

程 强 黄志锋 周怀春 著

精确高效 求解辐射传递方程的 DRESOR法

DRESOR Method for
Accurately and
Efficiently Solving Radiative
Transfer Equation



科学出版社

精确高效求解辐射传递方程的 DRESOR 法

**DRESOR Method for Accurately and Efficiently
Solving Radiative Transfer Equation**

程 强 黄志锋 周怀春 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

在高温工业设备中,辐射换热是一种主要的传热方式,准确地计算辐射换热热量对于高温系统设计、设备监测及安全优化运行有重要的指导意义。同时,在利用辐射图像法进行温度场测量等逆问题分析过程中,辐射传递过程的计算是逆问题求解的前提。本书致力于介绍一种适用对象广、计算效率高的高方向分辨率辐射强度计算方法——DRESOR 法。本书系统介绍 DRESOR 法的原理及其用于处理不同的辐射问题,包括一维/多维各向同性和异性散射、梯度折射率介质、瞬态辐射传递等,全面分析 DRESOR 法的计算精度及效率,并把它应用于基于图像处理的燃烧检测技术中。本书充分说明 DRESOR 法是一种能有效处理各种复杂辐射传热问题的高效可靠求解方法。

本书可供工程热物理、光学工程等相关领域从事辐射传递过程计算的科研人员、工程技术人员以及高等学校相关专业教师、研究生和高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

精确高效求解辐射传递方程的DRESOR法 = DRESOR Method for Accurately and Efficiently Solving Radiative Transfer Equation / 程强, 黄志锋, 周怀春著. —北京: 科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-061266-3

I. ①精… II. ①程… ②黄… ③周… III. ①辐射热传递-计算方法-研究 IV. ①TK124

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第094643号

责任编辑: 范运年 / 责任校对: 彭珍珍
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

天津市新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第一版 开本: 720×1000 1/16

2019年6月第一次印刷 印张: 17 1/2

字数: 350 000

定价: 158.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

热辐射是热传递的基本方式之一。在许多工程应用中,如炉膛内燃烧、高温材料的热加工、太阳能利用等,辐射换热更是一种主要的传热方式。通过辐射传递方程可以求解热辐射的传递过程。本书中介绍一套 DRESOR (distributions of ratios of energy scattered or reflected) 法,能精确高效求解各种复杂辐射传热问题中的辐射传递方程,得出高方向分辨率辐射强度。该方法兼顾计算效率和计算精度,并且便于处理复杂结构中复杂介质特性的辐射传热问题。目前已发表相关学术论文 50 余篇,其中包括发表在 *International Journal of Heat and Mass Transfer*、*Journal of Heat and Transfer*、*International Journal of Thermal Sciences*、*Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 等热科学领域国际知名刊物上的 SCI 论文 30 余篇。

目前,国内外一些求解辐射传递方程方法得到的往往是辐射强度积分量,如辐射热流、辐射内热源等,而无法有效计算高方向分辨率的辐射强度;另外,由于数学计算处理形式复杂,难于处理复杂多维辐射传热问题,应用上存在一定局限性。具有许多优势的蒙特卡洛法可以综合考虑辐射传递过程中所有重要的影响而不需要近似,所获解的精确性由计算时间和统计误差的综合因素决定,但还没有被应用在空间具有较高方向分辨率的辐射强度分布和辐射传递方程的求解中。本书采用蒙特卡洛法求解辐射强度在空间具有较高方向分辨率的分布方面进行了探索研究。很明显,这对于蒙特卡洛法的求解能力的提高具有重要的意义,为复杂辐射传递问题求解增添了新的途径,为推动辐射传递问题研究向前发展作出贡献。

本书内容丰富全面,基本覆盖了工程实际中遇到的各类辐射传热问题,包括不同维数几何结构:一维、二维及三维;不同坐标系:直角坐标和柱坐标;不同时间尺度:稳态和瞬态辐射传热问题;不同介质类型:梯度折射率介质及各向异性散射介质;不同壁面条件:漫反射、镜反射及双向反射分布函数 BRDF (bidirectional reflectance distribution function) 壁面。本书一个突出特点是,在多种求解条件下,介绍了能更准确反映壁面实际特性的耦合 BRDF 壁面条件下的辐射传递问题求解。

本书的研究内容得到国家自然科学基金重点项目“火焰多波段热辐射图像分析处理及热物理量场重建燃烧诊断”(No.50636010)、国家杰出青年科学基金项目“热辐射分析与燃烧监控”(No.51025622)、国家自然科学基金面上项目“基

于高光谱成像分析的煤焦高温燃烧机理研究”(No.51676077)、国家自然科学基金面上项目“基于红外辐射图像分析的气体燃烧系统内三维温度场反演研究”(No.51676142)、国家自然科学基金青年科学基金项目“精确、高效求解实际辐射传热问题的 DRESOR 法研究”(No.50906027)、中国博士后特别基金资助项目(No.200801307)及中国博士后基金一等资助项目(No.20070420171)、华中科技大学煤燃烧国家重点实验室自主研发基金项目(No.FSKLCCB1601, No.FSKLCCB1901)等的支持。作者还要感谢为本书的研究内容做出重要贡献的张向宇、王贵华、王志超、张险、陈杰、柴家乐、马文维、周奕帆、刘杨等课题组中已毕业的博士及硕士研究生。本书的出版过程中,欧涵和黄正伟做了较多的文字整理工作,对他们的辛勤付出表示感谢!本书的出版得到华中科技大学自主创新基金创新团队培育项目(No.2016YXZD009)经费的支持,在此表示感谢!

限于作者的知识视野和学术水平,书中难免存在不当之处,恳请读者批评、指正。

作 者

2019年1月10日

主要符号表

A	系数矩阵
A	单位表面积, m^2
A_m	散射相函数系数
a	黑度; 相函数系数
C	系数矩阵
C_0	补偿系数, m^{-3} 或 m^{-2} ; 形状因子
C_1	补偿系数, m^{-3} 或 m^{-2}
C_α	归一化因子
$C_{\max}$	归一化因子最大值
c	声速, m/s
c_0	真空中光速, $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$
c_1	第一辐射常数, $3.741832 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$
c_2	第二辐射常数, $1.4388 \times 10^4 \mu\text{m}^4 \cdot \text{K}$
D	正则化矩阵
D_a	吸收距离, m
D_s	散射距离, m
E	辐射能向量
E	辐射力, W/m^2 ; 辐射能, W
E_R	辐射能信号, W/m^2
E_0	能束初始能量, W
E_λ	单色辐射力, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$
E_b	黑体辐射力, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$
$E_{b\lambda}$	黑体光谱辐射力, W/m^2
G	入射辐射, W/m^2
g	散射非对称因子
H	Heaviside 函数; 待求变量
I	辐射强度向量; 单位矩阵
I	辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$
I_i	入射辐射, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$
I_λ	光谱辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$

$I_{b\lambda}$	光谱黑体辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$
I_r	反射辐射, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$
I_{ow}	边界入射辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$
J	雅可比矩阵强度
K	系数矩阵
K	模型系数
k_λ	单色吸收因子
M	离散方向数; 勒让德多项式总阶数
m	表面均方根斜率
N_0	追踪能束数
N	法向矢量
N	均匀性介质折射率, 真空中为 1
n_w	系统边界, 积分路径末端
$P(\cdot)$	概率
P	方位角坐标下的散射相函数
P_m	勒让德多项式
Q	能量, W
$\dot{Q}$	介质内辐射热源, W/m^3
q	辐射热流, W/m^2
$\tilde{q}$	无量纲反射热流
R	正交矩阵; 柱坐标轴
R_0	普适气体常数, $8314 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
R_d	READ 数
R_d^{d}	直接能量份额, $\text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
R_d^{i}	间接能量份额, $\text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
R_d^{s}	散射能量份额, m^{-3} 或 m^{-2}
r	位置矢量
r	半径, m
S	三维温度场的输出向量
S	源函数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$
$\hat{s}_i$	入射方向矢量
$\hat{s}_r$	反射方向矢量
$\hat{s}'$	散射方向矢量
s	能束行进距离, m
T	温度向量, 其元素为绝对温度的四次方

T	绝对温度, K
t	时间, s
t_p	单位时间步长
t^*	无量纲化时间
t_λ	光谱透射率
u	速度, m/s
V	体积, m^3
$\mathbf{V}$	速度矢量
v	速度绝对值
W	圆盘
w_m	离散坐标(DO)法的离散积分集的权值
$\mathbf{X}$	物理坐标系, $[X \ Y \ Z]^T$
Y_i	出射辐射角度测量值, $W/(m^2 \cdot sr)$
$\mathbf{Z}$	未知向量

希腊字母

α	光谱吸收率
β	消光系数, m^{-1}
ε_λ	单色发射率
φ	水平角, rad
γ	比热比
κ	吸收系数, m^{-1}
λ	光谱波长, μm
μ, ζ	方向余弦
η	方向余弦; 光谱参数
θ	天顶角, rad
θ_i	散射方向
θ_r	入射方向
ρ	密度, kg/m^3 ; 反射系数
σ	斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; 测量数据标准偏差
δ	Dirac-delta 函数
σ_s	散射系数, m^{-1}
τ	光学厚度
τ_s	以光学厚度表示的位置坐标
τ_λ	光谱光学厚度

τ_t	辐射能量透射率
Γ	扩散系数
ω	散射反照率
ψ	角度
ς	随机变量
Φ	光谱散射相函数
Ω	立体角, sr

上标

*	给定值
c	计算数据
exact	准确值
d	直接
i	间接
s	散射
k	迭代次数
m	测量数据

下标

a	吸收
b	黑体
B	蓝色
d	漫反射
E	辐射能
g	气体
I	辐射强度
m	介质
m	测量值
R	DRESOR 法计算结果; 红色
G	绿色
s	镜反射
T	温度
w	壁面
η	光谱参数
λ	波长

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 辐射传热的特征	2
1.3 常用的辐射传递方程求解方法	4
1.4 本书安排	12
参考文献	14
第 2 章 DRESOR 法求解辐射传递方程基本理论	19
2.1 辐射传递方程的一般积分形式解	19
2.2 DRESOR 法求解辐射传递方程的推导	20
2.3 DRESOR 数性质及计算方法	25
2.3.1 DRESOR 数性质	25
2.3.2 各向同性散射介质中 DRESOR 数的计算	26
2.3.3 各向异性散射介质中 DRESOR 数的计算	32
2.4 DRESOR 法计算一维灰性各向同性散射介质中辐射传递	35
2.4.1 计算算例介绍	35
2.4.2 计算结果分析	36
2.5 DRESOR 法计算一维灰性各向异性散射介质中辐射传递	38
2.5.1 结果验证	38
2.5.2 DRESOR 数分布	44
2.5.3 辐射强度分布	48
2.6 本章小结	54
参考文献	55
第 3 章 DRESOR 法求解梯度折射率介质辐射传递问题	57
3.1 梯度折射率介质内 DRESOR 法介绍	57
3.1.1 能束追踪及 DRESOR 数的计算	59
3.1.2 DRESOR 法求解线性梯度折射率介质辐射传递	61
3.1.3 黑体壁面的线性梯度折射率介质内辐射传递分析	65
3.2 一维周期性梯度折射率介质辐射传递的 DRESOR 法求解	71

3.2.1	DRESOR 法求解周期性梯度折射率介质辐射传递	71
3.2.2	周期性梯度折射率介质内辐射传递分析	75
3.3	耦合 BRDF 表面的梯度折射率介质辐射传递问题	78
3.3.1	BRDF 模型简介	78
3.3.2	耦合 BRDF 壁面梯度折射率介质辐射传递求解	82
3.3.3	BRDF 表面对辐射传递的影响分析	86
3.4	本章小结	94
	参考文献	95
第 4 章	迭代 DRESOR 法	97
4.1	迭代 DRESOR 法介绍	97
4.1.1	迭代 DRESOR 法计算过程	97
4.1.2	镜反射边界处理	99
4.2	迭代 DRESOR 法求解黑体边界问题	100
4.3	迭代 DRESOR 法求解漫-镜反射边界问题	102
4.4	镜反射边界对辐射传递的影响	104
4.4.1	镜反射边界对辐射强度的影响	105
4.4.2	镜反射边界对辐射热流的影响	109
4.5	本章小结	112
	参考文献	112
第 5 章	瞬态 DRESOR 法	114
5.1	DRESOR 法求解瞬态辐射传递方程	114
5.2	单脉冲或简单波形脉冲入射计算	116
5.2.1	瞬态 DRESOR 数计算介绍	116
5.2.2	计算结果验证	121
5.2.3	瞬态辐射强度分布	122
5.2.4	瞬态投入辐射及热流分布	124
5.3	非均匀散射介质中瞬态 RTE 求解的 DRESOR 法	125
5.3.1	DRESOR 法求解非均匀介质瞬态辐射传递	126
5.3.2	DRESOR 法计算结果讨论	127
5.3.3	双峰分布存在条件讨论	131
5.4	DRESOR 法求解瞬态梯度折射率介质辐射传递	135
5.4.1	DRESOR 法求解过程介绍	135
5.4.2	截断高斯脉冲入射梯度折射率介质的 DRESOR 法求解	137
5.4.3	DRESOR 法计算结果与讨论	139
5.5	本章小结	140

参考文献	141
第 6 章 DRESOR 法对平行入射辐射问题的研究	143
6.1 DRESOR 法求解平行入射辐射传递方程介绍	143
6.1.1 一个简单工况的计算公式	145
6.1.2 平行光入射条件下 DRESOR 数的计算	147
6.1.3 空间立体角的离散方法	147
6.1.4 辐射强度的计算	149
6.2 DRESOR 法计算结果验证	151
6.3 DRESOR 法计算结果及讨论	153
6.3.1 DRESOR 数分布	153
6.3.2 辐射强度分布	155
6.3.3 辐射热流分布	157
6.4 本章小结	159
参考文献	160
第 7 章 二维 DRESOR 法研究	161
7.1 DRESOR 法对二维辐射传递问题的研究	161
7.1.1 二维矩形区域内 DRESOR 法求解公式	161
7.1.2 计算结果与讨论	165
7.2 耦合 BRDF 的二维 DRESOR 法	171
7.2.1 BRDF 模型选取及模型参数	172
7.2.2 耦合 BRDF 壁面二维梯度折射率介质辐射传递求解	173
7.2.3 耦合 BRDF 壁面二维矩形介质模型	174
7.2.4 计算结果与讨论	175
7.3 本章小结	179
参考文献	180
第 8 章 三维 DRESOR 法	181
8.1 三维 DRESOR 法介绍	181
8.1.1 DRESOR 法基本理论	181
8.1.2 三维系统中辐射强度计算	182
8.2 辐射强度计算结果	184
8.3 计算时间比较	186
8.3.1 不同方向数辐射强度计算	186
8.3.2 不同发射源系统辐射强度计算	187
8.4 本章小结	189
参考文献	189

第 9 章 柱坐标下 DRESOR 法	190
9.1 柱坐标下 DRESOR 法	190
9.1.1 圆柱坐标系下均匀折射率介质中 DRESOR 法的求解	190
9.1.2 梯度折射率介质中圆柱坐标系下 DRESOR 法的求解	197
9.2 耦合 BRDF 的柱坐标下 DRESOR 法	200
9.2.1 BRDF 模型选取及模型参数	200
9.2.2 耦合 BRDF 壁面二维圆柱介质模型	203
9.2.3 计算结果与讨论	203
9.3 本章小结	209
参考文献	210
第 10 章 ES-DRESOR 法	211
10.1 ES-DRESOR 法基本理论	211
10.1.1 关于 DRESOR 数线性方程组的建立	211
10.1.2 方程的离散和系数的计算	214
10.2 一维冷黑边界平行平板系统中 ES-DRESOR 法	216
10.2.1 DRESOR 数	216
10.2.2 方向辐射强度	217
10.2.3 投入辐射和辐射热流	218
10.2.4 计算时间比较	219
10.3 一维漫射边界平行平板系统中 ES-DRESOR 法	221
10.3.1 DRESOR 数	221
10.3.2 方向辐射强度	222
10.3.3 投入辐射和辐射热流	223
10.3.4 计算时间比较	224
10.4 三维立方体系统中 ES-DRESOR 法	225
10.4.1 DRESOR 数	226
10.4.2 方向辐射强度	227
10.4.3 辐射热流	230
10.4.4 计算时间比较	230
10.5 本章小结	234
参考文献	235
第 11 章 基于 DRESOR 法的辐射成像模型及其逆求解	236
11.1 应用于燃烧检测的辐射成像模型	236
11.2 温度场与辐射特性参数解耦重建原理	240
11.3 二维系统温度分布与辐射特性参数同时重建模拟	242
11.3.1 计算模型	242

11.3.2 计算结果分析	244
11.4 热态试验炉三维温度场与辐射参数同时重建试验结果	254
11.4.1 试验装置及试验条件	254
11.4.2 试验结果	255
11.5 本章小结	262
参考文献	263

第1章 绪 论

1.1 研究背景

只要物体的温度高于绝对零度，物体内的微观粒子都会由于热运动而发射出不同波长的电磁波，这种现象被称作热辐射。从理论上讲，物体热辐射的电磁波长可以包括整个波谱，即波长从零到无穷大。在讨论包括太阳辐射在内的辐射换热问题时，有实际意义的波长范围是 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ ，如图 1.1 所示^[1]。

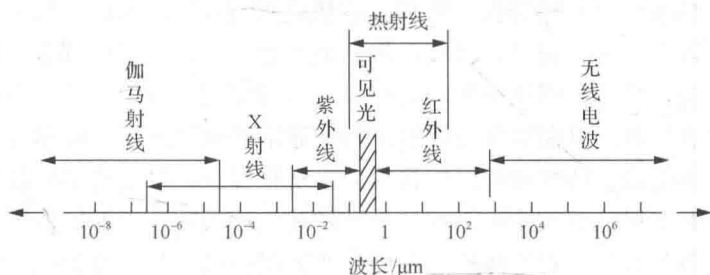


图 1.1 电磁波谱

物体在不断向外辐射热量的同时，也不断地吸收周围物体投射到它上面的热辐射，并把吸收的辐射重新转变成热能。物体间通过热辐射而交换热量的过程称为辐射传热。辐射传热是自然界三种基本热传递方式之一，它在工程应用中占有着很重要的地位。辐射传热是高温炉内最重要的传热方式，在电站煤粉炉内火焰和水冷壁间 95%以上的换热是通过辐射实现的^[2]。同时，在燃烧设备中，设备的体积越大，辐射传热在总的传热中所占的比例越大^[3]。

辐射传热研究涉及领域广泛，除了动力、机械制造、建筑等传统工业外，还进入了航空航天、军事、信息、生物工程等工业和技术部门。能源领域如燃煤电站锅炉、工业炉、气体透平燃烧室等传热分析计算，太阳能利用等。航天技术中，如航天飞行器热分析，卫星光学遥感器的杂光分析等；信息技术如军事目标红外线理论建模，红外信息的传输，用辐射反问题方法识别目标的几何形状、温度场等；材料工程领域如玻璃熔炉、半导体单晶炉、红外加热过程中的复合换热，纤维材料、多孔材料、微粒涂层内的复合换热以及用辐射反问题方法求热物理参数和热物性等。计算热辐射学和其他学科有着千丝万缕的交叉关系，较突出的是光学，其他还有电磁学、量子力学、大气科学、燃烧学、信息科学等。因此，深入

研究辐射传热中的诸问题, 能够帮助人们更加清楚地了解自然界, 解决工程应用中的各种问题。

1.2 辐射传热的特征

热辐射传递涉及的研究内容包括表面辐射、粒子辐射、介质(气体、半透明物质或流体)辐射、耦合传热、辐射热物性、热辐射逆问题、微尺度辐射传热、瞬态辐射传热等^[4-10]。按研究方法分类, 可分为理论分析法、实验研究法、数值计算方法。按物理本质分类, 可分为热辐射特性参数和热辐射传递过程的研究。本书注重理论分析, 借助数值计算, 在吸收、发射、散射的参与性介质中研究稳态及瞬态辐射传热问题。

辐射传热过程有其特殊性。例如, 在燃烧过程中^[3], 火焰的热辐射与火焰中介质的温度以及介质的辐射、吸收、散射能力有关, 而介质的辐射、散射能力与辐射波长有关。另外, 燃烧空间内, 任意一点对空间中其他任意一点都有辐射传热贡献, 燃烧装置的壁面也参与辐射传热, 通常对辐射具有反射和吸收作用。

辐射传热的以上特性使得辐射传热的求解很复杂。辐射传热的产生与传热机理与导热、对流换热有根本的不同, 导致描述它们的基本控制方程也有很大的差异。辐射传热与导热、对流传热的差异主要表现在以下几个方面^[6]:

(1) 辐射传热中能量方程有两个——能量平衡方程和能量传递方程, 而在导热和对流中, 这两个方程是统一的, 能量方程既是平衡方程也是传输方程。这样, 在辐射传热求解中, 除了和导热、对流一样有温度或热量的未知量外, 还多一个待求量辐射强度。

(2) 导热、对流传热是靠分子、原子微观运动或对流宏观运动来传输, 因此, 它们的控制方程中有扩散项或对流项, 而辐射传热方程中没有扩散项或对流项。在导热、对流中连续方程、动量方程、能量方程及湍流动能方程均可用如式(1.1)所示的通用微分方程表示^[6]。

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} H) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla H) + S_H \quad (1.1)$$

式中, ρ 为密度; $\mathbf{U}$ 为速度矢量; H 为待求变量; Γ 为变量 H 的扩散系数; S_H 为变量 H 的源项。通用微分方程中的四项分别为非稳态项、对流项、扩散项和源项。但是, 通用微分方程不能表示热辐射传输的控制方程。

(3) 导热、对流只与相邻控制体发生能量传输, 而辐射传热无需任何介质, 可在真空中传输。在通常情况下, 导热、对流发生在很小的范围内, 即分子发生碰撞的平均自由程 10^{-10}m 附近, 其能量平衡关系可以在无限小的体积内应用。而辐

射在传递过程中,由于光子的平均自由程范围很大,从 10^{-10}m (例如金属内部的吸收)到 10^{10}m ,甚至更大(例如太阳光到达地球),因此,不仅要研究相距很近的物体间辐射换热,有时还要研究很远的物体之间的辐射换热。

(4) 导热、对流传热有非稳态项,而在辐射传热中由于光子的传播速度非常快,绝大多数工程问题可忽略非稳态项。热辐射在介质中的传播速度为

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (1.2)$$

式中, c_0 为真空中的光速, $c_0 = 2.998 \times 10^8 \text{m/s}$; n 为介质的折射率, 真空的折射率 $n \equiv 1$, 大多数气体的折射率非常接近于 1。

(5) 辐射传热中介质的辐射能力与温度的四次方有关。

普朗克定律给出了黑体发射光谱的变化规律, 真空中普朗克定律表达式如下^[1]:

$$E_{b\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp[c_2 / (\lambda T)] - 1} \quad (1.3)$$

式中, $E_{b\lambda}$ 为黑体的光谱辐射力, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$; λ 为光谱波长, μm ; T 为绝对温度, K ; $c_1 = 3.741832 \times 10^8 \text{W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$, 为第一辐射常数; $c_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, 为第二辐射常数。

将普朗克定律表达式进行全波长积分即可得斯蒂芬-玻耳兹曼定律, 它指出黑体辐射力与其绝对温度的四次方成正比, 俗称四次方定律。因此, 辐射换热在高温时显得更重要, 其表达式为^[1]

$$E_b = \sigma T^4 \quad (1.4)$$

式中, E_b 为黑体的辐射力, W/m^2 ; $\sigma = 5.6703 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, 为黑体辐射常数, 又称斯蒂芬-玻耳兹曼常数。

由于辐射传热与导热、对流传热的以上几个方面的差异, 以往在导热、对流传热数值计算中发展起来的一系列行之有效的方法大部分都不适用于辐射传热的数值计算, 所以辐射传热必须发展自己的数值计算方法。在辐射传热问题分析和实际应用领域中, 辐射强度的计算和辐射传递方程的求解是关键。辐射传递方程求解方法的重要性可从两个方面来说明。

首先, 在获得辐射传递方程求解结果, 得到空间各点的辐射强度沿空间方向的分布后, 可以获得任何与辐射传递和辐射传热相关的物理量。以一维灰性系统为例, 当获得辐射强度 $I(\tau, \mu)$ 后, 可计算出投入辐射^[4]: