



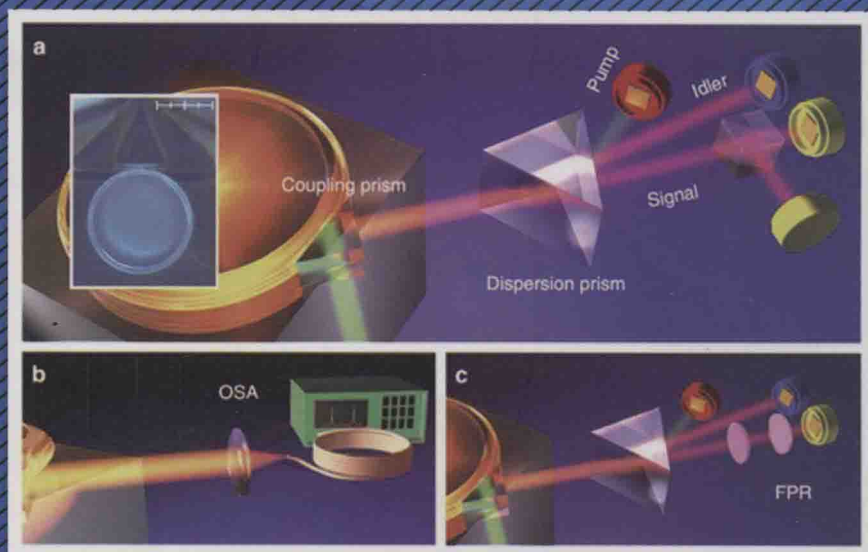
工业和信息化部“十二五”规划专著



红外目标探测

Infrared Target Detection

◎ 陈 钱 钱惟贤 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”规划专著

红外目标探测

陈 钱 钱惟贤 张闻文 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从实用性和先进性出发,较全面地介绍了红外目标探测的基本理论与相关算法。全书共分 16 章,主要内容包括:红外热成像特性分析、红外图像动态噪声抑制技术、红外非均匀噪声抑制技术、红外小目标特性分析、红外小目标自动检测与跟踪的核心框架、红外小目标自动检测与跟踪中的背景抑制、红外小目标自动检测与跟踪中的数据关联、红外小目标自动检测与跟踪具体算法、红外线目标特性分析、红外线目标自动检测中的背景抑制技术、红外线目标自动检测与跟踪算法、地面红外面目标特性分析、地面红外面目标搜索、地面红外面目标跟踪、红外目标探测硬件系统等。

本书可作为高等学校光电专业的基础教材,也可供相关领域的工程技术人员学习、参考。

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

红外目标探测/陈钱,钱惟贤,张闻文编著. —北京:电子工业出版社,2016.1

工业和信息化部“十二五”规划专著

ISBN 978-7-121-27763-4

I. ①红… II. ①陈… ②钱… ③张… III. ①红外目标—目标探测 IV. ①TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 294831 号

策划编辑:王晓庆

责任编辑:陈晓莉

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

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:787×1 092 1/16 印张:22.5 字数:576 千字

版 次:2016 年 1 月第 1 版

印 次:2016 年 1 月第 1 次印刷

定 价:69.00 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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: wangxq@phei.com.cn。

前 言

红外目标探测起源于军事用途，主要是采用红外热像仪结合信号处理技术，实现目标的自动检测与跟踪。在军事领域，红外目标自动检测与跟踪技术主要体现在红外搜索与跟踪系统，该系统既可以实现目标预警功能，又可对目标进行随动跟踪。当然针对每个实际系统，这两个功能有时是合在一起的，此时称为搜索与跟踪系统，有时又是分开的，如专门的搜索预警系统和专门的跟踪系统。在民用领域，可以利用红外热成像实现对外部入侵（强盗、小偷）的自动告警、自动跟踪等，还有海监、反恐等领域也可以应用。

目前有大量的学者从事红外目标探测相关的研究工作，每年有大量新人加入这个行业。但到目前为止，还没有一套综合介绍红外目标探测相关理论与方法的书籍，造成新的学生在接触到这个行业时，不知道怎么入门。而本书作者通过对多年实践经验的总结，归纳出红外目标探测的一套理论与方法。

该书有如下特色：

（1）本书系统地分析了红外目标探测的相关理论与方法。提供的相关理论可以作为系统总体设计人员的参考依据；提供的相关算法适合于算法设计人员作为参考依据；提供的相关硬件系统适合于硬件设计人员作为参考依据。

（2）根据目标特性和成像方式的差异，本书将红外目标分为点目标、线目标和面目标，并给出了不同的检测与跟踪算法。针对不同目标的不同处理方法，更具有实用性。

（3）本书专门对红外目标搜索的理论与算法进行了详细的论述，使读者能区分目标搜索算法与目标跟踪算法的区别。

通过学习本书，你可以：

- 了解红外热成像的基本原理；
- 了解红外热成像的噪声特性；
- 了解目标的红外特性；
- 掌握红外目标搜索相关技术；
- 掌握红外目标跟踪相关技术；
- 掌握红外目标探测系统硬件设计相关技术。

本书可作为高等学校光电专业的基础教材，也可供相关领域的工程技术人员学习、参考。

本书是工业和信息化部“十二五”规划专著，全书共分16章。本书从实用性和先进性出发，较全面地介绍了红外目标探测的基本理论与相关算法，主要内容包括：第2章，讲述红外探测器的原理及其响应的数学模型，这是我们后面做红外目标特性分析的理论基础；第3~4章，讲述红外图像去噪处理，分别是第3章的动态噪声抑制处理和第4章的非均匀性噪声抑制处理；第5~7章，讲述红外小目标自动检测与跟踪的相关内容；第8~12章，讲述红外线目标自动检测与跟踪的相关内容；第13~15章，讲述地面红外面目标自动检测与跟踪的相关内容；第16章，讲述红外目标自动检测与跟踪信号处理硬件部分设计的内容。

本书第1~16章由陈钱、钱惟贤共同总结编写和统稿，统稿过程中，张闻文做了大量工作。作者根据多年实践经验，同时对自己的博士生（胡永生、管志强、秦剑、彭晨、任建乐）

的博士论文进行了归纳总结，最终凝练出一套红外目标探测理论与方法。在本书的编写过程中，陈延如教授和倪晓武教授提出了许多宝贵意见，在此一并表示感谢！

本书的编写参考了大量近年来出版的相关技术资料，吸取了许多专家和同仁的宝贵经验，在此向他们深表谢意。感谢南理工社会公共安全科技协同中心经费资助。

由于红外目标探测技术发展迅速，作者学识有限，书中误漏之处难免，望广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 红外搜索与跟踪系统的优点	1
1.2 红外搜索与跟踪系统的功能特点	2
1.3 红外搜索与跟踪的发展现状	5
1.4 本书的安排	8
参考文献	8
第 2 章 红外热成像特性分析	13
2.1 红外热成像技术发展概况	13
2.2 红外探测器的主要热探测机理	15
2.2.1 热电探测器和铁电测辐射热计	15
2.2.2 热电偶探测器	17
2.2.3 电阻微测辐射热计	18
参考文献	19
第 3 章 红外图像动态噪声抑制技术	22
3.1 红外图像动态噪声特性	22
3.2 具有细节保护功能的改进型中值滤波器	24
3.2.1 基于隶属度的中心权值调整	24
3.2.2 算法的实验结果	26
3.3 新型图像噪声抑制各向异性扩散算法	28
3.3.1 基于方向信息测度的非线性扩散	28
3.3.2 新的非线性扩散方程	29
3.3.3 算法的仿真结果	30
3.4 基于运动补偿的红外图像噪声时域 IIR 滤波算法	32
3.4.1 时域 IIR 滤波器	33
3.4.2 基于噪声分布模型的运动检测	33
3.4.3 基于概率松弛法的运动区域标号	35
3.4.4 运动补偿	35
3.4.5 算法处理结果	36
参考文献	37
第 4 章 红外非均匀噪声抑制技术	38
4.1 空域低通时域高通非均匀性校正算法	39
4.2 高频恒定统计算法	45

4.3 基于最优化技术的条纹非均匀性校正算法	49
参考文献	56
第5章 红外小目标特性分析	57
5.1 背景杂波特性分析	57
5.2 目标特性分析	59
5.2.1 目标的红外辐射特性	59
5.2.2 目标几何特性分析	63
5.2.3 目标成像过程模型	64
5.2.4 运动特性分析	67
5.2.5 目标的图像统计特征分析	68
5.3 小目标探测作用距离分析	69
5.4 小目标探测作用距离的作战效能分析	72
5.5 目标与背景的局部相关性及其度量	73
参考文献	74
第6章 红外小目标自动检测与跟踪的核心框架	76
6.1 红外小目标自动检测与跟踪技术发展现状	76
6.1.1 先探测后跟踪 (DBT) 技术	76
6.1.2 先跟踪后探测 (TBD) 技术	78
6.2 本书的小目标自动检测与跟踪框架	80
参考文献	81
第7章 红外小目标自动检测与跟踪中的背景抑制	84
7.1 背景抑制技术的发展现状	84
7.2 传统的背景抑制算法	86
7.2.1 传统的空域背景抑制算法	86
7.2.2 频域高通滤波方法	91
7.3 基于背景分类的背景抑制算法	93
7.3.1 基于复杂度分类的背景抑制算法	94
7.3.2 基于光流直方图运动补偿算法	99
7.3.3 基于光流估计的背景抑制算法	104
7.3.4 基于二维速度矢量直方图的背景抑制算法	109
7.4 复滤波器组背景自适应抑制算法	113
参考文献	123
第8章 红外小目标自动检测与跟踪中的数据关联	127
8.1 小目标自动检测与跟踪的贝叶斯框架	127
8.2 小目标自动检测与跟踪的点迹形成	129
8.2.1 恒虚警率检测	129
8.2.2 点迹的特征变量	133
8.2.3 点迹的建模	137

8.2.4 多特征观测概率的建模	140
8.3 航迹的多特征似然概率	145
8.4 组合滤波技术	146
参考文献	150
第 9 章 红外小目标自动检测与跟踪具体算法	151
9.1 小目标自动检测与跟踪波门选择法则	151
9.2 最大观测概率算法	152
9.3 多特征 PDA 算法	157
9.4 组合滤波最大观测概率算法	163
9.5 粒子多假设算法	167
9.6 转移受限粒子滤波算法	172
9.6.1 粒子滤波器	172
9.6.2 Mean-shift 跟踪算法	173
9.6.3 Mean-shift 粒子滤波算法	175
9.6.4 我们的算法	176
9.7 MC_MHT 算法	181
参考文献	183
第 10 章 红外线目标特性分析	184
10.1 线目标产生机理分析	184
10.2 线目标作用距离分析	187
10.2.1 面阵旋转作用距离方程	187
10.2.2 有效作用距离方程	190
10.2.3 面阵与线阵的性能比较	191
10.3 红外线目标的模拟生成	192
10.3.1 红外场景的模拟生成	193
10.3.2 线目标的模拟生成	193
10.3.3 包含线目标的红外场景仿真	193
参考文献	195
第 11 章 线目标自动检测中的背景抑制技术	196
11.1 传统背景抑制算法用于线目标自动检测	196
11.1.1 红外图像噪声抑制	196
11.1.2 基于面阵探测器扫描搜索系统背景抑制处理思路	198
11.1.3 基于模板匹配滤波算法	198
11.1.4 基于形态学的滤波算法	199
11.1.5 基于中值滤波方法	201
11.2 面阵探测器扫描搜索系统背景抑制的新方法	201
11.2.1 最小行间差滤波算法	202
11.2.2 基于区域统计排序的滤波算法	205

11.2.3	基于小波变换的滤波算法	208
11.2.4	基于帧间匹配的滤波算法	211
11.3	实验比较分析	214
	参考文献	221
第 12 章	红外线目标自动检测与跟踪算法	223
12.1	基于多算法融合的目标自动检测流程	223
12.1.1	基于目标头、尾特征检测	224
12.1.2	单帧目标自动检测实现过程	226
12.1.3	帧间比较检测实现过程	228
12.1.4	融合判决	229
12.2	基于概率分布函数匹配的线目标探测技术	233
12.2.1	小目标子区域的灰度概率分布	233
12.2.2	基于概率分布函数匹配的小目标探测	235
12.3	基于目标特征的多目标跟踪检测技术	236
12.3.1	多目标跟踪完整过程	236
12.3.2	基于目标特征的数据关联技术	237
12.3.3	数据关联与跟踪具体算法	239
12.4	实验结果与分析	239
12.4.1	算法融合目标自动检测仿真结果与分析	239
12.4.2	目标跟踪仿真结果与分析	244
12.4.3	算法性能分析	245
	参考文献	246
第 13 章	地面红外面目标特性分析	247
13.1	地面红外目标探测的难点	247
13.2	地面红外目标跟踪技术的研究现状	249
13.2.1	地面红外场景图像预处理技术的研究现状分析	249
13.2.2	地面红外目标搜索技术的研究现状分析	251
13.2.3	成像目标跟踪技术的研究现状分析	253
13.3	基于光流的运动区域增强	255
13.3.1	光流的基本原理	255
13.3.2	TV-L1 光流	257
13.3.3	快速 TV-L1 光流	262
13.3.4	输入图像的预配准	264
13.3.5	光流的计算框架	266
13.3.6	基于 HSV 色彩空间的光流信息融合	268
13.4	红外序列图像光流估计的并行优化	269
13.4.1	GPU 的简要介绍	269
13.4.2	CPU-GPU 异构计算平台模式	270
13.4.3	基于 CUDA 并行优化的 TV-L1 光流	271

参考文献	273
第 14 章 地面红外面目标搜索	279
14.1 红外运动目标的帧内检测	279
14.1.1 基于连通域标记法的运动区域分割	279
14.1.2 特征空间的核密度估计	281
14.1.3 Mean Shift 算法	285
14.1.4 结合连通域标记的 Mean Shift 聚类	288
14.1.5 实验与结果	289
14.2 红外地面目标的数据关联	291
14.2.1 红外地面目标的特征	291
14.2.2 贝叶斯框架下的数据关联技术	293
14.2.3 地面目标多特征融合的 Kalman 滤波	295
14.2.4 航迹管理	298
14.2.5 实验与结果	300
参考文献	303
第 15 章 地面红外面目标跟踪	305
15.1 粒子滤波框架下的目标跟踪	305
15.1.1 重要性采样	305
15.1.2 序列重要性采样	306
15.1.3 粒子滤波的整体流程	309
15.2 粒子观测概率的估计	309
15.2.1 主成分分析的基本原理	310
15.2.2 序列 KL 变换	310
15.2.3 主成分分析的概率模型	313
15.2.4 目标的遮挡判定	315
15.3 系统状态转移概率的估计	317
15.4 基于特征子空间的多角点跟踪算法	320
15.4.1 基于特征子空间的角点描述	321
15.4.2 角点的跟踪	321
15.4.3 实验与结果	325
15.5 粒子滤波框架下的红外地面目标跟踪算法的总体流程	327
参考文献	328
第 16 章 红外目标探测硬件系统	330
16.1 硬件处理模块总体框架	331
16.1.1 硬件组成与信号处理流程	331
16.1.2 硬件处理电路	331
16.2 图像处理器群接口总线技术	333
16.3 多处理器多线程技术	339

16.4 信号处理关键模块 340

16.4.1 噪声抑制算法硬件流程 340

16.4.2 目标头、尾特征检测硬件流程 341

16.4.3 帧间比较检测硬件流程 343

16.4.4 单帧检测硬件流程 345

16.4.5 跟踪模块硬件流程 348

参考文献 349

第1章 绪 论

红外目标探测起源于军事用途,主要方式是采用红外热像仪结合信号处理技术,实现目标的自动检测与跟踪。目标自动检测定义为在一定空域或图像范围内,且不知道是否存在真实目标的前提下,通过信号处理的方式自动将真实目标寻找出来,其通常目的是实现威胁目标预警;目标跟踪的定义为在检测出并确认目标的前提下,对目标进行自动跟踪,从而获得目标的完整航迹和火控所需各种数据,以完成对目标的有效打击。

在军事领域,红外目标自动检测与跟踪技术主要体现在红外搜索与跟踪系统,该系统既可以实现目标预警功能,又可对目标进行随动跟踪。当然针对每个实际系统,这两个功能有时是合在一起,此时称为搜索与跟踪系统,有时又是分开的,如专门的搜索预警系统和专门的跟踪系统。为了叙述方便,我们在这里仍然统称为红外搜索与跟踪系统。搜索采用目标自动检测技术,跟踪采用目标跟踪技术。

红外搜索与跟踪技术本质上是一种多目标跟踪技术,即在不能明确判断是否为真实目标的前提下,对所有的可疑目标进行跟踪,建立航迹进行管理,直到确认为真实目标和虚假目标。因为检测需要进行多目标跟踪,所以计算量很大,一般采用简化的跟踪算法;而跟踪只需要对单个目标进行跟踪,所以可以采用复杂的算法,这就是主要区别。目标在图像中尺寸越大,跟踪算法计算量越大,此时检测与跟踪的差异越大;目标在图像中尺寸越小,跟踪算法计算量也相对要小一些,此时检测与跟踪的差异越小。本书在下面章节介绍小目标的时候,将检测与跟踪是放在一套体系进行论述的,并未对两者进行明确区分。在介绍面目标(图像中尺寸偏大的目标)的时候,将检测与跟踪分开进行论述。读者在阅读的时候要注意检测与跟踪的联系与差异。

当然红外搜索与跟踪技术不只是一个军用概念,很多民用安防领域一样可以应用,例如利用红外热成像实现对外部入侵(强盗、小偷)的自动告警,自动跟踪等,还有海监、反恐等领域也可以应用。但为了叙述方便,本书仍然将介绍的重点放在了红外搜索与跟踪系统,对于民用领域读者可以采用相同思路进行分析设计。

1.1 红外搜索与跟踪系统的优点

高科技的发展改变了传统的战争模式,在“二战”后的几次局部战争,尤其是两次伊拉克战争以来,一种新的趋势逐渐展现出来,就是越来越多的飞机和导弹被投入到战场而不是过去的士兵,制空权成为战争胜负的主导因素。在这种情况下,远程精确打击和防空力量的发展受到各国军工部门的普遍重视。目前,我军防空兵部队主要依赖雷达实施空情预警。然而,传统意义上的雷达是靠向空中发射大功率的电磁波,通过收集目标回波来实施探测并对目标定位的,这就导致了雷达在技术水平日益提高的电子干扰、反辐射导弹、隐身飞机导弹和低空超低空突袭的“四大威胁”面前,处于十分危险的境地^[1~2]。性能落后的雷达不仅难于

在实战中发挥应有的作用,而且容易成为敌方的“目标导引器”和“活靶子”。两次伊拉克战争中,伊方的防空系统陷入瘫痪正是由于美国利用了传统雷达的这一缺陷。

随着军事技术的迅猛发展,雷达预警系统固有缺点的限制越来越凸显^[3, 4],主要体现在以下几个方面。

(1) 对低空、超低空目标发现困难

低空、超低空是指 100~1000m 的高度范围,其中 0~100m 为超低空,100~1000m 为低空。随着大量高、精、尖兵器的广泛应用,越来越多的空袭兵器采用低空、超低空的进袭模式,这就要求雷达系统既要能探测远距离的中高空目标,又要能探测低空、超低空目标。而目前我军防空兵装备的侦察预警雷达体制单一、互补性差,对低空目标探测时,易受地物干扰,导致发现目标能力差;且不能对远距离低空目标进行连续监视,对低空目标的探测存在着较大盲区,缺少探测低空小型目标的功能性预警装备。

(2) 易受干扰和反辐射导弹攻击

由于雷达是采用主动发射电磁波的方式进行探测,这从本质上决定了其易受电子干扰和反辐射导弹的攻击。目前,我军防空兵部队装备的侦察预警雷达大多集中工作在几个常用频段,而这些频段恰好是敌捕捉重点,在战时极易遭受干扰和反辐射导弹的攻击;此外,现役雷达的工作频带窄,调频反干扰能力有限,现有的反干扰措施主要是针对无源干扰和少数波段的有源干扰,在敌高强度、全频域、多手段的电子干扰情况下,很难进行有效防护。

(3) 机动性差,配置地域容易受限

由于雷达系统体积大,质量重,因此不利于实现行军/战斗状态的相互转换,从而导致机动性能差,难于快速实现阵地转移;此外,雷达系统的配置易受地形条件限制,较适合平坦地域作战,在复杂条件下难于充分利用地形特点,如不能配置在山头、楼顶等地域。

红外热成像技术靠接收目标自身的红外辐射来工作,由于具有完全被动、利于隐蔽、昼夜工作等优点,成为一种重要的探测手段^[5~7]。红外搜索与跟踪系统就是基于红外热成像原理进行目标探测的一种完全被动式空情预警与目标跟踪系统。它将光电传感技术、控制技术和图像处理技术结合起来,实施对空中目标的昼夜探测。与雷达系统相比,该系统具有以下几个突出特点^[3, 8~9]:

一是利用目标热辐射被动探测,不易受到敌方干扰和反辐射导弹的攻击,尤其是在恶劣的电磁环境下,仍能正常工作;

二是由于红外辐射无时不在,故能昼夜工作,而自身无强辐射源,利于隐蔽;

三是利用温差原理成像,对采用雷达隐身技术的空袭武器也具有较强的探测能力;

四是不受地物回波的影响,探测器对飞行器尾部火焰敏感,对低空进袭的巡航导弹具有明显的探测优势,填补了传统雷达的低空死角;

五是体积小、质量轻,机动能力强,配置灵活,随着制造工艺的发展,红外搜索系统出现小型化的趋势,可以灵活地配置在各种地形,还可以通过车载增强机动能力。

1.2 红外搜索与跟踪系统的功能特点

红外搜索与跟踪系统是从红外探测器输出的图像信号中提取目标方位信息,实现自动探测和识别目标的系统。红外搜索与跟踪系统的基本组成如图 1.2.1 所示。

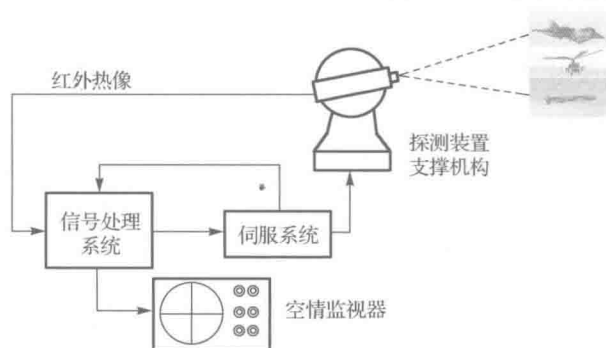


图 1.2.1 红外搜索系统原理图

红外搜索与跟踪系统主要由跟踪转台、红外信号处理、伺服系统和空情监视器组成。跟踪转台上的红外探测器接收到的红外图像被送到红外图像处理单元；信号处理系统实时地从图像序列中提取目标信息，并解算出目标的方位或位置信息、建立目标的航迹并实时跟踪目标的运动；伺服系统控制跟踪转台按照预定的速度控制转台转动，并根据要求实时发送转台状态信息给图像信号处理系统，以确定目标场景的真实方位。空情监视器实时接收红外信号处理系统发送的目标数据给工作人员处理和直接转送到武器的火控单元。

红外搜索与跟踪系统的关键部件由红外探测头、伺服系统、支撑机构、空情监视器、电源等几部分组成，如图 1.2.2 所示。

红外探测头是整个搜索系统的核心部件，主要由光学系统、红外探测器及制冷器、图像处理电路、镜体支撑座等组成。

1. 系统组成

红外搜索系统的探测头采用单个或多个红外热像仪作为信号接收单元。作为搜索与跟踪系统的一个关键部件，其性能直接影响到整个搜索系统的探测能力和对目标的分辨能力。因此有关的波段选择、探测器的选型问题都是系统设计的重要方面。红外在大气传输时主要有两个大气窗口： $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\mu\text{m}$ 。当目标温度超过 500K 时，其红外辐射能量主要集中在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段。选择 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段可以有效地探测目标发动机尾喷管及尾喷焰的辐射能量，从而最大限度地增加探测距离。 $8\sim 12\mu\text{m}$ 波段主要是在探测目标的蒙皮辐射方面具有优势。除了波段，红外热像仪的探测器类型也是另外一个重要的选项。现有红外探测器一般分为线阵探测器和面阵探测器，面阵探测器由于积分时间长作用距离远，是当今红外系统发展的主流。但是面阵探测器由于积分时间长，不能在高速扫描状态下成清晰像，所以一般用作跟踪用，也可用于小范围慢速扫描状态下的目标搜索。需要做 360° 高速扫描搜索目标时一般采用线阵探测器，原因是线阵探测器在高速扫描状态下可以利用机械扫描方式获得 360° 清晰像，线阵探测器在凝视状态下，也可利用光机扫描方式，获得清晰凝视图像。所以线阵探测器在一套系统内可以将高速扫描下的目标搜索和低速下的目

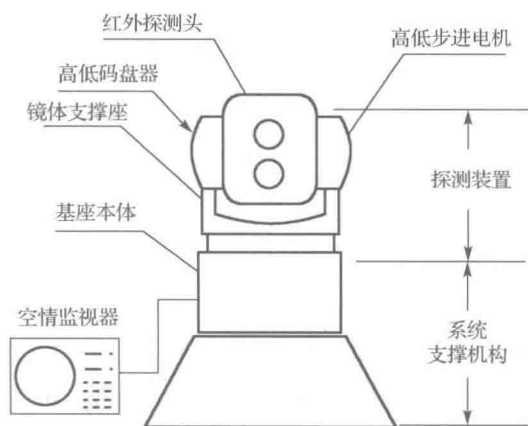


图 1.2.2 红外搜索系统结构组成示意图

标跟踪完美结合,而面阵探测器则很难将两者有机结合。但我们通过多年的研究,探索出了一种面阵探测器在速扫描状态下依然可以实现目标搜索的方法,该方法将在第 10~12 章进行详细介绍。

镜体支撑座连接红外热像仪与伺服系统、系统支撑机构。镜体支撑座采用 U 型设计,红外热像仪固定在镜体支撑座的托架上,红外图像处理器的相关信息通过探测头下部的电缆与托架中部的插头相连。U 型架的耳轴连接伺服系统的高低步进电机和测角码盘,由伺服系统控制步进电机完成探测头的高低扫描范围。

伺服系统由高低步进电机、方位步进电机、高低码盘器、方位码盘器、电机控制电路组成。高低步进电机和高低码盘器位于镜体托架的两耳上,控制探测头的俯仰扫描范围并将探测器的角度信息发送到红外信号处理单元。方位步进电机和方位码盘器系统的支撑结构,带动探测装置平稳匀速的旋转扫描并实时发送探测器的方位信息到红外信号处理单元。

系统的支撑机构用于支撑红外探测器本体。该机构设计要有足够的刚性,以保证探测装置在搜索与跟踪过程中能平稳转动。

空情监视器由箱体、操作面板和相应的控制电路组成。探测装置通过回转导电装置将目标信息送到空情监视器,空情监视器主要用于系统工作状态的设置、参数装定、显示空情态势,并按要求输出所探测到的目标坐标到火控系统中。

2. 系统工作时序

红外搜索与跟踪系统的工作时序如图 1.2.3 所示。

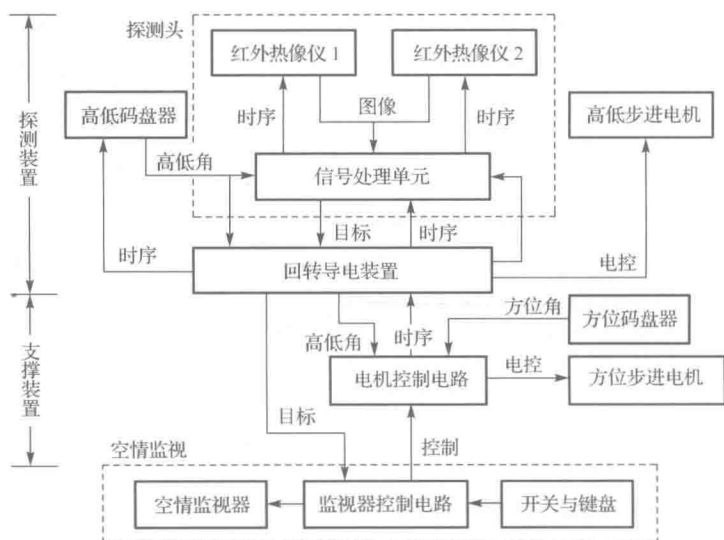


图 1.2.3 预警系统工作时序图

系统的工作时序来自电机控制电路,该电路发出一个同步时序脉冲。方向码盘器和高低码盘器根据该时序脉冲锁定当前时刻的测角坐标,将测角坐标发送至红外信号处理系统和电机控制电路。红外信号处理系统根据该时序脉冲实现红外热像仪的外同步,采集目标的红外图像。电机控制电路根据该时序脉冲实现高低步进电机和方向步进电机的控制和换层操作。红外信号处理系统提取的目标信息通过回转导电装置发送到空情显示器进行空情显示。在空情显示器上可以通过键盘对整个系统进行控制。

1.3 红外搜索与跟踪的发展现状

根据使用平台的不同,红外搜索与跟踪系统分为机载(战斗机)型、陆基型、舰载型等。根据使用平台及环境的不同,它们的控制系统、信号处理系统都有所差别^[10~14]。其中,机载红外搜索与跟踪系统通常作为飞机武器火控系统的一种重要的传感器,主要完成对空目标的搜索和跟踪,其主要的要求是体积小、重量轻;地面型红外搜索系统主要完成对地面和低空目标全方位的探测识别与告警,为地面防空系统或武器火控系统提供敌方来袭武器的方位等信息,通过组网可以完成对战区空域的严密防控;舰载型则强调对各种反舰导弹的全方位搜索、跟踪和告警功能,与陆基型功能相近。

从20世纪60年代开始,法国、荷兰、美国等国家就陆续开始了红外搜索与跟踪系统的研制工作^[15~16]。先后发展了第一代基于探测元、第二代基于线阵焦平面探测器的红外搜索系统,第三代基于面阵焦平面探测器的先进红外搜索系统也正处于研发和测试阶段。

早期的红外搜索与跟踪系统只是些具备简单目标指示或跟踪处理功能的前视红外摄像机,作用距离短、虚警率高。之后随着探测器工艺水平、热成像技术和信息处理技术的迅速发展,红外搜索与跟踪系统的功能不断增多,性能也不断提高。现代的红外搜索与跟踪系统拥有更强大的能力,包括大区域搜索、远距离目标自动捕获、多目标高精度跟踪、各种作战条件下极低的虚警率、被动式距离估计、高清晰度的图像质量、多传感器融合和与火控系统的集成等。红外搜索与跟踪系统的综合性能取决于上述多种因素的结合;可同时跟踪的最多的目标数量直接和系统的处理能力相关。

在机载红外搜索与跟踪系统中,欧美等国已经发展了多种适合各种工作平台的红外搜索系统。如美国的AN/AAR-34、23主要装备F-111战斗轰炸机和B-52战略轰炸机上;AN/AAR-44机载红外导弹告警系统装备载C-130、C-131上^[17]。除美国以外,欧洲和俄罗斯也发展了多种先进的机载红外搜索与跟踪系统,还有美国为F-22战斗机研制的AIRST和为联合攻击战斗机研制的DAIRS、法国为“阵风”战斗机研制的OSF、瑞典为JAS39“鹰狮”战斗机研制的IR-OTIS等,意大利、英国和西班牙正在联合研制名为PIRATE的红外搜索与跟踪系统,计划装备欧洲战斗机^[18]。俄罗斯的OEPS-27和S-3IE2是俄罗斯乌拉尔光学机械厂研制的两种红外搜索与跟踪系统,已分别装备苏-27和米格-29战斗机,用于昼间或夜晚、在所有飞行高度下对目标进行搜索、探测和跟踪^[19, 20]。

舰载红外搜索与跟踪系统也是一个主要的应用方面,欧洲国家一直处于领先地位。法国SAT公司的有关海军红外搜索与跟踪系统的研究工作早在1973年就开始进行可行性研究,并于1977年生产出第一台陆基系统,在1980—1986年进行VAMPIR的研制,并于此后装备在AAW护卫舰上。第二代产品VAMPIR MB于1993年开始研制,并于1997年在法国海军实验舰上试用。并且首批7部VAMPIR MB舰载型设备已经交付法国海军。其中1部装备在“戴高乐”号航母上,另有3部根据“舰艇防空反导自卫”(OP3A)项目,安装在F70乔治·莱格级反潜护卫舰“迪普莱克斯”、“蒙卡尔姆”和“让·德·维埃纳”号上^[21, 22]。

另外,荷兰Signaal公司自20世纪80年代中期以来一直任研制IRSCAN,这是一种快速反应的红外搜索与跟踪系统,该系统用来探测空中和海上目标。而该公司正在研制的另一种新型号,将改装在荷兰皇家海军Goalkeeper系统中。1993年来,Signaal公司开始在上述的



图 1.3.1 荷兰 SIRIUS 舰载红外搜索与跟踪系统

IRSCAN 技术基础上,与加拿大斯帕航空航天公司联合研制远距离双波段红外搜索和跟踪 (IRST) 系统,即 SIRIUS (天狼星),并生产这种系统。SIRIUS 是为荷兰、德国和西班牙海军的防空护卫舰项目而设计的^[23~25]。

由于始终受到经费的困扰,美国的舰载 IRST 系统在研制进展上落后于欧洲。从 20 世纪 70 年代以来,美国与加拿大联合执行一项 AN/SAR-8 舰用 IRST 系统的研制计划。1993 年又进行了舰艇自防护系统的海上实验。装备美国和加拿大的 3000 吨级以上的水面战舰和航空母舰。

另外美国洛克西德·马丁公司正在研制舰载 SIRST 监视红外搜索与跟踪系统,它是第二代远程红外搜索和跟踪系统 (LR-IRST),可提高对低空飞机和掠海导弹的探测能力。演示样机于 1998 年制造出来,用于陆基和舰载实验,预计本世纪初投入批量生产^[21~27]。

近年来,由于各类精确制导武器的投入使用和电子战水平的提升,对防空反导作战提出了新的要求,地面型红外搜索与跟踪系统作为传统雷达防空体系的补充得到了迅速发展^[28]。由于舰载平台和地基平台有很多共性,许多系统均可在两种平台上使用,如法国的 Vipere 和瑞典的 IRS-700 等。但相对来说,地基红外搜索系统的功能更侧重于对低空、地面的侦察告警。法国 SAGEM 公司研制的 SIRENE 系统,是一种模块式监视和跟踪系统,为支持中距离、短距离及超短距离防空武器系统而设计的。系统采用由闭路低温系统制冷并通过光纤与显示器相联的红外 CCD 焦平面列阵探测器,能够以 2Hz 的旋转速度进行 360° 全方位预警。该系统能够独立工作,或者作为战场 C³I 系统的一部分与其他主动敏感器 (雷达、敌我识别器) 和被动敏感器 (电子支援措施、红外) 相联接。

类似的地面搜索系统还有俄罗斯的“凤凰”新型远程红外搜索防空系统^[19],该系统可安装在各种陆地和海上平台上,用以探测具有隐身伪装的目标。另外,美联合作战计划中将多功能光电传感器系统列入技术计划中,开发和演示高稳定性的红外搜索和跟踪传感器及信号处理技术,用于反巡航导弹和空中防御。

表 1.3.1 列出了其中几种典型的红外搜索与跟踪系统及其性能参数,以及系统设计的战术指标要求。

表 1.3.1 目前装备与在研的几种主要红外搜索与跟踪系统及其性能参数

搜索系统 相关参数	意/英/西“海盗” (PIRATE) ^[20]	美/加 AN/SAR -8 ^[23~28]	法“旺皮尔”VAMPIR MB 型 ^[23, 24]	荷/加“天狼星” SIRIUS ^[25, 26]	俄罗斯“凤凰”防 控系统 ^[21]
工作平台	机载	舰载	舰载	舰载	地面/车/舰载
探测器	768×8 HgCdTe	2 个 480×12 HgCdTe	4 个 288×4	300×10 300×8	Na
工作波段 (m)	8~12	3~5, 8~12	3~5, 8~12	3~5, 8~12	8~12
预警范围 (方位/俯仰)	NA	360° 20°	360° -20°~+45°	360° 3.8°	360° -10°~+40°
探测距离 (km)	高速喷气式飞机 74	掠海导弹 30.5	亚音速导弹 9~16 超音速导弹 14~27 典型战斗机 10~25	亚音速导弹 21 超音速导弹 35 战斗机 30	低空导弹 5~7 直升机 8~9 飞机 15~18 运输机>20
处理批次	500	200	100	500	>50
扫描速度	可变	0.5°/s	1.5r/s	1r/s	0.5°/s
指示精度	0.25mrad	0.1°	0.5mrad	0.25mrad	0.5mrad