

工程检测中红外热成像技术的应用研究

马洪生, 姚娜娜

武汉中和工程技术有限公司, 湖北 武汉 430312

摘要: 起初, 本文概述了红外热成像技术的理论框架, 涵盖了红外辐射的基本原理、热成像系统的组成及其运作机制, 以及那些左右红外热成像质量的诸多因素。在此基础上, 探讨了红外热成像技术在工程检测中的应用范围, 主要包括结构健康监测、节能评估与改造、设备故障诊断和材料性能分析等方面。接着, 本文详细研究了红外热成像技术在工程检测中的应用方法, 包括检测方案设计、图像采集与预处理、特征提取与识别, 以及数据分析与解释等关键步骤。

关键词: 红外热成像技术; 工程检测; 应用研究; 温度分布; 缺陷识别

Research on the Application of Infrared Thermal Imaging Technology in Engineering Inspection

Ma Hongsheng, Yao Nana

Wuhan Zhonghe Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430312

Abstract: At the beginning, this article outlined the theoretical framework of infrared thermal imaging technology, covering the basic principles of infrared radiation, the composition and operation mechanism of thermal imaging systems, as well as the many factors that affect the quality of infrared thermal imaging. On this basis, the application scope of infrared thermal imaging technology in engineering inspection was discussed, mainly including structural health monitoring, energy-saving evaluation and renovation, equipment fault diagnosis, and material performance analysis. Subsequently, this article conducted a detailed study on the application methods of infrared thermal imaging technology in engineering inspection, including key steps such as detection scheme design, image acquisition and preprocessing, feature extraction and recognition, as well as data analysis and interpretation.

Keywords: infrared thermal imaging technology; engineering testing; applied research; temperature distribution; defect identification

引言

随着我国基础设施建设的快速发展, 工程结构的安全性和可靠性越来越受到广泛关注。工程检测作为保障结构安全的重要手段, 其技术水平直接关系到工程质量和使用寿命。传统的工程检测方法往往存在检测范围有限、效率低下、破坏性大等问题。因此, 寻求一种高效、无损、全面的检测技术已成为工程领域亟待解决的问题。

红外热成像技术作为一种非接触式、快速、实时、无损的检测手段, 近年来在工程检测领域得到了广泛地应用。该技术能够检测物体表面温度分布, 直观地反映结构内部缺陷、损伤和异常情况。因此, 它在工程结构健康监测和早期预警方面发挥着重要作用。本文旨在探讨红外热成像技术在工程检测中的应用研究, 以期为我国工程检测技术的发展提供理论依据和实践指导。

一、红外热成像技术理论基础

红外热成像技术作为一种先进的非接触式检测手段, 其独特的技术特性和广泛的应用领域使其在工程检测中占据了重要地位。以下内容将深入探讨红外热成像技术的理论基础, 为理解其在工程检测中的应用打下坚实的理论基础。

(一) 红外辐射原理

红外辐射是波长在 $5\sim 100\mu\text{m}$ 之间的长波辐射, 是地球热量

释放到太空的带宽。太阳辐射是波长小于 $5\mu\text{m}$ 的短波辐射, 即太阳光对地球的辐射。在地球大气的电磁波波段 $8\sim 13\mu\text{m}$ 范围内存在着一个“大气透明窗口”, 在该波段区域内大气辐射非常弱, 地球上所有温度高于绝对零度的物体都可以发射红外辐射并通过该窗口将热量直接辐射至外太空(约 0K), 从而实现被动辐射散热^[1]。

红外辐射, 作为一种自然界中无处不在的现象, 其本质是物体表面因温度梯度而产生的电磁波辐射。在宇宙的广阔舞台上,

任何温度超过绝对零度的物体都不例外地会发射出红外辐射。这种辐射的强度与物体的热状态紧密相关，遵循着温度的四次方律，即辐射强度与物体温度的四次方成正比。这一物理规律构成了红外热成像技术的理论基础。红外热成像技术利用物体发射的红外辐射，通过高精度的传感器捕捉这些微妙的温度差异，并将其转换成热图像，从而实现了对物体热信息的精确记录和可视化^[2]。这种技术不仅揭示了物体表面的温度分布，更深入地洞察了物体的热动态过程，为科学研究、工业检测、医疗诊断等领域提供了强大的工具。因此，红外热成像技术的应用，实际上是对自然界红外辐射现象的一种高级解读和应用拓展。

（二）热成像系统构成与工作原理

热成像系统是一种尖端的探测技术，其核心由红外探测器、精密光学系统、高性能信号处理单元和直观显示系统组成，通过红外探测器敏感地捕捉目标物体的红外辐射并转化为电信号，光学系统将其精确聚焦，信号处理单元则将这些信号通过放大、滤波、数字化和图像重建等复杂流程转换为可视化的热图像，最终通过高分辨率显示屏直观呈现，实现对物体热状态的实时监控和精确分析^[3]。

（三）影响红外热成像质量的因素

红外热成像技术的成像质量受到一系列复杂因素的影响，这些因素涵盖了环境条件、设备性能、物体表面特性以及信号处理算法等多个层面。具体而言，环境条件中的温度、湿度、风速等都会对红外辐射的传播和探测造成影响；设备性能方面，探测器的灵敏度、光学系统的分辨率等关键参数直接决定了成像系统的性能上限；而物体表面的反射率、发射率等特性则影响着红外辐射的有效接收与转换^[4]。此外，信号处理算法的优劣同样对热成像的最终效果起着决定性作用。

深入理解这些影响因素对于制定和优化检测方案、提升红外热成像质量具有至关重要的意义。通过对环境条件的精确控制、设备性能的精细调校、物体表面特性的准确把握，以及信号处理算法的优化，可以有效提升红外热成像技术在工程检测中的应用效果，确保所得热图像的准确性和可靠性。因此，在工程实践中，必须综合考虑这些因素，采取相应的措施进行干预和优化，以保障红外热成像技术在各类检测任务中发挥出最大的效能。

二、红外热成像技术在工程检测中的应用范围

红外热成像技术的独特优势使其在工程检测领域具有广泛的应用前景。以下将详细介绍红外热成像技术在结构健康监测、节能评估与改造、设备故障诊断以及材料性能分析等方面的应用范围，展示其在工程实践中的重要作用。

（一）结构健康监测

红外热成像技术在结构健康监测领域中的应用，主要依赖于其对建筑结构或桥梁等基础设施表面温度分布的精确检测能力。红外热成像技术能够直观地发现建筑结构的潜在问题，如裂缝、材料脱粘等^[5]。由于结构完整性问题的存在往往会导致局部热分布的异常变化，红外热成像技术以其快速、非接触式的检测方式，

能够直观地揭示出裂缝、材料脱粘、内部空洞等隐蔽问题。这些问题的及时发现，为工程师提供了关键的诊断信息，从而为后续的结构维修、加固和风险管理提供了科学依据，确保了建筑和桥梁等结构的安全性与可靠性。

（二）节能评估与改造

在建筑节能评估与改造的过程中，红外热成像技术扮演着至关重要的角色。该技术能够对建筑物的热损失区域进行精确地检测，特别是针对墙体、屋顶等部位可能存在的隔热性能不足问题。通过对捕获的热图像进行深入分析，可以精确地定位能量流失的关键点，为建筑节能改造提供了坚实的数据支持和科学依据^[6]。

红外热成像技术的应用，使得专业人员能够直观地观察到建筑围护结构的热工缺陷，从而在改造方案中针对性地采取措施，如增强隔热层、修复裂缝、改善门窗密封性等，以减少不必要的能量损失。这种技术的运用，不仅提高了建筑能源利用效率，而且显著降低了能耗，有助于实现绿色建筑和可持续发展的目标。

此外，红外热成像技术的非接触性和快速扫描能力，使其在节能评估中具有高效、全面的优势，能够为建筑业主和能源管理团队提供实时、可视化的热损失分布图，进而指导他们进行更为经济、有效的节能改造决策^[7]。因此，红外热成像技术在推动建筑行业向更高能效标准迈进的过程中，发挥着不可或缺的作用。

（三）设备故障诊断

在设备故障诊断领域，红外热成像技术已成为一种不可或缺的工具。该技术以其非接触式的检测方式，能够对电气设备和机械设备的运行状态进行实时监测，通过捕捉设备表面的温度变化，从而对潜在的故障点进行预判。在工业生产中，诸如变压器、电机等关键设备在发生故障前，往往会出现局部过热的现象。红外热成像技术能够精确地探测到这些温度异常，为维护团队提供及时的预警信号。

通过红外热成像技术的应用，维护工程师能够在设备性能下降或故障发生前，发现连接不良、绝缘老化、机械磨损等问题的早期迹象^[8]。这种技术的运用，不仅有助于避免设备的突发性损坏，减少维修成本，还能有效预防因设备故障引发的安全生产事故，确保生产过程的连续性和稳定性。

红外热成像技术的优势在于其快速、直观的故障识别能力，它能够在不影响设备正常运行的情况下，对设备进行全面的热状态评估。因此，该技术在预防性维护计划中发挥着至关重要的作用，为企业的设备管理提供了科学、高效的解决方案。

（四）材料性能分析

在材料科学领域，红外热成像技术在材料性能分析中具有显著的应用价值。该技术能够对材料的导热性、热膨胀系数等关键热物理性能进行精确评估。通过实时监测材料在加热或冷却过程中的温度分布和变化，红外热成像技术能够揭示材料内部的微观结构和宏观性能特征，为材料的选择、设计与应用提供了重要的实验数据和理论依据。

红外热成像技术的非侵入性特点，使其能够在不破坏材料的前提下，对材料的热响应行为进行细致地分析^[9]。这种分析有

助于科研人员 and 工程师深入理解材料的热传导机制、热应力和热变形等性能指标，从而在材料研发和应用中做出更为科学合理的决策。

此外，红外热成像技术在材料老化程度和损伤状况的检测方面也发挥着重要作用。该技术能够有效识别材料在使用过程中因环境因素或机械应力导致的性能退化，如裂纹、腐蚀、分层等缺陷。通过定期监测，可以及时发现潜在的安全隐患，确保材料在长期使用中的安全性和可靠性，这对于航空航天、建筑、化工等行业的材料质量控制尤为关键。因此，红外热成像技术在材料性能分析中的应用，不仅提高了材料研究的效率，也为保障工程结构的稳定性和使用寿命提供了强有力的技术支持。

三、红外热成像技术在工程检测中的应用方法研究

为了充分发挥红外热成像技术在工程检测中的潜力，研究其应用方法至关重要。以下将详细探讨检测方案设计、图像采集与预处理、特征提取与识别、数据分析与解释等关键环节，以期为工程检测提供一套系统化的操作流程。

(一) 检测方案设计

在红外热成像技术的应用领域，检测方案的设计构成了整个检测过程的基础和前提。该设计涉及对检测目标的明确、适宜检测设备的选择、检测流程的规划和检测标准的制定。在设计过程中，必须综合考虑检测环境的独特性、目标物体的特定属性以及所用设备的性能限制，以确保方案既科学又可行。精心构思的检测方案，不仅能够有效提升检测的效率，还能确保所得结果的精确无误，从而为检测活动提供强有力的技术保障。

(二) 图像采集与预处理

图像采集是红外热成像技术流程中的关键环节，它要求操作者根据既定检测方案，运用红外热像仪精确捕捉目标物体的热图像。在这一过程中，环境的稳定性至关重要，必须严格控制，以排除外部因素的干扰，确保所获图像的准确性^[10]。紧接着的图像

预处理步骤同样不可或缺，它涉及对采集到的热图像进行噪声消除、对比度增强、图像配准等操作，这些处理旨在提升图像的整体质量，为后续深入的数据分析和故障诊断奠定坚实的基础。

(三) 特征提取与识别

在红外热成像技术的应用中，特征提取环节至关重要，它涉及从预处理后的热图像中提炼出能够代表检测目标本质特性的关键信息，包括但不限于温度分布、热点位置、边缘特征等。随后，特征识别步骤则依据这些提取出的特征，对目标进行精确地分类或缺陷识别。此过程要求操作者根据具体的应用场景，精心挑选适宜的算法和模型，确保能够实现高效且准确的特征识别，从而为最终的检测结论提供坚实的数据支持。

(四) 数据分析与解释

在红外热成像技术的应用流程中，数据分析与解释阶段对提取特征进行深度挖掘和解读，旨在通过对温度数据的专业统计分析、缺陷严重度的精确评估以及故障原因的合理推断，得出关于检测目标的准确结论。此环节要求分析人员运用其专业知识，对热图像中所蕴含的信息进行详尽且合理地解释，从而为工程决策提供坚实的数据支持和科学依据。通过这一系列严谨方法的研究与实际应用，红外热成像技术在工程检测领域的有效性和实用性得到充分验证，进而推动其在各行各业中的广泛应用和发展。

结束语

总而言之，红外热成像技术在工程检测领域具有广阔的发展空间和应用潜力。展望未来，持续深化理论研究、精进检测手段，并努力克服现有技术的局限，将是推动红外热成像技术在工程检测领域应用范围进一步扩展的关键所在。希望通过本文的研究，能够为相关领域的技术人员提供借鉴和启示，共同推动红外热成像技术在工程检测事业中的持续发展，为我国工程建设质量的提升贡献力量。

参考文献

- [1] 何美莹, 岳学杰, 张涛, 等. 红外辐射调控原理及其在热管理应用中的材料研究进展 [J]. 化工进展, 2022, 41(07): 3719-3730. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-1788.
- [2] 刘洋, 魏晓斌, 孙正华. 红外热成像法检测技术在建设工程中的应用 [J]. 工程质量, 2023, 41(S1): 29-32.
- [3] 张健. 红外热成像技术在变电站发热点检测中的应用 [C]// 中国金属学会. 第十三届中国钢铁年会论文集——10. 冶金设备与工程技术. 新疆八一钢铁股份有限公司能源中心热力分厂; 2022: 5. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.017386.
- [4] 陈华, 周晓巍. 红外热成像技术在通信电源电路板故障检测中的应用 [J]. 通信电源技术, 2021, 38(01): 114-116. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2021.01.034.
- [5] 赖秋, 高燕俊, 温少鹏, 等. 基于 HoloLens 红外热成像技术在电力设备运行检测中的应用 [J]. 云南水力发电, 2020, 36(05): 137-139.
- [6] 王博正, 董丽虹, 王海斗, 等. 激光红外热成像技术在材料缺陷检测中的研究和应用现状 [J]. 材料导报, 2020, 34(05): 5127-5132.
- [7] 马旋. 红外热成像技术在电连接器插拔磨损检测中的应用研究 [D]. 河北工业大学, 2019. DOI: 10.27105/d.cnki.ghbgu.2019.000251.
- [8] 郭广平, 周在杞. 激光、微波和红外热成像检测技术在中国——庆祝中国机械工程学会无损检测分会成立三十周年 [J]. 无损检测, 2008, (10): 668-672.
- [9] 郭科伟, 陈彦龙, 董立亮. 红外热成像检测技术在电动汽车高压线束接头检测中的应用 [J]. 汽车维修与修理, 2019, (05): 66-68. DOI: 10.16613/j.cnki.1006-6489.2019.05.028.
- [10] 林群武. 红外热成像技术在电力系统设备故障检测中的应用研究 [D]. 安徽理工大学, 2016.