

# 和对撞机一起成长

于程辉

(中国科学院高能物理研究所 100049)

加入北京正负电子对撞机(BEPC)团队26载,在这里遇到了许许多多默默无闻踏实苦干的同事,见证了太多的拼搏、无私奉献和精益求精,只为对撞机能够时刻保持最高的运行效率和强劲的竞争力,这种精神激励着团队的每一个人,铸就了北京正负电子对撞机一个个辉煌,也影响着一代又一代追求科学的年轻人。

1996年夏,我从四川大学物理系毕业,进入了高能物理研究所储存环室物理组,很快发现自己在学校里掌握的数学、物理知识远远达不到工作的需要,工作的压力转变成学习的动力,我开始恶补加速器物理知识。入所不到两个月,BEPC进入新一轮的年度运行阶段,由于调束人员的短缺,物理组

组长王东把我编入储存环的调束值班队伍。就这样,我的职工生涯懵懵懂懂地开始了(图1)。

对撞机是一个通过正、负电子对撞研究基本粒子的大型科学实验装置。对于刚入所的我,与对撞机相关的一切既崭新又陌生。物理组有着完备的学习资料和浓厚的学术氛围,但是,即使我发奋学习了好几个月,各种学术会议上听大家的报告依然如同听天书,对撞机运行每天也给我灌输着巨量的加速器技术信息。为了尽快掌握这些新的技术知识,我把每天遇到的新知识、技术难点一点一滴地记录在本子上。日复一日,终于有一天我发现本子上的新增内容越来越少,我知道我已经摸到了工作任务的边界。



图1 初来乍到物理组

先从容易掌握的开始,做所有力所能及的事情。我参加了两期暑期准直工作,把储存环的每个设备都亲手摸了一遍;同时,进入了北京τ-粲工厂(BTCF)的物理设计小组,从动力学孔径跟踪与数据统计开始做起,逐渐融入了团队;在运行值班中,黄楠老师是我的启蒙老师,手把手传授调束经验和理论知识,鼓励我要敢想敢做。在我独立担任值班长之前,我跟班黄楠老师半年多的时间,不仅一点点地掌握了束流的特性,逐步熟悉软件和硬件系统,也真正进入了对撞机的大门。渐渐地,我利用自己在软件编程方面的特长,结合加速器物理知识开始编写在线调束程序 and 数据分析程序,参加调束运行4个月后,我发布了第一个自己编写的BEPC在线数据分析程序。终于有一天,物理组的学术报告我能听懂了,再后来我能参与提问和讨论了。1997年,我成为储存环调束值班长,参加了单点对撞、mini-β两个亮度提高改进项目的调束任务。另一方面,在BTCF物理设计中承担的工作越来越多。后来,根据高能物理研究所的战略规划,物理组开始针对BEPC进行单环方案的亮度升级研究,徐刚率先开始了麻花轨道方案的设计,并完成了方案可行性的验证。1999年,徐刚开始转向主攻双环交叉角多束团对撞的设计,与此同时,他让我接手单环麻花轨道多束团对撞设计,并给我讲解了许多设计技巧与技术要点。2000年3月,我完成了单环麻花轨道的多束团对撞设计,可使BEPC的亮度提高30倍至 $3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ;徐刚完成了双环交叉角多束团对撞设计,可使BEPC的亮度提高100倍至 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。然而,同年度美国康奈尔大学宣布正负电子对撞机CESRc进行亮度升级,设计亮度为 $3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。面对残酷的国际竞争,双环交叉角多束团对撞设计成为了BEPC升级的最优选择,北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)从2001年开始筹备建设。

根据工程建设的需要,BEPCII专职队伍抽调了大量的BEPC调束骨干,留在运行一线的值班长全部是年轻人。如何保障对撞机的运行效率成为了一个严峻的问题,为此,2000年10月,加速器中心领导让我担任储存环的调束负责人,专职负责BEPC的日常运行,从那时起我几乎一整年都在储存环控制室,专心致志琢磨束流和机器。之前我所学的加速器知识是支离破碎的,没有融会贯通它们之间的内在联系,在这一年沉静的时光里,我领悟到过去所做的、所学的都是对撞机有机整体的一部分,自己依然存在的知识漏洞变得清晰,我开始有意识地去补充和扩充,对同步辐射装置、北京谱仪、通用运行设施也逐步熟悉起来。2001年9月,加速器中心领导让我组织储存环专职运行队伍,经过半年的培训与磨合,运行队伍日趋成熟稳定。2002年3月,因BEPCII工程的需要我从BEPC储存环调束负责人岗位转入了BEPCII专职队伍,负责BEPCII对撞区的物理设计(图2)。

对撞区的设计是储存环磁聚焦结构设计的重要组成部分,在BEPCII对撞区系统负责人吴英志和物理系统负责人徐刚的推荐下,2001年10月,我开始BEPCII对撞区物理设计。随后的一年时间里,在对撞区、磁铁、机械和物理四个系统的协作下,依次完成对撞区的布局设计、一机三环的束流轨迹设计、磁聚焦结构设计、特种磁铁的物理参数要求、对撞运行和同步辐射运行的同步光扇面分布设计、双束流精确对撞设计、对撞区耦合补偿设计、对撞点耦合校正设计。一个好的对撞区设计必须兼顾束流性能、硬件可行性和运行稳定性。BEPCII对撞区的设计非常具有挑战和创新性,国外虽然有PEP-II、KEKB、DAFNE等双环对撞机,但是在对撞区长度、束流能量、对撞点束流参数、亮度调节机制等方面与BEPCII差异非常大,相关对撞区设计的经验根本无法照搬到BEPCII。可以说,在总长只有

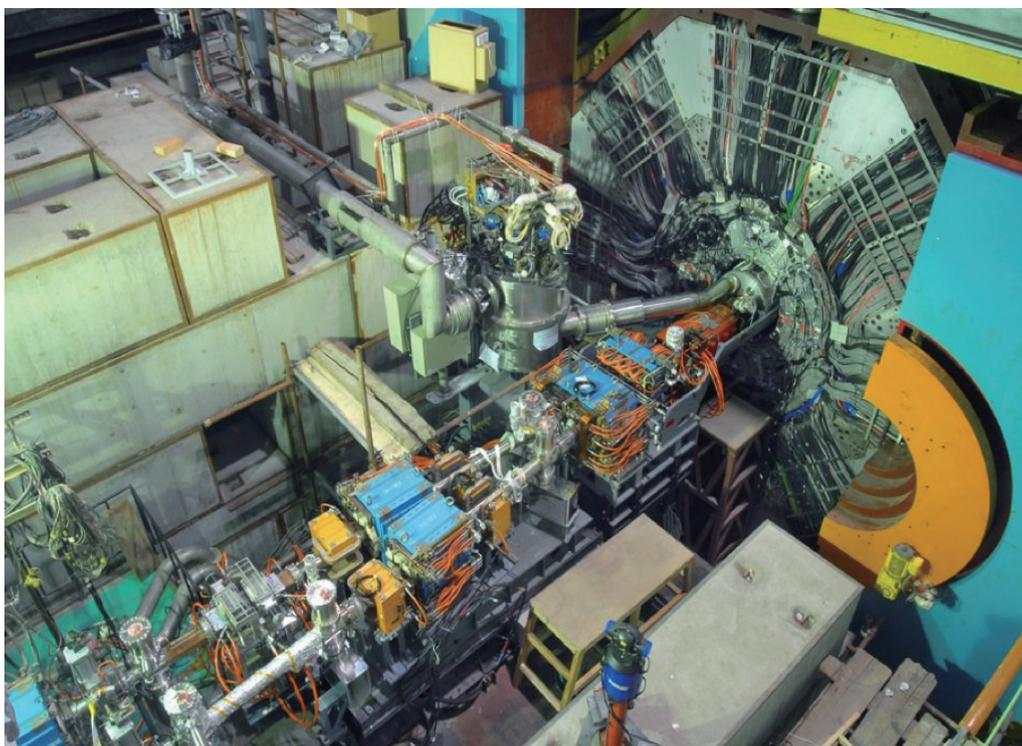


图2 BEPCII对撞区

23米的狭小隧道空间里,没有创新设计就不可能建成适合亮度要求和本底要求的对撞区。对撞区系统负责人吴英志最先提出将双孔径磁铁应用在对撞区,以解决空间严重不足的困难。他也一直倡议和鼓励大家进行创新,最终BEPCII对撞区诞生了双孔径四极磁铁和谱仪螺线管场局部耦合完全补偿两个首创的设计方案,实际运行证实这两个创新非常成功。目前,在未来高能量和高亮度环形对撞机的设计中都采纳或借鉴了这两个创新点。我在对撞区系统工作的5年时间里,吴英志老师在严谨认真和思维创新两个方面对我保持着时时刻刻的严格要求,这5年的经历直接建立了我对科研的认知。此外,我在对撞区系统还做了大量的跨专业工作,例如:完成对撞区146个温度探头的布局定位并参加探头安装;为真空泵的设计提供对撞区光子数目分布;确定0角度亮度探测器的位置和技术指标;提出旋转线圈、张力线、Salamander三种测磁设备

的测量步骤与技术要求;参加超导磁铁测磁,完成磁场质量和励磁曲线的分析;确定特种磁铁安装准直的定标数据;研究北京谱仪的光子本底和丢失粒子本底;优化束流清晰区以适配标准尺寸法兰接口;检查对撞区所有器件的安装流程;分析地基震动对悬臂梁支架上超导磁铁的影响;考虑热胀冷缩;考虑低温管壁凝露问题……渐渐地我已经分不清自己是物理组的人还是哪个硬件系统的人,物理与硬件的边界在我心里彻底消失了。

2003年初,BEPCII对撞区参数正式冻结,当时储存环磁聚焦结构的设计接近尾声。磁聚焦结构根据工作点区域分为了6.53/5.55、6.53/7.55、7.53/6.55三个方向,其中我负责6.53/5.55方向。自2002年4月起,我在储存环磁聚焦结构设计小组有一年半的时间,每天盯着束流包络曲线推敲和尝试,重复“枯燥”的工作给我带来一个意想不到的收获,那就是储存环的设备和束流参数都深深地印在了脑

海中,所有的磁铁、真空盒、插入件、高频腔、注入器、束流包络、束流的轨迹、机器的各种瓶颈、每块磁铁能够容忍的准直误差与场误差闭着眼都能浮现在眼前。2003年5月,陈森玉院士代工程经理部对加速器物理系统每个人的岗位职责进行了安排,我开始负责束流对撞与亮度优化设计课题。

亮度是对撞机的主要性能指标之一,影响因素非常多。双环对撞机的正、负电子束流在空间上是完全独立的,正、负电子束团在对撞点的参数完全不同,对于BEP CII能够导致亮度下降1%以上的变量有130多个,其中能够在线调节的参数为85个。束流对撞与亮度优化设计课题就是要盯紧这130个变量,并实现85个可调参数的在线调节。国外对撞机的亮度调节经验大部分无法借鉴,因为BEP CII储存环是一个没有周期结构、隧道空间异常狭小的对撞机,原有的隧道布局无法改变,只能根据BEP CII自身的特点去构建适合自己的亮度调节体系。方法总比困难多,2006年初,我完成了束流对撞设计并编写了12个亮度在线调节的调束软件。2006

年11月,BEP CII开始运行,我再次回到离开了四年多的储存环控制室,和邢军、王昕昊、温雪梅等熟悉的值班长再次相聚,很激动也很开心,大家为了BEP CII的调束任务再次并肩作战了。

从2006年11月到2020年4月,我一直是一名调束值班长,我在现场亲历了众多BEP CII闪光时刻。2006年11月18日,作为调束人员共同实现了同步辐射环束流的首次积累(图3);2007年2月7日,作为值班长实现了束流在电子环的首次积累,2007年3月25日,实现了BEP CII正负电子的首次对撞。

自BEP CII完成首次对撞之日至今,我制定了几乎所有的关于亮度调试的研究计划,经过运行会讨论和BEP CII调束负责人的批准之后负责具体执行。亮度的调试并不顺利,我们从来没有过安培级流强的机器建造经验和束流运行经验,很多关键参数的理论计算与实际束流存在明显的差异,很多觉得不会有问题的地方出了问题。在流强逐步提升的过程中,束流不稳定性、高次模发热、束腔作用、



图3 2006年11月18日亲历BEP CII储存环束流的首次积累

束长控制等问题对亮度和运行稳定性形成了严重的制约,BEPCII调束两年之后的对撞流强最高只达到了600 mA,而稳定的对撞流强最高只有500 mA。2009年5月,工程验收日前夕,BEPCII的峰值亮度只达到 $2.3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,距离验收指标 $3.0 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 差30%。留给调束团队的时间非常短暂,可谓背水一战,而且只能用500mA的对撞流强去想办法实现 $3.0 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的亮度。5月5日,BEPCII运行例会上大家集思广益,最后一致决定进行半整数磁聚焦结构工作点的亮度调试,因为工作点的变化不改动任何硬件参数,调试周期短、见效快,缺点就是会导致束流寿命下降、注入速率降低、谱仪本底明显增高,而且更加容易出现频繁丢束的现象。当时已经没有更好的选择,我制定了一个10天的亮度调试计划,磁聚焦结构水平工作点从6.530微调到6.505。在那10天里,运行组和物理组所有的调束值班人员都全力以赴,控制室里每个班次都有自愿加班的人加入,为了不留下遗憾,大家真的都拼了。我跟踪每一个班次,一起进行调束,根据亮度调试进展和

遇到的障碍及时进行路线调整。2009年5月12日的夜班我们成功地用 $513 \text{ mA} \times 508 \text{ mA}$ 的正、负电子流强达到 $3.01 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的对撞亮度,首次超越了验收指标。5月19日,BEPCII顺利通过了中国科学院基础局组织的储存环对撞模式工艺测试,现场测试的对撞亮度为 $3.21 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

正当BEPCII团队专注于国家验收的亮度调试阶段,中国散裂中子源(CSNS)工程领导邀请BEPCII物理系统短期参与CSNS快循环同步加速器(RCS)的磁聚焦结构方案设计,希望有更多优化的方案从而显著降低RCS的磁铁造价和电源功率。2009年3月至6月,加速器中心物理组一共设计了4个RCS的新方案,其中一个是我的四折对称Triplet结构方案(图4)。与CSNS已有的FODO方案一起,5个方案进行了综合对比,最终我的设计成为了主选方案。该方案具有 $\beta$ 函数分布均匀、磁聚焦调节灵活、直线节充足、硬件设计难度低、空间利用率高以及储存环周长短等诸多显著优点,磁铁造价和电源功率也能实现大幅度下降。2010年1月,我的

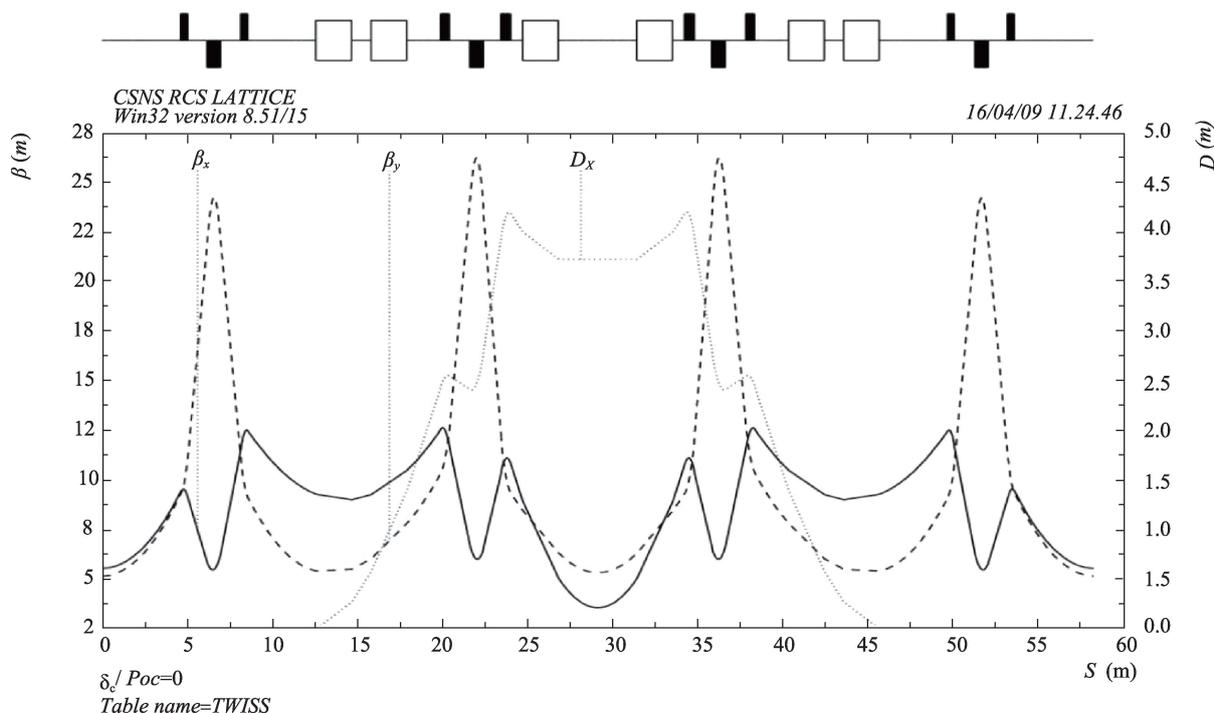


图4 Triplet结构的RCS环设计

方案得到了国际评审会专家的一致认可,成为最终方案。2020年2月28日,CSNS束流功率达到了100kW的设计指标,比原调束计划提前了一年半,表明我当初设计的RCS方案是成功的。

2009年7月,BEPCII通过国家验收之后就进入调试阶段,我除了继续担任亮度调试负责人,还开始担任物理系统负责人。根据高能物理取数规划,储存环设定的束流能量每年都会根据当年的运行任务在1.0 GeV~2.3 GeV范围变化。为了尽可能保证BEPCII在大能量跨度时的最优化亮度,我提出并经过了调束团队和运行负责人的一致同意,确定了不同能区采用不同运行模式的策略,高能区(>1.9 GeV)采用小发射度小动量压缩因子方案运行、中能区(1.6 GeV~1.9 GeV)采用中发射度小动量压缩因子方案运行、低能区(<1.6 GeV)采用大发射度中动量压缩因子方案运行。张源负责并完成了三个运行模式的设计,实际运行中三个方案都得到了很好的应用和验证,而且张源还开发了发射度耦合校正、色散校正等新的调束手段,使得亮度调试的流程更加规范,亮度提升也因此更加快速、可靠,越来越多的年轻人在实际运行中快速成长起来。BEPCII每年的运行任务都很重,分配给加速器进行亮度研究的机时很少,我们都是很珍惜地利用好每一次专项研究。物理系统根据加速器的实际性能针对物理方案进行了一系列调整:既然单束团流强不能稳定在9.8 mA对撞,那么就降低束流发射度使得7 mA的单束团流强也能实现理论束束参数;既然对撞亮度估算偏高了20%,那么就把设计亮度能达到 $1.2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的方案投入运行。BEPCII储存环对撞模式的工作点从初步设计时的6.530/7.580,经过不断优化最终设定在7.505/5.580,对撞点垂直 $\beta$ 函数由最初1.50 cm最终调整为1.35 cm,束流发射度由最初的144 nm最终设定在122 nm,方案前后变化之大,足见储存环物理方案不断优化所

经历的漫长艰辛。对于硬件系统,正、负电子环新增加了纵向反馈系统,消除了多束团耦合纵向振荡引发的亮度下降;升级了高频系统的低电平控制能力;升级了横向反馈系统的控制能力;升级了低温系统液氦压力控制能力……硬件的一系列升级其难度比预期的要大,提升流强的道路比预想的要曲折,但团队在亮度调试、暗电流、探测器噪声、安培级流强、阻抗、多束团不稳定性抑制等环节一直在努力,至2021年5月,历经12年持续不断的物理方案优化和硬件改进,实现了稳定对撞流强910 mA、高能物理实验运行期间峰值亮度 $8.5 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、机器研究期间峰值亮度 $1.0 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,大幅度超越了2009年5月时稳定对撞流强510 mA、峰值亮度 $3.2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的状态。至今,BEPCII投入运行已16年,见证了机器性能的提升,见证了运行团队的成长,也见证了全体成员不计个人得失、团结协作、不达目标绝不止步、勇于攀登的精神。

BEPCII进入运行阶段之后,加速器团队一直在精益求精,努力提升同步辐射和高能物理的运行效率,从而产出更多的科研成果。为此,我开始探索恒流运行的升级研究,并获得了中国科学院重大科技基础设施维修改造经费的支持。恒流运行改造涉及到了几乎所有的硬件系统及其相互连锁逻辑,难度很大而最终很成功,自2015年7月14日同步辐射运行正式启动恒流方式,2019年6月17日,对撞运行正式启动恒流方式,正负电子切换、注入启停、时钟屏蔽等流程完全自动化,恒流运行大幅度提升了BEPCII的积分流强和积分亮度。此外,我还负责了同步辐射兼用模式的调试,通过有效控制磁聚焦偏差和亮度偏差,在对撞运行成功加入了1W1和1W2两个插件,实现了9个同步辐射实验站在高能物理实验期间同时进行用户实验,大幅度提高了同步辐射实验机时。

2017年初,欧洲核子研究中心的未来环形对撞

机(FCC)与高能所的环形正负电子对撞机(CEPC)的概念方案设计都进入了后半程,当时,与FCC的高亮度双环方案相比,CEPC亮度指标的竞争力不足,而且团队的局部双环方案尚未收敛。2017年2月,CEPC指挥部和加速器中心领导指定我加入CEPC团队,开始担任物理系统负责人。

我首先对CEPC进行了迅速研判,发现局部双环方案不仅亮度没有进一步提升的潜力,而且弧区磁铁能量修正和全环误差校正两个重要技术面都存在着严重的缺陷,我将物理方案设计直接从双环对撞机起步。由于FCC双环方案已经完成在先,CEPC物理系统很忌讳将自己的方案设计成一个与FCC高度相似的结果,必须创新,必须设计出自己的特色。我首先完成了CEPC对撞区的布局设计和超导磁铁线圈布局的设计,同时把BEPCH对撞区的双孔径磁铁和螺线管局部补偿两个创新设计引入了CEPC对撞区;随后,我完成了CEPC高频区的共用高频腔与束流轨道水平交叉、纵向分离的创新设计,实现了高频区 $tt\bar{b}$ 、Higgs、W、Z四个能量皆能兼用的几何结构,可提供灵活的运行能量切换;我完成了CEPC对撞环束团的多圈累积、在轴回注设计,将对撞环对动力学孔径的需求降至理论最小值。此外,我规划了直线、能量增强器、对撞环三个加速器装置的接口参数和难度系数分配,发布了对物理、真空、机械、磁铁、电源、高频、束测等系统的设计要求,使得工程整体参数自洽。经过CEPC物理系统全体人员持续一年的设计攻关,完成了具有鲜明自主特色的CEPC双环方案的设计,极具竞争力。2017年下半年,FCC团队在其设计亮度已经明显高于CEPC的前提下,将对撞亮度又提升了70%,在Z、W、Higgs和 $tt\bar{b}$ 四个能量都选择了亮度最优设计,而且硬件设备的技术要求优化在 $tt\bar{b}$ 能量,这自然会导致高造价成本,而且对各能量之间的硬件参数衔接有很高的要求。竞争如同下棋,每

走一步都蕴含着目的,既然FCC选择了束流性能第一优先,我就把CEPC的物理方案设定为性价比第一优先。物理方案是束流性能、机器造价和运行费三者的平衡体,对于周长100公里的超大型双环对撞机,机器造价是一个重中之重的设计因素。根据CEPC运行取数10年计划(2年Z、1年W、7年Higgs)的特点,我制定的CEPC物理方案设计总方针为:磁聚焦结构和硬件技术要求都优化在Higgs能量点,加速器束流统一采用大发射度参数,使得对撞环具有高束流寿命、高误差容忍度和低束流本底的性能以及总体造价成本尽可能低,在Higgs能量确保对撞亮度的竞争力,Z、W、 $tt\bar{b}$ 其他三个能量的物理方案设计不增加任何造价,全部以Higgs方案的硬件设备为基础去实现各自亮度的最大值。CEPC概念设计报告2018年8月正式发布,FCC概念设计报告2018年11月正式发布。最终CEPC和FCC的物理设计都有着各自的特色,并没有哪一方显著超越了对方。

我伴随着对撞机一起成长,从一名小兵成为了科研一线的主力。自2014年9月起担任加速器中心物理组组长,和物理组50名职工和学生奋战在BEPCH、ADS、HEPS、CEPC和新加速原理研究的工作中;自2020年4月担任BEPCH运行总负责人,与加速器、北京谱仪、同步辐射装置、通用运行部和计算中心的运行团队共创运行佳绩;2005年,我负责建设了加速器微振动研究平台,白手起家从一台CMG-6TD微振动测量仪开始,亲手测量了BEPCH、BSRF、HEPS地基的微振动和NSLS-II四极磁铁固有频率,以及CSNS高频腔、注入涂抹凸轨磁铁、二极铁的振动,目前已发展为拥有5台微振动测量仪的小实验室……多年来,在身边老师和同事的大力支持,以及他们言传身教的指导下逐渐形成了自己的处世准则,光阴荏苒却永不忘BEPCH科研精神,学以致用,淡泊名利,无愧于心。