

# 高光谱成像技术在棉花纤维成熟度检测中的应用与分析

卫 莉 扈玉璞

巴州检验检测中心 新疆 库尔勒 841000

**摘 要：**棉花纤维成熟度是决定其品质和纺织性能的关键指标。传统检测方法依赖人工或实验室化学分析，存在效率低、破坏性大等问题。高光谱成像技术（HSI）通过融合空间与光谱信息，为棉花成熟度的无损、快速检测提供了新途径。本文系统综述了高光谱成像技术在棉花纤维成熟度检测中的应用原理、方法与挑战，并结合实验案例探讨其未来发展方向。

**关键词：**高光谱成像技术；棉花纤维成熟度；检测

## 引言

棉花纤维的成熟度直接影响其强度、细度和染色均匀性，是纺织工业质量管控的核心参数之一。传统检测方法如显微镜观察、化学溶解法等耗时耗力，且无法实现实时监测。高光谱成像技术通过捕捉棉花在可见光至近红外波段的光谱特征，结合机器学习算法，可实现成熟度的非接触式、高精度检测，为棉花产业智能化升级提供技术支撑。

## 1 高光谱成像技术原理与优势

### 1.1 技术原理

高光谱成像技术的原理基于光谱学的基本知识。与传统成像技术仅使用几个宽波段不同，高光谱成像技术采用了连续且狭窄的波段进行成像，这些波段的宽度通常控制在3-10纳米之间。通过这样的设计，高光谱成像系统能够在数百个波段上同时获取目标物体的光谱反射率曲线。以棉花纤维的成熟度检测为例，棉花纤维的成熟度直接影响其品质和使用性能，而成熟度与纤维内部的化学成分，如纤维素和木质素的含量，有着密切的关系。不同成熟阶段的棉花纤维对特定波长的光具有不同的吸收和反射特性。研究表明，成熟的棉花纤维在近红外波段（900-1700纳米）由于纤维素结晶度较高，其反射率显著高于未成熟的纤维。这种光谱特性的差异为高光谱成像技术提供了检测棉花纤维成熟度的理论基础。

### 1.2 技术优势

高光谱成像技术相较于传统检测方法，具有诸多显著优势：（1）无损检测：高光谱成像技术能够在不破坏棉花样本的前提下进行成熟度检测。这对于珍贵的农产品或需要保持完整性的样本来说，无疑是一种理想的检测方法。同时，这一特性也使得高光谱成像技术非常适合于生产线的实时监测，能够大大提高生产效率和产品质量。（2）高分辨率：高光谱成像技术的空间分辨

率可以达到毫米级，甚至更高。这意味着它能够识别出单根棉花纤维的局部成熟度差异，为精确分类和品质评估提供了可能。这种高分辨率的特性使得高光谱成像技术在细微结构的分析和检测中具有独特优势<sup>[1]</sup>。（3）多维度数据融合：高光谱成像技术不仅提供了丰富的光谱信息，还能够结合图像信息进行多维度的数据融合。这种融合后的数据更加全面、准确，能够显著提高分类模型的鲁棒性和准确性。通过综合考虑光谱特征和图像特征，高光谱成像技术能够更准确地识别出不同成熟度的棉花纤维，为农业生产提供有力的技术支持。

## 2 高光谱成像在棉花成熟度检测中的应用

棉花作为一种重要的经济作物，其成熟度直接影响纤维的品质和纺织性能。传统上，棉花的成熟度检测主要依赖人工视觉判断或简单的物理测量，但这些方法存在主观性强、效率低下和准确性不足等问题。随着光谱学和成像技术的快速发展，高光谱成像技术因其独特的光谱分辨率和空间分辨率优势，在棉花成熟度检测中展现出了巨大的潜力。

### 2.1 数据采集与预处理

在高光谱成像技术应用于棉花成熟度检测的过程中，数据采集是第一步也是至关重要的一步。通常，实验会采用高性能的高光谱相机，如iSpecHyper-VM系列相机，其光谱范围覆盖400-2500纳米，能够捕捉到棉花样本在可见光、近红外乃至短波红外波段的详细光谱信息。这种宽光谱范围的覆盖，为后续的光谱特征提取和成熟度分类提供了丰富的数据基础。在数据采集过程中，由于环境光照条件的变化、传感器自身的噪声以及相机与样本之间的距离和角度等因素，都可能对采集到的高光谱图像产生影响。因此，为了获得准确、可靠的高光谱数据，必须进行一系列的预处理操作。辐射校正是预处理中的重要步骤之一。它旨在消除由于光照条件变化引

起的图像亮度不均和光谱畸变。通过校正,可以使得不同时间、不同地点采集的棉花样本图像在光谱上具有一致性,从而提高后续处理的准确性。去噪处理也是必不可少的<sup>[2]</sup>。高光谱图像由于波段数多、数据量大,容易受到各种噪声的干扰,如热噪声、散粒噪声等。这些噪声会降低图像的质量,影响光谱特征的提取。因此,需要采用有效的去噪算法,如中值滤波、小波变换等,来抑制噪声,保留图像的有用信息。光谱归一化处理则是为了消除由于传感器响应差异、光照强度变化等因素引起的光谱曲线形状变化。通过归一化处理,可以使得不同样本的光谱曲线在相同的尺度上进行比较和分析,从而提高光谱特征的稳定性和可比性。

## 2.2 特征提取与模型构建

在完成数据采集和预处理后,下一步是进行特征提取和模型构建。这是高光谱成像技术在棉花成熟度检测中的核心环节。

### 2.2.1 光谱特征提取

光谱特征是高光谱成像技术提供的主要信息之一。它反映了样本在不同波段上的反射、吸收或透射特性。在棉花成熟度检测中,光谱特征与纤维素的含量、木质素的分布以及纤维的结构等密切相关。为了从高光谱图像中提取出与成熟度相关的光谱特征,通常采用主成分分析(PCA)或连续投影算法(SPA)等方法。PCA是一种常用的降维技术,它通过将高维的光谱数据投影到低维的主成分空间上,来保留数据的主要信息,同时去除冗余和噪声。通过PCA处理,可以得到一组新的光谱特征,这些特征能够更好地反映棉花的成熟度差异。SPA则是一种基于变量投影重要性的特征选择方法。它通过计算每个波段在投影方向上的重要性,来选择对成熟度分类最有贡献的波段。SPA方法能够有效地减少波段间的共线性,提高模型的稳定性和准确性。研究发现,在1300-1500纳米波段范围内,棉花的吸收峰与纤维素含量呈强相关性。这一发现为光谱特征的提取提供了重要的依据。通过针对这一波段范围进行特征提取,可以更加准确地反映棉花的成熟度信息。

### 2.2.2 空间纹理分析

除了光谱特征外,空间纹理特征也是高光谱成像技术提供的重要信息之一。它反映了样本在空间上的分布、结构和排列方式。在棉花成熟度检测中,空间纹理特征与纤维的表面形态、粗细以及排列紧密度等密切相关。为了提取棉花的空间纹理特征,通常采用灰度共生矩阵(GLCM)等方法。GLCM是一种描述图像灰度级之间空间相关性的矩阵。通过计算GLCM中的各种统计量,

如对比度、相关性、能量和同质性等,可以得到一组反映图像纹理特征的参数。这些参数能够作为分类模型的输入特征,提高成熟度分类的精度。

### 2.2.3 机器学习模型

在提取出光谱特征和空间纹理特征后,下一步是构建机器学习模型进行成熟度分类。支持向量机(SVM)、随机森林(RF)等算法因其强大的分类能力和泛化性能,被广泛用于棉花成熟度分类中。SVM是一种基于统计学习理论的二分类模型。它通过寻找一个最优的超平面来将不同类别的样本分开。对于多分类问题,可以采用一对多或多对多的策略进行扩展。SVM算法在处理高维数据和非线性问题时具有优势,能够有效地处理高光谱图像中的光谱特征和空间纹理特征。RF则是一种基于决策树的集成学习方法。它通过构建多个决策树并综合它们的输出结果来进行分类<sup>[3]</sup>。RF算法具有处理高维数据、抗过拟合能力强和计算效率高等优点。在棉花成熟度分类中,RF算法能够充分利用光谱特征和空间纹理特征的信息,提高分类的准确性和稳定性。

## 2.3 实验案例与验证

为了验证高光谱成像技术在棉花成熟度检测中的有效性,以莱森光学iSpecHyper-VS系统为例进行了实验研究。该系统具有高光谱分辨率、高空间分辨率和高信噪比等优点,能够捕捉到棉花样本在细微波段上的光谱差异。实验中,选取了不同发育阶段的棉铃纤维作为样本,包括未成熟、半成熟和成熟等三个阶段。通过iSpecHyper-VS系统采集了这些样本的高光谱图像,并进行了辐射校正、去噪和光谱归一化等预处理操作。在特征提取阶段,采用了PCA和SPA方法提取了与成熟度相关的光谱特征,并结合GLCM方法提取了空间纹理特征。然后,将这些特征作为输入变量,构建了SVM和RF等机器学习模型进行成熟度分类。实验结果显示,成熟纤维在1600纳米波段的反射率较未成熟纤维高15%-20%。这一发现与之前的研究结果相一致,进一步验证了高光谱成像技术在棉花成熟度检测中的有效性。同时,通过SVM模型分类的交叉验证精度达到了93.5%,表明该模型具有良好的分类性能和泛化能力。

## 3 技术挑战与未来展望

高光谱成像技术作为一种先进的检测技术,在棉花成熟度检测中展现出了巨大的潜力。然而,随着技术的不断发展和应用范围的拓展,也面临着一些挑战和问题。本文将针对这些现存问题进行分析,并对高光谱成像技术的未来发展方向进行展望。

### 3.1 现存问题

### 3.1.1 数据冗余与计算复杂度

高光谱成像技术的一个显著特点是数据量大。由于高光谱图像包含数百个波段，每个波段都包含丰富的光谱信息，因此数据量非常庞大。这不仅对存储和传输提出了更高要求，也给后续的数据处理和分析带来了巨大挑战。传统的数据处理算法在处理高光谱图像时往往效率低下，无法满足实时处理的需求。因此，如何优化算法，提高处理速度，降低计算复杂度，是高光谱成像技术面临的一个重要问题。

### 3.1.2 环境适应性

目前，大多数高光谱成像技术的研究都基于实验室环境。在实验室环境中，光照条件、温度、湿度等都可以得到严格控制，从而确保检测结果的稳定性和准确性。然而，在实际生产过程中，环境条件是复杂多变的。光照变化、棉絮堆积、灰尘污染等因素都可能对高光谱图像的采集和质量产生影响，进而影响检测结果的稳定性。因此，如何提高高光谱成像技术的环境适应性，使其能够在各种复杂环境下稳定工作，是一个亟待解决的问题。

### 3.1.3 多目标检测需求

在棉花产业中，除了成熟度检测外，还需要对棉花的杂质含量、纤维长度、强度等多个参数进行评估。这就要求高光谱成像技术不仅能够检测棉花的成熟度，还能够同时提取其他相关参数的信息。这对系统集成度提出了更高的要求<sup>[4]</sup>。如何实现多目标的同时检测，提高检测效率和准确性，是高光谱成像技术面临的另一个挑战。

## 3.2 发展方向

针对上述现存问题，高光谱成像技术的未来发展方向可以概括为以下几个方面：

### 3.2.1 多模态传感融合

为了提高高光谱成像技术在复杂场景下的检测能力，可以结合近红外、偏振光等多光源成像技术。近红外成像可以穿透棉絮表层，获取更深层次的光谱信息；偏振光成像则可以反映物体表面的微观结构和材质信息。通过多模态传感融合，可以充分利用不同成像技术的优势，提高检测的准确性和稳定性。

### 3.2.2 轻量化硬件开发

目前的高光谱成像设备大多体积庞大、重量较重，不便于田间应用。因此，推动轻量化高光谱设备的开发是未来的一个重要方向。例如，可以研发便携式高光谱设备，如无人机载系统，实现棉花的全生长周期监测。这样不仅可以提高监测的效率和准确性，还可以降低人力成本，推动棉花产业的智能化发展。

### 3.2.3 深度学习模型优化

深度学习技术在图像处理领域取得了显著成果，特别是在卷积神经网络（CNN）的应用上。CNN能够自动提取图像中的特征，减少人工干预。在高光谱成像技术中，可以结合CNN自动提取光谱-空间联合特征，提高检测的准确性和鲁棒性。通过优化深度学习模型，可以进一步提高高光谱成像技术的检测性能，满足实际应用的需求。

## 结语

高光谱成像技术，凭借其非破坏性和高精度的光谱分析能力，为棉花纤维成熟度检测带来了革命性的突破。这一技术不仅极大地提高了检测的准确性和效率，还为棉花产业的各个环节提供了全新的视角。展望未来，随着算法的不断优化和硬件设备的进一步小型化，高光谱成像技术将在棉花育种中发挥更精准的指导作用，在加工质量控制中实现更严格的把关，并在智能农业中展现更广泛的应用前景。这将有力推动纺织工业向更高效、更智能化的方向发展。

## 参考文献

- [1]石靖,王家强.基于高光谱遥感技术的棉花长势监测研究进展[J].农业科技与装备,2024,(01):69-71.
- [2]程俊涛,赵庆展,刘汉青,等.棉花全生长周期机载高光谱正射影像数据集构建[J].石河子大学学报(自然科学版),2023,41(03):372-380.
- [3]李贞.基于高光谱和无人机影像的棉花旱情识别与分级研究[D].塔里木大学,2023.
- [4]龙翔,赵庆展,王学文,等.基于机载高光谱端元提取分析棉花生长期光谱变化[J].新疆农业科学,2021,58(07):1207-1216.