



# 红外制导 系统原理

HONGWAI ZHIDAO XITONG YUANLI

主编 张红梅 副主编 柳红伟



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 红外制导系统原理

主 编 张红梅

副主编 柳红伟

参 编 刘 昕 宋 崎 刘 皓 张树栋



国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了红外制导导弹制导系统的组成与工作原理;以红外点源制导系统和红外成像制导系统为主要内容,以制导回路为主干,论述了红外制导系统的各组成部分;最后通过典型的便携式导弹将相关内容有机地联系在一起,具体说明了红外点源制导的工作过程。

本书共分为7章。第1章介绍红外探测的物理基础知识——红外基础知识;第2章介绍制导系统的关键传感器——陀螺仪;第3章和第4章分别介绍红外点源制导系统和红外成像制导系统,这两章不但介绍了制导系统的结构组成和基本原理,而且总结了制导系统的发展历程和技术特点;第5章介绍导弹的执行机构——舵机的工作原理,特别就脉宽式燃气舵机及舵回路进行详细分析;第6章主要介绍导弹在大气中运动的物理基础知识——飞行力学基础;第7章具体分析介绍便携式导弹的工作过程。

本书的内容为学习导弹制导系统提供了基本理论知识和系统框架,可用作探测、制导与控制及相关专业的教材,也可作为相关人员从系统角度了解导弹制导系统工作原理的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

红外制导系统原理/张红梅主编. —北京:国防工业出版社,2015.7

ISBN 978-7-118-10221-5

I. ①红… II. ①张… III. ①红外制导 IV. ①V249.32

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第171906号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 14 字数 330千字

2015年7月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价30.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

红外制导导弹是当今红外技术的重要军事应用之一,是非常有效的精确制导打击武器。世界各军事强国都在抓紧研发新一代红外(红外/复合)制导导弹。红外制导技术的发展,使其在军事领域已获得广泛应用。在未来现代化战争中,红外制导系统将在近程武器的制导系统或远程武器的末制导系统领域发挥更大的作用。

本书为主要面向于制导与控制专业本科学生的教材,以及导弹自动控制有关专业科技人员的参考书,其目的是使读者系统全面地理解红外制导系统的基本结构和工作原理,掌握导弹制导系统分析和设计的基本方法。本书在编写上具有下列特点:

(1) 始终围绕着红外制导系统这一核心,以点源和成像制导系统的基本结构为主线,使本书具有相对完整和系统全面的特点。

(2) 以某便携式导弹为例,进一步分析介绍了红外制导系统的工作过程,突出了工程性和实用性的原则。

本书编写过程中,始终围绕着制导控制系统原理介绍和系统分析这一核心,介绍了制导系统分析和设计所必备的物理基础知识和导弹建模的基本方法以及制导系统的测量和执行机构,然后总结分析了典型的便携式导弹的工作过程,并对现代导弹制导系统的发展历程和未来发展方向做了介绍。全书具有相对完整和系统全面的特点。

全书共7章。内容包括点源制导和成像制导的基础知识、系统组成、工作原理和技术性能等方面。

第1章简要介绍红外技术的应用,红外辐射的基本性质、基本理论、目标和背景以及传输方面的基础知识。

第2章介绍陀螺仪的基本特性和应用,具体讲述了激光、机械、框架式微机械陀螺仪的工作原理以及传递函数。

第3章介绍红外点源导引头的组成及工作原理,内容具体包括光学系统、探测器、调制盘、电子线路和陀螺跟踪系统。

第4章介绍成像制导系统的工作原理与结构,内容涉及光学系统、探测器,信息处理与显示、成像跟踪原理以及系统的综合特性等方面。

第5章介绍导弹舵机的基本要求、分类,便携式导弹舵机的控制方法及舵回路分析等内容。

第6章介绍导弹的飞行力学基础和导引律设计,具体包括作用在导弹上的力和力矩,运动方程组的建立、简化和线性化等内容。

第7章介绍便携式导弹的制导原理控制力、控制指令、弹体阻尼回路和工程过程,并对新一代红外制导导弹的发展趋势进行展望。

本书由张红梅(第1章、第3章、第4章)、刘昕(第2章)、宋崎(第5章)、刘皓(第6

章)、柳红伟和张树栋(第7章)编写,张红梅任主编,柳红伟任副主编。本书编写过程中,得到了沈阳航空航天大学 and 沈阳航天新乐公司的热情帮助,在此表示诚挚的谢意。另外,本书能够顺利出版,还要感谢国防工业出版社各位老师的辛苦工作!

本书编写过程中,参考或引用了参考文献中所列论著的有关内容,在此谨向这些论著的作者表示由衷的谢意!

由于编写时间和编者的水平所限,书中差错敬请读者指正。

编者  
2015年1月

# 目 录

<b>第 1 章 红外基础知识</b> .....	1
1.1 红外技术的应用 .....	1
1.2 红外辐射及基本性质 .....	6
1.3 红外辐射术语 .....	8
1.4 红外辐射基本理论 .....	13
1.5 目标辐射和背景辐射 .....	19
1.6 红外线在大气中的传输 .....	23
<b>第 2 章 陀螺仪</b> .....	28
2.1 陀螺仪的基本特性 .....	29
2.2 机械陀螺 .....	32
2.3 激光陀螺 .....	38
2.4 框架式微机械陀螺仪 .....	43
2.5 陀螺仪的应用 .....	45
<b>第 3 章 红外点源制导系统原理</b> .....	55
3.1 概述 .....	55
3.2 导弹自动导引系统的组成及工作原理 .....	57
3.3 红外导引头光学系统基本原理 .....	59
3.4 红外探测器及其制冷 .....	64
3.5 光学调制与调制盘 .....	71
3.6 误差信号处理电路框图 .....	79
3.7 红外目标跟踪系统 .....	80
3.8 十字叉及 L 形系统 .....	91
<b>第 4 章 红外成像制导系统</b> .....	97
4.1 引言 .....	97
4.2 红外成像系统的工作原理与结构 .....	102
4.3 红外光学系统 .....	104
4.4 红外探测器 .....	112
4.5 信息处理与显示 .....	124

4.6	成像跟踪原理 .....	130
4.7	红外成像系统的综合特性 .....	142
<b>第5章</b>	<b>舵机 .....</b>	<b>150</b>
5.1	引言 .....	150
5.2	舵机的基本要求 .....	150
5.3	舵机的分类 .....	151
5.4	便携式导弹舵机的控制方法 .....	153
5.5	脉宽式燃气舵机及舵回路的分析 .....	158
<b>第6章</b>	<b>导弹飞行力学基础 .....</b>	<b>164</b>
6.1	坐标系 .....	164
6.2	作用在导弹上的气动力 .....	168
6.3	作用在导弹上的气动力矩 .....	171
6.4	推力和重力 .....	174
6.5	导弹运动方程组 .....	175
6.6	导弹运动方程组的简化 .....	181
6.7	导弹运动方程的线性化 .....	183
6.8	导引规律 .....	188
<b>第7章</b>	<b>便携式导弹的制导原理 .....</b>	<b>195</b>
7.1	控制力的形成 .....	195
7.2	控制指令的形成 .....	203
7.3	弹体阻尼回路 .....	212
7.4	新一代红外制导导弹 .....	213
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>216</b>

# 第 1 章 红外基础知识

## 1.1 红外技术的应用

### 1.1.1 红外技术的起源与发展

1800 年,英国物理学家 F. W. 赫歇尔从热的观点来研究各种色光时,偶然发现放在光带红光外的一支温度计,比其他色光温度的指示数值高。经过反复试验,这个所谓热量最多的高温区,总是位于光带最边缘处红光的外面。于是他宣布:太阳发出的辐射中除可见光线外,还有一种人眼看不见的“热线”,这种看不见的“热线”位于红色光外侧,叫做红外线。这种红外线又称红外辐射,是指波长为  $0.76\sim 1000\mu\text{m}$  的电磁波。

F. W. 赫歇尔发现红外辐射时使用的是水银温度计,这是最原始的热敏型红外探测器。1830 年以后,相继研制出温差电偶的热敏型探测器、测辐射热计等。直至 1940 年以前,研制成的红外探测器主要是热敏型探测器。19 世纪以后,科学家们通过使用热敏型探测器,认识了红外辐射的特性及其规律,证明了红外线与可见光具有相同的物理性质,遵守相同的规律。它们都是电磁波之一,具有波动性,其传播速度都是光速,波长是它们的特征参数并可以测量。20 世纪初,科学家们测量了大量有机物质和无机物质的吸收、发射和反射光谱,证明了红外技术在物质分析中的价值。20 世纪 30 年代以后,首先出现了红外光谱仪,以后发展成在物质分析中不可缺少的仪器。20 世纪 40 年代初,光电型红外探测器问世,以硫化铅红外探测器为代表的这类探测器性能优良、结构牢靠。20 世纪 50 年代,半导体物理学的飞速发展,使光电型红外探测器得到新的推动。到 20 世纪 60 年代初期,对于  $1\sim 3\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\mu\text{m}$  和  $8\sim 13\mu\text{m}$  三个重要的大气窗口都有了性能优良的红外探测器。在同一时期内,固体物理、光学、电子学、精密机械和微型制冷器等方面的发展,使红外技术在军、民两用方面都得到了广泛的应用。20 世纪 60 年代中叶起,红外探测器和系统的发展体现了红外技术的现状及发展方向。20 世纪 60 年代,激光的出现极大地影响了红外技术的发展,很多重要的激光器件都在红外波段,其相干性便于移用电子技术中的外差接收技术,使雷达和通信都可以在红外波段实现,并可获得更高的分辨率和更大的信息容量。

### 1.1.2 红外技术的应用

#### 1. 军事方面的应用

在 19 世纪,科学家们研究天文星体的红外辐射,应用红外光谱进行物质分析。到了 20 世纪,红外技术首先受到军事部门的关注,因为它提供了在黑暗中观察、探测军事目标自身辐射及进行保密通信的可能性。第一次世界大战期间,为了战争的需要,研制了一些



实验性的红外装置,如信号闪烁器、搜捕装置等。第二次世界大战前夕,德国第一个研制出了红外变像管,并在战场上应用。美国也大力研究各种红外装置,如红外辐射源、窄带滤光片、红外探测器、红外望远镜等。20世纪50年代以后,美国“响尾蛇”导弹上的寻的制导装置和u-2间谍飞机上的红外照相机代表着当时军用红外技术的水平。1991年,美国在海湾战争中,红外技术特别是热成像技术在军事上的作用和威力得到充分显示。

利用目标和背景辐射特性的差异,可以识别各种军事目标,特别是能揭示伪装的目标等。这使得红外技术成为现代军事技术的一个重要组成部分,在现代军事技术上有了广泛的应用。红外技术可用于对远、中、近程军事目标的监视、侦察、告警、预警与跟踪,红外成像的精确制导,武器平台的驾驶、导航,探测隐身武器系统,光电对抗,武器瞄具等。

### 1) 红外夜视

红外夜视有助于人们在黑暗中观察景物,根据不同的需要可制成不同的红外夜视仪器。热成像仪是目前技术最为先进的夜视器材。热成像仪既不依靠夜天光也无需携带光源,而是通过接收目标的红外辐射来工作,所显示的图像反映了目标与周围环境之间热辐射的差异,即利用热对比度成像。热成像仪的主要特点:① 能实现全被动观察。微光夜视仪需要有星光、月光才能正常工作,在阴云密布的夜间其作用距离迅速下降,主动红外夜视仪需要人工红外光源工作,容易暴露目标,而热成像仪能够在全黑的情况下工作,所以十分隐蔽,不易被对方发现。② 能实现全天候观察。红外线特别是波长在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 的红外线比可见光在大气中的传输能力强,使热成像仪不仅探测距离远,而且白天黑夜都具有较强的透过浑浊空气和烟雾霾雪进行观察的能力。③ 能揭露伪装。由于热成像仪是靠探测目标和背景之间的热辐射差异识别目标,因而具有识别伪装的特殊能力,尤其是能发现隐蔽在树林和草丛中的人员和车辆,通过地表温差的探测还可发现雷场。④ 能获得目标的状态信息。热成像仪利用温差成像,这样不仅能对目标进行探测,还能获得关于目标状态的信息,如:机场上停放的飞机飞走了,通过停机坪上的热痕迹可以判断曾有几架飞机在此停留过。

另外,红外瞄准仪可供步枪、机枪、火炮等在夜间瞄准用;红外驾驶仪用在各种装甲车辆上,驾驶员可借助这种仪器观察前进道路和地物;红外观察仪可用于夜间军事行动时发现目标等。海湾战争从开始、作战到决胜的整个过程都是在夜间,夜视装备应用的普遍性乃是这次战争的最大特点之一。美国每辆坦克、每个重要武器都配有夜视瞄准具,仅美军第二十四机械化步兵师就装备了上千套夜视仪。多国部队除了地面部队、海军陆战队广泛装备了夜视装置外,美国的F-117隐身战斗轰炸机、“阿帕奇”直升机、F-15E战斗机、英国的“旋风”GRI对地攻击机等都装有先进的热成像夜视装备。夜视技术的发展在军事上形成了“制夜权”的概念,拥有夜视技术优势的一方,能在隐蔽处掌握敌方的信息,从而能有效地指挥、联络、打击敌人,并使敌方的夜战能力受到压制。人们从近几年高技术局部战争中认识到,制夜权对于赢得胜利的作用已上升到与制海权、制空权和制天权同等重要的地位。

### 2) 红外预警

不同气体分子在红外波段的吸收光谱不同,利用这一特点可以制成气体分析仪,对环境大气中的有害气体等进行监测。针对武警部队反恐活动中经常遇到的“毒气”恐怖事件,可利用红外吸收法做混合气体组分的定量分析,从而确定出混合气体中毒气的含量,

为部队应采取怎样的行动提供可靠的依据。之所以选用红外辐射,是因为气体分子的振动或转动吸收光谱是在红外波段,而且用红外波段测量可以不受日光的干扰,达到时刻预警的目的。

### 3) 红外侦察

利用红外技术能快速、准确地探知敌方的动态或部署。由于任何军事目标与周围环境都存在着温度的差异,根据红外热像图可以进行探测和识别。例如飞机是否刚发动过,营地炊事点和大炮、卡车的位置。机载前视红外装置能在  $1.5 \times 10^3 \text{m}$  上空探测到人、小型车辆和隐蔽目标,在  $2 \times 10^4 \text{m}$  高空能分辨出汽车,特别是能探测水下 40m 深处的潜艇。海湾战争中,为了躲过轰炸,伊拉克装甲部队将坦克伪装成沙丘,使目视侦察难以发现。但沙土是导体,埋有坦克的沙丘白天升温快,夜间散热慢,与周围真沙丘有明显的温差。在热像仪视野中,假沙丘是亮斑,因此夜航机用导弹和炸弹攻击“亮斑”,使大批伊军坦克被摧毁。另据研究显示,远红外在  $350 \mu\text{m}$ 、 $450 \mu\text{m}$ 、 $620 \mu\text{m}$ 、 $735 \mu\text{m}$  和  $870 \mu\text{m}$  波长附近存在着相对透明的大气窗口。与微波通信相比,远红外光束较窄,波束方向性好,可实现外差接收,可以作定点保密通信或宽频、大容量的通信系统,因此是将来多媒体传输大容量军用无线通信的希望所在。20 世纪 80 年代美国的“星球大战计划”在发展太空通信设备和雷达时就用了远红外频段;1992 年美国航空航天局提出从 1995 年到 2010 年要全面占领远红外技术领域。

### 4) 红外制导

许多军事目标,尤其是一些具有动力装置的目标,如飞机、火箭、坦克、军舰等,都在不断地发射大功率的红外辐射,它们是很强的红外辐射源。红外制导就是利用这些目标自身的红外辐射来引导导弹自动跟踪并接近目标,提高命中率。在各种精确制导体制中,红外制导因其制导精度高、抗干扰能力强、隐蔽性好、效费比高等优点,在现代武器装备发展中占据着重要地位。据报道,20 世纪 80 年代以来的几次局部战争中,被导弹毁伤的飞机有 90% 是被红外制导的导弹击落的。多国部队利用飞机发射的红外制导导弹在海湾战争中发挥了极大作用,仅在 10 天内就摧毁伊军坦克 650 辆、装甲车 500 辆。制导技术的发展在很大程度上取决于红外探测技术的发展(图 1.1)。

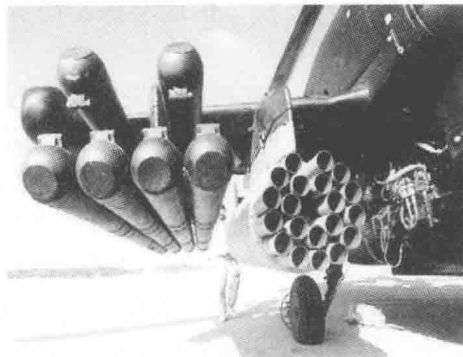


图 1.1 红外制导空空导弹

红外制导系统包括红外点源(非成像)制导和红外成像制导两大类。红外点源制导主要用于近距空格斗弹、反坦克导弹,及其他低成本、小型化导弹。

自从 1948 年第 1 枚红外制导导弹——美国的“响尾蛇”导弹(Sidewinder)问世以来,红

外制导技术获得了大量应用和快速发展。20世纪60年代中期以前,红外制导武器主要用于攻击空中速度较慢的飞机,其探测器采用不制冷的硫化铅,信息处理系统为单元调制盘式调幅系统,工作波段为 $1\sim 3\mu\text{m}$ ,灵敏度低、抗干扰能力差、跟踪角速度低。这一阶段的典型产品有美国的“响尾蛇”AIM-9B、“红眼睛”Redeye,以及苏联的K-13、SAM-7等。

20世纪60年代中期到70年代中期,探测器采用了制冷的硫化铅或碲化铟,从而极大地提高了灵敏度,工作波段也延伸到 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的中红外波段,改进了调制盘和信号处理电路,提高了跟踪速度。这一阶段制导武器的作战性能得到了较大的提高,虽然还只能进行尾追攻击,但攻击区和对付高速目标的能力有很大提高,代表型号有美国的AIM-9D、法国的“马特拉”R530等。

20世纪70年代后期以后,红外探测器均采用了高灵敏度的制冷碲化铟,并且改变了以往的光信号的调制方式,多采用了圆锥扫描和玫瑰线扫描,亦有非调制盘式的多元脉冲调制系统,具有探测距离远、探测范围大、跟踪角速度高等特点,有的还具有自动搜索和自动截获目标的能力。因此,这一阶段的红外制导武器可进行全向攻击和对付机动目标,代表型号有美国的AIM-9L、苏联的R-73E、以色列的“怪蛇”3、美国的“毒刺”(Stinger)及法国的“西北风”(Mistral)等。

红外成像制导主要用于巡航导弹、反舰导弹、空地导弹等。受高技术作战需求的强力推动,近年来红外成像制导技术发展十分迅猛,其发展历程大致如下:

第1代红外成像制导系统出现于20世纪70年代,采用线列阵红外探测器加旋转光机扫描机构,由 $4\times 4$ 元光导碲镉汞探测器的串并扫描成像,工作波长为 $8\sim 14\mu\text{m}$ 。代表型号有发射前锁定目标的AGM-65D“幼畜”反坦克导弹、AGM-65F反舰导弹以及发射后锁定目标的AGM-84E“斯拉姆”导弹。

第2代红外成像制导系统出现于20世纪80年代,采用小规模红外焦平面阵列探测器,以串并扫描方式工作。这类制导系统可以连续积累目标辐射能量,具有分辨率高、灵敏度高、信息更新率高的优点,能够对付高速机动小目标、复杂地物背景中的运动目标或隐蔽目标。红外焦平面阵列探测器灵敏度比线列器件高1个数量级,成本又比凝视型焦平面器件低,同时结构紧凑、体积小、可靠性高,易于小型化,从而促进了红外成像制导小型战术导弹的发展。代表型号有德、英、法三国联合研制的远程反坦克导弹“崔格特”(Trigat),美国的高空防御拦截弹(HEDI)。

第3代红外成像制导系统采用了更大规模的焦平面阵列探测器和凝视工作方式,采用电子自扫描取代复杂的光机扫描机构,简化了信号处理和读出电路,可以充分发挥探测器的快速处理能力,其作用距离更远,热灵敏度、空间分辨率更高。20世纪80年代后期以来,凝视红外焦平面阵列器件发展很快,其中 $3\sim 5\mu\text{m}$ 中波段器件已发展到 $512\times 512$ 元,碲化铟光伏器件已达 $256\times 256$ 元,长波 $8\sim 12\mu\text{m}$ 光伏碲镉汞/硅CCD混合焦平面探测器已达 $128\times 128$ 元。目前焦平面探测器正在向着高密度、多光谱、多响应度、高探测率、高工作温度、低成本的方向发展。因此,国际上新投入研制的红外成像制导系统几乎全部采用了凝视型焦平面阵列技术,典型代表有美国的“海尔法”(Hellfire)、AIM-9X空空导弹、AAWS-M反坦克导弹等。

#### 5) 红外探测

红外探测就是用仪器接收被探测物发出或反射的红外线,从而掌握被探测物所处位

置的技术。雷达是迄今为止最有效的远程探测电子设备,它根据目标对雷达电磁波的散射能量来判断目标的存在并确定目标的空间位置。然而,在现代战争环境下,雷达也存在一些难以克服的弱点,面临低空和超低空突防、综合性电子干扰、目标电磁隐身和反辐射导弹四大威胁。而且雷达服役时间较长,其工作频段等战术指标的保密性已成问题,在强大的电子干扰环境下,几乎没有任何对抗措施,必将陷入瘫痪,因此,迫切需要一种新型的空防体系。无源或被动探测器跟踪技术是解决这一问题的有效途径,即用红外探测装置阵列替代常规火控雷达完成目标的截获、跟踪、平滑外推和控制武器系统的功能,从而形成被动火控系统,提高防空系统的战场生存能力。近 50 年来,世界各国争相发展利用红外线探测目标的技术。在军事上,红外探测技术用于制导、火控跟踪、警戒、目标侦察、武器热瞄准器、舰船导航、空降导航等;在武警部队领域,红外探测技术可广泛用于安全警戒、刑侦、森林防火和消防、大气环境检测等方面;在民用领域,红外探测技术广泛应用于工业设备监控、安全监视、交通管理、救灾、遥感及医学热诊断技术等。

#### 6) 红外遥感

遥感技术就是用飞机、卫星等运载工具把传感器带到空中以至太空去接收和记录各种物体发射和反射的电磁辐射信号,并借助计算机对这些信号进行图像处理和分析判断,最终达到对地物进行识别和监测的目的。对地物进行红外遥感测量的辐射源主要是自然辐射源,即被地物反射的太阳辐射和地球本身发出的红外辐射。太阳辐射能有 99.9% 是集中在  $0.217 \sim 10.94 \mu\text{m}$  的波段,其中约有 50% 的能量在红外区域,地球辐射谱则相当于 300K 的黑体辐射,其辐射能主要分布在长波远红外区。而红外波段比较宽,这样就能获得较多的地面目标的信息。红外光学遥感器在空间光学遥感器中研制难度最大、用途最广,它集合了光学、精密机械、空间制冷、温度控制、探测器和系统控制等多种领域的技术成果,体现着一个国家的综合实力。红外遥感由于具有保密性好、抗干扰功能强、能昼夜连续工作等优点,因此在空中军事侦察中占有十分重要的地位。

目前,红外技术作为一种高科技技术,与激光技术并驾齐驱,在军事上占有举足轻重的地位。除以上提到的红外技术应用之外,红外成像、红外观瞄、红外监视、红外跟踪、红外对抗、红外伪装、执法缉毒等红外技术的应用,将是现代和未来战争中重要的战略和战术手段。

### 2. 国民经济各个领域中的应用

红外测温、红外成像已在工业、交通、电力、石化、农业、医学、遥感、安全监控与防范和科学研究等民用领域广泛应用,成为自动控制、在线监测、非接触测量、设备故障诊断、资源勘查、遥感测量、环境污染监测分析、人体医学影像检查等重要方法。

#### 1) 温度检测

温度高于绝对零度的物体都要不断地发射红外辐射,红外辐射的功率随物体温度的升高而增加,只要测出物体所发射的红外辐射,便可以计算出它的温度,这就是红外测温的依据。红外测温的优点:①测量时不接触物体,不影响被测物体的温度分布,应用方便;②测温速度快;③温度灵敏度高,可分辨微小的温差,一种国产测温仪室温下能分辨  $0.1^\circ\text{C}$  的温度变化。

红外测温在工业上被广泛用于安全监控、无损探伤、火车热轴探测、供电部门输电线路及电厂故障检测等,在医学上被用于无接触测量体温及人体靠近表面部位肿瘤的早期诊断。

## 2) 红外遥感

红外遥感在民用领域也有很多应用。所谓红外遥感,就是利用红外辐射传达环境信息的过程。红外遥感除了像可见光遥感那样,包括大量利用反射辐射传达信息的过程外,更加普遍的是,它还包含大量利用物体自身发出的辐射来传达信息,因此不仅信息量丰富,而且更容易传达物体内部的详情。这是红外遥感所特有的优点。红外遥感仪器可以安装在飞机或人造卫星上,从而对大面积的地面或空间进行探测。红外遥感技术已广泛用于地球资源勘探、地质测绘、探矿、测地下水位、鉴别农作物长势、预防病虫害、气象预报、海洋考察、环境保护等方面。

## 3) 红外加热干燥技术应用

由于红外辐射有很明显的热效应,对物质有加热作用,故可以用来加热烘干。近年来长波红外(远红外)加热干燥技术迅速发展,并被大力推广使用。红外加热干燥具有设备简单、投资费用低,特别是加热效率高、节省电力等优点,因此目前广泛用于轻工业的油漆涂层干燥,纺织工业的各种合成纤维的热定型和干燥,食品工业的加热和脱水,电子工业集成电路基板的干燥,农业中粮食、蔬菜、经济作物的脱水干燥等方面。

## 4) 红外线式触控交互技术

红外线式触控交互技术以红外线扫描检测技术为基本原理,由红外线发射管与接收管在屏幕表面构成一个红外线检测矩阵栅格。当有物体进入这个检测栅格的时候,就会阻挡一部分红外光线,实现坐标位置检测。红外线式触控交互技术完全透明,甚至可以无玻璃体操作,同时具备防爆、防水、防尘、防油污、无坐标漂移、抗光干扰、完全无漂移、可任意物体触击、宽温适应、支持压力轴反应等特性。随着平面显示时代的到来,诸如平面CRT显示器、液晶、等离子显示技术的不断成熟和普及,红外线触控交互技术优势凸显,以此为依托,市场优势渐趋明显。

近期推出的第五代红外式触控交互技术,将触控交互界面显示模块的应用推向新的水平,不仅将分辨率提高到了 $1000\times 720$ ,而且通过插值运算,分辨率高达 $4096\times 4096$ 。抗强光干扰性能提高到太阳直射环境亦可使用,更重要的是在产品寿命和免维护性能方面有了本质的飞跃,工作环境下寿命大于7年。这就是说,当配套的显示器达到寿命终结的时候,触控交互模块本身仍然可以正常工作。用户的书写可以十分流畅地转换成图像轨迹,完全支持手写识别输入。实际上,已经可以用第五代红外式触控交互技术这样一个单一设备作为完整的人机界面平台,取代鼠标、书写板甚至键盘。从应用的层面看,触控交互技术不应该仅仅作为一个将触摸位置转换为坐标信息的简单设备,而应该作为一个完整的人机界面系统进行设计。第五代红外式触控交互技术就是依据这样的标准,通过内置的处理器和完善的驱动软件来实现产品概念的提升。

# 1.2 红外辐射及基本性质

## 1.2.1 红外辐射

自然界的物质都在不停地发射和吸收电磁辐射。从经典电磁理论知道,物质内部带电粒子的变速运动都会发射或吸收振动电磁场,以振动电磁场的形式在空间传播的能量

称为电磁辐射能。人们在日常生活中受到各种辐射的照射,如 X 射线、紫外线、阳光、热辐射、无线电波等。由于产生各种辐射的方法不同,或探测它们的方法不同,因此在历史上就有了上述各种不同的名称。其实它们在本质上都是电磁辐射,都具有波动性,所以又称为电磁波。它们都遵守同样形式的反射、折射、衍射、干涉和偏振的规律,在真空中的传播速度都相同,只不过振动频率不同而已。譬如太阳辐射的可见光,它仅是整个电磁辐射大家族中很小的一个成员,并且与其他辐射如红外辐射没有本质上的差异,只是由于它是能被人眼所能探测的唯一的一类辐射能,就被人们命名为可见光,成为也许是迄今为止被研究得最清楚的一种辐射。

人们根据电磁波的波长,把已知的电磁波排列在一起,并称之为电磁波谱,如图 1.2 所示。红外辐射(亦称为红外线)是电磁波的一部份,其波长为  $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$ 。再进一步把红外辐射分为几个部分,但这种区分的界限并没有统一的规定,就是说,从红外辐射本身的物理作用来说并没有特别明显的差异。

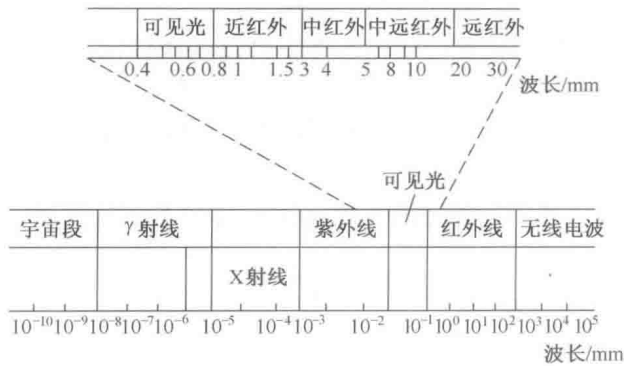


图 1.2 电磁波谱

各种电磁波的振动频率( $\nu$ )和波长( $\lambda$ )之间都遵守同样的关系式:

$$\nu \cdot \lambda = C \quad (1-1)$$

式中: $C$ 为真空中电磁波传播的速度, $C = 2.99792458 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

电磁波在其他介质中的传播速度会发生变化,而频率是不会改变的,因而其波长也会变化。

此外,考虑到辐射具有波动性的同时还兼有粒子性,其辐射能以一个光量子的能量为单位:

$$E = h \cdot \nu \quad (1-2)$$

式中: $h$ 为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{W} \cdot \text{s}^2$ 。由此得到

$$E = h\nu = h \frac{C}{\lambda} \quad (1-3)$$

若已知波长,就能算出能量。由式(1-3)可知红外辐射的波长越长,一个光子所具有的能量越小。

### 1.2.2 红外辐射的基本性质

红外辐射具有与可见光等其他波段的电磁波相同的物理性质,例如有波动性和量子

性的双重特征。红外辐射的波动性表现为反射、折射、干涉、衍射和偏振等。红外辐射的量子性表现为黑体辐射和光电效应。在考虑红外辐射的发射和吸收时,只有将其视为“分立的微粒——光子”的集合体才能进行完整的解释。一个光子的能量为  $h\nu$ , 光子频率越高或波长越短,光子能量也就越大。量子力学首先就是在黑体辐射理论上取得突破的。此外,只有用红外辐射量子特性,才能进行红外辐射的光电效应分析。

红外线与可见光有以下共同点和不同点。

共同点:① 红外线和可见光都是沿直线传播的,服从折射定律和反射定律,可见光的成象、干涉、绕射、偏振、光化学等理论都适用于红外线,因此可以直接应用可见光的这些理论来研究红外仪器。② 红外线和可见光都是电磁辐射,因此红外线也具有波动性和微粒性的双重属性。

不同点:① 红外线是不可见光,人眼对红外线不敏感,在军事上应用便于隐蔽。② 红外线的波长比可见光长,在大气中传输时衰减比可见光小些,因此红外线的传播距离比较远。③ 红外线有明显的热效应,因此可用于烘烤。

红外线也同其他事物一样,在一定的条件下可以互相转化,红外辐射可以是由热能、电能和光能等激发的,在一定条件下红外辐射又可以转化成热能、电能等。能量转化原理是光电效应、热电效应等现象的基础。我们利用光电效应、热电效应就可以制成各种探测红外线的敏感元件。

在红外光谱学中,一般将红外波段分成近红外、中红外和远红外三个波段。具体划分如下:

近红外波段:  $0.78 \sim 2.5 \mu\text{m}$ ;

中红外波段:  $2.5 \sim 50 \mu\text{m}$ ;

远红外波段:  $50 \sim 1000 \mu\text{m}$ 。

近红外波段可以用光电倍增管探测,有时也将其称为电子红外。中红外波段一般用卤化物晶体制成的棱镜进行分光 and 测量,有时也称为棱镜红外。在远红外波段没有合适的棱镜材料,只能采用衍射光栅进行分光 and 探测,所以也将其称为光栅红外。

### 1.3 红外辐射术语

通常把电磁波传播的能量称为辐射能,以  $Q$  表示,单位为焦耳(J)。辐射能既可以表示在给定的时间间隔内由辐射源发射出去的全部电磁能量,也可表示被阻挡物体表面(如照相底片之类的积累型探测器)所接收到的能量。但是,在红外系统中使用的大多数探测器都不是积累型的,所以它们响应的不是传递的总能量,而是辐射能传递的时间速率,即辐射功率。因此,辐射功率以及由它派生出来的几个物理量属于基本辐射量。它们都可以使用专门的红外辐射计在离开辐射源一定距离上进行测量。通常在进行辐射测量时,来自辐射源的辐射在到达测量仪器的探测器时,受到插入媒质(如大气和测量仪器的光学系统)的衰减。为了首先弄清各辐射量的物理意义,在下面的讨论中,暂不考虑插入媒质造成的辐射衰减。

辐射度学中最基本的物理量就是辐射功率,其余的辐射量均可以由它加上适当的限定词而派生出来。它们的严格定义如下。

### 1. 辐射功率

辐射功率就是单位时间内发射(传输或接收)的辐射能。其单位就是通常的功率单位:瓦(焦耳/秒),用  $W(J/s)$  表示。根据这个描述,不难把辐射功率  $P$  的定义表达式写成:

$$P = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (1-4)$$

因为辐射能  $Q$  还可能受其他因素的影响,所以,为了严格起见,这里用辐射能对时间的偏微商来定义辐射功率。由于类似的原因,后面讨论的其他辐射量也将用偏微商定义。

在不少文献中,把辐射功率叫做辐射通量,用符号  $\Phi$  表示。其物理意义与辐射功率相同。

### 2. 辐射度

上面讨论的辐射功率是整个辐射源表面在单位时间内向整个半球空间发射的辐射能量。不难理解,辐射功率与源面积有关。在其他条件都相同的情况下,源的发射表面积越大,发射的辐射功率也应该越大。因此,要想进一步描述源的辐射特性,必须考查它在表面的单位面积上发射的辐射功率。表征辐射源这一特性的辐射量就是辐射度也称为辐射出射度,用  $M$  表示。其定义为:若源表面上围绕某点  $x$  的一个小面积元  $\Delta A$ ,向半球空间发射的辐射功率为  $\Delta P$ ,则  $\Delta P$  与  $\Delta A$  之比的极限值,就是该辐射源在位置  $x$  的辐射度。

$$M = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{\partial P}{\partial A} \quad (1-5)$$

由此定义不难看出:辐射度就是源的单位表面积向半球空间发射的辐射功率。或者说,它表征源表面所发射的辐射功率沿表面分布情况的度量。对于表面发射不均匀的辐射源,辐射度  $M$  应该是源表面上位置  $x$  的函数。但是,辐射度对源面积的积分,应该等于源发射的总辐射功率,即

$$P = \int M dA \quad (1-6)$$

由于辐射功率的单位是瓦,所以由定义式(1-6)不难得到辐射度的单位是瓦/ $\Delta A$ ,一般用  $W/cm^2$  表示。

### 3. 辐射强度

有了前面讨论的两个辐射量,可知一个源发射的总辐射功率及其在发射表面上的分布情况。但是,有时还需要知道源发射的辐射功率在空间不同方向的分布情况。表征辐射源这种特性的辐射量是辐射强度和辐亮度。前者用于点辐射源(简称点源),后者用于扩展源(或称面源)。

在讨论辐射强度和辐亮度之前,首先说明点源和扩展源的含义。顾名思义,点源似乎应该是尺寸很小,甚至成为一个点的辐射源;而扩展源是尺寸很大的辐射源。其实,真正的点源在物理上是不可能实现的。但是,距离地面遥远的一颗星,真实的物理尺寸可能很大,而看起来却好像是一个“点”。在这里,首要的不是辐射源的真实物理尺寸,而是它相对于观测者(或探测器)所张的角度。同一个辐射源,在不同的场合,既可能是点源,也可能是扩展源,这取决于辐射源相对于观测者的距离或张角。例如,喷气飞机的尾喷管,在  $1km$  以上的距离上测量,是一个有效的点源,而在  $3m$  的距离上观测,则表现为一个扩展源了。



一般讲,只要在比辐射源本身的最大尺寸大 10 倍的距离上观测,当观测装置是不带光学系统的简单探测器时,就可以把该辐射源作为点源来处理。如果观测装置使用了光学系统,则简单的判断标准是由探测器的尺寸和辐射源在探测器表面上成的像尺寸来决定:如果像比探测器小,可看作点源;如果像比探测器大,则看作扩展源。换言之,充满光学系统视场的可看作扩展源,未充满视场的则是点源。

现在回过来讨论辐射强度。如前所述,它是描述点源特性的辐射量。

如图 1.3 所示,若一个点源在围绕某指定方向的小立体角元  $\Delta\Omega$  内发射的辐射功率为  $\Delta P$ ,则  $\Delta P$  与  $\Delta\Omega$  的比值的极限值,就定义为辐射源在该方向上的辐射强度  $I$ :

$$I = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta\Omega} = \frac{\partial P}{\partial\Omega} \quad (1-7)$$

立体角  $\Omega$  是指顶点在球心的一个锥体所包围的那部分空间的大小,用球面度( $S\gamma$ )来度量。球面度为被锥体所截的球面面积  $A$  和球半径  $R$  平方之比,即

$$\Omega = \frac{A}{R^2} \quad (1-8)$$

如图 1.4 所示,当  $A = R^2$  时对应的立体角为一个球面度。

由于球面总面积为  $4\pi R^2$ ,所以一个球面共围有  $4\pi$  个球面度,即整个空间对应  $4\pi$  个球面度。

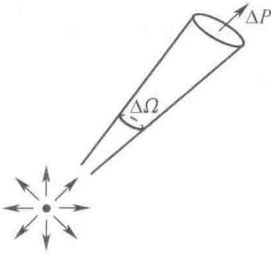


图 1.3 辐射强度示意图

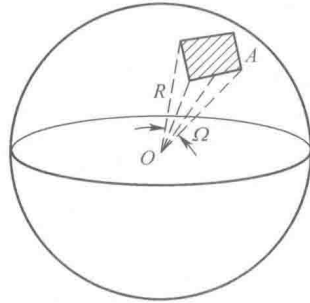


图 1.4 球面度示意图

由式(1-7)定义不难看出:辐射强度就是点源在某方向上单位立体角内发射的辐射功率。因此,其单位为瓦·球面度<sup>-1</sup>,符号为  $W \cdot (S\gamma)^{-1}$ 。因为一个给定辐射源向空间不同方向的发射性能可以不同,所以,辐射强度的物理意义表明源发射的辐射功率在某方向上角密度的度量,或者说是源发射功率在空间分布特性的描述。如果对整个发射立体角积分,就应该得到源发射的总辐射功率:

$$P = \int I d\Omega \quad (1-9)$$

式中:  $\Omega$  为发射立体角。

#### 4. 辐亮度

尽管辐射强度能够描述点源辐射在空间指定方向上的角密度,但是这个量不适用于扩展源。因为对于扩展源(比如天空),无法确定探测器对辐射源所张的立体角。而且,即使在给定某个立体角时,扩展源的辐射功率不仅与立体角的大小有关,而且还与源的发