

FEI ZHI LENG  
HONG WAI CHENG XIANG  
DAO YIN TOU



# 非制冷红外成像导引头

张义广 杨军 朱学平 蔡超 编著

西北工业大学出版社

TJ 765  
5

# 非制冷红外成像导引头

张义广 杨 军 朱学平 蔡 超 编著

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书较全面地介绍了红外成像导引头的设计、仿真和性能测试试验,主要内容包括成像目标特性、导引头总体设计、光学成像系统设计、随动系统设计、图像信号处理设计、结构总体设计、红外成像导引头设计、仿真与测试试验以及虚拟样机技术等。

本书内容丰富,具有工程应用的特色,可供从事红外成像制导技术研究、设计、试验的技术人员使用,也可供大专院校有关专业的师生学习、参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

非制冷红外成像导引头/张义广等编著. —西安:西北工业大学出版社,2009.9

ISBN 978-7-5612-2648-3

I. 非… II. 张… III. 导弹制导—红外导引头 IV. TJ765

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 174869 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:陕西丰源印务有限公司

开 本:850 mm×1 168 mm 1/32

印 张:8.5 彩插 1

字 数:219 千字

版 次:2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

定 价:25.00 元

# 前 言

随着现代导弹武器系统的发展,红外成像导引头的应用越来越广泛,在空空导弹、空地导弹、飞航导弹中的应用日趋成熟。红外成像导引头已成为精确制导导弹武器系统不可缺少的关键部件之一。由于非制冷红外成像导引头具备体积小、质量轻、使用简单、成本低等优点,现已成为红外成像导引头的主要发展方向之一。

目前,非制冷红外成像导引头的设计还没有一本系统的著作,其参数选择、系统设计、性能测试与仿真散落在部分期刊、文献之中,不能系统地从事该专业的设计人员提供参考。有幸成为航天系统工作人员,笔者在进行红外成像导引头研究之初就十分希望能找到合适的参考书,但未能如愿。如今红外成像导引头的技术发展已突飞猛进,但依然闻不到专著의清香。笔者结合多年的研究设计经验,并借鉴参考国内外相关学者的研究成果,编写了这本书,希望能为从事精确制导研究的相关人员提供一些小小的帮助,如能达此目的,笔者将备感欣慰。

本书出版恰逢新中国 60 周年大庆,60 年的科技发展成就为祖国母亲的寿辰增添了华丽的篇章,我们为之欣喜,骄傲。希望本书的融入,如滴水归大海,虽渺小但也能为科技发展贡献力量。

本书取材主要以工程设计为主,避免繁杂的理论推导。全书共分为 12 章。第 1,2 章概述了红外成像导引头的基本概念、技术现状和发展趋势;第 3 章分析了红外成像导引头的成像特点以及图像校正的方法;第 4~8 章着重叙述了红外成像导引头总体与各分系统的设计;第 9,10 章论述了红外成像导引头的仿真与测试;

第 11 章介绍了红外成像导引头的虚拟样机设计技术;第 12 章介绍了笔者所在课题组设计的一种非制冷红外成像导引头。

本书的研究成果是在中国航天科工集团九院领导的关心和支持下完成的。特别是冯志高院长、刘石泉书记、严信平厂长、**王赓**主任,他们的支持是笔者研究的动力源泉,在此表示衷心感谢!本书凝聚了笔者所在课题组研究人员的心血,在研究条件相当艰苦的情况下,他们依然不离不弃,用勤劳和智慧支持笔者的研究,他们是中国航天科工集团九院的吴丰阳、涂素平、张青虎、邓盼、李小丹,万峰无线电厂的杨军、刘惠玲、黄碧洲、谢静、王昊、陈圣荣、杜征宇,华中科技大学的张天序教授、左峥嵘博士、钟胜博士、颜露新博士等,对他们的支持表示感谢!

本书的出版得到了中国航天科工集团九院九部的焦继革所长、伍晓峰书记、段祥军副所长、刘爱国副总师的支持和帮助,此外,西北工业大学航空学院的凡永华博士、袁博博士、张晓峰博士、许涛博士为此书编写付出了辛勤的汗水,在此一并表示感谢!

由于时间仓促,笔者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,欢迎读者批评指正。

编著者

2009 年 8 月

## 序

红外成像导引头技术是光、机、电一体化的综合性工程技术，是现代精确制导导弹的关键技术之一，它从根本上改变了导弹的制导精度，对精确制导导弹产生了巨大的影响，是导弹技术发展的又一次飞跃。

非制冷红外成像导引头是未来红外成像导引头技术发展的主要方向之一，它的发展将改变现有红外成像导引头体积大、使用过程复杂、成本高的缺陷。发达国家在这个方面已取得了重大技术突破，但国内在这方面的研究和应用相对比较滞后，该技术值得广大科技人员研究、探索。

本书作者在非制冷红外成像导引头技术方面进行了深入的探索与研究，取得了可喜的成绩。作者在多年研究与实践的基础上，全面系统地介绍了非制冷红外成像导引头及其分系统设计、仿真和测试试验等重要问题，给出了有较高使用价值的设计、仿真和性能测试方法，并引入了虚拟样机设计技术，对工程设计与试验技术进行了全面的总结。全书内容丰富，为从事红外成像制导技术的研究与设计人员提供了宝贵的参考资料，值得借鉴。

把自己的工作经验公开与广大科技工作者分享是科技发展进步的基础条件之一，我希望广大科技工作者多多总结在红外成像制导相关技术方面的研究成果，使更多的人能够站在别人的肩膀上推陈出新，从而使红外成像制导技术的研究蓬勃发展。



2009年7月1日

# 目 录

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                 | 1  |
| 1.1 红外成像导引头技术现状与发展趋势 .....            | 1  |
| 1.2 非制冷红外成像导引头关键技术 .....              | 4  |
| 1.3 本书重点 .....                        | 5  |
| <b>第 2 章 红外成像导引头的基本概念</b> .....       | 7  |
| 2.1 红外成像导引头的功能和组成 .....               | 7  |
| 2.2 红外成像导引头的分类 .....                  | 8  |
| 2.3 导弹对红外成像导引头的要求 .....               | 9  |
| 2.4 红外成像导引头的设计准则.....                 | 12 |
| <b>第 3 章 红外成像导引头的成像特性分析与校正</b> .....  | 15 |
| 3.1 目标背景红外辐射特性.....                   | 15 |
| 3.2 图像退化.....                         | 20 |
| 3.3 大气传输特性及天候影响.....                  | 24 |
| 3.4 高速运动对成像的影响.....                   | 29 |
| 3.5 气动光学效应对成像的影响.....                 | 32 |
| 3.6 退化图像校正方法.....                     | 36 |
| <b>第 4 章 非制冷红外成像导引头的总体设计与分析</b> ..... | 43 |
| 4.1 红外成像导引头的误差特性分析与控制.....            | 44 |
| 4.2 红外成像导引头的总体参数设计与分析.....            | 50 |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 4.3        | 红外成像导引头电气总体设计           | 57         |
| 4.4        | 红外成像导引头软件总体设计           | 64         |
| <b>第5章</b> | <b>光学成像系统的设计与分析</b>     | <b>69</b>  |
| 5.1        | 红外光学整流罩的设计与分析           | 69         |
| 5.2        | 光学成像系统设计与分析             | 75         |
| <b>第6章</b> | <b>随动控制系统设计与分析</b>      | <b>87</b>  |
| 6.1        | 随动系统方案及选择               | 87         |
| 6.2        | 随动系统的组成和功能              | 92         |
| 6.3        | 关键部件设计与分析               | 94         |
| 6.4        | 随动控制回路与驱动电路设计           | 101        |
| <b>第7章</b> | <b>实时图像信息处理设计与分析</b>    | <b>112</b> |
| 7.1        | 实时图像处理的硬件设计与分析          | 112        |
| 7.2        | 自动目标识别算法设计与分析           | 129        |
| <b>第8章</b> | <b>红外成像导引头的结构设计</b>     | <b>141</b> |
| 8.1        | 红外成像导引头对结构的要求及结构设计内容与原则 | 141        |
| 8.2        | 红外成像导引头结构总体设计           | 143        |
| 8.3        | 分系统结构设计                 | 146        |
| <b>第9章</b> | <b>红外成像导引头的仿真技术</b>     | <b>156</b> |
| 9.1        | 仿真技术概述                  | 156        |
| 9.2        | 红外成像导引头的数学仿真            | 158        |
| 9.3        | 红外成像导引头半实物仿真系统          | 171        |
| 9.4        | MATLAB+dSPACE 仿真系统      | 188        |



---

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| <b>第 10 章 红外成像导引头的调试、测试与试验</b> .....  | 197 |
| 10.1 红外成像导引头试验内容及条件.....              | 197 |
| 10.2 分系统调试、测试与性能评价 .....              | 200 |
| 10.3 红外成像导引头调试与测试.....                | 218 |
| <b>第 11 章 导引头虚拟样机技术</b> .....         | 231 |
| 11.1 虚拟样机技术概述.....                    | 231 |
| 11.2 虚拟样机技术在导引头研制中的作用.....            | 232 |
| 11.3 红外成像导引头虚拟样机仿真系统.....             | 237 |
| <b>第 12 章 一种非制冷红外成像导引头的设计实例</b> ..... | 241 |
| 12.1 技术指标要求.....                      | 241 |
| 12.2 主要设计技术方案.....                    | 242 |
| 12.3 主要试验与测试结果.....                   | 243 |
| <b>参考文献</b> .....                     | 252 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 红外成像导引头技术现状与发展趋势

由于红外成像导引头具有灵敏度高、空间分辨率高、能够在复杂背景条件下识别目标、抗电磁干扰能力强、打击目标种类多、全天候工作、能够实现发射后不管的功能、适应多种型号能力强等特点,已成为世界各国军事应用中重点研究和竞相发展的关键技术之一。

红外成像导引头的发展主要经历了光机扫描成像导引头和凝视成像导引头两个阶段。光机扫描成像导引头已被装配使用,典型的如应用于美国的 AGM—65D 空地反坦克导弹、AGM—65F 反舰导弹等。光机扫描红外成像导引头体积大、结构设计复杂,已有逐渐被红外凝视成像导引头取代的趋势,但美国 Kollmorgen 公司研制出了微型视频光机扫描器,使光机扫描成像导引头有了一定的发展空间。红外凝视成像导引头于 1980 年开始研制,是目前最有发展前途和生命力的红外成像导引头,采用该导引头的红外成像制导系统已装配到多种导弹武器系统之中。目前使用红外成像导引头的典型武器如表 1.1 所示。

随着精确制导武器发展需求的牵引,红外成像导引头分辨率越来越高,识别能力也越来越强。目前红外成像导引头正朝着以下几个方面发展:

(1) 智能化、自动化。智能导引头能够实现自适应变焦、变门限智能探测、智能搜索和智能跟踪。利用人工智能、ATR 技术和

计算机技术实现红外成像导引头的智能化已成为红外成像导引头发展的一种趋势。

表 1.1 部分典型红外成像制导武器

| 国 别    | 型 号                | 制导方式            | 应用现状 |
|--------|--------------------|-----------------|------|
| 美 国    | “幼畜”AGM—65D        | 电视、红外成像、激光三种导引头 | 大量装备 |
|        | “标枪”反坦克导弹          | 凝视红外焦平面导引头      | 已装备  |
|        | 铜斑蛇                | 红外成像/激光导引头      | 定型装备 |
|        | 大气层外拦截ERIS         | 凝视红外焦平面导引头      | 研制中  |
|        | AMRAAM 空空导弹        | 凝视红外焦平面导引头      | 研制中  |
|        | 先进寻的器              | 凝视红外焦平面导引头      | 研制中  |
|        | AAWS—W 先进中程反坦克武器系统 | 凝视红外焦平面导引头      | 已装备  |
| 英国     | ASRAAM 空空导弹        | 凝视红外焦平面导引头      | 已装备  |
| 美国、以色列 | ARROW 导弹           | 红外成像导引头         | 定型装备 |
| 德、法、英  | 远程“崔特格”反坦克导弹       | 凝视红外焦平面导引头      | 已装备  |
| 挪威     | “企鹅”MK2 系列导弹       | 光机扫描型红外成像导引头    | 大量装备 |
| 法、德、意  | 独眼巨人               | 光纤红外成像导引头       | 已装备  |
| 中国台湾   | 雄风 II              | 雷达/红外导引头        | 已装备  |

(2)微型化、集成化。如采用单片成像技术将二元光学元件、微透镜阵列与焦平面探测器集成在一起,使成像系统体积与如今的探测器体积相当;采用微光学技术使光学系统集成在硅片上以使光学系统微型化;采用微光机电系统(MOEMS)技术可以巧妙设计成孔径共享的双色成像系统,显著减小成像系统体积,提高成像系统效率。

(3)简单化。简单就意味着可靠,简单就能降低成本。为了适应末制导炸弹的使用成本需要,红外成像导引头正朝着简单化方向发展,如采用捷联稳定的常平架结构来取代传统的常平架稳像平台,采用非制冷探测器取代制冷探测器,将目标识别图像处理与成像系统的图像处理集成在一起,采用灵巧焦平面阵技术可以将某些像元处理级的处理集成在焦平面阵内等。

(4)与仿生学技术相结合。如模拟脊椎动物的视网膜中央凹视觉机制研制非均匀采样智能焦平面阵列来同时保证大视场、高空间分辨率、高帧频、快响应速度的红外成像导引头。

(5)与光学技术相结合。如采用光学图像相关器来完成图像相关运算以提高图像信息处理的快速性,采用光学互连代替电学互连来提高信息传输速度等。

(6)多色复合或多波段复合。不同目标辐射的红外能量波长不同,因而针对不同目标所采用的红外成像导引头需要选择不同的波段。另外,随着光电技术、隐身技术的发展,未来战场环境日趋复杂,红外成像导引头要正确地辨别真目标、排除假目标的干扰,需要进行多色复合(将长波、中波、近红外复合,甚至要与紫外复合)或多波段复合(与毫米波、微波复合)。

与制冷型红外成像导引头相比,非制冷红外成像导引头具有成本低、体积小、使用维护简单等特点,越来越受到重视,是红外成像导引头的一个重点发展方向。美国的非制冷红外成像导引头在武器系统中的研究与应用走在世界的前列,他们研制发展了多种

高性能的非制冷红外成像探测器并继续进行新型非制冷红外成像探测器的技术研究。

## 1.2 非制冷红外成像导引头关键技术

非制冷红外成像导引头的关键技术较多,主要包含以下几个方面:

(1)目标特性研究。目标特性的不变性研究已旷日持久,取得了很多的成就,但人们还没有完全找到简单有效的适应各种目标的不变特性。目标与环境的红外辐射特性、传输过程中的影响等依然值得深入研究。在建立完善、简单的目标特征库之前,目标特性研究必然是红外成像导引头总体研究的关键技术之一。

(2)耐高温、高动压红外光学窗口。红外光学窗口是红外成像导引头的主要关键技术之一。红外光学窗口必须具备优良的光学性能、机械性能、化学性能和热性能,具体地说,就是要在全温度范围内( $600^{\circ}\text{C}$ 以内)具有高透过率、高机械强度、高热导率、低辐射系数、高抗热震能力以及高防腐能力。目前,很难找到满足上述所有要求的红外光学窗口材料。

(3)高精度随动系统。随动系统负载大,要求高稳定精度、体积小并且工作时过载大,这些都给随动系统的设计带来了新的挑战,特别是在宽频带条件下满足稳像精度是一个比较棘手的问题。

(4)宽温条件下的高分辨率热成像系统。红外成像导引头工作在一个温度不断变化的环境中,温度范围一般要求是 $-40\sim+85^{\circ}\text{C}$ ,这给热成像系统的无热化设计、成像系统的读出电路以及成像探测器都提出了较高的要求。另外,在体积受限的条件下热成像系统的孔径有限, $F$ 数要做小也是十分困难的。

(5)复杂背景条件下的自动目标识别算法。当前,自动目标识别仍然只是一门艺术,复杂背景条件下的自动目标识别仍处于研

究之中,理论和实践水平都有待提高,问题空间的复杂性、计算资源的有限性、跟踪精度的高要求以及实时性之间存在的矛盾较大,因而复杂背景条件下的自动目标识别仍然是制约红外成像导引头发展的主要瓶颈,有待广大科研工作者深入研究。

(6)红外成像导引头的测试与性能评价。当前已建立了红外成像导引头的测试与评价系统,也逐步研究出了许多性能评价方法,但仍然缺少行之有效的性能评价准则。“如何真正地做好性能评价并使红外成像导引头设计得恰到好处”依然是红外成像导引头总体研究的关键问题。

上述内容构成了非制冷红外成像导引头关键技术集合,涉及光学、自动控制、机械、电信、材料等诸多专业,需要多学科的结合才能得到有效的解决。

### 1.3 本书重点

本书重点阐述非制冷红外成像导引头的信息总体、系统设计总体和测试试验总体等相关内容,试图为工程设计人员提供系统性的设计参考。主要重点内容如下:

(1)红外成像导引头的成像特性。分析了目标红外辐射特性,重点阐述了目标红外辐射经过大气传输、激波流场、红外光学窗口后以及运动过程的图像退化特征,对图像退化模型进行了研究,分析了各种因素引起的图像退化的校正方法。

(2)红外成像导引头的总体设计。分析了红外成像导引头的总体指标论证以及关键总体参数设计原则与过程,给出了总体指标论证和总体参数设计的方法,阐述了红外成像导引头电气总体设计以及软件总体设计的内容和方法。

(3)红外光学成像系统设计。重点阐述了红外光学整流罩、光学成像系统的设计,对各种非均匀校正方法的性能和使用情况进

行了分析。

(4) 随动系统设计与分析。分析了各种随动系统方案的性能,详细阐述了速率陀螺平台稳定式随动系统的设计,论述了随动系统关键部件的选择以及随动控制回路的设计方法。

(5) 实时图像信息处理设计。讲述了红外成像导引头对实时图像信息处理的要求,分析了图像信息处理机的体系结构,重点阐述了图像信息处理机的设计,详细分析了自动目标识别算法的性能,讨论了自动目标识别算法的设计准则和重点问题,针对地面目标/背景设计了一种基于可见光模板匹配的目标识别算法。

(6) 红外成像导引头的结构设计。讲述了红外成像导引头对结构设计的要求,重点论述了红外成像导引头结构总体设计以及各分部件的设计。

(7) 红外成像导引头的仿真技术。介绍了红外成像导引头仿真系统的组成以及仿真技术现状,重点阐述了红外成像导引头的数学仿真和半实物仿真系统各组成部分的设计与选择问题。

(8) 红外成像导引头的测试与试验。介绍了红外成像导引头的调试内容与方法、试验设计体系,重点阐述了红外成像导引头各关键分系统(光学整流罩、光学成像系统、图像信息处理、随动系统)的测试方法以及整机的性能评价和试验方法。

(9) 红外成像导引头的虚拟样机设计。虚拟样机设计平台是红外成像导引头的重要设计手段,阐述了虚拟样机设计平台的组成、功能以及建造虚拟样机设计平台的方法。

(10) 非制冷红外成像导引头的设计实例。利用本书介绍的设计方法设计了一种小型随动非制冷长波红外成像导引头,介绍了技术指标实现情况以及各种考核试验的试验结果。

## 第 2 章 红外成像导引头的 基本概念

### 2.1 红外成像导引头的功能和组成

红外成像导引头是精确制导导弹控制系统的重要组成部分，是导弹的“眼睛”，它的作用是测量导弹偏离理想运动轨道的失调参数，利用失调参数形成控制指令，送给弹上控制系统，去操纵导弹飞行。一般地，红外成像导引头应具备如下基本功能：

(1) 成像功能。接收目标、背景红外辐射，并形成红外图像。

(2) 图像稳定功能。隔离导弹姿态扰动的影响，使导引头能够生成稳定、清晰的图像，给目标识别创造良好的条件。

(3) 目标检测识别功能。从红外图像中检测、识别目标，测量出目标失调角。

(4) 目标跟踪功能。根据失调角信息控制随动平台对目标进行稳定跟踪。

(5) 制导信息生成功能。计算目标视线角和目标视线角速率，形成制导信息。

(6) 与其他系统通信功能。与弹上计算机通信，接收弹上计算机传输的命令，将制导信息传送给弹上计算机和遥测系统，在需要的时候还需要将图像压缩后传输给遥测系统。

根据功能需要，不同种类红外成像导引头的组成不完全相同（如捷联红外成像导引头就没有稳定系统、伺服机构，非制冷红外



成像导引头就没有单独的制冷机构——制冷器),但它们都有一些共同的部分,比如目标/背景红外辐射、红外光学整流罩、光学系统、焦平面成像探测器、实时图像处理机、中央处理机以及二次电源等。红外成像导引头的一般组成框图如图 2.1 所示。

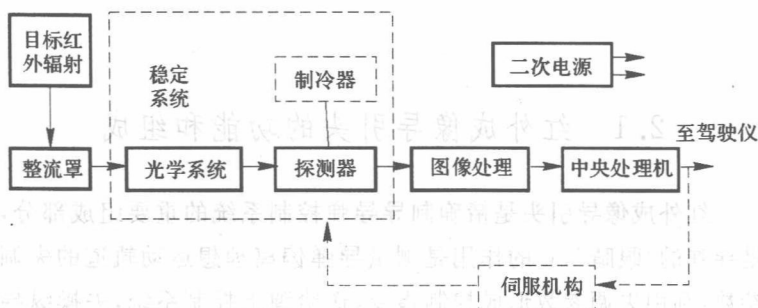


图 2.1 红外成像导引头组成图

## 2.2 红外成像导引头的分类

红外成像导引头按波长可以分为长波、中波、短波红外成像导引头;按成像方法可以分为光机扫描、凝视成像导引头;按位标器形式可以分成捷联、半捷联、电子稳像、平台稳像红外成像导引头;按是否需要制冷可以分成制冷、非制冷红外成像导引头,非制冷红外成像导引头又可按探测器类型细分为热释电、非晶硅和氧化钒红外成像导引头;按使用波段数目可以分为单色、双色和三色红外成像导引头。

红外成像导引头的分类如图 2.2 所示。