

文章编号: 1001—4322(2000)03—0379—03

# 储存环高频剔除系统\*

李为民<sup>1</sup>, 周安奇<sup>1</sup>, 李永军<sup>1</sup>, 李京一<sup>1</sup>, 刘功发<sup>1</sup>  
刁操正<sup>1</sup>, 于象坤<sup>1</sup>, 戴益明<sup>2</sup>, 裴元吉<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学, 国家同步辐射实验室, 安徽, 合肥, 230029;  
2. 中国科学技术大学, 电子工程与信息科学系, 安徽, 合肥, 230029)

**摘要:** 介绍了用于电子储存环部分填充和非均匀填充的一种实验装置储存环高频剔除系统, 它利用储存环中电子运动所具有的横向自由振荡和束团脉冲的时间结构这一特性, 采用外加激励的方法使其产生共振, 从而使得储存环中部分束团中的电子丢失, 形成储存环的部分填充和非均匀填充。还扼要给出了用高频剔除系统在储存环上实现不同填充方式时的束流积累结果。

**关键词:**  $\beta$ 振荡; 高频剔除; 部分填充

**中图分类号:** O 572 21, TL 506 **文献标识码:** A

目前国际上的加速器实验室凡有同步加速器者几乎都具备部分填充、单束团及全环填充多种运行方式。所采用的技术, 有的采用纳秒电子枪技术; 有的利用注入器与主加速器之间的开关元件控制实现部分填充及单束团; 有的采用高频剔除(RFKO)系统<sup>[1,2]</sup>; 对于特殊的实验用户来说还可以用局部凸轨技术改变同步光脉冲周期。中国科学技术大学国家同步辐射实验室(NSRL)电子储存环是采用多圈多次注入方式, 这种注入方式具有注入速率高的优点。但是这种注入方式是全环填充, 它所产生的多束团、横向耦合阻抗和离子俘获效应等不稳定性<sup>[3]</sup>限制了束流的积累, 为克服这种束流的限制我们研制了一套实现储存环部分填充的实验装置, 即高频剔除系统, 它利用电子在储存环中运动时所具有的横向自由振荡( $\beta$ 振荡), 在外加激励的作用下使其部分束团中的电子横向振荡运动产生共振而丢失, 在NSRL电子储存环上成功地实现了部分填充和非均匀填充。它不仅为积累更高流强提供了强有力的手段, 同时也为同步辐射用户提供了时间结构可调的同步光。

## 1 高频剔除原理<sup>[4]</sup>

储存环中电子的横向运动方程为

$$u'' + k_u \cdot u = G_u \cdot \delta_s \quad (1)$$

式中,  $u$  代表电子的两个横向位置  $x, y$ ;  $k_u$  为储存环聚焦参数;  $G_u$  为电子轨道的曲率;  $\delta_s$  为电子的色散。从式中可以看出电子的横向运动是振荡运动, 称为横向自由振荡, 即  $\beta$  振荡。在不考虑色散的情况下方程的解可表示为

$$u(s) = a \cdot \sqrt{\beta(s)} \cdot \cos\left(\frac{ds}{\beta(s)} + \varphi\right) \quad (2)$$

式中,  $a$  为振幅常数, 它与储存环的机械尺寸有关;  $\beta(s)$  为横向振荡振幅函数。

当电子在受到一个外加力的作用时, 横向振荡运动变为受迫振荡运动, 特别是当这个外加力是周期性变化的, 则此时的受迫振荡方程为

$$\overset{\circ\circ}{u} + \omega_\beta^2 \cdot u = F_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (3)$$

式中,  $\omega_\beta$  为横向振荡的角频率;  $\omega$  为外加力, 即激励信号的角频率;  $F_0$  为激励振幅, 而这个受迫振荡的

\* 中科院“八五”重大课题  
2000年2月29日收到原稿, 2000年5月7日收到修改稿。  
李为民, 男, 1960年6月出生, 副研究员

振幅可表示为

$$u_0 = F_0/m_e \cdot |\omega_\beta^2 - \omega^2| \quad (4)$$

由(4)式可得,当 $\omega = \omega_\beta$ 时电子的横向自由振荡在激励作用下将产生共振,束流电子因此将丢失,由于束流的横向自由振荡是高频振荡(一般机器的横向振荡频率为MHz量级),所以这种利用高频激励信号使束流电子的横向自由振荡产生共振从而去除束流电子的方法称为高频剔除(RF knockout)系统。

## 2 储存环部分填充

储存环的高频系统是用来加速电子和补偿同步辐射损失的,由于高频加速电场是正反向交变的,电子处于正向电场即加速电场中时从高频腔获得能量,从而得以在储存环中存储运行;而处于反向电场即减速电场中的电子因损失能量而丢失。因此电子束流在储存环中是以束团的形式存在的,每个束团都对应于相应的加速电场的相稳定区,形成束团脉冲。束团脉冲有严格的时间结构,其脉冲周期就是高频电场的周期。根据储存环电子束流所具有的横向运动的振荡性和脉冲的时间结构等特性,利用一个由开关脉冲控制的外加高频激励电场,开关脉冲打开时激励电场通过激励天线作用于储存束流,受到激励电场作用的束团被剔除;开关脉冲关闭时激励天线上没有信号,束流不受作用而被保存下来。这就是利用高频剔除方法实现储存环部分填充的原理<sup>[4]</sup>。

## 3 高频剔除系统简介<sup>[5]</sup>

### 3.1 系统电路工作原理

高频剔除系统框图如图1所示,它由储存环高频系统信号源作为触发源,这样即可使开关脉冲信号与束团脉冲在时间上同步,高频信号触发分频电路产生与所需要的填充系数相应的脉冲信号,经脉冲成形电路形成开关脉冲信号,经过调制电路对与 $\beta$ 振荡频率相对应的激励信号源的输出信号进行调制,就得到了激励信号(如图2中C所示),再经功率放大输出到储存环的激励天线上。

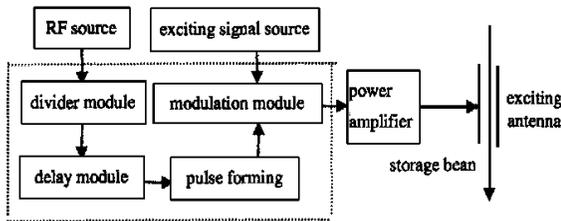


Fig. 1 Schematic layout of RFKO system

图 1 高频剔除系统框图

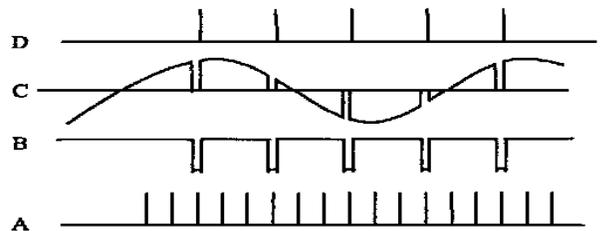


Fig. 2 The schematic diagram of RFKO timing

图 2 高频剔除系统信号时序图

N SRL 储存环的谐波数是 45, 高频剔除系统的分频点按 45 的因数为: 3、5、9、15、45, 对应于部分填充的束团串数分别为: 15、9、5、3、1(其中 45 分频点对应的部分填充可实现单束团)。

高频剔除系统(即系统框图中的虚框部分)由模数转换电路、数字电路和模拟电路三部分组成。系统输入信号(204.03MHz)来自储存环高频系统信号源,这样可以保证系统信号与储存环中的电子束团的时序同步。

模数转换电路将 204.03MHz 的正弦波输入信号转换为 ECL 电平的同频率的数字信号。

数字电路: 超高频分频电路对输入信号进行分频(3 分频), 将其频率降低至约 70MHz; 信号延迟电路用于调节开关脉冲与储存束流脉冲之间的时序, 使其同步; 经电平转换电路将 ECL 电平变换为 TTL 电平; 再经高频分频电路实现多种不同填充方式的分频频率(3、5、9、15、45 分频); 脉冲成形电路形成所需的开关脉冲。

模拟电路为零电平深度的调制电路, 由二极管桥式电路组成。四只二极管平时处于导通状态, 激励信号源的正弦波信号将无失真地输出, 当开关脉冲到来时四只二极管处于截止状态, 输出信号为零。电

路中采用脉冲变压器耦合电路产生用于桥式电路开关的双极性脉冲。

### 3.2 系统信号时序关系图及说明

高频剔除系统信号时序图如图2所示,图中以3分频点为例。图中A为电子束团脉冲信号;B为开关脉冲信号;C为激励信号;D为部分填充束团脉冲信号。

### 3.3 系统主要参数

开关脉冲前后沿为2ns;最小开关脉冲底宽为7ns;脉宽调节范围大于分频信号半周期;脉冲延迟调节范围为10ns;激励信号扫频范围为0.1~10MHz;激励功率约为0.5W。

## 4 实验结果

1995年5月高频剔除系统在NSRL电子储存环上调试成功45分频点,即单束团。此后经过几年来大量的机器研究与实验,使得高频剔除系统逐步得到了完善。目前利用高频剔除系统在储存环上已实现了单束团、三束团、单串束团、三串束团、五串束团和非均匀填充等多种运行方式;进行了高流强实验,在三束团非均匀填充方式下非常容易突破束流流强限制,在相同条件下,全环填充常规注入最高流强可达220mA,采用高频剔除流强即可突破300mA,注入时间为几分钟,最高流强达到350mA;为同步辐射用户(时间分辨光谱实验站)提供了单束团同步光。

致谢 工作得到了实验室同仁的大力协作,在此表示衷心的感谢!

### 参考文献:

- [1] Wehreter E, et al. Technischer bericht[R]. BESSY, 1983, B125/88
- [2] Katsura T, et al. Synchrotron sidebands in betatron oscillation measured by means of RF knockout in the PF storage ring[A]. Proceedings of the 5th symposium on accelerator science and technology[C], KEK, 1984, 286
- [3] 裴元吉等. 用RFKO法对HLS环中某些束流不稳定现象的初步试验研究[A]. 第六届全国加速器物理学术交流会议论文集[C], 张家界, 1997, 22
- [4] Kamiya K, et al. Vertical instability caused by ion-trapping in KEK-PF storage ring[A]. Proceedings of the 5th symposium on accelerator science and technology[C], KEK, 1984, 292
- [5] Kasuga T, et al. Single bunch storage in UVSOR storage ring[A]. Proceedings of the 5th symposium on accelerator science and technology[C], KEK, 1984, 295

## THE RF KNOCKOUT SYSTEM AT NSRL

L I Weimin, ZHOU Anqi, LI Yongjun, LI Jingyi, LIU Gongfa, DIAO Chaozheng,

YU Xiangkun, DAI Yiming<sup>+</sup>, PEI Yuanji

NSRL USTC, P. O. Box 6022, Hefei 230029, China;

<sup>+</sup> Department of Electronic Engineering and Information Science

Department of EEPS USTC, P. O. Box 6022, Hefei 230029, China

**ABSTRACT:** This paper describes the structure and principle of RF knockout system. Based on the transverse oscillations and timing structure of bunch pulse that are characteristics in storage ring, it excites the beam to produce the coherent oscillations and then, the electrons of some bunches are destroyed, resulting in a partial filling and uniform filling in storage ring. Also, the experimental results of the system are presented.

**KEY WORDS:**  $\beta$  oscillation; RF knockout; partial filling