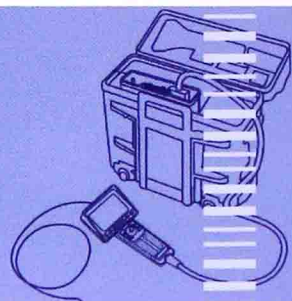


中国民航无损检测人员培训教材 **CANDTB**

航空器目视检测

■ 民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会 编

Hangkongqi
Mushi Jiance



中国民航出版社

014059193

V267
36

中国民航无损检测人员培训教材

航空器目视检测

民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会 编



V267
36

中国民航出版社



北航

C1746440

01020310

图书在版编目 (CIP) 数据

航空器目视检测/民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会编. —北京: 中国民航出版社, 2014. 3
中国民航无损检测人员培训教材
ISBN 978-7-5128-0169-1

I. ①航… II. ①民… III. ①航空器-无损检验-目
测法-技术培训-教材 IV. ①V267

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 024605 号

航空器目视检测

民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会 编

责任编辑 王迎霞
出 版 中国民航出版社 (010) 64279457
地 址 北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼 (100028)
排 版 中国民航出版社录排室
印 刷 北京金吉士印刷有限责任公司
发 行 中国民航出版社 (010) 64297307 64290477
开 本 787 × 1092 1/16
印 张 9.75
字 数 220 千字
版 印 次 2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5128-0169-1
定 价 52.00 元

官方微博: <http://weibo.com/phcaac>

淘宝网店: <http://shop106992650.taobao.com>

E-mail: phcaac@sina.com

前 言

民用航空器集中了当今最先进的工业技术，对安全和可靠性有极高要求。无损检测在保证航空器安全运行和维修质量方面发挥着关键作用，目视检测是其中重要的方法之一。本书是专门为民航目视检测人员培训编写的教材。

在此之前，民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会已经组织编写出版了《航空器无损检测综合知识》、《航空器磁粉检测》、《航空器渗透检测》、《航空器涡流检测》、《航空器超声检测》和《航空器射线检测》六本教材，现新增《航空器目视检测》和《航空器红外热像检测》两本，使民航无损检测人员培训教材增加至八本。

根据民航标准 MH/T3019《航空器无损检测 目视检测》规定，航空器目视检测人员自 2009 年纳人民航无损检测人员管理范畴，与其他方法的无损检测人员一样进行培训和资格鉴定与认证。事实证明，对民航目视检测人员，特别是从事发动机孔探检测的人员在拓宽知识面、加深基本原理的理解、系统掌握专业检测技能和规范操作方面起到了良好效果，促进了民航目视检测整体水平的提高。

本书在《航空器目视检测》（试用版）的基础上，历经四年八期培训班的教学实践，多次召开教学研讨会，听取授课教员和学员的意见，不断修改完善，最终形成本教材，现正式出版。

《航空器目视检测》一书共分 9 章，其中第 1 章、第 5 章、第 8 章、第 9 章由陈江明、范海清、刘兆江编写，第 2~4 章、第 7 章由孟铁军、王进明、张青元编写，第 6 章由顾海涛编写，全书由陈江明统稿，熊伟、孟铁军校对。

特别感谢东航工程技术公司西安基地在本书编写过程中给予的大力支持。

由于编写、审核人员水平有限且时间紧张，教材中难免有错误和不足之处，欢迎读者指正。

民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会

2013 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 目视检测的发展	1
1.2 目视检测的特点	2
1.3 目视检测的应用	2
第 2 章 目视检测的物理基础	4
2.1 光学基础	4
2.1.1 光和光线	4
2.1.2 光的特性	5
2.1.3 光学中的基本物理量	6
2.1.4 光的反射	11
2.1.5 光的折射	13
2.1.6 光的吸收和散射	21
2.2 视力	22
2.2.1 人眼解剖学与生理学特点及图像形成	22
2.2.2 人眼看清物体的条件	25
2.2.3 光强与颜色的观察及分辨力	25
2.2.4 夜盲和昼盲	30
2.3 目视检测人员的视力检查	30
2.3.1 近视力检查和远视力检查	31
2.3.2 辨色力检查	32
第 3 章 目视检测基本原理	33
3.1 直接目视检测	33
3.2 间接目视检测	35

3.2.1	刚性内窥镜成像原理	35
3.2.2	刚性内窥镜的光学成像系统	35
3.2.3	检查用内窥镜光学系统	39
3.3	纤维内窥镜成像原理	41
3.3.1	光导纤维的导光原理	41
3.3.2	光学纤维导像原理	45
3.4	电子内窥镜成像原理	47
3.4.1	CCD的基本工作原理	47
3.4.2	电荷的转移过程	48
3.4.3	彩色CCD图像处理器	49
3.4.4	图像传感器的主要特性	50
第4章	目视检测设备	51
4.1	直接目视检测设备	51
4.1.1	手电筒	51
4.1.2	放大镜	52
4.1.3	反光镜	52
4.1.4	度量工具	53
4.2	间接目视检测设备	55
4.2.1	刚性内窥镜	56
4.2.2	柔性内窥镜	57
4.3	光源	59
4.4	内窥镜检测的辅助器材	60
4.4.1	导管	60
4.4.2	温度测量装置	60
4.4.3	发动机转动工具	60
4.5	内窥镜设备的使用注意事项	60
4.5.1	光学内窥镜的正确使用	60
4.5.2	视频内窥镜系统的正确使用	61
4.5.3	安全防护	61
4.6	其他内窥镜设备简介	62
4.6.1	内窥镜抓取工具	62
4.6.2	内窥镜打磨工具	62
4.6.3	蛇眼视频诊断工具	62

4.6.4 接触式测量内窥镜	63
4.6.5 内窥镜无损检测	64
第5章 内窥镜检测技术	67
5.1 内窥镜检测的应用范围	67
5.1.1 内窥镜检查发动机	67
5.1.2 内窥镜检查飞机结构	68
5.1.3 内窥镜打磨修理	68
5.1.4 取出内部异物	68
5.1.5 内窥镜无损检测	68
5.2 内窥镜检测的主要影响因素	68
5.2.1 内窥镜检测人员	69
5.2.2 内窥镜检测设备	70
5.2.3 检测对象	71
5.2.4 检测工艺	72
5.3 内窥镜检测的实施	72
5.3.1 内窥镜检测的一般程序	72
5.3.2 内窥镜检测的注意事项	74
5.3.3 内窥镜的选用	74
5.4 内窥镜测量技术	75
5.4.1 视频内窥镜测量的特点	75
5.4.2 单物镜阴影测量法	75
5.4.3 立体测量法	79
5.4.4 激光测量法	81
5.4.5 比较测量法	82
5.4.6 3D 相位测量法	83
5.4.7 测量精度相关因素的影响	85
第6章 航空发动机原理及结构	87
6.1 航空发动机的分类	87
6.2 喷气推进原理	88
6.3 燃气涡轮发动机的工作循环和气流	89
6.4 燃气涡轮发动机的压气机	92
6.5 燃气涡轮发动机的燃烧室	96

6.6	燃气涡轮发动机的涡轮	100
6.7	发动机的内部空气系统	102
第7章	内窥镜在民航发动机维修中的应用	105
7.1	内窥镜检测常见损伤及其评估	105
7.1.1	内窥镜检测常见损伤	105
7.1.2	损伤评估	110
7.2	内窥镜检测记录	111
7.3	发动机在役内窥镜检查	113
7.3.1	发动机内窥镜检查分类	113
7.3.2	发动机内窥镜检查的准备工作	113
7.3.3	发动机内窥镜检查	116
7.4	发动机内窥镜监控	120
7.5	辅助动力装置 (APU) 内窥镜检查	121
7.5.1	辅助动力装置结构简介	121
7.5.2	辅助动力装置发动机内窥镜检查	122
7.5.3	辅助动力装置内窥镜检查注意事项和特点	122
7.6	内窥镜打磨修理	122
7.6.1	实施依据和适用性	122
7.6.2	高压压气机转子叶片打磨修理程序简介	124
7.7	飞机结构的内窥镜检查	124
7.7.1	飞机结构的内窥镜检查特点	124
7.7.2	飞机结构的内窥镜检查实例	125
第8章	标准 and 安全管理	130
8.1	国内目视检测标准体系介绍	130
8.2	国外目视检测标准体系介绍	131
8.3	民航目视检测标准介绍	131
8.4	安全管理体系 (SMS) 概述	132
8.4.1	定义	132
8.4.2	系统与工作分析	133
8.5	内窥镜检测中的风险管理	133
8.5.1	危险源识别	133

8.5.2	危险源的范围	133
8.5.3	危险源识别的渠道	133
8.5.4	目前已识别的危险源	133
8.5.5	风险分析与评价实例	134
第9章	内窥镜检测实际操作	137
9.1	内窥镜设备分辨率的实验	137
9.1.1	实验目的	137
9.1.2	实验仪器及器材	137
9.1.3	实验方法、步骤及记录	137
9.2	光学内窥镜日常检查实验	138
9.2.1	实验目的	138
9.2.2	实验仪器及器材	139
9.2.3	实验方法、步骤及记录	139
9.3	视频内窥镜的实验	140
9.3.1	实验目的	140
9.3.2	实验仪器及器材	140
9.3.3	实验方法、步骤及记录	140
9.4	内窥镜测量技术实验	141
9.4.1	实验目的	141
9.4.2	实验仪器及器材	141
9.4.3	实验方法、步骤及记录	141
9.5	内窥镜测量实际工作现场模拟实验	142
9.5.1	实验目的	142
9.5.2	实验仪器及器材	142
9.5.3	实验方法、步骤及记录	142
9.6	内窥镜测量损伤的判断实验	142
9.6.1	实验目的	142
9.6.2	实验仪器及器材	142
9.6.3	实验方法、步骤及记录	142
参考文献	144

第1章 绪论

目视检测是重要的无损检测方法之一。对于表面缺陷的检查，即使采用了其他无损检测方法（如磁粉、渗透、涡流等），但目视检测仍然被广泛用作有效补充。典型的目视检测是在电磁波谱的可见光范围内，对试件表面做直接观察。对于不同类型的表面缺陷可采取不同的目视检测手段。本章主要叙述了目视检测的发展和特点。

1.1 目视检测的发展

目视检测（visual testing 简称 VT），是指仅用人的肉眼或肉眼与不同的放大装置相结合对试件表面进行直接观察。

目视检测是最基本的和最常用的无损检测方法，它适用于多种材料和多种产品。确定被检工件的外观特性，其中包括尺寸的一致性，不连续性的存在，一般的装配和磨损，以及简单的表面一致性。可以在产品的制造阶段或产品的在役使用阶段进行直接或间接方法的目视检测。

目视检测是无损检测领域中首先被采用的方法，同时也是无损检测中较晚被承认的方法。它作为一门独立的检测方法，在工业应用中常常得不到应有的重视。1854年3月，美国康涅狄格州哈特福德市某汽车工厂发生锅炉爆炸，造成21人死亡、50人受伤的严重安全事故，因此康涅狄格州在之后的10年内，推出了要求每年使用目视检测方法检查锅炉的法令。自此之后，企业进行其他无损检测前经常要求先完成目视检测工作。美国焊接协会（AWI）对于焊接检查员资格认证中明确了焊接质量目视检测的课程、方法、技术的要求。20世纪80年代开始，美国机械工程师协会（ASME）建立了包括120小时正式培训的在役目视检测规程——ASME SECTION XI，并制定了主要用于锅炉和压力容器的相关标准。美国无损检测学会（ASNT）也将目视检测方法的要求纳入无损检测人员资格鉴定规程（SNT-TC-1A）中。

ASME第5部分第9节中将目视检测进行了分类，分为直接目视（direct visual）检测和间接目视（remote visual）检测。直接目视检测方法是生活中经常用到的，而

间接目视检测常被划分为3类：内窥镜（borescope）^①、光纤内窥镜（fiberscope）及视频内窥镜（video technology）。这3类间接目视检测方法是按照时间顺序发展的，早期使用中空的管子和镜子组成的内窥镜（borescope）也称为 endscope，这种内窥镜用于检查枪炮的内部，之后发展成由一系列透镜组成的硬杆镜；随着光纤技术的出现，玻璃光纤束和纤维光图像的传输发展成为光纤内窥镜（fiberscope）；人们通过目镜长时间检查经常会导致眼睛疲劳，然后出现了使用照相机和闭路电视等将眼睛观察到的图像传输到外部显示装置上。间接目视检测现今发展到使用视频技术为主，能够实现直径小、图像质量高的视频内窥镜（video technology）。

1.2 目视检测的特点

目视检测是无损检测方法中最基本的方法，检测人员依据程序进行目视检测的范围，可以是试件的外观简单检查，也可以是使用精密量具进行复杂的检查测量，确保工件符合验收标准。在进行目视检测时，因环境条件不同、检查技术要求不同、视线可达性和局限性及所要达到的检查目的不同，还可能借助其他工具如：放大镜、反光镜、内窥镜等实现目视检测。影响目视检测质量的因素有：检测仪器的质量、光线条件、处理检测数据的能力和检测人员训练水平和对细节的重视程度等。

目视检测方法的优点：

操作简便、直观、成本低、检查范围广以及可发现明显的表面缺陷如：裂纹、机械磨损、腐蚀、压伤、断裂、永久变形、保护层脱落、零件上的沉积物、系统的渗漏等；

目视检测方法的缺点：

只能进行表面检测，必要时需进行表面清理。

分辨率低，通常只能发现宽度较大的裂纹，宽度小于0.01mm的裂纹不易发现。检查时需要良好的照明条件。通常目视检测的光照度应不小于160 lx，局部目视检测时光照度应不小于500 lx。

1.3 目视检测的应用

目视检测一般情况下工具简单，检测结果直观，易于理解和掌握，不受检测产品的材质、结构、形状、位置、尺寸等因素的影响，所以被广泛使用在产品制造、安装、使用的各个阶段。随着视频内窥镜技术的使用和发展，现在的目视检测可以使用特种探头、特殊测量、实时图像传输并与电脑结合，能够提供更清楚的图像质量，使目视检测更适用于各行业的质量控制、日常维护和远程遥控等检测领域。其中，间接目视检测更

^① borescope 在当时仅指硬杆镜 rigid borescope。

是得到了广泛应用：

在航空航天领域，用于检查主火箭发动机，检查飞行发动机的防热罩，监控固体火箭燃料加工操作过程等；

在发电设备方面，用于核电站热交换管道检查，锅炉管及蒸汽轮机内部工作状态检查，水力发电涡轮机内部变换器检查；

在民用航空器方面，用于发动机本体部件日常检查，飞机结构内部检查，飞机零部件状态检查，飞机结构内留异物检查；

质量控制方面，用于不锈钢桶焊缝检查，船用锅炉内管检查，制药管道焊缝整体检查，内燃机及内部部件检查和对水下管道系统检查；

有些高技术的管道焊接检查系统还经常结合其他无损检测方法，例如远程磁性管道爬行器，在视频检查的同时配置了涡流或超声探头协同进行焊接质量的检测。

第2章 目视检测的物理基础

目视检测与可见光的光学原理密切相关，在学习目视检测技术前，需要学习和掌握相关的物理基础。

本章将对可见光及可见光的成像原理作简要介绍。

2.1 光学基础

2.1.1 光和光线

光和人类的生产生活有着十分密切的关系，人的视觉要依靠光，人类的一切活动几乎都离不开光，人们常说“耳听为虚，眼见为实”，正反映了人对光的重要作用的认识。

人类通过实践积累了有关光的丰富的感性认识，并且很早就开始研究光。对光的本性的认识从牛顿的微粒学说，发展到惠更斯的波动学说，麦克斯韦根据电磁波的性质证明，光实际上是电磁波，从此人类对光的本性有了正确和全面的认识。

现代物理认为，光是一种具有波粒二象性的物质，即光既具有“波动性”又具有“粒子性”，只是在一定条件下某种性质显得更为突出。

光波是电磁波的一种，波长在 $400 \sim 760\text{nm}$ ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m} = 10\text{\AA}$) 的电磁波能够被人眼感觉，称为“可见光”，超出这个范围人眼就无法感觉得到。不同波长的光产生不同的颜色感觉。同一波长的光，具有相同的颜色，称为“单色光”。由不同波长的光混合而成的光称为“复色光”，不同颜色光的波长范围如图 2.1 所示。白光是由各种不同波长的光混合而成的一种复色光。

把光的概念和几何中的点、线、面有机地联系起来，就形成了几何光学的几个基本概念。光源是一个光的辐射体，当光源的大小和其辐射能的作用距离相比可以忽略不计时，就称之为发光点，发光点被认为是一个既无体积又无大小的几何点。任何被成像的物体都是由无数发光点所组成的。用一条表示光传播的线来代表光，称之为光线，光线是一条携带能量的几何线。这种发光点和光线实际上是不存在的，因为它们的能量密度为无限大。但是，发光点和光线概念的几何化可以使人们处理问题大为简化，使人们用

简单的数学方法和图解法就可以解决十分复杂的光能传播和成像问题。

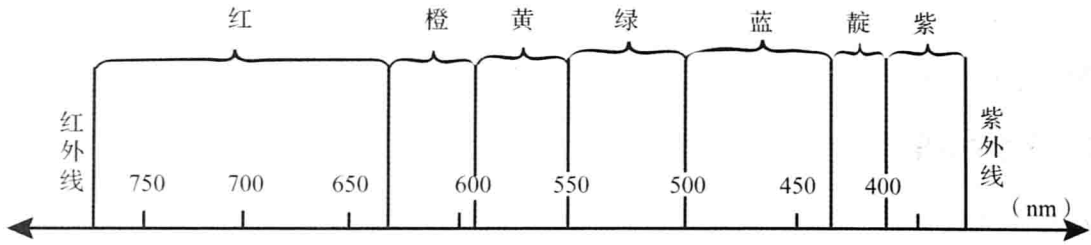


图 2.1 不同颜色光的波长范围

2.1.2 光的特性

1. 光源

眼睛之所以能看见物体，是由于物体对我们的眼睛引起光的感觉。像太阳、电灯等能够发光的物体，叫做光源或发光体，太阳是最大的光源。不发光的物体，只要受到发光体的照射，能反射出光来引起眼睛的感觉，我们同样可以看见。物体所以能发光，多半是由于物体的温度很高，就是所谓的热发光。金属和碳加热到 500°C 时发出暗红色的光，温度再升高光色就变黄，加热到 1500°C 时成白炽。太阳表面的温度大约是 6000°C ，内部温度大约是 1500 万 $^{\circ}\text{C}$ ，所以发光强。大多数发热的化学反应也同时发光，但是化学发光不一定是热发光。其他如生物发光、稀薄气体放电时的发光以及荧光和磷光等也都不是热发光。

2. 光的传播

光在各向同性的均匀介质中是沿着直线方向传播的，这就是光的直线传播定律，这一定律是大量宏观现象的总结。精密的天文测量、大地测量和其他许多测量中，都把这一定律看成是精确的。针孔所形成的像上下倒置、左右对调，就是光线沿直线传播所造成的现象。针孔越小，所成的像越清楚，但是，当针孔直径小到 $1/100\text{mm}$ 时，像又模糊不清了，这是由于孔的大小接近于光的波长，因而发生衍射现象，也就是说光在这种情况下不再是直线传播的。

3. 光的速度

各色光在真空中具有完全相同的传播速度， $C \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。光在空气中的传播速度略小于真空中的速度，但相差无几也可当作是 $C \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。光在其他物质中传播的速度都小于在真空中的传播速度，例如光在水中的传播速度大约是在真空中的四分之三，在晶体中光速大约是其真空中的三分之二。

$$C = \lambda f \quad (2-1)$$

式中： C ——光速（m/s）；

λ ——波长（m）；

f ——频率（Hz）。

光在透明介质中传播时频率不变，光速随波长的变化而变化。

2.1.3 光学中的基本物理量

发光体实际上是一个电磁波辐射源，研究电磁波辐射的学科为“辐射度学”，研究可见光的学科称为“光度学”。

1. 光通量

光的传播过程也是能量的传递过程，发光体在发光时失去能量，而吸收光的物质就增加能量。光源发出的光能向周围的所有方向辐射，在单位时间里通过某一面积的光能，叫做通过这个面积的辐射通量。各色光的频率不同，眼睛对各色光的敏感度也有所不同，即使各色光的辐射通量相等，在视觉上并不能产生相同的明亮程度。在七色光中，黄绿光有最大的激起明亮感觉的本领。按照产生明亮程度来估计辐射通量的物理量叫做光通量，光通量的国际单位是流明（lm）。其定义是纯铂在熔化温度（约1770℃）时，其1/60cm²的表面面积于1球面度的立体角内所辐射的光量。从点光源发出的光照度遵守平方反比律。

一个辐射体或光源发出的总光通量与总辐射能通量之比称为光源的发光效率。它表示每瓦辐射通量所产生的光通量。对于用电能点燃的光源，用每瓦耗电功率所产生的流明数作为其发光效率。例如，一个100W的钨丝灯泡所发出的总光通量为1400lm，则其发光效率为14lm/W。表2-1列出了一些光源的发光效率。

表 2-1 常用光源的发光效率

（单位：lm/W）

光源名称	钨丝灯	卤素钨灯	荧光灯	氙气灯	碳弧灯	钠光灯	高压汞灯	镝灯
发光效率	10~20	30	30~60	40~60	40~60	60	60~70	80

2. 发光强度

光源发光的强弱，用发光强度来描述，发光强度简称光度，就是评价光源有多亮。点光源向各个方向发出光能，在某一方向上划出一个微小的立体角 $d\omega$ ，则在此立体角的范围内光源发出的光通量 $d\Phi$ 与 $d\omega$ 的比值称为点光源的发光强度（图2.2），即：

$$dI = d\Phi/d\omega \quad (2-2)$$

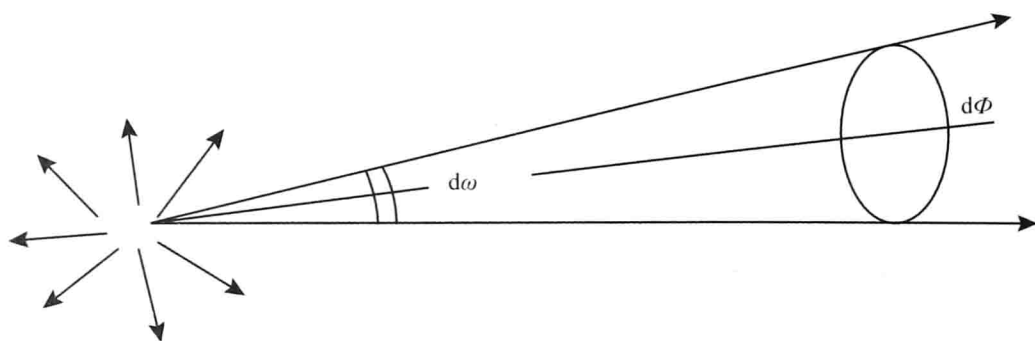


图 2.2 点光源发光强度定义示意图

对于均匀发光的光源其 I 为常数，此时有：

$$I = \Phi / \omega \quad (2-3)$$

式中： I ——发光强度 (cd)；

Φ ——光通量 (lm)；

ω ——立体角 (sr)。

由于点光源周围整个空间的总立体角为 4π ，故这种点光源向四周发出的总光通量为 $\Phi = 4\pi I$ 。发光强度的单位是基本计量单位之一，用坎德拉 (cd) 表示。1979 年第十六届国际度量衡会议规定，1 坎德拉是光源在给定方向上，在每球面立体角内发出 $1/683 = 0.00145 \text{ W}$ 、频率为 $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ 的单色辐射（即波长为 555 nm 的单色光）通量时的发光强度。

3. 照度

照射到物体表面上的光通量，也就是照明物体的光通量，我们可以利用它来观察物体表面，所以照度在目视检测中是个非常重要的概念。物体单位面积上所得到的光通量称为物体表面上的光照度，简称照度，定义示意图 2.3。在均匀照明情况下，可用公式表示为：

$$E = \Phi / S \quad (2-4)$$

式中： E ——照度 (lx)；

Φ ——光通量 (lm)；

S ——面积 (m^2)。

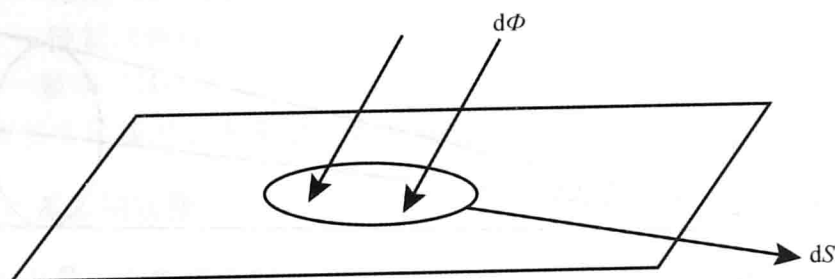


图 2.3 照度定义示意图

照度的单位是勒克斯，国际代号为 lx，1 勒克斯等于 1m^2 面积上得到 1lm 的光通量。即 $1\text{lx} = 1\text{lm}/\text{m}^2$ 。表 2-2 列出了一些情况下所达到或所需要的光照度。

表 2-2 有关情况下的光照度

(单位: lx)

晚间无月光时的光照度	3×10^{-4}	读书必需的光照度	50
月光下的光照度	0.2	精细工作时间所需的光照度	100 ~ 200
晴朗夏天室内的光照度	100 ~ 500	摄影棚内所需的光照度	10000
阳光直射时室外的光照度	100000	眼睛能感受的最低光照度	1×10^{-9}

某一发光物体表面上微小面积范围内所发出的光通量与这一面积之比称为这一微小面积上的光出射度。若均匀发光表面发出的光通量为 Φ ，则：

$$M = \Phi/S \quad (2-5)$$

式中： M ——发光体的光出射度 (lx)；

S ——发光体的表面积 (m^2)；

Φ ——发光体发出的光通量 (lm)。

可见，光出射度与光照度有相同的形式。这表示两者有相同的含义，其差别仅在于光照度公式中的 Φ 是表面接收的光通量，而光出射度公式中的 Φ 是从表面发出的光通量。因此，光出射度的单位与光照度的单位一样，也为勒克斯。

除自身发光的光源之外，被照明的表面会反射或散射出入射在其表面上的光通量，称之为二次光源。二次光源的光出射度与受照的光照度之比称为表面的反射率。可表示为：

$$\rho = M/E \quad (2-6)$$