

远程高速弹丸目标运动及红外辐射特性研究与应用

王 成, 蒋立民, 蒋汉元

(中国人民解放军 91245 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 针对光学测量装备在远程高速弹丸目标跟踪测量过程中存在的跟踪测量难题, 对弹丸目标的运动特性、红外辐射特性进行了研究分析, 采用计算机仿真飞行弹道曲线、飞行表面温度随时间的变化曲线, 得到给定条件下目标辐射度随时间的变化曲线, 获得了满足试验测量需求的弹丸目标特性; 通过仿真测量和半实物仿真测量等方式将研究成果应用于试验工程, 在弹丸测量方案制定、装备跟踪性能评估等方面发挥重要作用, 提高了试验成功率; 研究成果可推广应用于其他类型目标的测试测量试验, 具有较好的实用价值。

关键词: 弹丸目标; 目标特性; 测量

Research and Application of Target Motion and Infrared Radiation Characteristics of Long-range High Speed Projectile

Wang Cheng, Jiang Limin, Jiang Hanyuan

(Unit 91245 of PLA, Huludao 125001, China)

Abstract: In view of the range optical measurement equipment in the remote high-speed projectile target tracking problem existing in the measurement process, the movement characteristics of target of the projectile and the infrared radiation characteristics are analyzed, by using the computer simulation curve and surface of flying projectile flight trajectory with time, get under the condition of a given target radiation changing with time curve, obtained meet the demand of tracking measurement range projectile target features. Through the simulation measurement and hardware-in-the-loop simulation measurement of the shooting range it is applied to the special test so the shooting range. It plays an important role in the formulation of projectile measurement scheme and the evaluation of equipment tracking performance, and improves the success rate of tracking measurement. The research results can be extended to the tracking measurement of other types of targets and have good practical value.

Keywords: projectile target; target characteristics; measurement

0 引言

随着新型炮弹及其发射平台技术的发展^[1], 射程超过 100 公里, 速度达到 2 km/s 以上的弹丸类高速小目标^[2-4]成为武器装备试验鉴定的重要任务, 给试验鉴定的方法与测量装备带来了全新的挑战。对试验鉴定中的光学测试测量装备来说, 要完成目标的跟踪和外弹道测量任务, 首先要了解掌握被测目标的空间运动特性和红外辐射特性, 计算评估装备的跟踪能力, 研究合理的航路规划和装备布站, 从而制定出有效的跟踪测量方案。目前, 针对远程高速弹丸目标运动特性、红外辐射特性的研究近乎空白, 在超过 100 公里的弹道航路中布站多台冗余测试测量装备和采取多次目标射击获取目标特性参数的方式来验证测量方法、方案, 显然不切实际。因此, 开展远程高速弹丸目标运动特性和红外辐射特性针对性研究, 将研究成果转化到测量实践应用中, 对新型武器装备试验鉴定工作意义重大。

1 弹丸目标特性研究

目标飞行弹道中的运动特性、红外辐射特性是影响光学测试测量装备捕获跟踪目标的主要因素, 因此, 重点就远程高速弹丸的空间运动和红外辐射特性开展目标特性研究。

1.1 运动特性

新型远程高速弹丸与传统弹丸的主要区别在发射初速度上, 其出膛后的运动特性与传统枪炮类似, 为此可采用传统的弹道微分方程建立新型高速弹丸的外弹道模型^[5-6]。建立以弹丸发射时出膛位置为原点的发射坐标系, 其中 x 轴为射向面与原点所在平面的交线, 射击方向为 x 轴正方向, y 轴位于射向面内, 过原点切垂直 x 轴的直线, 地球引力反方向为 y 轴正方向, z 轴依据右手法则确定, 如图 1 所示。由于弹道微分方程组对多种参数和初始条件依赖性大^[7], 为便于研究, 简化弹丸运动状态, 将弹丸目标作为轴对称几何体, 并适当做一些假设条件来研究目标运动。

收稿日期:2021-03-27; 修回日期:2021-04-26。

作者简介:王 成(1983-),男,湖北枣阳人,工程师,主要从事测控技术方向的研究。

引用格式:王 成,蒋立民,蒋汉元. 远程高速弹丸目标运动及红外辐射特性研究与应用[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(6):136-141.

假设弹丸目标在空间飞行过程中处于标准的无风雨气象条件, 且弹丸飞行过程中只受地球引力和大气阻力作用, 如图 1 所示, 弹丸在空间飞行过程中, 在某一时刻 t 对应的射向速度为 v_t , v_t 与大气阻力方向相反, 且该时刻 v_t 与 x 轴夹角为 θ , 可以求得水平速度 v_x 与垂直速度 v_y , 如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} v_x = v_t \sin\theta \\ v_y = v_t \cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

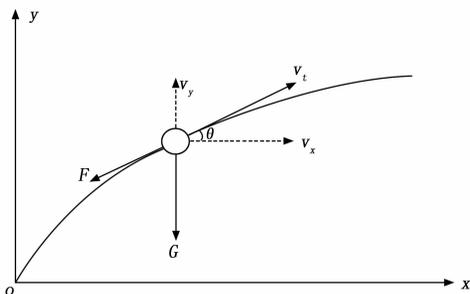


图 1 弹丸受力分析

由图 1 所示, 弹丸在空中飞行过程中, 根据研究过程假定的受力考虑, 弹丸受到一个与射向反方向的阻力, 这里用 F 表示, 产生的阻力加速度用 a 表示; 同时还受到地球引力作用, 这里用 G 表示, 产生的引力加速度用 g 表示, 可建立以时间为自变量的质心运动方程组, 方程组如下:

$$\begin{cases} a_x = \frac{\pi i d^2}{8m} \rho_{om} v_t^2 C_{om}(Ma) \\ \frac{\partial v_x}{\partial t} = -a_x \cos\theta \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} = -a_x \sin\theta - g \\ \frac{\partial y}{\partial t} = v_y \\ \frac{\partial x}{\partial t} = v_x \\ v_t = \sqrt{v_y^2 + v_x^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, i 为弹形系数 (由特定弹丸型号确定); d 为弹丸直径 (由特定弹丸型号确定); ρ_{om} 为标准气象条件的地面空气密度 (一般为 1.206 kg/m^3); Ma 为马赫数 ($Ma = v_t/u_a$, u_a 为声速); g 为重力加速度; C_{om} 为标准弹的阻力系数。

传统的近程弹炮试验在建立外弹道模型时, 空气密度函数可用经验公式表示^[8]。对于远程高速弹丸, 其飞行过程可能达到对流层以上的高度, 因此应考虑不同高度下空气密度的变化, 准确地计算高速弹丸所受的空气阻力。本文所建立弹道模型中的环境因素基于我国标准大气表 (30 km 以下部分) 和 1976 年美国标准大气表 (30~80 km 部分) 计算随高度变化的空气密度。沿用 43 年空气阻力定律确定弹丸的阻力系数, 43 年空气阻力定律曲线如图 2 所示。

1.2 红外辐射特性

空间目标飞行过程中的表面温度可反映出其红外特性状态^[9]。远程高速弹丸空间飞行过程中太阳辐射、目标自身辐射、地面辐射及气动对流换热等外部环境热作用直接

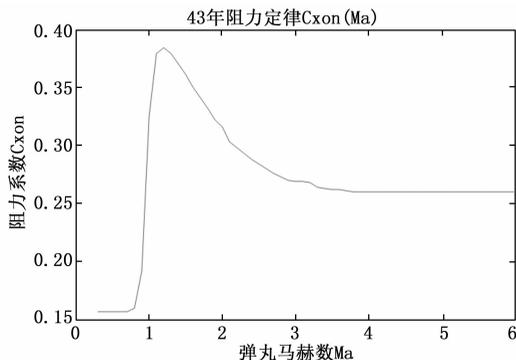


图 2 43 年阻力定律曲线图

影响其表面温度^[10-12]。研究过程中设定空间环境为弹丸提供的环境辐射热量为 Q_e , 弹丸飞行中气动对流换热产生热量为 Q_w , 根据能量守恒定律可得到下式:

$$Q_e + Q_w - \varepsilon\sigma(T^4 - T_e^4) = mc \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

式中, ε 为弹丸表层材质发射率; σ 为玻尔兹曼常数; T 为弹丸表面温度; T_e 为空间环境温度; m 为弹丸的质量; c 弹丸表层比热。

远程高速弹丸以 4 倍音速以上速度在大气中飞行时, 其与空间中的气体产生高速摩擦, 加热弹丸表面使其表层温度升高。此时, 大气与弹丸表层相切处的温度可根据下式求得。

$$T_0 = T(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2) \quad (4)$$

式中, T_0 为切点处温度; T 为环境温度; k 为空气绝热指数数值。

高速飞行的弹丸弹体温度变化还应考虑弹体壁温和绝缘壁温度^[13-14]。根据目标空间运动特性方程, 在知道特定弹丸 t 时刻的速度 v_t 情况下, 即可根据下式求得绝缘壁温度。

$$T_{aw} = T \left[1 + r \frac{k-1}{2} \left(\frac{v_t}{u_a} \right)^2 \right] = T \left[1 + \sqrt{P_r} \frac{k-1}{2} \left(\frac{v_t}{u_a} \right)^2 \right] \quad (5)$$

式中, T_{aw} 为绝缘壁温度; P_r 为普朗特数; r 为温度恢复系数, 取值要区分层流空气与湍流空气。

弹丸在空气中高速飞行过程中, 弹丸表层与大气气流间的热量流向取决于弹体壁温 T_w 和绝缘壁温度 T_{aw} 的大小^[15], 当 $T_w > T_{aw}$ 时, 热量传递给空间气体, 当 $T_w < T_{aw}$ 时, 热量传递给弹丸表层。具体热量交换可根据下式对流换热的准则方程表达:

$$N_u = \begin{cases} 0.664 R_e^{1/2} P_r^{1/3}, & \text{层流状态} \\ 0.036 R_e^{1/5} P_r^{1/3}, & \text{湍流状态} \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 中, N_u 为努谢尔特数; R_e 为雷诺数。

$$N_u = \frac{\alpha x}{\lambda} \quad (7)$$

$$R_e = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (8)$$

式 (7) 中, α 为换热系数; x 为目标特征长度; λ 为流

体导热系数。

式 (8) 中, ρ, ν 分别为空气在参考温度下的密度和粘度; v 为空气速度, 也就是飞行弹丸的速度; L 为目标物体的特征长度。如果知道弹丸的飞行速度 v , 即可得到雷诺数与时间的函数 $R_e(t)$ 。

$$a = \frac{q_w}{T_w - T_{aw}} \quad (9)$$

式 (9) 中, q_w 为热流密度。

结合热平衡微分方程 (3), 得到弹丸表面温度 T_w 与时间的函数关系, 即可得到飞行弹丸表面温度分布随时间的变化。

当 $R_e < 10^5$ 时:

$$cm \frac{\partial T_w}{\partial t} = \varepsilon \sigma (T_e^4 - T_w^4) + \frac{0.664\pi LR_c^{1/2}(t) P_r^{1/3} \lambda (T_{aw} - T_w) + Q_e}{x} \quad (10)$$

当 $10^5 \leq R_e < 10^7$ 时:

$$cm \frac{\partial T_w}{\partial t} = \varepsilon \sigma (T_e^4 - T_w^4) + \frac{0.036\pi LR_c^{4/5}(t) P_r^{1/3} \lambda (T_{aw} - T_w) + Q_e}{x} \quad (11)$$

2 弹丸目标特性仿真

2.1 运动特性仿真

根据弹丸目标运动特性的研究, 通过合理假设, 将远程高速弹丸作为均衡质点分析弹丸目标的相关参数, 对远程高速弹丸的典型飞行弹道进行仿真, 具体过程如下。

仿真中规定: 弹丸出膛后重新落回到炮口水平面上的一点为落点, 用 C 表示, 显然 $y_c = 0$ 。落点到炮口的水平距离叫全射程 x_c , 至落点的飞行时间叫全飞行时间 t_c , 弹丸在该处的速度为落速 v_c , v_c 与水平面的夹角叫落角 θ_c 。弹道上最高点叫弹道顶点, 以 S 表示, 相应的弹道高称为最大弹道高 y_s 。直角坐标系的弹丸质心运动方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -CH(y)G(v, c_s)v_x \\ \frac{dv_y}{dt} = -CH(y)G(v, c_s)v_y - g \\ \frac{dx}{dt} = v_x \\ \frac{dy}{dt} = v_y \\ \frac{dp}{dt} = -\rho g v_y \end{cases} \quad (12)$$

式中, $M_a = \frac{v}{c_s}, v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, c_s = 20.047\sqrt{\tau}, H(y) = \frac{\rho}{\rho_m}, R_1 = 29.27, \rho = \frac{p}{R_1\tau}, G(v, c_s) = 4.737 \times 10^{-4} c_{som}(M_a)v$, 弹道系数 $c = id^2 \times 10^3/m$ (i 为弹形系数, d 为弹丸直径, m 为弹丸质量)。积分起始条件为 $t = 0$ 时, $x = 0, y = y_0, v_x = v_0 \cos\theta_0, v_y = v_0 \sin\theta_0, \rho = \rho_m (v_0$ 为初速, θ_0 射角, $\rho_m = 1.206 \text{ kg/m}^3$)。

采用标准气象条件:

气压: $p_m = 1\ 000 \text{ hPa}$; 气温: $t_m = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; 密度: $\rho_m = 1.206 \text{ kg/m}^3$; 地面虚温: $\tau_m = 288.9 \text{ K}$; 相对湿度: $\varphi = 50\%$; 声速: $c_{som} = 341.1 \text{ m/s}$; 无风; 密度函数 $H(y)$ 在 $y < 10\ 000 \text{ m}$ 时采用经验公式^[8]:

$$H(y) = (1 - 2.1904 \times 10^{-5} \times y)^{4.4} \quad (13)$$

阻力函数 $G(v, c_s)$ 中阻力系数 $c_{som}(M_a)$ 采用 43 年阻力定律。得到运动特性仿真结果以 100 km 和 140 km 射程弹道为例如下。

2.1.1 弹丸 100 km 弹道仿真

仿真过程中设定弹丸初始速度 2 000 m/s, 炮口海拔高度为 10.0 m, 弹形系数取 0.45, 高低攻角和侧向攻角均为 0° 时, 得到仿真弹道如图 3 所示。

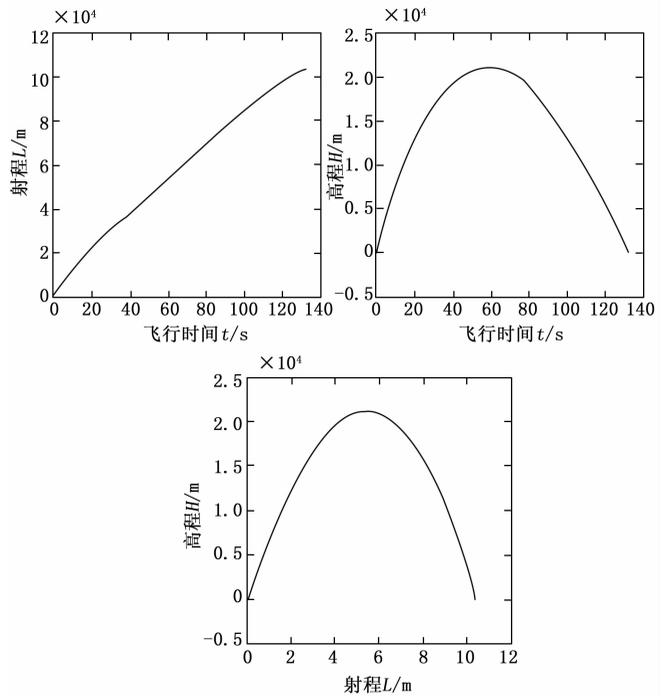


图 3 弹丸 100 km 射程仿真弹道曲线

2.1.2 弹丸 140 km 弹道仿真

仿真过程中设定弹丸初始速度 2 300 m/s, 炮口海拔高度为 10.0 m, 弹形系数取 0.45, 高低攻角和侧向攻角均为 0° 时, 得到仿真弹道如图 4 所示。

2.2 红外辐射特性仿真

2.2.1 弹丸表面温度变化仿真

利用前文 1.2 研究结果, 对飞行弹丸表面温度进行仿真。过程中利用式 (10)、(11) 中的微分方程, 设定初始条件弹丸质量 $m = 9.0 \text{ kg}$, 弹丸长 $L = 0.7 \text{ m}$, 弹丸初始温度 $T_{aw} = 350 \text{ K}$, 环境温度 $T_e = 288 \text{ K}$, 空气导热系数为 0.002 5。

首先, 通过仿真分析弹丸表面温度与飞行时间以及表面温度和飞行速度的关系曲线, 如图 5 所示。

仿真结果表明, 高速弹丸在出膛后 1~2 s 内表面温度急剧上升到最高点。在远程弹道中, 弹丸表面温度达到最高点转入指数下降后又转为平缓下降后略有升高再下降

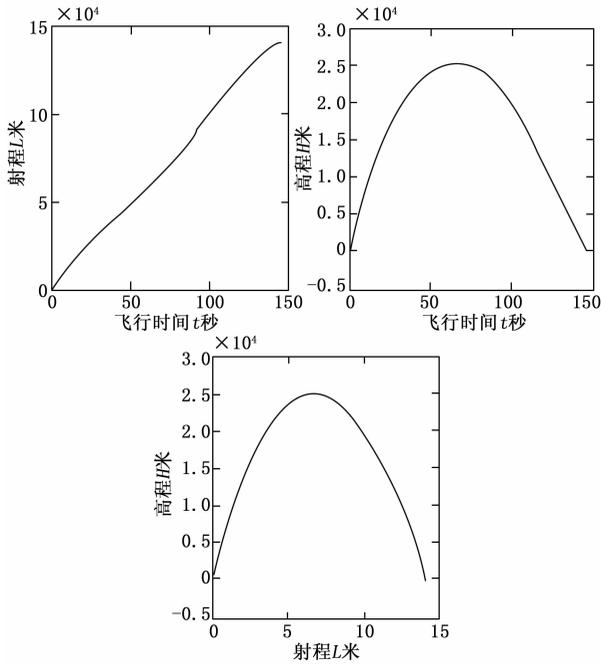


图 4 弹丸 140 km 射程仿真弹道曲线

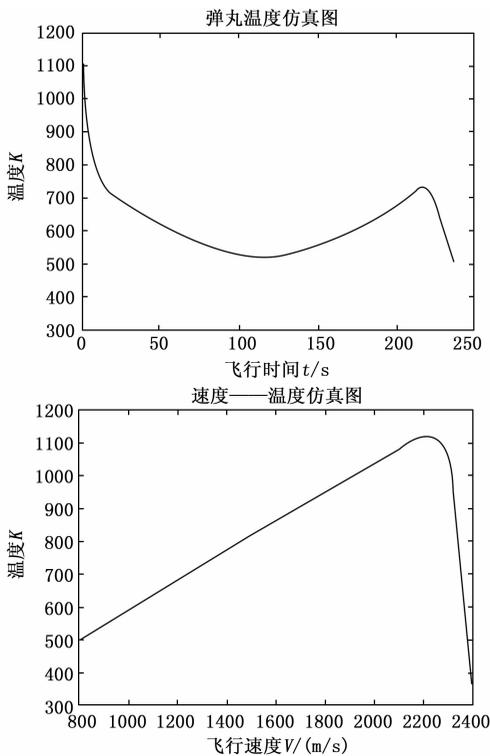


图 5 远程飞行弹道弹丸温度仿真曲线

的过程。表 1 列出了远程弹丸速度与表面温度分布的典型状态点。

其次, 仿真分析弹丸初速度对飞行弹丸温度分布的影响。在相同环境下发射弹丸, 当弹丸初速分别为 1 000, 1 500, 1 800 和 2 200 m/s 时, 其最大表面温度分别为 535.53, 750.27, 877.36 和 1 038.9 K, 如图 6 所示。仿真结果表明弹丸的初速越大, 其表面温度越高。

表 1 弹丸速度与表面温度典型状态点

时间 t/s	速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	表面温度 T/K	备注
0.64	2 226.9	1 119.4	温度最高点
11.4	1 376.6	760.5	温度拐点
115.8	873.7	522.8	温度拐点
216.9	1 314.1	728.5	温度拐点
237.68	800.7	501.6	温度最低点

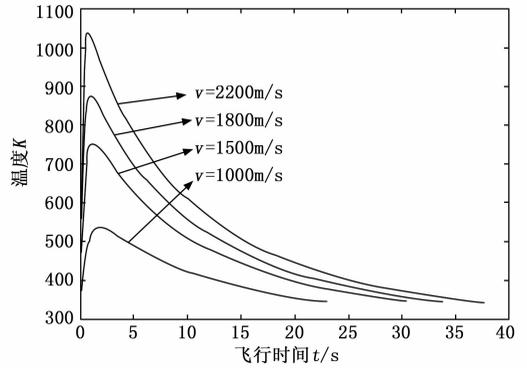


图 6 不同发射速度下弹丸表面温度分布图

2.2.2 弹丸表面辐射仿真

对飞行中的弹丸表面辐射特性进行仿真, 主要是通过已知或给定的相关参数条件下, 利用普朗克定律根据下式来求得弹丸目标表面层辐射度, 来实现仿真。

$$M_{\lambda} = \epsilon_g \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp(\frac{c_2}{\lambda T_w}) - 1} \quad (14)$$

式中, c_1 、 c_2 分别为第 1、第 2 辐射常数; ϵ_g 为弹丸材料的辐射系数; λ 为辐射波长; T_w 为弹丸表面温度。仿真过程中设定仿真条件为: c_1 第一辐射常数, 其值为 $3.742 \times 10^{-16} \text{ w} \cdot \text{m}^2$; c_2 第二辐射常数, 其值为 $1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, ϵ_g 为弹丸的辐射系数, λ 为辐射波长; T_w 为弹丸表面温度。设定弹丸初速为 2 400 m/s, 初始高度为 10 米, 弹丸的表面温度主要在 400~1 100 K 之间, 其辐射出射度随波长变化的曲线, 如图 7 所示。

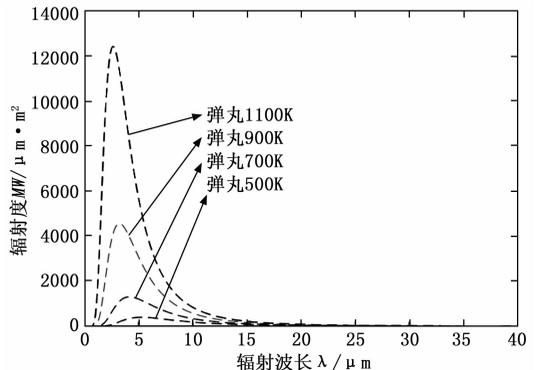


图 7 弹丸不同温度下辐射仿真

从仿真结果看, 弹丸发射约 0.5 s 后, 温度急速上升到

最高值约 1 100 K，出现弹丸烧蚀^[16-17]现象，辐射中心波长约为 3~8 μm。弹丸烧蚀、高速气流散热让弹丸温度逐渐下降约 600 K，直到烧蚀结束，气动加热与高速气流散热达到动热平衡，由于速度较大，气动加热作用较强，弹丸温度再次升高，辐射中心波长约为 3~8 μm，温度 > 600 K 持续时间大于 160 s，便于中波红外装备发现及跟踪测量。随着速度的减小，气动加热降低，高速气流换热增加，弹丸表面温度逐渐下降，在 200~230 s 从 600 K 降至 500 K 左右，辐射中心波长约为 4~10 μm，辐射强度大大降低，严重影响中波红外装备对弹丸的跟踪测量。在弹丸飞行的落点弹丸仿真温度约 500 K，辐射中心波长约为 4~12 μm，辐射强度很低，中波红外低空水平大气透过率降低，对弹丸末段的跟踪测量难度较大。

3 研究成果应用

根据弹丸运动特性及红外辐射特性的研究结果，可构建特定弹丸的运动模型和光学特性模型，结合光学测量装备理论性能指标开展的仿真测量，仿真测量可对测量装备操作人员进行跟踪训练，也可利用仿真测量来验证实际任务测量方案、评估装备性能，进行装备建设论证等。

3.1 在测量方案验证方面应用

应用过程为：1) 根据特定弹丸的光学特性利用仿真建模技术构建弹丸红外特性模型；2) 根据特定弹丸的运动特性构建弹丸运动轨迹模型；3) 利用计算机仿真技术构建与试验区域相一致的虚拟空间；4) 依据初步测量方案、实际装备理论性能结合构建的弹丸特性模型在虚拟空间内开展仿真跟踪测量；5) 根据仿真跟踪测量情况修改完善初步测量方案，形成二次方案；6) 依据二次测量方案，利用构建的弹丸模型结合实际光学装备开展半实物仿真跟踪测量，对二次方案进行验证完善，并形成最终测量方案。测量方案仿真验证过程如图 8 所示。

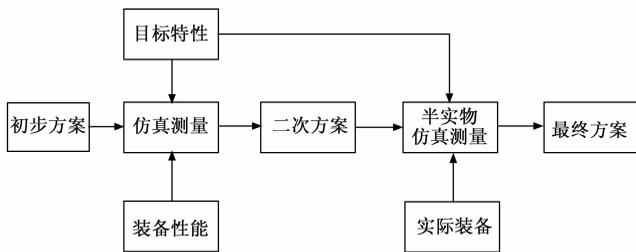


图 8 测量方案验证过程示意图

3.2 在装备训练与性能评估方面应用

应用过程为：1) 根据特定弹丸的光学特性利用仿真建模技术构建弹丸红外特性模型；2) 根据特定弹丸的运动特性构建弹丸运动轨迹模型；3) 利用实装训练系统实现仿真目标、仿真弹道与实际装备结合，依据测量方案开展实装仿真跟踪测量，过程中实现对装备操作人员的实际操作训练；4) 根据仿真跟踪过程和实际装备性能指标，对装备实际性能做出分析评估。应用过程如图 9 所示。仿真测量显示效果如图 10 所示，半实物仿真测量显示效果如图 11 所示。

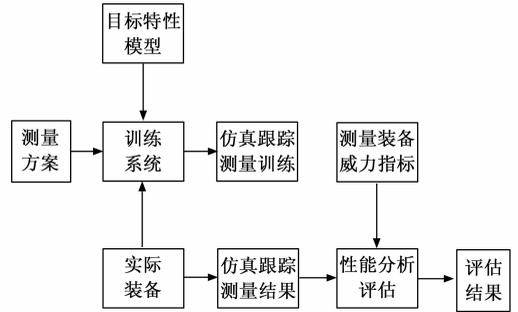


图 9 装备训练与性能评估过程示意图

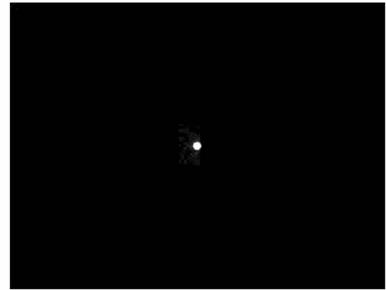


图 10 仿真跟踪测量

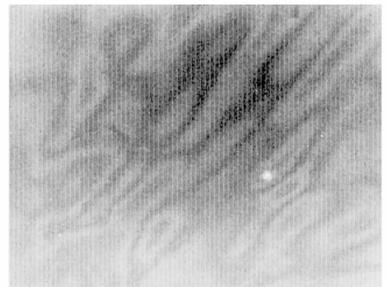


图 11 半实物仿真跟踪测量

3.3 在装备论证建设方面应用

目前光学测试测量装备主要使用的传感器有中波红外相机（响应波段 3.7~4.8 μm）、高速短波红外相机（响应波段 0.9~1.7 μm）和可见光相机（响应波段 0.4~1.0 μm）^[18]。图 8 的高速弹丸的辐射特性仿真结果表明，波长在 0~1.5 μm 时，不同温度下的辐射出射度均很小，接近于零，对应的可见光和短波探测器难以发现目标^[19]；波长在 3~5 μm 时，高速弹丸在不同温度情况下辐射出射度均具有较大值，中波红外相机可以接收到辐射波长信号；波长在 8~12 μm 时，目标表面温度进入 500 K 以下区间，弹丸辐射出射度强度和 3~5 μm 基本相同，且积分时间更长，长波红外相机也可接收辐射波长信号^[20-21]。可据此仿真结果论证建设满足新型高速弹丸武器装备鉴定试验测试需求的光学测量装备。

4 结束语

通过对远程高速弹丸目标运动特性及红外辐射特性的研究分析，利用计算机仿真方式仿真了远程高速弹丸目标的飞行弹道曲线、飞行表面温度随时间的变化曲线，得到

给定条件下远程高速弹丸目标辐射度随时间的变化曲线, 获得了满足试验测量需求的弹丸目标特性, 对解决光学装备跟踪测量高速小目标的难题具有重要意义。在此基础上, 利用计算机仿真技术构建了特定弹丸目标的运动特性模型和光学特性模型, 实现了特定弹丸目标的仿真测量与半实物仿真测量, 应用效果表明, 对装备操作人员具有较大的训练价值, 解决了以往靠传统经验制定测量方案、靠实际跟踪检验测量方案的问题, 提高了测量试验成功率; 通过仿真测量还能够对测量装备的跟踪性能做出分析评估, 给出装备参试布站及装备建设论证等建议。研究成果可推广至其他类型目标的跟踪测量试验中, 具有较强的实用价值。

参考文献:

- [1] US Navy. Navy rail gun test Dalgren, VA. 2006&2008 [EB/OL]. [2016-04-01]. http://www.eugenelesslover.com/VIDEOS/Rail_Gun.html
- [2] Lehmann P. Overview of the electric launch activities at the French-German research institute of Saint-Louis (ISL) [J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2003, 39 (1): 24-28.
- [3] Schneider M, Liebfried O, Stankevici V. Magnetic diffusion in railguns: measurements using CMR-based sensors [A]. 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology [C]. Victoria, Canada, 2008: 239-244.
- [4] Walls W A, Eweldon W, Pratap S B. Application of electromagnetic guns to future naval platforms [J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2000, 32 (1): 634-642.
- [5] 乔志明, 等. 电磁轨道炮关键技术与发展趋势分析 [J]. 火炮发射与控制学报, 2016 (6): 1673-6524.

(上接第 82 页)

析, 其误差在静力加载的允许误差范围内, 满足静力加载试验的单通道或多通道同步控制需求。对于多通道独立控制, 在 FPGA 上需独立完成加载谱的寄存和实时解析功能, 同时不同通道载荷步的切换与更新互不干扰, 生成的加载谱与位控和力控的 PID 控制算法相配合, 以实现静力加载控制器的试验验证。

参考文献:

- [1] 魏生道. 结构静力试验技术 [M]. 北京: 宇航出版社, 1991.
- [2] 刘 博, 王有杰, 侯京锋, 等. 多通道静力协调加载系统 [J]. 四川兵工学报, 2014, 35 (3): 126-129.
- [3] 张梦妍. 面向航天实验的多通道静力加载控制系统的设计与实现 [D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [4] 任建新, 余乐咏, 张 鹏. 基于 FPGA 的高精度信号发生器的实现与优化 [J]. 测控技术, 2011, 30 (1): 13-16.
- [5] 黄聚永, 袁慧梅, 吴向阳, 等. 基于查找表和 Newton 插值算法的正余弦函数的 FPGA 实现 [J]. 继电器, 2007, 35 (16): 33-36.

- [6] 刘 恋. 电磁轨道炮系统的建模与仿真研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 8-33.
- [7] 谢杨柳. 电磁轨道炮外弹道建模与仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 6-16.
- [8] 韩子鹏, 等. 弹箭外弹道学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- [9] 李翰山, 袁朝辉, 等. 探测光幕的高速弹丸红外辐射信号获取研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010 (3): 616-618.
- [10] 杨逢春. 飞行弹丸红外辐射测量的仿真与实验研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2014: 10-16.
- [11] 郑鹏飞, 张 合, 等. 飞行弹丸头部温度场研究 [J]. 南京理工大学学报, 2013 (2): 133-138.
- [12] 吕月迎. 飞行弹丸红外辐射特性模拟测试研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2013: 7-32.
- [13] 贺元兴, 张浩元, 等. 空中目标红外辐射强度计算通用模型及其应用 [J]. 光学学报, 2019, 39 (6): 182-187.
- [14] 张 俊, 刘荣忠, 等. 飞行弹丸表面温度的两种数值计算方法 [J]. 南京理工大学学报, 2013 (8): 585-589.
- [15] 杨 威, 邵晓鹏, 等. 飞行弹丸表面温度场的理论计算 [J]. 西安电子科技大学学报, 2001 (5): 651-654.
- [16] 王中原, 史金光. 超高速飞行弹箭气动烧蚀数值模拟研究 [J]. 南京理工大学学报, 2003 (5): 595-602.
- [17] 李铁鹏, 史金光. 高超声速弹箭烧蚀对外弹道特性的影响 [J]. 南京理工大学学报, 2002, 26 (3): 247-250.
- [18] 高 听, 李建安. 应用于弹丸跟踪测量的红外器件工作波段选择 [J]. 测试技术学报, 2002 (3): 192-195.
- [19] 何 恒. 海天背景红外成像探测系统作用距离预测研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 37-46.
- [20] 高 听, 邢廷文. 长波红外对常温目标的跟踪成像研究 [J]. 光电工程, 2004 (12): 64-66.
- [21] 卜正明, 李满良. 陆基长波红外辐射测量技术研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2005 (8): 309-302.
- [6] 王家乐, 张 静, 侯京锋, 等. 基于微处理器和 FPGA 的波形生成器 [J]. 测控技术, 2015, 34 (12): 127-129.
- [7] 李 欣, 禹舜阳, 郝维宁, 等. 针对星载 FPGA 配置数据的高可靠存储设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 143-147.
- [8] 刘志会. 一种基于 FPGA 的信号发生和扫频模块的设计 [D]. 中国科学院大学, 2016.
- [9] 关 宇. 一种高精度正弦波扫频信号发生器的设计与实现 [J]. 电子工程师, 2004, 30 (2): 38-41.
- [10] 沈 航. 基于 FPGA 的任意波信号发生器 [D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [11] 宿玲玲. 基于 FPGA 的任意波信号发生系统的软件设计与实现 [D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [12] 纳杰斯, 岳 雷, 马 雪, 等. 基于 FPGA 的串行多节点数据采集传输系统的应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (6): 125-128.
- [13] 郑黄婷. 一种基于 FPGA 随机脉冲信号发生器的研制 [D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [14] 杨明玲. 相位差可调的正弦波信号发生器设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.