Vol. 47, No. 8 August, 2017

文章编号:1001-5078(2017)08-1006-07

·光电对抗 ·

舰载激光武器毁伤评估仿真模型

彭 聪,卢发兴,邢昌风 (海军工程大学电子工程学院,湖北 武汉 430033)

摘 要:区别于传统舰炮,激光武器通过发射激光束对目标表面定点照射若干秒造成目标毁伤,是一个能量累积的过程。针对舰载激光武器打击空中目标,分析激光束指向过程,包括激光束指向高低角、方位角以及照射毁伤时间的确定。考虑观炮间隔和升沉运动影响,采用坐标转换和摇摆坐标变换的方法,在稳定舰艇坐标系下建立激光束指向模型;在指向模型基础上, 计算照射目标点能量、毁伤阈值能量、毁伤时间和平均光斑面积并建立毁伤评估仿真模型。利用毁伤评估模型仿真结果,对指向过程中的各误差精度进行分析。

关键词:激光武器;高低角;方位角;光斑面积;毁伤时间

中图分类号:TJ95 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.08.016

Damage assessment simulation model for shipborne high-energy laser weapon

PENG Cong, LU Fa-xing, XING Chang-feng

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Different from traditional naval gun, high – energy laser weapon illuminates the target surface at a point for several seconds to make target damage. In fact, it's a process of energy accumulation. To destroy aerial target, the process of laser pointing was analyzed, including calculation of elevation angle, azimuth angle of laser beam and killing time in ideal situation. Considering heave movement of navy vessel and the distance between sensor and laser weapon, laser pointing model was established in stable coordinate system of navy vessel, by adopting method of coordinate transform and coordinate conversion under the influence of swaying navy vessel. On the basis of laser pointing model, energy of the laser, threshold damage energy, killing time and average facula area were calculated, and damage assessment simulation model was established. Error precisions in the process of laser pointing were analyzed according to simulation results.

Key words: laser weapon; elevation angle; azimuth angle; facula area; killing time

1 引 言

不同于舰炮武器,激光武器发射即命中,因此不 存在解命中问题。但是,激光武器需要持续照射目标 上固定点(毁伤点)一段时间来造成目标毁伤。理想 情况下,发射激光束稳定指向目标毁伤点;由于舰船 在海面升沉和摇摆运动影响,激光束指向会产生小范 围内抖动,抖动值规定控制在 10 μrad 以内^[1-7]。另 外,由于海面大气环境复杂,激光束在传输过程中会 产生畸变,比如目标上激光光斑变形等。

激光武器毁伤评估仿真模型用于确定毁伤时间 和光斑面积。首先,建模分析激光武器打击空中目 标具体指向过程,提供毁伤评估建模时必要的误差 参数等。目前,激光束指向研究多为稳定性分析和 瞄准精度检测。由于是毁伤点打击,激光武器跟瞄

作者简介:彭 聪(1993-),男,硕士研究生,研究方向为火力控制系统。E-mail:13297505072@163.com 收稿日期:2016-12-26;修订日期:2017-02-16

精度为微弧度级,舰炮跟瞄系统精度能达到毫弧度 级,还不能有效满足激光武器需要,通常考虑激光光 束散射角扩大和跟瞄系统中误差源,提出适用于激 光武器的跟瞄精度需求。同时海面颠簸环境影响, 激光束抖动不可避免,激光束瞄准稳定性受影响较 大,通常检测光斑位置偏移量和伺服控制的方式减 小动态干扰^[8-11]。在指向基础上毁伤时间和形成 光斑面积通过建模计算。

本文分析激光束的指向过程,建立理想情况下 激光束毁伤评估仿真模型。考虑观测误差、升沉误 差、摇摆误差和指向系统误差,建立激光束指向模 型;照射能量达到阈值能量时目标毁伤,同时考虑激 光束指向过程造成的光斑半径误差,建立毁伤评估 仿真模型。最后以毁伤时间和平均光斑面积作为毁 伤评估依据,能够对整个激光束指向过程中各误差 值的精度进行分析,为激光武器研制提供一定帮助。

2 激光束指向过程

激光束指向过程从激光束照射目标开始,到毁伤目标结束,激光束以实时高度角和方位角指向毁伤点。激光武器对目标的毁伤评估建立在打击目标的基础之上,首先建立理想的激光束指向环境,研究激光束指向过程,条件如下:

(1)激光束传输过程中考虑发射望远镜出射光 束的衍射发散角和能量损失,不具体分析光学效应。

(2)照射目标能量到达毁伤阈值时即认为目标 毁伤。

基于理想指向环境,建立稳定舰艇坐标系 O-XYH。原点 O 为激光炮口中心, X 轴在水平面与 Y 轴垂直,指向舰艇右舷; Y 轴为舰艇纵轴(舰首尾 线)在水平面上投影,指向舰首方向; H 轴垂直水平 面,指向天顶;三个坐标轴与舰艇表面不固连。打击 开始至毁伤结束激光束指向如图 1 所示,文中目标 点均指待毁伤点。



图 1 激光束打击目标指向图 Fig. 1 Pointing of laser beam to damage target

图1中, O' 点为观测装置回转中心点; M_0 点为 目标现在点(初始位置); Mq 点为目标毁伤结束点, 在 XOY 平面内投影点分别为 o'、 m_0 、 m_q 。 $\overrightarrow{OO'}$ 为 观炮间隔矢量,表示从激光炮口到观测装置连线, A_{cp} 为矢量大小。 $\overrightarrow{OM_0}$ 和 \overrightarrow{OMq} 均为射击矢量,分别对 应初始时刻 $t_0(t_0 = 0)$ 和毁伤结束时刻 t_f ,表示从 炮口到目标点连线, $D_q(0)$ 和 $D_q(t_f)$ 分别为矢量大 小。 $\overrightarrow{O'M_0}$ 为瞄准矢量,表示从观测装置到目标现在 点连线, D_0 为矢量大小。 $\phi(t_f)$ 和 $\beta(t_f)$ 分别为时刻 t_f 激光束指向高低角和方位角。从 t_0 时刻射击开 始,到 t_f 时刻射击结束, $\overrightarrow{M_0Mq}$ 为该时间段内目标点 的飞行航迹,激光束始终指向该飞行段上的目标点。

3 激光束指向模型

由图1可知,存在如下矢量关系:

$$\overrightarrow{OM_0} = \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'M_0} \tag{1}$$

0 时刻目标现在点坐标为 (x_0, y_0, h_0) ,通常观测装置测得的目标现在点为球坐标 (D_0, β_0, ϕ_0) , 其对应的直角坐标为 (x_e, y_e, h_e) :

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ h_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_0 \cdot \cos\phi_0 \cdot \sin\beta_0 \\ D_0 \cdot \cos\phi_0 \cdot \cos\beta_0 \\ D_0 \cdot \sin\phi_0 \end{pmatrix}$$
(2)

观测装置对目标现在点观测误差为观测距离误差 ΔD_0 、观测高低角误差 $\Delta \phi_0$ 和观测方位角误差 $\Delta \beta_0$ 。利用观测误差进行修正:

$$\begin{cases} D'_{0} = D_{0} + \Delta D_{0} \\ \phi'_{0} = \phi_{0} + \Delta \phi_{0} \\ \beta'_{0} = \beta_{0} + \Delta \beta_{0} \end{cases}$$
(3)

将修正量代入式(2)得到真实观测坐标 (x'_e,y'_e,h'_e)。由于激光炮与观测装置不在同一 点处,因此存在观炮间隔,不能直接认为观测坐标 值即为目标现在点坐标,激光武器观炮间隔如图 2 所示。



图2 激光武器观炮间隔示意图 Fig.2 Distance between sensor and laser weapon 图2中坐标系为不稳定舰艇坐标系,坐标轴定 义与稳定舰艇坐标系相同,三个坐标轴与舰艇表面

固连,观炮间隔A_{ep} 在轴上的分量为A_{epx}、A_{epy}和A_{epH} (激光炮与观测装置通常共轴分布,观炮间隔分量 值较小)。同时受海面上浪涌的影响,舰艇在无速 度的情况下依然做升沉运动,导致炮口中心位置发 生变化,从而产生升沉间隔,如图 3 所示。图中 L_{ep} 表示升沉间隔,轴上分量为L_{epx} 和L_{epH}。



图 3 升沉间隔示意图

Fig. 3 Distance caused by heave movement of naval vessel

在稳定坐标系中间隔分量为 Δx_{cp} 、 Δy_{cp} 、 Δh_{cp} 。 舰艇航向角 C_w ,纵摇角 ψ ,横摇角 θ_b ,坐标变换 如下^[12]:

$$\begin{pmatrix} \Delta x_{cp} \\ \Delta y_{cp} \\ \Delta h_{cp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos C_w & \sin C_w & 0 \\ -\sin C_w & \cos C_w & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix}$$
$$\begin{pmatrix} \cos \theta_b & 0 & \sin \theta_b \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_b & 0 & \cos \theta_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{cpX} + L_{cpX} \\ A_{cpH} + L_{cpH} \end{pmatrix}$$
(4)

舰艇纵横摇角测量有一定误差,分别为 $\Delta \psi$ 和 $\Delta \theta_h$ 。进行误差修正:

$$\begin{cases} \psi' = \psi + \Delta \psi \\ \theta'_{\mu} = \theta_{\mu} + \Delta \theta_{\mu} \end{cases}$$
(5)

同时,升沉间隔测量也有一定误差 ΔL_{cpX} 、 ΔL_{cpY} 和 ΔL_{crH} ,进行误差修正:

$$\begin{cases} L'_{cpX} = L_{cpX} + \Delta L_{cpX} \\ L'_{cpY} = L_{cpY} + \Delta L_{cpY} \\ L'_{cpY} = L_{cpY} + \Delta L_{cpY} \end{cases}$$
(6)

将式(5)和(6)代入式(4)中得到修正后间隔 分量 $(\Delta x'_{cp}, \Delta y'_{cp}, \Delta h'_{cp})^T$ 。则式(1)可表示为:

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ h_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_c \\ y'_c \\ h'_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x'_{cp} \\ \Delta y'_{cp} \\ \Delta h'_{cp} \end{pmatrix}$$
(7)

任意 t 时刻的观测坐标按照式(1)~(7)的坐标转换以及误差修正后得到 t 时刻的现在点坐标 (x_i, y_i, h_i) 。

由于稳定平台自身元部件作用以及工作环境的 影响,平台在稳态和过渡过程中与水平面之间存在 误差角,称为稳定平台误差;由于随动机构的传动特 性和平台稳定性影响,随动机构相对理论正确位置 产生角偏离,称为随动误差。激光束指向系统误差 为 $\delta\beta$ 和 $\delta\phi$,包括激光器稳定平台误差和跟瞄系统 随动误差。修 正 后 指 向 方 位 角 $\beta(t)$ 和 高 低 角 $\phi(t)$:

$$\begin{cases} \beta(t) = \arctan \frac{x_t}{y_t} + \delta\beta \\ \phi(t) = \arctan \frac{h_t}{\sqrt{x_t^2 + y_t^2 + h_t^2}} + \delta\phi \\ t \, \mathbb{R}(\underline{a} \, \mathcal{B}) (0, t_f) , \mathcal{R}(8) \, \mathbb{R} \, \mathcal{B}: \\ \end{cases} \\ \begin{cases} \beta(t) = \beta(D_t, \beta_t, \phi_t, \psi, \theta_b, \Delta D_t, \Delta \beta_t, \Delta \phi_t, \Delta L_{cpX}, \\ \Delta L_{cpY}, \Delta L_{cpH}, \Delta \psi, \Delta \theta_b, \delta \beta, \delta \phi, t) \\ \phi(t) = \phi(D_t, \beta_t, \phi_t, \psi, \theta_b, \Delta D_t, \Delta \beta_t, \Delta \phi_t, \Delta L_{cpX}, \\ \Delta L_{cpY}, \Delta L_{cpH}, \Delta \psi, \Delta \theta_b, \delta \beta, \delta \phi, t) \end{cases}$$

$$(9)$$

观测误差、摇摆测量误差、升沉误差和指向系统 误差构成激光束指向角误差 $\Delta\beta(t)$ 和 $\Delta\phi(t)$ 。当 观测误差 $\Delta D_t = 0$, $\Delta\beta_t = 0$, $\Delta\phi_t = 0$, 纵横摇测量 误差值 $\Delta\psi = 0$, $\Delta\theta_b = 0$, 升沉误差 $\Delta L_{qx} = 0$, $\Delta L_{qy} = 0$, $\Delta L_{qH} = 0$ 和指向系统误差值 $\delta\beta = 0$, $\delta\phi = 0$ 时,激光束指向即为理论值;若不为零,即为 真实值。则指向角误差为:

$$\begin{split} \left\{ \begin{split} \Delta \beta(t) &= \beta(D_t, \beta_t, \phi_t, \psi, \theta_b, \Delta D_t, \Delta \beta_t, \Delta \phi_t, \Delta \psi, \Delta L_{cpX}, \Delta L_{cpY}, \\ \Delta L_{cpH}, \Delta \theta_b, \delta \beta, \delta \phi, t) &- \beta(D_t, \beta_t, \phi_t, \psi, \theta_b, \\ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, t) \\ \Delta \phi(t) &= \phi(D_t, \beta_t, \phi_t, \psi, \theta_b, \Delta D_t, \Delta \beta_t, \Delta \phi_t, \Delta \psi, \Delta L_{cpX}, \Delta L_{cpY}, \\ \Delta L_{cpH}, \Delta \theta_b, \delta \beta, \delta \phi, t) &- \phi(D_t, \beta_t, \phi_t, \psi, \theta_b, \\ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, t) \end{split}$$

4 毁伤评估仿真模型

利用毁伤时间和平均光斑面积作为毁伤评估依据,照射时间 t_f 和目标点累积能量E以及阈值能量 E_{th} 有关,平均光斑面积 \overline{S} 和射击矢量大小 D_q 有关:

$$f_f = f(E, E_{th}) \tag{11}$$

(10)

$$S = f(D_a, t_f) \tag{12}$$

激光束存在发散角,作用距离越远,发散越明显。由于发散作用的影响,照射在目标点上的亮斑能量仅为发射光束的部分能量。发散角 θ 与激光波 长 λ_m成正比,与光束直径 D 成反比^[13]:

$$\theta = \frac{1.22 \times \lambda}{D} \tag{13}$$

目标上形成的亮斑半径为 r:

$$r = \theta \cdot L \tag{14}$$

其中, L 为激光束作用距离。发射激光束功率 P_0 , 亮斑内功率为 P_1 :

$$P_1 = \eta_1 P_0 \tag{15}$$

发散系数 η₁ 取值由 84% 变化到 98%,具体数 值视光束特性和激光器的光学系统而定。

强激光在海上大气中传输时会受到许多不利 因素的影响,如大气折射和吸收等,结果导致到达 目标的激光束能量衰减。激光的大气衰减率^[14]为 η₂:

$$\eta_2 = (1 - \alpha)^L \tag{16}$$

其中, α 为激光束的大气衰减系数,其取值范围受地 区和气候影响。

综合式(15)和式(16),目标点上实际照射功率 P:

$$P = \eta_1 \eta_2 P_0 \tag{17}$$

当照射目标上的激光累积能量 *E* 超过阈值能量 *E*_t,时,目标毁伤。计算 *E*:

$$E = \int_{0}^{t_{f}} P(t) dt \tag{18}$$

其中, P(t) 为t 时刻目标点功率:

$$P(t) = \eta_1 (1 - \alpha)^{D_q (t)} P_0$$
(19)

式中, $D_q(t)$ 为 t 时刻射击矢量大小。通常, 目标 毁伤能量密度阈值 e_{th} 已知, 阈值能量 E_{th} 计算 如下:

$$E_{th} = e_{th} \cdot \overline{S} \tag{20}$$

式中, \overline{S} 为0到 t_f 时间段内光斑的平均面积:

$$\overline{S} = \frac{\int_{0}^{t_{f}} S'(t) dt}{t_{f}}$$
(21)

其中, *S'*(*t*) 为实际光斑面积。*S*(*t*) 为理论光斑面积,关系如下:

$$S(t) = \pi [\theta \cdot D_a(t)]^2$$
(22)

$$S'(t) = S(t) + \Delta S(t)$$
(23)

从建立的指向方程可知,真实激光束指向和理 论激光束存在指向夹角 γ ,因此形成光斑面积存在 误差 $\Delta S(t)$:

$$\Delta S(t) = \pi \cdot (\Delta t)^2 \tag{24}$$

依据激光束指向模型,时刻 t 真实激光束指向 为方位角 $\beta(t)$ 和高低角 $\phi(t)$,理论指向为方位角 $\beta'(t)$ 和高低角 $\phi'(t)$,满足式(10)的关系。则真实 目标点坐标为(x,y,h),理论目标点坐标为 (x',y',h'):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_q(t)\cos\phi(t)\sin\beta(t) \\ D_q(t)\cos\phi(t)\cos\beta(t) \\ D_q(t)\sin\phi(t) \end{pmatrix}$$
(25)

$$\begin{pmatrix} x'\\ y'\\ h' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D'_{q}(t)\cos\phi'(t)\sin\beta'(t)\\ D'_{q}(t)\cos\phi'(t)\cos\beta'(t)\\ D'_{q}(t)\sin\phi'(t) \end{pmatrix}$$
(26)

 $D'_{q}(t)$ 为理论射击矢量。通常 γ 较小, $D'_{q}(t)$ 和 $D_{q}(t)$ 较大,可以近似认为 $D'(t)_{q} = D_{q}(t)$,计算光斑半径误差 Δr :

$$\Delta r = D_q(t) \cdot \gamma$$
 (27)
 γ 可以根据向量关系计算:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{xx' + yy' + hh'}{D_q(t)D'_q(t)}\right)$$
(28)

根据理想条件(2),满足 $E = E_{ih}$ 条件即为毁伤时间 $t_{f^{\circ}}$ 综上:

$$f(E, E_{th}) = \begin{cases} E = \pi \int_{0}^{t_{f}} \eta_{1} P_{0} (1 - \alpha)^{D_{q}(t)} dt \\ \\ E_{th} = e_{th} \cdot \frac{\pi \int_{0}^{t_{f}} [\theta \cdot D_{q}(t) + D_{q}(t)\gamma]^{2} dt \\ \\ E = E_{th} \end{cases}$$
(29)

$$f(D_{q},t_{f}) = \frac{\int_{0}^{t_{f}} [\theta \cdot D_{q}(t) + D_{q}(t)\gamma]^{2} dt}{t_{f}}$$
(30)

5 仿真验证

观测装置测得目标现在点距离 3 km,方位角 60°,高低角 0.4°。目标速度 $v_m = 500$ m/s,目标航向 $C_m = -144°$ 。舰艇速度 $v_w = 20$ m/s,舰艇航向 $C_w =$ 53°。观炮间隔 $A_{cpX} = 0$ m, $A_{cpY} = 0$ m, $A_{cpH} = 0.2$ m;升 沉间隔 $L_{cpX} = 3$ m, $L_{cpY} = 4$ m, $L_{cpH} = 5$ m。舰艇纵摇角 为 $\psi = \psi_{max} \sin \frac{2\pi t}{T_{\psi}} + \frac{\psi_{max}}{2} \sin \frac{4\pi t}{T_{\psi}}$,最大纵摇角 $\psi_{max} =$ 3°,纵摇周期 $T_{\psi} = 58$ s;舰艇横摇角为 $\theta_b = \theta_{bmax} \sin \frac{2\pi t}{T_{\theta_b}} + \frac{\theta_{bmax}}{3} \sin \frac{4\pi t}{T_{\theta_b}}$,最大横摇角 $\theta_{bmax} = 6.5°$,横摇周期 $T_{\theta_b} = 26$ s。激光功率 $P_0 = 0.5$ MW,激光波长 $\lambda_m =$ 1.06 µm,发散系数 $\eta_1 = 0.84$,大气衰减系数 $\alpha = 0.35$,激光束发射镜直径 D = 0.7 m,目标毁伤能 量密度阈值 $e_{th} = 20$ J/cm²。观测误差: $\Delta D_t = 5$ m, $\Delta\beta_t = 5 \times 10^{-5}$ rad, $\Delta\phi_t = 5 \times 10^{-5}$ rad;升沉误差: $\Delta L_{cpX} = 0.5$ m, $\Delta L_{cpY} = 0.5$ m, $\Delta L_{cpH} = 0.5$ m。摇摆误 利用激光束指向模型,计算0~3s内激光束指向角,结果如图4和图5所示。







最后按照式(29)计算毁伤时间,如图 7 所示。 交点为毁伤时间点 $t_f = 1.0810 \text{ s}$,依据式(30)计算 得平均光斑面积为 0.6974 m^2 。



对仿真算例中给定的误差值进行修改,比较修 改后的结果,如表1所示。

表1 不同误差值下毁伤时间和平均光斑面积

Tab. 1 Killing time and average facula area under

different error values

	毁伤时间 t_f/s	平均光斑面积S/m ²
$\Delta D_t = 1 \text{ m}$	1.0629	0. 6833
$\Delta D_t = 5 \text{ m}$	1.0810	0. 6974
$\Delta D_t = 10 \text{ m}$	1.1041	0.7156
$\Delta \beta_t = 1 \times 10^{-5} \text{ rad}$	0. 7755	0. 4846
$\Delta \beta_t = 5 \times 10^{-5} \text{ rad}$	1.0810	0. 6974
$\Delta \beta_t = 1 \times 10^{-4} \text{ rad}$	1.6017	1.0911
$\Delta \phi_t = 1 \times 10^{-5} \mathrm{rad}$	0. 7974	0. 4995
$\Delta \phi_t = 5 \times 10^{-5} \text{rad}$	1.0810	0. 6974
$\Delta \phi_t = 1 \times 10^{-4} \mathrm{rad}$	1. 5785	1.0727
$\Delta \psi = 1 \times 10^{-3} \text{ rad}$	0. 9968	0. 6375
$\Delta \psi = 5 \times 10^{-3} \text{ rad}$	1.0810	0. 6974
$\Delta \psi = 1 \times 10^{-2} \text{ rad}$	1. 1895	0. 7762
$\Delta \theta_b = 1 \times 10^{-3} \text{ rad}$	1.0527	0. 6772
$\Delta \theta_b = 5 \times 10^{-3} \text{ rad}$	1.0810	0. 6974
$\Delta \theta_b = 1 \times 10^{-2} \text{ rad}$	1. 1216	0. 7267
$\delta\beta = 1 \times 10^{-5} \text{ rad}$	0. 7751	0. 4844
$\delta\beta = 5 \times 10^{-5} \text{ rad}$	1.0810	0. 6974
$\delta\beta = 1 \times 10^{-4} \text{ rad}$	1.6027	1.0919
$\delta \phi = 1 \times 10^{-5} \text{ rad}$	0. 7970	0. 4992
$\delta \phi = 5 \times 10^{-5} \text{rad}$	1.0810	0. 6974
$\delta \phi = 1 \times 10^{-4} \text{ rad}$	1. 5795	1.0735
$\Delta L_{cpX} = 0.1 \text{ m}$	1.0772	0. 6947
$\Delta L_{cpX} = 0.5 \text{ m}$	1.0810	0. 6974
ΔL_{cpX} = 1 m	1.0858	0. 7010
$\Delta L_{cpY} = 0.1 \text{ m}$	1.0761	0. 6940
$\Delta L_{cpY} = 0.5 \text{ m}$	1.0810	0. 6974
$\Delta L_{cpY} = 1 \text{ m}$	1.0817	0. 7017
$\Delta L_{cpH} = 0.1 \text{ m}$	1.0709	0. 6902
$\Delta L_{cpH} = 0.5 \text{ m}$	1.0810	0. 6974
ΔL_{cpH} = 1 m	1.0936	0. 7065

对比表中数据,得出如下结论:

(1)各误差值越小,计算所得毁伤时间越短,平 均光斑面积越小。

(2)距离观测误差 $\Delta D_i \pm 1 \sim 10 \text{ m}$ 之间取值时, 平均光斑面积相差最大为 0.0323 m²;高低角观测 误差 $\Delta \phi_i$ 和方位角 $\Delta \beta_i$ 观测误差在 10⁻⁵ ~ 10⁻⁴ rad 之间取值时,平均光斑面积相差最大分别为 0.5732 m² 和 0.6065 m²,变化较大。相较而言,角度观测误 差对毁伤评估影响较大。

(3) 纵横摇误差 $\Delta \theta_b$ 和 $\Delta \psi$ 在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ rad 之 间取值时, 平均光斑面积相差最大分别为 0.0495 m² 和 0.1387 m²。相较而言, 纵摇测量影响较横摇 测量影响较大。

(4)指向系统误差 $\delta\phi$ 和 $\delta\beta$ 在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ rad 之间取值时,平均光斑面积相差最大分别为 0.5743 m² 和 0.6075 m²,对毁伤评估影响均较大。

(5)升沉误差 $\Delta L_{cpX} \ \Delta L_{cpY} \ \pi \Delta L_{cpH} \ \pm \ 0.1 \ -1 \ m$ 之间取值时,平均光斑面积变化较小,对毁伤评估影 响较小。

6 结束语

文中提出理想的指向环境,对舰载激光武器 打击空中目标进行指向分析,描述了激光束的指 向过程。结合目标和舰艇运动,建立舰艇摇摆和 升沉运动情况下激光束指向模型,得到激光束的 指向和指向角误差;计算各时刻光斑面积并比较 照射能量值和阈值能量值,建立毁伤评估模型,确 定照射毁伤时间和平均光斑面积;最后通过仿真 对激光束指向过程中的误差值进行评估。不足之 处在于建立指向模型的条件理想化,未将传输过 程中的光学效应等考虑其中,下一步可以考虑更 多影响因素完善模型。

参考文献:

 [1] CHEN Shaojin, WANG Hongke, ZHENG Leigang, et al. The stabilization analysis of laser weapons' compound-axis tracking and pointing [J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(4):94 - 96. (in Chinese)

陈少金,王宏柯,郑磊刚,等.激光武器复合轴跟踪瞄 准的稳定性分析[J].火力与指挥控制,2012,37(4): 94-96.

- [2] LI Fanying, XIONG Zhenkai, CAI Jie. Analysis of tracking & pointing requirment and the factors for laser weapon
 [J]. Techniques of Automation & Applications, 2014, 33
 (1):63-66. (in Chinese)
 李凡营,熊珍凯,蔡杰. 激光武器跟瞄精度其成因分析
 [J]. 自动化技术与应用, 2014, 33(1):63-66.
- [3] GIBSON A. Laser pointing technology [J]. Proceeding of SPIE, 2000, 4034:166.
- [4] LI Bingbin, SONG Xiaolu, WANG Shiyu, et al. Directive property of the laser beam in DPL[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5):593-596. (in Chinese)
 李兵斌,宋小鹿,王石语,等. DPL 输出激光指向性研究[J]. 红外与激光工程,2006,35(5):593-596.
- [5] QI Jingang, LI Chunjie. Measuring the pointing st ability of laser beam [J]. Physic Experimentation, 2007, 27 (12):34 36. (in Chinese)
 祁金刚,李春杰.激光光束指向稳定性的测量[J].物 理实验,2007,27(12):34 36.
- [6] YANG Xiulin, LU Peiguo, LIU Xiaoqiang, et al. Simulation and analysis of the composite axis track control system for shipborne laser weapon [J]. Laser & Infrared, 2015,45(8):943-947. (in Chinese)
 杨修林,陆培国,刘小强,等. 舰载激光武器复合轴跟踪控制系统仿真分析[J]. 激光与红外,2015,45(8): 943-947.
- [7] ZHANG Donglai, LI Xiaojiang, YANG Chengwei. Discussion on key technology and battle mode of US army's anti-missile laser weapon [J]. Laser & Infrared, 2013, 43
 (2):121-127. (in Chinese)
 张东来,李小将,杨成伟. 美军激光反导关键技术及作战样式探讨[J]. 激光与红外,2013,43(2):121-127.
- [8] YUE Yufang, ZHANG Yushuang. Laser tracking and pointing simulation system and two tracking and pointing methods [J]. High Ppwer Laser and Particle Beams, 2010,22(11):2575-2580. (in Chinese) 岳玉芳,张玉双. 激光跟瞄仿真系统及两种跟瞄方法 [J]. 强激光与粒子束,2010,22(11):2575-2580.
- [9] WANG Pei, LI Yanjun, TIAN Jin. Simulation system and analysis of airborne laser weapon[J]. Infared and Laser Engineering, 2011, 40(7):1238-1242. (in Chinese)
 王佩,李言俊,田进. 机载激光武器仿真系统与分析
 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7):1238-1242.
- [10] HUANG Yong, DENG Jianhui. On tracking & pointing ac-

curacy requirement of high energy laser weapon[J]. Electronics Optics & Control, 2006 (13): 86 – 88. (in Chinese)

黄勇,邓建辉.高能激光武器的跟瞄精度要求分析 [J].电光与控制,2006(13):86-88.

[11] LI Nan, HE Youjin, REN Jiancun. Laser collimate - on based on imaging tracking[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2006, 21(5):513 - 516. (in Chinese) 李楠,何友金,任建存. 基于成像跟踪的激光瞄准[J].

海军航空工程学院学报,2006,21(5):513-516.

[12] WANG Hangyu, WANG Shijie, LI Peng. Shipborne fire control theory [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2006:146-148.(in Chinese) 王航宇,王士杰,李鹏.舰载火控原理[M].北京:国防

工业出版社,2006:146-148.

- [13] SU Yi, WAN Min. High-energy laser weapon system[M].
 Beijing: National Defense Industry Press, 2004:26 28.
 (in Chinese)
 苏毅,万敏. 高能激光系统[M]. 北京:国防工业出版 社,2004:26 - 28.
- [14] LI Qingyuan. Damage effects of vehicles irradiated by intense laser[M]. Beijing: China Aerospacce Press, 2012: 15-17. (in Chinese)
 李清源. 强激光对飞行器的毁伤效应[M]. 北京:中国 宇航出版社,2012:15-17.