



国家电网
STATE GRID

国网技术学院培训系列教材

输变电设备红外 紫外状态监测诊断技术

郑远平 主 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

国网技术学院培训系列教材

输变电设备红外 紫外状态监测诊断技术

郑远平 主 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为提高培训质量,国网技术学院依据国家电网公司制订的培训方案,结合自身实训设施和培训特点,编写完成了《国网技术学院培训系列教材》。

本书为《国网技术学院培训系列教材 输变电设备红外、紫外状态监测诊断技术》分册,共分九个项目,主要内容包括光基本知识及理论、红外线基本知识及理论、红外热像仪、红外诊断的影响因素及对策、红外诊断及典型故障分析、SF₆气体泄漏红外成像诊断技术、红外智能在线监测系统、紫外检测与故障诊断和机载吊舱高压线路巡检。

本书可作为电气试验专业的培训教学用书,也可作为各电力培训中心及电力职业院校的电气试验专业教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

输变电设备红外、紫外状态监测诊断技术 / 郑远平主编. —北京:中国电力出版社, 2013.4

国网技术学院培训系列教材

ISBN 978-7-5123-4279-8

I. ①输… II. ①郑… III. ①输电—电气设备—红外技术—设备状态监测—职业培训—教材②输电—电气设备—紫外技术—设备状态监测—职业培训—教材③变电所—电气设备—红外技术—设备状态监测—职业培训—教材④变电所—电气设备—紫外技术—设备状态监测—职业培训—教材 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 066087 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 6 月第一版 2013 年 6 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 9 印张 113 千字

印数 0001—3000 册 定价 45.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《国网技术学院培训系列教材》

编 委 会

主	任	赵建国	钱 平		
副	主 任	费耀山	程 剑	马放瑞	李勤道
委	员	康梦君	张效胜	范永忠	石 椿
		孙明晔	肖成芳	黄保海	马敬卫
		王立志	陈威斋	冯 靖	张进久
		马 骐	王立新	王云飞	于洲春
		杨 健	高建国	陈祖坤	商自申
		王付生	刘汝水	赵桂廷	刘广艳
编写组组长		费耀山			
副 组 长		黄保海	杨 健		
成 员		郑远平	战 杰	牛 林	高楠楠
		李金忠	孙庆生	黄 华	魏 旭
		邓洁清	李洪涛	聂鸿宇	陈玉峰
		贾志辉			



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

前 言

为贯彻落实国家电网公司“人才强企”战略，积极服务公司“三集五大”体系建设和智能电网发展对技能人才的需求，打造高素质的技术、技能人才队伍，提升企业素质、队伍素质，增强培训的针对性和时效性，创新国内一流、国际先进的示范性培训专业和标杆性培训项目，国网技术学院组织院内专职培训师、兼职培训师及国家电网公司系统内专业领军人才、生产技术和技能专家，结合国网技术学院实训设施和高技术、高技能员工培训特点，坚持面向现场主流技术、技能发展趋势的原则，编写了《国网技术学院培训系列教材》。

《国网技术学院培训系列教材》以培养职业能力为出发点，注重从工作领域向学习领域的转换，注重情境教学模式，把“教、学、做”融为一体，适应成年人学习特点，以达到拓展思路、传授方法和固定习惯的目的。

《国网技术学院培训系列教材》开发坚持系统、精炼、实用、配套的原则，整体规划，统一协调，分步实施。教材编写针对岗位特点，分析岗位知识、技术、技能需求，强化技术培训、结合技能实训、体现情景教学、覆盖业务范围、适当延伸视野，向受训学员提供全面的岗位成长所需要的素质、技术、技能和管理知识。编写过程中，广泛调研和比较分析现有教材，充分吸取其他培训单位在探索培养高素质的技术技能人才和教材建设方面取得的成功经验，依托行业优势，校企合作，与行业企业共同开发完成。

《国网技术学院培训系列教材》在经过审稿和试用后,已具备出版条件,将陆续由中国电力出版社出版。

本书为《国网技术学院培训系列教材 输变电设备红外、紫外状态监测诊断技术》分册。全书分为九个项目:项目一由国网技术学院郑远平、战杰、牛林、高楠楠编写;项目二由国网技术学院牛林、中国电力科学研究院李金忠编写;项目三由国网技术学院战杰、安徽省电力公司孙庆生编写;项目四由国网技术学院郑远平、上海市电力公司黄华编写;项目五由国网技术学院郑远平、江苏省电力公司魏旭、邓洁清编写;项目六由国网技术学院郑远平、北京市电力公司李洪涛编写;项目七由国网技术学院战杰、四川省电力公司聂鸿宇编写;项目八由国网技术学院郑远平、山东电力集团公司陈玉峰编写;项目九由国网技术学院郑远平、河北省电力公司贾志辉编写。全书由国网技术学院郑远平担任主编,国网技术学院杨健担任主审,山西省电力公司史晋生、浙江省电力公司陆伟民、中国电力科学研究院孙志锐、山东大学李可军、山东电力集团公司石岩等参审。

由于编者自身认识水平和编写时间的局限性,本系列教材难免存在疏漏之处,恳请各位专家及读者不吝赐教,帮助我们不断提高培训水平。

编 者

2013 年 5 月



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

目 录

前言

项目一 认识光	1
项目二 认识红外线	10
任务一 学习温度及其测量知识	10
任务二 学习热辐射概念理论	13
项目三 红外热像仪	26
任务一 认识红外热像仪	26
任务二 认识红外热像仪图像处理及测温系统	32
任务三 学习红外热像仪主要技术参数	34
任务四 使用红外热像仪	37
项目四 红外诊断的影响因素及对策	58
项目五 红外诊断方法及典型故障分析	63
任务一 学习红外诊断方法	63
任务二 分析典型故障	68
项目六 SF ₆ 气体泄漏红外成像诊断技术	84
项目七 红外智能在线监测系统	93
项目八 紫外检测与故障诊断	106

任务一 认识紫外成像仪.....	106
任务二 认识影响紫外检测的因素.....	112
任务三 评估紫外检测.....	117
任务四 分析电气设备放电典型故障.....	119
项目九 机载吊舱高压线路巡检.....	126

认识光

【项目描述】

本项目所述光的基本知识及理论包括：光的研究历史，光的本质，光的速度，光的反射与折射，光源分类；电磁波理论；光辐射及其涉及的物理量；光辐射测量的基本定律；光的基本特征。

【教学目标】

学习并掌握光的基本知识，了解光的研究历史，掌握光的性质，掌握电磁波的性质与电磁波谱的分类，掌握光辐射的分类，掌握光测量的基本定律和光的基本特征。

【任务实施】

一、光的研究历史

光学和力学一样，在古希腊时代就受到注意，光的反射定律早在欧几里得时代已经闻名，但在自然科学与宗教分离开之前，人类对于光的本质的理解几乎再没有进步，只是停留在对光的传播、运用等形式的理解层面上。17世纪，对这个问题已经开始存在“波动学说”和“粒子学说”两种声音：荷兰物理学家惠更斯在1690年出版的《光论》一书中提出了光的波动说，推导出了光的反射和折射定律，圆满的解释了光速在光密介质中减小的原因，同时还解释了光进入冰洲石时所产生的双折射现象；而英国物理学家牛顿则坚持光的微粒说，在1704年出版的《光学》一书中他提出，发光物体发射出以

直线运动的微粒子，微粒子流冲击视网膜就引起视觉，这也能解释光的折射与反射，甚至经过修改也能解释格里马尔迪发现的“衍射”现象。19世纪，英国物理学家麦克斯韦引入位移电流的概念，建立了电磁学的基本方程，创立了光的电磁学说，通过证明电磁波在真空中传播的速度等于光在真空中传播的速度，从而推导出光和电磁波在本质上是相同的，即光是一定波长的电磁波。20世纪，量子理论和相对论相继建立，物理学由经典物理进入了现代物理学。1905年，美国物理学家爱因斯坦提出了著名的光电效应，认为紫外线在照射物体表面时，会将能量传给表面电子，使之摆脱原子核的束缚，从表面释放出来，因此爱因斯坦将光解释成为一种能量的集合——光子。1925年，法国物理学家德布罗意又提出所有物质都具有波粒二象性的理论，即认为所有的物体都既是波又是粒子，随后德国著名物理学家普朗克等数位科学家建立了量子物理学说，将人类对物质属性的理解完全展拓了。综上所述，光的本质应该认为是“光子”，它具有波粒二象性。但这里的波的含义并不是如声波、水波那样的机械波，而是一种统计意义上的波，也就是说大量光子的行为所体现的波的性质。同时光具有动态质量，根据爱因斯坦质能方程可算出其质量。

光由光子为基本粒子组成，具有粒子性与波动性，即波粒二象性。光可在真空、空气、水等透明的物质中传播。人类肉眼所能看到的可见光只是整个电磁波谱的一部分。电磁波中可见光谱范围为 $390\sim 770\text{nm}$ ，其中 $1\text{nm}=1\times 10^{-9}\text{m}$ 。

二、光的基本知识

1. 光的速度

真空中的光速是宇宙中最快的速度，在物理学中用 c 表示。真空中的光速为 $c=2.997\ 92\times 10^8\text{m/s}$ 。空气中的光速大约为 $2.997\ 92\times 10^8\text{m/s}$ 。在计算中，真空或空气中的光速取为 $c=3\times 10^8\text{m/s}$ 。光在其他各种介质中的速度都比在真空中的小，光在水中的速度比真空中小很多，约为真空中光速的 $3/4$ ；

光在玻璃中的速度比在真空中小得更多,约为真空中光速的 $2/3$ 。

2. 光的反射与折射

光遇到水面、玻璃以及其他许多物体的表面都会发生反射。在反射现象中,垂直于镜面的直线叫做法线;入射光线与法线的夹角叫做入射角;反射光线与法线的夹角叫做反射角。反射光线、入射光线和法线都在同一个平面内;反射光线、入射光线分居法线两侧;反射角等于入射角。这就是光的反射定律。如果让光逆着反射光线的方向射到镜面,那么它被反射后就会逆着原来的入射光的方向射出。这表明,在反射现象中,光路是可逆的。凹凸不平的表面(如白纸)会把光线向着四面八方反射,这种反射叫做漫反射。

光线从一种介质斜射入另一种介质时,传播方向发生偏折,这种现象叫做光的折射。如果射入的介质密度大于原本光线所在介质密度,则折射角小于入射角;反之,若射入的介质密度小于原本光线所在介质密度,则折射角大于入射角。若入射角为 0 , 折射角为 0 , 则属于反射的一部分。此外,光的折射还在同种不均匀介质中产生,理论上,光可以从一个方向射入不产生折射,但因为分不清界线且介质一般分好几个层次又不是平面,故无论如何看都会产生折射。如在岸上看平静的湖水底部属于第一种折射,但看见海市蜃楼属于第二种折射。凸透镜和凹透镜这两种常见镜片所产生的效果就是因为第一种折射。

3. 光源的种类

光源可分为三种:

(1) 热效应产生的光。如太阳光、蜡烛等,此类光的颜色随着温度的变化而改变。

(2) 原子发光。如霓虹灯和荧光灯,都是由于灯管内壁涂抹的荧光物质被电磁波能量激发而产生光。此类光具有独自的基本色彩。

(3) 同步加速器发光。如原子炉发的光,携带着强大的能量。



三、电磁波

光是电磁波。根据麦克斯韦电磁场理论，若在空间某区域有变化电场（或者变化磁场），在邻近区域将产生变化的磁场（或者变化电场），这种变化的电场和变化的磁场不断地交替产生，由近及远以有限的速度在空间传播，形成电磁波，如图 1-1 所示。

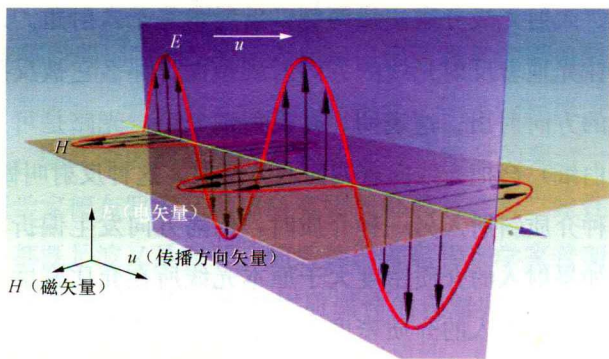


图 1-1 电磁波

1. 电磁波的性质

(1) 电磁波的电场 E 和磁场 H 都垂直于波的传播方向，三者相互垂直，所以电磁波是横波。电场、磁场与传播方向构成右手螺旋系。

(2) 沿给定方向传播的电磁波， E 和 H 分别在各自平面内振动，这种特性称为偏振。

(3) 空间各点 E 和 H 都作周期性变化，而且相位相同，即同时达到最大，同时减到最小。

(4) 任一时刻，在空间任一点， E 、 H 满足

$$\sqrt{\epsilon}E = \sqrt{\mu}H$$

式中 ϵ ——介电常数，F/m；

μ ——磁导率，H/m。



(5) 电磁波在真空中传播的速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

式中 ϵ_0 ——真空介电常数, $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$;

μ_0 ——真空磁导率, $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

介质中的传播速度为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

(6) 电磁波在介质的界面上发生反射、折射现象;在传播中出现干涉、衍射、偏振现象。

2. 电磁波谱的分类

电磁波包括的范围很广,从无线电波到光波,从 X 射线到 γ 射线,都属于电磁波的范畴,仅波长不同。目前已经发现并得到广泛利用的电磁波有波长长达 10^4 m 以上的,也有波长短到 10^{-5} nm 以下的。可以按照频率或波长的顺序把这些电磁波排列成图表,称为电磁波谱,如图 1-2 所示,光辐射仅占电磁波谱的一极小波段。

四、光辐射

以电磁波形式或粒子(光子)形式传播的能量,它们可以用光学元件反射、成像或色散,这种能量及其传播过程称为光辐射。一般认为其波长在 $10 \text{ nm} \sim 1 \text{ mm}$,或频率在 $3 \times 10^{11} \sim 3 \times 10^{16} \text{ Hz}$ 范围内。一般按辐射波长及人眼的生理视觉效应将光辐射分成紫外辐射、可见光和红外辐射三部分。一般在可见光到紫外波段波长用 nm 表示,在红外波段波长用 μm 表示。

1. 可见光

通常人们提到的“光”指的是可见光。可见光是波长在 $390 \sim 770 \text{ nm}$ 范围的光辐射,也是人视觉能感受到“光亮”的电磁波。当可见光进入人眼时,人眼的主观感觉依波长从长到短表现为红色、橙色、黄色、绿色、青色、蓝

色和紫色。

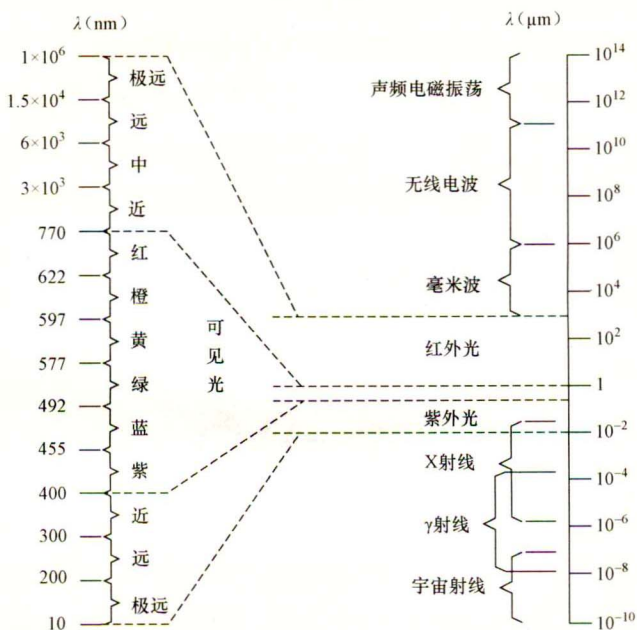


图 1-2 电磁波谱图

2. 红外辐射

波长在 $0.77 \sim 1000 \mu\text{m}$ 的光辐射是红外辐射，通常分为近红外、中红外和远红外三部分。

3. 紫外辐射

紫外辐射比紫光的波长更短，人眼看不见，波长范围是 $10 \sim 400 \text{ nm}$ 。细分为近紫外、远紫外和极远紫外。由于极远紫外在空气中几乎会被完全吸收，只能在真空中传播，所以又称为真空紫外辐射。

紫外辐射源分人工源和自然源两种，人工源有太阳模拟器和高压汞等，太阳则是紫外辐射的唯一自然源。由于只有波长大于 200 nm 的紫外辐射，才能在空气中传播，所以人们通常讨论的紫外辐射效应及其应用，只涉及 $200 \sim$

400nm 范围内的紫外辐射。为研究和应用之便,常将紫外辐射分为 A 波段(400~315nm)、B 波段(315~280nm)和 C 波段(280~200nm),并分别称为 UVA、UVB 和 UVC。

五、光辐射测量的基本定律

对于光辐射的探测和计量,存在辐射度单位和光度单位两套不同体系。

在辐射度单位体系中,辐通量(又称为辐射功率)或者辐射能是基本量,是只与辐射客体有关的量。其基本单位是 W 或者 J。辐射度学适用于整个电磁波段。

光度单位体系是一套反映视觉亮暗特性的光辐射计量单位,被选作基本量的不是光通量而是发光强度,其基本单位是 candela(坎德拉)。光度学只适用于可见光波段。

以上两类单位体系中的物理量在物理概念上是不同的,但所用的物理符号一一对应。为了区别起见,在对应的物理量符号标角标“e”表示辐射度物理量,角标“v”表示光度物理量。

1. 辐射量

(1) 辐射能。辐射能是以辐射形式发射或传输的电磁波(主要指紫外、可见光和红外辐射)能量。辐射能一般用符号 Q_e 表示,单位是 J。

(2) 辐射通量。辐射通量 Φ_e 又称为辐射功率,为单位时间内流过的辐射能量,单位为 W 或 $J \cdot s$,其公式为

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

(3) 辐射出射度。辐射出射度 M_e 是用来反映物体辐射能力的物理量。定义为辐射体单位面积向半空间发射的辐射通量,单位为 W/m^2 ,即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$$

(4) 辐射强度。辐射强度 I_e 为点辐射源在给定方向上发射的单位立体角



内的辐射通量, 单位为 $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$ (瓦特·球面度⁻¹), 即

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$$

(5) 辐射亮度。辐射亮度 L_e 为面辐射源在某一给定方向上的辐射通量, 单位为 $\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ [瓦特/(球面度·米²)], 即

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS \cos\theta}$$

(6) 辐射照度。在辐射接受面上的辐射照度 E_e 定义为照射在面元 dA 上的辐射通量与该面元的面积之比, 单位为 W/m^2 , 即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$$

(7) 单色辐射度量。对于单色光辐射, 同样可以采用上述物理量表示, 只不过均定义为单位波长间隔内对应的辐射度量, 并且对所有辐射量 X 来说, 单色辐射度量 X_e 与辐射度量 $X_{e,\lambda}$ 之间均满足

$$X_e = \int_0^\infty X_{e,\lambda} d\lambda$$

2. 光辐射测量基本定律

(1) 朗伯余弦定律。具体见项目二中任务二的辐射的空间分布规律。

(2) 距离平方反比定律。在点光源的垂直照射下, 被照射物体表面的照度与光源的发光强度成正比, 与光源至被照射物体的表面距离的平方成反比, 其公式为

$$E = I/l^2$$

式中 E ——照度;

I ——发光强度;

l ——光源至被照物体表面的距离。

六、光的基本特征

所有的光, 无论是自然光或人工室内光, 都有以下特征:



(1) 明暗度。它表示光的强弱，随光源能量和距离的变化而变化。

(2) 方向。只有一个光源时，方向很容易确定。而有多光源时，诸如多云天气的漫射光，方向就难以确定，甚至完全迷失。

(3) 色彩。光随不同的光源及其穿越的物质的不同而变化出多种色彩。自然光与白炽灯光或电子闪光灯作用下的色彩不同，而且阳光本身的色彩也随大气条件和一天时间的变化而变化。

对光的基本知识有了认识后，下面将介绍红外辐射、紫外辐射的基本知识和理论，并引出红外诊断和紫外诊断在电力系统中的应用。