中,针对加速物体的运动规律、气体流动规律及发射装置压力变化规律等内弹道特性的研究十分重要。

文章尝试将压缩空气驱动技术应用到焰火弹发射领域,建立了压缩空气驱动球形弹丸的发射动力学模型,通过数值计算分析了发射过程中的球形弹丸运动参数变化规律。

1 装置结构及工作原理

1.1 装置结构

压缩空气驱动球形焰火弹丸发射装置结构如图1所示,主要由发射身管、活塞杆、密封塞、单向阀、充气阀、泄气阀、储气罐、管路等组成。装置整体为圆柱形单开口结构。单向阀位于活塞杆上,控制气流只能由活塞杆流向高压室,防止反向流动。为了保证装置高压储气室的密封性,还有密封圈等未在图1中标出。

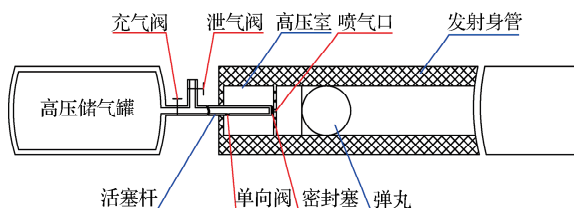


图1 压缩空气驱动发射装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of compressed air launcher

1.2 工作原理

充气阶段: 关闭泄气阀, 打开充气阀, 储气罐内的高压气体通过管路进入活塞杆, 在高压气体的作用力下, 活塞杆向右移动, 当其移动到极端位置时, 活塞杆前端的密封塞紧密贴合喷气口, 将喷气口密封, 气体通过单向阀流向高压室内。当高压室内部压力平衡后, 关闭充气阀。

发射阶段: 打开泄气阀, 使得管路与外界大气连通。活塞杆内的气体迅速排出, 因单向阀作用, 高压气体无法通过单向阀泄放, 由于压差的存在, 高压气体会使活塞杆向左运动, 带动密封塞左移, 喷气口被迅速打开, 高压气体进入发射身管推动弹丸向前运动。

2 计算模型

2.1 内弹道计算模型

膛内高压气体的流动过程是一个复杂的变边界瞬态过程^[10-13]。为了简化模型, 作出如下假设:

1) 发射管内的气体为理想气体, 且气体状态参数在管内均匀分布, 任一时刻均处于热平衡状态;

2) 由于发射过程时间很短, 忽略系统与外界的热交换, 气体膨胀做功过程无摩擦且绝热, 则该过程为等熵过程;

3) 气体沿发射管的流动为一维准定常流动, 且不考虑气体射流对弹丸运动的影响。

建立如图 2 所示的计算模型, 发射管内径为 d , 弹丸质量为 m_{pr} , 初始装填位置为 l , 弹丸行程为 L 。简化整个内弹道过程为一定体积 V_0 内初始压力 p_0 的高压气体膨胀做功过程。发射管内球形弹丸后部的气体初始质量为 m_0 , 满足理想气体状态方程

$$p_0 V_0 = m_0 R T_0 \quad (1)$$

式中: R 为气体常数; T_0 为高压气体的初始温度。

对于一个封闭系统的等熵过程, 有任意时刻, 系统存在关系

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{\gamma-1}, \quad \frac{p}{p_0} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{\gamma}$$

式中: T 为系统温度, K; V 为系统体积, m^3 ; p 为系统压力, Pa; γ 为气体绝热指数, 取 1.4; 下标 0 表示系统初始状态。

则膨胀做功 (W) 可表示为

$$W = \int p dV = \int m_0 R T \frac{dV}{V} = m_0 R T_0 V_0^{\gamma-1} \int_{V_0}^V V^{-\gamma} dV \quad (2)$$

采用距离来表示体积, 则有

$$W = m_0 R T_0 l_0^{\gamma-1} \int_0^x (l+x)^{-\gamma} dx = \frac{p_0 V_0}{1-\gamma} l^{\gamma-1} [(l+x)^{1-\gamma} - l^{1-\gamma}] \quad (3)$$

假设气体膨胀做功转化为弹丸动能的过程中, 次要功系数记为 φ , 则有

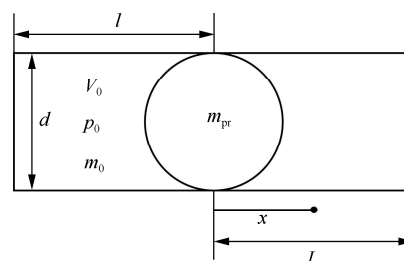


图 2 压缩空气驱动球形弹丸发射计算模型

Fig.2 Launch calculation model of compressed air driving the spherical projectile

$$W=\frac{1}{2}\varphi m_{\text{pr}}v^2 \tag{4}$$

式中 v 为弹丸运动速度。

因此, 弹丸运动速度可表示为

$$v=\sqrt{\frac{2p_0V_0}{\varphi m_{\text{pr}}(1-\gamma)}l^{\gamma-1}\left[(l+x)^{1-\gamma}-l^{1-\gamma}\right]} \tag{5}$$

2.2 外弹道计算模型

假设球形焰火弹飞行过程中作用于弹丸质心的只有重力 G 和空气阻力 f , 在某时刻弹丸速度方向与水平面之间的夹角为 θ , 建立如图 3 所示的球形弹丸飞行轨迹计算模型。

直角坐标系中的弹丸质心运动微分方程组可表示为^[14]

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt}=-C\cdot\Pi(y)F(v)\cdot\cos\theta\frac{\tau_{0N}}{\tau} \\ \frac{dv_y}{dt}=-C\cdot\Pi(y)F(v)\cdot\sin\theta\frac{\tau_{0N}}{\tau}-g \\ \frac{dx}{dt}=v_x \\ \frac{dy}{dt}=v_y \\ \theta=\arctan\frac{v_y}{v_x} \end{cases} \tag{6}$$

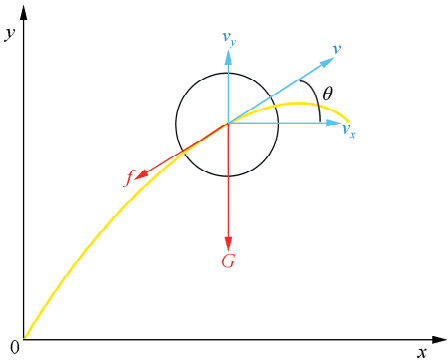


图 3 球形弹丸飞行轨迹计算模型

Fig.3 Flight trajectory calculation model of the spherical projectile

式中: C 为弹道系数, 与弹丸外形和质量有关; $\Pi(y)$ 为气压函数, 与海拔高度有关; $F(v)$ 为空气阻力函数, 一般采用 43 年阻力定律的 $F(v)$; τ_{0N} 为标准气象条件下的地面虚温, 取 288.9 K; τ 为虚温; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s²。

3 仿真分析

基于 Visual C++ 开发平台, 编写上述模型的计算仿真程序, 求解压缩空气驱动球形焰火弹丸的发射过程参数。球形由焰火弹丸含能材料制成, 直径为 50 mm, 其平均密度按照固体发射药平均密度 1.6×10³ kg/m³, 则焰火弹丸质量约为 105 g。主要仿真参数见表 1。

针对直径 50 mm, 质量 105 g 的球形焰火弹丸, 计算标准气象条件下, 不同发射角时的外弹道特征参数。重点考察弹道顶点处的高度 (H)、对应射程 (X) 和达到弹道顶点所需的飞行时间 (t) 3 个关键指标。计算结果见表 2。

表 1 仿真参数

Table 1 Parameters of simulation

参数	数值
发射器口径/mm	50
弹丸质量/g	105
弹丸行程/mm	1 000
发射角/ (°)	60~90
气体常数/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	287.06
绝热指数	1.4

表 2 外弹道计算结果

Table 2 External ballistic calculation results

初始速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	指标	发射角/ ($^{\circ}$)						
		60	65	70	75	80	85	90
60	H/m	108.90	118.80	127.30	134.20	139.40	142.50	143.60
	X/m	108.00	95.45	80.05	62.75	43.20	22.05	0
	t/s	4.70	4.90	5.05	5.20	5.30	5.35	5.20
65	H/m	123.80	134.80	144.40	152.30	158.10	161.70	162.90
	X/m	120.35	106.20	89.65	70.20	48.35	24.65	0
	t/s	5.00	5.20	5.40	5.55	5.65	5.70	5.50
70	H/m	138.80	151.10	161.80	170.60	177.00	181.00	182.40
	X/m	132.80	117.00	98.60	77.65	53.45	27.30	0
	t/s	5.30	5.50	5.70	5.90	6.00	6.05	5.80
75	H/m	154.10	167.60	179.40	189.00	196.20	200.60	202.10
	X/m	144.50	127.75	107.60	84.60	58.25	29.90	0
	t/s	5.55	5.80	6.00	6.20	6.30	6.40	6.05
80	H/m	169.40	184.20	197.10	207.60	215.40	220.20	221.80
	X/m	156.50	138.50	116.45	91.55	63.00	32.35	0
	t/s	5.85	6.10	6.30	6.50	6.60	6.70	6.30
85	H/m	184.70	200.80	214.70	226.10	234.50	239.70	241.50
	X/m	168.00	148.50	125.30	97.90	67.70	34.75	0
	t/s	6.10	6.35	6.60	6.75	6.90	7.00	6.55

一般的焰火升空高度要求为 150 m 和 200 m, 以此指标为基准, 确定焰火弹的发射初始速度和发射角。依照表 2 的计算结果, 绘制不同初始速度条件下的射高随发射角的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 图 4 中的 2 个黑点分别符合发射角固定为 65° 时, 射高分别为 150 m 和 200 m 的技术要求。因此, 确定外弹道起始参数为发射角 65° , 初始速度为 70, 85 m/s, 炮口动能为 257, 379 J。

不同初始速度条件下到达弹道顶点时的射程和飞行时间随发射角的变化曲线, 如图 5 所示。由图 5 可知, 2 种情况下的射程为 117, 149 m, 焰火弹丸的空中飞行时间为 5.50, 6.35 s。

采用内弹道计算程序获得了初始体积为 50 mL 时, 不同初始气体压力下的膛压和速度变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 发射器膛内压力具有相同的衰减趋势。随着初始气体压力的增加, 焰火弹丸的发射初始速度呈线性增长趋势。进一步地, 对初始体积为 100, 50, 20 mL 的情况分别进行了计算, 得到如图 7 所示的计算结果。由图 7 可知, 当初始体积为 100 mL 时, 设定初始速度为 70, 85 m/s 时, 初始压力分别为 1.55, 2.25 MPa。当初始体积为 50 mL 时, 设定初始速度为 70, 85 m/s 时, 初始压力分别为 2.65, 3.85 MPa。当初始体积为 20 mL 时, 设定初始速度为 70, 85 m/s 时, 初始压力分别为 5.75, 8.40 MPa。

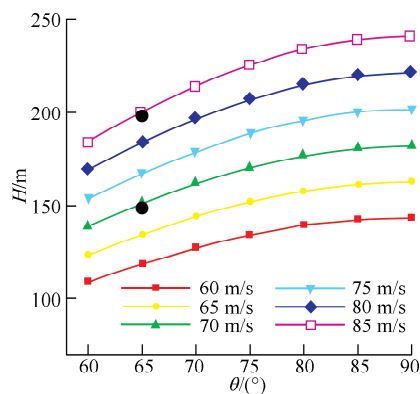


图 4 不同初始速度下的射高变化曲线

Fig.4 Firing height curves with different muzzle velocities

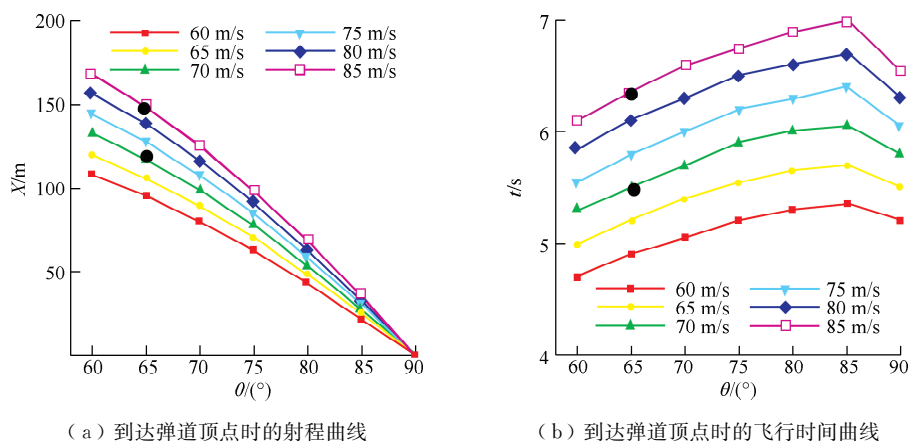


图5 不同初始速度下的射程和飞行时间变化曲线

Fig.5 Range and flight time curves with different muzzle velocities

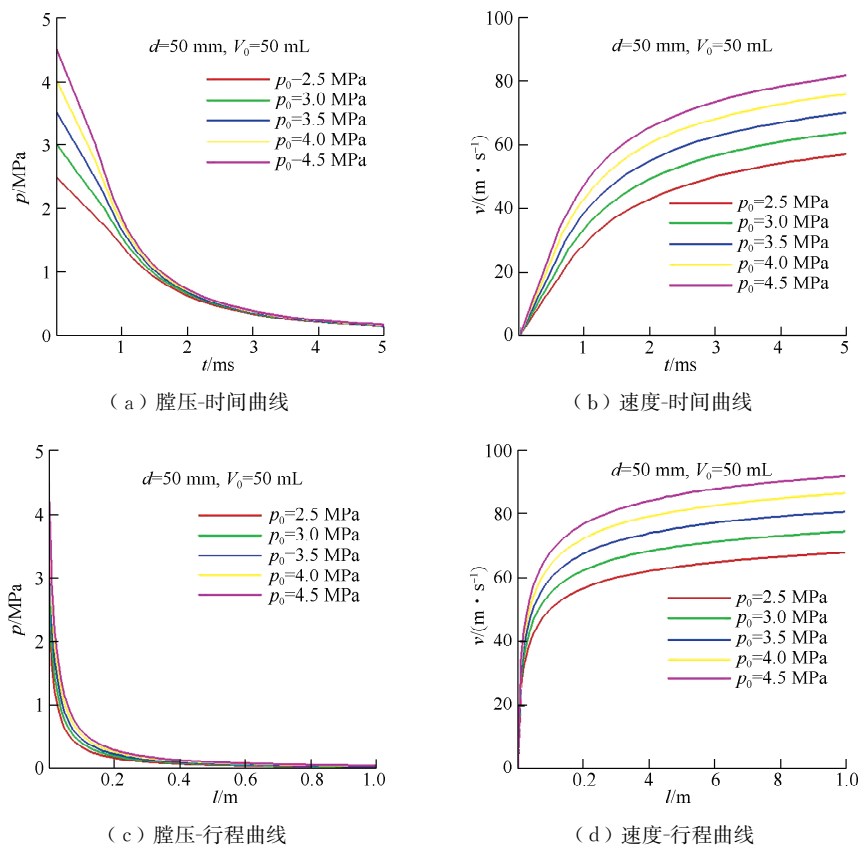


图6 不同初始压力下的膛压和速度变化曲线

Fig.6 Bore pressure and velocity curves with different initial pressures

综合考虑压缩空气驱动结构设计的合理性、可实现性和可靠性,针对口径为50 mm,弹丸行程为1 m,弹丸质量为105 g,初始体积为50 mL,装填位置为42 mm的焰火弹发射系统,选定的系统弹道参数见表3,以满足球形焰火弹丸的有效发射并到达预定发射高度。

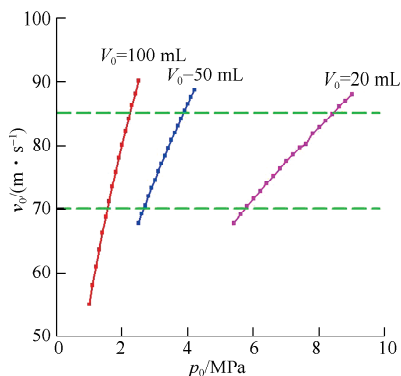


图 7 初始压力和发射初始速度的对应曲线

Fig.7 Correlation curves between the initial pressures and muzzle velocities

表 3 压缩空气驱动球形焰火弹丸的系统弹道参数

Table 3 System ballistic parameters of the compressed air driving spherical firework projectile

发射角/ (°)	p_0 / MPa	v_0 / (m · s ⁻¹)	E_0 / J	H / m	X / m	t / s
65	2.65	70.0	257	151.1	117.00	5.50
	3.85	85.0	379	200.8	148.50	6.35

4 结 论

文章建立了压缩空气驱动球形焰火弹丸的仿真模型和计算程序,对压缩空气发射球形焰火弹的过程进行了仿真分析。研究结果表明:① 所建立的模型能够有效模拟压缩气体驱动球形焰火弹丸的运动规律。② 球形焰火弹丸的发射初始速度与发射管内的初始压力呈线性增长关系,且随着发射管内初始体积的增大而增大。③ 球形焰火弹丸的射高随着发射初始速度的增加而增大,随着发射角的增大而增大;球形焰火弹丸到达弹道顶点时的射程随着发射初始速度的增大而增大,随着发射角的增大而减小;球形焰火弹丸到达弹道顶点的飞行时间随着发射初始速度的增大而增加,受发射角变化影响很小。研究结果为压缩空气驱动球形焰火弹系统弹道总体设计提供了理论依据和仿真模型,将来的研究工作将进一步细化仿真模型,考虑压缩空气膨胀做功过程的热损失,球形弹丸加速运动过程中与管壁的摩擦损耗等。

参考文献:

- [1] 尤秀. 电子芯片在焰火燃放技术中的应用[J]. 科技创新导报, 2019, 16(26): 110-111.
- [2] 陈蕾. 大型焰火燃放中存在的安全问题及解决对策探讨[J]. 科技资讯, 2019, 17(14): 176-177.
- [3] 左仲华, 丁功勋, 万彦里. 关于公安机关大型焰火燃放活动安全监管的思考[J]. 花炮科技与市场, 2018, 24(2): 50-52.
- [4] 厚美瑛. 焰火背后的科学[J]. 物理, 2019, 48(1): 33-35.
- [5] 程龙, 刘攀, 杨洪涛, 等. 低压环境下高密度压实黑火药柱燃速规律研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(2): 290-295.
- [6] 刘玲, 龙敏, 谭程鹏. 烟花爆竹用黑火药燃烧危险性实验研究[J]. 中国安全生产, 2020, 15(1): 54-55.
- [7] 张光辉, 邱丽娜. 一种无硫烟花发射药的开发及应用研究[J]. 火工品, 2017(5): 58-60.
- [8] 李娟, 刘玲. 烟花爆竹用爆响剂的发展研究[J]. 科技风, 2020(18): 196-197.
- [9] 赵芳, 王太江, 陈钦, 等. 压缩空气弹射在武器系统中的应用综述[J]. 现代防御技术, 2021, 49(5): 95-103.
- [10] 庞博, 尚彬彬, 张佳俊, 等. 阀控气体炮内弹道建模及实验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(9): 51-53.
- [11] 闫文哲, 李强, 曲普, 等. 气体炮内弹道建模与实验研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2021, 42(4): 87-90, 96.
- [12] 周鹏, 曹从咏, 董浩. 高压气体发射装置内弹道特性及膛口流场分析[J]. 兵工学报, 2016, 37(9): 1612-1616.
- [13] 赫雷, 尚兴超, 周克栋, 等. 一种压缩空气驱动武器发射过程动力学分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(21): 202-206.
- [14] 钱林方. 火炮弹道学[M]. 2版. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.

(责任编辑:谭晓荷)