



工业和信息化部“十二五”规划教材

光电信息科学与工程类专业规划教材

光电成像技术与系统

白廷柱 等编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

工业和信息化部“十二五”规划教材
光电信息科学与工程类专业规划教材

光电成像技术与系统

白廷柱 等编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为工业和信息化部“十二五”规划教材。

本书以光电成像技术的发展历程为脉络,从人眼对图像的认识机理出发,描述和分析了人类为达成符合人眼观察的灰度点阵要求所需要的四个环节(转换、解析、传输、显示),以及迄今为止为达成上述四个环节而产生的各类相关技术及对应的光电成像器件,进而介绍了利用这些器件与技术以及相关技术形成的各类光电成像系统、光电成像系统性能的评价方法等内容。本书重点描述了各种成像技术的基本思想,基于物理学的基础理论和方法分析了光电成像技术、器件和系统各环节的物理过程,以及典型光电成像系统的构成及应用等。

本书可作为光电信息科学与工程专业的教材,也可作为其他相关专业和从事光电成像技术研究的研究生的教材或参考教材,以及从事相关研究的科技人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

光电成像技术与系统 / 白廷柱等编著. —北京: 电子工业出版社, 2016.1

光电信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-27893-8

I. ①光… II. ①白… III. ①光电效应—成像原理—高等学校—教材②光电效应—成像系统—高等学校—教材 IV. ①O435.2②O482.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第307630号

责任编辑: 韩同平 特约编辑: 俞敦斐

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 28 字数: 850千字

版 次: 2016年1月第1版

印 次: 2016年1月第1次印刷

定 价: 69.80元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlbs@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

本书为工业和信息化部“十二五”规划教材，也是北京理工大学国家精品课程“光电成像原理与技术”的配套教材，是在作者编著的北京市高等教育精品教材《光电成像原理与技术》的基础上，依据光电信息科学与工程专业规定的教学内容范畴重新编写的。

本书以人类社会的光电成像需求为牵引，以人类社会发展光电成像技术的时间顺序为主线，以表现不同光电成像技术的器件为核心，以典型的光电成像系统分析和设计为应用，重新梳理了《光电成像原理与技术》一书的主要内容，进行了与时俱进的新技术、新原理和新器件等方面的补充完善。鉴于本书在重新编写过程中突出了用于实现光电成像的技术思想，故采用“光电成像技术与系统”为本书的书名。

光电成像技术是适应信息社会需求而迅速发展的高新技术，是光电技术发展的最高阶段，属于电子信息类光电信息科学与工程分支学科。本教材内容的选取力求全面反映当代光电成像领域的主要技术内涵和技术现状，教材内容的编排尽量考虑适应教学规律的要求。教材的总思路是为学生和有关读者提供一座了解光电成像的成像原理、技术范畴和系统应用的桥梁。

随着相关学科的进步和发展，光电成像技术领域也不断地涌现出新思想、新技术和新器件。因此，要在有限的篇幅内系统、深入、完整、全面地描述光电成像技术的进展是不现实的，本教材只能从便于读者学习的角度出发，通过教材引导读者学习有关光电成像技术的基本思想、基本理论、基础知识，讨论基于现有光电成像技术的典型光电成像器件结构、工作原理、性能指标，分析基于典型光电成像器件的光电成像系统实现途径、设计思想和设计要点等。

本书共 10 章。

第 1 章围绕人眼视觉的局限性，介绍了拓展人眼视觉的技术途径及发展应用现状。描述了人眼观察事物的基本要求和所受限制，分析了图像的实际物理构成和实现这些构成所必需的技术环节。同时，对比传统光学成像说明了光电成像的特性。

第 2 章以传统的电子束空间扫描成像技术为主线，介绍了电真空摄像器件的构成、工作原理、种类、特性及电子枪的相关知识。

第 3 章以基于电磁场的电子光学聚焦成像技术为主线，介绍了以像增强器、变像管为代表的像管的构成、工作原理、种类、特性及其他相关知识。

第 4、5 章以解决电子束空间扫描带来的问题而发展起来的电子驱动扫描成像技术为主线，分别介绍了以 CCD、CMOS 器件和红外焦平面探测器件为代表的各种器件的构成、工作原理、种类、特性及其他相关知识。这两章的内容为本书的重点，因为其基本涵盖了目前人们正在广泛使用的各种固体光电成像器件及其发展应用现状。

第 6 章以解决光电成像器件光敏元数量不足情况下实现光电成像的光机扫描技术为主线，介绍了光机扫描成像原理、各种光机扫描元件、各种扫描方式及其新的应用等。

第 7 章介绍了电视扫描、视频信号、全电视信号等的相关规定，电视摄像系统的构成、相关要求和部分典型电视成像系统，以及典型电视显示器的构造、工作原理和性能指标等。

第 8、9 章介绍了针对第 3 章的像管和第 5 章的红外探测器的微光夜视系统和红外热成像系统，分析了这些系统的特殊构成、特殊性能要求与评价、主要设计思想和设计原则，并给出了设计示例。

第 10 章对光电成像技术与系统应用过程中的相关影响因素进行了介绍和分析，讨论了评价光电成像系统作用距离性能的主要方法和作用距离预测示例。

本教材兼顾了从事光电成像技术专业研究的科技工作者的需要，内容涉猎广泛，并在相应章节中编入了国内外有关的技术资料和数据表，以供研究生和有关专业人员参考。

本教材的参考学时为 64 学时（内容可扩展至 96 学时）。为了使学生了解和掌握有关的理论知识，培养理论联系实际的能力，为今后从事本领域的研究工作奠定必要的基础并适应新技术的发展，本教材在编写过程中，尽力收集了一些新的科技成果，增补了一些最新器件和系统的内容。

本书凝结了北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室和光电成像与信息工程研究所全体教师多年的教学实践和科研积累，也充分吸收了国内外光电成像技术领域同行们的经验和工作成果，因此，本书也是以上所有相关科技工作者辛勤研究的共同结晶。

本书第 1~7 章由北京理工大学白廷柱教授编写，第 8、9 章由军械工程学院刘杰博士编写，第 10 章由军械工程学院武东生博士编写，全书由白廷柱统稿。

本书承蒙北京理工大学许廷发教授和装甲兵工程学院张智诠教授主审，在此谨向他们致以诚挚的谢意，并向本书参考文献的各位作者、译者表示衷心的感谢。

因时间所限，加之光电成像是综合广泛的高新技术学科，正处于迅速发展的进程中，因此，要编出一本全面、完整、成熟的教材乃是作者之力所不能及的。此外，限于作者的时间、学识与水平，书中缺欠、遗漏之处在所难免，对此，诚恳希望广大读者予以批评指正。

作者

(tzhbai@bit.edu.cn)

目 录

第 1 章 绪论	(1)	2.5.2 电子枪工作原理	(61)
1.1 关于光电成像技术	(1)	2.5.3 交叠点空间电荷效应与层流枪	(62)
1.1.1 光电成像技术对人眼视觉光谱域的拓展	(2)	2.5.4 电子枪中的准直透镜	(63)
1.1.2 光电成像技术的应用领域	(4)	习题和思考题	(64)
1.2 人眼的视觉特性与模型	(6)	第 3 章 电子光学聚焦成像技术	(65)
1.2.1 人眼的构造	(6)	3.1 像管成像的物理过程	(65)
1.2.2 人眼的视觉特性	(7)	3.1.1 辐射图像的光电转换	(65)
1.3 图像与实现图像的必需环节	(12)	3.1.2 电子图像的能量增强	(66)
1.3.1 图像及其物理表述	(12)	3.1.3 电子图像的发光显示	(66)
1.3.2 图像的解析与量化	(13)	3.2 像管的结构、分类与制造	(67)
1.3.3 实现图像的必需环节	(13)	3.2.1 像增强器(一代像增强器)	(67)
1.4 光电成像的特性	(14)	3.2.2 带有微通道板的像增强器	(69)
1.4.1 光电成像转换特性	(14)	3.2.3 负电子亲和势光阴极像增强器	(70)
1.4.2 光电成像的时间特性	(15)	3.2.4 红外变像管、紫外变像管、X 射线变像管和 γ 射线变像管	(70)
1.4.3 光电成像的噪声特性	(17)	3.2.5 像管的制造	(71)
1.4.4 光电成像的图像分辨特性	(28)	3.3 像管的性能参数	(71)
习题与思考题	(30)	3.3.1 光谱响应特性	(72)
第 2 章 电子束扫描成像技术	(31)	3.3.2 增益特性	(72)
2.1 摄像管工作原理	(31)	3.3.3 背景特性	(74)
2.1.1 摄像管的结构	(31)	3.3.4 成像特性	(75)
2.1.2 摄像管工作原理	(31)	3.4 辐射图像的光电转换	(77)
2.2 摄像管的分类	(35)	3.4.1 光电子发射的基本理论	(77)
2.2.1 光电导型摄像器件	(35)	3.4.2 典型实用光阴极	(84)
2.2.2 光电发射型摄像器件	(40)	3.4.3 光电发射的极限电流密度	(92)
2.3 摄像管的性能参数	(46)	3.4.4 光阴极面发射电子过渡过程的分析	(93)
2.3.1 摄像管的灵敏度	(46)	3.5 电子图像的成像理论	(95)
2.3.2 摄像管的惰性	(47)	3.5.1 电子光学基础	(95)
2.3.3 摄像管的分辨力	(51)	3.5.2 旋转对称场中的场方程	(96)
2.3.4 摄像管的其他特性参数	(52)	3.5.3 静电磁场中带电粒子的运动	(98)
2.4 热释电摄像管	(53)	3.5.4 旋转对称电子光学系统的成像	(102)
2.4.1 热释电效应与热释电摄像管	(53)	3.5.5 普遍情况下电子光学系统的折射率	(103)
2.4.2 热释电靶电荷图像的形成与读出	(57)	3.5.6 电子透镜	(105)
2.4.3 热释电摄像管工作的特点	(59)	3.5.7 典型电子光学系统分析	(109)
2.5 摄像管的电子枪	(60)	3.6 电子图像的发光显示	(112)
2.5.1 电子枪的结构与分类	(60)		

3.6.1 荧光层发光理论基础	(112)	4.6.6 CMOS 与 CCD 图像传感器的比较	(180)
3.6.2 荧光屏发光衰减过程分析	(114)	4.6.7 其他 CMOS 成像器件	(181)
3.6.3 典型荧光屏发光机理	(116)	4.7 紫外焦平面成像器件	(182)
3.7 光学图像的传像与电子图像的倍增	(118)	4.7.1 涂敷变频膜的固体紫外探测器	(183)
3.7.1 光学纤维面板	(118)	4.7.2 基于宽带半导体材料的紫外焦平面成像器件	(183)
3.7.2 微通道板	(120)	4.8 近红外及短波红外焦平面成像器件	(185)
3.8 像管的小型化直流高压电源	(129)	4.9 固体成像器件的性能参数	(185)
3.8.1 直流高压电源工作原理	(130)	4.9.1 固体成像器件的光电转换特性	(186)
3.8.2 倍压整流电路	(130)	4.9.2 固体成像器件的噪声特性	(188)
3.8.3 自动亮度控制电路	(130)	4.9.3 固体成像器件的成像特性	(188)
3.8.4 直流选通高压电源	(131)	习题与思考题	(190)
3.8.5 自动快门电路	(132)	习题与思考题	(190)
习题和思考题	(132)	第 5 章 电子驱动自扫描成像技术(2)	(191)
第 4 章 电子驱动自扫描成像技术(1)	(134)	5.1 红外探测器的分类与性能	(191)
4.1 固体成像器件的发展	(134)	5.1.1 热探测器	(191)
4.2 MOS 电容器的电荷存储、耦合与转移	(135)	5.1.2 光子探测器(光电探测器)	(192)
4.2.1 稳态下的 MOS 电容器	(135)	5.2 红外探测器的工作条件和性能参数	(194)
4.2.2 非稳态下的 MOS 电容器(MOS 电容器的电荷存储原理)	(138)	5.2.1 红外探测器的工作条件与要求	(194)
4.2.3 MOS 电容器系统的实际开启电压	(140)	5.2.2 红外探测器的性能参数	(195)
4.2.4 CCD 的电荷耦合与传输原理	(143)	5.3 红外焦平面探测器技术(红外 CCD)	(197)
4.3 CCD 的结构及其物理性能分析	(144)	5.3.1 红外焦平面成像器件的构成	(198)
4.3.1 CCD 的结构	(144)	5.3.2 单片式 IR-CCD	(199)
4.3.2 CCD 的物理性能	(151)	5.3.3 混合式 IR-CCD	(205)
4.4 CCD 成像原理	(166)	5.3.4 Z 平面红外焦平面探测器	(208)
4.4.1 线阵 CCD 成像原理	(166)	5.3.5 红外焦平面探测器制作工艺	(208)
4.4.2 面阵 CCD 成像原理	(168)	5.4 光电导型红外探测器理论分析	(210)
4.5 特殊 CCD 成像器件	(169)	5.4.1 光电导探测器的分类和基本关系	(210)
4.5.1 增强型 CCD(ICCD)	(169)	5.4.2 本征光电导探测器的性能分析	(212)
4.5.2 电子轰击型 CCD(EBCCD)	(170)	5.4.3 非本征光电导探测器的性能分析	(218)
4.5.3 电子倍增 CCD (Electron-Multiplying CCD, EMCCD)	(171)	5.4.4 SPRITE 探测器	(221)
4.5.4 其他异型 CCD	(172)	5.4.5 光电导探测器材料与工作模式	(227)
4.6 CMOS 成像原理	(174)	5.5 光伏型红外探测器理论分析	(229)
4.6.1 CMOS 器件的结构	(174)	5.5.1 光伏探测器的响应度	(230)
4.6.2 CMOS 器件的图像读出与成像	(174)	5.5.2 光伏型探测器工作方式分析	(231)
4.6.3 CMOS 图像传感器像元	(175)	5.5.3 光伏型探测器材料与工作模式	(236)
4.6.4 CMOS 器件的不足与改进	(178)	5.6 量子阱与量子点红外探测器	(237)
4.6.5 Pixim 的 DPS 成像技术	(178)	5.6.1 量子阱红外探测器	(237)
		5.6.2 量子点红外探测器	(241)

5.7 非制冷红外焦平面探测器·····	(242)	7.3.1 线阵 CCD 成像系统·····	(300)
5.7.1 热释电探测器·····	(243)	7.3.2 面阵成像系统·····	(302)
5.7.2 微测辐射热计·····	(249)	7.3.3 成像光谱系统·····	(306)
5.7.3 其他热电型非制冷焦平面阵列·····	(253)	7.4 微光成像系统(微光电视)·····	(308)
5.7.4 非制冷焦平面技术分析·····	(254)	7.4.1 微光摄像器件及其性能·····	(309)
5.8 基于光学读出的红外热成像技术·····	(254)	7.4.2 微光电视的发展及应用·····	(314)
5.8.1 基于 MEMS 微悬臂梁的红外热成像技术·····	(255)	7.4.3 成像光子计数探测系统·····	(315)
5.8.2 基于热光阀的红外热成像技术·····	(259)	7.5 电视信号的发送与接收·····	(316)
习题与思考题·····	(261)	7.5.1 视频处理放大器·····	(316)
第 6 章 光机扫描成像技术 ·····	(262)	7.5.2 模拟视频信号的频谱及复用·····	(317)
6.1 光机扫描成像的基本参数·····	(262)	7.5.3 视频正交平衡调幅·····	(318)
6.2 光机扫描系统·····	(264)	7.5.4 电视信号的传输、发射与接收·····	(318)
6.2.1 基本扫描方式·····	(264)	7.6 电视显示器件及显示工作原理·····	(319)
6.2.2 光机扫描器·····	(265)	7.6.1 CRT·····	(320)
6.2.3 几种常用的光机扫描方案·····	(271)	7.6.2 LCD·····	(320)
6.2.4 前置望远系统和中继透镜组·····	(272)	7.6.3 PDP·····	(321)
6.3 光机扫描成像信号处理与显示·····	(272)	7.6.4 OLED 显示器·····	(322)
6.3.1 光机扫描的成像方式·····	(272)	7.6.5 激光显示·····	(324)
6.3.2 光机扫描的信号处理与显示·····	(274)	7.7 电视显示器的性能·····	(326)
6.4 红外热成像系统中的微扫描技术·····	(278)	7.8 高清晰度电视和数字电视·····	(327)
6.4.1 提高分辨率的微扫描原理·····	(278)	习题与思考题·····	(328)
6.4.2 微扫描分类·····	(279)	第 8 章 微光成像系统 ·····	(329)
6.4.3 微扫描的工作模式·····	(280)	8.1 微光成像系统的分类与构成·····	(329)
6.4.4 微扫描系统·····	(280)	8.1.1 主动微光夜视系统·····	(329)
6.4.5 微扫描系统的应用·····	(281)	8.1.2 被动微光夜视系统·····	(330)
习题与思考题·····	(282)	8.2 主动微光成像的辅助照明系统·····	(331)
第 7 章 电视体制、摄像系统与图像显示 ·····	(283)	8.2.1 辅助照明系统基本要求·····	(331)
7.1 电视的体制与图像传送原理·····	(283)	8.2.2 典型照明系统组成与分析·····	(331)
7.1.1 图像与图像的传送·····	(283)	8.3 微光夜视系统的光学系统·····	(334)
7.1.2 图像的解析与合成——扫描·····	(284)	8.3.1 光学系统基本要求·····	(334)
7.1.3 全电视信号·····	(286)	8.3.2 典型微光夜视光学系统及其分析·····	(335)
7.1.4 电视图像的特点·····	(288)	8.4 微光成像系统性能分析·····	(339)
7.1.5 彩色全电视信号·····	(290)	8.4.1 微光成像系统参数对成像性能的影响·····	(339)
7.2 电视摄像系统·····	(291)	8.4.2 微光成像系统总体设计分析·····	(342)
7.2.1 摄像机的组成与种类·····	(291)	8.5 选通成像技术及其应用·····	(347)
7.2.2 摄像机的基本参数·····	(292)	8.5.1 大气后向散射和选通原理·····	(347)
7.2.3 摄像机的光学成像系统·····	(293)	8.5.2 选通成像基本原理·····	(348)
7.2.4 摄像机成像传感器芯片·····	(295)	8.5.3 选通成像技术的应用·····	(349)
7.2.5 摄像机的输出接口·····	(296)	习题与思考题·····	(349)
7.3 典型成像系统·····	(300)		

第 9 章 红外热成像系统	(351)	10.3.1 大气的构成	(385)
9.1 红外热成像系统的构成	(351)	10.3.2 大气消光现象及其理论分析	(389)
9.2 红外热成像系统的光学系统	(352)	10.3.3 大气消光对光电成像系统性能的影响	(396)
9.2.1 红外热成像对光学系统的要求	(352)	10.4 基于人眼信噪比的图像探测理论与图像探测方程	(397)
9.2.2 红外热成像光学系统性能参数	(353)	10.4.1 图像的信噪比	(398)
9.2.3 典型红外热成像光学系统及其分析	(356)	10.4.2 光电成像系统的图像探测方程	(399)
9.3 红外热成像系统中的制冷技术与制冷器	(360)	10.4.3 图像探测方程的其他表达形式	(402)
9.3.1 制冷原理及其分类	(360)	10.5 目标探测与识别理论	(403)
9.3.2 典型红外热成像系统制冷器	(361)	10.5.1 目标探测与识别的基本理论模型	(404)
9.4 红外热成像系统的性能参数	(365)	10.5.2 约翰逊准则及其应用	(408)
9.4.1 红外热成像系统光谱响应特性	(365)	10.5.3 约翰逊准则的改进	(410)
9.4.2 红外热成像系统的噪声	(365)	10.6 微光成像系统作用距离预测模型与方法	(414)
9.4.3 红外热成像系统的时间响应	(367)	10.6.1 微光成像系统作用距离模型	(414)
9.4.4 红外热成像系统的空间分辨特性与温度分辨特性	(368)	10.6.2 微光成像系统作用距离的预测	(415)
9.5 红外热成像系统总体设计分析	(370)	10.6.3 微光电视成像系统作用距离的预测	(416)
9.5.1 红外热成像系统总体设计	(370)	10.7 红外热成像系统作用距离预测模型与方法	(417)
9.5.2 典型红外热成像系统设计分析	(372)	10.7.1 红外成像系统作用距离模型	(418)
习题与思考题	(376)	10.7.2 红外热成像系统作用距离预测	(419)
第 10 章 光电成像过程影响因素与作用距离预测	(378)	10.7.3 红外热成像系统作用距离预测的修正	(420)
10.1 光电成像系统成像过程分析	(378)	习题与思考题	(422)
10.1.1 光电成像系统组成	(378)	参考文献	(439)
10.1.2 光电成像过程不同环节对成像质量的影响	(378)		
10.2 景物的反射与辐射特性	(379)		
10.2.1 典型人工目标的辐射特性	(380)		
10.2.2 典型自然景物的反射与辐射特性	(382)		
10.3 大气传输对成像过程的影响	(385)		

第 1 章 绪 论

人类社会已经进入了信息社会时代，信息获取是人类文明生存和发展的基本需要。从信息获取的方式考虑，人类获取信息的主要手段是通过五官，即眼、耳、鼻、舌、肤(视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉)进行的。据相关统计，人类通过视觉获取的信息占人类能够获取的信息的 80% 以上，正所谓“百闻不如一见”。

但是，由于人眼自然构造形成的视觉性能的限制，通过直接观察所获得的图像信息仍然是有限的，其包括：灵敏度的限制，夜间无照明时人的视觉能力很差；分辨率的限制，没有足够的视角和对比度就难以辨识；光谱的限制，人眼只对电磁波谱中很窄的可见光区敏感；空间的限制，隔开的空间人眼将无法观察；时间的限制，变化过去的影像无法存留在视觉中。总之，人类的直观视觉只能有条件地提供图像信息。

为了突破人眼的限制，很早以前人类就为开拓自身的视见能力进行了探索并取得了不少有成效的进展。灯具的出现改善了人类夜晚的照明环境，望远镜的出现为人类延伸了视见距离，显微镜的应用为人类观察微小物体提供了方便。但是，在扩展视见光谱范围，提高视见灵敏度和突破时空限制方面，人类则经历了漫长时间才有所进展，这一进展正是由于光电成像技术的出现和发展进步带来的。光电成像技术是当今信息时代的重要高新技术之一。

1.1 关于光电成像技术

光电成像技术是在人类探索和研究光电效应的进程中产生和发展起来的，历史最早可追溯到 1873 年，史密斯(W.Smith)首先发现了光电导现象；随后，普朗克(Planck)于 1900 年提出了光的量子属性；而后在 1916 年，爱因斯坦(Einstein)完善了光与物质内部电子能态相互作用的量子理论，人类从此揭示了内光电效应的本质。在相继的大量研究工作中，伴随着近代物理学的发展，先后建立了半导体理论并研制出了各类光电器件。由此带来了内光电效应的广泛应用，提供了人类探测光子的技术手段，为扩展人眼的视见光谱范围奠定了基本条件。人类在探索内光电效应的同时也探索了外光电效应。1887 年，赫兹(Hertz)首先发现了紫外辐射对放电过程的影响，第二年哈尔瓦克(Hallwacks)实验证实了紫外辐射可使金属表面发射负电荷，其后，由斯托列托夫(CToa.eTOB)、勒纳(Lenard)和爱因斯坦相继明确了光电发射的基本定律。在此基础上，1929 年科勒(Koller)制成了第一个实用的光电发射体——银氧铯光阴极，随后利用这一技术研制成功了红外变像管，实现了将不可见的红外图像转换成可见光图像。此后，相继出现了紫外变像管和 X 射线变像管，使人类的视见光谱范围获得了更有成效的扩展。外光电效应的深入研究使格利胥(Görlich)在 1936 年研制出铯铯光阴极，萨默(Sommer)在 1955 年研制出铯钾钠铯多碱光阴极。西蒙(Simon)在 1963 年提出了负电子亲和势光阴极理论，伊万思(Evans)等人在该理论的指导下研制成功了负电子亲和势铯砷光阴极。这些高量子效率光阴极的出现使微光图像的增强技术达到了实用阶段。利用像增强器，人类突破了视见灵敏阈的限制。

在发展光电成像技术的进程中，为扩展视界，人类从二十世纪 20 年代起开始致力于电视技术的研究。美国安培(Ampex)公司推出的世界上第一台实用型摄像机，开创了图像记录的新纪元，但由于当时的摄像机使用摄像管摄取图像，摄像管不仅使用寿命低、制造成本高、性能不稳定，而且不能对着强光进行摄影。1925 年，苏格兰人贝尔德经过精心设计，利用旧无线电器材、旧糖盒、自

行车灯透镜、旧电线等废旧材料，制造出了世界上最原始的电视摄影机和接收机。1926年1月27日，贝尔德在英国伦敦皇家学会向40位科学家表演了他的发明。1929年美国科学家伊夫斯在纽约和华盛顿之间播送50行的彩色电视图像，发明了彩色电视机。1931年，美国科学家兹沃雷金(Vladimir Kosma Zworykin)等人(贝尔德和费罗·法恩斯沃斯)制造出比较成熟的光电摄像管，即电视摄像机。其中，兹沃雷金在一次试验中将一个由240条扫描线组成的图像传送给4英里以外的一台电视机，完成了使电视摄像与显像完全电子化的过程，至此，现代电视系统基本成型，为人类提供了不必面对目标即可进行观察的可能性。电视所具有的极大吸引力为它带来了极为迅速的发展。在短短的半个多世纪中，电视摄像器件从初期的析像器，逐步提高并发展出众多类型的摄像器件。相继出现的摄像器件有：超正析像管、分流摄像管、视像管、二次电子导电摄像管、硅靶摄像管、热释电摄像管等。

在发展电真空类型摄像器件的同时，1970年玻伊尔(Boyle)和史密斯(Smith)开发出一种具有自扫描功能的电荷耦合器件(CCD)，由此诞生了固体摄像器件，使电视摄像技术产生了质的飞跃，Boyle和Smith获得了2009年诺贝尔物理学奖。近年来，随着CMOS成像器件的回归与突起，光电成像技术进一步走向了小型化、低成本化和高清晰化，各种特殊用途的成像器件也如雨后春笋般地不断涌现出来。尤其是现代半导体材料和技术在各种探测器件中的应用，使得采用红外焦平面探测器件的凝视红外热成像技术将人类的视见能力扩展和提高到了一个新的阶段。

归结起来，上述种种改善人类视见能力的新技术都是以光电转换技术、光电子理论和半导体物理等为基础，通过各类光电成像器件来实现的。采用这一类器件完成成像过程的技术可以统称为光电成像技术。光电成像技术在学科上归属于光电子物理学。

1.1.1 光电成像技术对人眼视见光谱域的拓展

自然界中存在着大量的非可见的电磁波，这些电磁波也同可见光一样构成了景物的辐射强度分布。例如在常温下(约300K)，景物本身的热辐射构成了红外线辐射分布的图像。但这种图像人眼却不能直接感受到。存在于自然界的电磁波，其波长范围很宽。从波长仅有 10^{-16}m 的宇宙射线到波长为 10^8m 的长电振荡，对于如此广泛的电磁波谱，如何利用其来传递图像信息并转换为可见光图像呢？这一问题只有借助于光电成像技术才能得到解决。

经典理论可以证明，全部波段的电磁波都可成为图像信息的载体。这是因为全部电磁波所形成的电磁场都遵循同一形式的Maxwell(麦克斯韦)方程组关系。Maxwell方程组给出了关于电磁场分布的经典理论描述。其微分形式如下：

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{cases} \quad (1-1)$$

换为积分形式，则为

$$\begin{cases} \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dV \\ \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \\ \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \\ \oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \int_S \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \end{cases} \quad (1-2)$$

式中的电位移 \mathbf{D} 、场强 \mathbf{E} 、磁感应强度 \mathbf{B} 和磁场强度 \mathbf{H} 都是矢量。式中封闭曲面 S 的体积为 V ，自

由电荷的密度为 ρ 。式中闭合曲线 L 的面积为 S ，传导电流密度为 J

Maxwell 方程组定量描述的电磁场取决于辐射源及传播介质的性质。一切辐射现象都可以通过求解一定边界条件下的 Maxwell 方程组进行确定。用于讨论光学成像过程的电磁场通常处于不包括辐射源的理想非导电各向同性的介质中。介质的介电常数和磁导率分别为 ε 和 μ ，由此可代入条件

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} & \rho &= 0 \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} & \mathbf{J} &= 0 \end{aligned} \quad (1-3)$$

获得简化的 Maxwell 方程组

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} = \mu \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{cases} \quad (1-4)$$

式中的电场矢量 \mathbf{E} 和磁场矢量 \mathbf{B} 都是时间 t 和空间点 \mathbf{r} 矢量的函数。利用上面的方程组可以证明两个矢量函数的所有分量都满足波动方程

$$\left[\nabla^2 - \mu \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (1-5)$$

$$\left[\nabla^2 - \mu \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (1-6)$$

研究电磁波传递图像信息需要确定物空间场分布与像空间场分布之间的定量关系。这一问题可以在已知初始条件及边界条件下通过求解波动方程解决。但是由于解析困难，所以需要进行线性变换处理。

由于与 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 及 $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ 相应的复解矢量也满足波动方程，故它们的傅氏变换 $\mathbf{E}(\mathbf{r} \cdot t)$ 及 $\mathbf{B}(\mathbf{r} \cdot t)$ 分别满足 Helmholtz (亥姆霍兹) 方程。

$$[\nabla^2 + \mu \varepsilon \omega^2] \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = 0 \quad (1-7)$$

$$[\nabla^2 + \mu \varepsilon \omega^2] \mathbf{B}(\mathbf{r}, \omega) = 0 \quad (1-8)$$

上式的一个解是平面波

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) \propto \exp(-j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) \quad (1-9)$$

式中， \mathbf{K} 是波矢量，其标量 $|\mathbf{K}| = \mu \varepsilon \omega$ (ω 称为空间圆频率)。

借助于式 (1-7) 对所有可能的频率和波矢量的平面波连续谱进行加权求和，即可得到式 (1-5) 的通解

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \int \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (1-10)$$

同理也可求出式 (1-6) 的通解

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \int \mathbf{B}(\mathbf{r}, \omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (1-11)$$

上述数学过程所描述的物方和像方分布函数之间的关系表明，广泛的电磁波都具有同一的传播规律，因此，通过经典电磁场理论可以处理电磁波的全部成像问题，并可以用 Poynting (坡印廷) 矢量 ω 来表示电磁能密度

$$\omega = \frac{1}{\mu} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad (1-12)$$

应用波动方程讨论电磁波成像可知，只要像空间两点的距离大于衍射极限即可分辨其间的光强分布，也就是能构成图像信息。根据简化的电磁波衍射理论模型，两个像点间能够被分辨的最短距离为

$$d = \frac{0.61\lambda}{n' \sin \theta'} \quad (1-13)$$

式中, λ 是电磁波的波长, n' 是电磁波在像空间的介质折射率, θ' 是电磁波在像方的会聚角。从这一衍射公式可知, 当电磁波的波长增大时, 所能获得的图像分辨率将显著降低。因此对波长超过 mm 量级的电磁波而言, 用有限孔径和焦距的成像系统所获得的图像分辨率将会很低。因此, 实际上已排除了波长较长的电磁波的成像作用。目前光电成像对光谱长波阈的延伸仅能扩展到亚毫米波成像。

除了衍射造成分辨率下降限制了将长波电磁波用于成像外, 用于成像的电磁波也存在一个短波限制。通常把这个短波限确定在 X 射线(Roentgen 射线)与 γ 射线(Gamma 射线)波段。这是因为波长更短的辐射具有极强的穿透能力, 所以, 宇宙射线难以在普通条件下聚焦成像。

由上述分析可知, 通常用于光电成像的电磁波应该具有明显的波粒二象性, 其波长有效波谱区为亚毫米波、红外辐射、可见光、紫外辐射、X 射线、 γ 射线等。

1.1.2 光电成像技术的应用领域

人们采用光电成像技术突破了人类视觉的部分限制, 特别是突破了人眼在低照度和有限光谱响应下的视觉限制。同时, 视觉机能在时间和空间两个方面也得到了扩展。时间上的扩展如数码照相、印刷、静电复印、摄录像等。空间上的扩展如电视、微光观察镜等可以将肉眼不能直接观察到的远处的图像传输到人眼视网膜上。

图像记录以随时可看和长时间保存为特点, 图像传输以即时可看和长距离传输为特点。两者的特点可以互补, 如在电视方面发展了图像记录——录像技术, 在照相方面发展了图像传输——传真技术等。

除了视觉机能的空间扩大和时间延长, 即图像传输和图像记录技术外, 正在发展扩大的是视觉识别技术, 例如, 将超出人类视觉响应能力的红外和紫外图像转换成可见光图像或者将细节模糊的图像处理成细节清晰的图像处理技术。由此可见, 图像与视觉是密切相关的。

随着科学技术的迅速发展和信息化社会的需求, 光电成像技术受到普遍重视且不断开拓新的应用领域(表 1-1)。

表 1-1 光电成像技术的应用

应用波段	应用类型	使用部门	应用
可见光谱区的应用	观察黑暗过程	警务	隐蔽监视某地点, 监视记录暗藏的犯罪活动
		心理学和医学	行为状态研究的记录
		军事	水下监视、隐蔽的远程监视记录, 夜间射击控制
		科学研究工作	记录空气动力学、核物理等方面的高速微光现象, 记录空间探测的确定方位, 水下自然现象的记录
	材料折射、色散和透明性的拍照	材料检查	应变光学
		天文学	天象的记录
	显微镜工作	冶金学和地质学	厚且不透明断面内的现象的快速记录和一般记录
动物学		在极微光下发生的现象的记录	
红外辐射的应用	在红外光照明条件下, 观察黑暗过程	照相工业	在照相乳胶不起作用的光谱区进行目视工作, 对乳胶和相纸进行试验, 黑暗中修理发生故障的仪器
		动物学	研究动物、特别是夜间活动的动物的行为
		公安	管理某一地区, 夜间巡视, 工事的防御
		心理学和医学	研究某种行为
	利用与可见光相比有不同折射、色散和透明度的红外照相或观察	材料检查	应变光学
		动物学	发射红外线(例如甲壳虫)的研究
		法律技术	证据的检查与提取
		艺术史	赝品检查

应用波段	应用类型	使用部门	应用
红外辐射的应用		测量学	扩展浓雾大气的可见区
		光学	红外区双折射的研究
		天文学	行星和恒星星象的记录
	红外显微镜工作	生物学和动物学	光敏制品的鉴定
		冶金学和地质学	金属或矿物断面的检查
	使温度高于绝对零度产生的热辐射成为可见的工作	材料检查	机器上存在热应力部分的温度分布
		消防	研究起火原因, 寻找火的中心区域
		钢铁工业	炼钢、轧钢过程的监控, 高炉料面温度的测定、热风炉破损的诊断, 出炉板坯温度的测量等
		石化工业	输油管道状态检查, 焦炭塔物料界面、HF 储罐物料界面的检测, 动力设备热泄漏及保温结构状况的检测等
		电力工业	输电线、电力设备热状态检查, 故障诊断
		医学	癌症及与温度变化有关的病变早期诊断
		军事	洲际导弹的探测、识别、跟踪, 拦截武器的制导, 大气层内外核爆炸的探测, 战术侦察, 观瞄、火控、跟踪制导和报警等
	紫外辐射的应用	利用衍射、物质辐射和透过辐射等性质的紫外照相	材料检查
动物学和生物学			记录在辐射影响下动物活动和植物生长的变化情况, 快速变化的生理过程的非干涉研究等
法律技术			证据的检查与提取
艺术史			贗品检查
光学			用菲涅耳波带片成像
天文学			用装在人造卫星上的望远镜进行天体的紫外照相
物理学			等离子现象和高能现象的记录
紫外显微镜工作		动物学	标本横断面和有关现象的研究
		冶金、地质学	金属和矿物断面检查
X射线谱段的应用	X射线照相	材料检查	检查静止和运动物体两者的内部情况, 以及超高速运动物体的状态检查
		动物学和生物学	利用低辐射强度的放射性跟踪、记录动、植物内部的活动情况
		天文学	利用人造卫星研究 X 射线辐射
		医学	病灶与创伤的检查和记录
		机场、海关的安检	违禁品检查
		物理学	快速结晶体取向的劳厄图形的直接观察、瞬时间事件的记录; 用电视技术进行 X 射线图形的远程显示; 根据谱线宽度的变化测量结晶的程度, 高能现象的记录等

由表 1-1 中所列举的光电成像技术应用情况可以看出, 光电成像技术是利用光电变换和信号处理技术获取目标图像, 在工农业生产、科学研究和国防建设中占有重要地位。

综上, 光电成像技术所研究的内容可以概括为以下四个方面:

- (1) 在空间上扩大人类视觉机能的图像传输技术;
- (2) 在时间上扩大人类视觉能力的图像记录、存储技术;
- (3) 扩大人类视觉光谱响应范围的图像变换技术;
- (4) 扩大人类视觉灵敏机能的图像增强技术。

就获取目标图像的基本过程而论, 所涉及的内容相当广泛。主要包括: (1) 人眼的视觉特性; (2) 各种辐射源及目标、背景特性; (3) 大气光学特性对辐射传输的影响; (4) 成像的光学系统; (5) 光辐射探测器及制冷器; (6) 信号的电子学处理; (7) 图像的显示。

1.2 人眼的视觉特性与模型

现代社会提倡以人为本，事实上，人类的所有活动都是围绕着人类的需求进行的，光电成像技术也不例外，因此，光电成像系统的性能应与人眼的视觉特性密切相关，各种光电成像装置是人们用以改善和扩展视觉能力的重要辅助工具，人眼借助这些装置获得肉眼不能直接得到的图像信息。因此，作为一名从事光电成像技术研究的工程技术人员，必须了解人眼的基本构造和视觉特性，由此，才能设计和研制出更适用于人类使用的光电成像系统。

1.2.1 人眼的构造

人的眼睛是一个非常灵敏和完善的视觉器官，其基本构造如图 1-1 所示。

作为一个完整的视觉系统(见表 1-2)，人眼主要由三个部分构成：① 由角膜、虹膜、晶状体、睫状体和玻璃体组成的光学系统；② 作为敏感和信号处理部分的带有盲点和黄斑的视网膜，是构成人眼视觉的关键部分；③ 作为信号传输和显示系统的视神经与大脑。

表 1-2 人眼简化眼模型的主要参数

折射率 n	1.33	物方焦距 f	-17.1mm
折射面半径 R	5.7mm	像方焦距 f'	22.8mm
焦度 φ	58.48 屈光度	网膜曲率半径 r	mm

视网膜是结构复杂的多层网络结构(见图 1-2)。与玻璃液相接触的部分是神经纤维层，这些神经的末端为神经细胞——神经元。光线通过玻璃液进入视网膜，视网膜中有锥状细胞和杆状细胞两类含有光敏物质的感光细胞。在光的作用下，感光物质强烈吸收光的同时发生化学分解作用引起视觉刺激。视觉刺激以电信号形式经内外网丛层和神经节细胞层后，在视神经汇合传至大脑信息处理系统产生视觉。视网膜的最后面为呈褐色的不透明色素上皮层，能吸收通过前面各层而未被吸收的全部入射光，不使这些光产生散射，并保护感光细胞不受强光的过度刺激。

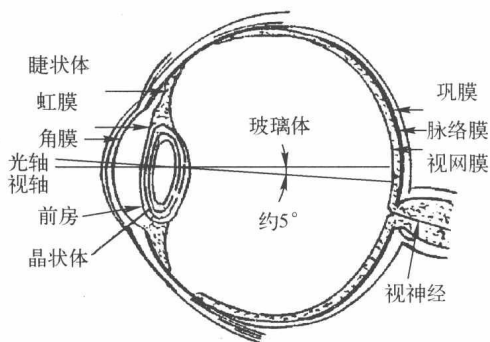


图 1-1 人眼的基本结构

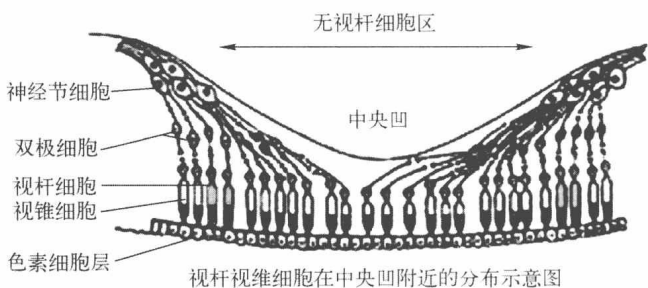


图 1-2 人眼视网膜的结构

视网膜上的感光细胞超过 11000 万个，其中约有 700 万个锥状细胞。锥状细胞和杆状细胞不仅数量上差异很大，分布也不均匀(见图 1-3)。在视神经进入眼内腔的盲斑部分(见图 1-1)既无锥状细胞，也无杆状细胞，是不感光的盲区。在黄斑中心凹处完全没有杆状细胞，是具有最高视觉分辨率的区域。从黄斑向视网膜边缘移动，锥状细胞的密度越来越小，直径也越来越粗，而且成簇地与视神经联系(在边缘大约 250 条结合成一簇)。在这些区域锥状细胞和杆状细胞混合在一起，杆状细胞比锥状细胞小得多，而且没有独立的视神经联系，而是合成一簇(多数达 500 条一簇)，这对于产生高灵敏视觉至关重要。到视网膜边缘就几乎全是杆状细胞了。两类视觉细胞对视觉的贡献

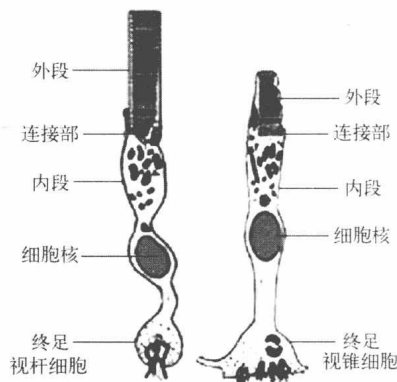


图 1-3 锥状细胞与杆状细胞

有很大差异，锥状细胞具有高分辨率和颜色分辨能力；杆状细胞的视觉灵敏度比锥状细胞高数千倍，但不能辨别颜色。

1.2.2 人眼的视觉特性

1. 视觉的适应

人眼能在一个相当大(约 10 个数量级)的范围内适应视场亮度。随着外界视场亮度的变化，人眼视觉响应可分为三类：

明视觉响应：当人眼适应大于或等于 3cd/m^2 的视场亮度后，视觉由锥状细胞起作用。

暗视觉响应：当人眼适应小于或等于 $3 \times 10^{-5}\text{cd/m}^2$ 的视场亮度之后，视觉只由杆状细胞起作用。由于杆状细胞没有颜色分辨能力，故夜间人眼观察景物呈灰白色。

中介视觉响应：随着视场亮度从 3cd/m^2 降至 $3 \times 10^{-5}\text{cd/m}^2$ ，人眼逐渐由锥状细胞的明视觉响应转向杆状细胞的暗视觉响应。

当视场亮度发生突变时，人眼要稳定到突变后的正常视觉状态需经历一段时间，这种特性称为“适应”，适应主要包括明暗适应和色彩适应两种。适应由两个方面来调节。

调节瞳孔的大小，改变进入人眼的光通量。眼瞳大小是随视场亮度而自动调节的，在各种视场亮度水平下，瞳孔直径及其面积的平均值如表 1-3 所示。

视细胞感光机制的适应。这种适应是由视细胞中的色素(视紫红质)在光的刺激下，产生化学反应而引起的。

人眼的明暗视觉适应分为亮适应和暗适应。对视场亮度由暗突然到亮的适应称为亮适应，大约需要 2~3 分钟；对视场亮度由亮突然到暗的适应称为暗适应，暗适应通常需要 45 分钟，充分暗适应则需要一个多小时。

人眼的色彩适应也是因为视紫红质的产生和消失，达到新的平衡所需要的时间延迟。

2. 绝对视觉阈

在充分暗适应的状态下，全黑视场中，人眼感觉到的最小光刺激值，称为人眼的绝对视觉阈。以入射到人眼瞳孔上最小照度值表示时，人眼的绝对视觉阈值在 10^{-9}lx 数量级。以量子阈值表示时，最小可探测的视觉刺激是 58~145 个蓝绿光(波长为 $0.51\mu\text{m}$)的光子轰击角膜引起的，据估算，这一刺激只有 5~14 个光子实际到达并作用于视网膜上。

对于点光源，天文学家认为正常视力的眼睛能看到六等星，六等星在眼睛上形成的照度近似为 $8.5 \times 10^{-9}\text{lx}$ 。在实验室内用“人工星点”测定的视觉阈值要小些，为 $2.44 \times 10^{-9}\text{lx}$ 。对于具有一定大小的光源来说，张角小于 $10'$ ，自身发光或被照明的圆形目标，在瞳孔上的照度阈值与张角无关，并等于 $5 \times 10^{-9}\text{lx}$ ，甚至只有 $2.2 \times 10^{-9}\text{lx}$ 。

在一定的背景亮度 L_b 条件下 ($10^{-9} \sim 1\text{cd/m}^2$)，人眼能够观察到的最小照度 E_{\min} 约为

$$E_{\min} = 3.5 \times 10^{-5} \sqrt{L_b} \quad (1-14)$$

当 $L_b > 16.4\text{cd/m}^2$ 后将产生眩目现象，绝对视觉阈值迅速提高。

实验表明，眩目亮度 L_0 与像场亮度 $L(\text{cd/m}^2)$ 之间的数值关系为

$$L_0 = 8\sqrt[3]{L} \quad (1-15)$$

表 1-3 不同视场亮度下人眼瞳孔的直径和面积

适应视场亮度 (cd/m^2)	瞳孔直径 (mm)	瞳孔面积 (mm^2)	视网膜上照度 (lx)
10^{-5}	8.17	52.2	2.2×10^{-6}
10^{-3}	7.80	47.8	2.0×10^{-4}
10^{-2}	7.44	43.4	1.8×10^{-3}
10^{-1}	6.72	35.4	1.5×10^{-2}
1	5.66	25.1	1.0×10^{-1}
10	4.32	14.6	0.6
10^2	3.04	7.25	3.0
10^3	2.32	4.23	17.6
2×10^4	2.24	3.94	109.9

由此可说明为何 100W 的灯在白天不感到眩目，但在暗室将产生眩目效应。

3. 阈值对比度

通常，人眼的视觉探测是在一定背景中把目标鉴别出来。此时，人眼的视觉敏锐程度与背景的亮度及目标在背景中的衬度有关。

目标的衬度以对比度 C 来表示

$$C = \frac{L_T - L_B}{L_B} \quad (1-16)$$

式中， L_T 和 L_B 分别为目标和背景的亮度。有时也将 C 的倒数称为反衬灵敏度。

L_B , C 和人眼所能探测的目标张角 α 之间具有下述关系 (Wald 定律)

$$L_B \cdot C^2 \cdot \alpha^x = \text{const} \quad (1-17)$$

式中， x 的值在 0~2 之间变化。

对于小目标 $\alpha < 7'$ ，则 $x=2$ ，式 (1-17) 变为

$$L_B \cdot C^2 \cdot \alpha^2 = \text{const} \quad (1-18)$$

即著名的 Rose 定律。若 $\alpha < 1'$ 时，就很难观察到目标。若目标无限大，则 $x \rightarrow 0$ 。

人眼视觉特性与视场亮度、目标对比度和目标大小等参数相关，1946 年 Blackwell 用实验确定了在各种视场亮度下人眼对不同尺寸目标的阈值对比度 (见图 1-4)。实验采用双眼探测一个亮度大于背景亮度的圆盘，时间不限，察觉概率取 50%。图示曲线说明：当观察亮度不同的两个面时，如果亮度很低就察觉不出差别。但如果将两个面的亮度按比例提高，并维持其 C 值不变，则到一定的亮度时，就有可能察觉出其差别，即不同亮度下的阈值对比度是不同的。此外，图中曲线均在 $2 \times 10^{-3} \text{cd/m}^2$ 附近有间断点，这正表明了人眼由明视觉过渡到暗视觉的转折。

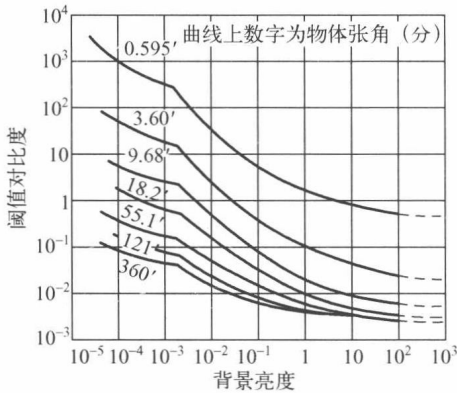


图 1-4 阈值对比度随背景亮度的变化曲线

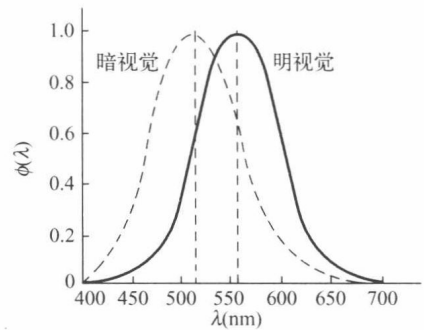


图 1-5 人眼的光视效率曲线

4. 人眼的光谱灵敏度

人眼对各种不同波长的辐射光有不同的灵敏度 (响应)，并且不同人的眼睛对各波长的灵敏度也常有差异。所以，为了确定眼睛的光谱响应，可对各种波长的光引起相同亮暗感觉所需的辐射通量进行比较，对大量具有正常视力的观察者所做的实验表明：

- 在较明亮的环境中，人眼视觉对波长 $0.555 \mu\text{m}$ 左右的绿色光最敏感；
- 在较暗条件下，人眼对波长 $0.512 \mu\text{m}$ 的光最敏感。

图 1-5 给出由人眼峰值灵敏度归一化的相对光谱灵敏度——光谱光视效率曲线，曲线表明在不同的视场亮度下，人眼对同一波长的响应是有差异的。

5. 人眼的分辨率

人眼能区别两发光点的最小角距离称为极限分辨率 θ ，其倒数则为眼睛的分辨率。