

普通高等教育
兵工类规划教材

微光与红外成像技术

张敬贤 李玉丹 金伟其 编著

北京理工大学出版社

微光与红外成像技术

北京理工大学

TN210

兵工类

微光与红外成像技术

张敬贤 李玉丹 金伟其 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书以微光与红外成像系统为主线,阐述有关的理论基础和各类成像系统的基本原理、结构、性能分析和设计要点。全书共十章,内容包括:绪论,人眼视觉的基本理论,光辐射度量的基础,热辐射定律及辐射源,辐射在大气中的传输,主动红外成像系统,直视微光成像系统,微光电视,热成像系统和热成像系统性能评价及设计要点。

本书可作为高等学校光电技术、光电成像技术专业本科生教材,又可兼作光学仪器、光学检测与仪器等专业的选修课教学参考书。对从事红外技术、光电技术等方面的科技工作者也可作为参考。

图书在版编目(CIP)数据

微光与红外成像技术/张敬贤等编著. —北京:北京理工大学出版社,1995

ISBN 7-81045-032-8

I. 微… II. 张… III. ①微光技术-高等学校-教材②红外成像系统-高等学校-教材
IV. TN216

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 10505 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路7号)

(邮政编码 100081)

各地新华书店经售

北京房山先锋印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 18.5 印张 448 千字

1995 年 9 月第一版 1995 年 9 月第一次印刷

印数:1-2000 册 定价:19.00 元

※ 图书印装有误,可随时与我社退换 ※

出版说明

遵照国务院国发[1978]23号文件精神,中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来,在广大教师的积极支持和努力下;在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下,已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务。共出版教材211种。这批教材的出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要,特别是国防现代化培养人才的需要,反映国防科技的先进水平,达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求,我们以提高教材质量为主线,完善编审制度、建立质量标准、明确岗位责任,制定了由主审人审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点,成立了十个专业教学指导委员会,以更好地编制兵工类专业教材建设规划,加强对教材的评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系统配套,完善管理制度,加强组织领导”的“八五”教材建设方针,兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上,于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划。共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的,专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查,认为符合兵工专业培养人才要求,符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套,为教学质量的提高、培养国防现代人才,为促进兵工类专业科学技术的发展,都将起到积极的作用。

本教材由北京理工大学高雅允教授主审,经中国兵器工业总公司夜视及激光技术专业教学指导委员会复查,兵总教材编审室审定。

限于水平和经验,这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处,希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1994年12月

序

光电成像技术是适应信息社会的需要而迅速发展的一门新技术分支学科。这一先进的技术为人类有效地扩展了自身的视觉能力。利用光电成像技术,可在全黑的夜空不用照明能像白天一样看清周围景物;可利用景物本身在常温下的辐射能获得可见的图像信息;可通过视频信号的转换能完成图像的传输、存贮以及处理等功能。由于光电成像技术首先在军事领域中得到了应用,因此这一技术已成为国防科技中至关重要的专业技术。

中国兵器工业总公司教材编审室最近组织编写了光电成像技术专业的系列教材,这是做了一件很有意义的工作。通过这套教材,读者可以全面了解军事及民用领域中光电成像技术的主要内容及其进展。

光电成像技术,一可以扩展人眼对微弱光图像的探测能力;二可以将超快速现象记下来;三可以开拓人眼对不可见辐射的接收能力。正是由于光电技术的这些作用,才逐步发展成为现在的各类光电成像器件及系统。并由此建立并发展了这一技术学科。

光电成像技术是以微光图像的增强和红外、紫外、X射线、亚毫米波等非可见辐射图像的探测与处理为基本内容的高新技术分支学科。由于军事工程的迫切需求,这一技术取得了迅猛的发展。当前光电技术已达到或接近光子探测的极限水平。其主要标志是:具有高量子效率的负电子亲和势光电阴极的第三代微光像增强器已走出实验室进入商品化市场;以超大规模的电荷耦合器件(CCD)面阵为核心的高性能固态摄像机已在国防和民用领域获得广泛应用;热成像中引入了焦平面技术,多元探测器的光机扫描热成像系统的噪声等效温差已可优于0.01K;辐射探测的长波限已延伸到 $30\mu\text{m}$ 的波段; $40\mu\text{m}$ 以上波段的开拓工作也有所进展;以红外电荷耦合器件(IRCCD)为核心的凝视热成像系统的发展正方兴未艾,并已开始对体积、重量要求严格的应用场合取代了光机扫描式热像仪。利用光电成像器件,可以将超快速(例如核爆炸、高压放电的形成)在纳秒、皮秒、以至飞秒级变化现象记录下来。

由30年代至今,光电成像技术的发展历程已走过了60年。当前光电成像技术已渗透到许多科学领域中。这一技术开拓了二维高密度以及随时间变化的三维信息源,促成了人类视觉探测域的光谱延伸、阈值扩展和时间暂留。根据当代社会对发展图像信息技术的迫切需要、国防上对夜战和图像制导等技术的重视,可以预计光电成像技术定会有更为迅速的发展前景。为此我深信这套教材的出版将会促进这一新兴分支学科的发展。

王大珩

1992年6月

前 言

本书经兵器工业总公司夜视及激光技术专业教学指导委员会1993年11月西安会议审定,列入八五教材规划。本书是按专业教学指导委员会审定的教材编写大纲,结合近年来教学、科研的实践而编著的。

微光与红外成像技术以微光图像增强和红外辐射图像的探测与处理为基本内容,广泛涉及光辐射的接收、传输、变换、存储、处理和显示等内容。它是适应信息社会的需要而迅速发展的新兴分支学科,不断有新思想,新器件,新技术出现。因此在有限的篇幅里,只能从教学角度出发,讨论有关光电成像方面的基础知识、基本理论;讲述典型的微光与红外成像系统的结构、工作原理、性能分析和总体设计要点;在相应的章节与附录中编入了国内外有关的技术资料和数据表,供系统设计参考。以使学生了解和掌握有关的理论知识,培养学生理论联系实际的研究能力,为今后的工作奠定必要的基础。为适应新技术的发展,在编写过程中,尽力收集新的科技成果,增补了凝视型热成像系统,标准大气模型及软件,热红外变像管等新内容。

本书共分十章,第六、七两章由李玉丹编写;第五、十两章由金伟其编写;其余各章由张敬贤编写并统编全书。本书承北京理工大学工程光学系高雅允教授主审,兵器工业总公司教材编审室刘金环副教授审核,对本书提出许多宝贵意见,在此谨向他们致以衷心的感谢。

本教材虽经几次编写、修改,但因涉猎的技术面广,错误与疏漏之处在所难免,诚望广大读者批评指正。

作 者

1994年7月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 图像与视觉	(1)
§ 1-2 光电成像技术所研究的内容	(2)
§ 1-3 光电成像技术的发展与展望	(4)
§ 1-4 夜视系统的组成及分类	(8)
第二章 人眼视觉的基本理论	(9)
§ 2-1 人眼的构造	(9)
§ 2-2 人眼的视觉特性.....	(10)
§ 2-3 微光下的视觉探测.....	(16)
§ 2-4 目标的探测和识别.....	(20)
第三章 光辐射度量的基础	(27)
§ 3-1 电磁波谱.....	(27)
§ 3-2 辐射度量及光度量.....	(29)
§ 3-3 朗伯辐射体及其辐射特性.....	(34)
§ 3-4 光辐射量计算举例.....	(35)
第四章 热辐射定律及辐射源	(39)
§ 4-1 基尔霍夫定律.....	(39)
§ 4-2 普朗克辐射定律.....	(41)
§ 4-3 其它黑体辐射定律.....	(43)
§ 4-4 黑体辐射的计算.....	(45)
§ 4-5 辐射源.....	(47)
第五章 辐射在大气中的传输	(60)
§ 5-1 大气的构成.....	(60)
§ 5-2 辐射在大气中传输的光学现象.....	(65)
§ 5-3 大气吸收和散射的计算.....	(69)
§ 5-4 大气消光对成像系统性能的影响.....	(80)
第六章 主动红外成像系统	(82)
§ 6-1 系统的组成及工作原理.....	(82)
§ 6-2 红外探照灯.....	(83)
§ 6-3 成像系统的光学系统.....	(92)
§ 6-4 红外变像管	(101)
§ 6-5 直流高压电源	(103)
§ 6-6 主动红外成像系统总体介绍	(106)
§ 6-7 大气后向散射和选通原理	(112)
第七章 直视微光成像系统	(117)
§ 7-1 系统的组成及工作原理	(117)

§ 7-2	微光像增强器	(118)
§ 7-3	直视微光成像系统的电源	(124)
§ 7-4	微光成像系统性能的基本极限	(128)
§ 7-5	微光瞄准镜	(133)
§ 7-6	微光成像系统视距估算	(135)
第八章	微光电视	(140)
§ 8-1	概述	(140)
§ 8-2	电视的基本原理	(141)
§ 8-3	微光电视系统	(146)
§ 8-4	微光电视系统的设计要点	(156)
§ 8-5	微光电视系统的视距估算	(165)
§ 8-6	CCD 微光摄像机	(167)
§ 8-7	成像光子计数探测系统	(174)
第九章	热成像系统	(176)
§ 9-1	概述	(176)
§ 9-2	光机扫描	(180)
§ 9-3	热成像系统的摄像方式	(191)
§ 9-4	红外探测器及致冷器	(195)
§ 9-5	信号处理与显示	(205)
§ 9-6	实用的热成像系统	(212)
§ 9-7	凝视型热成像系统	(217)
第十章	热成像系统性能评价与设计要点	(226)
§ 10-1	热成像系统的性能分析方法	(226)
§ 10-2	热成像系统的静态性能模型	(229)
§ 10-3	热成像系统的实验室评价	(244)
§ 10-4	热成像系统的作用距离	(251)
§ 10-5	热成像系统总体设计的基本考虑	(258)
附录一	黑体函数表	(268)
附录二	大气参数表	(271)
参考文献	(284)

第一章 绪 论

图像的最终接收器是人眼。本章从图像与视觉的关系出发,介绍微光与红外成像技术所研究的内容,及其发展历史、现状和展望,夜视系统的组成及分类。

§1-1 图像与视觉

所谓图像就是用任何技术手段,将景物目标重现为二维画面或三维立体图的视觉信息。图像的最终接收器是人眼,在白天晴空和有云的情况下,景物照度高达十万和数千 lx 之间,为人眼视觉提供了良好的环境条件。在视网膜中,有着上亿个敏感神经,数百万个锥状细胞和毛细管,为人们提供非常清晰和有色彩的外界图像。视觉敏锐度主要受视网膜的纤维结构以及衍射、像差等光学性能的限制。晚上,在晴朗夜空下,照度下降到 10^{-3} lx;在阴云夜空下,最小值约为 10^{-5} lx。夜天光来源于星光或月亮所反射的阳光,以及直接来自大气层的大气辉光。在微光条件下,视网膜在一定时间间隔内所捕获的光子数过少,以致由于随机涨落造成的“光子噪声”限制了可觉察的图像的最小细节。为了从景物上接收到更多的光子,补偿信噪比的降低,人眼自动地调整各种参数,如放大眼睛瞳孔,当眼睛完全暗适应时,在视网膜更大的面积上提取和积累信号,延长积累信号的时间等。但是人眼的功能仍然受到很大限制。正因为人类本身所具有的感觉机能和行动机能都不能达到人类自身的要求,人类为满足这些要求,于是发明了各种各样的工具,扩展自身的机能,如图 1-1 所示。

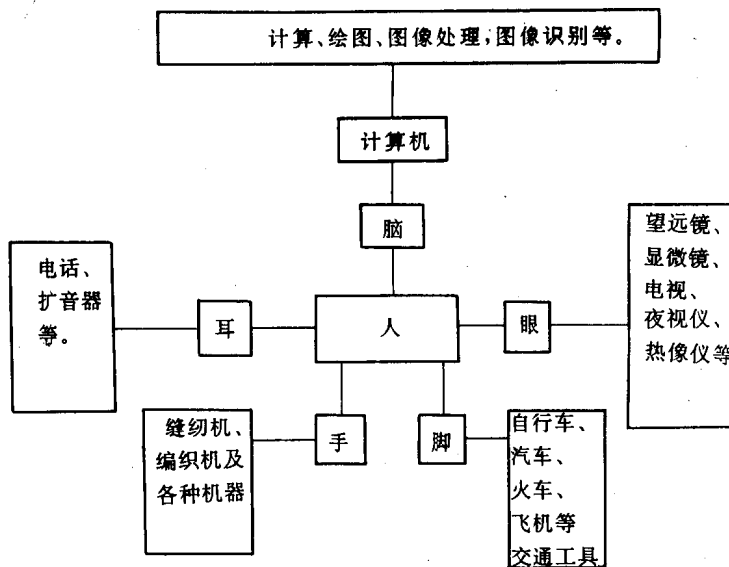


图 1-1 人体机能的扩展

人们试图采用光电成像的方法来突破视觉限制,特别是突破人眼在低照度和有限光谱响应下的视觉限制,以扩展人眼的视觉机能。

视觉机能可以从时间和空间两个方面扩展。时间上的扩展,如照相、印刷、静电复印等,将图像记录下来;空间上的扩展,如望远镜、电视等,将肉眼不能直接观察到的远处的图像传输到视网膜上。

图像记录以随时可看性和长时间保存的可能性为特点;图像传输以即时性和长距离传输的可能性为特点。两者的特点可以互补。在电视方面发展了图像记录——录像技术;而在照相方面又发展了图像传输——传真技术。

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以外,正在发展扩大视觉识别机能的技术。例如,把超出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。可见,图像与视觉是密切相关的。

§1-2 光电成像技术所研究的内容

随着科学技术的迅速发展,包括微光与红外成像技术在内的光电成像技术受到普遍重视,不断开拓新的应用领域,见表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	天像的记录
	显微镜 工 作	冶金学和地质学	在厚而不透明的断面内,现象的快速记录和一般记录
动物学		仅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中进行目视工作,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	利用红外线发射(例如甲壳虫)的研究
		法律技术	伪造物的检查
		艺术史	伪造物的检查
		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	行星和恒星的星像记录		

续表

应用波段	应用类型	使用部门	应 用
红外辐射的应用	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
		消防队	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 贮罐物料界面的检测,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	对洲际导弹的探测、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
		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
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		
法律技术	伪造物的检查		
艺术史	伪造物的检查		
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		标本的横断面和有关现象的研究
	冶金、地质学		金属和矿物断面的检查
x 射线波段的应用	x 射线照相		材料检查
		动物学和生物学	利用低辐射强度,使用放射性跟踪、记录动、植物内部活动情况
		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、海关的安全检查	武器及禁品的检查
		物理学	快速结晶体取向的劳厄图形的直接观察瞬时事件的记录 用电视技术作 x 射线图形的远程显示从谱线宽度的变化测量结晶的程度高能现象的记录

从表 1-1 中所列举的光电成像技术应用情况可以看出,光电成像技术就是利用光电变换和信号处理技术获取目标图像。它在工农业生产,科学研究和国防建设中占有重要地位。综上所述,光电成像技术所研究的内容可以概括为以下四个方面:

(1)在空间上扩大视觉机能的图像传输技术;

- (2)在时间上扩大视觉能力的图像记录、存储技术;
- (3)力图扩大视觉光谱响应范围的图像变换技术;
- (4)力图扩大视觉分辨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。其中包括:

- (1)各种辐射源及其特性;
- (2)大气光学特性对辐射传输的影响;
- (3)成像的光学系统;
- (4)辐射探测器及致冷器;
- (5)信号的电子学处理;
- (6)图像的显示技术;
- (7)人眼的视觉特性。

这些就是光电成像技术所研究的基本内容

§ 1-3 光电成像技术的发展和展望

光电成像技术始于本世纪 30 年代,1934 年,第一只红外变像管问世。它利用处于高真空中的银氧铯光阴极,将红外辐射图像转换为电子图像,再通过荧光屏,使电子图像转换为肉眼能察觉的光学图像。这一光子-电子-光子相互转换的原理就是现代夜视仪的理论基础。但在使用红外变像管实际观察时,必须有一红外辐射装置“主动”照射目标。在第二次世界大战中和朝鲜战争中得到了初步应用。

主动红外夜视仪具有隐蔽性差,易暴露,红外辐射源及供电装置笨重等缺点。人们自然想到从两个方向发展:一是利用夜间自然微光的反射辐射,即研究被动微光技术,使微弱照度下的目标成为可见;另一是利用场景中目标本身的热辐射和“大气窗口”,研究被动红外技术使热目标可见。为此,近半个世纪来,在夜视领域,发展了直视微光像增强技术,微光摄像技术和红外热成像技术。

1.3.1 直视微光像增强技术

所谓“微光”是泛指夜间或低照度下微弱的光或能量低到不能引起视觉的光。直视微光成像的原理就是将在夜间或在低照度下提取的微弱的光学图像通过一个称为像增强器的器件转换为增强的光学图像,以实现夜间或低照度下的直接观察。它的突出优点是不需要人工的照明光源,直接依靠夜天光辐射以“被动”方式成像,能观察到对方而不暴露自己。

自 60 年初发展微光夜视以来,其核心部件——像增强器的发展可分为三代,现将这三代技术及其进展加以概述。

1955 年,A. Sommer 发现,若将 Na_2KSb 双碱光阴极进行处理,所形成的 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 三碱光阴极(S-20)具有很高的灵敏度,且在可见光波段直至近红外有很好的光谱响应。这一新的光电发射体使低照度下的图像增强成为可能。60 年代中期,以纤维光学面板作为输入、输出窗三级级联像增强器问世,称为第一代像增强器(一代管)。极微弱的目标图像经过纤维光学输入窗传输到光阴极上,同心球型的电子光学系统将自光阴极逸出的光电子加速并聚焦到荧光屏上,形成可见光的输出图像;图像通过纤维光学传输到下一级,经过三级增强,使一代管具有很

高的增益,从而可以在微光下“被动”工作。

三级级联的一代管在低照度下应用具有增益高,成像清晰,不用照明源等优点,但较笨重,防强光能力差。为克服这一缺点,人们经过多年的探索,于70年代初成功地研制了能实现电子倍增的二维元件——微通道板(MCP)。它由上百万个紧密排列的空芯通道管所组成,通道芯径间距约为 $12\mu\text{m}$,长径比为 $40\sim 60$ 。通道板的两个端面镀镍,构成输入和输出电极。通道的内壁具有较高的二次发射特性,入射到通道的初始电子在电场作用下,使激发出来的二次电子依次倍增,从而在输出端获得很高的增益。利用MCP的像管称为第二代像增强器(二代管)。它具有二种聚焦形式:一是锐聚焦,它类似单级一代管,但在管子的荧光屏前安置一微通道板,称为二代倒像管;二是近贴聚焦,微通道板被贴近放置在光阴极和荧光屏之间,荧光屏制在光纤面板或光纤扭像器上,称为二代薄片管。与三级级联的一代管相比,二代管的优点是体积小,长度仅为级联管的 $1/5\sim 1/3$,重量轻,畸变小,分辨力高,能防强光和具有亮度自动控制的特性。因此,问世以来发展很快,有取代级联管的趋势。

上述一代管和二代管所用的 $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ 光阴极乃是常规的光阴极。1965年科学家发现,对掺杂型GaAs表面进行特殊处理,使真空能级位于导带底之下,电子亲和势变为零或负值,得到负电子亲和势(NEA)光阴极。这种光阴极的灵敏度很高,其典型值为 $1000\mu\text{A}/\text{lm}$,在实验室可达到 $2000\mu\text{A}/\text{lm}$ 以上。在二代管的基础上,用负电子亲和势光阴极代替多碱光阴极,就构成了第三代像增强器(三代管)。三代管具有高灵敏度,高分辨力,宽光谱响应,高传递特性和长寿命等优点。从80年代初许多技术发达国家竞相研制。在美国,到80年代中期,便有采用三代管的航空夜视系统和夜视眼镜。

三代管的制作涉及超高真空技术,表面物理技术,大面积高质量的单晶和复杂的外延生长技术,难度相当大,因而管子的价格相当昂贵。目前,人们正致力于提高二代管光阴极灵敏度,减小微通道板的噪声和改善整管的MTF,从而大幅度提高二代管的水平,增加夜视系统的观察距离。

为了进一步解决在极低微光下的应用,出现了杂交管的方案,它是以二代薄片管或三代管作为第一级,单级一代管作为第二级相耦合的组合式像管,称为杂交管。它的优点是可以获得很高的增益,并有可能减小微通道板的增益以寻求 S/N 与增益之间的最佳折衷,而分辨力比二代薄片管仅下降10%。这一方案充分运用各自的优点,使增益和信噪比充分发挥出来。

对于直视微光像增强器,其中一代、二代、三代以及杂交管能解决一公里以内的夜间观察问题。目前,正在从提高光阴极灵敏度和微通道板分辨力两方面努力,研制超二代像管,或称二代半像管。可以预期新的超二代像管性能上将有较大突破,进而提高直视微光成像系统的观察距离。

1.3.2 微光摄像技术

由于军事、天文与航空航天科学的需要,作为间接观察的微光摄像技术,近20年来得到了极大的发展。

微光摄像通常采用视频信号输出,因而可以实现远距离多点同时观察,观察者不必进入危险的侦察区;通过电路的信息处理,可以加强图像对比;根据不同观察条件的要求,通过改变扫描速度变更积累时间,可获得最适宜的视觉增益。这一系列优点使其形成一个新的重要的夜视技术领域,日益广泛地用于指挥哨所,军用车辆,直升飞机和舰船上。

微光摄像具有二条途径:一是使用真空摄像器件,如硅增强靶管和二次电子导电摄像管等;另一是使用固体摄像器件,如像增强电荷耦合器件和电子轰击电荷耦合器件等。

应该指出,真空微光摄像器件虽仍有应用,但 CCD 用于微光摄像发展非常迅速,显示出巨大的应用前景。

鉴于一般的 CCD 摄像,只能在景物照度 1lx 以上才能工作,解决微光摄像的方案之一便是将像增强管耦合到 CCD 上,形成 II/CCD。耦合的方式通常有纤维光锥耦合和光学透镜耦合,使图像尺寸与 CCD 光敏面的大小相适应。

对于许多应用,单级缩小倍率的一极管与 CCD 耦合是比较适宜的方案,其入射光照可下降二个数量级;若在前面再加一个二代薄片管,形成杂交管结构,则此 II/CCD 可用于景物照度低于 10^{-4}lx 的场合。若在管子内加选通,则景物照度的动态范围可达 $10^{-5}\sim 10^{+3}\text{lx}$ 。二代管、三代管通过缩小倍率的光锥与 CCD 耦合,亦能形成高性能的 II/CCD 系统。其总尺寸小,结构紧凑,且微通道板能防强光。不过,三代管的应用增加了费用,且目前的光锥有畸变、疵点等毛病。

固体微光摄像的另一个方案是将 CCD 作为电子图像探测器直接置于像管内取代荧光屏,电子直接轰击 CCD,CCD 提供视频信号。通常采用背面轰击 CCD 灵敏面的途径,以避免集成的 MOS 结构的绝缘层中的能量损失与充电效应。背面轰击的 CCD 要对背面进行减薄,以便获得高分辨力,高探测率和高稳定性。此外,要求封装到管子中与管子光阴极的制造工艺相兼容。电子轰击 CCD 可在景物照度 10^{-4}lx 下工作,分辨力为 500 电视线/帧。

目前,在天文学、高能物理、光谱学和空间科学中获得广泛应用的成像光子计数探测系统乃是微光摄像技术的进一步发展。这种系统具有探测单个光子或带电粒子的能力,并且有高空间分辨力以及实时成像与图像分析的能力。

随着高分辨力电视(HDTV)的进展,采用真空摄像器件的途径,将在靶面研究上有突破;另外,随着成像光子计数探测技术的进展,CCD 和各类读出系统日新月异的发展;看来,在微光下应用,真空摄像器件和固体摄像器件之间将面临新的竞争。

1.3.3 红外热成像技术

红外热成像技术实质上是一种波长转换技术,即把红外辐射转换为可见光的技术,利用景物本身各部分辐射的差异获得图像的细节。通常采用 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 两个波段。这种热成像技术既克服了主动红外夜视仪需要人工红外辐射源,并由此带来容易自我暴露的缺点,又克服了被动微光夜视仪完全依赖于环境自然光的缺点。红外热成像系统具有一定的穿透烟、雾、霾、雪等限制以及识别伪装的能力,不受战场上强光、闪光干扰而致盲,可以实现远距离,全天候观察。这些特点使热成像系统特别适合军事应用。因此,各国都以巨额投资竞相开展这一领域的研究工作。

红外热成像技术可分为致冷和非致冷两种类型。前者又有第一代和第二代之分,后者又可分为采用热释电摄像管和热电探测器阵列两种。

第一代热成像系统主要由红外探测器、光机扫描器、信号处理电路和视频显示器所组成。红外探测器是系统的核心器件,决定了系统的主要性能。红外探测器有碲化铟(InSb)和碲镉汞(CMT)等器件。当前广泛发展的是高性能多元 CMT 探测器,器件元数已高达 60 元、120 元和 180 元。80 年代初,一种称为 Sprite 探测器(或称扫积型探测器)的新型器件在英国问世,它是

由几条纵横比大于 10:1 的窄条的光导型 CMT 元件所组成,在正偏压下工作。Sprite 探测器除了具有信号检测功能外,还能在器件内部实现信号的延迟和积分,减少器件引线数和热负载,与多元探测器相比,杜瓦瓶结构简单,工艺难度下降,大大提高了可靠性。一个 8 条 Sprite 探测器相当于 120 元 CMT 探测器的性能,但只需 8 个信号通道。目前,美国热成像通用组件采用多元 CMT 探测器,并扫体制,英国则采用 Sprite 探测器,串并扫体制。这两种热成像系统温度分辨力都可小于 0.1°C ,图像清晰度可与像增强技术的图像相类比。

为便于组织大批量生产,降低热像仪成本,省去重复设计和研制的费用,便于维修、保养和有效地装备部队,美英法等国都实行了热成像的通用组件化。

第二代热成像系统要求其性能优于第一代通用组件热像仪所达到的水平,即更高的响应度,更高的分辨力和更大的视场;同时还要尺寸小、重量轻、可靠性好、能耗小、自动化程度更高且应用范围更扩大,以适应未来战争中夜间观察,搜索跟踪,导弹寻的,光电对抗和卫星侦察等要求。第二代红外热成像系统采用了位于光学系统焦平面上,具有 $n \times m$ 元且带有信号处理的面阵探测器,即红外焦平面探测器阵列。它是借助于集成电路的方法将探测器装在同一块芯片上并具有信号处理的功能,利用极少量引线把每个芯片上成千上万个探测器信号读出到信号处理器中。这种焦平面阵列的优点是:既能在焦平面上封装高密度探测器;又能在焦平面上进行信号处理。

红外焦平面阵列有两种工作方式:一是扫描式,一是凝视式。目前,红外焦平面阵列日趋成熟,除 32×32 元和 64×64 元凝视式中波红外面阵外, 128×128 元高密度 CMT 面阵已问世,预期将有更大进展。

鉴于第一代热像仪太笨重(约 5kg),体积也大;而第二代用红外焦平面阵列的热像仪成本又太高,技术难度大,人们便从非致冷途径探索热成像技术,试图在轻型、低成本上有所突破。

非致冷热成像技术采用热(释)电探测器,利用其热释电效应而工作。它的主要优点是可在一般环境温度下工作,不需要致冷;缺点是热灵敏度低和响应速度慢。总体性能不如采用光子探测器的致冷的光机扫描热成像系统。

目前,非致冷热成像有二种形式探测器:一是用硫酸三甘肽(TGS)等材料制成的热释电摄像管,其温度分辨力小于 0.2°C ,另一是采用多元热电探测器与固体多路电子传输器件组成的混合焦平面阵列结构。与以 CMT 为基础的第一代热像仪相比较,最显著的优点是,室温下工作,不需真空杜瓦瓶和高压气瓶等致冷系统,简化或不需要机械扫描装置,因而可以大大减轻系统的重量与功耗,降低成本,提高可靠性。显然,在要求中等灵敏度和中等响应速度的场合,非致冷热电探测器的热像仪大有用武之地。目前,用多元热电探测器阵列制成的热像仪的温度分辨力和空间分辨力已接近第一代前视红外热像仪的水平。

1.3.4 光电成像技术的展望

光电成像技术作为一门新兴的学科分支,随着科学技术的发展,国防战备和经济建设的需要,正处在不断发展之中。新概念,新思想,新工艺和新技术的涌现,推动着成像器件和技术日新月异的发展。90 年代成像器件和技术发展的总趋势是,向着高灵敏度,高响应速度,高分辨力,低噪声,宽光谱响应,大动态范围,小型化,固体化方向前进。在 90 年代,将研究新型的电子倍增器件,高性能的靶面,高密度与高位置灵敏度的阵列读出系统,并探索它们在成像技术中的应用;将会出现 $4K \times 4K$ 高密度的 CCD 面阵,灵敏度高达 $2000\mu\text{A}/\text{lm}$,且光谱向 $1\mu\text{m}$ 以上

波长扩展的 NEA 光阴极,以及具有方形通道、弯曲通道与长寿命的微通道板等。这一切将使直视微光与微光摄像技术跃上一个新的台阶。此外,红外焦平面阵列探测器将导致新一代热像仪灵巧化和智能化。而低成本,重量轻,低功耗的非致冷型热像仪的发展,一方面在手持热像仪领地继续冲击致冷型红外热像仪;另一方面,它将进入微光夜视仪观察距离小于 1km 的传统领地,使微光与红外之争也趋表面化。还应该指出,随着微电子技术和光电子技术的飞速发展,成像器件的固体化,集成化以及固体与真空相结合已成为不可避免的趋势。借助固体物理学成果,将使微光成像技术和红外成像技术迅猛地向前发展。

§ 1-4 夜视系统的组成及分类

各种新技术一般都是在军事科学领域中最先发展起来的,微光与红外成像技术无例外地最先在军事上应用,为适应夜战的需要,构成了各类夜视系统。

各类夜视系统的结构及工作原理可能有很大差异,但基本组成部分类似,如图 1-2 所示。

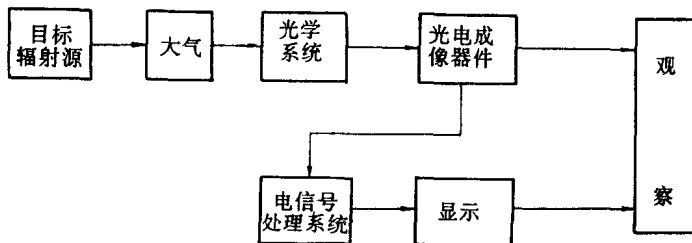
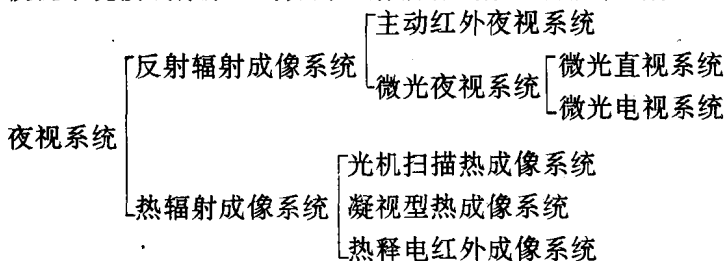
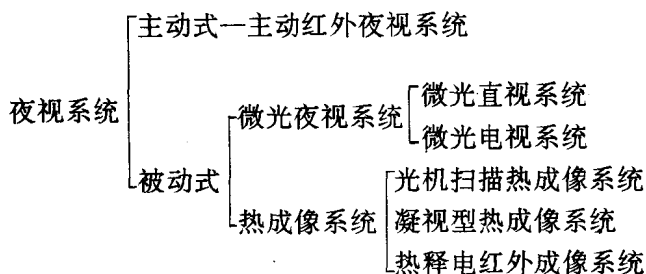


图 1-2 夜视系统的组成

夜视系统按成像原理可分为反射辐射成像和热辐射成像两大类:



按系统工作方式可分为主动式和被动式两大类:



第二章 人眼视觉的基本理论

各种成像装置是人们用以改善和扩展视觉能力的辅助工具,人眼借助这些装置获得肉眼不能直接得到的图像信息。这说明成像系统的性能与人眼的视觉特性密切相关。本章从人眼的基本构造出发,介绍人眼的视觉特性,讨论微光下的视觉探测特性,最后给出人眼对目标的探测和识别模型。

§ 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,它的基本构造如图 2-1 所示。

人眼作为一个完整的视觉系统,由三个部分构成:一是由角膜、虹膜、晶状体、睫状体和玻璃体组成的光学系统;二是作为敏感和信号处理部分的带有盲点和黄斑的视网膜;三是作为信号传输和显示系统的视神经与大脑。其中视网膜是构成人眼视觉的关键部分。

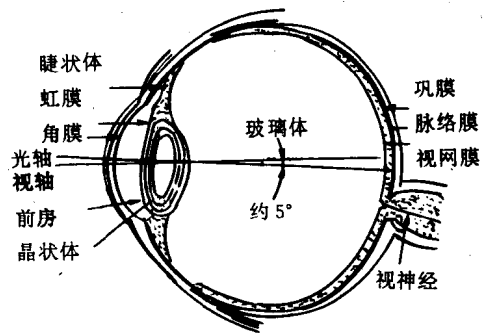


图 2-1 人眼的构造

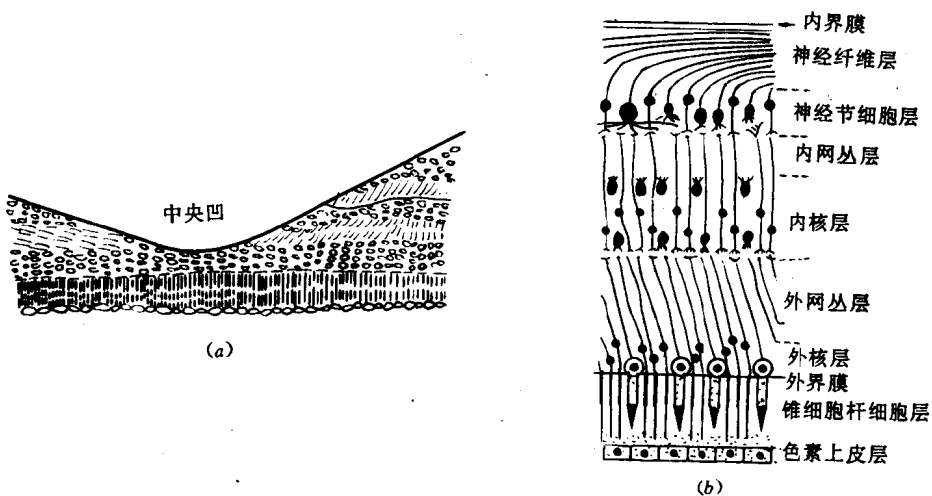


图 2-2 视网膜的结构