

文章编号: 1672-8785(2019)06-0035-09

## 红外热成像技术在民用领域的应用

张 敏 韩 芳 康 键 孙 浩 郭 亮 李春领\*

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 介绍了红外热成像技术的特点, 讨论了红外热成像技术在民航、电力、石化、森林防火、医疗等民用领域的应用情况。介绍了红外热成像技术的市场状况, 分析了不同应用领域对红外热成像技术的发展需求。

**关键词:** 红外热成像技术; 民用; 发展需求

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.06.006

### Civilian Application of Infrared Thermal Imaging Technology

ZHANG Min, HAN Fang, KANG Jian, SUN Hao, GUO Liang, LI Chun-ling\*

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** The characteristics of infrared thermal imaging technology are introduced, and the civilian application of infrared thermal imaging technology in civil aviation, electric power, petrochemical, forest fire prevention, medical and other civil fields is discussed. The market situation of infrared thermal imaging technology is introduced, and the development demand of infrared thermal imaging technology in different application fields are analyzed.

**Key words:** infrared thermal imaging technology; civilian application; development demand

### 0 引言

自从第一台红外热像仪问世以来, 红外热成像技术便首先应用于军事领域。随着时间的推移, 该技术已经发展成为了现代军事战争中的关键技术<sup>[1]</sup>。随着红外技术的不断发展, 各种红外探测材料及组件技术逐步成熟, 红外成像技术在军事侦察、敌情监视、枪具与战车瞄准、射击指挥和导弹制导等方面的应用变得越来越广泛, 相关技术要求也随之不断提高。许多国家从加强自身防御能力和提高夜战水准的角度出发, 不仅把红外热成像技术作为现代化武器装备的重要组成部分纳入国防建设发展战

略, 而且还持续加大人力物力投入进行研究, 使得红外热成像技术不断获得发展, 由此带动了单价成本的逐渐降低以及性能的进一步提升, 从而在民用领域也得到了迅猛发展<sup>[2]</sup>。

### 1 红外热像仪技术

由于绝对零度以上的物体都会发出红外光, 红外热成像技术就是通过吸收目标物体辐射的红外光, 然后将光信号转换为电信号, 即将肉眼不可见的红外辐射转换为可视图像的。同时, 红外大气窗口有三个: 1~3  $\mu\text{m}$ (短波)、3~5  $\mu\text{m}$ (中波)和 8~14  $\mu\text{m}$ (长波)。红外热成像通常工作中波红外和长波红外两个波段。

收稿日期: 2019-06-20

作者简介: 张敏(1981-), 男, 山东莱州人, 硕士, 工程师, 主要从事红外探测器工艺研究。

\*通讯作者: E-mail: dadonggua163@163.com

该技术广泛应用于各个领域,且具有以下几个特点<sup>[3]</sup>:(1)温度测量范围广,通常为 $-170\sim 2000^{\circ}\text{C}$ (或需加滤光片);(2)探测准确度高,能分辨小于 $0.1^{\circ}\text{C}$ 的温度;(3)响应时间短,可在几秒内测出物体的温度场;(4)可用于测量小目标或点目标物体;(5)属于被动测量,不会破坏被测温场(测温距离可近可远,从几厘米到天文距离)。

## 2 红外热像仪在民用领域的应用

红外成像可以应用于基础设施建设、城市管理、工业生产、交通管控、资源勘探、检验检疫和消防安保等领域,市场需求广阔。由于应用广泛,且能为生产生活提供极大的便利性,未来对红外成像的市场需求可能会保持持续稳定增长的态势。除了传统的应用行业之外,将会有更多的新兴市场需求成为红外成像市场新的增长点。

在民用领域,红外成像市场保持着很快的增长速度。根据美国 Maxtech International 公司及北京欧立信咨询中心预测,全球民用市场规模在 2019 年可达 55.07 亿美元,其中高端制冷型红外应用达 15.12 亿美元;民用红外成像市场的复合年增长率为 11.00%。2023 年,全球民用红外市场的规模将达到 74.65 亿美元<sup>[4]</sup>。

目前,红外热成像技术的应用正在变得越来越普及,涉及民航、安防、边防、工业、建筑、交通、户外以及自动化等众多领域。

### 2.1 民航领域

随着现代航空科学技术的不断发展,民用

飞机的安全性越来越高。在装备综合环境监视系统(Integrated Surveillance System, ISS)以后,飞机能够为机组人员提供全面的地面与空中交通、飞行气象、复杂地貌等信息,使空中环境感知能力不断增强。然而 ISS 系统只是解决了飞机在空中飞行时的安全问题,但对于在大雾或雷雨等能见度较低以及天气恶劣的条件下进行着陆和位于跑道上的安全性问题,则无法提供有效的解决措施<sup>[5]</sup>。现有的 ISS 系统具有两个缺陷:第一,飞机降落时飞行员无法对跑道情况有充分了解;第二,飞机在跑道上移动时不能对周围环境进行检测和识别,以致经常发生与其他飞机碰撞、对地勤人员造成伤害等事故。这一缺陷可以通过在飞机前方增加红外辅助系统进行弥补。由于红外热成像技术能够对跑道及周边环境进行检测和识别,通过借助红外可视图像进行导航可以提高飞机的起降等级,从而提升飞机起降的安全性,如图 1 所示<sup>[6]</sup>。

同时,机场的光源环境相对比较复杂,因此依靠可见光进行成像监控时图像容易受到夜晚灯光的干扰。触发报警时,有可能因为监控图像效果受到干扰而无法看到引起报警的事件,达不到原有的效果。解决该问题的有效办法就是采用红外热成像技术。由于属于被动成像,它不受机场环境如雨、雪、雾、霾以及夜晚灯光的影响,在白天黑夜均可正常使用。

目前我国有四千余架各型民航飞机,且《“中国制造 2025”重点领域技术路线图》提出将



图 1 红外探测在民航领域的应用

大力发展国产民用大飞机(如 C919 机型等)。预计各类国产民用飞机未来的总数将超过数千架。如果每架飞机上均安装一套红外辅助系统,那么红外热成像技术将会在民航领域具有巨大的潜在市场。

## 2.2 电力领域

电力行业在预防检测领域中是目前应用最成熟、最稳定的。作为最有效的在线电力检测手段,红外热成像技术可以快速地对电力设备进行检修,从而有效降低设备检修的时间成本和提高设备运行的可靠性<sup>[7-11]</sup>。未来我国电力行业大约需要 2.5 万台红外热像仪,其中百万像素的高端热像仪约 1 万台,可以带来 25 亿元左右的产值。

利用红外热成像进行电力检测的优点有很多:远离设备,安全性强;非接触式测温,不影响设备运行;扫描速度快,节省时间;测温范围宽,精度高;监测到位,可准确发现设备缺陷。重要区域的发电、配电及变电站均可配备高端的红外成像监控设备,如图 2 所示。

## 2.3 石油化工领域<sup>[12-15]</sup>

石油化工领域的许多重要设备需要在高温高压环境下工作,容易产生安全隐患。根据安全生产要求,需要对其进行实时监测,及时消除隐患。使用红外热成像技术能对产品传送和管道,耐火及绝热材料,各种反应炉的腐蚀、破裂、减薄、堵塞以及气体泄漏等进行检测,从而搜集有关检测信息。炼油厂采用热成像技术可以对催化裂化装置、反应堆尾气设备和熔

炉、安全阀与凝气阀的泄漏、地下管道的裸露与浅埋等安全隐患等进行检测,在早期就能迅速、准确地对其进行排查与定位,如图 3 所示。这些技术的应用对于预防安全事故和降低能耗十分有效。

早期的气体泄漏检测方法采用机械探头,需要与被检目标进行密切接触或近距离接触。检测人员可能会暴露在看不见的有害化学物质中,而且这种检测方法对检测环境条件有着特殊要求,不利于实时检测。随着红外技术的不断进步,基于红外热像仪的气体泄漏监测技术也将会逐渐普及。红外热像仪可以利用图像实现泄漏气体的可视化,从而实时、迅速地锁定泄漏点。

## 2.4 森林防火和环境监测

从红外热像仪观察到的目标图像中可以提取出物体表面温度信息并对其进行量化。利用这一特点可以应用于消防预防领域。如图 4 所示,在大面积的森林中,不明显的隐火容易引起大火,仅仅靠人工监控是难以及时发现的,等发现时已经发展成了难以控制的局面。高灵敏度红外热像仪可以通过设置目标温度上限来对监测目标进行实时分析。如果目标温度达到设定上限就会发出报警信息,由此便可迅速确定起火点的位置和规模,将森林火灾消灭在萌芽阶段,从而消除火灾隐患。

同时,红外热像仪还可应用于环保监测。行业监管执法机构利用气体泄漏检测用红外热像仪监控各行业,确保其遵守法规,并负责审



图 2 红外热成像技术在电力领域的应用

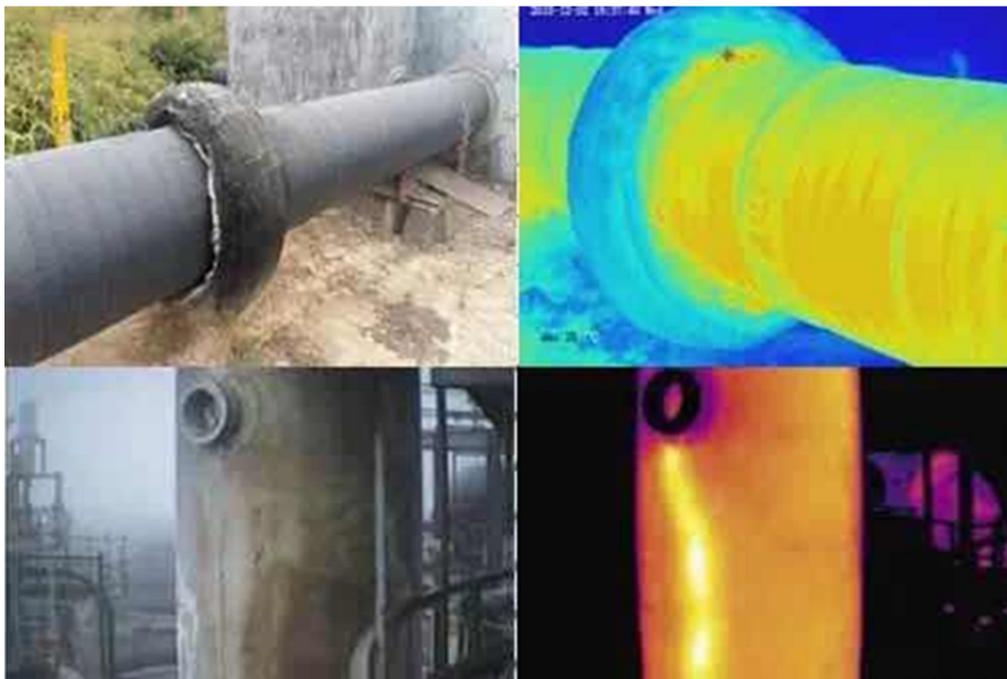


图 3 红外热成像技术在石油化工领域的应用

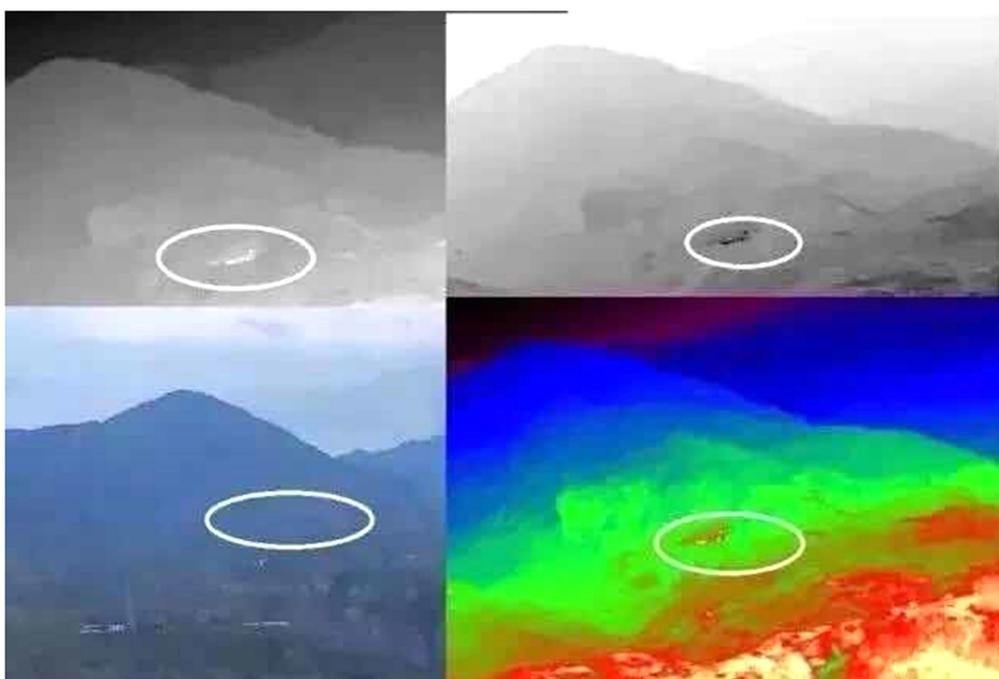


图 4 红外热成像技术在森林防火中的应用

计其减排绩效。红外热像仪在环保治理中的秸秆焚烧污染防范方面也可以起到重要作用<sup>[16-17]</sup>。

### 2.5 医疗领域

人体本身也是一个红外辐射源，其组织细

胞在新陈代谢的过程中产生热量并向体表传递。当人体的某处生理状况发生变化或病变时，该处的表面温度就会偏离正常值。如图 5 所示，医用红外热像仪可以将这部分变化绘制成温度图谱<sup>[18]</sup>。作为一种无创伤、非接触、

无辐射、绿色的辅助诊断技术, 医用红外热成像具有高敏感度、全面、快速的特点, 能够起到早筛查、早诊断、全程动态监控的作用, 从而达到“治未病”的目的。它与核磁共振、CT、X 光、超声并称为五大医学影像技术。医用红外热成像技术的主要应用包括体质辨识、慢性病预防/控制(老年保健)、重大疾病预防、常见病诊断、亚健康综合评估、康复服务、精神卫生检查、中医辨证及疗效评估等<sup>[19-23]</sup>。该技术在医疗领域的应用才刚起步, 我国社会也将逐渐步入老年社会, 所以红外热像仪在医疗领域具有巨大的应用市场。

## 2.6 安防监控<sup>[4,6,24]</sup>

红外热成像技术在安防方面的应用包括防盗监控, 伪装及隐蔽目标识别, 夜间及恶劣气候条件下的治安巡逻, 重点部门、建筑、仓库的安保工作, 防火监控, 陆上和港通安全保障, 机场监控等领域, 如图 6 所示。高端红外成像设备具有隐蔽性强、误报率低以及夜间无需任何辅助光源等优点, 可及时发现目标并记录现场情况, 从而准确定位越界人员的位置。

港口、机场、核电厂等属于重要领域, 容易遭到偷窃, 甚至是恐怖袭击。使用热像仪则可在防护方面发挥重要作用。机场、水力发电站、精炼厂、油气管道以及其他任何的大型基础设施都可能拥有长达数公里的围护边界。此时, 红外热像仪能够为其提供安全的周界报警解决方案。在 2003 年的非典时期, 安检中就已经采用了红外热成像技术, 并取得了良好的效果。

此外, 红外热像仪还可用于无人机、航空模型、空飘气球等“低、慢、小”目标的监测与预警。由于此类目标具有雷达散射面积小、运动速度慢等特点, 雷达技术手段难以对其进行监测<sup>[25]</sup>。而红外热成像技术则不受上述特点的限制, 可以实时地对空域内的“低、慢、小”目标进行监测与预警, 从而实现“低、慢、小”目标的有效探测和驱离。

据中国安防网数据统计, 美英两国配备监控摄像机的数量分别为 96 台/千人和 75 台/千人; 我国北上广深等一线城市的监控摄像机数量约为 41 台/千人, 约为美国的 43%; 其他二三线城市的数量更少, 均在 10 台/千人以下<sup>[26]</sup>。由此可见, 我国安防摄像头的人均占有率仍有较大的上升空间。随着我国信息化城市和智能化城市的不断建设, 安防监控设备的市场空间逐渐得到释放, 所以我国视频监控设备的建设量仍有很大的提升空间。

根据中国报告大厅数据, 我国视频监控市场的复合增长率超过 24%。在安防视频监控产品市场中, 随着传统产品竞争的日趋白热化, 红外热成像技术已经成为了安防厂商的关注重点。据《中国安防》预测, “十三五”期间, 红外产品在安防监控领域的市场规模将达 150 至 200 亿元, 年复合增长率将达到 20% 以上<sup>[27]</sup>。其中, 重点和要点区域的安防监控对百万像素的高端红外探测器提出了急迫的需求。

## 2.7 海事领域

红外热成像技术在海洋环境中高效实用,

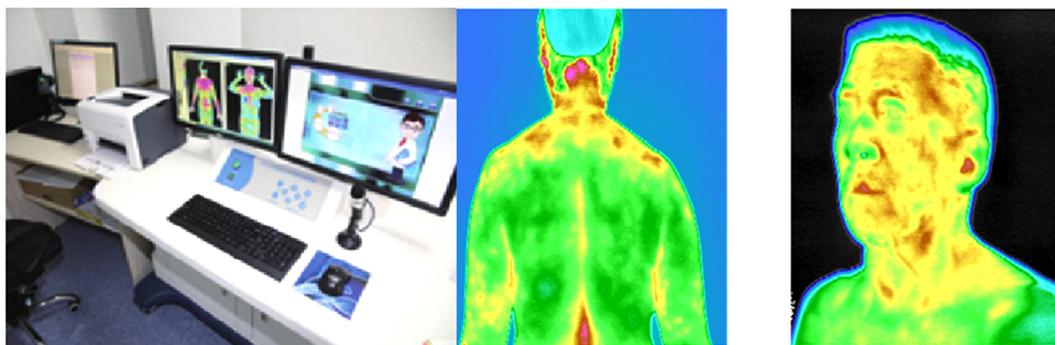


图 5 红外热成像技术在医疗领域的应用

能够满足以下客户的需求：港口、航道及沿海安全，海事安全，海上非法入境侦测，海上执法，反海盗与威胁探测，渔船队保护，船舶跟踪与观察，搜索救援行动以及环境保护。即便是雷达系统无法探测到的物体(如帆船、木船及漂浮物等)，均可利用红外热成像技术对其进行探测。

红外热像仪可以提供针对常见危害的“早期预警系统”，即可显示潜在危害所发出的不可见的热能(见图 7)，包括漂浮物、航线交通、抛锚的船舶和小船只；也可显示漂浮、桥墩、码头等人工建筑，还可以识别出冰山以及浅游的鲸鱼。

红外热像仪可以帮助油轮安全通过冰层覆盖的水域，在夜晚看清一切事物，并可看清其他船只上的任何细节信息，包括驾驶舱、桥

楼、锚具等一切细节。同时，它还可以用于海上搜救任务。搜救人员可使用红外热像仪精准地寻找和定位受害者，进而顺利展开水中搜救工作。红外热成像技术还可以帮助海事工作人员了解陆地上的动态，在犯罪现场或搜索区域周围划定警戒范围，为陆地上的执法人员提供观察到的信息，有利于海上与海滨执法人员展开高效且安全的合作<sup>[4,6]</sup>。

## 2.8 工业制造领域<sup>[28-30]</sup>

红外热成像技术在工业制造领域也有着广泛的应用(见图 8)。由于电子组件的尺寸越来越小，要准确了解其热信息变得异常困难。但是工程师们借助红外热成像技术便能轻松地对制造设备的热像图进行可视化 and 量化处理。同时，在电路设计的前期阶段，可以利用热成像来预先优化设计。显微镜同红外热成像技术相



图 6 红外热成像技术在安防监控领域的应用

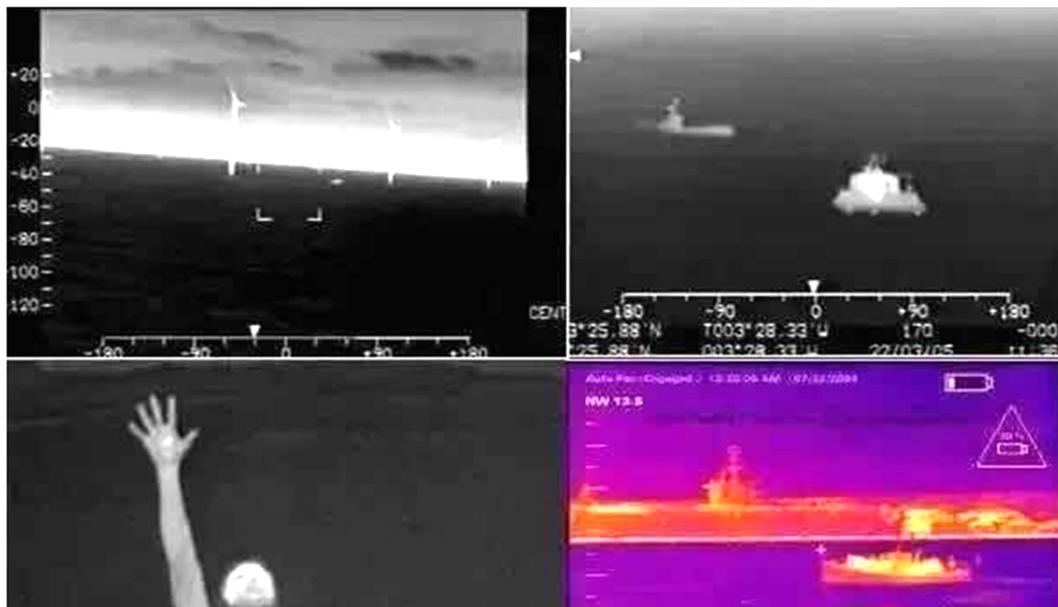


图 7 红外热成像技术在海事领域的应用

结合后就变成了一台热成像显微镜, 能够对小至  $3\ \mu\text{m}$  的目标进行精确测温。研究人员可使用热成像显微镜以非接触方式描绘组件和半导体衬底的热性能。红外热成像技术能帮助汽车工程师改善安全气囊系统设计, 验证供暖和制冷系统的效率, 量化热冲击对轮胎磨损的影响, 检测连接处和焊接处的性能质量等。借助红外技术进行新药品研发。科学家们通过观测化学反应的温度变化来研究滴定盘中发生的变化。借助红外热成像技术, 制造业可以缩短研发周期和提高产品质量, 从而增加公司盈利。

红外无损检测是一种广泛用于材料、组件和系统属性评估且不会对检测对象构成损害的方法。红外热成像技术不仅能够完成各种先进检测, 比如无损检测、应力测绘和表面裂纹, 而且还能用于发现低至  $1\ \text{mK}$  的细小温差。红外无损检测能够基于目标激发, 通过观察目标表面的热差异来检测内部缺陷。该技术对于检测复合材料的孔洞、层离和藏水颇有价值。

应力测试和疲劳测试是机械工程和材料科学中的常用测试方法, 但对于复杂结构却只能提供有限信息。即便是几何结构复杂的组件, 用于热应力测绘的红外热成像技术也能同时提供数千个应力测量结果。与应变仪相比, 这种技术可为研究人员提供更快速、更完整的信息<sup>[31]</sup>。

目前, 我国电子、工业制造、医药等制造业单位约 130 万家, 如果有 10% 的企业在生产制造中应用红外热像仪, 那么就可产生 13 万台以上的市场需求总量, 使其市场份额达到 150 亿元<sup>[3]</sup>。

### 3 民用领域对红外热像仪的发展需求

由于成本原因, 红外热成像技术在民用方面大多是非制冷型产品。与制冷型红外热像仪相比, 它们的性能还存在一定差距。但随着红外材料和探测器芯片制备技术的发展, 探测器的制造成本会逐步降低, 于是影响制冷型红外热像仪在民用领域广泛应用的价格问题便可迎刃而解。目前, 在高端民用领域已经有越来越多的客户开始使用制冷型红外热像仪。民用市场对红外热像仪有着迫切的应用需求, 同时不同的应用领域对红外热像仪的技术参数又有不同的要求<sup>[32]</sup>。表 1 列出了一些民用领域对红外热像仪的产品要求<sup>[33-34]</sup>。

随着红外热图像后端处理技术、在线监测技术、小型化设计技术的日益成熟以及相关制造成本的降低, 红外热成像技术广泛应用于各个民用领域, 在民航、安防监控、电力、石油化工、汽车辅助驾驶、医疗协助诊断等方面发挥着重要作用, 市场应用前景十分可观。2014 年, 红外热像仪在民用领域的市场规模约为 31.07 亿美元, 2020 年预计可达到 56.01 亿美

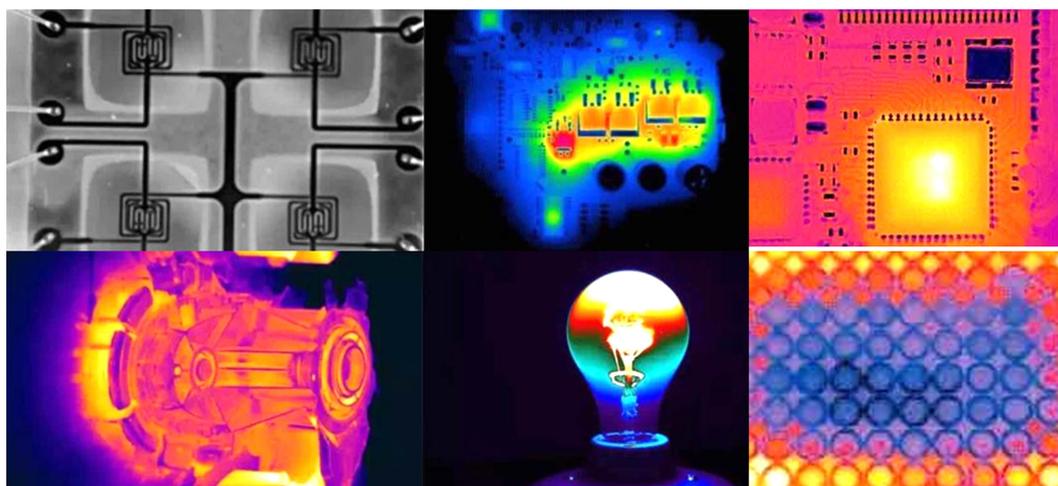


图 8 红外热成像技术在工业领域的应用

表 1 红外热像仪在民用领域的应用

序号	用途	应用领域	产品要求
1	警用	出入境监控	准军事、民用
		毒品防控	准军事、民用
		危险品监测	准军事、民用
2	天文观测、深空探测	民用	大面阵或长线列、高灵敏度、长时间积分能力、防辐射
3	安防监控	民用	分辨率高、易操作、模块化、低成本
4	对地观测	民用	大面阵或长线列、防辐射、高可靠性
5	环境监测	民用	探测精度高、重复性好、特殊响应波段
6	通用摄像机(含汽车辅助驾驶)	民用	低成本、高可靠性、模块化
7	工业制造	民用	高灵敏度、低成本、高可靠性
8	医疗卫生、制药	民用	特殊要求、低成本、高灵敏度
9	交通运输(含民航、海运)	民用	大面阵、低成本、高可靠性、优质成像
10	气象预报	民用	重复性好、精度高、可靠性高

元,如图 9 所示。从国内红外热像仪的应用情况来看,整个市场正处于快速发展期,潜在需求远大于实际需求:现阶段我国红外热像仪市场规模约为 4 亿元,但从长期来看,市场年均增长率可达 20%以上,未来总体市场规模可达到 500~600 亿元<sup>[4,27]</sup>。

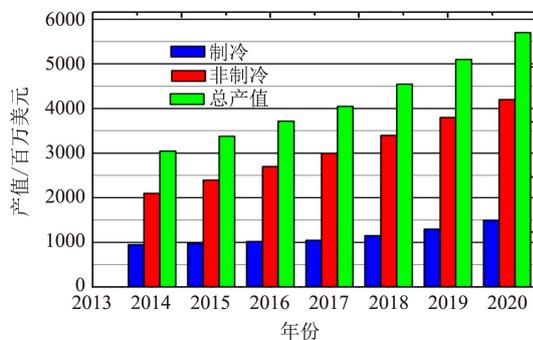


图 9 2014~2020 年全球民用红外热像仪市场需求预测

红外热成像系统未来的发展方向与红外探测器组件一致,均向焦平面成像系统的方向发展。焦平面成像系统已经进入了以大面阵、低成本、多光谱和高探测率为特点的第三代红外探测系统,正朝着高灵敏度、宽波段、高分辨率、低功耗、小型化和智能化的方向发展<sup>[35]</sup>。未来焦平面的发展趋势及要求如下:(1)百万像素、小像元,提高目标分辨能力;(2)多波

段、双/多色探测器,提高目标检测能力;(3)高帧频、数字化读出电路技术,提高获得的数据量;(4)提升工艺成熟度,降低探测器组件的制作成本,有利于热像仪的推广应用;(5)小体积、低功耗和光学集成探测器,向模块化、插拔式发展;(6)推广工程化,适应不同的应用环境。

随着焦平面探测器组件制备工艺的不断成熟和工程化水平的提升,预计在未来可预见的时间内,探测器成本将逐渐降低,红外热像仪在不同民用领域的应用也会越来越广泛。

#### 4 结束语

经过多年的积累,红外热成像技术已经实现了功能模块化、小型化、电子化和全自动化,并具有灵敏度高、响应速度快、对人体无害、产品易于维护以及使用寿命长等特点。非制冷热成像技术更是推动其广泛应用于工业生产监控、公共安全执法、平安城市建设、医疗辅助诊断、民用卫星遥感、设备预防性故障诊断与维护、海上执法、星系深空探测和车辆辅助驾驶等民用领域。随着制冷型红外探测器技术的不断发展,高性能、大面阵、高可靠性、高分辨率红外探测器的成本将会逐渐降低,使得制冷型红外热像仪在高端民用领域得到越来越

越多的应用。

### 参考文献

- [1] 俞信. 红外热成像技术: 技术进展与展望 [J]. **光学技术**, 1994, **20**(6): 1-4.
- [2] 李其昌, 李兵伟, 王宏臣. 非制冷红外热成像技术发展动态及其军事应用 [J]. **军民两用技术与产品**, 2016, **11**(1): 54-57.
- [3] 焦宏光, 高福生. 红外热像仪在温度领域上的应用 [J]. **技术平台**, 2016, **28**(4): 65-66.
- [4] 2017-2023年中国红外热像仪市场深度调研及投资战略研究报告 [R]. 北京: 智研咨询集团, 2017.
- [5] 徐悦. 民机 ISS 系统中红外/可见光的跑道监视算法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [6] 王达, 邓文杰, 杨再平, 等. 红外热成像技术与应用 [J]. **中国公共安全**, 2015, **23**(12): 112-126.
- [7] 卢丽榕. 红外热成像技术在变电站的应用 [J]. **信息通讯**, 2014, **28**(12): 21-22.
- [8] 诸葛葳. 输电设备状态检修中红外热成像技术的应用探析 [J]. **企业技术开发(下半月)**, 2015, **34**(6): 41-42.
- [9] 陈凯旋. 红外热成像技术应用于高压输电设备缺陷诊断 [J]. **电子世界**, 2013, **35**(14): 44-45.
- [10] 李超群. 红外成像技术及在天津电网电缆设备的应用研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [11] 彭晔. 基于红外热图像的架空输电线路故障检测软件开发 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [12] 李丹嵩. 红外热成像技术在化工设备检测中的应用及发展 [J]. **上海化工**, 2010, **35**(6): 26-30.
- [13] 刘晖, 陈国华. 红外热像检测技术在石化工业中的应用 [J]. **石油化工设备**, 2010, **39**(1): 47-53.
- [14] 李鑫. 红外热成像技术在化工装置中的应用 [J]. **科技创新与应用**, 2017, **7**(13): 29-30.
- [15] 李器宇, 张洁, 徐晓旭. 基于无人机红外遥感的地下石油管道安全监测 [J]. **红外**, 2019, **40**(5): 32-36.
- [16] 黄玉章. 红外热成像技术及其在火灾监控中的应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [17] 赵国顺. 浅析红外热成像技术的发展与应用 [J]. **中国安防**, 2016, **11**(4): 38-40.
- [18] 朱琦. 基于红外热成像技术的寒热症哮喘患者相关经穴皮肤温度变化的研究 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2013.
- [19] 周敏华. 基于生物传热效应的医用红外热成像技术 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [20] 肖微, 周俊, 章文春. 红外热成像技术在中医临床研究的应用进展 [J]. **江西中医药大学学报**, 2015, **27**(6): 109-112.
- [21] 易腾达, 韩智云, 吉泽云, 等. 红外热成像技术在中医“治未病”工程中的应用概况 [J]. **红外**, 2018, **39**(11): 39-43.
- [22] 程波敏, 吴海滨, 尹霖, 等. 红外热成像技术在中医“治未病”实现思想中的应用概况 [J]. **红外**, 2019, **40**(4): 29-34.
- [23] 杨瑞宇, 吴晶晶, 彭江云, 等. 利用热成像红外技术探究高尿酸血症的病因病机 [J]. **红外**, 2019, **40**(4): 35-38.
- [24] 余海燕, 陈庆程. 红外热成像技术的研究 [J]. **科技创新导报**, 2013, **10**(2): 29-31.
- [25] 吕敬. “低慢小”无人机威胁与防范 [J]. **现代世界警察**, 2017, **33**(7): 92-93.
- [26] 毛建群. KPI 指标影响下的供应商评价模型与实施机制研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
- [27] 高勇. 红外热成像市场前景广阔 安全核心竞争力有待提升 [J]. **中国安防**, 2010, **5**(10): 2-7.
- [28] 邓佩红. 压力管道检测中红外热成像技术的应用 [J]. **化工设计通讯**, 2017, **43**(8): 59-78.
- [29] 沈洁, 郭利波. 红外热成像技术在玻璃领域的应用 [J]. **玻璃**, 2017, **44**(8): 33-38.
- [30] 张剑, 齐暑华. 红外热成像技术在复合材料无损检测中的应用现状 [J]. **工程塑料应用**, 2015, **43**(11): 122-126.
- [31] 王亚辉. 基于脉冲涡流热成像的钢结构应力检测方法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- [32] 王瑞凤, 杨宪江, 吴伟东. 发展中的红外热成像技术 [J]. **红外与激光工程**, 2018, **37**(6): 699-702.
- [33] 赵江. 红外探测技术的现状与发展趋势 [J]. **舰船电子工程**, 2018, **27**(1): 32-37.
- [34] 麦绿波. 焦平面热像仪的发展与应用综述 [J]. **红外技术**, 2018, **28**(9): 497-502.
- [35] 张雪, 梁晓庚. 红外探测器发展需求 [J]. **电光与控制**, 2013, **20**(2): 41-45.