

Q/NSSC

中国科学院国家空间科学中心标准

Q/NSSC 011—2025

空间环境 中高能电子探测载荷

实验室定标方法

Space environment—Laboratory calibration method for medium- & high-energy electron exploration payloads

2025-05-15 发布

2025-05-15 实施

中国科学院国家空间科学中心

批 准

目 次

| | |
|------------------------------|----|
| 前言..... | II |
| 1 范围..... | 1 |
| 2 规范性引用文件..... | 1 |
| 3 术语和定义..... | 1 |
| 4 一般要求..... | 2 |
| 4.1 定标人员要求..... | 2 |
| 4.2 定标环境要求..... | 2 |
| 4.3 定标设备要求..... | 2 |
| 4.3.1 通则..... | 2 |
| 4.3.2 中能电子加速器..... | 2 |
| 4.3.3 高能电子加速器..... | 2 |
| 4.3.4 地面检测设备..... | 3 |
| 4.3.5 真空靶室和转台..... | 3 |
| 5 定标方法..... | 3 |
| 5.1 定标流程要求..... | 3 |
| 5.2 定标流程..... | 3 |
| 5.2.1 定标准备..... | 3 |
| 5.2.2 定标步骤..... | 4 |
| 5.3 数据处理方法..... | 4 |
| 5.3.1 能量线性度定标..... | 4 |
| 5.3.2 能量分辨率定标..... | 5 |
| 5.3.3 能档定标..... | 5 |
| 5.3.4 通量量程范围定标..... | 5 |
| 附录 A（资料性） 能量线性度定标..... | 7 |
| 附录 B（资料性） 能量分辨率定标..... | 8 |
| 附录 C（资料性） 能档定标..... | 10 |
| 附录 D（资料性） 通量量程范围定标..... | 12 |
| 附录 E（规范性） 角度定标..... | 17 |
| 附录 F（资料性） 抗污染能力定标..... | 18 |
| 附录 G（资料性） 中高能电子探测载荷定标报告..... | 19 |
| 参考文献..... | 25 |

前 言

本文件按照《空间中心标准管理办法》和GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定给出的规则起草。

本文件由中国科学院国家空间科学中心空间环境探测室提出。

本文件由中国科学院国家空间科学中心质量管理处归口。

本文件起草单位和部门：中国科学院国家空间科学中心空间环境探测室，中国计量科学研究院电离辐射研究所，中国科学院高能物理研究所。

本文件主要起草人：周平，荆涛，张坤毅，沈国红，王志鹏，龚晓明，安正华，侯东辉，冀文涛，张焕新，袁斌，权子达，脱长生，苏波。

空间环境 中高能电子探测载荷实验室定标方法

1 范围

本标准规定了空间环境 中高能电子探测载荷实验室定标的环境、设备、方法以及数据处理方法。

本标准适用于空间环境 中高能电子探测载荷的实验室定标，其它能量段的空间环境电子探测载荷实验室定标可参照执行，医用电子加速器电子束流检测探测器实验室定标亦可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 30114.1 空间科学及其应用术语 第1部分：基础通用

GB/T 5201-2012 带电粒子半导体探测器测量方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

定标 calibration

在规定条件下，建立测量装置与可追溯且已知参考值不确定度的标准之间关系的一整套操作活动。

注：航天载荷出厂前一般均需要对其性能做出定标，为后续在轨探测数据分析处理提供依据。

3.2

空间环境 中高能电子 space environment medium- & high-energy electron

空间环境中能量范围为 30keV 至 2MeV 的电子。

3.3

载荷实验室定标 payload laboratory calibration

在实验室装置上对载荷性能进行测试以给出其特定参数的响应系数的试验。

3.4

中高能电子探测载荷 space environment exploration payloads of medium- & high-energy electron

用于测量在宇宙空间中广泛分布的中高能电子的能谱、通量以及方向分布和相互关系的仪器。

4 一般要求

4.1 定标人员要求

定标试验操作人员应满足以下要求：

- a) 操作人员应经过培训和考核，并持证上岗；
- b) 操作人员须熟练掌握定标设备的规范操作方法与操作步骤；
- c) 试验人员在试验操作过程中要严格遵守防静电操作规范。

4.2 定标环境要求

定标试验室环境应满足待定标载荷以及其他参试设备对使用环境的要求。具体要求如下：

- a) 温度： $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 相对湿度：35%~60%；
- c) 真空环境：定标装置的真空度优于 $5 \times 10^{-4}\text{Pa}$ ；
- d) 电磁环境：试验区域的电磁场对用于定标试验的电子束的偏转不大于 1° 。

4.3 定标设备要求

4.3.1 通则

用于中高能电子探测载荷定标的装置，包括中能电子加速器、高能电子加速器、真空转台、真空靶室、地面检测设备等部门，为中高能电子探测载荷定标试验提供必要的电子束辐射环境和真空试验环境。

4.3.2 中能电子加速器

中能电子加速器指标如下：

- a) 可产生定标试验需要的能量范围为(30~200)keV的中能电子束流；
- b) 束流在束斑垂直截面内均匀度 $\geq 90\%$ ；
- c) 在定标试验期间束流的稳定度优于5%/h。

4.3.3 高能电子加速器

高能电子加速器指标如下：

- a) 可产生定标试验需要的能量范围为(0.1~2)MeV的高能电子束流；
- b) 束流在垂直截面内均匀度 $\geq 90\%$ ；
- c) 在定标试验期间束流的稳定度优于5%/h。

4.3.4 地面检测设备

地面检测设备要求如下：

- 地面束流检测设备满足加速器束流通量范围和均匀度检测要求；
- 地面载荷检测设备应满足载荷专用地面检测设备的技术要求；
- 地面束流和载荷检测设备应每年送检一次，确保符合定标试验的检测要求。

4.3.5 真空靶室和转台

真空靶室和转台要求如下：

- 真空靶室真空度需优于 5×10^{-4} Pa；
- 转台行程及精度应符合载荷定标要求。

5 定标方法

5.1 定标流程要求

中高能电子探测载荷实验室定标试验需要在真空靶室内进行，定标试验核心区域的磁场和电场要进行控制，避免低能量电子束流被外界电磁场影响。中高能电子探测载荷实验室定标流程框图见图1。

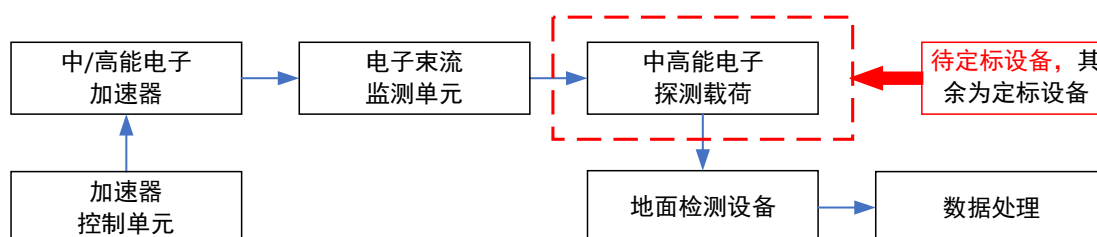


图 1 中高能电子探测载荷实验室定标原理图

由中能电子加速器和高能电子加速器产生空间环境中高能电子探测载荷实验室定标所要求的中高能电子束流，控制待定标载荷的位置和朝向使其探测窗口对准束流方向，使用地面检测设备采集不同束流参数下的定标数据，确认数据有效后，进行定标数据分析处理，给出载荷定标结果。

5.2 定标流程

5.2.1 定标准备

空间环境中高能电子探测载荷实验室定标准备工作如下：

- 完成定标试验大纲和定标试验细则的编写；
- 完成辅助设备（支架、夹具等）的加工；
- 完成待定标载荷在真空靶室内的位置安装和位置定位；
- 连接待定标载荷与地面检测设备，并通电检测，确保工作正常；
- 按试验流程对真空靶室抽真空至定标试验所要求的真空度；

- f) 使用地面检测设备将待定标载荷调整至定标试验状态;
- g) 先将束流检测设备移动至束流截面处进行束流检测, 并记录此时束流参数;
- h) 再将待定标载荷测量窗口移动到束流截面内, 使待定标载荷测量窗口对准束流, 准备进行定标试验并记录存储定标试验数据。

5.2.2 定标步骤

空间环境中高能电子探测载荷定标步骤如下:

- a) 检查载荷定标位置正确后, 关闭真空舱门, 按操作规范抽真空直至达到要求 ($<5 \times 10^{-4} \text{Pa}$);
- b) 用中能电子加速器或高能电子加速器产生被定标载荷需要的束流;
- c) 使用定标系统束流测量仪器测量并存储束流参数数据;
- d) 控制转台方位, 使待定标载荷以要求方向对准束流;
- e) 使用待定标载荷地面检测设备采集数据, 并记录此时的束流参数, 详见附录A~附件附录F;
- f) 根据定标测试细则调整中/高能电子加速器输出束流参数, 重复步骤 b)~ e);
- g) 定标试验数据采集后, 确认采集数据的有效性;
- h) 开展载荷定标数据分析工作, 编写中高能电子探测载荷检测报告, 具体格式详见附录G。

5.3 数据处理方法

在中高能电子探测载荷定标试验过程中, 一般会对载荷的能量线性度、能量分辨率、能档、通量量程范围、通量精度、探测角度和抗污染能力等重要指标参数进行中高能电子加速器提供中高能电子辐射环境和真空试验终端提供真空环境等条件下的定标试验。各项指标的具体定标原理和定标试验数据处理方法详见附录 A~附录 F, 最终形成中高能电子探测载荷检测报告。

5.3.1 能量线性度定标

能量线性度定标的基本原理是粒子在硅探测器中的能量损失与输出的脉冲信号幅度之间在理论上为严格的正比关系, 通过对能量线性度的定标可以得到仪器的基本研制水平。

在载荷定标试验过程中, 以待探测电子能量密度分布高低为原则确定测试能量点, 根据设计的载荷能量测量范围选择待定标载荷测量范围内的不同能量点, 在选定能量点用定标载荷进行多次测量。利用电子在探头中的能量损失特性, 即待定标载荷对选定能量粒子束流的响应, 根据测量数据拟合可以得到定标载荷的能量线性度响应曲线, 能量线性度定标示例如下图所示。

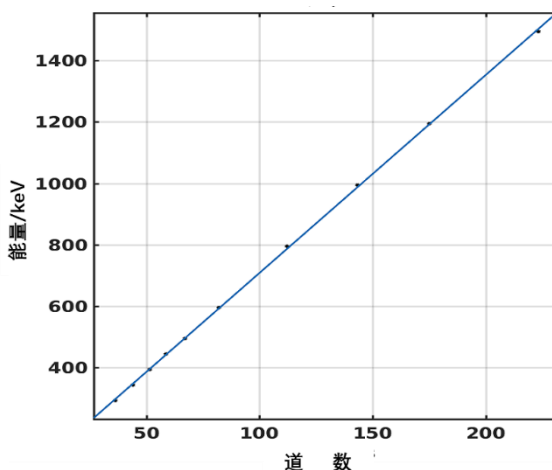


图2 中高能电子探测载荷能量线性度定标结果示例

5.3.2 能量分辨率定标

仪器的能量分辨率是考察仪器对单一能量的粒子的测量重复性的好坏评价，仪器的能量分辨率越高，仪器的测量精度也就越高。一般可认为粒子在传感器中的能量沉积谱近似为高斯分布，详见附录 B。

5.3.3 能档定标

能档定标的目的是为了通过定标确认仪器的每个能档的实际测量范围。仪器的设计和调试是按照用户指标要求进行，但仪器实际研制出来后需要对其指标进行确认，得到仪器真实的能量测量范围。主要目的有：

- a) 通过定标获得仪器的实际能量测量范围；
- b) 通过定标得到实际能量测量范围与设计指标的偏差。

对能档范围定标实际上就是确定探测器能档的实际分界点。定标的基本原理是普遍的物理常识，即当一个以仪器能档实际分界点能量入射的粒子，其落入在上下两个能档的概率相等。

5.3.4 通量量程范围定标

通量量程范围定标原理是在进行测量时，假设粒子通量为各项同性，则仪器的计数率与环境中的粒子通量的关系见式（1）。

$$s = \frac{N}{G} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

s ——仪器的通量测量值（单位： $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ ）；

N ——仪器的计数率（counts/s）；

G ——仪器的几何因子（ cm^2sr ）。

通过上式可以看出，通量的测量范围和仪器单位时间内的计数能力和几何因子有关。由于几何因子 G 是固定的，因此通量测量范围主要与计数能力关联。通过确定仪器最小和最大的计数范围即可确定仪器的通量测量范围。

附录 A
(资料性)
能量线性度定标

能量线性度定标的基本原理是粒子在硅探测器中的能量损失与输出的脉冲信号幅度之间在理论上为严格的正比关系。假设粒子在传感器中的能量沉积为 ΔE (MeV)，则 ΔE 的能损在硅探测器中产生的电子空穴对数量 $N=\Delta E/3.62$ ，产生的电荷量 $Q=N\times 1.602\times 10^{-19}$ (C)，则能损与脉冲信号关系为

$$U = \frac{\Delta E/3.62 \times 1.602 \times 10^{-19}}{C} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

U ——仪器输出的电压值（单位为伏特，V）；

C ——仪器的反馈电容（单位为法，F）；

ΔE ——能量沉积（单位：兆电子伏特，MeV）；

N ——电子空穴对数量（无量纲）；

Q ——电荷量（单位：库伦，C）

或者

$$U = \frac{\Delta E}{C} \times 44.2 \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

U ——仪器输出的电压值（单位为毫伏，mV）；

C ——仪器的反馈电容（单位为微法， μF ）；

ΔE ——能量沉积（单位：兆电子伏特，MeV）；

N ——电子空穴对数量（无量纲）；

U 与 ΔE 为成正比关系，通过对能量线性度的定标可以得到仪器的基本研制水平。

附录 B
(资料性)
能量分辨率定标

仪器的能量分辨率是考察仪器对单一能量的粒子的测量重复性的好坏评价，仪器的能量分辨率越高，仪器的测量精度也就越高。一般可认为粒子在传感器中的能量沉积谱近似为高斯分布，则在粒子物理中能量分辨率的定义见式 B.1。

$$\eta = \frac{\lambda}{FWHM} \times 100\% \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

η ——能量分辨率（无量纲）；

λ ——高斯拟合的中心值；

$FWHM$ ——半高宽。

能量分辨率的定义图解见图 B.1。

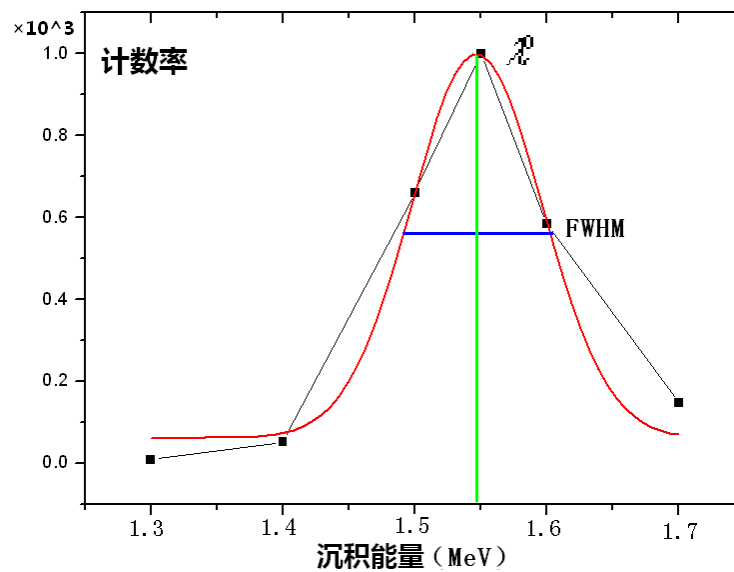


图 B.1 能量分辨率定义

电子在空间环境中高能电子探测载荷中的能量分辨率定标结果示例见图 B.2。

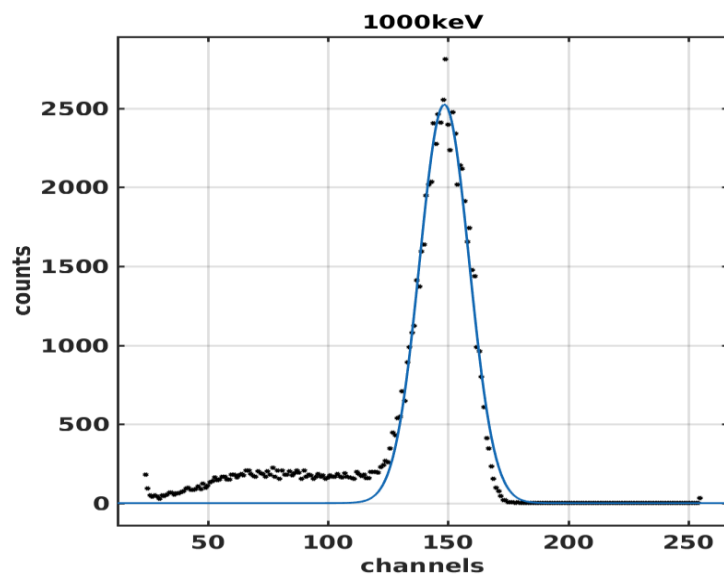


图 B.2 电子在空间环境中高能电子探测载荷中的能量分辨率定标结果示例

附录 C
(资料性)
能档定标

能档定标的目的是为了通过定标确认仪器的每个能档的实际测量范围。仪器的设计和调试是按照用户指标要求进行，但仪器实际研制出来后需要对其指标进行确认，得到仪器真实的能量测量范围。主要目的有：

- c) 通过定标获得仪器的实际能量测量范围；
- d) 通过定标得到实际能量测量范围与设计指标的偏差。

对能档范围定标实际上就是确定探测器能档的实际分界点。定标的基本原理是普遍的物理常识，即当一个以仪器能档实际分界点能量入射的粒子，其落入在上下两个能档的概率相等。其原理用公式表示见式 C.1。

$$P(i, E_i) = P(i + 1, E_i) \dots \dots \dots (C.1)$$

式中：

i ——仪器的某个能档；

E_i ——仪器的实际能量分界点；

P ——落入该能档的概率。

用探测器整机对单能电子进行测量，可以获得探测器的传感器和电子学部分整体对不同能量粒子的响应情况。通过相邻能档间计数的变化我们可以确定实际的能档分界值。具体方法为将两个能档计数归一化，得到每个能档中计数所占的比例并将其显示在图像中，根据两个能档计数比例的变化趋势寻找中心交点根据实际响应情况，可获得探测器每个能档实际上能记录到的电子能量范围，通过调节电子束流能量配合数据拟合找到相邻两个通道计数相等时的束流能量，即能档的实际测量边界。

示例：

在寻找 E6 和 E7 两个能档的实际分界点时，束流能量选择了 6 个能量点，两条线分别代表不同能量的电子分别落在 E6 和 E7 两个能档的概率，两条线相交时意味着粒子落入两道的概率相等，两条线的交点对应的入射能量即为 E6 和 E7 的实际能档分界点。图解形式见图 C.1。

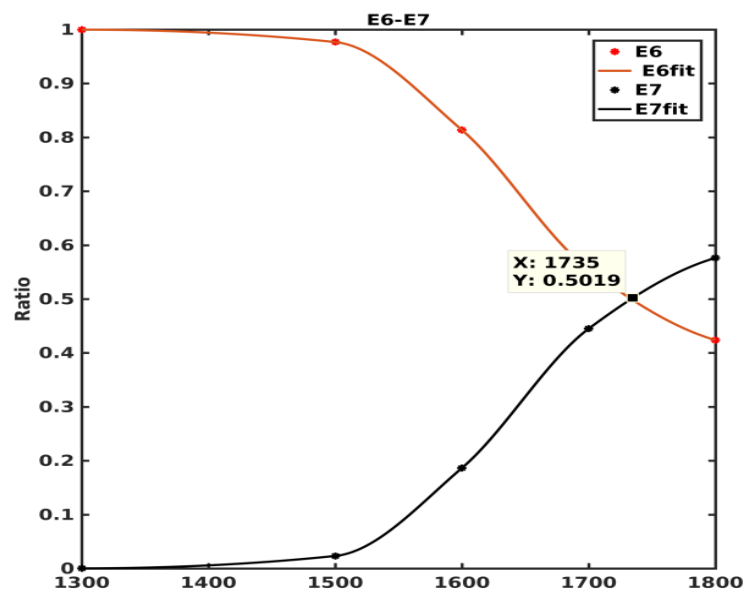


图 C.1 能档定标的原理

对于加速器能量不能覆盖的高能范围，则使用可覆盖范围的测试结果进行线性外推进行推算。

能档精度的定标是指通过定标得到的能档边界的实际值与设计值的偏差，当实际能档范围定标完成后,利用能档边界的实测值和设计值计算出能档划分精度。

附录 D
(资料性)
通量量程范围定标

D.1 通量量程范围定标原理

通量量程范围定标原理是在进行测量时，假设粒子通量为各项同性，则仪器的计数率与环境中的粒子通量的关系见式 D.1。

$$s = \frac{N}{G} \cdots \cdots \cdots \text{(D.1)}$$

式中：

s ——仪器的通量测量值（单位： $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ ）；

N ——仪器的计数率（个/s）；

G ——仪器的几何因子（ cm^2sr ）。

通过上式可以看出，通量的测量范围和仪器单位时间内的计数能力和几何因子有关。由于几何因子 G 是固定的，因此通量测量范围主要与计数能力关联。通过确定仪器最小和最大的计数范围即可确定仪器的通量测量范围。

D.1.1 最小通量测量范围

仪器计数率下限理论上为 0。噪声会在最低的能道记录到计数，可通过设置阈值卡掉。对于较高能道不会有影响。因此理论上探测器可测量的最低通量是 0。

D.1.2 最大通量测量范围

在未加仪器内部偏转磁铁的情况下，利用电子加速器对中能质子探测器直接照射。改变电子加速器的通量 N ，得到不同入射粒子通量下传感器探测到的计数率 N_1 。通过单位时间入射粒子数和探测到粒子数变化趋势得到最大计数，根据通量计算公式即可得到最大通量测量值。

D.2 通量精度定标

通量精度定标的目的主要有三个：

- (1) 仪器的通量测量的准确程度；
- (2) 地面通量定标结果可作为在轨计数率修正的依据；

(3) 验证仪器在极限大通量情况下的响应。

D.3 计数误差定标

D.3.1 计数误差定标原理

理论上通量误差可以通过已知通量的粒子源对探测器进行直接定标。但实际上无论加速器还是放射源，粒子通量都并不稳定，因此对通量进行直接定标并没有准确可靠的方法。所以对粒子通量误差进行定标，通常采用将通量误差分解为各种对其有贡献的误差，将其分别测出然后叠加成总通量误差的间接方法。

探测器通量的计算公式见式 D.1。

$$M = \frac{N}{G} \dots \dots \dots (D.1)$$

式中：

M ——探测器的通量（单位为： $\text{cm}^2\text{S}^{-1}\text{sr}^{-1}$ ）

N ——探测器的直接探测计数（个/s）；

G ——仪器的几何因子（ cm^2sr ）。

通过上面的公式可以看出影响通量定标精度的因素有两个：仪器测量计数的误差 σ_M 和几何因子的误差 σ_G 。误差传递公式见 D.2。

$$\sigma_y^2 = \sum_i \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 \sigma_{xi}^2 \dots \dots \dots (D.2)$$

通过这两个误差可以计算出总的通量误差，具体公式见 D.3。

$$\sigma_M^2 = \sigma_N^2 + \sigma_G^2 \dots \dots \dots (D.3)$$

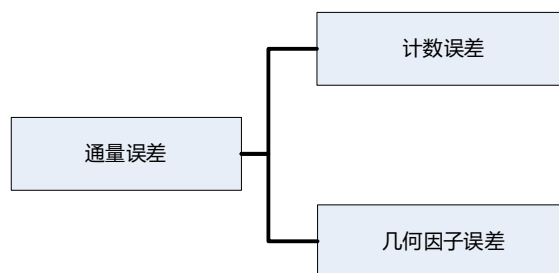


图 D.1 通量精度定标总体原理

D. 3. 2 计数误差定标方法

计数误差包括了传感器的计数误差和电子学计数误差，下面分别针对这两个测量要素进行了描述。

首先可以分别对传感器和电子学的计数误差分别进行定标，之后通过加速器的束流可以对整机进行联合定标，但由于加速器的绝对通量不易获得，因此整机的计数定标只能是相对定标。

D. 3. 2. 1 传感器计数误差定标方法

- a) 将探头所使用的同一批次的硅半导体探测器分别进行测试；
- b) 将一片传感器放置在测试盒内，使用 Bi207 放射源对传感器进行照射，现场布置见图 D.2。



图 D. 2 传感器计数误差定标

- c) 通过传感器测量专用多道系统统计单位时间内传感器记录到的总计数；
- d) 重复步骤 2 和步骤 3 分别得到一系列的计数率 n_i ；
- e) 通过求标准差的方法 $\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (n_i - \bar{n})^2}$ ，得到该批次传感器的计数响应误差。

D. 3. 2. 2 电子学计数误差定标方法

电子学计数误差定标的办法：由于目前没有随机信号发生器，因此我们使用了编写软件模拟的方法。通过编写软件利用程序中的随机函数发生器模拟空间粒子入射传感器的时间分布，假设仪器的信号收集时间为 $2\mu\text{s}$ ，因此当两个粒子入射的时间差小于 $2\mu\text{s}$ 时，只记录其中一个大信号。记录下由于信号叠加原因而被“吃掉”的计数和探测器的实际计数，从而得到探测器的电子学计数误差。定标中使用不同通量的粒子入射可得出入射粒子数与探测器输出计数之间的对应关系，如图 D.3 所示。

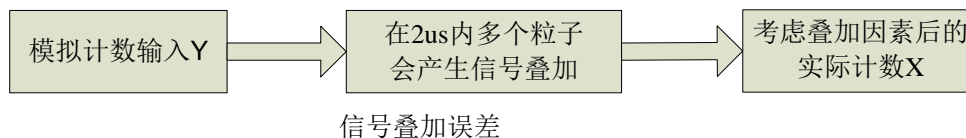


图 D.3 电子学计数误差的产生原理

求电子学计数误差的具体方法为：

(1) 首先假设模拟计数输入为 y_i ，考虑叠加因素后的实际计数为 x_i ，每个通量点 y_i 进行 10 次模拟，得到 10 个输出值 $x_i(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{i10})$ ，平均值为 \bar{x}_i ，针对该点的通量测量精度 $\sigma_x^2 = S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n$ ，其中 $n=10$ ；

(2) 然后使用 10 个数据点分别进行输入 $y_n(y_1, y_2, y_3, \dots, y_{10})$ ，分别得到 10 个输出平均值 $x_n(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_{10})$ 和 10 个通量精度 $\sigma_x(\sigma_{x1}, \sigma_{x2}, \sigma_{x3}, \dots, \sigma_{x10})$ 。通过数据拟合得到实测值和输入值的应验公式 $y = f(\bar{x})$ ；

(3) 电子学信号叠加的随机误差公式为 $\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2$ 。分别求出 10 个数据点对应的精度 $\sigma_y(\sigma_{y1}, \sigma_{y2}, \sigma_{y3}, \dots, \sigma_{y10})$ ，取其中的最大测量误差作为仪器的精度 $\sigma_{\text{电路计数随机误差}} = \text{MAX}(\sigma_{y1}, \sigma_{y2}, \sigma_{y3}, \dots, \sigma_{y10})$ ；

(4) 电子学信号叠加的系统误差可通过经验公式 $y = f(x)$ 得出。假设模拟总数为 y_i ，通过仿真得到经过信号叠加后的计数为 x_i ，利用 10 个点的 $y_i(y_1, y_2, y_3, \dots, y_{10})$ 与 $x_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{10})$ 关系，通过模拟的输入计数 y 与叠加后的实际计数 x 得到函数关系 $y = f(x)$ ，则电子学的计数系统误差可表示为

$$\sigma_{\text{电路计数系统误差}} = \text{MAX}_{i=1}^{10} \left(\frac{f(x_i) - y_i}{y_i} \right);$$

(5) 考虑极限误差情况，电路计数误差可以用如下公式表示：

$$\sigma_{\text{电路计数误差}} = \sigma_{\text{电路计数随机误差}} + \sigma_{\text{电路计数系统误差}}$$

D.3.2.3 加速器计数误差相对定标

最理想的是对整机的计数响应进行定标，但由于目前加速器入射的粒子通量的绝对值获取具有一定困难。一是电子的绝对通量探测器还没有标准；二是仪器的几何结构对通量的影响。因此使用了相对定标的方法，即研究加速器通量与探测器计数之间的相对关系，理论上应当保持一致。

(1) 将探测器放在靶室载物台的中心位置连接好；

(2) 现则加速器电性能量点中能 100keV，高能 400keV 入射；

- (3) 加速器通量 N 通过加速器系统自带的通量测量仪器得到，记录仪器的计数率 n ；
- (4) 逐步提高加速器通量，得到一系列的 N_i 和 n_i ；
- (5) 判断二者的线性关系。

D.3.2.4 几何因子误差定标

D.3.2.4.1 几何因子误差定标原理

仪器的几何因子是通过仿真探测器对各能档粒子的实际接收能力，同时考虑不同能量、不同种类的粒子对该能档粒子的干扰而最终得出的统一几何因子。几何因子是通过仿真计算得出，实际上是一个抽样统计，会存在一定误差 σ_G 。通过仿真的结果误差传递函数可得到仿真的误差。

D.3.2.4.2 几何因子误差定标方法

几何因子是探测器的重要特性参数，它是对数据进行归一化处理和数据比对时必须的参数。几何因子与探测器的几何结构，以及不同能量、不同种类的粒子对每个能档计数的干扰相关。几何因子需要结合探测器的几何结构和不同种类、能量的粒子在探测器中的物理过程进行仿真计算得到。几何因子误差的获得方法是，用同样的输入参数仿真得到各个能道的几何因子值 G_i ，根据误差传递函数求出几何因子误差 σ_G 。

具体方法为：

- (1) 在 GEANT4 程序中建立待测仪器的实际结构模型；
- (2) 在 GEANT4 中粒子的鉴别的能档划分按照仪器的实际设计进行设定；
- (3) 使用某个能道内均匀分布的电子束流 E_k 入射到仪器中，并记录该能档的响应情况；
- (4) 假设入射的粒子总数量为 X ，对应能档记录到的计数为 Y ，则仪器的几何因子 $G = \frac{Y}{X} \times \Omega \times S$ ；
- (5) 几何因子的误差 $G_\sigma = \sqrt{\frac{1}{X} + \frac{1}{Y} \times \frac{X}{Y}} \times \Omega \times S$ 。

D.3.2.4.3 几何因子误差分析

在通过仿真计算得到几何因子的过程中，实际上是利用计算机进行的一种随机抽样过程，并对抽样过程进行统计，得到仪器最后的几何因子。具体方法可参考相关文献（张坤毅等，中国科学 2015）。正因为该过程是一个基于随机数的计算方法，因此必然存在计算上的误差，具体计算方法为通过多次同样的计算，得到一系列的几何因子值 G_i ，求平均得到最后的几何因子，该几何因子样本的方差就是几何因子的精度，由于采用的是大样本抽样仿真，通过仿真表明几何因子的计算精度均优于 3%。

附录 E
(规范性)
角度定标

E.1 角度定标的目的主要有三个：

- a) 通过定标确定每个测量方向的实际张角；
- b) 通过定标确定探头的总张角覆盖情况；
- c) 评估探头的通量测量一致性。

E.2 角度定标原理

通过将加速器产生的粒子产生的信号为依据，围绕张角进行旋转，从探测器刚开始响应为张角的起始值，探测器的响应消失为结束值，起始和结束之间走过的视场范围即可视为仪器的张角。

E.3 角度定标的方法：

- a) 将探测器放在靶室载物台的中心位置；
- b) 加速器束流方向及能量大小不变，均匀旋转靶室载物台，使束流从左到右缓慢扫过三个方向的探测器；
- c) 统计旋转不同角度时，探头的触发计数响应情况；
- d) 选择最大通量的一半为开始和结束视场范围，它们之间的角度为探头的视场；
- e) 三个探头总的起始和终止角度为总的探测视场；
- f) 比较相同能量时三个探头的三个方向的响应效率。

附录 F

(资料性)

抗污染能力定标

抗污染能力定标原理是偏转磁铁的作用是排除中能电子对质子探头测量的干扰。当电子与质子在硅半导体传感器中的能量损失相同，在电路上无法对其进行鉴别，因此在仪器内部使用了偏转磁铁对中能电子进行偏转，使其无法入射到硅传感器中，从而达到排除干扰的目的。

定标方法

抗污染能力定标方法是在做磁偏转试验时，电子加速器对特定能量点入射。由于磁偏转作用，大部分中能电子无法进入中能质子探测器。改变中能电子束的能量，偏转磁铁对电子的偏转能力发生变化。通过统计不同能量电子入射时电子被中能质子探头探测到的概率可以得到中能质子探测器中磁铁的偏转能力，如公式 D.4 所示：

$$\text{磁偏转能力} = \frac{\text{入射总电子数} - D1D2D3}{\text{入射总电子数}} \dots\dots\dots (D.4)$$

通过统计 (D1D2D3D4) 中的计数与总入射电子数的比值可以得到总的抗污染能力。如公式 D.5 所示：

$$\text{抗污染能力} = \frac{\text{入射总电子数} - D1D2D3\overline{D4}}{\text{入射总电子数}} \dots\dots\dots (D.5)$$

附录 G

(资料性)

中高能电子探测载荷定标报告

定标试验完成后，应根据试验结果形成《中高能电子测试与定标检测报告》，报告内容包括：

- a) 报告封面；
- b) 报告声明；
- c) 受试试件情况；
- d) 参试设备情况；
- e) 试验状态与结果；

试验报告的具体样式见下页。

Report No.

中高能电子测试与定标检测报告

MEDIUM & HIGH ENERGY ELECTRON TEST and CALIBRATION REPORT

委托单位: 中国科学院国家空间科学中心

Customer

试件名称: 空间站辐射生物学暴露装置

Sample Name

型号任务: 空间站

Type of Project

试验项目: 能量分辨率

Experiment Item

编写: _____

Submitted By

审核: _____

Reviewed By

批准: _____

Approved By

实验室试验专用章:

Laboratory Seal

中国科学院国家空间科学中心可靠性与环境试验中心

RELIABILITY AND ENVIRONMENT TEST CENTER

NATIONAL SPACE SCIENCE CENTER,CAS.

报 告 声 明

1. 报告一式两份，一份由本实验室留档，一份交予委托方。
2. 报告及复印件未加盖本实验室试验专用印章无效。
3. 报告附页未加盖骑缝章无效。
4. 报告无编写、审核、批准签名无效。
5. 报告不得自行涂改、增删，未经本实验室书面同意不准部分复制报告。
6. 报告仅对委托试件的试验结果负责，不对委托试件品质负责。
7. 若对报告有异议，应于收到报告之日起一个月内向本实验室提出申诉，逾期不予受理。
8. 本报告未加盖资质认定标志时仅用于科研、教学或内部质量控制等活动，不具有对社会证明作用。

中国科学院国家空间科学中心可靠性与环境试验中心

地 址：北京市海淀区中关村南二条一号

联 系 人：周平

电 话：(010) —62582600

传 真：(010) —62610172

邮政编码：101400

试验报告

| | |
|------------------------------|---------------------------------|
| 委托单位 | 中国科学院国家空间科学中心 |
| 委托单位地址 | 北京市海淀区中关村南二条 1 号 |
| 委托人 | |
| 联系方式 | |
| 试件名称 | |
| 试件编号 | |
| 试件数量 | |
| 任务阶段 | |
| 试验项目 | 能量线性度、能量分辨率、能档、通量测量范围、角度等载荷参数定标 |
| 试验依据标准、规范及客户相关要求 | |
| GB/T5201-2012 带电粒子半导体探测器测量方法 | |
| 试验接收日期 | |
| 试验单位 | 中国科学院国家空间科学中心可靠性与环境试验中心 |

试验报告

| | | | | | |
|----------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------|----|
| 试件名称 | | | | | |
| 试件编号 | | | | | |
| 试件数量 | | | | | |
| 试验环境 | 22℃, 50%RH | | | | |
| 试验地点 | 北京市怀柔区京密北二街 1 号中高能电子测试与定标实验室 | | | | |
| 试验设备 | 中高能电子辐射测试与定标装置一套 | | | | |
| 设备制造商 | 上海三競加速器有限公司、荷兰高压工程公司、上海三井真空设备有限公司 | | | | |
| 设备出厂编号 | No.25161 | | | | |
| 设备校准有效期 | 20240523-20250523 | | | | |
| 试验条件 | | | | | |
| 中能电子辐射测试与定标系统: | | | | | |
| 序号 | 指标名称 | 单位 | 技术指标 | 试验条件允许偏差 | 备注 |
| 1 | 能量 | keV | 10~200 | 能量≤2% | |
| 2 | 通量 | counts/(cm ² s) | 10 ⁵ ~10 ⁹ | 通量≤10% | |
| 高能电子辐射测试与定标系统: | | | | | |
| 序号 | 指标名称 | 单位 | 技术指标 | 试验条件允许偏差 | 备注 |
| 1 | 能量 | keV | 100~2000 | 能量≤2% | |
| 2 | 通量 | counts/(cm ² s) | 10 ³ ~10 ⁷ | 通量≤10% | |

试验报告

试验状态与结果:

以下为空白

参 考 文 献

参考文献

- [1] GB/T 30114.1 空间科学及其应用术语 第1部分：基础通用；
 - [2] GB/T 5201-2012 带电粒子半导体探测器测量方法。
-