基于时间与电荷的μ子径迹重建算法在水切伦科夫探测器中的应用研究

张 宇[1,2,3] 徐吉磊[2] 王志民[2] 王玲玉[2]

1（国能经济技术研究院有限责任公司 北京 102211）

2（中国科学院高能物理研究所 北京 100049）

3（中国科学院大学 北京 100049）

摘要 宇宙线径迹的重建在大型中微子探测器上非常重要，精确的径迹重建可以在有效去除径迹周围的同位素本底的同时，不用反符合整个探测器体积。本研究利用光电倍增管探测到的最快光时间和电荷信息，构建了带电荷权重的时间最小二乘法的χ^2方程，通过模拟数据，调节参数，成功应用到大型水切伦科夫探测器上。本研究以水切伦科夫探测器为例，使用Geant4进行探测器模拟，优化模型参数，最终可实现夹层水中的μ子径迹重建，空间分辨率好于12 cm，角分辨率好于0.4°，重建效率约97%。

关键词 径迹重建，电荷权重，模拟，水切伦科夫探测器

中图分类号 TL99

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250423

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250423

Application of the timing and charge based on muon track reconstruction algorithm for water Cherenkov detector

ZHANG Yu[1,2,3] XU Jilei[2] WANG Zhimin[2] WANG Lingyu[2]

1(*China Energy Economic and Technology Research Institute Co*., *Ltd*., *Beijing 102211*, *China*)

2(*Institute of High Energy Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing 100049*, *China*)

3(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing 100049*, *China*)

Abstract **[Background]** The reconstruction of cosmic ray tracks is highly important in large neutrino detectors. Precise track reconstruction can effectively eliminate isotopic backgrounds around the tracks without requiring anti-coincidence measures across the entire detector. The muon reconstruction in the water buffer region (interlayer water) of the Central Detector (CD) has not been studied, which is called CD Water Buffer (CWB) muon. The CWB muon event number is about 20% of the muons that pass through the CD. **[Purpose]** This study aims to develop a new reconstruction method for muon tracks and measure the mass ordering of neutrinos based on the background, veto strategy and effective volume cut. **[Methods]** The earliest photon arrival time and charge information from the photomultiplier tube signals was ultilized to construct a charge-weighted least squares time equation. Then, this method was successfully applied to large water Cherenkov detectors through simulation studies and parameter

国家自然科学基金(No.12575210)资助

第一作者：张宇，男，1996年出生，2024年于中国科学院大学获博士学位，研究领域为先进核能技术分析

通信作者：徐吉磊，E-mail：xujl@ihep.ac.cn

收稿日期：2025-11-18，修回日期：2026-01-19

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12575210)

First author: ZHANG Yu, male, born in 1996, graduated from University of Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2024, focusing on advanced nuclear energy technology analysis

Corresponding author: XU Jilei, E-mail: xujl@ihep.ac.cn

Received date: 2025-11-18, revised date: 2026-01-19

adjustments. Finally, the JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Experiment) Cherenkov detector was taken as a case study, and Geant4 simulations were performed to optimize parameters. **[Results]** Simulation results show that muon track reconstruction in the water layer is achieved with a spatial resolution better than 12 cm, an angular resolution better than 0.4°, and a reconstruction efficiency of approximately 97%. **[Conclusions]** These results demonstrate that muon track reconstruction proposed in this study can help JUNO to further reduce the background, which plays an important role in the sensitivity analysis of JUNO in the future.

Key words Track reconstruction, Charge weighted, Simulation, Water Cherenkov detector

高能宇宙线是来自地外的高能粒子，能量范围10~10^{11} GeV，与大气非弹性碰撞可以产生多种次级粒子，这些次级粒子的衰变会产生高能中微子、γ光子和μ子等[1-2]。高能宇宙线μ子与探测器靶物质作用产生的长寿命放射性同位素是大型中微子和暗物质探测实验的主要本底之一[3-6]。早期探测器一般较小，在几米的量级，一般是对全探测器进行宇宙线的反符合，即宇宙线经过探测器之后一段时间（毫秒至秒量级），整个探测器数据不用于中微子或暗物质的寻找。近年来，特别是对中微子的研究，探测器越来越大，达到了几十米量级，比较有代表性的有日本的超级神冈实验（Super-K）探测器40 m量级[7]、下一代的顶级神冈实验（Hyper-K）探测器70 m量级[8]，以及中国正在运行的江门中微子实验（Jiangmen Underground Neutrino Experiment，JUNO）探测器直径约为43.5 m[9-10]。几十米的大型探测器为了提高探测器有效测量体积与时间，要求实验上对μ子进行径迹长度上一定体积的反符合，去除宇宙线μ子引起的同位素本底，这就需要对μ子进行径迹重建，重建精度越高，对同位素的本底排除越精确，从而能进一步提高探测中微子的灵敏度。

目前，已有一些关于中微子探测器实验对径迹重建的方法研究。传统算法可采用电荷信息进行重建，如2022年，Yang等[11]通过多支光电倍增管（Photomultiplier Tube，PMT）电荷重心的办法重建宇宙线μ子的出射和入射点；Zhang等[12]采用PMT时间信息构建最小二乘法重建μ子径迹；2024年，Qi等[13]提出了一种修正时间的方法来优化PMT的筛选条件，去除水中μ子径迹对实验的影响；Super-K[14]则通过顶点挑选程序获取事例顶点位置，然后通过切伦科夫环反推出粒子信息。近年来，随着机器学习的发展，也可利用深度学习重建μ子径迹。2021年，刘言等[15]提出了一种基于卷积神经网络（Convolutional Neural Network，CNN）模型的μ子重建方法，利用顶部跟踪器重建的径迹信息进行网络训练，训练数据集通过对μ子径迹进行旋转来增强，以补偿顶部跟踪器覆盖的有限角度。

本文研究开发了一种基于时间极小化的加权重迭代最小二乘法（Iterative Reweighted Least Square，IRLS）[16]进行μ子重建的方法。研究基于Geant4软件进行探测器模拟，探测器几何基于类似JUNO实验[9-10]的水切伦科夫探测器结构，即一个直径和高都为43.5 m的圆柱形水池浸泡一个直径为35.4 m的液体闪烁体球（液闪），在距离液闪球周边约2 m范围向内密排1.8万支PMT。模拟随机输入穿过夹层水的各种角度的μ子，产生切伦科夫光，得到PMT的电荷和时间信息，用来验证算法性能。PMT和液闪球之间的水层称为夹层水（CD Water Buffer，CWB）。虽然夹层水厚度相对较薄，穿过这部分水的宇宙线μ子占穿过整个液闪球的μ子的约20%，其引起的宇宙线本底对中微子的探测不容忽视。重建采用PMT收集的光电子（Photoelectron，PE）的第一击中时间（First Hit Time，FHT），也称最快光，和电荷（Q）联合构建极小化方程，而且在初始化拟合时，直接采用解析方法给出一个待精确的出入射点[17]，开发了一套利用PMT系统测量到的最快光时间和电荷信息联合重建中心探测器水介质μ子轨迹的重建算法，即（Cherenkov Time and charge weighted method），简称CT重建算法或CT算法。该重建算法对穿过探测器夹层水部分的μ子进行了重建验证，验证结果表明该CT重建方法运行稳定且对径迹的重建结果可靠。

此方法对改善水切伦科夫探测器重建性能有良好效果，进而可提高探测器对μ子引起的本底排除能力。由于此方法是利用水切伦科夫探测器PMT的时间和电荷信息进行的宇宙线重建，因而，对于类似原理的大型水切伦科夫探测器都适用，比如未来的日本Hyper-K实验[8]，深海高能物理实验如中国南海的海玲计划[18]、HUNT（High-energy Underwater Neutrino Telescope）项目[19]、欧洲地中海海底的KM3Net实验[20]等。

1 μ子信号响应特征

1.1 重建算法中的光学模型

μ子在穿过以水为介质的探测器时，其速度大

于光在水中的速度，会发出切伦科夫光[21]。产生的光子以带电粒子的径迹为轴，以一定角度的锥形发射，切伦科夫光子飞行方向和粒子运动方向的夹角θ_c由式(1)定义。

$$\cos\theta_c = \frac{1}{\beta n} \tag{1}$$

式中：β是粒子速度与真空中光速的比值，即相对论因子；n是介质的折射率。这些光子的时间和电荷信息将被PMT阵列收集和记录，是重建可利用的关键信息。由于CWB μ子没有穿过液闪，μ子在自身径迹周围的夹层水中产生切伦科夫辐射，形成的光锥效应最终被PMT收集和记录，如图1所示。红色实线表示μ子的飞行方向，黑色虚线描述了切伦科夫辐射的圆锥波前和切伦科夫辐射的方向。带箭头的黄实线表示沿μ子径迹辐射的光子径迹，实心黄色椭圆表示中心探测器水介质中的第i个光电倍增管。以μ子径迹上的实心红点作为参考点$r_0(x_0,y_0,z_0)$，以t_0作为μ子在该参考点的时间，能够得到第i个光电倍增管接收到切伦科夫光子的第一击中时间$t_i^{\exp}$，这相当于μ子在图1中沿实红线飞行一段距离后的时间：

$$t_i^{\exp} = t_0 + \frac{\vec{p}\cdot(\vec{r}_i - \vec{r}_0) + d_i \times \tan\theta_c}{v_m} \tag{2}$$

式中：$\vec{p}$是μ子径迹方向；$\vec{r}_i$是第i个光电倍增管的位置；d_i是从μ子径迹到光电倍增管的垂直距离；v_m是μ子的飞行速度。一般穿过CD水介质的μ子速度近似光速，因此在计算$t_i^{\exp}$时，v_m和θ_c被设定为常数。

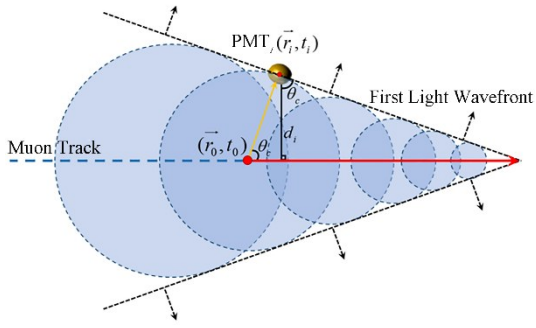


图1 宇宙线μ子在水介质中飞行中产生切伦科夫光的示意图(彩图见网络版)

Fig.1 Schematic diagram of Cherenkov light generation during muon flying in the CD water buffer (color online)

μ子在穿过水时，单位电荷粒子产生的波长在300~600 nm内的切伦科夫光子总数约为300个/cm。μ子穿过图2水切伦科夫探测器的CD水介质时，由于PMT密排，μ子经过PMT所在的圆面时，在出入射点附近的PMT均会收集到较多电荷，形成电荷簇团，而且在入射点附近的PMT最先收集到μ子的切伦科夫光。

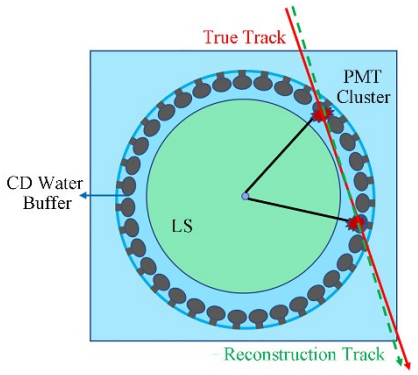


图2 宇宙线μ子重建示例图

Fig.2 Schematic diagram of a muon track reconstruction with two clusters

模型中紧密围绕液闪球的PMTs形成了一个PMT壳，这可以视作一个二维(2D)表面而非三维(3D)空间，使用经纬度投影法，将PMT的电荷和FHT信息投影到2D平面。PMT位置在球坐标系下的ϕ角对应2D平面上的X轴，范围[−180°，180°]；θ角在球坐标系下从北极到南极是[0°，180°]，这里转换成了“90−θ”的形式，即从90°~−90°，便于画图与实际上下位置对应起来，如图3所示。图中表示一个μ子穿过探测器时，PMT阵列记录到的电荷和最快光时间分别投影到2D平面上的情况。不同颜色表示像素点的电荷和最快光的数值是不同的。红色三角标记对应于μ子的真实入射点和出射点。图3(a)中红色像素表示在μ子出入射点附近的PMT收集到的电荷最多，可超过1 000个PE。

本研究根据高能宇宙线实验的地下μ子数据[22]，模拟产生了约38万个实际进入探测器的来自不同方向和能量的μ子样本。μ子样本的平均能量约为207 GeV，在探测器中的能量沉积范围为0~100 GeV。

1.2 宇宙线μ子响应特征

使用上述μ子样本，模拟得到PMT收集到的μ子穿过夹层水的总PE分布和μ子径迹距离液闪球心的距离分布，如图4所示。红色竖直虚线是距离CD中心约19.4 m的位置，即LPMT光阴极赤道位置。PE数从20 000往右增长，在90 000时达到峰值，这部分对应于右图μ子径迹从PMT赤道的19.4 m位置开始，往球心方向移动，穿过水介质的径迹长度增加，产生的切伦科夫光子增多，直到有机玻璃球边缘17.8 m，此时μ子在水介质的有效径迹为15.5 m。在左图中20 000 PE以下，有一个靠近零的尖峰，对应于右图所示的红色虚线以外的边缘CWB μ子，距离球心19.4~20.0 m，在夹层水中的径

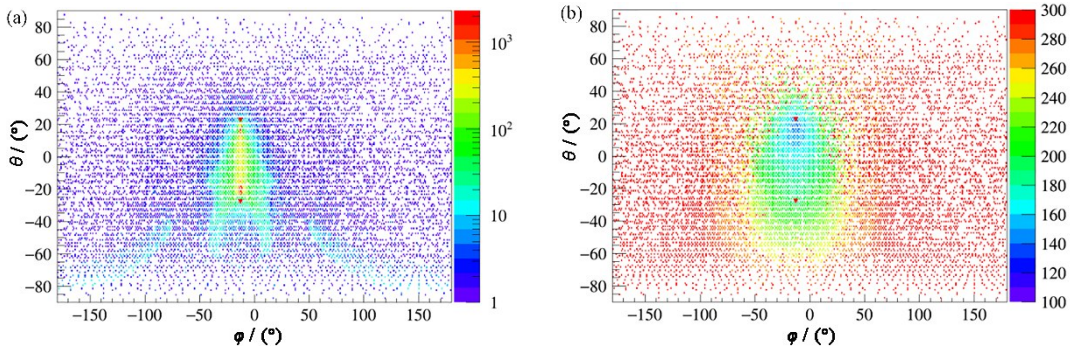


图3 PMT阵列对CWB μ子的电荷(a)和最快击中时间(b)分别在θ-φ二维平面上的投影
Fig.3 Projections of the charge (a) and FHT (b) of CWB muons on the θ-φ two-dimensional plane by the PMT array

迹小于10 m，且径迹几乎都位于PMT赤道线之外，光子产生于PMT背后，难以直接到达光阴极，需要反射才能最终到达，所以收集到的PE数较少。这部分μ子不适宜采用直接光的FHT理论重建，因为径迹距离我们关心的中心探测器较远，这里在重建时不做详细讨论。

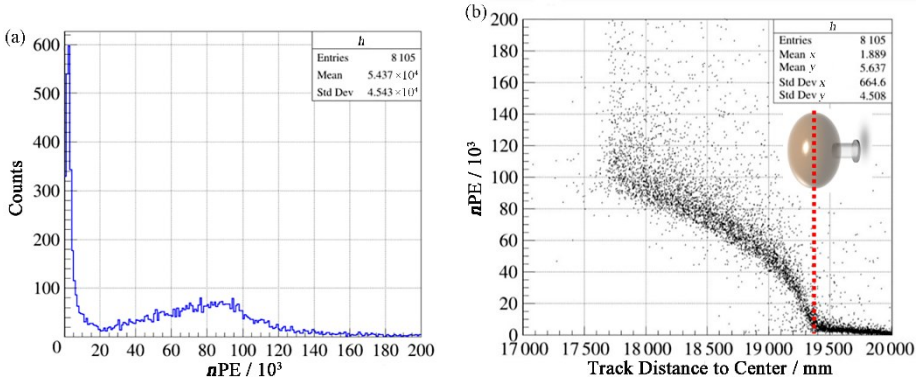


图4 模拟得到的穿过CD水介质的μ子的PE数分布（彩图见网络版）
(a) PMT接收到的PE数分布，(b) PE数与μ子距离CD中心的关系
Fig.4 The PE distribution of PMT induced by CWB Muon in simulation (color online)
(a) PE number distribution induced by CWB muon, (b) PE *vs*. the distance to CD center

1.3 时间极小化χ^2方程的构建

在进行宇宙线μ子径迹的重建时，本研究构造了PMT预期时间的加权最小二乘估计量χ^2，通过ROOT工具“TMinuit”软件包[23]扫描参数在给定范围内与真值的χ^2差异，找到卡方值最低的参数值，从而实现极小化拟合，找到径迹的最佳值[23]。

CWB μ子在水中以接近光速飞行，沿着它们的径迹发射切伦科夫光。通常在距离μ子入射点或出射点最近的PMT将收集最多的切伦科夫光电子，因此在击中PMT二维电荷图上形成两个簇团，如图3(a)所示。由于CD水介质两侧的PMT玻璃、不锈钢挡光板和有机玻璃等各种材料，PMT接收到的光子既有直接光子也有反射光子。FHT是直接光子的贡献，受反射的影响较小，因此，在构建加权最小二乘法估计参数时，应选择PMT接收到的FHT信息作为观测值。通过比较PMT接收光子的实际时间和预期时间的差异，构建一个加权最小二乘的χ^2统计量：

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^{N} w_i \left(\frac{t_i - t_i^{\exp}}{\sigma_i} \right)^2 \tag{3}$$

式中：N是触发的PMT总数；t_i是第i个PMT接收光子的FHT；$t_i^{\exp}$是第i个PMT接收光子的预期时间；w_i是第i个PMT在χ^2统计量占的FHT权重；σ_i是第i个PMT的渡越时间分辨。一般是几个纳秒的时间，对于江门探测器，一部分光电倍增管是打拿极的PMT时间分辨是2.6 ns，一部分是微通道型PMT，时间分辨是8.2 ns。预期时间$t_i^{\exp}$是从式(2)中得到的。对式(3)作极小化拟合，从而得到一组相应的μ子径迹参数。

2 μ子径迹重建算法构建

2.1 重建算法的设计和流程

对于穿过已知半径的球（PMT所在的球，半径20 m）的μ子径迹，最少可采用4个参数确定一条宇

宙线μ子的径迹，分别是径迹在球表面入射位置的天顶角和方位角，以及径迹方向矢量的天顶角和方位角。

一个接近真实值的初始值有助于“TMinuit”极小化快速地收敛到最佳拟合结果。本研究在第一阶段对初始值的输入使用一种基于解析导数的line-fit方法[17]直接获取μ子径迹参数的优化解。在第二阶段进行极小化的多次迭代，实现最佳拟合值。以下是重建的两个阶段共8个步骤的具体介绍，同时图5是更直观的简要步骤。

第一阶段（Stage 1）：

1）筛选水池中触发的PMT总数。由于有4个径迹参数需要拟合，触发的PMT总数不能少于4个；

2）对水池中触发的PMT进行比较宽松的时间和电荷挑选，即FHT<250 ns，电荷>3 p.e.；

3）采用Line-fit拟合方法[17]，初步解析计算出CWB μ子径迹的出射点和入射点，作为下一阶段使用ROOT工具“TMinuit”[23]进行拟合的径迹参数初值。

第二阶段（Stage 2）：

4）初始化，挑选事例，重置迭代参数。一个作用是将第一阶段的解析结果作为初始输入；第二个作用是通过后面的极小化挑选，返回迭代PMT的筛选，作为初始参考值输入，重新进行后面步骤的极小化；

5）采用迭代IRLS方法[16]计算权重，并根据FHT观测值与预测值的残差调整相应的权重w_i；

6）循环迭代直到满足以下所有停止条件（Stop 1）（1）拟合次数不得超过20次；（2）本次拟合权重与上次权重的差异非常小（$\sum\left|w_i^{\mathrm{now}}-w_i^{\mathrm{last}}\right|<0.02w_i^{\mathrm{last}}$）；实际每个事例的循环迭代次数平均为五次，最多为十几次；同时，这里的停止参数在程序中是可调的，用户可以自由更改其值；

7）循环迭代直到满足以下所有停止条件（Stop 2）（1）拟合总次数不得超过40次；（2）通过电荷权重扔掉PMT的机制使用次数不超过3次；该机制是根据拟合的径迹参数计算预期时间t_i^{exp}，并与观测时间t_i比较，找出满足（$|t_i-t_i^{\mathrm{exp}}|\geqslant 10$ ns）的PMT，然后一次性扔掉残差最大的前ΔN个PMT，然后进入内部循环开始新一轮迭代拟合；这一机制可以确保大大减小残差的影响，结果也表明该机制可改善拟合效果较差的边缘CWB μ子径迹重建结果。如果上述两个条件都满足，则整个程序流程结束，返回拟合的径迹参数结果；

8）输出一条最佳的候选径迹作为μ子径迹。

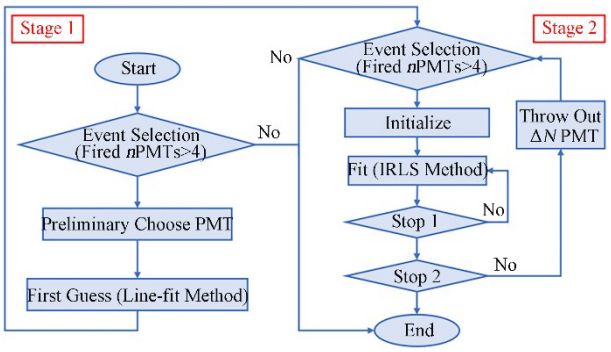


图5 基于CWB μ子径迹的CT方法重建流程图

Fig.5 Flow chart of muon track reconstruction

2.2 PMT挑选和加权最小二乘法权重讨论

图6展示了μ子在模型探测器中飞行并辐射出切伦科夫光子的示意图。在图中左侧带箭头的黄色实线表示直接切伦科夫光子的飞行路径，这些光子穿过有机玻璃球和液体闪烁体，最终到达对面的PMT。图中的黄色虚线阴影部分表示在探测器中，能够接收到直接切伦科夫光子的PMT位置，这些PMT的位置是根据μ子在中心探测器的入射点和出射点来确定的。

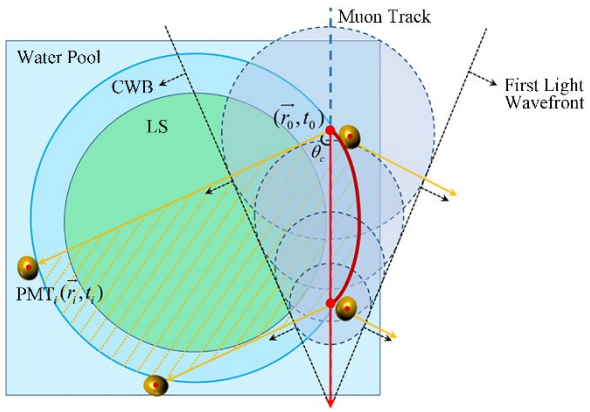


图6 在水切伦科夫探测器中CWB μ子辐射出的直接切伦科夫光子的物理过程（彩图见网络版）

Fig.6 Physical processes of direct Cherenkov photons emitted by CWB muon in water Cherenkov detectors (color online)

由于PMTs接收到的第一击中光子中，有部分并不是直接由μ子产生的切伦科夫光子，简单的挑选条件无法完全去除这部分光子。为精确偏离切伦科夫光学模型的观测值t_i，并减少残差$(t_i-t_i^{\mathrm{exp}})$偏离FHT的PMT事例数量，我们提出一种迭代IRLS算法，这是得到高精度重建结果的关键，其核心是根据这些光子的FHT残差$(t_i-t_i^{\mathrm{exp}})$调整统计量χ^2中的相应权重w_i。CWB μ子径迹重建算法中，总权重$w_i=Q^{\alpha}w_i'$，其中Q^{α}是PMTs接收到的光子数量的α次幂，经过参数拟合确定α最优值为2，MAD是$|t_i-t_i^{\mathrm{exp}}|$分

布的中位值，w_i'由IRLS算法给出：

$$w_i = Q^{\alpha} w_{i'} = \frac{Q_i^{\alpha}}{\sum_{i=1}^{n} Q_i^{\alpha}} w_{i'}$$

$$\begin{cases} w_{i'} = 1, & \text{when } -2\ \text{ns} < t_i - t_i^{\exp} < 7\ \text{ns} \\ w_{i'} = 0, & \text{when} |t_i - t_i^{\exp}| > 3 \times \text{MAD} \\ w_{i'} = \left[1 - \left(\dfrac{t_i - t_i^{\exp}}{3 \times \text{MAD}}\right)^2\right]^2, & \text{when } |t_i - t_i^{\exp}| \leqslant 3 \times \text{MAD} \end{cases} \tag{4}$$

IRLS是一种鲁棒性统计的参数估计方法[24-25]，相比传统的加权普通最小二乘法（Ordinary Least Squares，OLS）鲁棒性更强，因为IRLS可以通过自动调整w_i来抑制异常值，即在模型中具有较大残差的观测值的权重w_i较小。极小化加权最小二乘法（Weighted Least Squares，WLS）通常比极小化OLS法要复杂得多，因此使用IRLS方法是在OLS方法的基础上对WLS的迭代优化，以确保更快地收敛。复杂的WLS问题通过迭代解决通常比用OLS解决更简单，有助于避免得到局部最优解。

3 重建性能分析

本研究采用三个重要指标来评价径迹重建算法的性能表现：角分辨、位置分辨和重建效率。角分辨描述的是重建的径迹与实际径迹之间夹角的分辨精度；位置分辨则指的是重建径迹与真实径迹在中心探测器内部的弦中点处的距离分辨精度，如图7所示。

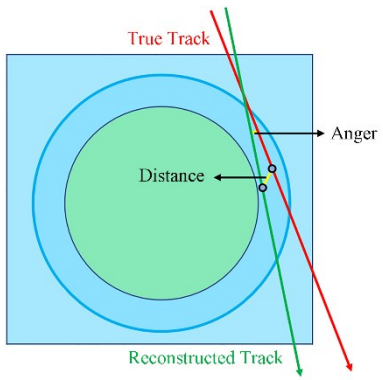


图7 评估算法的重建效果时的两个关键指标：夹角和弦中点间的距离（彩图见网络版）

Fig.7 When evaluating the reconstruction performance of the algorithm, two key metrics are considered: angular and positional deviations (color online)

3.1 重建性能定义

为计算夹角和距离分辨率，采用以下方法，以距离为例：首先，构建一个以距离为变量的分布直方图，以0点作为起始点。然后，从直方图的0点处开始，逐步向右积分数据，直至积分的事例数占到总事例数的68.3%，这个点被定义为分布的2σ位置。分辨率即为σ的值。基于2σ位置进一步确定5σ位置，在0~5σ内的事例视为成功重建，占总事例数的比例即为重建效率。偏差则被定义为5σ范围内所有事例距离的平均值。由此，能够量化径迹重建算法的性能，并据此对其优化。

3.2 重建结果

根据上述条件和算法，基于CT重建方法的CWB μ子重建算法的性能测试结果如图8所示。横轴表示的是实际径迹与探测器中心的距离。图8（a）表示重建径迹与真实径迹的弦中点距离的中心值在距离球心不同距离处的偏差。图8（b）表示重建径迹与真实径迹的夹角在距离球心不同距离下的偏差。偏差是重建的某个变量（图8中Distance或Anger）的统计平均值，实际上表征的是重建径迹和真实径迹的中心值偏移，这部分偏移，往往是因为算法或者探测器几何等因素造成的，实际应用中可以把中心值的偏移通过刻度修正回去。而分辨率是表示的重建围绕中心值的弥散程度，即重建精度。图8（c）和图8（d）分别表示重建径迹与真实径迹的弦中点距离和夹角分辨率随距离球心不同距离的变化关系。紫色线的Stage 1只是一个中间结果，但重建结果也列出来作为简要数值解析重建算法的参考。红色线Stage 2作为最终的重建结果，在探测器边缘处的径迹重建效果较差，而在17.7~19.4 m的径迹重建结果较为一致，径迹越靠近中心探测器重建结果越好。距离的偏差在30 cm以内，分辨率达到12 cm以内；角度的偏差在0.8°以内，分辨率在0.4°以内。整体的重建效率达到了97.1%。

Stage 1中Line-fit的解析方法具有一定的重建能力，方便快速，可用于重建要求不高的模型，比如在线快速重建。Stage 2中的时间极小化是为了进一步提高重建精度，在19 m之内重建精度甚至小于10 cm。

4 结语

本文提出了一种基于光电倍增管电荷和最快光时间信息的径迹重建算法——CT重建方法。该算法通过利用PMT测量到的信号，结合加权重迭代最小二乘法，能够有效地重建水切伦科夫μ子的径迹。在算法设计和流程方面，本文详细描述了从PMT挑选、权重计算、迭代拟合到停止条件设置的各个关键步骤，确保算法的鲁棒性和高效性。此外，还讨论了径迹参数的选择、基于时间信息的加权最小二乘法重建，以及算法的挑选配置条件，以上方法提高了从

复杂探测器信号中提取有用物理信息的能力。在性能分析方面，本文通过对水切伦科夫探测器的Geant4模拟数据，对重建算法进行验证、优化，通过重建径迹的角度和距离偏差、分辨率以及重建效率进行全面模拟测试。模拟数据测试结果给出的夹层水μ子重建的距离偏差控制在30 cm以内，分辨率达到12 cm以内；角度偏差在0.8°以内，分辨率在0.4°以内。整体的重建效率可达97%。这表明CT方法在重建效率和精度方面具有良好的准确性与潜力。此方法对未来低本底的中微子或暗物质实验的水切伦科夫探测器宇宙线μ子径迹重建具有重要的借鉴和指导意义。

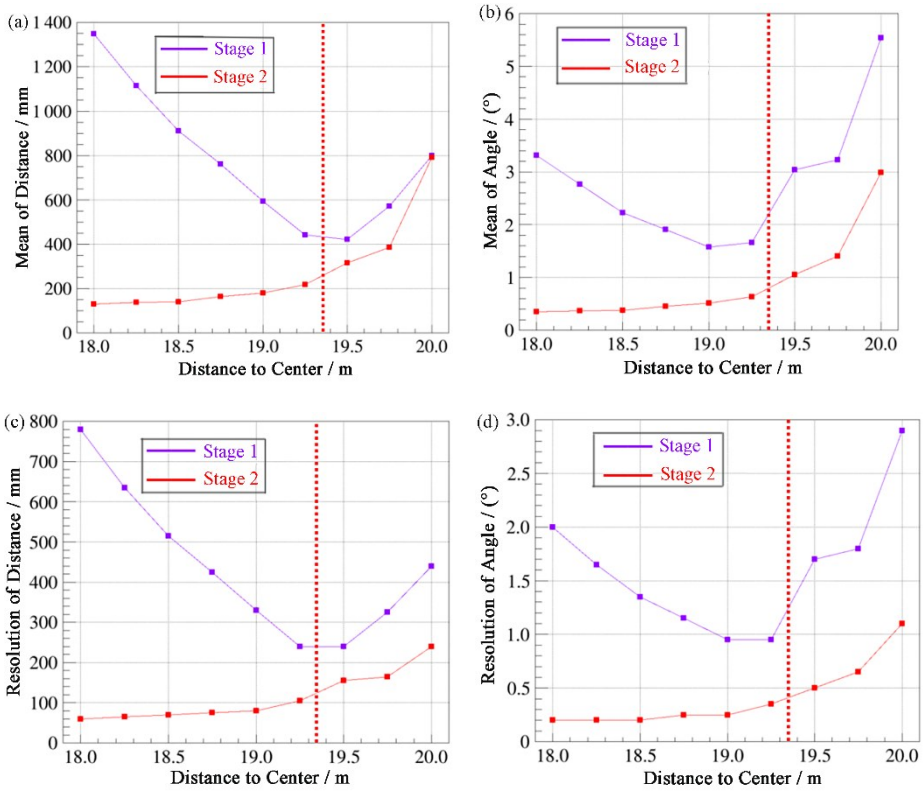


图8 基于CT重建算法的CWB μ子重建算法的性能测试结果（彩图见网络版）
(a) 距离偏差的中心值，(b) 角度偏差的中心值，(c) 距离分辨率，(d) 角度分辨率

Fig.8 Performance test results of CWB muon reconstruction algorithm based on CT method (color online)
(a) Mean of distance, (b) Mean of angle, (c) Resolution of distance, (d) Resolution of angle

作者贡献声明 张宇负责实验执行、编写代码、数据结果分析、论文写作；徐吉磊负责项目的构思、实验设计、论文修改、数据收集；王志民负责实验设计、论文修改；王玲玉负责项目技术构思。

参考文献

1 Dutta S I, Reno M H, Sarcevic I, *et al*. Propagation of muons and taus at high energies[J]. Physical Review D, 2001, **63**(9): 094020. DOI: 10.1103/physrevd.63.094020.

2 王宏凯, 徐翀, 赵传奇, 等. 多层像素芯片缪子成像装置中芯片位置校正方法研究[J]. 核技术, 2019, **42**(7): 070403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.070403.
WANG Hongkai, XU Chong, ZHAO Chuanqi, *et al*. Research on chip position correction method in multilayer pixel chip muon imaging device[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(7): 070403. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2019.hjs.42.070403.

3 Guo Z Y, Bathe-Peters L, Chen S M, *et al*. Muon flux measurement at China Jinping underground laboratory[J]. Chinese Physics C, 2021, **45**(2): 025001. DOI: 10.1088/1674-1137/abccae.

4 Bae H W, Kim H J, Kim Y D, *et al*. Simulation studies for neutron and muon-induced backgrounds in AMoRE-II[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, **1468**(1): 012245. DOI: 10.1088/1742-6596/1468/1/012245.

5 王钰锋, 刘家璇, 杨丽桃, 等. 中国锦屏地下实验室与稀有物理实验[J]. 核技术, 2023, **46**(8): 080018. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080018.
WANG Yufeng, LIU Jiaxuan, YANG Litao, *et al*. China Jinping Underground Laboratory and rare physics

experiments[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(8): 080018. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080018.

6 赵剑锟, 姜爽, 李泳珲, 等. 4~400 MeV宇宙线质子对近月空间轨道γ能谱中湮灭辐射的贡献[J]. 核技术, 2023, **46**(5): 050201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs. 46. 050201.
ZHAO Jiankun, JIANG Shuang, LI Yonghui, *et al*. Contribution of 4~400 MeV cosmic-ray protons to annihilation radiation in the γ-ray spectrum of near-lunar orbit[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(5): 050201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050201.

7 Suzuki Y. The super-kamiokande experiment[J]. The European Physical Journal C, 2019, **79**(4): 298. DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-6796-2.

8 Abe K, Tanaka H K. Hyper-Kamiokande construction status and prospects[J]. Frontiers in Physics, 2024, **12**: 1378254. DOI: 10.3389/fphy.2024.1378254.

9 An F P, An G P, An Q, *et al*. Neutrino physics with juno [J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2016, **43**(3): 030401. DOI 10.1088/0954-3899/43/3/030401.

10 Abusleme A, Adam T, Ahmad S, *et al*. The design and technology development of the JUNO central detector[J]. The European Physical Journal Plus, 2024, **139**(12): 1128.

11 Yang C F, Huang Y B, Xu J L, *et al*. Reconstruction of a muon bundle in the JUNO central detector[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(5): 59. DOI: 10.1007/s41365-022-01049-3.

12 Zhang K, He M, Li W D, *et al*. Muon tracking with the fastest light in the JUNO central detector[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2018, **2**(1): 13. DOI: 10.1007/s41605-018-0040-8.

13 Qi Y, Liu J L, Liu M Y, *et al*. Muon energy reconstruction in the high-energy neutrino observations[J]. Astronomical Techniques and Instruments, 2024, **1**(3): 197–202. DOI: 10.61977/ati2024027.

14 Shiozawa M. Reconstruction algorithms in the Super-Kamiokande large water Cherenkov detector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999, **433**(1–2): 240–246. DOI: 10.1016/s0168-9002(99)00359-9.

15 Liu Y, Li W D, Lin T, *et al*. Muon reconstruction with a convolutional neural network in the JUNO detector[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2021, **5**(3): 364–372. DOI: 10.1007/s41605-021-00259-4.

16 Babson J, Barish B, Becker-Szendy R, *et al*. Cosmic-ray muons in the deep ocean[J]. Physical Review D, 1990, **42** (11): 3613–3620. DOI: 10.1103/physrevd.42.3613.

17 Stenger V J. Detecting AGN neutrinos with a single DUMAND string[R/OL]. (2025-03-28) [2025-10-23]. https://www. phys. hawaii. edu/~dumand/post/dumandexternal/1995/HDC-01-95004.pdf.

18 Zhang H M, Cui Y D, Huang Y L, *et al*. A proposed deep sea Neutrino Observatory in the Nanhai[J]. Astroparticle Physics, 2025, **171**: 103123. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2025.103123.

19 Peng Y J, Wang Z K, Gao B, *et al*. Performance testing of a novel short axis photomultiplier tube for the HUNT project[J]. Journal of Instrumentation, 2024, **19**(8): T08006. DOI: 10.1088/1748-0221/19/08/T08006.

20 Bagley P, Werneke P, Fehr F, *et al*. KM3NeT: technical design report for a deep-searesearch infrastructure in the mediterranean sea incorporating a very large volume neutrino telescope[R/OL]. (2025-04-15) [2025-10-20]. http://www. inp. demokritos. gr/~rapidis/CVlong/Rapidis_all_pubs/a243.pdf.

21 Cherenkov P A. Visible light from clear liquids under the action of gamma radiation[J]. Comptes Rendus (Doklady) de l'Académie des Sciences de l'URSS, 1934, **2**(8): 451–454.

22 JUNO Collaboration. JUNO physics and detector[J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2022, **123**: 103927.

23 ROOT. TMinuit class reference[EB/OL]. [2025-09-16]. https://root.cern.ch/root/html534/TMinuit.html.

24 Holland P W, Welsch R E. Robust regression using iteratively reweighted least-squares[J]. Communications in Statistics - Theory and Methods, 1977, **6**(9): 813–827. DOI: 10.1080/03610927708827533.

25 Kiers H A L. Weighted least squares fitting using ordinary least squares algorithms[J]. Psychometrika, 1997, **62**(2): 251–266. DOI: 10.1007/BF02295279.