

基于紫外激光测量时间投影室 电离能损的方法研究

常 悅^{1,2},祁辉荣^{2,3,*},余 信^{2,3},张锦闲^{2,3},喻纯旭¹,赵 光^{2,3},伍灵慧^{2,3},邓 智⁴,王建春^{2,3}

(1. 南开大学 物理科学学院, 天津 300071; 2. 中国科学院 高能物理研究所, 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘要: 时间投影室(TPC)具有高精度、低物质量和出色的粒子鉴别能力,在对撞机物理、暗物质研究以及核物理领域得到了广泛应用。TPC能同时测量电离能量损失率(dE/dx)和动量,这是其进行电离能损测量和实现粒子鉴别(PID)的关键特性。然而,传统的电离能损测量方法存在成本高、重复性低等不足。本文提出通过监测每个激光脉冲的能量并进行校正,优化激光电离的概率密度分布,从而提高 dE/dx 分辨率的测量精度。实验使用集成了2层气体电子倍增器(GEM)模块的TPC原型机进行验证,结果表明该方法能恢复单能激光的高斯分布能谱,实现 dE/dx 分辨率的有效测量。通过拼接激光事件,模拟了有效长度为1.2 m时TPC的 dE/dx 分辨率为4%,与DESY GEM模块束流实验的拼接结果基本一致。此外,通过搭建TPC全模拟软件框架给出了大尺寸TPC的 dE/dx 在0 T 和3 T 下的模拟结果。

关键词: 时间投影室; 气体电子倍增器; 紫外激光; 电离能损

中图分类号: TL81 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2025)03-0725-09

doi: [10.7538/yzk.2024.youxian.0916](https://doi.org/10.7538/yzk.2024.youxian.0916)

Study on Method of Measuring Ionization Energy Loss of Time Projection Chamber Using UV Laser

CHANG Yue^{1,2}, QI Huirong^{2,3,*}, SHE Xin^{2,3}, ZHANG Jinxian^{2,3}, YU Chunxu¹,

ZHAO Guang^{2,3}, WU Linghui^{2,3}, DENG Zhi⁴, WANG Jianchun^{2,3}

(1. School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Institute of High Energy Physics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The time projection chamber (TPC) is a critical component in collider physics, dark matter research, and nuclear physics due to its high precision, low material budget, and superior particle identification (PID) capabilities. The TPC's main strength is its ability to measure both the ionization energy loss (dE/dx) and the momentum of particles simultaneously, which is essential for accurate ionization energy loss measurement and PID. However, traditional methods for measuring ionization

收稿日期: 2024-12-16; 修回日期: 2025-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(11975256, 11775242, 12475200); 国家重点研发计划(2016YFA0400400, 2024YFA16000300)

* 通信作者: 祁辉荣

energy loss, such as charged particle beams or cosmic rays, are not only expensive but also suffer from low repeatability. UV lasers present a cost-effective, portable, and flexible alternative to these traditional particle beams. By adjusting the laser energy, the ionization process can be easily controlled, allowing for precise simulations of different particle momentum. This capability is crucial for studying the dE/dx resolution of TPC and meeting various physical requirements. An innovative method that optimizes the probability density distribution of laser ionization was introduced. The method involved monitoring and adjusting the energy of each laser pulse, which significantly improves the measurement accuracy of dE/dx resolution. The experimental setup included a TPC prototype equipped with a double-layer gas electron multiplier (GEM) module and a laser optical path for validation purposes. The method entailed monitoring the energy of each laser pulse and making corrections to optimize the probability density distribution of laser ionization. This optimization was aimed at enhancing the measurement accuracy of dE/dx resolution. The test was conducted over 40 minutes, utilizing eight effective pad readout layers and retaining 43 000 events. The experimental results indicate that this method successfully recovers the Gaussian energy spectrum of monochromatic lasers, enabling precise measurement of dE/dx resolution. Additionally, the experiment involves stitching laser events to simulate the dE/dx resolution of the TPC at an effective length of 1.2 m. The simulated dE/dx resolution was calculated to be 4%, which aligns closely with the results of DESY GEM module beam test. This close alignment further substantiates the effectiveness of the proposed method in enhancing the measurement accuracy of dE/dx resolution. In order to explore the variables that influence the performance of TPC, an extensive simulation software framework for TPC was constructed, enabling swift and accurate performance simulations. This framework yields simulation data for the dE/dx parameter of large-scale TPC in environments with both zero and three Tesla magnetic fields. The research is of considerable importance to particle physics. It presents an innovative and streamlined technique for assessing ionization energy loss, which is a crucial factor in PID, and it also greatly aids in the energy profiling and distortion correction of TPC. This cutting-edge methodology enhances the versatility of TPC across different domains, including their use in collider experiments and dark matter investigations, and it also establishes a foundation for employing UV lasers in the energy and distortion analysis of TPC.

Key words: time projection chamber; gas electron multiplier; UV laser; ionization energy loss

时间投影室(TPC)是一种高分辨率的气体探测器。它通过测量带电粒子在电场中的漂移时间和投影平面上的空间位置来实现粒子三维径迹的测量。TPC具有优异的记录大量径迹的能力和良好的粒子鉴别能力，并具有物质量低、位置分辨高和动量分辨高等优势，因而被广泛应用于粒子物理实验。在对撞机实验中，如 STAR^[1]、CEPC^[2]，TPC均作为主径迹探测器在径迹重建和粒子鉴别等方面发挥着重要的作用；在暗物质实验中，如 CDEX^[3]、Panda^[4]实验，TPC被用于探测暗物质粒子，提供高精度的粒子径迹和能量信息，对于识别和追踪原子核相互作用产生的次级粒子、电离

能损的测量、低能量粒子的探测至关重要。此外，TPC还被应用于辐射场监测与核反应监测等领域。

TPC能够同时测量粒子的能量损失率(dE/dx)和动量，这一特性使其具备优异的粒子鉴别能力，也是 TPC 被广泛应用的关键原因。评估 dE/dx 分辨率的传统方法主要有 3 种。第 1 种方法使用带电粒子束(如电子、 π 介子、K 介子)，这种方法常用且稳健，但稀有粒子束设施稀缺且实验成本高昂。第 2 种方法利用宇宙射线，虽然可行，但实验周期较长且重复性较低^[5]。第 3 种方法通过模拟进行研究，这种方法简便且可用于分析影响 dE/dx

分辨率的关键因素,但其结果需要实验验证。在传统方法中,TPC通过计算收集的电荷量来测量 dE/dx 。然而,由于电离能损的波动较大,其平均值可能被少数高能量沉积粒子所主导,导致 dE/dx 的平均值呈现朗道分布,严重影响 dE/dx 的计算精度^[6]。因此,在实际应用中,通常采用截断平均或事例筛选的方法,以尽可能消除朗道分布“长尾”带来的影响。

紫外线激光器提供了一种成本效益高、便携且灵活的粒子束替代方案。激光具有高准直性和强稳定性,可以通过调整激光能量精确控制电离过程。基于这些特性,激光已在多个大型TPC中得到应用^[1-2,5]。这些TPC探测器通过构建复杂的激光系统,将多束激光均匀分布在TPC腔体内的预定义位置,从而实现对TPC状态的精确监测。由于激光能够产生与带电粒子数量相当的电子-离子对,在研究TPC的 dE/dx 分辨率时,激光有潜力模拟不同动量的粒子,以满足各种物理需求。国际上,日本的KEK研究团队已利用紫外激光对TPC的增益稳定性进行了初步测试^[7]。同时,国内高能物理研究所的气体探测器团队也在开展基于紫外激光的TPC性能研究^[8]。然而,由于紫外激光电离过程中存在显著波动性,其在测量电离能损和进行畸变校准方面的应用尚未得到详细研究。

本研究通过模拟和实验对TPC中的 dE/dx 进行深入探讨。首先,利用Garfield++和COMSOL多物理场分析软件构建一个TPC全模拟软件框架,旨在高效模拟TPC内部的所有物理过程。通过这一框架,对带电粒子的电离机制进行分析,并开展对TPC dE/dx 性能的模拟研究。同时,基于紫外激光的电离特性,提出一种利用紫外激光实现 dE/dx 测量的新方法,并设计实验以验证其可行性。此外,利用事例拼接的方式对更大尺寸下的TPC dE/dx 性能进行预估,并将结果与模拟数据以及DESY GEM模块的测试结果进行对比。

1 电离能损的模拟研究

1.1 TPC全模拟软件研究框架

在气体探测器中,带电粒子电离的过程可分为3个阶段:首先,粒子与气体分子发生碰撞,这一过程是完全随机的,遵循泊松分布;然后是碰撞

引发的能量损失阶段,其概率由微分截面决定,可通过PAI模型^[9]来描述,该模型能较真实模拟带电粒子在气体中的电离过程,每次散射均可能引起1个或多个电子的电离;最后,粒子在气体分子中沉积的能量转化为原初或次级电子-离子对。带电粒子的电离能谱是这3个阶段过程的卷积。

TPC探测器通过计算收集到的电荷量实现 dE/dx 测量,对于探测器粒子鉴别能力的评估非常重要。通过拟合现有分辨率作为读出pad尺寸和气压的函数,可推导出描述过去大型TPC探测器分辨率测量值 $R_{dE/dx}$ (%) 的经验公式^[10]:

$$R_{dE/dx} = 5.4L^{-0.37} \quad (1)$$

其中, $L(\text{m}\cdot\text{bar})$ 是 $N_{\text{sample}}L_{\text{sample}}$ 与压力的乘积,为测量的有效长度,与测量点数 N_{sample} 和pad大小 L_{sample} 有关。

为对带电粒子的电离过程进行深入理解,同时对TPC的 dE/dx 分辨率进行研究,本研究基于CERN开发的Garfield++模拟软件^[11]和COMSOL多物理场分析软件,搭建了一套TPC全模拟软件研究框架,TPC内主要物理过程及模拟框架的流程如图1所示。

模拟过程包括对于TPC内电离、漂移、倍增以及数字化过程的全模拟,随后利用 dE/dx 算法实现对于TPC性能的分析。Garfield++提供的Heed接口,其核心是PAI模型的扩散版本,可用于模拟带电粒子在气体中的能量损失,并在计算过程中考虑了 δ 电子和入射粒子的多次散射。因此,电离和漂移过程全部依赖于Garfield++的直接模拟数据。电子经过漂移后到达倍增结构,若直接进行全模拟将面临巨大的资源消耗和较长的计算时间。为此,研究首先利用Garfield++对GEM模块进行电子增益模拟,然后利用式(2)的Polya分布进行拟合,用于描述电子倍增后的数量分布。

$$P(G) = C_0 \frac{1+\theta}{\Gamma(1+\theta)} \frac{G}{G_0} \exp\left[-(1+\theta)\frac{G}{G_0}\right] \quad (2)$$

式中, C_0 为常数; G_0 为单电子增益分布的平均值; θ 为决定 Polya 分布方差的参数。倍增部分的模拟数据保持与实验数据一致,具体过程如下:首先利用COMSOL多物理场分析软件对标准尺寸的CERN GEM进行建模,GEM的尺寸和距离与实验设置相同。然后将COMSOL解析后的Field文件和Mesh文件导入Garfield++完成后续模拟。通过

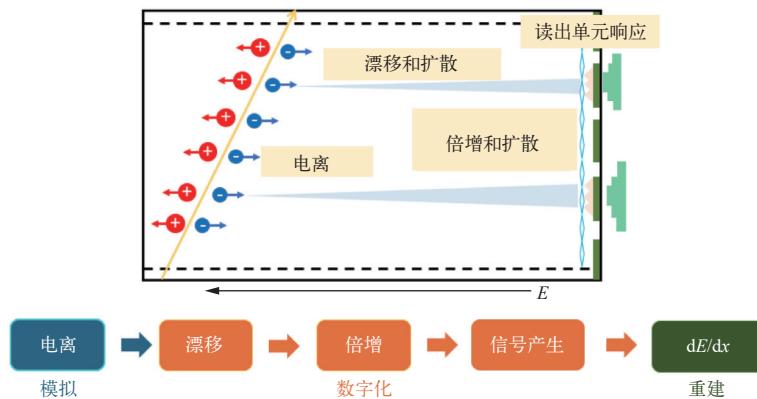


图 1 TPC 内的主要物理过程及模拟软件框架的模拟流程

Fig. 1 Main physical processes within TPC and simulation process of simulation software framework

调整电压设置, 调整到与实验近似的增益 1 300。

图 2a、b 分别示出了电子在经过 double-layer-GEM 模块后的倍增示意图, 以及模拟得到的 Polya 分布和拟合参数。在软件框架中, 基于模拟得到的参数, 利用 Polya 抽样实现参数化。电子在到达读出 pad 后被收集, 这些信号经放大、成形、滤波, 随后被数字化。对于噪声的模拟参考了实验数据^[12], 即基线噪声为 100~300 LSB, 电子学噪声为 8 LSB, 利用高斯抽样实现对该过程的模拟。

1.2 dE/dx 重建结果

基于软件框架, 模拟了 2 000 条 20 GeV 的 K 粒子在 T2K($\text{Ar} : \text{CF}_4 : \text{iC}_4\text{H}_{10} = 95 : 3 : 2$)气体中不同磁场环境下的 dE/dx 重建结果。有效径迹长度为 1.2 m(正负电子对撞中大型 TPC 应用的有效长度), pad 尺寸与实验设置一致, 为 1 mm×6 mm, 共 200 个采样点。图 3a 给出了截断前每层 pad 上电子数的分布(模拟环境为 3 T 磁场), 尽管电离过程完全随机, 但每层 pad 上电子数量(正比于电

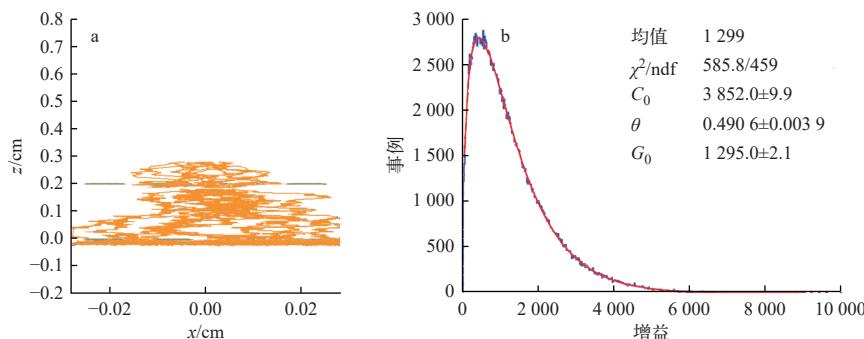
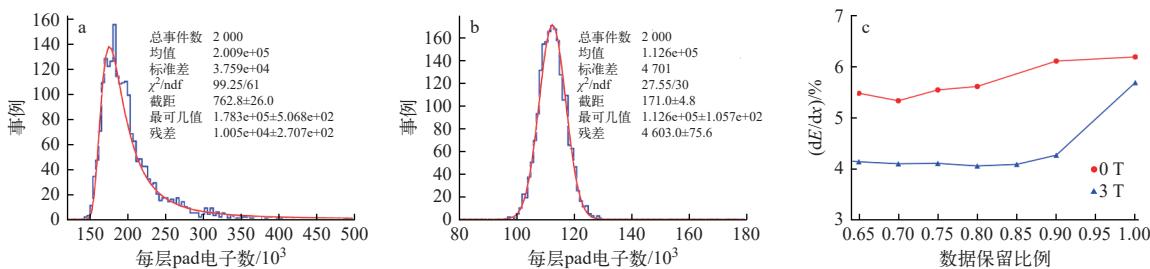


图 2 电子经过 double-layer-GEM 模块倍增示意图(a)和电子倍增分布的 Polya 拟合(b)

Fig. 2 Schematic diagram of electron multiplication through double-layer-GEM module (a) and distribution of electron multiplication fitted with Polya function (b)

图 3 截断前(a)和截断后(截断比例为排序后 30%)(b)每层 pad 电子数的统计分布
以及截断比例对 dE/dx 分辨率的影响(c)Fig. 3 Pre-truncation (a) and post-truncation (with truncation ratio targeting the last 30% of data) (b) statistical analyses of pad electron counts per layer and effect of varying truncation ratios on resolution of dE/dx measurements (c)

荷量)的分布却存在明显的“长尾”,影响 dE/dx 的测量。

在分析读出 pad 收集到的电荷时,采用传统的 dE/dx 算法,即统计每层读出 pad 的电子数后,去掉一定比例排序靠后的电子层数,在消除“长尾”带来的影响后,对截断后的总电子数 pad 层数统计,得到 dE/dx 的模拟结果,如图 3b 所示,截断比例为升序排列后 30%。此外,模拟还给出了重建结果 0 T 和 3 T 磁场下不同截断比例的优化,如图 3c 所示。不同截断比例的 dE/dx 分辨率存在明显差异,也解释了电离能损在具体测量时存在明显波动的原因。0 T 和 3 T 下的 dE/dx 分辨率均在截断后 30% 时达到最优值,分别为 5.31% 和 4.08%。

1.3 紫外激光的电离机制

Nd:Yag 激光器(266 nm)和氮气激光器(337 nm)是气体探测器最常用的两种激光器。由于紫外激光的单光子能量远低于气体分子的最低电离电位,因此在与气体相互作用时,双光子电离成为主要过程。气体探测器中的工作气体通常具有较高的最低电离电位,如 Ar(15.7 eV)、CO₂(14.4 eV)、CH₄(13.1 eV)。266 nm 和 337 nm 激光的两倍光子能量(分别为 7.36 eV 和 9.32 eV)仍不足以使这些工作气体发生电离。研究发现,紫外激光可通过双光子电离过程电离工作气体中的有机杂质气体,如甲苯(8.82 eV)和丁基苯(8.96 eV),进而产生足够的原初电子^[13]。

2 利用紫外激光测量电离能损的方法

在多数实验中,紫外线激光器的平均电离密度约为几个最小电离粒子(MIPs)^[2,14-15],以匹配前端电子学的动态范围。通过重建预定义位置的激光径迹,可实现对 TPC 径迹畸变的监测。紫外线激光器因其高稳定性和可重复性,正逐渐成为气体探测器,特别是 TPC 畸变校准的重要途径。然而,由于测量的激光电离分布具有较大的 FWHM 和类似朗道的尾部,紫外线激光器一直未能用于能量相关的研究,如 dE/dx 分辨率的测量。在先前的研究中,测量的分布被拟合为类朗道分布^[12]。研究发现激光电离的分辨率定义为尺度参数 σ 除以最可几值(MPV)约 25%,对于开展能量相关研究精度不足。因此,需找到一种方法来降低激光

电离波动的影响。

2.1 激光能谱分布的理论推导

在文献 [15] 中,激光电离概率密度分布被近似为泊松分布,但这与测量到的类朗道尾部存在冲突。因此,应从理论上对激光电离进行推导,具体参考了气体探测器中带电粒子的电离过程。激光相互作用的机制是双光子电离。杂质分子吸收光子是一绝对随机的过程,这与带电粒子与气体原子的碰撞相同。这个过程可通过平均自由程来描述:

$$\lambda = 1/(N\phi^2\sigma^{(2)}) \quad (3)$$

其中: N 为杂质分子的密度; ϕ 为光子通量; $\sigma^{(2)}$ 为双光子吸收截面。每次吸收都是独立发生的,因此沿任何长度 L 的发生频率的分布应遵循与带电粒子相同的泊松分布:

$$P(L/\lambda, k) = \left(\frac{L/\lambda}{k!}\right)^k e^{-(L/\lambda)} \quad (4)$$

每次双光子吸收只产生一个电子,带电粒子与气体的相互作用过程有很大不同(电子-离子对的生成伴随着复杂的能量沉积机制)因此可认为在单位长度的电离电子数也应遵循泊松分布。在大多数实验中,激光电离产生的电子数大于 100 cm⁻¹^[1,5],这种情况下,泊松分布可用高斯分布代替。

2.2 激光能量校正

理论推导激光电离的高斯分布与实际测量的类朗道分布存在差异,这种差异主要来源于激光能量的波动,这对脉冲激光器来说不可避免。先前的研究得到了 T2K 气体中激光能量密度 E 与电离密度 I 之间的幂律关系^[12]:

$$I = 98.38E^{2.35} \quad (5)$$

根据式(5)的描述,即使小的激光能量波动也可能导致大的电离波动,那些能量偏离平均值较远的激光脉冲导致了长尾效应。Nd:YAG 激光器出束能量可达 15 mJ,而如果将激光应用于 TPC 研究,激光的电离密度最好相当于 1~2 MIPs,即每 cm 产生 100~200 个原初电子,此时对应的激光能量应在 1~2 μJ/mm²。激光能量的降低也将增加激光的能量波动,进而影响激光电离。因此上述差异可认为是:单能激光的电离概率密度分布预计为高斯分布,由于激光能量随时间波动,许多对应于不同能量的高斯分布叠加,导致

测量得到的电离谱呈现类似朗道分布的特征,具有较大的 FWHM。因此,如能对每个激光事例对应的激光脉冲能量进行记录,就可利用式(5)给出的激光能量密度和激光电离密度的关系,以激光的平均能量为基准,还原出单能激光的电离能谱,这种方法称为能量校正。经过校正后的激光能量可减少大的 FWHM 并显著提高 dE/dx 分辨率。

3 实验装置

实验采用集成 double-layer-GEM 模块的 TPC 原型机对该方法进行实验验证。探测器和光学系统的布局如图 4 所示。使用的是 Quantel 公司的 Q-smart 100 Nd:YAG 激光器,频率为 20 Hz,脉冲持续时间为 5.64 ns。激光束的直径为 4.55 mm,光束发散角为 0.52 mrad。激光脉冲能量最大为 20 mJ,能量可调。

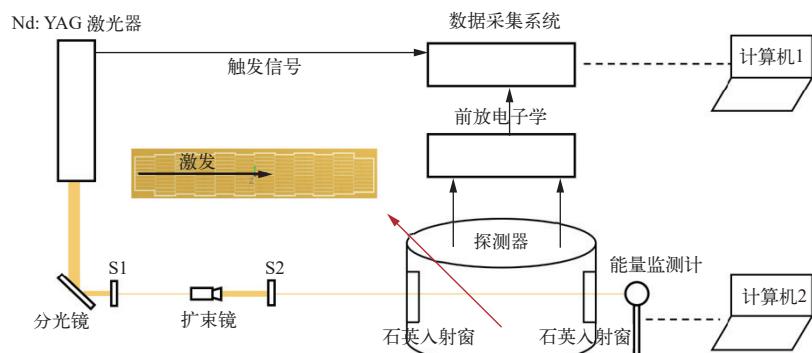


图 4 探测器和光学系统的布局

Fig. 4 Schematic diagram of detector and optical system layout

在光学系统中,激光先被一个(99/1)部分反射镜反射,以衰减激光能量,仅保留 1% 的激光脉冲能量。然后,激光通过两个相同的光阑。两个光阑用于激光束的准直和将激光光斑尺寸缩小至 0.8 mm。在光阑之间放置 1 个 3 倍扩束镜,将高斯激光束的光斑尺寸扩展至 2.4 mm。光阑-扩束镜-光阑这种结构,可进一步衰减脉冲能量,同时减少激光发散角,保证光束均匀性。最后,激光通过石英窗口进入探测器。通过另一个石英窗口离开腔室后,光束能量由激光能量计(Ophir 公司的 StarLite)测量。关于激光器的更多细节,包括激光信号幅度、稳定性等信息,可参考文献 [16]。

实验在常压和室温条件下的 T2K 气体进行。探测器包含 128 个读出 pad,分布在 12 层读出单元中,相邻层以半个 pad 的间距错开(图 4 中间位置)。每个 pad 的尺寸为 1 mm×6 mm,激光沿 pad 长边方向入射。探测器漂移长度为 73 mm,并设有两个石英窗口以将激光引入腔体内部。电子通过 2 层标准 CERN GEM 进行放大。GEM 的有效面积为 100 mm×100 mm,间距为 140 μm ,外孔尺寸为 70 μm ,两层 GEM 之间的距离为 2 mm。漂

移区、传输区和感应区的电压分别由通用多通道电源系统(CEAN SY5527)独立供电。前端电子学基于 CASAGEM ASIC 芯片^[17],每个 ASIC 集成 16 个通道,每个通道的等效噪声电荷(ENC)小于 2 000。ASIC 的增益和成形时间可调。实验中,通过对激光信号和⁵⁵Fe 放射源的测试,最终选择设置为 20 mV/fC 和 40 ns。经过前置放大器的放大、成形、滤波后,信号传输至数据采集系统(DAQ)^[18],并由 40 MHz 时钟采样进行数字化。

在信号处理中,在数据文件中读取包头和包尾进行数据区分,获得波形并提取时间信息和电荷信息。图 5 示出一典型的激光波形,波形的峰值和峰面积与输入电荷之间均存在严格的正比关系。在表征电荷信息时,采用波形的峰面积而不是最大值,能有效降低采样频率(40 MHz)和有效位数(12 bit)在获取峰值时引入的误差。此外,使用峰面积表征电荷信息还可保留饱和信号的部分信息。电子学的成形时间设置为 40 ns,波形的上升沿约 200 ns,下降沿约 400 ns。为提高信息获取的精度,计算波形面积的范围需大于理论波形底宽。因此,实验中选取峰值前的 10 个采

样点(250 ns)作为上升沿部分, 峰值后的21个采样点(525 ns)作为下降沿部分。其中, 信号值可高达1 100个最低有效位 LSB, 而基线噪声范围在100~300 LSB之间。此外, 每个通道的平均电子噪声水平约8 LSB。

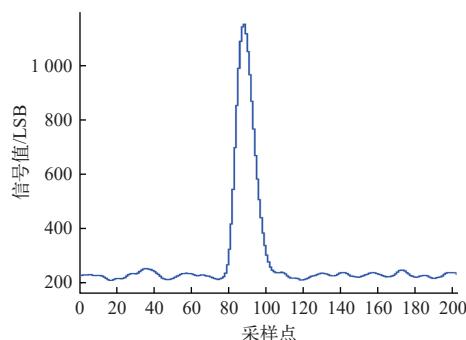


图5 典型激光波形
Fig. 5 Typical laser waveform

4 结果及分析

4.1 测试过程及结果

测试时间为40 min, 记录43 000个事例以供后续分析。探测器的增益通过⁵⁵Fe源进行校准, 并设定为1 300。校准过程发现了一些死通道, 后续的数据处理中利用中间8层连续的读出pad进

行数据重建。为进行能谱校正, 需记录每个激光事例对应的激光脉冲能量。在测试过程中, 能量计通过控制设备连接到上位机, 记录每个激光脉冲的能量。激光器产生两路同步触发信号: 一路连接到DAQ系统, 用于控制激光电离信号的收集; 另一路连接到控制能量计的设备, 以记录激光能量。这样做的目的是为了确保电子学测量的激光事例与能量计记录的激光脉冲能量之间保持同步和准确的对应关系。

测试过程中, 存在部分激光事例的脉冲能量偏离均值过大, 会引入较大误差。考虑到激光的能谱并不如朗道分布一样具有很长的“长尾”, 因此并未采用传统的截断平均法, 而是采用事例筛选的方法, 筛选出能量在 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 范围内的激光事例。筛选过程事例数量减少了约33%。接着, 使用式(5)对实际测量的激光电离能谱进行校正。图6示出在进行激光能量校正和事例筛选前后, 激光电离概率密度分布的变化。经过校正和筛选后, 激光电离分布呈现出高斯分布特征。该结果也证明了单能激光的电离能谱服从高斯分布。 dE/dx 分辨率可通过计算均值和标准差直接确定, 值为 $(13.60 \pm 0.06)\%$ 。

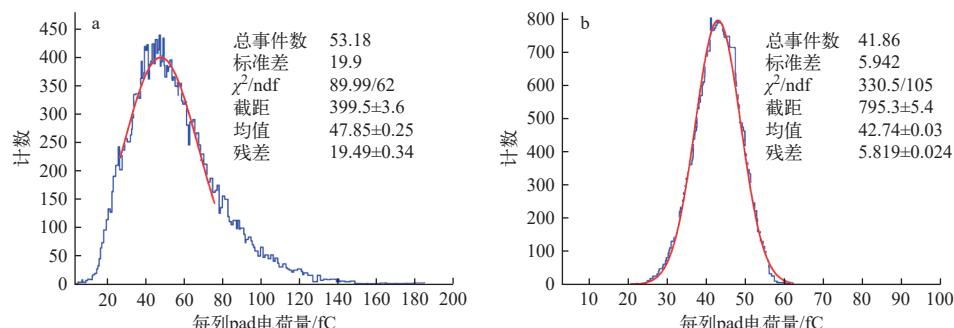


图6 修正前(a)和利用关系公式修正后(b)激光的电离分布
Fig. 6 Distribution of laser ionization energy spectrum before (a) and after correction (b)

4.2 分析与讨论

测试结果表明, 经能量校正的激光能恢复单能激光的高斯分布能谱。为模拟更大尺寸的TPC环境, 本研究采用类似于文献[19]中描述的方法, 通过将一次实验中的多个激光事例进行拼接, 构造出具有更多pad层的事例。这种方法有效增加了式(2)中的有效长度, 从而可模拟更大尺寸的TPC环境。因此, 可将 dE/dx 分辨率的测量结果外

推到更大体积的TPC。实验操作和数据处理方法与第4.1节中描述的相同。

图7详细示出了通过事例拼接方法模拟不同有效长度的TPC所获得的 dE/dx 分辨率的变化趋势。红色点代表利用激光事例拼接模拟后的结果, 显示随着探测器有效长度的增加, dE/dx 分辨率得到显著提升, 这与理论预期相吻合。蓝色线则代表了文献[19]中基于DESY GEM模块在

1 T 磁场下进行的束流测试事例拼接结果。对比两者,尽管实验条件和使用的电离源不同,但两种方法得到的 dE/dx 分辨率随有效长度增加而降低的趋势是一致的,这验证了事例拼接方法在模拟 TPC 性能方面的可靠性和有效性。值得注意的是,由于带电粒子的电离机制与激光电离机制之间存在差异,以及带电粒子固有的电离能损误差,激光事例拼接的结果略优于束流测试结果。因此,在对 TPC 的性能进行研究时,可利用激光事例拼接作为更精确的模拟手段。根据事例拼接结果,当 TPC 的有效长度达 1.2 m,且使用 1 mm×6 mm 的读出 pad 单元时, dE/dx 分辨率能达到 4% 的水平。这一结果不仅证实了事例拼接方法的实用性,也为未来 TPC 的设计和优化提供了重要的参考数据。

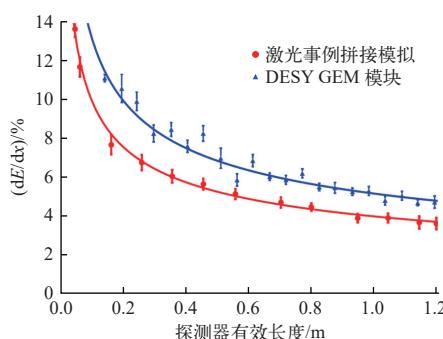


图 7 激光拼接事件的模拟结果与 DESY GEM 模块束流实验测试结果的对比

Fig. 7 Comparison of simulation results of laser concatenation events with DESY GEM module test results

基于紫外激光的实验研究表明,经过能量校正后的单能激光电离能谱能够显著提高 dE/dx 的测量精度,可从 $(40.70 \pm 0.74)\%$ 优化提升至 $(13.60 \pm 0.06)\%$ 。此外,通过采用事例拼接的方法,能对更大尺寸下的 dE/dx 性能进行估计。

5 小结

本研究通过模拟和实验相结合的方法,深入探讨了 TPC 中的电离能损。在模拟研究方面,通过构建 TPC 全模拟软件框架,实现大尺寸 TPC 内物理过程的快速模拟。模拟结果显示,在 1.2 m 的径迹长度上,200 个采样点的 dE/dx 分辨率在 0 T 和 3 T 磁场下分别为 5.31% 和 4.08%。未来研究将通过调整磁场强度,进一步提供 TPC 其他物理

参数对磁场依赖性的模拟结果,并通过改变读出单元尺寸,给出不同尺寸下 dE/dx 的模拟研究结果。在实验方面,基于紫外激光的双光子电离机制,提出了一种新的 dE/dx 测量方法,通过监测激光脉冲能量并校正电离能谱,显著降低了激光电离过程中的波动影响,最终实现了对电离能损信息的精准测量。实验结果表明,经过能量校正后的单能激光电离能谱,其 dE/dx 测量精度显著提高,从 $(40.70 \pm 0.74)\%$ 优化至 $(13.60 \pm 0.06)\%$ 。同时,采用事例拼接方法预估了更大尺寸 TPC 的 dE/dx 性能,当 TPC 有效长度达到 1.2 m 且使用 1 mm×6 mm 的读出 pad 单元时, dE/dx 分辨率预计可达 4%。本研究为紫外激光在 TPC 能量研究中的应用奠定了坚实基础,并为未来更大规模 TPC 探测器的设计与优化提供了重要的参考数据。未来的研究将深入探索紫外激光的电离特性以及包括增益稳定性因子、有效电子数在内的多项 TPC 性能参数,以实现更高的测量精度和更优的探测性能。

参考文献:

- [1] LUDLAM T. Overview of experiments and detectors at RHIC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2003, 499(2/3): 428-432.
- [2] GROUP T C S. CEPC conceptual design report: Volume 2 - physics & detector[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1811.10545v1>.
- [3] CAO X G, CHANG Y L, CHEN K, et al. NvDEx-100 conceptual design report[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, 35(1): 3-9.
- [4] LI C, FENG C, DONG J, et al. Design of the FPGA-based gigabit serial link for PandaX-III prototype TPC[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2017, 1(2): 25-31.
- [5] WIECHULA J, Alice TPC Collaboration. Commissioning and calibration of the ALICE TPC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2009, 830(1/2/3/4): 531-534.
- [6] WILLIAMS E J. The straggling of β -particles[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1929, 125(798): 420-445.
- [7] KOBAYASHI M, YUMINO K, OGAWA T, et al. A novel technique for the measurement of the avalanche fluctuations of a GEM stack using a gating foil[J]. Nuclear-

- ar Instruments and Methods in Physics Research A, 2022, 1039: 166872.
- [8] YUAN Z Y, QI H R, CHANG Y, et al. Performance of TPC detector prototype integrated with UV laser tracks for the circular collider[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2022, 1040: 167241.
- [9] SMIRNOV I B. Modeling of ionization produced by fast charged particles in gases[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2005, 554(1/2/3): 474-493.
- [10] HAUSCHILD M. Progress in dE/dx techniques used for particle identification[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1996, 379(3): 436-441.
- [11] SCHINDLER H. Garfield++ user's guide[OL]. [2023-04]. <https://garfieldpp.web.cern.ch/documentation/>.
- [12] CAI Y, LI Y, QI H, et al. Investigation of UV laser ionisation in argon-based gas mixtures with a Triple-GEM detector[J]. Journal of Instrumentation, 2020, 15(2): T02001.
- [13] TOWRIE M, CAHILL J W, LEDINGHAM K D, et al. Detection of phenol in proportional-counter gas by two-photon ionisation spectroscopy[J]. Journal of Physics B, 1986, 19(13): 1989-1996.
- [14] LEBEDEV A. A laser calibration system for the STAR TPC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, 478(1/2): 163-165.
- [15] HILKE H J. Detector calibration with lasers: A review[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1986, 252(2/3): 169-179.
- [16] 王海云, 祁辉荣, 刘凌, 等. 微结构气体探测器中紫外激光束的信号和指向精度实验研究[J]. 物理学报, 2019, 68(2): 63-71.
- WANG Haiyun, QI Huirong, LIU Ling, et al. Signal and pointing accuracy of ultraviolet laser in micro-pattern gaseous detector[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(2): 63-71(in Chinese).
- [17] HE L, DENG Z, LIU Y N, et al. Development of a multi-channel readout ASIC for a fast neutron spectrometer based on GEM-TPC[J]. Chinese Physics C, 2014, 38(10): 106101.
- [18] HUANG Y, GONG H, LI J, et al. Development of the readout system for a time projection chamber prototype [J]. Journal of Instrumentation, 2019, 14(1): T01001.
- [19] EINHAUS U, KRÄMER U, MALEK P. Studies on particle identification with dE/dx for the ILD TPC[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1902.05519v1>.