

# Research on the Multi Dynamic Characteristics of the Tactical Infrared Decoy Based on Aerodynamics

Qi Hu<sup>1,2</sup>, Jin Duan<sup>1\*</sup>, Di Zhai<sup>3</sup>, Lining Wang<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

<sup>2</sup>Information Engineering Department, Jilin Business and Technology College, Changchun Jilin

<sup>3</sup>Department of Public Security of Jilin Province, Changchun Jilin

<sup>4</sup>College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun Jilin

Email: \*duanjin@vip.sina.com

Received: May 1<sup>st</sup>, 2016; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2016; published: May 25<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In the research field of the elastic characteristics of infrared decoy, the dynamic aerodynamic characteristics research is particularly important for the practical application of it compared with the relatively static radiation characteristics research. Therefore, considering the influence of the multi dynamic characteristics of infrared decoy and using the principle of aerodynamics and atmospheric model, we systematically analyzed the close relationships among the variation law of gravity attenuation, flight speed and Mach number of the infrared decoy, which effectively simulated the trajectory effect of the pneumatic model of the infrared interference missile in three-dimensional space. Using development tools like VC++. Net and OpenGL to do integrated simulation and design experiment on the actual trajectory model of the decoy and adaptively adjust the multiple dynamic characteristics of the decoy basically reaches the expected improvement goal, and further provides a strong support for the improvement of the tactical infrared decoy combat effect.

## Keywords

Dynamic Characteristics, Infrared Decoy, Aerodynamics, Infrared Radiation, Mach Number

---

\*通讯作者。

# 基于空气动力学的战术红外干扰弹多元气动特性研究

胡奇<sup>1,2</sup>, 段锦<sup>1\*</sup>, 翟翟<sup>3</sup>, 王立宁<sup>4</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春

<sup>2</sup>吉林工商学院信息工程学院, 吉林 长春

<sup>3</sup>吉林省公安厅, 吉林 长春

<sup>4</sup>吉林大学生物和农业工程学院, 吉林 长春

Email: \*duanjin@vip.sina.com

收稿日期: 2016年5月1日; 录用日期: 2016年5月22日; 发布日期: 2016年5月25日

## 摘要

在红外干扰弹自身特性研究领域, 与其相对静态的辐射特性研究相比, 其复杂多变的动态气动特性研究对于实战应用显得尤为重要。为此, 本文针对红外干扰弹多元气动特性影响, 利用空气动力学原理及大气模型, 系统分析了红外干扰弹的飞行速度与马赫数之间的紧密关系, 进而高效模拟了红外干扰弹气动模型在三维立体空间中的作用效果。通过VC++.net及OpenGL开发工具对干扰弹的实际弹道模型进行综合模拟仿真设计实验, 将红外干扰弹的气动特性进行自适应调节, 基本达到了预期的改进目标, 进而为红外干扰弹改进实战效能提供了有力支撑。

## 关键词

气动特性, 红外干扰弹, 空气动力学, 红外辐射, 马赫数

## 1. 引言

近些年, 在红外干扰弹的模拟仿真系统研究中, 人们对于红外干扰弹自身的辐射特性进行了较为深入的研究。然而, 当红外干扰弹脱离载机被投放于大气中, 自身处于非线性的动态变化过程。除了自身离机瞬间所受推力而赋予的初速度以外, 必将受到空气阻力等外在因素的影响。此外, 因大气中存在的自身辐射反射、大气湍流效应、大气消光等现象, 红外干扰弹的红外辐射因受到某些气体选择性吸收以及各种悬浮微粒反射散射等因素的影响而产生衰减, 这不仅会对红外成像系统造成影响, 而且其燃烧周期及运动轨迹也必将受到影响[1]。为此, 本文从红外干扰弹的多元气动特性展开深入研究, 并应用空气动力学原理, 系统分析红外干扰弹的飞行速度与马赫数之间的紧密关系, 进而高效模拟了红外干扰弹气动模型在三维立体空间中的作用效果。

在红外诱饵弹的研究方面, 国外的 E.-C. Koch, P. Ase, A. Snelson 等在 Propellants Explos, Pyrotech 等杂志上发表了多篇论文, 内容涉及红外诱饵弹的材料、外形、运动轨迹以及三维建模仿真等[2]-[6]。而近年来, 国内的研究人员也对此开展了广泛研究。其中, 文献[7]-[9]对红外干扰弹干扰制导弹的机理进行了较为深入的研究, 并建立了红外干扰弹的运动模型和辐射模型; 文献[10]-[12]则对红外干扰能量质心的运动特性进行了仿真与研究; 文献[13]则从大气透过率的角度研究红外干扰弹的红外辐射传输特性, 并

系统分析了不同大气环境下红外制导导弹所获取的辐射量的变化情况;文献[14]-[17]提出了关于面源型红外诱饵弹的关键技术指标,对于提升虚拟视景仿真逼真度提供了有利条件;在此基础上,文献[18]-[20]介绍了低燃温红外干扰弹的设计及辐射特性,并证明了大面积、高效能、宽光谱的面源型红外干扰弹是对抗红外制导武器的一种有效手段,从以上多数的研究成果来看,对于红外干扰弹自身的辐射特性研究较多,而对处于运动中其动态燃烧消耗特性研究较少,而且从大气多变的实战环境下分析红外干扰弹的实际运动状态的研究文章较少。为此,本文将重点从红外干扰弹投放之后所体现的多元气动特性开展研究,并结合典型的气候环境影响因素,力争为实战战况模拟提供较为全面的技术支撑。同时,也为新型红外干扰弹的研制提供较为详实的理论指导。

## 2. 红外干扰弹的气动特性分析

不可否认的是,红外干扰弹的红外辐射特性研究对其干扰性能而言起到决定性的因素,但随着红外干扰弹种类的不断丰富,例如伴飞式红外干扰弹、拖曳式红外干扰弹等新型弹体的出现,对其进行传统单一式的辐射特性研究已无法满足精确干扰的作战需求。为此,本文视红外干扰弹为具有短暂独立飞行行为的飞行弹体进行研究,在已有关于红外干扰弹辐射特性研究成果基础上,对其进行气动特性研究,进而使其达到精确干扰的最终目的。

当红外干扰弹被视为具有短暂独立飞行行为的飞行弹体时,其飞行过程及飞行轨迹的预置将充分考虑其空气动力学特性和所处的大气环境,这必将极大影响其飞行状态和燃烧周期。当红外干扰弹投放后,红外诱饵剂被迅速点燃产生高温火焰,并在其周围产生高温气体[21][22]。根据流体力学中的二维不可压定常流动理论,投放后的红外干扰弹可以被视为一个点源,如图1所示。大气气流相对红外干扰弹可以认为是直匀流,根据流体力学的叠加原理,单位时间内有流体加入流场,全部流量流向正 $x$ 方向。而流场内各点的气体状态参数除与红外干扰弹的相对位置有关以外,还与其所处的绝对高度 $h$ 和相对速度 $v_m$ 等相关参数有关。接下来,本文将从红外干扰弹的所受空气阻力、马赫数及重力衰减等多元气动特性进行分析。

## 3. 红外干扰弹的多元气动模型

根据有翼导弹飞行动力学理论及大气环境中的复杂因素影响作用,进而建立了制导导弹与红外干扰弹和目标载机三者之间的相对动态弹道模型,其示意图如图2所示。根据红外干扰弹被投放后在大气中的受力情况分析,载机的飞行为红外干扰弹赋予了初动能[23][24]。此外,红外干扰弹还会受到自身重力 $G$ 及与其运动方向相反的阻力 $Q$ 的影响。三个作用力都在不断的变化之中,也就导致了红外干扰弹弹道轨迹的不确定性,进而降低了红外干扰弹精确的干扰效果。

### 3.1. 空气阻力分析

设红外干扰弹发射后发生燃烧反应的微元体质量为 $m$ ,重力加速度为 $g$ ,在空中主要受到重力与空气阻力的作用,为了便于计算,模拟弹道计算暂且只考虑2D铅垂平面情形[25]。

$$Q = \frac{\rho V^2 S_R k_x}{2m} \quad (1)$$

式中, $Q$ 是空气阻力, $S_R$ 是导弹参考面积; $\rho$ 为空气密度, $V$ 为干扰弹飞行速度, $k_x$ 为阻力系数。

而干扰弹阻力系数 $k_x$ 又可表示为由其马赫数 $M_a$ 、雷诺数 $R_e$ 、章动角(攻角) $\delta$ 相关参数所组成的函数,一般可表示为[26]:

$$k_x = T(M_a, R_e, \delta) \quad (2)$$

其中, $R_e = \rho \cdot V \cdot L / k_c$ ,这里 $L$ 是干扰弹长度, $k_c$ 是空气的动粘性系数,其随高度的变化曲线如图3所

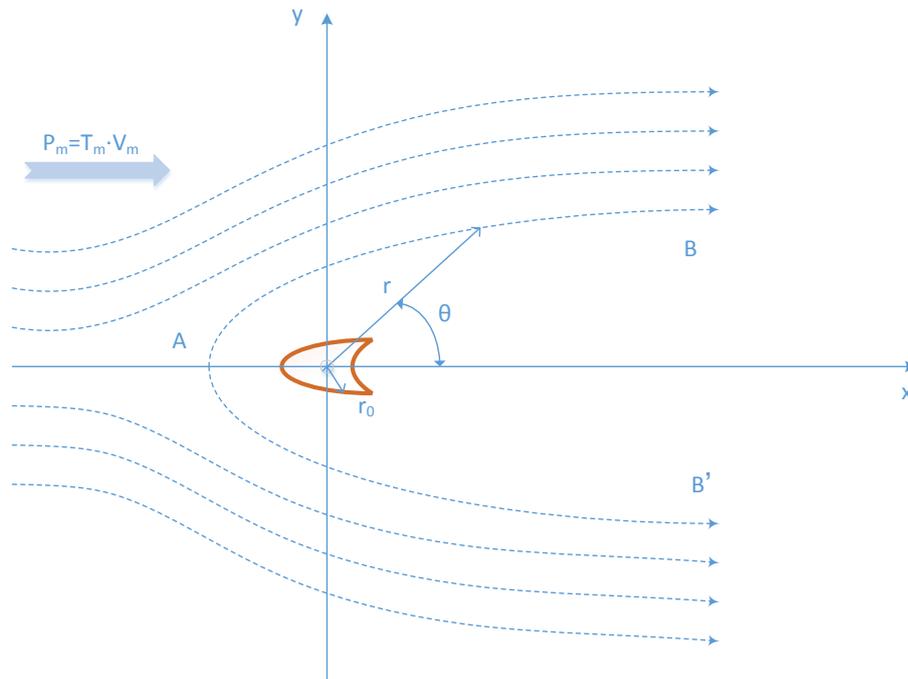


Figure 1. Sketch map of the aerodynamic model of infrared decoy

图 1. 红外干扰弹的气动模型示意图

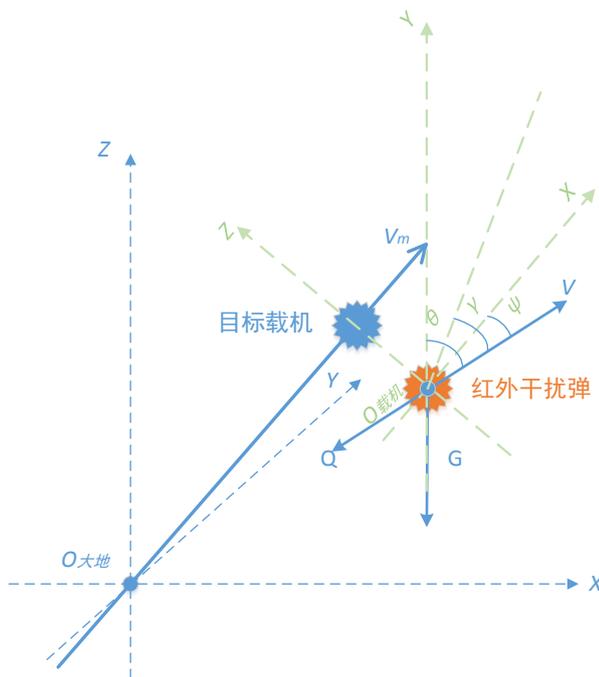


Figure 2. Relative dynamic trajectory model of infrared decoy and guided missile and target aircraft three

图 2. 红外干扰弹与制导导弹和目标载机三者之间的相对动态弹道模型

示。一般处于稠密大气中的低速流动状态下，其雷诺数一般小于 1。

而  $M_a = V/C$ ，这里  $C$  为音速。两个参数值大小既与红外干扰弹的实时速度相关，同时又均作用于

其阻力系数的变化[27]。

通常情况下，当马赫数  $M > 0.6$  时(干扰弹正是工作在此范围)，雷诺数对阻力系数的影响不大，故通常可以忽略，即：

$$k_x = T(M_a, \delta) \tag{3}$$

首先分析一下红外干扰弹阻力系数在  $\delta = 0$  时， $k_{x0}$  与马赫数  $M_a$  关系曲线，如图 4 所示：

1) 亚音速段 ( $M_a < 0.75$ )，此段  $k_{x0}$  较小且近似为常数。这是因为此时空气阻力由摩擦阻力和涡流阻力组成，弹形确定后，阻力随速度变化较小。

2) 跨音速段 ( $0.75 < M_a < 1.3$ )，阻力系数随马赫数发生激烈变化，几乎是直线上升至最大值附近。这是因为在干扰弹附近区域气流达超音速，并有激波出现于弹体表面，故阻力急剧增加。

3) 超音速段 ( $M > 1.3$ )，此时  $k_{x0}$  最大且近似为常数。这是因为此时离体的弹头波，开始近似为一平面，激波角接近  $90^\circ$ ，且距弹顶较远。当速度逐渐增大时，激波角逐渐变小，激波逐渐接近弹顶，因此使

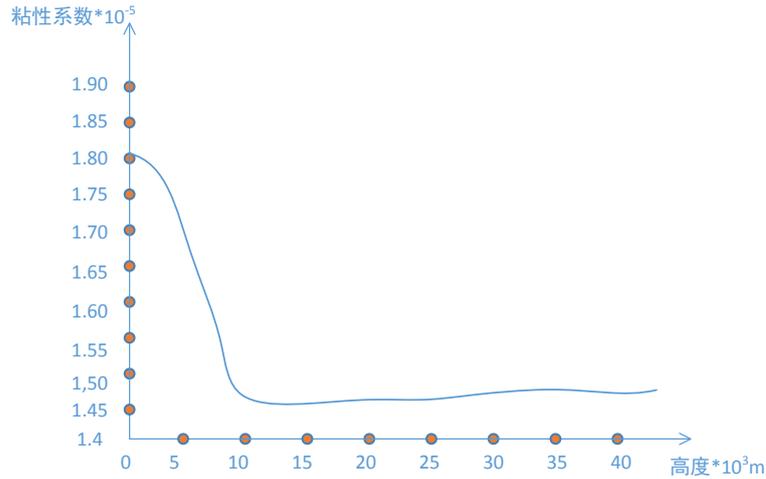


Figure 3. The variation curves of the standard atmospheric viscosity coefficient with altitude  
图 3. 标准大气粘性系数随高度的变化曲线

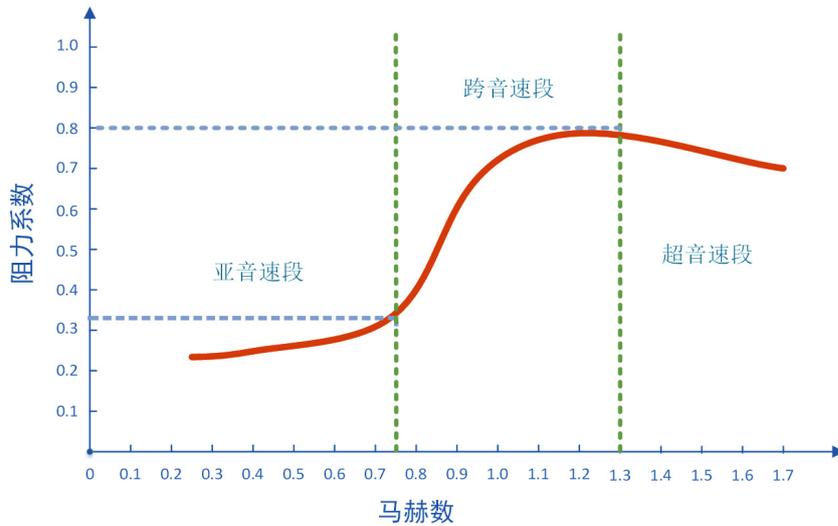


Figure 4. Relationship curve between resistance coefficient and Maher number  
图 4. 阻力系数与马赫数关系曲线

$k_{x0}$  基本不变[28]。

### 3.2. 重力衰减分析

红外干扰弹被投掷后,除了受到空气阻力之外,还有就是受到随着其负载诱饵剂的不断燃烧降质而迅速变化的自身重力作用。

$$G = mg = (m_0 - m_c t) g_0 \left[ R_d / (R_d + h) \right]^2 \quad (4)$$

式中,  $G$  为红外干扰弹所受的重力,  $m$  为干扰弹实时质量,  $m_0$  为导弹的初始质量,  $m_c$  为燃料的每秒消耗量(kg/s),  $g$  为重力加速度,  $g_0 = 9.806 \text{ m/s}^2$ ,  $R_d$  为地球半径,  $h$  为高度(m)。对于其重力衰减速度而言,  $m_c$  将起到十分重要的作用[29]。

而在仿真系统中,所有物体都是基于大地坐标系,所以最终干扰弹的运动模型都必须建立在大地坐标系下。设载机的速度为  $V_m$ , 发射干扰弹的瞬间, 载机位置在大地坐标系下的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 载机的偏航角、俯仰角和滚转角分别为  $\psi_0$ 、 $\theta_0$  和  $\gamma_0$ 。诱饵弹被发射出去的时候, 发射器位置与机体坐标系原点重合, 红外干扰弹的发射速度为  $v_1$ , 可得到红外干扰弹在发射的瞬间于机体坐标系里的速度分量分别为  $v_{x1}$ 、 $v_{y1}$ 、 $v_{z1}$  则:

$$V(v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}) = \Theta(v_0, v_1, \theta_0, \psi_0, \gamma_0) \quad (5)$$

### 3.3. 影响因素分析

红外干扰弹在大气中的运动过程相当复杂,上述分析也只是单纯建立在理想的标准大气环境条件下,除了之前分析的红外干扰弹的飞行高度对其辐射强度和有效燃烧时间的影响并非呈现线性特性之外,还应与季节因素、模式大气因素(赤道热带气候、近赤道亚热带气候等),以及不同天气影响因素,如温湿度、风向、风速、云量、云层基本高度、可视范围等[30]。此外,有研究指出,在尘、霾、烟雾、云雾、雨雪等典型能够影响能见度的不良大气环境条件中,其运动轨迹、燃烧温度及辐射能量也会受到大气中各种因素的影响而衰减变化。据不完全统计,大气中的微小颗粒可使采用可见光及近红外制导方式的制导武器作用距离降低 20%~70%,而对波长较长的中远红外制导方式,可使其作用距离下降 60%~70%,使得精确制导武器的制导严重受阻,甚至无法正常工作[31]。由此可见,不同大气环境的影响也是导致红外干扰弹辐射特性的主要外部因素之一。

## 4. 实验结果

本文重点从红外干扰弹的辐射特性和运动特性出发,根据以上所建立的红外干扰弹的一般数学模型及传热平衡方程式,采用 PC 机作为仿真平台,基本配置为 Intel Core i5 4590 处理器,8 G 内存,华硕 GTX960-DC2OC-4GD5-SI 显卡,显存为 4 G。实验采用 VC++.NET 及 OpenGL 工具共同实现红外干扰弹与载机的弹道模型(如图 5 所示)。利用所建立的仿真模型,设载机的速度为 300 m/s,发射干扰弹的瞬间,载机位置在大地坐标系下的坐标为(200, 4550, 200)。为简化计算,载机沿  $x$  轴方向飞行,偏航角、俯仰角和滚转角为  $0^\circ$ ,干扰弹被发射出去的时候水平角为  $45^\circ$ ,俯仰角为  $90^\circ$ ,红外干扰弹的发射速度为 25 m/s。经与实际干扰弹的弹道轨迹比对来看,基本模拟了其实际运行状况。

## 5. 结束语

本文所研究的红外干扰弹的多元性气动特性,通过对于红外干扰弹的投放方式,以及投射之后在空中所受到的气动特性的分析,对于红外干扰弹的气动特性进行了系统的梳理,进而将作用因子反馈至其气动特性之中。本文通过 VC++.NET 与 OpenGL 工具进行系统仿真设计实验,针对影响因

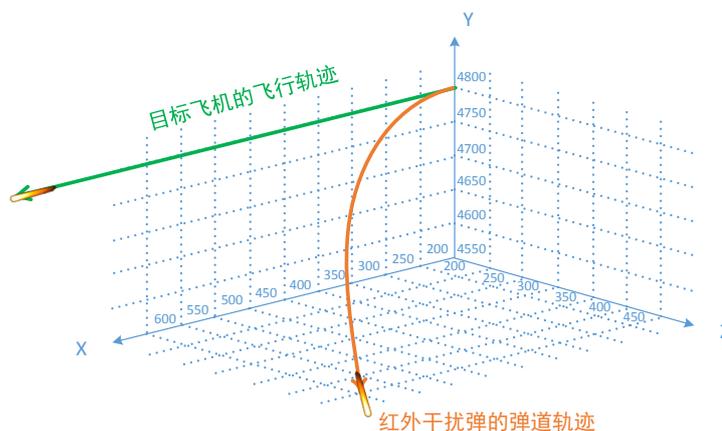


Figure 5. The trajectory mode of IR decoy and target aircraft  
图 5. 红外干扰弹与载机的弹道模型

子的设计及改进, 进而较好地作用于红外干扰弹的运动轨迹及干扰效率, 希望能够对于改进红外干扰弹的实际作战效能提供理论支撑。

## 参考文献 (References)

- [1] Koch, E.-C. (2009) 2006-2008 Annual Review on Aerial Infrared Decoy Flares. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **34**, 6-12. <http://dx.doi.org/10.1002/prop.200700219>
- [2] Koch, E.-C. (2001) Review on Pyrotechnic Aerial Infrared Decoys. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **26**, 3-11. [http://dx.doi.org/10.1002/1521-4087\(200101\)26:1<3::aid-prop3>3.0.co;2-8](http://dx.doi.org/10.1002/1521-4087(200101)26:1<3::aid-prop3>3.0.co;2-8)
- [3] Koch, E.-C. (2006) Pyrotechnic Countermeasures: II. Advanced Aerial Infrared Countermeasures. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **31**, 3-19. <http://dx.doi.org/10.1002/prop.200600001>
- [4] Hooper, J.F., Hamshere, B.L. and Kilpin, D. (1994) AMRL Study of Composite Propellants for IR Decoy Application. Technical Report, DSTO-TR-0044.
- [5] Rogalski, A. (2006) Competitive Technologies of Third Generation Infrared Photon Detectors. *Opto-Electronics Review*, **14**, 84-98. <http://dx.doi.org/10.2478/s11772-006-0012-2>
- [6] Buford, A.J., King, D.E. and Bowden, M. (1997) Low Cost Realtime IR Scene Generation for Image Projection and Signal Injection. *Part of the SPIE Conference on Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing II*, **3084**, 48-57.
- [7] 赵善彪, 张天孝, 李晓钟. 红外导引头综述[J]. 飞航导弹, 2006(8): 42-46.
- [8] 孙伟通, 陈长春, 张洪涛. 红外成像制导及对抗技术[J]. 光电技术应用, 2003, 72(4): 17-21.
- [9] GB3100-3102-93. 量和单位[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [10] 徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997, 9-13.
- [11] 刘阳, 仲秦, 阎杰. 红外成像型空空导弹目标自动识别技术[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(10): 136-141.
- [12] 杨东升, 孙嗣良, 戴冠中. 基于三维仿真模型的飞机红外图像仿真研究[J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(5): 758-764.
- [13] 简爱平. 红外目标图像建模与仿真[M]. 西安: 西北工业大学, 2001.
- [14] Chronister, A. (2004) Blender Basic. Class Room Tutorial Book. [www.blender.org](http://www.blender.org)
- [15] 罗聪翼, Blender 权威指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [16] 孙蓓. 红外导引头图像处理[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [17] Mann, S. (2002) Intelligent Image Processing. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- [18] Pratt, W.K. (2001) Digital Image Processing. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- [19] (美)冈萨雷斯, (美)伍兹. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 148-160.

- [20] 王洪强, 方洋旺, 伍有利, 曾宪伟. 红外诱饵弹干扰特性与仿真[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(4): 25-28.
- [21] 卢君, 徐大伟, 石永山. 机载红外诱饵弹的运动轨迹模型及发展方向[J]. 光电技术应用, 2004, 19(3): 10-14.
- [22] 陈纯. 计算机图像处理技术及算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 75-80.
- [23] 张文华, 王星, 张凤鸣, 童中翔. 红外诱饵弹气动辐射特性数学建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(21): 5731-5736.
- [24] 彭真明, 雍扬, 杨先明. 光电图像处理及应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2008: 152-155.
- [25] 金政芝, 杜文红, 王星, 鲁磊. 红外诱饵弹建模与视景仿真实现研究[J]. 火箭与制导学报, 2010, 30(6): 31-34.
- [26] 姜长生, 王从庆, 魏海坤, 陈谋. 智能控制与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 232-246.
- [27] 徐勇, 荆涛. 神经网络模式识别及其实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999: 57-90.
- [28] Bradski, G. and Kaehler, A. (2008) Learning OpenCV. O'Reilly Media, Inc., Sebastopol, 340-348.
- [29] Kalman, R.E. (1960) A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering*, **82**, 35-45.
- [30] 李弼程, 邵美珍, 黄洁. 模式识别原理与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 89-93.
- [31] 钟珞, 潘昊, 封筠, 何平. 模式识别[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006: 177-191.