红外诊断技术在电力设备中的应用

董其国　编

机械工业出版社

本书比较系统地介绍了红外技术的发展概况，红外仪器的基本原理、分类、功能、配置及选型；书中着重介绍了红外检测、诊断技术在电力设备中的应用，其中包括对大量具体案例的检测诊断与剖析。论述了测试中的影响因素与对策、应用分析与评价，及对开展红外诊断工作的基本要求，最后提出对电力设备推广应用红外检测诊断技术的建议。书中内容丰富，结合实际，通俗易懂。

本书可作为技术进步的科普读物，供从事电气设备维护、管理及相关技术人员及有关院校师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

红外诊断技术在电力设备中的应用/董其国编 .—北京：机械工业出版社，1998.8
ISBN 7-111-06488-7

Ⅰ.红… Ⅱ.董… Ⅲ.红外探测-应用-电力系统-电气设备-故障诊断 Ⅳ.TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字（98）第 16659 号

出 版 人：马九荣（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
责任编辑：吴柏青、沈红 版式设计：冉晓华 责任校对：罗凤书
封面设计：姚 毅 责任印制：路 琳
北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1998 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
850mm×1168mm 1/32 · 7.25 印张·186 千字
0 001—3 000 册
定价：16.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

序　言

现代红外技术是以红外物理学、红外光电子技术和微型计算机技术为基础发展起来的一门新兴的综合性技术学科。它以红外辐射作为能量和信息传递的手段，广泛应用于军事上的伪装探测、目标侦察、搜索、跟踪、制导、通信；空间技术中的遥感、遥测、地球资源与海洋探测、气象预报；工业上的温度测量、生产过程监控、烘烤、设备状态监测与故障诊断、无损检验；农业上的国土调查、作物长势与产量预估、灌溉管理、病虫害预报、农产品脱水干燥；医学上的病理诊断、疗效监测以及许多基础科学研究等领域。

工业设备故障的红外诊断是红外技术在现代设备故障诊断工程中的重要应用，由于借助红外辐射探测技术能够以非接触、实时、快速在线监测方式获取设备的运行状态信息，又有分辨率高、形象、直观和效益／投资比高等一系列优点，所以，在电力、冶金、石油化工、交通、机械等许多工业部门广泛受到重视，并收到了显著的经济效益和社会效益。尤其在电力系统中，由于电能生产、输送、分配和使用的连续性，对系统中各设备单元的安全可靠运行都有很高的要求。特别是随着电力工业向着大机组、大容量、高电压的迅速发展，保障设备运行的可靠性更成为安全生产的突出课题。一旦某一环节发生事故，必将造成重大经济损失或人员伤亡。因此，随着红外技术的日臻成熟，它在电力设备故障诊断中的应用也越来越受到普遍重视，取得的经济效益也越来越明显，并可促进电力设备维修体制从传统的预防性检修向预知性状态维修发展。

我国电力行业应用红外技术进行设备故障诊断起步较晚，但近几年随着电力事业的高速发展和安全、供电可靠性的需求，又

由于各级主管部门的重视和广大科技工作者与现场作业人员的共同努力，使得我国电力设备故障红外诊断技术已逐步普及推广和广泛应用。目前，应用红外诊断技术不仅可以准确地发现各种电气设备的裸露外部故障和缺油故障，而且可以有效地查出许多电气设备内部的导流回路故障和绝缘故障。

由于电力设备故障的红外诊断技术是一门跨学科的综合技术，在迅速推广过程中，不少从业人员感到对该领域知识了解甚少，急需一本实用的专业读物。恰在此刻，江苏省常州供电局董其国同志适时地编写了《红外诊断技术在电力设备中的应用》一书，适应了读者的需要。在该书中董其国同志没有将重点放在系统论述红外诊断技术的许多理论分析，而是把重点放在诸多电力设备故障红外诊断案例的讨论上，突出了实用性，便于读者在实践中对照，这是该书的一大特色。相信这对从事现场工作的广大从业人员会有更实际的参考价值。在此，也对董其国同志为我国电力行业推广红外诊断技术所做的不懈努力与贡献给予充分的肯定。

国际 IEEE 高级会员
中国电子学会量子电子学
与光电子学分会委员
华北电力大学教授　　陈　衡

前　言

红外诊断是电力设备在线监测的一项行之有效的技术手段和重要内容。推广电力设备红外技术检测、诊断的应用，是非常重要和有效的，因其能及时而准确地发现和诊断运行电力设备的事故隐患和故障先兆，以便采取合理、可靠的处理措施，降低电力设备因过热造成的能源损失和浪费，减少或避免电力设备因过热故障而引发的突发性设备事故。

由于红外诊断是对运行中的电力设备的一种非接触无损检测和故障诊断，故能实现电力设备运行现场大面积温度分布场的扫描和局部缺陷的定点测温，技术先进、操作方便、检测快速、诊断准确。红外检测仪器具备的高灵敏度能够准确地分辨出设备表面小于0.1～0.5℃的温差变化，同时红外仪器和计算机技术结合，对设备的红外热像进行处理，从而实现数据的统计、分析、显示、存储等技术功能，便于建立设备状态和设备档案管理的数据库，高压现场测温可以选择合理而安全的操作位置和检测角度，不受高压强电场的干扰和影响，同时对带电设备可保持足够的安全距离操作，因此安全性好，可靠性高。

红外诊断技术的发展和推广已引起广大电力企业的高度重视和关注，在已经开展红外技术应用的一些地区和部门，也逐步取得了一定的现场经验和相当的经济效益。大量的应用实践证明，推广红外技术，对保证电力设备的安全运行，提高经济效益和节能降耗，保证电能质量和供电可靠性，实现电力设备从传统的计划检修向预知的状态检修转移等方面都发挥了积极的作用。

红外诊断技术在国内电力行业的应用目前尚处于被认识和推广应用的起步阶段，相关系统和详细论述的资料还很少。由于红外检测与诊断技术是一门专门技术，涉及到的理论和技术问题及

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

应用技巧非常广泛，要求从事该项技术的工作人员，其必须了解和掌握相应的知识和熟悉仪器的工作原理、性能，并积累丰富的现场经验，才能取得应有的效果。

在江苏电机工程学会的组织下，我们经过大量的调研和收集资料、整理，并得到有关领导和专家及应用人员的热忱指导、帮助，编写了本书。其特点是从实际应用的角度出发，论述了红外技术的发展概况、基础理论、应用实例、相关要求，并作了粗浅的技术分析与评价，最后提出在电力系统推广红外诊断技术的建议。

本书由董其国编写，陈衡主审。由于编者水平有限，书中疏漏和错误之处，敬请读者谅解并予指正。

文中引用了许多红外检测工作者和有关专家提供的实例、经验，及公开发表的文章，正式出版的图书和非正式出版发表的资料，并得到他们的指教和帮助，在此表示衷心的感谢。

编者

目　录

前言
一、红外技术的发展概况 …… 1
二、红外技术的基础及原理 …… 8
（一）红外辐射与热的基础知识 …… 8
（二）红外辐射的基本原理 …… 13
（三）红外辐射的特性 …… 17
（四）红外辐射的探测 …… 19
（五）红外探测器的应用 …… 22
（六）红外成像的图像处理 …… 24
三、红外测温仪器的基本类型及选择 …… 29
（一）电力设备常用红外测温仪器的功能 …… 29
（二）电力设备常用红外测温仪器的类型 …… 30
（三）红外测温仪器的配置选型 …… 67
四、红外诊断在电力设备中的应用 …… 72
（一）应用概况 …… 72
（二）电力设备的故障与发热 …… 73
（三）电力设备的发热与危害 …… 79
（四）电力设备热缺陷的分类 …… 81
（五）电力设备的外部热缺陷及红外诊断 …… 84
（六）电力设备的内部热缺陷及红外诊断 …… 101
（七）国外红外测温技术在电力设备中的应用简况 …… 147
五、影响因素与对策 …… 156
（一）大气吸收的影响 …… 156
（二）大气尘埃及悬浮粒子的影响 …… 158
（三）太阳光辐射的影响 …… 158
（四）风力的影响 …… 159
（五）辐射率的影响 …… 159

（六）距离系数的影响 …… 163
（七）邻近物体热辐射的影响 …… 165
（八）仪器工作波段不同的影响 …… 165
（九）设备负荷率对温升的影响 …… 167
（十）不同类型红外仪器对测温效果的影响 …… 167
六、技术应用与经济效益分析 …… 169
（一）设备热缺陷与负荷率、气温、电压及投运时间的关系 …… 171
（二）外部热缺陷分析 …… 173
（三）内部热缺陷分析 …… 182
（四）经济效益分析 …… 185
七、红外检测诊断工作的基本要求 …… 193
（一）对工作人员的要求 …… 193
（二）对管理制度的要求 …… 194
（三）对仪器选择的要求 …… 195
（四）对检测工作的要求 …… 195
（五）对操作环境的要求 …… 199
（六）对结果处理的要求 …… 201
八、对推广应用红外诊断工作的建议 …… 206
九、附录 …… 209
参考文献 …… 222

一、红外技术的发展概况

1672年，人们发现太阳光是由各种颜色的单色光复合而成的白光，同时，牛顿做出了单色光在性质上比白光更简单的著名结论。人们使用分光棱镜就可把白光分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等单色光。19世纪初，英国物理学家F·W赫胥尔用热的观点来研究各种单色光的热量时，有意地把暗室的唯一的窗户用木板堵住，并在板上开一矩形孔，孔内装一个分光棱镜，当太阳光通过棱镜时，便被分解为彩色光带。他在用温度计去测量光带中不同单色光所含热量的过程中为了与环境温度比较，又在彩色光带附近放了几支作为比较用的温度计来测定周围环境温度。试验中，他偶然发现一个奇怪的现象：放在光带红光外的一支温度计，比室内其他温度计的指示数值高，经过反复试验，这个所谓热量最多的高温区，总是位于光带最边缘处红光的外面。于是赫胥尔宣布，太阳光发出的辐射中除可见光线外，还有一种人眼看不见的“热线”。这种看不见的“热线”位于红色光外侧，因此叫做红外线。1840年，赫胥尔等人根据物体不同区域温度的分布，制定了温度谱图。

红外线是一种电磁波，具有与无线电波和可见光一样的本质，红外线的发现是人类对自然认识的一次飞跃，对研究、利用和发展红外技术领域开辟了一条全新的广阔道路。

第二次世界大战中，德国人用红外变像管作为光电转换器件，研制成功了主动式夜视仪和红外通信设备，从而为红外技术的发展奠定了基础。

第二次世界大战后，美国德克萨兰仪器公司经过近一年的探索，开发研制了第一代用于军事领域的红外成像装置，称之为红外前视系统（FLIR）。它是利用光学机械系统对被测目标的红外

辐射扫描，由光子探测器接收两维红外辐射图像，经光电转换及一系列信号处理，形成视频图像信号。这种系统的原始形式，是一种非实时的自动温度分布记录仪，后来随着50年代高速锑化铟和锗掺汞光子探测器的发展，才开始出现高速扫描及实时显示目标热像的系统。

60年代早期，国外研制成功的第二代红外成像装置，它是在红外前视系统的基础上又增加了测温的功能，称之为红外热像仪。

开始由于保密的原因，在发达国家中也仅限于军用，投入应用的热成像装置可在黑夜或浓厚烟幕云雾中探测到对方的目标，还可探测伪装的和高速运动的目标。由于有国家经费的支撑，投入的研制开发费用很大，仪器的成本也很高。以后考虑到在工业生产中的应用，结合工业用红外探测的特点，采取压缩仪器造价、降低生产成本，并根据民用的要求，通过减小扫描速度来提高图像分辨率等措施才逐渐发展到民用领域。

60年代中期，国外研制出的第一套工业用的实时成像系统（THV），该系统为能实现对目标准确测温，仪器由液氮制冷，用110V电源供电，机身重约35kg，因此使用中便携性很差。经过对仪器的几代改进，发展到1986年研制的红外热像仪已无需液氮或高压气，而以热电方式制冷，可用电池供电，1988年推出的全功能热像仪，将温度的测量、修正、分析、图像采集、存储等合于一体，重量小于7kg，仪器的功能、精度和可靠性都得到了显著的提高。

90年代中期，由军用技术（FPA）转民用并商品化的第三代红外热像仪（CCD）属焦平面阵列式结构的一种凝视成像装置，技术功能更加先进，现场测温时只需对准目标摄取图像，对着微型话筒讲述现场各种情况，并将上述信息存储到机内的PC卡上即完成全部操作，其各种参数的设定均可回到室内用软件进行修改和分析数据，最后直接得出检测报告，90年代中期以后迅速发展，并由美国红外测量公司（inframetrics），日本航空电

子公司（NACL）、瑞典阿吉玛公司（AGEMA）等竞相推出推广应用的非制冷焦平面阵列式凝视成像的长波段红外热像仪进一步提高了红外技术在电力设备诊断中实际应用的科学性和先进性，由于结构的改变，取代了复杂的机械扫描和制冷系统，功耗得到降低，仪器重量已有小于2kg的产品，使用中如同手持摄像机，单手即可方便地操作。

最初出于军事目的发展起来的热红外技术，由于其技术的先进和实用，今天已成为电力设备监测和诊断的有用工具。

国外红外热像仪的工业化应用，始于60年代中期，最早应用的电力部门，是瑞典国家电力局，他们成功地应用了红外热像仪进行电力设备的故障诊断。

由于红外技术对保证电力安全生产和提高供电可靠性方面取得了明显的效果，同时，其经济效益十分显著。据美国有关应用部门统计，利用红外技术检测电力设备的投入产出比达到1:19以上，所以目前国外的一些电力部门应用已很广泛。在工业发达的国家更是普遍推广使用，应用范围也从最初的电气设备和电力线路开始扩大到发电厂等有关方面。1990年在国际大电网会议（CIGRE）上，对红外诊断技术给予了足够的重视和充分的肯定。1993年在美国动力会议上，底特律爱迪生公司和伊利诺依州电力公司都分别介绍了在架空线路和变电站、发电厂中应用红外热像技术检测电力设备的最新经验，红外诊断技术已成为电力设备监测、普查、及时发现隐患、及时抢修、杜绝恶性突发性设备事故的一种重要手段。

在国内，1975年由上海引进了第一套红外热像仪，这在当时是国内最先进的红外测温装置，应用后取得了很大的经济效益。80年代初，电力系统结合500kV平武工程在电力工业中首次引进了3套进口红外热像仪。应用后，大大提高了电力设备探测和诊断的技术水平。目前，大多电力试验研究机构和一些大型发电厂及部分供电局都配置了先进的红外热成像仪，广泛应用于电力生产的设备普查、故障探测及诊断。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

国内研究开发红外技术的应用，起始于50年代后期，当时主要是为国防事业服务的。经过几十年的努力，在军事应用和高科技领域都取得了令人瞩目的成就，随着改革开放形势的深入发展，我国军用方面的红外技术开始向民用方面辐射。到目前，民用国产红外热像仪的研制、开发和生产，已处于不断的完善和提高之中，特别是随着计算机技术的高速发展，国产红外热像仪的功能已充分考虑到挖掘、利用计算机在图像采集、处理、显示、存储等多方面的技术功能，图像的软件采用C语言WINDOWS，因此可根据实际需要进行功能的扩展，同时结合吸收进口红外设备的先进技术，并针对过去进口红外热像仪存在的问题和不足进行改进和提高，从而大大改进了国产仪器的功能和结构，提高了仪器的实用性、先进性和灵活性。

国产红外热像仪，因价格上只占国外同类进口仪器的1/3～1/2，技术功能满足应用要求，使用和维修方便，目前已占有相当市场。

国产红外热像仪正在国内许多领域和单位代替进口产品投入实际应用，而且还有部分型号的产品出口到国外，在红外技术的推广应用方面发挥了积极的作用。

红外热电视是红外技术和电视技术相结合的产物，目前大多仪器无定量测温功能或测温精度不高，主要以定性成像为主，显示被测目标的温度分布场。它与红外热像仪一样，都属于扫描成像装置，但两种仪器的工作原理和基本结构不同，红外热电视是采用常温热释电探测和电子束扫描，靶面成像，不同于红外热像仪的光学机械扫描或焦平面阵列成像技术。

红外热电视的发展始于1965年，首先由法国人海德尼提出并探索使用热电材料制作电视摄像管，以便把普通电视响应的波长范围扩展到热成像范围3～5μm和8～14μm区域，1968年试制成功红外热释电摄像管，70年代中期国外市场出现了可供实际应用的热释电摄像管商品和红外热电视。

我国从1975年开始研制红外热电视，1979年初步取得成

功，80年代初期由国家仪器仪表组牵头组织红外热电视全国攻关组，研制成功的红外热电视被授于1984年国家发明奖，并在电力系统推广应用。

目前国内已有多家红外热电视生产厂家，仪器的技术功能、测量精度及实用性、可靠性等方面，比起步阶段的产品都有了较大的改进和提高。

红外热电视已在国内外得到广泛的应用，特别是工业发达的国家已将其普及应用于众多的领域，随着红外热电视的器件、热释电管的靶面材料及生产工艺水平的改进和提高，红外热电视的清晰度和技术性能也在不断改善，不仅大大提高了仪器的稳定性和精度，给使用者也带来了极大的方便。

红外热电视与红外热像仪，同样都能显示被测目标的热图像，仪器的技术功能，特别是对图像的分辨率和温度的定量分析方面，红外热电视相对红外热像仪要差一些，但由于红外热电视没有复杂的机械扫描，价格只有红外热像仪的1/5～1/3，维护费只占红外热像仪的1/5～1/20，同时红外热电视无需制冷系统，结构简单、携带方便、操作容易、可靠性高而普遍受到基层电力部门的欢迎。

红外测温仪是根据物体辐射强度与温度之间存在一定的函数关系而制成的一种红外辐射定量温度计。因其工作原理和结构简单，是国内外研制开发较早，应用最为普遍的一种非接触型单点测温仪器。

60年代由当时的东北电力技术改进局、沈阳电业局和长春光机研究所联合研制了国内第一代专为电力设备探测诊断用的红外测温仪，推广应用后，使电力设备的过热故障有了明显的下降。但在实际应用中，红外测温仪由于不具备扫描功能和仪器本身距离系数的影响而存在一定的局限性，在电力设备的探测和普查工作中效率也不算高。不过由于其具有价格低和对单点能准确测温的优势，同时操作简单，易于掌握，便于在基层电力部门普及推广应用，而占有相当大的市场。

开始研制应用的产品结构笨重、携带不便、操作调校复杂、探测中温度由指针显示，测温精度和仪器可靠性也不算高，华东电力试验研究所在此基础上于70年代末研制成功第二代红外测温仪。几经改进换代后的红外测温仪，已广泛使用先进的微处理机扩展技术功能，完善了远程测温的技术要求，应用中，能由数字准确显示被测目标的实际温度、最高温度、最低温度及平均温度和温差值，并能存储数十个不同目标的检测温度值，同时具有限温报警，环境温度补偿，应用中无需调焦和修正系数及目标锁定等功能，仪器更加小巧、应用更加灵活，技术更加先进。

红外荧光光纤测温仪是近10余年国内外有关专家倾心研究的课题。它是能对变压器内部绕组温度变化直接测量的一门技术。

针对红外测温和红外成像技术都无法使红外线辐射穿透外壳直接检测设备内部真实温度的情况，美国路克公司在美国电力研究所（EPRI）的资助下，研制了专为电力系统应用而开发、生产检测变压器绕组温度的荧光光纤测温装置，它是一种全新的在线监测高压设备内部温度的仪器。

国外在70年代便开始这方面的研究。美国以威克西姆博士为首的研制小组，在80年代初使荧光光纤测温仪商品化。当时美国电力研究所（EPRI）通过调研，列出了变压器绕组测温、局部放电、瓦斯检测、数字保护、组合电器故障、开关诊断等7项为电网急需解决的课题。其中美国电力研究所为解决变压器绕组直接测温难题，选用了荧光光纤测温仪，并在1982年发表了《荧光光纤测温仪作为热点传感器在电力变压器中应用评估》的最终报告，肯定了其作用。1985年威克西姆博士和孙(M.H.Sun)博士研制出第二代荧光光纤测温仪，并在变压器厂家生产的电力变压器和电力公司对旧变压器改造中广泛采用。

国内变压器制造行业和电力部门也十分重视变压器绕组热点的监测问题。沈阳变压器厂早在10多年前便立项进行了这一课题的研究。同时，保定变压器厂、西安变压器厂等单位也都进行

了有关研究。特别是我国国标《油浸式变压器负载导则》的正式颁布和实施后，在主变压器上加装光纤点测温仪将势在必行。

美国电力研究所（EPRI），1994 年 6 月发表了 RP1289—1 报告，报导了美国太平洋电力和煤气公司，采用光纤点测温仪节省 5 万美元的应用事例，和其在保证变压器运行寿命，减少电力变压器故障方面的重大作用。同时，美国路克公司的光纤点测温仪产品也得到了 ISO9002 认证，质量达到更高的水平。在此基础上，美国企业发展有限公司（Enterprise Marketing Inc. - EMI）联合中国和美国的电力、光电专家们，于 1994 年开始向中国介绍能测发电机、主变压器等高压电器内部热点温度的光纤测温仪。

光纤测温现场安装改造比较麻烦，但由于光纤具有优良的电气绝缘性能，抗电磁场干扰能力强，同时，将探头埋设在电气设备内的高压选定部位，直接测出该点实际温度的变化，解决了变压器内部测温的难题，因而，很快得到了推广应用。

目前，荧光光纤测温技术已被 ABB、GE、西门子等 10 余家变压器制造厂在其所生产的大型变压器上配套安装应用，作为大型变压器有效的安全运行监测措施。

红外技术是电力设备在线监测的一项行之有效的技术手段和重要内容，电力系统推广红外技术的应用，能及时而有效地发现和诊断运行中的电力设备的事故隐患和故障先兆，以利于采取合理、可靠的处理措施，降低设备因过热缺陷而造成的能量损失和浪费，减少或避免电力设备因过热故障而引发的突发性设备事故。

红外技术的发展和推广应用，已引起广大电力企业的高度重视和关注，在已经开展红外测温技术应用的一些地区和部门，逐步取得了一定的现场经验和相当的经济效益，大量的应用实践证明，推广红外技术，对保证电力设备的安全运行，提高经济效益和节能降耗，保证电能质量和供电可靠性，实现电力设备从传统的计划检修向预知的状态检修转移等方面都发挥出了积极的作用。

二、红外技术的基础及原理

红外技术是研究红外辐射的产生、传递、转换、探测并实现在实际工作中应用的一门技术。

红外技术的原理是基于自然界中一切温度高于绝对零度的物体，每时每刻都辐射出红外线，同时，这种红外线辐射都载有物体的特征信息，这就为利用红外技术和判别各种被测目标的温度高低与热分布场提供了客观的基础。

（一）红外辐射与热的基础知识

1. 红外线在电磁波频谱及波长范围中的区域

红外线是波长在 0.76～1000μm 之间的一种电磁波，按波长范围分为近红外、中红外、远红外、极远红外 4 类，它在电磁波连续频谱中的位置处于无线电波与可见光之间的区域（见图 2-1）。

2. 红外线辐射在真空中的传播速度

红外线辐射在真空中的传播速度为：

$$C = 299792458\text{m/s} \approx 3 \times 10^{10}\text{cm/s}$$

红外线辐射的波长

$$\lambda = \frac{C}{\omega}$$

式中 C——速度（cm/s）；

λ——波长（cm）；

ω——频率（s^{-1}）

3. 红外线辐射与热度

红外线辐射是自然界存在的一种最为广泛的电磁波辐射，它是基于任何物体在常规环境下都会产生自身的分子和原子无规则

的运动，并不停地辐射出热红外能量。分子和原子的运动愈剧烈，辐射的能量愈大；反之，辐射的能量愈小。

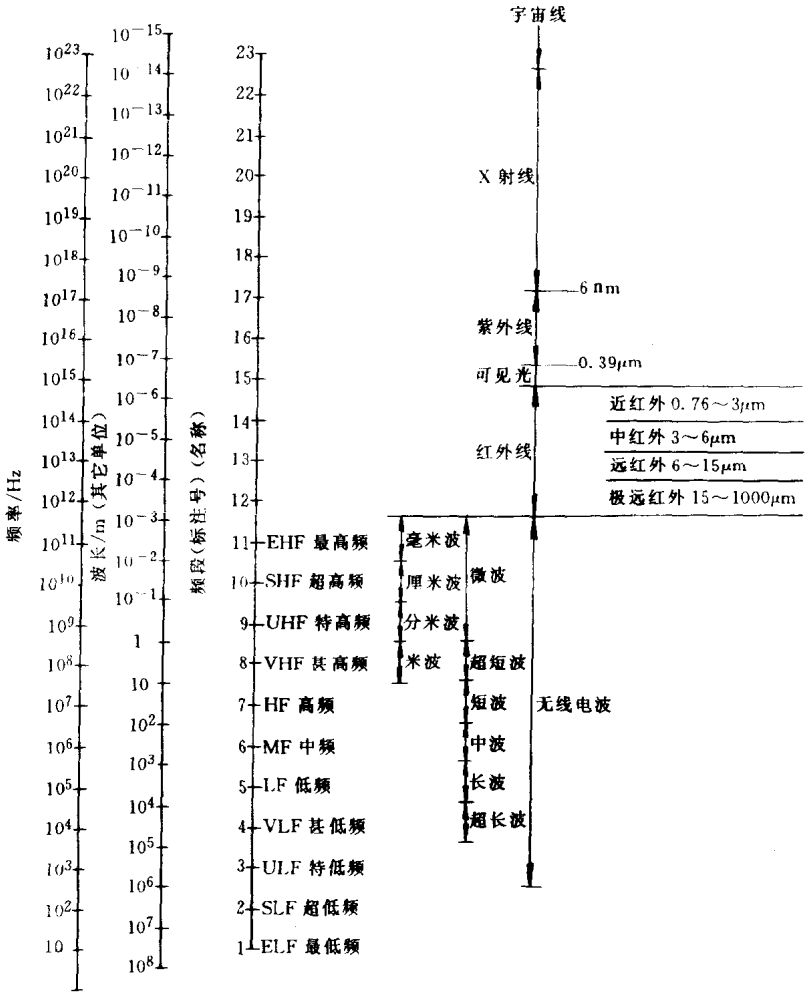

图 2-1　红外线在电磁波连续频谱中的位置

4. 温度与温标

红外线辐射的能量可用物体表面的温度来度量，辐射的能量

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com