arXiv:2303.04481v1 [physics.ins-det] 8 Mar 2023

用于升级 T2K 近探测器时间投影腔室的封装式电阻性微网格探测器电荷扩散与增益特性研究

D. Attié[a], *O. Ballester*[h], *M. Batkiewicz-Kwasniak*[b], *P. Billoir*[c], *A. Blondel*[c], *S. Bolognesi*[a], *R. Boullon*[a], *D. Calvet*[a], *M. P. Casado*[h,l], *M.G. Catanesi*[d], *M. Cicerchia*[e], *G. Cogo*[f], *P. Colas*[a], *G. Collazuol*[f], *D. D'Ago*[f], *C. Dalmazzone*[c], *T. Daret*[a], *A. Delbart*[a], *A. De Lorenzis*[h,k], *R. de Oliveira*[m], *S. Dolan*[m], *K. Dygnarowicz*[i], *J. Dumarchez*[c], *S. Emery-Schrenk*[a], *A. Ershova*[a], *G. Eurin*[a], *M. Feltre*[f], *C. Forza*[f], *L. Giannessi*[f], *C. Giganti*[c], *F. Gramegna*[e], *M. Grassi*[f], *M. Guigue*[c], *P. Hamacher-Baumann*[g], *S. Hassani*[a,1], *D. Henaff*[a], *F. Iacob*[f], *C. Jesús-Valls*[h], *S. Joshi*[a,2], *R. Kurjata*[i], *M. Lamoureux*[f], *A. Langella*[j], *J. F. Laporte*[a], *K. Lachner*[n], *L. Lavitola*[j], *M. Lehuraux*[a], *S. Levorato*[f,o], *A. Longhin*[f], *T. Lux*[h], *L. Magaletti*[d], *T. Marchi*[e], *M. Mattiazzi*[f], *M. Mehl*[m], *L. Mellet*[c], *M. Mezzetto*[f], *L. Munteanu*[m], *W. Obrębski*[i], *Y. Orain*[c], *M. Pari*[f], *J.-M. Parraud*[c], *C. Pastore*[d], *A. Pepato*[f], *E. Pierre*[c], *C. Pio Garcia*[h], *O. Pizzirusso*[m], *B. Popov*[c], *J. Porthault*[a], *H. Przybiliski*[b], *F. Pupilli*[f], *T. Radermacher*[g], *E. Radicioni*[d], *C. Riccio*[a], *L. Rinaldi*[o], *F. Rossi*[a], *S. Roth*[g], *S. Russo*[c], *A. Rychter*[i], *Ph. Schune*[a], *L. Scomparin*[f], *D. Smyczek*[g], *J. Steinmann*[g], *J. Swierblewski*[b], *A. Teixeira*[m], *D. Terront*[c], *N. Thamm*[g], *F. Toussenel*[c], *V. Valentino*[d], *M. Varghese*[h], *G. Vasseur*[a], *E. Villa*[m], *U. Virginet*[c], *C. Vuillemin*[a], *U. Yevarouskaya*[c], *M. Ziembicki*[i], *M. Zito*[c]*[a]IRFU，CEA*，巴黎萨克雷大学，吉夫叙尔伊韦特，法国*[b]*波兰科学院亨里克·涅沃德尼赞斯基核物理研究所，克拉科夫，波兰*[c]*LPNHE*，索邦大学，法国国家科学研究中心/核与粒子物理研究所，巴黎，法国*[d]*意大利国家核物理研究院巴里分部，巴里大学和巴里理工大学，意大利*[e]*意大利国家核物理研究院：莱尼亚罗国家实验室（LNL），帕多瓦，意大利*[f]*意大利国家核物理研究院帕多瓦分部和帕多瓦大学物理与天文学系，帕多瓦，意大利*[g]*亚琛工业大学，第三物理研究所，亚琛，德国

*通讯作者[1]
samira.hassani@cea.fr[2]
shivam.joshi@cea.fr

提交至《核仪器与方法》的预印本 *2023*年*10*月*31*日

[h]高能物理研究所（*IFAE*）——巴塞罗那科学技术研究所（*BIST*），巴塞罗那自治大学校区，*08193*贝拉特拉（巴塞罗那），西班牙[i]华沙理工大学，华沙，波兰[j]意大利国家核物理研究院那不勒斯分部和那不勒斯费德里科二世大学物理系，那不勒斯，意大利[k]*Qilimanjaro*量子科技，巴塞罗那*08007*，西班牙[l]巴塞罗那自治大学物理系[m]欧洲核子研究中心，日内瓦，瑞士[n]华威大学物理系，考文垂，英国[o]意大利国家核物理研究院的里雅斯特分部，*Valerio*街*2*号 - *34127*的里雅斯特，意大利

摘要

目前正在对 T2K 长基线中微子振荡实验的近探测器进行升级。此次升级将包括两台新型时间投影室，每台均配备 16 个电荷读出电阻式微网格模块。

我们开发并实施了一套流程，用于在生产的不同阶段验证探测器的性能，以确保探测器安装后能够正常、可靠地运行。我们使用专用的 X射线测试台对探测器进行表征，逐个扫描焊盘，并精确测量焊盘平面上的增益均匀性和沉积能量分辨率。测得的能量分辨率约为 10%。

我们建立了一个详细的物理模型，用于描述电阻式Micromegas阳极中的电荷扩散现象。该模型的详细物理描述涵盖初始电离、电子漂移、扩散效应和读出电子学效应。该模型能够出色地表征实验测量中的电荷扩散，并可同时提取模块的增益和 RC 信息。

关键词：电阻式微网格、T2K近探测器时间投影室、增益、 RC

目录

1 引言 4

2 ERAM生产 5

3 读出电子学 8

3.1 AFTER 芯片简介.93.2 使用校准数据验证电子学模型 . . . 103.3 电子学响应线性度.11

4 网格脉冲测试 12

5 X射线实验装置 13

6 使用 ^{55}铁源进行增益提取156.1 增益计算模型.156.2 使用X射线数据的增益结果.18**7 信号模型20**7.1 使用X射线数据同时拟合波形.22

8 *RC* **使用X射线数据拟合得到的RC map24**

8.1 *RC* 不同ERAM的map.258.2 理解 *RC* map特征.278.3 与预期 *RC* 值的比较.298.4 *RC* 的系统不确定度.308.4.1 DLC 电压对 *RC* 的影响.308.4.2 电子学对 *RC* 的影响.309

使用X射线数据拟合波形得到的增益图31

9.1 去除 PCB阻焊层.319.2 焊盘内的增益变化.34**10 环境条件对增益的影响 35**

11 结论 38

1. 引言

基于加速器束流的长基线实验（如 T2K 和 NOvA）使中微子振荡研究进入了精密测量时代。在这些实验中，通过比较近探测器（置于中微子源附近）和远探测器（置于距离放射源数百公里处）测得的中微子通量和能谱，测量中微子振荡。中微子振荡研究的前景令人期待。尤其是对 T2K 中微子和反中微子振荡的分析，首次在轻子扇区发现了 CP破坏的令人振奋的迹象 [1]。这类结果仍受限于现有统计量，因此 T2K 将于 2023 年开始新的数据采集阶段，并提高束流功率。

统计量的增加带来了前所未有的挑战：精密测量要求对中微子相互作用和探测器响应进行准确建模。为应对这些挑战，研究人员为 T2K近探测器 ND280 研发了新一代子探测器。这些新子探测器旨在提升近探测器的性能 [2], ，以测量中微子通量并约束中微子相互作用截面 [3] ，从而将远探测器（超级神冈探测器）预测事件数的不确定度降至 4% 以下。为实现这一目标，研究人员改造了探测器的上游部分，增设了一台高颗粒度闪烁体探测器（Super-FGD） [4], 、两台新型水平高角度时间投影室（HA-TPC）以及六个飞行时间探测平面 [5]。

HA-TPC的每个端板将安装八个封装式电阻阳极Micromegas（ERAM）。对于电阻阳极Micromegas，需在分段阳极上沉积一层电阻层，使电荷扩散到多个相邻焊盘上。这样，在给定分段方式下，空间分辨率得以提高。此外，这种方法还能提高Micromegas稳定性，并保护电子学免受放电事件的影响。新型时间投影室的探测器原型已在欧洲核子研究中心和DESY的测试束流上成功完成测试 [6, 7, 8]，验证了探测器技术及其性能。测试束流数据使得我们能够确定所有关注的漂移距离下，空间分辨率和dE/dx分辨率随径迹相对于ERAM平面的角度变化的关系。对于所有入射角和漂移距离，测得的空间分辨率优于 800 μm，dE/dx 分辨率优于10%。

本文结构安排如下：第2 节详细介绍ERAM的设计与制造流程。第3 节介绍读出电子学的架构及其对应的响应函数。通过电子学校准验证电子学模型及其响应线性度。第4节详细介绍一种称为网格脉冲测试的流程，该流程用于验证ERAM模块的功能。第5节介绍用于详细表征ERAM响应的X射线测试台装置。第6节展示ERAM增益提取模型及其在实际X射线数据上的应用。第7节阐述结合电荷扩散现象与电子学响应的信号模型，并通过同时拟合波形将该模型应用于X射线数据。第8节专门研究 RC ERAM分布图及其特征，并将测量值与预期值进行比较。此外，还研究了 RC 的系统不确定度。第9 节对比了两种不同方法得到的增益，并说明了部分ERAM内部及单个焊盘内的增益不均匀性。第10节研究环境条件对增益的影响。最后，第11节给出本文的结论。

2. ERAM生产

ERAM 模块由一个电阻式微网格探测器组成，该探测器粘接在铝框架上，读出电子学直接固定在其背面。该 42×34 厘米^2 探测器有 1152 个焊盘，每个焊盘尺寸为 11。18×10.09 毫米^2，排列成矩阵，沿 x 方向有 36 个焊盘，沿 y 方向有 32 个焊盘。焊盘平面覆盖着一层电阻层，该层由一片绝缘的 $50\ \mu$m Api- cal 聚酰亚胺薄膜（用 $150\ \mu$m 胶层压合）构成，其上通过电子束溅射沉积了类金刚石碳（DLC）。这种电阻层技术能够使电荷弥散到多个焊盘上，从而提高空间分辨率。它还可以提高Micromegas稳定性，并保护电子学免受放电事件影响。为确保电荷至少弥散到两个焊盘上，DLC 表面电阻率选定为 R 约 400 kΩ/□ 。图 1 展示了 ERAM 探测器的剖面示意图及其规格。撰写本文时，ERAM 的生产已全面展开：32 个探测器（含备件共 40 个）中已有 21 个完成生产并全面表征，这些探测器用于装备两个 HA-TPC 的两个端板。质量控制已建立起一套灵活的基础设施，其中包括两个测试台，一个用于宇宙

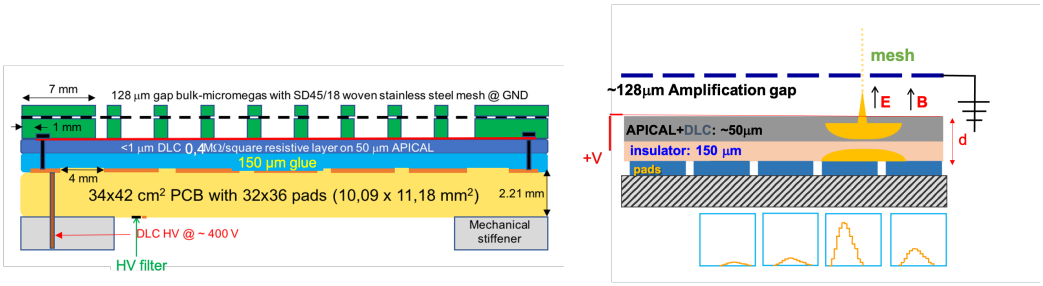


图 1：电阻式 Micromegas 概念及其特性的示意图。

射线数据采集，另一个用于使用来自 a ^{55}Fe 放射源的 X射线光子进行测试和校准。两者均配备了冷却系统、读出电子学和数据采集系统。

2018年秋季，升级后的 ND280 探测器整体设计确定。制作了两个名为 MM1 的原型（MM1-DLC1 和 MM1-DLC2），其 75 µ胶层厚度为 m，最终 DLC 电阻率接近 200 kΩ/□ 。其中一个原型安装在一台小型时间投影室上，漂移距离为 15 cm，并于 6 月在 0.2 T PCMAG（持久电流超导磁体）中，使用宇宙射线和 DESY 的电子束进行了广泛测试 2019 [7]。不同的测试运行旨在研究主要参数的影响（为读出电子学选择最佳峰值时间及阳极电压）。测试验证了 ERAM 的整体设计，包括 PCB 以及最终前端电子学的一些设计选择（移除 AFTER 芯片输入端的外部火花保护二极管，并确认某些组件适用于预期强度的磁场环境）。总体而言，ERAM 原型表现出出色的稳健性。它在最高 380 V 的电压下运行，采集了大量信号，探测器和电子学均未受到任何损坏。DESY测试束流进一步表征了电荷扩散和电阻箔的均匀性，并确保其采用最终焊盘尺寸时的性能满足 ND280 升级要求。

在 MM0 和 MM1 原型机完成所有验证后，需要着手优化探测器的 RC 常数，其中 R 为该层的表面电阻率，C 为由阳极与读出平面之间的间距决定的单位表面积电容。由于 DLC 电阻率越低，火花保护效果越差，因此将 DLC 的电阻率规格设定为 400 ± 60 kΩ/□ （fi-

nal DLC 电阻率，即制造过程最后阶段的电阻率）。需要指出的是，在生产阶段精确控制 R 值并非易事。此外，探测器组装过程（包括对 DLC 薄膜施压和加热）会导致电阻率降低。为了更好地控制电阻率，欧洲核子研究中心开发了一种退火工艺（在烘箱中对 DLC 薄膜进行“烘烤”）：在高于制造过程所达到温度的条件下退火两小时（例如 $200°C$），发现电阻率会降低约一半，而且这一结果已在不同薄膜上得到验证，具有可重复性。该工艺使生产/溅射工艺阶段可以采用更高的电阻率，并避免探测器生产阶段电阻率出现不可控的下降。事实上，对同一薄膜在相同或更低温度下进行第二次退火，不会使电阻率进一步改变。

最后一项也是关键的规格是胶层厚度，它决定了连续 C RC 网络的电容。胶层由浸渍了环氧树脂的玻璃纤维布构成。必须在电荷扩散、信号幅度和探测器稳定性之间取得平衡。使用与MM1探测器同一批DLC薄膜，制作了两个新的预系列ERAM原型，但胶层更厚，为 200 μ米。

在可重复性方面，计量测量显示，两个MM1探测器与两个预系列ERAM原型之间的胶层厚度差小于3 μ米。它们的最终电阻率也得到了良好控制。使用迷你时间投影室，利用宇宙射线对这两个预系列ERAM原型进行了广泛测试。

在预系列原型中观察到了一些稳定性问题。这些不稳定现象是由模块机械组装中的缺陷造成的。我们对机械设计和组装流程进行了修正。2020年11月，生产就绪评审启动了ERAM模块的生产。探测器的 RC 选用了中间值胶层厚度 150 μ米，以便在径迹重建性能与探测器在约350 V的类金刚石碳高电压工作点下的安全运行之间取得平衡。首个采用最终设计的ERAM探测器（标记为ERAM-01）制作完成；该模块经宇宙射线和 ^{55}Fe X射线源验证后，ERAM模块的批量生产随即恢复。

2021年，时间投影室原型配备了首个 ERAM 模块和 HA-TPC读出电子学链，并接受了 DESY测试束流的照射 [8] ，以测量空间分辨率和 $\mathrm{d}E/\mathrm{d}x$ 分辨率。

对于所有入射角和所有关注的漂移距离，测得的空间分辨率优于 800 μ m，且 dE/dx 分辨率优于 10%。模拟准确再现了数据的所有主要特征，且性能满足 T2K 的 HA-TPC（高角度时间投影室）的要求。

3. 读出电子学

新型读出电子学基于 AFTER 芯片 [9]，其采样频率为 25 MHz，峰值时间为 200 或 412 纳秒，增益设置为在脉冲电流携带 120 fC 电荷时可获得 4096 个 ADC 计数。每个 ASIC 读取连接到一组 9×8 焊盘的 72 个电子学通道。前端卡（FEC）搭载八个 AFTER ASIC，并对焊盘信号进行数字化。读取单个 ERAM 模块需要两块 FEC，它们直接插接在探测器 PCB 上，如图 2所示。最后，前端夹层卡（FEM）安装在两块 FEC 上方，使信号数字化与主时钟同步。专为屏蔽而设计的罩盖可确保电子学能够与时间投影室一起置于磁场中并正常运行。冷却系统通过在 ASIC 附近铺设的铜管循环冷水，从而控制电子学的温度。最后，HA-TPC 中全部 16 个 ERAM 模块产生的数据通过一组光纤发送至一块定制电路板，该板称为触发与数据集中器模块（TDCM） [10]。

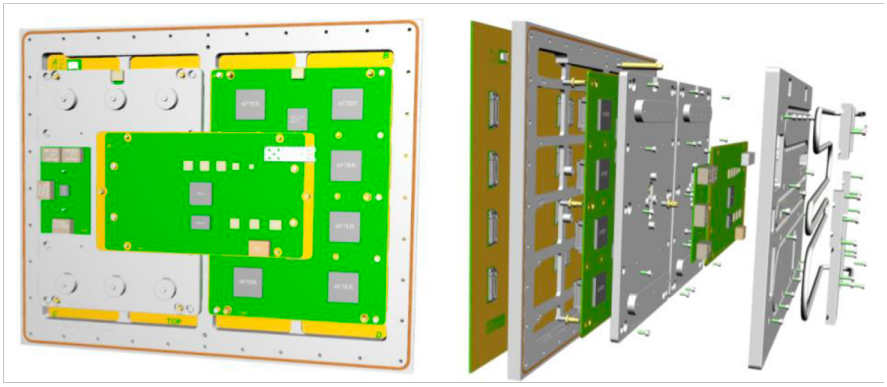


图 2：安装在探测器上的基于 AFTER 芯片的电子学 CAD 模型（左），以及用于展示屏蔽结构和冷却系统管道的爆炸视图（右）。

3.1. *AFTER* 芯片的描述

AFTER 芯片的架构 [9] 如图 3所示。它由电荷积分级（CSA）、极零补偿级、Sallen & Key 滤波器、放大器以及一个由 511 个单元组成的开关电容阵列（SCA）模拟存储器构成。触发后，SCA 被锁定，所有单元依次由外部模数转换器进行数字化。

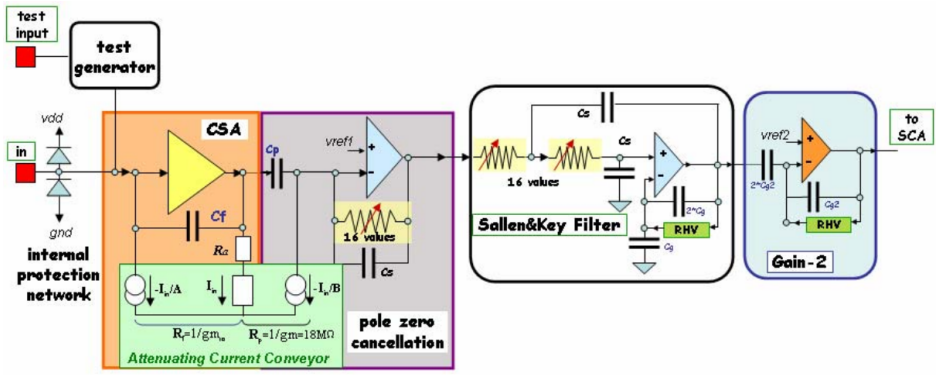


图 3：AFTER 芯片输入信号调理级的架构。所有 72 个通道完全相同。

假设运算放大器为理想器件且极零补偿精确，则在后期离散化阶段之前，对狄拉克电流脉冲的响应与以下函数成正比：

$$f(t;w_s,Q)=e^{-w_s t}+e^{-\frac{w_s t}{2Q}}\left[\sqrt{\frac{2Q-1}{2Q+1}}\sin\left(\frac{w_s t}{2}\sqrt{4-\frac{1}{Q^2}}\right)-\cos\left(\frac{w_s t}{2}\sqrt{4-\frac{1}{Q^2}}\right)\right] \tag{1}$$

其中，w_s 和 Q 取决于电路电阻和电容 [11]的值。这两个参数都将进行调整，以拟合电子学校准数据。

更实用的是，比例因子可写为：

$$ADC^D(t;w_s,Q)=\frac{ADC_o}{Q_o}\frac{f(t;w_s,Q)}{f_{max}(w_s,Q)} \tag{2}$$

其中，$f_{max}(w_s,\ Q)$ 是函数 $f(t;\ w_s,\ Q)$ [3] 的最大值。按照这种方式参数化，携带电荷的狄拉克脉冲电流的响应

[3]可以证明，f_{max} 实际上仅取决于 Q 。

为电荷 Q_o, $i(t) = Q_o\delta(t)$，即 $ADC^D(t;\ w_s,\ Q) = \frac{ADC_o \cdot f(t;w_s,\ Q)}{f_{max}(w_s,\ Q)}$，其最大值为 ADC_o。因此，这种参数化实现了电子学增益，即电荷输入与模数转换器输出之间的比例关系，其设定值为：

$$Q_o = 120 \text{ fC and } ADC_o = 4096 \text{ counts.} \tag{3}$$

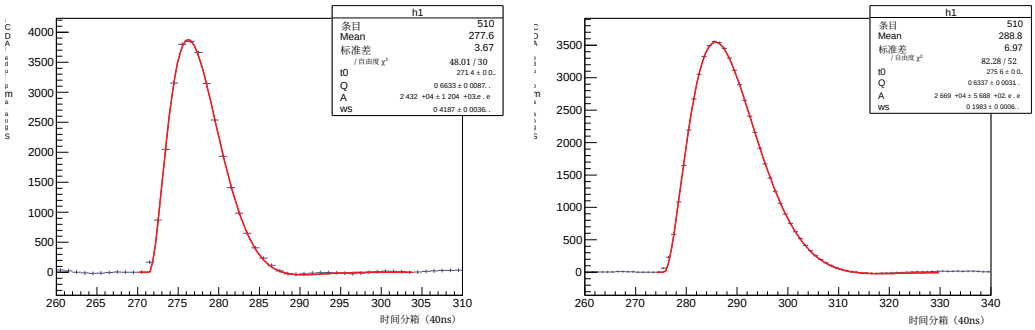
这种电荷-模数转换对应关系仅适用于狄拉克电流脉冲。对于较慢的电流，电子学响应的最大值无法根据公式转换为恰当的电荷。3。

3.2. 使用校准数据验证电子学模型

为了测试和验证第3.1节所述的电子学模型，使用峰值时间为200和412纳秒的板载脉冲发生器，采集不同振幅下、探测器连接或未连接时的校准数据集。每个ERAM与两块前端卡配对，随后进行校准，以供实验使用。

首先使用函数 $f(t;\ w_s,\ Q)$ (公式1)拟合脉冲，以确保模型能够正确描述电子学脉冲形状，同时提取 w_s 和 Q 参数值，并研究ASIC之间电子学响应的均匀性。理想情况下，参数 w_s 和 Q 可独立于输入信号的振幅确定，这样在后续分析中拟合波形时，便可通过电荷沉积函数考虑振幅因子，从而完全确定电子学脉冲形状。

图4 展示了基于 AFTER 芯片模拟、峰值时间分别为 200 和 412 纳秒的解析模型对校准脉冲进行拟合的示例。该解析形式能够很好地描述电子学响应。对于每个焊盘，分别提取参数 w_s 和 Q ，如图5 和 6 所示。任意两个 ASIC 之间的离散度估计低于 10%。属于两个不同 ASIC 的相邻焊盘的 Q 和 w_s 值之间的最大差异可达 4.5%，而同一 ASIC 内两个不同焊盘之间的最大差异可达 3.5%。观察到 Q 和 w_s 之间存在 85% 的负相关，这是因为这两个参数对信号宽度的影响方向相同。这项研究验证了读出电子学响应与解析模型的一致性。



（a）峰值时间为 200 纳秒的信号　　（b）峰值时间为 412 纳秒的信号

图 4：FEC 校准的输出信号，使用电子学响应函数拟合以提取 Q 和 w_s。拟合得到的振幅 A 和 t_0 也一并显示。

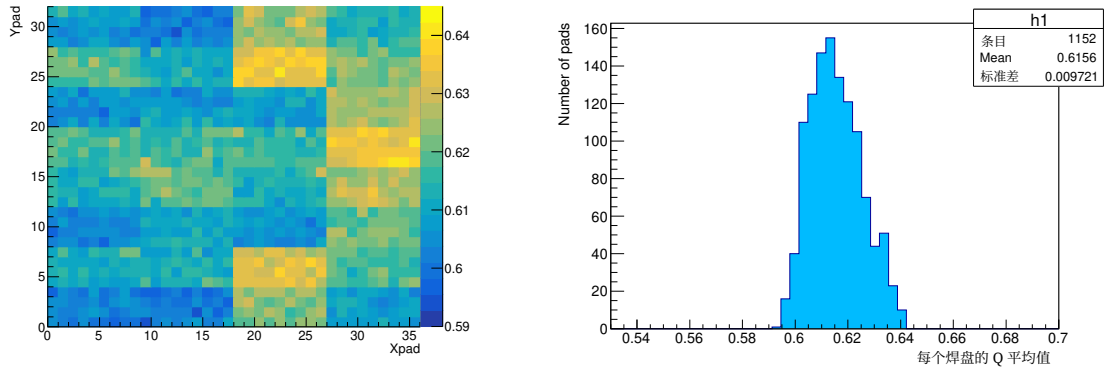
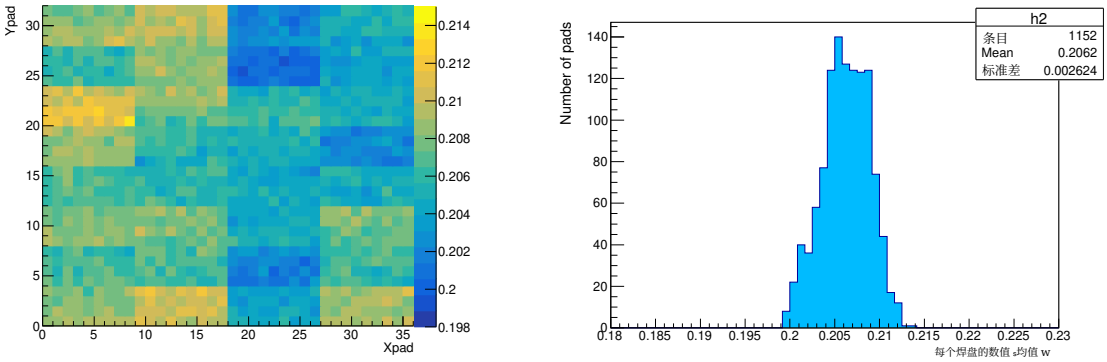


图 5：整个 ERAM 上各焊盘的电子学参数 Q均值分布图（左），以及一维分布图（右）。

3.3. 电子学响应线性度

校准数据还用于研究电子学响应的线性度。图7a 展示了两个不同通道中注入信号振幅最大值的示例。可以看到，注入振幅越大，不同通道间响应的偏移越大。不过，正如预期，偏移幅度很小（2%-2.5%）。图7b 还展示了某个通道的线性度测试示例。在该图中，峰值编号以高斯拟合得到的振幅最大值均值为函数绘制。两个前端卡所有通道得到的线性度系数（图7c）显示出均匀的响应，其典型



Fig图 6：电子学参数 w_s 在每个焊盘上的均值，映射覆盖整个ERAM（左）及其一维分布（右）。

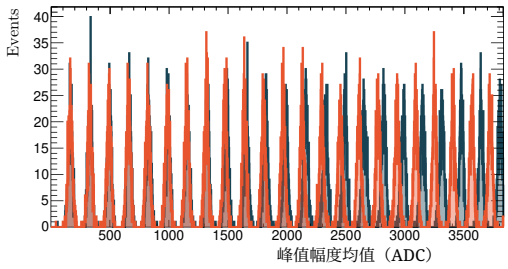
相邻 ASIC 之间的线性度差异小于 3%。两个 FEC 的线性度系数一维分布如图 7d所示。

4. 网格脉冲测试

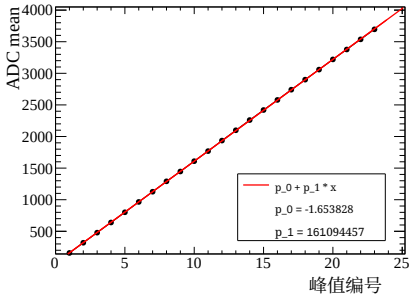
ERAM印刷电路板左上角顶层的板载 DLC 高电压（HV）滤波器配有一个可选的独立网格连接，可向 Micromegas网格（距阳极128 μm）注入信号，从而同时在所有焊盘上感应出信号。此流程（称为网格脉冲测试）用于验证 ERAM 模块的功能。

向网格注入信号，并同时从所有焊盘读取信号。由于激励是均匀的，预期焊盘平面上的响应也均匀，因此该流程可以快速检测任何局部缺陷。测试期间还可以识别失效焊盘：每个模块最多允许有四个失效焊盘，前提是它们彼此不相邻。在将探测器粘接到机械支撑件之前和之后，都会重复进行网格脉冲测试。信号的不均匀性允许为 10%–15%。

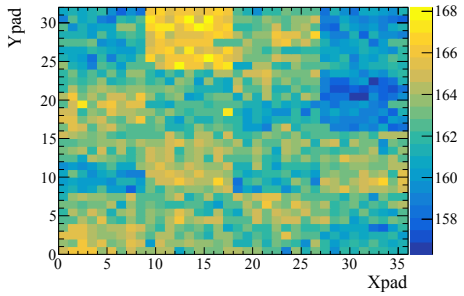
通过一根 50 Ω 阻抗匹配电缆，向 ERAM网格发送频率为 1 kHz、振幅为 300 mV 的方波信号。读出电子学数据采集系统由与网格脉冲测试同步的NIM信号触发。为避免电磁兼容噪声，使用了法拉第笼并进行了仔细接地。图 8 （左）显示了故障ERAM每个焊盘测得的平均振幅。观察到两个较低的



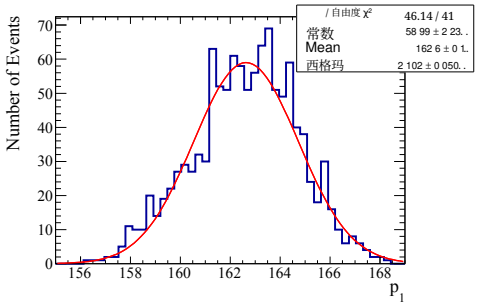
(a)两个不同通道中注入信号幅度最大值的示例。



(b)某个通道中校准测试的示例。



(c)两个 FEC 的电子线性系数分布图两个 FEC 的系数。



(d)两个 FEC 的电子线性系数一维分布两个 FEC 的线性系数。

图7： 电子学响应的线性度研究。

振幅区域。经调查发现，层压过程中灰尘导致网格局部从支柱上剥离。探测器经修复后，按照图8 （右）所示的相同流程进行了验证，未发现局部问题。

5. X射线实验装置

采用X射线测试台对ERAM进行表征。该测试台由一个漂移距离为3厘米的铝腔室和一个安装在尺寸为 120×60 厘米^2 的光学面包板上的机器人 $x-y-z$臂系统组成，该系统承载一个280 MBq的 ^{55}Fe放射源。

在腔室中与 ERAM 相对的一侧贴有一扇 20 μm 镀铝迈拉窗，使 X射线能够穿透气体体积。一张网格

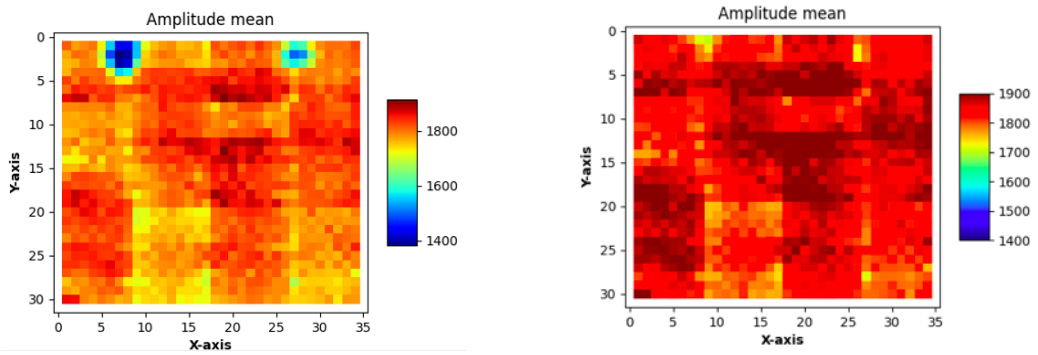


图8：修复前（左）和修复后（右）ERAM 每个焊盘的平均振幅示例。

阴极使电场能够贯穿整个 3 cm 漂移体积，直至 ERAM 接地网格。DLC 电压设为 350 V。AFTER 芯片的设置为：采样周期 40 纳秒，峰值时间 412 纳秒。

机器人每移动一步，位移为 0.1 毫米，因此可以将放射源精确定位在 ERAM 每个焊盘的中心。每安装一个新探测器后，都会执行对准程序，以确保放射源相对于每个焊盘中心的位置准确。放射源前方直径为 1.5 毫米的准直孔可确保大多数光电子到达目标焊盘。使用 100 Hz 的内部触发，每个焊盘需扫描约三分钟，才能获得统计量充足的 ^{55}Fe 能谱，因此自动完成 1152 个焊盘的完整扫描约需 64 小时。使用随机触发。

测试台使用所谓的 T2K 气体混合物（Ar-CF_4-iC_4H_{10}[$95\% - 3\% - 2\%$]），气体流量为 14 升/小时。X 射线室的一个关键方面是气密性，以及更广义上的腔室内部环境条件，例如压力、湿度、流量、温度和气体纯度。鉴于环境条件会影响 ERAM 的增益，监测气体条件至关重要。因此，在腔室出口处的气路中增设了一组传感器。气体监测室 [12] 与部署在 T2K 的 ND280 探测器中的气体监测室相同，已用于最新的 ERAM 扫描。它能够以类似于 ND280 中所采用的方式监测气体条件。

由于 ER- 运行期间与湿度相关的潜在风险。

AMs 运行期间存在与湿度相关的潜在风险，因此必须根据现有各种湿度传感器的测量结果，确定腔室可接受的最高湿度标准。湿度应保持在 0.4% 以下。

6. 使用 ^{55}Fe放射源提取增益

如第5节所述，使用准直器内的 ^{55}Fe放射源产生的X射线束扫描ERAM的每个焊盘。每个X射线光电子都会在目标焊盘（前导焊盘）上方的Micromegas放大间隙中引发电子雪崩，并向该焊盘沉积电荷。这些初始电荷最终会扩散至相邻焊盘。图9展示了扫描某个给定焊盘期间记录的所有X射线事件。可以清楚地看到，被扫描的焊盘计数率最高，电荷则扩散到了相邻焊盘。相邻焊盘中感应电荷的到达时间和电荷量由 RC 前导焊盘的值、初始电荷量以及相邻焊盘相对于初始电荷沉积位置的位置决定。

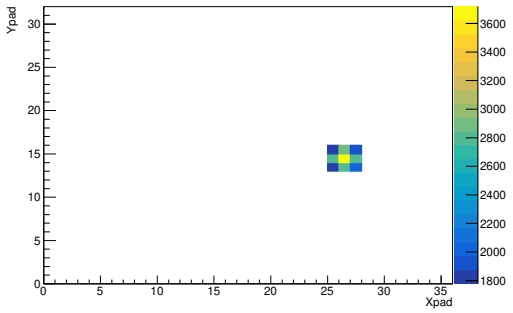


图9：三分钟内扫描某个焊盘（编号为（26,14））时产生的X射线事件显示。被扫描的焊盘计数率最高。相邻焊盘记录到的计数是初始电荷扩散所致。 X_{pad} 和 Y_{pad} 为焊盘索引。

6.1. 增益计算模型

增益定义为阳极上接收到的电荷Q_{Anode} 与电离粒子沉积的初级电荷 $Q_{Primary}$ 之比：

$$G = \frac{Q_{Anode}}{Q_{Primary}} \tag{4}$$

电阻层与导电焊盘之间的电容耦合意味着，电阻层某处的电荷会由焊盘上的异号电荷补偿。这些镜像电荷通过电流注入电子电路，从而产生可读取的ADC信号。

对于X射线事件，关注的焊盘是信号振幅最高的焊盘（前导焊盘），以及如图所示围绕它的另外八个焊盘 9。一种[8] 计算增益的方法是将这些焊盘信号的波形相加，取所得波形的最大值（ADC^{Σ}_{max}），并根据式Q^{Σ}_{max}所定义的转换关系将其转换为电荷（3）。因此，增益就是该电荷与估算的X射线光子沉积的初级电荷（$Q_{Primary}$）之比：

$$G = \frac{Q^{\Sigma}_{max}}{Q_{Primary}} = \frac{ADC^{\Sigma}_{max}}{ADC_o}\frac{Q_o}{Q_{Primary}} \tag{5}$$

这种将ADC计数隐含地视为电荷的方法之所以可行，是因为对于实际ERAM器件的 RC 值范围而言，存在一个特殊情况：沉积在九个焊盘上方电阻层表面的电荷扩散，在电子学响应的时间尺度内近似保持恒定。就电子学而言，为中和电阻层上的电荷而注入焊盘的总电荷是恒定的，并且是瞬时注入的，也就是说，相应的电流是一个狄拉克脉冲。因此，焊盘信号之和就是等效电子学对狄拉克电流脉冲的响应，其最大振幅确实可以根据式3转换为电荷。

这些考虑可以转化为如下数学表述。设 $\rho(x,\ y,\ t)$ 为电阻层上的电荷密度，而$Q_i(t) = \iint_i \rho(x,\ y,\ t)\mathrm{d}x\mathrm{d}y$ 为时间 t时，位于编号为 i的焊盘对面的电阻层上的电荷。该电荷的电子学响应，是其导数与狄拉克脉冲的电子学响应（式2）的卷积；等价地，也可以表示为该电荷与此电子学响应的导数的卷积：

$$ADC_i(t) = \left(\frac{dQ_i}{dt} * ADC^D\right)(t) = \left(Q_i * \frac{d}{dt}ADC^D\right)(t) \tag{6}$$

因此，上述九个焊盘的响应之和为：

$$ADC^{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^{9} ADC_i(t) = \left(\left[\sum_{i=1}^{9} Q_i\right] * \dot{ADC}^D\right)(t) \tag{7}$$

推导最后一项时，假设九个焊盘的电子学具有相同的响应。由式 7 可得，若总电荷实际上为常数，因而等于雪崩在电阻层上沉积的电荷， $\sum_{i=1}^{9} Q_i(t)$ $\sim Q_{Primary}\, G\, \theta(t)$ 其中 $\theta(t)$ 为赫维赛德阶跃函数，可将其因式分解提取出来，从而得到

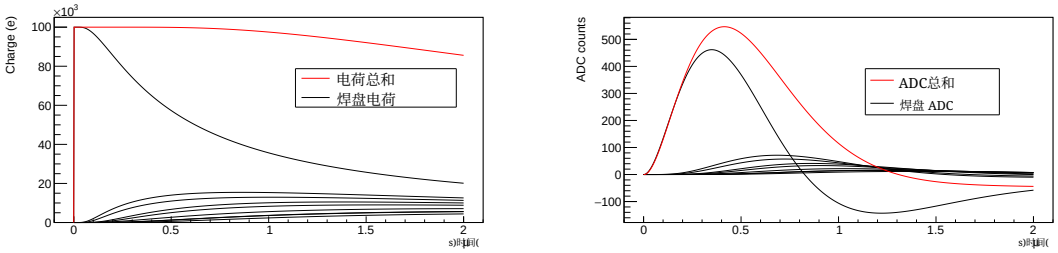
$$ADC^{\Sigma}(t) \sim Q_{Primary}\, G\, ADC^{D}(t) \tag{8}$$

因此，九个焊盘的响应之和的最大值 is

$$ADC^{\Sigma}_{max} \sim Q^{Primary}\, G\, \frac{ADC_o}{Q_o} \tag{9}$$

这等价于公式 5。

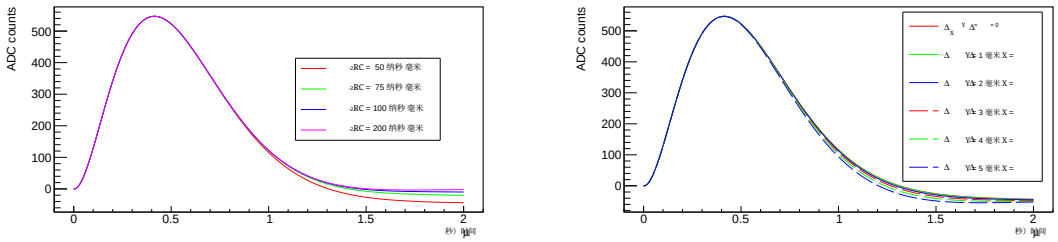
此证明仅依赖于九个焊盘的电子学响应相同这一事实。它不依赖于 RC 在九个焊盘上方的电阻表面上的均匀性，而仅假设在电子学响应的时间尺度内，最初沉积在前导焊盘上的电荷没有大量逸出该扩展表面。



(a) (b)

图 10：在焊盘中心沿 X 和 Y 方向各偏移 1 毫米处沉积 100 个初级电子时的焊盘电荷（以电子电荷单位 (a) 和模数转换器读数 (b) 表示）及其总和；增益为 10^3， RC 的值为 50 纳秒/毫米^2。

针对 100个初级电子沉积在焊盘中心旁 1 毫米处的情况，对 x 和 y 方向进行了电荷和模数转换器响应的模拟，增益为 10^3， RC 的值为 50 纳秒/毫米^2。结果见图10a，其中展示了电荷及其总和；图10b 则展示了模数转换器响应及其总和。尽管各焊盘上的电荷变化显著，但九个焊盘上的总和在图10b所示的电子学响应时间尺度内变化要缓慢得多。



(a) (b)

图 11：模拟中焊盘 ADC 总和随 10^3, 增益的变化。沉积 100 个初级电子时，(a) 在 X 和 Y 方向上距焊盘中心 1 毫米处，取不同的 RC 值；(b) 在坐标 ΔX 和 ΔY 相对于焊盘中心的不同位置，且 RC 固定为 50 纳秒/毫米^2。

方程8并非精确成立。事实上，图10a 显示，总电荷并非常数。不过，只需确认这种近似足够好，使模数转换器响应总和的最大值实际上不受具体条件影响即可。图11a显示，对于 RC 从 50 纳秒/毫米^2 到 200 纳秒/毫米^2, 的范围内的任意取值，这一结论均成立；该范围涵盖了实际测得的数值 [4]。同样，图11b 显示，无论初始电荷沉积位于前导焊盘上的何处，这种近似实际上都成立。

最后，本文提出的增益模型通过X射线数据进行了验证。图12 展示了X射线事件中生成的垫片信号总和与其对应电子学响应之间的比较（根据第7.1节详述的同时拟合结果进行了归一化）。数据与模型吻合极佳。

6.2. 使用*X*射线数据的增益结果

为量化每个焊盘的增益和分辨率，对重建的 ^{55}Fe 能谱峰进行拟合。采用第 ^{55}6.1 节介绍的增益法重建的典型 Fe 能谱见图 13。图中叠加了 5.9 keV 峰对应的高斯拟合。氩逃逸峰也清晰可见。两个峰位之比为 1.94。根据峰位，可利用

[4]顺带一提，这表明九个焊盘上的 RC 不均匀性不会影响该方法，因为即使在 RC 值最低、允许电荷最快逸出的情况下，总电荷实际上仍保持恒定

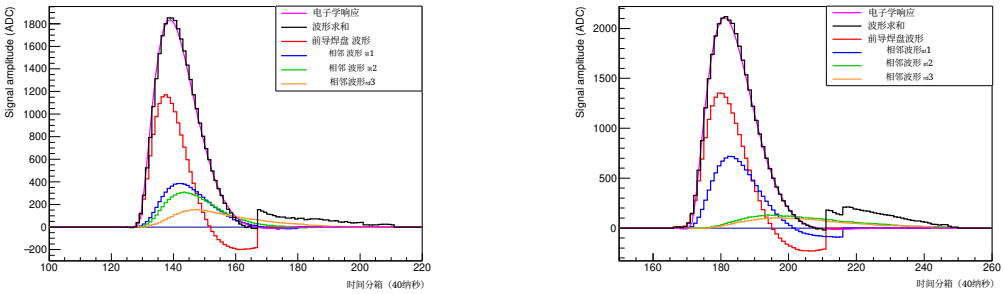


图 12：X射线事件中垫片信号总和与其电子学响应的两组比较示例，电子学响应已根据同时拟合结果进行归一化。

公式 5 计算增益，其中 $Q_{Primary} = 224\ e_{\circ}$ 至于能量分辨率，其定义为：$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\sigma}{\mu}$，其中 σ 为高斯标准差，μ 为拟合得到的 K_α 线位置。图 14a 展示了 ERAM-30 的二维增益图。该图显示，焊盘之间存在最高达 25% 的局部不均匀性。图 15a展示了 ERAM-30 的二维能量分辨率图。能量分辨率优于 10%。

还研究了增益随 DLC 电压的变化情况。图16展示了 ERAM 中心处一个焊盘的增益随 DLC 电压的变化情况，比较了不同的 ERAM探测器。增益随 DLC 电压呈指数增长，证实了探测器运行正常。

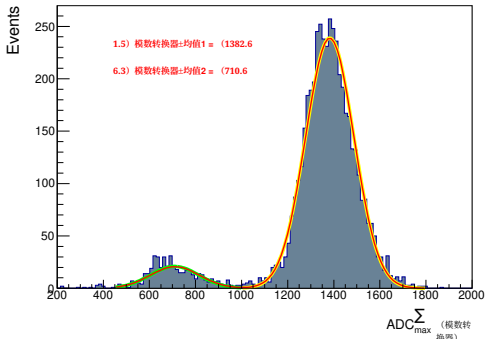
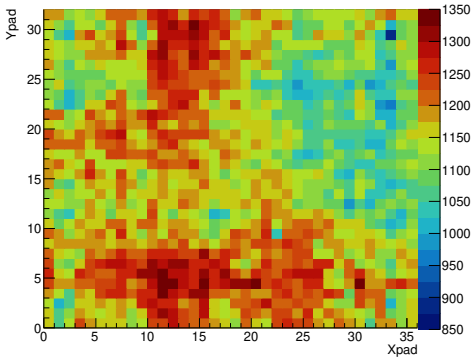
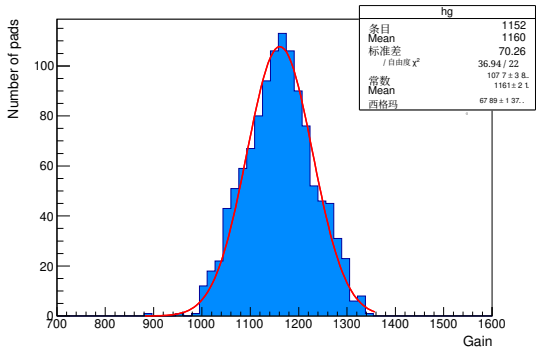


图 13：^{55}由 ADC^{Σ}_{max} 从一个焊盘中的所有事件提取并重现的铁谱。

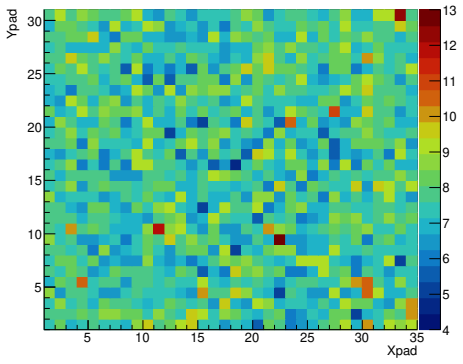


(a) ERAM-30 增益图

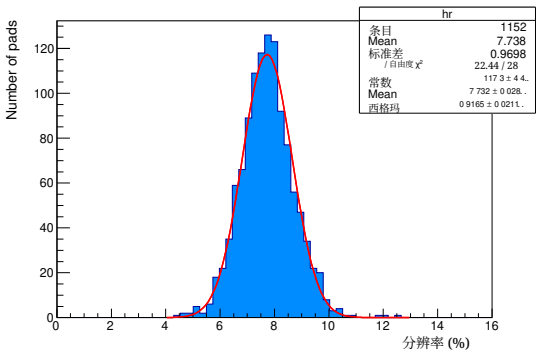


(b) ERAM-30 增益分布

图14：采用第6.1节所述方法获得的 ERAM-30 增益信息。



(a) ERAM-30 分辨率图



(b) ERAM-30 分辨率分布

图15：采用第6.1节所述方法得到的 ERAM-30 增益对应的能量分辨率。

7. 信号模型

信号模型基于 [13]，中给出的理论，主要内容总结如下。电阻层上的电荷空间扩散由扩散方程支配：

$$\frac{\partial \rho(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{RC}\Delta\rho(r,t) \tag{10}$$

其中 Δ 为拉普拉斯算子，$\rho(r,t)$ 为电荷密度函数，R 为该层的表面电阻率，C 为由阳极与读出平面之间的间距决定的表面电容

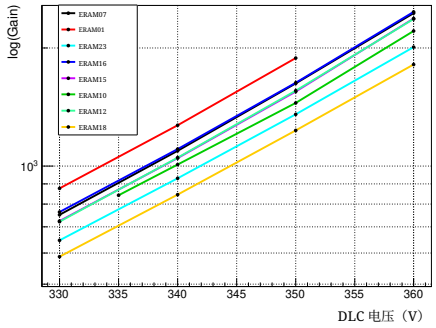


图 16：不同 ERAM探测器的增益随所施加的 DLC 电压变化。增益值取自探测器中心的一个焊盘。

。该 RC 常数记为 $\tau = RC$。

对于沉积在 $r = 0$ 和 $t = 0$处的点状单位电荷，其电荷密度随半径 r 和时间 t 的变化可表示为高斯分布：

$$\rho(r,t) = \frac{1}{4\pi(t/\tau)} e^{-r^2/4(t/\tau)}. \tag{11}$$

实际的初始电荷分布并非狄拉克 δ 函数，用具有有限宽度的高斯分布可能更能近似表示 ω 且总电荷为Q_e。在这种情况下，阳极表面电荷密度随空间和时间的变化可通过将方程11 与初始高斯分布进行卷积得到：

$$\rho(r,t) = \frac{Q_e}{2\pi\sigma^2(t)} e^{-r^2/2\sigma^2(t)}, \tag{12}$$

其中 $\sigma(t) = \sqrt{\dfrac{2t}{RC} + \omega^2}$。

电阻层下方矩形焊盘上的感应电荷可通过对焊盘面积上的电荷密度函数积分来计算：

$$\begin{aligned} Q_{pad}(t) = \frac{Q_e}{4} \times \left[erf\left(\frac{x_{\text{high}} - x_0}{\sqrt{2}\sigma(t)}\right) - erf\left(\frac{x_{\text{low}} - x_0}{\sqrt{2}\sigma(t)}\right) \right] \times \\ \left[erf\left(\frac{y_{\text{high}} - y_0}{\sqrt{2}\sigma(t)}\right) - erf\left(\frac{y_{\text{low}} - y_0}{\sqrt{2}\sigma(t)}\right) \right] \end{aligned} \tag{13}$$

其中，Q_e 是倍增后的初始电荷，(x_0, y_0)是初始电荷沉积的位置。最后，x_{high}，x_{low}，y_{high}，y_{low} 是焊盘边界。

信号还会分别受到纵向扩散导致的电子到达时间展宽和横向扩散导致的位置展宽的影响。对于漂移距离为 3 cm 的 X 射线测量，到达阳极的电荷簇横向均方根宽度约为 $540\ \mu$m，纵向时间均方根展宽约为 4.5 纳秒。在以下所有研究中，与横向扩散项相关的 ω 固定为 $540\ \mu$m，并忽略纵向扩散。

为计入电子学对感应电荷的响应，将电荷扩散函数（式 13）与电子学响应函数（式 2）的导数进行卷积，从而得到电荷信号函数 $S(t)$，定义如下：

$$S(t) \;=\; Q_{pad}(t) \;\circledast\; \frac{\mathrm{d}(ADC^{D}(t))}{\mathrm{d}t} \tag{14}$$

图 17展示了使用式 14进行卷积的一个示例：在相对于前导焊盘中心的位置（焊盘宽度/3，−焊盘长度/3）沉积了 24845 个电子，其中 $RC = 100$ 纳秒/毫米^2。可以清楚地看到，靠近电荷沉积点的相邻焊盘与距离较远的焊盘，其振幅大小和时间存在明显差异。

7.1. 使用*X*射线数据同时拟合波形

对单个X射线事件中生成的所有波形，使用信号函数（式 14）进行同时拟合，以提取 RC 和前导焊盘的增益。拟合基于 χ^2 最小化。此处，事件定义为：一个X射线光电子在前导焊盘及其相邻焊盘中引发电荷沉积的情形，这是由电荷扩散现象导致的。为充分约束（x_0，y_0）位置，拟合至少使用前导焊盘周围 3×3 焊盘矩阵中的三个波形。为避免在拟合过程中纳入噪声，最大振幅低于 70 模数转换器计数的波形会被舍弃。基线的典型均方根值为 6。该值作为信号幅度的误差。

拟合是逐事件进行的，电子学响应参数 w_s、Q 固定为上述研究中获得的数值。该模型包含五个参数：

- t_0 是电荷在前导焊盘上的沉积时间，
- （x_0、y_0）是初始电荷沉积的位置，
- RC 读出焊盘 - 胶层 - 电阻箔网络，以及

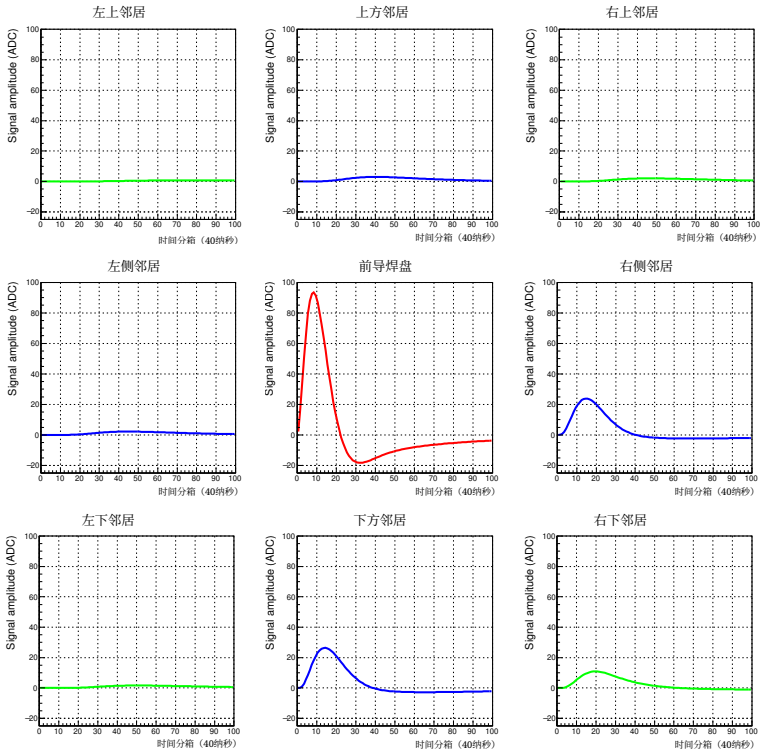


图 17：使用公式模拟电荷扩散与电子学响应的卷积。14 ，当 24845 e^- 沉积在前导焊盘中心相对于位置（焊盘宽度/3，-焊盘长度/3）处，且 $RC = 100$ 纳秒/毫米^2。

- Q_e 是放大间隙中倍增后的初始电荷。

图中展示了一个X射线事件产生的四个波形同时拟合的示例及其拟合结果 18。对一个焊盘中的所有事件进行拟合后，根据提取的 RC 值可得到一个高斯分布，如图 RC 19a所示。所有事件的 RC分布的均值被视为该焊盘的全局 RC 值。图 19b 展示了拟合参数 Q_e ，其形状经发现能够复现 ^{55}Fe 能谱，因此可用于提取增益。第9节将进一步阐述这一主题。图 20 （左）展示了一个焊盘中所有同时事件拟合的 χ^2/自由度分布；图 20（右）则是针对前导焊盘的X射线光电子所产生的所有电荷沉积估计位置的二维映射。电荷位置分布的形状反映了准直器的圆形孔径

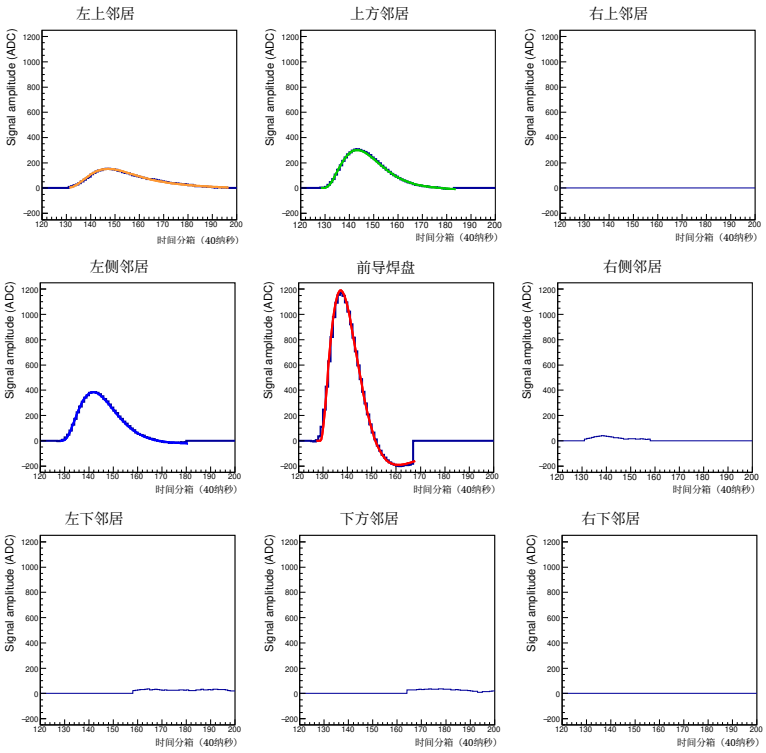
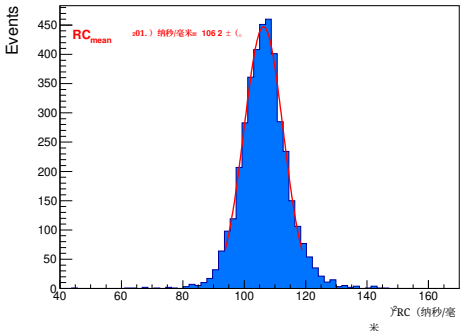


图18：一个由X射线产生的事件的四个波形同时拟合示例。拟合结果： $RC = (146.6 \pm 1.6$ 纳秒/毫米$^2)$， $Q_e = (327.6 \pm 1.8) \times 10^3 e$，$(x_0,\ y_0) = (-0.442$ 厘米，0.352 厘米$)$（相对于前导焊盘中心），χ^2/自由度 $= 1.08$。

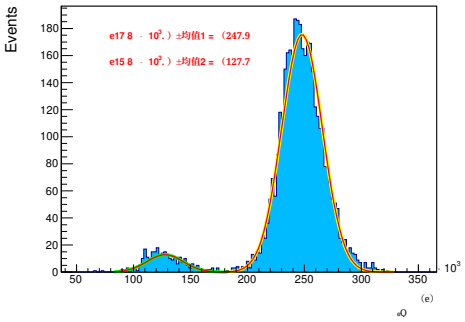
其中容纳了X射线源。

8. *RC* 图：使用X射线数据拟合波形得到的映射

第7.1 节所述的拟合过程也应用于所有焊盘中产生的事件，以获得二维 RC 分布图以及一个均值 RC ，用于代表在X射线测试台上扫描的ERAM。图21a和21b 分别展示了 RC 分布图以及 RC ERAM-30所有焊盘的分布。 RC 二维分布图显示出水平方向上的均匀性，这将在8.2节讨论。然而， RC 分布图中仍观察到高达35%的整体变化。

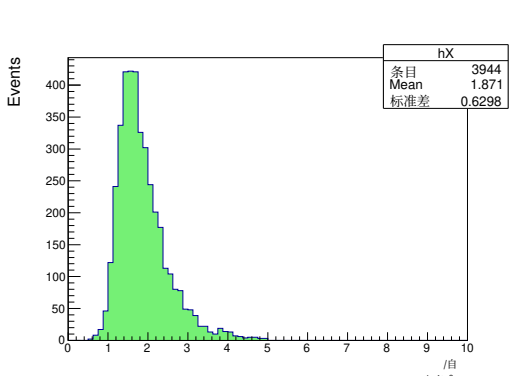


（a） RC 单个焊盘的分布。



(b) Q_e 分布（单个焊盘）。

图19：通过拟合单个焊盘中的所有事件得到的 RC 和 Q_e 分布。



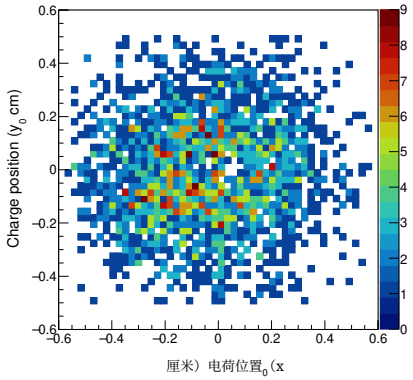
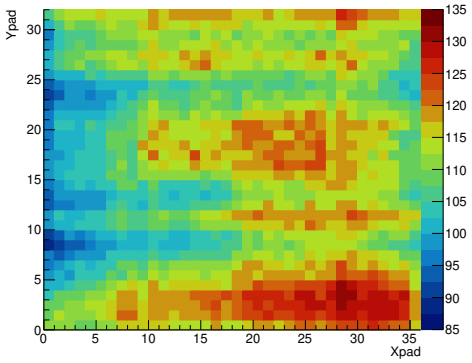


图20：所有拟合事件的 χ^2/Ndf分布（左）和电荷沉积的拟合位置（x_0， y_0）（右），均来自单个焊盘。

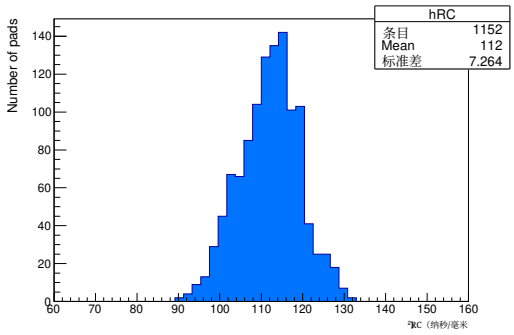
8.1. 不同*ERAM*的 RC 图

迄今为止已研究的23个ERAM的 RC 分布图汇总见表1。图22 展示了 RC 另外八个已完成表征的ERAM的分布图。这些ERAM采用表面电阻率为400 kΩ/□ 、胶层厚度为 150 μm的DLC薄膜制成。所有这些ERAM的均值 RC 均处于100 ns/mm^2 至150 ns/mm^{2}的范围内。

另外，还研究了两块表面电阻率和胶层厚度不同于常规规格的ERAM。其中一块 ERAM（ERAM-18）的胶层厚度相同，但表面电阻率只有典型 ERAM 的一半。理论上，其 RC 值应为典型 ERAM 的一半，



(a) RC ERAM-30的映射图。



(b) RC ERAM-30所有焊盘的分布。

图21： RC 从ERAM-30测试台数据中提取的信息。

这一点确实得到了验证，测得其 RC 值为 70 纳秒/毫米^2。另一块 ERAM（ERAM-29）的胶层厚度和表面电阻率均为典型 ERAM 的一半，因此其 RC 应保持不变。测得 ERAM-29 的均值RC 值为 102 纳秒/毫米^2, ，如预期所示，该值处于标准 RC 值范围内。迄今为止完成表征的所有 ERAM 的 RC 图均显示出水平方向上明确的均匀性。

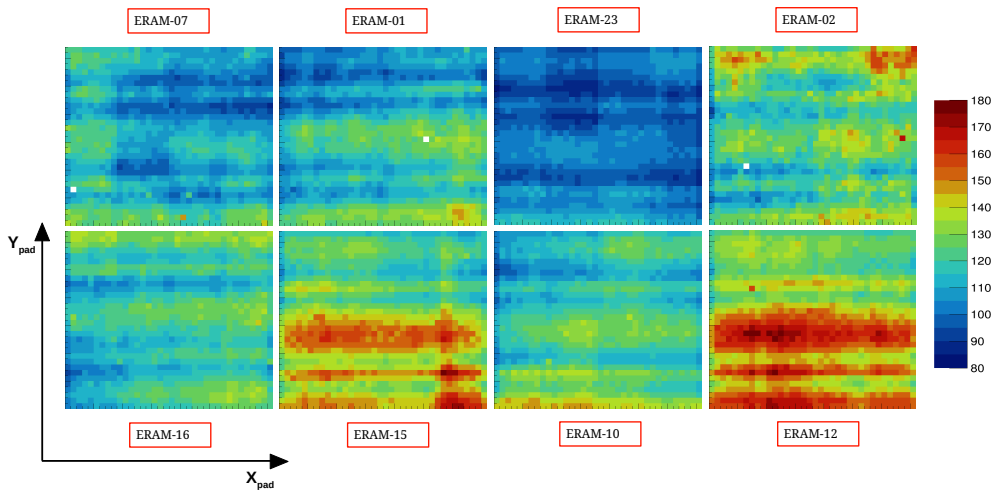


图22： RC 2022年9月在欧洲核子研究中心测试束流中，在场笼原型内共同测试的8个ERAM的映射图。

ERAM	均值 RC (纳秒/毫米²)	RMS 的 RC (纳秒/毫米²)
01	114.9	12.1
02	124.2	12.2
03	116.4	8.0
07	111.3	9.7
09	115.7	9.9
10	119.9	9.0
11	122.4	6.7
12	144.2	15.1
13	114.9	8.1
14	100.5	8.2
15	134.9	14.6
16	119.3	8.4
17	122.1	6.7
18	68.98	4.3
19	109.5	5.6
20	111.1	7.1
21	97.7	5.9
23	100.2	6.0
24	105.9	6.9
26	115.3	6.1
28	109.6	5.5
29	102.0	5.9
30	112	7.3

表1：23 个 ERAM 的全局 RC 值汇总。所有 ERAM 均采用 DLC 电阻率为 400 kΩ/□、胶层厚度为 150 μm 的工艺制成，但 ERAM-18 的胶层厚度相同，表面电阻率减半；ERAM-29 的胶层厚度和表面电阻率均减半。

8.2. 理解 RC 图特征

为了确定在 RC分布图中观察到的水平结构究竟是器件本身的特性还是拟合造成的假象，我们重建了对电荷扩散敏感的基础级观测量。图 RC 23b 和23b 及23c中展示了两个与电荷扩散相关的变量，它们可用于指示

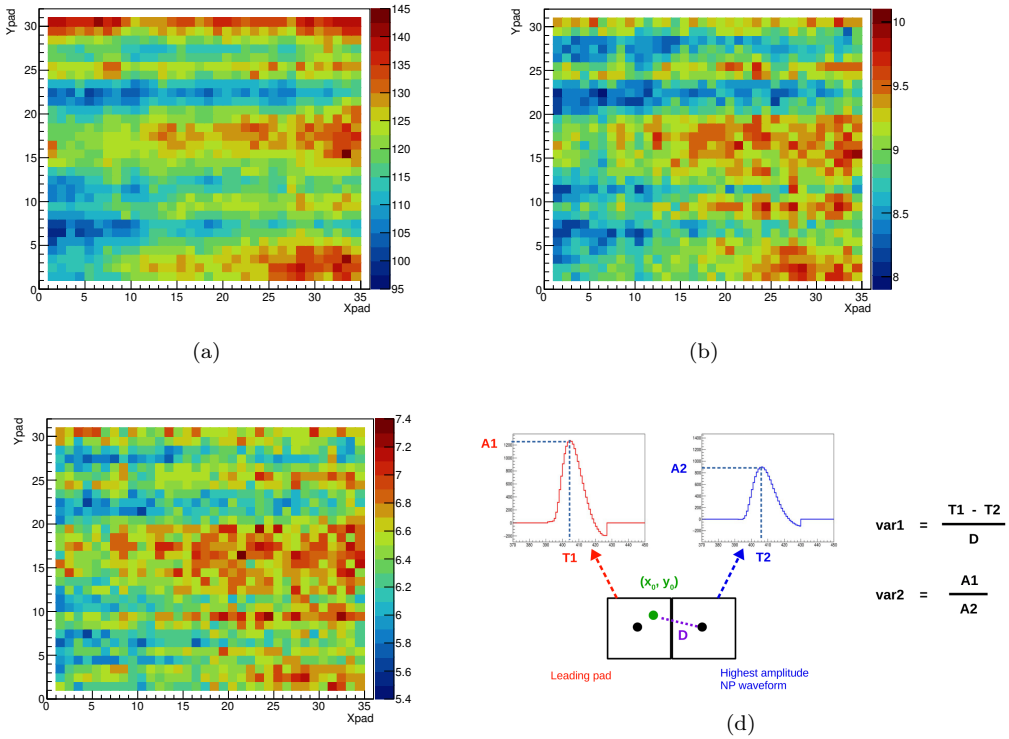


图23：比较 ERAM-16 的 RC map（a）与两个不同基础级变量的映射图（b）和（c）的特征。图（d）中描述的变量 var1 和 var2 分别用于构建映射图（b）和（c）。

图23d 中的示意图解释了用于构建两幅分布图的变量。变量 var1 用于生成图23a中的分布图，其定义为以下两者之差与电荷沉积点 T_{max} （即波形中振幅出现时的时间）之比：前导焊盘波形的（x_0，y_0）与振幅最高的相邻焊盘波形的时间之差，再除以电荷沉积点到振幅最高的相邻焊盘波形所在焊盘中心的距离。为使该变量不受同时拟合模型影响，电荷沉积点采用电荷中心法计算。变量 var2 用于生成图23c中的分布图，其定义为前导焊盘波形的振幅与振幅最高的相邻焊盘波形振幅之比。

两种基础级变量图都呈现出 RC 图的关键特征

但精确程度各不相同。基础级变量图再现了高、低 RC 区域的位置和幅度。因此，在 RC 图中观察到的特征是器件固有的。

8.3. 与预期 RC 值的比较

研究了电阻率测量结果与二维 RC 图之间的相关性。探测器生产过程中，使用由 CERN PCB 车间设计的探针测量 DLC 薄膜的电阻率。图 24显示了将 DLC 薄膜层压到探测器 PCB 上之后，在九个不同位置测得的 ERAM-01 电阻率。图RC 中的水平结构与电阻率测量结果明显相关：电阻率值越高，估算的 RC 值也越高。为了将

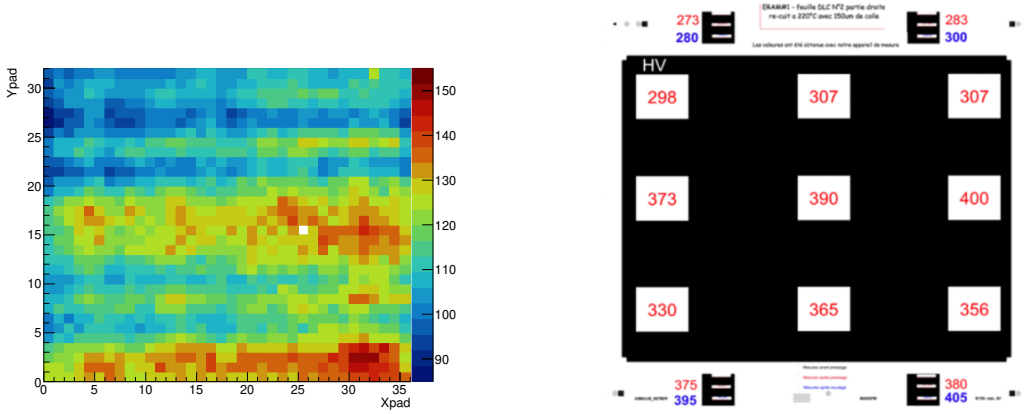


图 24：ERAM-01 RC 图（左），使用由 CERN PCB 车间设计的探针测得的 ERAM-01 电阻率（右）。红色表示 DLC 压合后的 ERAM-01 电阻率。探测器粘合后，电阻率测量结果以蓝色表示。测量仅能在探测器有源区外的四个位置进行。

将拟合得出的均值 RC 与预期值 RC 进行比较时，假设采用由 Apical（聚酰亚胺薄膜）和胶层厚度决定的简单平板电容 C。此时可计算常数电容 $C = \epsilon_0 \epsilon_r / d$，其中 ϵ_0 为真空介电常数，ϵ_r 为 Apical 和胶层材料的相对介电常数。距离 d 定义为 Apical 和胶层的厚度之和。

粘合探测器 ERAM-01 后，只能在探测器有源区外的四个位置进行电阻率测量。

R 测量结果介于 280 至 405 kΩ/□，如图 24所示，由此得到预期的 RC 变化范围为 53 至 77 纳秒/毫米^2。计算得到的 RC 约为通过拟合提取出的 RC 的一半。

对这一差异的一种可能解释是 DLC [11]上的离子场。离子场会限制远距离电荷扩散，从而对其产生显著影响。这种现象称为牧羊犬效应。使用玩具模型时，发现 RC 值确实是未考虑离子贡献时所得值的 2.7 倍。这一解释实际上尚未得到完全证实，后续还将开展进一步研究以理解这种效应。

8.4. RC上的系统不确定度

8.4.1. DLC 电压对 RC的影响

通过拟合在不同 DLC 电压下扫描期间于一个焊盘中产生的 RC 事件，研究了 DLC 电压对 RC 图 25展示了这项研究的结果。均值RC 值相对于所施加 DLC 电压的变化可以忽略不计。该研究表明， RC 与增益值之间不存在明显的相关性。

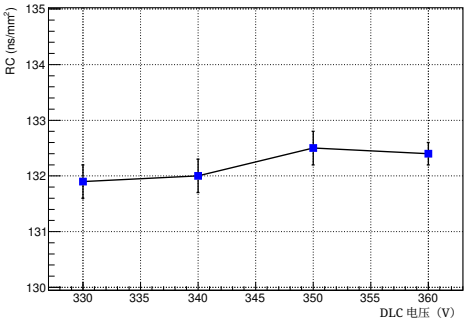


图 25：DLC 电压对 RC 值的影响。

8.4.2. 电子学对 RC的影响

电子学响应参数 Q 和 w_s 在上述所有结果的同时拟合模型中均设为常数。但如图5和6所示， Q 和 w_s 的数值在单个焊盘与整个 ERAM 的均值之间最多可相差 4%。因此，研究这些参数对电荷信号的影响十分重要

以研究这些参数对电荷信号的影响，从而RC 了解对于整个 ERAM，将 Q 和 w_s 固定为一个中心值会产生什么影响。我们使用 ERAM-03 及其前端卡组研究了这一效应。对于某一事件同时拟合中涉及的每个焊盘，均使用与这些焊盘相连的 FEC 通道所对应的特定 Q 和 w_s 数值。与将这些数值设为常数相比，针对每个焊盘采用特定的 Q 和 w_s 数值后，观察到整个 ERAM 的均值 RC 变化了 5%。

9. 使用X射线数据拟合波形得到的增益图

通过考虑根据公式 Q_e 得到的初级电子数，可以直接从同时拟合所得的分布（图19b）中提取增益。4。图27 展示了另外八个已完成表征的ERAM的二维增益图。研究发现，ERAM探测器的绝对增益会随设计而变化。目前仍在研究这一效应。

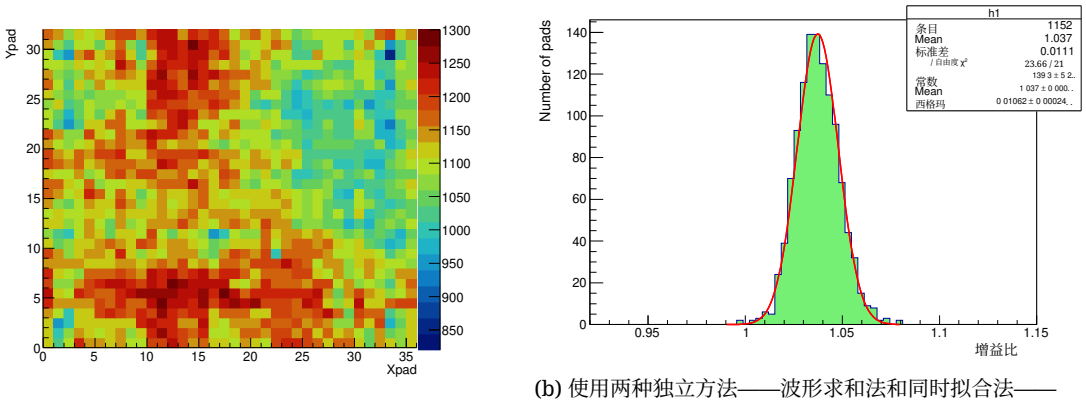
图28 比较了通过两种不同方法得到的增益。不同ERAM之间，两种方法得到的增益差异小于4%。这种系统性差异是同时拟合中的电子学效应所致。事实上，与考虑Q、 w_s的逐焊盘变化相比，使用固定的（ Q 和w_s ）数值对（如第8.4.2节所述）会使增益产生5%的变化。在同时拟合中，各FEC通道的（Q， w_s）值相对于所采用常数的差异，决定了增益的变化百分比。因此，不同前端卡之间的这种变化会有所不同。

图 29 展示了均值 RC 与这些 ERAM 的平均增益值之间的关系。与绝对增益值之间没有明显的相关性。这一观察结果证实了第 8.4.1 节所得的结果。

9.1. 去除 *PCB*阻焊层

部分 ERAM 模块的二维增益图呈现出网格图案，其形状与 PCB 顶层的阻焊层非常相似，如图 30所示。

使用一个基础层级变量来研究一个



(a) 使用同时拟合法得到的 ERAM-30 增益图。

(b) 使用两种独立方法——波形求和法和同时拟合法——得到的 ERAM-30 增益分布之比。

图26：从 ERAM-30 测试台数据中提取的增益信息。

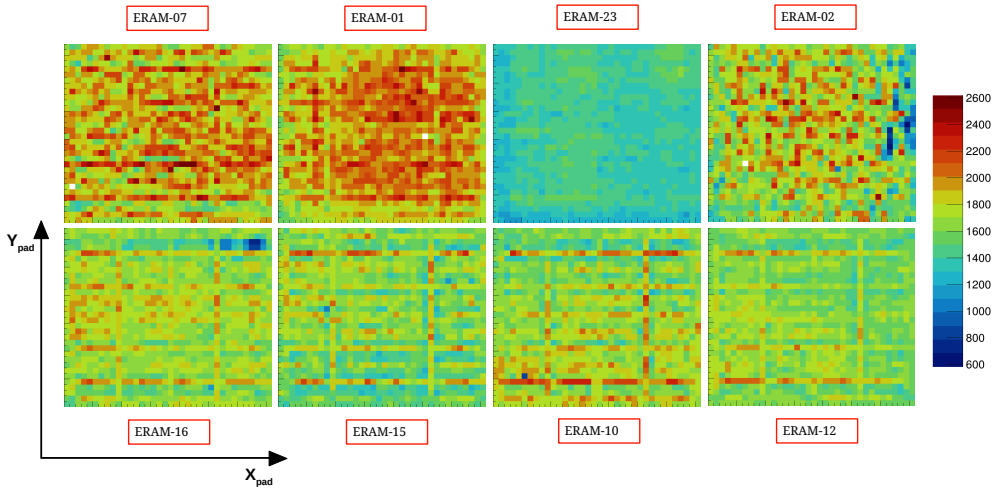


图27：在场笼原型中一同测试的八个 ERAM 的增益图。

指定焊盘内增益的均匀性。该变量定义为所研究焊盘顶部、底部、左侧或右侧区域重建出的平均振幅，相对于该焊盘平均振幅的相对偏移。该变量以焊盘平均振幅为参考，突显焊盘内部增益的不均匀性。如图 31 所示，沿着显示网格图案的区域，焊盘内增益的不均匀程度最高可达 30%。

事实上，如图所示32，在探测器组装过程中将 DLC 压到 PCB 上时

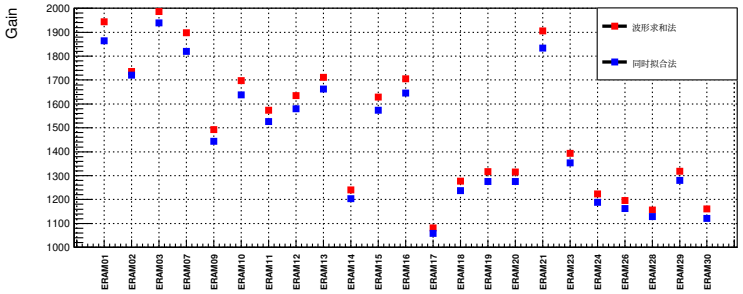


图 28：所有已分析 ERAM 的波形求和法与同时拟合法提取的增益对比。

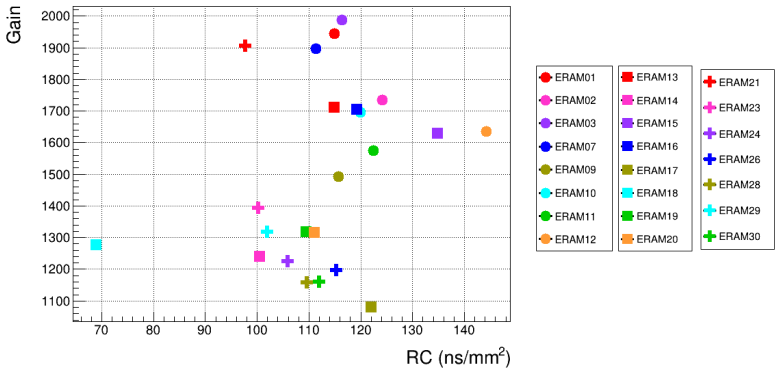


图 29：所有已分析 ERAM 的均值 RC 对平均增益的依赖关系。

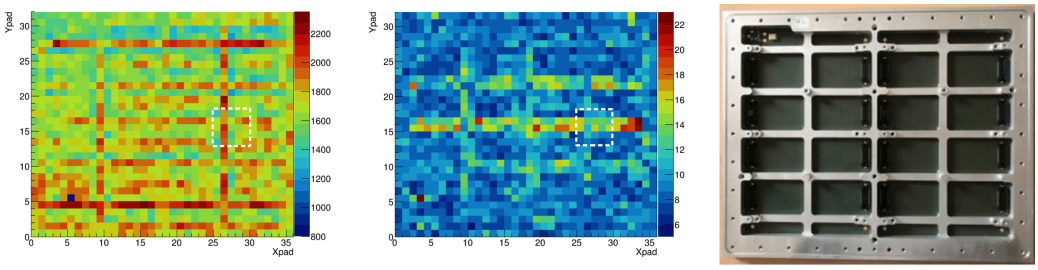


图 30：左：ERAM-10模块的模数转换器相对增益二维图；中：ERAM-10模块的能量分辨率（%）二维图；右：印刷电路板顶层：灰色区域为厚度为 20-35 μm 的铜层和 $+50$ μm 阻焊层，交叉阴影区域仅由铜网构成。

印刷电路板底层的不均匀性导致机械约束分布不均，从而造成了重新-

放大间隙与加劲网格对齐处的高度变化。考虑到放大间隙中的电场，仅几微米的变化就足以解释测得的增益波动。为解决这一问题，阻焊层和铜板被均匀的铜网取代。图33 展示了印刷电路板底层修正后探测器的性能。

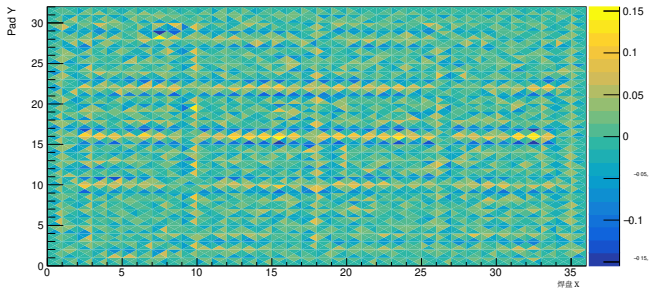


图31：焊盘内增益不均匀性的分布图。 z 轴表示所研究焊盘的顶部、底部、左侧或右侧区域重建的平均振幅相对于该焊盘平均振幅的相对偏移。

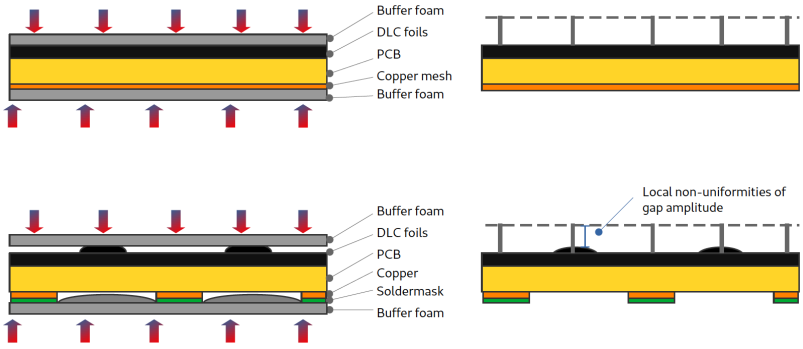


图 32：探测器组装过程中 DLC 压在 PCB 上的示意图，这会导致二维增益图和能量分辨率图中观察到的不均匀性。箭头表示所施加的机械约束；移除阻焊层并以铜网取代后，这些约束便会均匀分布。

9.2. 焊盘内的增益变化

利用同时拟合结果，可以非常细致地研究给定焊盘内的增益变化。这可以通过绘制

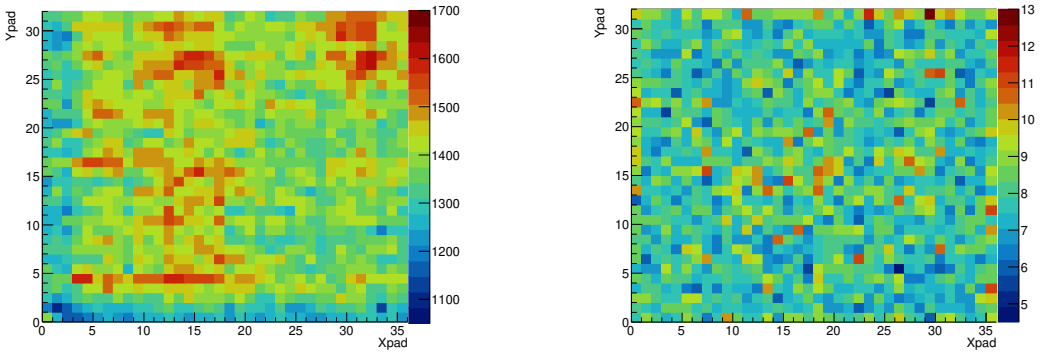


图 33：修改 PCB 底层后，相对增益的二维图（左，单位：模数转换器计数）和能量分辨率（右，单位：%）。与图 30比较。

焊盘内每个电荷沉积点（x_0， y_0）位置对应的增益来实现。借助这一能力，可以探测由下方阻焊层（第 9.1 节）引起的焊盘内增益变化。

图 34 展示了 5×5 网格中每个焊盘的高粒度增益图，该网格在图 30 的增益图和分辨率图中以白色虚线方框标出。网格中位于阻焊条上方的焊盘，其增益结构与其他焊盘不同，图 31中也可见这一点。位于水平条上方的焊盘（图 34中从上往下数第二、第三行）尤为明显：不同增益区域的强度存在清晰差异，勾勒出焊盘下方有阻焊层和没有阻焊层的部分。得益于拟合在重建电荷位置时具有出色的分辨率，这项研究才得以实现。

10. 环境条件对增益的影响

如第 5 节所述，由于环境条件的变化可能会影响增益，因此我们对 X 射线室内的气体环境条件进行密切监测。以下条件会对增益产生显著影响：气体温度、腔室压力和相对气体湿度。为了观察这些因素对增益的影响，我们在不同时间以相同的气体流量扫描了 ERAM 两次。

温度与压力之比（T/P）对增益的影响如图35所示。左侧 y轴及蓝色数据点表示两次不同扫描中每个焊盘计算所得的增益比值

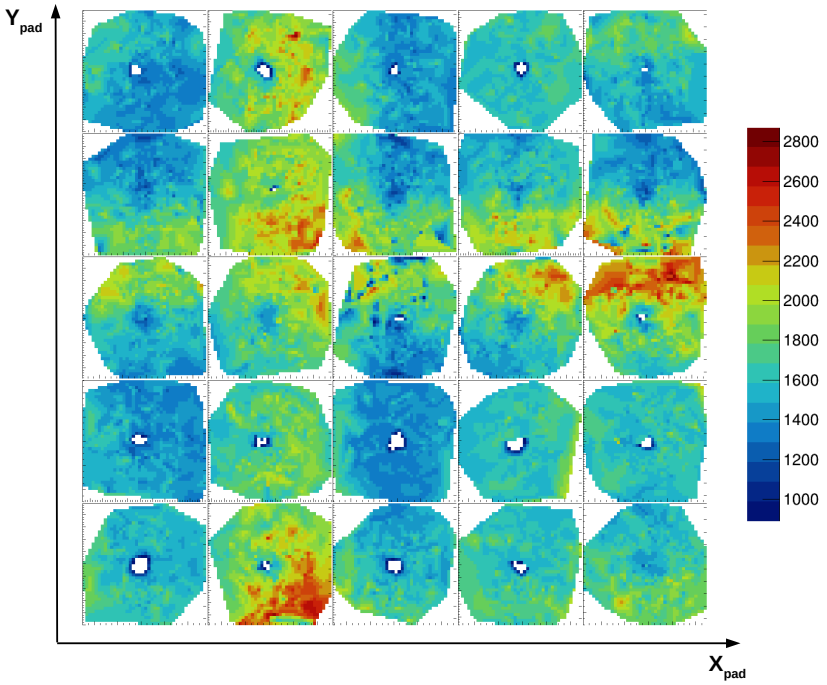


图34：通过同时拟合法，以高颗粒度呈现位于PCB加固板上方焊盘内的增益不均匀性。

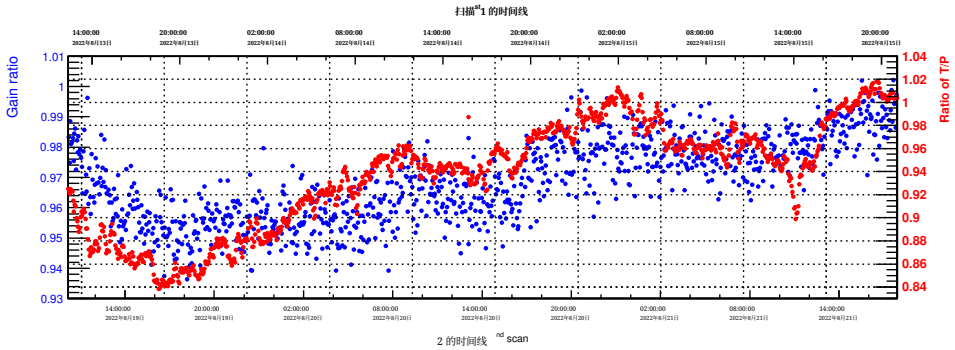


图35： T/P 对ERAM增益的影响。顶部和底部的 x轴分别表示两次完整探测器扫描的时间线。

，而右侧 y- 轴及红色数据点表示每个焊盘在两次不同扫描中记录的 T/P 比值。上方和下方的 x-轴

表示两次完整探测器扫描的时间线。增益与 T/P 之间存在明显的直接相关性，如图35所示。

为避免出现重大波动，X射线测试台的气体条件受到严格控制。相对湿度是受到密切监测的其中一项条件，并设有上限，超过该上限便不会进行X射线扫描。尽管采取了这些措施，在一次罕见情况下，完整探测器扫描接近结束时，湿度开始迅速上升，这为观察其对增益的影响提供了一个很好的案例研究。图36 展示了上述事件与一次正常的重复扫描的对比，以及由此对增益造成的影响。该图遵循上一段所述的相同惯例，但右侧 y坐标轴和红点表示异常完整扫描与典型扫描之间相对湿度的差值。如图所示

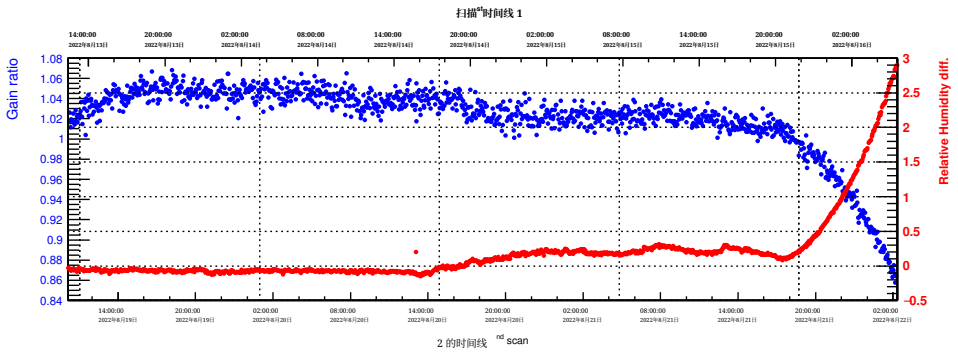


图36：相对湿度对 ERAM 增益的影响。顶部和底部的 x 轴分别表示两次完整探测器扫描的时间线。

在图 36中，完整扫描接近结束时，湿度开始上升，增益随即大幅下降。完整扫描结束时，相对湿度已达到 3%，导致增益下降约 14%。

为了量化温度和压力变化引起的增益变化，应对同一个焊盘进行长时间扫描。本研究对一个焊盘进行了24小时扫描，并将其数据划分为48个数据集，每个数据集包含采集时长为30分钟的事件。我们从每个数据集中提取增益，并将其与相应时间段内记录的温度和压力平均值进行比较。图37显示，增益与温度和压力之比之间存在直接的线性关系。

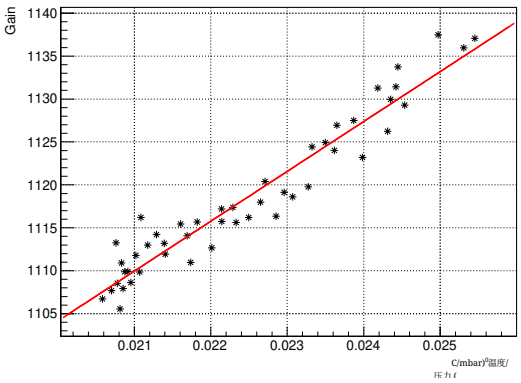


图37：温度/压力对单个焊盘增益的影响。扫描期间记录到的(T,P)最低值为(19.8 °C, 959.5 mbar)，最高值为(24.5 °C, 963.7 mbar)。

11. 结论

封装式电阻阳极体积型Micromegas模块的生产正在顺利进行。生产出的模块在安装到T2K实验的HA-TPC探测室之前，会在欧洲核子研究中心使用X射线测试台进行测试和验证。X射线测试台通过逐个扫描焊盘，对探测器进行表征，从而精确测量焊盘平面上增益和能量分辨率的均匀性。测得的能量分辨率约为10%。

我们开发了一个详细的物理模型，用于描述电阻式Micromegas阳极上的电荷扩散现象。该模型可以利用X射线数据同时提取模块的二维增益图和 RC 图。数据与模型之间吻合极佳。我们详细研究了 RC图和增益图的均匀性。测得的 RC 和增益信息将用于HA-TPC模拟和重建。

致谢

我们感谢 CEA 和法国国家科学研究中心/核与粒子物理研究所（法国）、德国研究联合会（德国）、意大利国家核物理研究院（意大利）、波兰国家科学中心（NCN）和科学与高等教育部（资助编号：DIR/WK/2017/05）（波兰），以及西班牙经济与竞争力部（SEIDI - MINECO）通过资助编号 PID2019-107564GB-I00 提供的支持（高能物理研究所，西班牙）。高能物理研究所还获得了加泰罗尼亚政府 CERCA计划的部分资助。

本研究由 P2IO 实验室卓越计划（ANR-10-LABX-0038 – 项目“BSMNu”）在“未来投资计划”（ANR-11-IDEX-0003- 01）框架下提供支持，该计划由法国国家研究署（ANR）管理。此外，H2020 资助项目 RISE-GA822070-JENNIFER2 2020、玛丽·居里行动联合资助计划（2016）编号 754496、ANR-19-CE31-0001、俄罗斯基础研究基金会资助项目 # 19- 32-90100、加泰罗尼亚政府商业与知识部大学与研究秘书处和欧洲社会基金（2022FI_B 00336），以及加泰罗尼亚政府研究与大学部的工业博士计划（2022 DI 011），进一步支持了个别研究人员和机构的参与。

参考文献

[1] K. Abe 等，《中微子振荡中物质–反物质对称性破坏相位的约束》，《自然》580 (7803) (2020) 339–344, [勘误：《自然》583, E16 (2020)]。arXiv:1910.03887，doi:10.1038/s41586-020-2177-0。[2] K. Abe 等，《T2K ND280 升级——技术设计报告》（2019年1月）。arXiv:1901.03750。[3]S. Dolan 等，《利用核子-轻子关联，提升后的 T2K 近探测器对末态中无介子的中微子和反中微子相互作用的约束灵敏度》，Phys. Rev. D 105 (3) (2022) 032010。arXiv:2108.11779，doi:10.1103/PhysRevD.105.032010。[4] A. Blondel 等，《S uperFGD 原型带电粒子束测试》，《仪器学报》15 (12) (2020) P12003。arXiv:2008.08861，doi:10.1088/1748-0221/15/12/P12003。[5] A. Korzenev 等，一种 4π 用于 ND280/T2K 升级的飞行时间探测器，《仪器学报》17 (01) (2022) P01016。arXiv:2109.03078，doi:10.1088/1748-0221/17/01/P01016。[6] D. Attié 等，《用于升级 T2K近探测器时间投影室的电阻式 Micromegas 探测器表征》，核仪器与方法 A 1025 (2022) 166109。arXiv:2106.12634，doi:10.1016/j.nima.2021.166109。

[7]D. Attié 等，《用于 T2K近探测器升级版时间投影室的电阻式 Micromegas 模块性能》，核仪器与方法 A 957 (2020) 163286。arXiv:1907.07060，doi:10.1016/j.nima.2019.163286。[8] D. Attié 等，《采用电阻式 Micromegas 原型时间投影室获取的测试束流数据分析：用于 T2K近探测器升级》（2022年12月）。arXiv:2212.06541。[9] P. Baron、E. Delagnes、D. Calvet、X. de la Broise、A. Delbart、F. Druillole、J.-L. Fallou、E. Mazzucato、E. Monmarthe、F. Pierre、A. Sarrat、E. Zonca、M. Zito，《After：用于大型 T2K 时间投影室读出的 ASIC》，载于：2007 年 IEEE 核科学研讨会会议记录，第 3 卷，2007 年，第 1865–1872 页。doi:10.1109/NSSMIC.2007.4436521。[10] D. Calvet，《面向低本底和中型物理实验的基于非对称网络的后端电子学》，IEEE核科学汇刊 66 (7) (2018) 998–1006。arXiv:1806.07618，doi:10.1109/TNS.2018.2884617。[11] L. Scomparin，载于：《T2K升级实验新型时间投影室中的信号形成》，2021年。doi:http://hdl.handle.net/20.500.12608/21505。[12] N. Abgrall 等，《T2K近探测器的时间投影室》，核仪器与方法 A 637 (2011) 25–46。arXiv:1012.0865，doi:10.1016/j.nima.2011.02.036。[13] M. S. Dixit、J. Dubeau、J. P. Martin、K. Sachs，《利用电阻阳极的微结构气体探测器中电荷弥散进行位置测量》，核仪器与方法 A518 (2004) 721–727。arXiv:physics/0307152，doi:10.1016/j.nima.2003.09.051。