

BEPC 中的电子云不稳定性研究*

国智元¹⁾ 刘瑜冬 秦庆 王九庆 邢军

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 多束团正电子储存环中可能发生电子云不稳定性(ECI). 自1996年起, 在北京正负电子对撞机(BEPC)上开展了与这种束流不稳定性相关的系列研究. 文章扼要介绍在BEPC上进行的电子云不稳定性研究, 包括实验观测和模拟计算, 并讨论可能的抑制措施.

关键词 电子云 不稳定性 储存环

1 引言

高能储存环是高能粒子加速器的一种, 如粒子对撞机或同步辐射光源等. 通常其束流能量较高, 束流较强, 多束团运行. 在带正电荷粒子的储存环中, 由于电子在正粒子束流附近聚集引起的束流不稳定性, 称之为电子云不稳定性(ECI), 是加速器物理研究的重要课题之一.

由电子云引起的束流效应最早于20世纪70年代初在CERN的ISR等加速器中曾被观测到. 第一次作为电子云耦合束团不稳定性于1989年在KEK光子工厂中被观测到^[1], 并于1996年在BEPC的观测中得到证实^[2]. 近几年在大型粒子对撞机PEP II 和KEKB的实验中发现电子云导致束团横向尺寸增长, 从而限制对撞亮度. BEPC是最早开展电子云不稳定性研究的加速器之一, 其中一部分研究是与KEK合作进行的. 最近的研究主要在对电子云的直接测量和不同抑制措施实验验证方面, 实验结果证明了螺线管磁场、清洗电极、色品、八极磁铁等措施的有效抑制作用. 本文扼要介绍在BEPC上进行的电子云不稳定性研究.

BEPC II 是北京正负电子对撞机的升级改造工工程, 将单环结构改成双环结构的正负电子对撞机. 针对BEPC II 情况, 对可能发生的电子云不稳定性及其抑制措施进行了详细的研究. 这些研究结果具有普遍意义并对BEPC II 工程具有重要的实际价值.

2 BEPC 中的实验研究

自1996年以来, 我们在BEPC中开展了一系列的实验研究, 包括参数依赖关系、对电子云直接测量、色品、螺线管磁场、清洗电极、八极磁场对不稳定性的抑制作用等, 得到了极其丰富的信息, 对于认识电子云不稳定性的物理过程及其抑制方法具有重要意义^[3-5].

1996年, 在均匀注入160个束团, 总流强9.3mA条件下^[2], 在频谱仪上观测到束流垂直振荡边带, 同时在同步光探测器上观测到束团的垂直振荡. 这一现象与高次模无关, 并在同样条件下的负电子束流中, 没有被观测到. 我们确认这就是电子云不稳定, 随后开展了一系列的深入研究.

通过研究不稳定性与束流和加速器参数之间的关系, 有助于理解这种束流现象的物理过程, 最终达到控制束流的目的. 研究中, 观测得到了以下参数依赖关系: 不稳定性的阈值很强烈地依赖于束团间距, 当束团间距加大一倍时, 阈值约提高4倍; 增大色品或八极磁场, 都对不稳定性有抑制作用; 束流发射度对不稳定阈值有一定的影响, 束流发射度较大, 容易发生不稳定; 束流能量改变对不稳定影响不大. 应用单次通过BPM, 观测研究了束团耦和振荡及其阻尼过程.

束流管道中的电子云分布对不稳定性有重要的影响. 在BEPC储存环的不同位置上安装了电子云探测

* 国家自然科学基金(10275079, 10375076)资助

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

器, 它由收集极、栅极和接地极组成. 为了减少二次电子带来的测量误差, 在收集极表面, 镀了几个微米的石墨涂层. 实验中栅极电压可以调节, 用串联在收集极上的电流表直接测量电子电流强度. 测量发现对电子云起直接作用的是束流强度、束流能量、束流闭轨、相邻两束团间距和清洗电极电场等.

抑制电子云不稳定性的有效措施之一是增加色品. 较大的正色品可以减弱耦合束团振荡, 同时也可以抑制束团头尾不稳定性引起的束团横向尺寸增长^[6]. 实验中改变色品从 1.8 增加到 3.0, 耦和束团振荡振幅下降约 90%, 束团串尾部束团尺寸的增长约减小 50%.

PEP II 和 KEKB 的实验结果证明了利用绕在束流管道上的螺线管线圈产生的磁场可以有效抑制电子云不稳定性. 我们在 BEPC 储存环的直线节上绕了总长度约为 42m 的螺线管线圈, 占全环周长的 18%. 在达到发生电子云不稳定性条件下, 将螺线管线圈中的电流加到 30A, 对应的磁场约为 0.003T 时, 耦和束团振荡振幅下降约 60%, 束团串尾部束团尺寸的增长约减小 30%.

利用安装在储存环同一位置的上下对称垂直探测器对清洗电极作用进行了实验观测, 在下方探测器的电极上加不同电压作为清洗电压, 同时利用上方探测器测量电子流强的变化. 得到的结果表明, 随清洗电极上电压增加, 电子云密度降低, 并最终达到饱和. 进一步利用全环 BPM 作为清洗电极, 增加了清洗电极的数量, 观测对耦合束团振荡和单束团不稳定性的抑制作用. 实验中在全部 BPM 上加 600V 电压时, 耦和束团振荡振幅下降约 20%, 束团串头部束团尺寸的增长约减小 15%. 束团串尾部束团尺寸的增长约减小 20%.

BEPC 储存环中安装有一块八极磁铁, 可以为粒子运动提供朗道阻尼. 实验观测了改变八极磁场对电子云不稳定性的影响. 结果表明将八极磁铁的电流加到 1A 时, 耦和束团振荡振幅下降约 90%, 束团串尾部束团尺寸的增长约减小 35%.

根据电子云不稳定性的物理过程分析和模拟计算, 电子云密度沿束团串逐步增大并达到饱和, 束团尺寸亦具有同样的行为. 实验中连续注入 22 个束团, 每个束团流强约 2.5mA, 用条纹相机观测到了束团垂直尺寸沿束团串逐渐增大, 并约在第 12 个束团起达到饱和; 对观测的分析中还发现束团尺寸增长程度与束团流强的比例关系, 并发现了电子云效应引起的束团垂直方向还有另一种频率的附加相干振荡. 这些现象

正在进一步分析中^[7].

3 电子云不稳定性的模拟计算研究

结合在 BEPC 中的实验并针对 BEPC II 的条件, 模拟计算了束流管道中的电子云密度、耦合束团不稳定性增长率、束团横向尺寸变化和抑制措施等^[8].

粒子通过弯转磁铁时沿轨道切线方向发出同步光, 光子入射在管道壁上或经多次反射产生电子. 一次光电子在光子入射点产生, 初始能量为高斯分布, 出射角度按 $\cos\theta$ 方式变化; 二次电子在管道中均匀分布, 能量也是高斯分布, 出射角度在 3 个方向上随机. 用 PIC 方法计算空间电荷力, 用 Basseti-Erskine 公式计算束流的电场力, 并包括清洗电极等外电场作用力.

计算中研究了椭圆型和前室型真空管道中的电子云密度以及在真空管道内表面镀 TiN 膜的影响. 中心密度定义为电子云范围在束流中心横向 $10\sigma_x$ 和 $10\sigma_y$ 区域内的电子密度. 计算表明, 随着前室宽度的增加, 电子云中心密度降低, 当前室宽度增加到其高度的 5 倍时, 中心电子密度约降低到 20%. 相同束流管道截面如果镀 TiN, 则中心电子密度可以降低到约 20%. 计算研究了清洗电极对电子云的影响, 结果表明中心电子云密度随清洗电压的提高而降低, 1000V 的清洗电压可以降低中心电子云密度到约 15%.

用跟踪计算方法研究了电子云引起的耦合束团不稳定性. 束团用一个宏粒子表示, 电子云用多个宏粒子来描写; 假定束团每圈受到一次电子云冲击作用; 束团运动规律用储存环参数的传输矩阵来计算. 结果表明束团振荡幅度随圈数增加而增大, 束团振荡之间存在耦合. 在电子云密度为 $1.03 \times 10^{13} \text{m}^{-3}$ 条件下, 得到振幅增长时间约为 0.08ms; 通过 FFT 可以得到束团振荡的频率分布. 如果在真空室内壁镀 TiN、应用前室型真空室和光子吸收器等措施, 电子云密度可以降低至 $1.35 \times 10^{11} \text{m}^{-3}$, 则耦合束团效应将被有效减弱, 振幅增长时间降至约 4.3ms, 可以用反馈系统抑制.

在单束团效应的模拟计算中, 束团用多个宏粒子代表, 全环电子云集中在某一位置, 用 n_e 个宏粒子来表示. 假定电子云的宏粒子与束团宏粒子相互作用仅发生在横向. 束团宏粒子数在纵向为高斯分布, 束团长度取为 $6\sigma_z$, 沿长度方向切片, 每个切片中的宏粒子和电子云宏粒子分别作用. 束团中的宏粒子按纵向运动规律每过一圈在切片内重新排列, 则束团头部粒子偏离的信息通过电子云分布的变化传递给束团尾部粒子.

对不同电子云密度下,跟踪4096圈束团尺寸变化的计算结果表明,当电子云密度超过 $1.0 \times 10^{12} \text{m}^{-3}$ 后,束流尺寸将急剧增加,即到了不稳定性阈值.计算模拟研究了束团中粒子的振荡过程,即束团截面尺寸增大的过程.计算结果并证明了较大的正色品可以抑制束团横向尺寸的增长.

4 总结

利用BEPC的束流和测量设备等条件,观测了电子云不稳定性的多束团耦合振荡和束流横向尺寸增长等现象.通过研究相关参数影响和模拟计算,深入理解了电子云不稳定性的物理机理,从而提出了可能的抑制措施.

实验中设计安装了电子云探测器,对电子云状态进行直接测量,得到了很多与电子云密度相关的信息.实验中,对清洗电极的观测是电子云不稳定性研究的

一项最新尝试,结果表明在清洗电场的作用下,电子云局部密度和分布状态都发生了变化,随着清洗电压提高,电子云密度逐渐降低.通过频谱仪记录束团振荡频率分布和条纹相机测量束团横向尺寸,研究了多束团耦合振荡和单束团横向尺寸增长.研究了螺线管磁场对不稳定的抑制作用.实验证明,在不影响束流寿命条件下,采用较大正色品和八极磁场都可以抑制电子云不稳定性.

对不同电子云密度抑制措施的计算结果表明,采用前室型真空室、TiN镀膜、光子吸收器、螺线管磁场及清洗电极等都可以有效降低束流管道中的电子云密度.这些措施已经开始在BEPC II中采用,预期可能克服电子云不稳定性引起的束流品质下降.

感谢BEPC运行组为实验提供稳定的束流,感谢束测组、电源组对实验的大力协助.

参考文献(References)

- Izawa M et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **74**: 5044
- GUO Z Y et al. The Experimental Study on Beam-Photoelectron Instability in BEPC, Proc. of PAC'97, 1997
- GUO Z Y et al. Studies on the Photoelectron Cloud at the BEPC, Proc. of APAC'01, 2001 APAC'03, 2004
- WANG J Q et al. PRSTAB, 2004, **7**: 094401
- QIN Q et al. NIM, 2005, **A547**: 239—248
- CHAO A. Physics of Collective Instability in High Energy Accelerators, J. Wiley, 1993
- LIU Y D et al. Private Communication
- LIU Yu-Dong. HEP & NP, 2004, **28**: 1222 (in Chinese) (刘瑜冬等. 高能物理和核物理, 2004, **28**: 1222)

Studies on Electron Cloud Instability in the BEPC*

GUO Zhi-Yuan¹⁾ LIU Yu-Dong QIN Qing WANG Jiu-Qing XING Jun

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

Abstract The Electron Cloud Instability (ECI) may occur in a positively charged particle storage ring when the machine is operated with a multi-bunch beam. The related experiments have been carried out on the Beijing Electron Positron Collider (BEPC) since 1996. The phenomena of the ECI are mainly coupled bunch oscillation and transverse beam size blow up. The ECI studies at the BEPC are reviewed in this paper, both on experiments and on simulations. The potential methods to suppress the ECI in a positron storage ring have been summarized from the studies.

Key words electron cloud, instability, storage ring

*Supported by National Natural Science Foundation of China(10275079, 10375076)

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