DOI：10.3724/zrht.1674-5825.2026048

中国空间站巡天空间望远镜巡天相机图像快速评判方法及验证

陈永杰[1]， 郭碧峰[1]， 王红飞[1,2*]， 李新峰[1]， 吴 鹏[1]， 梁 骥[1]
（1. 中国科学院空间应用工程与技术中心，北京 100094；2. 中国科学院大学星际航行学院，北京 101408）

摘 要：中国空间站巡天空间望远镜（CSST）是我国载人航天工程规划建设的旗舰级空间天文观测设施，具有大视场、高像质、宽波段等突出特点，并具备在轨维护升级能力。有效载荷运控中心（POAC）在任务运行过程中需要对巡天相机的观测图像进行快速分析，及时获取光学系统的像质、合焦状态及CCD级中心投影偏差等关键信息，以保障科学观测的有效实施。针对上述工程需求，本文提出了面向巡天相机单CCD图像的快速评判方法。该方法基于天体源检测与恒星星表匹配，建立像素坐标与天球坐标的对应关系，实现像质统计、合焦判别和CCD级中心投影偏差计算。本文以CSST巡天相机多色成像仿真图像为主，对完整流程进行验证。对于无缝光谱图像，当前主要开展候选0级像搜索和PSF参数测量工作，相关结果作为运控现场的辅助参考。利用CSST巡天相机仿真数据、哈勃空间望远镜和丽江2.4 m望远镜观测数据的测试结果表明，该方法能够快速、稳定地输出关键评判指标。

关键词：中国空间站巡天空间望远镜；天文图像处理；成像质量监测；星表匹配
中图分类号：V19 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5825(2026)03-0359-15

Rapid Assessment Method for the Main Survey Camera Images of the Chinese Space-station Survey Telescope

CHEN Yongjie[1]， GUO Bifeng[1]， WANG Hongfei[1, 2*]，
LI Xinfeng[1]， WU Peng[1]， LIANG Ji[1]
(1. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. School of Space Exploration, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: The Chinese Space-station Survey Telescope (CSST) is a flagship space-based astronomical observatory planned and developed under the China Manned Space Program. It is characterized by a wide field of view, high image quality, broad wavelength coverage, and the ability for on-orbit maintenance and upgrades. During mission operations, the Payload Operation and Application Center must rapidly analyze the images acquired by the main survey camera to derive key diagnostic information on the optical system—including image quality, focus status, and charge-coupled device (CCD)-center projection offset—thereby ensuring the effective implementation of scientific observations. To meet these engineering requirements, this study proposes a rapid assessment method for single-CCD images of the main survey camera. By leveraging

收稿日期：2026-03-30； **修回日期：**2026-05-28
基金项目：空间应用创新行动项目（CSU-CXXD-PY-2025-005）
第一作者：陈永杰，男，博士，助理研究员，研究方向为天文图像处理与活动星系核宽线区结构。E-mail：chenyj@csu.ac.cn
*** 通信作者：**王红飞，男，博士，研究员/中国科学院大学岗位教授，研究方向为智能任务规划。E-mail：whf@csu.ac.cn
引用格式：陈永杰，郭碧峰，王红飞，等. 中国空间站巡天空间望远镜巡天相机图像快速评判方法及验证[J]. 载人航天，2026，32. Chen Y J，Guo B F，Wang H F，et al. Rapid assessment method for the main survey camera images of the Chinese Space-station Survey Telescope[J]. MANNED SPACEFLIGHT，2026，32.

astronomical source detection and stellar catalog matching, the method establishes a correspondence between pixel and celestial coordinates, enabling image quality assessment, focus evaluation, and CCD-center projection offset calculation. The complete workflow is primarily validated using simulated multiband imaging data from the CSST main survey camera. For slitless spectroscopic images, the study focuses on the detection of candidate zeroth-order sources and the measurement of point spread function parameters, providing vital auxiliary data to support on-site operations. Tests using simulated data from the CSST main survey camera, together with observational data from the Hubble Space Telescope and the Lijiang 2.4 m Telescope, demonstrate that the proposed method can rapidly and stably output key assessment parameters.
Key words: CSST; astronomical image processing; image quality monitoring; stellar catalog matching

1 引言

近几十年来，宇宙学研究经历了巨大的转变。伴随观测设备分辨率与灵敏度的不断提升、数据处理与统计推断方法的日益成熟，以及理论模型体系的系统化发展，宇宙学已从早期以理论假设与定性分析为主的学科，演进为一门以高精度观测数据为核心支撑的定量科学。上述转变标志着“精密宇宙学”时代的到来，同时也对观测数据的准确性、长期稳定性以及系统误差的严格控制提出了更为严苛的要求。宇宙微波背景辐射温度涨落的高分辨率测量、大尺度结构分布的统计分析、Ia 型超新星对宇宙加速膨胀的观测证据，以及宇宙结构形成过程的精细刻画，这些研究使得关键宇宙学参数能够在严格的误差预算框架下得到高精度约束[1,2]。在这一进程中，ΛCDM 模型逐渐确立为标准宇宙学框架，成为解释宇宙加速膨胀、大尺度结构演化及早期宇宙物理过程的理论基础。

在精密宇宙学背景下，第四代巡天任务被视为下一代大规模宇宙观测计划的代表，其目标是在更大天区范围内实现更高精度的成像与光谱测量，以进一步减少宇宙学参数的不确定度并检验现有理论框架。典型的第四代空间巡天任务包括欧几里得空间巡天任务（Euclid）、罗曼空间望远镜（Nancy Grace Roman Space Telescope）以及中国空间站巡天空间望远镜（Chinese Space-station Survey Telescope，CSST）。其中，CSST 作为我国新一代空间巡天设施，旨在开展覆盖近紫外至近红外波段的高空间分辨率成像与低分辨率光谱巡天观测。其设计目标是为宇宙学、星系形成与演化、恒星天体物理以及系外行星等研究领域提供高精度、大样本的观测数据[3]。与传统小视场空间成像系统相比，大视场拼接焦面结构在显著提升巡天效率的同时，也对成像系统的稳定性等提出了更为严格的要求。例如，焦面热变形或装调漂移均可能导致空间依赖的像质退化。因此，在巡天任务的长期运行过程中，持续、定量地监测成像性能与指向状态，对于保障科学目标的实现具有重要意义。

为支撑 CSST 在轨观测任务的安全、有序与高效开展，中国科学院空间应用工程与技术中心有效载荷运控中心（Payload Operation and Application Center，POAC）承担了载人航天任务有效载荷在轨运行的管理职能。作为 CSST 的第一飞控现场，POAC 负责天文观测任务的组织与管理、任务规划与运行控制、图像快视快判、异常检测与健康管理，以及现场指挥协调与调度等工作。围绕上述任务需求，CSST 有效载荷运行管理系统构建了包括前端通信与信息交互、任务规划与操作控制、指向计算与跟踪引导、分布式实时数据处理、综合显示与图像快视、天文图像快速评判以及光学设施健康管理等功能子系统，各子系统协同运行，以保障系统稳定性并提升观测数据质量。

在该运行体系中，图像快速评判模块直接面向单帧观测图像，是连接在轨观测数据与运控决策的重要环节。其核心任务是在有限时间内对成像质量与合焦和指向状态进行定量分析，为运控人员提供明确的、可追溯的状态判据。因此，建立一套稳定、可重复且具备准实时处理能力的图像级性能评估方法，是支撑 CSST 在轨运行监测与工程决策的重要技术基础。

基于上述需求，本文围绕 CSST 巡天相机单 CCD（Charge Coupled Device，电荷耦合器件）图像，构建并验证了一套像质、合焦状态与 CCD 级中心投影偏差的快速评判指标测量方法。该方

法面向运控现场快速评判场景设计，强调单帧图像条件下的处理效率与结果稳定性，可为巡天相机在轨运行监测与运控决策提供技术支撑。

2 天文图像快速评判功能块及流程概述

CSST 巡天相机主焦面使用的视场大小为 1.1°×1.2°，由 30 片 CCD 探测器拼接而成。其中，18 片探测器用于实现 NUV、u、g、r、i、z 和 y 共 7 个波段的多色成像观测。12 片用于无缝光谱观测，分别搭载 GU、GV 和 GI 共 3 种类型的光栅。在巡天相机视场两侧安装了拓展焦面、短波红外组件，以及主光机的导星仪与波前传感器。本文的快速评判流程以巡天相机的多色成像单 CCD 图像为主要处理对象，围绕图像预处理、候选星检测、星表匹配、像质参数测量、合焦状态判别和 CCD 级中心投影偏差计算展开。

在运控系统中，快速评判流程位于分布式实时数据处理、综合显示与图像快视以及光学设施健康管理等功能之间。其上游输入包括实时接收并解析的巡天相机图像数据、观测规划文件中的目标编号、曝光时间和规划指向等信息，以及科学辅助数据中的曝光时刻、姿态、载荷状态和指向计算结果等。快速评判模块利用上述信息完成图像可用性检查、候选星识别、星表匹配和快判指标计算。输出结果包括图像异常标记、像质参数、合焦判别结果、CCD 级中心投影偏差和处理状态等，写入快速评判数据库并推送至前端界面，供运控人员开展现场复核，同时为光学设施健康管理、异常检测和长期趋势分析提供输入。

图 1 展示了天文图像快速评判的整体流程。流程开始阶段为图像数据丢包检测与图像异常检测，用于判断输入图像的完整性和可用性。当严重丢包或异常可能影响像质等指标计算的可靠性时，相关图像将被标记或剔除，以避免不可靠数据进入后续快判流程。图像异常检测模块主要用于保障输入数据的可用性，其具体实现方法与判定规则不是本文重点，后续分析均基于通过质量检查的有效图像数据。

图像预处理模块对图像执行前扫/过扫描扣除（prescan/overscan）及有效区域裁剪，生成仅含科学成像区的数据。星点识别与恒星筛选模块基于预处理后的图像进行候选源检测，并通过星表匹配获得可用于像质统计的恒星样本及其像平面位置。像质、合焦与 CCD 级中心投影偏差计算模块在匹配恒星样本的基础上统计 PSF 相关参数，并结合 WCS 解算结果计算 CCD 中心投影位置与规划位置之间的几何差异。最终，快速评判结果汇总模块统一输出像质评判结果、合焦判别结果、CCD 级中心投影偏差以及异常检测与数据质量标记信息。

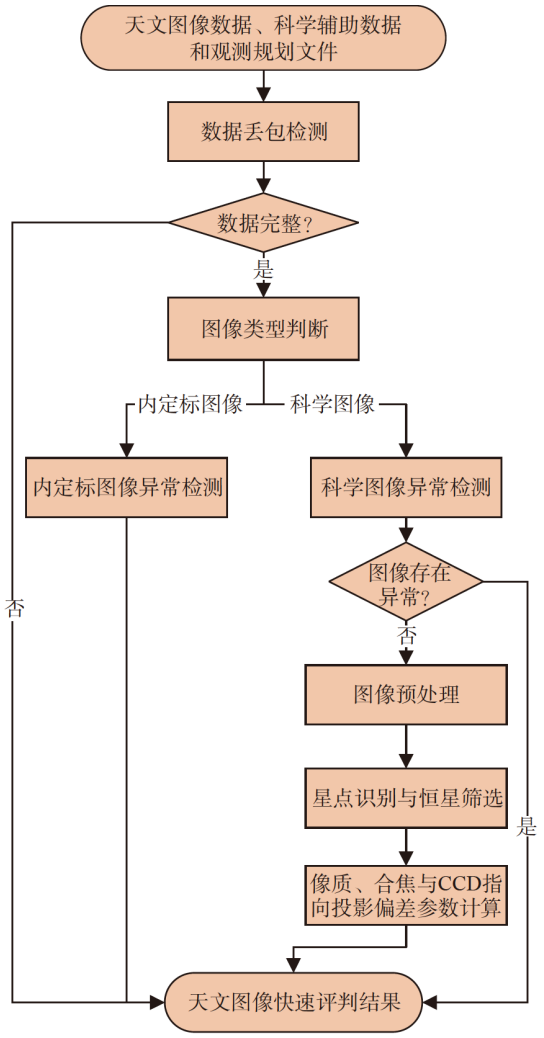


图 1 天文图像快速评判流程

Fig. 1 Flowchart for the rapid evaluation of astronomical image quality

3 天文图像快速评判指标测量方法

本章将详细介绍天文图像快速评判主流程中图像预处理、星点识别与恒星筛选，以及像质、合焦和 CCD 级中心投影偏差参数计算的具体处理细节。

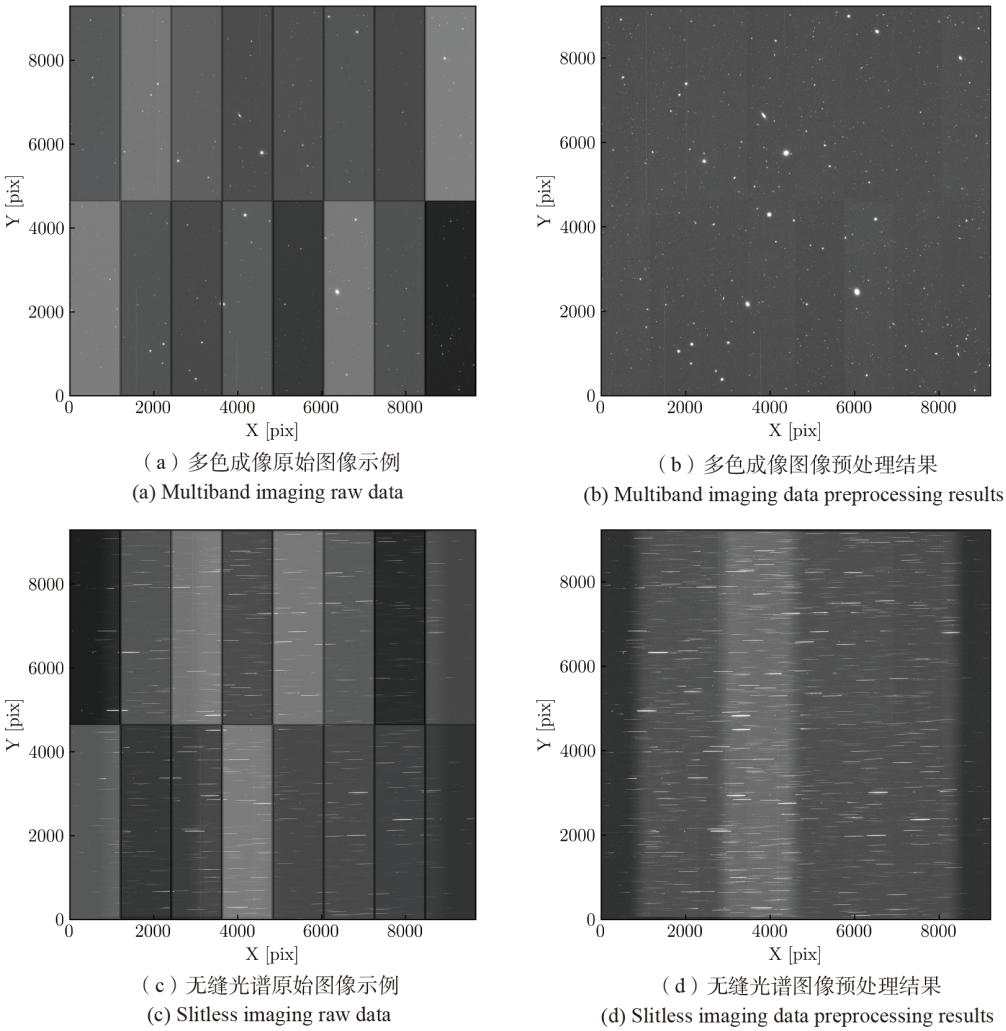
3.1 图像预处理

通常情况下，为了扣除图像中的仪器效应，

对科学观测图像的预处理包含前扫/过扫描扣除、本底场与暗流扣除以及平场校正等步骤。然而，在 CSST 任务运控现场的快速评判场景中，处理流程需满足较高的时效性要求，其主要目标是支撑在轨状态监控和运控决策，而非生成科学级数据产品。因此，在本文流程中，图像预处理仅保留前扫/过扫描扣除以及有效成像区域裁剪两个步骤。

由于 CSST 巡天任务所使用的探测器采用多通道读出结构设计，不同读出通道之间在电压偏置、读出噪声和增益等方面存在差异，前扫与过扫描扣除采用单通道独立处理方式。针对每个读出通道，利用对应的前扫描或过扫描区域沿读出方向构建一维参考信号，并采用 Savitzky-Golay 滤波对参考信号进行平滑以抑制随机噪声，随后从通道成像区域中统一扣除该参考信号，以消除读出偏置的影响。

完成扫描扣除后，根据探测器几何布局裁剪出有效成像区域，去除非成像像元，仅保留用于后续候选星搜索和参数计算的有效成像数据。图 2 展示了处理前后的图像对比结果，其中（a）（c）为原始图像，（b）（d）为处理后的图像（图像由主巡天图像仿真软件产生，参见第 4.1 节）。可以看出，不同读出通道间的偏置水平均已校正至同一水平。扫描校正后，图像中仍可能存在通道间的结构差异。这类差异主要源于暗电流差异、增益差异及读出噪声水平的不一致。由于本文后续像质与指向参数的计算基于点源的局部结构特征，并在孔径范围内进行背景重估与扣除，上述残余差异不会对半高全宽（Full Width at Half Maximum，



（a）多色成像原始图像示例
(a) Multiband imaging raw data

（b）多色成像图像预处理结果
(b) Multiband imaging data preprocessing results

（c）无缝光谱原始图像示例
(c) Slitless imaging raw data

（d）无缝光谱图像预处理结果
(d) Slitless imaging data preprocessing results

图 2 图像预处理结果
Fig. 2 Data preprocessing results

FWHM）、80%能量集中度半径（Radius of 80% Encircled Energy，REE80）等统计指标产生显著的系统性影响，仅可能在统计误差层面引入微小差异。

3.2 星点识别

考虑到在轨观测图像中宇宙线、噪声以及无缝光谱等信号对星点和无缝光谱 0 级像检测的显著干扰，在星点搜索前需对图像进行宇宙线（Cosmic Ray，CR）检测，并在后续处理中对异常目标加以剔除，以降低恒星误检率并提高像质参数测量的可靠性。

3.2.1 宇宙线事件检测

宇宙线事件是导致恒星误检和像质参数异常的重要干扰因素。传统的宇宙线识别方法主要包括基于拉普拉斯边缘增强的 AstroScrappy 方法[4]，以及基于多帧图像配准与堆叠的 AstroDrizzle 方法[5]。前者在地面望远镜数据处理中得到广泛应用，而后者已成熟应用于哈勃空间望远镜（Hubble Space Telescope，HST）和詹姆斯·韦布空间望远镜（James Webb Space Telescope，JWST）等空间天文任务中。然而，AstroScrappy 方法在高分辨空间望远镜单帧观测数据中的宇宙线识别准确率相对较低[6,7]，针对 CSST 巡天探测器 9 K × 9 K 的大图像处理速度慢，且通常依赖于完成偏置、暗流和平场校正且具备精确噪声估计的输入数据[4]。AstroDrizzle 方法则需要多帧观测数据进行联合处理[5]，难以直接应用于 CSST 巡天任务中以单帧快速评判为主的应用场景。

鉴于在轨快速评判对单帧适用性和处理效率的要求，本文在快速评判流程中引入了基于深度学习的宇宙线探测方法 DeepCR[7]。该方法基于卷积神经网络对天文图像进行逐像元分类，能够有效识别单帧观测图像中形态复杂、尺度多样的宇宙线事件。尤其在密集星场或背景起伏较大的条件下，DeepCR 对细长型和非规则形态宇宙线具有较高的检出能力。同时，该方法不依赖于显式的形态假设，对成像条件变化具有较好的适应性，适用于在轨观测环境下的宇宙线识别任务。目前，基于 DeepCR 的宇宙线检测已经广泛应用于暗能量巡天（Dark Energy Camera）[8]和欧几里得宽视场巡天等数据处理流水线[9]。在未来的 CSST 巡天任务中，DeepCR 方法亦将用于探测宇宙线事件与观测天体混叠的情况，从而降低宇宙线对观测数据的影响，提高测光精度[6]。

本文中，DeepCR 方法所使用的训练数据集基于 CSST 仿真数据构建，仿真数据由 CSST 主巡天仿真软件生成[10]。训练集构建步骤如下：

1）将仿真的全帧宇宙线图像进行二值化，并通过连通域分析提取宇宙线连通域列表；

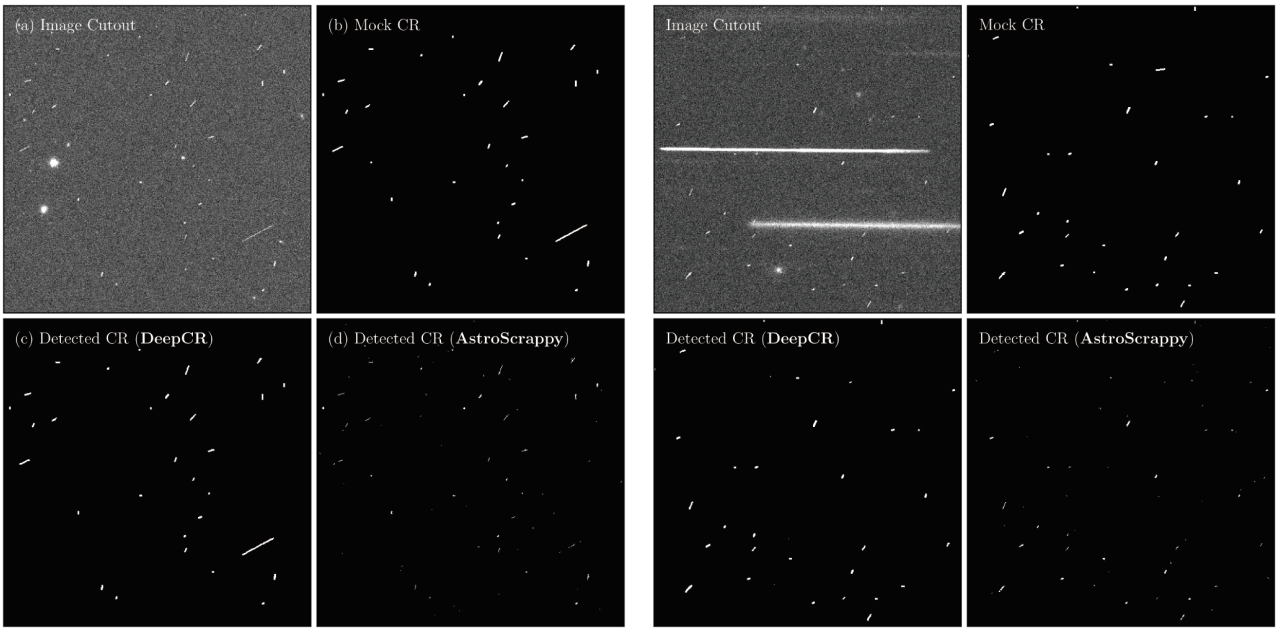
2）从连通域列表中随机选取宇宙线事件的中心坐标，以该坐标为中心，对宇宙线二值图像及对应的预处理图像进行裁剪，得到尺寸为 256 pix × 256 pix 的子图像样本；

3）去除宇宙线事件在图像中占比 0.2%（约 130 pix）的样本，以保证训练样本的有效性；

4）对样本中的图像进行 Z-Score 归一化，以统一特征尺度，从而提高机器学习模型的收敛速度和稳定性。

在上述过程中，本文共使用 180 个图像集作为训练数据，其中包括多色成像与无缝光谱共 30 个探测器的数据，每个探测器包含 6 个图像集。此外，为避免训练样本与测试样本重叠导致模型性能被高估，本文按全帧图像集划分训练集、验证集和测试集，不同数据集之间不共享同一幅全帧仿真图像及其裁剪子图像。训练集用于 DeepCR 模型参数学习，验证集用于模型参数选择和训练过程监控，测试集仅用于最终宇宙线检测性能评估。在 CSST 进入稳定运行阶段后，可利用固定天区多次连续曝光获得的实测图像构建真实宇宙线样本，对基于仿真数据训练的模型进行再验证。若实测数据评估表明模型性能不能满足快判需求，可基于在轨样本对模型进行微调或重新训练，并经独立测试后更新快判系统中的宇宙线识别模型。

图 3（a）（b）给出了基于仿真数据训练得到的 DeepCR 模型在 CSST 多色成像 u 波段和无缝光谱 I 段上的宇宙线检测结果示例。为方便对比分析，图 3（a）（b）的右下图给出了 AstroScrappy 方法的检测结果。对从全帧图像中随机选取的 512 pix × 512 pix 子图像块进行对比可见，基于深度学习的宇宙线检测方法 DeepCR 在多色成像和无缝光谱观测图像中，能够更准确识别宇宙线事件的位置和形态。在仿真测试样本中，DeepCR 在 CSST 多色成像数据上的宇宙线识别准确率约为 92%，较 AstroScrappy 提升约 20 个百分点。该结



（a）多色成像 u 波段图像宇宙线检测比较
(a) U-band image cosmic ray detection comparison

（b）无缝光谱 GI 波段图像宇宙线检测比较
(b) GI-band image cosmic ray detection comparison

图 3 宇宙线检测结果
Fig. 3 Results of cosmic ray detection

果基于仿真数据获得，其在真实在轨数据中的适用性仍需结合实测样本进一步验证。

3.2.2 星像搜索

在完成宇宙线检测并生成相应掩码后，候选星搜索在掩码约束下进行，具体计算过程如下：

1）对图像背景进行估计与扣除，以降低大尺度背景结构（见图 2 无缝光谱图像，其大尺度结构来自背景天光色散与两片光栅色散的叠加）和噪声起伏对恒星检测阈值的影响。本文采用中值平滑与 σ 迭代剪裁相结合的背景估计方法，即对经过扫描扣除的图像进行二维中值平滑，以去除大尺度背景结构（主巡天观测图像的平滑窗口大小设为 128 pix×128 pix）。在此基础上，对图像进行 σ 迭代剪裁，剔除偏离背景均值 3 σ 的像元，以降低恒星、星系和异常像元对背景估计和后续检测过程的影响。

2）对图像进行二值化处理，以提取具有显著信噪比特征的信号。二值化阈值根据背景噪声水平确定，本文采用 5 σ 背景阈值生成二值化图像。

3）对二值图像进行连通域分析，以识别空间上相互独立的候选目标区域，并通过连通域面积约束去除由噪声引起的小尺度虚假目标（面积小于 3 pix）以及明显偏离点源特征的大尺度延展目标源（如邻近星系等，面积大于 500 pix）。同时，通过计算候选目标的形态参数，即长轴和短轴之比 R，对明显偏离点源形态的目标（$R > 5$）进行剔除，从而有效去除坏像列及无缝光谱等信号。

经上述步骤处理后保留下来的目标作为候选恒星。上述面积、信噪比和形态阈值是在巡天相机仿真图像测试的基础上，结合典型星像尺度、背景噪声水平以及快速评判优先选取高信噪比点源样本的需求确定的经验参数。对于密集星场、复杂背景和无缝光谱图像，源混叠、背景起伏及色散条带可能增加误检或漏检风险，因此后续像质统计不直接使用全部候选源，而以后续星表匹配后的孤立、高信噪比恒星样本为准。此外，上述步骤中的背景估计、σ 迭代剪裁、二值化和连通域筛选仅用于候选星检测和候选目标区域确定，不直接参与后续 FWHM、REE80 和椭率等星像轮廓参数测量。后续像质参数测量基于完成前扫/过扫描扣除和有效区域裁剪后的图像，在候选星局部子图像内重新估计背景后计算得到。

4）在获得候选星点集合后，对其像平面位置与亮度信息进行定量测量。星点位置采用亮度加

权质心算法进行估计。质心坐标（x_c，y_c）的定义见式（1）。

$$x_c=\frac{\sum_{x,y}xI(x,y)}{A},\ y_c=\frac{\sum_{x,y}yI(x,y)}{A} \tag{1}$$

式中，$A=\sum_{x,y}I(x,y)$，$I(x,y)$为扫描扣除后的像元强度，x和y为像元的像素坐标。同时，本文通过使用孔径测光方法，测量每个星点的累积电子数（即星点的辐射强度），采用的测光孔径半径为5 pix。所得电子计数数值用于对候选星按亮度进行排序，并在后续分析中优先选取亮度较高（高信噪比）的恒星样本。

3.3 恒星筛选

恒星在空间尺度上可近似视为点源，其成像形态主要由光学系统的点扩散函数（PSF）决定，能够直接反映光学系统的成像性能和合焦状态。相比之下，星系等延展天体具有固有的空间结构，其形态特征受自身形成与演化过程的影响显著，通常表现为旋臂、棒状或其他复杂结构，观测到的成像形态由天体自身结构与光学系统效应共同决定，难以直接表征光学系统的成像性能。如果将星系等延展天体纳入后续像质等测量分析过程，容易引入与光学系统无关的形态变化，导致测量结果弥散增大，从而降低对望远镜成像质量和合焦状态监测的可靠性。然而，由于3.2.2小节所述的自动搜星过程中难以对候选目标的天体类型进行精确判别，因此需要结合星表对候选星点进行进一步筛选。

此外，在巡天相机的无缝光谱设计中，由于CSST单片CCD探测器面积较大，若在整片CCD上覆盖单块光栅会影响成像像质，因此采用了2块光栅的设计方案。由于色散过程的复杂性，该设计使得同一CCD平面上的0级像无法通过星表匹配实现恒星筛选及像质、合焦等参数的准确计算。本文暂不对无缝光谱图像进行星表匹配恒星筛选，而是保留星点识别结果中亮度排名前200的孤立候选源，计算其0级像PSF参数，用于观测辅助参考。

3.3.1 星表匹配方法概述

为对候选星点的天体类型进行进一步判别，并建立CCD像平面与天球坐标之间的对应关系，需要将CCD平面上提取的星点与参考星表进行匹配，从而确定星表中恒星在CCD平面的具体位置。当前应用较为广泛的经典星表匹配方法主要包括等边三角形匹配法和相似三角形匹配法等[11-13]。这类方法通常通过构造由三颗恒星组成的几何图形，并利用其在平移、旋转和尺度变换下的不变或近似不变特性实现图像与星表之间的匹配。然而，这类方法由于仅使用3个角距作为匹配特征，可能会出现大量冗余的匹配结果，从而导致匹配的精度和准确率下降。在实际应用中，该类方法对初始指向误差、星点数量等较为敏感，当观测图像中存在恒星数量不足、星点漏检或错检较多等情况时，其匹配成功率和稳定性往往明显降低。此外，在巡天观测和在轨快速评判场景下，图像的指向、比例尺和取向角可能存在较大不确定性，进一步增加了传统三角形匹配法的应用难度。

针对上述问题，本文采用基于Astrometry.net的星表匹配流程来实现候选星点与星表的匹配。针对CSST巡天相机的快速评判需求，本文对索引星表构建、候选星均匀化策略和求解调用参数进行了定制化处理。Astrometry.net方法并不直接依赖单颗恒星的位置或亮度信息，而是从候选恒星集合中构建由多颗恒星组成的几何图形（通常为四元组，即quads），并利用这些几何图形在仿射变换下保持不变的几何特征（如边长比、角度关系等）作为匹配不变量。通过将观测图像中提取的几何特征与预先构建的星表索引进行比对，系统能够在大参数空间内快速搜索到与观测图像一致的天区，从而建立图像像平面坐标与天球坐标之间的对应关系[14]。因此，采用Astrometry.net进行星表匹配，能够在保证匹配结果可靠性的同时，显著降低对初始指向信息及星点完备性的依赖。

3.3.2 索引星表构建与均匀化处理

在Astrometry.net的匹配框架中，索引星表中恒星的空间密度与亮度分布直接影响几何特征构建的规模及匹配解的稳定性。具体而言，在恒星高度密集的天区（如球状星团及其他密集星场，常被用作天体定标星场），大量恒星在有限视场内聚集，恒星像在CCD平面上相互混叠，导致候选星提取结果中容易出现位置偏移、漏检和错检等情况。在此条件下，若直接采用高密度星表构建索引，会导致可生成的多星几何组合数量急剧

增加，显著扩大匹配搜索空间，并提高几何特征相似和误匹配发生的概率；而若仅选取有限数量的亮星参与匹配（Astrometry.net 方法默认策略），则可能由于亮星在星团中心区域高度聚集〔见图 4（b）〕，或因亮星饱和引起位置测量偏差，从而导致匹配失败。

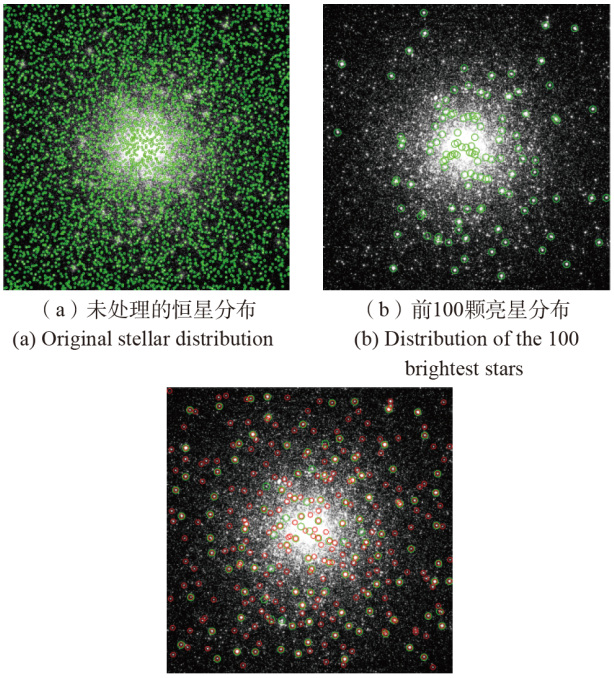
基于上述考虑，本文在 Astrometry.net 索引构建阶段使用基于亮度加权的星表均匀化处理方法。

首先，对 Gaia DR3 全天星表采用等面积空间分区方法[15]（Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelation，HEALPix），将全天星表划分为若干空间单元，在每个分区内独立进行恒星筛选与处理。本文采用 NSIDE = 256 的 HEALPix 分辨率，将全天划分为N_{pix} = 786432个等面积区域，每个区域对应的天区面积约为 0.053 deg^2。

其次，为抑制极端密集天区的源混叠与冗余组合，在球面上引入最小间距约束。即将恒星坐标转换为球面单位向量表示，并按星等由亮到暗依次处理，对每一颗恒星剔除其邻域内角距离小于 3″的较暗源。同时，为减弱 HEALPix 分区边界对处理结果的影响，在执行最小间距约束的同时纳入相邻 HEALPix 像素内的恒星作为候选集合。

最后，对各 HEALPix 像素区域内仍处于过密状态的恒星集合执行基于 Voronoi 图的迭代均匀化处理。以对应像素中心作为投影中心，对“中心像素及其邻域像素”组成的局部天区进行心射切面投影，并在投影平面上构建 Voronoi 图，计算每颗恒星对应的 Voronoi 单元面积。为在空间均匀性与亮星保护之间取得平衡，定义恒星的删除优先级为 Voronoi 单元面积与亮度权重的乘积，其中，亮度权重由恒星星等给出。通过多轮迭代删除优先级最低的恒星，逐步降低局部恒星密度，直至每个 HEALPix 区域内的恒星数量控制在数百颗的量级（本文取 100~300）。

图 4 展示了球状星团 NGC 7078 区域（视场为 0.041 deg^2，图像来自哈勃空间望远镜的观测）在星表均匀化处理前后的恒星分布情况。可以看出，在均匀化处理前，亮星在星团中心区域聚集〔见图 4（b）〕，参与索引构建的恒星主要集中于高密度核心区，外围天区采样不足。在采用上述星表均匀化处理后，星团中心区域的恒星密度得到有效抑制，恒星在整个视场内呈现出更加均匀的空间分布，同时亮星仍被优先保留〔见图 4（c）的绿色圈分布〕。



（a）未处理的恒星分布
(a) Original stellar distribution

（b）前100颗亮星分布
(b) Distribution of the 100 brightest stars

（c）星表均匀化后的恒星分布（绿）与匹配候选星分布（红）
(c) Stellar distribution following catalog homogenization (indicated in green) alongside matched candidate stars (indicated in red)

图 4 NGC 7078的恒星分布
Fig. 4 Stellar spatial distribution of NGC 7078

3.3.3 CCD平面匹配候选星点均匀化

在星表索引构建完成后，本文在 CCD 平面上的候选星点选择阶段采用了与索引星表构建相一致的筛选原则。具体而言，在完成候选星检测并剔除明显异常的目标后，对候选星点按亮度进行排序，并优先选取亮度较高、信噪比较高的恒星参与星表匹配。同时，在 CCD 平面上引入 Voronoi 图进行空间均匀化，避免候选星点在局部区域内高度聚集，减少由源混叠和位置测量不稳定引起的匹配失败。巡天相机单帧图像视场范围 ~0.034 deg^2，若候选星数量较多，则通过上述流程将用于匹配的星点数量筛选至不超过 300 颗。

图 4（c）给出了索引星表与 CCD 平面候选星在均匀化处理后的星点分布。可以看出，经过筛选后的星点在视场内分布更加均匀，避免了匹配星点在星团中心的聚集，有利于构建稳定的多星几何特征，提高星表匹配的成功率。

3.3.4 星表匹配流程与恒星筛选

使用 3.2.2 小节中获得的候选星点质心坐标作

为输入，构建 Astrometry.net 所需的星点列表，并调用预先生成的星表索引文件执行自动星表匹配。具体说来，在 Astrometry.net 的解算框架中，首先通过几何不变量匹配获得初始线性世界坐标系（World Coordinate System，WCS）解，并在验证阶段利用匹配星点对 WCS 参数进行拟合优化[14]。在使用像场畸变建模的情况下，引入 TAN-SIP 多项式模型来进一步拟合高阶畸变项。具体而言，在 TAN-SIP 模型中，像素坐标(x,y)首先转换为以参考像素 CRPIX 为原点的相对像素坐标(u,v)，即$(u,v)=(x-\mathrm{CRPIX1},y-\mathrm{CRPIX2})$。在考虑高阶光学畸变的情况下，引入 SIP 多项式对像素坐标进行畸变修正，其正向模型可用式（2）表示[16]。

$$\begin{pmatrix}\xi\\ \eta\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}CD_{11} & CD_{12}\\ CD_{21} & CD_{22}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}u+f(u,v)\\ v+g(u,v)\end{pmatrix} \tag{2}$$

式中，$\mathrm{CD_{ij}}$为线性变换矩阵，$f(u,v)$和$g(u,v)$为高阶多项式，定义见式（3）和式（4）。

$$f(u,v)=\sum_{p,q}A_{pq}u^{p}v^{q} \tag{3}$$

$$g(u,v)=\sum_{p,q}B_{pq}u^{p}v^{q} \tag{4}$$

式中，A_{pq}和B_{pq}为多项式系数，本文取$p+q=3$。所得(ξ,η)为切平面投影坐标，单位为(°)。

匹配成功后，输出观测图像的 WCS 解，即像平面与天球坐标之间的初步映射关系。在此基础上，进一步查询覆盖观测视场 1.5 倍范围的 Gaia DR3 星表，获取该天区内的参考恒星，并利用上述 WCS 解将其投影至 CCD 像平面。然后计算星表投影位置与候选星点质心之间的像素距离，当二者的距离小于 5 pix 时，判定其为同一恒星，从而建立 CCD 像平面星点与参考星表恒星之间的对应关系。对于 CSST 巡天相机 0.074 (″)/pix 的像元尺度，5 pix 匹配半径约对应 0.37″，可覆盖候选星质心误差和初始 WCS 残差，同时小于星表均匀化后典型邻近星间距，有助于降低误匹配概率。未与星表成功匹配的候选源可能包括低信噪比恒星、星系、宇宙线残留、无缝光谱信号或星表未覆盖目标。为保证后续统计结果的可靠性，本文不将其纳入 FWHM、REE80、椭率和 CCD 级中心投影偏差的计算。

索引星表在构建阶段采用的参考历元为 2016.0，与实际观测历元存在差异。恒星自行、视差和视向速度会使星表位置随时间变化，若直接采用原始历元坐标进行 WCS 求解，会给 CCD 中心投影偏差带来系统误差。为此，在获得 CCD 平面匹配星列表及其 Gaia DR3 对应源后，本文根据星表给出的自行、视差和径向速度参数，将参考星表坐标传播至观测历元，并基于传播后的星表位置重新开展 WCS 精修解算。此外，当前处理尚未考虑由航天器瞬时位置和速度引起的光行差等视位置改正，也未考虑投影切点与光轴中心不重合导致的投影误差效应。在本文的仿真数据验证和单片 CCD 局部 WCS 求解上，这类改正主要对应近似公共的坐标偏移，对 FWHM、REE80、椭率和像素比例尺等局部像质统计影响较小。但在真实的在轨应用中，CCD 中心投影位置需要与规划位置进行绝对比较，光行差等视位置改正会影响两者的一致性。后续在轨处理将结合曝光时刻、曝光时间、航天器轨道、姿态辅助数据和任务规划指向，把参考星表坐标与规划指向统一到同一观测参考框架后，再计算 CCD 级中心投影偏差。

3.4 像质、合焦和指向偏差测量

3.4.1 像质与合焦参数测量

本文用于评估像质和合焦的指标分别为 PSF 的 FWHM、REE80、椭率和像素比例尺。其中，FWHM 与 REE80 主要反映光学系统的焦面成像质量与波前误差水平；椭率用于描述 PSF 的各向异性形变，能够反映像差、装调偏差及跟踪误差等效应；像素比例尺则反映焦距变化和光学系统的尺度稳定性。

1）FWHM 拟合。恒星星点的 PSF 形状可近似为二维高斯分布描述，见式（5）。

$$f(x,y)=\alpha\exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right]+b_0 \tag{5}$$

式中，x_0和y_0为高斯分布中心（星点质心），α为高斯分布幅值，σ_x和σ_y为两个方向的标准差，b_0为拟合背景。因此，可以计算两个方向 FWHM 的几何平均值，见式（6）。

$$\mathrm{FWHM}=\left(\mathrm{FWHM}_x\times\mathrm{FWHM}_y\right)^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

式中，$\mathrm{FWHM}_x=2.355\sigma_x$，$\mathrm{FWHM}_y=2.355\sigma_y$。

2）REE80 测量。对每颗恒星，以式（1）获得的质心为中心，采用半径为R_1像素的圆形孔径计算孔径内灰度总和 S_1。为消除局域背景影响，在半径R_2-R_3像素的同心圆环区域内估计单位面积背景灰度中值B_m，并进行背景扣除，得到净通量，见式（7）。

$$F_1 = S_1 - \pi B_{\mathrm{m}} R_1^2 \tag{7}$$

在半径区间（0, R_1）内计算不同半径对应的累积通量$F(r)$，构建生长曲线$F(r)/F_1$。定义满足$F(r)=0.8F_1$ 时对应的半径为 REE80，单位为 pix（像素）。考虑到 REE80 测量对干扰信号的敏感性，在计算前，对每个用于计算的恒星子图像块（20 pix × 20 pix），已预先剔除宇宙线及邻近星点等异常信号。对于 CSST 仿真图像的测光孔径，本文暂取$(R_1,R_2,R_3)=(9,11,18)$ pix。

3）椭率计算。利用点扩散函数面亮度的二阶矩，每颗恒星的两个椭率分量定义见式（8）和式（9）。

$$e_1 = \frac{Q_{xx}-Q_{yy}}{Q_{xx}+Q_{xy}} \tag{8}$$

$$e_2 = \frac{2Q_{xy}}{Q_{xx}+Q_{xy}} \tag{9}$$

式中，Q_{xx}、Q_{yy}和Q_{xy}的定义分别见式（10）~（12）。

$$Q_{xx} = \frac{\sum_{x,y}(x-x_c)^2 I(x,y)}{A} \tag{10}$$

$$Q_{yy} = \frac{\sum_{x,y}(y-y_c)^2 I(x,y)}{A} \tag{11}$$

$$Q_{xy} = \frac{\sum_{x,y}(x-x_c)(y-y_c) I(x,y)}{A} \tag{12}$$

式中，参数x_c、y_c和A的定义见式（1）。结合每个星像的椭率分量，其椭率可计算为$e=\sqrt{e_1^2+e_2^2}$。

4）像素比例尺与旋转角。在 3.3.4 小节中，通过星表匹配获得了观测图像的 WCS 解。根据式（2），像素比例尺（s_x, s_y）在两个像素轴的计算公式见式（13）。

$$s_x = \sqrt{\mathrm{CD}_{11}^2+\mathrm{CD}_{21}^2},\ s_y = \sqrt{\mathrm{CD}_{12}^2+\mathrm{CD}_{22}^2} \tag{13}$$

平均比例尺为$s=(s_x+s_y)/2$。此时，图像的旋转角定义为像素 x 轴相对于天球东向（赤经增大方向）的旋转角，其表达式如式（14）所示。

$$\theta_{\mathrm{rot}} = \tan^{-1}\frac{\mathrm{CD}_{21}}{\mathrm{CD}_{11}} \tag{14}$$

3.4.2 CCD级中心投影偏差测量

CCD 级中心投影偏差用于描述单片 CCD 中心天球投影位置与规划 CCD 中心位置之间的几何差异。对于单帧观测图像，CCD 中心位置定义为有效成像区域几何中心像素在天球坐标系中的对应位置。将图像中心像素坐标代入 3.3.4 小节所获得的 WCS 映射关系，可得到对应的天球坐标(α_0,δ_0)。假设给定当前 CCD 中心坐标的规划指向(α_p,δ_p)，在小角度近似下，CCD 级中心投影偏差可通过式（15）计算。

$$\Delta\theta = 3600\sqrt{(\Delta\alpha\cos\delta_0)^2+\Delta\delta^2}\ \mathrm{arcsec} \tag{15}$$

式中，$\Delta\alpha=\alpha_p-\alpha_0$，$\Delta\delta=\delta_p-\delta_0$。

本文所定义的 CCD 级中心投影偏差反映的是单片 CCD 局部 WCS 解算得到的中心投影位置与规划位置之间的几何偏差，而非望远镜姿态控制系统的真实指向误差。在未进行焦面级统一畸变标定前，该量包含焦面畸变、CCD 安装误差和局部 WCS 解算残差等影响。在 CSST 在轨运行阶段，可通过焦面级天体测量标定建立焦面几何布局模型及各 CCD 的相对安装参数，将单 CCD 局部结果统一转换至焦面光轴参考系后，再用于系统级指向状态评估。

4 方法验证

4.1 CSST主巡天仿真数据

本文采用 CSST Cycle 9（C9）仿真图像作为测试输入。该仿真数据基于 CSST 主巡天模拟框架生成，结合望远镜光学模型、探测器响应、噪声模型及观测策略，进行像素级图像模拟，能够较为真实地反映在轨观测条件下的成像特性。相关仿真流程与数据构建细节详见文献[10]。由于 C9 恒星星表完全基于 TRILEGAL 银河系模型生成，为验证快速评判全流程的适用性，本文按照 3.3.2 小节的方法对输入星表进行了均匀化重构，用于构建测试数据集。

4.1.1 多色成像图像评判参数测量

本文处理全流程使用的测试环境为配置了

Intel（R） Core（TM） i9-14900HX 和 64GB 内存的 Ubuntu 22.04LTS 操作系统。测试过程中启用 DeepCR 宇宙线检测模块，DeepCR 推理采用 GPU 计算，星表匹配调用本地 Astrometry.net 索引文件。在此环境中，单幅 9 K × 9 K 的图像处理时间平均约为 36 s，其中，宇宙线检测和搜星与星表匹配共耗时 12 s，满足快判系统的时效性。每幅图像参与星表匹配的候选星经均匀化后控制在 300 颗以内，最终用于像质统计的恒星数量随天区恒星密度和图像信噪比变化。统计结果为 18 片多色成像 CCD 图像各重复运行 6 次、共 108 次处理的平均值。

图 5 给出了随机选取的多色成像 g 波段搜星结果局部示例，其中红色圆圈表示本文方法检测得到的恒星，绿色圆圈表示仿真输入星表在 CCD 上对应的像素坐标。结果表明，本文方法能够准确识别具有足够信噪比、可用于成像质量指标计算的恒星点源。未被选中的目标主要为星等较暗、信噪比较低的恒星源。

表 1 列出了 18 片多色成像仿真图像的像质、合焦和 CCD 中心评判参数计算结果。结果显示，平均像素比例尺约为 0.0735 (″)/pix，与仿真输入值 0.074 (″)/pix 一致。各波段计算得到的 REE80 均小于 0.15″，与仿真设定的动态像质指标（≯0.15″）相符合[3,10]。这些结果表明，相关评判算法能够准确恢复仿真输入的成像参数。

需要注意的是，对于理想的高斯点扩散函数，高斯拟合得到的 FWHM 与 REE80 存在近似关系 FWHM≈1.31×REE80。然而，在本文结果中出现了 FWHM<REE80 的情况，与理想高斯模型预期不一致。这表明仿真图像中的点扩散函数偏离二维高斯轮廓，存在较为延展的翼部结构，从而导致包围能量半径相对增大。

表 1 中单片 CCD 中心投影偏差范围为 2″~13″。该量由单片 CCD 局部 WCS 解算得到，表示 CCD 中心天球投影位置与规划 CCD 中心位置之间的几何差异，并非望远镜整体姿态指向误差。结合仿真输入的焦面畸变模型分析可知，当前偏差主要来源于未引入焦面级统一畸变校正所导致的局部投影偏移，同时也可能包含 CCD 安装误差和局部 WCS 解算残差。图 6 显示，依据本文解算结果反演得到的恒星位置偏离矢量分布，其趋势和幅值与仿真输入的像场畸变矢量分布基本一致；在视场边缘 CCD 位置处，最大偏移量可达约 200 pix（约 14″）。因此，表 1 中的 CCD 中心投影偏差应作为单片 CCD 局部投影几何误差进行理解，后续需结合焦面级统一畸变模型和 CCD 相对安装参数，将各 CCD 结果转换至焦面光轴参考系后，再用于系统级指向状态的评估。

4.1.2 无缝光谱图像像质参数测量

CSST 无缝光谱采用双光栅色散设计（分别占 CCD 的 2/5 和 3/5 区域），两片光栅色散方向相反，在焦面上形成方向相反的光谱条纹结构。该设计在提升光谱覆盖连续性的同时，也显著增加了图像结构的复杂性。同时，色散像在空间上与其他天体源发生重叠的概率较高，且其形态明显

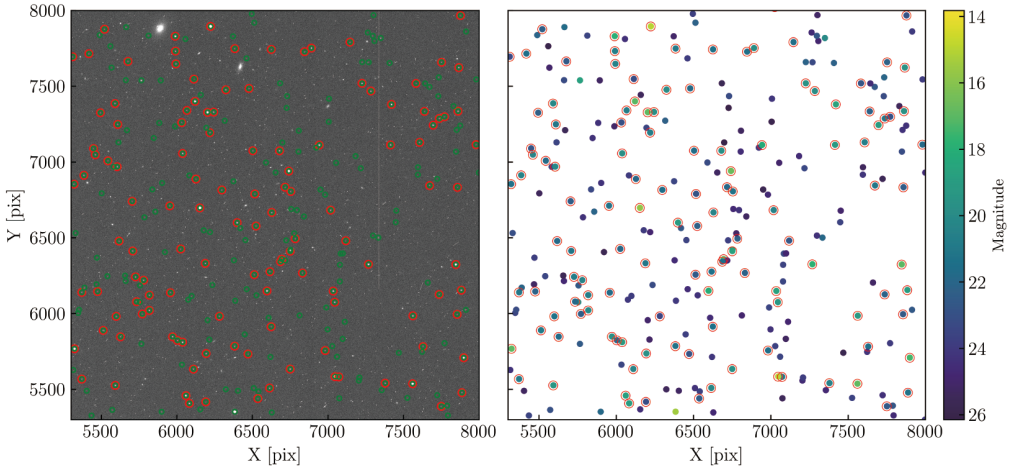


图 5 恒星搜索结果

Fig. 5 Representative stellar identification results

表 1 CSST 多色成像仿真图像像质、合焦与 CCD 级中心投影偏差参数计算结果

Table 1 Image quality, focus, and CCD-center projection offset parameters for CSST multiband simulated images

CCD编号	滤波片	RA/(°)	Decl/(°)	像素比例尺 /[(″)·pix^{-1}]	FWHM/(″)	REE80/(″)	椭率	取向角 /(°)	CCD中心投影偏差/(″)
06	y	302.37	−60.85	0.0736	0.124±0.027	0.132±0.039	0.19±0.17	−74.63	10.71
07	i	301.97	−60.80	0.0736	0.116±0.040	0.129±0.048	0.21±0.17	−74.44	7.69
08	g	301.56	−60.74	0.0735	0.107±0.041	0.124±0.056	0.24±0.20	−74.25	6.53
09	r	301.15	−60.69	0.0736	0.110±0.044	0.126±0.049	0.23±0.19	−73.90	7.90
11	z	302.48	−60.66	0.0735	0.121±0.021	0.130±0.031	0.19±0.17	−74.88	9.94
12	NUV	302.07	−60.61	0.0735	0.103±0.030	0.122±0.045	0.19±0.15	−74.61	5.58
13	NUV	301.67	−60.55	0.0735	0.105±0.034	0.126±0.055	0.20±0.16	−74.23	2.58
14	u	301.26	−60.50	0.0735	0.109±0.040	0.129±0.055	0.23±0.18	−73.97	5.65
15	y	300.86	−60.44	0.0735	0.124±0.016	0.135±0.032	0.20±0.16	−73.83	10.00
16	y	302.58	−60.47	0.0735	0.122±0.015	0.132±0.029	0.20±0.16	−74.99	10.53
17	u	302.18	−60.41	0.0735	0.100±0.024	0.121±0.039	0.20±0.19	−74.72	5.60
18	NUV	301.78	−60.36	0.0735	0.101±0.026	0.120±0.040	0.20±0.16	−74.42	2.35
19	NUV	301.38	−60.31	0.0735	0.105±0.034	0.126±0.054	0.22±0.17	−74.18	5.71
20	z	300.98	−60.25	0.0735	0.123±0.026	0.130±0.034	0.20±0.17	−73.89	10.61
22	r	302.29	−60.23	0.0735	0.106±0.030	0.122±0.042	0.23±0.18	−74.81	9.57
23	g	301.89	−60.17	0.0735	0.103±0.037	0.122±0.053	0.22±0.18	−74.39	7.72
24	i	301.49	−60.12	0.0734	0.114±0.034	0.126±0.048	0.21±0.17	−74.23	9.24
25	y	301.09	−60.06	0.0735	0.122±0.014	0.130±0.028	0.19±0.16	−73.94	13.36

注：（1）RA和Decl为本文解算的 CCD 中心对应的J2000天体坐标系下的赤经和赤纬；（2）FWHM 与 REE80 为单 CCD内所有匹配恒星样本的均值±标准差；（3）CCD 中心投影偏差为单片 CCD 局部 WCS 解算得到的中心天球投影位置与规划 CCD 中心位置之间的几何差异，包含焦面畸变、CCD 安装误差和局部 WCS 解算误差，不等同于望远镜整体指向误差。

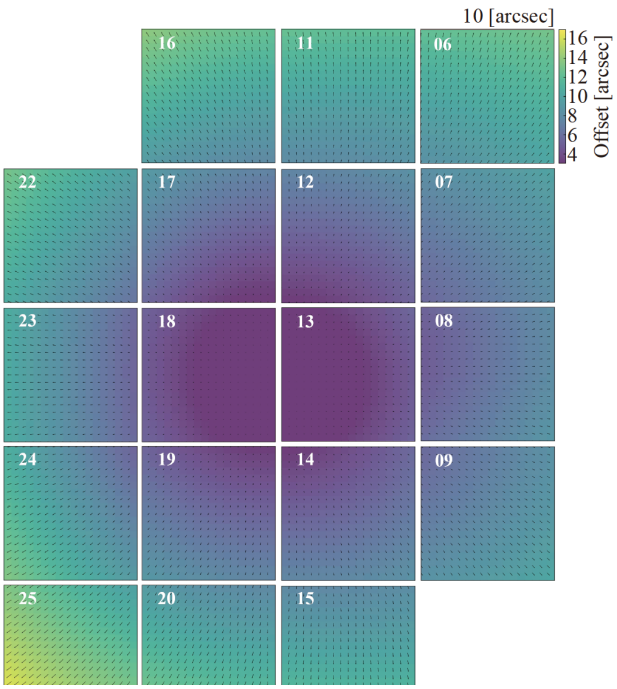


图 6 恒星位置偏离矢量分布

Fig. 6 Spatial distribution of stellar position offset vectors

偏离点源特征，使得基于点源模型的星表匹配、合焦计算和指向解算流程难以直接适用。因此，当前流程暂不对无缝光谱数据执行星表匹配筛选、合焦评判及指向参数计算。此外，由于无缝光谱图像中用于像质计算的天体源不可避免地受到星系混叠的影响，导致统计得到的 REE80 和 FWHM 整体偏大。考虑到上述因素，无缝光谱相关结果仅作为 POAC 运控现场的辅助参考，不作为精确量化评判依据。

图 7 展示了 GI 波段无缝光谱 0 级像的搜星结果及 REE80 的空间分布。可以看到，0 级像在视场右侧约 3/5 区域的像质整体优于左侧约 2/5 区域，表现出明显的空间不对称性。该分布特征与双光栅相对于探测器平面的几何配置具有一致性。像质差异可能与两片光栅与探测器之间存在的倾角有关，其中一片光栅的倾斜方向与光路方向一致，另一片则相反，从而导致在焦面上引入不同程度的 0 级像，成像质量退化。

4.2 HST观测数据

为验证本文提出的快速评判方法在真实观测数据中的适用性与稳定性，我们选取 HST 搭载的主成像仪器——宽视场通道（Advanced Camera for Surveys，ACS/WFC）的在轨观测图像作为测试数据。其中，ACS/WFC 相机单像素尺度约为 0.050 (″)/pix，单帧图像有效视场约为 202″ × 202″。在 F606W 等典型可见光滤光片下，其分辨率 REE80 好于 0.15″[17]，对应亚角秒级成像分辨率。

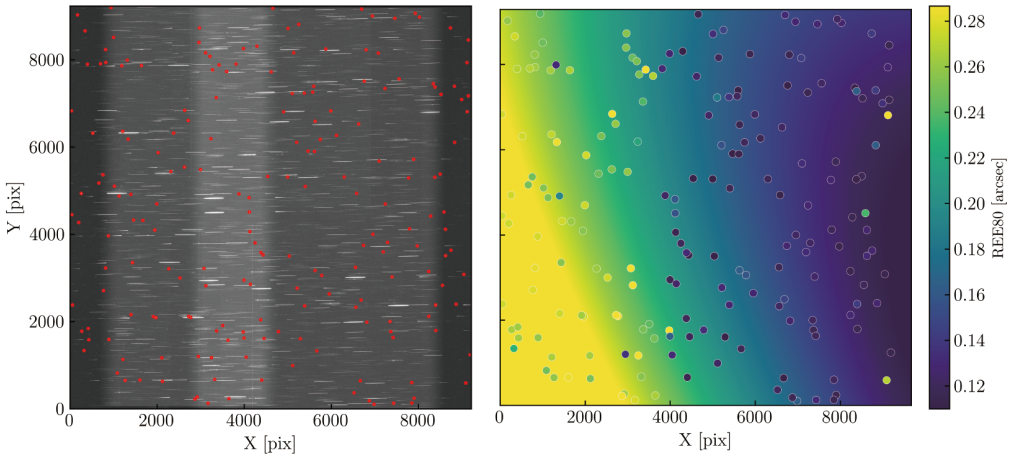


图 7　无缝光谱 0 级像搜索结果与 REE80空间分布

Fig. 7　Slitless spectroscopic zeroth-order source detection results and the spatial distribution of R_{EE80}

HST 图像具有较好的几何畸变校正和 WCS 标定基础，可用于检验本文星表匹配、WCS 解算和像质参数测量流程在真实空间望远镜图像上的稳定性。

本文选取经 AstroDrizzle 处理后的图像作为测试数据。该类图像已完成几何畸变校正、图像配准和重采样，并在文件头中提供产品 WCS、像素比例尺和取向角等信息。本文以 AstroDrizzle 产品 WCS 给出的图像中心天球坐标、像素比例尺和取向角作为参考，对本文流程解算结果进行可靠性检验。表 2 列出了测试数据概要和测试结果。结果表明，本文方法计算得到的像素比例尺与点扩散函数 REE80 均与 HST 标称参数在 1σ误差范围内一致。

本文解算得到的图像取向角也与 AstroDrizzle 产品 WCS 给出的取向角（经过 AstroDrizzle 修正后的图像，其旋转角为 0°）基本一致。图像中心投影偏差为 0.4″~1.0″，与 HST 在采用 GSC-I（Guide Star Catalog I）作为导星星表、双导星精细锁定模式下运行时所报告的性能指标处于同一量级：其在轨指向稳定性优于 5 mas（RMS），绝对指向精度优于 1″。这些结果说明，本文星表匹配与 WCS 解算流程在真实空间望远镜图像上能够得到合理的结果。

需要说明的是，中心投影偏差表示本文解算的图像中心天球坐标与 AstroDrizzle 产品 WCS 参考中心坐标之间的角距离，不代表 HST 望远镜姿态控制误差。

4.3　丽江2.4 m望远镜数据

为验证本文提出的像质与合焦指标计算方法在不同成像系统中的适用性，我们选取位于丽江高美古观测站的丽江 2.4 m 光学望远镜的观测数据进行测试。该望远镜配备 2048 pix×2048 pix CCD 相机，单帧有效视场约为 9′×9′，与 CSST 单 CCD 视场尺度相当，但其像素比例尺为 0.284 ″/pix，约为 CSST 巡天相机像素尺度的 4 倍。因此，丽江图像数据可用于检验本文方法在不同观测条件下的拓展能力。本文使用 NGC 2324 Cousins-I 波段观测图像进行测试。

图 8 给出了本文处理流水线的恒星提取结果以及对应恒星样本的 FWHM 与 REE80 分布。统

表 2　HST ACS/WFC测试数据概要与测试结果

Table 2　Dataset Specifications and Calibration Results for the HST Advanced Camera for Surveys Wide Field Channel

观测目标	文件名	滤波片	像素比例尺 /[(″)·pix^{-1}]	REE80/(″)	旋转角/(°)	中心投影偏差/(″)
NGC 362	hst_10043_05_acs_wfc_f606w_01_drz.fits	F606W	0.0500	0.138±0.038	0.08	0.57
NGC 6341	hst_10120_04_acs_wfc_f435w_01_drz.fits	F435W	0.0500	0.128±0.035	0.02	1.07
NGC 6205	hst_10349_30_acs_wfc_f625w_01_drz.fits	F625W	0.0500	0.126±0.022	0.04	0.17
NGC 1261	hst_10775_09_acs_wfc_f606w_01_drz.fits	F606W	0.0500	0.141±0.044	−0.07	0.88
NGC 188-58	hst_11379_12_acs_wfc_f625w_01_drz.fits	F625W	0.0500	0.126±0.028	0.09	0.67

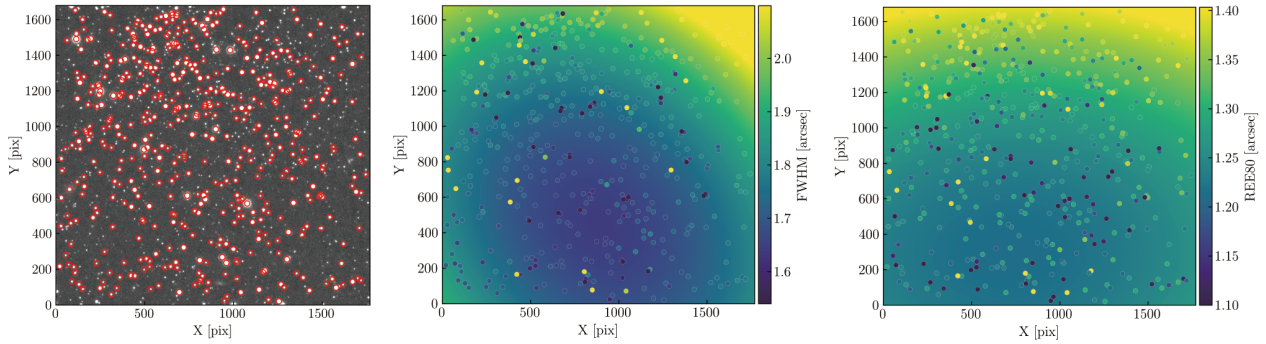


图 8 丽江望远镜观测图像像质分析结果示例

Fig. 8 Image quality analysis results from observations made with the Lijiang 2.4-m Telescope

计结果表明，样本恒星的平均 FWHM 为（1.786±0.211）″，REE80 为（1.360±0.223）″，椭率为 0.012± 0.010。由此得到 FWHM≈1.31×REE80，该比例与理想二维高斯 PSF 模型下的理论关系相符，说明在当前观测条件下，丽江 2.4 m 望远镜获得的星像在统计意义上接近高斯分布。

从空间分布特征来看，FWHM 与 REE80 在视场不同位置呈现出系统性差异：图像上方区域恒星对应的 PSF 尺寸整体大于下方区域，反映出单帧图像中存在一定程度的空间非均匀性。这种空间梯度通常与焦平面倾斜、边缘像场失焦或光学像差有关。该现象与已有关于丽江 2.4 m 望远镜成像 PSF 的研究结果一致[18]，即视场边缘区域存在一定程度的离焦或像质退化。

上述结果及4.2 节中 HST 的实测数据表明，本文方法在不同像元尺度、不同 PSF 宽度和不同背景噪声条件下，均能够给出自洽且具有明确物理意义的像质参数，并可识别视场内的空间非均匀性特征。这说明本文的像质参数测量方法具有一定的适应性，可用于检验算法实现的稳定性。由于 HST 和丽江 2.4 m 望远镜数据在 PSF 形态、像元尺度、畸变特性和噪声来源等方面均与 CSST 巡天相机存在差异，上述实测数据结果不作为 CSST 在轨性能验证依据。CSST 在轨快速评判能力仍需在获取真实在轨数据后，结合焦面级几何标定和载荷状态信息进一步验证。

5 结论

本文围绕 CSST 巡天相机在轨快速评判需求，建立单 CCD 图像的快速评判流程，实现了 FWHM、REE80、椭率、像素比例尺和 CCD 级中心投影偏差等关键指标的计算。基于 CSST 巡天相机多色成像仿真数据的测试表明，本文方法能够恢复仿真输入的像素比例尺，并给出与输入 PSF 统计结果一致的像质参数。单幅 9K×9K 图像平均处理时间约为 36 s，具备运控现场快速分析的应用基础。

单片 CCD 中心投影偏差主要反映局部 WCS 解算下 CCD 中心投影位置与规划位置之间的几何差异。在当前未引入焦面级统一畸变模型的条件下，该量包含焦面畸变、CCD 安装误差和局部 WCS 解算残差，不能直接解释为望远镜整体姿态误差。HST 和丽江 2.4 m 望远镜观测数据的测试结果表明，本文像质参数测量方法在不同像元尺度、不同 PSF 宽度和不同背景噪声条件下均能保持较好的稳定性，进一步验证了算法的通用性和可靠性。

后续将结合 CSST 真实在轨数据，进一步完善视位置改正、焦面级畸变统一建模以及不同观测模式下的参数配置，使快速评判结果能够更好地服务于在轨状态监测、异常识别和运控决策支持。

致谢：感谢暨南大学彭青玉教授和江西师范大学林孚荣博士提供的丽江2.4 m望远镜观测数据。

参考文献（References）

[1] Riess A G, Filippenko A V, Challis P, et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant[J]. The Astronomical Journal, 1998, 116（3）: 1009-1038.

[2] Planck Collaboration, Aghanim N, Akrami Y, et al. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters[J]. Astronomy & Astrophysics, 2020, 641: A6.

[3] 詹虎. 载人航天工程巡天空间望远镜大视场多色成像与无缝

光谱巡天[J]. 科学通报，2021，66（11）：1290-1298.
Zhan H. The wide-field multiband imaging and slitless spectroscopy survey to be carried out by the Survey Space Telescope of China Manned Space Program[J]. Chinese Science Bulletin，2021，66（11）：1290-1298（in Chinese）.

[4] van Dokkum P G. Cosmic-ray rejection by Laplacian edge detection[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific，2001，113（789）：1420-1427.

[5] Fruchter A S，Hook R N. Drizzle：a method for the linear reconstruction of undersampled images[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific，2002，114（792）：144-152.

[6] Yu Y，Ma B，Zhang T，et al. Cosmic-ray detection and rejection for CSST[J]. The Astronomical Journal，2026，171（1）：13.

[7] Zhang K，Bloom J S. DeepCR：cosmic ray rejection with deep learning[J]. The Astrophysical Journal，2020，889（1）：24.

[8] Bhavanam S R，Channappayya S S，Srijith P K，et al. Cosmic ray rejection with attention augmented deep learning[J]. Astronomy and Computing，2022，40：100625.

[9] Cuillandre J C，Bertin E，Bolzonella M，et al. Euclid：early release observations—programme overview and pipeline for compact- and diffuse-emission photometry[J]. Astronomy & Astrophysics，2025，697：A6.

[10] Wei C L，Li G L，Fang Y D，et al. Mock observations for the CSST mission：main surveys—an overview of framework and simulation suite[J]. Research in Astronomy and Astrophysics，2026，26（2）：024001.

[11] 孙晓雄，王宏力，陆敬辉. 一种基于星三角形的星图识别算法[J]. 传感器与微系统，2009，28（12）：8-10.
Sun X X，Wang H L，Lu J H. Star triangle identification algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2009，28（12）：8-10（in Chinese）.

[12] Zhao Y，Wei X，Li J，et al. Star identification algorithm based on K-L transformation and star walk formation[J]. IEEE Sensors Journal，2016，16（13）：5202-5210.

[13] Beroiz M，Cabral J B，Sanchez B. Astroalign：a Python module for astronomical image registration[J]. Astronomy and Computing，2020，32：100384.

[14] Lang D，Hogg D W，Mierle K，et al. Astrometry.net：blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images[J]. The Astronomical Journal，2010，139（5）：1782-1800.

[15] Gorski K M，Hivon E，Banday A J，et al. HEALPix：a framework for high-resolution discretization and fast analysis of data distributed on the sphere[J]. The Astrophysical Journal，2005，622（2）：759-771.

[16] Shupe D L，Moshir M，Li J，et al. The SIP convention for representing distortion in FITS image headers[C]//Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV. San Francisco：Astronomical Society of the Pacific，2005：491.

[17] Sirianni M，Jee M J，Benítez N，et al. The photometric performance and calibration of the Hubble Space Telescope advanced camera for surveys[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific，2005，117（836）：1049-1112.

[18] Lin F R，Peng Q Y，Zheng Z J，et al. Investigation and application of fitting models for centering algorithms in astrometry[J]. Astrophysics and Space Science，2021，366：59.

（责任编辑：周鹏）