

# 新一代北京谱仪的设计与建造

王贻芳

粒子物理是研究物质构成的最基本单元及其相互作用的一门学科,它的两个前沿(高能量与高精度)目标均为精密检验粒子物理标准模型,并寻找超出标准模型的新物理、新现象。北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)是目前国际上在2~5GeV能区内亮度最高的加速器,其建设将使我国高能物理在国际上占有重要地位,并有助于在 $\tau$ -粲领域继续保持领先。

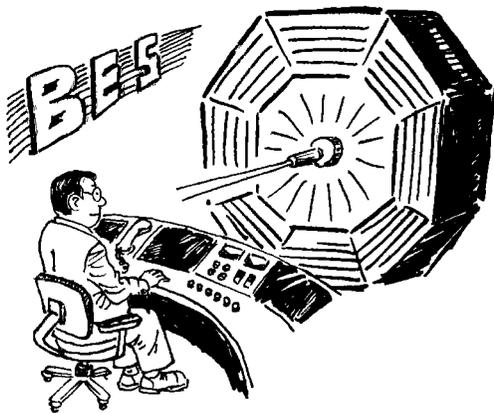
新的北京谱仪(BESIII)作为北京正负电子对撞机重大改造工程的一个重要组成部分,总投资达2.4亿元人民币,是北京正负电子对撞机的“眼睛”,它通过测量正负电子对撞产生的次级粒子来研究物质的基本组成及其性质。自行建造探测器是粒子物理学家的主要任务之一,也是其区别于其他研究领域的最大特点。我们自行设计与建造的BESIII探测器已达国际先进水平,体现了国内探测器、电子学与工业水平的巨大进步。本文介绍BESIII探测器的设计与研制情况。

## 一、BESIII的设计思想

大型加速器上的粒子探测器,一般由铍束流管、顶点探测器、径迹探测器、粒子鉴别探测器、电磁量能器、强子量能器、大型磁铁、 $\mu$ 子探测器构成。

铍束流管是围绕粒子对撞点的一段管道,作为加速器真空束流管的一部分,要求其在保证真空的情况下,尽可能不与粒子发生相互作用,以便粒子不受影响地到达探测器。铍的原子序数小,是对撞点真空束流管的理想材料。一般的铍束流管由两个不到1毫米厚的圆桶套在一起,中间通几毫米厚的冷却液。BESIII采用了类似结构。

顶点探测器一般采用硅微条或硅点阵探测器,测量次级粒子产生顶点与原初对撞点之间的距离。这类探测器一般用于研究B介子,而BEPCII不产生B介子,BESIII主要研究D介子,其次级粒子产生顶点与原初对撞点之间的距离太小,用目前的技



术基本看不到,因此BESIII上未设计顶点探测器。

径迹探测器用于测量带电粒子径迹,通过其在磁场中的偏转,得到偏转半径,从而得到粒子的动量。径迹探测器一般有气体探测器、硅微条或硅点阵探测器两种。低能情况下,气体探测器有较好的分辨率,且造价低,是BESIII探测器的不二选择。

我们选用小单元氦基气体漂移室,它比其他类型的气体探测器(如TPC、TEC、Jet型漂移室等)分辨率好。氦基气体可减少多次散射,提高单丝位置分辨率。

粒子鉴别探测器一般可采用切伦科夫探测器、飞行时间探测器等,用于鉴别不同粒子,如K介子、 $\pi$ 介子等。切伦科夫探测器对不同粒子的鉴别能力强,可区分K介子与 $\pi$ 介子直至4GeV以上,但造价太高。通过分析物理需求及具体条件与环境,我们认为目前国际上已有的切伦科夫探测器占用空间太大,因此决定采用飞行时间探测器,虽然分辨率差一些,但占用空间小、造价低,基本能满足要求。同时我们也决定积极开展切伦科夫探测器的预研工作,考虑将其作为未来BESIII的改进项目。

电磁量能器用来测量光子和电子的能量,一般分为全吸收型和取样型两种。全吸收型一般由晶体构成,其能量分辨率一般较取样型好几倍,但价格也高几倍。仔细权衡物理需求并得到上海硅酸盐所在价格上的大力支持后,我们采用碘化铯( $\text{CsI(Tl)}$ )晶体作为全吸收型电磁量能器的材料。这种设计使我们的探测器在性能上一举达到国际先进水平,为BESIII取得一流物理成果奠定了基础。

用于测量强子(如质子、介子等)能量的强子量能器。对我们这个较低能量范围的探测器来说不是必须的,因此BESIII没有设计强子量能器,而是代之以晶体量能器和 $\mu$ 子探测器。

大型螺线管磁铁通过洛伦兹作用使运动中的带电粒子发生偏转,通过测量偏转半径就可得到带电

粒子动量。这类磁铁一般有两类可供选择,即普通磁铁和超导磁铁。普通磁铁造价低、技术成熟,但磁场强度小,只有超导磁铁的一半以下。超导磁铁性能好,但国内没有技术基础,其进口价格又令人难以接受。经过仔细权衡,我们决定与国外的华人公司合作,在高能所自己建造,这样既可降低造价,又可掌握技术。

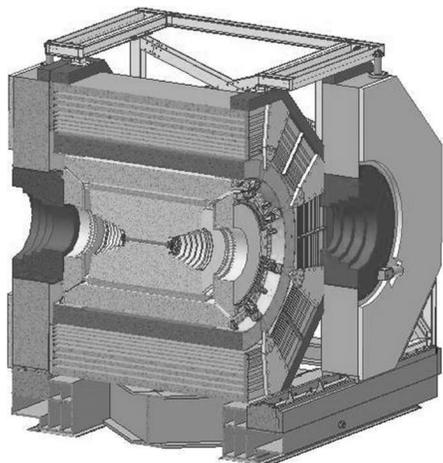
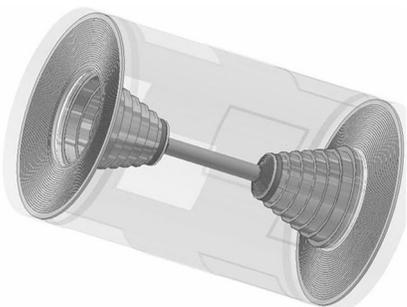


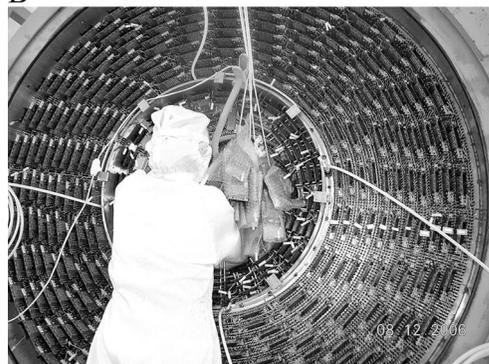
图1 北京谱仪(BESIII)示意图

$\mu$ 子探测器用来测量逃逸出超导磁铁的 $\mu$ 子径迹,可以选择阻性板探测器(RPC)和流光管探测器(streamertube)。考虑到RPC具有较好的发展前景,

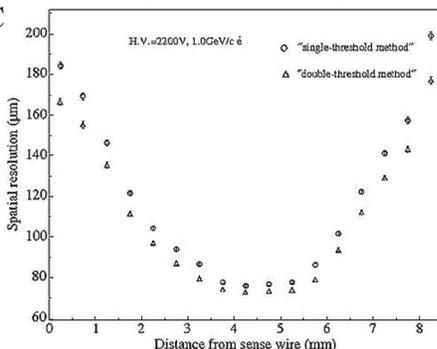
A



B



C



D

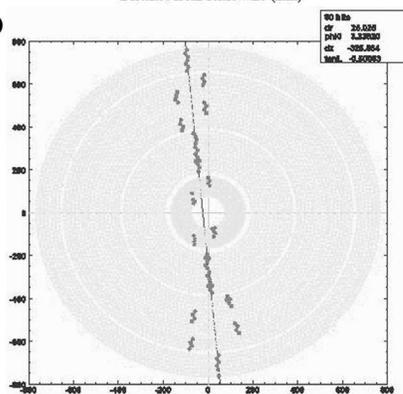


图2 北京谱仪(BESIII)漂移室

A. 漂移室结构; B. 正在安装读出电子学、高压与电缆; C. 束流实验结果: 单丝位置分辨率最好处达到 $70\mu\text{m}$ , 超过设计指标; D. 已完成的漂移室得到的一个宇宙线事例

我们决定自制新型的阻性板探测器,以掌握技术并为未来发展打下基础。

如上所述, BESIII 探测器的设计要考虑物理目标、物理过程和次级粒子的特点,技术指标及方案的可行性,国内的工业、技术基础与能力,先进技术对国内的引领作用,时间进度与造价等多方面因素,经过综合平衡才能决定。

BESIII 的最终设计包括一个有 30000 根丝的小单元氦气漂移室,由高精度塑料闪烁体组成的飞行时间计数器,有 6300 根晶体的 CsI(Tl) 晶体量能器,磁场为 1 特斯拉的大型超导磁铁及总重达 700 吨的轭铁,其中穿插有 2000 平方米的 $\mu$ 子计数器(如图 1)。BESIII 采用国际最新的粒子探测和电子学技术,其制造与加工涵盖了物理设计、精密机械加工、材料、低温超导、快电子学、大规模数据获取与处理技术等,性能指标达到或超过国际先进水平。

## 二、BESIII 探测器的研制

BESIII 的设计与预研工作目前已全面完成,主要技术问题也已全部解决,各个子探测器均通过束流实验和小模型实验证明达到设计指标。工程的关键部件与材料的采购及各个子探测器有关部件的加工制造与批量生产已基本完成,开始进入组装阶段。

BESIII 漂移室是一个直径 80 厘米、长 2.4 米的圆柱体(如图 2A),沿轴向共布 6000 根左右、加约 2000 伏正高压的金属丝作为信号丝,和作为场丝的 22000 根接地金属丝。信号丝和场丝一起构成合适的电场,中间通氦与丙烷混合气体。带电粒子在气体中通过电离作用产生电子,电子在气体中受电场作用,在向信号丝漂移的过程中,经过雪崩放大,在信号丝上产生信号。通过测量这个电离信号到达信号丝的时间,我们可以精确了解粒子的位置。单丝位置的设计精度高于 120 微米,与国际最好水平一致。在漂移室的设计中,我们还在国际上

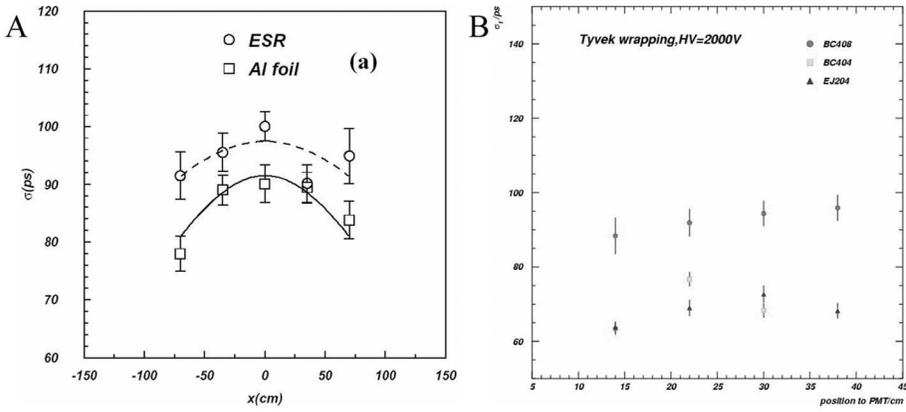


图3 北京谱仪 (BESIII) 飞行时间计数器的束流实验结果 (A.桶部, B.端盖)

厘米、长 2.4 米的塑料闪烁体。带电粒子通过塑料闪烁体时会发出可见光,并被两端的光电倍增管探测到。中性粒子通过其产生的次级带电粒子也会被探测到。不同质量的粒子从对撞点到达闪烁体的时间不同,因而该飞行时间可用来鉴别粒子类型。通过束流实验,我们完成了全部物理与工程设计(如图 3)。结果表明我们已达到飞行时间测量精度高于 90ps 的目标,这是当前国际塑料闪烁体时间测量的最好结果。现在,所有光电倍增管与闪烁体均已到货,全部光电倍增管的批量测试也已完成,闪烁体的批量测试正在进行。

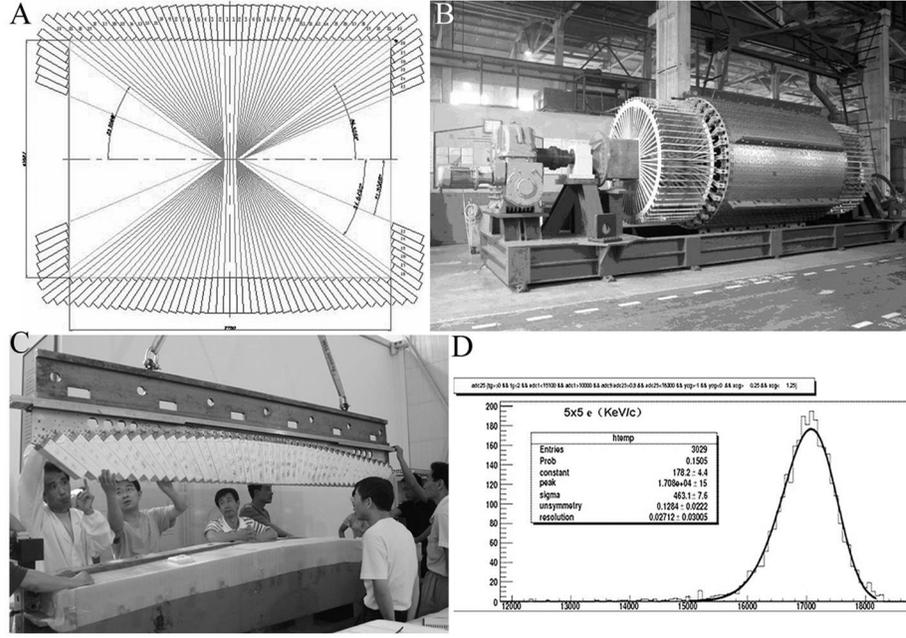


图 4 北京谱仪(BESIII)晶体电磁量能器

A. 晶体量能器的结构; B. 已完成的晶体量能器桶部机械支撑结构; C. 正在安装中的晶体量能器; D. 束流实验结果: 对 1GeV 电子能量分辨率为 2.6%

首次采用内外漂移室结合、中间无隔墙的方案,以便可以在需要时更换内漂移室,防止辐射引起内漂移室工作不正常。

目前已完成全部漂移室的制造与组装工作,包括超高精度的室体机械加工与组装,特别是其端面板共有约 28000 个孔,每个孔的位置精度好于 25 微米;各类零部件与工装设备的设计与制造;28000 根丝的布丝任务;探测器的组装、读出电子学与高压的接入(如图 2B);探测器的测试等。在小模型的束流实验中,我们已得到很高的单丝分辨率(如图 2C)。目前我们正在用宇宙线对整个漂移室进行测试,图 2D 为一个通过整个漂移的宇宙线事例。

BESIII 的飞行时间计数器采用宽 5 厘米、厚 5

BESIII 的电磁量能器采用 6272 根 28 厘米长的含铯碘化铯晶体,晶体总重达 20 吨。带电粒子在碘化铯晶体中会产生红外光而被光二极管收集。中性粒子通过其产生的次级带电粒子也会被探测到。由于电子与光子在晶体里会损失其全部能量并通过光信号被很精确地探测到,所以我们称其为电磁量能器。

在晶体的机械支撑设计上,我们在国际上首次应用无隔墙的晶体量能器吊挂方案,使晶体间的物质质量最小,提高了分辨率。目前共 20 吨的晶体绝大部分已到货,90% 的晶体检测与组装也已完成,读出电子学的噪声在束流实验中达到国际最先进的极限值——1000 个电子。国际首创的晶体吊挂机械结构已完成加工,一半以上的晶体已完成安装(如图 4)。

BESIII 的  $\mu$  子探测器采用我们自己开发的以特殊材料和工艺制作的阻性板探测器(RPC)。带电粒子通过加高压的两平板间气体间隙时,会产生信号。我们设计的这种气体平板探测器,采用阻值可调的大面积阻性板,表面覆盖密封胶膜,方法简单、造

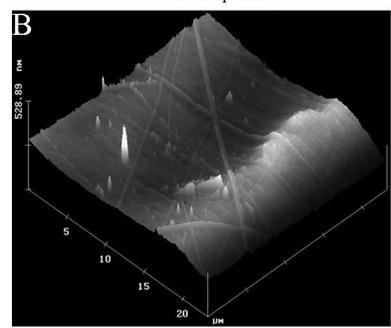
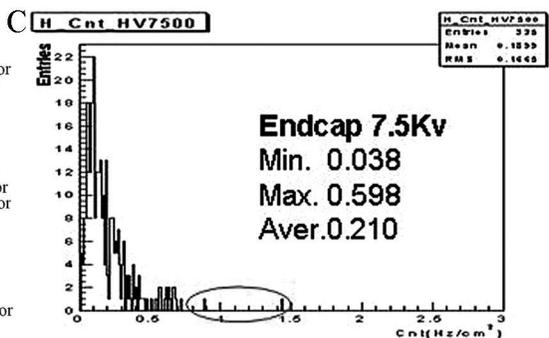
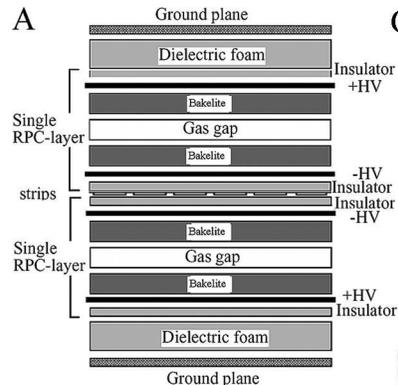


图5 北京谱仪 (BESIII)  $\mu$ 子计数器

A. RPC探测器的结构示意图; B. 用原子力显微镜看到的阻性板相当平滑的表面;  
C. 批量生产时RPC的噪声分布; D. 完成安装的BESIII  $\mu$ 子探测器

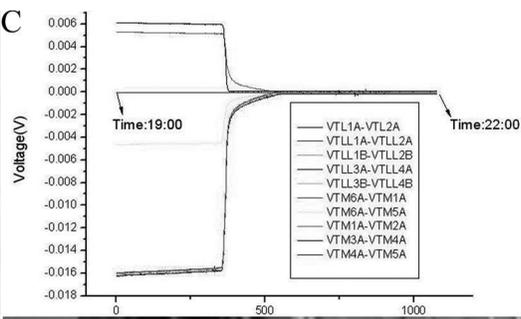


图6 北京谱仪(BESIII)超导磁铁

A. 工人们正在绕线; B. 正在安装中的磁铁; C. 系统达到超导状态; D. 磁场达到1特斯拉

价低廉、方便大规模生产,并解决了意大利工艺中表面淋蓖麻油后产生的寿命问题,在国际上引起了广泛注意。这种探测器在未来的大亚湾实验、国际直线对撞机、宇宙线实验等方面应用广泛。目前我们已高质量地完成全部2000平方米RPC的生产、测试与组装,并已全部装入BESIII探测器(如图5)。

式计算机集群、VME读出系统和庞大的软件控制系统,每秒能够采集4000次、可将50MB数据记录于磁盘。目前整个触发与数据获取系统已完成鉴定,达到设计指标。为进行最终的物理分析,我们还开发了一个巨大的离线软件系统,目前已基本完成,正在测试运行。

BESIII的超高精度机械系统既是谱仪的机械支撑结构,又为磁铁提供了磁通回路。目前该系统已完成并通过鉴定(如图5D)。我们自主研发的国内最大的单体超导磁铁,直径3.4米、长3.9米、设计场强1特斯拉,储能近 $10^7$ 焦耳。在下定决心自己建造后,我们吸取国外经验,完成了物理与工程设计。经过不懈努力,解决了大量技术与工艺困难,终于在两年内完成部件制造、绕线、组装、调试和安装,并成功进行了冷却、加电,使整个系统达到超导状态,磁场强度在电流为3364安培时达到设计值1特斯拉(如图6)。

北京谱仪的读出电子学共有约40000读出道,从高精度时间测量(25ps)到高精度电荷测量(15bit),各方面指标均为目前国际先进水平。触发系统采用目前国际上最先进的光纤传输和FPGA技术,包括RocketIO技术,使系统的通用性、可靠性、可扩展性和兼容性大大加强。目前我们自行设计与制造的所有电子学板进展顺利,束流实验证明各项指标均达到设计要求。批量生产现已基本完成,测试表明质量很好,达到设计要求。我们的数据获取系统采用分布

### 三、BESIII 的建设与管理

BESIII 实验是一个大型国际合作组,目前共有国内外 20 多个单位、200 多位物理学家参加。我们按国际惯例建立了合作组的管理机构,制定了章程和健全的规章制度,为下一步完成全部建设任务,开始获取数据和物理分析奠定了基础。

在 BESIII 建设的项目管理方面,我们有以下体会。

**质量控制** 质量控制始终是贯穿 BESIII 建设的关键。我们建立了一系列质量控制文件与规章制度,每个部件均有质量管理及测试要求并归档,落实到人。我们还经常进行质量管理教育,设立质量监督员,检查管理制度的落实情况。每个系统及其关键设备均在关键节点组织国内外专家进行评审和鉴定,大部分系统均需两次以上才能通过鉴定,真正做到不走过场。

**风险控制** BESIII 这样的大工程,往往隐含着巨大风险,包括技术的、人为的、管理的等等。我们在工作中首先找出风险项目和其中的风险问题,有针对性地组织解决,包括进行小模型试制以规避技术风险。加强管理,特别是制度管理以解决人为风险,技术人员驻厂以降低加工风险,等等。通过时刻保持警惕,风险自然就会降低。

**进度控制** 为了控制与掌握进度,我们制定了详细的 CPM 计划,通过仔细筹划、并行作业、预先准备,提高整体配合程度,将进度控制在计划之内。

**造价控制** 造价控制的关键是合理预算和质量控制,包括技术方案与造价估算要合理,不能有质量不合格与返工等。详细的预算造价表对理解项目的设计、推动项目进展具有重要作用。我们采用专家评审议的办法,制订了详细的预算造价表。同时要求任何采购都必须有多家报价,超过一定总量要采取招标,价格谈判时要有多人等。我们还采取了合适的谈判方案,如同类项目合并采购等。价格控制的另一个方面是要掌握好自制与采购的关系。什么都自己做不符合现代工业专业分工的原则;全都采购(特别是进口)则价格过高。对于什么能自己做、什么必须进口,必须在吃透技术的基础上对造价、进度、技术风险和技术需求等各方面综合考量。到目前为止,我们的所有选择都是比较正确的。总之,一个好的粒子物理学家必须学会控制造价,用最少的钱做最多的事。

BESIII 是国内外 100 多位物理学家近 5 年努力工作的结晶。中国科学院高能物理研究所承担了总体设计和绝大部分设备的研制任务,中国科学技术大学、清华大学、四川大学、美国夏威夷大学等单位承担了许多关键设备的研制工作,北京大学、山东大学、俄罗斯杜布纳联合核子研究所等单位在软件方面做出了关键贡献。参加 BESIII 物理分析合作的除上述单位外,还有南京大学、华中师范大学、河南师范大学、南开大学、湖南大学、广西大学、广西师范大学、日本东京大学、美国华盛顿大学、德国重离子研究中心(GSI)、波鸿大学、吉森大学等国内外 30 多个单位、100 多位物理学家。我们计划 2007 年底之前完成全部探测器的组装与安装任务,2008 年开始取数。

经过多年努力,我国已有一支在国际上有一定影响的粒子物理队伍。相信通过大家的努力,我们一定会在 BESIII 上取得令人瞩目的成果。

在此感谢国内外 20 多个单位为 BESIII 辛勤工作的物理学家、工程师、技术支持人员和学生,感谢为 BESIII 的制造做出重要贡献的国内外 100 多家单位的大力支持。

(北京中国科学院高能物理研究所 100049)

#### 作者简介

王贻芳,1984 年毕业于南京大学物理系原子核物理专业,1991 年获意大利佛罗伦萨大学博士学位。先后在美国麻省理工学院、斯坦福大学工作。2001 年入选高能物理所“百人计划”回国工作。2002 年获国家自然科学基金会“杰出青年基金”。担任 BES-III 探测器分总体主任和 BESIII 实验国际合作组发言人。现任高能物理所副所长、实验物理中心主任,中国高能物理学会常务理事兼秘书长,全国核电子学与探测技术学会副主任委员,同时还担任大亚湾中微子实验项目经理、首席科学家和国际合作组发言人。

