

直流清洗电场对储存环聚焦参数修正作用的研究

王相綦 裴元吉 董晓莉 徐宏亮 尚雷 王琳
樊宽军 方志高 姚成贵 胡守明 罗雪芳

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 研究了直流清洗电场对储存环聚焦参数的修正作用。认为该清洗电场形成的横向振荡数移位,与储存束流闭轨实时位置有关。指出电极沿环不对称分布的此类清洗电场,会破坏储存环聚焦结构的对称性,降低储存环的接受度,在一定条件下,对注入积累束流过程有负作用。

关键词 清洗电场 横向振荡数移位 畸变闭轨 不对称分布 环接受度

1 引言

已有文献限于直流清洗电极直流电场一般性作用与测量结果的叙述^[1-4],或者对储存电子影响,讨论所用电场有关的势函数不能满足实际边值问题的边界条件^[5]。最近文献^[6]报告了同样边界条件下的解析势函数,以及该电场的二极分量与高阶分量表达式。此类电场的势函数为

$$\varphi(x, z) = -\frac{V_{\text{dce}}}{\ln\left(\frac{ar}{R\delta}\right)} \cdot \ln\left[\frac{R\sqrt{x^2 + (z+a)^2}}{a\sqrt{x^2 + (z+b)^2}}\right], \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} a = a_0 + \delta \\ b = \frac{R^2}{a_0 + \delta} \\ \delta = \frac{2a_0R^2}{R^2 + a_0^2 - r^2 + \sqrt{(R^2 + a_0^2 - r^2)^2 - 4a_0^2R^2}} - a_0 \end{cases},$$

该表达式满足真实边界条件. 式中坐标零点在圆形真空管道轴上, x 为径向(真空管截面上的水平方向)坐标, z 为垂向(真空管截面上与地面垂直的方向)坐标. 式中的参数 R 为圆形真空管道的内半径, r 为电极圆导线的截面半径, a_0 为圆形真空管轴与电极导线轴的距离, V_{dcc} 为直流清洗电压. 式中其它符号均为公式推导中引入的计算常数. 式中的 V_{dcc} 单位取伏特, 其它单位均取米. 这样, 利用此表达式研究直流清洗电场清除离子机理^[7], 研究此类电场对储存环聚焦结构参数修正作用, 及其非线性高阶分量对储存束流包络的影响, 都是有可能的. 文中以合肥同步辐射光源(HLS)储存环为例. 该环聚焦结构为三弯铁消色差(TBA)类结构, 四个小周期, 有 32 块四极磁铁, 组成 16 个四极磁铁对. 注入长直线节两端的四极磁铁对处的真空盒形状为扁真空盒, 一个条带激励器占用一个四极磁铁对的圆管真空盒, 均没有安装此类清洗电极; 两个冲击磁铁使得两个四极磁铁对圆管真空盒的长度变短. 这样, 全环只能在 13 个四极磁铁对圆管真空盒内安装三种不同规格的清洗电极, 沿环不对称分布. 这些直流清洗电极总长度达到 17.9m, 相当于磁四极子物理长总和的 1.86 倍. 自 1989 年调束以来, 此类清洗电极在清除离子, 减弱离子陷阱不稳定性, 有利注入束流积累方面起着重要作用^[1-4,7]. 但是, 布局不对称分布清洗电极会改变聚焦结构的对称性. 清洗电场对储存束流横向振荡数(tune)影响的线性研究, 已有文献[9—12]报道. 本文将就此类清洗电场的二极分量和四极分量对储存束流 tune 的作用, 对柯朗-斯纳德参数^[13](指 α 、 β 、 γ 函数, 又称 Twiss 参数)的修正作用, 对储存环接受度的影响, 以及对水平多圈注入的可能影响进行了讨论.

2 近轴邻域的横向振荡数移位

直流清洗电场的四极分量对储存束流电子有聚焦或散焦作用^[6], 使得储存环工作点横向振荡数移位(tune shift).

2.1 线性描述

一般认为, 直流清洗电场四极分量的聚焦作用与施加电压线性相关. 近轴邻域, 存在

$$K_E = K_z(0,0) = -K_x(0,0) = \frac{-e(b^2 - a^2)}{E_C R^4 \ln\left(\frac{ar}{R\delta}\right)} \cdot V_{\text{dcc}} \quad (2)$$

线性关系, 表达式单位取 m^{-2} . 式中 e 为电子电荷, E_C 是单位为 eV 的电子能量. 这样, 负清洗电压对储存束流 x 方向的横向运动表现为散焦作用, 对 z 方向的横向运动表现为聚焦作用. 线性描述下, 储存束流电子横向运行二阶微分方程一般为

$$\frac{d^2 x}{ds^2} + (K_Q - K_E)x = 0, \quad (3a)$$

$$\frac{d^2 z}{ds^2} - (K_Q - K_E)z = 0, \quad (3b)$$

式中的 K_Q 为磁四极子提供的聚焦强度, 单位取 m^{-2} . 由于 K_E 与 K_Q 相比总是小量. 因此,

在线性描述下, 该清洗电场引起储存束流的 tune shift 为

$$\Delta v_x = \frac{e(b^2 - a^2) \int_{L_{\text{dce}}} \beta_x(s) ds}{4\pi E_C R^4 \ln\left(\frac{ar}{R\delta}\right)} \cdot V_{\text{dce}}, \quad (4a)$$

$$\Delta v_z = \frac{e(b^2 - a^2) \int_{L_{\text{dce}}} \beta_z(s) ds}{4\pi E_C R^4 \ln\left(\frac{ar}{R\delta}\right)} \cdot V_{\text{dce}}, \quad (4b)$$

式中积分在储存环已有清洗电极投入段 (积分号下用符号 L_{dce} 表示) 进行. 显然, 其比例系数仅与储存环聚焦结构和清洗电极结构有关, 两个方向的正负号相反.

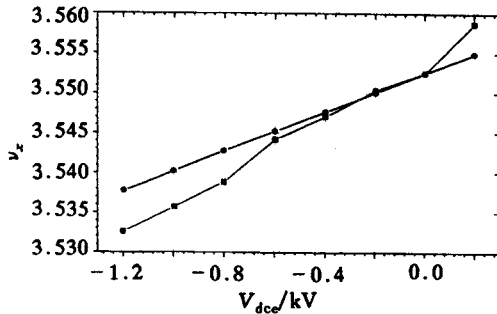


图 1 径向方向横向振荡数变化示意
—●—计算值; —■—测量值.

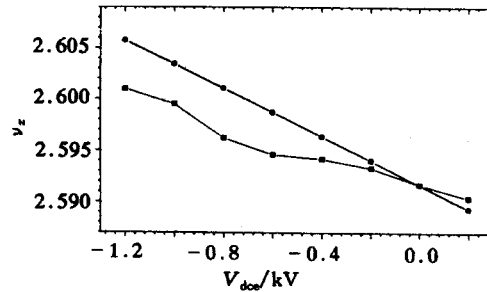


图 2 垂直方向横向振荡数变化示意
—●—计算值; —■—测量值.

将通用光源 (GPLS) 模式的运行数据与清洗电极的结构参数代入式 (4), 得到 tune 与清洗电压相关, 示于图 1 和图 2 (图中黑圆点标注的直线段). 相同运行参数下, tune 的测量曲线也示于图 1 和图 2 (图中黑方点标注的直线段). 图中横坐标为清洗电极的施加电压数值, 纵坐标为 tune 值. 测量数据是在小束流流强下用尽量小的激励信号测量得到的. 测量 tune 的主要仪器是型号为 TR4172 的频谱分析仪, 测量中设置合适的带宽和分辨率, 其测量精度可以达到 1.24×10^{-4} . 线性描述数值计算得到的数据, 与测量得到的曲线相比, 第一, 清洗电场径向都有散焦作用, 垂向都有聚焦作用; 第二, 数值计算和测量得到的 tune shift, 都随着清洗电压升高有增大的趋势; 第三, 测量数据表明 tune shift 与清洗电压的相关性, 是非线性的, 两种方法的结论有区别.

2.2 非线性描述

由图 1、图 2 可以看出, 同样清洗电压下的 tune shift, 在径向稍偏小, 在垂向稍偏大. tune shift 线性描述中, 清洗电场四极分量对聚焦作用的贡献, 是用圆形真空管道轴心坐标代入得到的. 如果一并考虑磁四极场和清洗电场对近轴邻域储存束流作用, 由动力学方程出发, 舍去清洗电场表达式分母中类似 $(x/a)^2$ 、 $(x/b)^2$ 、 $(z/a)^2$ 、 $(z/b)^2$ 二次方以上的

高阶小量, 得到近轴邻域储存束流的另一组二阶变系数微分方程

$$\frac{d^2 x}{ds^2} + \left[K_Q - K_E \left(1 - 2 \cdot \frac{a^2 + ab + b^2}{R^2(a+b)} z \right) \right] x = 0, \quad (5a)$$

$$\frac{d^2 z}{ds^2} - (K_Q - K_E) z = - \frac{eV_{dc}(b-a)}{E_C R^2 \ln\left(\frac{ar}{R\delta}\right)}, \quad (5b)$$

这样 tune 与束流电子的横向坐标有关.

2.3 移位与闭轨位置有关

垂向微分方程 (5b) 右边, 是类似于与闭轨位移有关的项. 此类清洗电极, 其垂直对称面上存在有清除离子的清洗电场垂向二极分量^[6,7]. 储存束流电子也会受到此二极分量作用, 其闭轨在总体上应略微向上移位. 由于闭轨向上位移, 清洗电场四极分量提供的真实聚焦强度贡献, 比式 (2) 给出的 K_E 计算值应略小一些^[6]. 真实储存环中, 影响闭轨的因素很多. 图 3 给出了测量数据时的注入能量和满能量条件下分别有无直流脉冲切割磁铁 (DC-septum) 磁场四种情况下 (均施加 -1kV 清洗电压) 的闭轨的相对关系, 图中基线是不加 DC-septum 磁场条件下满能量束流的闭轨. 图中横坐标表示储存环的纵坐标, 其起点为注入长直线节的中点. 图中纵坐标表示闭轨相对位移. 尽管测量系统的测量值尚未标定, 但由图 3 已经可以看出储存束流实时闭轨随状况有明显差异. 这样, 更精确地数值计算中, K_E 应理解为储存束流电子实时轨道处的值. 因此, 不难理解垂向 tune 的实际测量值, 总是会略小于线性描述的计算值.

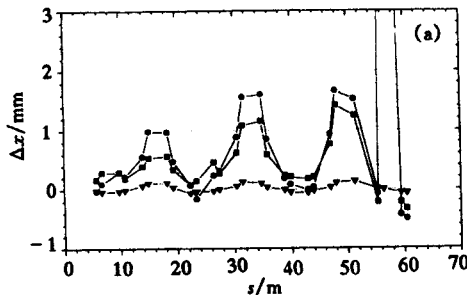


图3(a) 测量不同能量径向闭轨相对关系
—●—有DC-sep, 200MeV; —■—无DC-sep, 200MeV;
—▼—有DC-sep, 800MeV.

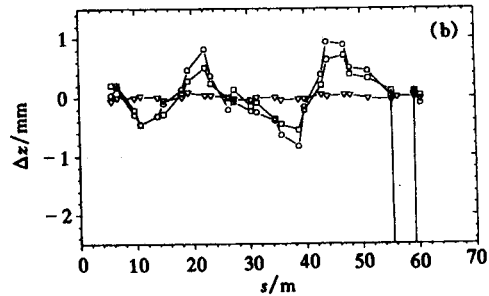


图3(b) 测量不同能量垂向闭轨相对关系
—○—有DC-sep, 200MeV; —□—无DC-sep, 200MeV;
—▽—有DC-sep, 800MeV.

储存束流的 tune 值, 实际上应理解为储存电子数百万圈旋转中每一圈横向振荡数的渐近平均值^[8]. 径向微分方程中, 含有与储存束流闭轨位置有关的修正项, 此修正项的正负号与闭轨在垂向的取向有关. 因此, 严格来讲, 只要知道了闭轨沿环分布, 就能够更精确地计算 tune shift. 在目前条件下, 计算只能是稍为粗糙一点的线性描述.

非线性描述表明闭轨位置有较大改变时, tune shift 也会发生变化. HLS 储存环 1997 年插入件真空管道开环、闭环. 闭环后发现 GPLS 模式在清洗电极投入状况不同 (部分没有投入) 时, 储存环注入工作点有变化. 其它状况相同条件下, 束流积累性能变差. 调整

使得全部直流清洗电极均投入后,束流累积性能才恢复储存环开环前的状况. 此阶段初步测量表明,清洗电极部分投入与全部投入两种情况相比,尽管清洗电压值相同,闭轨沿环分布与储存环工作点仍有变化. 因此,图 1 和图 2 测量数据的非线性变化,应理解为闭轨变化引起的.

3 对 Twiss 参数的修正作用

图 4 给出了无清洗电场作用,根据 GPLS 运行参数拟合的 β 函数和 η 函数沿环分布. 曲线起始点为第四个长直线节的中点. 图中横坐标为储存环纵向长度.

3.1 线性描述下的不对称分布

考虑直流清洗电场作用的线性描述,视全环为一个周期,计算 GPLS 模式 β 函数和 η 函数沿环分布. 所用计算程序采用为 HLS 发展的 MULIN 码. 计算中清洗电压取 -1.0kV , 其它参数与不投入清洗电场时取值完全相同. 清洗电场的投入分三种情况: 已有 13 个清洗电极都投入使用; 部分投入使用; 以及 2 期工程改造后 15 个直流清洗电极都投入使用. 三种布局的 β 函数和 η 函数沿环分布示于图 5、图 6 和图 7. 显然,投入清洗电极后,GPLS 模式的对称性被破坏了, β 函数和 η 函数沿环无对称性. 如果 15 个清洗电极

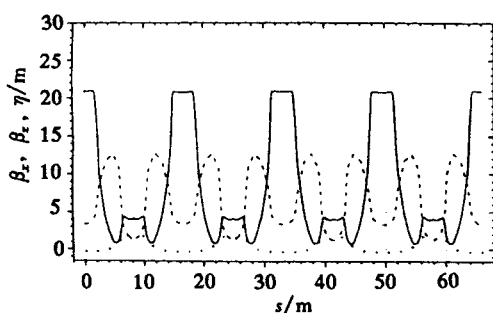


图 4 无清洗电极 Twiss 参数沿环分布

— β_x — β_z ··· η .

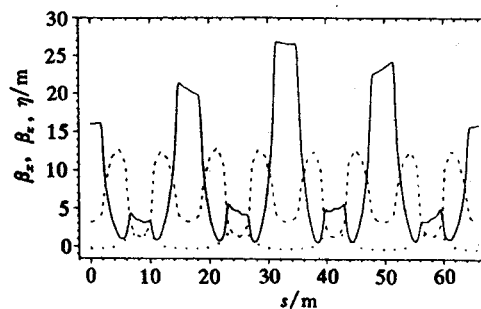


图 5 十一个清洗电极 Twiss 参数沿环分布

— β_x — β_z ··· η .

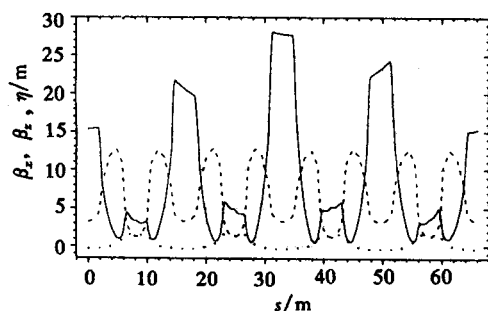


图 6 十三个清洗电极 Twiss 参数沿环分布

— β_x — β_z ··· η .

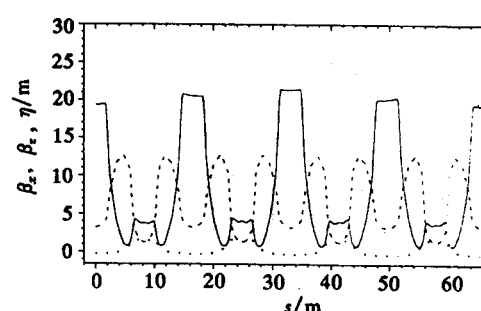


图 7 十五个清洗电极 Twiss 参数沿环分布

— β_x — β_z ··· η .

都投入, GPLS 模式的对称性会有所恢复, β 函数和 η 函数的对称性接近不投入清洗电极时的对称性.

3.2 储存环接受度

不投入清洗电场, 四个长直线节的 β_x 分布完全相同. 考虑清洗电场投入, 比较四个长直线节的 β_x , 第四个长直线节的 β_x 变小了, 第二个长直线节(高频腔和超导扭摆磁铁所在位置)的 β_x 变得最大. 图 5 和图 6 情况下, 第二个长直线节中点与注入长直线节中点相比, 其 β_x 比值分别为 1.31 和 1.37, 该比值平方根值分别为 1.15 和 1.17, 即储存电子的径向振幅分别增大 15% 和 17%. 或者说, 环接受度变小了. 为简捷起见, 在不考虑束流能散和动力学孔径情况下, 考察清洗电场对环接受度的定量影响. 清洗电极不投入时 GPLS 模式水平多圈过程的瓶颈大体是注入点邻域的脉冲切割磁铁切割板, 接受度的计算值为 $81\text{nm} \cdot \text{rad}$; 清洗电极投入时水平多圈注入过程的瓶颈处可能在第二长直线节, 环接受度的计算值为 $66\text{nm} \cdot \text{rad}$. 即环接受度由于直流清洗电极的不对称投入降低 19%.

如果第二长直线节真空室径向有效孔径相对变小, 对水平注入过程有不利影响, 会增加注入过程调试的复杂性. HLS 储存环此处的径向半宽由于新安装超导扭摆磁铁, 其径向半宽不超过 40mm, 已有清洗电极投入, 环接受度的计算值降为 $57\text{nm} \cdot \text{rad}$, 降低 30%. 如果 15 个清洗电极都投入, GPLS 模式的接受度恢复至 $75\text{nm} \cdot \text{rad}$, 只降低 7%. 如果不是第二长直线节处径向半宽已经降低, 此条件下环的接受度仍然取决于切割板处径向半宽, 可恢复至 $79\text{nm} \cdot \text{rad}$, 只降低 2%.

据此推测, 合肥光源束流发射度为 $27\text{nm} \cdot \text{rad}$ 的高亮度光源 (HBL) 模式, 其二周期对称性在直流清洗电极作用下也会发生变化, 使得注入电子的振幅在某些 β 函数形变增大处过大, 超出该模式的动力学孔径范围, 引起注入束流易于丢失, 注入积累束流状况会进一步恶化. 由此, 可以理解二期工程改造前 HBL 模式调束研究难度是相当大的. 改造后 15 个直流清洗电极投入, HBL 模式的对称性也会有所恢复, 注入积累束流的过程会有所改善.

4 结论

本文研究得到三点结论. 第一, 为清除离子目的而设置的直流清洗电极, 会引起储存束流横向振荡数移位. 第二, 无闭轨畸变时, 储存束流的横向振荡数移位与直流清洗电压线性相关, 可以用线性描述进行数值计算; 有闭轨畸变时, 储存束流的横向振荡数移位还与储存束流的闭轨实时位置有关, 精确数值计算必须用非线性描述. 第三, 全环不对称分布的直流清洗电极, 会破坏 Twiss 参数的周期对称性, 降低环的接受度, 对注入过程产生负面作用; 沿环对称分布的直流清洗电极, 基本不会破坏 Twiss 参数的周期对称性, 会减少直流清洗电场对注入过程产生的负面作用. 因此, 试图采用此类直流清洗电极的储存环应尽量布局对称安装.

参 考 文 献

- [1] He Duohui. *Int. J. Mod. Phys. A(P.S.)*, 1993, **2A**: 552—554
- [2] Pei Y J. Report progress of Hefei Synch. Radia. Light Source In: Liang Xiuru et al. Proc. of First Taiwan Straits Symp. on Synch. Radia. (in Chinese). Beijing: Particle Accelerator Society of China, 1993. 40—47
(裴元吉. 合肥同步辐射光源进展报告. 见: 梁岫如等编. 第一次两岸同步辐射学术研讨会论文集. 北京: 中国粒子加速器学会, 1993, 40—47)
- [3] Yao C Y, Pei Y J. In: Yiton T. Yan et al. AIP Confe. Procee. **326**. New York: AIP Press, 1993. 197—201
- [4] Pei Y J. *Jour. of China of Sci. and Tech.*, 1995, **25**:64—67
- [5] Chen L, Sun B, Wang J et al. Single bunch instabi. in HLS ring. In: Weiren Chou et al. Procee. of the Workshop on Beam Instabilities in Storage Rings. Hefei: Press of USTC, 1994. 65—71
- [6] Wang Xiangqi et al. *Journal of China University of Sci. & Tech.* (in Chinese), 1997, **27(2)**:228—235
(王相基等. 中国科学技术大学学报, 1997, **27(2)**: 228—235)
- [7] Wang Xiangqi et. al. Study on mechanism of eliminating ion with DC cleaning electrode of HLS storage ring. *Journal of China University of Sci. & Tech.* (in Chinese), 1998, **28(2)**(being published)
(王相基等. HLS 储存环直流清洗电极清除离子机理的研究. 中国科学技术大学学报, 1998, **28(2)**: 待出版)
- [8] Autin B. Nonlinear Beta. Oscillations. In: M. Month & M. Dienes. AIP Confe. Proc. **153(1)**(Physics of Particle Acc., SLAC Summer School). New York: American Institute of Phys., 1985. 288—347
- [9] Kohaupt R D. *Interner Bericht DESY H1-71/2*, 1971
- [10] Kasuga T et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1985, **NS-32(5)**:2550—2552
- [11] Kasuga T et al. *Jpn. Jour. of Appl. Phys.*, 1985, **24(9)**:1212—1217
- [12] Kasuga T. *Jpn. Jour. of Appl. Phys.*, 1986, **25(11)**:1711—1716
- [13] Courant E D, Snyder H S. *Annals of Physics*, 1958, **3**:1—11

Research on Changes of Focusing Structure Parameters Caused by the DC-Clearing Electric Field of Storage Ring

Wang Xiangqi Pei Yuanji Dong Xiaoli Xu Hongliang Shang Lei
Wang Lin Fan Kuanjun Fang Zhigao Yao Chenggui Hu Shouming
Luo Xuefang

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029)

Abstract The changes of focusing structure parameters caused by the DC-clearing electric field of storage ring were researched. The conclusion is made that tune shift caused by the DC-clearing electric field is related to the real-time close orbit of stored beam. The clearing electric field asymmetrically distributed along the ring destroys the symmetry of the focusing structure and decreases the acceptance of storage ring. It has negative effect to the injection and accumulation process in certain condition.

Key words clearing electric field, tune shift, deformed close orbit, asymmetrical distribution, acceptance of storage ring