

激光近炸复合引信探测舰船目标的建模与仿真

姜易阳,倪邦福,钱红庆

(北京机电工程研究所,北京 100074)

摘要: 针对采用激光近炸引信与触发引信体制的飞行器,研究了探测海面舰船雷达目标的建模分析方法,并进行了引战配合仿真及优化研究。通过建立激光近炸探测装置与目标间的空间交汇运动模型,可在激光近炸引信探测光束与飞行器空间运动强耦合,且舰船外型面复杂多样的情况下进行毁伤效率分析。采用同制导精度计算一致的误差干扰模型及蒙特卡罗打靶方法,统计了复合引信体制下不同引战配合方式对舰船雷达毁伤概率的影响,为优化引战配合效率、增大毁伤概率提供可靠依据。该方法可对任意支路激光近炸引信探测任何复杂舰船型面进行建模分析及毁伤概率计算,也可适用于针对其他类型目标的分析计算,具有良好的通用性和扩展性。

关键词: 激光近炸引信; 建模与仿真; 蒙特卡罗打靶; 引战配合

中图分类号: TJ765.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1006001

Modeling and simulation of combination laser proximity fuse detecting warship target

Jiang Yiyang, Ni Bangfu, Qian Hongqing

(Beijing Mechanical and Electronic Engineering Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: The modeling and optimizing of fuse and warhead coordination of combination laser proximity fuse, which detects a warship target with ship-borne radar, were discussed. By means of building the 3D model of warship and the detecting model of laser proximity fuse, a better solution was provided to the problem of the damage effectiveness analysis, which was due to the complex surface of warships and the strong coupling between laser beam and vehicle body. Then, the Monte Carlo simulation, which has been widely used in the guidance accuracy evaluation, was used to calculate damage probability with different fuse-warhead coordination models. The modeling and simulation method provides an effective and universal way to optimize the coordination of any kind of fuse and warhead.

Key words: laser proximity fuse; modeling and simulation; Monte Carlo simulation; coordination of fuse and warhead

收稿日期:2016-02-11; 修订日期:2016-03-13

作者简介:姜易阳(1987-),男,工程师,硕士,主要从事飞行力学、飞行器制导与控制方面的研究。Email:buaa_jiang@126.com

0 引言

激光近炸引信是随着激光技术的发展而出现的一种新型的近炸引信^[1],通常为主动式激光近炸引信,主要特点是体积小、质量轻、可靠度高,且控制炸点精度高、抗干扰能力强^[2-3]。近年来激光近炸引信广泛应用于反辐射攻击武器中,如美国的哈姆 AGM-88,以色列的 Harpy 和南非的 RAKI 反辐射无人机均采用了激光近炸引信。

随着激光近炸引信的广泛应用,对引战配合设计的需求越来越强烈,参考文献 [4] 针对飞机类目标,进行了激光近炸引信引战配合系统建模及仿真研究,参考文献[5]针对地面雷达目标,研究了复合引信体制的反辐射导弹引战配合优化方案。与飞机类和地面类目标不同,舰船类目标一般具有多个斜面平台,且舰上存在桅杆、烟囱、舰炮等物体,舰上雷达的架设方式和架设环境也复杂多样,这都对激光近炸模式下的炸点分析及毁伤效果评估带来困难。同时,因激光近炸引信固连于飞行器,其探测光束与飞行器的空间运动存在强烈的耦合关系,如何在该复杂条件下设计复合引信的引战配合优化设计,从而达到最佳毁伤效果,是进行引战配合优化设计时必须要考虑的问题。

文中将飞行器六自由度空间运动模型与激光近炸引信探测目标模型融合,为解决上述问题提供了通用可行的分析手段。首先,针对典型海面舰船目标,根据近炸探测装置激光束对物体的探测原理,建立了目标舰船的三维数学模型,为开展六自由度建模仿真分析和引战配合研究建立基础;其次,针对激光近炸探测装置的特点,在全空间六自由度运动模型的基础上,建立了激光近炸探测装置与目标模型间的交汇运动数学模型;最后,分析了复合引信体制下的引战配合方式,及不同引战配合模式下的舰船目标毁伤概率,并给出了分析结论。

1 典型舰船目标三维建模

作为海军舰队的重要舰种之一,驱逐舰能执行防空、反潜、反舰、侦察、警戒等作战任务,有着海上多面手之称^[6],而美国的阿列·伯克级驱逐舰是世界公认的现役最先进的驱逐舰,装备了 SPY-1D 多功

能相控阵雷达,并具备多部 SPY-62 火控雷达,其上层建筑风格及雷达架设方式均具有代表性,故以阿列·伯克级驱逐舰作为典型目标进行三维建模。

图 1 为阿列·伯克级驱逐舰的外形图,其上层建筑的主体由舰炮、多个舰台、烟囱、桅杆等物体组成,因激光测距系统的分辨力有限^[7],故在进行三维建模时,略去几何尺寸小于激光距离分辨力的物体,得到阿列·伯克级驱逐舰三维模型如图 2 所示。



图 1 阿列·伯克级驱逐舰外形图

Fig.1 Scheme of Arleigh Burke destroyer

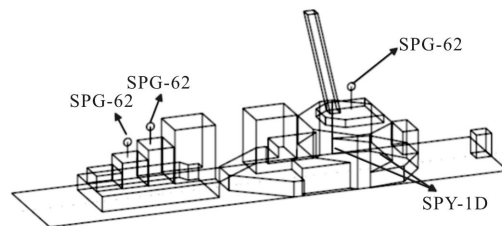


图 2 阿列·伯克级驱逐舰三维模型

Fig.2 3D model of Arleigh Burke destroyer

2 激光近炸引信探测舰船目标运动模型

激光近炸探测装置与飞行器本体为固连关系,其探测目标的交汇运动模型与飞行器空间六自由度运动及激光近炸引信的安装方式相关,此节对相关坐标系进行定义说明,并推导激光束与目标三维模型的空间交汇运动模型。

2.1 相关坐标系定义及其转换关系

2.1.1 发射坐标系(S_0)

原点 O_0 为发射瞬时飞行器质心在当地水平面上的投影; O_0X_0 指向发射方向, O_0Y_0 垂直向上为正, O_0Z_0 轴垂直于 $X_0O_0Y_0$ 平面,其方向按右手定则确定。

2.1.2 弹体坐标系(S_b)

原点 O_b 取在飞行器质心上; O_bX_b 轴与飞行器纵轴重合,指向头部为正; O_bY_b 位于飞行器纵向对称平面内,与 O_bX_b 轴垂直,向上为正; O_bZ_b 轴垂直于 $X_bO_bY_b$ 平面,其方向按右手定则确定。

2.1.3 目标坐标系(S_t)

原点 O_t 取在目标雷达中心上; $O_t X_t$ 轴与舰船纵对称面重合, 在水平面内指向头部为正; $O_t Y_t$ 位于舰船纵向对称平面内, 铅垂向上为正; $O_t Z_t$ 轴垂直于 $X_t O_t Y_t$ 平面, 其方向按右手定则确定。

2.1.4 激光近炸探测坐标系(S_j)

设置激光近炸探测坐标系的原点 O_j 为探测光束与弹轴的交点; $O_j X_j$ 轴与探测光束重合, 指向外为正; $O_j Y_j$ 位于飞行器纵向对称平面内, 与 $O_j X_j$ 轴垂直, 向上为正; $O_j Z_j$ 轴垂直于 $X_j O_j Y_j$ 平面, 其方向按右手定则确定。

图 3 为激光近炸引信装置的探测视场与飞行器相对位置关系示意图, 实际中激光引信在飞行器上的布局方式复杂多样, 且探测支路的数量也有多有少, 分析时可对各支路近炸引信进行独立建模, 并在统计仿真时一并考虑。

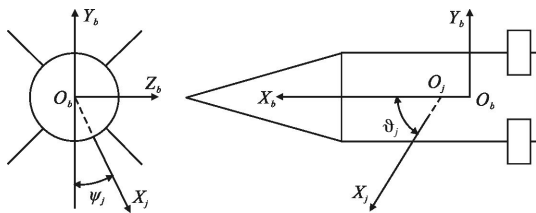


图 3 激光近炸装置探测视场示意图

Fig.3 Detecting field of view of laser proximity fuse

2.1.5 坐标系间的转换关系

各坐标系转换关系如图 4 所示, 其中 ψ, ϑ, γ 为飞行器的空间姿态, ψ_t 为目标雷达坐标系相对于发射坐标系的转角, ψ_j 和 ϑ_j 分别为弹体坐标系相对于激光近炸探测坐标系的偏角和倾角。

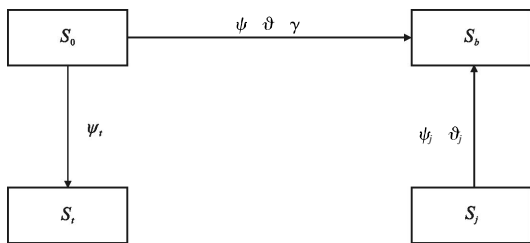


图 4 坐标系间的转换关系

Fig.4 Transformation between coordinate systems

各坐标系间的转换矩阵为(其中“C”为余弦函数的缩写,“S”为正弦函数的缩写):

$$C_0^t = \begin{bmatrix} C\psi_t & 0 & -C\psi_t \\ 0 & 1 & 0 \\ S\psi_t & 0 & S\psi_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_0^b = \begin{bmatrix} C\vartheta C\psi & C\vartheta & -C\vartheta S\psi \\ -S\vartheta C\psi C\gamma + S\psi S\gamma & C\vartheta C\gamma & S\vartheta S\psi C\gamma + C\psi S\gamma \\ S\vartheta C\psi S\gamma + S\psi C\gamma & -C\vartheta S\gamma & -S\vartheta S\psi S\gamma + C\psi S\gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C_j^b = \begin{bmatrix} C\vartheta_j C\psi_j & S\vartheta_j & -C\vartheta_j S\psi_j \\ -S\vartheta_j C\psi_j & C\vartheta_j & S\vartheta_j S\psi_j \\ S\psi_j & 0 & C\psi_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 交汇运动模型推导

飞行器发射后即向着目标飞行, 固联在飞行器上的多支路激光束也随着弹体在空间中进行扫描探测。由于激光引信的有效探测距离较短(一般在 100 m 以下), 故建模中不考虑激光束发散锥角的影响, 各探测支路均简化为射线。

弹道末段接近目标时, 激光束开始与目标三维模型相交, 需进行交点坐标的计算, 并判断交点与飞行器间的相对距离, 若小于激光引信的有效探测距离则探测目标有效, 此时交点与飞行器间的相对高度即为激光近炸引信的探测高度。下面以单束激光束为例, 对交汇运动方程进行推导, 在此基础上可推广至进行任意多支路激光束。推导时将目标舰船模型简化为立方体模型, 以此为基础可推广至任意多个立方体组合成的复杂目标三维模型。

图 5 为飞行过程中的弹目空间相对关系示意图, 其中立方体 ACEG 为目标三维模型, AJ 为激光近炸探测坐标系沿 X_j 轴的单位向量, J 为激光探测光束延长线与 ABCD 平面的交点。由矢量运算律可知:

$$\overrightarrow{O_t O_j} = \overrightarrow{O_t O_b} + \overrightarrow{O_b O_j} - \overrightarrow{O_t O_t} \quad (4)$$

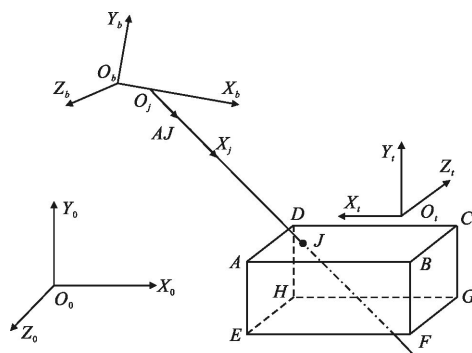


图 5 弹目空间相对关系示意图

Fig.5 Engagement geometry of the vehicle and target

将其投影到目标坐标系,可得:

$$\overrightarrow{O_i O_j} |_{i_r} = \overrightarrow{O_o O_b} |_{i_r} + \overrightarrow{O_b O_j} |_{i_r} - \overrightarrow{O_o O_i} |_{i_r} = C_0^t \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} + C_0^t C_b^0 \begin{bmatrix} x_{bj} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - C_0^t \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: x_b, y_b, z_b 为飞行器在发射坐标系下的坐标; $x_i,$

y_i, z_i 为目标在发射坐标系下的坐标; x_{bj} 为探测光束与弹轴的交点距导弹质心的距离。经推导,得:

$$\overrightarrow{O_i O_j} |_{i_r} = \begin{bmatrix} x_{bj}(C\psi C\psi_t C\vartheta + C\vartheta S\psi S\psi_t) + (x_b - x_i)C\psi_t - (z_b - z_i)S\psi_t \\ y_b - y_i + x_{bj}S\vartheta \\ x_{bj}(C\psi S\psi_t C\vartheta - C\vartheta S\psi C\psi_t) + (x_b - x_i)S\psi_t + (z_b - z_i)C\psi_t \end{bmatrix} \quad (6)$$

另外,由 AJ 的定义可知,其在 S_j 下的坐标向量 AJ_j 为 $[1, 0, 0]$, 将其转换至目标坐标系下,有:

$$AJ_i = C_j^t AJ_j = C_0^t C_b^0 C_j^b AJ_j = \begin{bmatrix} S\vartheta_j [C\psi_t(S\gamma S\psi - C\gamma C\psi S\vartheta) - S\psi_t(S\gamma C\psi + C\gamma S\psi S\vartheta)] \\ C\gamma C\vartheta S\vartheta_j \\ S\vartheta_j [C\psi_t(S\gamma C\psi + C\gamma C\psi S\vartheta) + S\psi_t(S\gamma C\psi - C\gamma S\psi S\vartheta)] \end{bmatrix} \quad (7)$$

设交点 J 在目标坐标系下的坐标分别为 J_x, J_y, J_z , 因交点位于 $ABCD$ 平面上,故 J_y 即为 $ABCD$ 平面在目标雷达坐标系下的高度,而 J_x 和 J_z 未知,需求

解。由矢量运算律可知:

$$\overrightarrow{O_j J} = \overrightarrow{O_i J} - \overrightarrow{O_i O_j} \quad (8)$$

将其投影到目标坐标系,可得:

$$\overrightarrow{O_j J} |_{i_r} = \overrightarrow{O_i J} |_{i_r} - \overrightarrow{O_i O_j} |_{i_r} = \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} J_x - [x_{bj}(C\psi C\psi_t C\vartheta + C\vartheta S\psi S\psi_t) + (x_b - x_i)C\psi_t - (z_b - z_i)S\psi_t] \\ J_y - [y_b - y_i + x_{bj}S\vartheta] \\ J_z - [x_{bj}(C\psi S\psi_t C\vartheta - C\vartheta S\psi C\psi_t) + (x_b - x_i)S\psi_t + (z_b - z_i)C\psi_t] \end{bmatrix} \quad (9)$$

因矢量 $O_j J$ 和矢量 AJ 共线,可知其在同一坐标系下的坐标分量成比例,即由公式(7)和公式(9)可得:

$$\frac{J_y - [y_b - y_i + x_{bj}S\vartheta]}{C\gamma C\psi S\vartheta_j} = \frac{J_x - [x_{bj}(C\psi C\psi_t C\vartheta + C\vartheta S\psi S\psi_t) + (x_b - x_i)C\psi_t - (z_b - z_i)S\psi_t]}{S\vartheta_j [C\psi_t(S\gamma S\psi - C\gamma C\psi S\vartheta) - S\psi_t(S\gamma C\psi + C\gamma S\psi S\vartheta)]} = \frac{J_z - [x_{bj}(C\psi S\psi_t C\vartheta - C\vartheta S\psi C\psi_t) + (x_b - x_i)S\psi_t + (z_b - z_i)C\psi_t]}{S\vartheta_j [C\psi_t(S\gamma C\psi + C\gamma C\psi S\vartheta) + S\psi_t(S\gamma C\psi - C\gamma S\psi S\vartheta)]} \quad (10)$$

由公式(10)即可解得 J_x 和 J_z , 通过判断 J_x 和 J_z 与 $ABCD$ 平面边界坐标值来判断交点是否位于平面范围内。若交点有效,激光束的探测距离即为矢量 $O_j J$ 的长度,矢量 JO_j 在目标坐标系下的 Y 向分量即为激光近炸引信的探测高度。激光束与目标立方体上的其他平面交点及探测距离、探测高度的解算同上,这里不再给出。

3 基于空间弹道仿真的起爆逻辑优化设计

3.1 复合引信引战配合方式分析

对于舰船类目标,因舰上建筑复杂、雷达架设方式多样,且干扰能力强,采用单一触发引信的毁伤概率较低,而激光近炸引信可通过测量飞行器距舰船平台的相对高度来控制战斗部在最佳高度起爆,大大提高战斗部的杀伤力,故对于激光近炸引信与触发引信复合的引信体制,一般采用激光近炸引信定

高起爆为主、触发引信的触发起爆为辅的引战配合方式。此节通过蒙特卡罗空间弹道仿真,研究不同定高起爆高度下对毁伤概率的影响。

3.2 空间弹道仿真流程设计

空间弹道仿真是进行制导控制律设计完整性、合理性、以及制导控制精度评估时的必经环节,空间弹道仿真一般采用蒙特卡罗打靶的仿真方式,并加入惯导导航误差模型、导引头测量误差模型、风干扰、气动拉偏等干扰误差模型,故仿真结果具有较高的置信度,且相比于半实物仿真及飞行试验成本低、效率高、拉偏干扰条件的覆盖性广^[8]。

通过在空间弹道仿真模型中加入激光近炸引信探测舰船目标模型,并采用同制导精度仿真一致的干扰及误差模型,可对目标毁伤概率进行统计。计算时以脱靶量评估对目标的单次毁伤效果,即脱靶量小于战斗部毁伤半径则判断目标毁伤有效,反之则判断目标毁伤无效,仿真流程见图 6。

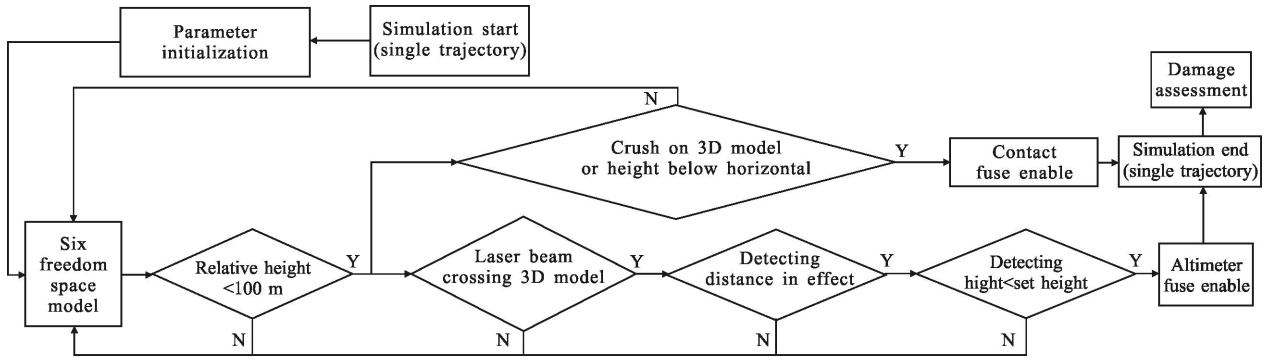


图 6 弹道仿真流程示意图

Fig.6 Flow chart of flight simulation

3.3 蒙特卡罗打靶结果分析

针对阿列·伯克级驱逐舰上的各雷达目标,采用不同的装定起爆高度,分别进行蒙特卡罗空间打靶仿真,根据打靶结果对目标毁伤概率进行统计。图 7 为各雷达目标的毁伤概率与装定高度的变化曲线(图中的毁伤概率为各引战配合方式下的毁伤概率与对舰艇 SPG-62 雷达为目标且装定高度为 5 m 下的毁伤概率的比值),当装定高度为 0 m 时,仅触发引信有效。

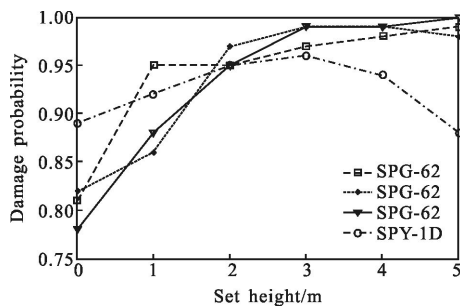


图 7 各目标的毁伤概率随装定高度变化曲线

Fig.7 Curves of damage probabilities of different targets vs set height

据图可知,单一触发起爆模式下目标的毁伤概率相比于激光近炸复合引信模式下的目标毁伤效率较低,最大相差 23%。究其原因在于,被攻击雷达一般处于平台之上,且其周围平台的面积较小,飞行器与雷达周围平台直接接触并对目标造成有效毁伤的概率较小。另外还可以看到,目标毁伤概率随着装定高度的增加而上升,但当装定高度超过一定值后又有所下降,这是由于装定高度过低,只有当脱靶量较小时才会对目标造成有效毁伤,而装定高度过高时,

因周围建筑的影响导致近炸引信提前起爆,特别对于具有多个舰岛的舰船目标,较易因其他舰岛的干扰造成提前起爆,降低毁伤概率。

通过分析仿真数据可知,对于该复合引信体制,当装定高度为 2~4 m 间时,相比于其他装定高度下对不同雷达目标的毁伤概率均较高,且对目标假设方式的适应性较强。

4 结论

基于舰船目标的三维空间建模及激光近炸引信探测运动建模,并结合空间弹道蒙特卡罗打靶方法,对舰船上各目标的毁伤概率进行了分析计算,并得到了较优的引战配合方式。该方法可对具有多支路激光近炸引信探测复杂舰船型面进行建模分析及毁伤概率计算,也适用于针对其他类型目标的分析计算,具有良好的通用性和工程可实现性。进行毁伤概率计算时,考虑了同精度计算一致的干扰及误差模型,并采用蒙特卡罗打靶方法,使得计算结果具有较高的置信度。

参考文献:

[1] Yao Pingping, Tu Bihai, Wang Xiangjing, et al. Design and application of high-precision threshold circuit for laser proximity fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1156-1161. (in Chinese)
姚萍萍, 涂碧海, 王相京, 等. 高精度激光近炸引信阈值电路设计与应用[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 1156-1161.

[2] Zha Bingting, Zhang He. Scanning frequency and pulse frequency of single-beam pulsed laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2081-2086. (in Chinese)

- 查冰婷, 张合. 单光束脉冲激光引信扫描频率和脉冲频率研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2081-2086.
- [3] Chen Huimin, Liu Xinyang. Backscattering polarization characteristics of pulsed laser fuze with coaxial optical system in water fog [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(3): 626-631. (in Chinese)
- 陈慧敏, 刘新阳. 收发同轴脉冲激光引信在水雾中的后向散射偏振特性[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(3): 626-631.
- [4] Sun Bo, Hu Guohuai, Zhao Junmin, et al. Design of fuze-warhead coordination simulation system based on laser proximity fuze [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, 32(4): 123-126. (in Chinese)
- 孙博, 胡国怀, 赵军民, 等. 基于激光近炸引信的引战配合数学仿真设计[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(4): 123-126.
- [5] Zhang Zhen, Ma Dengwu, Chu Defang. Fuze-warhead matching for air-to-ground anti-radiation missile with blast warhead[J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(3): 31-35. (in Chinese)
- 张真, 马登武, 诸德放. 反辐射导弹爆破式战斗部引战配合[J]. 弹道学报, 2012, 24(3): 31-35.
- [6] Wu Jiaming. Evolvement, existing circumstances and features of destroyers [J]. *Guangdong Shipbuilding*, 2012, 2: 37-40. (in Chinese)
- 吴家鸣. 驱逐舰的演变、现状与特点[J]. 广东造船, 2012, 2: 37-40.
- [7] Dong Naige, Zhang Zhenghui. Range resolution of laser range finder modeling and simulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S1): 277-280. (in Chinese)
- 董乃歌, 张正辉. 激光测距系统距离分辨力建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S1): 277-280.
- [8] Zhang Youji. Tactical Missile Flight Dynamic Design [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1998: 406-429. (in Chinese)
- 张有济. 战术导弹飞行力学设计 [M]. 北京: 宇航出版社, 1998: 406-429.