

HLS二期工程储存环调试中一些问题的物理分析*

刘祖平 李为民 徐宏亮 王琳¹⁾ 冯光耀 张善才 洪钧

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 介绍了合肥光源(HLS)二期工程储存环调试过程中遇到的一些现象,并对这些现象进行了初步定量或定性的分析.在现有硬件条件的基础上,采取了一些相应的措施,取得了一定的效果,HLS通用模式储存束流超过300mA,寿命好于8h,达到了设计要求.

关键词 注入系统 Robinson不稳定性 Landau阻尼 超导扭摆磁铁

1 引言

HLS二期工程主要目标是:通用模式流强超过300mA,束流寿命好于8h;高亮度模式流强超过150mA等. HLS通用模式(GPLS)和高亮度模式(HBLS)主要参数见表1. 本文对HLS调试过程中注入系统表现分析、高频系统参数调节、八极磁铁系统设计以及超导扭摆磁铁补偿等问题做简单的介绍.

表1 合肥光源主要参数

参数名称	参数值
运行/注入能量/MeV	800/200
周长/m	66.13
GPLS和HBLS发射度/(nm·rad)	133; 27
GPLS和HBLS工作点	3.54/2.60; 5.82/2.42
GPLS和HBLS动量紧缩因子	0.0444; 0.0116
注入和运行能量下辐射阻尼时间/ms	1400/1400/700;20/20/10

2 注入系统分析

HLS采用集中布局四冲击磁铁局部凸轨系统. GPLS模式下,采用直流凸轨辅助注入,降低冲击磁场强度,获得了较好的注入累速率,积累流强超过300mA. HBLS模式下,储存束流损失率比较大,束流积累速率低,最高流强约80mA. 系统表现不佳,猜测原因很多,如磁场均匀性或一致性不好等. 为此用Elegant²⁾程序对注入过程进行了数值模拟研究.

模拟中,束流用满足 3σ 截断高斯分布的1万个宏粒子表示;公差满足 1σ 截断高斯分布.用不同误差种子数进行100次跟踪计算,对结果统计分析得到结论.分别考虑了注入束流公差(轨迹、能量和相空间参数误差等)和注入系统公差(磁场径向不均匀性,幅度和时间抖动)对注入积累速率的影响;并模拟了GPLS和HBLS调试中采用直流凸轨辅助注入过程.

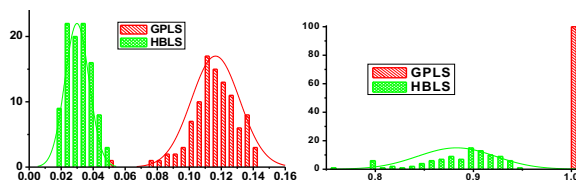


图1 GPLS和HBLS注入束流(a)和储存束流(b)跟踪结果统计

从不同条件下注入数值模拟中得到以下结论: 1) 现注入系统对注入束流参数很敏感; 2) 冲击磁场幅度和时间的抖动严重扰动储存束流,造成储存束流部分损失; 3) 增加直流凸轨并降低冲击磁铁强度,GPLS下注入速率变化很小,避免了储存束流损失,这有利于积累高流强; HBLS下注入速率很低,储存束流损失率仍然较高,很难注入积累高流强. 图1给出了GPLS和HBLS的注入跟踪模拟结果.

因此,系统公差影响过于严重是GPLS下无法工作在设计参数下和限制HBLS积累流强的主要原因.

* 国家重大科学工程(NSRL二期工程)基金,中国科学院创新工程和国家自然科学基金(10205024)资助

1) E-mail: wanglin@ustc.edu.cn

2) M. Borland, Elegant: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation, Advanced Photon Source LS-287, Sep. 2000

3 高频系统调试

HLS 新高频系统使用了分路阻抗和品质因子更高的新高频腔; 增加低电平电路 (调谐环路和幅控环路) 改善系统工作状态. HLS 注入能量低, 束流负载效严重, 调试难点在于注入过程中工作状态调节.

无反馈环路条件时合理地调节调谐杆位置就可以避免 Robinson 不稳定性, 稳定条件为

$$0 < \sin 2\varphi_z < \cos \varphi_B / Y, \quad (1)$$

式中 φ_z 是失谐角, Y 是相对束流负载因子, φ_B 是稳定相角. 调试中, 预先设置好调谐杆位置和高频机功率, 可以顺利注入束流 300mA 以上.

低电平电路会使情况更复杂, 重束流负载引起反馈环路间耦合而改变 Robinson 不稳定性阈值, 详细研究可在时域¹⁾ 或频域^[1-3] 中进行. HLS 低电平电路包含频控和幅控环路, 采用 Pederson 模型定性分析环路对束流稳定性的影响. 假设频控和幅控环路传输函数为 ω_T/s 和 ω_a/s , 其中 ω_T 和 ω_a 是环路增益, 稳定相角 φ_B 为 0. 只有频控环路时系统特征方程是 5 阶多项式, 由 Lienard-Chipart 判据可以得到稳定性条件. 当 ω_T/σ 和 ω_T/ω_s^2 远小于 2 时, 稳定性条件和式 (1) 近似相同, 表明慢频控环路几乎不会扰动束流. HLS 频控环路由步进电机控制机械式调谐杆, 满足慢环条件, 近似忽略频控环路影响, 只考虑幅控环路作用. 这时系统特征方程仍是 5 阶多项式, 若视在失谐角 $\varphi_L = 0$, 则由 L-C 判据得到稳定性条件为

$$0 < Y < \sqrt{4\sigma\omega_s^2 + 2(\omega_s^2 - \sigma^2)\omega_a - \sigma\omega_a^2} / 2\sigma^2\omega_a, \quad (2)$$

式中 ω_s 是同步振荡频率, σ 是腔阻尼率. 当 $\varphi_L \neq 0$ 时, 可以通过数值计算判断系统是否稳定. 计算表明 $\varphi_L > 0$ 时, 稳定性阈值有所提高. 虽然上述分析中采用环路传输函数可能和实际情况有所差别, 但可以得到两个定性结论: 幅控环路增益不宜太大和增加视在失谐角是有利于束流稳定的. 调试中, 采用上述方法避免了 Robinson 不稳定性发生.

4 八极磁铁系统设计

HLS 注入过程中束流能量低, 辐射阻尼弱, 全环均匀填充, 没有反馈系统抑制不稳定性, 束流集体效应很强. 调试中观测到各种不稳定现象, 如束流横向

“爆散”、束流突然损失和反常束流频谱等. 因此希望通过八极磁铁增强 Landau 阻尼来稳定束流.

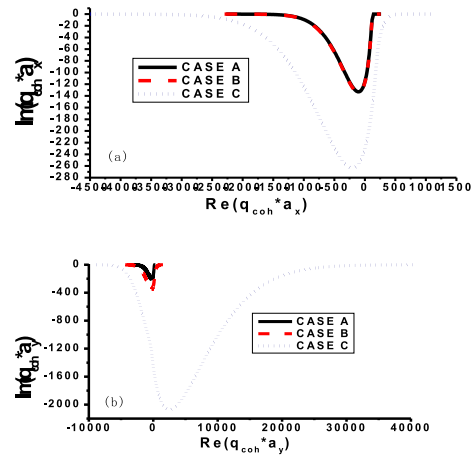


图 2 束流稳定性图($\text{Im}(q)=0$): 水平方向(a); 垂直方向(b)

表 2 HLS 储存环失谐系数

储存环条件	a_x	a_y	b
无八极磁铁 (CASEA)	127.66	40.94	29.14
一组八极磁铁 (CASEB)	128.90	332.21	-8.87
两组八极磁铁 (CASEC)	252.39	505.01	-300.26

设计中综合考虑八极磁铁对动力学孔径影响及产生频散的有效性. 设计目标是在不影响束流孔径前提下, 尽量增加频散. 束流稳定图^[4] 可表示出八极磁铁对束流稳定性的贡献. 图 2 给出了 HLS 储存环增加八极磁铁前后的束流稳定性图. 稳定性图计算中束流横向分布为高斯分布, $a_{x,y}$ 和 b 分别是水平、垂直和耦合失谐系数, $q_{coh,x/y}$ 是归一化相干频移. 表 2 给出了增加八极磁铁前后失谐系数的变化. HLS 无八极磁铁时, 横向振荡频率分散主要来自于四极磁铁边缘场和六极铁的高阶效应等. 图 2 表明, 目前一组八极铁只能改善垂直方向稳定性; 若再增加一组八极铁, 则不仅水平稳定区增大, 垂直稳定性也得到明显改善.

5 超导扭摆磁铁的线性补偿

超导扭摆磁铁给 HLS 储存环带来很强聚焦扰动, 工作点漂移会影响束流存储; β 函数畸变会影响束流品质如寿命. 早期运行中只补偿了工作点漂移, 束流寿命较差 (约 3h). 因此要优化超导扭摆磁铁补偿方案以改善束流寿命. 计算中, 环模型基于重新测量的四极铁聚焦梯度数据; 根据超导扭摆磁铁设计和磁测参数, 构建硬边模型^[6] 描述其线性聚焦作用.

1) L.K.Mestha, C.M.Kwan and K.S.Yeung, Instabilities in Beam Control Feedback Loops in Proton Synchrotrons, SSCL-Preprint-9, 1992.

计算中使用方法之一是响应矩阵拟合方法^[6], 即调节可以变化的参数, 使有插入元件时轨道响应矩阵 R^{wiggler} 和无插入元件时轨道响应矩阵 R^{ideal} 的差别最小, 具体过程可以表示为

$$-E = M \cdot \Delta K, \quad (3)$$

其中 $E_i = (R_i^{\text{ideal}} - R_i^{\text{wiggler}})$ 为偏差矢量, i 是响应矩阵元素标号; $M_i = \partial E_i / \partial K_j$ 是敏感矩阵; ΔK 是变量矢量. 由于 Lattice 函数是非线性的, 拟合过程需要多次迭代. 计算表明, 即使 HLS 储存环 32 块四极磁铁强度均独立可调, 也无法完全消除超导扭摆磁铁的聚焦扰动, 无法恢复 β 函数对称性.

运行中, 选择了一组 HLS 可以实现的补偿参数 (β 函数见图 3), 虽然响应矩阵与理想响应矩阵差别较大, 但消除了工作点漂移并抑制了较大的 β 函数畸变, 可以保证束流稳定并改善束流寿命.

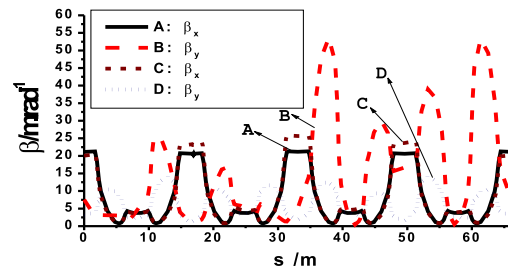


图 3 HLS 超导扭摆磁铁效应补偿前后 β 函数

6 结论

HLS 二期工程调试中, 遇到了很多有趣的现象. 本文仅就注入系统、高频系统、八极磁铁系统以及超导扭摆磁铁补偿等几个问题进行了简单地分析和讨论, 分析得到的结论与实际调试中的现象是基本一致的. 因此, HLS 储存环性能还有很大改善空间.

参考文献(References)

- 1 Boussard D. RF Stability Design for Stability, from Handbook of Accelerator Physics and Engineering. Edited by A.W.Chao and M.Tigner, Singapore: World Scientific, 1998
- 2 Pedersen F. Beam Loading Effects in the CERN PS Booster, IEEE Transactions on Nuclear Science, 1975, **NS-22**(3): 1906—1909
- 3 Pedersen F. A Novel RF Cavity Tuning Feedback Scheme

- for Heavy Beam Loading, IEEE Transactions on Nuclear Science, 1985, **NS-22**(3): 2138—2140
- 4 Berg J S, Ruggiero F. Stability Diagrams for Landau Damping, PAC'97, Vancouver, B.C., Canada, 12-16 May 1997
- 5 Wiedemann H. Particle Accelerator Physics II: Nonlinear and Higher Order Beam Dynamics, second edition, Berlin: Springer, 1998
- 6 Safranek J, Nuclear Inst. & Methods, 1997, **A388**: 27—36

Analysis of Some Phenomena in the Commissioning of the Storage Ring in the Phase II Project of the HLS*

LIU Zu-Ping LI Wei-Min XU Hong-Liang WANG Lin¹⁾

FENG Guang-Yao ZHANG Shan-Cai HONG Jun

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

Abstract The main subsystems of the Hefei Light Source (HLS) storage ring were upgraded in the Phase II project of the NSRL. Some phenomena, occurred in the commissioning of the HLS storage ring, were simply described and analyzed in this paper. Firstly, the performance of the injection system was analyzed by the numerical tracking study. Then the adjustment of the RF system was explained with the traditional Pederson model. The effects of the octupole system were expressly revealed by the beam stability diagram with and without octupoles. Finally, the linear optics compensation of the super-conducting wiggler magnet was introduced briefly. Generally, these analyses basically agree with the physical phenomena and maybe helpful for the improvement of the HLS storage ring.

Key words injection system, Robinson instability, Landau damping, super-conducting wiggler magnet

*Supported by National Key Project(NSRL Phase II Project), Knowledge Innovation Project of CAS and National Natural Foundation(10205024)

1) E-mail: wanglin@ustc.edu.cn