Vol. 51, No. 1 January, 2021

文章编号:1001-5078(2021)01-0095-05

・光电对抗・

烟幕扩散模型中任意光路电磁波透过率的计算

蒋 云,李 伟,宋伟伟,于照亮,代晓东 (防化研究院,北京102205)

摘 要:在烟幕扩散模型中,计算电磁波沿任意路径穿透烟幕云团时产生的衰减,需要准确计 算出该路径下的烟幕积分浓度,从而得到电磁波的透过率。本文基于空间几何坐标变换原理、 线性代数矩阵运算方法以及烟幕材料消光理论,推导了烟幕扩散模型中电磁波入射方向改变 时的三维坐标系变换矩阵和二维积分浓度投影算法,实现了电磁波沿任意方向入射时的积分 浓度分布及透过率的计算,为烟幕扩散模型的多角度(方向)数据分析、烟幕云团红外图像处 理以及更多应用场景中的使用奠定了基础。

关键词:烟幕;随机游走模型;烟幕积分浓度;坐标变换 中图分类号:TJ530.2;TN972 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2021.01.017

Calculating the transmission rate of electromagnetic wave along any light-path in smoke diffusion model

JIANG Yun, LI Wei, SONG Wei-wei, YU Zhao-liang, DAI Xiao-dong (Researched Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract: In the smoke diffusion model, to calculate the attenuation of electromagnetic wave when it penetrates the smoke cloud along any path, it is necessary to accurately calculate the smoke integral concentration under this path, so as to obtain the transmission rate of electromagnetic wave. Based on the principle of space geometric coordinate transformation, the method of linear algebra matrix operation and the theory of smoke material extinction, the transformation matrix of three-dimensional coordinate system and the projection algorithm of two-dimensional integral concentration are derived when the incident direction of electromagnetic wave changes in the smoke diffusion model. The calculation of integral concentration distribution and transmissivity when the electromagnetic wave incidents in any direction is realized, which lays a foundation for the multi angle(direction) data analysis in smoke diffusion model, infrared image processing of smoke cloud and application in more scenarios.

Keywords: smoke screen; random walk model; integral concentration of smoke screen; coordinate transfo rmation

1 引 言

烟幕是现代战争中对抗精确制导武器和光电观 瞄器材的有效手段,能够遮蔽干扰可见光、激光、红 外、毫米波等电磁波,具有使用方便、效费比高等特 点,受到世界军事强国的重视^[1-3]。烟幕能够对波 段电磁波形成有效干扰的关键因素在于:首先,烟幕 中含有大量能够对电磁波产生散射或吸收效果的烟 幕粒子;其次,烟幕粒子能够在大气中通过扩散形成

收稿日期:2020-04-13

基金项目:国防预研基金项目(No. 30110020502)资助。

作者简介:蒋 云(1981-),女,本科,助理研究员,研究方向为光电干扰材料的制备,加工与性能测试。

通讯作者:代晓东(1974 -),男,博士,研究员,硕士导师,研究方向为电光干扰材料,计算材料学。E-mail:dxd010@ sina.com

足够浓度和尺寸的烟幕云团,在制导武器和保护目 标之间形成有效屏障[4-6]。在烟幕技术领域,烟幕 粒子扩散特性的研究一直是一个难点和热点,人们 利用各种计算模型对烟幕云团的扩散特性进行计算 和模拟,高斯扩散模型和随机游走模型是该领域最 常用的两个计算模型^[7-8]。特别是随机游走模型, 它基于拉格朗日算法,不受平衡和均匀假设的限制, 扩散过程与时间相关,具有广泛的适用性^[9-10]。在 随机游走模型中,输入烟幕施放源参数、风场参数、 温度场参数以及其他相关参数,可以较为准确的模 拟出烟幕的扩散尺寸以及浓度分布情况。电磁波会 从任何可能的方向穿过烟幕云团,在计算模拟中需 要准确得到烟幕云团沿任意路径的浓度变化情况, 从而计算出电磁波沿这一路径穿过云团时的透过 率,得到烟幕云团对电磁波的衰减效果。文献中关 于随机游走模型本身的介绍较多,在实现任意方向 和角度的计算和分析方面,目前没有公开可见的报 道。本文基于空间几何坐标变换原理、线性代数矩 阵运算方法以及烟幕材料消光理论,推导了烟幕扩 散模型中电磁波入射方向改变时的坐标系变换矩 阵、积分浓度及透过率计算公式,为烟幕扩散模型的 多角度(方向)数据分析、烟幕云团图像处理以及更 多应用场景中的使用奠定了基础。

2 透过率的计算

在烟幕随机游走模型中,需要构建一个长方体 形状的计算区域,烟幕施放点设为坐标原点,施放出 的所有烟幕粒子都在该计算区域里扩散运动,通过 随机扩散模型可模拟烟幕粒子在该三维空间中的分 布情况。计算模拟时一般将计算区域被划分为若干 网格,设坐标轴 x、y、z 三个方向的网格精细度分别 为 Δx、Δy 和 Δz,则每个长方体小网格中的浓度可由 式(1)计算得到^[11]:

$$C(i,t) = \frac{Q(t) n_i(t)}{N\Delta x \Delta y \Delta z}$$
(1)

其中,C(i,t)为第 i 个网格在 t 时刻的质量浓度; Q(t)为 t 时刻施放的烟幕粒子总质量; $n_i(t)为 t$ 时刻第 i 个网格中的烟幕粒子数量;N 为总的烟幕粒 子数量。根据朗伯 – 比尔定律^[12-13],电磁波经过第 i 个网格的透过率 T_i 可表达为;

$$T_{i} = e^{-c(i,i)\cdot\Delta L_{i}\cdot\alpha}$$
其中, α 为烟幕的质量消光系数; ΔL_{i} 为电磁波经过

第*i*个网格时的光程。

如果电磁波入射方向与任意一个坐标轴方向平 行,则很容易知道其经过每个网格的光程。例如电 磁波沿 x 轴穿过烟幕云团,则经过每个网格的光程 均为 Δx ,设 x 轴方向的网格数量为 m,电磁波的初 始能量为 I_0 ,则电磁波经过第一个网格后的能量 I_1 为 $I_0 \cdot T_1$,经过第二个网格后的能量 I_2 为 $I_0 \cdot T_1 \cdot$ T_2 ,以此类推,经过第 m 个网格后的能量 I_m 为 $I_0 \cdot T_1$ · $T_2 \cdots T_m$ 。因此一束电磁波沿 x 轴经过整个烟幕云 团的透过率 T_x 为:

$$T_{x} = \frac{I_{m}}{I_{0}} = T_{1} \cdot T_{2} \cdots T_{m} = e^{-\alpha \cdot \sum_{i=1}^{m} \left[C \in i, i > \Delta x \right]} \quad (3)$$

把 $\sum_{i=1}^{m} [C(i,t) \cdot \Delta x]$ 定义为烟幕云团沿 *x* 轴的 积分浓度 C_x ,则式(3)可表示为:

$$T_x = e^{-\alpha \cdot C_x} \tag{4}$$

显然,只要知道了沿空间某一路径 L 的积分浓度 C_L ,就可以根据式(4)得到电磁波经过该路径后的透过率 T_L 。

当电磁波沿任意方向入射时,无法准确知道电 磁波穿过每个网格时的路径长度 ΔL,从而无法准确 计算积分浓度。特别是把烟幕模型嵌入一个更大的 视场中时,烟幕模型中的坐标只是相对坐标,无法根 据该坐标系的坐标值进行积分浓度的准确计算,无 法获知任意方向入射的电磁波经过该烟幕云团时发 生的衰减情况。烟幕扩散模型中任意光路下积分浓 度的计算和分析,以及该模型嵌入其他应用场景中, 均涉及到空间坐标系的变换。

3 三维坐标系的转换

实现任意光路积分浓度计算的基本思路是:建 立一个新的空间几何坐标系 O'(X'Y'Z'),其原点 O'(0,0,0) 与原坐标系的原点 O(0,0,0) 重合, X' 轴的方向为电磁波入射方向;得到两个坐标系之间 的转换关系,使烟幕模型的空间坐标可以在两个坐 标系之间自由转换;将烟幕云团的空间坐标由 O(XYZ) 坐标系转换到 O'(X'Y'Z') 坐标系,然后 可以计算得到烟幕在 X'方向上的积分浓度分布和 电磁波穿过烟幕云团的透过率。

3.1 三维坐标系的建立

新坐标系 O'(X'Y'Z') 与原坐标系 O(XYZ) 的关系如图 1 所示,两个坐标系均为右手坐标系。 图中,X 轴的正向为风向,Z 的正向为地面的法线 方向, *XOY* 平面为水平面, *OR* 为电磁波入射方向 (也是新三维坐标系的 *X*'轴), *OR*'为 *OR* 在 *XOY* 面上的投影。 α 角为 *OR* 与 *OR*'的夹角, β 角为 *OR*'与 *X* 轴的夹角。根据地理关系,也可以把 α 角 称为 俯 仰 角 (0°~90°), β 角 称 为 方 位 角 (0° ~360°)。





3.2 空间坐标系转换矩阵

要实现原坐标系 O(XYZ) 和新坐标系 O'(X'Y' Z')之间的转换,需要求得它们之间的转换矩阵,包 括原坐标系到新坐标系的转换矩阵 M 以及新坐标 系到原坐标系的转换矩阵 M'。

(1)M的推导

*M*的推导方法是:*X*′轴经过两次旋转操作,与*X* 轴重合,得到原坐标系到新坐标系的转换矩阵*M*。 右手坐标系中绕坐标轴的旋转操作均遵循右手法 则,即右手拇指指向旋转轴正向,其余四指的指向便 是旋转角的正方向^[14]。

第一次旋转操作:*OR*(即 *X*/轴)绕 *Y*/轴旋转 α 角度,使 *OR* 与 *OR*/重合,其转换矩阵为:

$$M_{y} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix}$$
(5)

旋转后得到坐标系 O"(X",Y",Z"),其 X"轴为 OR',Y"轴为 OY',Z"轴为过 O(0,0,0) 点垂直于 X" O" Y" 平面的方向。

第二次旋转操作: OR'绕 Z"轴旋转(-β)角度,使 OR'与 X 轴重合,其转换矩阵为:

$$M_{z} = \begin{bmatrix} \cos(-\beta) & \sin(-\beta) & 0\\ -\sin(-\beta) & \cos(-\beta) & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0\\ \sin\beta & \cos\beta & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(6)

整个过程的转换矩阵为:

$$M = M_{y} \cdot M_{z}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & -\cos\alpha\sin\beta & -\sin\alpha \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ \sin\alpha\cos\beta & -\sin\alpha\sin\beta & \cos\alpha \end{bmatrix}$$
(7)

利用转换矩阵 *M*,可以实现原坐标系中任意一点(*x*,*y*,*z*)到新坐标系的转换,即

$$(x' \ y' \ z') = (x \ y \ z) \cdot M$$
 (8)

(2)M'的推导

M′推导过程是*M*的逆过程,操作方法是:*X*轴 经过两次旋转操作,与*X*′重合,得到新坐标系到原 坐标系的转换矩阵*M*′。

第一次旋转操作:*X* 轴绕 *Z* 轴旋转 β 角度到 *OR*',其转换矩阵为:

$$M'_{z} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0\\ -\sin\beta & \cos\beta & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(9)

旋转后得到坐标系 *O*₁(*X*₁ *Y*₁ *Z*₁),其 *X*₁ 轴为 *OR*',*Z*₁ 轴为 *OZ*,*Y*₁ 轴为过 *O*(0,0,0) 点垂直于 *X*₁ *O*₁ *Z*₁ 平面的方向。

第二次旋转操作:*OR*'绕 *Y*₁ 轴旋转(-α)角度, 使 *OR*'与 *OR* 重合,其转换矩阵为:

$$M'_{y} = \begin{bmatrix} \cos(-\alpha) & 0 & -\sin(-\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(-\alpha) & 0 & \cos(-\alpha) \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix}$$
(10)

经过两次旋转,完成了 X 轴到 OR 轴的变换,整 个过程的转换矩阵为:

$$M' = M'_{z} \cdot M'_{y}$$
$$= \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0\\ -\sin\beta & \cos\beta & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

激光与红外

利用转换矩阵 M',可以得到新坐标系中任意一 点(x', y', z')在原坐标系中的对应坐标:

 $(x \ y \ z) = (x' \ y' \ z') \cdot M'$ (12)

(3)转换坐标系原点不重合的情况

有时将烟幕扩散模型嵌入另外一个场景中,此时两个转换坐标系的原点不重合,设原坐标系的原 点 *0* 在新坐标系中的值为(*a*,*b*,*c*),则原坐标系中的任意一点(*x*,*y*,*z*)在新坐标系中可表示为:

$$\begin{cases} x^{\prime} = x + a \\ y^{\prime} = y + b \\ z^{\prime} = z + c \end{cases}$$
(13)

反 之, 新 坐 标 系 中 的 任 意 一 点 (x', y', z') 在原坐标系中可表示为:

$$\begin{cases} x = x' - a \\ y = y' - b \\ z = z' - c \end{cases}$$
(14)

4 烟幕积分浓度分布计算

4.1 二维坐标系

以三维坐标系 O'(x'y'z')的 X'轴为投影方向, Y'O'Z'平面为投影幕,可以得到如图 2 所示烟幕云 团二维投影坐标系,求得二维坐标系中每点的烟幕 积分浓度,则得到烟幕云团在 X'轴方向的积分浓度 二维分布图,进而可以计算电磁波经过二维投影图 中任意一点的透过率。



Fig. 2 Smoke screen 2D field of view coordinate system

烟幕云团所在的三维空间投影到 Y' O' Z' 平 面,在 Y'轴上的最大值和最小值分别为 y₁ 和 y₂,在 Z'轴上的最大值和最小值分别为 z₁ 和 z₂,因此烟幕 的投影区域为矩形 *O*"*ABC* 所包含的区域。投影区域的四个顶点 *O*"、*A*、*B*、*C* 的坐标分别为(*y*₂,*z*₂)、(*y*₁,*z*₂)、(*y*₁,*z*₁)和(*y*₂,*z*₁)。将坐标系原点 *O*'平移到 *O*",两个坐标系之间的转换关系为:

$$\begin{cases} y'' = y' - y_2 \\ z'' = z' - z_2 \end{cases}$$
(15)

4.2 烟幕积分浓度和透过率的计算

在投影区域内任意一点(y",z")上烟幕的积分 浓度为:

$$C(y'',z'') = \sum_{x'=x_1}^{x_2} C(x',y',z') \cdot \Delta x$$
(16)

其中, x_1 和 x_2 分别为烟幕体在X'轴方向的最小值 和最大值, Δx 为X'轴方向的计算精度,y'、z'与y''、z''的关系为:

(*x*',*y*',*z*')在原坐标系对应的点为(*x*₀,*y*₀,*z*₀), 根据式(8)可得:

$$(x_0 \ y_0 \ z_0) = (x' \ y' \ z') \cdot M'$$
 (18)
从而得到:

$$C(x', y', z') = C(x_0, y_0, z_0)$$
(19)

根据朗伯 – 比尔定律,电磁波沿 X'轴方向经过 点(x',y',z')的透过率 T 为:

$$T(x',y',z') = \sum_{x'=x_1}^{x_2} e^{-C(x',y',z')\cdot\Delta x\cdot\alpha}$$
(20)

5 总 结

通过以上推导,得到了烟幕随机游走模型中 三维坐标系的转换矩阵,通过转换矩阵可以很方 便地实现新旧坐标系之间的坐标变换,计算烟幕 云团沿任意路径的积分浓度和电磁波衰减率。同 时,推导了烟幕积分浓度的二维投影算法,可计算 出任意投影面上的积分浓度分布情况和电磁波透 过该点的透过率,为烟幕扩散模型在多角度数据 分析、烟幕云团红外图像处理、更多场景中的应用 奠定了基础。

参考文献:

Deng Yi, Su Haiying, Su Lei, et al. Analysis of the functionary of infrared smoke screen against precision guided weapon[J]. Infrared Technology, 2007, 29 (6): 320 – 323. (in Chinese)

邓轶,苏海樱,苏蕾,等. 红外烟幕在防精确制导武器 打击中的作用分析 [J]. 红外技术, 2007, 29(6): 320-323.

- [2] Zeng Zhaokai, Zhu Dongsheng. Smokescreen air defense and command control [J]. Fire Control and Command Control, 2018, 43(3):1-4. (in Chinese) 曾照凯,朱东升.烟幕防空与指挥控制[J].火力与指 挥控制, 2018, 43(3):1-4.
- [3] Zhao Hui, Jiang Teng, Guo Shihong, et al. Research on smokescreen support for defensive operations in naval anchoring area[J]. Mine Warfare & Self-Defence, 2018, 26 (1):68-71. (in Chinese)
 赵晖,姜腾,郭世宏,等. 海军驻泊地域防御作战中烟

幕保障问题[J].水雷战与舰艇防护,2018,26(1): 68-71.

[4] Du Shiming, Zeng Kai, Lu Xiangyin, et al. Study on extinction mechanism and performance of infrared smoke screen[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(1): 90-93, 97. (in Chinese)
杜石明,曾凯,吕相银,等. 对红外烟幕消光机理及性

能的研究[J]. 电光与控制,2011,18(1):90-93,97.

 [5] Liu Benli, Wang Hongxia, Zhu Youzhang, et al. Research on interference characteristics of smoke screen to laser
 [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(7):736 - 739. (in Chinese)

刘本利,王红霞,竹有章,等.烟幕对激光的干扰特性研究[J].激光与红外,2010,40(7):736-739.

- [6] Yan Junhong, Min Jiang, Su Shiming, et al. Research on smoke screen jamming technology against millimeter wave guided weapon [J]. Electro-Optic Technology Application,2012,27(5):17-21. (in Chinese)
 闫俊宏,闽江,苏世明,等. 对毫米波制导武器的烟幕 干扰技术[J]. 光电技术应用,2012,27(5):17-21.
- [7] Li Qingzi, Zheng Yinhe, Xiong Jiewei, et al. Comparison between random walk diffusion model and gauss diffusion model[J]. Meteorolgy Journal of Henan, 1997, (1):38 – 39. (in Chinese)

李清梓,郑银鹤,熊杰伟,等.随机游动扩散模式与高 斯扩散模式的对比[J].河南气象,1997,(1):38-39.

[8] Zhang Hongyu, Zhang Zhisheng, Wang Naiyan, et al. Comparison between Gaussian model and random walk model of smoke agent atmospheric diffusion [J]. Electrooptics & Passive Countermeasures, 2004, 19(6):38-40, 59. (in Chinese)

张红雨,张志生,王乃岩,等.发烟剂大气扩散高斯模 式与随机游动模式比较[J].光电技术应用,2004,19 (6):38-40,59.

[9] Sun Xun, Wang Xuanyu, Wang Xian, et al. Real time modified smoke random walk simulation model[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9):1979 - 1984. (in Chinese)
孙逊,王玄玉,王献,等. 实时修正的烟幕随机游走仿

真模型[J]. 系统仿真学报,2016,28(9):1979 – 1984.

- [10] Huang Mingquan, Gao Junlin, Xiao Kaitao, et al. Numerical simulation of smoke diffusion [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2006, (6):19-21. (in Chinese)
 黄明犬,高钧麟,肖凯涛,等.烟幕扩散的数值模拟
 [J].火工品,2006, (6):19-21.
- [11] Jin Taosheng, Yang Jin, Han Suqin, et al. Application of random walk model in air pollution diffusion analysis[J]. Journal of Safety and Environment, 2008,8(1):73-75. (in Chinese)
 金陶胜,杨锦,韩素芹,等.随机游动模型在大气污染 扩散分析中的应用探讨[J].安全与环境学报,2008,8 (1):73-75.
- [12] Wang Xuanyu, Pan Gongpei. Study on the extinction coefficient of 10.6 μm laser by red phosphorus smoke[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(6):636 640. (in Chinese)
 王玄玉,潘功配. 红磷烟幕对 10.6μm 激光的消光系数 测试研究[L] 红外与激光工程 2005 34(6).

测试研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34 (6): 636-640.

- [13] Yao Lujiu, Gao Junlin, Xiao Kaitao, et al. Smoke theory and testing technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese) 姚禄玖,高钧麟,肖凯涛,等. 烟幕理论与测试技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [14] Wu Haiyu, Yang Yang, Zhao Jianfeng, et al. On the transformation of 3D graphics and its transformation matrix
 [J]. China High-tech Enterprises, 2007, (1):36 37.
 (in Chinese)
 吴海玉,杨阳,赵剑锋,等. 浅谈三维图形的图形变换

及其变换矩阵[J]. 中国高新技术企业,2007,(1): 36-37.