

# 均匀取样电磁量能器能量纵向泄漏的修正<sup>\*</sup>

李祖豪<sup>1)</sup> 陈国明 陈刚 杨长根 杨民 王小斌  
张少鹤 杨 ■ 宇 吕雨生 陈和生

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

**摘要** 研究对铅-闪烁光纤夹层电磁量能器能量纵向泄漏的纠正.对 AMS02 电磁量能器 2002 年末流测试的数据进行了分析,用  $\Gamma$  函数拟合的方法和末层沉积能量法对量能器的能量纵向泄漏进行了修正.经过修正后的能量线性变好,能量分辨率显著提高.末层沉积能量法对于能量分辨率的提高效果更为明显.

**关键词** 电磁量能器 能量分辨率  $\Gamma$  函数拟合 能量泄漏修正

## 1 引言

阿尔法磁谱仪 II (AMS02) 将于 2007 年安装到国际空间站 (ISS), 并至少运行 3 年. 它的主要目标是寻找反物质和暗物质, 并测量原初宇宙线成分和能谱<sup>[1]</sup>. 它由超导磁铁与穿越辐射探测器 (TRD) 飞行时间计数器 (TOF)、硅微条径迹探测器 (Tracker)、反符合计数器 (ACC)、环形成像切仑科夫计数器 (RICH) 和电磁量能器 (ECAL) 等子探测器组成, 可以测量  $0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$  几何接收度内宇宙线的刚度 ( $R \equiv pc / |Z|e$ )、电荷 ( $Z$ )、速度 ( $\beta$ ) 和能量 ( $E$ ). 电磁量能器位于 AMS02 的最下方, 主要用来精确测量光子和电子的能量、进行粒子识别.

AMS02 电磁量能器采用均匀取样型结构, 使用铅作为惰性吸收板, 用闪烁光纤作灵敏取样层, 采用光电倍增管读取光纤的输出信号. 量能器的长、宽均为 64.8cm, 厚 18.5cm. 分 9 大层读出, 每大层由 36 个光电倍增管读出. 同一大层内的光纤相互平行, 相邻层的光纤相互垂直. 每大层包含 10 层铅, 相邻的铅层之间夹着光纤. 每个大层为 1.8 个辐射长度, 总共 16.2 个辐射长度. 每个光电倍增管包含 4 个独立的阳极, 所以量能器的 9 个大层被分为 18 个读出

层, 每个读出层包含 72 个读出单元<sup>[2]</sup>.

由于量能器的尺寸常常会受到各种条件如尺寸、重量、经费等的限制. 在量能器不能对电子、光子全吸收时, 能量的泄漏会引起能量测量线性变差、能量分辨率变坏. 入射电子、光子的能量越高, 泄漏就越多, 对能量线性和分辨率的影响也就越厉害. 通常能量的泄漏主要是纵向的. 如果能够对能量的纵向泄漏进行修正, 就可以大大改善能量的线性和分辨率.

均匀取样型量能器具有对电磁簇射分层均匀取样的特性. 可以根据簇射纵向发展的规律, 由量能器中各层的沉积能量推断出能量纵向泄漏的大小. 从而对能量的纵向泄漏进行补偿, 这样可以提高能量的线性和分辨率. 作者对 AMS02 电磁量能器 2002 年末流测试数据进行了分析, 运用两种方法 ( $\Gamma$  函数拟合法和末层沉积能量补偿法) 对能量纵向泄漏进行了补偿, 并对这两种方法进行了对比.

## 2 束流测试

本次束流测试在 CERN 的超级质子同步加速器 (SPS) 的 H6 束流线上进行. 从 SPS 中引出的

2004-03-12 收稿, 2004-05-17 收修改稿

\* 国家自然科学基金 (10099631) 资助

1) E-mail: lizh@mail.ihep.ac.cn

450GeV/c 的质子束打在一个叫 T4 的铍靶上,产生的次级粒子经过多次的偏转聚焦过程,在 H6 束流线上产生可调能量的单粒子强子、电子和  $\mu$  子.本次束流测试采集了近一个月的数据,入射粒子包括质子、 $\mu$  子和电子.其中电子束流包括 3, 6, 10, 15, 20, 30, 35, 50, 80, 120, 150 和 180GeV 12 个能量,束流入射中心主要集中在测量区域的中心,以保证簇射能量基本上沉积在测量区域<sup>[2]</sup>.

### 3 电磁量能器能量纵向泄漏的补偿方法

均匀取样型电磁量能器能量纵向泄漏的补偿可以用  $\Gamma$  函数拟合法和末层沉积能量补偿法来实现. $\Gamma$  函数拟合法通过对电磁量能器各层沉积能量的分布进行拟合,得到能量纵向泄漏的大小,从而对重建能量进行补偿.末层沉积能量补偿法则通过量能器最后一层的沉积能量与总沉积能量和入射能量三者之间的关系,由末层沉积能量与总沉积能量求得入

射能量.下面将对这两种补偿办法进行详细描述.

#### 3.1 $\Gamma$ 函数拟合法

电磁簇射能量沉积纵向投影的平均值遵从  $\Gamma$  分布<sup>[3]</sup>:

$$\frac{dE}{dt} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)}, \quad (1)$$

其中  $t$  代表簇射的深度(以辐射长度  $X_0$  单位);  $E_0$ ,  $a, b$  为参数.其中  $E_0$  为拟合能量,理论值为入射能量  $E$ ;  $a, b$  由量能器组成物质的原子量  $Z$  和入射能量决定,并且与电磁簇射极大的纵向深度有如下关系<sup>[4]</sup>

$$t_{\max} = \frac{a-1}{b} = 1.0 \times (\ln y + c_j), j = e, \gamma, \quad (2)$$

其中  $y = E/E_c, C_e = -0.5, C_\gamma = +0.5, E$  为入射能量,  $E_c$  为临界能量.

对本次束流测试中不同能量电子的各层平均沉积能量用公式(1)进行了拟合,发现实验数据与公式(1)符合的很好,10, 50, 120GeV 电子在不同读出层中的平均沉积能量的分布如图 1 所示.

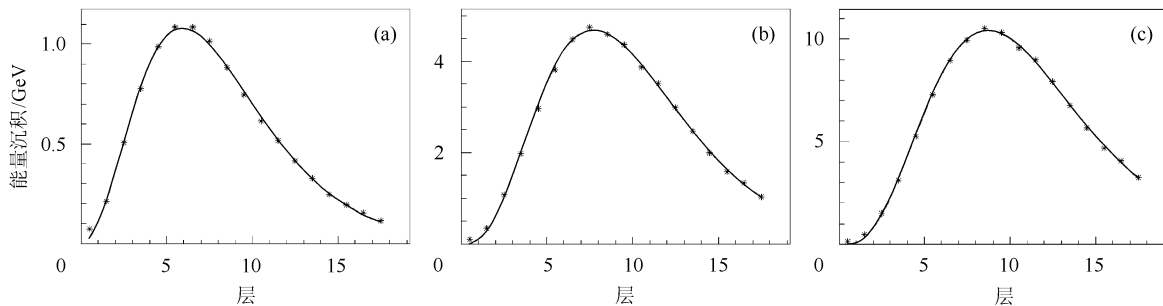


图 1 不同入射能量电子的能量沉积纵向分布图

(a) 10GeV 电子能量沉积纵向分布图; (b) 50GeV 电子能量沉积纵向分布图; (c) 120GeV 电子能量沉积纵向分布图.

\* 为实验点,实线为拟合曲线.

图中实验点为各层的平均沉积能量,实线为拟合曲线,可以看出实验点与拟合曲线符合的很好.图 1 中拟合参数  $E_0, a, b$  见表 1.

表 1 纵向拟合参数表

入射电子能量/GeV	10	50	120
$E_0$ /GeV	$10.0 \pm 0.8$	$49.4 \pm 3.2$	$119.5 \pm 6.9$
$a$	$3.6 \pm 0.6$	$4.4 \pm 0.6$	$4.8 \pm 0.5$
$b$	$0.45 \pm 0.08$	$0.44 \pm 0.07$	$0.43 \pm 0.06$

利用公式(1)对单事例进行拟合可以得到各个事例的入射能量.但是公式(1)描述的是纵向能量沉积的统计分布.对单个事例来说,每层沉积能量的分布有较大的涨落,入射能量较低时这种涨落尤其明

显.如果以拟合得到的总能量  $E_0$  作为重建能量,在入射能量较低时,会因为单事例拟合的较大涨落而造成能量分辨率的降低.可以采用如下公式进行重建以避免上述问题:

$$E_{\text{Rec}} = E_{\text{Vis}} \times \frac{E_0}{E_0 - E_{\text{Leak}}} = E_{\text{Vis}} \times \frac{1}{1 - E_{\text{Leak}}/E_0}, \quad (3)$$

其中  $E_{\text{Rec}}$  为重建能量、 $E_{\text{Vis}}$  为测量到的量能器总沉积能量、 $E_0$  意义与公式(1)中相同、 $E_{\text{Leak}}$  为能量纵向泄漏,等于  $E_0$  减去利用公式(1)积分得到的量能器总沉积能量.

采用公式(3)的办法进行补偿时,对于入射能量较低电子(光子),  $E_{\text{Leak}}$  远小于  $E_0$ , 从而  $E_{\text{Rec}}$  约等

于  $E_{\text{Vis}}$ . 这样入射能量低时重建能量由  $E_{\text{Vis}}$  决定, 避免了由于纵向拟合的较大涨落而造成的能量分辨率降低.

### 3.2 末层沉积能量法

对于取样型的电磁量能器, 入射能量与末层沉积能量、总沉积能量之间的关系如下<sup>1)</sup>

$$\frac{E_{\text{Vis}}}{E_{\text{Beam}}} = A - B \times \frac{E_{\text{Last}}}{E_{\text{Vis}}}, \quad (4)$$

其中  $E_{\text{Last}}$  为量能器最后一层的沉积能量、 $E_{\text{Vis}}$  为测量得到量能器总沉积能量、 $E_{\text{Beam}}$  为入射能量.  $A, B$  为参数, 由量能器的特性决定, 其中  $A$  的值近似等于 1.

用不同能量的电子束流与量能器相互作用, 测量  $E_{\text{Beam}}, E_{\text{Last}}$  和  $E_{\text{Vis}}$ , 作拟合就可以得到  $A, B$  的值.  $A, B$  的值确定以后, 就可以采用如下的公式进行能量重建:

$$E_{\text{Rec}} = \frac{E_{\text{Vis}}}{A - B \times E_{\text{Last}}/E_{\text{Vis}}} \quad (5)$$

其中  $E_{\text{Rec}}$  为重建能量.

本次束流测试的电子事例包括 3, 6, 10, 15, 20, 30, 35, 50, 80, 120, 150 和 180 GeV 共 12 个能量. 对所有的电子事例进行统计, 它们的  $E_{\text{Last}}/E_{\text{Vis}}$  与  $E_{\text{Vis}}/E_{\text{Beam}}$  的二维散点图如图 2 所示. 对散点图作投影得到图 3. 从图 3 可以看出, 除了开始端 ( $E_{\text{Last}}/E_{\text{Vis}} < 0.01$ ) 以外,  $E_{\text{Last}}/E_{\text{Vis}}$  与  $E_{\text{Vis}}/E_{\text{Beam}}$  基本上呈线性关系, 说明不同入射能量的电子事例基本满足同样的线性关系, 因此可以通过公式 (5) 对电磁簇射的纵向能量泄漏进行修正. 对图 3 中数据进行拟合得到公式 (4), (5) 中的  $A, B$  值分别为  $1.01 \pm 0.04, 3.3 \pm 0.1$ .

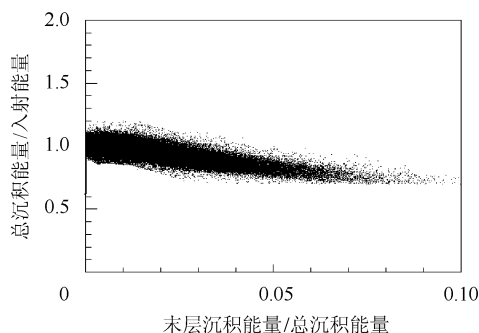


图 2 末层沉积能量、沉积能量和入射能量关系图

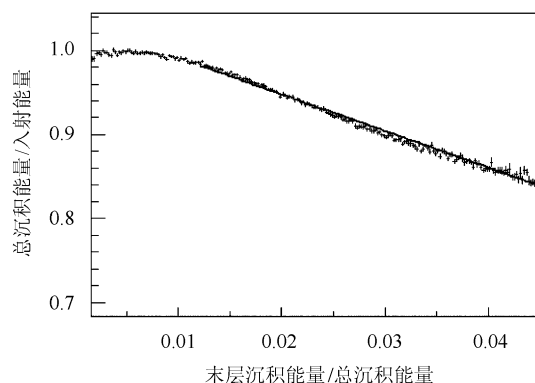


图 3 末层沉积能量、总沉积能量和入射能量关系投影图

## 4 实验结果

对不同能量的电子进行了能量重建, 并用上述两种方法进行了能量纵向泄漏的修正. 图 4 描述了 50 GeV, 120 GeV 电子的重建能量分布图. 从图中可以看出, 未做修正的电子重建能量分布图左边有一条因为纵向泄漏造成的长尾巴, 经过纵向泄漏修正后

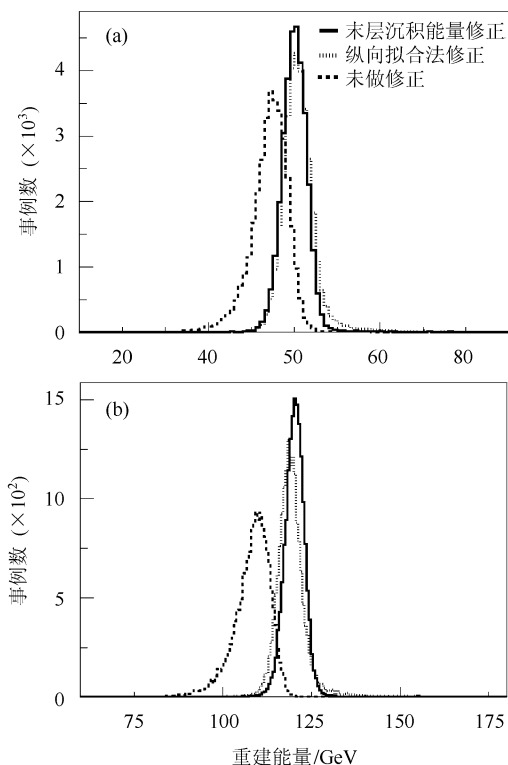


图 4

(a) 50 GeV 的电子重建能量分布图;  
(b) 120 GeV 的电子重建能量分布图.

1) 公式 (4) 由俄罗斯 A. Choutko 建议

左边的尾巴消失,对称性变好,且分布明显变窄.经过修正后的能量平均值与入射电子能量更符合.

对未进行能量修正、用  $\Gamma$  函数拟合法进行能量修正和用末层沉积能量法进行能量修正 3 种情况下电子事例重建能量的线性进行了对比,结果如图 5 所示.从图中可以看出,在未进行能量修正的情况下,入射电子能量大于 50GeV 时,能量的线性就开始变差,随着入射能量的增加,线性越来越差.而经过纵向泄漏修正后,重建能量一直到入射能量等于 120GeV 都有很好的线性,在 150GeV 和 180GeV 开始变差,其原因是光电倍增管的饱和效应.两种修正方法在改善线性方面效果基本相当.

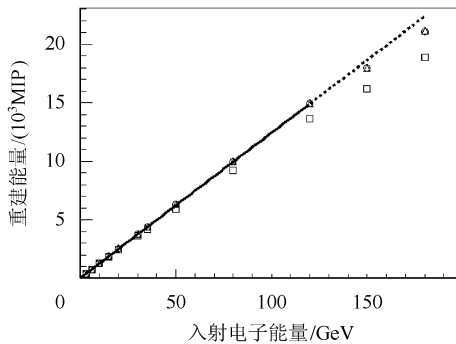


图 5 能量重建线性图

○末层沉积能量修正,△纵向拟合法修正,  
□未作能量修正.

我们还对 3 种方法重建后的能量分辨率进行了比较,结果如图 6 所示.从中可以看出:在低能端,3 种方法重建后的分辨率都差不多;但是随着能量的升高,经过修正后的能量分辨率明显变好,末层沉积能量法修正对分辨率的提高效果更为明显.图中 150GeV,180GeV 两点分辨率变差,其主要原因是光电倍增管的饱和效应和少量的横向泄漏.

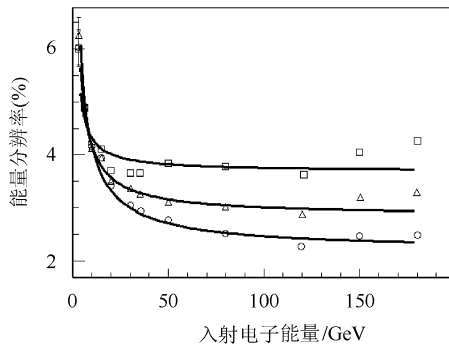


图 6 能量分辨率随入射能量变化图

○末层沉积能量修正,△纵向拟合法修正,  
□未作能量修正.

## 5 进一步讨论

对入射能量为 10GeV,50GeV,120GeV 的电子事例进行了分析,使用量能器上端不同数目层的数据,利用末层沉积能量法进行能量纵向泄漏的修正,观察能量线性和能量分辨率随着量能器厚度的变化.表 1、表 2、表 3 分别列出了 10GeV,50GeV,120GeV 的电子,在不同厚度的量能器中修正前和修正后的相对能量分辨率  $\sigma_1, \sigma_2$ ;修正前和修正后重建能量与入射能量的偏差  $\Delta_1, \Delta_2$  的值.AMS 电磁量能器每层吸收长度约为  $0.9X_0$ .其中:

$$\Delta_1 = \frac{E_{\text{Beam}} - E_{\text{Vis}}}{E_{\text{Beam}}} \times 100\%$$

$$\Delta_2 = \frac{E_{\text{Beam}} - E_{\text{Rec}}}{E_{\text{Beam}}} \times 100\%$$

表 2 10GeV 电子重建能量与入射能量的偏差 ( $\Delta$ ) 和能量分辨率 ( $\sigma$ ) 随量能器层数的变化表

总层数	8	9	10	11	12	13
$\Delta_1(\%)$	52.6	42.3	33.2	25.5	19.3	11.4
$\Delta_2(\%)$	-7.1	-2.3	-1.1	-0.6	-0.4	-0.3
$\sigma_1(\%)$	21.4	17.1	14.1	11.1	9.09	7.54
$\sigma_2(\%)$	14.8	10.4	8.26	6.71	5.92	5.17
总层数	14	15	16	17	18	
$\Delta_1(\%)$	10.0	7.0	4.6	2.8	1.4	
$\Delta_2(\%)$	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.0	
$\sigma_1(\%)$	6.57	5.70	5.15	4.76	4.44	
$\sigma_2(\%)$	4.76	4.42	4.21	4.05	3.95	

表 3 50GeV 电子重建能量与入射能量的偏差 ( $\Delta$ ) 和能量分辨率 ( $\sigma$ ) 随量能器层数的变化表

总层数	10	11	12	13	14
$\Delta_1(\%)$	51.4	42.6	37.9	27.5	21.6
$\Delta_2(\%)$	-4.2	1.2	0.1	0.9	0.8
$\sigma_1(\%)$	18.81	15.69	12.56	10.17	8.31
$\sigma_2(\%)$	10.18	6.53	5.21	4.39	3.81
总层数	15	16	17	18	
$\Delta_1(\%)$	16.7	12.8	9.8	7.3	
$\Delta_2(\%)$	0.7	0.7	0.8	0.8	
$\sigma_1(\%)$	6.69	5.65	4.90	4.27	
$\sigma_2(\%)$	3.35	3.08	2.90	2.75	

比较表 2、表 3、表 4 中的  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  可以看出,如果不进行能量纵向泄漏的修正,重建能量随着量能器厚度的减少快速地偏离入射能量;而经过纵向泄漏的修正后,如果重建能量的准确度要求为 1%,对

于 10GeV 的电子,量能器的厚度只要大于 10 层(9 个辐射长度)就可以达到要求,对于 50GeV 和 120GeV 的电子需要的量能器厚度为 11 层(10 个辐射长度)和 12 层(11 个辐射长度).

表 4 120GeV 电子重建能量与入射能量的偏差( $\Delta$ )和能量分辨率( $\sigma$ )随量能器层数的变化表

总层数	11	12	13	14
$\Delta_1(\%)$	51.1	42.4	35.3	28.0
$\Delta_2(\%)$	-3.2	-1.1	-0.1	-0.0
$\sigma_1(\%)$	16.23	12.34	10.91	8.23
$\sigma_2(\%)$	7.45	5.77	3.92	3.34
总层数	15	16	17	18
$\Delta_1(\%)$	23.0	18.3	14.3	12.1
$\Delta_2(\%)$	-0.1	+0.0	-0.1	+0.0
$\sigma_1(\%)$	7.17	5.73	4.57	4.29
$\sigma_2(\%)$	2.93	2.57	2.32	2.12

比较表 2、表 3、表 4 中的  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  可以看出,经

过纵向泄漏修正后,要达到与不经过修正大体相当的能量分辨率,对于 10GeV 的电子所需的量能器厚度比不经过修正所需的厚度少三层(2.7 个辐射长度),对于 50GeV 和 120GeV 的电子所需的量能器厚度比不经过修正时少四层甚至更多.

因此对于均匀取样型的电磁量能器,在设计电磁量能器时,如果考虑到能量纵向泄漏的修正,可以减少量能器的厚度,从而达到节约经费、减少重量等目的.

对于全吸收型的电磁量能器(如 BGO 晶体量能器),可以采用如下的方法来增加其能量分辨率:在量能器的末端加一个辐射长度的补偿层,通过补偿层的能量沉积与总能量沉积来计算能量的纵向泄漏,运用公式(5)进行能量修正.运用这种办法可以大大提高能量分辨率,或者在达到相同能量分辨率的情况下大大减少量能器的厚度.

## 参考文献 (References)

- 1 Longo E. Nucl. Instrum. Methods, 2002, **A486**:7—12
- 2 LI Zu-Hao, CHEN Guo-Ming, CHEN Gang et al. HEP&NP, 2004, **28** (5):521(in Chinese)
- 3 Longo E, Sestili I. Nucl. Instrum. Methods, 1975, **128**:283
- 4 Rossi B. High Energy Particles, Englewood Cliffs. NJ: Prentice-Hall Inc., 1952

## Longitudinal Leakage Correction of Uniformly Sampling Electromagnetic Calorimeter\*

LI Zu-Hao<sup>1)</sup> CHEN Guo-Ming CHEN Gang YANG Chang-Gen YANG Min WANG Xiao-Bin  
ZHANG Shao-He YANG Zhao-Yu LÜ Yu-Sheng CHEN He-Sheng

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

**Abstract** Correction of longitudinal energy leakage for a lead scintillating fiber sandwiched electromagnetic calorimeter was studied. Electron data from AMS beam test in 2002 was analyzed.  $\Gamma$ -Function-Fit and Last-Layer-Energy-Deposit methods were used to correct longitudinal energy leakage. The linearity and resolution of energy were clearly improved after the correction. And the Last-Layer-Energy-Deposit method is more effective on energy resolution improving.

**Key words** calorimeter, energy resolution,  $\Gamma$  function fit, energy leakage correction

Received 12 March 2004, Revised 17 May 2004

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (10099631)

1) E-mail: lizh@mail.ihep.ac.cn