

反馈抑制 HLS 注入过程中 β 振荡的尝试*

王筠华¹⁾ 贡顶 刘建宏 郑凯 杨永良 孙葆根 卢平

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 为了提高注入束流的积累,抑制由于注入系统误差所引起较大的 β 残余振荡是非常有必要的. 本文较系统地介绍了合肥光源(HLS)抑制注入 β 振荡反馈系统的设计思想、原理和线路,并提供了它的初步实验结果. 作为原理论证和预研,我们使用了一个相对简单的模拟滤波器和移相器对 Kicker 过程激发的 β 振荡进行反馈,看到了明显的抑制作用. 为以后研制低频和高频反馈系统,研究抑制束流的横向和纵向不稳定性打下基础.

关键词 束流位置监测系统 横向和纵向不稳定性 反馈系统

1 系统概述

在合肥光源(HLS)环上新注入系统联调时,发现由于 4 块 Kicker 磁铁磁场的均匀和不对称,注入时会引起大的残余振荡^[1]. 日本 KEKB,美国布鲁海文的 RHIC 等^[2,3] 都采用反馈系统来抑制它. 2002 年底,我们制作了一套线路,希望能有效地抑制电子振荡,减少由于振荡过大和时间过长而碰壁损失的电子数,从而对注入时的电子积累产生有利影响. 2003 年初,在 NSRL 环上进行了抑制注入时 β 振荡的实验,实现了对 β 振荡的快速阻尼.

对于抑制低频的 β 振荡,设计与处理相对高频反馈系统来说较简单些. 模拟滤波器和可调的相移器就起到了很好的效果. 低频反馈系统由信号检测电极、对数比率信号处理模块、滤波移相电路、功率放大器和反馈激励电极等组成的,如图 1.

其中,信号检测是由环上一个 Button 束流位置监测电极(BPMQ7N)^[4] 来承担;购买法国 Bergoz 公司的对数比率模块(LR-BPM)^[5] 处理来自 BPMQ7N 的 pick-up 信号;对数比率模块输出近似直流 x 和 y 模拟电压信号,它正比于束流偏离管道中心的偏移量. 该信号经过自制的中心频率 2.5MHz,带宽 0.4MHz

的模拟滤波电路和 180° 可调相移电路处理,后经功率放大和魔 T 分别送到一对水平或垂直的反馈激励电极上. 反馈激励借用了环上的长条带电极(Strip-line Q7N).

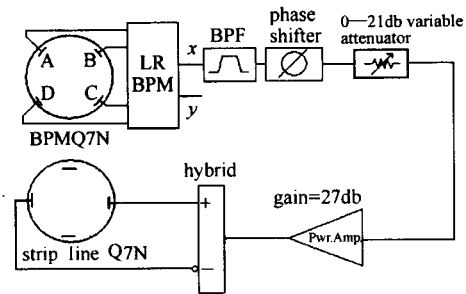


图 1 低频反馈系统框图

2 低频反馈电路

低频反馈电路由带通滤波、移相电路、可编程衰减器、功率放大器和魔 T 组成.

2.1 低频反馈信号

低频反馈信号来源于 HLS 逐圈测量系统的 LR-BPM 输出 V_{out} ^[6]:

2003-07-01 收稿, 2003-10-05 收修改稿

* 国家自然科学基金(10175063)资助

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

$$\text{因为 } x' = \frac{20}{SG_{ex}} \log \frac{A}{C} = \frac{1}{SG_{ex}} V_{out} = \frac{1}{G_x} V_{out} = K_x V_{out},$$

所以 LR-BPM 输出模拟信号:

$$V_{out} = 20(\log V_A - \log V_C) = G_x x'.$$

x 是束流偏离管道中心的偏移量, G_x (51.28mV/mm) 是 x 方向系统总的灵敏度^[6].

2.2 滤波及移相电路

滤波及移相电路作用是取出 LR-BPM 输出的 x 和 y 方向的低频振荡信号,并补偿电缆、放大器等带来的相移,保证反馈点的功率与束流反相位.

针对较大的残余振荡,滤波器的中心频率确定原则:当 x 方向自由振荡频率 $\nu_x = 3.56$ 时,低频反馈系统中心频率大约是: $f_L = f_0 \times 0.56 = 2.538\text{MHz}$ (f_0 是旋转频率 - 4.533MHz). 我们采用了 4 阶巴特沃斯有源滤波器,对中心频率的信号有很强的放大作用. 相移功能则通过一个简单的 RC 网络完成,通过调节可调电阻 R ,相移范围可在 $0^\circ - 180^\circ$ 变化.

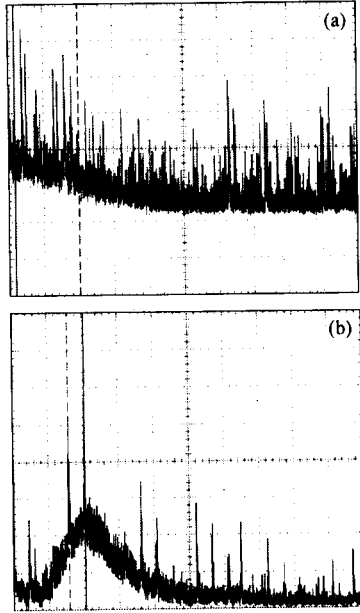


图 2 未加 Kicker, LR-BPM 输出未经过和经过滤波器后的 FFT 分析的比较
(a) 未经滤波的 FFT 分析 ($V: 10\text{dB/div}; H: 5.00\mu\text{s/div}$); (b) 经过滤波后的 FFT 分析 ($V: 10\text{dB/div}; H: 20.0\mu\text{s/div}$)

实际的 BPM 输出,除了 x 方向的位置信号外,还掺杂了基频信号及它们的和频、差频、倍频等如图 2(a). 经过滤波后,杂频信号基本去除,得到较好的 x 方向 β 振荡信号,见图 2(b). 从图中可以看到在

2.55M 处有明显的峰存在.

3 条带电极激励场的计算

我们使用的是位于储存环第三象限直线段上的 75cm 长条带电极,它的结构如图 3.

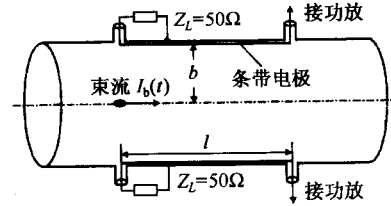


图 3 条带激励电极示意图

电极上游以 50Ω 电阻接管壁(地),下游接收来自功率放大器输出成对的激励信号.

激励时,条带上存在着所加电压产生的交变电流,它在空间感应出电场和磁场,由于频率较低 (2.5M) 波长远大于结构的特征尺度,条带上电流可看作同相位的.

首先,根据洛仑兹力公式: $f = q(E + v \times B)$ 在量级上估计电场与磁场力的大小. 从法拉第电磁感应方程 $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ 得出

$$|\nabla \times E| \approx \left| \frac{E}{L} \right|, L \text{ 为特征尺度,为 } 10^{-2}\text{m 量级};$$

$$\left| \frac{\partial B}{\partial t} \right| \approx \left| \frac{B}{T} \right|, T \text{ 为特征时间,为 } 10^{-7}\text{s 量级},$$

$$\text{可知 } \left| \frac{E}{cB} \right| \approx \frac{1}{c} \left| \frac{L}{T} \right| \approx 10^{-3}.$$

由以上估计看出,电场力仅有磁场力的千分之一. 这种情况下,只要计算磁场即可.

时谐情况下,在 Maxwell 方程组中消去磁场 H 或电场 E ,分别得到关于 E 和 H 的方程:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times E \right) - \omega^2 \epsilon_c E = -j\omega J_b,$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon_c} \nabla \times H \right) - \omega^2 \mu H = \nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon_c} J_b \right), \text{ 其中}$$

$$\epsilon_c = \epsilon - \frac{j\sigma}{\omega}.$$

这里已把总的电流分开为场诱导的电流 J_σ 和外加电流(由束流引起) J_b , 所以总的电流: $J = J_\sigma + J_b$. 考虑时谐的情况,

$$J_\sigma = \frac{4\pi\sigma}{c} E = -\frac{j4\pi\sigma}{\omega} \frac{\delta E}{\delta t},$$

故方程中既有 $\epsilon_c = \epsilon - \frac{j4\pi\sigma}{\omega}$ 的改变,又仍然存在

$\nabla \times \left(\frac{\mathbf{J}_b}{\epsilon_c} \right)$ 项. 这是场的控制方程, 我们还需要边界条件. 如果在界面上面电流密度 \mathbf{J}_s 和面电荷密度 ρ_s , 则有:

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) &= \rho_s, & \mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) &= 0, \\ \mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) &= 0, & \mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) &= \mathbf{J}_s, \end{aligned}$$

式中 \mathbf{n} 为界面法向的单位矢量. 下标 1, 2 表示两种介质.

在两端开口处, 电磁波会辐射至无限远, 必须在有限远处截断, 代之以辐射条件. 离源足够远的面满足 Sommerfeld 辐射条件^[7].

$$\begin{aligned} \lim_{r \rightarrow \infty} r(\nabla \times \mathbf{E} + jk_0 \mathbf{r} \times \mathbf{E}) &= 0, \\ \lim_{r \rightarrow \infty} r(\nabla \times \mathbf{H} + jk_0 \mathbf{r} \times \mathbf{H}) &= 0. \end{aligned}$$

这样, 理论上方程可以求解了. 但是实际中, 由于频率太低, 即使采用高阶的辐射条件, 边界仍然要求与场源相距四分之一波长^[8]. 为了实现计算, 避免计算量过大, 尽可能的伸长管道, 在两端用切向磁场为 0 的自然边界条件代替辐射条件. 明显的在离源很远处, 磁场应该很小, 可以用 0 磁场来代替. 这样计算结果是收敛的, 且不会引起太大的误差.

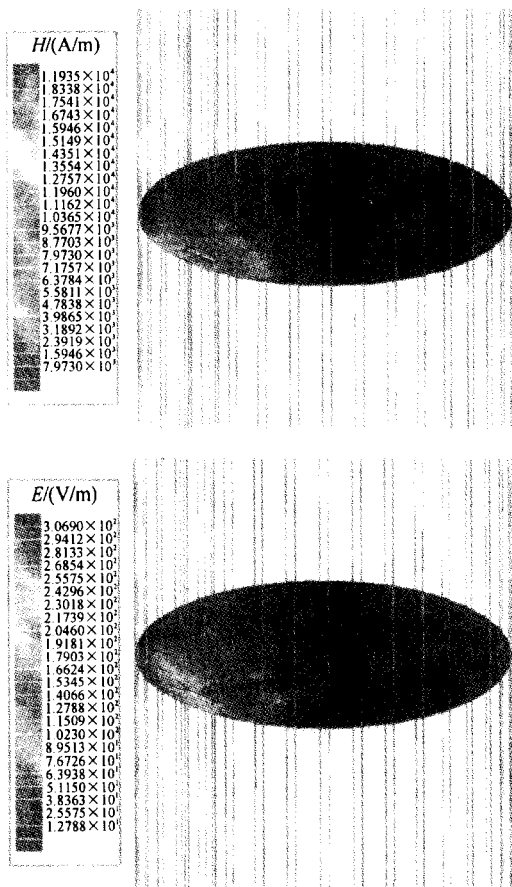


图 4 管道中心横截面磁场电场分布图

我们使用了 Ansoft 公司的 HFSS8.0, 专用于天线计算的有限元软件, 整个结构划分了 6 万个节点, 使用了 1G 的存储空间. 结果以 3D 显示如图 4. 当管道的中心附近通过 1A 电流时, 磁场与电场的值分别为

$$H = 3.43792e + 002 \text{ A/m},$$

$$E = 1.46201e + 001 \text{ V/m},$$

可以得出, $|E/cB| = 0.11 \times 10^{-3}$, 与前面的估算一致.

4 束流的阻尼时间

注入时, 由于注入系统误差的存在, 使得注入凸轨外的平衡轨道受到一个 δ 扰动. 环中存在着各种阻尼, 使得振荡幅度逐渐减小. 如果反馈存在, δ 扰动后最初的时间内反馈阻尼正比于扰动量 ∇x , 远大于其他阻尼, 因此只需考虑反馈阻尼, 而可忽略其他作用. 由于反馈阻尼与扰动同步减小, 一段时间后其他因素再不能忽略, 束流将达到平衡.

2003 年 3 月 26 日晚我们做了一系列实验. Kicker 打开的瞬间, 从图 5(a) 中的 LR-BPM 输出可以看出, 峰 - 峰值大约 70mV, β 振荡幅度大约在 1.4mm, 此时滤波放大输出如 5(b), 电压峰 - 峰值为 350mV. 经过功放和魔 T 后, 每根条带上通过 17mA 的电流. 此时管道中心磁场 $H = 11.7 \text{ A/m}$.

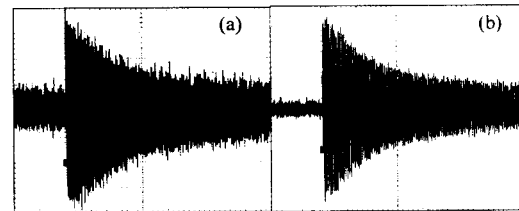


图 5 4 Kickers 同时加载时示波图

(a) LR-BPM 输出 ($V: 10.0 \text{ mV/div}; H: 200 \mu\text{s/div}$); (b) 经滤波器的输出 ($V: 50.0 \text{ mV/div}; H: 400 \mu\text{s/div}$).

束流初次经过条带, 速度改变量可以从动量方程 $Ft = m\Delta v$ 来估计. 其中 m 由相对论能量公式: $\epsilon = mc^2$, 阻尼力由洛伦兹方程 $|\mathbf{f}| = |Q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})| = 7.2 \times 10^{-16} \text{ N}$ 得到电子飞越条带时间 $t = 2 \text{ ns}$, 这相对于 2.5MHz 信号很短. 在这段时间内, $|\mathbf{f}|$ 可看作定值. 理想情况下, 我们加的信号总是与束流 β 振荡反相, 束流将看到一个平均的阻尼作用. 动量方程修改为 $\frac{\sqrt{2}}{2} ft = m\Delta v$, 可以算出, 束流经过条带, 速度平均改变 $|\Delta v| = 3.4 \times 10^3 \text{ m/s}$.

同时可以估算初始时刻 β 振荡的速度. 在储存环的 66m 周长内, 电子将振荡大约 3.5 个周期. 即 7 次从最大值到最小值. 每次所花时间 $t = 31\text{ns}$. 由此可以得出 β 振荡的平均速度 $v = 4.5 \times 10^4 \text{m/s}$.

由于整个系统是线性的, 以后 β 振荡与反馈依然成正比, $|\Delta v/v|$ 将保持不变. 在大幅度振荡时仅

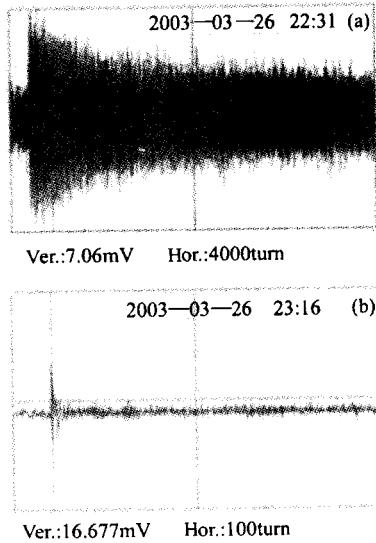


图 6 4Kickers 同时加载时 ADC 采集的数据

(a) 无反馈时; (b) 反馈存在时.

考虑反馈阻尼, 计算振荡速度衰减到 $1/e$ 所需的圈数, 可以由下式得出

$$(1 - \Delta v/v)^n = 1/e,$$

得到 $n \approx 13$. 即阻尼时间 $T \approx 2.9\mu\text{s}$. 如图 6.

从 ADC 采回的数据图中可以看到明显的抑制作用, 无阻尼时阻尼时间约在 2000 圈左右, 反馈阻尼存在时阻尼时间在 50 圈以下, 与我们的计算量级一致.

需要指出的是, 束流基本稳定后, 反馈阻尼将退居次要位置, 束流状态与未加反馈没有明显差别.

5 结束语

本文是对 2003 年 3 月 26 日的实验结果进行的初步分析, 有很多近似与忽略, 最主要的是假设反馈信号始终与束流反相. 但实验中, 由于 β 函数的不连续性, 我们的系统是做不到的. 最后仅得到了量级上相同的结果. 基于初步实验的成功, 在以上设计思想和实验结果的基础上, 使用高速 DSP 的设计方案已经在研制中, 它将采用精确的延时来保证相位的准确, 该设计将更为复杂与精细, 使用也更为方便.

参考文献 (References)

- 1 WANG Jun-Hua et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(1) (in Chinese)
(王筠华等. 强激光与粒子束, 2004, 16(1))
- 2 Heins D, Klute J. The Transverse Damping System With DSP PLL Tune Measurement for HERAP, DESY, Hamburg, Germany. DESY-M-Reports 1996
- 3 Drees A, Nrennan M. A Transverse Injection Damper at RHIC. In: G. A. Smith, T. Russo. Brookhaven National Lab, CP648, BIW 2002, Tenth Workshop National Lab
- 4 WANG Jun-Hua et al. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(4): 485—488 (in Chinese)
(王筠华等. 强激光与粒子束, 2002, 14(4): 485—488)
- 5 Bergoz Log-Radio. Beam Position Monitor User's Manual
- 6 WANG Jun-Hua et al. Calibration of Turn-By-Turn System of HLS and it's Application, HEP & NP, to be published (in Chinese)
(王筠华等. 合肥光源逐圈测量系统定标和它的应用, 高能物理与核物理, 待发表)
- 7 JING Jian-Ming, WANG Jian-Guo. The FEM of Electromagnetic. Xi'an: XIDIAN University Publishing Company, 1998. (in Chinese)
(金建铭著. 王建国译. 电磁场有限元方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998)
- 8 Ansoft HFSS Users Guide: Radiation Boundaries

Feedback Suppression of β Oscillation in Injection of HLS*

WANG Jun-Hua¹⁾ GONG Ding LIU Jian-Hong ZHENG Kai YANG Yong-Liang SUN Bao-Gen LU Ping

(NSRL, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract In order to improve the accumulation of the injected beam, it is necessary to restrain β -oscillation because of injection system error. This paper systematically introduces the design principle and circuit of the feedback system for the injected β -oscillation suppression of HLS. It also provides the preliminary experimental results. As the proof of the theory and pre-study, we use a relatively simple analog filter and phase shifter to agitate the Kicker course, which causes the β -oscillation, and get the feedback, from which we see the obvious suppression effect. All of these are the foundation of feedback system of bunch-by-bunch and lower frequency in the future, which are for the research of transverse beam & longitudinal beam instability.

Key words beam position monitor, transverse & longitudinal instability, feedback

Received 1 July 2003, Revised 5 October 2003

* Supported NSFC(10175063)

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