

动力机械及工程热物理



# 红外辐射特性 与传输的数值计算 —— 计算热辐射学

谈和平 夏新林 刘林华 阮立明 编著



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

国防科工委「十五」规划专著

0434.3

751

1-



国防科工委“十五”规划专著·动力机械及工程热物理

# 红外辐射特性与传输的数值计算 ——计算热辐射学

谈和平 夏新林 刘林华 阮立明 编著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

本书是哈尔滨工业大学航空航天热物理研究所在近 20 年的科研成果积累和教学经验总结基础上编著而成的,既阐明了红外辐射特性与传输的基础知识,也论述了其数值方法及其在工程中的应用,具有一定的深度和广度。全书共十五章,包括红外辐射的基本概念、基本定律和基本方程,表面辐射的传输计算,气体与粒子辐射特性的数值计算,红外辐射传输数值计算方法及误差分析,热辐射反问题,空间光学系统的杂散光分析与计算,目标红外特性理论建模等内容。

本书可作为能源、动力、航空、航天、光学、机械、冶金、化工等专业的研究生教材和参考书,也可供相关科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

红外辐射特性与传输的数值计算:计算热辐射学/谈平等编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.10

ISBN 7-5603-2364-2

I. 红… II. 谈… III. 红外辐射-热辐射-数值计算  
IV. 0434.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 111303 号

## 红外辐射特性与传输的数值计算——计算热辐射学

责任编辑 田 秋

书籍装帧 彩多设计

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 肇东粮食印刷厂

开 本 787mm×960mm 1/16 印张 27.25 字数 578 千字

版 次 2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷

印 数 1~3 000 册

定 价 39.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# 国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

**主 任:**张华祝

**副主任:**陈一坚 屠森林

**编 委:**王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰 刘建业  
张华祝 张近乐 张金麟 杨志宏 杨海成  
肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈一坚 陈鹏飞  
武博祎 侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平  
屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介 葛小春



# 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其它技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技



新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入二十一世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,



提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝

# 前 言

近 20 年来,红外辐射传输数值计算有很大发展,除能源、化工、材料、机械制造、建筑等传统工业外,还应用于生物、信息、航空航天、国防军事等工业与技术部门,如生物组织内部辐射传递、空间环境热分析、空间光学系统杂光分析、军用目标红外特性、红外探测、红外成像制导等。作者在热辐射特性与传递方面的研究工作,始终得到国家自然科学基金委员会的支持。自 1986 年本课题组的创始人余其铮教授首获国家自然科学基金资助以来,课题组先后获国家自然科学基金重点项目 1 项(50336010)、国家杰出青年科学基金 2 项(59725617、50425619)、国家自然科学基金面上项目及青年项目 11 项(5860062, 58976254, 5927255, 59486003, 59606006, 59706008, 59806003, 50076010, 50176011, 50276014, 50306004)。此外,本研究工作还得到国防科工委预研基金的资助,在此表示衷心的感谢。与此同时,已有大量的红外传输数值计算的研究成果发表,散见于各种学术期刊、会议文集与书籍中。本书为归纳整理这些研究成果,做了初步的尝试。

本书书名为“红外辐射特性与传输的数值计算”,其内容既可以用于光辐射传递领域,也可以用于热辐射传递领域。从热辐射角度而言,本书可命名为“计算热辐射学”。

全书共十五章:第一到第三章介绍了热辐射的基本概念、基本定律和基本方程,以及表面辐射的传递计算;第四、五章介绍了气体与粒子辐射特性的数值计算;第六到第十章介绍了 9 种辐射传递数值计算方法;第十一章介绍了辐射传递数值计算中两种特殊的误差现象——假散射和射线效应;第十二章介绍了辐射反问题计算;第十三到第十五章结合具体工程,分别介绍了梯度折射率介质中的辐射传递、空间光学系统中杂散光及军用目标红外建模的数值计算。

本书的第一至第三章、第六至第九章、第十章的 10.1~10.3 节、第





十一章、第十五章由谈和平撰写,第十三、十四章由夏新林撰写,第十二章由刘林华撰写,第五章由阮立明撰写,第四章由董士奎撰写,第十章的10.4~10.7节由易红亮撰写,全书最后由谈和平统一定稿。

本书由哈尔滨工业大学余其铮教授、哈尔滨工程大学刘顺隆教授主审,两位教授对本书的结构、内容乃至公式、符号均提出了许多宝贵的、建设性的意见。本书撰写过程中,得到哈尔滨工业大学出版社和哈尔滨工业大学航空航天热物理研究所教师和支持和同学的帮助,在此表示衷心的感谢。

本书可作为高等学校相关专业的研究生教材或教学参考书,也可供有关专业科研或工程技术人员参考。限于编著者的水平,且本书部分内容涉及热辐射特性与传递的新方向,书中难免有错误、不足、疏漏和不当之处,编著者热切希望读者和同行专家提出宝贵的批评意见与建议,以便在再版时进行修订。我们的电子信箱分别是:tanheping@hit.edu.cn, xiaxl@hit.edu.cn, lhliu@hit.edu.cn 和 ruanlm@hit.edu.cn。

谈和平 夏新林 刘林华 阮立明  
2006年2月于哈尔滨工业大学

# 目 录

第一章 绪 论	1
1.1 概 述	1
1.2 热辐射能量的表示方法	3
1.3 辐射物性与热辐射基本定律	6
1.4 计算热辐射学的特点	14
参考文献	16
第二章 热辐射传输方程和辐射能量方程	18
2.1 介质辐射特性及布格尔定律	18
2.2 介质能量的发射	23
2.3 热辐射传输方程的微分积分形式	24
2.4 热辐射传输方程的积分形式	27
2.5 辐射能量方程	28
2.6 辐射特性随波长变化的处理	30
2.7 热辐射边界条件	34
2.8 热辐射传输控制方程的分类	39
参考文献	40
第三章 表面热辐射传输计算	42
3.1 漫射、均匀表面间的辐射换热	42
3.2 漫射、非均匀表面间的辐射传热	47
3.3 辐射换热线性积分方程求解方法	49
3.4 非灰体、非漫射、物性随温度变化时的表面辐射换热	62
参考文献	66
第四章 气体辐射特性计算方法	69
4.1 气体辐射基本原理简介	70
4.2 中高温气体辐射特性计算 I——逐线计算法	74
4.3 中高温气体辐射特性计算 II——窄谱带模型	76
4.4 中高温气体辐射特性计算 III——宽谱带及其它谱带模型	80

4.5 高温非平衡(约 3 000 ~ 15 000 K)空气辐射特性	86
参考文献	99
<b>第五章 粒子辐射</b>	<b>105</b>
5.1 概 述	105
5.2 单个粒子的辐射特性	107
5.3 粒子系辐射特性	119
5.4 粒子辐射特性参数实验研究中的数值问题	126
5.5 粒子辐射研究展望	134
参考文献	135
<b>第六章 热辐射传输方程几种经典求解方法</b>	<b>139</b>
6.1 区域法	139
6.2 扩散近似法	143
6.3 热流法	147
6.4 离散传递法	150
6.5 球形谐波法	152
参考文献	154
<b>第七章 蒙特卡洛法</b>	<b>157</b>
7.1 两种方法	157
7.2 吸收、散射性介质系内辐射传递的概率模型	158
7.3 辐射传递因子与表面辐射热流密度	164
7.4 蒙特卡洛法模拟中伪随机数检验的 STRTDM	165
7.5 蒙特卡洛法的优缺点	171
参考文献	172
<b>第八章 离散坐标法</b>	<b>174</b>
8.1 直角坐标系下辐射传递方程的离散坐标法	174
8.2 圆柱坐标系下辐射传递方程的离散坐标法	180
8.3 适体坐标系下辐射传递方程的离散坐标法	185
8.4 离散坐标法研究进展	188
参考文献	190
<b>第九章 有限体积法</b>	<b>194</b>
9.1 求解规则形状介质内辐射传递方程的有限体积法	194

9.2	适体坐标系下的有限体积法 .....	204
9.3	有限体积法研究进展 .....	213
	参考文献 .....	214
<b>第十章</b>	<b>射线踪迹 - 节点分析法 .....</b>	<b>217</b>
10.1	引    言 .....	217
10.2	耦合换热能量方程、边界条件和热辐射源项的离散 .....	218
10.3	单层吸收、发射性介质的辐射传递系数 .....	224
10.4	单层吸收、发射、各向同性散射介质的辐射传递系数 .....	232
10.5	激光脉冲引起的瞬态热效应 .....	247
10.6	红外加热中介质内部温度场的数值分析 .....	258
10.7	射线踪迹 - 节点分析法研究进展 .....	262
	参考文献 .....	263
<b>第十一章</b>	<b>辐射传输方程数值计算的误差分析 .....</b>	<b>269</b>
11.1	引    言 .....	269
11.2	有关假散射及射线效应的讨论 .....	270
11.3	国内外研究现状 .....	273
11.4	物理模型与控制方程 .....	274
11.5	计算方法的检验 .....	278
11.6	FVM、DOM、DTM 和 MCM 中假散射的对比及分析 .....	283
11.7	FVM、DOM、DTM 和 MCM 中射线效应的对比及分析 .....	290
11.8	红外辐射传输方程计算方法的选择 .....	293
	参考文献 .....	295
<b>第十二章</b>	<b>热辐射反问题 .....</b>	<b>299</b>
12.1	引    言 .....	299
12.2	基本概念 .....	300
12.3	反演方法 .....	302
12.4	轴对称自由火焰内温度场和吸收系数分布的反演 .....	303
12.5	遗传算法在辐射反问题中的应用 .....	308
	参考文献 .....	311
<b>第十三章</b>	<b>梯度折射率介质内的热辐射传递 .....</b>	<b>315</b>
13.1	引    言 .....	315

13.2	梯度折射率介质内辐射传递的研究方法简介 .....	315
13.3	梯度折射率介质内辐射传递弯曲轨迹的求解 .....	316
13.4	离散弯曲光线跟踪法与曲线蒙特卡洛法 .....	319
13.5	吸收 - 发射性梯度折射率介质层内的热辐射平衡 .....	323
13.6	梯度折射率介质辐射传递的其它特性 .....	327
	参考文献 .....	328
<b>第十四章</b>	<b>空间光学系统的杂散光分析与计算 .....</b>	<b>330</b>
14.1	概 述 .....	330
14.2	空间光学系统杂散光分析的类型与特点 .....	331
14.3	杂散光分析计算的蒙特卡洛法 .....	334
14.4	复杂系统杂散光分析中的几个问题及求解技术 .....	342
14.5	杂散光分析算例 .....	346
	参考文献 .....	354
<b>第十五章</b>	<b>目标红外特性理论建模 .....</b>	<b>357</b>
15.1	研究意义 .....	357
15.2	区域分解算法和并行处理 .....	358
15.3	几何建模与区域分解 .....	359
15.4	目标表面单元与单元间的辐射传递因子 .....	368
15.5	目标表面单元与天地环境背景间的辐射传递因子 .....	371
15.6	目标表面单元的太阳入射投影面积和太阳入射传递因子 .....	372
15.7	三维瞬态温度场建模 .....	382
15.8	目标表面红外辐射特性计算 .....	395
15.9	缩小计算规模与并行计算 .....	400
	参考文献 .....	402
<b>附录</b>	<b>.....</b>	<b>407</b>
附录 A	球形粒子散射计算源程序 .....	407
附录 B	散射相函数的表达式 .....	412
附录 C	指数积分函数、计算程序及算例 .....	414
附录 D	离散坐标法的积分格式 .....	417

# 第一章 绪 论

## 1.1 概 述

辐射传热通常被用来描述由电磁波引起的热量传输的科学。在工程上经常遇到的温度范围内,热辐射的能量主要集中在 $0.1 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 波长范围内<sup>[1~3]</sup>,可分为紫外线、可见光和红外线三部分。真空中,紫外线的波长为 $0.1 \sim 0.38\ \mu\text{m}$ ,可见光的波长为 $0.38 \sim 0.76\ \mu\text{m}$ ,红外线的波长为 $0.76 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 。上述分界线,并没有严格统一的规定。紫外线与可见光的分界波长在 $0.3 \sim 0.4\ \mu\text{m}$ 内变化;可见光与红外线的分界波长在 $0.7 \sim 0.78\ \mu\text{m}$ 内变化;红外线与无线电波的分界波长在 $100 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 内变化。至于红外波段内的近、中、远红外线的分界就更不统一了。按国际照明委员会的分类, $0.76 \sim 1.4\ \mu\text{m}$ 为近红外, $1.4 \sim 3\ \mu\text{m}$ 为中红外, $3 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 为远红外<sup>[3]</sup>。也有将红外波段分为4个区域<sup>[4]</sup>:近红外( $0.76 \sim 3\ \mu\text{m}$ ),中红外( $3 \sim 6\ \mu\text{m}$ ),远红外( $6 \sim 15\ \mu\text{m}$ ),极远红外( $15 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ )。红外波段的前3个区域各包含一个大气窗口,分别为 $2 \sim 2.5\ \mu\text{m}$ , $3 \sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14\ \mu\text{m}$ 。

综上所述,紫外线、可见光和红外线都是电磁波,具有电磁波的通性,但不同条件下电磁波产生的机制不同,与物质相互作用的性质也有区别,其工程应用与研究侧重也不同。热辐射是指由于热的原因产生的电磁波。热辐射是热量传输三种方式(导热、对流、热辐射)之一,广泛用于热交换领域,属传热学研究范畴。而可见光与红外线又可作为一种信号,广泛用于遥测、通信领域,属光学研究范畴<sup>[4, 5]</sup>。在20世纪前半叶,这两种传输方式大部分时间是各自独立发展的,但这两种传输过程的物理本质、计算方法,除一些术语不同外基本一样。到20世纪后半叶,两种传输方式的发展逐渐交叉,在一些研究领域甚至统一起来。例如一本著名的国际期刊,其刊名为定量光谱学与辐射传输(J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer)。近年来,随着工业发展,尤其在国防科技中出现很多伴随着传热过程的信息传输问题,如红外目标特性、红外探测与遥感、红外成像制导等<sup>[6~10]</sup>,需要将传热过程与光学传输过程结合起来。这两种传输过程的计算原理、方法基本上是一样的,本书即以此为出发点,将两种传输过程统一起来进行阐述,所以本书定名为红外辐射特性与传输数值计算,副书名为计算热辐射学。也由于此原因,本书在以后的叙述中,“光辐射”、“红外辐射”和“热辐射”将不再加以区别。

热辐射传输涉及的研究内容包括表面辐射,粒子辐射,介质(气体、半透明固体或流体)辐射,耦合传热,辐射热物性,热辐射反问题,微尺度辐射传热<sup>[11]</sup>等。按研究方法分类,可分为理论分析法,实验研究法,数值算法。从物理本质上分类,可分为热辐射特性参数和热辐射传输



过程的研究<sup>[12]</sup>。

热辐射在介质中的传输速度为

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (1.1)$$

式中  $c_0$ ——真空中的光速,  $c_0 = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;  
 $n$ ——介质的折射率(折射系数、单折射率)。

真空的折射率  $n \equiv 1$ , 因此介质的折射率也就同时代表“相对折射率”<sup>[13]</sup>。对于大多数气体, 其折射率  $n$  非常接近于 1, 见表 1.1。

表 1.1 常见气体的折射率  $n$ <sup>[14]</sup>

常见气体	$n$
H <sub>2</sub>	1.000 138 ~ 1.000 142
空气(室温、可见光波段)	1.000 293
CO	1.000 335 ~ 1.000 340
CO <sub>2</sub>	1.000 448 ~ 1.000 454
N <sub>2</sub> O	1.000 516

热辐射光谱通常有 4 种表示方法:

- ① 频率( $\nu$ ), 单位为 Hz,  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ ;
- ② 波长( $\lambda$ ), 单位为  $\mu\text{m}$ ,  $1 \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$ ,  $1 \text{ \AA} = 10^{-10}\text{m} = 0.1 \text{ nm}$ ;
- ③ 波数( $\eta$ ), 单位为  $\text{cm}^{-1}$ ;
- ④ 角频率( $\omega$ ), 单位为  $\text{rad/s}$  或  $\text{s}^{-1}$ 。

它们之间的关系为

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{\lambda} = c\eta \quad (1.2)$$

每个光子或者波, 都携带一定量的能量  $E_{\text{光子}}$ , 从量子力学理论中可以得到

$$E_{\text{光子}} = h\nu \quad (1.3)$$

式中  $h$ ——普朗克常数,  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

式(1.3)将波和粒子的两象性联系起来, 即从能量的观点上认为: 组成不同波长的单色光的光子各不相同<sup>[13]</sup>。当光从一种介质透射到另一种介质时, 光的频率不变, 因为光子的能量必须守恒<sup>[15]</sup>; 而波长和波数则依赖于两种介质的折射率。某些场合下, 电磁波用光子携带的能量  $h\nu$  来表征, 其能量单位为电子伏特( $1\text{eV} = 1.602 2 \times 10^{-19}\text{J}$ )。因此, 携带  $a\text{eV}$  光子能量的光在真空中的波长为

$$\lambda = \frac{hc}{h\nu} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}}{a \times 1.602 2 \times 10^{-19} \text{ J}} = \frac{1.240 \times 10^{-6}}{a} \text{ m} \quad (1.4)$$



## 1.2 热辐射能量的表示方法

为了明确与某个量相关的变量,本书采用下角标和函数符号表示法。例如

$$\epsilon_{\lambda}(\lambda, \theta, \Psi, T) = \epsilon(\lambda, \theta, \Psi, T) = \epsilon_{\lambda}(\theta, \Psi, T) = \epsilon_{\lambda, \theta, \Psi, T}$$

表示  $\epsilon$  与下标或括号中标注的 4 个变量相关。当变量较少时,用下角标表示;当变量较多时,用函数符号表示。当某个变量同时用下角标和函数符号表示时,如  $\epsilon_{\lambda}(\lambda, \theta, \Psi, T)$ ,则表示强调该变量  $\lambda$  对量  $\epsilon$  的作用。

辐射能按空间方向、波长的分布,需要用不同的参量来表示。空间方向的性质常用方向角和立体角表示,有时也用向量表示。设有一半球,半径为  $R$ ,在基圆中心有一微元面  $dA$ 。微元面发射一微元束能量,微元束的中心轴表示该能束的发射方向,用  $\theta$  和  $\Psi$  表示,见图 1.1。 $\theta$  角是  $dA$  面的法线与微元束中心轴的夹角,称为天顶角,也称纬度角。 $\Psi$  角是中心轴在基圆上的投影线与  $x$  坐标轴的夹角,称为圆周角,也称经度角。微元立体角  $d\Omega$ ,用球面上被立体角切割的球形面积  $dA$ ,除以球半径的平方来表示,见图 1.2 和图 1.3,单位为球面度(sr),即

$$d\Omega = \frac{dA_s}{R^2} = \frac{R \sin \theta d\Psi \cdot R d\theta}{R^2} = \sin \theta d\theta d\Psi \quad (1.5)$$

半个空间的立体角为  $2\pi$ 。图 1.2 的方向角表示与图 1.1 的略有不同,两者仅差一无穷小量,完全可以忽略不计。

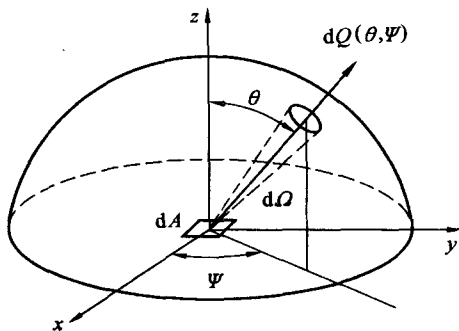


图 1.1 辐射微元束的空间几何性质

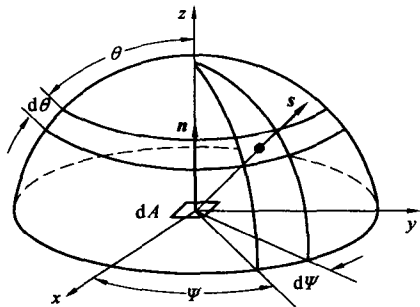


图 1.2 立体角

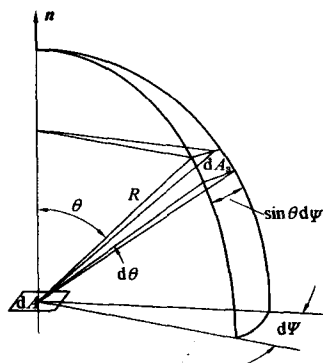


图 1.3 立体角的定义





## 一、描述热流量

辐射热流量  $Q$ , 光学上称为辐射功率或辐(射能)通量, 表示单位时间内的辐射热量(能量), 单位为  $W$ 。光谱辐射热流量  $Q_\lambda$ , 光学上称为光谱辐射功率, 表示以波长  $\lambda$  为中心的单位波长间隔内的辐射热流量, 单位为  $W/\mu m$ 。

辐射热流密度  $q$ , 表示单位面积上的辐射热流量, 单位为  $W/m^2$ 。光谱辐射热流密度  $q_\lambda$ , 单位为  $W/m^3$  或  $W/(m^2 \cdot \mu m)$ 。

在本书中, 有时为了强调辐射传热, 或当辐射传热与其它热量传输方式同时出现时以示区别, 加上角标  $r$ , 分别用  $Q^r$  和  $q^r$  表示辐射热流量和辐射热流密度。

## 二、描述物体向半个空间的辐射能量

### (1) 半球总辐射力 $E(T)$

半球总辐射力光学上称为辐射出射度, 简称辐出度。表示单位时间内, 单位面积上, 向半球空间发射的所有波长( $\lambda = 0 \sim \infty$ ) 的总能量, 简称辐射力, 单位为  $W/m^2$ 。

### (2) 半球光谱辐射力 $E_\lambda(\lambda, T)$

半球光谱辐射力光学上称为光谱辐出度。表示单位时间内, 单位面积上, 向半球空间发射的以  $\lambda$  为中心的单位波长间隔内的能量, 简称光谱辐射力或单色辐射力, 单位为  $W/(m^2 \cdot \mu m)$  或  $W/m^3$ 。也可定义为, 微元波长范围内的辐射力除以该波长范围, 即

$$E_\lambda(\lambda, T) = \frac{\partial E(T)}{\partial \lambda} \quad (1.6)$$

显然, 辐射力与光谱辐射力的关系为

$$E(T) = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda, T) d\lambda \quad (1.7)$$

## 三、描述物体向某个方向的辐射能量

### (1) 定向辐射力 $E(\theta, \Psi, T)$

单位时间内, 单位面积上, 向  $\theta, \Psi$  方向的单位立体角内发射的所有波长( $\lambda = 0 \sim \infty$ ) 的总能量, 单位为  $W/(m^2 \cdot sr)$ 。显然

$$E(T) = \int_{2\pi} E(\theta, \Psi, T) d\Omega \quad (1.8)$$

### (2) 光谱定向辐射力(单色定向辐射力) $E_\lambda(\lambda, \theta, \Psi, T)$

微元波长范围内的定向辐射力除以该波长范围, 单位为  $W/(m^3 \cdot sr)$  或  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ , 即

$$E_\lambda(\lambda, \theta, \Psi, T) = \frac{\partial E(\theta, \Psi, T)}{\partial \lambda} \quad (1.9)$$