

红外热成像技术在夜间交通监控中的适应性分析

马东阳 王亚勇

河南交通投资集团有限公司洛阳分公司 河南 洛阳 471000

摘要：红外热成像技术凭借其不依赖外部光源、可穿透烟雾雾霾、对温度差异敏感等独特优势，在夜间及恶劣天气条件下展现出卓越的感知能力，成为智能交通系统（ITS）中极具潜力的补充甚至替代方案。本文系统梳理红外热成像技术的基本原理与核心特性，深入剖析其在夜间交通监控场景下的技术优势与现存挑战，并结合实际应用案例，从目标检测识别、环境适应性、系统集成与成本效益等多个维度进行综合评估。研究结果表明，红外热成像技术在提升夜间交通安全、增强全天候监控能力方面具有显著适应性，但其在目标细节辨识、多模态融合及标准化建设等方面仍需进一步优化。本文最后对未来发展方向提出建议，以期为红外热成像技术在智能交通领域的深度应用提供理论参考与实践指导。

关键词：红外热成像；夜间交通监控；智能交通系统；环境适应性；多模态融合；目标检测

引言

据世界卫生组织（WHO）统计，全球每年约有135万人死于道路交通事故，其中近半数事故发生在夜间或光线不足的时段。在中国，随着高速公路网和城市快速路的不断扩展，夜间行车比例逐年上升，而传统依赖可见光摄像头的交通监控系统在无光照或弱光环境下性能急剧恶化，极易出现漏检、误检甚至完全失效的情况，严重制约了交通管理部门对夜间违法行为的取证、事故的快速响应以及交通流的实时调控能力。在此背景下，探索一种能够在全时段、全天气条件下稳定工作的新型感知技术成为智能交通系统发展的迫切需求。红外热成像技术通过探测物体自身辐射的红外能量并将其转换为可视化的热图像，从根本上摆脱了对可见光的依赖，为解决夜间监控难题提供了全新思路。近年来，随着红外探测器成本下降、分辨率提升及图像处理算法进步，ITI技术正逐步从军事、安防领域向民用交通监控渗透，展现出广阔的应用前景。

1 红外热成像技术原理与特性

1.1 基本工作原理

红外热成像技术基于黑体辐射定律和维恩位移定律。任何温度高于绝对零度（-273.15°C）的物体都会向外辐射电磁波，其辐射强度与波长分布取决于物体自身的温度。在常温（约-20°C至50°C）范围内，物体辐射的峰值波长位于8–14微米的长波红外（LWIR）波段。红外热像仪的核心部件是红外焦平面阵列（FPA）探测器，通常采用非制冷型微测辐射热计（如氧化钒VOx或非晶硅a-Si）。该探测器接收来自场景中各点的红外辐射，将其转换为微弱的电信号，经放大、数字化后，由图像处理

单元根据预设的温度-灰度映射关系生成热图像。图像中每个像素的灰度值（或伪彩色）对应场景中相应位置的表面温度。

1.2 核心技术特性

相较于可见光成像，红外热成像具有以下显著特性：（1）被动成像，无需照明：ITI仅接收物体自身发出的热辐射，完全不依赖太阳光或人工光源，在完全黑暗、逆光、强眩光等极端光照条件下均能正常工作^[1]。（2）穿透烟雾雾霾能力强：长波红外线在大气中的散射效应远小于可见光，因此能在烟雾、薄雾、沙尘等恶劣天气下保持较好的成像清晰度。（3）对温度差异高度敏感：ITI能清晰区分不同温度的物体。例如，行驶中的汽车发动机、轮胎与路面存在明显温差；人体体温（约37°C）远高于环境背景，使其在复杂背景下极易被凸显。（4）隐私保护性好：热图像无法呈现人脸、车牌等细节纹理信息，仅显示轮廓和热分布，在公共监控中更符合隐私保护法规要求。（5）全天候工作稳定性高：不受昼夜交替、季节变化影响，可实现真正的7×24小时连续监控。

2 红外热成像在夜间交通监控中的优势分析

2.1 克服光照限制，实现真正“全天候”监控

红外热成像技术最核心的优势在于其彻底摆脱了对可见光的依赖。在无路灯的乡村道路、隧道内部、桥梁下方或遭遇突发停电等场景中，传统可见光摄像头往往因缺乏照明而失效，导致监控盲区的出现。而红外热成像系统凭借其被动接收热辐射的机制，无论环境光照如何变化，均能持续输出清晰的热图像，确保对车辆、行人、非机动车等交通参与者的有效监控。这种能力不仅保障了执法取证的连续性，也为应急指挥和事故快速响

应提供了不间断的数据支持，真正实现了“全天候、全时段”的交通感知覆盖。

2.2 提升目标检测与分类精度

在夜间，可见光图像信噪比极低，目标边缘模糊，导致基于深度学习的目标检测模型（如YOLO,SSD）性能大幅下降。相比之下，热图像中运动目标（尤其是机动车和行人）因其与背景（如冷路面、植被）存在显著温差而形成高对比度，轮廓清晰锐利。研究表明，在同等条件下，基于热图像的车辆检测召回率可比可见光图像高出15%-30%。此外，不同车型（如轿车、卡车、摩托车）因发动机布局、散热特性不同，在热图像中呈现出独特的“热指纹”，有助于细粒度分类。

2.3 增强行人与非机动车安全预警能力

夜间行人和骑行者是交通事故中的高危群体，他们往往穿着深色衣物，在可见光监控下极难被发现。而人体恒定的体温使其在热图像中如同“灯塔”般醒目，即使在百米之外也能被可靠检测。这一特性为行人安全预警系统提供了坚实的技术基础^[2]。结合智能视频分析算法，红外热成像系统可实时监测人行横道、非机动车道及路侧区域，一旦检测到行人或非机动车闯入机动车道，即可立即触发声光报警装置，或通过车联网（V2X）技术向附近车辆发送碰撞预警信息。这种主动干预机制能有效缩短驾驶员反应时间，显著降低夜间人车冲突事故的发生概率，对提升弱势交通参与者安全具有重要意义。

2.4 有效应对恶劣天气干扰

雨、雪、雾、霾等气象条件是导致夜间能见度降低的另一主要原因。在这些环境中，可见光因强烈散射而严重退化，图像模糊甚至完全不可用。而长波红外线对水汽、气溶胶颗粒的穿透能力更强，使其在浓雾、轻霾等条件下仍能保持较好的成像清晰度。实验数据显示，在能见度低于100米的浓雾中，高质量的长波红外热像仪仍能有效识别50米范围内的车辆目标。这一能力为交通管理部门在恶劣天气下实施限速管控、车道封闭、情报板诱导等措施提供了关键决策依据，有助于维持交通秩序、预防连环追尾等重大事故。

2.5 支持特殊事件检测

除了常规的交通流监控，红外热成像还能用于检测一些可见光难以察觉的异常事件。例如，当车辆因机械故障导致发动机或刹车系统过热时，会在热图像中表现为异常高温区域，系统可自动识别并触发预警，提醒车主或路政人员及时处置，防止自燃等严重事故发生。此外，非法停车或故障车在动态交通流中会形成明显的

“冷点”（若已熄火较久）或“热点”（若刚熄火），易于被系统识别并定位。在郊区或山区公路，野生动物因体温高于环境背景，在热图像中清晰可见，可提前向驾驶员发出穿越预警，减少人兽冲突引发的交通事故。这些功能拓展了交通监控系统的应用场景，提升了整体安全防护水平。

3 面临的挑战与局限性

3.1 目标细节信息缺失

尽管红外热成像在目标存在性检测方面表现优异，但其图像缺乏可见光所包含的丰富纹理、颜色和细节信息，这一固有局限带来了显著挑战。最突出的问题在于无法直接识别车牌号码和人脸特征，而这恰恰是交通执法取证的核心要素。虽然可通过与可见光摄像头融合来弥补，但这不仅增加了系统复杂性和硬件成本，还对多源数据的时间同步与空间配准提出了更高要求^[3]。此外，在需要区分外观相似但品牌不同的车辆，或识别具体车型时，纯热图像所能提供的判别信息极为有限，限制了其在精细化交通管理中的应用深度。

3.2 图像质量与分辨率限制

目前主流的非制冷红外探测器在分辨率上仍普遍低于可见光摄像头。常见的384×288或640×480分辨率难以满足远距离小目标（如摩托车、行人）的精确识别需求，尤其在高速公路等大视场监控场景中更为明显。同时，热图像普遍存在噪声较大、整体对比度偏低、边缘模糊等问题，这些图像质量缺陷对后续的计算机视觉算法构成了严峻考验。尽管图像增强和超分辨率技术可在一定程度上改善画质，但往往以增加计算开销为代价，且难以从根本上突破物理分辨率的限制。

3.3 温度混淆与环境干扰

红外热成像的可靠性在特定环境条件下会受到干扰。在夏季高温天气，沥青路面经阳光暴晒后温度可高达60°C以上，接近甚至超过部分车辆表面温度，导致目标与背景的温差减小，图像对比度急剧下降，使得车辆检测变得困难。此外，阳光照射后的建筑物、护栏等物体在夜间会缓慢释放储存的热量，形成“热岛”效应，可能被误判为静止车辆或行人^[4]。刚驶离的车辆也会在路面留下短暂的“热轨迹”，造成虚假目标。另一个重要限制是红外线无法穿透普通车窗玻璃，这意味着系统无法观测车内驾驶员状态，也无法识别被前车遮挡的后车车牌，这在某些执法和安全场景中构成明显短板。

3.4 成本与系统集成问题

尽管近年来红外探测器成本已大幅下降，但高性能红外热像仪的价格仍是同级别可见光摄像头的数倍。对

于需要大规模部署的城市交通监控网络而言，这一成本差异构成了显著的财政压力。此外，现有交通管理平台大多基于可见光视频流设计，如何将红外热成像数据无缝接入这些系统，实现从采集、传输、存储到智能分析的全流程兼容，仍缺乏统一的技术标准和成熟的工程解决方案。系统集成的复杂性不仅增加了初期部署难度，也提高了后期运维的技术门槛。

3.5 算法适配与数据集匮乏

当前主流的计算机视觉算法，如目标检测、跟踪和行为分析模型，大多是针对可见光图像的统计特性和噪声模式进行优化的，难以直接迁移至热图像。热图像具有独特的灰度分布、低纹理特征和特定类型的噪声，需要专门设计或深度微调模型架构与训练策略。然而，公开可用的大规模、高质量、带精细标注的交通热成像数据集极为稀缺。数据资源的匮乏严重制约了深度学习模型的训练效果与泛化能力，也阻碍了学术界和工业界对算法性能的公平评估与持续迭代。

4 应用场景分析

4.1 高速公路团雾预警与诱导系统

某省在易发团雾的高速公路路段部署了红外热成像与毫米波雷达的复合感知系统。当能见度降至200米以下时，可见光摄像头基本失效，系统自动切换至热成像主导模式。红外热像仪负责检测车道上的车辆位置与轮廓，毫米波雷达则提供精确的距离与速度信息。二者数据通过时空配准与融合算法进行整合，实时计算车流密度与平均速度。一旦系统识别出异常拥堵或缓行趋势，立即通过沿线可变情报板发布预警信息，并联动开启雾灯诱导系统，引导车辆保持安全车距。该系统运行以来，显著降低了团雾天气下追尾事故的发生率，验证了红外热成像在极端气象条件下的实战价值。

4.2 城市隧道安全监控

某市一条全长3公里的穿山隧道内部无自然光照，传统方案需密集布设高功率照明与可见光摄像头，不仅能耗高，且维护成本巨大。改造后，采用间隔200米部署一台 640×480 分辨率红外热像仪的方案。系统不仅能 7×24 小

时无间断监控车辆通行状态，还多次成功预警因刹车过热引发的车辆冒烟事件，并精准定位非法停车（如故障车、违停车）的具体位置。由于无需额外照明，该方案大幅降低了运营能耗，同时提升了隧道应急响应效率和本质安全水平。

4.3 行人过街智能预警

在无信号灯控制的人行横道，安装了面向道路的红外热像仪。系统实时检测接近人行横道的车辆与正在过街的行人。当判断存在碰撞风险时（如车辆未减速、行人突然闯入），立即触发行人行横道两侧的地面发光警示带和上方的LED爆闪灯，同时通过路侧单元（RSU）向支持V2X的车辆推送预警信息。试点数据显示，该措施使该路口夜间人车冲突事件减少了70%。

5 结语

本文系统分析表明，红外热成像技术凭借被动成像、抗光照干扰及强雾霾穿透能力，在夜间与恶劣天气交通监控中展现出不可替代的适应性，显著提升了目标检测可靠性与系统连续性，并在行人预警、异常事件识别和全天候交通感知等方面验证了其独特价值。然而，其在目标细节缺失、成本偏高、环境干扰及算法适配等方面的局限，制约了大规模应用，单一模态难以满足全场景需求。未来应聚焦多模态深度融合、专用算法与高质量数据集建设、成本优化与标准制定，以及与C-V2X车路协同系统的集成，通过技术创新与系统协同，推动红外热成像从“有益补充”迈向“核心支柱”，为构建更安全、高效、智能的未来交通体系提供关键支撑。

参考文献

- [1] 邓敬文.高速公路视频监控中红外热成像技术的运用[J].通讯世界,2019,26(07):119-120.
- [2] 王绘清.安全防范视频监控红外热成像设备标准理解与行业应用[J].中国安全防范技术与应用,2020,(04):19-23.
- [3] 何邦胜.基于红外热成像的多模态疲劳驾驶检测[D].重庆理工大学,2025.
- [4] 曾铭萱.基于红外热成像的动作识别方法研究[D].福州大学,2023.