

北京谱仪 (BESIII) 的建造和调试

李卫国

北京谱仪 (BESIII) 探测器是 BEPCII 重大改造的重要部分, 是全新设计建造的高性能探测器, 用来记录和分析对撞的物理事例。至 2008 年 7 月 19 日观察到第一个对撞事例, BESIII 按照初步设计, 完成了建设任务, 其总体结构如图 1。

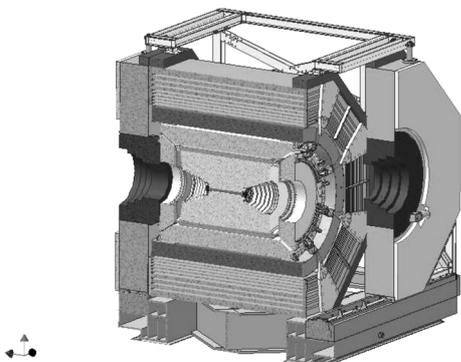


图 1 北京谱仪 III 总体结构图

由内到外, 主要的探测器有: 1. 单丝分辨率好于 $130\mu\text{m}$ 的 He 基气体漂移室; 2. 能量分辨率好于 $2.5\% @ 1\text{GeV}$ 的 CsI 量能器; 3. 时间分辨率好于 100ps 的飞行时间系统; 4. 场强为 1.0Tesla 的超导螺线管磁铁; 5. 基于 RPC 的 μ 子室系统。

在建设中, 完成了谱仪总体的机械系统, 包括了谱仪的支撑和轭铁、铍束流管等; 主漂移室 (MDC) 和电子学读出系统; 飞行时间计数器 (TOF) 和电子学读出系统; CsI 晶体电磁量能器 (EMC) 和电子学读出系统; 超导磁铁系统; 基于 RPC 的 μ 子室和电子学读出系统; 事例触发判选系统; 在线数据获取系统; 谱仪慢控制系统; 离线数据分析系统等。

在完成了初步设计后, 谱仪总体和各系统在研制和生产过程中进一步完善了设计并完成了工程设

计。主要的机械结构和部件通过招投标确定了制造单位; 各主要探测器和 MDC、EMC 电子学读出、事例触发判选、在线数据获取、谱仪慢控制、离线数据分析等系统由高能所承担研制、测试和安装任务; 中国科学技术大学完成了 TOF 和 μ 子室的电子学读出系统的研制、测试和安装; 超导磁铁系统通过高能所和美国 WANG NMR 公司合作完成工程设计, 在高能所绕制超导线圈、完成组装和调试。

在研制过程中, 各探测器和电子学系统经过了样机研制、小系统的宇宙线和束流实验, 通过了技术鉴定再进入批量生产, 保证了质量。事例触发判选、在线数据获取和各主要探测器分别进行了联合调试, 解决了存在的问题, 使探测器的总体调试能够顺利完成。谱仪总装完成后进行了宇宙线调试, 然后和加速器进行了近一年的联合调试和数据获取, 北京谱仪性能达到了设计的要求。

下面介绍各子系统的设计、研制、调试和测试结果。

一、漂移室系统

漂移室是最内层的子探测器, 用来测量末态带电粒子的径迹、动量, 同时还通过测量能量损失 (dE/dx) 鉴别带电粒子。漂移室要有大的立体覆盖角, 好的空间分辨, 高的动量分辨, 较好的 dE/dx 分辨, 要对低动量径迹有高的重建效率。要能适应高亮度高计数率的工作环境。

BESIII 漂移室采用具有台阶结构的端面设计, 使用 He/C₃H₈(60/40) 作为工作气体以减小多次散射提高动量分辨, 同时采用小单元结构设计 (内室部分采用半宽约 6mm 的类正方单元, 台阶及外室部分采用半宽约 8.1mm 的类正方单元)。漂移室共有 6796 根信号丝及信号读出道。

此外, 在为储存环提供注入束流的间隔里, 直线加速器还为中能物理实验厅和慢正电子提供电子束流, 进行多项科学实验研究。

BEPC II 投入运行后, 将加紧开展高能物理和同步

辐射实验研究, 不断提高对撞亮度等性能, 发挥对社会开放的大科学装置平台作用, 成为国际领先的高效率生产粲粒子的工厂, 国际一流水平的科研成果。

(中科院高能物理研究所 100049)

BESIII 漂移室的主要设计指标:

$\sigma_{XY} = 120\sim 150\mu\text{m}$; $\Delta P/P = 0.5\%\sim 0.7\%/1\text{GeV}$;
 $\sigma_{dE/dx} = 6\%\sim 8\%$ 。

漂移室采用内外室, 中间无分隔的结构。端板由内室端板, 台阶端板和外室大端板组成。内室端板和外室端板分别是由整块铝材加工而成, 端板设计成阶梯锥盘型结构。主漂移室的丝孔为 $\phi 3.2\pm 0.025\text{mm}$, 丝孔的位置度设计值为 0.025mm , 内漂移室和外漂移室组装后的 X, Y 的对应偏差 $\leq 0.10\text{mm}$ 。漂移室丝孔的直径误差小于设计值 $+0.025\text{mm}$, 达到了 $+0.015\text{mm}$ 。丝孔的位置精度(误差半径)分布的中心值为 0.025mm , 最大值为 0.050mm , 满足设计要求。

漂移室室体是由内筒, 外筒和端面板组成。漂移室的内筒和外筒在探测区域内的材料均为碳纤维。内筒长 844mm , 内径 118mm , 厚度 1.2mm 。外筒长 2582mm , 内径 1588mm , 厚度 12mm 。内筒主要承载内室丝的张力 ($\sim 100\text{kg}$), 内筒的实验轴向承载能力可达 500kg , 其轴向变形量小于 0.05mm 。外筒承担外室的丝张力总量约为 3500kg 。外筒轴向承载能力可达 5000kg , 其轴向变形量小于 0.05mm 。

固定丝的定位子在满足丝的精确定位和固定的同时, 要满足高压绝缘和方便人工穿丝。塑料件的材料为 LCP-A310 (液晶聚合物+30%玻璃纤维)。这种材料具有优异的耐热性能和成型加工性能, 很好的高压绝缘性能。塑料件的设计参数: 外圆直径 $\phi 3.2\pm 0.025\text{mm}$, 塑料件的定位小孔 $\phi 0.15\pm 0.01\text{mm}$, 内孔对外圆同轴度误差不大于 0.025mm 。高压的接入和信号的引出是由插入塑料件的大铜管来完成。

对定位子的塑料件进行了长期的高压实验, 并对定位子在不同温度和湿度的条件下的高压绝缘性能进行了测试。两种长度的定位子共生产了 10 万只。所有信号丝的定位子都按设计要求逐个检测。

在布丝过程中采用预应力的方法保证丝张力的稳定。信号丝和场丝分别为 $25\mu\text{m}$ 的镀金钨丝和 $125\mu\text{m}$ 的镀金铝丝。主漂移室采用垂直拉丝法, 在穿丝后通过定位子将丝固定在上下端板上, 并施加一定的张力。丝的固定采用夹小铜管(小铝管)的方法。漂移室的布丝过程中每天对拉完的

丝进行张力和漏电流的测量。对超出张力和漏电流设计的范围值的丝进行更换。信号丝的张力控制在 $\pm 5\%$, 场丝的张力控制在 $\pm 10\%$; 单元的漏电流控制在 5nA 。

BESIII 漂移室使用的工作气体为氦+丙烷 $\text{He}/\text{C}_2\text{H}_8$ (60/40), 用胶防止渗漏。结果漏气率国际最小。

漂移室电子学系统包括: 跨阻型前置放大器、电荷-时间测量插件、VME 机箱和各类 VME 控制插件系统的特点为电荷-时间测量插件集放大成形、甄别定时、电荷测量、时间测量、数据读出于一体, 减少了电路品种, 增强了可靠性并节省了造价; 大规模地引入了 FPGA, 使复杂的硬件设计变得相对简单, 增强了高速处理信号的能力; 引入了当前先进的 HPTDC 芯片, 使时间测量变得相对简单, 提升了系统性能; 提供了完善的检测系统性能的手段。

MDC 电子学主要性能测试结果: 电荷分辨设计 8fc , 测试值 6fc ; 电荷积分非线性设计 2% , 测试值 0.4% ; 时间分辨设计 0.5ns , 测试值 70ps 。时间积分非线性设计 0.5% , 测试值 0.015% 。

漂移室建造完成后, 进行了宇宙线测试。宇宙线测试研究了空间分辨、空间分辨随漂移距离的变化以及不同时间阈下各丝层的空间分辨等。在标准时间阈下采用双高斯函数对残差分布进行拟合得到 $120\mu\text{m}$ 的空间分辨。在单元大部分区域效率 $>98\%$ 。

漂移室完成宇宙线的测试后, 将 TOF 探测器捆绑在漂移室的外筒上并安装就位到谱仪, 连接读出电子学电缆, 高压电缆, 地线和屏蔽。进行了 BESIII 整体宇宙线测试, 表明漂移室的性能达到了设计要求。

漂移室在与加速器联调的过程中出现的一个严重的问题是加速器运行对漂移室的噪声影响。通过与加速器的通力合作, 采取了谱仪内加速器部件的屏蔽, 磁铁电源的输出端加电容以减小输出电流脉冲的过冲和对所有 BPM 部件的输出电缆上加磁环等措施, 大大减小了漂移室的噪声, 能正常取数。离线数据分析中主要利用在 $\psi(2\text{S})$ 获取的 Bhabha 事例对漂移室的时间和电离能损 (dE/dx) 进行全面细致的离线刻度, 刻度后漂移室的性能为漂移室空间分辨为 $138\mu\text{m}$, 如图 2 所示。

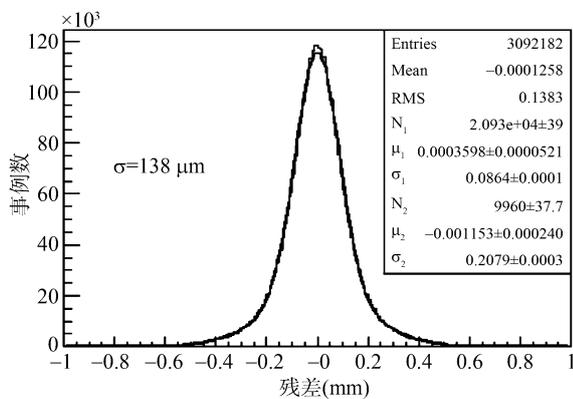


图2 漂移室残差分布

动量分辨拟合得到在 $\psi(2S)$ Bhabha 正副电子动量分辨 σ_p 为 15.8 MeV/c, 为 0.86% @ 1.84GeV/c, 如图3。

在 dE/dx 计算中使用 70%截断, 即低端 5%, 高端 25%。目前得到的 dE/dx 的分辨好于 5.9%。

运行结果表明, BESIII 漂移室的状况良好。数据分析结果表明漂移室的主要性能指标好于验收指标, 见表1。

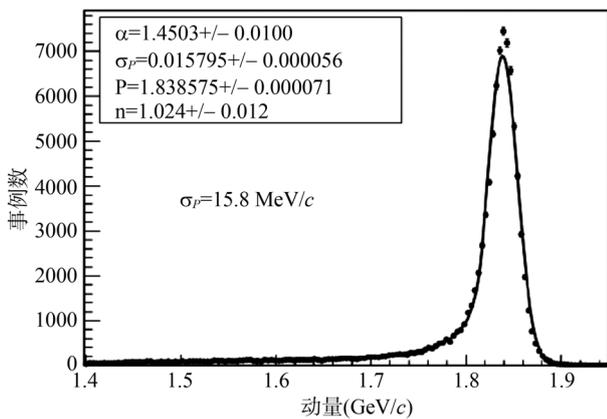


图3 $\psi(2S)$ 处 Bhabha 电子的动量分布

表1 漂移室主要性能指标和测量值

	漂移室验收指标	漂移室运行测量指标
动量分辨 (1 GeV)	0.7% (0.94% / 1.84GeV)	好于 0.7% (0.86%/1.84GeV)
dE/dx 分辨	8%	好于 6%

二、飞行时间探测器

飞行时间探测器桶部采用双层双端读出, 每层由塑料闪烁体 BC408 在两端直接耦合光电倍增管; 端盖采用扇型塑料闪烁体 BC404、在小端垂直耦合光电倍增管。桶部 TOF 的接收度为 0.82, 端盖 TOF

的接收度从 0.85 到 0.95。BESIII 飞行时间探测器的具体结构和尺寸如图4所示。

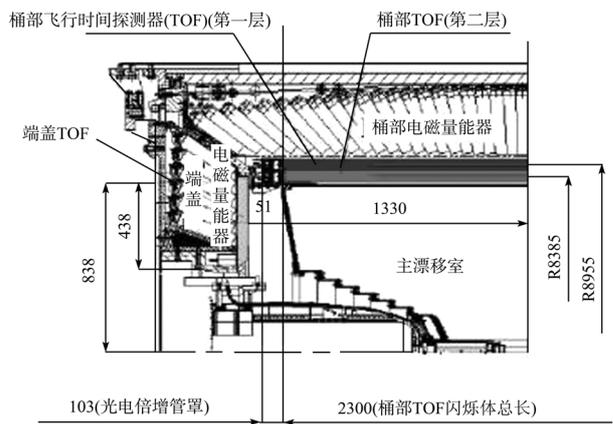


图4 飞行时间探测器结构

飞行时间探测器主要物理目标是粒子鉴别, 其能力大小主要由相同动量粒子的飞行时间差和飞行时间探测器的时间分辨率所决定。

每层 TOF 的时间分辨率受表2中多种因素影响, 总的时间分辨率为各项的平方之和的开方值。

表2 TOF 时间分辨率分析

时间分辨率项目	桶部时间分辨率	端盖时间分辨率
单层 TOF 本征时间分辨率	80~90ps	80ps
束团时间的不确定性	20ps	20ps
束团长度的不确定性	15mm, 35ps	15mm, 35ps
MDC 外推的定位精度	5mm, 33ps	10mm, 100ps
电子学测量的精度	25ps	25ps
预期飞行时间精度	30ps	30ps
时幅修正	10ps	10ps
单层 TOF 总时间分辨率	100~120ps	110~130ps
双层 TOF 总时间分辨率	80~90ps	

对飞行时间探测器的小模型进行了深入的实验, 包括闪烁体的选择、闪烁体的抗辐照性能、包装材料的选择、光电倍增管的性能、机械结构的强度实验等。通过束流实验确定, 对于桶部闪烁体因其长度 2.30 米, 选择衰减长度较长、发光较快、光产额较大的 BC408; 对于端盖闪烁体, 长度比较短, 选择发光更快、光产额更大、但衰减长度比较短的 BC404。

考虑到塑料闪烁体在辐照环境下工作, 研究了

塑料闪烁体的光产额、透过率、发射谱等性能随辐照剂量的变化。实验表明在辐照达 1,000,000rad 后它的性能明显变坏,在 BESIII 的工作环境中的辐照在年 1000rad 的量级上,可以满足使用要求。

光电倍增管在 10000 高斯强磁场下工作,选择滨松公司生产的精细网型光电倍增管 R5924。其在磁场下增益性能的变化非常明显,在工作磁场下增益下降达 100 倍。确定要增加一个快速的 10 倍前置放大器,保证增益、延长光电倍增管的寿命。

闪烁体的不同包装对闪烁光的传播路径和时间有一定影响,从而影响时间分辨。利用 1:1 探测器模型进行了束流实验和模拟计算。结果表明,对于桶部选用铝箔可以得到比较好的时间分辨;对于端盖,因为它的形状特殊、垂直耦合,对光的收集非常敏感,强反射率的 ESR 膜非常有效。在国内首先采用 ESR 膜用于闪烁体包装,后来国内很多项目为增加光收集也采用了这种材料。

为保证质量,对每个闪烁体、光电倍增管等都进行了详细的性能测试,对每根组装好的探测器进行了测试并记录存档。

飞行时间探测器的检测系统由美国夏威夷大学负责研制,采用激光二极管作为光源,可以很好地实现对飞行时间探测器各个单元的时间、电荷等信息的运行监测。此系统与世界上同类探测器相比,在技术上是比较领先的,光强稳定、频率高、操控简便、维修方便。约一年的运行表明,工作稳定。

快前置放大器的主要要求为:放大器增益 10 倍,上升时间 $\leq 2\text{ns}$,线性动态范围至 4V(差分信号),噪声峰峰值 $<20\text{mV}$ 。放大器设计为两级增益的

快电压放大器,信号从 PMT 阳极输出,通过交流耦合输入到前置放大器,输出采用差分形式。

TOF 对读出电子学系统的要求为:时间测量精度 $\sigma \leq 25\text{ps}$,动态范围 0~60 ns;电荷测量精度折算到幅度要求为 $\sigma q \leq 10\text{mV}$,动态范围 200mV ~ 4V。为达到 25ps 的分辨要求,采用双阈甄别技术。低阈甄别器输出信号经过适当延迟后与高阈甄别器的输出信号符合,利用高阈来剔除噪声和干扰信号,利用低阈甄别实现比较高精度的时间测量。时间数字转换采用 CERN 的 HPTDC 芯片,工作在最高时间分辨测量精度的模式,精度 25ps 以内。电荷测量采用电荷时间转换电路,把电荷信息转换成时间信息,采用 HPTDC 进行时间测量。

TOF 直接测量的信息包括原始飞行时间和电荷量,为了得到准确的飞行时间信息,还需要对幅游动、粒子在闪烁体上击中位置、光在闪烁体中的传播时间以及电缆的时间延时等因素进行刻度和修正。利用获取的 $\psi(2\text{S})$ 数据选取 Bhabha 事例做 TOF 的离线刻度,利用得到的刻度常数对原始飞行时间信息进行重建。

对桶部单层 TOF 两端时间进行加权平均后可以得到单层双端的时间分辨。对于桶部 TOF 双层时间测量值通过类似的方法加权平均。

对 Bhabha 事例,重建后的 TOF 桶部单端、单层和双层时间分辨,分别为 152ps、104ps 和 86ps,见图 5。端盖的时间分辨率为 125ps。

三、电磁量能器

BESIII CsI(Tl)晶体量能器系统是国内自行设计,制作,安装完成的,是目前国际高能物理界最好的晶体电磁量能器之一。

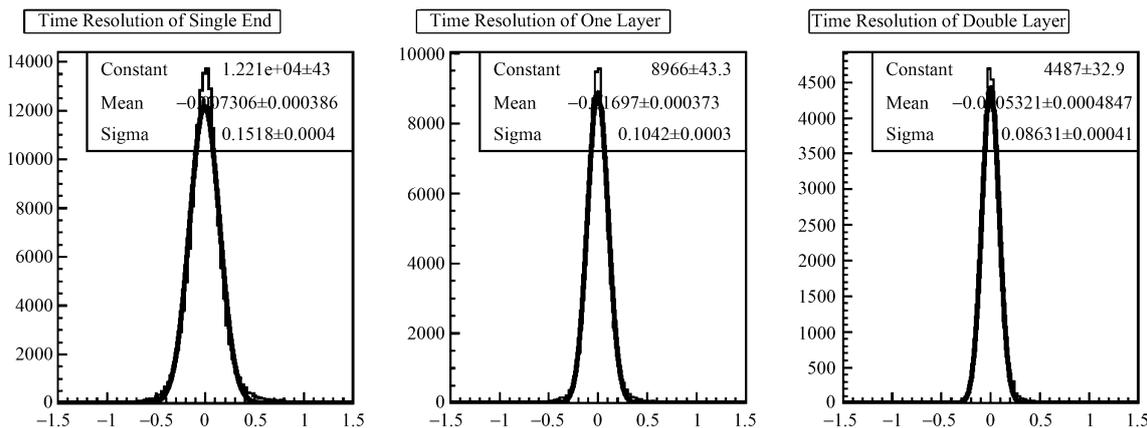


图 5 桶部 TOF 的单端(左)、单层(中)和双层(右)时间分辨

电磁量能器(EMC)设计指标为：测量 γ 光子的能量覆盖范围为 20 MeV~2 GeV，重点能区低于 500 MeV；能量分辨率达到 $2.5\%/\sqrt{E}$ (GeV)。

电磁簇射的位置分辨 $\sigma_{xy} \leq 6 \text{ mm}/\sqrt{E}$ (GeV)；可以提供中性 (γ) 能量触发；在能量大于 200MeV 的区域具有良好的 e/π 分辨和具有良好的双 γ 角分辨能力；晶体探测单元的电子学噪声水平小于 220keV。

BESIII电磁量能器由桶部和端盖两部分组成(图 6)，以正电子束流为中心轴向，桶部覆盖角 $146.5^\circ \rightarrow 33.5^\circ$ ($\cos\theta=0.83$)，桶部内半径为 94cm，内长为 275 cm。端盖位于对撞点 $Z = \pm 138\text{cm}$ 区，内半径为 50cm，覆盖角从 $32.5^\circ \rightarrow 21.3^\circ$ ($\cos\theta=0.93$)，总立体角为 $93\%/4\pi$ 。

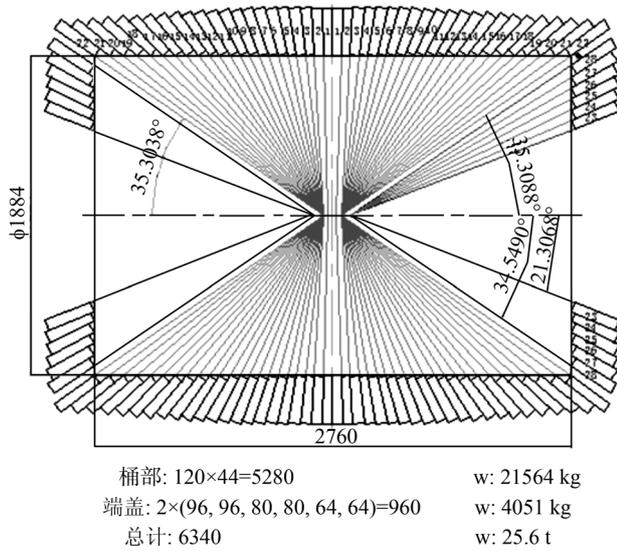


图 6 EMC 晶体排列截面示意图

BESIII量能器由桶部和端盖合计 6240 块 CsI(Tl) 晶体探测单元组成，晶体长度为 28 厘米即 15 个辐射长度，晶体总重量超过 24 吨。桶部在 Z 方向有 44 圈晶体，每圈有 120 块晶体，总共有 5280 块晶体，对撞中心 θ 向的左右二部分的每圈晶体，除第一圈外，各都指向距对撞中心 5cm 的点，以避免光在晶体间泄漏过多。

东西端盖各由两个半圆组成，各装有 480 块晶体探测单元，共 960 个探测单元。每层晶体各指向距对撞中心 10cm 的点。

图 7 显示了晶体探测单元结构，晶体的外包装反射材料是两层 130 μm 的 Tyvek 纤维白纸，再加 50 μm 铝和绝缘聚脂复合膜。每块晶体耦合两片光二极管(灵敏面积 $1\text{cm} \times 2\text{cm}$)、分别通过两路前放读出(晶体前放盒)。考虑到晶体的支撑，利用 CsI(Tl) 晶体材质类似于金属材料铅的黏性性能，在晶体上打四个螺钉孔，将铝基板和铝前放盒直接安装在晶体上，然后安装一块 L 形的铝托板可以将晶体探测单元固定到量能器支撑架的金属梁上。

EMC 电子学读数为从晶体前放来的 2 路的信号，通过 18 米长的电缆(14 对芯)进入一路主放大器成形放大后，采用 3 量程的 FADC 进行信号扫描，读出峰位电荷量和峰位对应的扫描时间(50ns/bit)量。另外电子学功能上要提供能量触发(16 路主放相加)信号，接受一级触发信号的控制和可以进行系统电荷的刻度。

为了减少晶体间的死物质层尽可能提高能量分辨率，EMC 机械结构设计配合吊挂晶体单元的机械结构。桶部量能器的支撑架为条板结构，在 Φ 方向分

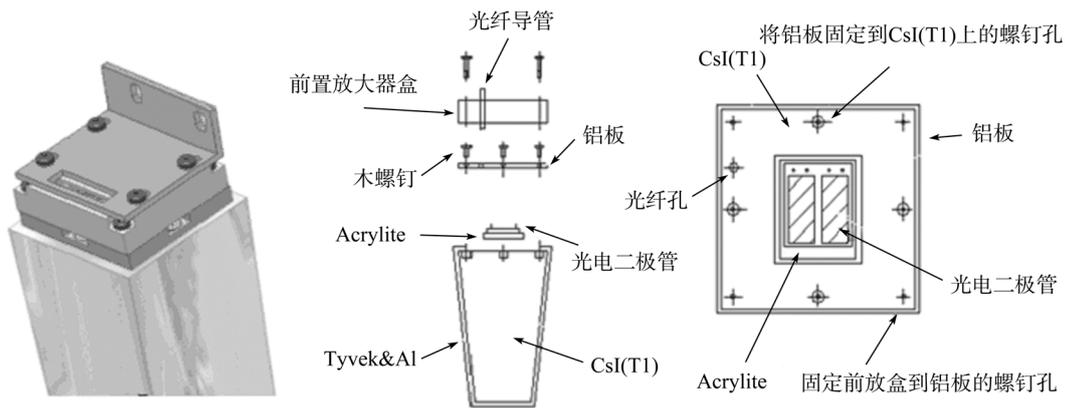


图 7 晶体探测单元结构示意图

60 等分，外壁由 60 件无磁不锈钢外壳板组成，外壳版的两端用螺钉与端环相连。外壳版的下边沿焊有一不锈钢的剪口梁，2 排晶体（88 块）吊挂在一条剪口梁上；外壳版的两侧通过两块不锈钢加强板与两邻的外壳版相连，如此使整个支撑架相连。对端部量能器的支撑结构，为使端盖晶体探测单元紧密排列，晶体探测单元首先排列进圆容器内，采用圆螺杆（固定在前放盒上的附加板）吊挂在端盖支撑架的斜梁上，斜梁上的圆孔与圆螺杆为配装并加环氧胶控制定位。

在 EMC 制作阶段，对各厂家的晶体（6240 桶部 22 种型号；端部 22 种型号）进行了外观检查，尺寸测量，相对发光输出，发光均匀性，抗辐照性能。表 3 为 3 个晶体生产厂家订购数量，最终提供数量和因质量问题退货数量；图 8 为晶体发光性能测量结果分布。

表 3 晶体厂家订购数量和退货数量

	法国 Sanit-Gobain	上海 硅酸盐所	北京 Hamamatsu	总计
订货	2040(960)	1920	1320	5280(960)
到货	2040(960)	1920	1320	5280(960)
废品	87	316	79	482
替换	87	316	79	482

对日本滨松的 PDS2744-08（13200 片）进行暗电流测量和结电容测量，然后老化（工作电压下加温 65℃，150h），再分别测量暗电流和结电容。测量 PD 的相对光电转换效率，并进行分类，作为晶体单元的配对使用。对前置放大器进行检查，以前放盒为单元，分别测量 2 路的相对放大倍数和噪声水平，使 2 路前放的放大差别小于 3%。

完成了晶体探测单元的组装，晶体探测单元的宇宙射线检查。选取穿透晶体阵列的宇宙射线事例，定位（塑料闪烁体条 X, Y/cm）测量沉积在晶体中单位能量的输出，将晶体长度分为 9 段输出，与 PMT 放射源测量进行对照，检验 PD 与晶体的粘接，PD 与前放连接质量。对 384 通道电子学模型的测试并通过验收，进入批量生产。进行了晶体探测单元（6×6）阵列与电子学的试验束联调。晶体探测单元阵列的束流实验结果：能量分辨（1GeV）：2.62%（束流~1%）；位置分辨（1GeV）：6mm；电子学噪声：160keV；时间分辨：150ns。

为了监测晶体的辐射损伤导致晶体发光衰减，建立了一套 LED-光纤监测系统包括 76 套 LED-光纤

束，光纤通过前放盒插入到晶体表面。LED 光强可自动变化（10 步），等效能量从 10MeV~2GeV。

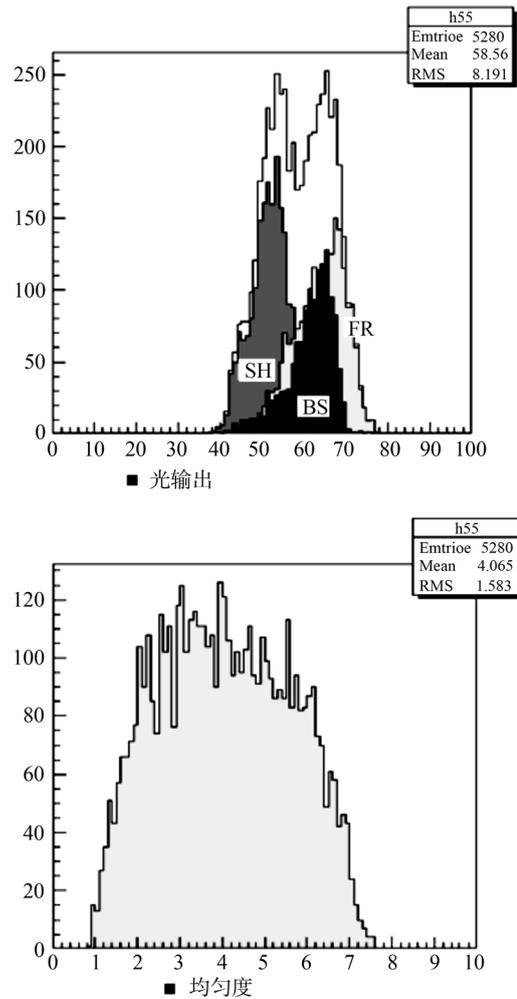


图 8 晶体相对发光输出和发光均匀测量结果

在组装和总装阶段，先进行桶部量能器模块的组装：对每个模块的晶体探测单元（88）用 LED-光纤光脉冲进行相对测量；放入模块槽安装，确保晶体紧靠并安装绝缘片、导热带、电缆、L 形板、丁字梁和 L 形板配孔，安装冷却水管、固定 L 形板、整理电缆、安装 LED-光纤束和每根光纤，连接电缆到测量系统——光脉冲测量每个通道。经过检测正常后吊装运输到谱仪大厅。

在谱仪大厅内进行 60 个模块的组装：模块脱离安装槽、吊装入 EMC 大桶。在检查工作正常后桶部量能器装入到谱仪内。2008 年 5 月 CsI(Tl)晶体量能器全部安装完成，并通过宇宙线测试，全部探测单元工作正常。按同样的步骤完成端部量能器模块的组装、检查和安装到谱仪。

电磁量能器读出电子学的主要功能是测量电荷量，要求 EMC 电子学读出系统除了具有噪声低、通道间串扰小、线性好的特点外。EMC 读出电子学系统达到以下技术指标，满足系统设计要求：电子学数字化动态范围 15bit；系统噪声<1000 个电子电荷；1GeV 能量分辨率<1%；系统串扰<1.5%；量程非线性<2%；台基长期稳定性 1 LSB/80 小时。在谱仪总装完成后电子学刻度得到的噪声水平小于（ $2.2 \times 60\text{keV}/\text{ADC}$ 道）130keV，在有束流的环境下，利用高斯拟和仍然小于 150keV。

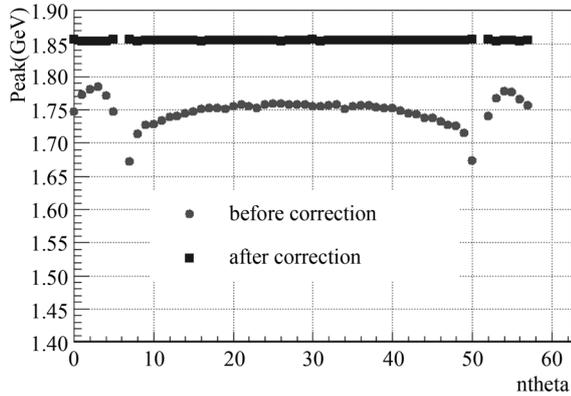


图 9 用 1.843GeV 的 Bhabha 事例得到的能量随 Z 向晶体分布

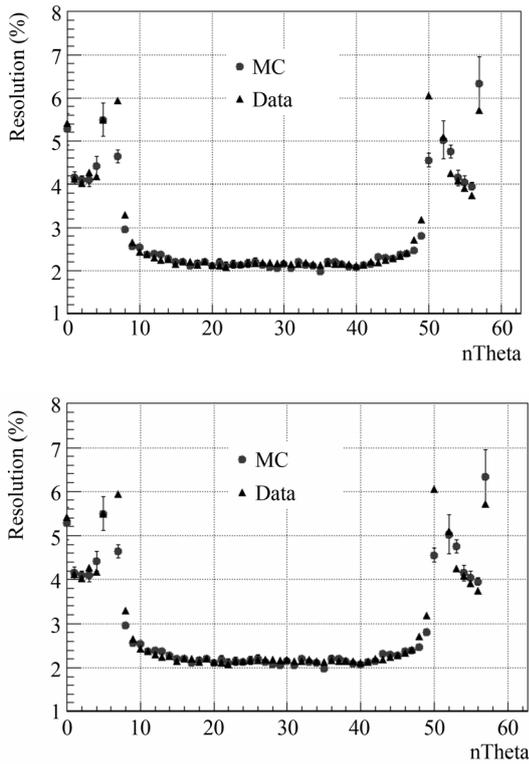


图 10 1.843GeV 的 Bhabha 和双光子事例得到的能量分布，和模拟比较

利用宇宙射线和 Bhabha 事例进行能量刻度和利用 $\psi(2S)$ 数据中的 Bhabha 和双光子事例进行能量修正（图 9），桶部 EMC 的能量分辨分别为 2.4% 和 2.7%，和模拟符合很好（图 10）。

利用 1.843GeV 的对撞产生的多个末态事例连续能量分布的电子和光子，给出桶部量能器对应不同能量的能量分辨率（图 11）。利用 1.843GeV 的 Bhabha 和双光子事例，通过晶体沉积能量的权重计算，给出桶部 EMC 的位置分辨小于 6mm。

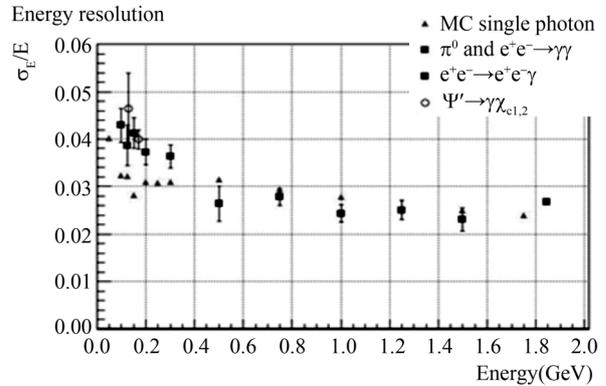


图 11 桶部 EMC 光子能量分辨率随能量的分布

在设计中 EMC 电子学可以读出 EMC 能量的达峰时间，以去除束流本底。

数据表明 EMC 时间的分布与能量基本无关，可以得到时间分辨小于 180ns。EMC 时间信息可用于排除末态束流光子本底。

利用 LED-光纤光脉冲监测晶体的辐照损伤通过 5 个月的 LED-光纤系统监测，得到桶部量能器的晶体发光变化很小，少数的减少 1%，端盖晶体最大发光减少 3%。

数据分析结果表明 EMC 性能达到设计指标：能量分辨（1GeV）2.5%；位置分辨（1GeV）6mm；电子学噪声 150keV；达峰时间分辨 180ns。

四、MUON 探测器

BESIII μ 子鉴别器选用阻性平面板（RPC）作为探测器，因计数率不高，工作模式采用流光模式。

桶部 μ 子鉴别器的内半径 170cm，外半径 262cm，按八边形排列，为了分辨尽可能低动量的 μ 和 π ，在超导线圈的外面和第一层磁铁之间铺设第一层 RPC，再往外面都是吸收铁和 RPC 夹层结构，每两层铁之间留 4cm 缝隙，在缝隙中排列 RPC。从内到外共 8 层吸收铁，总的吸收铁厚度约 41cm，最外层还有一层 15cm 厚的保护铁，读出条的宽度为

4cm。探测器模块中，RPC 采用不同尺寸的长方形 RPC 交错排列，以减小死区，两层 RPC 用铝盒封装在一起。读出条夹在两层 RPC 中间，单数层 Z 方向读出，双数层 Y 方向读出。高压系统采用在阻性板的阳极和阴极分别加正负高压的方法，总电压约为 8000 伏左右。

建成后的 μ 子鉴别器，在理论上单层位置分辨在 ϕ 方向可以达到 $4/\sqrt{12} \approx 1.2\text{cm}$ ，考虑到探测器层和层之间都有 3~8cm 的铁，多次散射造成的位置不确定为 4~8cm，因此探测器的位置分辨率主要有多次散射和重建算法决定，估计应小于 1.7cm。

RPC 的关键部件是气体室，它的制作工艺要求较高，要求阻性板的阻抗、厚度、间隙和所喷的石墨层均匀，尤其是阻性板内表面的光洁度要求很高。阻性板厚度为 2mm，再在阻性板的表面压了一层密胺膜，光洁度仪测试其光洁度达到和玻璃相近的水平，是国际上首次采用的技术。其体电阻在室温下为 $1 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 。两块板之间由两毫米厚的绝缘材料做成的圆形垫片分开。垫片间距为 10cm。两板之间的间隙里通过工作气体（气体比分为 Ar:F134A:异丁烷=50:42:8）周围由绝缘材料密封。在气体室两端安装了通气管。高压极和读出条之间有 PET 膜隔离。阻性板外表面喷涂一层石墨层作为电极。模型试验的结果显示，制作的 RPC 在 6.8kV 达到了坪区，在 7.2kV 时效率接近 98%。坪长达到 1.0kV。单计数率在效率坪区里面基本保持在小于 0.1 Hz/cm²，暗电流 2 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ 。实验数据见图 12。

用这种技术生产出的 RPC 既达到了玻璃 RPC 的良好性能，又避免了玻璃分量重、易碎和易被腐蚀的缺陷，也避免了涂油的电木板 RPC 稳定性差的缺陷。同时，使用这种技术在规模生产中容易保证质量和速度，有利于大批量生产。

我们对探测器模型进行了长达两年的寿命试验、辐照损伤试验，结果显示，经过长时间的运行，探测器效率没有看到明显的下降，单计数率和暗电流经过长时间运行后可以下降到更低的水平。

Muon 电子学 FEC 小系统测试：信号正常；通道间串扰 <15mV@600mV 输入信号；触发率 >4kHz；Fast Or 效率 100%；抗辐照性能达到低能伽玛射线 28000rd，FEC 是安全的，对 14MeV/2.5MeV 中子，100/cm²/S，SEU~0.54 $\times 10^{-2}$ /h 进行了测试；读出性能测试满足系统要求，无错误发生。

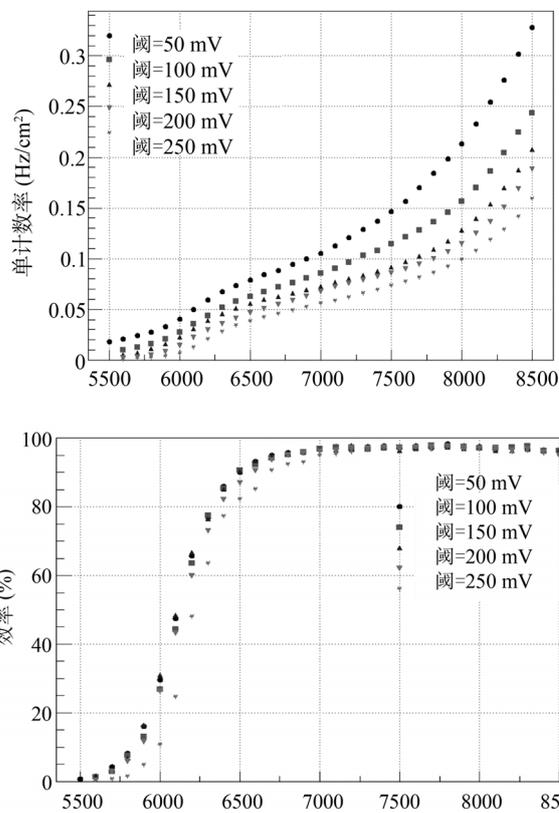


图 12 RPC 单计数率随高压的变化曲线(左)，效率坪曲线(右)

对生产出的每个 RPC 都进行了认真测量，在 8000V 高压的情况下，平均效率达到 96%，平均单计数率达到 0.13Hz/cm²。对组装后的探测器模块也认真地进行了检查、测试，确保探测器质量，测试结果显示性能良好，模块平均效率达到 98%，位置分辨达到 14.2mm。

利用获取数据的双 μ 事例，分析探测器性能，高压 7200 \pm 200V，阈值 100mV。通过重建双 μ 事例，计算 μ 径迹在每层的预期位置与最近着火读出条中心位置的残差，用高斯拟合残差分布，得到的方差即为空间分辨。分析结果： $\sigma_{r\phi}=14.75\text{mm}$ ， $\sigma_z=16.13\text{mm}$ 。

五、超导磁铁系统

决定以我国自主研发北京谱仪超导磁体，完成工程设计并通过国际评审后，选择与美国 WANG NMR 公司合作，进入加工制造阶段。

超导电缆由日本日立电缆制造。

磁体主要部件线圈支持筒、液氮屏、真空容器等，由中国舰船研究院加工制作。特殊截面的铝合金液氮、液氮管路由河南一家企业制造。超导磁体

的 4000A、10V 高稳定度直流电源由北京宝辰新技术公司制造。测磁机由课题组确定整体方案、完成初步设计,由北京机床研究所制造。磁体真空系统自行设计并总成。失超保护系统和 WANG NMR 公司合作研制和集成。超导磁体监控系统自行研制和集成。

核心部件超导线圈在所内绕制。在正样线圈绕制之前,做了一个与正样线圈直径相同、长度约 1/8 的模型线圈,得到了重要的绕制经验和参数。2005 年中完成正样超导线圈绕制后,与各筒体进行装配,运到谱仪大厅安装,准直定位,然后安装与低温系统、电源、真空机组之间联接的阀箱。在进行低温实验时,WANG NMR 公司制作的阀箱内的关键部件电流引线达不到要求。高能所自己研制了电流引线,成功通过了低温实验。

2006 年 9 月 BESIII 超导磁体励磁测试成功,达到了 1T 的设计值。随后,安装测磁机,并与加速器对撞区超导磁体系统(SIM)进行联合励磁调试,于 2007 年 7 月完成了联合测磁。测磁数据进行处理修正后已交付使用。

2008 年 6 月至 7 月,在对撞点位置,谱仪与加速器所有系统总成后,重新对超导磁体励磁,并解决了大系统总调时失超探测器的抗干扰、加速器 SIM 失超带动 SSM 失超等问题,实现了 BESIII 超导磁体的稳定运行。

六、机械系统

BESIII 机械系统是北京谱仪的机械主体结构,是一台综合性的重型非标设备,新建造的北京谱仪机械结构长 11m,宽 6m,高 6.5m,总重量约 650 吨。装配后有很好的强度、刚度和精度。桶部轭铁和端部轭铁为北京谱仪磁场提供磁回路,同时又是 Muon 探测器的吸收体,机械系统为谱仪的内部探测器提供一组准确定位、连接和调整的支撑结构,也是电缆、水管、气管以及超导磁体阀箱支座等的固定安装基础。当内部子探测器需要维修时,北京谱仪的端部轭铁和活动极头可以很方便地打开。基座可以使谱仪整体平稳升降和拖动,具有良好的可移动性和可调整性。

桶部轭铁为螺栓连接的 9 层平板空心结构,刚度较弱,安装时,其八边形内切圆直径 3480mm 的几何精度控制在 2mm 以内,达到国际同类设备的精度指标。端部轭铁也是螺栓连接的 9 层平板空心结构,桶部轭铁和端部轭铁的间隙小于 0.4mm,东、

西活动极头同轴度误差小于 1mm。端部轭铁关闭时,对缝处在 Z 轴线上,安装后的闭合间隙 $\leq 0.5\text{mm}$ /全面积,重复定位精度 $\leq 0.5\text{mm}$ /全面积。

经鉴定,整机性能和主要技术指标达到了国际当代同类设备的先进水平。

中心束流管是 BESIII 的主要部件之一,处于北京谱仪的中心部位,加速聚焦后的正负电子束团在中心束流管内对撞。束流管在国内研制加工。由中心铍管、放大腔、外延铜管构成。要求机械强度高、内表面粗糙度小、密封性能好,对真空度、冷却效果等参数要求都很高。中心铍管由内、外铍管组成内铍管内壁要镀 $15\mu\text{m}$ 厚的金,要求镀层的厚度均匀、附着力强。

这种结构在国内是首次研制,各项指标均达到或好于设计指标。

七、触发判选系统

触发判选系统的设计目标是利用 BESIII 各个探测器电子学提供的信号及系统时钟,设计并建造一套快速高效的事例选择与数据读出控制系统,用 BESIII 在取数运行时抑制束流丢失及宇宙线等本底事例和选择好事例提供关键的技术手段。从 2001 年起,经过预制研究、模拟仿真与方案优化、系统设计、硬件设计、小系统验收与批量生产、系统调试、BESIII 联调等过程,最终完成了建造任务。

通过系统的模拟研究与优化,最终确定了 MDC 以超层寻找径迹段,在径迹段的基础上进行短径迹和长径迹的寻迹,EMC 以 4×4 排列的 16 块晶体为基本触发单元,在基本触发单元的基础上进行簇团的寻找和总能量的相加与能量阈的判断等,最终由总触发综合处理判断。径迹段与径迹的组合数目和合理的阈值都经过了系统优化。

在确定了采用最新的技术路线后,进行了相关技术的预制研究:为了克服各个前端电子学在触发系统进行共地连接可能造成各个电子学子系统间的共地回路电流引起的串扰问题,采用光纤进行了隔离研究。光纤传输是信号的串行传输,触发系统中需要对不同光纤通道的信号进行同步和时间对齐,研究成功后应用于工程。探测器结构的不对称性特别是 MDC 信号丝数量不是 8 的倍数,给触发系统硬件设计带来的困难。高速串行技术 RocketIO 的出现为我们提供了一种可能的解决方案。经过仔细研究,进行了多版本的设计研究,最终确定了可行的技术方案、并最终得以成功应用,实现单道

1.75Gbps、整体 205Gbps 的同步实时的数据传输率，使得最后触发系统只有 3 个 VME 机箱，非常简单。光纤和 RocketIO 这两项关键技术的应用，使得触发系统的设计具有国际先进水平。

触发系统区别于其他系统的主要特点是要根据实验进行过程中的需要功能要灵活可变。因此在板级设计和系统级的设计中都贯彻了这一设计理念。在器件选型时 FPGA 的资源要在 50% 以下，预留未来的更改资源，板上/面板/系统等灵活的加载方式，便于功能修改。经过调试触发系统给出触发通过 L1 信号，工作稳定，L1 时滞可调，根据需要现调整为 7.6 μ s。晃动为 0.4 μ s 左右，在 $1.3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 亮度下，事例率~1000Hz,其中好事例约 150，本底小于 850，离线数据分析获得的触发判选效率对 Bhabha 事例的分析给出，带电道效率 99%，加上中性道的效率，整体效率接近 100%，指标满足设计要求。

八、数据获取系统

BESIII 数据获取系统的主要任务是获取经过一级触发判选后的前端电子学事例数据，经过两级计算机预处理和高速网络传输，将分布在各 VME 读出机箱中的事例数据迅速地汇集到在线计算机系统上，进行事例组装和在线过滤，整理成为完整的有效事例，最终将标记的事例数据记录到永久介质上。设计目标：能在事例率 4000Hz，事例平均长度小于 12kB 的条件下连续稳定获取数据 24 小时以上，死时间小于 5%。

设计完成的 BESIII 数据获取系统是由上百个处理器构成的分布式并行处理系统，如图 13 所示，各个处理器分别完成相对独立的任务，可以并行地工作。PowerPC 和读出计算机处理的只是其中某个子探测器的全部或部分信息，在线数据处理机群计算机通过千兆网络交换机处理完整的事例数据。经过 PowerPC、读出计算机和在线数据处理机群计算机三级处理，最终组装成一个完整的事例数据传送到文件服务器，并进一步传送到计算中心记录到永久介质中。BESIII 数据获取系统除完成上述的数据读出任务外，还需要提供友好的运行控制界面和实时探测器状态监测，完成部分数据处理任务，如格式转换、直方图填充和提供在线过滤框架等。另外由于高能物理实验需要长时间不间断运行，数据获取系统在一开始设计时就充分考虑它的可靠性，具有一定的容错能力。采用模块化程序设计，提高系统的可扩展性。

测试结果表明 BESIII 数据获取系统每秒钟处理的数据量超过 200M 字节，BESIII 数据获取系统的各项测试结果均达到了项目原定的设计指标；系统的多项指标尚有余量，同时系统具有一定的检错和容错能力；在漂移室系统的宇宙线实验和束流实验中，各项功能运行正常，系统长期工作稳定可靠。在宇宙线实验和加速器对撞束流实验中，数据获取系统运行稳定可靠。

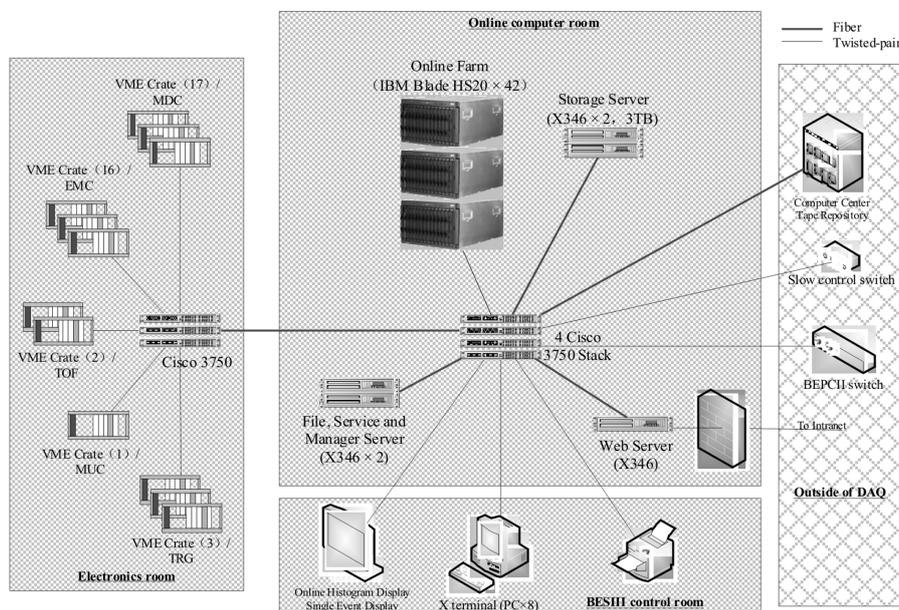


图 13 BESIII 数据获取系统结构

在实际取数测试中，总数据率达到 90Mbytes/s 的情况下系统运行稳定，达到系统的设计指标。从数据获取能力看，与 BESII 数据获取系统相比提高了 1000 多倍。在线的软件触发系统可以进一步去除本底。

BES III 数据质量监测 (data quality monitoring) 系统利用离线重建算法重建的事例，实时监测数据质量和探测器性能。DQM 系统还负责在线单事例的显示。

九、慢控制系统和技术支持系统

系统的主要任务是监测北京谱仪探测器、电子学系统以及运行环境的状态，实现远程控制部分设备，通过连锁系统的保护，确保设备和人员的安全，监测运行参数的变化，确保探测器高精度的物理测量。技术支持系统为北京谱仪探测器、电子学系统提供一个稳定的运行环境。

慢控制系统需监测达到 9000 数据点，4000 个硬件通道，数据量达 100GB/年。主要包括：探测器、电子学系统及谱仪运行环境的温度、湿度监测；探测器高压、电子学低压的监测、控制和连锁保护；电子学 VME 机箱的监测和控制；探测器气体自动配比系统；北京谱仪安全连锁系统；剂量率监测和累计剂量监测系统。

自主开发的温湿度监测系统测量精度温度可达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，湿度可达 $\pm 3\%\text{RH}$ 。我们选用的探头可以耐辐照达 10 年以上。

基于工业可编程控制器 (PLC) 技术设计的气体自动配比系统配比精度可达 $\pm 0.1\%$ ，年运行稳定性 $\pm 1\%$ 。PLC 技术即保证配比的精度，又保证系统长期可靠运行。

剂量率监测系统可以实时监测敏感点的辐照剂量率，给加速器调试或设计加速器束流挡板提供依据。为此建造的剂量率监测系统的精度为 5mrad/s，累计剂量监测精度为 1.5rad。

成功采用 LabVIEW 开发慢控制系统软件，在如此大规模的控制系统上的应用在世界是极为少见的。

设计完成了谱仪相关的配电系统和地线系统，地线系统接地阻值要求 4Ω ，实测接地电阻 1Ω 。

谱仪电子学安装在三层四组平台上。完成了电子学机柜设备冷却系统。

重新设计、制作、安装中控台，新装大型背景墙及运行参量显示大屏，新增谱仪视频监测系统。

十、谱仪总结

BESIII 探测器已完成全部的设计、研制、安装与调试任务。2008 年 8 月至 12 月进行了试运行，共采集了 1300 万 ψ ' 事例。利用这些事例，经过对各子探测器的刻度、标定与重建，得到各子探测器的性能指标如表 4 所示。

表 4 BESIII 主要探测器设计指标和测量值

子探测器		设计指标	测量值
主漂移室	动量分辨 (1 GeV)	0.5%~0.7%	0.7 %
	dE/dx 分辨	6%~8%	6 %
量能器	能量分辨 (1 GeV)	2.5%~3.0%	2.5 %
	位置分辨	6~7mm	6.7 mm
飞行时间	时间分辨 桶部	100~120 ps	105 ps
	端部	110~130 ps	125 ps
μ 子探测器	$\delta_{R\phi}, \delta_z$	1.4~1.7 cm	< 1.7 cm

结果表明，BESIII 探测器已全面达到设计指标，可以正式投入物理运行。

BESIII 将在今后的若干年内，在 J/ψ 、 $\psi(2S)$ 、 $\psi(3770)$ 和 τ 产生阈等能量点，获取世界上最高统计量的数据，将取得一批世界一流的物理成果。

(中国科学院高能物理所 100049)

