

文章编号: 1672-8785(2014)08-0038-04

人造水雾对红外辐射衰减的建模与仿真研究

徐东翔¹ 胡云安²

(1. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东烟台 264001;

2. 海军航空工程学院控制工程系, 山东烟台 264001)

摘 要: 在建立水雾红外衰减模型时, 通常把水雾空间看作单一均匀整体进行处理, 然而雾滴的扩散现象会使水雾的雾滴密度无法做到处处相等, 所以仿真结果与实际情况之间普遍存在较大偏差。针对这一问题, 基于高斯扩散理论与 Mie 散射理论, 提出了一种新的建模方案。通过将水雾空间划分为多个子空间, 并计算每个子空间内水雾的消光性能, 提高了建模的准确性; 同时根据仿真结果, 分析了水雾在不同方向上的红外辐射衰减能力。该研究对于制定有效的红外对抗策略具有一定的参考价值。

关键词: 水雾; 高斯扩散; Mie 理论; 空间划分

中图分类号: TN976 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.08.008

Modeling and Simulation of Infrared Radiation Attenuation of Artificial Water Mist

XU Dong-xiang¹, HU Yun-an²

(1. Graduate Students' Brigade, Naval Aeronautical and Astronautical University,

Yantai 264001, China; 2. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical

and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: When the model of infrared attenuation of water mist is established, the space of water mist is usually treated as a homogeneous whole. However, because of diffusion, the droplet density of water mist can not be kept consistent everywhere. So there is commonly a great deviation between the simulation result and the actual situation. To solve this problem, a new modeling method based on Gaussian diffusion theory and Mie scattering theory is proposed. By dividing the space of water mist into several subspaces and calculating the extinction performance of the water mist in each subspace, the modeling accuracy is improved. At the same time, the infrared radiation attenuation of the water mist in different directions is analyzed according to the simulation result. This research work is of a certain reference value to the making of an effective infrared countermeasure strategy.

Key words: water mist; Gaussian dispersion; Mie theory; space division

0 引言

随着科技水平的高速发展, 各国军队的信

息化水平逐年提高, 各大军事科研单位也都在利用各种手段不断提高制导武器的精确度以及各类武器装备的信息对抗能力, 为在将来战争中

收稿日期: 2014-06-11

作者简介: 徐东翔(1989-), 男, 山东青岛人, 硕士生, 主要从事红外仿真研究。E-mail: xu_dongxiang@126.com

夺取主导权而不断努力^[1]。由于具有精度高、抗干扰能力强以及可昼夜作战等优点, 红外制导技术已经成为近年来精确制导技术发展的重要方向之一。为了有效对抗红外制导武器和保护重要军事目标, 各种红外伪装手段已经受到了相关领域学者的极大关注。人造水雾具有良好的红外遮蔽性能, 其生成快捷方便, 廉价环保, 因此是一种十分有效的红外伪装手段。国内外研究人员对人造水雾的红外衰减能力都进行了大量研究。例如, Chen Z W 和陈兵等人做了大量实验研究, 而 Wang X 和孙超等人则通过理论模型从不同角度对水雾的红外伪装效果进行了分析^[2-5]。但是以上研究都是针对水雾的自身特性进行的, 忽略了水雾释放时所受到的周围环境影响。现有的红外仿真软件在建模过程中所使用的水雾模型都没有考虑水雾的扩散现象, 所以其最终的仿真误差较大。本文以高斯扩散模型与 Mie 散射理论为基础, 结合不同的导弹来袭方向, 分析了不同环境下水雾对不同方向上的红外辐射的消光系数。

1 水雾透过率计算

1.1 Mie 散射理论

由 B-L 定律可知, 经过雾区后, 辐射强度为 I_0 的入射电磁波衰减后的辐射强度为

$$I = I_0 e^{-GL} \quad (1)$$

式中, L 为入射辐射所经过的路程; G 为消光系数。

根据电磁波传播理论, 我们把雾滴的形状假定为圆球状; 当红外辐射穿过雾区时, 雾滴会引起红外辐射能量衰减。此时会发生多种现象, 其中散射是红外辐射能量衰减的最主要原因。特别是在红外辐射的波长小于或者相当于雾滴的直径时, 利用 Mie 理论可以求出消光截面和消光系数^[6]:

$$G = \int_r N \pi r^2 Q_{ext} n(r) dr \quad (2)$$

式中, N 为雾滴密度; $n(r)$ 为雾滴半径 r 的分布函数, 本文采用正态分布模型^[7]; Q_{ext} 为雾滴截面的消光系数。正态分布函数的表达式为

$$n(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r} \log \sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log r - \log r_m}{\log \sigma} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中, σ 为雾滴半径的标准差; r_m 为雾滴的平均半径。

消光系数 Q_{ext} 可由式 (4) 计算:

$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \quad (4)$$

式中, $x = 2\pi r/\lambda$, λ 为电磁波的波长; a_n 、 b_n 和 n 与 λ 及 r 有关。另外, 由于雾滴半径与红外辐射波长相当, 可以采用 Mie 理论进行计算。

1.2 高斯扩散模型

若地面不吸收和吸附水雾雾滴, 而水雾本身又没有沉降成分, 那么地面对水雾来说是一个全反射体。若风速大于 1 m/s, 且风向恒定, 则高斯正态型浓度模式可以通过梯度传送理论及统计理论推出^[8]:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \times e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} \right] \quad (5)$$

式中, $C(x, y, z, H)$ 为点 (x, y, z) 处的水雾浓度; Q 为水雾释放速率; u 为释放水雾时喷嘴口喷出雾滴的平均速度; h 为水雾对红外辐射衰减的有效高度; σ_y 和 σ_z 分别为 y 方向和 z 方向上的大气扩散方差, 它们与大气稳定度及地形参数有关。本文针对的是草地背景下的地面目标, 故查表可得相应参数。图 1 所示为高斯扩散模型。表 1 列出了 Briggs 稳定度等级, 表 2 列出了草地的 Briggs 内插值。

由高斯扩散公式可知, 处在不同位置上的水雾会因雾滴扩散作用而产生浓度不均的现象。而且根据式 (2) 可知, 在相同战场环境中对抗某

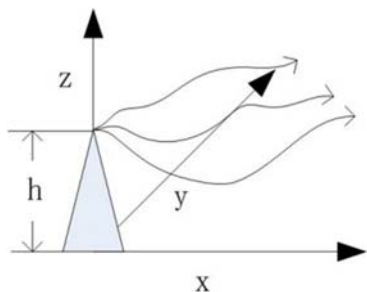


图 1 高斯扩散模型

表 1 Briggs 稳定度等级

风速 /(m/s)	白天	夜间
1	A	F
2.5	B	E
4.5	C	D
7	D	D
10	D	D

表 2 草地的 Briggs 内插值

稳定度	σ_y	σ_z
A	$0.22x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.20x$
B	$0.16x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.12x$
C	$0.11x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.08x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$
D	$0.08x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.06x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$
E	$0.06x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.03x(1 + 0.0001x)^{-1}$
F	$0.04x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.016x(1 + 0.0001x)^{-1}$

个特定的红外波段时,由同一设备产生的人造水雾的平均雾滴半径等参数不会发生巨大变化。因此,雾滴密度的变化是水雾在不同位置上的消光性能存在差异的最主要原因。所以建立雾滴密度与水雾空间位置之间的关系也就成为了建立水雾扩散模型的关键点。通过结合高斯扩散公式以及球体的几何与密度公式,我们可以建立高斯(正态)型浓度与雾滴密度之间的关系:

$$N(x, y, z) = \frac{3C(x, y, z)}{4\pi\bar{r}^3\rho} = \frac{3Q}{8\pi^2\bar{r}^3 u \sigma_y \sigma_z} \times e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} \right] \quad (6)$$

式中, $N(x, y, z)$ 为坐标为 (x, y, z) 处水雾的雾滴密度数; ρ 为雾滴密度。

通过用高斯扩散模型进行计算可知,处于雾区不同位置上的水雾的消光系数 G 也是不同的。为了精确计算水雾的红外辐射透过率 e^{-GL} , 我们不妨把雾区平均分成多个体积相同的正方体。在每个正方体的内部,水雾的雾滴密度等参数不再发生变化,而其水雾参数则由正方体中心点的水雾特性参数决定。因此,式(1)可以改写为

$$\begin{cases} I = I_0 e^{-M} \\ M = \sum_{i=1}^n G_i L_i \end{cases} \quad (7)$$

式中, n 为导弹轨迹直线所穿过的正方体个数; G_i 为第 i 个正方体内水雾的消光系数; L_i 为第 i 个正方体内目标红外辐射穿过的距离。

假定坐标原点为水雾释放点,为了计算水雾在不同方向上的红外辐射衰减能力,我们不妨用 α 与 β 来确定红外辐射束的方向。图 2 为坐标示意图。确定辐射方向后便可计算红外辐射在水雾区域内的光程。在计算光程时,为了精确计算每段光程 L_i 的长度,同时保证计算效率,我们把总光程分为 k 段,然后通过计算每一段中点的空间位置来确定这一段光程的消光系数。虽然这种计算方案会大大提高仿真速度,但是也必然会由于存在横跨两个不同子空间的光程而产生误差。这种用于确定各段光程所处雾区的方法虽然会产生一些误差,但是如果使每一

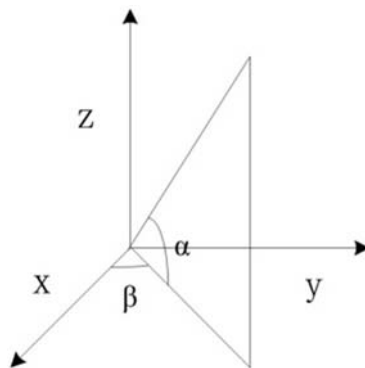
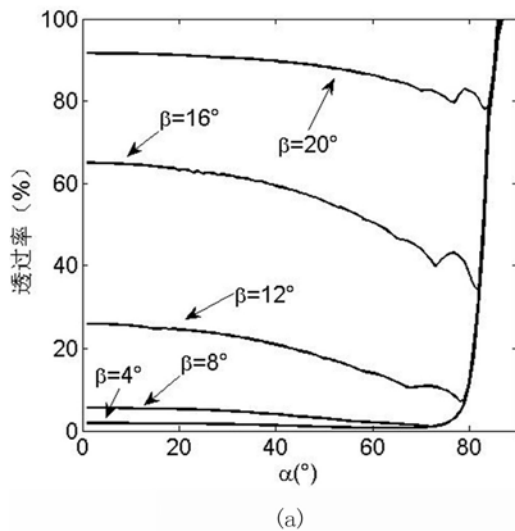


图 2 坐标示意图

小段的光程都远远小于正方体的边长, 那么就可以大大减小此类误差。另外, 由仿真结果可知, 相邻两个正方体的消光系数之间的差异十分微小, 这也进一步降低了此类误差对最终结果所产生的影响。

2 仿真结果与分析

仿真参数如下: (1) 红外波长为 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ($m = 1.178 + 0.071j$), 雾滴的平均半径为 $r = 10 \mu\text{m}$, 雾滴半径的标准差为 $\sigma = 1.10$, 雾滴密度为 $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$; 水雾释放速率为 $Q = 20 \text{ g/s}$; 释放水雾时喷嘴口喷出雾滴的平均速度为 $u = 15 \text{ m/s}$;



有效高度为 $h = 0$ 。(2) 雾区体积为 $30 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高), 每个小正方体的边长为 0.25 m , 仿真时光程 L 分为 $k = 1000$ 段。(3) 风向为沿 x 轴的正方向, 大气稳定度为 C 。由式 (6) 可知, 雾滴的密度分度与坐标轴之间呈对称状, 所以计算时只需考虑 $x > 0, y > 0, z > 0$ 的区域即可。

根据以上模型, 通过计算机仿真可以得到图 3 所示的仿真结果。该图分别显示了 α 和 β 的变化对水雾透过率的影响。可以看出, 对于由单个点源产生的水雾来说, α 和 β 的变化对水雾的红外辐射透过率的影响是巨大的。

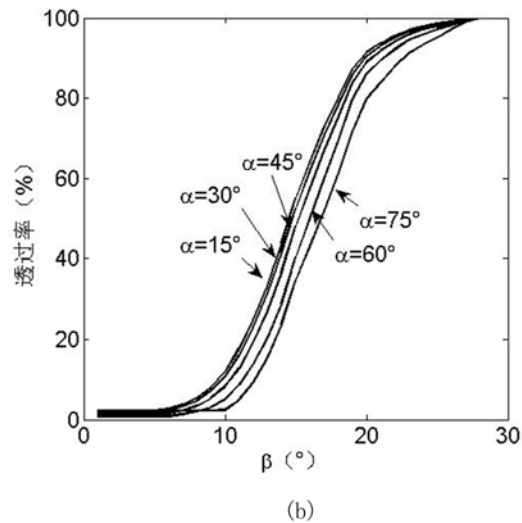


图 3 仿真结果

从图 3(a) 中可以看出, 当 $\alpha < 80^\circ$ 时, 水雾的透过率随着 α 的增加而降低; 当 $\beta < 8^\circ$ 时, α 的变化对透过率影响较小, 而且水雾的红外辐射透过率基本保持在 10% 以下, 能够有效地遮蔽目标; 当 $8^\circ < \beta < 12^\circ$ 时, 可以发现水雾的遮蔽性能会随着 α 的增加而有所提高, 但是在透过率的下降过程中会产生震荡现象。这主要是因为是在 α 增加的过程中, 辐射穿过的总光程 L 也会增加; 光程的增加在一定程度上会有助于提高水雾的遮蔽性能, 但是随着 α 的不断增大, 辐射光束穿过的空间内的雾滴密度 N 会普遍减小, 最终导致水雾的遮蔽性能下降。图 3(a) 中的震荡现象就是由于这两种原因相互作用而产生的。当 $\beta > 20^\circ$ 时, 水雾的红外辐射透过率

已经大于 80%, 因此很难提供有效的红外伪装能力。当 $\alpha > 80^\circ$ 时, 水雾的红外辐射透过率普遍较高, 所以其遮蔽性能基本可以忽略不计。

图 3(b) 显示了 β 对红外辐射透过率的影响。可以更加清楚地看出, 随着 β 的不断增大, 水雾的红外辐射透过率普遍得到提高。值得注意的是, 当 $\beta < 8^\circ$ 时, α 越小, 水雾的透过率越低。另外, 对于 β 来说, 为了取得良好的遮蔽性能, β 应小于 12° , 这也印证了图 3(a) 中的仿真结果。仿真结果表明, 由单个点源产生的水雾的遮蔽范围十分有限, 而在实际操作中如果想要提高伪装效率, 最好是使用多个释放点同时释放水雾, 只有这样才能取得良好的伪装效果。

(下转第 46 页)