

文章编号: 1672-8785(2014)02-0044-05

基于可达辐射能的目标表面辐射传递系数计算方法

梁 英 肖卫国 王 力 刘泽文

(北京控制与电子技术研究所, 北京 100038)

摘 要: 为了便于在红外成像仿真中对目标表面温度场进行计算, 提出了一种基于可达辐射能的目标表面辐射传递系数计算方法。分别用公式法、蒙特卡洛法和可达辐射能计算法计算了两两垂直表面和两两平行表面模型间的辐射传递系数, 并进行了仿真验证。结果表明, 该可达辐射能计算方法在确保计算精度满足要求的同时, 在计算效率上相对于公式法和蒙特卡洛法都有较大提高。

关键词: 蒙特卡洛法; 辐射传递系数; 相互辐射

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.02.008

Calculation of Radiation Transfer Coefficient on Target Surface Based on Accessible Radiant Energy

LIANG Ying, XIAO Wei-guo, WANG Li, LIU Ze-wen

(Beijing Institute of Control and Electronics Technology, Beijing 100038, China)

Abstract: To calculate the temperature field on target surface conveniently during infrared imaging simulation, a method for calculating the radiation transfer coefficient on target surface based on accessible radiant energy is proposed. The formula method, Monte Carlo method, and accessible radiant energy calculation method are respectively used to calculate the radiation transfer coefficient between two vertical surfaces and that between two parallel surface models. The calculations are verified by simulation. The result shows that the calculation efficiency of the accessible radiant energy calculation method is improved greatly compared with the formula method and the Monte Carlo method, while its calculation accuracy is ensured to meet the requirements.

Key words: Monte Carlo method; radiation transfer coefficient; mutual radiation

0 引言

目标红外特性建模是红外成像仿真的重要部分。基于理论计算的目标红外特性建模过程一般包括温度场计算和辐射场计算两个部分。目标表面温度场计算为辐射场计算提供必要的前提, 且对建模的逼真度影响很大。为建立较为

精确的目标表面温度场计算模型, 需要考虑目标表面各面元之间相互辐射的影响, 计算时通常使用辐射传递系数法。

辐射传递系数的计算方法有公式法、实验测定法、作图法、数值模拟法等。其中, 较为常用的是数值模拟法。文献 [1] 中给出了适用于黑体表面辐射传递系数的计算公式。文献 [2-4] 采

收稿日期: 2014-01-06

作者简介: 梁英(1987-), 女, 山西吕梁人, 硕士, 主要研究红外制导与控制。

E-mail: liangying163163@163.com

用蒙特卡洛法计算辐射传递系数时仅考虑自身辐射的相互影响, 对于开放环境的适用性不强。本文提出了一种针对开放环境、同时考虑自身辐射和环境辐射的辐射传递系数计算方法。

1 常用计算方法

1.1 公式法

公式法是从角系数定义出发进行计算的。角系数定义为: 离开表面 1 的辐射能到达表面 2 所占的份额, 记为 D_{12} [2]。图 1 为角系数相关参数的示意图。

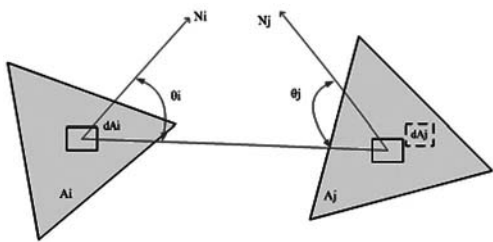


图 1 角系数计算参量示意图

用 D_{ij} 表示面元 I 对面元 J 的角系数的表达式为 [1]

$$D_{ij} = \frac{1}{A_j} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (1)$$

式中, A_i , A_j 表示面元 I 与面元 J 的面积; r 表示面单元 dA_i 与面单元 dA_j 之间的距离; θ_i 表示面单元 dA_i 的法线 N_i 与两面单元连线的夹角; θ_j 表示面单元 dA_j 的法线 N_j 与两面单元连线的夹角。

如果目标表面是理想的等温黑体, 则角系数 (即目标表面辐射传递系数) 可用公式法计算辐射传递系数。但如果物体是非理想黑体, 通常采用数值模拟方法计算辐射传递系数。

1.2 数值模拟法

在工程应用中, 辐射传递系数大多采用数值模拟法计算。其中, 蒙特卡洛法作为一种数字统计的随机模拟方法, 因思路简单, 模拟精度较高, 计算量较小, 而被广泛采用。

蒙特卡洛法计算辐射传递系数的基本思路是: 首先, 将面元 I 发射的辐射能看作由能束组

成, 假定能束从面元 I 发射的方向是随机的, 物体表面是漫反射面, 即表面反射方向与入射方向无关。每一能束代表一定的辐射能。然后, 跟踪每一能束的可能途径, 直到其最终被某一面元所吸收为止。累计由面元 I 发出到达面元 J 并被该面元吸收的能束数量, 即可得到面元 I 对面元 J 的辐射传递系数 D_{ij} 。

相对于公式法, 蒙特卡洛法更适用于非理想物体表面辐射传递系数的计算。该方法采用能束跟踪法, 认为被反射的能束最终被吸收。然而, 作为非黑体, 被反射的能束最终可能被吸收也可能留在空间中, 这给辐射传递系数的计算带来了一定的误差及计算难度。而且蒙特卡洛法计算辐射传递系数仅考虑自身辐射, 忽略了环境辐射, 会对辐射传递系数的计算产生一定的影响。基于上述思想, 本文给出了开放环境中目标表面辐射传递系数的计算方法。

2 基于可达辐射能的计算方法

实际应用中, 目标表面是封闭腔的情况很少, 大多是处于开放环境中的。在开放环境中, 目标表面辐射的相互影响既包括自身辐射的相互影响, 也包括环境辐射的相互影响。本文提出的辐射传递系数, 在计算辐射传递系数时将发射和反射的辐射能都看作离开表面的辐射能。根据辐射传递系数的物理意义, 统计离开面元 I 的辐射能束落到面元 J 的数量, 即可获得面元 I 对面元 J 的辐射辐射传递系数。

2.1 总体实现流程

该算法的实现: 首先判断能束属于自身辐射还是环境辐射, 然后确定能束随机发射的位置和方向, 判断离开面元 I 的能束能否到达面元 J 。如果能到达, 则判断是否被吸收。否则返回继续判断; 能束是否被吸收是随机的。如果被吸收, 则相应的计数器加 1。如果没被吸收, 则能束属于离开面元 J 的环境辐射能。在计算辐射传递系数时, 认为该能束是面元 J 对其他面元的影响; 返回判断离开面元 I 的下一条能束, 重复以上步骤; 最后分别对自身辐射和环境辐射的统计结果进行加权处理, 可得面元 I 对面元 J 的辐射传递系数。

基于可达辐射能的环境辐射传递系数计算流程如图 2 所示。

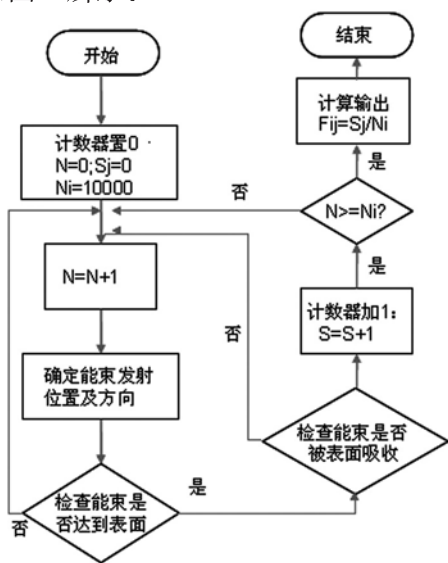


图 2 辐射传递系数的计算流程图

2.2 能束发射方向的确定

采用随机抽样公式决定发射方向的方位角及圆周角：

$$\cos \theta = \sqrt{R_\theta} \quad (2)$$

$$\varphi = 2\pi R_\varphi \quad (3)$$

R_θ 、 R_φ 是 0、1 之间均匀分布的随机数， θ 是能束射线与表面法线的夹角， φ 是射线在表面投影的圆周角。

对于能束是否被面元吸收，可采用随机法来确定：

$$R_\alpha \leq \varepsilon \quad (4)$$

如果随机数 R_α (0、1 之间均匀分布的随机数) 满足上式与表面发射率的关系，则确定能束被该面元吸收，否则就是被反射。

2.3 可达辐射能判断

由于能束的发射位置及方向是随机的，所以需要用到遮挡分析法来判断能束能否到达面元。我们采用的是角度分析法和位置判断法。角度分析法如图 4 所示。

角度分析法：分别计算能束与面元 I 和面元 J 的法线的夹角 θ_i 、 θ_j 。若 $\cos \theta_i$ 及 $\cos \theta_j$ 均大

于零，则可判断能束能够到达面元 J 所在的平面，否则判断为不能到达 [5]。

位置判断法：当确定能束能够到达面元 J 所在的平面时，根据能束的方向向量及发射位置计算能束与 J 所在平面的交点。如果交点属于面元 J ，则判断能束能够达到面元 J ，否则判定为不能到达。

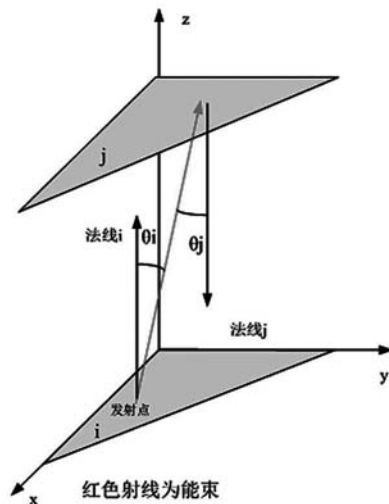


图 3 角度分析示意图

3 仿真实验与分析

3.1 计算精度验证

为验证可达辐射能算法的计算精度，采用两垂直表面和两平行表面模型对辐射传递系数进行了计算，并将计算结果与采用蒙特卡洛法的计算结果进行了对比分析。

3.1.1 两垂直表面间辐射传递系数的计算

图 4 中 L_1 为表面 1 的宽度， L_2 为表面 2 的宽度。离开表面的能束数量取为 10^4 ， x 方向为无限长，实验中取 10^7 个单位长。

(1) 取表面发射率 $\varepsilon = 1$ ，改变两表面的宽度，分别用简化算法、蒙特卡洛法及公式法对辐射传递系数 D_{12} 进行计算，结果见表 1。

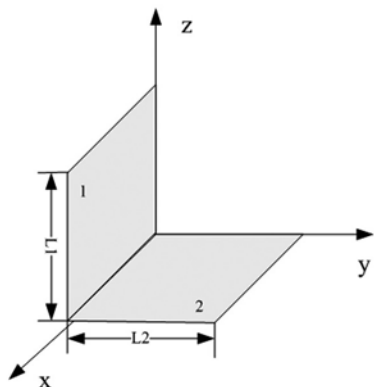


图 4 两垂直表面示意图

分析表 1, 当表面发射率为 1 时, 采用可达辐射能算法、蒙特卡洛法与公式法的计算结果近似。蒙特卡洛法与公式法的绝对误差比可达辐射能算法与公式法的小。这是由于可达辐射能算法中考虑了自身辐射及环境辐射的反射, 避免能束跟踪以提高计算效率, 从而导致计算精度有所降低。

(2) 改变发射率, 分别用可达辐射能算法和蒙特卡洛法计算辐射传递系数, 结果见表 2。

表 1 三种方法计算垂直表面间辐射传递系数的结果

$\frac{L2}{L1}$	N	简化方法		蒙特卡洛法		公式法		简化法相对公式法误差		蒙特卡洛相对公式误差	
		D_{12}	D_{21}	D_{12}	D_{21}	D_{12}	D_{21}	D_{12}	D_{21}	D_{12}	D_{21}
1	10^4	0.2933	0.2937	0.2916	0.2915	0.2929	0.2929	0.0004	0.0008	0.0013	0.0014
4	10^4	0.4427	0.1139	0.4381	0.1116	0.4384	0.1096	0.0043	0.0043	0.0003	0.0020
5	10^4	0.4550	0.0924	0.4486	0.0896	0.4505	0.0901	0.0045	0.0023	0.0019	0.0005
7	10^4	0.4700	0.0678	0.4627	0.0660	0.4645	0.0664	0.0055	0.0014	0.0018	0.0004
9	10^4	0.4777	0.0537	0.4711	0.0527	0.4723	0.0525	0.0054	0.0012	0.0012	0.0002

表 2 改变发射率计算垂直表面间辐射传递系数 D_{12} 的结果对比

ε	$L2/L1$	N	可达辐射能算法	蒙特卡洛法	绝对误差
1.0	5	10000	0.4550	0.4486	0.0064
0.1	5	10000	0.0430	0.0360	0.0070
1.0	1	10000	0.2933	0.2916	0.0017
0.1	1	10000	0.0269	0.0222	0.0047

分析表 2, 当面元几何参数相同而吸收率不同时, 辐射传递系数不同。这是由于辐射传递系数与表面吸收率有关。但改变发射率并不影响简化算法的计算精度, 得到的结果与用蒙特卡洛法的计算结果近似, 误差在允许范围内。

3.1.2 两平行表面间辐射传递系数的计算

图 5 中, L 为表面的宽度, D 为两平行表面间的距离。离开表面能束数量取为 10^4 , 表面发射率取为 $\varepsilon = 1$, x 方向无限长, 实验中取 10^7

个单位长。改变两平行表面间的距离, 分别用简化算法、蒙特卡洛法和公式法计算辐射传递系数, 结果见表 3。

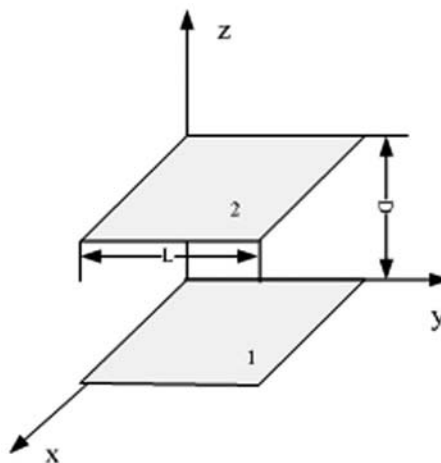


图 5 两平行表面示意图

分析表 3, 可达辐射能算法相对蒙特卡洛法计算精度稍有降低, 但误差在允许范围内。

表 3 三种方法计算平行表面间辐射传递系数 D_{12} 的结果

L	D	N	可达辐射 能算法	蒙特卡 洛法	公式法	可达辐射能算法相 对公式法误差	蒙特卡洛相对 公式误差
1	1	10000	0.4206	0.4198	0.4144	0.0062	0.0054
1	0.5	10000	0.6259	0.6222	0.6183	0.0076	0.0039
1	0.1	10000	0.9099	0.9063	0.9056	0.0043	0.0007
1	0.01	10000	0.9909	0.9892	0.9921	0.0012	0.0029

3.2 计算效率分析

为了反映蒙特卡洛法和基于可达辐射能算法的计算效率不同,假设单元表面的吸收率 ε 都取相同,每一单元表面的能束取为 M 。

用蒙特卡洛法计算辐射传递系数时,首先要判断 M 条能束中有多少条到达系统单元表面并被吸收。假设判断一条能束的时间为 t ,则 M 条总共耗时 $M \cdot t$ 。如果有 m 条能束没有被系统单元表面吸收,则需要对这 m 条能束进行跟踪,判断其能否被单元表面所吸收。如果能束没有被吸收,则继续跟踪,直到所有能束被系统单元表面吸收为止。对这 m 条能束进行跟踪吸收判断所需的计算时间为 $m \cdot t$ 。由此可以看出,当采用蒙特卡洛法进行第一次系统投射时, $m=M$,一次系统投射的时间为 $t_1 = mt = Mt$ 。如果各单元表面吸收率相同,第二次投射的时间为 $t_2 = Mt(1 - \varepsilon)$ 。同理可得,第 k 次投射的时间 $t_k = Mt(1 - \varepsilon)^k$ 。因此,用蒙特卡洛法计算辐射传递系数所需的总时间为

$$T_{total} = MT \frac{1 - (1 - \varepsilon)^k}{1 - (1 - \varepsilon)} \quad (5)$$

可达能计算方法与蒙特卡洛法不同,由于它在计算过程中把环境辐射的反射和自身辐射都看作是离开表面的辐射,因此在计算辐射传递系数时,不需要对能束进行跟踪,只需要判断能束到达单元表面能否被吸收,相当于只进行蒙特卡洛法中的第一次系统投射,其投射时间为

$$T_{total} = Mt \quad (6)$$

对比式 (5) 和式 (6) 可以看出,可达辐射能计算方法大大地提高了计算效率,而且计算时间不受单元表面吸收率的影响。蒙特卡洛法只在表面吸收率为 1 的情况下计算时间与简化算法相同,其他情况下其计算时间随单元表面吸收率而变,且吸收率越小,计算时间越长。

4 结论

红外成像仿真中的目标表面温度场计算复杂,很难在计算效率与计算精度方面同时达到最优。本文提出的基于可达辐射能的目标表面辐射传递系数计算方法,较好地解决了此问题。仿真试验结果表明,可达辐射能计算方法在确保计算精度满足要求的同时,在计算效率上相对于公式法和蒙特卡洛法都有较大提高。在实际工程应用中具有较好的应用前景,能满足红外目标半实物仿真系统的仿真精度与仿真实时性要求。

参考文献

- [1] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2012,395-404.
- [2] 李方军,曾宪雯,等. 蒙特卡洛法计算辐射传递函数[J].数学力学物理高新技术研究进展,2000,8:298-302.
- [3] 张伟清,宣益民,韩玉阁. 单元表面间辐射传递系数的新型计算方法[J].宇航学报,2005,26(1):77-80.
- [4] 沈国土,杨宝成,等. 热分析中辐射传递系数的迭代计算[J].红外技术,2004, 26(6):9-12.
- [5] 程惠尔,洪鑫,卢万成. 四对角喷管外向辐射角系数的数值模拟[J].推进技术,1999, 20(2):69-72.