

# NICA-MPD 中电磁量能器模块性能的 Geant4 模拟研究

祝锦 彭肖宇 罗思远 肖万成 何列 刘雨晨 罗凤姣 肖敏 王晓冬  
(南华大学核科学技术学院 衡阳 421001)

**摘要** 桶状抽样型电磁量能器(Electromagnetic Calorimeter, Ecal)是俄罗斯在建的重离子超导同步加速器(Nuclotron-based Ion Collider facility, NICA)中多功能探测谱仪(Multi-Purpose Detector, MPD)上的一个重要探测器,主要用于探测10 MeV至几个GeV能域内电子和光子的能量、时间、位置信息。基于Geant4软件,使用单能电子研究了入射位置及闪烁体层数对探测器模块(module)能量分辨率的影响,闪烁体层数和电子能量对探测器单元(tower)时间分辨率和Ecal位置分辨率的影响。模拟结果表明:随着电子入射位置由module边缘向中心移动,闪烁体内能量沉积由718 MeV增加至758 MeV;在tower长度为415.5 mm条件下,随着闪烁体层数增加,module能量分辨率变差,tower时间分辨率变好,Ecal位置分辨率变差。在兼顾量能器的各项性能后,tower中闪烁体最佳层数为211层,Ecal能量分辨率好于4.35%,时间分辨率小于112 ps,位置分辨率好于2 mm;在相同条件下,电子能量越高电磁量能器的时间分辨率和位置分辨率越好。

**关键词** 能量分辨率, 时间分辨率, 位置分辨率, Geant4

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.120202

## Performance of the electromagnetic calorimeter module in the NICA-MPD based on Geant4

ZHU Jin PENG Xiaoyu LUO Siyuan XIAO Wancheng HE Lie  
LIU Yuchen LUO Fengjiao XIAO Min WANG Xiaodong  
(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract** [Background] The barrel-sampled electromagnetic calorimeter (Ecal) is an important part of the Multi-Purpose Detector (MPD) in Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA) that is being built in Russia. It is primarily used to detect energy, time, and position information of electrons and photons in the energy domain from 10 MeV to a few GeV. MPD-Ecal is comprised of 2 400 modules with 16 towers per module. Each tower is made up of alternating layers of 211 scintillator sheets and 210 lead sheets, as well as 16 wave-length shift fibers. [Purpose] This study aims to evaluate the performance, such as energy resolution, time resolution, and coordinate resolution, etc., of the Ecal by simulation. [Methods] The Geant4 software was employed to simulate single-energy electron incident on Ecal to examine the effects of several parameters on the performance of Ecal. Influences of the position of the particle

中国科学技术部基金(No.2020YFE0202001)、国家自然科学基金(No.11875163, No.12275120)、湖南省青年科技创新人才培养(No.2022RC1202)、湖南省自然科学基金项目(No.2021JJ20006)、湖南省教育厅基金项目(No.21A0281)资助

第一作者: 祝锦, 男, 1999年出生, 2020年毕业于湖南工程学院, 现为硕士研究生, 研究领域为电磁量能器研制与实验测试

通信作者: 王晓冬, E-mail: wangxd@usc.edu.cn

收稿日期: 2023-01-09, 修回日期: 2023-07-17

Supported by China Ministry of Science and Technology Fund (No. 2020YFE0202001), National Natural Science Foundation of China (No. 11875163, No. 12275120), Hunan Province Youth Science and Technology Innovation Talent Training (No. 2022RC1202), Hunan Province Natural Science Foundation Project (No. 2021JJ20006), and Hunan Province Education Department Fund Project (No. 21A0281)

First author: ZHU Jin, male, born in 1999, graduated from Hunan Engineering Institute in 2020, master student, focusing on the development and experimental testing of electromagnetic quantity energy devices

Corresponding author: WANG Xiaodong, E-mail: wangxd@usc.edu.cn

Received date: 2023-01-09, revised date: 2023-07-17

incidence point, the number and thickness of the scintillator and lead layers, the polish of the optical fibre end-face, and the energy and type of incident particles on the energy deposition and resolution, time distribution and time resolution, and coordinate resolution were investigated in details. Finally, the time resolution of a single tower was simulated using the natural cosmic ray package, and the tower's expected time resolution in the cosmic ray test was obtained. **[Results]** As the electron incidence position moves from the edge to the center of the module, the energy deposition within the scintillator rises from 718 MeV to 758 MeV. With a limited tower length of 415.5 mm, increasing the number of scintillator layers decreases the energy resolution of the module, improves the time resolution of the tower, and worsens the coordinate resolution of the Ecal. Taking into account the performance of the Ecal gauge, the optimal number of scintillator layers in the tower is 211. SiPM detects 42% more photoelectrons at a polish of 0.6 when the fiber end is coated with a reflective material than when it is not. As the polish of the fiber end-face increases, so does the number of photoelectrons detected by the SiPM, and the time resolution of the tower improves. When the fibre end-face polish is 1.0, the time resolution of the tower is less than 103 ps while time resolution of the tower (with 211 layers) in the cosmic ray is 185 ps. **[Conclusions]** The time and coordinate resolutions of Ecal improve with increasing electron energy under the same circumstances.

**Key words** Energy resolution, Time resolution, Coordinate resolution, Geant4

重离子超导同步加速器(Nuclotron-based Ion Collider Facility, NICA)是俄罗斯杜布纳联合核子研究所(Joint Institute for Nuclear Research, JINR)正在建造的新型对撞机。它能提供4~11 GeV 能量范围内的 Au-Au 重离子碰撞,以此来寻找高重子密度区夸克物质和强子物质的混合相,以及研究量子色动力学(Quantum Chromodynamics, QCD)物质的相变临界点<sup>[1]</sup>。NICA 的重离子实验计划十分有利于把此前的相关研究拓展到高重子密度区。尽管第一性原理计算无法用于该能量域,但是理论预期、高密度下的 QCD 相图可能具有丰富的结构<sup>[2]</sup>。

NICA 加速环上共设置了两个对撞点,两个对撞点上的探测器可以同时工作,多功能探测谱仪(Mult-Purpose Detector, MPD)是位于其中一个对撞点上的探测器<sup>[3]</sup>,可用于研究重离子碰撞中高温高密核物质的特性,特别是用于研究夸克禁闭、手征对称破缺、核物质相变及相变临界点等科学问题。电磁量能器(Electromagnetic Calorimeter, Ecal)作为 MPD 上重要的子探测器,其主要用于探测 10 MeV 至几个 GeV 能域内电子和光子的能量、时间、位置信息<sup>[4]</sup>。为了满足实验的要求,MPD-Ecal 必须具备莫里哀半径较小的致密工作物质和最小的电磁级联簇射重叠的优点,并且能在 MPD 螺线管的磁场( $B=0.5$  T)中运行。为了避免粒子入射角度对探测器的性能造成影响和减少探测器的探测死区,Ecal 采用物理性能优异的“Shashlik”型抽样量能器,并且采取圆桶状全对心的设计方案<sup>[5]</sup>,将其模块制作为楔形。

“Shashlik”型电磁量能器凭借稳定的性能被广泛应用于多个大科学装置上,例如 PHENIX<sup>[6]</sup>、KOPIO<sup>[7]</sup>、LHCB<sup>[8]</sup>、T2K<sup>[9]</sup>等实验。能量分辨率、时

间分辨率、位置分辨率是评估电磁量能器性能的重要依据。MPD-Ecal 的技术报告(Technical Design Report, TDR)<sup>[10]</sup>中要求探测器在 3 GeV 电子入射条件下,量能器必须满足好于 5% 的能量分辨率、小于 1 ns 的时间分辨率(最好能够接近 100 ps)、优异的位置分辨率的条件。目前,Ecal 的整体结构尺寸<sup>[11-12]</sup>、吸收体和反射材料的选取<sup>[13-14]</sup>、波长位移光纤的选择以及光子输运过程<sup>[15]</sup>已经得到了充分的研究。本工作基于 Geant4 软件<sup>[16]</sup>模拟了多个物理参数对量能器的能量分辨率、时间分辨率的影响,包括电子入射点位置、tower 中闪烁体层数、入射粒子能量和类别、光纤端面抛光度等,以及使用电荷重心法对 7×7 阵列组合的 tower 的位置分辨率进行了研究。模拟所得到的能量分辨率、时间分辨率、位置分辨率参数将为后续的实验提供参考。

## 1 电磁量能器结构

JINR 对 MPD-Ecal 的整体设计结构如图 1 所示,内径为 3.42 m,外径为 4.226 m,长度为 6 m,重量为 60 t。整个 Ecal 由 2 400 个 module 组成,根据倾斜角度不同,分为 8 个不同区域的 module<sup>[17]</sup>。中方总负责 768 个 module 的研制与测试,分别由清华大学、山东大学、复旦大学、南华大学共同完成。南华大学负责研制图 1 中第一区域的 77 个 module,每个 module 由 16 个 tower 通过 8×2 的排列方式粘接在一起组成。tower 经过铣切加工呈棱台形,向底部逐渐变小,端部面积为 33 mm×33 mm,长度为 415.5 mm。每个 tower 中穿插 16 根由可乐丽(Kuraray)公司生产的 Y-11(200)<sup>[18]</sup>型号的波长位移光纤(Wavelength-Shifted Fibers, WLSF),光纤由三层不同材料组成。

16根光纤在 tower 的末端集束成为一个  $5.5\text{ mm} \times 5.5\text{ mm}$  的水平端面, 距离光纤端面约  $0.3\text{ mm}$  处耦合一个大小为  $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  的硅光电倍增器(SiPM)以读出 WLSF 的光信号, 后接电子学系统, 获取入射粒子的能量、时间、位置等物理信息的数据。

tower 结构如图 2(a)所示, 每个 tower 由上下两片厚度分别为  $7\text{ mm}$  和  $8\text{ mm}$  的底座及 211 片塑料闪烁体片(厚度  $1.5\text{ mm}$ )和 210 片铅片(厚度  $0.4\text{ mm}$ )交错堆叠组成, 其横截面积均为  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ , 并且铅片的两侧均喷涂有二氧化钛作为反射层。闪烁

体片与铅片均留有 18 个直径为  $1.6\text{ mm}$  的小孔, 其中按照  $4 \times 4$  排列(间距  $9.6\text{ mm}$ )的 16 个小孔用于安装 WLSF, 剩余的 2 个用于安置固定钢丝。同时, 为了辅助定位, 闪烁体设计成“LEGO”体结构。其表面有 4 个直径为  $2\text{ mm}$  且高度为  $1.25\text{ mm}$  的圆柱突起, 背面是直径为  $2.1\text{ mm}$  且深度为  $0.9\text{ mm}$  的凹槽, 相应的在铅片相同位置有 4 个直径为  $2.2\text{ mm}$  的圆孔。南华大学所研制的 1 232 个 tower 的闪烁体层数分布如图 2(b)所示, 闪烁体层数范围在 207~217, 其中闪烁体层数为 211 的 tower 数目最多。

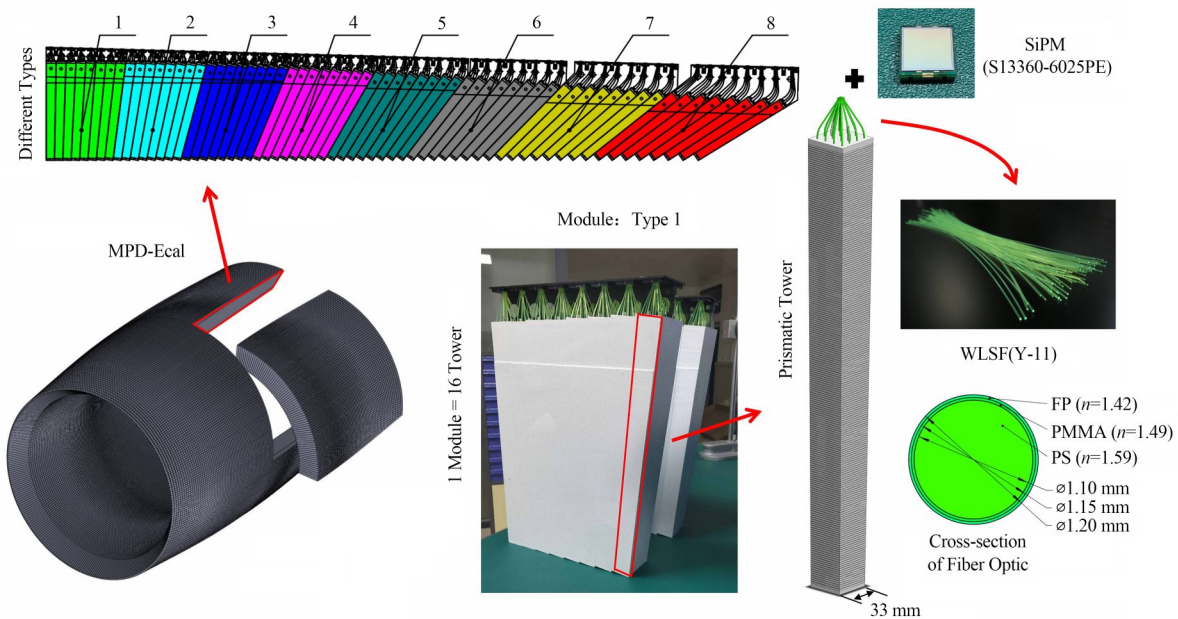


图 1 电磁量能器结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of the structure of the electromagnetic calorimeter

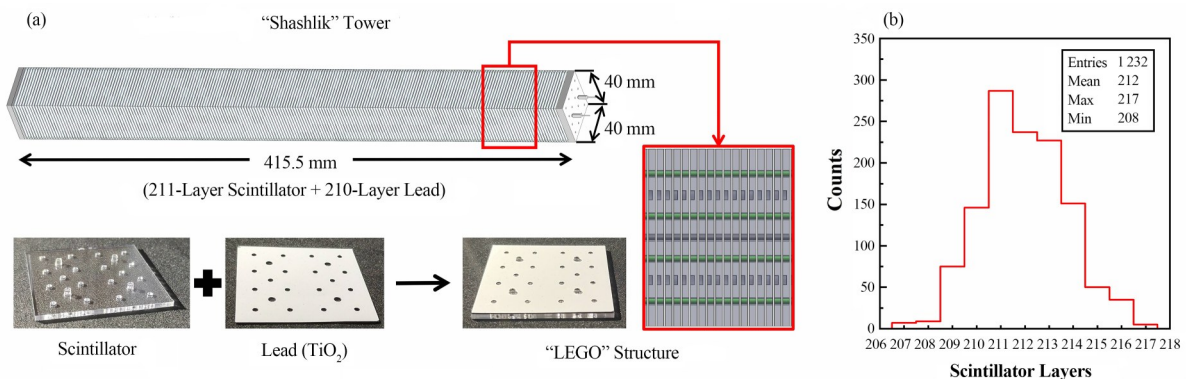


图 2 电磁量能器单元 (a) Tower 结构示意图, (b) 闪烁体层数分布  
Fig.2 Electromagnetic calorimeter unit (a) Schematic diagram of Tower structure, (b) Distribution of scintillator layer

## 2 电磁量能器模拟建模

本工作基于 Geant4.10.07.p03 版本, 对影响电磁量能器性能的多个参数进行模拟研究。粒子源分别

设置为单能电子和天然宇宙射线源(Cosmic Ray, CRY), 表 1 为模拟中使用的塑料闪烁体与反射材料的主要性能参数。程序中所建立的 module 模型如图 3(a)所示, 模型中的反射材料均为  $\text{TiO}_2$ 。闪烁体

选取的是北京高能科迪科技有限公司生产的 HND-S2 型塑料闪烁体<sup>[19]</sup>，该塑料闪烁体的发光衰减曲线

表 1 材料的主要参数  
Table 1 Main parameter of the materials

塑料闪烁体(HND-S2) Plastic scintillator (HND-S2)		反射材料 Reflective material	
闪烁发光时间 Luminescence time	$\tau_r=0.7\text{ ns}; \tau_d=2.8\text{ ns}$	铅片两侧反射层厚度 Thickness of the reflective layer	HR=0.025 mm
光产额 Photon yield	10 000 MeV <sup>-1</sup>	TiO <sub>2</sub> 折射系数 TiO <sub>2</sub> refractive index	N=2.75
表面光洁度 Surface finish	P=0.6	TiO <sub>2</sub> 反射层反射效率 TiO <sub>2</sub> reflection efficiency	R=0.8

电磁簇射过程即高能电子在 tower 中经过一段路程后发生韧致辐射，产生次级电子和韧致辐射光子，后者在经过一段路程后发生电子对效应，又会转换为正负电子对。此过程交替出现，直至粒子能量下降到临界值以下时，簇射粒子停止增殖。对于电磁簇射的发展，通常使用辐射长度( $X_0$ )进行描述。 $X_0$ 表示电子能量减少至原来的 1/e 所走过的射程，图

3(c)所示为电磁簇射简化模型。tower 的长度为 415.5 mm，等效于电子经过 11.8  $X_0$ 。塑料闪烁体内沉积的能量使闪烁体发光(波长为 440 nm)，产生的光子大部分直接进入 WLSF，小部分经过反射层反射后进入 WLSF，光子进入后将以 470 nm 的波长再次发射，被光纤一端的 SiPM 收集，图 3(d)表述了光子在塑料闪烁体与光纤中的传输过程。

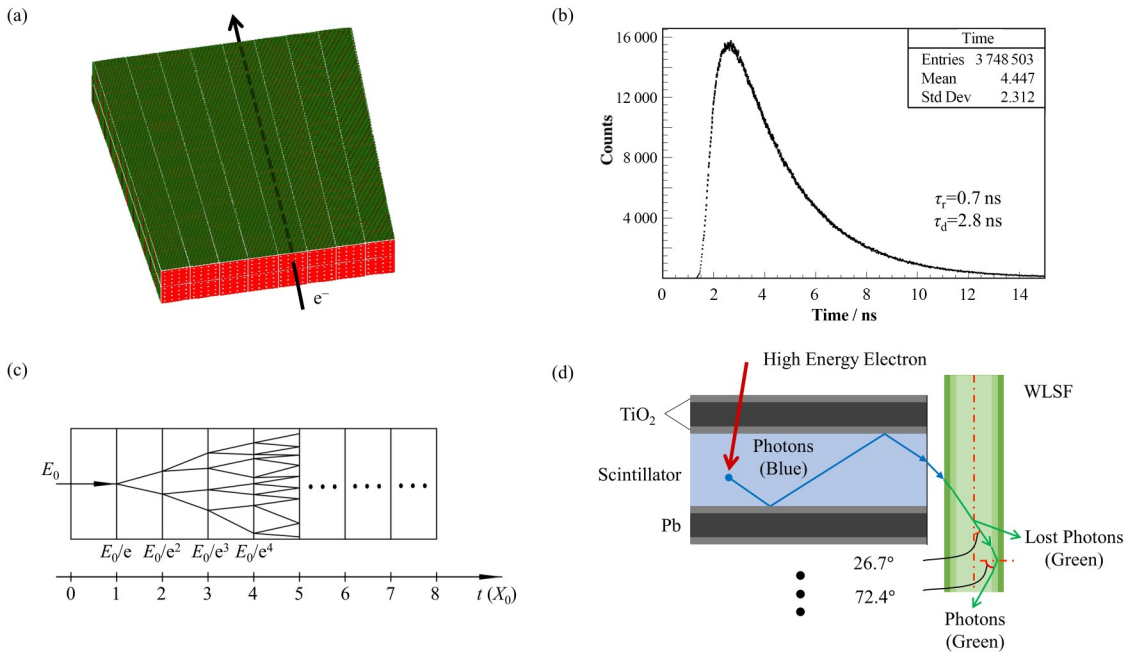


图 3 电磁量能器工作原理 (a) Module 模型, (b) 发光衰减曲线, (c) 电磁簇射简化模型, (d) 光子传输过程  
Fig.3 Working principle of electromagnetic calorimeter (a) Module model, (b) Luminescence decay curve, (c) Simplified model of electromagnetic shower, (d) Photon transmission process

### 3 电磁量能器模拟

#### 3.1 电子入射位置对 module 能量分辨率的影响

module 的能量分辨率表征了它对相近能量的辐射粒子的分辨本领，探测器的能量分辨率越小，其对粒子能量分辨的精度越高，蒙特卡罗模拟中通常

将能量的相对涨落  $\sigma_E/E$  作为量能器的能量分辨率的表征<sup>[20]</sup>。模拟设置 3 GeV 的单能电子从不同 tower 的中心径直入射，来研究入射位置对 module 能量沉积和能量分辨率的影响，对 module 一侧的 tower 进行编号如图 4(a)所示，一共有 8 个入射点。粒子入射位置对 module 的闪烁体内能量沉积影响结果如图 4(b)所示，2~7 号 tower 中心位置入射时，相比于 1

号 and 8号位置入射, 闪烁体内的能量沉积较多。对于闪烁体层数为211层的tower, 随着电子入射位置由module边缘向中心移动, 闪烁体内能量沉积由718 MeV增加至758 MeV。图4(c)为电子入射位置对module能量分辨率的影响, 当入射位置为2~7号tower中心位置时, module能量分辨率较好, 且可好

于4.35%。入射位置接近module边缘时, module周围存在较大的横向能量泄漏, 导致module的闪烁体内能量沉积少, 使module的能量分辨率变差。然而, MPD-Ecal是桶型结构, 因此不存在大量横向能量泄漏, 所以推断根据Ecal总体结构模拟给出的能量分辨率要好于4.35%。

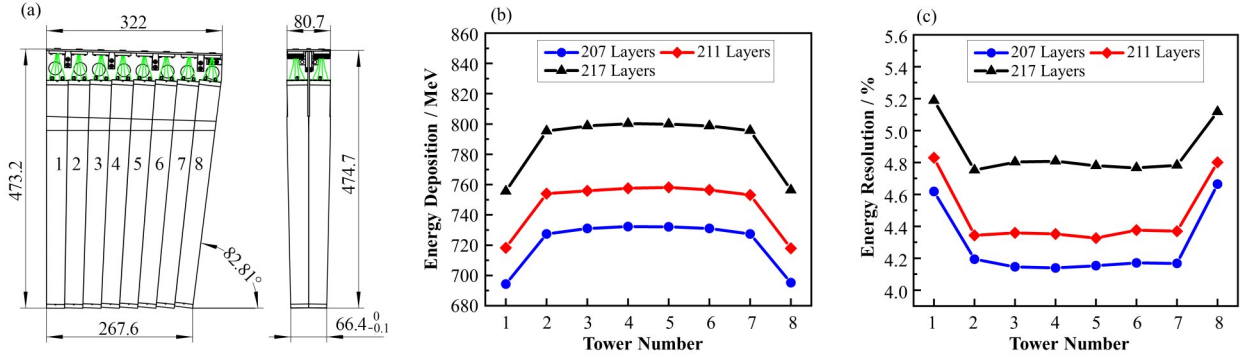


图4 入射位置对module性能的影响 (a) 8个不同电子入射位置, (b) 入射位置对能量沉积的影响, (c) 入射位置对能量分辨率的影响

Fig.4 Influence of incident position on module performance (a) Eight different electron incident positions, (b) Influence of incident position on energy deposition, (c) Influence of incident position on energy resolution

### 3.2 闪烁体层数对module能量分辨率的影响

为了研究闪烁体层数对module能量分辨率的影响, 模拟中设置3 GeV电子入射不同闪烁体层数的module, 入射点位置为4号tower中心。基于tower长度为415.5 mm、tower中的闪烁体层数为207~217片、闪烁体厚度为 $(1.50 \pm 0.01)$  mm、铅片厚度为 $(0.39 \pm 0.04)$  mm条件下, tower中的闪烁体层数与材料(铅片、闪烁体片)厚度之间的对应关系如图5(a)所示。图5(b)为闪烁体层数对module的能量

沉积的影响结果, 闪烁体层数与能量沉积之间具有良好的线性关系。闪烁体的层数每增加1层, 闪烁体内的能量沉积增加9 MeV, 铅片内的能量沉积减少20 MeV。图5(c)展示了闪烁体层数对module的能量分辨率的影响, 随着闪烁体的层数增加, module能量分辨率变差。当闪烁体的厚度为1.49 mm、层数为209时, module能量分辨率达到最佳, 可好于4.15%。Tower层数在207~217区间内, 其组成的module能量分辨率均能好于4.79%, 模拟结果好于TDR(Ecal)中5%的性能要求。

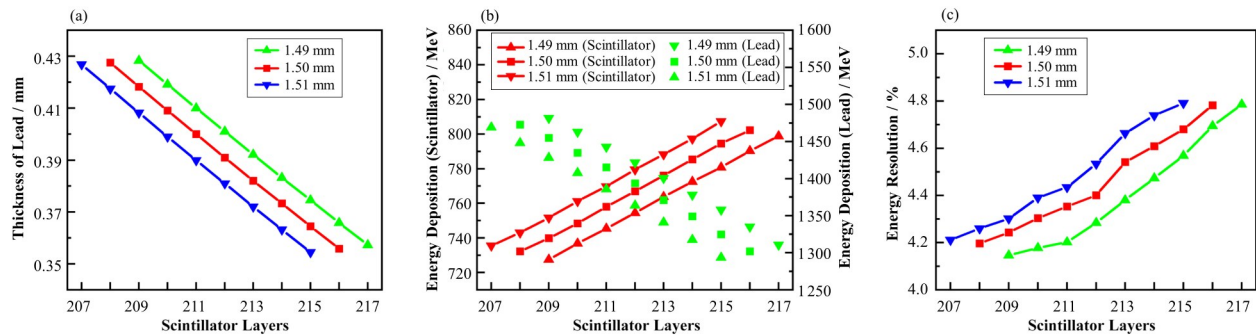


图5 闪烁体层数对module性能的影响 (a) 闪烁体层数与铅片厚度的关系, (b) 闪烁体层数对能量沉积的影响, (c) 闪烁体层数对能量分辨率的影响

Fig.5 Effect of scintillator layer number on module performance (a) Scintillator layer vs. thickness of lead, (b) Effect of scintillator layer on energy deposition, (c) Effect of scintillator layer on energy resolution

以上的模拟过程中同时改变了闪烁体的层数和铅片厚度两个参数, 为了进一步确定层数和铅片厚度对module能量分辨率的影响。在模拟参数为

1.5 mm厚闪烁体片、0.025 mm厚反射层的条件下, 对不同层数的tower的能量分辨率进行模拟研究; 以及对相同层数的tower, 通过改变铅片的厚度来研究

铅片厚度对 tower 的能量分辨率的影响。模拟结果如图 6 所示,闪烁体层数或铅片厚度的增加都能使 module 能量分辨率变好。这是因为闪烁体层数和铅片厚度增加都能增长 tower 的等效辐射长度,有利于 tower 中的电磁簇射事件的发展。闪烁体层数在

208~216 区间内时,铅片厚度比闪烁体层数对 module 能量分辨率的影响要大。因此,在 tower 长度不变的情况下增加闪烁体层数,module 的能量分辨率变差。

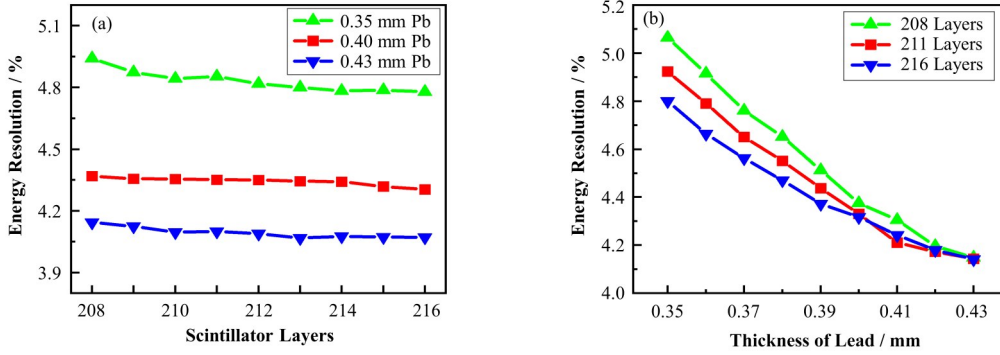


图 6 材料参数与能量分辨率的关系 (a) 闪烁体层数与能量分辨率的关系, (b) 铅片厚度与能量分辨率的关系  
Fig.6 Material parameters vs. energy resolution (a) Relationship between the number of scintillator layers and energy resolution, (b) Relationship between the thickness of lead and energy resolution

### 3.3 闪烁体层数对 tower 时间分辨率的影响

Tower 的时间分辨率表征其对不同时刻到达探测器的辐射粒子的区分能力,时间分辨率越小,所探测到粒子的时间信息越准确。图 7(a)为模拟方案,设置电子径直入射 tower 中心,在 tower 的前方放置两个大小为 40 mm×40 mm 的塑料闪烁体(A、B)作为触发探测器。在模拟中的定时方法借助了过零定时<sup>[21]</sup>的定义,使用信号的峰值时刻  $t_0$  作为 SiPM 探测

到光电子的时刻。SiPM 探测到的光电子的时间信息分布服从朗道分布,使用 root 程序<sup>[22]</sup>对其进行朗道拟合,再对拟合曲线寻峰获取峰值时刻  $t_0$ ,如图 7 (b)所示。再通过式(1)计算可得 tower 的时间分辨率  $\sigma_{T(t)}$ ,式中,  $\sigma_{T(t)-T(a)}$ 、 $\sigma_{T(t)-T(b)}$ 、 $\sigma_{T(a)-T(b)}$  为探测器两两之间的时间差分布的标准差。

$$\begin{aligned} \sigma_{T(t)-T(a)}^2 &= \sigma_{T(t)}^2 + \sigma_{T(a)}^2 \\ \sigma_{T(t)-T(b)}^2 &= \sigma_{T(t)}^2 + \sigma_{T(b)}^2 \\ \sigma_{T(a)-T(b)}^2 &= \sigma_{T(a)}^2 + \sigma_{T(b)}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

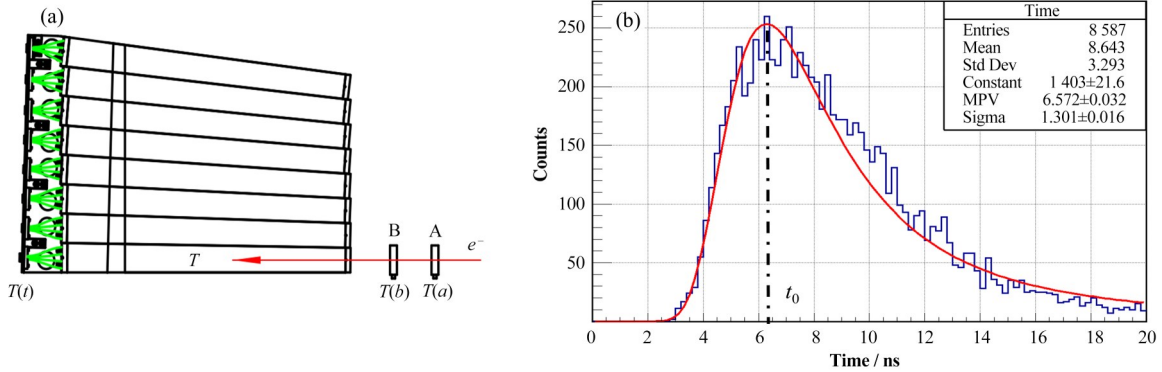


图 7 时间分辨率模拟 (a) 模拟方案示意图, (b) SiPM 探测到光电子的时间分布  
Fig.7 Time resolution simulation (a) Schematic diagram of the simulation scenario, (b) Time distribution of SiPM detected photoelectrons

图 8(a)展示了在 3 GeV 单能电子入射条件下,闪烁体的层数对 SiPM 探测到光电子数和 tower 时间分辨率的影响。随着闪烁体层数增加,探测到的光电子数目增多,tower 的时间分辨率变好。闪烁体厚度为 1.51 mm、层数为 215 时,tower 时间分辨率可达最好,且小于 96 ps。Tower 层数在 207~217 区间内,

其时间分辨率均能小于 118 ps,模拟结果好于 TDR 对 tower 的时间分辨率小于 1 ns 的要求。模拟得到的时间分辨率是 tower 在理想模型下的理论性能,该结果可以作为性能的参考指标,从而对探测器进行结构上的改进或优化。但是,模拟中并未考虑电子学器件对粒子时间信息的测量影响,所以与实验测

量值存在一定差异。

使用不同能量的电子径直入射 tower 中心, 入射电子能量对 SiPM 探测到光电子数和 tower 时间分辨率的影响结果如图 8(b) 所示。随着电子能量增加, SiPM 探测到光电子数目增多, tower 的时间分辨率变好。探测到的光电子数目越多, SiPM 对信号的峰值时刻分辨越精确。因此入射电子能量在 0.1~1 GeV 阶段, 随着入射电子能量增加, 探测到的光电

子数目增多, tower 时间分辨率变好趋势明显。当入射电子能量为 1 GeV 时, 探测到的光电子数目为 2 903, 此时 SiPM 已经能够很好分辨信号的峰值位置。因此在 1~3.5 GeV 阶段, 随着入射电子能量增加, 探测到的光电子数目增多, tower 时间分辨率变好的趋势较缓慢。对于闪烁体层数为 211 层的单个 tower, 在 3.5 GeV 电子入射条件下, 其时间分辨率小于 110 ps。

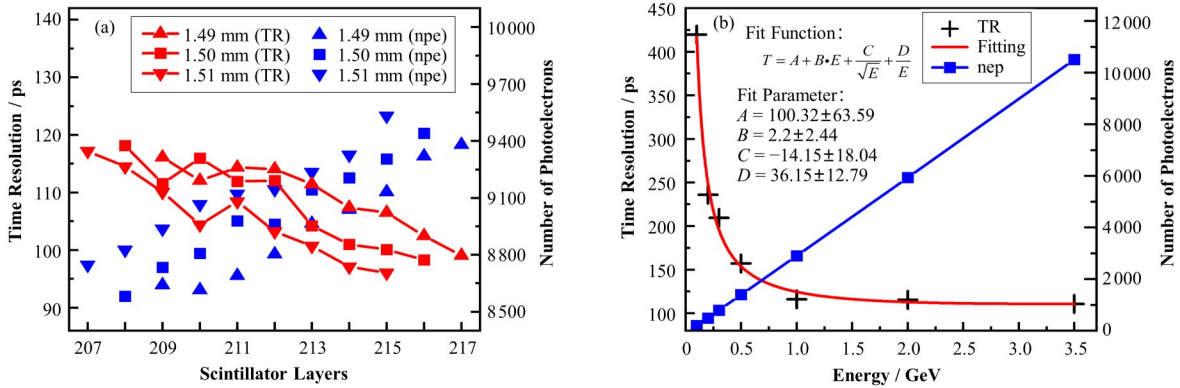


图8 时间分辨率模拟结果 (a) 闪烁体层数对 tower 时间分辨率的影响, (b) 入射电子能量对 tower 时间分辨率的影响  
Fig.8 Simulation results of time resolution (a) Effect of scintillator layers on tower time resolution, (b) Effect of incident electron energy on tower time resolution

### 3.4 光纤端面抛光度对 tower 时间分辨率的影响

NICA 实验中桶型电磁量能器采取的是单端读出方案, 桶外层的光纤端面按照 tower 各自集束后耦合 SiPM, 桶内壁的光纤端面则通过涂覆反射材料, 以提高每个 tower 的光子输出。由于 SiPM 是直接耦合在光纤端部, 所以耦合端的截面需要尽可能光滑以免损伤 SiPM。涂覆反射材料的非耦合端面的抛光度根据加工工艺不同, 则有多种选择。端面反射层的抛光度会影响 SiPM 光电子的收集效率, 进而影响 tower 的时间分辨率, 因此本小节研究了涂覆反射

材料的光纤端面不同抛光度对 SiPM 探测到光电子数和 tower 时间分辨率的影响。蒙特卡罗模拟中抛光度为镜面反射在反射中所占的比值, 0 表示光纤端面的光子全发生漫反射, 1 表示光纤端面的光子全发生镜面反射。

粒子源设置为 3 GeV 单能电子, 端面抛光度对探测到光电子数的影响如图 9(a) 所示, 对 tower 时间分辨率的影响结果如图 9(b) 所示。光纤端面抛光度越高, SiPM 探测到的光电子数越多, tower 的时间分辨率越好。抛光度为 0 时, 探测到的光电子数

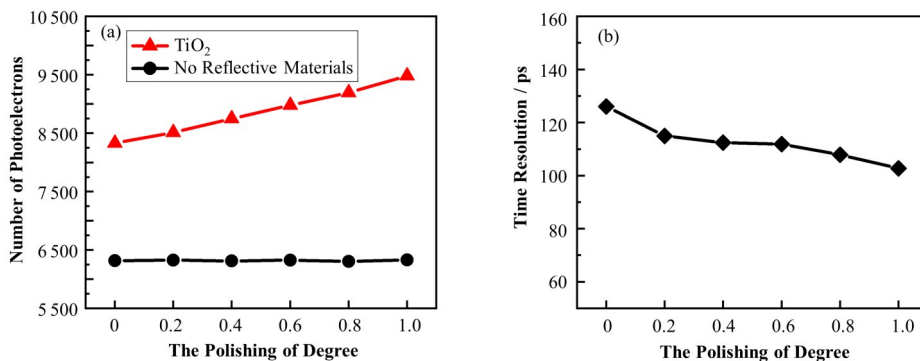


图9 抛光度对探测器性能的影响 (a) 光纤端面抛光度对 SiPM 探测到的光电子数目的影响, (b) 光纤端面抛光度对 tower 时间分辨率的影响

Fig.9 Effect of polishing on detector performance (a) Influence of optical fiber end face polishing on the number of photoelectrons detected by SiPM, (b) Influence of optical fiber end face polishing on the time resolution of tower

目为 8 331 个, tower 的时间分辨率小于 126 ps; 抛光度为 1 时, 探测到的光电子数目为 9 484 个, tower 时间分辨率小于 103 ps。两者的结果存在差异, 是因为光子在波移光纤内传输时, 漫反射会使光子在光纤内的反射次数增多, 使光子在传输过程中损失增大, 探测到的光电子数少, 导致 tower 时间分辨率变差。当端面抛光度为 0.6 时, 光纤端面涂抹反射材料相比于不涂抹反射材料的 tower, SiPM 探测到光电子数提升了约 42%。

### 3.5 天然宇宙射线模拟 tower 时间分辨率

本工作拟搭建一套基于宇宙射线的电磁量能器性能测试平台, 为了更好地优化测试条件和性能, 在模拟中利用了天然缪子源程序包<sup>[23-24]</sup>(CRY, 平均能

量为 3~4 GeV) 研究单个 tower (211 层) 的时间分辨率。研究方案如图 10(a) 所示, tower 置于探测器 A、B 之间, 三个探测器中两两做触发。图 10 中 (b)、(c)、(d)、(e) 为模拟结果, 计算得到 tower 的时间分辨率为 185 ps。宇宙射线测试 tower 相比于 3 GeV 单能电子测试, tower 时间分辨率变差了 73 ps。造成该结果是因为缪子质量约为电子的 207 倍, 具有极强的穿透能力; 与电子在闪烁体中通过韧致辐射损失能量引发电磁簇射过程不同, 缪子穿过物体通过电磁相互作用损失能量, 穿越闪烁体时损失能量使闪烁体原子发生激发—退激作用产生荧光。因此缪子穿过 tower 时在塑料闪烁体内沉积的能量少, 导致探测到的光电子数目少, tower 的时间分辨率变差。

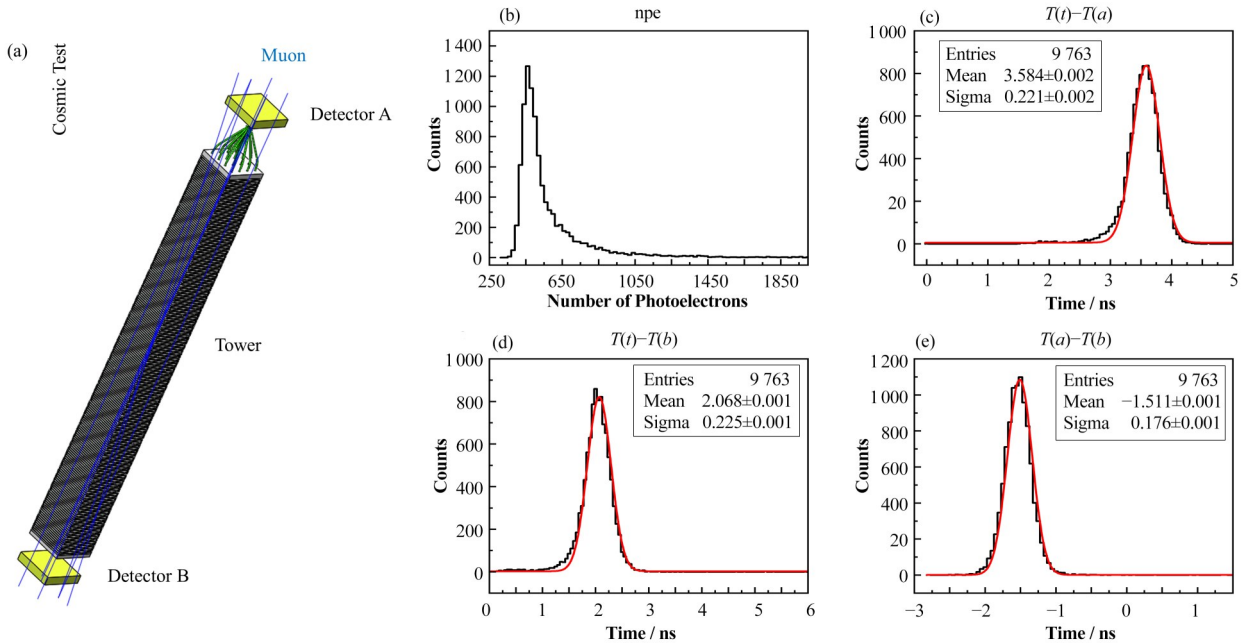


图 10 宇宙线测试 (a) 宇宙线测试模拟方案, (b) 光电子产额, (c) Tower 与 A 的时间差分布, (d) Tower 与 B 的时间差分布, (e) A 与 B 的时间差分布

Fig.10 Cosmic ray test (a) Simulation scheme for cosmic ray testing, (b) Photoelectric yield, (c) Distribution of time difference between Tower and A, (d) Distribution of time difference between Tower and B, (e) Distribution of time difference between A and B

### 3.6 电磁量能器的位置分辨率模拟

Ecal 的位置分辨率表征了探测器对粒子入射位置的分辨能力, 一般通过位置重建的方法来获取粒子入射位置, 位置分辨率越小, 探测器对粒子位置重建的准确度越高。Ecal 是由大量 tower 组成的桶型电磁量能器, 本工作将 tower 组成的阵列近似看作量能器的组成结构, 以此来模拟 Ecal 的位置分辨率, 图 11(a) 为 7×7 阵列组合 tower 在横向上的排列方式。在 3 GeV 电子径直入射 tower 阵列的正中心条件下, tower 阵列组合的闪烁体内能量沉积分布图如图 11

(b) 所示, 能量沉积主要集中在中心入射的 tower 内。由于 tower 横向面积小, 当电子入射到某个 tower 时, 相邻区域的 tower 也会响应, 且距离入射点位置越远的 tower 能量沉积越少。本工作利用电荷重心法对入射 tower 及周围 8 个 tower 的能量沉积进行分析, 假设各个方位具有相同权重, 在此假设条件下重建了入射粒子的入射位置。式(2)是电荷重心法的计算方法, 其中  $E_i$  为水平方向上第  $i$  个 tower 的能量沉积,  $X_i$  为第  $i$  个 tower 的水平中心位置,  $Y_i$  为第  $i$  个 tower 的垂直中心位置。



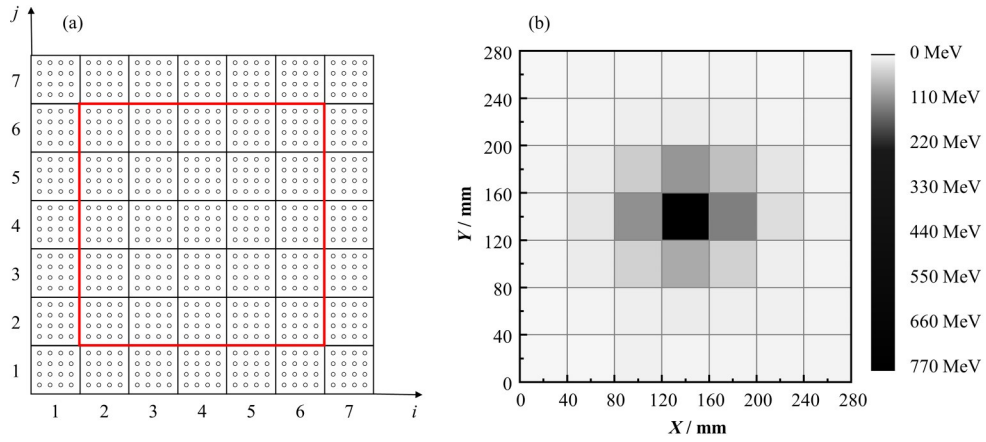


图11 位置分辨率模拟 (a) 7×7的tower组合, (b) 阵列tower的能量沉积分布  
Fig.11 Coordinate resolution simulation (a) 7×7 tower combination, (b) Energy deposition distribution of array towers

$$\begin{aligned} X_{\text{measured}} &= \frac{\sum E_i \times X_i}{E} \\ Y_{\text{measured}} &= \frac{\sum E_i \times Y_i}{E} \end{aligned} \quad (2)$$

由于最外层tower的边缘没有tower分布,无法对该区域内的射入粒子进行位置重建。设置3 GeV电子随机打入中间区域( $2 \leq i \leq 6, 2 \leq j \leq 6$ )内的tower,利用电荷重心法得到了水平方向重建位置与入射位置的对应关系如图12(a)所示。其中,点为利用电荷重心法计算出的电子位置,直线为入射粒子实际位置

置,二者的差别表现出粒子重建位置与入射位置存在有规律的波动偏差。3 GeV电子打入tower正中心时,入射点周围3×3区域内水平方向上的能量沉积分布如图12(b)所示,入射点附近10 mm范围内沉积了约80%的能量。因此,当入射点位置由中心向两边位移的幅度较小时( $\Delta x < 10$  mm),不会较大影响到每个tower内的能量沉积,则通过电荷重心法得到的重建位置不会发生较大改变,这将导致距离中心点越远重建精度越差。随着位移幅度的增大( $10 \text{ mm} < \Delta x < 20$  mm),靠近移动方向tower内的能量

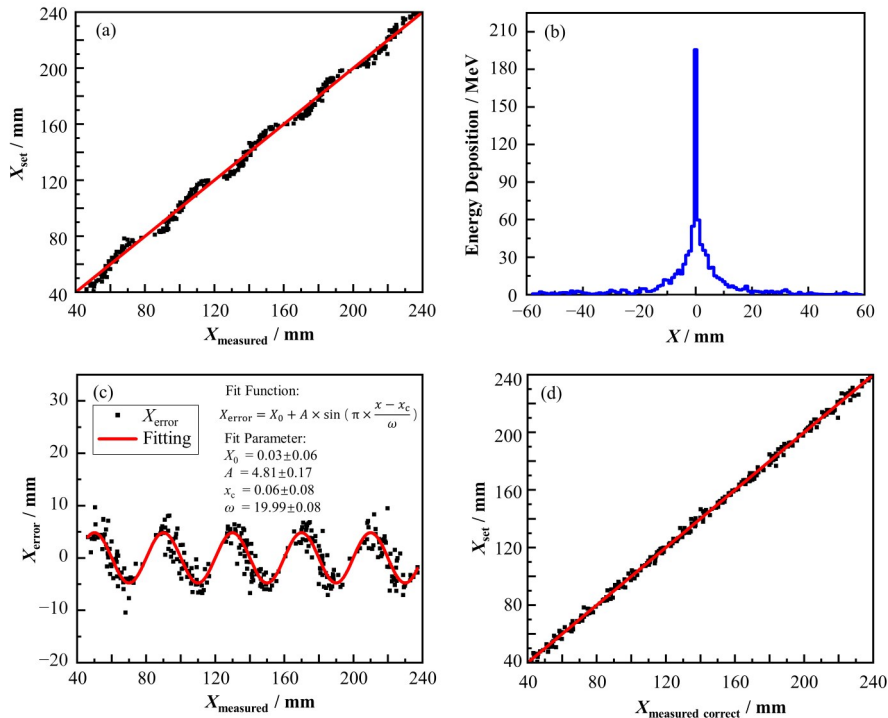


图12 电子重建位置校正 (a) 电子位置重建, (b) 入射点周围能量沉积分布, (c) 重建位置误差与入射位置的关系, (d) 校正后的电子重建位置

Fig.12 Correction of the reconstructed position of the electrons (a) Electronic position reconstruction, (b) Energy deposition distribution around the point of incidence, (c) Reconstruction position error vs. incident position, (d) Calibrated electronically

沉积将会快速增加,此时探测器的位置重建精度随着位置幅度增大逐渐恢复。因此当入射点位置由 tower 中心向边缘移动时,量能器的位置重建误差会出现先增大后减小的正弦波动现象,造成该现象的主要原因来源于位置重建方法本身。为了消除正弦波动特性的影响,使用正弦函数对其进行拟合如图 12(c)所示,利用拟合后的函数曲线对重建位置进行校正,从而减少由电子入射位置导致的重建位置偏差。校正后的结果如图 12(d)所示,与图 12(a)相比,它的重建位置与入射位置具有更好的线性关系。

对校正后的重建位置偏差分布进行高斯拟合,所得到的分布宽度  $\sigma_x$  即 Ecal 的位置分辨率。设置 3 GeV 电子随机打入 tower 上,闪烁体层数对探测器位置分辨率的影响如图 13(a)所示。随着 tower 中闪烁体层数的增加,Ecal 的位置分辨率变差,但是变化的趋势非常缓慢,这是因为闪烁体层数增加虽然增加了闪烁体内的能量沉积,但是使 tower 内的总能量沉积减少了,导致电子位置重建误差变大。当闪

烁体的厚度为 1.49 mm、层数为 209 时,Ecal 位置分辨率达到最佳为 1.84 mm。在兼顾电磁量能器的各项性能后,tower 中的闪烁体层数最佳为 211 层、厚度为 1.5 mm。此时,Ecal 的能量分辨率好于 4.35%,时间分辨率小于 112 ps,位置分辨率好于 2 mm。

为了研究不同能量下 Ecal 的位置分辨能力,设置不同能量的电子随机打入到 tower 上,以此来模拟入射电子能量对 Ecal 位置分辨率的影响,其结果如图 13(b)所示。随着电子能量提高,Ecal 的位置分辨率变好。电子能量在 0~1 GeV,随着能量增加,Ecal 的位置分辨率变好趋势快;在 1~3.5 GeV 阶段,Ecal 的位置分辨率变好趋势缓慢。造成该结果是因为随着电子能量增加,周围的 tower 内能量沉积增多,有利于提高位置重建精度。当电子能量达到 1 GeV 以后,周围 tower 沉积的能量足以用于对电子位置重建。此时,Ecal 的位置分辨率随电子能量变化的趋势减缓。入射电子能量为 3.5 GeV 时,探测器的位置分辨率好于 1.85 mm。

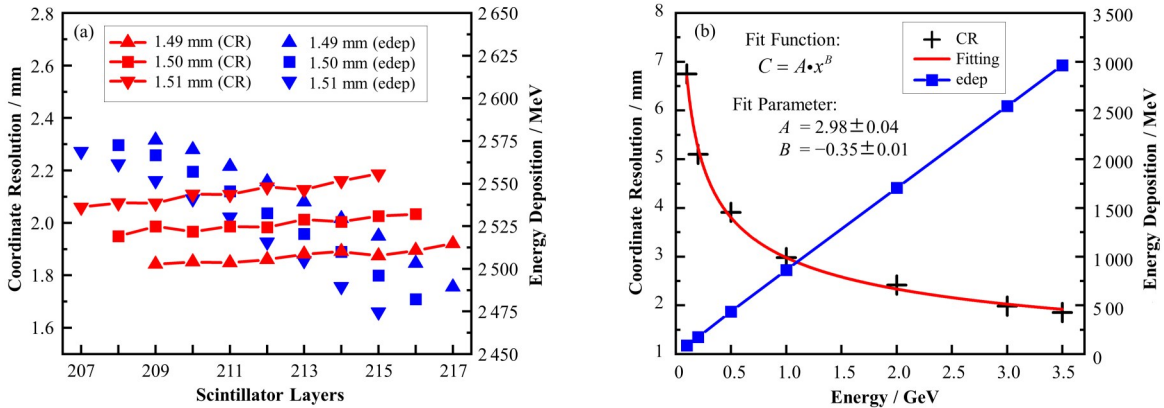


图 13 位置分辨率模拟结果 (a) 闪烁体层数对位置分辨率的影响,(b) 入射电子能量对位置分辨率的影响  
Fig.13 Simulation results of coordinate resolution (a) Effect of scintillator layer number on coordinate resolution, (b) Effect of incident electron energy on coordinate resolution

#### 4 结语

本工作基于 Geant4 软件,使用单能电子模拟研究了多个参数对电磁量能器性能的影响,包括电子入射点位置和能量、闪烁体和铅片的层数和厚度、光纤端面抛光度。在 tower 长度为 415.5 mm 限定条件下,当 3 GeV 电子沿着 module 中心区域入射时,module 的横向能量泄漏最少,且随着 tower 中闪烁体层数增加,module 能量分辨率变差,tower 时间分辨率变好,Ecal 位置分辨率变差。在兼顾能量分辨率、时间分辨率、位置分辨率后,tower 中闪烁体层数最佳为 211 层。闪烁体层数在 207~217 范围内,module 能量分辨率均能好于 4.79%、tower 时间分辨率小于 118 ps,Ecal 位置分辨率好于 2.2 mm。随着

入射电子能量增加,量能器的时间分辨率和位置分辨率变好。当光纤端面抛光度为 0.6 时,光纤端面涂覆反射层与不涂覆相比,SiPM 探测到的光电子数目增加了 42%。随着光纤端面抛光度提高,探测到的光电子数目增加,tower 时间分辨率变好,抛光度为 1 时,时间分辨率小于 103 ps。为了给后续宇宙线测试实验提供一些参考,本工作还使用了天然宇宙射线程序包模拟了单个 tower 的时间分辨率,得到的结果小于 185 ps。模拟得到的结果是 tower 在理想模型下的理论性能,该结果可以作为性能的参考指标,从而对探测器进行结构上的改进或优化。但是,模拟中并未考虑电子学器件对粒子时间信息的测量影响,所以将会与实验测量值存在一定差异。

**作者贡献声明** 祝锦负责研究的提出及设计、数据的收集和整理、文章的起草和最终版本的修订;彭肖宇负责模拟程序设计;罗思远负责数据的收集;肖万成负责数据的收集;何列负责数据的验证与核实;刘雨晨负责模拟结果可视化;罗凤姣负责研究课题的指导;肖敏负责研究课题的指导;王晓冬负责最终版本的修订、项目的监督和管理。

## 参考文献

- 1 Taranenko A. Status of the mega-science project NICA[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, **1685**(1): 012021. DOI: [10.1088/1742-6596/1685/1/012021](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1685/1/012021).
- 2 Zinchenko A, Kolesnikov V, Mudrokh A, *et al.* Prospects for the study of the strangeness and hypernuclei production at NICA/MPD[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, **1390**(1): 012017. DOI: [10.1088/1742-6596/1390/1/012017](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1390/1/012017).
- 3 Abgaryan V, Kado R A, Afanasyev S V, *et al.* Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA[J]. *The European Physical Journal A*, 2022, **58**(7): 140. DOI: [10.1140/epja/s10050-022-00750-6](https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00750-6).
- 4 Li Y, Han D, Durum A, *et al.* A shashlyk electromagnetic calorimeter system for NICA-MPD[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, **15**(11): C11007. DOI: [10.1088/1748-0221/15/11/c11007](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/11/c11007).
- 5 Li Y L, Han D, Wang Y, *et al.* Beam test results of two shashlyk ECal modules for NICA-MPD[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, **958**: 162833. DOI: [10.1016/j.nima.2019.162833](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162833).
- 6 Aphetche L, Awes T C, Banning J, *et al.* PHENIX calorimeter[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, **499**(2 - 3): 521 - 536. DOI: [10.1016/s0168-9002\(02\)01954-x](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(02)01954-x).
- 7 Atoian G S, Issakov V V, Karavichev O V, *et al.* Development of shashlyk calorimeter for KOPIO[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2004, **531**(3): 467 - 480. DOI: [10.1016/j.nima.2004.05.094](https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.05.094).
- 8 Dzhelyadin R. The LHCb calorimeter detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2007, **581**(1 - 2): 384 - 388. DOI: [10.1016/j.nima.2007.08.010](https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.08.010).
- 9 Karlen D. Near detectors for the T2K experiment[J]. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 2006, **159**: 91 - 96. DOI: [10.1016/j.nuclphysbps.2006.08.062](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2006.08.062).
- 10 JINR 2019 MPD NICA technical design report of the Electromagnetic Calorimeter (ECal) rev 3.6 [EB/OL]. [2019-1-16]. <http://mpd.jinr.ru/doc/mpd-tdr/>.
- 11 Li Y, Shen C, Zhang Z, *et al.* Production and quality control of NICA-MPD shashlik electromagnetic calorimeter in Tsinghua University[J]. *Journal of Instrumentation*, 2022, **17**(4): T04005. DOI: [10.1088/1748-0221/17/04/t04005](https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/04/t04005).
- 12 曾德凯, 彭肖宇, 魏鑫, 等. 应用于 NICA-MPD 的 Shashlik 取样型电磁量能器性能模拟[J]. *核技术*, 2021, **44**(8): 080201. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.080201](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.080201).  
ZENG Dekai, PENG Xiaoyu, WEI Xin, *et al.* Performance simulation of a Shashlik sampling electromagnetic calorimeter for NICA-MPD[J]. *Nuclear Techniques*, 2021, **44**(8): 080201. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.080201](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.080201).
- 13 Shen C, Xiao D, Wang Y, *et al.* Development of shashlik electromagnetic calorimeter for the NICA/MPD[J]. *Journal of Instrumentation*, 2019, **14**(6): T06005. DOI: [10.1088/1748-0221/14/06/t06005](https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/06/t06005).
- 14 Skobliakov A V, Kulikov V V, Bulychjov S A, *et al.* Time response simulation of a “shashlyk”-type calorimeter as applied to ECAL MPD/NICA[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, **1690**(1): 012067. DOI: [10.1088/1742-6596/1690/1/012067](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012067).
- 15 Peng X, Zhu K, Ji X, *et al.* Simulation study on photon generation and collection of tower applied to NICA-MPD electromagnetic calorimeter[J]. *Journal of Instrumentation*, 2022, **17**(1): T01004. DOI: [10.1088/1748-0221/17/01/t01004](https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/01/t01004).
- 16 Book for application developers[EB/OL]. [2020-12-4]. <https://geant4.web.cern.ch>.
- 17 Bhattacharjee M, Tyapkin I, Dabrowska B, *et al.* Calibration of NICA-MPD electromagnetic calorimeter modules with cosmic muons[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, **1690**(1): 012052. DOI: [10.1088/1742-6596/1690/1/012052](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012052).
- 18 Plastic scintillating fibers[EB/OL]. [2020-10-1]. <http://kuraraypsf.jp/pdf/all.pdf>.

- 19 Test results of GNKD plastic scintillators[EB/OL]. [2020-02-03]. <http://www.gaonengkeji.com/>.
- 20 Wigmans R. Calorimetry: energy measurement in particle physics[M]. Oxford: Clarendon Press, 2000.
- 21 王英芝. 核电子技术原理[M]. 北京: 原子能出版社, 1989.  
WANG Yingzhi. Principles of nuclear electronic technology[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1989.
- 22 RooFit users manual v2.91[EB/OL]. [2019-9-18]. <https://root.cern.ch>.
- 23 Luo S Y, Huang Y H, Ji X T, *et al.* Hybrid model for muon tomography and quantitative analysis of image quality[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(7): 81. DOI: [10.1007/s41365-022-01070-6](https://doi.org/10.1007/s41365-022-01070-6).
- 24 Ji X T, Luo S Y, Huang Y H, *et al.* A novel 4D resolution imaging method for low and medium atomic number objects at the centimeter scale by coincidence detection technique of cosmic-ray muon and its secondary particles [J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(1): 2. DOI: [10.1007/s41365-022-00989-0](https://doi.org/10.1007/s41365-022-00989-0).