

化干选模式正成为未来选矿工艺的发展趋势。

4 工艺流程优化与发展趋势

超贫磁铁矿选矿的核心目标在于实现“低品位高回收、低能耗高效率、低污染高利用”。随着矿石资源品质下降和选矿规模扩大，传统流程的能耗高、流程长、效率低等问题愈发突出。

4.1 流程结构的系统优化

针对超贫磁铁矿嵌布细、可选性差的特征，优化后的流程一般遵循“多碎少磨—干选预抛尾—高压辊磨精选—湿式提纯—尾矿干排”原则。首先，通过三段一闭路破碎控制粒度至 -8 mm ，实现矿石的预解离；其次利用干式磁选机抛弃大部分脉石物质，使入磨品位由 27% 提高至 35% 以上；在磨矿环节，采用干式格子球磨机或高压辊磨系统实现颗粒层压破碎，减少过磨现象；随后进入湿式磁选与反浮选联合流程，通过强化解离与药剂控制提升精矿品位；最后，尾矿经脱水系统干排，实现资源回收与环境治理的统一。该优化模式不仅缩短了流程长度，还实现了能量与物料的高效匹配。与传统弱磁选—反浮选两段流程相比，该系统在保证精矿品位 60% 以上的同时，铁回收率提高 5% ~ 8%，单位能耗降低约 15% ~ 20%。此外，通过干选预抛尾减少入磨量，磨矿介质与衬板的消耗降低近 25%，显著改善了设备的经济运行水平。

4.2 设备性能与工艺参数的协同匹配

设备选择与参数匹配是影响流程性能的关键因素。高压辊磨机的应用实现了磨矿粒度可控化与能耗分级利用，其层压粉碎原理促使矿物沿晶界解离，为后续磁选提供了更优粒级结构。实验结果显示，在辊压强度 6 MPa、辊面线速度 1.5 m/s 的条件下，可将 -0.074 mm 粒级提高 10% ~ 15%，而能耗降低约 18%。磁选设备方面，高梯度立环磁选机与干式永磁筒式磁选机的联合使用显著改善了分选效果。立环磁选机磁场强度可调至 1.8 T 以上，可有效分离细粒磁铁矿与钛铁矿；干式磁选机在处理粗粒贫矿时表现出良好的节能特性。浮选环节则通过控制矿浆 pH 值（一般为 8 ~ 9）和药剂体系（石灰—淀粉—胺类捕收剂组合），实现铁矿物与硅质脉石的选择性分离。此外，参数优化的核心是“过程协同”，即在破碎、磨矿、

磁选与浮选之间建立能量与粒度的动态反馈机制。近年来，利用数值模拟与人工智能算法建立的“选矿数字孪生模型”，能够实时预测粒度分布、磁化率变化及选别曲线，实现工艺参数的自适应优化与生产自动调节。

4.3 自动化与智能化控制技术的集成

现代选矿工艺优化不仅依赖设备性能提升，更强调系统控制的智能化。通过工业物联网（IIoT）与大数据分析平台的引入，选矿过程实现了从“静态控制”向“动态自调节”的转变。自动化监控系统可实时采集给矿量、磨矿细度、磁场强度、精矿含水率等关键参数，并通过模型预测控制（MPC）算法实现多变量耦合调度。部分研究单位已建立“选矿数字孪生平台”，通过虚拟仿真模拟矿浆流动、颗粒分选轨迹及能耗分布，从而在不影响生产的情况下进行参数试算与工艺调整。该技术不仅提高了选矿系统的响应速度与运行稳定性，还能减少人工干预带来的误差。智能控制技术的推广，标志着超贫磁铁矿选矿由传统经验操作进入到“数据驱动—模型决策—自动优化”的新阶段。

5 结语

超贫磁铁矿的高效选矿已成为中国钢铁原料保障与资源绿色开发的重要方向。通过对矿石组成、分选机理、技术路径及工艺优化的系统分析可以看出，干湿联合选矿、高压辊磨干选集成、强磁—反浮选联合及尾矿干排综合回收，构成了当前超贫磁铁矿选矿的主流体系。未来，随着人工智能、数字孪生及节能装备技术的深入应用，选矿过程将实现全流程可视化与智能化控制，进一步降低能耗与损失率。实现从“高能耗粗放选矿”向“低碳智能选矿”的转变，是推动低品位铁矿资源高效利用和矿业可持续发展的必然趋势。

参考文献

- [1] 李亚,王英凯,牛艳萍,等.黑龙江某含钒超贫磁铁矿选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2022,(3):108-112.
- [2] 张美诺,石康兴,邱昆峰,等.冀东司家营BIF铁矿床磁铁矿类型与成因及其对高品位铁矿成矿机制的启示[J].现代地质,2025,39(1):96-114.
- [3] 母传伟,苑仁财,张皓楠,等.基于多目标决策综合效用值法优选超贫磁铁矿选矿工艺流程研究[J].现代矿业,2025,41(9):25-31.

Hyperspectral image classification method based on satellite remote sensing and its application

Tingting Han

Liaoning Provincial Natural Resources Service Center, Shenyang, Liaoning, 110034, China

Abstract

Hyperspectral remote sensing technology provides a powerful tool for surface feature identification and classification by acquiring high-resolution information of ground objects across continuous spectral bands. Satellite-based hyperspectral image classification methods can comprehensively utilize spectral, spatial, and temporal characteristics to achieve precise identification and dynamic monitoring of landforms. This paper systematically analyzes the fundamental principles and data characteristics of hyperspectral imaging, while exploring the theoretical foundations and applicability conditions of various classification methods including statistical feature analysis, band selection techniques, and spatial information fusion. By integrating support vector machines, spectral angle mapping, and deep fusion algorithms, the study conducts comparative analysis of classification performance across different models. The research demonstrates that optimizing band feature selection and model architecture can significantly enhance classification accuracy and stability, providing high-precision remote sensing support for agricultural, geological, and ecological environment monitoring applications.

Keywords

satellite remote sensing; hyperspectral images; classification methods; feature extraction; accuracy assessment

基于卫星遥感的高光谱图像分类方法及其应用

韩婷婷

辽宁省自然资源事务服务中心，中国 · 辽宁 沈阳 110034

摘要

高光谱遥感技术通过获取地物在连续光谱波段上的高分辨率信息，为地表特征识别与分类提供了强有力手段。基于卫星遥感的高光谱图像分类方法，能够综合利用光谱、空间与时间特征，实现地物的精细识别与动态监测。本文系统分析了高光谱成像的基本原理与数据特征，探讨了统计特征法、波段选择法及空间信息融合等多种分类方法的理论基础与适用条件。结合支持向量机、光谱角映射和深度融合算法，对不同模型的分类性能进行比较分析。研究指出，通过优化波段特征选择与模型结构，可显著提高分类精度与稳定性，为农业、地质与生态环境监测等领域提供高精度的遥感信息支持。

关键词

卫星遥感；高光谱图像；分类方法；特征提取；精度评估

1 引言

随着遥感技术的快速发展，高光谱影像凭借其高光谱分辨率和丰富的地物特征信息，已成为卫星遥感应用研究的重要方向。相较于多光谱影像，高光谱图像能够在数百个连续波段上反映地物的细微光谱差异，为精准识别和分类提供了科学依据。然而，高光谱数据维度高、信息冗余度大、噪声干扰强等问题，给分类算法的设计与应用带来了挑战。为此，研究者们不断探索适合不同应用场景的分类方法与特征提取策略，推动了算法体系的持续优化。本文立足于卫星遥感背景，围绕高光谱图像的分类原理、主要方法体系及典型

应用展开系统分析，旨在为高光谱遥感在地表信息识别与环境监测中的应用提供技术参考与理论支持。

2 高光谱遥感技术的基本原理与发展概况

2.1 高光谱成像的物理基础与数据特征

高光谱成像技术以电磁辐射与地物反射特性为基础，通过分光仪对连续波段的光谱信息进行获取，形成空间与光谱双维度的数据立方体结构。每个像元包含数百个波段的反射率信息，能够精确刻画地物的光谱特征，实现细微差异识别。高光谱数据具有高光谱分辨率、高信息量和强区分能力等特征，在地表覆盖、植被监测和矿产勘查中表现出独特优势。随着探测技术与成像算法的发展，高光谱影像的空间分辨率不断提升，数据获取与传输能力显著增强，为多源数据融合与智能分类提供了丰富的信息支撑与技术基础。

【作者简介】韩婷婷（1988-），女，蒙古族，中国辽宁阜新人，硕士，高级工程师，从事高光谱遥感应用研究。

2.2 卫星遥感系统的观测模式与传感器类型

卫星遥感系统通过轨道高度、成像方式与光谱分辨率的不同，构建多层次、多角度的观测模式。高光谱卫星主要采用推扫式与成像光谱仪观测技术，通过线阵探测器扫描地表，实现连续波段信息采集。国内典型高光谱卫星包括资源一号 02D/02E 星、高分五号、珠海一号、西光壹号系列等，覆盖从可见光到短波红外的广谱范围。传感器类型多样，既有反射式高光谱仪，也有红外辐射计与成像干涉仪，可根据任务需求选择不同波段组合。现代卫星系统还配合地面定标与星上辐射校正技术，提高数据的精度与可比性，为高光谱分类研究提供可靠的数据来源^[1]。

3 高光谱图像分类的主要方法体系

3.1 基于统计特征的传统分类方法

传统高光谱分类方法多基于统计学原理，通过对样本的概率分布建模实现地物识别。最大似然法、最小距离法与马氏距离分类器是常用算法，它们假设各类地物样本服从特定统计分布，并依据光谱特征计算样本间的相似性。此类方法实现简单、可解释性强，适用于样本分布稳定的场景。但在高维数据中，协方差矩阵的估计误差和样本数量不足常导致分类结果波动。为提高鲁棒性，研究者引入贝叶斯判别、主成分分析及特征选择策略，有效减轻维度冗余对分类精度的影响，增强算法的泛化性能。

3.2 基于谱维特征的波段选择与特征提取技术

波段选择与特征提取技术通过降低数据维度和剔除冗余信息，提高高光谱分类的效率与准确性。波段选择主要依据光谱特征重要性排序，常用方法包括相关系数法、信息熵法与最优子集搜索算法。特征提取则利用数学变换将高维光谱映射到低维空间，典型算法有主成分分析、独立成分分析与线性判别分析。近年提出的局部保持投影与稀疏表示技术进一步强化了非线性特征表达能力。通过合理选择波段与提取关键特征，可在保证信息完整性的前提下，减少计算量、提高分类稳定性，并改善模型在复杂地物场景下的适应性。

4 高光谱图像分类的模型构建与算法比较

4.1 支持向量机与随机森林的分类性能分析

支持向量机通过构建最优超平面实现样本间的最大间隔分类，适用于高维、小样本的高光谱数据。其核函数的灵活选取可处理非线性问题，具有较强的泛化能力。随机森林基于多棵决策树的集成思想，通过随机抽样与特征分割，提升了分类的稳定性与抗噪性。两者在处理高光谱数据时表现出较好的性能差异，支持向量机在边界样本识别中具有更高精度，而随机森林在多类复杂地物中表现出更强的适应性。通过参数优化与特征加权，可进一步提升二者的分类效果，为模型构建提供互补支持。

4.2 光谱角映射与最小距离法的适用性研究

光谱角映射方法基于光谱向量夹角计算地物相似性，

不受光照强度变化影响，适合反射率差异明显的地表特征分类。最小距离法以样本均值向量为参照，通过计算待测像元与样本中心的欧氏距离实现分类，计算速度快、实现简便。光谱角映射在矿产识别、植被类型划分中具有较高鲁棒性，而最小距离法在噪声较低的数据集中表现稳定。研究表明，在高光谱数据波段多、噪声复杂的场景下，光谱角映射具有更优性能。结合两者优势，可采用加权混合策略提升总体分类精度与模型稳健性。

4.3 集成学习与深度特征融合的分类策略

集成学习通过融合多个基学习器的分类结果，显著提升模型的泛化能力与鲁棒性。常见的集成框架包括 Bagging、Boosting 及 Stacking 结构，能够在高光谱数据中减弱单模型过拟合风险。深度特征融合方法基于卷积神经网络与自编码器等模型，自动提取光谱与空间层级特征，实现端到端的特征学习。该策略在处理复杂地物与非线性关系时具备明显优势。通过融合卷积特征与光谱统计特征，分类精度可提升约 10% 至 15%。未来的算法研究正趋向轻量化网络与多源数据融合方向，以实现更高的处理效率与实时应用能力^[2]。

5 高光谱图像分类在典型区域的应用研究

5.1 土地利用与覆盖变化监测中的应用

高光谱图像在土地利用与覆盖变化监测中能够实现对地表类型的高精度识别，通过连续光谱反射特征区分农田、林地、水体、建筑物和裸地等地物类别。利用高光谱数据的细致波段信息，可以构建植被指数、湿度指数和城市化指数等多维参数，对区域变化进行定量分析。通过多时相影像比对与分类结果叠加分析，可追踪土地利用动态过程，识别出耕地转建设用地、森林退化或湿地缩减等现象。研究表明，在采用光谱角映射与随机森林分类算法的基础上，土地利用分类精度可超过 90%。高光谱影像的应用不仅提升了地表变化监测的时空分辨能力，还为区域规划与生态评估提供了科学依据。

5.2 农作物精细识别与长势评估分析

高光谱遥感通过捕捉农作物在可见光、近红外与短波红外等波段的光谱响应特征，实现对不同作物类型的精细识别。不同作物在光谱反射曲线形态、红边位置和波段吸收深度上存在显著差异，可用于建立作物识别模型。结合地面样点数据与时间序列影像，可实现对作物生长阶段、叶面积指数及氮含量的动态监测。研究表明，基于支持向量机与特征波段选择算法的分类方法在玉米、水稻、小麦识别中表现稳定，分类精度提升约 12%。通过引入多光谱指数融合与生理参数反演技术，高光谱遥感已成为农业精准管理与产量预测的重要工具，对提高农田管理精细化水平具有重要意义^[3]。

5.3 矿产资源与地质信息提取的应用实践

高光谱遥感在矿产资源勘查中具备独特优势，通过识