

基于霍夫变换的 STCF 主漂移室实时径迹识别与数据压缩算法*

彭亮¹⁾²⁾ 张宝林¹⁾ 郭兆立¹⁾ 赵佳睿¹⁾ 马轶臻¹⁾
方竹君³⁾⁴⁾ 李吉光⁵⁾ 李慧霖^{1)2)†}

1) (湖南科技大学物理与电子科学学院, 湘潭 411201)

2) (湖南科技大学物理与电子科学学院, 湖南省智能传感器与新型传感材料重点实验室, 湘潭 411201)

3) (中国科学技术大学物理学院近代物理系, 合肥 230026)

4) (中国科学技术大学, 核探测与核电子学实验室, 合肥 230026)

5) (诺森比亚大学计算机科学学院, 英国纽卡斯尔 NE1 8ST)

(2026 年 1 月 24 日收到; 2026 年 3 月 16 日收到修改稿)

超级陶粲装置 (STCF) 是拟建的一台高亮度、对称结构的正负电子对撞机。为应对 STCF 实验面对的更高亮度和事例率所带来的实时数据处理性能瓶颈, 本研究提出了一种基于霍夫变换的针对低横动量粒子的快速径迹识别方法。本研究在传统共形-霍夫变换框架基础上, 通过矩阵化建模实现参数空间投票过程的向量化与并行化; 此外, 针对霍夫累加器高度稀疏的统计特性, 引入基于稀疏映射结构的参数空间表示方式, 消除了冗余计算与无效访问开销。实验结果表明, 该算法在保持高信号留存率的同时, 显著地提升了计算吞吐量并大幅降低了内存资源占用, 为 STCF 高阶触发 (HLT) 系统在实时环境下高效筛选低横动量物理信号提供了关键的算法支撑与可行性验证。

关键词: 超级陶粲装置, 主漂移室, 径迹识别, 霍夫变换

DOI: 10.7498/aps.75.20260130

CSTR: 32037.14.aps.75.20260130

1 引言

超级陶粲装置 (Super Tau-Charm Facility, STCF) 是中国拟建的一台高亮度、对称结构的正负电子对撞机^[1,2]。其设计质心能量范围覆盖 2—7 GeV 区间, 在质心能量等于 4 GeV 时峰值亮度超过 $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[3]。STCF 将运行于量子色动力学的微扰与非微扰过渡区域, 聚焦陶轻子与粲夸克对阈值能区的研究, 具备独特的物理潜力。

随着对撞机亮度的不断提升, 超级陶粲装置实验面临着高亮度、高物理事例率、高本底、大数据量的挑战。尽管在总触发事例中, 绝大多数源于束流本底或低能散射过程, 但在峰值亮度下, 即便经过一级触发的初选, 系统的数据传输带宽需求仍有约 30 GB/s^[1,4,5]。如此庞大的数据通量若直接进行全量记录, 将远远超过后端存储介质与离线计算集群的承载阈值。为解决这一问题, 目前国际主流高能物理实验的触发结构普遍采用多级触发系统, 核心均在于通过高阶触发 (high level trigger, HLT) 实

* 国家自然科学基金 (批准号: 12341503)、湖南省芙蓉计划科技领军人才项目 (批准号: 2025GD-03)、湖南省科技创新计划 (批准号: 2023RC4006)、湖南省教育厅科学研究项目 (批准号: 24B0454) 和合肥综合性国家科学中心超级陶粲装置关键技术攻关项目资助的课题。

† 通信作者。E-mail: lihuilin@hnust.edu.cn

现对复杂物理事例的实时在线识别与数据压缩. 例如, 在 LHC 上的 ATLAS 和 CMS 实验基于大规模 CPU 集群或异构计算单元设计的 HLT 系统, 在获取全探测器信息的基础上进行了精细径迹重建^[6]; 此外, LHCb 实验在 Run 3 升级后更是实现了全软件触发结构设计^[7]. STCF 也计划采用多级触发系统, 通过基于硬件的 L1 触发实现事例快速筛选, 再利用 HLT 系统进行本底抑制并降低误触率, 在保证物理信号探测效率的同时, 将原始数据吞吐量降至可存储水平, 解决海量本底带来的计算资源瓶颈.

在 高能物理实验中, 实现带电粒子径迹的高效与全事例重建是物理分析的一个重要环节^[8]. 理想状态下, 寻迹算法需要利用探测器记录的所有击中信息, 精确还原出粒子运动轨迹. 在强轴向磁场环境下, 径迹的重建效率与粒子的横动量密切相关. 对于横动量 $p_T > 160 \text{ MeV}/c$ 的带电粒子其径迹曲率半径较大, 通常能够穿透主漂移室的所有丝层, 因而较易被算法识别. 然而横动量 $p_T < 160 \text{ MeV}/c$ 的带电粒子受洛伦兹力约束, 容易在漂移室内发生螺旋卷曲, 形成单圈或多圈的径迹^[9]. 这类径迹由于未能飞出漂移室, 其击中点在空间的分布较为复杂, 传统算法往往难以对其进行有效提取. 若无法正确重建这部分低动量径迹, 可能会造成关键物理事例的丢失, 从而引入系统误差. 因此, 针对低横动量径迹开发高效的识别与保留算法对于提升探测器的综合重建性能以及保证物理分析的精度至关重要.

针对低横动量带电粒子的识别问题, 近年来研究者开展了大量研究. 其中, 霍夫变换因其在图像处理和计算机视觉领域中广泛用于在含噪图像中识别特定几何结构^[10,11], 而低横动量带电粒子在探测器磁场中呈现的单圈或多圈径迹特征与霍夫算法的几何识别优势高度契合, 因此霍夫变换算法在 高能物理领域也被广泛应用. 目前霍夫变换已被许多高能物理实验用作离线处理软件或高阶触发中的全局寻迹方法, 例如 STCF 实验^[12]、Belle II 实验^[13]、BESIII 实验^[14]、LHC 上的 CMS 实验^[15] 和 ATLAS 实验^[16] 等. 相关研究探索了基于霍夫变换或其改进形式的全局寻迹方法, 以应对高事例率和复杂拓扑条件下的径迹重建需求.

为满足 STCF 在高亮度运行条件下对实时径迹重建的性能需求, 本文针对传统霍夫变换在计算

复杂度与存储效率方面的不足, 提出了一种基于矩阵运算与稀疏表示优化的快速实现方法. 该方法将霍夫变换的参数运算和参数空间累加过程表述为矩阵形式, 避免了显式循环开销; 同时, 针对霍夫参数空间中存在大量低计数元素的特性, 引入稀疏矩阵存储结构以减少内存占用和访存开销, 实现了计算效率与资源利用率的优化. 通过在 STCF 离线重建框架中的实现与仿真验证, 本文对该算法的性能进行了系统评估, 结果表明该方法在保持高寻迹效率和参数分辨率的同时, 能够显著地降低运算时间, 为后续在 HLT 系统中的实时部署提供了可行技术路径.

STCF 探测器的 主径迹探测器为主漂移室 (main drift chamber, MDC). 其内壁材料厚度约为 $0.4\% X/X_0$, 而整个灵敏区域的平均材料厚度约为 $0.3\% X/X_0$. MDC 共包含 48 层近似方形的单元, 整体覆盖半径范围从 200 mm 至 840 mm. MDC 按结构划分为 8 个超层, 每个超层由 6 个探测层构成, 类型包括轴向 (A 型) 和立体角 (U, V 型) 两类. 其中, U 和 V 型超层的阳极丝相对于束流方向具有正或负的倾角, 以增强 3D 轨迹重建能力. 各超层的单元尺寸随半径增加而逐渐增大, 以兼顾空间分辨率与探测效率. 整个 MDC 系统共包含 11520 个读出单元, 表 1 列出了 MDC 的若干关键设计参数. MDC 的平均空间分辨率预期优于 $120 \mu\text{m}$ ^[1].

表 1 主漂移室主要的几何参数

Table 1. Main geometric parameters of the main drift chamber.

超层类型	起始半径/mm	层数	每层 单元数	极角范围 /mrad
A	200.0	6	128	0
U	271.6	6	160	39.3 to 47.6
V	342.2	6	192	-41.2 to -48.4
A	419.2	6	224	0
U	499.8	6	256	50.0 to 56.4
V	578.1	6	288	-51.3 to -57.2
A	622.0	6	320	0
A	744.0	6	352	0
总计		48	11520	

整个径迹系统置于沿 z 轴方向的 1 T 均匀磁场中, 极角覆盖范围为 20° — 160° . 对于大倾角径迹, 粒子可能从 MDC 端盖区域穿出, 导致实际穿越的探测层数少于总数.

2 算法原理

2.1 共形变换

共形变换^[17,18]是一种保持角度不变的映射,在低横动量带电粒子的径迹拟合过程中,为了简化圆轨迹的参数化与拟合过程,通常合理假设径迹通过坐标原点,基于该假设引入了共形变换,该变换定义为

$$u = \frac{2x}{x^2 + y^2}, \quad v = \frac{2y}{x^2 + y^2}, \quad (1)$$

其中 x - y 平面上的点 (x, y) 经过共形变换后映射为共形平面上的点 (u, v) . 该变换具有重要的几何性质: 平面上所有过原点的圆在 (u, v) 共形平面上被映射为直线. 设粒子轨迹在原坐标系中的解析式为 $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$, 其中 (x_0, y_0) 是圆心坐标, r 为半径, 由假设轨迹过原点的条件有 $x_0^2 + y_0^2 = r^2$ 代入可得线性关系 $x_0 u + y_0 v = 1$. 经过共形映射, 原本非线性的圆形轨迹问题可以被线性化, 降低了霍夫变换寻找圆迹的空间维度与计算开销.

2.2 霍夫变换

经共形变换后, 原始坐标系中过原点的圆径迹就被映射为 u - v 空间中的一条直线 $x_0 u + y_0 v = 1$. 为避免斜率趋于无穷大时出现歧义, 该线采用极坐标的方式进行表示^[19]:

$$\rho = u \cos \theta + v \sin \theta, \quad (2)$$

其中 ρ 表示直线到原点的最短距离, θ 表示法线与 u 轴的夹角. 在此参数化下, 空间点 (u, v) 在霍夫参数空间中都对一条正弦曲线, 若干共线点所对应的正弦曲线在参数空间中会交于同一点, 该交点即

表征了该直线的参数 (ρ, θ) . 通过在离散化的 ρ - θ 累加器中对投票结果进行统计, 再寻找局部峰值点, 即可基于此得到拟合圆的参数信息. 基于霍夫变换对噪声和数据缺失的鲁棒性, 因此即使存在噪声误差或部分径迹点丢失的情况下, 只要有效点数足以形成统计显著性, 累加投票结果仍然能够在参数空间中形成显著峰值.

3 霍夫变换算法优化

在传统的霍夫变换实现中, 每个击中点都需要遍历所有离散角度 θ , 并计算其在参数空间中的投影 $\rho = u \cos \theta + v \sin \theta$, 该过程的时间复杂度为 $O(N_{\text{hit}} \cdot N_{\theta})$, 其中 N_{hit} 为击中点数量, N_{θ} 为角度采样数. 当击中点数量和角度分辨率增大时, 此类逐点遍历策略将导致计算开销迅速上升, 难以满足数据的实时吞吐需求. 为解决这一问题, 本研究将霍夫变换的计算过程进行了矩阵化重构, 并将共形变换与霍夫参数计算以矩阵的形式进行统一表达, 从而将原本嵌套的显式循环转化为高效向量操作. 本算法的流程图如图1所示.

主漂移室中的击中点在二维平面上可以表示为一组点集:

$$\{(x_i, y_i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}.$$

为了便于矩阵化表述, 可将其表示为数据矩阵 $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{2 \times N}$:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_i \\ y_1 & y_2 & y_2 & \cdots & y_i \end{bmatrix}. \quad (3)$$

为了将原本非线性的圆检测问题转化为线性空间中的直线检测问题, 本文使用了共形变换的方法. 对空间中任意一点 (x_i, y_i) , 其映射关系被定义为(1)式, 基于该映射机制, 原始数据矩阵 $\mathbf{X}$ 被转

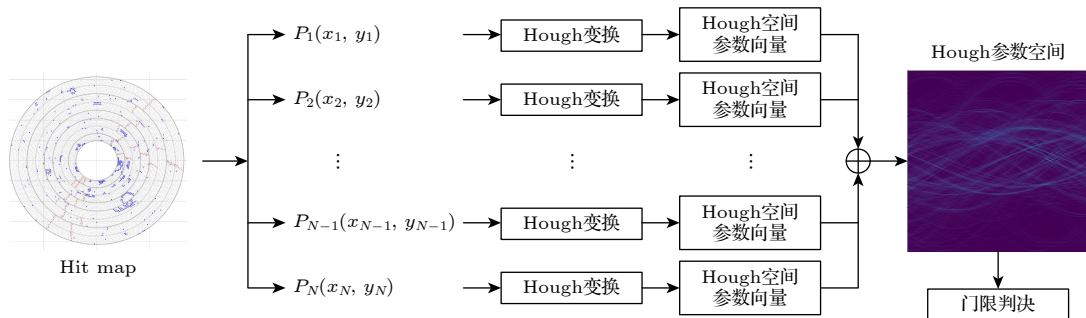


图1 霍夫变换处理单事例流程图

Fig. 1. Flowchart of the single-event processing using the Hough transform.

换为对偶空间下的坐标矩阵 $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{2 \times N}$:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & \cdots & u_i \\ v_1 & v_2 & v_3 & \cdots & v_i \end{bmatrix}. \quad (4)$$

在霍夫变换的检测阶段, 极径 ρ 的计算依赖于极角 θ 的采样. 考虑到 θ 在区间 $[0, 2\pi)$ 内的取值范围与分辨率是预先设定的, 可将其离散化为 M 个固定角度值 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M$. 基于此, 可以构建角度投影矩阵 $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{M \times 2}$:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ \vdots & \vdots \\ \cos \theta_M & \sin \theta_M \end{bmatrix}. \quad (5)$$

角度维度固定后, 可以将所有击中点的参数空间映射表示为

$$\rho = \mathbf{H}\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \rho_{1,1} & \rho_{1,2} & \cdots & \rho_{1,N} \\ \rho_{2,1} & \rho_{2,2} & \cdots & \rho_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{M,1} & \rho_{M,2} & \cdots & \rho_{M,N} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中, 矩阵元素 $\rho_{j,i}$ 表示第 i 个变换点在第 j 个离散角度下的 ρ 值. 该矩阵形式能够有效地将参数计算过程转化为向量运算, 提升算法的计算效率.

在霍夫参数空间的构建过程中, 传统算法需对每个输入点遍历全部离散角度 θ 并逐次进行投票, 通常以双重嵌套结构实现, 导致算法时间开销较高. 本文将霍夫参数计算建模为矩阵运算, 生成一个 ρ 值矩阵, 其中每一列表示 θ 对应的一条独立投票轴. 由于不同 θ 下的 ρ 分布相互独立, 整个参数空间可被视为由若干沿 θ 维度排列的子向量组成, 每一个子向量对应固定的 θ , 内部仅需要对点集给出的 ρ 值进行离散化统计. 参数空间的填充过程即转化为: 对每一列给出的 ρ 值按照设定的分辨率映射到对应的离散 bin, 并在该 θ 所对应的累加器列中完成计数.

为了确保离散化的一致性与数值稳定性, 本文采用线性映射方式将连续的 ρ 值投影到均匀划分的 ρ 区间中. 具体而言, 设定 $[\rho_{\min}, \rho_{\max}]$ 为物理可达范围, 通过预定义的等间隔划分将其离散为若干 bin, 从而实现从连续空间向参数空间的唯一映射.

在标准霍夫变换中, 参数空间通常呈现高度稀疏特性. 由于在单个物理事例中的探测器击中点数

量有限, 因此在投票后绝大多数累加器单元的值为零或者是一个较小的累加值. 实验统计表明, 在包含单倍束流本底的典型事例中, 仅使用直丝信息进行 2D 径迹查找, 当 ρ 和 θ 的分 bin 数量均设为 1000 时, 累加矩阵的稀疏度通常高于 80%. 若采用传统的二维数组进行存储, 会造成无效内存占用, 并且在寻峰过程中算法需要遍历整个数组空间, 引入了大量无效访存操作.

为应对以上问题, 本文引入了压缩稀疏行结构对霍夫参数空间进行了重构, 以避免二维数组在存储与访问上的冗余. 不同于直接存储完整的累加矩阵, 图 2 给出了本文所采用的稀疏映射表示方法. 该方法通过三个一维数组实现高效表示: 数值数组 A 存储所有非零投票值, 列索引数组 J 记录非零元素对应的 θ 坐标, 以及行偏移数组 P 定义每一行 ρ 在 A 中的起始位置. 数学形式上, 参数空间中的非零元素 $H(i, j)$ 被映射为线性存储, 其中内存占用从 $O(M \cdot N)$ 降低至 $O(N_{nz})$, 其中 N_{nz} 为元素总数. 在稀疏表示下, 寻峰逻辑转化为对非零数组 A 的线性遍历. 此时算法仅需处理实际存在投票的参数单元, 自动跳过了对所有零值区域的访问. 此外, 考虑到霍夫空间中多数非零累加值仍处于噪声水平附近, 本文进一步引入基于物理阈值的剪枝策略, 在寻峰阶段忽略累加值低于预设阈值的单元, 以提高寻峰效率.

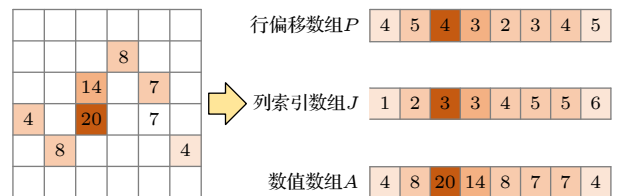


图 2 压缩稀疏行结构存储示意图

Fig. 2. Illustration of the compressed sparse row storage structure.

初始峰值检测结果通常包含由多圈径迹、量化误差及噪声干扰引起的冗余触发或伪峰, 因此仍需进一步对这些候选峰值进行合并. 本文采用基于邻域聚类的合并策略, 将在参数空间中距离较近、累加值相近的候选单元归并为可能需要合并的峰值组合. 首先, 将所有候选点按累加强降序排列; 随后, 依次以每个未被归并的峰值为中心, 在预设的 $(\Delta\rho, \Delta\theta)$ 参数邻域内搜索其他候选点, 将满足空间邻近性条件的峰值归入同一簇, 视为可能源于同一

条物理轨迹的多重投票响应. 然后在峰值组合内进行筛选, 考虑相邻峰值之间共享击中的数量和它们在逆共形映射后所对应的圆参数的一致性, 若多个峰值对应的拟合圆圆心小于预设的几何容差, 且内层径迹和外层径迹共享足够多的击中点, 则认为其仅保留累加值最高的峰值作为该径迹的唯一候选, 避免因多圈径迹而引发的重复重建.

通过上述合并与筛选后, 最终保留的峰值集合即作为径迹候选输出, 其对应的参数坐标 (ρ, θ) 作为该径迹的初始参数. 圆轨迹的参数可以由下式计算:

$$x_c = \frac{\cos \theta}{\rho}, \quad y_c = \frac{\sin \theta}{\rho}, \quad r_c = \frac{1}{|\rho|}, \quad (7)$$

其中拟合圆的圆心为 (x_c, y_c) , 半径为 r_c . 可通过计算各信号点到拟合圆的距离, 并设定合理容差阈值, 对信号点进行留存判定, 从而实现对数据的筛选.

4 实验平台及测量结果

OSCAR 是 STCF 离线数据处理的核心软件平台, 其功能涵盖了从初态物理事件生成、探测器响应模拟到径迹重建及物理分析的完整链条流程^[20,21], 为实验全生命周期的数据处理提供了统一而稳定的软件支撑. 在事件生成中 OSCAR 实现了本底全模拟^[22], 将生成的本底粒子信号与物理信号击中点在重建之前进行混合, 从而构建了包含复杂本底环境的模拟事例, 以模拟对撞过程中的真实物理响应. 基于该平台, 本研究通过大规模蒙特卡罗模拟生成了大量事例样本, 为对本算法性能评估与稳健性检验提供了数据基础.

为了对所提出的方法的性能进行客观的评价与分析, 本文引入了数据压缩率 (data compression ratio, DCR) 和信号留存率 (signal retention ratio, SRR) 作为主要评价指标. 这两个指标分别从数据精简效率与物理信息完整性两个维度定量评估算法在实验环境下的综合表现.

数据压缩率定义为原始探测器击中点总数与经算法筛选后保留的有效候选点数量之比, 其数学表达式为

$$R_d = \frac{N_{\text{select}}}{N_{\text{total}}}, \quad (8)$$

其中 N_{total} 表示事例中所有原始探测器信号点的总

数, 而 N_{select} 为通过算法筛选后保留用于后续处理的点数.

信号留存率的定义为真实物理击中的信号点被成功保留的比例, 其数学表达式为

$$R_s = \frac{N_{\text{true select}}}{N_{\text{true total}}}, \quad (9)$$

其中 $N_{\text{true total}}$ 通过蒙特卡罗模拟生成的已知真实径迹所对应的全部真实击中点数, $N_{\text{true select}}$ 为这些真实击中点中被算法正确保留的数量.

为评估本文所提算法在实际高能物理实验环境下的性能指标, 本研究选取了由 OSCAR 生成的五种具有代表性的物理分析道数据, 每个物理分析道各 10000 个事例作为基准测试数据集. 实验结果如表 2 所列.

表 2 霍夫变换在一倍本底下典型物理反应道的性能指标

Table 2. Performance metrics of the Hough transform for typical physics channels under $1\times$ background conditions.

通道编号	物理分析道	数据压缩率	信号留存率
Channel 1	$e^+e^- \rightarrow K^+K^- J/\psi$ $J/\psi \rightarrow l^+l^-$	0.494	0.912
Channel 2	$J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$	0.469	0.831
Channel 3	$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$	0.387	0.966
Channel 4	$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ $J/\psi \rightarrow e^+e^-$	0.495	0.960
Channel 5	$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$	0.496	0.967

表 2 综合展示了优化霍夫变换算法在五个经典物理通道下的各项性能指标, 实验数据表明, 优化后的霍夫变换算法在压缩率方面, 各反应道的平均压缩率为 38%—50%; 在信号留存率方面大部分通道中也能保持较高水平, 这进一步验证了优化后的霍夫变换在降低数据冗余和保持物理信息完整性方面具有一定优势.

图 3 给出了各反应道在 10000 事例规模下信号留存率分布的事例数统计结果. 各通道事例的信号留存率呈现显著的右偏分布, 这表明本算法能够留存较高比例的真实物理信号点信号. 结果显示, Channel 1, Channel 3, Channel 4 和 Channel 5 在信号留存率大于 0.9 区间内存在更为明显的累积趋势, 而 Channel 2 的分布整体更为平缓, 其整体信号留存率水平仍处于较高区间.

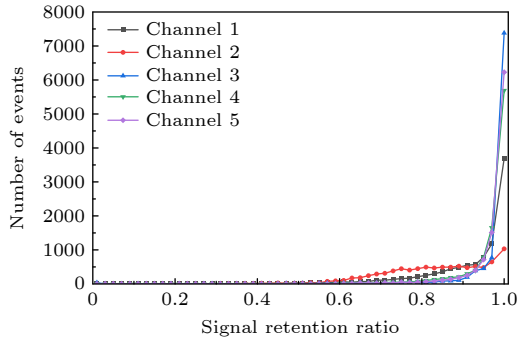


图3 五个典型物理反应道在 10000 事例规模下信号留存率分布的事例数统计

Fig. 3. Event count distribution of signal retention ratio for different channels.

为了进一步评估优化后霍夫变换算法在低横动量区间对粒子径迹打捞的性能优化效果, 本研究选取 μ^+ 粒子作为研究对象, 在不同极角条件下进行了测试, 实验结果如图 4 所示.

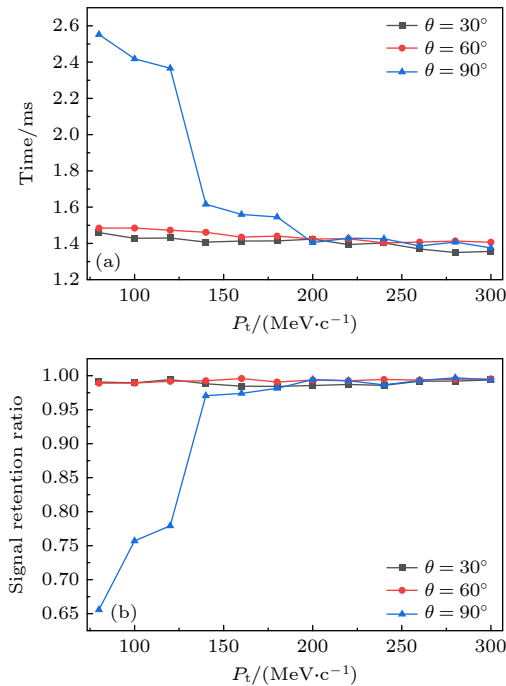


图4 不同极角条件下霍夫变换算法性能随横动量的变化 (a) 不同极角条件下算法处理时间与横动量的关系; (b) 不同极角条件下信号留存率与横动量的关系

Fig. 4. Performance of the Hough transform algorithm as a function of transverse momentum under different polar angle conditions: (a) Processing time versus transverse momentum for various polar angles; (b) signal retention rate versus transverse momentum for various polar angles.

图 4 详细地展示了在不同极角 θ 条件下霍夫变换算法性能随横动量的变化. 在时间性能方面, 当 $\theta = 30^\circ$ 和 60° 时, 算法执行时间基本保持稳定,

波动幅度较小, 体现出算法具有良好的时延确定性与计算稳定性; 在信号留存率方面, 上述两种极角条件下, 算法处理后的单事例平均信号留存率始终维持在 0.99 左右, 表明算法能完整保留真实物理信号点, 具有良好的稳健性. 然而, 当 $\theta = 90^\circ$ 时, 算法执行时间和信号留存率均出现了一定程度的恶化. 主要原因是该条件下粒子在 z 轴方向上的动量分量极小, 导致粒子在探测器灵敏体积内发生多次回旋, 形成复杂的多圈螺旋径迹. 针对此类多圈径迹, 本算法保留了其横动量最高的径迹, 虽然在指标上会导致信号留存率的表现下降, 但并不会对后续重建和物理分析流程造成影响, 因此这种做法在实时处理框架下可被接受. 在时间性能方面, 多圈径迹会导致信号点的密集触发, 增加霍夫算法的计算负荷, 从而导致单事例处理时间有所提高. 实验结果表明, 当横动量低于 120 MeV/c 时, 算法处理耗时约为 2.4 ms, 该量级的延迟不影响系统的数据吞吐量.

在 STCF 的在线数据处理体系中, HLT 系统需要在极高事例率条件下对探测器数据进行快速筛选, 因此算法执行所需的时间开销也是衡量一个算法性能的重要指标之一. 为进一步评估优化后霍夫变换算法在不同数据环境下的时延性能与计算稳定性, 本研究在同一软硬件环境及相同数据样本条件下, 针对五种典型物理反应道进行了优化前后霍夫变换算法耗时测试, 实验结果如图 5 所示.

图 5 展示了各被测通道单事例霍夫变换算法执行时间的统计分布特性. 图 5(a) 展示了优化前霍夫变换算法在五个典型物理反应道下的单事例执行时间统计分布情况, 各通道执行时间均呈现一定波动且均存在高时延离群点. 平均算法执行耗时结果显示, Channel 3 的平均执行时间约为 12 ms, 其余通道的平均执行时间分布于 20—26 ms 之间. 图 5(b) 展示了优化后霍夫变换在五个典型物理反应道下的单事例执行时间统计分布情况, 优化后霍夫变换所有通道的执行时间分布呈现高度聚敛性, 其四分位区间主要分布于 1.3—2.1 ms 之间, 且各通道均值与中位值均显著低于 2.0 ms. 受输入事例击中点数波动的影响, 各通道在上限方向均出现了少量离群值, 但在所观测的样本事例中, 事例的最大执行时间仍被有效控制在 4.0 ms 以内. 这表明优化后算法处理不同物理事例时具有良好的时间性能一致性, 未见明显的计算堆积现象. 基于单核

处理单个事例的霍夫变换算法平均处理耗时低于 2 ms 的实际测试结果, 其单核吞吐量约为 500 事例/秒, 在 300 kHz 事例率的情况下, 根据负载均衡需求推算, 部署约 600 个核心即能够满足系统完成霍夫变换算法实时处理的需求.

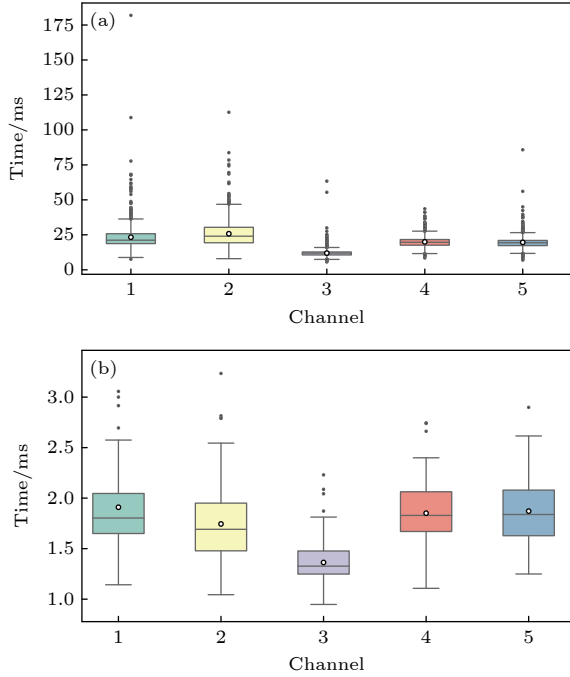


图 5 各被测通道单事例霍夫变换算法执行时间的统计分布 (a) 优化前霍夫变换算法执行时间; (b) 优化后霍夫变换算法执行时间

Fig. 5. Per-event execution time distributions of the Hough transform algorithm for different tested physics channels: (a) Execution time of the Hough transform algorithm before optimization; (b) execution time of the Hough transform algorithm after optimization.

为进一步评估优化策略对霍夫变换计算速度方面的提升效果, 本研究在同一软硬件环境及相同数据样本条件下, 对优化前后霍夫算法的平均单事例执行时间进行了对比. 为直观表征性能提升幅度, 本文定义加速比 (Speedup) 为基准算法平均处理耗时与优化后算法平均处理耗时之比, 即

$$S = \frac{T_{\text{base}}}{T_{\text{optimize}}}. \quad (10)$$

在本研究中基准算法即为优化前霍夫变换算法. 加速比能够直接反映单位时间内优化算法处理能力的提升倍数, 其数值越大说明优化后算法的计算加速效果越显著. 实验结果如表 3 所列. 结果显示, 优化后算法在所有物理分析道下均实现了显著的算法处理速度提升. 优化前各通道平均耗时分布

在 11—26 ms 之间, 而优化后平均耗时均压缩至 1—2 ms 以内, 加速比达到 8—15 倍. 这一速度提升为算法在高事例率的实时环境下的部署奠定了基础, 同时也从实验层面验证了优化策略在降低计算冗余和提升资源利用效率方面的有效性.

表 3 优化前后霍夫变换算法平均耗时对比

Table 3. Comparison of the average execution time of the Hough transform before and after optimization.

物理分析道	优化前霍夫变换平均耗时/ms	优化后霍夫变换平均耗时/ms	加速比
$e^+e^- \rightarrow K^+K^-J/\psi$	24.48	1.89	12.95
$J/\psi \rightarrow l^+l^-$			
$J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$	25.3	1.75	14.46
$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$	11.7	1.34	8.73
$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$	21.22	1.81	11.72
$J/\psi \rightarrow e^+e^-$			
$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$	20.3	1.82	11.15
$J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$			

在霍夫变换中, 累加器参数空间的离散化会引入大规模矩阵的存储需求, 本文采用稀疏矩阵格式对数据存储方式进行重构, 以降低存储开销并提升寻峰效率. 为定量地评估稀疏存储策略的压缩效果, 本文在保持霍夫参数空间分辨率不变的条件下, 使用一倍本底的事例研究不同输入击中点数对累加器存储规模的影响, 实验结果如图 6 所示.

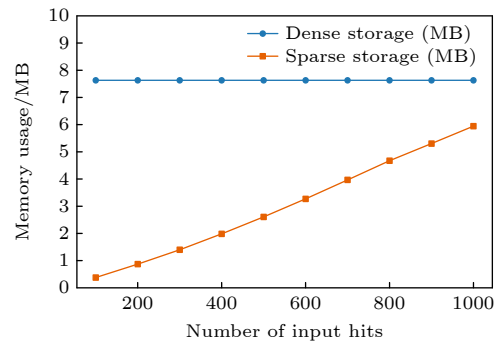


图 6 不同输入击中点数下霍夫累加矩阵的内存占用

Fig. 6. Memory consumption of the Hough accumulator matrix for different numbers of input hits.

图 6 展示了霍夫变换中内存占用情况随输入击中点数变化的对比曲线. 由图 6 可知, 稠密存储策略下当霍夫参数矩阵的分 bin 数量设置为 1000×1000 时, 单事例内存开销恒定在 7.6 MB, 不随输入规模变化. 另一方面, 稀疏存储策略的内存开销与输入事例击中点数呈现出高度线性正相

关性. 在输入击中点数量为 200 时, 稀疏存储的单事例内存开销约为 0.8 MB, 此时单事例内存占用能够降低至稠密存储的 80%; 随着输入规模扩大, 在击中点数量提升至 1000 点时, 单事例内存开销约增长至 5.4 MB 左右, 仍低于稠密静态存储内存开销.

图 7 反映了一倍本底下各物理反应道信号击中点数量的分布情况. 对于 STCF 主漂移室中一倍本底下的物理事例, 其击中点规模主要集中于 200—600 之间, 此时稀疏存储下的单事例平均内存占用率与稠密存储相比能降低约 70%, 能够有效地减少高事例率条件下的瞬时内存占用, 在 300 kHz 事例率的在线处理场景中, 有助于在有限硬件资源条件下维持稳定的事例吞吐率. 实验结果表明, 在数据非饱和分布的情况下, 稀疏存储策略通过动态内存分配机制能有效规避冗余内存开销. 此外, 空间复杂度的降低可以进一步优化处理器的访存时间开销, 协同提升算法的时间性能.

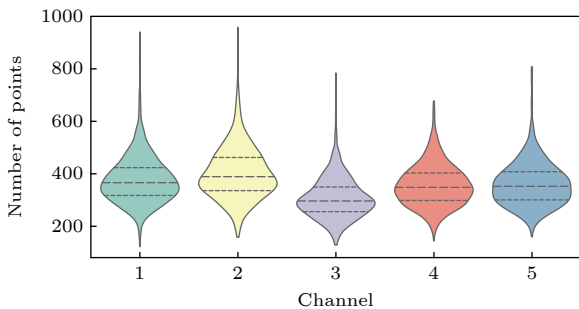


图 7 一倍本底条件下各物理反应道信号击中点数量分布
Fig. 7. Distribution of the number of signal hits per event for different physics channels under $1\times$ background conditions.

5 结 论

针对 STCF 的 HLT 系统在实时性与存储资源方面的双重约束, 本文提出并实现了一种基于霍夫变换的快速径迹识别方法. 该方法通过引入矩阵化表达形式重构霍夫参数计算过程, 将传统嵌套循环转化为向量化操作, 提升计算局部性; 同时, 针对霍夫累加器的高度稀疏特性, 引入了压缩稀疏行结构, 将存储开销从全参数空间的 $O(M \cdot N)$ 解耦, 使单事例内存占用平均降低了约 70%. 通过上述算法改进, 一定程度上突破了现有算法在低动量区域与高触发压力下的实时数据压缩的性能瓶颈. 在霍

夫寻峰阶段, 算法避免了全空间遍历, 使用对非零元素向量的线性扫描, 利用数据的空间局部性提升 CPU 缓存命中率, 该方法相比传统霍夫变换在主要处理环节将单事例的算法平均运行时间降低到了 2 ms, 实现了计算效率与资源利用率的平衡.

与已有主要面向离线重建的霍夫变换改进算法相比, 本文工作更侧重于算法结构对 HLT 实时触发需求的适配, 满足 HLT 系统对确定性时延和稳定吞吐的约束. 目前在基于 STCF 离线软件框架 OSCAR 产生的数据集测试结果表明, 本文算法在保证对关键物理信号灵敏响应的前提下, 即便击中点数显著增加, 本文算法的整体执行时间分布仍表现出较高的集中性和可控性, 能够有效地满足 HLT 系统对实时处理性能的要求. 此外, 为了进一步应对高数据流带来的实时处理压力, 未来的工作也将深入探索该算法在异构计算平台和量子计算平台^[23]上的并行化移植潜力, 以期在保证精度的前提下进一步突破系统的数据吞吐量瓶颈.

参考文献

- [1] Achasov M, Ai X C, An L P et al. 2024 *Front. Phys.* **19** 14701
- [2] Peng H, Zheng Y, Zhou X 2020 *Physics* **49** 513
- [3] Lu T, Wang Q, Luo Q 2024 *Nucl. Tech.* **47** 100204 (in Chinese) [吕涛, 王妍, 罗箐 2024 *核技术* **47** 100204]
- [4] Dong W H 2022 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [董文豪 2022 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [5] Hao Y, Feng C, Zhou Z, Dong W, Fang Z, Hu X, Zhou H, Liu S 2025 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **72** 429
- [6] Albrecht J, Bozianu L, Calefice L, Cella S, Toapaxi C E C, Doglioni C, Gligorov V V, Gooding J A, Iversen K E, Inkaew P, Magdalinski D, Sopasakis A, Wilson-Edwards D J 2025 *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **52** 030501
- [7] Aaij R, Adinolfi M, Aiola S, et al. 2022 *Comput. Softw. Big Sci.* **6** 1
- [8] Frühwirth R, Mitaroff W, Regler M 2000 *Data Analysis Techniques for High-Energy Physics* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [9] Ablikim M, An Z H, Bai J Z, et al. 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **614** 345
- [10] Mukhopadhyay P, Chaudhuri B B 2015 *Pattern Recognit.* **48** 993
- [11] Li Z L, Zhai H C, Wang M W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3234 (in Chinese) [李智磊, 翟宏琛, 王明伟 2007 *物理学报* **56** 3234]
- [12] Zhou H, Sun K X, Lu Z N, Li H, Ai X C, Zhang J, Huang X T, Liu J B 2025 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **1075** 170357
- [13] Belle II Tracking Group, Bertacchi V, Bilka T, et al. 2021 *Comput. Phys. Commun.* **259** 107610
- [14] Zhang J, Zhang Y, Liu H M, Yuan Y, Zhang X Y, Dong L Y, Huang Z, Ji X B, Li H B, Li W G, Lu J D, Nakatsugawa Y, Wang L L, Wang M, Wu L H 2018 *Radiat. Detect. Technol.*

Methods **2** 20

- [15] Ryd A, Skinnari L 2020 *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **70** 171
- [16] Gabrielli A, Alfonsi F, Del Corso F 2022 *Sensors* **22** 1768
- [17] Hansroul M, Jeremie H, Savard D 1988 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* **270** 498
- [18] Liu Q G, Zang S L, Li W G, Mao Z P, Bian J M, Cao G F, Cao X X, Chen S J, Deng Z Y, Fu C D, Gao Y N, He K L, He M, Hua C F, Huang B, Huang X T, Ji X B, Li F, Li H B, Li W D, Liang Y T, Liu C X, Liu H M, Liu S, Liu Y J, Ma Q M, Ma X, Mao Y J, Mo X H, Pan M H, Pang C Y, Ping R G, Qin G, Qin Y H, Qiu J F, Sun S S, Sun Y Z, Wang J K, Wang L L, Wen S P, Wu L H, Xie Y G, Xu M, Yan L, You Z Y, Yu G W, Yuan C Z, Yuan Y, Zhang B Y, Zhang C C, Zhang J Y, Zhang X Y, Zhang Y, Zheng Y H, Zhu K J, Zhu Y S, Zhu Z L, Zou J H 2008 *Chin. Phys. C* **32** 565
- [19] Duda R O, Hart P E 1972 *Commun. ACM* **15** 11
- [20] Ai X C, Huang X T, Li T, Qi B B, Qin X S 2024 *Mod. Phys. Lett. A* **39** 2440006
- [21] Huang W H, Li H, Zhou H, Li T, Li Q Y, Huang X T 2023 *J. Instrum.* **18** P03004
- [22] Fang Z J, Pei Y P, Shi H C, Peng H P, Liu J B 2024 *J. Instrum.* **19** P11014
- [23] Wang D S 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 220302 (in Chinese) [王东升 2024 物理学报 **73** 220302]

Real-time track identification and data compression algorithms for the STCF main drift chamber based on the Hough transform^{*}

PENG Liang¹⁾²⁾ ZHANG Baolin¹⁾ GUO Zhaoli¹⁾ ZHAO Jiarui¹⁾
 MA Yizhen¹⁾ FANG Zhujun³⁾⁴⁾ LI Jiguang⁵⁾ LI Huilin^{1)2)†}

¹⁾ (School of Physics and Electronic Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

²⁾ (Human Provincial Key Laboratory of Intelligent Sensors and New Sensor Materials, School of Physics and Electronic Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

³⁾ (Department of Modern Physics, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

⁴⁾ (Laboratory of Nuclear Detection and Nuclear Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

⁵⁾ (School of Computer Science, Northumbria University, Newcastle-upon-Tyne NE1 8ST, United Kingdom)

(Received 24 January 2026; revised manuscript received 16 March 2026)

Abstract

The proposed super tau-charm facility (STCF) is a next-generation electron-positron collider designed for high-precision studies in the tau-charm energy region. However, its unprecedented luminosity and event rates impose severe demands on real-time data processing, particularly in the high-level trigger (HLT) system, which requires rapid and accurate track reconstruction.

In this work, we present a fast track identification algorithm tailored for low-transverse-momentum particles, based on an optimized conformal-Hough transform framework. Building upon the classical Hough voting scheme, the proposed method reformulates the parameter-space accumulation process through a matrix-based representation, enabling vectorization and significantly improving computational throughput. Furthermore, considering the sparsity observed in the Hough accumulator under realistic STCF detector occupancies, a sparse-mapping representation is introduced to minimize redundant memory accesses and reduce storage overhead.

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12341503), the Hunan Provincial Furong Scholar Science and Technology Leading Talents Project, China (Grant No. 2025GD-03), the Science and Technology Innovation Program of Hunan Province, China (Grant No. 2023RC4006), the Scientific Research Foundation of Education Department of Hunan Province, China (Grant No. 24B0454), and the Key Technology Research and Development Program for the Super Tau-Charm Facility at the Hefei Comprehensive National Science Center, China.

[†] Corresponding author. E-mail: lihuilin@hnust.edu.cn

Performance studies are conducted within the STCF offline reconstruction and simulation environment with representative physics channels. Results show that the proposed algorithm maintains high signal retention efficiency and significantly improves in processing speed over conventional implementations. In particular, the combined matrix-based and sparsity-aware optimizations result in a significant increase in computational throughput and a pronounced reduction in memory resource consumption, thereby meeting the stringent latency constraints of the STCF HLT system.

These results demonstrate that the proposed approach provides a viable and scalable solution for real-time track finding at STCF. More broadly, this work illustrates how algorithmic reformulation and data-structure optimization, guided by detector-specific statistical characteristics, can effectively bridge the gap between tracking performance and real-time processing requirements in next-generation high-luminosity collider experiments.

Keywords: super tau-charm facility, main drift chamber, track identification, Hough transform

DOI: [10.7498/aps.75.20260130](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260130)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260130](https://cstr.net.cn/32037.14.aps.75.20260130)



基于霍夫变换的STCF主漂移室实时径迹识别与数据压缩算法

彭亮 张宝林 郭兆立 赵佳睿 马轶臻 方竹君 李吉光 李慧霖

Real-time track identification and data compression algorithms for the STCF main drift chamber based on the Hough transform

PENG Liang ZHANG Baolin GUO Zhaoli ZHAO Jiarui MA Yizhen FANG Zhujun LI Jiguang LI Huilin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 120202 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260130

CSTR: 32037.14.aps.75.20260130

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260130>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于纳米传感器矩阵的混合气体组分探测与识别

Detection and identification of gas components based on nano sensor array

物理学报. 2022, 71(18): 180702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220955>

基于卷积神经网络与改进视觉变换器的涡旋光束叠加态轨道角动量模式识别方法

Orbital angular momentum pattern recognition method for vortex beam superposition states based on convolutional neural network and improved vision transformer

物理学报. 2026, 75(1): 180702 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251048>

多晶材料散射模型及识别实验研究

Ultrasonic scattering model and identification experiment of polycrystalline materials

物理学报. 2024, 73(3): 034302 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231578>

高能X射线FLASH放射治疗: 基于低气压电离室的束流监视器物理及性能

High-energy X-ray FLASH radiotherapy: Physics and performance study of beam monitoring based on low-pressure ionization chambers

物理学报. 2025, 74(14): 148704 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250258>

基于分段边缘拟合的测风多普勒差分干涉仪成像热漂移监测方法

Thermal imaging drift monitoring of Doppler asymmetric spatial heterodyne spectroscopy for wind measurement based on segmented edge fitting

物理学报. 2022, 71(8): 084201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212086>

用于等离子体相干模式自动识别的谱聚类算法实现

Implementation of spectral clustering algorithm for automatic identification of plasma coherence patterns

物理学报. 2022, 71(15): 155202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220367>