

北京正负电子对撞机重大改造工程

陈和生, 张 闯, 李卫国

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘 要: 北京正负电子对撞机重大改造工程是我国“十一五”时期的一项重大科学工程。工程从2004年初开工建设, 经过五年的努力, 按指标、按计划、按预算、高质量地完成了各项建设任务, 并于2009年7月通过了国家验收。本文报告了北京正负电子对撞机重大改造工程的建设进程, 总结了在激烈的国际竞争中改造方案的选择和工程的质量、经费和进度控制等方面的经验。

关键词: 对撞机; 大科学工程; 高能物理; 同步辐射; 工程管理

中图分类号: O4-1

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2009)03-0275-07

顾名思义, 北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)是对北京正负电子对撞机(BEPC)进行重大改造的科学工程, 改造的目的是提高性能, 增强竞争力, 更好地实现其科学目标。BEPCII的主要设计指标对撞亮度是 BEPC 的 30×100 倍, 新建与之相匹配的北京谱仪 BESIII, 同时大幅度提高同步辐射的性能。BEPCII 于 2004 年初开始建设, 投资人民币 6.4 亿元, 计划五年完成。2004 年 1 月 17 日, 人大常委会副委员长、中国科学院院长路甬祥在 BEPCII 工程动员大会上, 要求我们“认真组织实施北京正负电子对撞机改造工程, 保证按质按时完成, 实现预定科学目标”, 并希望 BEPCII 能够“成为大科学工程的范例”。2008 年 7 月 19 日, BEPCII 的加速器与北京谱仪联合调试对撞成功, 观察到了正负电子对撞产生的物理事例, 标志着 BEPCII 圆满完成了建设任务。2009 年 7 月 17 日, 以国家发展改革委员会副主任张晓强和中国科学院常务副院长白春礼为主任的国家

验收委员会对 BEPCII 工程进行了验收, “国家验收委员会认为, BEPCII 工程按指标、按计划、按预算、高质量地完成了各项建设任务, 是我国大科学工程建设的一个成功范例”。^[1]

1 北京正负电子对撞机

BEPC 是国家“八五”重大科学工程, 总投资人民币 2.4 亿元, 工期 4 年。BEPC 于 1984 年 10 月 7 日破土动工, 1988 年 10 月 16 日首次实现正负电子对撞。10 月 24 日, 邓小平同志来到高能物理所, 视察了刚建成的对撞机, 指出:“过去也好, 今天也好, 将来也好, 中国必须发展自己的高科技, 在世界高科技领域占有一席之地。”

北京正负电子对撞机由五大部分构成: 注入器、束流输运线、储存环, 北京谱仪(BES)和同步辐射装置(BSRF)。图 1 是 BEPC 的总体布局图。

BEPC 的注入器是一台长 202 米的正负电子直线加速器, 把正负电子束加速到 13 亿电子伏,

收稿日期: 2009-08-07; 修回日期: 2009-08-19

作者简介: 陈和生(1946-), 男, 湖北省武汉市人, 研究员, 中国科学院院士, 所长, 北京正负电子对撞机重大改造工程经理, 主要从事高能物理研究。Email: chenhs@ihep.ac.cn

张闯(1944-), 男, 上海市人, 研究员, 北京正负电子对撞机重大改造工程副经理, 中国物理学会副理事长, 主要从事粒子加速器研究。

李卫国(1946-), 男, 上海市人, 研究员, 北京正负电子对撞机重大改造工程副经理, 主要从事高能物理研究。

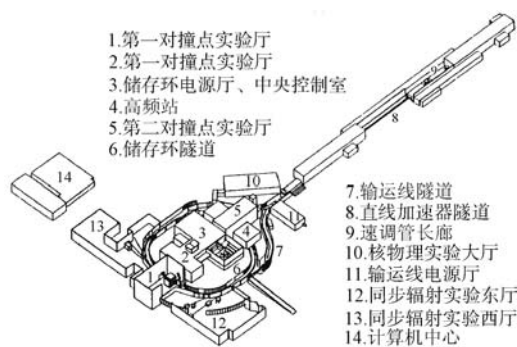


图1 北京正负电子对撞机的总体布局

通过 30 米长的公用段, 再分别经由各长 90 米的束流输运线注入储存环。储存环是一台周长为 240.4 米的环形加速器, 束流在这里积累、加速、储存、对撞, 提供高能物理和同步辐射实验。储存环上有两个对撞区, 北京谱仪安装在南对撞区。北京同步辐射装置分布在储存环南半环东西两侧的实验厅里, 共装有 9 条光束线和 13 个实验站^[2]。

BEPC 投入运行后, 对撞机的亮度迅速达到设计指标, 在 18.9 亿电子伏时为 $1 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 成为在 τ -粲能区性能居国际领先地位的高能物理实验装置。20 世纪 90 年代以来, 北京谱仪合作组在对撞机上获得了 τ 轻子质量精确测量、R 值精确测量、胶子球的研究和新粒子的发现等一批国际领先的重大成果, 在国际权威的粒子数据表上就有 400 多项数据是在北京谱仪合作组在对撞机上测定的, 高能物理研究所也跻身于世界八大高能加速器实验中心之一。北京同步辐射装置作为我国众多学科的大型公共实验平台, 每年向来自全国数百个研究所和高等院校用户开放, 取得了包括若干重要蛋白质结构测定在内的许多重要结果。2003 年抗击非典期间, 对撞机照常运行, 并在同步辐射装置上完成了药物与非典病毒分子的相互作用研究等成果。通过在对撞机上开展的高水平研究工作, 培养了大批人才, 发展了我国尖端领域的科研队伍, 提高了我国在相关领域的工业技术水平, 并为我国今后相关的大科学工程的建设提供了丰富经验, 打下了坚实基础。

2 重大改造工程

BEPC 的建成为我国高能物理及其相关领域的研究取得重大进展创造了良好条件。然而, 科学研究没有止境。为了发展我国在高能物理研究领域的一席之地, 保持在 τ -粲能区性能国际领先地位, 做出更多高水平的研究成果, 我们从 20 世纪末就着手研究对 BEPC 进行改造。当时我们提出的改进方案是所谓的“麻花轨道”对撞, 即采用静电分离器将正负电子束流的轨道分开, 使正负电子在各自的麻花状的轨道上运动, 只在碰撞点相遇。这样就可以在一个储存环里储存多个正负电子束团并在碰撞点相撞, 从而增加碰撞的机会, 也就能提高对撞亮度。图 2 是 BEPC 中采用“麻花轨道”对撞的示意图。在 BEPC 中采用“麻花轨道”方案, 可以把正负电子束流中进行对撞的束团数目从原先的 1 对增加到 6~18 对, 加上其他方面的改进, 理论计算的对撞亮度可以提高到 10~30 倍。

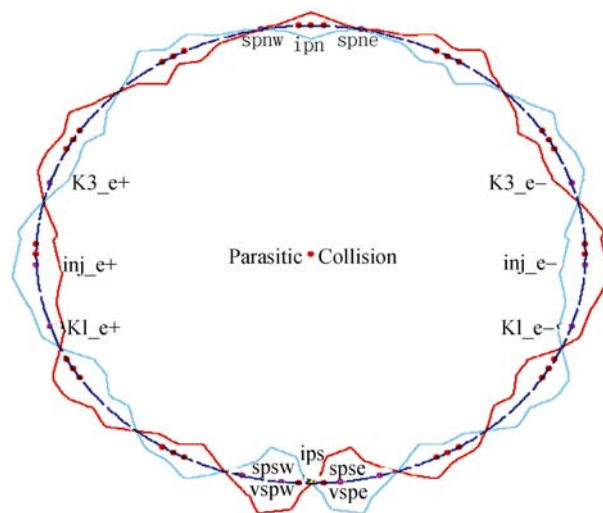


图2 采用“麻花轨道”对撞的 BEPCII 方案

BEPC 的丰硕成果和 BEPCII 的计划受到国际高能物理界的高度关注, 也在 τ -粲物理实验研究领域引发了激烈的竞争。美国康奈尔大学有一台正负电子对撞机, 原先在高能量下工作, 2001 年初他们决定把束流能量降低到 τ -粲物理研究领域

与 BEPC 竞争, 称作 CESRc, 其亮度设计指标是 $(1.5 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}) \square 3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 当时预计在 2003 年底就能开始运行。形势对于 BEPC 十分严峻: 单环方案的 BEPCII 最早只能在 2005 年完成, 设计亮度与 CESRc 相当, 而单环多束团对撞的技术难度较大, 达到设计亮度指标可能需要更多的时间; 加上当时我们的探测器的性能比 CESRc 的探测器相差较大, 使我们在与 CESRc 的竞争处于劣势。

面对这一国际知名实验室和曾经创造亮度世界纪录对撞机的挑战, 我们怎么办? 是放弃改进计划, 还是提高方案的竞争力? 经过深入研究和反复论证, 我们在参考国际先进的双环方案的基础上, 根据“一机两用”的原则, 采用了独特的三环结构, 满足了双环对撞、外环同步辐射的设计要求。在双环方案中, 正负电子束流在两个彼此独立的储存环中积累, 在南对撞点处相遇、对撞, 因而每个环中束流的束团数目可以更多, 从而使设计亮度大幅度提高, 可比单环改进方案高 3 倍以上。同时, 为了与双环方案的高亮度相适应, 我们大大提高了探测器的性能指标, 采用高性能的碘化铯晶体电磁量能器和超导磁铁等, 总体上与 CESRc 的水平相近。这样就确保了我们在与 CESRc 的竞争处于领先地位。这个方案得到了科学界的支持和国家的批准, 成为最终的 BEPC 重大改造的方案^[3]。图 3 是双环的 BEPCII 储存环的结构示意图。

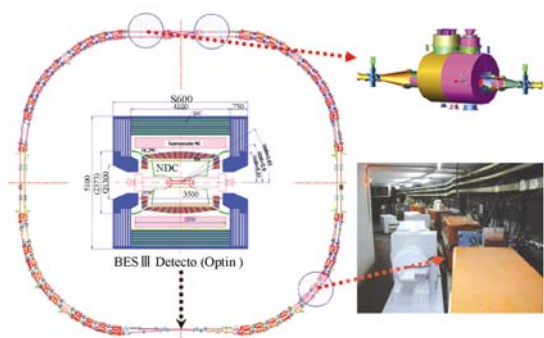


图 3 双环结构 BEPCII 的示意图

在 BEPC 的现有的隧道里, 能否安装两个储存环, 是 BEPCII 双环方案的关键。我们进行了

1:1 的模型演示, 验证方案的可行性。图中, 储存环的弧区双环的照片中, 右侧是 BEPC 已有的磁铁设备, 左侧是木制模型磁铁, 可见虽然空间十分拥挤, 但隧道里还可以安装双环。新建的北京谱仪 BESIII 将安装在南对撞区, 而北交叉区将安装两台超导高频腔。

BEPCII 创新性方案, 为工程的成功提供了基础, 而工程的实施, 也需要技术发展与创新。

3 工程与创新

工程的可靠性要求采用成熟技术, 而装置的先进性又需要创新技术, 这是一对矛盾。

对撞机涉及高功率微波、高性能磁铁、高稳定电源、高精密机械、超高真空、束流测量、自动控制、高精度粒子探测、快电子学、数据在线获取和离线处理等高技术, 其设计指标都接近当代技术的极限。基于 BEPC 工程建设中相应的技术发展和多年的技术积累, BEPCII 采用的技术总体上是成熟的, 工程中不存在颠覆性的技术问题。

但这不等于说 BEPCII 工程中不存在关键技术和创新课题。

与国外现有的多数双环对撞机不同, BEPCII 要在较短的周长和窄小的隧道里安放双储存环, 又要兼顾同步辐射应用, 这给磁铁、真空、机械和设备安装与维护带来很大的困难。在磁铁设计中, 我们采用了高励磁电流密度的设计, 减小了磁铁的尺寸; 在真空系统中, 巧妙地安排了真空盒和真空泵等设备的位置, 为系统的维护提供了空间; 在设备支架中, 采用了三维可调的伺服电机设计, 实现了设备高精度的灵活调节; 在隧道里采用气垫装置, 解决了无吊车情况下的重型设备安装难题。而在储存环的设备上, 安装了数千个监测探头和相应的连锁装置, 时刻监测设备的状态, 确保设备运行万无一失, 避免出现设备损毁, 以及由此引起的在窄小的隧道里难以更换的问题。

对撞区插入节超导磁铁、北京谱仪大型超导螺线管、超导高频腔和相应的低温系统, 是实现

BEPCII 性能所必需的关键技术, 在国内的加速器尚属首次采用, 我们缺乏工作经验和技术积累。我们通过国际合作, 在引进国外技术的同时, 发挥主导作用, 掌握了研制和测试技术, 现在不仅具备了自行研制的能力, 并研制成功了应用于工业和医学等方面的超导设备。低温系统一度是 BEPCII 工程的瓶颈, 我们加强了与国内外低温方面的研究所的合作, 成立了 BEPCII 低温系统联合工作组, 经过近三年的努力, 解决了大量关键技术问题, 终于使系统投入了正常运行。

工程的建设者们和全国数百个工厂、研究所、高等院校、建筑公司的数以万计的科研人员和干部工人精心研制、大力协同, 严格按科学规律办事, 解决了大量关键技术问题, 实现了大科学工程中的集成创新^[4]。图 4 是建成后的 BEPCII 的示意图。从图 3 到图 4, 凝聚着工程建设者五年的辛勤努力, 也包含着大量的技术创新: 在直线加速器中, 新建的电子枪实现了强流和小发射度的要求; 新建的正电子源采用具有大俘获效率的磁号 and 直流强磁场获得了高产额的正电子束流, 等等。在储存环中, 有效地控制真空部件的耦合阻抗, 抑制了束团拉伸效应; 在国内首次研制成功基于事件的定时系统、逐束团流强测量系统和横向束流反馈系统; 与日本高能加速器研究机构合作设计并研制 500 兆赫超导高频腔系统并成功投入运行; 设计了新型的注入冲击磁铁, 满足了束流阻抗和磁场均匀性的要求; 成功研制对撞区特种磁铁和特殊真空盒, 并与美国布鲁克海汶实验室联合设计研制了世界上最复杂的紧凑型对撞区超导插入磁体, 等等。在 BESIII 探测器中, 自主研制的高性能漂移室不但满足了物理实验的需求, 也大大提高了国内铝加工和塑料加工的精度; 创新性地采用碘化铯晶体后吊挂方案大大降低造价并提高了整体分辨率; 飞行时间计数器的时间分辨达到了国际最高水平; 国际首创的无淋油工艺解决了国际上阻性板探测器长期存在的寿命与噪声问题; 触发系统在国际上率先采用了

RocketIO 技术, 大大简化了系统的复杂性, 提高了可靠性及可维护性, 降低了造价; 自行开发的数据获取系统达到 100MB/s 的国内最高水平; 大规模离线分析系统能自动完成 PB 量级数据的质量检查、筛选、刻度、重建和模拟, 达到了国际先进水平; 以我为主研制成功了国内最大的单体超导磁体, 等等。在通用设施中, 在国内首次研制成功了用于大型加速器装置的 4.5 K 低温系统并实现了稳定可靠运行, 等等。

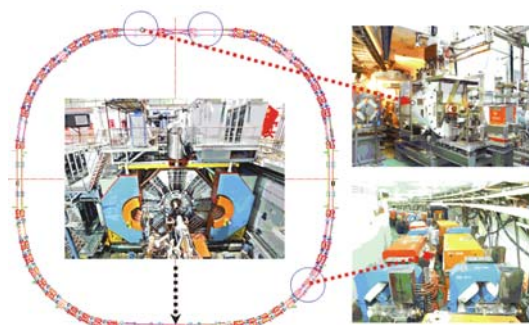


图 4 建成后的 BEPCII 的示意图

实践证明, 工程与创新既存在矛盾, 又可以兼顾。大科学工程既需要成熟技术, 又要求创新技术, 因此必须重视工程前期的技术储备和预先研究, 并在建设过程中, 精心设计、精心研究, 不断解决关键技术问题, 不断创新, 不断前进。

4 质量: 工程的生命线

质量是工程的生命线。BEPCII 工程指挥部十分重视工程的质量管理, 在建设初期就依据 GB/T19001-2000《质量管理体系》, 结合 BEPCII 工程的特点, 编制了《BEPCII 质量手册》^[5], 建立了相应的质量管理体系文件, 加以实施和保持, 并持续改进其有效性。工程指挥部提出了“科学管理, 精心研制, 安全施工, 保证质量”的十六字质量方针, 制定了一套完整的规章制度和程序管理文件, 从设计、制作样机、批量生产、验收等各个环节进行全面质量管理。各分总体也编制了分总体内部的质量管理程序文件, 做到有章可循。作为一个例子, 图 5 给出了质量手册中规定

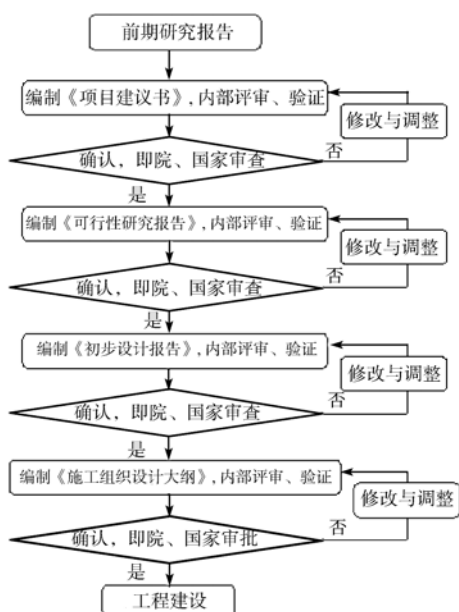


图5 BEPCII工程总体设计过程的流程

的 BEPCII 工程总体设计过程的流程,对工程从前期研究、项目建议书、可行性研究报告、初步设计到施工设计的流程都做出了明确的要求。

在工程建设中,各个系统和重要设备的设计、制作、调试、验收都必须根据管理规定经过相应级别的审批。工程指挥部根据项目技术难度和影响程度,明确了十个指挥部主抓的重大项目,由指挥部成员专人负责,并定期汇报进展。对于重要设备都建立了质量跟踪卡,记录组装、检测、安装和调试的全工程。所有设备都要经过质量测试检验方予安装,绝不放不符合质量标准的设备过关。例如,在 2005 年 10 月上旬,发现储存环前室铝真空盒在抽真空后发生明显的凹陷变形。对此事故,工程指挥部和分总体都十分重视,立即组织分析检查,发现是生产厂家进行抽真空烘烤时的温度过高所致。我们按照《质量手册》中对“不合格品控制”的规定,立即通知厂家进行整改,严格控制烘烤温度,同时对变形的前室真空盒进行矫形研究,并对 4 根变形量最严重的真空盒做报废处理,重新加工制造。当时,已经有 24 根真空盒已经进入了预安装准直单元,我们要求全部拆出进行变形量检测,并进行相应处理。经

过努力,到 2006 年 2 月底,80 根前室真空盒的加工和真空调试全部完成,满足了加速器物理的要求。这样做虽然影响了工程进度,但保证了质量,并从中吸取了教训。在随后的设备安装中,储存环分总体严格贯彻质量方针,采取了一系列旨在严格质量监督和控制的措施,包括组织各系统人员对已安装就位的预准直单元进行现场检查,制定并实施了“预准直单元通电前的检查”和“磁铁、电源、控制系统联调步骤”等规程等,确保了工程高质量地进展。

5 经费：工程的性价比

BEPCII 建设资金总预算 6.4 亿元,经费十分紧张。对于经费的控制,直接影响工程的性能价格比,是质量控制的重要方面。BEPCII 工程按照大科学工程建设的要求,制定了工程财务管理规定,建立了总经济师制度,并充分利用研究所的管理资源,加强经费管理。总经济师负责按国家有关规定对工程财务资源进行总体管理,包括:组织编制估算、概算书,组织编制设备清单;估算、概算书报国家有关部门审批后实施;根据工程计划编制年度基本建设经费计划,经工程经理审批后实施;落实各年度工程资金,监督、检查工程投资计划执行情况,并对经费支出进行实时监控。在研究所的财务处设置基建财务部门,专门负责工程经费的管理,包括按国家有关规定办理工程款接收和支付手续,并及时向总经济师、各部门提供所需财务信息等。

采购是实施工程投资的主要活动。工程指挥部制订了《BEPCII 物资采购程序》、《BEPCII 招标工作程序》和《BEPCII 采购合同签订程序》和《BEPCII 工程非标设备在外制造的质量保证程序》等采购质量控制文件,并严格执行。工程经费管理采取逐级审批制度,分级严格控制经费的使用,各级领导根据设备清单严格控制经费,工程办公室统一审批合同的商务条款。BEPCII 指挥部成立了招标工作小组,通过招标方式采购 50 万

元以上的设备和器材,通过竞争性谈判、多家报价方式采购 5 万元至 50 万元的设备和器材。指挥部设置了专职人员管理日常的招标工作。为了把经费用在“刀刃”上,我们将所内已有的贵重仪器设备上网公布,避免重复购买,各分总体和研究室之间可以相互借用,充分共享全所的仪器设备。

BEPCH 工程坚持自主创新,自主研发的设备超过 85%,有力地推动了国内相关高技术领域的发展,同时也大大节省了经费,有利于投入运行和维护与改进。例如,直线加速器中的正电子源,在国外采购需要 100 万美元以上,工程技术人员采用了先进的技术路线和创新的物理设计,并在本所实验工厂自行研制,结果只花了不到人民币 100 万元,就研制成功了具有国际先进水平的正电子源。

在设备安装方面,在国外通常请安装公司承包,费用往往占工程总造价的 10%左右。我们根据国内的实际和 BEPCH 工程的特点,采取了以公用设施分总体为主体和骨干,安装公司按协议派技术工人参与的工作模式,节省了大量经费,加快了安装进度,也保证了对撞机的工程质量。

BEPCH 工程加强科学管理,在经费紧张、欧元强劲和材料涨价的情况下,按预算全面完成了建设任务。

6 进度: 工程的竞争力

BEPCH 工程是在激烈的国际竞争中进行的,倘若不能如期建成,纵有先进设计指标,仍有可能失去机会。进度就意味着工程的竞争力。

BEPCH 采用关键路径法 CPM(Critical Path Method)分级制定工程各级计划,并实施动态管理,进行科学的进度管理。在诸多工程任务中,我们解析出其中最关键的几项,采取相应的技术与管理措施,保证其按期以至提前完成。工程指挥部对若干技术风险较大,可能影响整个工程进度的关键系统分别安排工程指挥部的领导负责协调,并及时解决建设中遇到的困难。图 6 是 BEPCH 工程设计阶段制定的零级 CPM 计划。

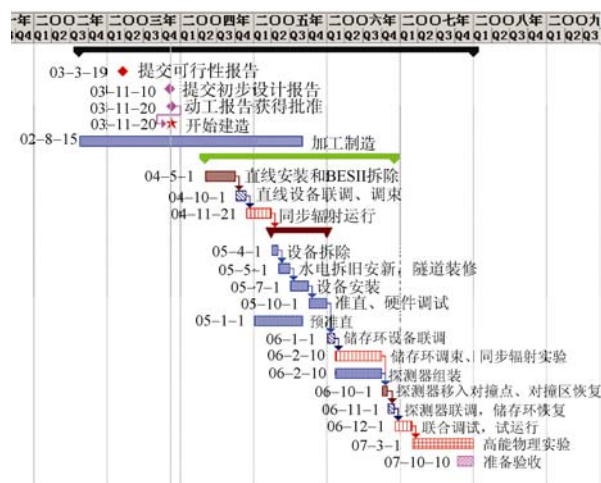


图 6 BEPCH 工程零级 CPM 计划

这个计划是基于各分总体和系统根据一级计划和二级计划制订的,是根据当时的知识,认为可以实现的。但由于认识的局限,特别是大科学工程的科研性,在实施中常常有不可预见的情况发生,需要进行动态调整。例如,2006 年 9 月中储存环主体设备安装完成,但由于低温系统合作方设计中的问题,杜瓦和阀箱漏热量超过了设计允许指标,因此无法将对撞区超导磁铁冷却到超导状态。针对这个情况,工程指挥部决定启动备用方案,即采用常规磁铁代替超导磁铁,安装在对撞区,开始第一阶段的调束和同步辐射开放运行。同时,对低温系统进行改进,并在对撞区墙外的离线位置上,进行北京谱仪的安装和超导磁铁的联合测磁。到 2007 年 6 月,低温系统完成了改进,三台超导磁体联合励磁成功,10 月开始第二阶段带对撞区超导磁铁调束和运行。这样既保证了工程建设,又满足了用户需求,争取了宝贵的调束与运行时间。图 7 是对撞区备用方案的图片。

BEPCH 作为 BEPC 的改造工程,如何在建设阶段兼顾运行、又在运行时继续建设,是工程指挥部面临的重要课题。在工程指挥部会议上,曾发生过“鱼和熊掌”之争:加速器需要调束达到设计指标,通过国家验收,这是“熊掌”;实验物理需要获取更多粒子事例,以便在试运行阶段取得更多成果,这是“鱼”;如何进行安排或取舍?工程指挥部经过深入研究、反复讨论,做出了“鱼和熊掌”兼得



图7 采用常规磁铁的对撞区,北京谱仪的安装和超导磁铁的联合测磁就在屏蔽墙外进行

的决定,既要按进度达到设计指标通过国家验收,又要完成试运行的物理取数计划。经过集体的努力,这个任务在2009年8月得以圆满完成。

在工程建设中,我们精心安排、精心组织,采取了 BEPCII 设备研制与 BEPC 运行,旧设备拆除与新设备安装, BESIII 探测器离线组装与加速器在线调束,加速器与探测器联合调束与高能物理实验取数运行,同步辐射开放运行与加速器调束等多任务或并行或交叉进行、分阶段实施的创新性工作方式,在保证工程按计划进展的同时,安排了三个阶段的调束和同步辐射开放运行与高能物理实验取数,既保证了工程建设,又满足了用户需求。在 BEPCII 工程建设期间为用户提供了四轮共5个月的同步辐射实验专用光,完成了约700个课题,取得一批高水平的研究成果。BES III 试运行80天就获取了高质量的1.12亿个 $\psi(2S)$ 和1.5亿J/ ψ 事例,是此前世界上最大数据样本的3~4倍。

BEPCII 的成功在国际上引起了热烈反响。我们的竞争对手,美国康奈尔大学 CESR 项目负责人赖斯教授在发来的邮件中说:“CESRc 将终止运行,我们期待来自 BESIII 的一系列重要的物理发现。”

BEPCII 的圆满完成,是工程的一个新起点。在新一轮的开机运行前,我们将安装子谐波聚束器、纵向反馈装置和束流能量精确测量装置等设备,进一步提高对撞机的整体性能。工程建设者和科研人员将充分发挥 BEPCII 在粲能区国际领先的对撞机优势,加紧开展高能物理和同步辐射实验研究,不断提高对撞亮度和各项性能,充分发挥对社会开放的大科学装置的平台作用,尽快取得国际一流水平的原创性科研成果。

参考文献

- [1] BEPCII 项目国家竣工验收委员会.国家重大科学工程北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)竣工验收意见[R]. 2009-07.
- [2] Fang S X and Chen S Y. The Beijing electron-positron collider[C]//Kimura, Muto, Nakayama, et al. Proceedings of the 14th International Conference on High-energy Accelerators:High Intensity Beams, Ion Beams and Accelerator Applications, 1990: 51.
- [3] 中国科学院高能物理研究所.北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)初步设计[R], IHEP-BEPCII-SB-03-R2, 2003-11.
- [4] 中国科学院高能物理研究所.北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)建设报告[R], IHEP-BEPCII-JB-09-01, 2003-11.
- [5] 北京正负电子对撞机重大改造工程指挥部.北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)质量手册[R], BEPCII-PM-02-R1, 2005-03.

Major Upgrade of the Beijing Electron-Positron Collider

Chen Hesheng, Zhang Chuang, Li Weiguo

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The major upgrade of Beijing Electron-Positron Collider (BEPCII) is one of the state key projects during the eleventh five-year plan period. The construction of the project started at the beginning of the year 2004. With the five-year efforts, the project has completed on its technical specification, planned schedule and specified budget, and passed the state assessment in July 2009. This paper reports the progress of BEPCII and summarizes the experiences in quality control of the project.

Key words: collider; mega-science project; high energy physics; synchrotron radiation; project management

□责任编辑：王大洲