

引用格式:秦晓科. 光电观瞄系统激光照射距离分析[J]. 电光与控制, 2019, 26(6):92-96. QIN X K. On laser designation distance of electro-optical targeting system[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(6):92-96.

光电观瞄系统激光照射距离分析

秦晓科

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 激光照射距离是光电观瞄系统照射器和火控系统重要的设计输入。对于激光制导系统, 利用能量传递关系可导出入瞳处的能量密度, 进而分析影响光电观瞄系统激光照射距离的因素。通过目标反射因子和大气透过率经验公式的推导, 建立了照射距离和激光能量、导引头灵敏度阈值、束散角、目标大小等影响因素的函数关系。借助 Matlab 编程, 实现照射距离的快速求解。计算结果表明, 照射距离随着激光能量提高而增大, 达到一定距离后, 增速明显放缓。对于面目标, 目标靶面法线平行于弹目连线时, 照射距离最大。此外, 任务高度、目标大小、导引头灵敏度阈值和气象参数等也是影响照射距离的关键因素。

关键词: 激光制导系统; 激光能量; 照射距离; 灵敏度阈值

中图分类号: TN249 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.06.019

On Laser Designation Distance of Electro-Optical Targeting System

QIN Xiao-ke

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: Laser designation distance of electro-optical targeting system is an important design input of the laser designator and the fire control system. By using the energy transfer sequence of laser-guided system, we obtained the energy density at the entrance pupil of the seeker, and analyzed the factors that have effects on the designation distance. The empirical equations of target reflectance factor and atmospheric transmittance were deduced, and the functional relationship between the designation distance and such factors as laser energy, seeker sensitivity threshold, the divergence angle and the size of target, etc. Then the designation distance was obtained with the aid of Matlab. The calculation result showed that: 1) The designation distance increases with the laser energy, and the slope decreases obviously when it achieves a certain distance; 2) For a surface target, the maximum designation distance is reached when the target normal is parallel to target-seeker direction; and 3) There are some other important factors that have effects on the designation distance, including the attack height, the target size, the seeker sensitivity threshold, the atmospheric parameters, and so on.

Key words: laser-guided system; laser energy; designation distance; sensitivity threshold

0 引言

光电观瞄系统主要为载机提供光学搜索侦察、目标识别跟踪和目标指示定位等能力支持。当使用激光制导系统^[1]时, 光电观瞄系统内装备的激光照射器可以对作战目标进行持续照射, 引导激光制导武器实施精确打击。激光制导系统的作战距离指标包含激光照射器的照射距离和导引头的探测距离, 目前关于导引

头探测距离的研究工作较多^[2-5], 为了综合反映激光制导系统的性能, 亟需对影响光电观瞄系统照射距离的因素进行研究。

激光脉冲信号经过照射器发射、大气传输、目标漫反射、大气传输, 最终到达导引头入瞳处, 只有此处能量密度大于导引头的灵敏度阈值, 导引头才能够正常工作。在光电观瞄系统照射器的设计过程中, 照射距离是关键的技术指标之一。分析大气传输、导引头灵敏度阈值、目标漫反射特性、照射器激光能量等因素对照射距离的影响, 可以为照射器和火控系统提供重要设计依据。

在现代战争中, 保持一定的作战任务高度能够有

收稿日期: 2018-07-19

修回日期: 2018-08-16

作者简介: 秦晓科(1987—), 男, 河南洛阳人, 博士, 工程师, 研究方向为光电探测与对抗技术。

效规避敌方防空炮、肩扛式防空导弹等近程武器的攻击,这对光电观瞄系统的激光照射能力提出了较高的要求。分析光电观瞄系统激光照射距离,对制定作战任务具有一定的参考价值。

本文主要研究了影响光电观瞄系统照射距离的因素。首先根据激光制导系统能量传递关系,推导出到达导引头入瞳处的能量密度公式;接着分析了公式中关键参数的数学表达式,从而解析计算照射距离;然后研究了照射器激光能量、大气传输、导引头灵敏度阈值、目标漫反射特性等因素对照射距离的影响;最后总结了本文的研究结果,并为提高光电观瞄系统照射距离提供了设计依据。

1 激光制导系统能量传递分析

1.1 作战过程

激光制导系统在载机执行自主攻击任务时的作战过程如图1所示。

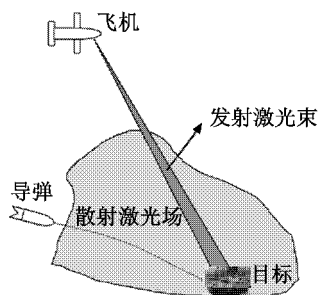


图1 激光制导系统作战过程

Fig. 1 Attack procedure of the laser guided system

首先由雷达和光电系统等对目标进行综合发现、识别,确认目标为待攻击目标后,使用装备在光电观瞄系统上的照射器发射激光束,对目标进行持续照射。激光制导武器投放后,进入目标散射激光场中,由导引头四象限探测器引导激光制导武器对目标实施打击^[6]。

1.2 能量传递分析

图2所示为激光制导系统能量传递关系。激光器发射激光束,通过激光发射系统到达照射器出瞳,经照射器和目标之间路径大气衰减后照射于目标之上,目标将能量漫反射,再经目标和导引头之间路径大气衰减后,到达导引头入瞳,最后通过导引头激光接收光学系统汇聚于四象限探测器。



图2 激光制导系统能量传递关系

Fig. 2 Energy transfer of laser guided system

照射器端影响照射距离的因素主要有激光器激光

能量 E_t 、发射系统透过率 T_t 和束散角 ω 。

照射器到目标的大气透过率为 T_1 ,与照射距离 R_1 相关;目标到导引头的大气透过率为 T_2 ,依赖于末制导距离 R_2 。影响激光传输大气透过率的因素包括能见度、地理位置、斜距和天顶角等。

目标的漫反射过程比较复杂,对能量传递的贡献因素主要有目标大小($2a \times 2b$,单位 m),目标漫反射率(ρ)和目标靶面法线方向等。

由以上分析可知,到达目标漫反射面的总能量 $E_A = E_t T_t T_1$ 。目标漫反射后,光强 $I_\varphi = KE_A/t_0$,其中, K 为目标漫反射因子(单位 1/sr), t_0 为发射激光脉冲宽度。考虑到大气衰减,得到入瞳处光照度^[7] $E_B = I_\varphi T_2/R_2^2$ 。最终推导出入瞳处能量密度为

$$E_r = E_B t_0 = E_t T_t T_1 T_2 K/R_2^2 \quad (1)$$

2 计算方法

2.1 目标反射因子

目标靶面坐标系见图3,其中,入射激光方向与目标靶面法线夹角为 θ ,弹目连线与目标靶面法线夹角为 φ 。

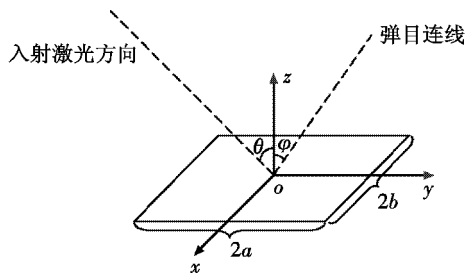


图3 目标靶面坐标系

Fig. 3 Reference frame defined on the target surface

激光器发射出来的激光束能量分布为高斯型^[8],距离照射器 R_1 处的光斑特征半径为 $\omega R_1/2$,假设入射激光方向在 yo z 平面内,照射到目标表面的激光能量占整个光斑能量的比值为

$$\beta = \frac{8}{\pi \omega^2 R_1^2} \int_{-a}^a \int_{-b \cos \theta}^{b \cos \theta} \exp\left[-\frac{8(x_1^2 + y_1^2)}{\omega^2 R_1^2}\right] dx_1 dy_1 \quad (2)$$

具有漫反射表面的辐射体,可以认为是朗伯光源,发光强度分布满足余弦辐射特性^[7],即

$$I_\varphi = I_N \cos \varphi = KE_A/t_0 \quad (3)$$

在半球立体角内积分,可得

$$\pi I_N = E_A \rho \beta/t_0 \quad (4)$$

式中, ρ 为目标靶面漫反射率。进而推导出

$$K = \frac{\rho \beta}{\pi} \cos \varphi \quad (5)$$

代入式(1),改写导引头入瞳处能量密度为

$$E_r = \frac{E_t T_t T_1 \rho \beta T_2}{\pi R_2^2} \cos \varphi \quad (6)$$

当 E_r 大于四象限探测灵敏度阈值 E_s 时, 导引头才能够正常工作。

2.2 大气透过率

大气透过率一般可通过 Lowtran7 软件^[9]或经验公式^[10-11]计算。Lowtran7 软件是目前应用较广的大气传输计算软件, 用于计算低频谱分辨率系统给定大气路径的平均透过率和路程辐射亮度。研究表明, 对于 1064 nm 波长的激光, 修正粒子散射标高后, 大气透过率可表示为^[12]

$$\tau = \exp\left\{-\frac{FH_0(V)\sec\phi}{V}\left[1 - \exp\left(-\frac{H}{H_0(V)}\right)\right]\right\} \quad (7)$$

式中: V 为地面大气能见度; H 表示斜程路径高度; ϕ 为斜程路径天顶角。无量纲系数 F 与地理位置相关: 沙漠取 $F=2.084$; 乡村 $F=2.361$; 城市 $F=2.614$; 海洋 $F=3.792$ 。不同能见度下粒子散射标高 $H_0(V)$ 如表 1 所示^[13]。

表 1 不同能见度下的粒子散射标高

Table 1 Scale height of particle scattering versus visibility

V/km	$H_0(V)$ /km	V/km	$H_0(V)$ /km	V/km	$H_0(V)$ /km
5	0.99	8	1.10	13	1.23
6	1.03	10	1.15	25	1.45

对表 1 中的数据进行多项式拟合后可得

$$H_0(V) = p_0 + p_1V + p_2V^2 + p_3V^3 \quad (8)$$

式中: 系数 $p_0=0.7237$; $p_1=0.0657$; $p_2=0.00275$; $p_3=5.135 \times 10^{-5}$ 。

照射器位于高度为 H_1 的高空, 目标位于地面, 则照射器到目标路径斜程天顶角 ϕ_1 为

$$\phi_1 = \arccos(H_1/R_1) \quad (9)$$

进而得到大气透过率 T_1 为

$$T_1 = \exp\left\{-\frac{FH_0(V)\sec\phi_1}{V}\left[1 - \exp\left(-\frac{H_1}{H_0(V)}\right)\right]\right\} \quad (10)$$

激光制导武器末制导高度为 H_2 , 目标位于地面, 则导引头到目标路径斜程天顶角 ϕ_2 为

$$\phi_2 = \arccos(H_2/R_2) \quad (11)$$

接着推导出大气透过率 T_2 为

$$T_2 = \exp\left\{-\frac{FH_0(V)\sec\phi_2}{V}\left[1 - \exp\left(-\frac{H_2}{H_0(V)}\right)\right]\right\} \quad (12)$$

2.3 角度变换关系

目标靶面法线天顶角为 δ , 则照射器到目标连线与目标靶面法线夹角为

$$\theta = \delta - \phi_1 \quad (13)$$

弹目连线与目标靶面法线夹角为

$$\varphi = \delta - \phi_2 \quad (14)$$

2.4 仿真计算

通过 Matlab 编程计算照射距离的流程见图 4, 计算流程可分解为如下步骤:

- 1) 设置计算所需参数;
- 2) 给出影响照射距离的自变量 X 值, X 为激光能量、束散角、大气能见度、导引头灵敏度阈值等;
- 3) 给出照射距离初始值 $R_1 = dR$, 其中 dR 为照射距离步长;
- 4) 利用式(6)计算导引头入瞳处能量密度 E_r , 需调用式(2)、式(10)和式(12)等;
- 5) 判断 E_r 是否大于导引头灵敏度阈值 E_s , 如果大于, $R_1 = R_1 + dR$, 返回步骤 4) 重新计算, 如果小于, 将 $R_1 = R_1 - dR$ 作为照射距离计算结果;
- 6) 改变自变量 X 值, 返回步骤 3) 重新计算此自变量 X 下的照射距离, 多次循环获得照射距离与所选自变量 X 之间的依赖关系。

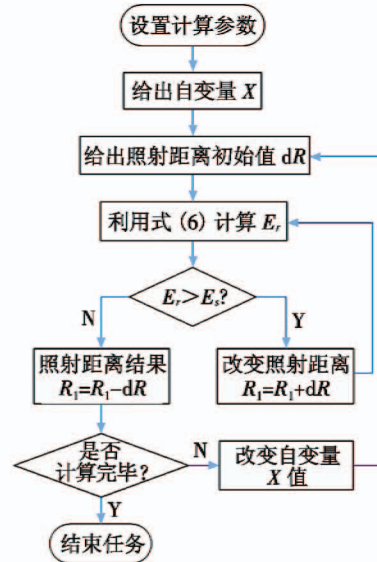


图 4 仿真计算流程图

Fig. 4 Flow chart of calculation

3 照射距离主要影响因素分析

研究影响照射距离的主要因素时, 假设激光制导系统开始工作时导弹飞行高度 $H_2 = 1$ km, 此时弹目距离 $R_2 = 3$ km, 激光发射系统透过率 $T_1 = 0.7$, 目标靶面漫反射系数 $\rho = 0.2$ 。

3.1 照射器

照射器端影响照射距离的主要因素有激光能量和束散角等: 激光能量越大, 照射距离越远; 在同一照射距离下, 束散角越大, 激光光斑越大, 当激光光斑大于目标靶面尺寸时, 只有部分能量被目标漫反射, 直接限制了照射距离的增长, 目标被照射部分的能量占到达此处激光能量的比例用参数 β 衡量。

取目标靶面法线天顶角 $\delta = 45^\circ$, 任务高度 $H_1 = 3$ km, 导引头灵敏度阈值 $E_s = 8$ fJ/cm²。地理位置为乡村, 地面大气能见度 $V = 15$ km。目标大小 $2a \times 2b = 4 \times$

4,单位m。利用 Matlab 编程计算得到不同束散角下照射距离随激光能量的变化关系,如图5所示。

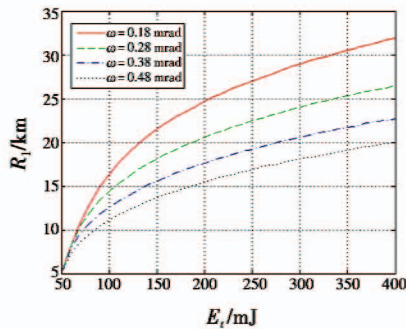


图5 照射距离与激光能量依赖关系

Fig. 5 Designation distance versus laser energy

由图5可知,整体上照射距离随着激光能量的增加而增长,但是并非线性,激光能量较小时,照射距离增长较快,激光能量较大时,照射距离增长放缓。照射距离较小时,光斑全部落入目标靶面之上,即 $\beta = 1$,此时随着激光能量增加照射距离快速增长;随着照射距离增长,光斑大于目标靶面尺寸,照射距离增长时, β 减小,这是激光能量较大时照射距离增长放缓的原因,增长开始放缓的距离由 $2a/\omega$ 和 $2b/\omega$ 的较小值估算,因此束散角越大,增长开始放缓的距离越小。

当激光能量不大时,不同束散角对照射距离影响较小,随着激光能量的增加,不同束散角照射距离的差值也逐渐增大,这是因为照射距离较小时,尽管束散角不同,但是光斑仍然全部落入目标靶面上,即 β 均为1,而当照射距离较大时,束散角变化导致能量分布尺度的变化更加明显,不同束散角对应的系数 β 也会显著不同,造成照射距离随着激光束散角的增加而减小。

3.2 任务高度

取目标靶面法线天顶角 $\delta = 45^\circ$,目标大小为 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$,激光能量 $E_i = 180\text{ mJ}$,束散角 $\omega = 0.28\text{ mrad}$ 。导引头灵敏度阈值 $E_s = 8\text{ fJ/cm}^2$ 。地理位置为乡村,地面大气能见度 $V = 15\text{ km}$ 。在某一任务高度照射时,随着照射距离增大、斜程天顶角变化,照射方向也会变化,进而影响照射方向与目标靶面法线夹角。另外,由于散射粒子标高的存在,即使同样的照射距离,斜程大气透过率与水平也不同,因而照射距离与任务高度相关。利用 Matlab 编程计算得到照射距离随任务高度 H_1 的变化关系,如图6所示。

对于 1064 nm 波长的激光,影响大气透过率的主要因素为气溶胶,气溶胶随着任务高度的增加呈指数下降,对 1064 nm 波长激光的衰减作用也会削弱。分析图6可知,随着任务高度增加,照射距离得到提升,和理论预测结果一致。

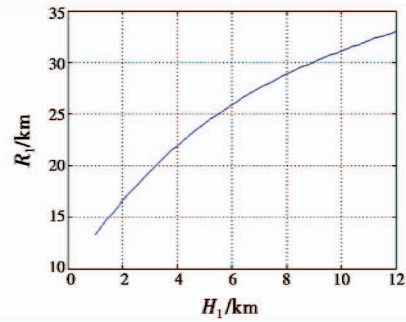


图6 任务高度对照射距离的影响

Fig. 6 Designation distance versus attack height

3.3 气象参数

取目标靶面法线天顶角 $\delta = 45^\circ$,任务高度 $H_1 = 3\text{ km}$,导引头灵敏度阈值 $E_s = 8\text{ fJ/cm}^2$ 。激光能量 $E_i = 180\text{ mJ}$,束散角 $\omega = 0.28\text{ mrad}$ 。目标大小为 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 。令能见度在 $6 \sim 30\text{ km}$ 之间变化,利用 Matlab 编程计算得到不同地理位置(沙漠、乡村、城市和海洋)下照射距离随能见度的变化曲线,如图7所示。

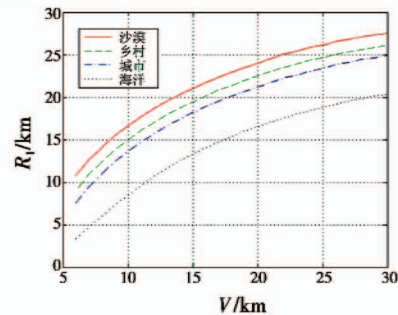


图7 照射距离随能见度的变化

Fig. 7 Designation distance versus visibility

式(6)中,随着能见度的增加,大气衰减作用减弱,结合式(1)可知,照射距离增长。式(7)中,4种地理环境大气衰减程度由强到弱依次为海洋、城市、乡村和沙漠。

图7的结果表明,能见度越高,照射距离越远。在同样的条件下,地处沙漠,照射距离最远,乡村次之,城市更次,地处海洋,照射距离最近。图7的结果和式(7)及前文对大气透过率的分析一致。

3.4 目标特性

为了分析目标特性对照射距离的影响,需要改变目标靶面法线方向。假设激光能量 $E_i = 180\text{ mJ}$,束散角 $\omega = 0.28\text{ mrad}$,任务高度 $H_1 = 3\text{ km}$ 。地理位置为乡村,地面大气能见度 $V = 15\text{ km}$ 。激光制导系统开始工作时,导弹飞行高度 $H_2 = 1.5\text{ km}$,此时弹目连线的天顶角 $\varphi_2 = 60^\circ$ 。导引头灵敏度阈值 $E_s = 8\text{ fJ/cm}^2$ 。图8共显示了4组不同目标大小下照射距离随目标靶面法线天顶角的变化关系,目标大小分别为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, $4\text{ m} \times$

4 m, 8 m × 8 m 和 16 m × 16 m。

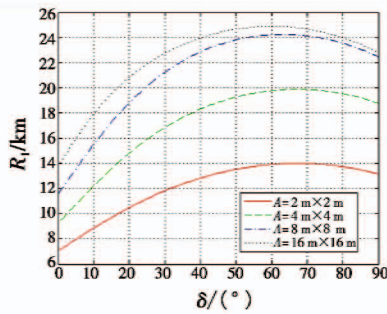


图8 不同目标靶面法线天顶角的照射距离

Fig. 8 Designation distance versus zenith angle of target normal

如图8所示,同一目标靶面法线天顶角下,目标越大,照射距离越远,16 m × 16 m 和 8 m × 8 m 目标下照射距离差距较小,表明光斑大部分能量已在目标靶面上,照射距离差距最小的目标靶面法线基本与照射方向平行。对于大目标(16 m × 16 m),当目标靶面法线天顶角取60°时,得到最大的照射距离。目标尺寸减小时,照射距离取得最大值的位置向更大目标靶面天顶角方向移动,这是因为对于小目标,目标靶面天顶角变化也会引起系数 β 变化,两种因素相互影响导致照射距离取得最大值的目标靶面天顶角向更大角度方向移动。

3.5 导引头灵敏度

取目标靶面法线天顶角 $\delta = 45^\circ$,任务高度 $H_1 = 3$ km,激光能量 $E_t = 180$ mJ,束散角 $\omega = 0.28$ mrad。地理位置为乡村,地面大气能见度 $V = 15$ km。目标大小为4 m × 4 m。利用Matlab编程计算得到照射距离与导引头灵敏度阈值的依赖关系如图9所示。

显然,导引头灵敏度阈值越低,照射距离越远,两者呈反相关关系。实际应用中导引头灵敏度阈值不能过低,过低时,激光后向散射信号可能干扰导引头的工作^[5]。

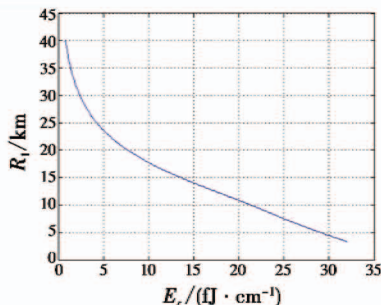


图9 照射距离与导引头灵敏度阈值的依赖关系

Fig. 9 Designation distance versus threshold of seeker sensitivity

4 结论

本文通过激光制导系统能量传递关系获得照射距离与其影响因素的隐函数关系,并利用Matlab编程计算

照射距离的变化。研究表明,照射距离随着激光能量增长到一定程度后,增速明显放缓。对于大目标,目标靶面法线平行于弹目连线时,照射距离最大。目标大小、激光束散角、目标表面法线和照射方向夹角等都会影响激光光斑被目标靶面反射的比例系数 β ,进而影响照射距离。另外,作战地理位置对照射距离的影响体现在等效大气衰减上,等效大气衰减系数越小,照射能力越强。

根据以上影响因素和作战指标要求可确定激光照射器主要指标(激光能量、束散角等),执行任务时,可根据地理位置、能见度等确定任务高度,并与导引头灵敏度阈值匹配,满足作战要求。

参考文献

- [1] 张腾飞,张合新,惠俊军,等. 激光制导武器发展及应用概述[J]. 电光与控制,2015,22(10):62-67.
- [2] 刘秉琦,闫雅慧,周冰,等. 激光半主动制导系统的极限作用距离测量模型[J]. 半导体光电,2014,35(2):354-357.
- [3] 陈前荣,王国玉,陈永光,等. 激光制导武器探测作用距离影响因素分析评估[J]. 电子对抗,2007,117(6):34-40.
- [4] 华创录,王春艳,王晓曼,等. 外场激光导引性能分析[J]. 长春理工大学学报:自然科学版,2017,40(1):60-63.
- [5] 夏兴宇,王国民,李文生,等. 激光半主动制导武器作战配置建模与仿真[J]. 弹箭与制导学报,2013,33(4):45-48.
- [6] 邓潘. 浅析激光半主动寻的制导系统[J]. 制导与引信,2008,29(4):15-20.
- [7] 李晓彤,岑兆丰. 几何光学,像差和光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,2014:78-92.
- [8] AMMON Y. Optical electronics in modern communications [M]. 5th ed. Oxford: Oxford University Press, 1997:121-158.
- [9] 孟凡斌,郑丽. 基于LOWTRAN 7 的红外大气透过率计算方法[J]. 光电技术应用,2009,24(3):29-32.
- [10] 张文攀,吴军辉,胡欣,等. 基于激光导引头对抗数据的光电对抗效果实验方法[J]. 红外与激光工程,2013,42(3):637-642.
- [11] 臧永强,王仕成,刘志国,等. 1.064 μm 激光制导半实物仿真大气衰减模型研究[J]. 电光与控制,2012,19(9):17-22.
- [12] WANG W T, YANG Y Y, ZHAO W F, et al. Analysis of laser atmospheric propagation characteristic and optimization of laser rangefinder [C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging,2013. doi: 10.1117/12.2033264.
- [13] 张辉. 强激光大气斜程传输热晕数值模拟[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.