

红外诱饵弹干扰特性有限元建模

朱 敏¹, 陈 宇², 杨春玲¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 山东华宇空间技术公司, 山东 烟台 264000)

摘 要: 针对国内诱饵弹半实物仿真技术和红外制导技术研究的迫切需要, 提出了针对诱饵弹干扰特性的有限元建模方法。通过分析诱饵弹的工作机理和运行状态, 借助有限元方法建立诱饵弹的温度流场分布和空气变阻力运动特性模型, 并通过仿真实验验证所提出模型的有效性和正确性, 该方法不仅能为红外诱饵弹的设计和红外制导算法的研究提供依据, 也对红外半实物仿真系统的搭建有重要指导意义。

关键词: 红外诱饵弹; 干扰特性; 有限元建模; 仿真

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-1979-08

Infrared decoys interference characteristics of finite element modeling

Zhu Min¹, Chen Yu², Yang Chunling¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Shandong Arima Space Technology Company, Yantai 264000, China)

Abstract: In view of the urgent need for domestic decoys loop simulation technology and infrared guidance technology research, a finite element modeling method interference characteristics for decoys was proposed in this paper. The mechanism and the operating status of the decoys were analyzed, the flow field of the decoys were solved accurately based on finite element theory. Then the changes of air resistance in the process of decoys sports movement and the distribution of temperature field were studied in the paper, and the decoys movement characteristics and radiative properties of the finite element model were set up, which provides a theoretical basis for the hardware-in-loop simulation. And simulation verify the validity and correctness of the proposed model. The method can not only provide the basis for the infrared decoys design and infrared-guided algorithm research, but also have important guiding significance of infrared decoy HIL simulation system.

Key words: infrared decoys; interference characteristics; finite element modeling; simulation

收稿日期: 2012-12-27; 修订日期: 2013-01-16

基金项目: 黑龙江省博士后资助(LBH-Z11157); 中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.NSRIF.2012010)

作者简介: 朱敏(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事红外图像处理方面的研究。Email: zhumin@hit.edu.cn

0 引言

目前,国外相关机构已经在红外诱饵弹特性模型和仿真系统的研制方面展开工作。如美国 Naval Air Warfare Center 建立的红外成像仿真实验室,美国 CSA 实验中心 (Computer Science and Application Inc) 设计开发的红外景像模拟系统 IRSP 等,都已经得到实际应用,并发挥了巨大的作用^[1-2]。

AIISPES 系统是美国陆军在 20 世纪末建立的武器性能评价系统,该系统已经具备测试空中武器的能力,可以对常规飞行武器、红外对抗武器、机载舰载诱饵武器等多种红外制导武器进行打靶实验和仿真测试,在美国陆军系统中得到广泛的使用^[3]。

英国 Chemring 防务公司为便携式防空武器开发了专业的目标特征模拟系统和配套的仿真软件-COUNTERSIM^[4]。该系统能够对直升机及其红外对抗系统(主要是机载红外诱饵弹)进行模拟,通过用户的输入,描述目标的大小、形状和表面温度分布,由于该软件使用了 3D 场景模拟技术,使得用户可以真实地再现仿真目标的工作状态。

法国、以色列等国家也开展了红外半实物仿真系统的研制,并取得一定成果。20 世纪 80 年代,以色列研制并生产出一款红外模拟器,该模拟器专门用于动态目标的红外图像仿真,可以对不同背景下的红外目标进行实时模拟^[5]。

尽管国外相关机构和科研单位已经对红外目标半实物仿真系统进行了大量的研究,但针对仿真目标,特别是红外诱饵弹的自身特性研究比较少,现有的仿真系统多是使用简化仿真模型对其运动功和辐射特性进行仿真,使得仿真系统的可信度有所降低^[6-9]。

美国空军研究实验室 (Air Force Research Laboratory) 研究员 James J. Maier 和 David P. Forrai 对红外诱饵弹特性进行了研究,提出了诱饵弹运动的简化模型和单波段红外辐射模型^[10]。

弗罗茨瓦夫理工大学 (Wroclaw University of Technology) 的 Krzysztof Sibiński 教授和波兰空军材料研究院 (Air Force Material Command) 的研究员 Janusz B. Aszczyk 博士,对直升机自我防卫系统进行了研究,建立了直升机和机载诱饵等防卫武器在天空背景下的红外辐射模型^[11]。

国内对红外诱饵弹的特性也有一定的研究。在

诱饵弹特性建模方面,空军工程大学、西北工业大学和东北电子技术研究所等高等院校和科研机构,对诱饵弹的运动规律及辐射特性进行了研究和仿真^[12-17]。空军工程大学的刘加从等人,对诱饵弹运动简化模型进行了研究,着重讨论了诱饵弹运动过程中的受力情况^[18]。东北电子技术研究室的研究人员,结合实践经验,给出了面源式诱饵弹的辐射特性及其仿真模型,并对该类型的诱饵弹干扰性能进行了评价^[19]。

另外,空军工程大学的张文华等人,将红外诱饵弹的工作环境进行了简化,以匀直流点源模型为基础,建立了诱饵弹的流体力学模型,并推导出此模型下诱饵弹的相关气动参数,同时提出了等效分子假设,给出了诱饵弹的辐射特性模型。该模型从理论的角度,给出了诱饵弹运动及辐射特性的计算方法,从一定程度解决了以往模型对风洞实验的依赖^[20]。

总之,国内各单位在诱饵弹半实物仿真技术的研究上还处于起步阶段,特别是在诱饵弹精确模型的建立和新型红外模拟器的研制方面,与国外先进水平有很大的差距。因此,有必要对诱饵弹半实物仿真技术进行更深入的研究,以适应制导武器的发展需要。红外诱饵弹的干扰特性主要指诱饵弹的运动特征和红外辐射特性。对诱饵弹干扰特性的研究,不仅能为红外诱饵弹的设计和红外制导算法的研究提供依据,也对红外半实物仿真系统的搭建有重要指导意义。文中对诱饵弹的流场分布进行研究,建立诱饵弹空气动力特性的有限元建模,研究诱饵弹的运动规律和辐射特性,并建立相应的干扰特性模型。

1 诱饵弹气动特性有限元分析

1.1 诱饵弹 workflows 的分析与简化

诱饵弹工作时,内部燃料迅速燃烧,产生大量的高温燃气,喷射到弹体周围。这一特性使得诱饵弹周围流场的分布变得十分复杂,不同于一般弹丸运行时周围流场的匀直流情况。根据空气动力学基础理论,诱饵弹运动时,周围空气流场的分布满足流体力学基本方程组:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} &= 0 \\ \frac{d\mathbf{e}}{dt} + \mathbf{p} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) &= \mathbf{q}_R \\ \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= \rho \mathbf{F} - \nabla \mathbf{p} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ρ 为气体密度; v 为气体流速; e 为气体内能; p 为压力张量; q_r 为气体辐射热; F 为气体所受外力; μ 为气体粘性系数。

自然流区和燃气扰动区的流场有相同性质: 首先, 流场的粘性可忽略, 整个流场为无旋场。其次, 流场的参数不随时间变化, 是定常流场。最后, 流场中气体的外力很小(主要是重力), 可忽略不计。因此, 可以对流场的基本方程进行化简, 忽略连续性方程中的外力和时间导数, 公式(1a)可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0 \quad (2)$$

在直角坐标系中, 无粘性气体的欧拉运动方程如公式(3)所示:

$$\begin{cases} v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \end{cases} \quad (3)$$

该方程可以缩写成公式(4)的形式:

$$(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (4)$$

根据声速公式 $c^2 = dp/d\rho$, 可推导出:

$$\frac{1}{\rho} (\mathbf{v} \cdot \nabla) \rho = \mathbf{v} \cdot \frac{1}{\rho} \nabla \rho = \frac{1}{c^2} \mathbf{v} \cdot \nabla p = -\frac{1}{c^2} \mathbf{v} \cdot (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \quad (5)$$

将公式(5)代入公式(2), 可以得出诱饵弹无粘性流动区域中流速所满足的微分方程:

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{v_x^2}{c^2}\right) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \left(1 - \frac{v_y^2}{c^2}\right) \frac{\partial v_y}{\partial y} + \left(1 - \frac{v_z^2}{c^2}\right) \frac{\partial v_z}{\partial z} - \\ & \frac{v_x v_y}{c^2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}\right) - \frac{v_y v_z}{c^2} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z}\right) - \\ & \frac{v_z v_x}{c^2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x}\right) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

由前面的讨论可知诱饵弹流场是无旋场, 根据场论的有关知识, 在无旋场中可以引入速度势函数 φ , 使其满足以下条件:

$$v_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \varphi_x, v_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \varphi_y, v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \varphi_z \quad (7)$$

将公式(7)代入公式(6), 整理可得用速度势函数表示的流场运动方程:

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{\varphi_x^2}{c^2}\right) \varphi_{xx} + \left(1 - \frac{\varphi_y^2}{c^2}\right) \varphi_{yy} + \left(1 - \frac{\varphi_z^2}{c^2}\right) \varphi_{zz} - 2 \frac{\varphi_x \varphi_y}{c^2} \varphi_{xy} - \\ & 2 \frac{\varphi_y \varphi_z}{c^2} \varphi_{yz} - 2 \frac{\varphi_z \varphi_x}{c^2} \varphi_{zx} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

由于诱饵弹的轴向对称性, 可以将公式(8)中 Z 轴方向的分量消去, 从而得到诱饵弹流场的二维运动方程:

$$\left(1 - \frac{\varphi_x^2}{c^2}\right) \varphi_{xx} + \left(1 - \frac{\varphi_y^2}{c^2}\right) \varphi_{yy} + 2 \frac{\varphi_x \varphi_y}{c^2} \varphi_{xy} + \frac{\varphi_y}{y} = 0 \quad (9)$$

式中: φ/y 项是由于取 X 轴为对称轴而引入的。至此, 已推导出诱饵弹流场关于势函数的运动方程, 只要求出势函数 φ , 就能利用公式(7)的约束条件求出流场中的流速, 然后再利用理想气体方程求出压强、温度等其他气动参数。

1.2 诱饵弹流场有限元模型的建立

用速度势函数表示的流场运动方程本质上依然是二阶非线性微分方程, 求解起来有很大难度。为了求解流场运动方程, 文中引入了有限元方法^[21-25]。

1.2.1 诱饵弹流场的有限单元剖分

文中求解区域是以诱饵弹表面为内边界, 以弹体直径 5 倍长度为半径的空心圆柱区域, 子单元为任意四边形。对诱饵弹流场解算区域进行有限单元剖分, 剖分后的求解区域共有 1715 个单元, 3514 个结点, 剖分结果如图 1 所示。

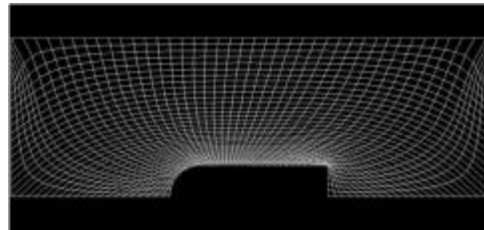


图 1 求解区域有限元剖分结果

Fig.1 Solving regional finite element split results

1.2.2 单元插值基函数的确定

借助标准等边四边形的基函数选取方法, 再通过变换得到任意四边形单元的基函数表达式。变换过程如图 2 所示。

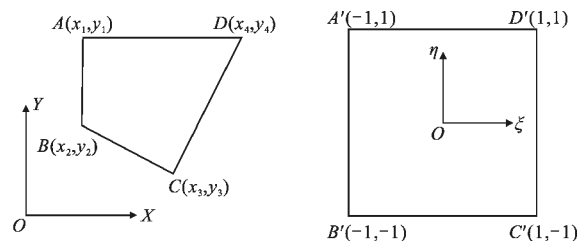


图 2 任意四边形的标准化

Fig.2 Standardization of arbitrary quadrilateral

根据图 2,在实际坐标系 XOY 中,取任意一个四边形 ABCD,其结点坐标分别为 A(x₁, y₁), B(x₂, y₂), C(x₃, y₃), D(x₄, y₄)。建立一个与之对应的标准坐标系 ηOξ,将四边形 ABCD 映射成一个标准的等边四边形 A'B'C'D',各结点坐标为 A'(-1, 1), B'(-1, -1), C'(1, -1), D'(1, 1)。那么这两个坐标系之间的变换关系如公式(2)-(10)所示:

$$\begin{cases} x = \frac{1}{4}(a_1 + b_1\xi + c_1\eta + d_1\xi\eta) \\ y = \frac{1}{4}(a_2 + b_2\xi + c_2\eta + d_2\xi\eta) \end{cases} \quad (10)$$

其中各系数满足如下关系:

$$\begin{cases} a_1 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \\ b_1 = -x_1 + x_2 + x_3 - x_4 \\ c_1 = -x_1 - x_2 + x_3 + x_4 \\ d_1 = x_1 - x_2 + x_3 - x_4 \\ a_2 = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \\ b_2 = -y_1 + y_2 + y_3 - y_4 \\ c_2 = -y_1 - y_2 + y_3 + y_4 \\ d_2 = y_1 - y_2 + y_3 - y_4 \end{cases} \quad (11)$$

在标准坐标系中,等边四边形的插值基函数有多种取法,只要是相互正交的函数即可。这里取最为常用的线性插值基函数,其形式如公式(12)所示:

$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \\ \phi_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) \\ \phi_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \\ \phi_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta) \end{cases} \quad (12)$$

根据公式(10)和(12),可以得到标准基函数对 x, y 的导数:

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} = \frac{1}{8|J|}(A_{xi} + B_{xi}\xi + C_{xi}\eta) \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} = \frac{1}{8|J|}(A_{yi} + B_{yi}\xi + C_{yi}\eta) \end{cases} \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (13)$$

其中各系数满足以下关系:

$$\begin{bmatrix} A_{xi} \\ B_{xi} \\ C_{xi} \\ A_{yi} \\ B_{yi} \\ C_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_2 - y_4 & y_3 - y_1 & y_4 - y_2 & y_1 - y_3 \\ y_4 - y_3 & y_3 - y_4 & y_1 - y_2 & y_2 - y_1 \\ y_3 - y_2 & y_1 - y_4 & y_4 - y_1 & y_2 - y_3 \\ x_4 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_4 & x_3 - x_1 \\ x_3 - x_4 & x_4 - x_3 & x_2 - x_2 & x_1 - x_2 \\ x_2 - x_3 & x_4 - x_1 & x_1 - x_4 & x_3 - x_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

将标准坐标系下的基函数及其导数的表达式带入到有限元计算方程中,便可以求得标准坐标系下的有限元解计算结果,然后坐标变换,即可得到实际坐标系中的计算结果。

1.2.3 有限单元分析

将公式(9)进行积分,可以得出诱饵弹流场势函数的单元积分表达式:

$$\int_{\Omega} \left[\left(1 - \frac{\phi_x^2}{c^2} \right) \phi_{xx} + \left(1 - \frac{\phi_y^2}{c^2} \right) \phi_{yy} - 2 \frac{\phi_x \phi_y}{c^2} \phi_{xy} + \frac{\phi_y}{y} \right] \delta \phi \, 2\pi y \, d\Omega = 0 \quad (15)$$

式中:Ω为子单元的求解域;δφ为子单元的近似解。插值函数 φ_i和结点值 φ_i的线性组合表示子单元的解 φ如公式(16)所示:

$$\phi = \phi_i \phi_i \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (16)$$

将公式(16)代入公(15),并把实际坐标系中的积分变量(x, y)替换成标准坐标系中的(η, ξ),可以得到带有系数矩阵的近似解方程:

$$2\pi \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left[H_{ij}(\eta, \xi) - \frac{1}{c^2} G_{ij}(\eta, \xi) \right] \phi_j y \, d\eta \, d\xi = 0 \quad (17)$$

式中:H_{ij}(η, ξ)和 G_{ij}(η, ξ)的表达式:

$$\begin{cases} H_{ij}(\eta, \xi) = \frac{1}{y} \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \phi_j + \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial \phi_j}{\partial x} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial \phi_j}{\partial y} \\ G_{ij}(\eta, \xi) = \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial x} \right)^3 \frac{\partial \phi_j}{\partial x} + \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial y} \right)^3 \frac{\partial \phi_j}{\partial y} + 2 \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial \phi_j}{\partial y} \end{cases} \quad (18)$$

记

$$F_{ij}(\eta, \xi) = H_{ij}(\eta, \xi) - \frac{1}{c^2} G_{ij}(\eta, \xi)$$

$$A_{ij}^e = 2\pi \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 F_{ij}(\eta, \xi) y \, d\eta \, d\xi \quad (19)$$

则公式(17)可以表示为:

$$A_{ij}^e \phi_i = 0 \quad (20)$$

式中:A_{ij}^e为有限单元积分方程的系数矩阵,上标 e 表示 A_{ij}^e是第 e 个单元的系数矩阵,e=1, 2, ..., N, N 为结点总数。将坐标变换关系式(10)代入公式(19),可以得到有限单元系数矩阵的最终形式。

1.2.4 总体有限元方程的建立

在求出每个单元的系数矩阵 A_{ij}^e之后,要通过总体合成,求出整个求解区域所对应的总体系数矩阵 A_{ij},然后,以所有结点值 φ_i为未知量,建立求解区域的总体有限元方程:

$$A_{ij} \phi_i = 0 \quad (21)$$

假设某一子单元 e , 其结点 i, j 对应的总体结点序号为 m, n , 在总体合成时按如下规则进行:

$$A_{nm} = A_{nm} + A_{ij}^e \quad (22)$$

在求解域中任取两个相邻单元 e_1, e_2 , 其总体结点序号为 $n_1 \sim n_6$, 单元 e_1 的结点 i_1, i_2, i_3, i_4 分别对应总体结点 n_1, n_2, n_3, n_4 , 单元 e_2 的结点 i_1, i_2, i_3, i_4 分别对应总体结点 n_4, n_3, n_6, n_5 , 具体结构如图 3 所示。

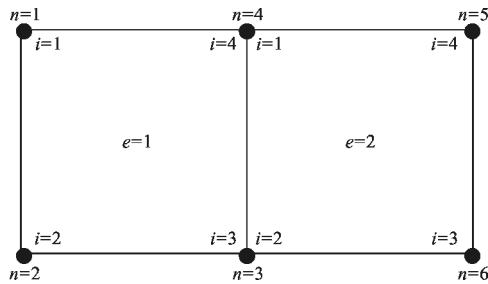


图 3 两节点合成示意图

Fig.3 Two nodes synthetic schematic

根据公式(22), 可以得到两个单元进行总体合成以后的系数矩阵 A_{nm} , 如式(23)所示:

$$A_{nm} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^{(1)} & A_{12}^{(1)} & A_{13}^{(1)} & A_{14}^{(1)} & 0 & 0 \\ A_{21}^{(1)} & A_{22}^{(1)} & A_{23}^{(1)} & A_{24}^{(1)} & 0 & 0 \\ A_{31}^{(1)} & A_{32}^{(1)} & A_{33}^{(1)} + A_{22}^{(2)} & A_{34}^{(1)} + A_{21}^{(2)} & A_{24}^{(2)} & A_{26}^{(2)} \\ A_{41}^{(1)} & A_{42}^{(1)} & A_{43}^{(1)} + A_{12}^{(2)} & A_{44}^{(1)} + A_{11}^{(2)} & A_{14}^{(2)} & A_{16}^{(2)} \\ 0 & 0 & A_{42}^{(2)} & A_{41}^{(2)} & A_{44}^{(2)} & A_{43}^{(2)} \\ 0 & 0 & A_{32}^{(2)} & A_{31}^{(2)} & A_{34}^{(2)} & A_{33}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (23)$$

最终的总体有限元方程是一个含有 3 514 个未知数的线性方程组。对于诱饵弹的工作环境来讲, 影响其流场分布的主要边界条件有两个: 一是诱饵弹的运动速度, 一是燃气出口状态。在不同边界条件下, 通过编程求解总体方程, 可以得到流场速度势函数在每个结点的值, 根据公式(7)对势函数求导, 便可以求出流场的速度分布 $v(x, y)$ 。表 1 是取

诱饵弹运动速度 300 m/s, 燃气出口压强为 3 个标准大气压, 温度 1 000 K 时, 总体有限元方程计算结果的一部分, 图 4 是用后处理软件绘制的诱饵弹流场速度分布。

表 1 有限元方程求解部分结果

Tab.1 Finite element equation solver partial results

No.	X/m	Y/m	$v_x/m \cdot s^{-1}$	$v_y/m \cdot s^{-1}$
1	0.05	0.55	350.00	0.00
2	0.05	0.53	350.51	0.00
3	0.05	0.51	350.70	0.10
4	0.05	0.49	350.82	0.12
...			
100	0.31	0.55	369.28	4.59
101	0.29	0.55	367.53	4.13
102	0.27	0.55	365.50	3.43
103	0.25	0.55	363.35	2.60
...			
3 511	0.63	0.17	372.85	81.81
3 512	0.64	0.15	411.14	38.97
3 513	0.66	0.17	382.54	88.51
3 514	0.68	0.19	428.47	37.37



图 4 诱饵弹流场速度分布

Fig.4 Decoys flow velocity distribution

从图中可以明显看出, 诱饵弹流场速度分布是不均匀的, 弹体前后表面有很大的速度差, 这是诱饵弹释放的燃气与自然流空气相互扰动而引起的。诱饵弹的流场分布情况直接影响其运动和辐射特性。

2 诱饵弹变阻力运动特性模型仿真

2.1 诱饵弹运动模型的建立及特性仿真

2.1.1 诱饵弹空气阻力的离线求解

为了提高仿真系统的实时性,文中采取“离线求解,在线拟合”的方法,将不同边界条件下的空气阻力在仿真之前,离线地求解出来,把结果编制成若干数据表,然后通过数据拟合得到诱饵弹阻力与速度的函数关系式,由仿真程序调用。这种方法将用时较长的求解过程和实时性要求很高的仿真过程分离开来,将复杂的求解转换成了简单的函数关系式,缩短了求解时间,提高了系统的实时性。表 2 给出了不同速度条件下,诱饵弹空气阻力的计算结果。

表 2 空气阻力与速度关系

Tab.2 Relations of air resistance and velocity

Velocity /m·s ⁻¹	80	130	180	230	280	330	380	430	480	530
Air resis- tance/N	418	967	1377	1905	2736	3533	5332	5854	6351	6524

根据数据表给出的数据,利用最小二乘拟合,可以得到阻力与速度的函数关系,如公式(24)所示:

$$f_d(v) = 3.2e^{-9}v^5 - 5.5e^{-6}v^4 + 0.0033e^{-8}v^3 - 0.88v^2 + 1.1e^2v - 4.3e^3 \quad (24)$$

图 5 则给出了拟合结果与原始数据的对比,由图可以看出,拟合结果与原始数据非常接近。

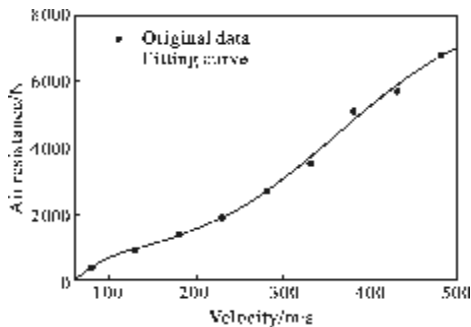


图 5 阻力数据拟合结果对比

Fig.5 Resistance data fitting results comparison

2.1.2 诱饵弹运动方程的建立及仿真

在求出诱饵弹所受空气阻力 f_d 以后,可以根据牛顿运动定律建立诱饵弹的运动方程组。首先建立

诱饵弹受力分析的笛卡尔坐标系:以地面上某定点为参考点,令 X 轴与地面平行,指向观测方向,Y 轴竖直向上,Z 轴与 X、Y 轴满足右手定则。诱饵弹在该坐标系内受力分析如图 6 所示。

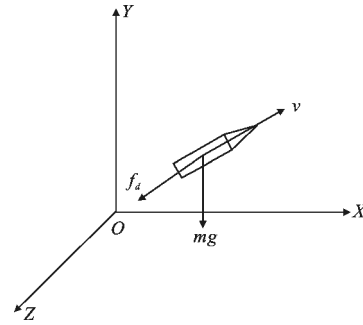


图 6 诱饵弹受力分析

Fig.6 Decoys force analysis

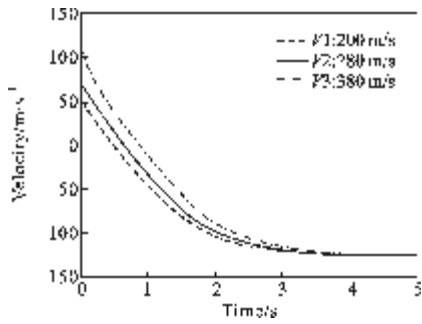
其中 f_d 为空气阻力,方向与速度 v 相反, mg 为重力,方向竖直向下。不妨设诱饵弹与地面参考系的俯仰角为 θ ,偏航角为 ϕ 。将阻力 f_d 向坐标系的三个坐标轴投影,根据牛顿运动定律,可以得到诱饵弹加速度的分量表示形式:

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -f_d \cos(\theta) \cos(\phi) / m \\ \frac{dv_y}{dt} = -f_d \sin(\theta) / m - g \\ \frac{dv_z}{dt} = -f_d \cos(\theta) \sin(\phi) / m \end{cases} \quad (25)$$

将微分方程转化为差分方程,便可根据运动学定律得到诱饵弹运动方程组:

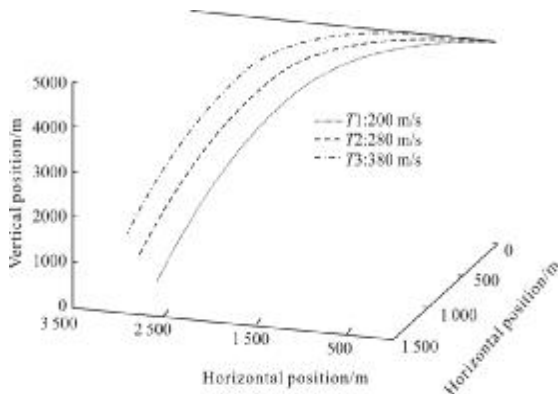
$$\begin{cases} a_x = -f_d \cos(\theta) \cos(\phi) / m \\ a_y = -f_d \sin(\theta) / m - g \\ a_z = -f_d \cos(\theta) \sin(\phi) / m \\ v_x^t = v_x^{t-1} + a_x \times \Delta t \\ v_y^t = v_y^{t-1} + a_y \times \Delta t \\ v_z^t = v_z^{t-1} + a_z \times \Delta t \\ X^t = X^{t-1} + v_x^{t-1} \times \Delta t \\ Y^t = Y^{t-1} + v_y^{t-1} \times \Delta t \\ Z^t = Z^{t-1} + v_z^{t-1} \times \Delta t \end{cases} \quad (26)$$

取合适的仿真步长 Δt ,通过迭代计算可以得到诱饵弹每一时刻的速度和位置,图 7 给出了不同初始条件下,诱饵弹运动速度和位置的仿真结果。



(a) 不同初始条件下速度仿真结果

(a) Speed simulation results under different initial conditions



(b) 不同初始条件下位置仿真结果

(b) Location simulation results under different initial conditions

图 7 诱饵弹运动模型仿真结果

Fig.7 Decoys motion model simulation results

3 诱饵弹干扰辐射特性模型建立与仿真

诱饵弹的辐射特性遵循普朗克定律^[26-27], 该定律描述了辐射度与波长 λ 和温度 T 的函数关系式, 以波长表示的普朗克公式为:

$$M_b(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (27)$$

式中: h 为普朗克常数, $h = (6.626\ 075\ 5 \pm 0.000\ 004\ 0) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; k 为玻耳兹曼常数, $k = (1.380\ 658 \pm 0.000\ 012) \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; c_1 为第一辐射常数, $c_1 = 2\pi^5 h c^2 = (3.741\ 774 \pm 0.000\ 002\ 2) \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; c_2 为第二辐射常数, $c_2 = hc/k = (1.438\ 786\ 9 \pm 0.000\ 000\ 12) \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

一般的红外探测器只对某些波段的红外辐射比较敏感(通常在 $2.4 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 或 $4.3 \sim 4.55 \mu\text{m}$ 范围内), 因此仿真时只需计算相应波段的辐射度即可, 此时, 目标的总辐射度可表示为:

$$M_{0-\lambda} = \int_0^\lambda \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda = \frac{c_1 T^4}{c_2} \int_{c_2/\lambda T}^\infty \frac{(c_2/\lambda T)^3}{e^x - 1} d\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) \quad (28)$$

设 $x = c_2/\lambda T$, 公式(28)可化简为:

$$M_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{c_1 T^4}{c_2} \int_{c_2/\lambda_2 T}^{c_2/\lambda_1 T} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \quad (29)$$

式中: λ_1 和 λ_2 分别表示波段的上下限。目标表面的温度分布 $T(x)$ 与目标燃料的类型和燃烧情况有关, 根据干扰弹的具体型号来确定。由于干扰弹的目标较小, 为了便于仿真计算, 可以用平均温度 T_s 代替各点实际温度, 代入公式(29)并化简, 便可求得目标总辐射强度 I_0 与平均温度 T_s 的关系:

$$I_0 = G(T_s) = \frac{\varepsilon_0}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \cdot S_0 \cdot \cos\theta_0 \quad (30)$$

式中: ε_0 为弹体表面的发射率, 与干扰弹表面材料的特性有关; S_0 为干扰弹的截面积; θ_0 为探测方向与红外辐射面法向量的夹角。仿照诱饵弹空气阻力离线求解的过程, 可以将诱饵弹辐射强度与温度的积分关系拟合简单的多项式函数:

$$I_0 = -6.2e^{-13t^5} + 1.1e^{-7t^4} - 0.000\ 18t^3 + 0.11t^2 - 30t + 3e^3 \quad (31)$$

图 8 给出了拟合函数与原始数据的对比, 由图可以看出, 拟合结果与原始数据非常接近。

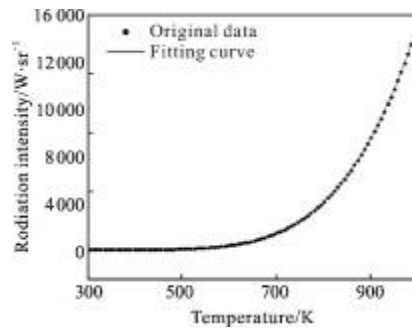


图 8 辐射强度数据拟合结果对比

Fig.8 Radiation intensity fitting results contrast

目标产生的红外辐射经过大气衰减, 最终被红外探测器所检测到。大气对不同波段红外辐射的衰减可以用衰减系数 $a(\lambda)$ 表示, 红外光谱透过率 $\tau_a(\lambda)$ 和衰减系数 $a(\lambda)$ 之间的关系可用布盖尔-朗伯定律表示:

$$\tau_a(\lambda) = \exp(-a(\lambda) \cdot R) \quad (32)$$

式中: R 为目标与红外系统之间的距离, λ 为波长。在仿真波段内, 目标的平均透过率和平均衰减系数为:

$$\bar{\tau}_a = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_a(\lambda) d\lambda \quad (33)$$

$$\bar{a} = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} a(\lambda) d\lambda \quad (34)$$

红外探测器最终检测到的目标辐射强度可表示为 $I = I_0 \cdot \tau_a$

4 结 论

文中分析了红外诱饵弹的工作原理和影响其干扰特性的因素,指出了诱饵弹的气动环境对干扰特性的影响作用。然后,从空气动力学理论出发,对诱饵弹的气动环境和流场进行了分析和化简,并建立了诱饵弹流场分布的有限元模型。最后,以该模型为基础,深入研究了诱饵弹运动特性和辐射特性,建立了相关的仿真模型,为半实物仿真系统的设计奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] Sun Yi. Development of the electro-optic passive jamming technology [J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(9): 39-42. (in Chinese)
- [2] Tong Zhongxiang. Optimal method for interfering with infrared homing missile by airborne infrared smoke [C]//ASIC, 2008, 4244: 588-592.
- [3] D Beasley, D Saylor. Overview of dynamic scene projectors at the US army aviation and missile command [C]//SPIE, 2009, 4469:147-156.
- [4] James Jackman. Countermeasure effectiveness against a man-portable air-defense system containing a two-color spintan infrared seeker [J]. Optical Engineering, 2011, 50(12): 401-409.
- [5] Han C J, Sawyer B, Stockbrig R, et al. Cryovacuum resistor infra red scene projector [C]//SPIE, 2009, 4469: 157-167.
- [6] Yang Yufeng. The effect of complex background infrared radiation on target scattering radiance [C]//IEEE, 2010, 4244: 749-752.
- [7] Huang Kang, Mao Xia. Novel approach to IR moving dim target detection against complex background [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009, 30(9): 1754-1760.
- [8] Ji Yuanming. Characteristics in infrared radiation with deformation of bolt and rock [C]//IEEE, 2009, 2587: 215-217.
- [9] Hu Yifan. Evaluation the effectiveness of infrared flare with a tactic of dispensing in burst [C] //IEEE, 2010, 6044: 131-135.
- [10] Forrai David P, Maier James J. Generic models in the advanced IRCM assessment model [C]//WSC, 2011: 789-796.
- [11] Krzysztof Sibilski, Janusz B aszczyk. Modeling of helicopter self-defense system [C]//AIAA, 2010, 36: 474-479.
- [12] Huang Bingyue. Simulation of warship-equipped infrared bait's effectiveness in interfering with anti-vessel missile [J]. Journal of System Simulation, 2011, 21 (1): 17-20. (in Chinese)
- [13] He Jiangfeng, Xu Li, Yan Junwu. Disturbance performance testing system of infrared disturbance artillery [J]. Ordnance Industry Automation, 2011, 21(1): 17-20. (in Chinese)
- [14] Hu Yifan. Method of evaluation the effect of airborne infrared decoy [J]. Infrared Technology, 2009, 30(3): 136-140. (in Chinese)
- [15] Wu Tao, Bai Yunta. Research into the jamming method to laser/IR composite guided missiles [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2009, 30(2): 23-26. (in Chinese)
- [16] Zhang Hongyan. Simulation research on jamming mode of infrared ground-air missile [J]. Aeronautical Computing Technique, 2009, 39(4): 105-109. (in Chinese)
- [17] Hua Xiang, Wang Peng. A special 3D effect method of infrared decoy [C]//IEEE, 2010, 5540: 606-609.
- [18] Liu Jiacong, Liu Zhanchen, Zhang Hengxi, et al. Research on the movement characteristics of an infrared countermeasure bomb [J]. Journal of Missiles and Guidance, 2009, 26 (3): 166-167. (in Chinese)
- [19] Kong Xiaoling. Simulation research on surface-type infrared decoy for jamming infrared imaging guided missile [J]. Command Control & Simulation, 2011, 33(1): 78-81. (in Chinese)
- [20] Wu Longbao, Xie Xiaofang, Wang Chencheng, et al. Modeling and simulation of supersonic missile temperature distribution [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1):1-6. (in Chinese)
- [21] Zhang Genbao. Numerical simulation of two-dimensional flapping-wing MAVs [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2011, 37(2): 256-260. (in Chinese)
- [22] Liu Shoubao, Ruan Jiangjun, Du Zhiye, et al. Application of FE-BECM in 3D eddy current problem with open boundary [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 655-659. (in Chinese)
- [23] Han Xiangke. Improved characteristic-based split finite element method for fluid dynamics [J]. Journal of Xi'An Jiao Tong University, 2011, 45(7): 112-114. (in Chinese)
- [24] Qian Ruojun, Han Xiangke, Su Bo. Numerical simulation of wind field based on fluid mechanics theory [J]. Spatial Structures, 2010, 16(4): 3-6. (in Chinese)
- [25] Zhong Fanjun, Wang Zhenping. Aeroelastic modeling and calculation of flying wing control surface linkage [J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(2): 53-56. (in Chinese)
- [26] Luo Maojie, Zhou Jinmei, Fu Jingneng, et al. Integration time as variable for radiometric calibration of infrared system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 36-40. (in Chinese)
- [27] Lu Hu, Arvind Narayanaswamy. Near-field thermal radiation between two closely spaced glass plates exceeding Planck's blackbody radiation law [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(4): 236-239.