

[苏]Л. 3. 克利克苏诺夫 著

红外技术原理 手册

俞福堂 孙星南 程促华 梁士元 赵金纯 译

国防工业出版社

红外技术原理手册

〔苏〕 Л. 3. 克利克苏诺夫 著

俞福堂 孙星南 程促华 梁士元 赵金纯 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书详细阐述红外辐射的各种定律、红外辐射源、红外辐射与物质的相互作用、红外辐射的聚焦、扫描、探测、调制和光学系统的滤波，并附有红外技术诸要素计算所必需的大量图表。

本书可供从事红外技术工作的工程技术和科学研究人员以及高校师生参考。

СПРАВОЧНИК ПО ОСНОВАМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕХНИКИ

Л. З. Криксунов

Издательство «Советское радио», 1978

*

红外技术原理手册

〔苏〕 Л. З. 克利克苏诺夫 著

俞福堂 孙星南 程促华 梁士元 赵金纯 译

责任编辑 刘树兰

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 $15\frac{1}{4}$ 404千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷 印数：40,001—2,860册

统一书号：15034·3039 定价：3.40元

译者序

红外辐射是波长范围介于可见光和无线电波之间的一种肉眼不可见的电磁波，它发现于 1800 年。近两个世纪来，人们经过长期的探索、实验和研究，逐步掌握了有关红外辐射的产生、传输、探测及其与物质相互作用的基本规律，并且由此而发展了一门新兴的应用技术——红外技术。

早在第二次世界大战时，由于灵敏可靠的红外探测器的问世和战争的需要，红外技术开始应用于军事上。近三十年来，红外技术已广泛地渗透到工农业生产、交通运输和科学研究的许多领域，并且相继派生了一系列与之相关的分支学科，如红外光谱学、红外天文学等。激光的出现在一定程度上加速了红外技术的发展，开拓了红外外差接收法、红外-可见光转换等新技术；同样，红外技术的不断发展，在颇大程度上也推动了激光技术的研究和应用。今天，红外技术已成为遥感技术和空间科学中不可缺少的手段，在红外系统中引入近代电子计算技术不仅可加速信息处理和传输过程，而且可使系统增加更多的功能。

我国红外技术的发展起步较晚，开始于五十年代，经过六十年代的发展，于七十年代在军民方面逐步推广应用。近年来，作为红外技术基础的红外探测器的研制发展很快。红外测温、红外分析、红外成像、红外遥感、红外加热等技术应用范围日益扩展，不少项目（如火车轴温探测、水泥窑转胴控温、红外加热等）由于经济效益显著而深受欢迎，已被列为重点推广应用的新技术项目。

随着我国国民经济建设的发展，红外技术研究和应用的队伍正在日益壮大，为了满足这方面的科技人员对有关文献和资料的需要，我们选译了本书。

本书以手册的形式详尽地介绍红外技术的基础知识。书中的公式、图表和曲线较全，选例较新，每章都附有相当数量的参考文献。

本书由俞福堂、孙星南、程促华、梁士元和赵金纯翻译。全书最后由孙星南、程促华和俞福堂校对和整理。由于译校者的水平有限，错误和缺点在所难免，欢迎广大读者批评指正。

前 言

近四分之一世纪以来,由于人们在掌握电磁谱红外波段方面所取得的成就,使研制出各种供科学、工业和军事应用的仪器设备成为可能。大批专业人员改行从事这类仪器的研制和运用,他们在实际工作中要求参阅红外技术专业的新文献。在研究红外辐射的产生、传播和探测工作中尤其需要参考手册性读物。

本书系红外技术的原理手册,书中阐述了红外辐射的定律,辐射源的特性,辐射与各种介质的相互作用,辐射的聚焦、扫描、探测和调制,以及光信号滤波。

全书各章扼要地介绍必要的理论材料,援引了计算公式及图表,其中主要的计算方法通过计算示例加以说明。本书侧重于实用性,故对于纯物理学性质的问题以及公式的理论推导仅作简短的描述,限于解释计算关系的过程和求取。

每章结尾列有参考文献,它包括各种图书及各国科技期刊上发表的最有用的资料。

读者在使用本手册时务请注意,作者在许多情况下不得不采用相同的符号来说明不同的物理量,但均加了附注,以免误解和搞错。

编著红外技术原理手册存在着一定的困难,因为这门学科发展很快,而出版这类读物的经验又不足。因此,一切旨在改进本书的意见和愿望,都将认真研究,并在本书再版时加以考虑。

科学技术副博士卡里凯也夫(А. Е. Каликеев),瓦西里庆柯(Н. В. Васильченко)和诺维柯夫(И. В. Новиков)曾在评审本书书稿时提出了宝贵的意见和建议,贝索诺夫(А. И. Бессонов),克利克苏诺娃(Е. М. Криксунова),娜林斯卡娅(А. З. Наринская)和尼基金(Д. А. Никитин)为书稿付印的准备也提供了帮助,为此作者表示衷心的感谢。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 史话	1
1.2 红外辐射波谱和光学性质	18
1.3 术语和符号	20
第二章 热体的红外辐射	33
2.1 总光谱辐射出射度	33
2.2 光谱辐射出射度最大值在光谱中的位置	56
2.3 给定光谱范围内的辐射出射度	58
2.4 能量光强的空间分布	99
第三章 红外辐射源	107
3.1 分类	107
3.2 标准辐射源	107
3.3 工程用辐射源	120
3.4 激光器	126
3.5 自然辐射源	142
3.6 运载工具和工业目标的辐射	158
第四章 红外辐射与各种物质的相互作用	173
4.1 基本原理	173
4.2 辐射的反射和折射	175
4.3 辐射的吸收和散射	187
4.4 辐射的透射	190
4.5 辐射在晶体中的传输	201
4.6 红外辐射在大气中的传输	204
第五章 辐射的聚焦与扫描	229
5.1 聚焦系统	229
5.2 光学机械扫描装置	246
5.3 激光束控制装置	260
第六章 红外辐射的探测和转换	274

6.1	辐射探测器的用途、分类和主要参数	274
6.2	热辐射探测器	282
6.3	光子辐射探测器	293
6.4	激光调制辐射探测器	324
6.5	电子光学象转换器	336
6.6	电视摄像管	352
6.7	专用的像转换器	361
第七章 光辐射的调制		372
7.1	调制的用途与种类	372
7.2	振幅调制	375
7.3	相位调制	403
7.4	频率调制	410
7.5	脉宽调制	414
第八章 光信号滤波		420
8.1	红外系统滤波器的用途和分类	420
8.2	空间滤波理论的数学工具	421
8.3	辐射目标和背景的空间频谱	438
8.4	多维滤波器的光信号转换	446
8.5	调制盘的空间-频率传递函数、空间滤波	455
8.6	光谱滤波	465
8.7	电子滤波	467

第一章 绪 论

1.1 史 话

关于存在着一种不可见“热”射线的假说，由来已久。早在公元前，罗马的唯物主义哲学家狄脱·留克利茨基·卡尔曾在其著作《论事物的本质》中写道：“太阳是个拥有巨大能量的粉红色发光天体，它向周围大量地发射出肉眼看不见的热射线。”

热辐射的系统研究，开始于十八世纪末叶。那时，与热过程密切相关的冶金和化学工业广泛应用蒸汽机，因而促进了热学的发展。

热辐射的最初概念是卓越的瑞典化学家卡尔·谢利提出的，他在其著作《空气和火焰的化学论述》(1777)中曾单用一章阐述了“辐射热”的性质。谢利在观察热辐射时并没有采用温度计测量方法，因此他的试验纯粹是定性的。

谢利的论著出版两年后，德国数学家兼物理学家约翰·朗伯的遗著《测温术》问世。书中描述了与谢利的观察不谋而合的试验。朗伯首先实验证明了，热辐射的直线传播和辐射强度的衰减与距离的平方成反比。

“辐射热”概念在文献中保持了整个十九世纪。甚至在二十世纪初叶，赫伏尔逊(О.Д.ХВОЛЬСОН)教授还在为反对这个在物理学教科书中的老术语而进行斗争，他认为，这个术语已经过时，不能适应该学科的最新发展。当然，赫伏尔逊不仅反对“辐射热”这一术语，而且也反对最新文献中采用的“热辐射”这一术语。

不管谢利，还是朗伯，他们都看到并强调了热辐射和光辐射之间的相似性(直线传播、反射)，但还说不上两者的同一性。只是由于热辐射理论的进一步发展，并经过实验数据加以证实，才

对热辐射和光辐射的相互关系有了较为深入的认识。

1790 年出版了日内瓦科学院教授（后任院长）马尔克·皮克坚（M·Pictet）所著的《关于火焰的试验》一书，书中描述了著名的“冷反射”试验。皮克坚把两块锡制抛光凹面反射镜（直径 30.5cm，焦距 11.4cm），放在相隔 365cm 处。皮克坚用一只烧热但尚未烧红的小球（直径 5cm）置于其中的一块反射镜的焦点上，此时发现装在另一块反射镜焦点上的温度计的读数比并列放置在焦点以外的温度计的读数高出 10° 。皮克坚还在两块反射镜之间放一块玻璃片，随后很快移开，试图由此测定热辐射的传播速度，然而试验毫无结果。

皮克坚在与其他学者讨论他的试验时，产生了一个问题：冷是否也能反射？起初，皮克坚觉得这一假设是荒谬的。他曾写道：“冷——它仅仅是热的不足，而负值是不可能反射的。”^[54]皮克坚利用自制的凹面反射镜装置来证明这一点。他把盛有雪的容器放到一块反射镜的焦点上。顷刻，装在另一块反射镜焦点上的温度计读数比周围空气温度下降了若干度。容器中加入硝酸而使雪溶化成水之后，温度计读数却又减少了 $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ 。

试验结果使皮克坚大吃一惊。后来他对此作了这样的解释：温度不同的两个物体如果相互发生作用，较热物体释放热量并因而降温，而较冷物体吸收热量并因而升温。当两个物体的温度相同时，就不再存在热量的任何释放和吸收。

皮克坚的解释推翻了“冷射线”概念，他强调指出，“冷反射”乃似是而非，事实上，当热球换为盛雪容器时发生的还是热辐射反射。这种解释是依据静态平衡观点，其特点是单向热辐射只能从热体传向冷体。

1771 年，日内瓦科学院教授皮叶尔·普列沃提出了一种设想：温度相同的诸物体始终在进行辐射交换。他最先指出，能量平衡状态具有动态性质。根据普列沃的看法，任何发热体都发射热射线，如同任何发光体都发射光线一样。热射线是在空间作直线高速运动的热粒子。由热粒子组成的热射线贯穿整个空间。热体表

面上的每一点都可看作这样一个中心，即由这点向四处发射热粒子，而各方的热粒子也又流向这点。换言之，每一物体不断发射热量，同时也从周围物体的热辐射获取热量。这两种热量的比值确定了物体的温度^[57]。普列伏曾作过这样的形象化表述：“任何物体如同一个湖泊，湖中因下雨而增加的水量等于因蒸发而失去的水量。”

自从 1800 年威廉·赫胥尔发现不可见的红外辐射之后，有关热和光辐射之间相互作用的问题变得特别尖锐。赫胥尔生于汉诺威的一个军乐队乐师的家庭里，1757 年侨居英国，经历长期贫困的岁月后觅得担任乐师的工作。对音乐理论的研究，使赫胥尔对数学发生了兴趣，后来又对光学发生了兴趣。1774 年，赫胥尔掌握了磨镜技术并建成了他的第一台望远镜（直径 20cm，焦距 210cm）。1781 年他用这台望远镜发现了天王星。1789 年前后，赫胥尔制成了当时世界上最大的望远镜（直径 1.2m，焦距 12m），并用它完成了一系列重要的发现：观察到太阳系向武仙星座的运动，发现土星和天王星的卫星，编制出星团表和星云表。

1800 年初，赫胥尔发现，用作望远镜滤光片的各色玻璃对太阳射线的光和热吸收各不相同。这件事触发了赫胥尔的好奇，于是他进行了一系列试验，想弄清热效应的强度在太阳射线通过玻璃棱镜而形成的波谱中的分布情况。赫胥尔通过放置带涂黑小球的灵敏温度计和太阳波谱的每一色带，发现温度计读数随着紫色谱带向红色谱带的移动而增加。当时他产生了一个想法：不断增长的射线热效应不应在给出最大热量的红色谱带处终止。赫胥尔在科学史上第一次测到了光谱范围以外的温度，并且发现了一种不可见的“具有最大加热能力的射线”。

1800 年 3 月 27 日，赫胥尔在伦敦皇家学会的会议上报告了自己的发现。约一个月后，他作了以二十次实验为内容的第二次报告，实验证明，不可见的热射线如同可见光一样反射和折射。在这些实验中，赫胥尔采用了金属反射镜（夹角 45° ，在红色谱带范围以外）及钢制凹面反射镜和玻璃棱镜。

赫胥尔遵照牛顿有关光的微粒学说,肯定“辐射热和光相同”。在进一步研究热辐射特性的过程中,赫胥尔却开始怀疑这一结论是否正确,并在作第三次报告时(1800年5月15日)曾试图证实“光和热的差异大得异乎寻常”^[34]。例如,他指出了射线通过不同物质时的差异。赫胥尔写道:“尽管两者的反射和折射十分类似,这两种射线在同一类特性中遵守不同的规律,因而本质也各不相同”^[34]。

赫胥尔的发现给他的同时代人留下了强烈的印象,但由于他的某些试验说服力不强以及赫胥尔本人提出的怀疑,致使对其发现的种种解释自相矛盾。英国爱丁堡大学教授、物理学家琼·赖斯利(J. Leslie),就是对存在着一种不可见辐射并能产生热效应观点的最起劲的反对者。他肯定不可见辐射概念自身包含着内在矛盾(Contradiction in adjecto),所以认为“想象中的不可见太阳射线,只不过是发光体周围热空气之类微不足道的东西”^[34]。

赖斯利为了检验赫胥尔的结果,独自进行了类似的实验,他用燧石玻璃制的棱镜分解太阳的波谱。温度的测量,采用了专为这项实验设计制成的差示水银温度计。

赖斯利发现,温度计的读数随着蓝色谱带向红色谱带的移动而增加,红色谱带处的温度最高。但是在红色谱带之外却没有发现温度有任何变化。因此他断言,赫胥尔的试验做得并不细致,有很多不精确的地方,总之是“不理智的妄想”^[43]。

赖斯利的看法受到爱丁堡大学校长大卫·普鲁斯脱的支持,后者认为,在赫胥尔的试验中是由于棱镜自身发热而产生热辐射的。赖斯利的评论尽管错误地否定了红外辐射的实际存在,但还是具有积极的意义。通过他的评论,揭示了赫胥尔论断中的不合逻辑之处,因而使阐明热辐射本性的讨论得以开展。

皮叶尔·普列沃是最先承认赫胥尔发现的人士之一。他认为,赫胥尔的发现是证明光和热辐射之间存在着相似性的决定性论据。他写道:“光和热在物体中的透过率差异,并不说明光和热

的不同或相同”^[68]。赫胥尔的观点也受到英国物理学家托马斯·杨(T·young)的支持,早在1802年他就曾推断光和热辐射只有振荡频率的差异。根据他的意见,赫胥尔有关不可见辐射的折射率低于可见辐射的发现,是牛顿时代以后最伟大的发现^[71]。

赫胥尔的发现,引起了大批研究人员开始探索与热效应最大值相应的波段位置。其中值得一提的有:安格尔菲尔德^[80]、冯希^[70]、佩拉尔^[20]以及鲍威尔^[56]。塞贝克在指出利用燧石玻璃棱镜可以发现这种最大值总是位于波谱红端限以外之后,对他们所得的这一相反结果理解得十分清楚。

直到1830年,赫胥尔的试验已重复了相当多的次数,因而可以确信,在太阳波谱红端之外存在着一种能使温度计水银球发热的不可见辐射。稍后,法国物理学家白克兰把这种辐射称之为红外辐射。

红外辐射性质的进一步研究,与意大利物理学家麦克唐尼奥·曼劳尼的名字是分不开的,他毕生的科学活动是从事热辐射问题的研究。1831年,曼劳尼发现红外辐射有不同的种类,并且在水中透过的程度也不同^[48]。二年后,他证明不同的物质透射红外辐射的程度也不同,并且用“透热”(диатерман)一词来描述这一性质。曼劳尼确认,同一物体透射不同辐射源的红外辐射是不一样的。1834年,他研究各种辐射源(酒精灯、加热到390°C的铜坩埚、白炽铂电阻丝、沸水器)发射的红外辐射性质,从而发现不同辐射源中“不同红外辐射”的成分极不相同,其中的某些成分有时甚至在一些辐射源中根本不存在^[49]。

1836年,曼劳尼发表了自己对红外辐射偏振所做的试验结果,而后他证明了红外辐射的折射和反射如同可见光一样^[50]。在所有的试验中,曼劳尼采用了意大利佛罗伦萨的物理学教授利奥波德·诺皮略于1830年创制的铋铈温差电堆(Thermomultiplicateur)作为红外辐射探测器,在测辐射热计发明以前它一直是最常用的辐射探测器。

曼劳尼对红外辐射的折射、反射和偏振所作的全部研究结果

表明, 红外辐射与可见光相同, 当时由于光的波动学说几乎已被大家公认, 故大部分物理学家都支持杨氏提出的热辐射的波动学说理论。

遵循自然力具有同一性这一有益的哲学思想, 安培在光的波动理论基础上得出了热和光辐射具有共性的结论。至于辐射透过物体时的差异, 安培是以波长的不同来解释的^[16]。安培的观点在数年之后才获得公认。这一观点在许多方面都曾受到德国学者卡尔·克诺勃劳赫试验的支持。克诺勃劳赫在其《辐射热的重新试验研究》巨著^[40]中, 援引了他本人对红外辐射透过不同物体的情况、物体的热辐射率、不同物体在不同温度下所发射的红外辐射的性质、各种辐射源所发射可见光的性质等的观察结果。克诺勃劳赫还发现, 红外辐射几乎能被眼球中的液体完全吸收而达不到视网膜, 所以对眼睛没有任何作用。

1848年, 克诺勃劳赫为了彻底证实光辐射和红外辐射性质的同一性, 进行了一系列红外辐射双折射、偏振和衍射的试验。在此前一年, 法国物理学家菲索和富柯观察到红外辐射的干涉现象^[31], 而索尔蓬纳的物理学教授鲍利·狄绳和法国物理学家佛莱狄利克·普洛伏斯泰于1849年证明, 红外辐射的偏振面如可见光的偏振面一样可以利用磁铁来转动^[27]。他们在另一篇著作中确信, 用于偏振光因折射或反射而发生强度变化的正弦平方定律同样适用于可见和红外辐射; 计算通过透明介质后的光强所用的弗莱纳尔(Френель)公式对热辐射也是正确的, 无论对可见光还是对红外辐射都同样遵守金属表面上的反射定律。

这样, 通过曼劳尼、克诺勃劳赫、菲索、富柯、普洛伏斯泰、狄绳等学者的研究, 可见光和红外辐射本质的同一性到上世纪中叶最终得到了公认。此后, 研究人员的注意力集中于测定红外辐射的波长。这方面的探索工作在不断地加快步伐, 新的发现一项紧接一项, 以前认为红外辐射仅仅分布在与可见光相邻的电磁振荡波谱内, 后来却逐渐发现其波段范围愈来愈远。

菲索和富柯在研究红外辐射的干涉现象时(1847), 波谱标定

到 $1.94\mu\text{m}$ 。莫当以更为精确的方法重复了菲索和富柯的试验,使波段范围延伸到 $2.14\mu\text{m}$ (1879)。1881 年美国天文物理学家塞缪埃尔·兰利在自己的试验中采用新型的辐射能量测定器件——瑞典数学家兼物理学家阿道尔夫·斯万佩尔格 1857 年发明的测辐射热计,用其测定火石的色散 (达 $2.7\mu\text{m}$) 和岩盐的色散 (达 $5.3\mu\text{m}$) 的精确度在当时十分突出。帕森用萤石研究红外辐射使波长延伸到 $9.3\mu\text{m}$ (1894), 而鲁宾斯的研究则达到了 $18\mu\text{m}$ (1895)。鲁宾斯和尼柯尔斯发现一种剩余射线法,使波谱推至 $60\mu\text{m}$ (1897)。1910 年鲁宾斯和伍德利用石英的透射特性获得更长的波长。他们用石英透镜分离出了波长 $108\sim 110\mu\text{m}$ 的辐射,稍后鲁宾斯又和巴尔采取同样的技术测量汞蒸气石英弧光放电灯的辐射,其波长达到了 $343\mu\text{m}$ (1914)。盖尔达·拉斯基于 1922 年分离出了波长为 $400\mu\text{m}$ 的辐射,而尼柯尔斯和齐尔在重复鲁宾斯和巴尔的试验时,发现小型电振荡器发射的波长为 $420\mu\text{m}$ 的红外辐射 (1923)。莫斯科大学教授亚历山大·安德烈也夫娜·格拉高莱娃-阿尔卡吉也娃 (Александра Андреевна Глаголева-Аркадьева) 于 1923 年用她所发明的新型辐射源——普及型辐射器——终于在器件产生的电磁振荡同分子和原子发射的辐射之间架起了桥梁。由电火花穿过金属屑和粘性油混合物 (振动质量) 而形成的这种辐射源,能获得波长从若干厘米到 $82\mu\text{m}$ 的辐射,即覆盖当时电磁振荡标度的空白绰绰有余。格拉高莱娃-阿尔卡吉也娃的研究,消除了有关电磁振荡波谱共性假设的全部痕迹,从而确认了光和无线电波在电磁本质上的同一性。

在为测定红外辐射波长而进行研究的同时,也探讨了热辐射的理论。这一理论的基础,就是著名德国物理学家歌斯塔夫·基尔霍夫创立的定律。

基尔霍夫根据相同温度的物系中的相互辐射不致破坏平衡的热力学原理,发现所有物体,不管其性质如何,它们的辐射率 $e(\lambda, T)$ 和吸收率 $a(\lambda, T)$ 的比值均相同,都是辐射波长和温度的普适函数^[39];

$$e(\lambda, T)/a(\lambda, T) = f(\lambda, T) \quad (1.1)$$

基尔霍夫假定可能存在着一种能全部吸收入射通量的物体, 即与温度无关, 且在所有波长下 $a(\lambda, T) = 1$ 的物体。他称这样的物体为绝对黑体 (AQT)。显然, 二物体中若有一物体为绝对黑体, 其比式应为

$$e(\lambda, T)/a(\lambda, T) = e_{\text{AQT}}(\lambda, T)/1 = E_{\lambda, T} \quad (1.2)$$

即所有物体的辐射率和吸收率之比值相同, 等于绝对黑体的辐射率。

热辐射理论的进一步发展, 证明基尔霍夫提出的绝对黑体概念具有重大的意义。基尔霍夫本人也认识到了这一点, 他确认, 只有通过这类物体才能得到具有普遍意义的定律。物理学家们起初并没有注意基尔霍夫的这一说明, 而只是到了十九世纪末才理解到绝对黑体乃是波谱中能量分布完全确定的“标准”辐射体。

必须公正地指出, 与基尔霍夫同时代的英国物理学家巴利富尔·斯佳尔脱在早些时候就曾提出过十分接近于基尔霍夫定律的想法。斯佳尔脱利用温差电堆和电流计, 比较了炭黑、玻璃、矾土、亚硒酸盐、云母和岩盐在 100°C 温度下的热辐射情况, 并得出结论: “不同物质抛光薄片的辐射率与其吸收率成正比”^[65]。斯佳尔脱也曾作过绝对黑体的假设, 但他没有精确地确定这一概念并且也不理解这种设想的意义。

后来, 围绕斯佳尔脱的想法比基尔霍夫定律早多少, 曾发生过激烈的争论。斯佳尔脱在其逝世前二年 (1880 年), 承认作为他提出关于发射和吸收成正比定律的理论基础有其局限性。但在更早的时候, 他曾写道: “我根本不能同意, 一名学者证明一项新定律而不顾已有前人以同样的前提得出同样的结论, 竟然以自己解决得更为完满些来贬低他人的劳动”。尽管基尔霍夫把斯佳尔脱视为自己亲近的前辈, 但是后者的历史功绩却几乎被人遗忘了。事实上, 斯佳尔脱的著作在当时对阐明热辐射的性质具有很大的意义, 这些著作在基尔霍夫研究之前, 代表了该领域的最高水平^[2]。

鉴于光谱分析的发展,探索表征绝对黑体发射率的基尔霍夫普适函数解析式的任务,在理论上和实际中具有愈来愈大的意义。基尔霍夫的科学预见才能十分出众,他曾写道:“这一函数的意义很大,实验研究虽有极大的困难,但可以期望通过实验将能确定这一函数,因为毫无疑问,它具有简单的形式,如同迄今为止所有与个别物体性质无关的已知函数一样。只有在完成这项任务之后,才看得出经过证明了的这一定律的全部价值”。

基尔霍夫的普适函数 $E_{\lambda, T}$ 成了大量理论和实验研究的对象。首先是确定了绝对黑体积分辐射的关系。不过为获得这种关系而迈出第一步的还是牛顿,他曾推测热体辐射的总能量与其自身温度和周围介质温度两者之差成正比^[52]。法国物理学家皮尔·杜朗和阿历克西斯·普齐经观察证明,牛顿提出的定律只适用于物体和周围介质的温度之差不超过几度的情况。杜朗和普齐提出了另外一个公式,该公式几乎在半个世纪期间都被用来计算热体辐射的总能量^[28]。同时还必须提及韦尔海密(1851)^[60]和洛赛蒂(1878)^[69]提出的积分辐射定律。然而,给予杜朗和普齐定律决定性打击的是奥地利物理学家约瑟夫·斯忒藩的评论,他于1879年提出了积分辐射的新定律^[64]。

按此定律,任何物体辐射的总能量正比于物体绝对温度 t 的四次方和周围介质绝对温度 t_0 的四次方之差:

$$R \approx \sigma [(273 + t)^4 - (273 + t_0)^4] \quad (1.3)$$

斯忒藩依据法国物理学家丁达尔(Тиндаль)、杜朗、普齐、普洛伏斯泰、狄绳等人的试验确定了他的定律。丁达尔测量了通电加热到不同温度的铂电阻丝的辐射强度。辐射用岩盐透镜会聚,并通过岩盐棱镜的分光而获得光谱,在光谱的红外波段内安装一个线性温差电堆^[68]。

1884年,著名德国学者留达维·玻耳兹曼对斯忒藩定律作了严格的论证,并指出这一定律仅适用于绝对黑体^[21]。后来,这个定律被称为斯忒藩-玻耳兹曼定律。

尽管玻耳兹曼著文从理论上严格论证了斯忒藩定律,然而研