0254-6124/2023/43(3)-0558-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HAO Mengtan, ZHANG Shenyi, HOU Donghui, SHEN Guohong, ZHANG Huanxin, SU Bo, BAI Chaoping, SUN Ying, ZHOU Ping, JI Wentao. Calibration of the Medium Energy Proton Detector of FY-3E (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(3): 558–566. DOI:10.11728/cjss2023.03.220329033

风云三号 E 星中能质子探测器标定*

郝梦坛[1,2,3] 张珅毅[1,2,3] 侯东辉[1,3] 沈国红[1,3]
张焕新[1,3] 苏 波[1,3] 白超平[1,2,3]
孙 莹[1,3] 周 平[1,3] 冀文涛[1,3]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(北京天基空间环境探测重点实验室 北京 100190)

摘 要 风云三号 E 星搭载的中能质子探测器实现了风云三号系列卫星首次对辐射带中能质子进行多方向的测量。中能质子探测器实现了对九个方向的测量能量范围为 0.03～5 MeV 的中能质子能谱的测量。为确定中能质子探测器的实际性能，在仪器交付前，利用中国科学院国家空间科学中心的中高能电子加速器，对中能质子探测器的能量分辨率，相对响应效率曲线、不同方向探头测量一致性以及抗电子污染能力进行了标定。文中介绍了仪器的标定场所、标定内容，并对标定的结果做了分析。其结果显示，仪器的能量分辨率为 6.50%@310 keV，各测量一致性偏差优于 1.51%，电子在仪器内产生污染计数的概率低于 1%。该结果为中能质子探测器在轨运行时数据的分析处理提供了重要的参考依据。

关键词 太阳同步轨道，风云三号 E 星，中能质子探测器，定标，能量分辨率

中图分类号 V447

Calibration of the Medium Energy Proton Detector of FY-3E

HAO Mengtan[1,2,3] ZHANG Shenyi[1,2,3] HOU Donghui[1,3]
SHEN Guohong[1,3] ZHANG Huanxin[1,3] SU Bo[1,3] BAI Chaoping[1,2,3]
SUN Ying[1,3] ZHOU Ping[1,3] JI Wentao[1,3]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*Beijing Key Laboratory of Space Encironment Exploration, Beijing* 100190)

* 中国科学院国家空间科学中心“攀登计划”和科工局基金项目 (D020104) 共同资助

2022-03-28 收到原稿，2022-10-18 收到修定稿

E-mail：houdonghui@nssc.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Abstract FY-3E is the first satellite among the FY-3 series that has observed protons with medium energy in multiple directions. The medium energy proton detector can measure the energy spectrum of protons with the energy range of 0.03～5 MeV in nine directions. In order to determine the actual performance of the medium energy proton detector, before the instrument delivered, the energy resolution, relative response efficiency curve, measurement consistency of probes in different directions, and anti-electron pollution ability of the medium energy proton detector were calibrated using the medium and high-energy electron accelerator of the National Space Science Center of the Chinese Academy of Sciences. This paper introduces the calibration site and contents of the instrument, and analyzes the calibration results. The results show that the energy resolution of the instrument is 6.50% @ 310 keV, the consistency deviation of each measurement is better than 1.51%, and the probability of electronic pollution counting in the instrument is less than 1%.The results provide an important reference for the analysis and processing of the data of the intermediate-energy proton detector in orbit.

Key words Sun-synchronous orbit, FY-3E, Medium energy proton detector, Calibration, Energy resolution

0 引言

在地球周围一定的空间范围内存在大量被地磁场捕获的高能带电粒子，该捕获区被称为地球辐射带[1]。地球辐射带分为内辐射带($1.2 \leqslant L \leqslant 2.5$)和外辐射带($3 \leqslant L \leqslant 8$)，其中内辐射带主要由质子和电子组成，还有少量重离子存在；外辐射带以电子为主，并存在 MeV 以下的质子[2]。在平静情况下，内辐射带质子的全向积分通量在 10^0～10^8 $cm^{-2}\cdot s^{-1}$，其最大全向积分通量出现在磁赤道上，在太阳质子事件、磁暴等活动期间，内辐射带的质子通量会受到明显的影响，质子通量发生明显增长[1]。

中能质子是辐射带的重要研究内容之一，对磁暴、波粒相互作用的起因以及机制的研究有重要的意义。此前，POLAR 卫星搭载的 IPS(Imaging Proton Sensor)[3]、POES 卫星搭载的 MEPED(Medium Energy Proton and Electron Detector)[4]、GOES-N,O,P 卫星搭载的 MAGPD(Magnetosphere Proton Detector)[5] 以及 GOES-R 卫星搭载的 MPS-HI(Magnetospheric Particle Sensor-High Energy)[5,6] 均对辐射带的中能质子进行了观测，其测量的质子范围及探测手段列于表 1[3–6]。这些载荷的质子数据在研究极区中的粒子沉降、构建辐射带模型以及研究南大西洋异常区等方面发挥了重大的作用[7]，例如验证了粒子沉降对当地时间以及地磁活动的依赖性[8]；HILDCAA 事件期间粒子注入导致 *Dst* 指数的降低提供了证据[9]；为辐射带模型的构建与修正提供了大量的实测数据[10] 等。

过去的风云三号系列卫星从未进行过中能质子的测量，风云三号 E 星首次实现对辐射带的中能质子和极区沉降的中能质子的探测，测量的质子能量范围为 0.03～5 MeV。风云三号 E 星的运行轨道为 830 km 的太阳同步轨道，位于内辐射带边缘，空间环境平静期间，这个轨道的粒子分布在南大西洋负磁异常区，空间环境扰动时，在高纬地区也会有粒子分布。通过对该轨道中能质子的能谱和投掷角测量可以服务于空间天气的预警和预报；同时，通过中能质子的测量可以提供大量数据的累积研究粒子的时间、空间分布，补充中国辐射带模型中能质子的欠缺部分，以及高能粒子的运动规律；最后，为中国空间环境保障监测和体系提供支撑，同时为卫星飞控管理和异常情况分析提供分析数据。

1 仪器的设计方案

风云三号 E 星的中能质子探测器总体的物理设计思想是使用硅半导体传感器组成的望远镜形式对中能质子进行测量，通过多个半导体测量单元实现不同方向上的中能质子能谱测量，每个方向的能档划分情况如表 2 所示。

仪器共包括两个部件，分别为中能质子探测器部

表 1 国际上辐射带中能质子探测载荷

Table 1 Medium energy proton detector of radiation belts in the international

卫星	载荷	质子范围/MeV	探测手段
POLAR	IPS	0.02～1.5	小孔成像+磁偏转
POES	MEPED	0.03～6.9	半导体望远镜+磁偏转
GOES-N,O,P	MAGPD	0.08～0.8	半导体望远镜+磁偏转
GOES-R	MPS-HI	0.08～12	半导体望远镜+磁偏转

表 2 FY-3E 中能质子探测器的能档划分

Table 2 Energy bin division of the medium energy proton detector of FY-3E

能档	能量 / keV
P1	30～48
P2	48～80
P3	80～120
P4	120～170
P5	170～240
P6	240～350
P7	240～350
P8	350～500
P9	500～800
P10	800～1500
P11	1500～3000
P12	3000～5000

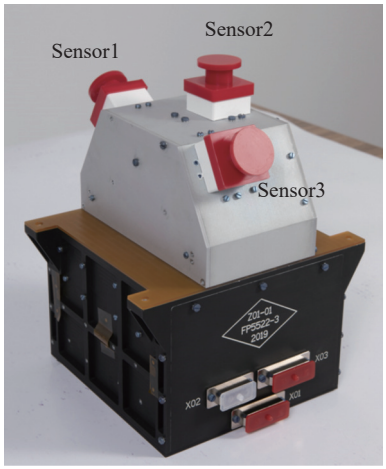

图 1 风云三号 E 星中能质子探测器部件 1

Fig. 1 Component 1 of the medium energy proton detector of FY-3E

件 1 和 2。单个部件的实物图如图 1 所示，包括三个探头 1/2/3，每个探头内各包括 3 组传感器，呈扇形排列，3 组传感器共用一个入射窗口，形成 3 个方向的测量（见图 2）。因此整个仪器共实现了对 18 个方向中能质子的测量。在卫星本体坐标系中，对仪器方向的定义如图 3 所示，其中部件 1 实现了方向 1～9 的测量，部件 2 实现了方向 10～18 的测量。每组传感器由两片硅半导体组成，每组硅半导体传感器的特性参数列于表 3。第一片半导体传感器的作用是测量能量粒子在传感器中的能量损失，将能量转化为电信号，提供给后续电子学电路进行分析；第二片传感器为反符合探测器，用于去除高能粒子的干扰（如果粒子同时在第一片和第二片传感器产生信号，则认为该粒子为干扰粒子）[11]。

单个探头的截面图如图 2 所示，其中准直仪用于限定仪器的视场并阻止斜入射粒子的进入[12,13]；挡光层用于屏蔽太阳光产生的信号干扰；铁用于对磁铁进行磁屏蔽；磁铁可对电子的路径进行偏转，使之无法进入传感器，从而提高测量精度；硅半导体传感器用于粒子的测量。

2 定标设备及定标参数

2.1 定标设备

仪器的标定在中国科学院国家空间科学中心的电子加速器进行。FY-3E 中能质子探测器定标采用的加速器进行选取时主要考虑两方面因素。一方面是仪器可承受的最大通量，高通量的粒子进入传感器后，容易对传感器造成损伤，为了确保仪器不因试验高通量的粒子辐照损坏，所使用的加速器需要通量较低；另一方面是仪器的时间分辨率，FY-3E 中能质子探测器的时间分辨率为 6 μs，即当入射粒子时间间隔小于 6 μs 时，探测器将无法分辨两个粒子信号，在这种情况下会造成计数的损失，以及信号幅度的错误。

因此, 在采用加速器对该仪器标定时, 需要加速器的束流最好均匀且 6 μs 内进入传感器视场的粒子数不超过 1 个。中国部分质子加速器虽然单位时间的通量较低, 但是属于脉冲信号, 束流中两个粒子的时间间隔远小于 6 μs, 这可能导致信号的叠加问题, 对后续的试验数据分析较为困难。此外, 电子和质子在传感器中的主要作用机理都是电离, 且中能电子和中能质子的探测原理都是一致的, 因此只要使用能损相同的电子就可以替代质子进行定标。实验时将需要测试的质子能量等效成相应的电子能量。加速器可输出连续可调的单能电子束, 用中能质子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电子的响应情况。综合以上原因, 本试验优先选择了中国科学院国家空间科学中心的电子加速器替代质子的定标。

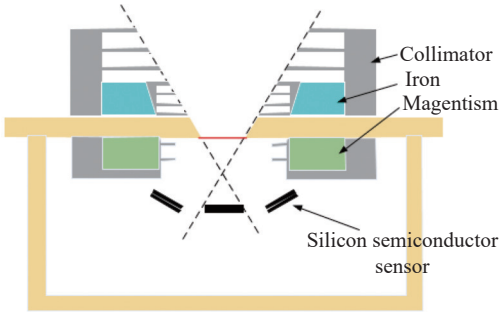

图 2 中能质子探头截面

Fig. 2 Schematic diagram of the cross section of the medium energy proton probe

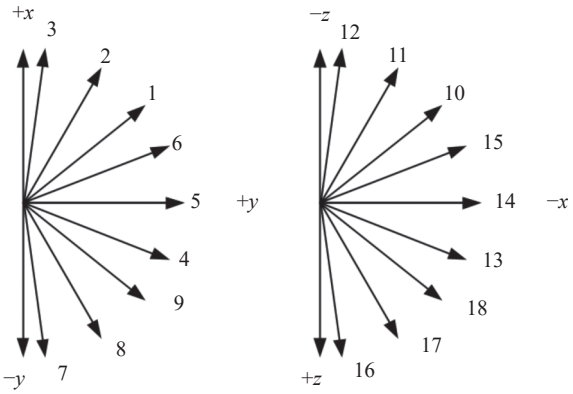

图 3 中能质子探测器探测方向分布 (xyz 为卫星本体坐标系, $-z$ 为朝天向, $+z$ 为对地方向, $+y$ 和 $-y$ 为垂直轨道面, $+x$ 为前进方向, $-x$ 为后退方向)

Fig. 3 Distribution of the medium energy proton detector detection direction (xyz are the satellite body coordinate system, where $-z$ is the upward direction, $+z$ is the direction to Earth, $+y$ and $-y$ is the vertical orbital plane, $+x$ is the forward direction, and $-x$ is the backward direction

中国科学院国家空间科学中心怀柔中高能电子加速器是中国唯一的应用于星载中高能电子探测载荷测试定标的综合系统(见图 4)。电子加速器采用多次扩散与限束相结合的先进技术方案, 获得极弱流电子束, 再经高精磁屏蔽束流输运线输运至同样高精磁屏蔽的高真空试验终端。通过法拉第同阵列、硅探测器阵列、硅微条探测器联合标定, 国际首次实现测试定标试验过程中准实时(<5 min)监测, 独有设计保证极弱束流测量达飞安级(10^{-15} A)。根据标定怀柔电子加速器的能谱范围为 10～2000 keV, 电子束流通量范围: 10^{3}～10^{9} $cm^{-2}\cdot s^{-1}$。

2.2 定标参数

2.2.1 能量分辨率

能量分辨率是指仪器对某一个单能粒子进行测量时, 测量结果的展宽情况。能量分辨率实际反映了仪器的测量精度。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为

表 3 每组硅半导体传感器特性参数

Table 3 Characteristic parameters of each group of silicon semiconductor sensors

传感器	厚度/μm	直径/μm	传感器死层/nm
第一片	300	8	150(100 nm铝电极+50 nm注入层)
第二片	300	8	150(100 nm铝电极+50 nm注入层)

图 4 仪器标定试验使用的加速器

Fig. 4 Accelerator used for instrument calibration test

$$\eta = \frac{\delta}{\lambda} \times 100\%. \tag{1}$$

式中, λ为高斯拟合的中心值, δ 为半高宽。

2.2.2 仪器的相对响应效率曲线

粒子与传感器作用时, 由于散射、能损涨落以及硅传感器死层等因素的影响, 同能量的粒子会在不同的探测能档产生响应计数, 即对于某个设计能档不可能只测量其对应能段的入射粒子, 其他能段的入射粒子也有机会在该能档产生响应[14], 此时需要测试不同能量粒子在仪器各个能档的响应情况。具体原理: 以加速器作为标准源, 将电子加速器的能量进行调节, 测试每个能量点的电子落在各个不同电子能道上的概率即可得到电子的响应曲线。

2.2.3 不同方向探头测量一致性

在相同通量、能量条件下, 不同方向探头的最大响应计数之间的偏差, 其计算公式为

$$\chi_i = \frac{D_{\max,i}}{\sum_{i=1}^{i=n} D_{\max,i}/n}. \tag{2}$$

式中, $D_{\max,i}$ 为方向 i 的最大响应计数, n 为测量的方向数。

2.2.4 抗电子污染能力

仪器的抗电子污染能力是指电子从探测器开口进入后在传感器的能档产生响应的概率, 其计算公式为

$$\kappa = \frac{\phi - T}{\phi}. \tag{3}$$

式中, ϕ为加速器在探测器开口面积的通量, T 为在探测器能档引起响应的计数。

抗电子污染能力为磁铁对电子的偏转能力与反符合探测器的反符合能力共同作用的结果, 磁偏转能力计算公式为

$$\kappa_M = \frac{\phi - M}{\phi}. \tag{4}$$

式中, M 为在探测器第一片传感器产生响应的粒子计数。

反符合能力计算公式为

$$\kappa_A = \frac{A}{M}. \tag{5}$$

式中, A 为同时在探测器第一片传感器和第二片传感器中产生响应的粒子数, 即被反符合掉的粒子数。

当电子能量较低时, 主要是磁铁偏转占主要作用; 随着电子能量升高之后磁铁偏转能力减弱, 会有一部分能量较高的进入探测器中产生计数, 通过反符合探测器的作用可以去掉这部分粒子, 探测器对电子有更高的抗污染能力。

3 结果与分析

仪器内的磁铁对电子有偏转作用, 为保证测试的顺利开展, 在进行能量分辨率标定、相对响应效率曲线标定以及不同方向探头测量一致性的标定时, 需要拆除仪器内部的磁铁装置。但在进行抗电子污染能力测试时, 需要安装磁铁。

3.1 能量分辨率定标结果

图 5 给出了不同单能电子在中能质子探测器方向 9 的能量沉积谱及高斯拟合结果, 从图中可以看出, 单一能量电子在传感器中的沉积能谱呈近似高斯函数分布, 对其进行高斯拟合得到在方向 9, 128 keV 和 155 keV 电子响应能谱的能量分辨率分别为 11.55% 和 8.79%, 190 keV 和 310 keV 电子响应能谱的能量分辨率分别为 7.90% 和 6.15%。随着电子能量的增加, 电子的能量分辨率整体呈下降趋势, 这主要是因为粒子与物质作用时, 发生的散射作用是一个统计过程, 会造成探测器收集的电荷有涨落起伏。随着入射粒子能量的增强, 散射能力变弱, 探测器收集电荷的涨落变小, 因此能量分辨率变好。

3.2 仪器的相对响应效率结果

为了对仪器的性能有更加全面的了解, 利用多个单能电子束流对风云三号 E 星中能质子探测器进行了照射。测试时选取的电子能量分为两大部分: 一是与表 1 中能档边界质子能量等效的电子; 二是介于能档上下边界之间的质子能量的等效电子。风云三号 E 星中能质子探测器方向 1 传感器对电子加速器产生的不同能量电子束流的部分响应结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 不同单能电子在传感器中, 沉积能谱峰值(图 6 中采用脉冲信号幅度表示)随着入射电子能量的增加而增加。由于沉积谱存在一定的展宽, 不同能量的沉积能谱存在交叠, 即不同能量电子在传感器中有一定概率产生相同的沉积能量, 产生干扰计数。

根据不同能量电子在仪器中产生的沉积谱以及仪器的每个能档阈值的划分, 可以得到不同能量电子

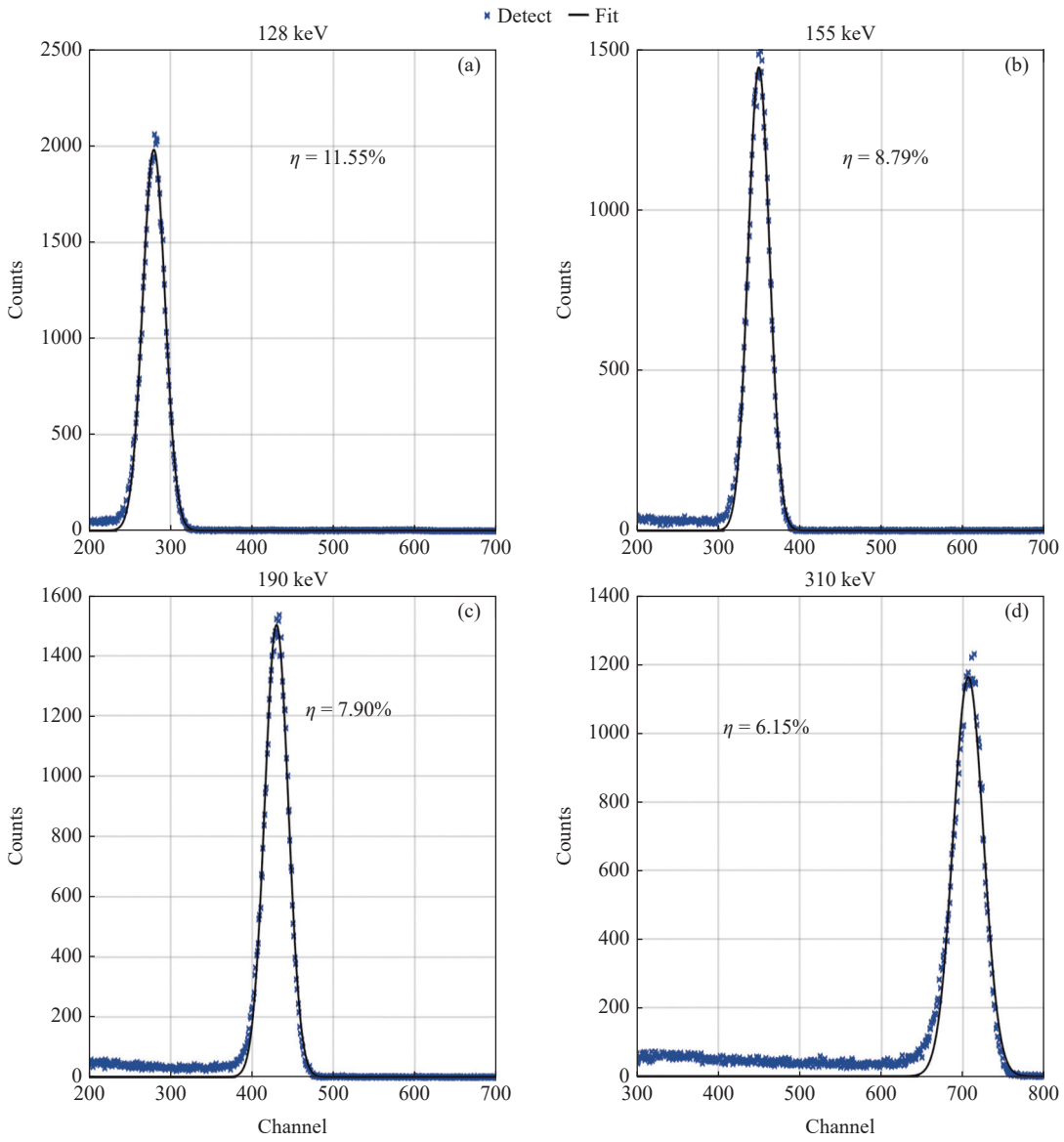

图 5　FY-3E 星中能质子探测器方向 9 传感器的单能电子沉积能谱及其高斯拟合结果

Fig. 5　Single-energy electron deposition energy spectrum and its Gaussian fitting results of the sensor in Direction 9 of the medium energy proton detector of FY-3E

在中能质子探测器中各能档的响应计数。某单能粒子在 Pi 能档的相对响应效率为

$$R_i = \frac{C_i}{T}. \tag{6}$$

式中, C_i 为该单能粒子入射时在 Pi 能档的响应计数, T 为仪器响应总计数。

图 7 给出的是不同能量电子在中能质子探测器不同能档中的相对响应效率。其中, 横坐标代表入射电子等效的质子能量, 纵坐标代表粒子落在不同质子能档中的概率, 不同颜色曲线代表不同的能档。以 218 keV 为例, 从图中可以看出, 218 keV 作为 P5 能档的中间能量, 大部分粒子落在了 P5 能档, 还有少部分粒子在较低的 P1～P4 能档产生了响应计数。对仪器相对响应函数曲线的测试, 将为在轨测量数据的能谱反演修正提供参考依据。

3.3　不同方向探头测量一致性结果

入射能量为 200 keV 时, 将中能质子探头放在加速器真空罐的转台上, 维持束流通量、能量以及方向不变的情况下, 慢慢转动转台(见图 8)。此时, 束流方向与传感器相对角度不断变化, 得到的中能质子探头

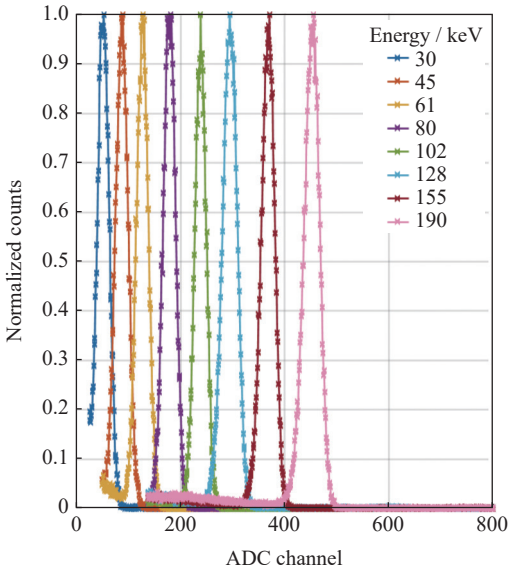

图 6 不同能量电子在方向 1 产生的沉积谱

Fig. 6 Deposition spectra of electrons with different energies in Direction 1

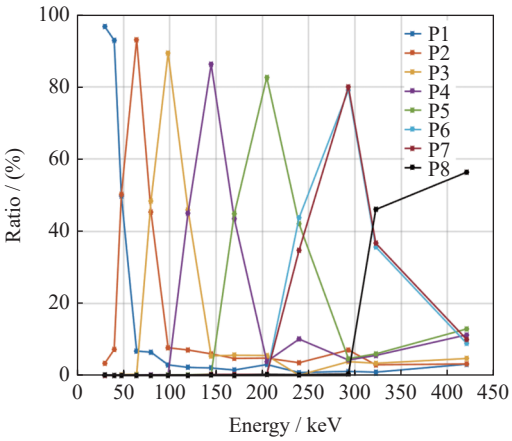

图 7 风云三号 E 星中能质子探测器方向 1 传感器相对响应效率

Fig. 7 Relative response efficiency curve of sensor in Direction 1 of the medium energy proton detector of FY-3E

方向 14、方向 15 和方向 18 的传感器响应计数随转动时间的变化如图 9 所示，其中横坐标代表转台转动的时间，纵坐标代表不同方向传感器在每一秒的响应计数。随着转台的缓慢转动，在第 123 s，方向 18 开始有响应，这说明束流开始进入了方向 18 的视场范围；在第 314 s 时，方向 18 响应消失，方向 14 开始有响应，束流离开了方向 18，进入了方向 14 的视场内；在第 392 s，束流的入射切入到方向 15，该方向的响应

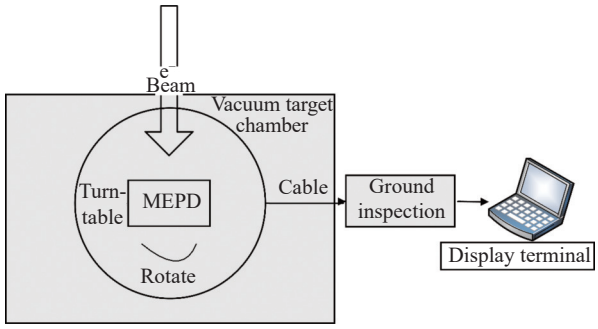

图 8 测量一致性定标设备连接

Fig. 8 Connection of equipment for measuring conformance calibration

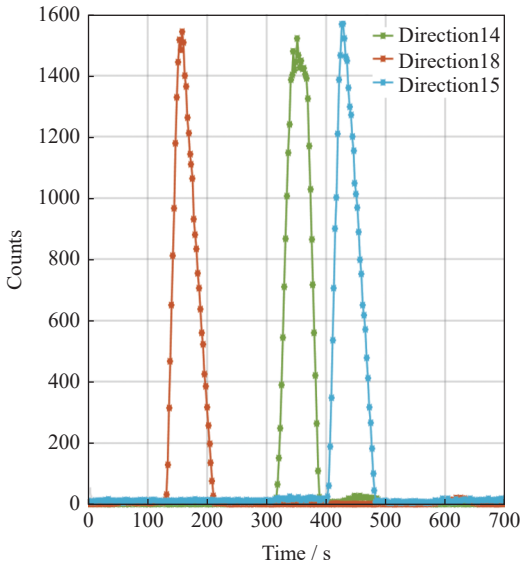

图 9 方向 14、方向 15 以及方向 18 响应计数随转台转动时间的变化

Fig. 9 Changes in response counts for Direction 14, Direction 15, and Direction 18 as turntable rotation time

计数开始增多，并随着转台旋转经历计数先增多后减少的规律。

束流缓慢扫过探头，根据测试结果，该方向响应遵循偏离探头响应变小；垂直探头方向入射，响应达到最大值的规律。旋转时，在各个方向测量的一致性如表 4 所示，测量一致性偏差不超过 1.51%。该结果为整器的实测结果，因此该偏差为各种因素综合的作用结果。根据电子加速器的性能参数，束流强度的不稳定度在 1 h 内<1%，一致性测试的整个实验是在 400 s 内完成的。因此，束流强度不稳定性对各方向一致性的影响较小。

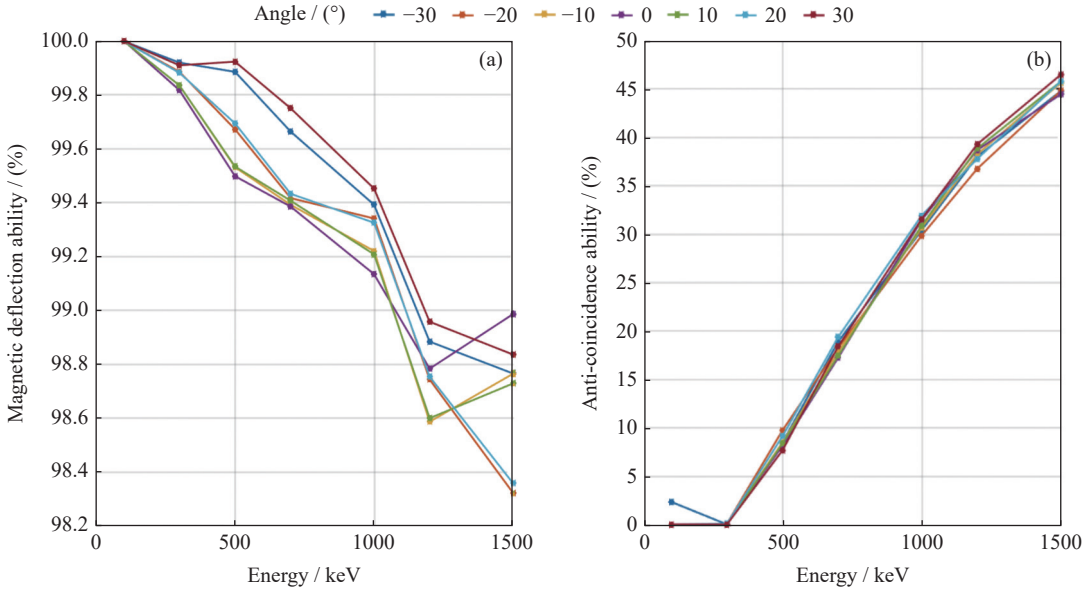

图 10　不同能量及角度下电子在方向 14 的磁偏转及反符合能力

Fig. 10　Magnetic deflection and anti-coincidence of electrons in Direction 14 at different energies and angles

表 4　各方向垂直入射时通量测量的一致性

Table 4　Consistency of flux measurements at normal incidence in all directions

能量/keV	方向14	方向15	方向18
200	0.01%	1.50%	1.51%

3.4　抗电子污染能力结果

对中能质子探测器方向 14 做抗电子污染能力实验时，入射电子束的能量点为 300 keV, 500 keV, 700 keV, 1000 keV, 1200 keV, 1500 keV，入射电子束偏转角度分别为–30°, –20°, –10°, 0°, 10°, 20°, 30°。不同能量点的电子在仪器内部偏转磁铁作用下的磁偏转能力如图 10(a)所示，反符合能力如图 10(b)所示。由于磁偏转和第二片传感器反符合共同作用，对探测器抗电子污染能力的影响如图 11 所示。

根据上文对磁偏转作用、反符合作用以及两者总和作用的分析可以看出，磁偏转能力随着能量的上升而下降，但是反符合能力则随着能量的上升而变强，两者的结合可以达到很好的抗污染效果，使电子对中能质子探头的污染能量降到 1% 以下。

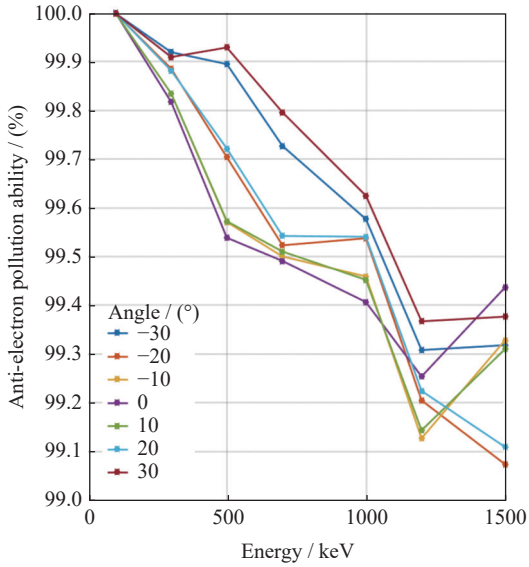

图 11　方向 14 抗电子污染能力

Fig. 11　Probe resistance to electronic contamination in Direction 14

4　结论

对 FY-3E 星搭载的中能质子探测器的性能参数的加速器标定情况进行了介绍，其中仪器的能量分辨率为 6.50%@310 keV，各测量一致性偏差优于 1.51%，电子在仪器内产生污染计数的概率低于 1%。定标结果为风云三号 E 星仪器的阈值划分提供了重要依据，为在轨数据的分析提供了保障。

风云三号 E 星的中能质子探测器是中国首次对在轨中能质子探测的尝试，后续还会在更多型号任务

中搭载中能质子探测仪器，为空间天气研究提供更多有效的数据支撑。

参考文献

[1] Space Science and Application Research Center, Chinese Academy of Sciences. Aerospace Space Environment Manual[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2000 (中国科学院空间科学与应用研究中心. 宇航空间环境手册[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2000)

[2] DU Heng, YE Zonghai. Space Environment Manual for Low-orbit Spacecraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996 (都亨, 叶宗海. 低轨道航天器空间环境手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996)

[3] BLAKE J B, FENNELL J F, FRIESEN L M, *et al*. CEPPAD: comprehensive energetic particle and pitch angle distribution experiment on POLAR[J]. *Space Science Reviews*, 1995, **71**(1): 531-562

[4] YANDO K, MILLAN R M, GREEN J C, *et al*. A Monte Carlo simulation of the NOAA POES medium energy proton and electron detector instrument[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(A10): A10231

[5] RODRIGUEZ J V, DENTON M H, HENDERSON M G. On-orbit calibration of geostationary electron and proton flux observations for augmentation of an existing empirical radiation model[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2020, **10**: 28

[6] KRESS B T, RODRIGUEZ J V, ONSAGER T G. The GOES-R space environment in situ suite (SEISS): measurement of energetic particles in geospace[M]//GOODMAN S J, SCHMIT T J, DANIELS J, *et al*. The GOES-R Series. Amsterdam: Elsevier, 2020: 243-250

[7] ASIKAINEN T, MURSULA K. Recalibration of the long-term NOAA/MEPED energetic proton measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, **73**(2/3): 335-347

[8] WISSING J M, BORNEBUSCH J P, KALLENRODE M B. Variation of energetic particle precipitation with local magnetic time[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **41**(8): 1274-1278

[9] SØRAAS F, AARSNES K, OKSAVIK K, *et al*. Evidence for particle injection as the cause of *Dst* reduction during HILDCAA events[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, **66**(2): 177-186

[10] LEMAIRE J F, HEYNDERICKX D, BAKER D N. Radiation Belts: Models and Standards[M]. Washington: American Geophysical Union, 1996: 79-91

[11] LI Xiao, ZHANG Shenyi, ZHANG Weijie. The application of anti-coincidence detective cup technology in space[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2015, **35**(6): 566-570 (李肖, 张珅毅, 张伟杰. 反符合杯测量技术在空间中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2015, **35**(6): 566-570)

[12] ROLF P. Developments and Numerical Simulations for the Electron-Proton-Telescope Onboard Solar Orbiter[D]. Kiel: Kiel University, 2012

[13] HOU Donghui, ZHANG Shenyi, ZHANG Xiaoxin, *et al*. Design optimization of novel collimator for detector of space high energy electron: a simulation study[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2020, **40**(10): 965-970 (侯东辉, 张珅毅, 张效信, 等. 空间高能电子探测器准直仪的设计研究[J]. 真空科学与技术学报, 2020, **40**(10): 965-970)

[14] ZHANG S Y, ZHANG X G, WANG C Q, *et al*. The geometric factor of high energy protons detector on FY-3 satellite[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(10): 2558-2566