

文章编号: 1001-4322(2004)08-1075-03

合肥光源储存环束流软慢加速控制*

刘功发, 谢 东, 李为民, 刘祖平

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

摘 要: 合肥光源储存环为非满能量注入, 束流以 200MeV 的能量注入到储存环后慢加速到 800MeV。介绍了慢加速的理论依据及储存环主电源控制系统的硬件结构, 详细描述了束流软慢加速方法中的慢加速表计算及慢加速过程控制。机器运行结果表明: 软慢加速方法控制灵活, 慢加速过程运行平稳, 束流损失很少, 能很好地满足合肥光源机器运行和研究的需要。

关键词: 同步光源; 储存环; 慢加速; 磁铁; 电源; 控制

中图分类号: TL503.6 **文献标识码:** A

合肥光源由直线加速器、输运线和电子储存环组成。直线加速器将电子加速到 200MeV 后, 通过输运线注入到储存环。合肥光源的电子储存环是一个四重对称的 TBA 结构, 共有 12 块二极磁铁、32 块四极磁铁和 14 块六极磁铁。电子在每块二极磁铁内弯转 $1/6$, 所有二极磁铁由同一台电源供电。四极磁铁分为 8 组, 分别由 8 台电源供电。六极磁铁分为 2 组, 分别由 2 台电源供电^[1]。当电子在储存环中积累到一定流强后, 要进行慢加速(Ramping), 将电子加速到工作能量(800MeV)。慢加速过程实际上就是控制上述 11 台电源协调一致地增减, 以保持束流的工作点基本不变, 即停留在稳定区内。

合肥光源一期工程的慢加速控制是通过特殊的硬件来实现的, 在多个电源控制器之间由同步信号来同步, 我们称之为硬慢加速^[2]。本文介绍的慢加速控制主要通过软件来实现, 没有专为慢加速设计硬件, 我们称之为软慢加速。软慢加速的优点是控制灵活, 如可以在慢加速过程中同时慢加速高频功率。另外, 由于没有专用硬件, 便于电源控制器的维护。

1 慢加速过程的理论依据^[3,4]

慢加速的物理过程是在加速带电粒子时, 同步调节各种磁铁的磁场和高频加速场的频率, 从而把带电粒子从初始注入能量加速到工作能量。对于电子储存环, 电子在 高能情况下, 其速度接近光速, 且随着能量的增长, 速度基本不变, 也就是其回旋频率保持不变, 因此在慢加速过程中无需调节高频频率。为保证电子的工作点(即横向振荡频率 ω_{or} 值)和弯转半径不变, 慢加速过程中必须随着电子能量的增加同步调节二极磁铁和四极磁铁的磁场。此外慢加速过程还要考虑校正色品 ω_{or} 的变化, 这就要求六极磁铁的磁场也必须协调地变化。

对于分离作用的磁铁, 各种磁铁只有一级分量, 在这里我们所关心的是它们沿电子运动方向的积分场。其积分磁场分别表示为

$$\begin{cases} B_B = \int B ds = \frac{(B)}{L_B} L_B = \frac{2}{nec} E \\ B_Q = \frac{\partial B_y}{\partial x} ds = (B) / K / L_Q = \frac{E}{ec} L_Q / K \\ B_S = \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} ds = (B) / / = \frac{E}{ec} / / \end{cases} \quad (1)$$

式中: B_B, B_Q, B_S 分别为二极磁铁、四极磁铁和六极磁铁的积分磁场; ds 为沿磁场路径的积分单元; $B = E \sqrt{1 - \beta^2} / qec$ 为系统的磁刚度, 对 200MeV 的电子, q 为 1, $\sqrt{1 - \beta^2} / E^2$ 为 0.999 997, 可近似认为 $B = E / (ec)$; E 为电子的能量; c 为光速; n 为储存环上二极磁铁的个数。 $\partial B_y / \partial x$ 和 $\partial^2 B_y / \partial x^2$ 分别为磁场的四极场和六极场。在理想情况下, 它们在四极磁铁和六极磁铁内分别视为常量。 $K = (1/B) (\partial B_y / \partial x) =$

* 收稿日期: 2003-12-29; 修订日期: 2004-03-18

基金项目: 国家计委九五重大科研项目“国家同步辐射实验室二期工程”资助课题

作者简介: 刘功发(1969—), 男, 高级工程师, 博士, 从事加速器控制系统和数据库工作; 合肥市 6022 信箱; E-mail: gfliu@ustc.edu.cn。

$(ec/E)(\partial B_y/\partial x)$ 为四极磁场的聚焦参数。 $\kappa = (1/B)(\partial^2 B_y/\partial x^2) = (ec/E)(\partial^2 B_y/\partial x^2)$ 为归一化的六极磁场参数。对六极磁铁作薄透镜假设,其长度 L_s 可忽略。

由于同步加速器的弯转半径主要是由二极磁场和粒子的能量决定,即 $R = E/(Bec)$ 。而 κ 和 ω_r 共同决定了束流的 β 和 γ 值。由(1)式可以看出,随着粒子能量的变化按照一定比例同步调节 B_B, B_Q 和 B_S 值,则可以有效地控制 β, κ 和 γ 值,从而保证了 β 和 ω_r 基本不变。

2 缓慢加速的实现

已知能量,通过(1)式就可以计算出对应磁铁的磁场(积分场)。由磁化曲线,即磁铁积分场与电流的 $B-I$ 曲线可以得到对应的电流 I 。而电源的输出电流 I 与电源控制器 DAC 的数字量 D 存在一个对应关系,即 $I-D$ 曲线。通过它可以得到对应的 D 值。这样,我们根据慢加速过程的起点能量和终点能量以及设定的步长,可逐步计算出对应的 D 值,将 D 值送给电源设备控制器,即可实现束流慢加速。

2.1 储存环主电源控制系统的硬件结构

合肥光源控制系统是基于 EPICS (Experiment Physics and Industrial Control System, 近年来国际上流行的用于加速器控制系统的软件包)的,图 1 为在合肥光源储存环主电源控制系统的硬件结构框图。一台 SUN 工作站用作 OPI (Operation Interface), OPI 通过局域网与 IOC (Input/Output Controller) 相连,IOC 通过 RS422 与 11 台电源控制器点对点通讯。IOC 和电源本控机都采用工业 PC (IPC) [5]。电源控制器的 16 位 DAC 板用来控制电源的输出电流。

2.2 慢加速表的计算

慢加速表是电子能量与各台电源控制器 DAC 数字量 D 值之间的对应关系表。慢加速表的计算是在 OPI (SUN 工作站) 上完成的,程序用 TCL/TK 语言开发 [6], 计算结果以 ASCII 文件存放。

电子注入储存环后,根据注入时的二极磁铁电源电流设定值、二极磁铁的 $B-I$ 曲线以及(1)式就可以计算出注入时的电子能量。对于合肥光源,注入时的电子能量一般为 200.8 MeV。慢加速的终点值由用户设定,缺省值为 800 MeV。步长由用户设定,缺省值为 0.1 MeV。

在通常情况下整个慢加速过程被分为几个能量段,每个能量段的慢加速速率可以不同,即步长不同,以满足不同的需要。同时为了补偿工作点的漂移,根据合肥光源多年的研究结果,选择 200, 300, 400, 600 和 800 MeV 等几个能量点进行工作点校正,它们之间的各点则采用线性插值的方法进行校正。这样,根据慢加速过程的起点和终点能量以及设定的步长,可得到慢加速过程中的每个能量点。由 $B-I$ 曲线和 $I-D$ 曲线,通过线性插值可逐步计算出对应各电源控制器 DAC 的 D 值。

2.3 慢加速过程的控制

慢加速过程的控制有两个关键点,其一是同步性,其二是慢加速过程的时间长度。由于各台电源电流的改变不可能绝对同步,这样会造成工作点的漂移。但只要选择合适的步长,保证每一步各台电源输出的电流同步,就可以保证束流仍停留在稳定区内。合肥光源储存环的工作点为 $x = 3.54, y = 2.59$, 工作点最大容许变化量为 $\Delta x = 0.04, \Delta y = 0.07$ 。测量结果表明,工作点的最大变化量 Δx 限制在 0.007 以内, Δy 限制在 0.015 2 以内,可保证束流的稳定 [4]。不同的能量段,束流对工作点漂移的承受度不同。对于合肥光源,在 200~300 MeV 段,步长可选择 0.1 MeV, 300 MeV 以上可选择 0.2 MeV 或更高,这样就可调节慢加速过程的时间长度。合肥光源储存环的注入能量为 200.8 MeV, 在此能量下,由于托歇克 (Touschek) 效应使得束流的寿命很短,理论计算的寿命仅为 10~20 min [7]。因此在注入完成后应该迅速进行慢加速,且慢加速过程的时间不能太长,但也不是越短越好。因为磁铁系统是电感元件,对磁铁电流增长的速度有一定限制,同时由于慢加速过程引起的束流振荡和阻尼现象,也对慢加速的速度有影响,而且低能时的影响较大。根据我们对合肥光源多年的研究,一般要求慢加速过程在 3 min 左右。对合肥光源, 200~300 MeV 能量段,选择步长 0.1 MeV, 能量在

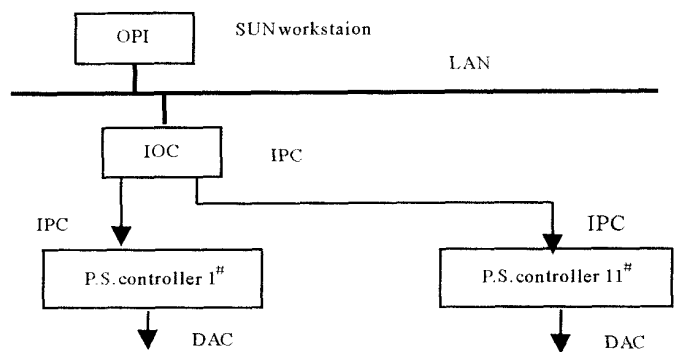


Fig. 1 Structure diagram of main P.S. control system of HLS storage ring

图 1 合肥光源储存环主电源控制系统的硬件结构框图

300MeV 以上,选择步长 0.2MeV,这样慢加速过程为 2.5min。

控制慢加速过程的程序在 OPI 上用 C 语言开发,在 IOC 启动时下装到其内存中。IOC 运行的操作系统是 VxWorks,它通过网络启动,启动时登录到 OPI 上。这样将 OPI 上慢加速表计算的结果文件放在 IOC 的登录目录,控制慢加速过程的程序就可以打开慢加速表文件,并通过循环来实现对各电源电流值的设置。在设置电源电流时有应答机制,以保证每一步各电源输出电流同步。只有每台电源的电流值都设置好才进行下一步电流的设置。

为方便运行人员的操作,控制慢加速过程的程序与慢加速表的计算程序放在一个操作界面,位于 OPI 上,通过 telnet 后台自动交互执行的办法来启动控制慢加速过程程序的执行^[8]。

3 结 论

软慢加速方法的控制非常灵活,如可以进行工作点的慢加速(即能量不变,只改变某几块磁铁的 K 或值)和向下慢加速(Ramping down,即慢加速的终点能量比起点能量低)。通过进一步的研究,掌握慢加速过程中高频功率的增加规律后,也可以很方便地实现慢加速过程中高频功率的同时慢加速。

近来机器运行结果表明,软慢加速方法控制灵活,慢加速过程运行平稳,束流损失很少。如 2003 年 12 月 18 日 3:24~3:26,慢加速开始时束流流强为 318mA,慢加速结束时束流流强为 314mA,慢加速过程束流损失仅为 4mA,能很好地满足合肥光源机器运行和研究的需要。

参考文献:

- [1] 国家同步辐射实验室. 合肥同步辐射加速器研制报告[R]. 合肥:中国科学技术大学,1991. (National Synchrotron Radiation Laboratory. National Synchrotron Radiation Lab development report. Hefei: University of Science and Technology of China, 1991)
- [2] Yao C Y, Wang J, Liu S, et al. Ramping magnet P. S. control for HESYRL ring[A]. Proceedings of the International Conference on Synchrotron Radiation Applications[C]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1989. 237~240.
- [3] 陈佳洱. 加速器物理基础[M]. 北京:原子能出版社,1993. (Chen J E. Accelerator physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1993)
- [4] 李京祯. HLS 控制系统改造及其物理应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2002. (Li J Y. HLS control system upgrade and related physics application research. Hefei: University of Science and Technology of China, 2002)
- [5] Li W M, Liu S Q, Li J Y, et al. The control system of the main magnet power supply in NSRL[A]. Proceedings of the 7th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control System[C]. Trieste: Comitato Conferenze EL ETTRA, 1999.
- [6] Welch B B, 崔凯. TCL/TK 编程权威指南[M]. 北京:中国电力出版社,2002. (Welch B B, Cui K. Practical programming in Tcl/ Tk. Beijing: China Electric Power Press, 2002)
- [7] 金玉明. 电子储存环物理[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2001. (Jin Y M. Physics of electron storage ring. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001)
- [8] Scbell M G, 詹文军, 廖铮, 等. Solaris 技术指南[M]. 北京:机械工业出版社,2001. (Scbell M G, Zhan W J, Liao Z, et al. A Practical Guide to Solaris. Beijing: China Machine Press, 2001)

Beam soft ramping control of Hefei light source storage ring

LIU Gong-fa, XIE Dong, LI Wei-min, LIU Zrping

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, P. O. Box 6022, Hefei 230029, China)

Abstract: HLS (Hefei Light Source) is a second generation synchrotron radiation light source. After injected into the storage ring at energy of 200MeV, beam will be ramped to 800MeV. At first, the accelerator physics analysis about the ramping process is described. After the structure diagram of HLS storage ring's main P. S. control system is shown, the ramping table calculation and the ramping process control are described in detail. Operation of HLS shows that the method of beam soft ramping is flexible and effective, and can satisfy the demands of HLS machine operation.

Key words: Synchrotron radiation light source; Storage ring; Ramping; Magnet; Power supply; Control