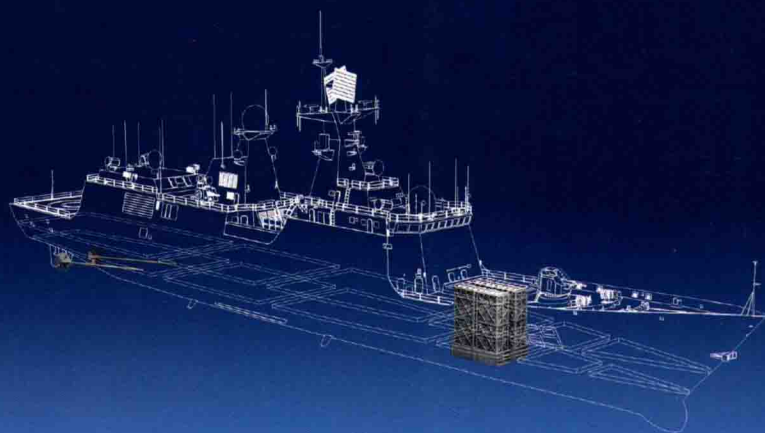


舰船热物理技术及应用

杨立 寇蔚 杜永成 范春利 编著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

舰船热物理技术及应用

杨 立 寇 蔚 杜永成 范春利 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书在介绍热辐射的基本知识和导热数值计算的基础上,重点论述了舰艇及其尾流的温度场和红外特征、舰艇温度场控制与红外隐身技术、红外辐射测温及其在舰艇机电设备故障监测诊断上的应用和定向能武器的传热问题。全书共9章,包括热辐射基本理论、有限体积法、舰艇温度场与红外特征分析、舰艇红外隐身技术、舰艇尾流温度场与红外成像特征、潜艇水下排气控制与红外隐身、机电设备温度场与红外监测诊断以及定向能武器及其传热问题。

本书可作为能源、动力、光学、机械、船舶和交通运输等专业的高年级本科生和研究生的教材或参考书,也可供相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

舰船热物理技术及应用/杨立等编著. —北京:国防工业出版社,2017. 11
ISBN 978-7-118-11426-3

I. ①舰… II. ①杨… III. ①军用船—工程热物理学
IV. ①U674. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 225820 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
国防工业出版社印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 19 字数 332 千字
2017 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777 发行邮购:(010)88540776
发行传真:(010)88540755 发行业务:(010)88540717

前 言

随着舰船技术的迅速发展和舰艇装备的日益复杂,舰船热物理问题就显得格外突出,研究舰船及其机电设备的热特征和控制技术对保证舰船的隐蔽性、安全性都具有重要的意义。目前,以红外热像仪为主要探测手段的舰艇及其尾流的红外辐射特征与隐身技术、机电设备状态红外监测、故障红外诊断技术受到人们的极大关注,许多相关技术已在舰艇及其装备上得到应用。作者在红外辐射测温、舰艇红外特征与隐身和机电设备状态红外监测与故障诊断等专题方面的研究得到了有关部门的大力资助。与此同时,已有大量的相关研究成果发表,散见于各种学术期刊、会议文集与书籍中,本书归纳整理了这些研究成果。

全书共分9章:第1章绪论;第2章介绍了热辐射的基本知识、基本定律;第3章介绍了导热计算的有限体积方法,着重介绍了一维稳态导热和一维瞬态导热的计算;第4章介绍了舰艇温度场及其红外辐射特征,着重介绍了目标动态温度场的建模计算方法,研究了舰艇红外特征;第5章介绍了舰艇红外隐身的发展现状和舰艇红外隐身的控制技术,着重介绍了舰艇红外隐身的评估方法、排气红外抑制器、液膜降温技术、水雾红外隐身技术等;第6章介绍了舰艇尾流温度场及其成因,分析了尾流红外辐射的主要特征和热尾流测量与实验方法;第7章介绍了潜艇红外隐身的发展现状和排气温度控制技术;第8章介绍了舰艇机电设备的红外监测与故障诊断技术,着重介绍了接线端子、电缆和接触器等设备故障的红外监测诊断方法;第9章介绍了定向能武器及其传热问题,主要介绍了激光武器、粒子束武器、高能微波武器、太阳能武器、声能武器和主动拒止系统中的热物理问题。

本书第1章、第6章和第7章由杨立撰写,第2章由杨立、杜永成撰写;第4章、第8章由寇蔚编写;第3章、第5章由杜永成撰写;第9章由范春利编写;全书最后由杨立统稿和修改。本书在编写过程中得到海军工程大学动力工程及工程热物理专业研究生袁江涛、张士成、陈翔、彭友顺、王小川等的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书可作为能源、动力、光学、机械、船舶和交通运输等专业的高年级本科生与研究生的教材及参考书,也可供相关科技人员参考。限于编著者水平有限,且本书的许多内容都是新的研究结果,书中难免有错误和不当之处,恳请读者提出宝贵的批评意见和建议。

编著者

2016年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 热物理及其在海军装备中的应用	1
1.2 热物理发展简史	1
1.3 舰船热物理应用的主要内容及研究方法	2
参考文献	3
第 2 章 热辐射基本理论	4
2.1 概述	4
2.2 辐射学的一些基本概念	5
2.3 黑体热辐射的基本定律	7
2.3.1 辐射的光谱分布规律—普朗克辐射定律	8
2.3.2 辐射光谱的移动规律—维恩位移定律	9
2.3.3 辐射功率随温度的变化规律—斯蒂芬-玻耳兹曼定律	9
2.3.4 黑体辐射能按波段的分布	9
2.4 实际物体的热辐射规律	10
2.4.1 漫射体和灰体	11
2.4.2 基尔霍夫定律	12
2.4.3 辐射度量中的基本规律	13
2.4.4 发射率及其变化规律	13
2.4.5 吸收率及其变化规律	16
2.5 红外辐射的大气传输	17
2.5.1 大气吸收	18
2.5.2 大气散射	19
2.5.3 大气辐射传输的计算	23
思考题	30
参考文献	30
第 3 章 有限体积法	32
3.1 有限体积法的基本思想和特点	32
3.1.1 基本思想	32
3.1.2 有限体积法的特点	34

3.2 一维导热问题的有限体积法	34
3.2.1 一维稳态导热问题的一般离散格式	35
3.2.2 一维稳态导热问题的边界离散格式	44
3.3 一维非稳态导热问题的有限体积法	44
3.3.1 一般离散格式	44
3.3.2 显式计算格式	46
3.3.3 Crank-Nicolson 格式	47
3.3.4 全隐格式	47
思考题	52
参考文献	52
第4章 舰艇温度场与红外特征分析	53
4.1 舰艇红外特征概述	54
4.1.1 红外特征研究进展	54
4.1.2 舰艇红外辐射的来源	55
4.1.3 舰艇红外辐射的估算	56
4.2 舰艇温度场建模	58
4.3 舰艇温度场的分析与计算	60
4.3.1 状态空间法	60
4.3.2 算例分析	61
4.3.3 舰艇表面温度场分布	63
4.4 舰船目标红外辐射场计算	67
4.5 小结	71
思考题	72
参考文献	72
第5章 舰艇红外隐身技术	75
5.1 概述	75
5.1.1 红外隐身涂料技术	77
5.1.2 降温红外隐身技术	77
5.1.3 遮蔽红外隐身技术	79
5.2 红外探测器的作用距离模型	81
5.2.1 扩展源目标的作用距离估算模型	81
5.2.2 点源目标的作用距离估算模型	84
5.3 液膜流动红外隐身	87
5.3.1 液膜流动特性	88
5.3.2 恒热流条件下液膜温度场特性	89

5.3.3 红外抑制效果分析	92
5.4 细水雾红外隐身技术	94
5.4.1 细水雾红外隐身影响因素分析	94
5.4.2 实验分析	96
思考题	105
参考文献	105
第6章 舰船尾流温度场与红外成像特征	108
6.1 概述	108
6.2 舰船热尾流的数学模型	111
6.2.1 基本控制方程	111
6.2.2 湍流封闭模型	112
6.3 舰船热尾流的温度分布	114
6.3.1 海洋温度分层特征	116
6.3.2 舰艇热尾流特征	116
6.3.3 潜艇热尾流特征	120
6.4 舰船热尾流的海上测试技术	123
6.4.1 热尾流海上实验设备	123
6.4.2 实验结果与分析	124
6.5 舰船尾流的红外特征	128
6.5.1 舰船尾流的红外辐射模型	128
6.5.2 舰船湍流尾迹红外特征	129
6.5.3 舰船尾迹波红外特征	133
6.6 舰船尾流红外成像探测实验方法	139
6.6.1 实验设备	139
6.6.2 水槽中温度分层的实现	142
6.6.3 热尾流实验	145
6.6.4 尾流红外成像结果与讨论	146
6.7 小结	147
思考题	148
参考文献	149
第7章 潜艇水下排气控制与红外隐身	151
7.1 概述	151
7.2 国内外的研究概况	152
7.2.1 国外排气系统降温冷却措施	152
7.2.2 国内排气系统冷却技术研究	153

7.2.3 一维分析方法的应用	154
7.3 潜艇排气系统概述	155
7.3.1 常规动力潜艇的排气系统	155
7.3.2 排气管路传热学分析	157
7.3.3 排气管路阻力计算	160
7.4 发动机高温排气喷雾降温实验	161
7.4.1 喷雾降温实验台架	161
7.4.2 烟气温度测量装置	164
7.4.3 压力损失测量装置	170
7.4.4 测量结果及其分析	171
7.5 小结	179
思考题	180
参考文献	180
第8章 机电设备温度场与红外监测诊断	182
8.1 概述	182
8.2 红外辐射参数测量	182
8.2.1 温度	182
8.2.2 发射率	190
8.2.3 反射温度	196
8.3 设备故障红外诊断方法	199
8.3.1 定性与定量分析	199
8.3.2 红外监测诊断方法	201
8.4 设备热故障产生机理	204
8.4.1 电气设备过热故障发热机理	204
8.4.2 动力装置的失效机理	205
8.4.3 机械设备失效机理和模式	207
8.4.4 设备故障严重程度与评估	210
思考题	212
参考文献	212
第9章 定向能武器及其传热问题	214
9.1 激光武器	215
9.1.1 激光武器概述	215
9.1.2 舰载激光武器	216
9.1.3 激光武器的热效应	219
9.2 高能微波武器	221

9.3 粒子束武器	222
9.4 声能武器	225
9.5 太阳能武器	226
9.6 主动拒止系统	227
9.6.1 生物组织传热的基本模型	228
9.6.2 毫米波辐照分析	229
9.7 本章小结	242
参考文献	242
附录 1 Mie 散射计算程序	245
附录 2 例 3.1 无内热源一维稳态导热问题	250
附录 3 例 3.2 有内热源一维稳态导热问题	252
附录 4 例 3.3 一维非稳态导热问题(显示格式)	254
附录 5 例 3.4 一维非稳态导热问题(全隐格式)	257
附录 6 常用材料发射率表	260

第 1 章 绪 论

1.1 热物理及其在海军装备中的应用

热物理是研究物质的热现象,即研究热的运动变化规律及其与物质性质之间关系的学科。简单来说,凡是与温度有关的现象都属于它的研究范畴。舰船热物理是研究舰船在航行中由于热能的产生、传递和转换引起的舰船及其设备的热效应及其温度变化规律,以及与其他物理现象并存和交织在一起的,如热辐射、热应力、热电、光热、光声等变化规律。热力学第二定律指出,热总是自发、不可逆地从高温处传向低温处,即有温差存在就有热量的传递。由于温差广泛存在于自然界和日常生活中,因此热量传递是一种普遍的自然现象。

在海军舰船及其装备中存在大量热物理问题,如舰船壳体表面温度变化、烟囱排气等引起的舰艇红外辐射变化,设备运行时由于能量的耗散引起的设备温度变化与设备故障之间的关系,舰船航行时引起的尾流温度场的变化,定向能武器中的热物理问题等。

掌握舰船热物理的基本原理和分析方法,必将为舰船红外特征、红外隐身、设备红外监测诊断、舰船热管理和定向能武器的高效使用等领域的深入研究打下坚实的基础。

1.2 热物理发展简史

热现象是人类最早广泛接触到的自然现象之一,人类的生产实践和探索未知事物的欲望是科学技术发展的动力。对热的本质的探索可一直追溯到古代,如公元前 8 世纪我国商周时期的“五行”说和公元前 6 世纪西方古希腊时期的“本源”说、近代的热质说与热动说等。但是直到 18 世纪初,在欧洲,由于煤矿开采、航海、纺织等产业部门的发展,产生了对热机的巨大需求,才促使热学的发展得到积极的推动。1763 年至 1784 年,英国人瓦特(James Watt, 1736—1819)对当时用来带动煤矿水泵的原始蒸汽机作了重大改进,且研制成功了应用高于大气压的蒸汽和配有独立凝汽器的单缸蒸汽机。蒸汽机的发展与应用,刺激、推动了热学方面的理论研究,促成了热力学的建立与发展。1800 年,英国天文学家赫谢耳(Sir William

Herschel)在寻找新的光学介质时意外发现了红外线。到1830年,经大批研究人员的反复实验证明,在红光外侧,确实存在一种人眼看不见的“热线”,并存在一个热效应最大的波段,法国物理学家白克兰把这种辐射称为“红外辐射”。19世纪初,兰贝特(J. H. Lambert)、毕渥(J. B. Biot)和傅里叶(J. B. J. Fourier)等从固体的一维导热实验探索热量的传递规律。1822年,傅里叶正确概括了导热实验结果,提出了傅里叶导热定律,奠定了导热理论的基础。1842年,迈耶(Julius Robert Mayer, 1814—1878)提出了能量守恒原理,认为热是能量的一种形式,可以与机械能相互转换。1850年,焦耳(James Prescott Joule, 1818—1889)在他关于热功当量实验的总结论文中,以各种精确的实验结果使能量守恒与转换定律,即热力学第一定律得到了充分的证实。能量守恒与转换定律是19世纪物理学的最重要发现。傅里叶从他建立的导热定律和能量守恒定律推出的导热微分方程是导热问题正确的数学描述,成为求解导热温度场的出发点。1851年,汤姆逊把能量这一概念引入热力学。1850年至1851年,克劳修斯(Rudolf Clausius, 1822—1888)和汤姆逊(William Thomson, 即开尔文 Lord Kelvin, 1824—1907)先后独立地从热量传递和热转变成功的角度提出了热力学第二定律,指明了热过程的方向性。

热辐射的研究开始于人们对黑体辐射的实验测量。1860年,基尔霍夫首先提出了黑体的概念,所谓黑体,简单来讲,就是在任何情况下对一切波长的入射辐射都全部吸收的物体,即黑体的吸收率等于1。1889年,卢默(O. Lummer)等人测得了黑体辐射的光谱能量分布实验数据。1879年,斯忒藩(J. Stefan)根据前人的实验结果提出了黑体辐射力正比于它的热力学温度的四次方规律,1884年,玻耳兹曼(L. Boltzmann)对斯忒藩定律作了严格的论证,并指出这一定律仅适用于黑体。后来,人们将该定律称为斯忒藩-玻耳兹曼定律。1893年,德国物理学家韦尔海姆·维恩(W. Wien)确定了黑体光谱辐射出射度极大值相对应的波长与其热力学温度成反比,该关系式称为维恩位移定律。1900年,德国科学家普朗克(M. Planck)根据量子理论提出了黑体辐射光谱能量分布公式,称为普朗克公式。普朗克定律正确揭示了黑体辐射能量光谱分布的规律,奠定了热辐射理论的基础。

1.3 舰船热物理应用的主要内容及研究方法

热物理学的研究范围很广,从最尖端的基础研究、最重要的应用研究到人们的日常生活几乎都有热物理问题。本书重点介绍热物理学的一些基本理论及其在海军装备中的若干重要应用,主要内容包括红外辐射的基本理论、热传导的数值计算方法、舰船温度场建模方法与红外特征分析、舰船红外抑制与隐身的原理与方法、舰艇尾流温度场特征与控制技术、设备温度场红外辐射测量与设备故障诊断、定向能武器中的热物理问题研究等。

热传递的研究方法既可用理论分析,也可用实验研究,两者是相辅相成的。理论的基础是实践,并不断在实践中发展。所以,科学技术的进步和生产实践经验对于加强理论分析,进而更好地解决生产中有关热传递的问题,具有十分重要的意义。

在热物理的研究中,也需引入一些对现象进行科学简化的假设。这些假设一般分为两类。一类属于普遍性的假设,例如,在本书所讨论的范围内均假设所研究的物体为连续体,即物体内各点的温度等参数为时间和空间坐标的连续函数。若不考虑物质的微观结构,只要所研究的物体的尺寸与分子间相互作用的有效距离相比足够大,这一假设总是成立的。又如,假定所研究的物体是各向同性的,也即在同样的温度、压力下,物体内各点的物性与方向无关。另一类假设是针对某一类特定问题引入的,例如,反映物体导热能力的导热系数总是随温度而变的,但为了简化计算而不致出现明显的误差,而取为定值或适当的平均值。为了能在实际计算中作出恰当的简化和假设,必须对各种物理现象作详细的观察和分析,这就要求我们具有丰富的理论知识和实践经验。在处理工程热物理问题时,还必须熟悉和掌握传热机理,有关定律、测试技术和分析计算方法等。

通过本课程的学习,应使学生获得比较宽广和坚实的热量传递规律的基础知识,具备分析工程热物理问题的基本能力,掌握计算工程热物理问题的基本方法,并具有相应的计算能力及一定的实验技能,这就是学习本课程的目的和要求。

学好舰船热物理理论首先要掌握学科的主要线索——研究热传递的规律、方法及其测试技术。其次是在深刻理解基本概念的基础上运用抽象简化的方法抽出各种具体问题的本质,应用热物理的基本定理和基本方法进行分析研究。再以后是必须重视实际问题的分析和计算、实验研究方法等环节,通过对实际问题的分析和计算等环节训练可以培养抽象、分析问题的能力,加深对基本概念的理解。最后是随着近代计算机技术的发展,计算机越来越多地介入热物理学的研究中,成为一种强有力的分析和计算工具,掌握现代数值计算方法对解决实际问题有重要的促进作用。

参 考 文 献

- [1] 胡汉平,程文龙. 热物理学概论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2006.
- [2] 克利克苏诺夫. 红外技术原理手册[M]. 北京:国防工业出版社,1986.
- [3] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

第 2 章 热辐射基本理论

2.1 概 述

由于热的原因,物质的分子和原子等微观粒子受激发将连续不断地发射电磁辐射,这种辐射的本质就是热辐射,其大小主要由这个物体的温度和材料本身的性质决定。特别是,热辐射的强度及光谱成分取决于辐射物体的温度,也就是说,温度对热辐射现象起着决定性的作用。具有一定温度的任何物体都会向周围空间辐射电磁波,虽然辐射的形式各种各样(γ 射线、X射线、紫外线、可见光、红外线、无线电波),但它们都由带电粒子的能态变化而产生,传播过程都遵守麦克斯韦波动方程,以光速传播,并遵守光线传播的所有规律,如反射、折射和衍射定律,其强度与距离的平方成反比,它们的区别在于波长和发射源不同,都称为电磁辐射。所以热辐射在宏观上是连续的电磁波传递能量的过程,而在微观上则是不连续的光子传递能量的过程。物体间热量的相互辐射和相互吸收称为辐射换热。辐射换热不需要物体互相接触,也不需要介质,且在真空中传递最有效,如太阳辐射。换热过程伴随能量形式的转换,其中,物体向外辐射时,其内能转换为辐射能;物体吸收辐射能时,其吸收的辐射能转换为内能。

物体辐射投射到某介质表面上时,一部分将被介质吸收,一部分被表面反射,如果介质是部分透明的,还有一部分将从介质中透射过去。我们将被介质吸收、被表面反射和从介质中透射过去的辐射能量与投射能量的比值称为吸收率 α 、反射率 ρ 和透射率 τ 。

通常把电磁辐射按波长或频率的不同划分为许多波段,总称为电磁波谱,如图 2-1 所示。辐射的电磁波波长理论上从 0 到无穷大,红外辐射位于电磁波谱中可见光和微波之间,波长范围为 $0.76 \sim 1000\mu\text{m}$ 。工程上把 $0.1 \sim 100\mu\text{m}$ 波段的辐射称为热射线,其中大部分位于红外区($0.76 \sim 20\mu\text{m}$),可见光所占份额不大。

通常把红外波段分为四部分:近红外($0.76 \sim 3\mu\text{m}$)、中红外($3 \sim 6\mu\text{m}$)、远红外($6 \sim 15\mu\text{m}$)和极远红外($15 \sim 1000\mu\text{m}$)。红外波段的前三部分各包含一个大气窗口,分别为 $2 \sim 2.5\mu\text{m}$ 、 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 、 $8 \sim 12\mu\text{m}$,在大气窗口内,大气对红外线的吸收较少,因此大多数红外系统都选用这些波段^[1]。

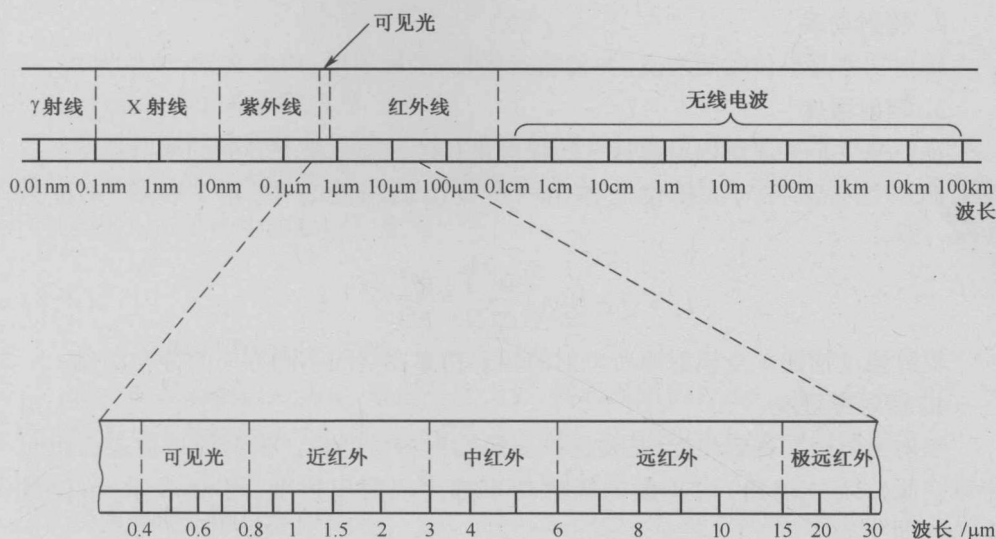


图 2-1 电磁波的频谱

2.2 辐射学的一些基本概念

本节着重介绍辐射学的一些基本概念^[1,2],这些概念将在以后的章节中见到。

1. 立体角

在三维空间中通常用微元立体角来表示某一方向的空间所占的大小,定义为

$$d\Omega = \frac{dA_e}{r^2} \quad (2-1)$$

式中: dA_e 为球面上的微元面积; r 为球的半径。立体角的单位为球面度,用 sr 表示。半球面对球心所张的立体角为 2π (sr)。

对于图 2-2,由几何关系有

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \frac{r d\theta r \sin\theta d\varphi}{r^2} = \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2-2)$$

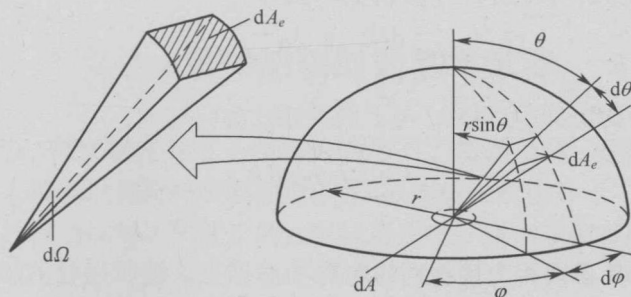


图 2-2 微元立体角与半球空间几何参数的关系

2. 辐射功率

辐射功率是单位时间内发射(传输或接收)的辐射能,用 P 表示,单位为 W 。

3. 辐射强度

辐射强度是描述点辐射源特性的辐射量。辐射源在某一方向的辐射强度是指辐射源在包含该方向的单位立体角内所发出的辐射功率,用 I 表示,单位为 W/sr ,即

$$I = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta\Omega} \right) = \frac{\partial P}{\partial\Omega} \quad (2-3)$$

辐射强度描述了点辐射源所发射的辐射功率在空间不同方向的分布特性。

4. 辐射出射度

辐射出射度简称辐出度,是描述扩展源辐射特性的量。辐射源单位表面积向半球空间(2π 立体角)内发射的辐射功率称为辐射出射度,用 M 表示,单位是 W/m^2 ,即

$$M = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta A} \right) = \frac{\partial P}{\partial A} \quad (2-4)$$

辐射出射度描述了扩展源所发射的辐射功率在源表面位置的分布特性。辐射表面的总辐射功率就是辐射出射度 M 对源发射表面积 A 的积分,即

$$P = \int_A M dA \quad (2-5)$$

5. 辐射亮度

辐射亮度简称辐亮度,是描述扩展源辐射特性的量。为了描述扩展源所发射的辐射功率在源表面不同位置上沿空间不同方向的分布特性,特别引入辐射亮度的概念。其描述如下:辐射源在某一方向上的辐射亮度是指在该方向上的单位投影面积向单位立体角中发射的辐射功率,用 L 表示,单位是 $W/(m^2 \cdot sr)$,即

$$L = \lim_{\substack{\Delta A \rightarrow 0 \\ \Delta\Omega \rightarrow 0}} \left(\frac{\Delta^2 P}{\Delta A_\theta \Delta\Omega} \right) = \frac{\partial^2 P}{\partial A_\theta \partial\Omega} = \frac{\partial^2 P}{\partial A \partial\Omega \cos\theta} \quad (2-6)$$

根据 M 的定义,可得到 L 与 M 的关系式为

$$M = \frac{dP}{dA} = \int_{2\pi} L \cos\theta d\Omega \quad (2-7)$$

由辐射强度的定义,可得到 I 与 L 的关系式为

$$I = \int_A L \cos\theta dA \quad (2-8)$$

6. 辐射照度

被照表面的单位面积上接收到的辐射功率称为该被照射处的辐射照度,辐射照度简称为辐照度,用 E 表示,单位是 W/m^2 ,即

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta A} \right) = \frac{\partial P}{\partial A} \quad (2-9)$$

1) 点源产生的辐射照度

设点源的辐射强度为 I , 它与被照面上 x 点处面积元 dA 的距离为 l , dA 的法线与 l 的夹角为 θ , 则投射到 dA 上的辐射功率为 $dP = I d\Omega = I dA \cos\theta / l^2$, 所以点源在被照面上 x 处产生的辐射照度为

$$E = \frac{dP}{dA} = \frac{I \cos\theta}{l^2} \quad (2-10)$$

2) 小面源产生的辐射照度

设小面源的面积为 ΔA_s , 辐射亮度为 L , 被照面面积为 ΔA , ΔA_s 与 ΔA 相距为 l , ΔA_s 与 ΔA 的法线与 l 的夹角分别为 θ_s 和 θ 。小面源 ΔA_s 的辐射强度为

$$I = L \cos\theta_s \Delta A_s \quad (2-11)$$

小面源产生的辐射照度为

$$E = \frac{I \cos\theta}{l^2} = L \Delta A_s \frac{\cos\theta_s \cos\theta}{l^2} \quad (2-12)$$

以上论述的几个基本辐射量, 都只考虑了辐射功率的空间分布特性, 并认为这些辐射量包含了波长从 0 到 ∞ 的全部辐射, 因此也称为全辐射量。实际上, 任何辐射都有一定的光谱分布特性, 以上各基本辐射量均有相应的光谱辐射量, 如光谱辐射功率 P_λ 、光谱辐射强度 I_λ 、光谱辐出度 M_λ 、光谱辐亮度 L_λ 、光谱辐照度 E_λ 。

7. 辐射对比度

当用红外热像仪测量表面温度与背景温度很接近的目标时, 分辨目标与背景十分困难。为了描述目标与背景辐射的差别, 引入辐射对比度的概念。

辐射对比度定义为目标与背景辐射出射度之差与背景辐射出射度之比, 即

$$C = \frac{M_T - M_B}{M_B} \quad (2-13)$$

式中: M_T 为目标在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波长间隔的辐射出射度; M_B 为背景在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波长间隔的辐射出射度。

2.3 黑体热辐射的基本定律

1860 年, 基尔霍夫首先提出了黑体的概念^[3]。所谓黑体, 就是在任何情况下对一切波长的入射辐射都全部吸收的物体, 即黑体的吸收率等于 1。然而, 自然界中实际存在的任何物体对不同波长的入射辐射都有一定的反射或透射 (即吸收率不等于 1)。所以, 黑体只是人们抽象出来的一种理想化物体模型。尽管如此, 黑体热辐射的基本规律却是红外科学领域中许多理论研究和应用的基础, 它揭

示了黑体发射的红外辐射随温度及波长变化的定量关系^[3]。可以说,黑体是用以确定波谱中能量分布的标准物体。

2.3.1 辐射的光谱分布规律—普朗克辐射定律

1900年,德国科学家普朗克根据量子理论提出,对一个热力学温度为 T 的黑体,单位表面积在波长 λ 附近单位波长间隔内向整个半球空间发射的辐射功率 $M_{\lambda b}(T)$ (即光谱辐射出射度),与波长 λ 、温度 T 满足下列关系,即

$$M_{\lambda b}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} = C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (2-14)$$

式中: c 为真空中的光速, $c = 10^8 \text{ m/s}$; h 为普朗克常数, $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; k 为玻耳兹曼常数, $k = 1.38054 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; C_1 为第一辐射常数, $C_1 = 2\pi hc^2 = 3.7415 \times 10^8 (\text{W/m}^2) \cdot \mu\text{m}^4$; C_2 为第二辐射常数, $C_2 = hc/k = 1.43879 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

式(2-14)就是黑体辐射的普朗克定律,它给出了黑体在温度 T 时的辐射光谱分布特征。如果以不同的温度值代入式(2-14),则可计算出黑体在不同温度下发射辐射的光谱分布曲线,如图2-3所示。从图中曲线可看出黑体辐射具有以下几个特征。

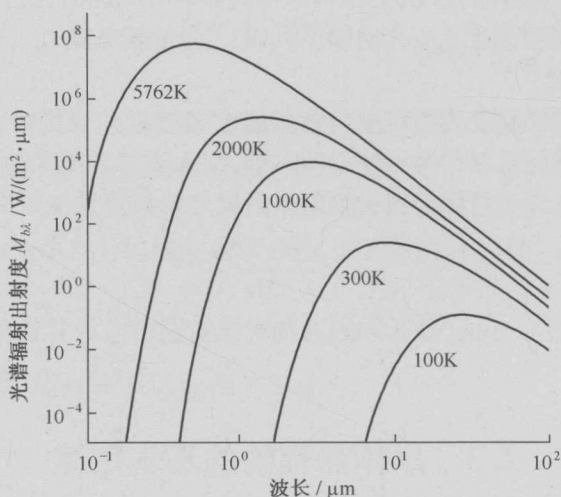


图 2-3 不同温度下黑体光谱辐射出射度

(1) 在任何温度下,黑体的光谱辐射出射度 $M_{\lambda b}(T)$ 都随波长连续变化,每条曲线只有一个极大值。

(2) 随着温度的升高,与光谱辐射出射度 $M_{\lambda b}(T)$ 极大值对应的波长减小,这表明,随着温度升高,黑体辐射中的短波长辐射所占比例增加。