

红外搜索与跟踪系统中光学指向器的设计

孙 波,朱振福,邓 蓉,熊 飞

(北京环境特性研究所,北京 100854)

摘要:给出了一种红外搜索与跟踪(IRST)系统中红外指向器的设计方案,在分析了 IRST 系统及指向器整体特点的基础上,着重讨论了红外指向器各组成部分的工作原理及设计方案。红外搜索与跟踪系统要求目标搜索范围大、周期短、系统反应时间短,同时还要求体积小、质量轻,并尽可能降低成本。为了达到以上目的,采用了六棱台转鼓结合双面翻转反射镜扫描光路的方案,较好地达到 IRST 系统的各项指标要求。对伺服控制系统的设计是根据不同组件对速度、位置精度的要求选用合适的驱动电机、编码器与控制方法,力求满足精度要求的同时做到体积小、成本低。实验证明,此红外指向器技术先进,方案合理,其性能达到了 IRST 系统的各项指标要求,目标搜索实验效果良好。采用巧妙的设计方案有效解决了 IRST 系统大视场快速扫描与轻小型化、低成本化的问题。

关键词:红外搜索与跟踪系统; 指向器; 扫描; 光学系统

中图分类号:TN21 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)04-0384-04

Optical director design of IRST system

SUN Po,ZHU Zhen-fu,DENG Rong,XIONG Fei

(Beijing Institute of Environmental Features,Beijing 100854,China)

Abstract:An optical director design of the infrared search and track (IRST) system is proposed. After analyzing characters of the IRST system and its optical director,the compositions and functions of the optical director of the IRST system are described.IRST system requires a large search field, a short search period and response time. In order to get these effects, this scheme scans the search field with mirror polygon combining overturn mirror, by this means,it is able to meet all demands of an IRST system. With regard to the control system,different electromotors, encoders and control methods are applied according to different requirements for position and speed of each component to reduce volume and cost at the same time to meet the precision demand.Testified by experiments, this infrared optical director has advanced technology and rational scheme and can well meet all demands of an IRST system. The experiments of searching targets have excellent results. An innovation of this paper is that it resolves effectively the conflict between the demand for the large field and rapid search and the demand for the small volume and the low cost.

收稿日期:2004-10-25; 修订日期:2004-12-09

作者简介:孙波(1979-),江苏徐州人,硕士,主要从事光电系统的研发工作。

Key words: Infrared search and track system; Director; Scanning; Optical system

0 引言

红外搜索与跟踪系统的任务是可靠探测、定位和连续跟踪在背景辐射和其他干扰下发射红外线的物体和目标^[1]。其基本原理是在热成像的基础上利用图像处理的方法来获得目标位置信息。红外指向器是IRST系统的关键组成部分,其作用是搜集搜索空域内的红外辐射以形成图像,并对视频信号进行相应的实时信号处理后传输给IRST系统的信息处理器。IRST系统的性能很大程度上取决于红外指向器的性能,因为IRST系统的搜索空域、成像质量、指示精度、探测距离等重要指标主要由红外指向器决定。因此红外指向器的设计是整个IRST系统设计的关键。

与雷达系统相比,IRST系统采用被动探测,隐蔽性好,没有多路径干扰。同时它还具有体积小、重量轻、跟踪精度高等优点。在雷达受到强电磁干扰或目标进入低仰角区时,IRST系统仍能保持对目标的有效探测和跟踪。IRST系统目标搜索范围大,能发现和搜索大空域和远距离的来袭目标。但扩大目标搜索范围和缩短搜索周期、提高武器系统反应时间有矛盾,解决这一矛盾需要巧妙、审慎的设计思想^[2]。

1 IRST系统工作原理及组成

IRST系统由红外扫描光学指向器和信号处理与显示机柜组成,如图1所示。而红外扫描光学指向器由扫描光学系统、扫描控制伺服系统以及红外成像器三个主要部分组成;信息处理与显示机柜由工控机、红外信号处理机、显示控制板和通信接口等组成。红外搜索跟踪系统工作时,首先接收来自火控计算机的命令,通过方位调转平台将指向器调到指定的区间内。随后,通过扫描控制伺服系统,控制光学扫描器在一定的方位、俯仰角度的空域内对目标进行搜索扫描,并通过红外热像仪成像获取扫描区域内的场景图像送红外信号处理机进行处理,经目标检测与识别,形成目标指示信息^[3],送火控计算机;另一路场景图像在红外信号处理机内经图像、字符叠加处理,并经

显示控制板处理送显示器为操作手提供直观显示。

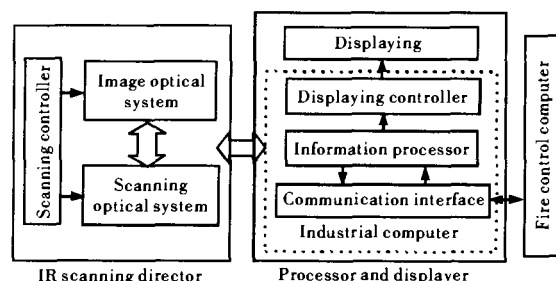


图1 IRST系统组成框图

Fig.1 Composition of the IRST system

2 红外指向器光学系统设计

IRST光学指向器的系统光路图如图2所示。

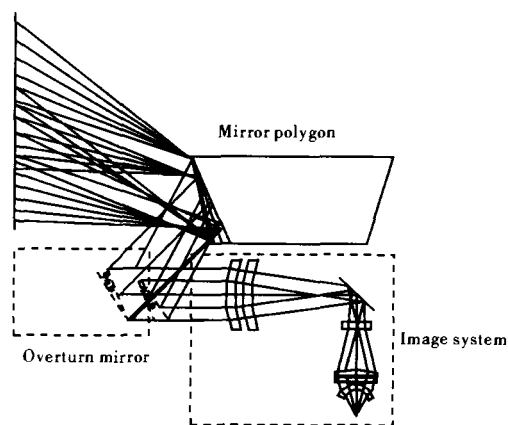


图2 指向器系统光路图

Fig.2 Optical principle of the IR director

本系统利用大气窗口中8~12 μm波段的红外辐射工作^[4,5]。为了保证IRST系统具有对大空域快速的目标搜索能力,同时具有远距离目标检测能力,在光学设计中要求采用尽量小的 $f/\#$ 值,以增大视场,这会增大扫描光学系统中镜面的面积^[6,7]。而另一方面,对IRST系统的体积、质量都有较苛刻的要求,所以必须考虑用最节省空间的方案实现最大的扫描视场。通过对国内外常用的四棱锥扫描、双反射镜扫描、转鼓扫描等方式进行比较^[8-10],最终确定采用由6个平面反射镜组成的六棱台转鼓,与双面反射镜配合实现对物空间的扫描。本方案采用的主要技术措施有:选择合

适的六棱台转鼓；在热像仪内增加一个孔径光阑；采用可快速切换的楔形双面反射镜。同时通过精确的光路追迹，确定转鼓、反射镜的具体面型、角度、面积等参数，确保以最小的体积实现最高的系统性能指标。

2.1 六棱台转鼓

六棱台转鼓由 6 个与水平面不同夹角的反射镜组成，如图 3 所示，镜面 1 的法线与转轴的夹角为 67.5° 。当转鼓绕垂直地平面的轴旋转一周时，其 6 个平面依次对物空间形成视轴仰角逐渐抬高的条形扫描视场，每次抬高的角度为 4° ，而红外成像器的俯仰瞬时视场为 4.2° 。6 个条带在俯仰方向上的覆盖范围为 24.2° ，方位扫描范围约 60° 。

由于采用方位调转转台，搜索区域的中心可在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 任意方位上调转，进而将搜索范围扩大至全方位以满足作战需求，综合考虑之后确定，转鼓的每个面法线在水平面上的投影在 $\pm 15^\circ$ 范围为有效搜索，按这个条件计算，扫描转鼓的直径为 540 mm，满足系统对搜索空域的要求。

六棱台转鼓的 6 个镜面采用铝基抛光形成反射面，表面镀氧化硅保护层，每个镜面背面带有一体的调整机构与转轴相连，装配后调整机构固定。控制转鼓转动的电机与码盘，大部分沉入转鼓内部，不再增加转鼓的高度。

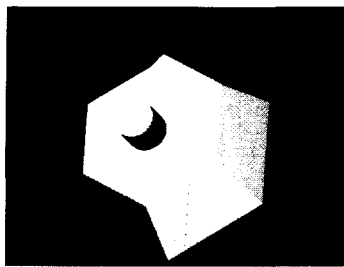


图 3 六棱台转鼓立体示意图

Fig.3 Solid figure of the mirror polygon

2.2 红外成像器

红外成像器的光学系统由两个透镜组构成，中间置一个 45° 反射镜，参见图 2。第一组的第一面透镜为 ZnSe 材料，表面镀有高硬度防护膜，以保证在野外恶劣环境下使用；其后为锗透镜，安装在精密调节台上，通过它调节光学聚焦。第二个透镜组由 3 个透镜组成，负责将红外辐射聚焦到红外探测器焦平面。由于

采用了非球面设计^[11]，整个光学系统仅用 5 个透镜。

2.3 系统成像质量

(1) 点列图^[12]

从图 4 可以看出设计的光学系统成像质量是比较好的，在靠近视场中心的像斑大小不到 $15 \mu\text{m}$ ，边缘处像斑也不超过 $20 \mu\text{m}$ 。

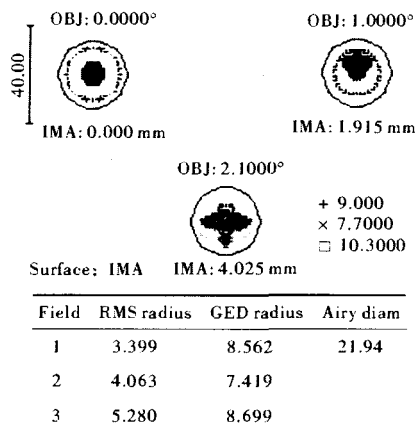


图 4 红外光学指向器成像质量点列图

Fig.4 Spot diagram of IR director

(2) 调制传递函数^[12]

图 5 表明设计的成像光学系统的调制传递函数 (MTF) 很好，MTF 在 30 c/mm 处达到 58%。

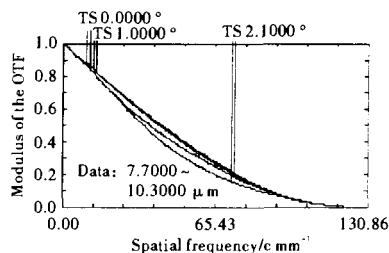


图 5 红外光学指向器调制传递函数

Fig.5 Optical modulation transfer function of IR director

3 红外指向器扫描控制伺服系统的设计

本系统由伺服电动机、驱动器、编码器、运动控制器组成，主要负责控制转鼓、反射镜的运动，如图 6 所示。图中左侧支路（包括驱动器 1、电机 1、编码器 1）用来控制转鼓扫描；右侧支路（包括驱动器 2、电机 2、编码器 2）用来控制反射镜的运动。在设计过程中重点考虑的是如何确保电机的速度稳定性以及定位精

度。对速度稳定性要求高的电机1,采用半闭环伺服回路,这样只需电机本身的相对编码器就可完成;而对于电机2,要求定位精度高,则采用全闭环伺服回路,使用绝对编码器^[13]。

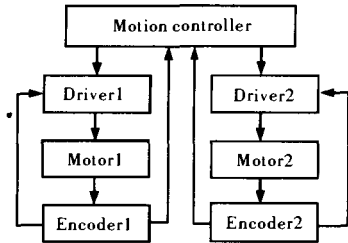


图6 扫描伺服控制系统

Fig.6 Scanning control system

4 结论

根据目前系统所选用的光学元件的参数,通过计算,可获得如下技术指标:

- (1) 局域搜索: 60° (方位) $\times 40.1^\circ$ (俯仰);
- (2) 全方位搜索: 360° (方位) $\times 40.1^\circ$ (俯仰);
- (3) 搜索时间: 2 s 60° (方位) $\times 24.1^\circ$ (俯仰);
4 s 60° (方位) $\times 40.1^\circ$ (俯仰);
- (4) 光学指向器外形尺寸: 700 mm \times 512 mm \times 700 mm;

- (5) 光学指向器质量 80 kg。

在规定的标准大气气象条件下,相应于发现概率0.95,虚警概率 10^{-6} 情形时,飞机类目标的探测距离不小于 16 km^[14]。

参考文献:

- [1] Stephen B Campanai; YANG Ying-huai, LU Jin, LU Ling-hua, et al. Passive Electro-Optical Systems, The Infrared Electro-Optical Systems Handbook[M]. Tianjin: The 8358th Institute of China Aerospace Corporation (Stephen B Campanai; 杨应槐, 卢进, 陆玲华, 等. 被动光电系统, 红外与光电系统手册. 天津: 航天工业总公司第三研究院八三五八所), 1997.
- [2] Michael C Dudzik; YANG Ying-huai. Infrared Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing, The Infrared Electro-Optical Systems Handbook [M]. Tianjin: The 8358th Institute of China Aerospace Corporation (Michael C Dudzik; 杨应槐. 光电系统设计、分析和测试, 红外与光电系统手册. 天津: 航天工业总公司第三研究院八三五八所), 2001.
- [3] HUANG Yong-mei, MA Jia-guang, FU Cheng-yu, et al. Application of moving target velocity in electro-optical tracking control system[J]. Infrared and Laser Engineering (黄永梅, 马佳光, 付承毓, 等. 目标速度预测在光电跟踪控制系统中的应用. 红外与激光工程), 2004, 33(5): 477-481.
- [4] George J Zississ; CHEN Guang-yu. Sources of Radiation, The Infrared Electro-Optical Systems Handbook [M]. Tianjin: The 8358th Institute of China Aerospace Corporation (George J Zississ; 陈光余. 红外辐射, 红外与光电系统手册. 天津: 航天工业总公司第三研究院八三五八所), 2001.
- [5] YAO Lian-xing, QIU Wei-li, WANG Fu-heng, et al. Target and Environment Optical Features [M]. Beijing: Astronautics Publishing House (姚连兴, 仇维礼, 王福恒, 等. 目标和环境的光学特性. 北京: 宇航出版社), 1995.
- [6] Max J Riedl. Optical Design Fundamentals for Infrared System [M]. USA: SPIE Press, 2001.
- [7] Robert E Fischer. Optical System Design [M]. USA: McGraw Hill, Inc, 2000.
- [8] William D Rofatto; ZHAI Shu-li, ZHOU Zan-xi, QIU Xiao-cheng, et al. Electro-Optical Components, The Infrared Electro-Optical System Handbook [M]. Tianjin: The 8358th Institute of China Aerospace Corporation (William D Rofatto; 翟树礼, 周赞熙, 秦效诚, 等. 光电元器件, 红外与光电系统手册. 天津: 航天工业总公司第三研究院八三五八所), 1998.
- [9] ZUO Ming, LI Xu-hui, QI Jian-zhong. Scanning thermal imaging system [J]. Electronics Optics and Control (左明, 李翔辉, 戚建忠. 扫描式热成像系统的研制. 电光与控制), 1996, (4): 36-38.
- [10] William L Wolfe. Infrared Design Examples [M]. USA: SPIE Press, 1999.
- [11] Smith W J. Modern Optical Engineering [M]. USA: McGraw-Hill, Inc, 2000.
- [12] ZEMAX Development Corporation. ZEMAX Optical Design Program User's Guide [Z]. Pleasanton, California: ZEMAX Development Corporation, 2004.
- [13] Galil Motion Control, Inc. DMC Controller User Manual [M]. Rocklin, CA: Galil Motion Control, Inc, 2002.
- [14] CHEN Zhi-wei, LIU Gang-hua, HUANG Yong, et al. Range estimation model of infrared surveillance system in low level [J]. Infrared and Laser Engineering (陈志伟, 刘刚华, 黄勇, 等. 低空红外预警系统距离估算模型. 红外与激光工程), 2004, 33(5): 441-444.