

·激光技术·

飞机尾喷 CO₂ 扩散的激光探测特性分析

张 华, 胡以华, 林 放

(国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

摘要: 飞机尾喷 CO₂ 浓度扩散场是飞机不可隐藏的目标特性之一, 为间接探测飞机提供了可能。采用数值模拟方法对典型工况下简化飞机模型的尾喷 CO₂ 浓度扩散场进行了仿真, 利用仿真数据模拟了激光雷达系统探测目标并获取 CO₂ 浓度分布的过程, 对不同参数条件下激光探测系统的探测性能进行了仿真分析。结果表明, 飞机尾喷 CO₂ 扩散具有可探测性; 选择合适的激光发散角、扫描角间隔和空间积分距离可探测到飞机, 且在参数组合 (0.5 mrad, 4.4°, 20 m) 和 (5 mrad, 4.4°, 20 m) 下计算得到 CO₂ 浓度扰动中心与设定目标间的距离为 2.9 m。本研究可为实际应用提供参考。

关键词: 飞机尾喷; CO₂ 浓度场; 数值模拟; 激光探测; 系统参数选择

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-05-0012-05

Laser Detection Characteristic Analysis of CO₂ Diffusion of Aircraft Plume

ZHANG Hua, HU Yi-hua, LIN Fang

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: The CO₂ concentration diffusion field of aircraft plume is one of the target characteristics that the aircraft can't hide, by which it's possible to detect aircraft indirectly. With a simplified aircraft model, the numerical simulation method is used to simulate the CO₂ concentration diffusion field of aircraft plume under typical working conditions. Then the process of detecting targets and obtaining CO₂ concentration distribution by a lidar system is simulated with simulation results. And the detection performances of the laser detection system under different parameters is simulated and analyzed. The results show that the CO₂ diffusion of the aircraft plume is detectable with appropriate laser divergence angle, scanning angle interval and space integral distance. The distance between the CO₂ disturbance center and the preset target is 2.9 m when the combination of above parameters is 0.5 mrad, 4.4°, 20 m or 5 mrad, 4.4°, 20 m. This research may provide a reference for practical application.

Key words: aircraft plume; CO₂ concentration field; numerical simulation; laser detection; system parameter selection

飞机尾喷流是飞机燃油在燃烧室燃烧后所排放的废弃流, 它具有很高的温度, 文献[1]表明某型飞机在发动机全加力状态下尾流核心区范围为距喷口 0.4~7 m, 温度在 1 400~1 600 °C 范围内。除此之外, 飞机尾喷流与周围背景大气相比还具有很强的速度场和浓度场, 其扩散范围可达数公里以上, 存在时间在分钟量级^[2], 这就为通过探测飞机尾喷

实现飞机侦测提供了可能。飞机尾喷浓度场包含多种化学组分, 但能够用于目标探测的成分主要是 CO₂ 气体^[3]。因此, 文中采用数值模拟^[2]的方法针对飞机尾喷 CO₂ 浓度场进行了研究, 在此基础上模拟了激光雷达系统探测飞机目标并获取扫描区域内 CO₂ 浓度分布的过程, 进而对激光探测系统不同参数条件下的探测性能进行了仿真分析, 以完成对飞

收稿日期: 2017-09-11

作者简介: 张华(1992-), 男, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为激光相干探测技术; 胡以华(1962-), 男, 安徽怀宁人, 教授、博士研究生导师, 主要研究方向为空间信息和光电信息处理技术; 林放(1995-), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 主要研究方向为激光断层成像。

机的间接探测并得到理想的探测效果。

1 某型飞机尾喷CO₂浓度场数值模拟

对某型飞机尾喷CO₂浓度扩散场进行了数值模拟,旨在获取CO₂浓度分布规律及CO₂浓度值。

1.1 控制方程与数值计算方法

飞机发动机尾喷流是多组分的气体流动,涉及化学成分变化的情况,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型求解流动和扩散问题时,控制方程组包括连续性方程、动量方程、能量方程、 k 方程、 ε 方程和组分方程,这些方程可以表示为如下通用形式^[4]

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{u}\phi) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1)$$

其展开式为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial z}\right) + S_\phi$$

式中, ϕ 为通用变量, $\phi=1$ 为连续性方程, $\phi=u, v, w, k, \varepsilon, T, C_i$ 则分别对应于三个速度分量、湍动能、湍动耗散率、温度和组分的体积浓度; Γ_ϕ 为广义扩散系数; S_ϕ 为广义源项。式(1)中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项,通用方程中各符号的具体形式参见文献[4]。同时为了使方程组封闭,采用理想气体状态方程计算流体密度。

在运用 Fluent 软件进行仿真计算中,对近壁区域采用标准壁面函数进行处理。用有限体积法对上述控制方程进行离散化,采用耦合算法求解方程,压力方程采用 Presto 法求解,其余方程按一阶迎风格式解算。

1.2 计算模型与边界条件

以 2 000 m×2 000 m×3 000 m 范围作为飞机经过大气后产生 CO₂ 浓度扩散场的研究区域,具体地将某型飞机简化为一个最大直径为 4 m、长为 16 m 的纺锤体,这样的简化对机身附近的流场结构有一定影响,但对飞机尾喷流的分布影响较小;机身附近网格加密部分的进口计算区域大小为 40 m×40 m;计算区域进口到目标头部的尺寸为 3 m。由于简化模型呈纺锤体状,故无法用规则的六面体网格划分,同时考虑

到计算区域较大,因而采用分区划分网格的方法,机身附近采用加密的非结构化网格,外围区域采用稀疏的规则六面体网格,计算的过程中还采用了网格自适应技术,图 1 所示为机身附近剖面网格加密图。

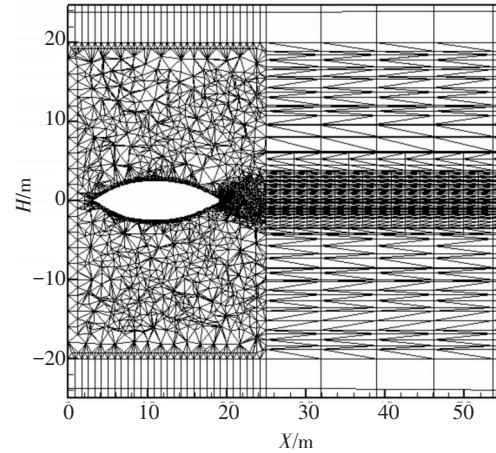


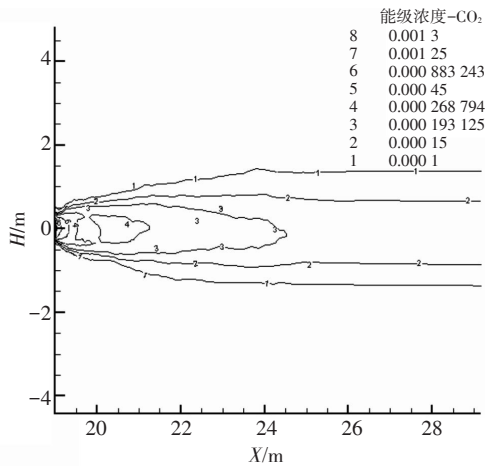
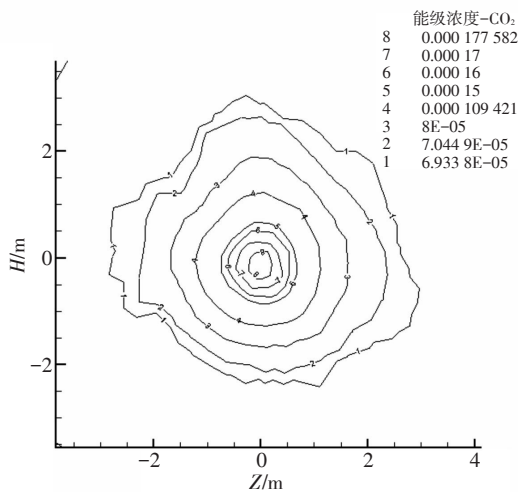
图1 机身附近纵截面网格加密图

所涉及到的边界条件有:进口条件给定进口的大气速度、气体组份、压力、温度以及湍流量等参数值,尾喷口的边界条件按照某型飞机的出口参数给出相应的参数值,计算区域的上下和侧面给定压力远场条件,出口条件给定压力边界条件,对壁面附近的网格节点采用壁面函数法。

1.3 计算结果及分析

计算条件为飞机马赫数 $Ma=0.8$,方向沿 X 轴负向,飞行高度为 8 km。在计算时为了将飞机进入目标区域的非定常问题转化为定常问题,计算时采用相对坐标系进行计算,即将飞机固定,气流速度给定为飞行速度。大气及尾喷口的参数如下:(1)大气参数为氧气质量分数 0.21, CO₂ 质量分数 0.000 42,进口截面静温 $T=236$ K,平均压力 $P=35\ 600$ Pa,大气湍流强度为 1%,大气湍流尺度为 10 m;(2)尾喷出口参数为氧气质量分数 0.02, CO₂ 质量分数 0.16,截面平均总温 $T=2\ 065$ K,平均压力 $P=305\ 600$ Pa,总的质量流量 $m=60$ kg/s,湍流强度为 5%,湍流尺度为 0.05 m。

图 2a 所示为飞机尾喷口附近的 CO₂ 摩尔体积浓度的纵截面分布图。图 2b 为轴向距离 $X=29$ m 处横截面内的 CO₂ 浓度分布图,图中浓度单位为 Kmol/m^3 。

(a) 纵截面内 CO₂ 浓度分布(b) 横截面内 CO₂ 浓度分布图2 飞机尾喷 CO₂ 摩尔体积浓度分布图

从图中可以看出,飞机尾喷 CO₂ 在尾喷口处分布面积较小,但其浓度最高可达 0.001 3 kmol/m³ (约 7 × 10⁴ ppm),这远大于大气中正常水平下的 CO₂ 体积浓度值^[5],随着分子扩散与湍流的影响,在尾喷流的下游其分布面积增大,而浓度则有逐渐减小的趋势;而在横截面内的 CO₂ 浓度分布则表现为随着半径增加,CO₂ 浓度逐渐降低,直至与周围大气平衡,其浓度分布等高线的形状接近于圆形,由于湍流影响其外边缘的等高线变得不规则。

2 激光探测特性分析

2.1 对 CO₂ 浓度场探测理论

对于大气中 CO₂ 浓度的探测获取,可以运用差

分吸收激光技术^[6],以反演得到 CO₂ 的浓度分布,其基本原理是:激光雷达的发射系统发出两束波长相近的激光脉冲,其中一束激光波长位于 CO₂ 吸收峰的中心,记为 λ_{on} ,另一束激光波长位于吸收峰的外侧,其受到的吸收较小,记为 λ_{off} ;激光在大气中传播被大气中的气溶胶散射和吸收;散射回波被接收系统检测,经过信号处理之后得到浓度信息。由于 λ_{on} 和 λ_{off} 相近,近似有如下 CO₂ 浓度解算公式

$$N_w(R) = \frac{1}{2[\sigma_w(\lambda_{on}) - \sigma_w(\lambda_{off})]} \frac{d}{dR} \left[\ln \frac{p(R)_{off}}{p(R)_{on}} \right] \quad (3)$$

其中, $N_w(R)$ 为 CO₂ 气体的分子数密度 (cm⁻³); $\sigma_w(\lambda_{on})$ 和 $\sigma_w(\lambda_{off})$ 分别为 λ_{on} 光和 λ_{off} 光的 CO₂ 吸收截面 (cm²); $p(R)_{on}$ 和 $p(R)_{off}$ 是接收系统接收到的来自距离 $R \sim R + \Delta R$ 处的回波功率,在计算时常将 dR 近似用空间积分距离 ΔR 代替。

2.2 模拟探测过程及判别探测结果原则

在运用 Fluent 软件对飞机尾喷 CO₂ 浓度场进行数值模拟的基础上,可以获得飞机尾喷 CO₂ 浓度分布的数据库,基于以上信息即可模拟激光雷达系统扫描特定空域,反演出径向的 CO₂ 浓度,进而获取扫描区域内的 CO₂ 浓度分布。由于实际中激光束存在发散角 θ ,且采用差分吸收技术解算 CO₂ 浓度时的空间积分距离为 ΔR ,因此某一位置处的 CO₂ 浓度值是一个平均值,故文中模拟激光探测过程获取的某一位置处的 CO₂ 浓度值是由该位置处一定邻域内 (邻域大小由该位置及激光发散角 θ 和空间积分距离 ΔR 共同决定) 的 Fluent 仿真模拟得到的数据的平均值。

设定激光探测系统垂直于 X 轴方向进行 RHI 方式扫描,由此将获得某一扫描截面内的 CO₂ 浓度分布信息。由 Fluent 仿真获得的某型飞机尾喷横截面内的 CO₂ 浓度分布可以发现,越靠近 X 轴 (截面中心) 的位置 CO₂ 浓度值越大,因此在基于 CO₂ 浓度分布反演目标位置信息时,可以将扫描截面内获取的最大 CO₂ 浓度值的位置近似为目标的位置。当然,这是在已经确定目标存在且扫描截面垂直于飞行方向的前提条件下的结果;如果尚未确定目标是否存在,还要先基于扰动信息判断目标的存在与否。然而由于获取的最大 CO₂ 浓度值是一个平均值,其受扫描位置、激光发散角 θ 和空间积分距离 ΔR 等

因素共同影响,因而用来反演目标位置信息不准确。为了得到较为准确的目标信息,采用简单加权平均方法来处理,即目标位置 X_c 为

$$X_c = \sum_{i=1}^n w_i X_i \quad (4)$$

其中, X_i 为某一探测点的位置坐标;而 w_i 为与之对应的权值,并由下式给出

$$w_i = \frac{|C(X_i) - \overline{C(X)}|}{\sum_{i=1}^n |C(X_i) - \overline{C(X)}|} \quad (5)$$

式中, $C(X_i)$ 为 X_i 点的 CO₂ 浓度值; $\overline{C(X)}$ 为扫描截面内各探测点浓度值的平均值,当然用于计算的探测点应该位于飞机尾喷影响区域内,并且剔除自然扰动的影响因素,为此 $|C(X_i) - \overline{C(X)}|$ 需要大于一定阈值,而该阈值一般为一个经验阈值,可以通过仿真实验和实际探测大气 CO₂ 浓度后统计获得。

基于以上说明,在分析激光探测特性时,主要研究扫描位置、激光发散角 θ 和空间积分距离 ΔR 等激光探测系统参数对探测飞机尾喷 CO₂ 浓度信息的影响,其中在扫描区域一定的条件下扫描位置由扫描角间隔 δ 决定。为了对不同探测参数条件下获得的结果进行判别,进而为实际激光探测飞机尾喷 CO₂ 浓度场提供参考依据,需要引入如下判别原则:选择的探测参数要保证能探测到目标,在此条件下使用简单加权平均方法反演得到的目标位置 X_c 越接近仿真时设定的目标位置,则代表此时的激光探测系统参数越优。

2.3 探测结果分析

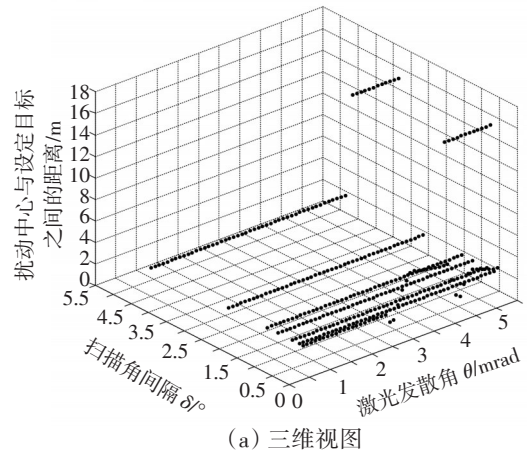
仿真中设定 CO₂ 浓度的探测精度为 50 ppm,并以此作为判别扰动存在与否的经验阈值,而 CO₂ 浓度的探测精度将限制空间积分距离 ΔR 的取值,假设有下式

$$\Delta \left[\ln \frac{p(R)_{\text{off}}}{p(R)_{\text{on}}}_{\min} \right] = 0.01 \quad (6)$$

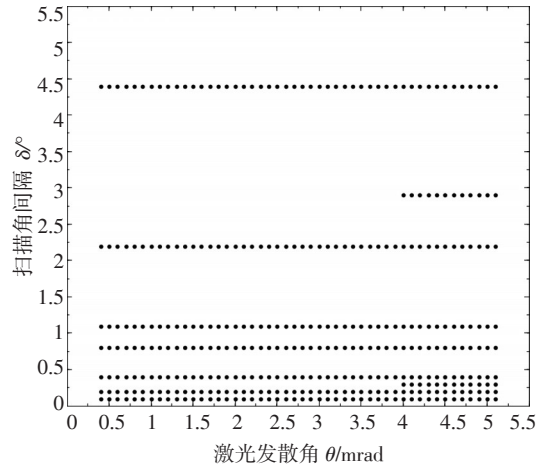
当激光波长为 2 μm 时, $\Delta\sigma_w = 39.96 \times 10^{-22} \text{ cm}^2$, 则经公式计算可得 $(dR)_{\min} \approx 9.3 \text{ m}$ 。

当空间积分距离 $\Delta R = 20 \text{ m}$ 时,仿真了激光发散角 θ 和扫描角间隔 δ 对探测结果的影响, θ 取值范围为 0.1~5.1 mrad,步长为 0.1 mrad, δ 取值范围为 0.1°~5.1°,步长为 0.1°。图 3 所示为仿真结果。

其中图 3a 为三维视图。 X 轴代表变量 θ (mrad), Y 轴代表变量 δ (°), Z 轴代表扰动中心点与设定的目标位置之间的距离(m),而图中的散点则代表在该参数条件下可以探测到目标,且由 Z 坐标值给出扰动中心点与设定的目标位置之间的距离。由此可以看出,只有选择特定的 θ 值和 δ 值才能保证探测到目标,在此基础上,不同的参数组合得到的探测效果也不同,即计算得到的扰动中心点与设定目标之间的距离是有差异的,二者之间距离越小,探测效果越好,仿真得到的二者之间最小距离为 2.9 m。图 3b 为 θ - δ 视图。即图 3a 在 XY 平面的投影。



(a) 三维视图

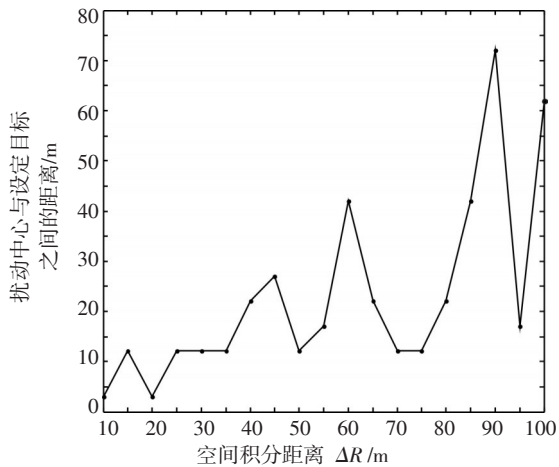


(b) θ - δ 视图

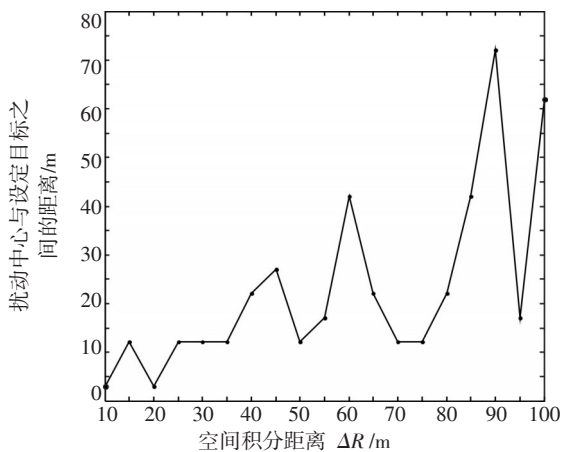
图 3 激光发散角 θ 和扫描角间隔 δ 对探测结果的影响

由该图可以看到,每一个 θ 值都可以找到相应的 δ 值,实现探测到目标的目的,其中探测参数组合 $(\theta, 0.1^\circ)$ 均实现了探测到目标的目的,并且当 δ 值取 0.1° 的 2、4、8 倍和 11、22、44 倍时,也可以探测到目标,剩余散点则集中在 δ 值取 0.3° 和 2.9° 的部分。

进一步地选取能探测到目标的两组 (θ, δ) 参数对空间积分距离 ΔR 对探测结果的影响进行了仿真, ΔR 取值范围为10~100 m,步长为5 m。图4所示为仿真结果。其中图4a为 $(0.5 \text{ mrad}, 4.4^\circ)$ 条件下的结果,图4b为 $(5 \text{ mrad}, 4.4^\circ)$ 条件下的结果。



(a) $0.5 \text{ mrad}, 4.4^\circ$ 条件下的结果



(b) $5 \text{ mrad}, 4.4^\circ$ 条件下的结果

图4 空间积分距离 ΔR 对探测结果的影响

首先可以看出,在这两种情况下 ΔR 取不同值时都可以探测到目标;其次两幅图折线变化趋势一致,随着 ΔR 取值的增大,扰动中心点与设定目标之间的距离发生波动,最小值为2.9 m,最大值为72.0 m,且波动范围有增大的趋势,这是由于 ΔR 取值增大的同时,扰动中心点位置的不确定度也在增大。

3 结论

飞机尾喷产生的 CO_2 浓度场是目标难以抑制和

隐藏的目标特性之一,对其研究可以实现对飞机间接探测的目的。通过数值模拟的手段研究了某型飞机简化模型的尾喷 CO_2 浓度扩散场,以获得飞机尾喷 CO_2 浓度分布的数据库,在此基础上模拟了激光雷达系统采用RHI扫描方式探测飞机目标的过程,并获取扫描区域内的 CO_2 浓度分布;最后通过Matlab仿真了激光发散角 θ 、扫描角间隔 δ 和空间积分距离 ΔR 等激光探测系统参数对探测结果的影响。研究发现,要想探测到目标,就要选择合适的参数组合 $(\theta, \delta, \Delta R)$,在此基础上,不同的参数组合得到的扰动中心点与设定目标之间的距离也是有差异的,二者之间的最小距离为2.9 m,该值可在参数组合 $(0.5 \text{ mrad}, 4.4^\circ, 20 \text{ m})$ 和 $(5 \text{ mrad}, 4.4^\circ, 20 \text{ m})$ 条件下获得。本研究通过数值模拟的手段以较小的投入研究了飞机尾喷 CO_2 浓度的空间扩散特性,并对不同参数条件下的激光探测性能进行了分析,以期为实际工程应用中选择和调节激光探测系统参数提供参考。

参考文献

- [1] 于芳芳,史建邦,邓小宝.飞机尾流温度场测量与数值模拟[J].工程与试验,2011,51(4):31-33.
- [2] 蔡晓春,胡以华,陶小红.飞机尾喷流的速度场及浓度场数值模拟[J].微计算机信息,2008,24(7):263-264.
- [3] 杨越,雷武虎.对飞行目标尾气引起大气成分变化的激光探测[J].红外与激光工程,200,36(s2):427-429.
- [4] 王福军.计算流体动力学分析:CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:122-123.
- [5] 林晓庆,吴晓庆,秦余贞,等.合肥地区 CO_2 含量和湍流通量的测量研究[J].大气与环境光学报,2010,5(1):54-61.
- [6] 陶小红,胡以华,蔡晓春.差分吸收激光雷达探测大气 CO_2 精度分析[J].大气与环境光学报,2008,3(2):100-103.
- [7] 胡以华,吴永华.飞机尾涡特性分析与激光探测技术研究[J].红外与激光工程,2011(6):20-22.
- [8] 周中亮,应加驹,何永强,等.激光复合探测技术研究[J].激光与红外,2010,40(9):976-980.
- [9] 张冰娜,张亮,黄庚华,等.一种红外引导激光指向红外指向双模复合探测技术研究[J].中国激光,2011,38(9):0917001-1-0917001-6.
- [10] 谷锁林,孙华燕,张永继,等.空中目标的激光主动探测[J].激光与红外,2005,35(7):476-478.