

文章编号:1001-5078(2017)05-0521-06

· 综述与评论 ·

舰载激光武器火控系统研究与展望

彭 聪, 卢发兴, 邢昌凤

(海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘 要:激光武器被认为是海军舰艇防御方面最具潜力的新概念武器,被国外军事强国列为未来舰载攻击和防御武器。要实现舰载激光武器精确稳定毁伤目标,其火力控制系统至关重要。通过与传统舰炮火控系统对比分析和研究,系统概述了舰载激光武器火控系统功能、舰载激光武器火控系统组成,以及舰载激光武器火控系统中存在的关键技术,阐明舰载激光武器火控系统研究方向。

关键词:激光武器;激光武器系统;火控系统

中图分类号:TJ955 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.001

Research and expectation on fire control system of 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: Laser weapon is considered to be the most potential new concept weapon in the defense of naval warship and ranked as offensive and defensive shipborne weapon in the future. To damage targets accurately and steadily, fire control system of shipborne high-energy laser weapon is crucial. Through comparing fire control system of high-energy laser weapon and traditional shipborne gun, the composition, function and the key technologies of fire control system of shipborne high-energy laser weapon were summarized. At last, research area of fire control system was pointed out.

Key words: laser weapon; laser weapon system; fire control system

1 引 言

现代海战中,传统的水面舰艇防空体系面临的空中威胁主要是来自各种飞机包括隐身飞机和反舰导弹的威胁;而现代舰载防空体系还出现了一些新的威胁,主要是战术反舰弹道导弹、反辐射导弹以及严峻的电磁环境等。舰载激光武器系统能够应付传统威胁和新的威胁,较好地满足现代海战对防空武器系统所提出的各种要求。舰载激光武器系统能迅速反应并有效地摧毁快速低空、超低空突防的近距离飞航导弹;具有从远距离上对战术反舰弹道导弹和巡航导弹的助推段或平飞段进行精确拦截的能力;

能不受电磁干扰影响,可在强电磁干扰环境中作战^[1-6]。

激光武器以光速打击目标,不需要计算目标提前量,容易产生激光武器不需要火控系统的理解。实际上,激光武器不同于传统武器,两者毁伤目标机理和过程完全不同。尽管无需提前量的计算,但是要求激光束稳定照射目标上固定点一段时间,才可能毁伤目标。激光输出功率和照射时间的计算、激光束稳定跟瞄控制、激光束指向修正以及毁伤评估等等,均应由火控系统完成。

通过和传统舰炮火控系统的比较,说明激光武

器火控系统功能特点;结合激光武器特点,提出火控系统组成和 workflows;依据激光武器功能实现需求,提出火控系统关键技术。通过以上内容,为将来具体实现激光武器火控系统提供依据。

2 与传统舰炮火控系统对比分析

激光武器利用高能激光束直接击中目标造成破坏,是一种先进定向能武器。与传统高炮、舰空导弹武器相比,激光武器对海军装备性能与作战效能的影响,主要体现在以下几个特点:瞄准即命中、转火速度快、抗电子干扰能力强、持续射击能力强、作战效费比高等。对来袭目标作战过程中,火控流程贯穿从探测目标到毁伤目标的整个打击过程,由火控系统负责实现其中火控功能。由于毁伤目标机理不一样,激光武器火控系统与传统火控系统相比较,其主要不同之处在与两者实现火控功能不一致。下面针对火控功能主要区别,将两者进行对比分析。

在传统舰炮武器系统中,舰炮火控系统的核心功能是在完成对目标闭环跟踪的基础上,实现对舰炮炮管指向和发射时机及时间的精确控制,通过舰炮发射的弹药直接或间接命中(近炸预制破片)目标

相较于传统舰炮武器系统,舰载激光武器火控系统主要实现功能^[7]如下:

(1) 非同平台的目标信息融合与处理

对非同平台的目标信息进行时间和空间对准,将远程预警系统的目标信息转换到当前时刻的舰艇地理坐标系,对搜索跟踪传感器进行目标指示。

(2) 目标传感器控制与指示

在搜索跟踪传感器没有发现目标时,由非同平台的目标信息融合与处理后给出的目标角度,指示搜索跟踪传感器截获目标。在搜索跟踪传感器截获目标后,跟踪计算目标角度位置,指示搜索跟踪传感器跟踪目标,同时控制传感器的工作方式。

(3) 目标角度精确跟踪计算

在搜索跟踪传感器截获目标后,根据该传感器测量的目标角度与角速度数据,对目标进行角度跟踪滤波。

(4) 激光波束的指向与修正控制

信标光是指来自目标或目标附近的点光源,带有光束传输路径上的相位畸变信息。通过信标光给出目标测量与修正信息,计算激光波束的指向。

(5) 攻击区解算与攻击条件判断

根据精确跟踪计算给出的目标角度范围和信标光信息,判断目标是否在舰载激光武器的攻击范围

内,同时激光光束是否已经稳定跟踪照射到目标。

(6) 毁伤目标的持续时间和功率计算

根据目标的距离、作用时间、激光的输出功率、波长等参数计算出激光至目标的能量密度。在目标距离和激光武器输出功率一定的情况下,计算目标的持续照射时间。或者在照射时间缩短的情况下,计算摧毁目标的激光输出功率。

(7) 毁伤效果进行评估

确定激光束照射到被拦截目标后,根据目标破坏阈值的先验数据和激光光束照射时间、功率、波长等数据,计算目标被毁伤的程度。

3 舰载激光武器火控系统工作流程

舰载激光武器火力控制系统是舰载激光武器系统的子系统。通常,激光武器主系统由4个子系统组成:

(1) 高能激光器装置。主要用于提供数兆瓦功率的激光。

(2) 预警探测系统。主要用于探测侦查舰艇周围空域,搜集目标信息,并将预警信息提供给全舰。

(3) 火控系统。主要完成捕获目标、跟踪瞄准目标,并将战场信息经过计算机处理后,选定打击区域、锁定目标打击点、补偿激光波束,实现激光束稳定持续照射目标打击点,直至目标摧毁。

(4) 指挥控制系统。主要接收目标信息、己舰信息、气象信息,对战场态势进行评估并形成决策。下达“发射”指令,允许激光武器对目标打击。在作战结束时,下达“停止射击”指令,停止激光武器射击。

舰载激光武器系统的基本组成如图1所示^[8]。

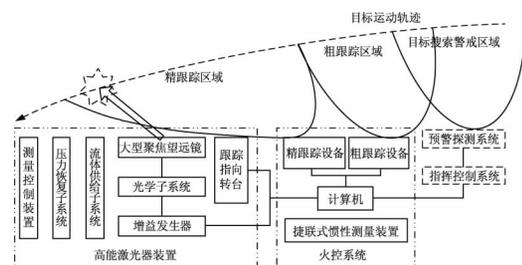


图1 舰载激光武器基本组成

Fig. 1 Basic components of shipborne high-energy laser weapon

根据舰载激光武器系统基本组成,其工作流程主要可分为搜索、捕获、粗跟踪、精跟踪、大气传输及补偿及打击六个阶段。

(1) 搜索阶段:外部预警雷达告知大致空域信息,伺服转台根据预警信息开始目标搜索,探测到目标后变焦为小视场进行图像识别,判定是否为打击

目标。

(2)捕获阶段:判定为打击目标后,由粗跟踪成像系统获取的图像、距离信息,计算出目标的方位角、高低角、时延等信息控制伺服转台紧跟随目标,完成捕获。

(3)粗跟踪阶段:目标捕获后,粗跟踪成像系统持续自动变焦,放大目标细节,通过图像识别完成打击区域的选取锁定。

(4)精跟踪阶段:打击区域选定后,进入精跟踪,采取主动照明激光成像的方式进一步放大打击区域,确定打击点,并通过像方扫描机构实时控制发射/跟踪光轴指向打击点,实现打击点锁定。

(5)大气传输及补偿阶段:激光束发射前,根据打击区域海面环境信息,采取应对措施减小激光功率在大气中衰减,降低湍流、热晕以及气溶胶的影响。

(6)打击阶段:接收指挥控制系统发射指令,激光源系统工作,光束发射系统发射高能激光束对目标实施精确打击,并进行杀伤评估。打击多目标时,依据时机转火,与软/硬武器协同配合。

4 舰载激光武器火控系统关键技术

舰载激光武器系统中由于大大降低了传统舰炮命中目标所需的弹丸飞行时间的不利影响,对目标的命中精度可以大幅度提高。但是,对目标是否构成有效毁伤,主要取决于在目标局部区域上累积的激光辐照能量密度能否达到特定的毁伤阈值。在目标局部区域上能量累积效果与激光器输出功率、光束质量、跟瞄精度、激光束照射时间、激光传输距离、大气特性等因素有关^[9-17]。

对来袭目标的捕获、跟踪和瞄准及其控制环路的时间预测和补偿历来是火控系统的重要工作内容。要实现舰载激光武器对空中运动目标的有效毁伤,就必须实现在几秒甚至更长时间内激光光束以不大于 $10 \mu\text{rad}$ 的精度稳定对准目标局部区域。火控系统完成对目标捕获、稳定跟踪、精确瞄准,使高能激光束精确、集中、持续稳定地击中目标上的瞄准点,即保证激光以最小光斑、最大功率密度、最大能量集中度汇聚在瞄准点上。通过确定目标最佳毁伤点、激光发射时机和持续时间,对激光的发射进行控制和打击效果评估,实现有效毁伤。对舰载激光武器火控系统研究,涉及到以下几个关键技术。

4.1 目标跟踪及瞄准技术

跟瞄系统主要负责目标探测、捕获、跟踪和瞄准,是激光武器系统不可或缺的部分。对于舰载激

光武器跟瞄系统而言,则要求系统误差尽可能小,要求跟踪精度达到微弧度级,以使仪器视轴为中心的发射激光束最大能量密度持续、稳定瞄准照射目标。传统的光电跟踪系统中,由于跟踪架惯量大、频带窄、响应慢,难以直接实现快速高精度跟踪。要保证对空中目标进行高精度的测量和跟踪,必须有一个精密的跟踪系统,由粗跟踪和精跟踪两部分构成的复合轴系统是实现高精度跟踪的一种有效途径^[18-23]。

粗跟踪原理:由搜索雷达信号将目标位置传送给探测器,探测器对目标进行探测得到目标图像,图形处理单元对目标图形进行分析,给出目标脱靶量信息;然后,粗跟踪控制器结合目标脱靶量信息以及转台测角装置信息计算出瞄准目标所需控制量,对驱动器发出控制信号,驱动器带动力矩电机使目标进入精跟踪系统目标探测器视场。粗跟踪原理框图如图2所示。

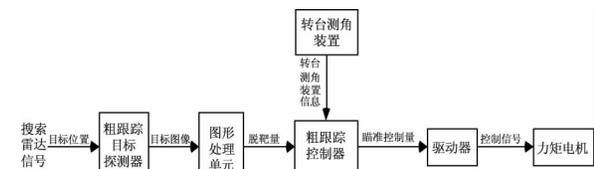


图2 粗跟踪原理图

Fig. 2 Theory of coarse tracking

精跟踪原理:精跟踪目标探测器对目标进行精确探测得到目标图像信息,精图像处理单元对精探测器给出的图像信息进行处理,得到目标精确脱靶量,精跟踪系统控制器采用高精度控制算法计算出控制偏差量,控制量控制FSM驱动器带动伺服驱动瞄准目标。精跟踪原理框图如图3所示。

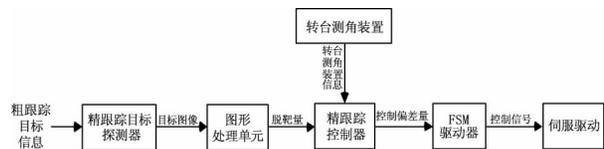


图3 精跟踪原理图

Fig. 3 Theory of fine tracking

4.2 毁伤目标部位选择技术

高能激光武器的破坏效应主要有热烧蚀破坏效应、激波破坏效应和辐射破坏效应。不同激光器的功率密度、波长、脉冲结构不同,杀伤破坏机制也各不相同。功率密度 $> 108 \text{ W/cm}^2$ 时,以冲击破坏机制为主;功率密度 $< 107 \text{ W/cm}^2$,以热烧蚀破坏机制为主;连续波或重复脉冲激光,主要是热烧蚀破坏机制。激光武器对目标的杀伤效果,与激光波长、光束

强度、照射时间的长短和目标的通频带以及激光在大气中传播的远近有关^[24-25]。

激光发射到目标上有两个主要参数,一是功率密度,二是光斑半径,可近似由以下的关系式计算:

$$r = \frac{1.22 \times \beta \times \lambda \times R}{D} \quad (1)$$

其中, r 为目标上的光斑半径(光束轴线垂直于目标表面); β 为光束质量因子,最佳情况 $\beta = 1$,通常 $\beta > 1$; λ 为激光的波长; R 为目标距离; D 为发射望远镜主镜的直径。

$$q = \frac{P}{\pi \times r^2} = \frac{P \times D^2}{\pi \times 1.22^2 \times \beta^2 \times \lambda^2 \times R^2} \quad (2)$$

其中, q 为目标上功率密度; P 为激光束功率(发射望远镜处)。

通常认为,当激光照射到目标上激光的面能量密度超过某个阈值时,靶目标将会失效(出现熔化、热解、汽化、穿孔、破裂、失稳等),即满足条件:

$$e = \frac{q \times \tau}{\pi \times r^2} \geq e_{th} \quad (3)$$

其中, τ 为激光束照射靶时间。

根据照靶时间的长短,确定出对不同来袭目标在不同特征参数情况下,激光束毁伤目标部位(如导引头、战斗部、尾翼等)。结合目标材料毁伤功率阈值,考虑同一目标在不同距离处,不同运动状态情况下,可选择的毁伤部位按照优先顺序进行排序。建立相关的毁伤部位选择数据库,便于目标打击时实时决策。

4.3 大气传输及补偿技术

强激光通过大气传输时与大气相互作用产生一系列效应,这些效应对激光传输产生影响。强激光大气传输产生效应可分为两大类,第一类是线性光学效应,包括大气折射、吸收、散射和湍流;第二类是非线性光学效应,主要有热晕、受激拉曼散射和大气击穿。

舰载激光武器系统主要在接近海平面的大气对流层作战,其大气组成主要是 N_2 、 O_2 、 Ar 、 H_2O (水汽)、 CO_2 、 CO 、气溶胶等,接近海平面大气环境会对舰载激光武器的性能产生严重影响。这些不利影响使得激光在传输过程中出现能量衰减和光束畸变,从而使得目标上的光斑扩大和光束质量变差,能量密度下降,达不到摧毁目标的目的^[26-27]。

通常,将激光的大气衰减率 η 表示为:

$$\eta = (1 - \alpha)^R \quad (4)$$

其中, α 为激光的大气衰减系数。

于是,照射在目标上的总功率为:

$$P = \eta \times P_0 \quad (5)$$

其中, P 为距离 R 处目标上总功率; P_0 为激光束初始功率(发射望远镜处)。

由于大气湍流的影响,传输光束的波前将随机起伏,引起光斑漂移和光束扩展。

光束路径上光束整体倾斜,光斑质心偏离瞄准点,光束倾斜随时间变化形成光斑漂移。

湍流引起的倾斜方差为:

$$\sigma_i^2 = 0.184 \times \left(\frac{D}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \times \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2 \quad (6)$$

其中, σ_i^2 为倾斜方差; r_0 为光束路径上不同角度且随时间变化的楔镜尺度。

光束扩展是指光斑半径或面积增大,长期曝光点光源图像角半径为:

$$\theta_{\frac{1}{2}} = \sqrt{\left(\frac{1.22 \times \lambda}{D}\right)^2 + \left(\frac{1.22 \times \lambda}{r_0}\right)^2 + \sigma_i^2} \quad (7)$$

目前克服或解决大气传输畸变的有效途径是采用自适应光学技术。自适应光学系统利用波前补偿原理,对光学系统的有关发射镜进行控制,使光束在系统出口处产生初步的波前畸变,在经过大气通道上的畸变后,得到相应的补偿。

4.4 在线杀伤评估技术

舰载激光武器在射击过程中,需要进行实时在线射击效力评估,计算已经发射的强激光束对目标的累积命中毁伤概率,作为舰载激光武器转火和停火决策的判断依据。在线杀伤评估是在当前威胁评估和射流对每个威胁的积累量计算完成之后,实时评估所打击的目标可能被杀伤的概率,这个概率是向威胁提供射流总量的函数。

由于激光武器与众不同的杀伤机理,需要精确计算激光束在目标上需驻留多长时间才能将目标毁伤,这需考虑天气、激光射流速率、目标距离和高度、目标运动速度和方向、目标径向轴的法线与已舰艇瞄准线之间的夹角、舰艇运动、摇摆和震动等的影响,以确定转火射击时机、控制开停发射时间。

根据舰载激光武器强激光束射击的特点,借鉴现有火炮系统闭环校射技术的基本理论,利用精跟踪系统获取强激光束命中点与解命中预测点偏差,对辐射激光束的射击诸元进行实施修正,并根据激光束脱靶量实测数据,用于修正解析算法得出的激光束毁伤概率,进而修正舰载激光武器累计毁伤效能,同时还应用已测脱靶量的统计数据及系统校正量,估算经过实时闭环修正的强激

光束单次毁伤概率,得到更为精确的射击毁伤效能评估结果。

5 对舰载激光武器火力控制系统发展的思考

综上所述,舰载激光武器具有瞄准即命中、转火速度快、抗电子干扰能力强、持续射击能力强、作战效费比高等多种优点,并且可以应对除传统威胁外的新威胁,诸如弹道导弹、反辐射导弹,适应复杂电磁环境能力强。然而,经过分析,要实现激光武器在作战需求中的应用,还需要配备激光武器完善的火控系统。可以说,相比于传统武器,激光武器的优势极为明显,但是必须对激光武器中存在的火控技术问题深入研究。对于激光武器火控问题研究,建议如下:

5.1 提高跟踪瞄准精度

激光武器毁伤目标要求激光束对目标表面辐照点持续照射,其配套的跟踪瞄准系统相比较于传统武器的跟踪瞄准系统所要求的技术指标更高,达到微弧度级。为满足高精度需求,主要提高跟踪精度关键技术,从改进控制结构和控制方法角度出发,以及提高跟踪精度子系统结构控制精度等方面进行研究。

5.2 明确目标毁伤部位选择的方法

为保证激光武器高效运作以及高概率毁伤目标,对辐照点的选择显得尤为重要。但是激光辐照效应涉及面广,包括材料对辐照的吸收、软化、熔化以及热断裂、热爆裂。结合理论与实际,明确毁伤部位选择方法。

5.3 具体化激光大气传输及补偿措施

受海上大气干扰,激光传输过程中畸变严重。依据已有的激光大气传输理论以及补偿机理,结合海面作战环境,在激光打击目标前制定补偿光路传输的预案,并对补偿后效果进行准确评估。

5.4 增强在线杀伤评估能力

舰载激光武器的优势之一是能够对多批次来袭目标实施快速转火并拦截,在实施快速转火及拦截的同时,舰载激光武器火力控制系统需要做出效能评估,以提高舰载激光武器的总体作战效能,这对其在毁伤评估的实时性和准确性提出了更高的要求。

6 结束语

未来战场上,激光武器利用其优异性能,在水面舰艇的防空反导和光电对抗中可发挥独特作用。舰载激光武器完美实现毁伤目标功能,火控系统必不可少。针对激光武器本身特点,区别于传统近防武器系统,其火控系统的研究将保证激光束毁伤目标

的高精度和高稳定度,对火控系统提出新的更高的要求。

参考文献:

- [1] LIU Xiaoming, HE Xihong, ZHANG Yulin. Study of laser weapon and anti-laser technology of missile[J]. Tactical Missile Technology, 2014, (4): 1-5. (in Chinese)
刘晓明,何煦虹,张翼麟. 激光武器及导弹抗激光技术研究[J]. 战术导弹技术, 2014, (4): 1-5.
- [2] YI Hengyu, QI Yu, HUANG Jijin. Development of ship-based laser weapons system[J]. Laser Technology, 2015, 39(6): 834-839. (in Chinese)
易亨瑜,齐予,黄吉金. 舰载激光武器的研制进展[J]. 激光技术, 2015, 39(6): 834-839.
- [3] LIAO Longwen, FENG Jinling, ZHANG Xiabin. Development status of U. S Navy Shipboard Laser Weapon[J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34(12): 9-13. (in Chinese)
廖龙文,冯锦玲,张夏彬. 美海军舰载激光武器的发展现状[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(12): 9-13.
- [4] Phillip Sprangle. Laser weapons for naval applications[J]. Naval Research Laboratory, 2012: 1-21.
- [5] Gregory G Allgaier. The shipboard employment of a free electron laser weapon system[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2003.
- [6] Ivan NgA. Free electron laser weapon for sea archer[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2001.
- [7] ZOU Jie, WANG Jingtao. General technologies of fire control to airborne directed energy weapon[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 361-364. (in Chinese)
邹杰,王景涛. 机载定向能武器反导火控总体技术研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S3): 361-364.
- [8] LUAN Shengli, HAN Jianxing, JIANG Chongjian. Modeling and simulation for shipborne energy laser weapon system[J]. Command Control & Simulation, 2008, 30(5): 61-64. (in Chinese)
栾胜利,韩建兴,蒋充剑. 舰载激光武器系统建模与仿真技术[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(5): 61-64.
- [9] Ching Na Ang. Analysis of high energy laser weapon employment from a navy ship[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2012.
- [10] Timothy S. Fontana. High Power optical cavity design and conception of operations for a shipboard free electron laser weapon system [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2003.
- [11] Bryan M. Gallant. Vibrational analysis of a shipboard free electron laser beam path[D]. Monterey: Naval Postgradu-

- ate School, 2011.
- [12] CHEN Wei, DENG Pan, DOU Xiang, et al. A new method for evaluating high energy laser weapon's anti-missile ability [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, 32(4): 191 - 194. (in Chinese)
陈卫, 邓潘, 樊祥, 等. 一种新的高能激光武器反导能力评估方法 [J]. *弹箭与制导学报*, 2012, 32(4): 191 - 194.
- [13] LI Caorong, LI Yongle, HONG Yu. Development trend and analysis of the tactical laser weapons technology [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2013, 33(2): 13 - 16. (in Chinese)
李朝荣, 李永乐, 洪宇. 战术激光武器技术的发展动向与分析 [J]. *舰船电子工程*, 2013, 33(2): 13 - 16.
- [14] XU Guoliang, ZHAO Shubin, WANG Yong. Technology analysis of shipborne high-energy laser weapon systems intercepting UAVs [J]. *Modern Defence Technology*, 2015, 43(5): 12 - 17. (in Chinese)
徐国亮, 赵书斌, 王勇. 舰载激光武器拦截无人机技术指标分析 [J]. *现代防御技术*, 2015, 43(5): 12 - 17.
- [15] REN Guoguang, YI Weiwei, QU Changhong. High-power fiber lasers and their applications in tactical laser weapons [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(10): 1145 - 1151. (in Chinese)
任国光, 伊炜伟, 屈长虹. 高功率光纤激光器及其在战术激光武器中的应用 [J]. *激光与红外*, 2015, 45(10): 1145 - 1151.
- [16] LIU Xiaoming, GE Yutao. Analysis of development of high energy laser weapon [J]. *Tactical Missile Technology*, 2014, (1): 5 - 9. (in Chinese)
刘晓明, 葛悦涛. 高能激光武器的发展分析 [J]. *战术导弹技术*, 2014, (1): 5 - 9.
- [17] XU Dawei. Development trend and analysis of the shipborne laser weapon aboard [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2012, 32(1): 7 - 9. (in Chinese)
徐大伟. 国外舰载激光武器的发展动向与分析 [J]. *舰船电子工程*, 2012, 32(1): 7 - 9.
- [18] TIAN Fuqing, LI Keyu. Tracking and aiming control of shipborne high-energy weapon [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 1 - 3. (in Chinese)
田福庆, 李克玉. 舰载激光武器跟踪与瞄准控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 1 - 3.
- [19] CHEN Shaojin, WANG Hongke, ZHENG Liegang, etc al. The stabilization analysis of laser weapons' compound-axis tracking and pointing [J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(4): 94 - 97. (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 - 97.
- [20] LI Fanying, XIONG Zhenkai, CAI Jie. Analysis of tracking & pointing requirement 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. 激光武器跟瞄精度及其成因分析 [J]. *自动化技术与应用*, 2014, 33(1): 63 - 66.
- [21] YANG Xielin, LU Peiguo, LIU Xiaoqiang, etc 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.
- [22] NIE Guangshu, LIU Min, WEI Ruixuan, etc al. Application of fuzzy self-adaptive PID controller in the tracking and pointing system of the airborne laser weapon [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2013, 33(2): 121 - 124. (in Chinese)
聂光成, 刘敏, 魏瑞轩, 等. 模糊自适应 PID 控制在机载激光武器跟瞄系统中的应用 [J]. *弹箭与制导学报*, 2013, 33(2): 121 - 124.
- [23] Megan P Melin. Modeling and analysis of high energy laser weapon system performance in varying atmospheric conditions [D]. DR-II Civilian, USAF, 2011.
- [24] Yang Pei, Bi-feng Song. Method for assessing unmanned aerial vehicle vulnerability to high-energy laser weapon [J]. *Journal of Aircraft*, 2012, 49(1): 319 - 323.
- [25] LI Qinyuan. Damage effects of vehicles irradiated by intense laser [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2012: 15 - 19. (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 - 19.
- [26] SU Yi, WAN Min. High-energy laser weapon system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 135 - 143. (in Chinese)
苏毅, 万敏. 高能激光系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 135 - 143.
- [27] Steven T Fiorino, Robb M Randall, Richard J Bartell, et al. Climate change: anticipated effects on high-energy laser weapon systems [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 50(1): 153 - 166.