

BEPC II 储存环加速器物理问题研究

徐刚¹⁾ 秦庆 于程辉 王九庆 王生 刘瑜冬 张源

陈利民 国智元 周德民 黄楠 温雪梅

(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改进工程——BEPC II, 已经完成其设计阶段, 并处于建造过程中. 系统回顾了 BEPC II 储存环的设计, 系统总结了设计中的加速器物理问题.

关键词 正负电子对撞机 磁聚焦结构 动力学孔径 线性耦合 束流集体效应

1 物理目标

北京正负电子对撞机 (BEPC)^[1] 改进工程——BEPC II, 采用双环结构, 正负电子束流在水平分离的两个独立的储存环 (对撞环) 中积累、加速, 以多束团的方式在对撞点进行对撞, 达到提高对撞亮度约 100 倍 (相对 BEPC) 的设计目标. 同时, BEPC II 利用水平分离的两个储存环的外环, 以及非对撞区的另一个束流交叉点处的外环连接束流管道, 构成一个同步辐射环, 可以用电子束流并以同步辐射专用模式为 BEPC 原有的及将要增加的同步辐射光束线提供同步辐射专用光, 保持原 BEPC “一机两用” 的特色, 并大幅提高同步辐射专用光的性能. BEPC II 以对撞亮度 $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 为设计指标, 同时兼顾同步辐射应用.

2 磁聚焦结构设计

BEPC II 将使用现有的 BEPC 的隧道且保持现有的同步辐射光束线出口位置不变, 因此两个对撞环和同步辐射环的周长以及内、外环之间的距离只能在几十厘米的范围内调节, 而且南半区外环的二极铁位置与 BEPC 相同. 我们选择 499.8 MHz 作为储存环高频频率, 与直线加速器的频率关系为 7:40, 进而相应的对撞环和同步环的高频谐波数分别为 396 和 402, 同时还满足未来双束团注入的要求.

BEPC II 采用对撞点交叉角及两侧的一对垂直聚焦四极铁、一对水平切割磁铁 (对内环束流进行偏转,

减少探测器内的同步辐射本底) 将正负电子束分开. 对于同步辐射环, 则在超导四极铁上附加两个超导二极线圈来连接对撞点两边的 2 个外环. 同样对于高频区, 利用弱二极铁和相反方向的弯转磁铁, 在内外环的束流轨道交叉点处提供 $154.7 \text{mrad} \times 2$ 的交叉角, 并利用垂直校正铁形成的 3-bump 使束流在轨道交叉点垂直分离. 在同步辐射专用模式运行时, 外环向内环过渡的二极铁停止工作, 负电子束流经过连接东、西两个外半环的束流管道, 由两个超导高频腔提供束流功率. 弧区仍采用与 BEPC 相同的抽铁方式, 并设计内外环的二极铁在同一个扇形内, 以使内外环相应的二极铁间直线节长度一样, 具有同样的磁铁单元结构. BEPC II 的磁聚焦结构仍保持了南北半环关于注入点的部分对称性, 且正负电子环具有同样的磁聚焦结构.

在磁聚焦结构的匹配上, BEPC II 储存环对撞模式可以在 $Q_x/Q_y = 6.5/5.5, 6.5/7.5$ 及 $5.5/6.5$ 附近区域工作, 满足注入及对撞要求. 全环除对撞区外, 束流包络函数均小于 25m, 色散函数小于 2.5m, 而注入点的水平包络函数则在此限制下尽可能大. 两个注入用冲击磁铁间的水平相移为 π , 以达到没有闭轨泄漏的目的. 而对于同步辐射模式, 磁聚焦结构的匹配则在保持与对撞模式所有四极铁极性相同的情况下, 做到尽可能小的水平自然发射度. 同时满足同步光出口处的包络函数尽可能小.

3 非线性效应及其影响

对 BEPC II 储存环, 非线性来自两方面: 一是来

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

自校正色品所使用的六极铁, 另一个是各类磁铁的高阶场误差. 对于色品校正, 可以通过搭配不同六极铁之间的强度关系, 使一些低阶的非线性参数得到优化, 从而得到适当的色品曲线及足够的动力学孔径. 然而优化这些参数并不总是能到较好的色品曲线及足够大的动力学孔径, 故在优化参数以后还必须对实际的校正效果及动力学孔径进行检验.

BEPC II 每个储存环设计了 36 块六极铁以 18 组独立的六极铁电源供电以增加色品校正的灵活性. 实际上这也是不同的模式的色品校正的要求. 在一个模式中实际使用的六极铁的组数一般都远小于 18 组, 但是不同模式的每组电源所供电的磁铁却往往是不同的. 这主要是因为 BEPC II 的磁聚焦结构的非周期性导致不同模式的六极铁之间的相位关系及各六极铁处的聚焦函数是完全不同的.

在磁铁设计和制造中不可避免地存在着系统的和偶然的误差, 这些误差尽管在某一块磁铁中的所占的比例很小, 但是由于所有磁铁都存在误差, 这些误差所产生的效应是不容忽视的. 这些误差会使束流品质下降, 主要体现在动力学孔径减小, 注入效率降低, 束流寿命下降, 对撞区的本底增加等. 这些公差所产生的动力学孔径下降非常明显.

4 线性耦合校正

BEPC II 的耦合源有 2 个: 探测器的螺线管场和环内各磁铁的制造和安装误差. 由于 BEPC II 的对撞区很短, 空间非常紧张, 探测器的螺线管场又非常强, 很难在对撞区以外的地方进行补偿. 为此, BEPC II 设计了一套非常复杂的就地补偿的方案^[2]. 这个方案包括 3 个超导反螺线管和 1 个超导斜四极线圈, 它们与主超导四极线圈在同 1 个低温箱内 (对撞点左右各有 1 个低温箱). 3 个螺线管分别补偿超导四极线圈前, 四极线圈本地, 及四极线圈后的探测器螺线管场, 理论上, 这 3 个螺线管足以用来补偿探测器螺线管场所引起的耦合效应. 在设计中又增加了 1 个斜四极线圈, 用来补偿四极线圈的制造和安装可能带来的耦合效应.

对于 BEPC II 的另一个耦合源, 即制造和安装误差所引起的耦合, 在全环闭轨校正后, 环内剩余耦合已经很小, 原理上可以不再进行补偿. 但考虑到实际的安装误差可能更大, 闭轨校正效果可能不如模拟那么好, 另外对撞点处的局部耦合需要进行调节, 因此在环上的消色散的地方又增加了 4 个斜四极铁, 用以对撞点处或全环的耦合进行调节.

5 束流集体效应

耦合阻抗以及单束流集体效应引起的束流不稳定性, 是影响 BEPC II 对撞亮度达到设计指标的一个重要因素. 纵向宽带阻抗的限制主要来自因势阱效应和微波不稳定性引起的束长拉伸效应. 束长拉伸也是 BEPC II 储存环中最严重的不稳定性之一. BEPC II 的亮度设计目标要求束团长度 $\sigma_l \sim \beta_y^*$, 即拉伸后的束长在 1.5cm 左右. 我们将束长拉伸控制在微波不稳定性发生的流强阈值以下, 即可以由势阱畸变引起的束长拉伸来给出纵向宽带有效阻抗的上限, 为 $|Z/n|_{\text{eff}} < 0.97\Omega$. 按照 BEPC II 储存环的阻抗预算, 纵向低频耦合阻抗将力争控制在 0.2 Ω 左右, 相应的总电感为 26nH, 距离由微波不稳定性阈值给出的阻抗限制留有较大的裕量. 按此阻抗阈值计算, 束团流强为 9.8mA 时的束团长度为 1.35cm, 为可能的对撞点垂直包络函数的减小留出了一定余地. 基于阻抗预算建立宽带阻抗的 Heifets-Bane 模型^[3], 可以进一步计算纵向有效阻抗和束长拉伸, 进而估算束长及能散随单束团流强的变化. 同时, 利用 $\sigma_l = 2\text{mm}$ 的短束团在各主要部件产生的尾场势及全环的格林函数, 用程序^[4]模拟计算束长随流强的变化. 用阻抗模型计算和用程序模拟的结果都表明微波不稳定性阈值比单束团设计流强高许多, 而在单束团设计流强下, 束长拉伸约 5%.

在 BEPC II 储存环中, 耦合束团不稳定性主要由高频腔的窄带阻抗以及电阻壁阻抗引起. 由于总束流强度较大, 需要对耦合束团不稳定性进行研究以确定反馈系统的设计指标. 利用 ZAP 程序^[5]对 BEPC II 储存环中耦合束团不稳定性增长率按最小束团间距均匀分布的情况进行计算, 结果为纵向耦合束团不稳定性增长最快的模的增长时间 $\sim 12\text{ms}$, 与同步辐射阻尼时间相当. 横向电阻壁不稳定性由电阻壁阻抗的实部激起. BEPC II 储存环弧区采用带前室的真空盒, 直线段则采用跑道型截面的真空盒, 材料均为铝. 由于真空盒的垂直尺寸小于水平尺寸, 故垂直方向的电阻壁不稳定性更严重些. 在设计工作点 $Q_x/Q_y = 6.53/7.58$, 电阻壁不稳定性的增长时间为 4.3ms, 最不稳定模式为 $\mu = 91$. 考虑到可能增大的工作点, 不稳定性增长时间会因而变短, 故取反馈系统的设计指标为 1ms.

包括离子俘获、快离子不稳定性、尘埃效应及电子云不稳定性的双流不稳定性是束流集体效应的重要组成部分. 在储存环中, 残余气体主要为氢和一氧化碳. 全环注入 1 个包含 93 个束团的束团串, 即全环留

出约5%的间隙时,可以较好地抑制离子俘获.而若在此束团串中再留出一些空隙,则可以有效地减弱快离子不稳定性的影响.采用抽气狭缝倾斜的离子泵,并将泵口置于前室及真空盒底部,可以减小尘埃效应.前室真空盒的采用,真空盒内壁镀TiN以及直线节绕螺线管线圈,都将有效地抑制正电子环中的电子云不稳定性.模拟结果^[6]表明这些措施将使电子云密度下降两个量级.此外,使用横向反馈系统,将有效抑制束流集体效应.

对于同步辐射专用模式,占主导地位的束流集体效应是耦合束团不稳定性与束流电子与离子的作用.前者利用横向反馈系统,后者类似于对撞时电子环的情形并采用相同措施,可被有效地抑制.

6 束束相互作用和亮度提高

作为1个高亮度的正负电子对撞机,束束相互作用是BEPC II的一个重要课题.在BEPC II的设计早期,由于计算机能力有限,相关的模拟研究主要是用BBC(KEK的Hirata开发的弱强模拟程序)进行.然而弱强的模拟跟踪有一定的局限性,目前我们采用的是SLAC的蔡云海博士以及IHEP张源开发的强强模拟的程序进行跟踪模拟.这两个程序都是6D的程序,可以包括交叉角及阻尼效应.跟踪模拟的结果表明在设计 $\nu_x=6.53$ 上亮度最大约为设计亮度的45%,而

在 $\nu_x=6.51$ 最大亮度为60%,其中因交叉角及束长效应所引起的亮度因子约0.8.

进一步提高BEPC II的亮度有3种可能的措施:1)开发 $\nu_x=6.51$ 的模式;2)减小 β_y^* ;3)增加束团数目.第1种措施的主要问题是动力学孔径难以满足注入要求;第2种措施由于高频腔电压1.5MV继续提高是困难的,主要的措施可能是降低动量压缩因子,然而由于色散函数减小,动力学孔径也将是一个困难的问题;第3种措施将导致总流强增加,将给高频系统,真空系统,冷却系统等增加负担.尽管有多种可能的措施来提高BEPC II的对撞亮度,但究竟采用哪种措施只能由将来调束中实际的束团拉伸、能达到的最大束束作用限、电子云不稳定性的增长率及各个硬件能达到的指标来决定.

7 结论

BEPC II储存环采用了目前粒子工厂级对撞机所用的主要手段来达到设计亮度.磁聚焦结构则保持了BEPC原有特色以及“一机两用”的特点.动力学孔径、误差及线性耦合校正能满足储存环的设计要求.目前的阻抗预算以及抑制双流不稳定性的措施可以较好地减小束流集体效应的影响.束束相互作用的模拟研究验证了高亮度工作区域,并为亮度的进一步提高提供了依据.

参考文献(References)

- 1 FANG S X, CHEN S Y. Particle Accelerator, 1990, **26**: 51—61
- 2 YU C H. HEP & NP, 2005, **29**(4): 418(in Chinese)
(于程辉.高能物理与核物理, 2005, **29**(4): 418)
- 3 Heifets S. SLAC/AP-93 1992
- 4 Oide K, Yokoya K. KEK-Preprint 10 1990
- 5 Zisman M et al. ZAP User's Manual. LBL-21270 1986
- 6 LIU Y D et al. HEP & NP, 2004, **28**(11): 1222—1226(in Chinese)
(刘喻冬等.高能物理与核物理, 2004, **28**(11): 1222—1226)

Study on the Accelerator Physics Issues in the Storage Ring of BEPC II

XU Gang¹⁾ QIN Qing YU Cheng-Hui WANG Jiu-Qing WANG Sheng LIU Yu-Dong
ZHANG Yuan CHEN Li-Min GUO Zhi-Yuan ZHOU De-Min HUANG Nan WEN Xue-Mei
(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The upgrade project of the Beijing Electron Positron Collider (BEPC) - BEPC II is in its construction stage. We review the physics design of the storage ring of the BEPC II, concluding the main focusing accelerator physics issues. The results of these physics problems are given.

Key words electron positron collider, lattice, dynamic aperture, linear coupling, collective effect

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