



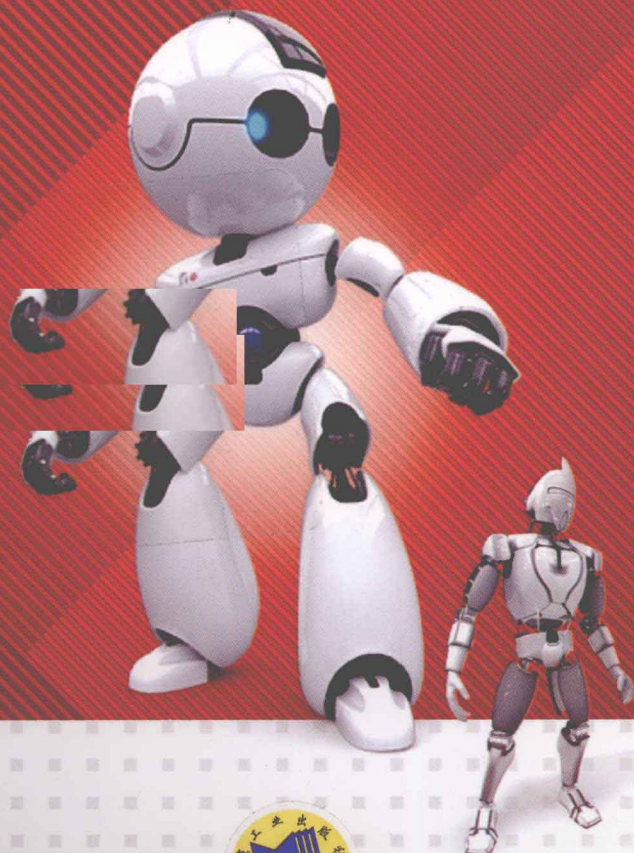
普通高等教育“十二五”规划教材



# 微光与红外成像技术

邸旭 杨进华○等编著

WEIGUANG YU HONGWAI CHENGXIANG JISHU



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

# 微光与红外成像技术

邸旭 杨进华 韩文波 冷雪 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了微光与红外成像系统的基本原理、结构及应用。全书共分8章,内容包括夜视技术概论、人眼的视觉特性、夜天辐射及光辐射度量、微光夜视仪、主动红外夜视仪、红外成像系统、微光与红外图像融合及红外成像技术应用等。

本书内容详实、理论充分、涵盖面广,可作为高等学校光电类专业本科生教材,也可兼作其他专业的选修课教学参考书,还可作为从事微光与红外技术等方面科技工作者的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

微光与红外成像技术/邱旭等编著. —北京:机械工业出版社,2012.2  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-111-34265-6

I. ①微… II. ①邱… 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. ①TN223②TN216

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第253851号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)  
策划编辑:王小东 责任编辑:王小东 谷玉春 卢若薇  
版式设计:霍永明 责任校对:肖琳  
封面设计:陈沛 责任印制:杨曦  
保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2012年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·8.75印张·214千字

标准书号:ISBN 978-7-111-34265-6

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

现代光学技术的发展日新月异，并广泛涉及微光夜视技术、红外技术、视觉与信息融合技术等诸多方面，而综合介绍这些技术及其应用的书籍目前还并不多。本书编写的宗旨是为相关专业的高校学生提供学习的平台，同时也可为从事相关工作和研究的技术人员提供参考。

微光与红外成像技术是以微光图像的增强及红外辐射图像的探测与处理为核心内容，广泛涉及光辐射的接收、传输、存储、处理及显示等内容。本书从教学的角度出发，系统地介绍了微光成像技术与红外成像技术方面的基础知识和基本原理，讲述了典型的微光红外成像系统的基本结构、工作原理、性能分析和总体设计要点。全书内容分三大部分，第一部分包括前三章，介绍微光红外的基础知识，其中第1章为夜视技术概论，第2章着重介绍人眼的视觉特性，第3章主要介绍夜天辐射及辐射度量与光度量；第二部分包括第4章至第6章，这部分也是全书的重点，从原理、器件、系统、性能分析、技术发展等诸多层面详细阐述了微光成像与红外成像技术；第三部分包括最后两章，阐述了微光与红外成像技术的应用，其中第7章讲述微光与红外图像的融合技术，第8章以红外成像技术为主线，讨论了在军事、安防、设备故障诊断、医学诊断等不同领域的综合应用。微光与红外图像的融合是本领域的最新发展成果，在同类书籍中甚少述及，故本书予以重点论述。

本书力图尽可能多地为读者提供微光与红外成像技术方面的信息、素材和思路，但因编者学识水平有限，加上编写时间紧迫，难免出现错误与不足，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 夜视技术概论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 微光夜视技术 .....	2
1.2.1 微光夜视仪 .....	3
1.2.2 微光电视 .....	4
1.3 红外成像技术 .....	5
1.3.1 第一代红外成像技术 .....	5
1.3.2 第二代红外成像技术 .....	6
1.3.3 第三代红外成像技术 .....	6
1.3.4 非制冷型红外成像技术 .....	6
1.4 夜视技术的未来发展 .....	7
1.4.1 红外成像技术与微光成像 技术的比较 .....	7
1.4.2 微光夜视技术的发展趋势 .....	7
1.4.3 红外成像技术的发展趋势 .....	8
1.4.4 微光图像和红外图像的融合 .....	11
<b>第 2 章 视觉特性探测和识别模型</b> .....	13
2.1 人眼的构造 .....	13
2.2 人眼的视觉特性 .....	14
2.2.1 视觉的适应性 .....	14
2.2.2 人眼的绝对视觉阈 .....	15
2.2.3 人眼的阈值对比度 .....	15
2.2.4 人眼的光谱灵敏度 .....	16
2.2.5 眼睛的分辨力 .....	16
2.2.6 视系统的调制传递函数 .....	18
2.3 微光下的视觉探测 .....	20
2.3.1 理想探测器的罗斯方程 .....	21
2.3.2 夏根 (Schagn) 方程 .....	21
2.3.3 弗利斯-罗斯定律 .....	22
2.4 目标的探测和识别 .....	23
2.4.1 目标搜索的一般原理 .....	23
2.4.2 人眼目视搜索时的运动 .....	25
2.4.3 目标探测-识别模型 .....	25
2.4.4 约翰逊 (Johnson) 准则 .....	28
<b>第 3 章 夜间辐射及光辐射度量</b> .....	30
3.1 夜间辐射 .....	30

3.2 辐射度量与光度量 .....	34
3.2.1 辐射度量 .....	35
3.2.2 光度量 .....	36
3.2.3 辐射度量与光度量之间的关系 .....	37
3.3 光辐射量计算 .....	37
3.3.1 朗伯辐射体 .....	37
3.3.2 光辐射量计算举例 .....	39
<b>第 4 章 微光夜视仪</b> .....	43
4.1 微光夜视仪概论 .....	43
4.2 第一代微光夜视仪 .....	45
4.3 第二代微光夜视仪 .....	46
4.4 第三代微光夜视仪 .....	48
4.5 微光夜视仪的静态性能 .....	51
4.6 微光夜视仪的总体设计与视距估算 .....	53
4.7 微光电视 .....	58
4.8 微光电视系统的静态性能 .....	61
4.9 微光电视系统的视距 .....	66
<b>第 5 章 主动红外夜视仪</b> .....	71
5.1 主动红外夜视仪的组成及工作原理 .....	71
5.2 红外变像管 .....	72
5.3 红外探照灯 .....	73
5.4 主动红外夜视仪的光学系统 .....	74
5.5 直流高压电源 .....	74
5.6 大气后向散射和选通原理 .....	75
5.7 视距估算 .....	76
<b>第 6 章 红外成像系统</b> .....	79
6.1 概述 .....	79
6.2 红外成像系统的工作原理与结构 .....	80
6.2.1 红外成像系统的工作原理 .....	80
6.2.2 红外成像系统的类型和组成 .....	80
6.2.3 红外成像系统的基本参数 .....	81
6.3 红外光学系统 .....	82
6.3.1 红外物镜系统 .....	82
6.3.2 光机扫描系统 .....	84
6.4 红外探测器 .....	86
6.4.1 红外探测器的用途及类型 .....	86
6.4.2 红外探测器的特性参数 .....	87

6.4.3 常用红外探测器 .....	89	7.2.1 微光图像特征 .....	110
6.4.4 红外焦平面阵列器件 .....	90	7.2.2 红外图像特征 .....	111
6.5 红外成像中的信号处理 .....	94	7.2.3 红外与微光图像的比较 .....	112
6.5.1 前置放大器 .....	94	7.3 图像融合预处理 .....	113
6.5.2 直流恢复 .....	94	7.3.1 图像去噪处理 .....	113
6.5.3 多路转换技术 .....	96	7.3.2 微光与红外图像配准技术 .....	115
6.5.4 通频带选择 .....	96	7.4 微光与红外图像融合算法 .....	119
6.5.5 温度信号的线性化 .....	97	7.4.1 加权平均法 .....	119
6.5.6 中心温度与温度范围的选择 .....	97	7.4.2 拉普拉斯塔形分解融合 .....	120
6.6 红外图像增强 .....	97	7.4.3 对比度调制融合 .....	120
6.6.1 直方图 .....	97	7.4.4 小波变换法 .....	121
6.6.2 自适应分段线性变换 .....	98	<b>第8章 红外成像技术的应用</b> .....	123
6.7 红外成像系统的综合特性 .....	100	8.1 红外成像技术在煤矿中的应用 .....	123
6.7.1 调制传递函数 .....	100	8.1.1 红外成像检测的基本理论 .....	123
6.7.2 噪声等效温差 .....	105	8.1.2 矿用红外成像仪及实际应用 .....	123
6.7.3 最小分辨温差 .....	106	8.2 红外成像技术在安防领域的应用 .....	125
6.7.4 最小可探测温差 .....	107	8.3 红外成像技术在军事领域中的应用 .....	127
<b>第7章 微光与红外图像融合</b> .....	108	8.4 红外成像技术在设备故障 诊断中的应用 .....	129
7.1 图像融合概述 .....	108	8.5 红外成像技术在医学诊断中的应用 .....	130
7.1.1 图像融合的概念 .....	108	<b>参考文献</b> .....	134
7.1.2 图像融合的层次划分 .....	109		
7.2 夜视图像的融合 .....	109		



# 第1章 夜视技术概论

## 1.1 引言

在我们生活的世界中，光不只是生命赖以繁衍生息的主要能源，也是人类认识客观世界的重要信息源。人类通过自身的眼、耳、鼻、舌、身（触觉）去认识自然界，其中，通过人眼视觉得到的图像信息所占的比例最大。据统计，在人类获得的信息中，由视觉获取的信息占60%，由听觉获取的信息占20%，触觉获取的信息占15%，味觉获取的信息占3%，嗅觉获取的信息占2%。而在当今飞速发展的信息时代，利用电视、互联网、卫星通信等光电技术手段，使得视觉信息在人类认识世界的过程中所起的作用早已超过90%。可以想象，如果没有光，没有各种先进的光电技术手段，人类就不会有今天这种绚烂多彩、盛况空前的文明。

但应该注意到，现今光电技术中所论述的光，就其物理本质而言，包括了从高能粒子（ $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线）、X射线、紫外线、可见光、红外线，以至短波、中波和长波的无线电波等所构成的整个波谱的电磁辐射。产生或反射这些电磁波以供人眼观察的景物信息的光谱、强度、速度以及时空分布会千差万别，很显然，单靠人的裸眼，无法直接感知上述全部光信息。这是因为尽管人眼结构精巧、功能齐全，是任何其他单一光学或光电仪器所无法比拟的，然而就整体而言，人眼却具有有限的空间、时间、光谱和能量的分辨能力。为了克服人眼的上述缺陷，人类先后发明了各种光学和光电仪器。例如，我国古代天文学家利用简单的“窥管”，斩除四周杂散光，改善了观察星体的视觉分辨率；望远镜、显微镜的发明，又把人眼的视野扩展到了遥远的星空和物质的微观世界。科学技术的飞速发展创造了近代的高度文明，给人类提供了更为有效、动态范围更宽和光谱适应性更强的各类光电观察、瞄准、显示仪器，如各种激光、微光、红外仪器等。

各类成像技术的发展离不开社会需求，尤其是军事需求的牵引和相关基础技术进步的推动。作为光电技术重要组成部分的光电成像技术发展的强大推动力是军用夜视、夜瞄装备的迫切需求。出其不意、攻其不备是军事上出奇制胜的策略之一，而夜间或其他能见度不良的气候条件是实现上述作战方针的最佳时机，因此，作为指战员耳目的各类夜视器材的发展自然会受到各国高度重视。夜视技术在现代战争中具有重要的地位，装备夜视器材的武器装备可遍及海陆空作战平台，应用于大、中、小型武器装备。因此，掌握先进的夜视技术对于控制战场形势具有至关重要的意义。顺应这种强烈需求，自第一次世界大战后，尤其是近几十年来，迅速发展起微光夜视和红外成像这两类光电成像领域的主体技术。

按照传统的划分方法，夜视技术主要分为微光夜视技术和红外成像技术两大类。

微光夜视技术，按国内外文献的约定，习惯上被理解为真空光电子成像技术的总称，它以光子——光子为景物图像的信息载体，基于器件的外光电效应、电子倍增和电光转换等原理，对夜间微弱光或其他非可见光照明下的景物进行图像摄取、转换和增强，最后显示为人眼可见的图像；而红外成像技术利用景物自身的红外辐射空间分布，以红外光子、光生载流

子（电子和空穴）为景物图像信息载体，通过红外探测器的内光电效应（光电导效应或光生伏特效应）及特定扫描读出和 TV 显示等原理，再现被观察的景物为可见光图像。

微光夜视和红外成像是军用夜视观瞄仪器的两大支撑技术，两者各有特色，相互竞争又互为补充。相比而言，微光夜视仪器体积小、重量轻、成本低、操作方便、维护容易，微光夜视仪器夜天光下视距在几百米至几千米；微光电视仪器视距可达 10 ~ 20km；红外成像仪器作用距离远，全天候、防伪装能力强，易于实现远程武器精确制导、目标跟踪和多波段多频谱探测功能。两类夜视观瞄器材先后在第一次世界大战、第二次世界大战和 20 世纪 90 年代海湾战争中发挥了神奇的作用，从而促进了夜视技术装备的扩大和不断更新换代。

## 1.2 微光夜视技术

白天，我们人眼能看到自然界中的景物，是因为眼睛接收到它们表面反射的太阳直射光或是散射光。夜晚，由于没有太阳光，人眼就看不见自然界中的景物了。但在多数夜间，仍有月光、星光、大气辉光存在，自然界中的景物表面仍然要反射这些微弱的光线，于是我们人眼还能模糊地看到近处景物、大景物的轮廓。“漆黑的夜晚”，天空仍然充满了光线，这就是所谓“夜天辐射”。夜天辐射来自太阳、地球、月亮、星球、云层、大气等自然辐射源，只是由于其光照度太弱（低于人眼视觉阈值），不足以引起人眼的视觉感知。解决这个问题基本思路是：①使用大口径的望远镜，尽可能多地得到光能量；②像电子学那样，设法对微弱的光图像进行放大；③用红外线探照灯或红外照明弹对景物进行照明；④利用景物在红外波段的辐射能量实现热成像。用不同的技术解决这个问题，就形成了不同的夜视方法。

把夜间微弱光辐射增强至正常视觉所要求的程度，是微光夜视技术工作的核心任务。微光夜视技术致力于探索夜间和其他低光照度时目标图像信息的获取、转换、增强、记录和显示，它的成就集中表现为使人眼视觉在时域、空域和频域的有效扩展。就时域而言，它克服“夜盲”障碍，使人们在夜晚行动自如。就空域而言，它使人眼在低光照空间（如地下室、山洞、隧道）仍能实现正常视觉。就频域而言，它把视觉频段向长波区延伸，使人眼视觉在近红外区仍然有效。在军事上，微光夜视技术已用于夜间侦察、瞄准、车辆驾驶、光电火控和其他战场作业，并可与红外、激光、雷达等技术结合，组成完整的光电侦察、测量和告警系统。微光夜视器材已成为军队武器装备中重要的组成部分，同时也广泛应用于天文、公安、航天、海洋事业等领域。

微光夜视技术是用电真空和电子光学等技术实现光子图像—电子图像—光子图像的转换，在转换过程中，通过对电子图像的增强实现对光子图像的增强，进而达到在有微弱光线照明下的夜间观察的一种技术。微光夜视技术的核心是微光图像增强器，它是一个由光电阴极、电子光学部件、荧光屏三大部分组成的光电真空器件。其工作原理是：景物反射的微弱可见光和近红外光会聚到光电阴极上，光电阴极受激向外发射电子，在这一过程中，实现把景物的光强分布图像变成与之对应的电子数密度分布图像；在电子光学部件中，输入一个电子，可以输出成千上万个电子，因此，光电阴极的电子数密度分布图像就被成千上万倍地增强了，所谓的“微光图像增强”就是在这过程中实现的；最后，经过倍增的大量电子轰击荧光屏，实现电子图像—光子图像的转变，得到增强的微光图像供人眼观察。

在微光夜视技术发展的初期，使用的核心器件是近红外光图像变像管，可将其看成是一



种电子倍增效率比较低的微光图像增强器。它利用处于高真空中的银氧铯光电阴极，将红外辐射图像转换为电子图像，再通过荧光屏，使电子图像转换为人眼可观察的光学图像。这种光子—电子—光子相互转换的原理就是现代微光夜视仪的理论基础。但在使用红外变像管观察时，需要采用红外线探照灯主动照射目标，以提高观察距离，因此这种装置也称为主动式红外夜视仪。在第二次世界大战中得到了初步应用。

主动式红外夜视仪成像清晰，对比度好，但需要红外光源照射，存在隐蔽性差、易暴露、能耗大及供电装置笨重等缺点。人们自然想到利用夜天自然微光，研究被动微光技术，使微弱照度下的目标成为可见，从而发展了微光夜视技术。

目前，采用微光夜视技术的微光夜视系统可分为两大类：微光夜视仪（属直接观察型）和微光电视（属间接观察型）。

### 1.2.1 微光夜视仪

以像增强器为核心部件的微光夜视器材称之为微光夜视仪。由于其光增强过程的功能，使人能在极低照度（ $10^{-5}\text{lx}$ ）条件下有效地获取景物图像信息。

微光夜视仪包括四个主要部件：强光力物镜、像增强器、目镜、电源。从光学原理而言，微光夜视仪是带有像增强器的特殊望远镜。微弱自然光经由目标表面反射，进入夜视仪；在强光力物镜作用下聚焦于像增强器的光电阴极面（与物镜后焦面重合），激发出光电子；光电子在像增强器内部电子光学系统的作用下被加速、聚焦、成像，以极高速度轰击像增强器的荧光屏，激发出足够强的可见光，从而把一个被微弱自然光照明的远方目标变成适于人眼观察的可见光图像，经过目镜的进一步放大，实现更有效的目标观察。以上过程包括了由光学图像到电子图像再到光学图像的两次转换。

微光夜视仪按所用像增强器的类型，可分为第一代、第二代、第三代微光夜视仪。

#### 1. 第一代微光夜视仪

20世纪60年代初，在多碱光电阴极（Sb-Na-K-Cs）、光学纤维面板的发明和同心球电子光学系统设计理论完善的基础上，人们将这三大技术工程化，研制出第一代微光管。其单级管由一个平/凹光纤面板光电阴极、同心球静电聚集系统和凹/平光纤面板荧光屏组成。一级单管可实现约50倍亮度增益，通过三级级联，像增强器增益可达 $5 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$ 倍，这样就可把典型夜天光照度（ $10^{-3}\text{lx}$ ）下的景物亮度放大到 $10 \sim 100\text{cd}/\text{m}^2$ ，接近人眼正常观察物体所需的亮度条件。用这种亮度增强方式实现被动夜视观察的理论和实践，通常叫做第一代微光夜视仪。第一代微光夜视仪属于被动观察方式，其特点是隐蔽性好、体积小、重量轻、成品率高，便于大批量生产；技术上兼顾并解决了光学系统的平像场与同心球电子光学系统之间的矛盾，成像质量明显提高。

第一代微光夜视仪曾在战争中得到装备应用，发挥了重要作用。但在使用中暴露了它的几大弱点：一是怕强光，难以在战火纷飞的环境下正常工作，有晕光现象；二是器件尺寸和重量限制了它在轻武器夜瞄镜上的大量装备和广泛应用。

#### 2. 第二代微光夜视仪

第二代微光夜视仪的主要特色是微通道板电子倍增器（MCP）的发明并将其引入单级微光管中。这种MCP由上百万个 $10\mu\text{m}$ 级直径的微通道的二次电子倍增器阵列所组成，每一个微通道相当于一个倍增管倍增极，在 $900 \sim 1000\text{V}$ 工作电压下，每块MCP电子增益可达

$10^3 \sim 10^4$ 。这样,装有一个 MCP 的一级微光管就可达到  $10^4 \sim 10^5$  亮度增益,从而替代了原有的体积大、笨重的三级级联一代微光管;同时, MCP 微通道板内壁实际上是具有固定板电阻的连续倍增级。因此,在恒定工作电压下,当强电流输入时,有恒定输出电流的自饱和效应,此效应正好克服了微光管的晕光现象;加之它的体积更小、重量更轻。所以第二代微光夜视仪是目前国内外微光夜视装备的主体。

第一代、第二代微光管用的是多碱光电阴极,灵敏度在  $225 \sim 450 \mu\text{A}/\text{lm}$  之间,做成的仪器可在星光夜晚照度下正常工作。为了充分利用夜天光丰富的近红外光谱能量,提高器件的灵敏度,人们从 20 世纪 70 年代到 80 年代,积极研制和开发了第三代微光夜视仪。

### 3. 第三代微光夜视仪

1965 年,砷化镓负电子亲和势 (Negative Electron Affinity, NEA) 反射式光电阴极理论的发展和工艺的实现,在微光夜视领域引发了一场革命。这类 III ~ V 族半导体光电阴极的显著特点是灵敏度高,向红外波段延伸的潜力大。将透射式 GaAs 光电阴极和带  $\text{Al}_2\text{O}_3$  离子壁垒膜的 MCP 引入近贴微光管中就构成了第三代微光夜视仪的两大特色。与第二代微光夜视仪相比,第三代微光夜视仪的灵敏度增加了 4 ~ 8 倍,寿命延长了 3 倍,对夜天光光谱利用率显著提高,在漆黑 ( $10^{-4}\text{lx}$ ) 夜晚的目标视距延伸了 50% ~ 100%。20 世纪 80 年代以来,美欧国家军队陆续大量装备了第三代微光夜视仪。在 1983 年英阿马岛战争、1991 年海湾战争中使用后,取得了优于前几代微光产品的满意结果,反过来又促进了第三代微光夜视仪的进一步扩大再生产和装备。第三代微光夜视仪的工艺基础是超高真空、NEA 表面激活、双近贴、双钢封、表面物理、表面化学和长寿命、高增益 MCP 技术等,又为发展新一代微光管和长波红外光电阴极像增强器等高技术产品创造了良好的条件。

## 1.2.2 微光电视

微光电视系统主要包括微光电视摄像机、传输通道、接收显示装置三部分。其中的微光电视摄像机除具有普通电视摄像机的功能之外,还突出地表现出把微光图像增强的作用。微光电视的传输通道可以是借助电缆或光缆的闭路传输方式,也可以是利用微波、超短波做空间传输的开路方式。它的接收显示装置与一般电视没有显著的区别。

在军事上,微光电视可用于以下场合:①夜间侦察、监视敌方阵地,掌握敌人集结、转移和其他夜间行动情况;②记录敌方地形、重要工事、大型装备,发现某些隐蔽的目标;③借助其远距离传送功能,把敌纵深领地的信息实时传送给决策机关;④与激光测距机、红外跟踪器(或热像仪)、计算机等组成新型光电火控系统;⑤在电子干扰或雷达受压制的条件下为火控系统提供替代的或补充手段;⑥对我方要害部门实行警戒。

目前,外军在各兵种都配有微光电视装备。给歼击机、轰炸机、潜艇、坦克、侦察车、军舰等重要武器配上微光电视,则作战性能更加完备。在公共安全方面,可应用微光电视组成监视告警系统,对机场、银行、档案室、文物馆、重要机关、军用仓库等实施远距离夜间监视和告警。微光电视在扩展空域、延长时域、拓宽频域方面对人类视觉的贡献与微光夜视仪相似。同时,微光电视又有一些新的特色:①它使人类视觉突破了必须面对景物才能进行有效观察的限制;②突破了要求人与夜视装备同在一地的束缚,实现远离仪器现场的观察;③可实施图像处理,提高可视性;④可以实时传送和记录信息,可以对重要情节多次重放、慢放、“冻结”;⑤实现多用户的“资源”共享,供多人多点观察;⑥改善了观察条件;⑦可

以远距离遥控摄像,隐蔽性更好。它的缺点是:①价格较高,使大批量装备部队受到限制;②耗电多,体积、重量较大;③操作、维护较复杂,影响其普及应用。

### 1.3 红外成像技术

作为军用夜视装备的主体技术之一的红外成像器件及其系统技术是20世纪80年代以来发展起来的。美国、英国、法国、德国和俄罗斯等国处于研究、开发和应用的领先地位。其装备包括红外观察仪、红外瞄准镜、潜望式红外热像仪、火控热像仪、红外跟踪系统、前视红外系统及红外摄像机等。这些装备的应用范围分别是:

陆军:夜间侦察、监视、瞄准和射击、制导和防空等;

海军:监视、巡逻、观察和导弹跟踪等;

空军:侦察机、攻击机、轰炸机和直升机的导航、搜索、跟踪、识别、捕获、观察和火控等;

航天:星载系统的侦察、监视和摄影等;

民用:医疗诊断、火灾防救、炉温检测和高压工程等。

红外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。

红外成像技术可分为制冷和非制冷两种类型。前者有第一代、第二代和第三代之分,后者可分为热释电摄像管和热电探测器阵列两种。

#### 1.3.1 第一代红外成像技术

第一代红外成像技术主要由红外探测器、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( $\text{InSb}$ )和碲镉汞( $\text{HgCdTe}$ 或CMT)等器件。当前广泛发展的是高性能多元 $\text{HgCdTe}$ 探测器,器件元数已高达60元、120元和180元。20世纪80年代初,一种称为SPRITE探测器(或称扫描型探测器)的器件在英国问世,它是由几条纵横比大于10:1的窄条的光导型 $\text{HgCdTe}$ 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 $\text{HgCdTe}$ 探测器的性能,但只需8个信号通道。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。美国热成像通用组件采用多元 $\text{HgCdTe}$ 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 $0.1^\circ\text{C}$ ,图像清晰度可与像增强技术的图像相媲美。

### 1.3.2 第二代红外成像技术

第二代红外成像技术采用了红外焦平面探测器阵列 (IRFPA), 从而省去了光机扫描机构。这种焦平面阵列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。由于去掉了光机扫描, 这种用大规模焦平面成像的传感器又被称为凝视传感器。它的体积小、重量轻、可靠性高。在俯仰方向可有数百元以上的探测器阵列, 可得到更大张角的视场, 还可采用特殊的扫描机构, 用比通用热像仪慢得多的扫描速度完成  $360^\circ$  全方位扫描以保持高灵敏度。这类器件主要包括 InSb IRFPA、HgCdTe IRFPA、SBD FPA、非制冷 IRFPA 和多量子阱 IRFPA 等。

### 1.3.3 第三代红外成像技术

第三代红外成像技术采用的红外焦平面探测器单元数已达到  $320 \times 240$  元或更高, 其性能提高了近 3 个数量级。目前,  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  焦平面探测器的单元灵敏度又比  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  探测器高 2 ~ 3 倍。因而, 基于  $320 \times 240$  元的中波与长波热像仪的总体性能指标相差不大, 所以  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  焦平面探测器在第三代焦平面成像技术中格外的重要。从长远看, 高量子效率、高灵敏度、覆盖中波和长波的 HgCdTe 焦平面探测器仍是焦平面器件发展的首选。

### 1.3.4 非制冷型红外成像技术

由于制冷型红外探测器材料昂贵, 探测器的成品率很低, 导致了制冷型红外成像系统价格昂贵; 同时, 制冷型红外成像系统需要一套制冷设备, 增加了系统成本, 降低了系统的可靠性; 此外, 制冷型红外成像系统功耗大、体积大、笨重, 难以实现小型化, 这些都限制了制冷型红外成像系统的广泛应用。

非制冷红外焦平面探测器阵列具有室温工作、无需制冷、光谱响应与波长无关、制备工艺相对简单、成本低、体积小、易于使用、维护和可靠性好等优点, 因此形成了一个新的富有生命力的发展方向, 其目的是以更低的成本、更小的尺寸和更轻的重量来获得极好的红外成像性能。近年来, 已研制成功三种不同类型的非制冷红外焦平面探测器阵列, 这三种不同类型的非制冷红外焦平面探测器阵列工作的物理机理分别为:

(1) 热电堆 根据塞贝克 (Seebeck) 效应检测热端和冷端之间的温度梯度, 信号形式是电压。

(2) 测辐射热计 探测温度变化引起载流子浓度和迁移率的变化, 信号形式是电阻。

(3) 热释电 探测温度变化引起介电常数和自发极化强度的变化, 信号形式是电荷。

在这三种不同类型的非制冷红外焦平面探测器阵列器件中, 测辐射热计阵列的发展最为迅速, 并且取得了令人瞩目的成就。它采用类似于硅工艺的硅微机械加工技术进行制作, 为了实现有效的热绝缘, 一般采用桥式结构。探测器与硅读出电路之间通过两条支撑腿实现电互连。测辐射热计的灵敏度主要取决于它与周围介质的热绝缘, 即热阻, 热阻越大, 可获得的灵敏度就越高。目前测辐射热计阵列的温度分辨率可达  $0.1\text{K}$ 。非制冷测辐射热计阵列技术是红外成像技术在过去 20 年中取得的最重要的进展。2000 年, 法国 Sofradir 公司生产出了第一只非制冷焦平面红外探测器, 探测器阵列规模为  $320 \times 240$  元, 像元中心距为  $45 \mu\text{m}$ ,

填充因子大于 80%，噪声等效温差（NETD）达到 0.1K（典型值），器件的性能指标达到了当今世界先进水平。

## 1.4 夜视技术的未来发展

### 1.4.1 红外成像技术与微光成像技术的比较

由于工作原理不同，红外成像技术与微光成像技术各有利弊。

1) 红外成像系统不像微光夜视仪那样借助夜光，而是靠目标与背景的辐射产生景物图像，因此红外热成像系统能 24h 全天候工作。

2) 随着计算机技术的发展，很多红外热成像系统具有完整的软件系统以实现图像处理、图像运算等功能，图像质量大大改善。

3) 红外辐射比微光的光辐射具有更强的穿透雾、霾、雨、雪的能力，因而红外成像系统的作用距离更远。

4) 红外热成像能透过伪装，探测出隐蔽的热目标，甚至能识别出刚离去的飞机和坦克等所留下的热迹轮廓。

5) 微光夜视仪图像清晰、体积小、重量轻、价格低、使用和维修方便、不易被电子侦察和干扰，所以应用范围广。

6) 微光夜视仪的响应速度快，利用光电阴极像管可实现高速摄影。

7) 一般微光成像面为连续靶面，期间的分辨率很高，目前最高达到 90lp/II Hn。相当于 1600 以上的电视行。

8) 微光夜视频谱响应向短波范围扩展的潜力大，包括高能离子、X 射线、紫外线、蓝绿光景物的探测成像基本上都是基于外光电转换、增强、处理、显示等微光成像技术原理。

从学科和技术发展的角度看，红外技术有一定优势。可见光的存在是有条件的，而任何物体都是红外源，都在不停地辐射红外线，所以红外技术的应用将无处不在。目前，在近距离夜视方面，由于微光夜视仪价格低廉，图像质量也较好，仍然占据主要地位。随着红外器件价格的降低，红外热像仪必将大有作为。而在远距离夜视方面，红外热像仪的作用更为突出。

### 1.4.2 微光夜视技术的发展趋势

微光夜视器件的研究方向是致力于提高已有的几代产品的性能，降低成本，扩大装备；进一步延伸新一代产品的红外响应和提高器件的灵敏度。

(1) 超二代微光夜视技术 超二代微光管采用与第三代微光近贴管结构大体相同的技术，主要技术特点是将高灵敏度的多碱光电阴极引入到第二代微光管中，并借用第三代微光 MCP、管结构、集成电源以及结晶学、半导体本体特性等机理和工艺研究成果，其成像质量大幅度提高，由于工艺相对简单，价格相对较低，因而成为目前的主流产品。

(2) 第四代微光夜视技术 近年来，微光管的设计者从 MCP 中去除离子壁垒膜以得到无膜的微光管，同时增加一个自动门开关电源，以控制光电阴极电压的开关速度，并且改进了低晕成像技术，有助于增强在强光下的视觉性能。1998 年，Litton 公司首先研制成功无膜

MCP 的成像管, 在目标探测距离和分辨力上有很大的提高, 尤其是在极低照度条件下。其关键技术涉及新型高性能无膜 MCP、光电阴极与 MCP 间采用的自动脉冲门控电源及无晕成像技术等。这种无膜的 BCG-MCPIV 代微光管技术虽然刚刚起步, 但良好的性能使其必然成为 21 世纪微光像增强技术领域的新热点。

随着微光夜视技术的发展, 微光夜视装备越来越体现出集成化的趋势, 一方面表现在将微光夜视功能直接集成到武器、观测设备上; 另一方面体现在夜视装备本身功能集成上。对前者来说, 主要体现在夜视瞄准器的发展上。另外, 一些光学观测器材, 如测距仪也将夜视仪集成进去, 成为昼夜观测器材, 其中比较有代表性的是瑞士 Vectronix 公司的 LEICA BIG-35, 这个设备可以昼夜工作, 测量远方目标的距离和方位角, 测量远处两个目标之间距离和方位角, 还可以通过自身携带的全球定位系统 (GPS) 定位远方敌人的坐标, 大大提高了侦察员的侦察效率。

对于夜视装备本身, 除了向更小型化、紧凑化发展外, 应该向现代战争的 C<sup>4</sup>I 系统靠拢, 不仅应具备数字连接接口, 更应成为单兵信息系统的显示终端。以瑞士的 BIM4 型夜视仪为例, 该设备的夜视图像中可以加入多种单兵信息, 如方向北、指挥员指令、电子地图、战场示意图等, 成为未来单兵作战系统的核心部件之一。

总的来说, 夜视技术的发展是紧紧跟随现代战争科技发展趋势的, 不仅仅是夜视能力本身的提高, 更加趋向于与未来战争的信息化系统融于一体。

### 1.4.3 红外成像技术的发展趋势

#### 1. 红外技术的发展趋势

红外技术的发展以红外探测器的发展为标志, 可以从红外探测器的发展来推断其发展趋势。

1) 红外焦平面器件发展到高密度、快响应、像元数达到  $10^6 \sim 10^{10}$  元的大规模集成器件, 由二维向三维多层次结构发展, 在应用上就可以实现高清晰度热像仪, 极大地缩小整机体积, 增强功能。

2) 双色、多色红外器件的发展使整机可同时实现不同波长的多光谱成像探测, 成倍扩大系统信息量, 成为目标识别和光电对抗的有效手段。

3) 探测器在焦平面上实现神经网络功能, 按程序进行逻辑处理, 使红外整机实现智能化。

4) 提高探测器工作温度。高性能室温红外探测器和焦平面器件是发展的重点之一, 不需要制冷器, 将会使整机更精巧、更可靠, 从而实现全固体化。

5) 提高成品率, 降低价格。

目前的红外成像技术没有充分利用红外辐射的各种特性。随着探测技术和传感器技术的发展, 红外探测的精度和灵敏度越来越高, 人们对于记录和再现现实环境的要求也越来越高, 要求探测技术达到对环境的全面监测。目前, 世界各国装备的各种红外侦察装备大都能通过探测目标的红外辐射, 提供目标的二维空间信息, 但无法确定目标的距离信息。因而随着对环境空间参数准确性的要求不断提高, 拓展空间距离信息, 寻找适当的实时准确的三维空间信息获取手段, 已经变得越来越重要。因此, 人们试图找到一些新方法来提高目标与背景信号的信噪比, 改善特定环境的应用场合下对特定目标检测的准确度和清晰度, 获取更加



丰富的目标信息，这就是科学家们不断探索新型红外成像机理的原动力。科学家们从红外信号的不同频段、幅度、相位和偏振等特性寻求新的成像方法，一些新型红外成像技术不断研究出来。

## 2. 太赫兹成像

太赫兹辐射是指频率在  $0.1 \sim 10\text{THz}$  范围内的远红外电磁辐射。太赫兹成像是 1995 年由 Hu Binbinm 等人首先提出的，其原理是利用已知波形的太赫兹波作为成像射线，透过成像样品的太赫兹波的强度和相位包含了样品复介电常数的空间分布；将透射的太赫兹波的强度和相位的二维信息记录下来，并经过适当的数字处理和频谱分析，就能得到样品的太赫兹波的三维图像。太赫兹成像的一个显著特点是信息量大，每一像源对应一个太赫兹时域谱，通过对时域谱进行傅里叶变换又可得到每一点的太赫兹频率谱。由于太赫兹探测器阵列目前还十分昂贵，典型的太赫兹成像是用单元探测器进行光栅扫描来实现的。图 1-1 所示是一个太赫兹成像系统示意图。

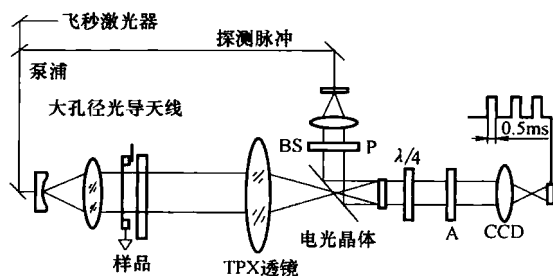


图 1-1 太赫兹成像系统示意图

由于太赫兹的频率很高，所以其空间分辨率很高，又由于太赫兹脉冲很短，它具有很高的时间分辨率；另外，太赫兹的能量很少，不会对物质产生破坏作用，所以与 X 射线相比，它又有很大的优势。太赫兹成像的一些主要优点包括太赫兹辐射能以很少的衰减穿透，如陶瓷、脂肪、布料、塑料等物质，还可无损穿透墙壁、烟雾；太赫兹的时域频谱信噪比很高，因此太赫兹非常适合成像应用。

太赫兹成像的主要瓶颈在于产生足够强的有效信号，除自由电子激光外，目前大多数太赫兹辐射源功率都很低；太赫兹成像所需的许多元器件还未开发出来；太赫兹成像距离短，目前的太赫兹成像要求目标在太赫兹辐射源的数十厘米范围内；太赫兹成像数据采集的时间长。

## 3. 红外偏振成像

(1) 红外偏振成像机理 众所周知，光是具有偏振性的，同样，作为电磁波的热辐射同光波一样也是具有偏振性的。电磁波的偏振由两个正交的偏振矢量组成，它们都与波前的传播方向垂直。如果波前的传播方向为  $Z$ ，电场的两个偏振分量的方向就是  $X$ 、 $Y$  方向，位移 ( $z$ ) 和时间 ( $t$ ) 的函数可以写成下面的形式

$$\begin{cases} E_x(z, t) = E_{ox} \cos(kz - \tilde{\omega}t) x \\ E_y(z, t) = E_{oy} \cos(kz - \tilde{\omega}t + \varepsilon) y \end{cases}$$

式中， $E_{ox}$ 、 $E_{oy}$  是电场在  $X$ 、 $Y$  方向的振幅； $k$ 、 $\tilde{\omega}$  分别是空间频率和时间频率； $\varepsilon$  是  $Y$  方向电场的偏振矢量对于  $X$  方向的相位延迟。所有与偏振有关的信息都可以由邦加球上 4 个矢量 ( $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ ) 表示。其关系表示为

$$\begin{aligned} S_1 &= S_0 \cos(2\chi) \cos(2\psi) \\ S_2 &= S_0 \cos(2\chi) \sin(2\psi) \end{aligned}$$

$$S_3 = S_0 \sin(2\chi)$$

用这种方法所有偏振光都可以用邦加球上一点来表示，偏振度定义为

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}$$

自然界中的电磁波由许多偏振度不同的电磁波组成。这种现象在反射和辐射中都有表现，从紫外到红外波段都有，各个自然物体有着不同的偏振度。红外偏振成像就是利用红外偏振的特性将本来难以识别的杂乱背景和目标区分开来，图 1-2 是一种红外偏振成像系统示意图。

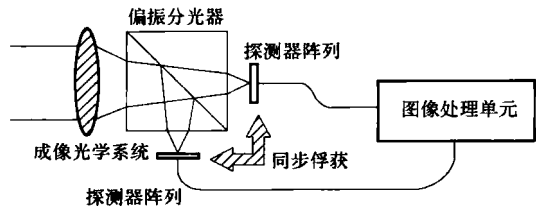


图 1-2 红外偏振成像系统示意图

通常，人造物比自然物表现出更高的偏振度，尤其是在那些绝缘材料上的反射和辐射。这个现象可以用来提高目标或背景信号与杂乱的噪声信号的比率，提高红外成像质量和探测范围，降低误报率。

(2) 红外偏振成像的特点 红外偏振成像与红外热成像比较，其优势主要有：①偏振成像无需准确的辐射量校准就可以达到相当高的精度，这是由于偏振度是辐射值之比，在传统的红外热成像中，定标对于红外热成像的测量准确度至关重要；②红外偏振成像识别地物背景中的车辆目标具有明显的优势，研究表明，自然环境中地物背景的红外偏振度非常小，而金属材料的红外偏振度相对较大，因此以金属为主体的军用车辆的偏振度和地物背景的偏振度差别较大，这有利于提高目标与背景的对比如；③军事上的红外防护的主要方法是制造复杂背景，使红外系统无法从背景中区别目标，但是这种杂乱的热源和目标的偏振特性存在差异，因此这种形式的防护对于红外偏振成像侦察就会失效；④对于辐射强度相同的目标和背景，红外成像无法区别，而红外偏振成像可以很好地区别。

但是红外成像中加入偏振以后接收到的辐射量减少了 50%。在一些情况下，减少了接收的红外辐射能量会破坏成像质量；这就要研究哪些条件下使用偏振会改善成像效果，哪些情况下不能，这些条件包括大气条件、各种材料和环境的红外辐射的偏振特性等一些因素。通常，当偏振图像信号的信噪比在 10 以上时，就很有必要用偏振成像了。

(3) 红外偏振成像研究现状及应用展望 红外偏振成像在军事上有很大的应用价值，国外进行了热偏振成像的理论和大量的实验研究。以色列的 B. Ben 等人对各种背景的偏振度进行研究得出结论：绿色植被的偏振度大约在 0.5%，岩石土的偏振度在 0.5% ~ 1.5%，沥青混凝土公路的偏振度在 1.7% ~ 3.4%，水面、海面的偏振度在 1% ~ 2%。美国的 Cooper 等人进行了舰船目标和海背景的成像试验得出结论：目标与背景的水平偏振度的对比在长波红外波段远强于中红外波段。Aron 等人将红外偏振成像应用到了红外前视中，提高了前视仪的信噪比、降低了误报率。他对车辆和帐篷进行了野外实验。图 1-3 是红外成像红外偏振成像效果的比较。

图 1-3 中我们可以看到汽车和帐篷都有线性偏振，而背景没有。红外偏振成像的信噪比提高到 30 倍。在大多数有杂乱波干扰的情况下，红外偏振成像比普通红外成像能探测到波长范围更广的目标。在所有的波长范围，误报率保持在 2% 以下。红外偏振成像除了可应用于军事目标的搜索与跟踪，基于组织对人射光和背光散射的偏振特性，还可以非侵入快速诊

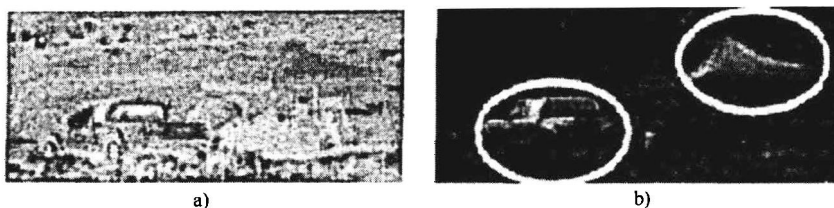


图 1-3 红外成像与红外偏振成像效果的比较

a) 红外图像 b) 红外偏振成像

断早期皮肤癌，因此，红外偏振成像在军事及生物医学上都具有广泛的应用前景。

#### 4. 红外相位成像

(1) 红外相位成像机理 现有的红外成像主要利用红外辐射的幅度信息，而红外相位热成像的基本原理是通过接收目标辐射信号进行分析，建立目标红外辐射的相位信息算法模型及目标与探测器之间的距离算法模型，获取目标的距离图像，与二维图像结合，得到探测目标的立体图像。红外相位热成像突破了以往单一利用红外辐射的幅度信息的思路，利用红外辐射的相位特性来成像，是一种新的红外成像机理。相位与距离关系如图 1-4 所示。

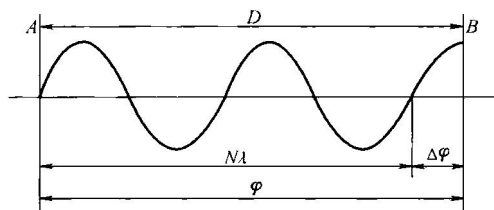


图 1-4 相位与距离关系

距离和相位之间的关系可由以下关系推导出

$$D = ct$$

$$t = \left( N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \frac{1}{f}$$

由以上两式可得

$$\Delta\varphi = 2\pi \times \left( \frac{D}{\lambda} - N \right)$$

式中， $N$  为光波全行程中的整周期数； $\Delta\varphi$  为不足一周期的相位值，若波长  $\lambda$  已知，即可找到距离与相位之间的关系。红外相位成像就是利用这一原理获得红外图像的距离信息，与红外目标的二维信息结合重建成三维图像。

(2) 红外相位成像的特点 红外相位成像与传统的红外成像相比具有以下特点：首先，红外相位成像可以得到更多的目标空间信息，合成立体图像，特别是对于生物学样本相位成像可获得更加丰富的样本信息；其次，军事目标中的伪装可以通过红外相位成像辨别，由于要伪装目标的某一面特征相对容易，而要伪装目标的体形特征就十分困难；另外，红外相位成像应用于集成电路芯片线宽测量可减少结果对基片厚度的敏感。红外相位成像的不足是目前红外辐射的相位信息算法模型及目标与探测器之间的距离算法模型还不完善，算法和重建三维图像的计算量大；红外相位成像的相关器件还有待于开发。

#### 1.4.4 微光图像和红外图像的融合

在微光与红外技术各自不断进展的时期，考虑到两者的互补性，在不增加现有技术难度的基础上，如何将微光图像与红外图像融合以获取更好的观察效果，成为当前夜视技术发展