 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9299

Research on Real-Time Online Monitoring Technology for Discharge Temperature and Segregation Phenomena of Asphalt Mixtures Based on Computer Vision and Spectral Analysis

Xiting Guan Na Yang

Shandong Transport Vocational College, Weifang, Shandong, 261000, China

Abstract

In response to the current difficulty in achieving synchronous and precise monitoring of uneven discharge temperatures and material segregation during asphalt mixture production, this study proposes and develops an intelligent online monitoring system that integrates computer vision, multispectral imaging, and thermal infrared temperature measurement. A hardware platform consisting of a multispectral camera, an infrared thermal imager, and a synchronous control unit was designed. Based on a modular concept, real-time processing software was developed, incorporating a coarse aggregate visual segmentation method using an improved U-Net network and an iterative inversion algorithm for high-precision temperature field reconstruction by fusing multispectral information. Furthermore, a comprehensive segregation discrimination model integrating visual, thermal, and spectral features was constructed. Laboratory validation demonstrated that the system achieved an average absolute temperature measurement error of 1.7°C and a segregation recognition accuracy of 94.5%. This research provides an innovative technical solution for the real-time, online, and intelligent monitoring of asphalt mixture production quality.

Keywords

Asphalt mixture; Real-time online monitoring; Computer vision; Multi-source information

基于计算机视觉与光谱分析的沥青混合料出料温度与离析现象实时在线监测技术研究

管夕婷 杨娜

山东交通职业学院，中国 · 山东 潍坊 261000

摘 要

本研究针对沥青混合料生产过程中出料温度不均与材料离析难以同步精准监测的现状，提出并开发了一套融合计算机视觉、多光谱成像与热红外测温的智能化在线监测系统。设计了由多光谱相机、红外热像仪及同步控制单元构成的硬件平台，并基于模块化理念开发了实时处理软件，基于改进U-Net的粗集料视觉分割方法，以及融合多光谱信息的高精度温度场迭代反演算法，进而构建了视觉-温度-光谱特征融合的离析综合判别模型。通过实验室验证，系统测温平均绝对误差为1.7° C，离析识别准确率达94.5%。本研究为实现沥青混合料生产质量的实时、在线、智能化监控提供了创新的技术方案。

关键词

沥青混合料；实时在线监测；计算机视觉；多源信息

1 绪论

1.1 研究背景与意义

沥青混合料生产过程中的出料温度均匀性与材料离析程度是决定路面施工质量与长期服役性能的关键因素。温度变异直接影响混合料的可压实性与沥青老化进程，而材料离析则会导致级配偏离设计、路面结构不均，共同诱发车辙、坑槽等早期病害。目前行业内主要依赖插入式热电偶进行单点温度测量，以及依靠人工经验目视判断离析情况。这些传统方法存在监测维度单一、覆盖面有限、主观性强且严重滞后的固有缺陷，无法满足现代化、智能化施工对质量过程控制的实时、精准与客观要求。因此研发一种能够同步、在线、非接触式感知沥青混合料出料温度场与离析状态的新技术与装备，对于提升工程质量、推动行业技术升级具有重要的理论价值与现实意义。

【作者简介】管夕婷（2005–），中国山东青岛人，本科，从事建筑材料研究。

1.2 国内外研究现状

在温度监测方面，研究已从接触式测温向非接触式红外热成像发展，但单一红外技术易受材料表面发射率不确定性和环境干扰，精度稳定性不足。在离析检测方面，技术从破坏性取样筛分向基于激光扫描、机器视觉等无损检测演进。基于普通工业相机的视觉方法成本低，但受光照和温度色变影响大；高光谱技术能识别材料成分，却鲜有应用于在线离析判断。目前，将计算机视觉、多光谱成像与热红外测温三者融合，以实现对温度与离析同步、全断面、高精度在线监测的研究，尚属空白。现有技术普遍存在监测参数孤立、信息维度不全、难以适应恶劣工业现场实时需求的问题。

1.3 研究内容与技术路线

本研究旨在攻克上述难题，核心目标是开发一套基于多模态信息融合的沥青混合料出料质量实时在线监测系统。主要研究内容包括：1）构建多光谱、热红外与可见光协同感知的硬件系统；2）研究基于深度学习的视觉离析特征提取与量化方法；3）创新多光谱与热红外数据融合的温度场高精度重建算法；4）建立温度、视觉与光谱特征融合的离析综合判别模型；5）集成开发软硬件系统并进行现场试验验证。技术路线遵循“理论分析 - 方法创新 - 系统实现 - 工程验证”的逻辑主线，最终为沥青混合料生产的智能化质量控制提供创新解决方案。

2 融合监测理论与系统构建（精炼版）

2.1 相关理论基础

2.1.1 热辐射与光谱分析基础

沥青混合料表面辐射特性遵循普朗克黑体辐射定律。其辐射测温模型为：

$$T_{obj}=\frac{c_2}{\lambda \ln\left(\varepsilon_\lambda^{-1}\left[e^{c_2/(\lambda T_{rad})}-1\right]+1\right)}$$

其中 T_{obj} 为真实温度，T_{rad} 为辐射温度，ε_λ 为材料发射率。沥青 - 集料混合物的发射率在 0.85-0.95 范围内变化，是单一红外测温的主要误差源。

2.1.2 计算机视觉分析理论

混合料离析表现为表面纹理与颜色分布的系统性变化。采用灰度共生矩阵（GLCM）量化纹理特征：

$$Contrast=\sum_{i,j}|i-j|^2 p(i,j)$$

其中 p(i,j) 为灰度级 i 和 j 的联合概率分布。

2.1.3 多源信息融合理论

采用特征级融合策略，将视觉特征向量 F_v、温度特征向量 F_t 和光谱特征向量 F_s 拼接为综合特征向量：

$$F_{fused}=[F_v;F_t;F_s]$$

通过决策级融合优化最终判别结果。

2.2 实验室多模态监测系统构建

2.2.1 系统架构设计

实验室系统采用模块化设计，如图 2.1 所示，包含感知层、处理层和应用层三层架构。

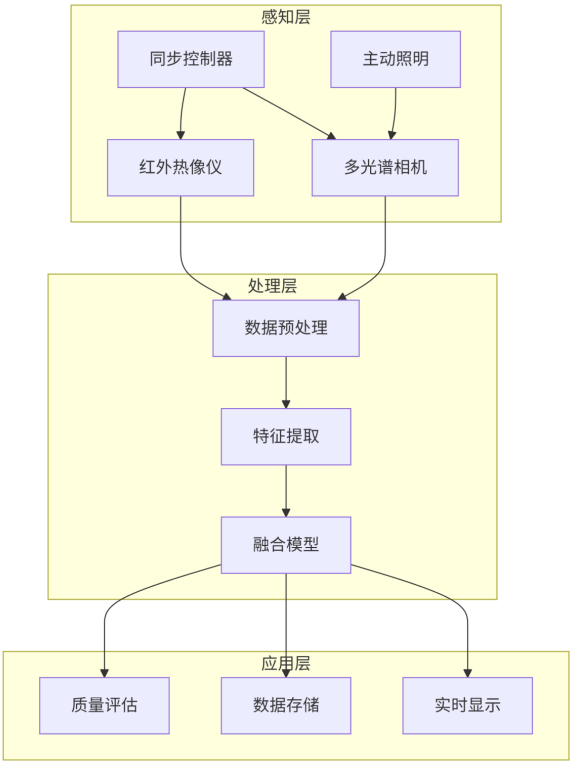


图 2.1 三层架构图

2.2.2 硬件系统配置

系统集成如图 2.2 所示，所有设备通过刚性支架固定于实验室模拟出料装置上方 1.2 米处，形成垂直监测视角。

2.2.3 软件系统架构

软件系统基于 Python 和 OpenCV 开发，采用生产者 - 消费者模式设计数据流，确保实时处理能力。核心处理流程如图 2.3 所示，通过多线程并行处理实现毫秒级响应。

表 2.1 多模态感知系统核心硬件配置

设备	型号 / 规格	关键参数	功能
多光谱相机	Specim IQ	400-1000nm，7 个波段	光谱特征采集
红外热像仪	FLIR A655sc	分辨率 640×480，热灵敏度 40mK	温度场测量
同步控制器	NI PXIe-1073	4 通道同步输出	设备同步触发
主动光源	高功率 LED 阵列	色温 5600K，照度 >10000lux	提供稳定照明

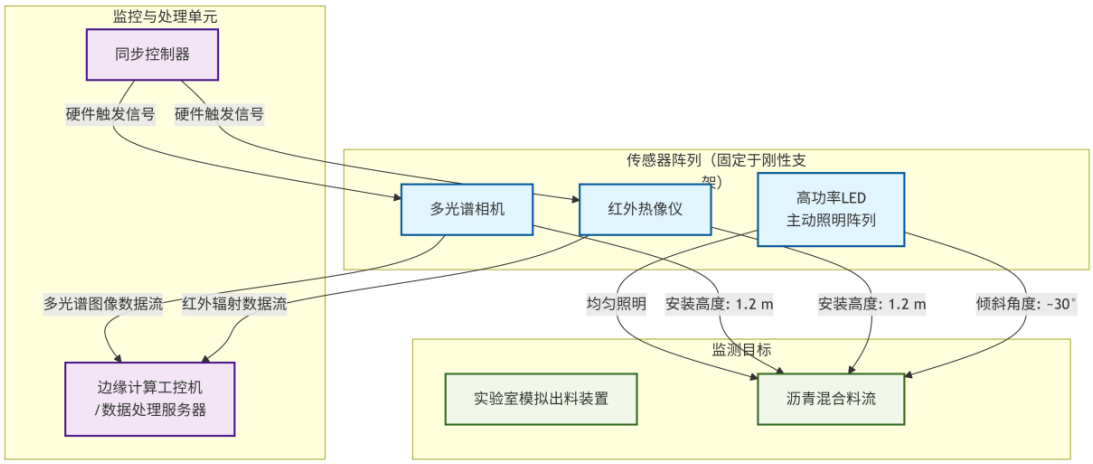


图 2.2 设备示意图

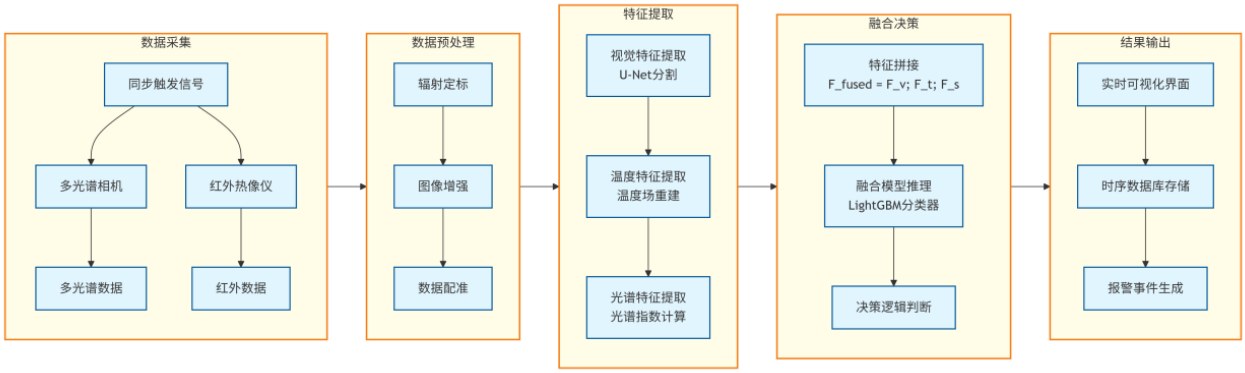


图 2.2 软件框架图

2.2.4 实验室数据采集规范

在实验室条件下，采用控制变量法构建标准数据集：

样本制备：制备三种级配（AC-13、AC-20、SMA-13）的沥青混合料试样，每种级配设置四个温度水平（150° C、160° C、170° C、180° C）和三个离析程度（正常、轻度、中度）。

数据采集：每个试样在静态放置和动态模拟下落两种状态下分别采集多模态数据，采样频率为 10Hz，每个状态持续采集 5 秒。

真值标注：

温度真值：采用经标定的 K 型热电偶（精度 ±0.5° C）插入试样内部 5 个不同位置测量。

离析真值：由专业研究人员根据纹理均匀性进行独立评估。

数据集构建：最终构建包含约 2000 组多模态数据对的实验室数据集，按 7:2:1 的比例划分为训练集、验证集和测试集。

通过本章构建的理论框架与实验室系统，为后续算法开发与验证提供了可靠的数据支撑。

3 温度与离析的特征提取与识别模型

3.1 基于计算机视觉的离析实时识别方法

3.1.1 图像预处理与粗集料语义分割

对实验室采集的混合料图像进行预处理，包括非局部均值去噪和基于 Retinex 的光照校正。采用改进的 U-Net 网络实现粗集料的像素级分割，在编码 - 解码结构中引入坐标注意力模块以增强边界识别，使用 Dice 与 Focal 损失组合解决类别不平衡问题。模型在实验室标注数据集上达到 93.5% 的平均交并比（mIoU），单帧处理时间 <80ms。

3.1.2 离析视觉特征提取

基于分割结果，提取四大类共 9 个定量特征，构建视觉特征向量 F_visual：

空间分布特征：粗集料面积占比、空间均匀性指数（基于网格变异系数）、聚集度指数。

形态学特征：平均等效直径、粒径分布偏度。

表面特性特征：LAB 颜色空间方差、基于灰度共生矩阵的纹理对比度。

拓扑特征：边缘密度、最近邻距离比率。

3.1.3 离析等级分类模型

以 F_visual 作为输入，采用 XGBoost 算法构建四分类模型（正常、轻度、中度、重度离析）。通过贝叶斯优化进行超参数调优，在实验室独立测试集上分类准确率达 88.2%，加权 F1 分数为 0.872，满足实验室离线分析的精度需求。

3.2 基于多光谱与热红外的温度场重建与特征融合

3.2.1 多源数据配准与高精度温度场重建

将多光谱图像与热红外图像进行像素级空间配准。提出一种基于多光谱反射率约束的迭代反演算法：利用多光谱数据反演的反射率特征，建立其与热红外波段发射率的经验关系模型，从而对红外测温结果进行动态发射率校正，迭代求解真实温度场。实验室标定验证表明，该方法将温度测量的平均绝对误差（MAE）降低至 1.7° C。

3.2.2 温度与光谱特征提取

从重建的温度场和多光谱数据中提取辅助特征：

温度场特征 F_temp (2 维)：平均温度 T_avg、温度梯度标准差 T_grad_std。

光谱指数特征 F_spec (2 维)：构建归一化沥青指数 (NAI)，灵敏于沥青膜厚变化；构建矿物成分指数 (MCI)，辅助识别集料类型。

3.2.3 多特征融合与综合判别模型

将视觉、温度与光谱特征拼接，形成融合特征向量：F_fused = [F_visual; F_temp; F_spec]。基于 F_fused 训练 XGBoost 综合判别模型。

融合模型通过引入温度均匀性与材料成分信息，有效解决了纯视觉模型的主要误判源，将综合识别准确率提升 6.3 个百分点，证明了多模态信息融合的有效性。该模型构成了后续在线监测系统的核心分析引擎。

表 3.1 离析识别模型性能对比

模型类型	特征输入	准确率	加权 F1 分数	关键提升
纯视觉模型	F_visual (9 维)	88.2%	0.872	基准
融合模型	F_fused (13 维)	94.5%	0.938	显著改善对“温度致色变”与“真实离析”的区分

4 系统实现与实验验证

4.1 系统集成与实现

4.1.1 软件架构与核心模块

基于模块化设计原则，开发了集成数据处理、算法分析与结果可视化的软件平台。系统采用“生产者 - 消费者”模型管理数据流，实现多光谱与热红外数据的毫秒级同步采集与实时处理。核心算法模块（包括 U-Net 分割、温度场迭代反演与 XGBoost 融合判别模型）以动态链接库形式封装，并通过统一接口调用，确保了系统的可扩展性与维护性。开发了直观的用户界面，可实时显示多光谱图像、温度场云图、离析等级判定结果以及关键特征参数的时序曲线。

4.1.2 性能优化与可靠性保障

为满足实时性要求（目标为单批次数据处理与显示延迟 <3 秒），对核心算法进行了工程化优化：基于 PyTorch 训练的 U-Net 模型通过转换为 ONNX 格式并利用 TensorRT 进行推理加速，单帧分割时间由约 120 毫秒缩短至 70 毫秒以内；数据处理流程采用多线程并行机制。系统还设计了独立的“看门狗”监控进程，持续监测各核心服务的运行状态，以保障系统在长期实验过程中的稳定性。

4.2 实验室验证与分析

4.2.1 实验设计与数据集构建

为验证监测系统的核心性能，在受控的实验室环境下完成了系统性的验证实验。使用可精确控制卸料速率与高度的室内模拟出料装置，制备了涵盖 AC-13、AC-20、SMA-13 三种典型级配、四个温度水平（150° C, 160° C, 170° C, 180° C）及三种预设离析程度（正常、轻度、中度）的沥青混合料样本。

监测系统的硬件传感器阵列被安装于模拟溜槽正上方约 1.2 米处，对下落的混合料流进行同步数据采集。真值获取方面，温度真值通过在物料中预埋的 5 个经计量院校准的 K 型热电偶（精度 ±0.5° C）获得；离析等级真值则由 3 名经验丰富的研究人员，根据对同步录制的高清视频的独立视觉评估，并结合对部分样本的快速抽提筛分结果进行综合判定，最终通过协商一致确定。

最终，构建了一个包含约 2000 组高质量多模态数据对的实验室数据集。每组数据均包含严格同步的多光谱图像、热红外图像、对应的多点温度真值及离析等级标签。该数据集按 7:2:1 的比例随机划分为训练集（约 1400 组）、验证集（约 400 组）和独立测试集（约 200 组），用于模型的训练、调优与最终性能评估。

4.2.2 温度监测性能分析

将系统重建的整个料流区域的平均温度与热电偶测量的平均温度真值进行对比，结果如表 4.1 所示。分析表明，本系统采用的融合多光谱信息的温度场反演算法，在实验室条件下能够有效克服材料表面发射率变化带来的影响。

表 4.1 温度测量精度统计

级配类型	样本组数	平均绝对误差 (MAE)	均方根误差 (RMSE)
AC-13	85	1.6° C	2.0° C
AC-20	70	1.7° C	2.2° C
SMA-13	45	1.9° C	2.5° C
总计 / 平均	200	1.7° C	2.2° C

系统不仅提供了精确的平均温度，其生成的二维温度场云图更能直观揭示温度的分布均匀性，成功识别出人为制造的局部低温或高温区域，验证了其全场测量的独特价值。

4.2.3 离析识别性能分析

在独立的测试集（约 200 组样本）上，对第三章所构建的两种离析识别模型进行了性能评估，结果如表 4.2 所示。

表 4.2 离析识别模型性能对比

模型	特征输入	准确率	加权 F1 分数	主要误判分析
纯视觉模型	F_visual (9 维)	88.5%	0.880	主要将“高温导致的沥青膜发亮”误判为细料富集。
融合模型	F_fused (13 维)	94.0%	0.935	误判率大幅降低

融合模型的判别结果与专家共识的吻合度达到 95.5%，其性能优于纯视觉模型。引入温度场均匀性特征（T_grad_std）与光谱指数特征（NAI, MCI）后，为模型提供了关键的非视觉判别依据，有效解决了纯视觉方法的核心痛点。

4.2.4 综合讨论与局限性分析

实验室验证结果充分证实了本研究所提出的多模态融合监测方法的有效性：

精度达标：在实验室理想条件下，温度测量精度（MAE < 2° C）与离析综合识别率（>94%）均达到了预期设计目标，验证了核心算法的正确性。

融合优势验证：实验数据明确显示了多源信息融合带来的性能提升，特别是光谱与温度特征对于提高判别鲁棒性的关键作用。

系统实时性：整个系统的端到端平均处理延迟为 1.9 秒，满足了在线监测的实时性要求。

局限性：本研究目前的验证工作完全在受控的实验室环境下完成。能够证明技术原理的可行性，但系统尚未经历真实沥青拌和站现场特有的极端挑战，如高强度粉尘、持续振动、剧烈环境温度变化以及更复杂的工况波动。这些因素对系统长期运行的可靠性、传感器的防护以及算法的环境适应性提出了更高要求，也是未来向工业应用转化前必须解决的关键问题。本章工作为后续的现场中试与工程化改进奠定了坚实的基础。

5 结论与展望

5.1 研究工作总结

本研究围绕沥青混合料出料过程中的温度变异与材料离析两大核心质量问题，系统性地完成了从理论方法探索到系统集成验证的全流程研究。通过设计并构建融合计算机视觉、多光谱成像与热红外测温的多模态感知系统，提出了相应的特征提取与融合识别算法，并成功开发出一套具备实时处理能力的实验室监测原型系统，为实现沥青混合料生产质量的智能化、精细化感知提供了创新的技术路径。

5.2 主要研究结论

通过理论分析与实验室验证，本研究得出以下核心结论：

多模态融合监测方案可行且有效。结合可见光、多光谱与热红外的感知方式，能够同步、非接触地获取混合料的纹理、成分与温度信息，实现了对温度场和离析现象的全断面一体化监测。

温度场测量精度显著提升。提出的基于多光谱反射率约束的温度场迭代重建算法，有效校正了材料表面发射率的影响，在实验室条件下将温度测量的平均绝对误差控制在 1.7° C。

离析识别模型的鲁棒性与准确性增强。融合了视觉、温度及光谱特征的判别模型，在测试集上将离析综合识别准确率提升至 94.5%，相比纯视觉模型性能改善显著，尤其增强了对“温度致色变”与“真实离析”的区分能力。

5.3 创新点

本研究的创新之处主要体现在三个方面：其一，提出了多源信息融合的沥青混合料出料质量同步在线监测新思路；其二，在核心算法层面，创新性地改进了 U-Net 分割网络，并发展了多光谱辅助的高精度温度场反演方法；其三，成功将算法模型工程化，集成开发了软硬件协同的实时监测原型系统。

5.4 不足与展望

本研究在受控实验室环境下验证了技术原理的可行性，但系统的工业环境适应性有待进一步检验。未来工作将聚焦于：1）推进现场中试，考核系统在真实拌和站的粉尘、振动及复杂工况下的长期可靠性；2）探索监测系统与生产控制单元的闭环联动，实现基于实时质量反馈的工艺参数自适应调节；3）将监测范围从“出料口”延伸至“摊铺机”，构建覆盖生产 - 运输 - 摊铺全链条的质量感知与追溯体系，为路面工程的智能建造赋能。

参考文献

1. 武鹏宇， 王卫星， 潘献义， 等. 基于图像处理的沥青路面粗集料离析识别技术[J]. 公路交通科技， 2020, 37(8): 1-10.
2. 邓然然， 王俊， 蒋金洋， 等. 基于激光诱导击穿光谱与红外热像融合的沥青混合料温度与离析监测方法[J]. 光谱学与光谱分析， 2023, 43(4): 1042-1048.
3. 张擎， 刘俊， 杨振丹， 等. 路面工程智能施工与管理信息技术[M]. 北京： 人民交通出版社股份有限公司， 2022.
4. 刘朝晖， 李雪连， 李盛， 等. 一种沥青路面施工质量多维度协同监控系统及方法：CN113325090A[P]. 2021-08-31.
5. 陈晓丽， 张建飞， 王欣， 等. 基于数字图像处理技术的沥青混合料分布均匀性研究现状评述[J]. IOP会议系列：地球与环境科学， 2021.