

快速冲击磁铁系统的研制

樊宽军 冯光耀 王相基 裴元吉 赵 枫

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 合肥同步辐射光源(Hefei synchrotron light source, HLS)的某些实验需要长时间间隔同步辐射(Synchrotron radiation, SR)光脉冲,但是目前HLS还不能满足这些要求。因此提出在HLS储存环上采用局部凸轨的方法来延长SR光脉冲的时间间隔。为此设计了快速冲击磁铁系统,其中脉冲调制器采用脉冲成型线(Pulse Forming Line)技术设计;冲击磁铁为空芯电流板结构的磁铁。初步实验表明,快速冲击磁铁系统的设计符合实验要求。

关键词 同步辐射, 时间间隔, 局部凸轨, 冲击磁铁

中图分类号 TL503.8

同步辐射加速器产生的SR具有严格的时间结构,它为时间分辨光谱研究提供了必要的条件。材料的性质不同,其发光光谱响应的过程也不相同,因此需要不同时间间隔SR脉冲。与其他同步辐射光源一样,目前HLS能提供SR脉冲的最大时间间隔为电子在储存环中的回旋周期 T_e (220 ns)。当光谱实验需要的SR脉冲间隔大于220 ns时,HLS则无法提供,这限制了对一些材料的研究。因此如何增加SR的时间间隔,拓宽SR的应用研究范围是一个重要的研究课题。

1 延长SR脉冲间隔的方案和对脉冲磁场的要求

根据储存环的束流动力学及快速磁铁技术,为延长时间分辨光谱实验站的SR脉冲间隔,提出采用局部凸轨的办法^[1]。由于技术的限制,局部凸轨由两部分组成,一是借用环中该光谱站光束线附近的校正铁形成一垂直方向的直流凸轨(DC bump),一是由冲击磁铁形成与直流凸轨反方向的脉冲凸轨(Pulse bump),如图1所示。当实验不需要SR脉冲时,电子沿直流凸轨通过该弯铁,由于直流凸轨与同步光引出狭缝(Exit slit)在垂直方向错位,因此同步光不能通过狭缝进入该实验站。当需要SR时,启动快速磁铁系统成脉冲凸轨,由于它与直流凸轨的高度相同,方向相反,因此在弯铁处的复合凸轨高度为零。此时,同步光可以通过狭缝进入实验站。

为了得到严格的长时间间隔的SR脉冲,脉冲凸轨必须仅对一个束团作用。因此要求冲击磁铁产生的脉冲磁场波形如图2所示,且满足(1)式

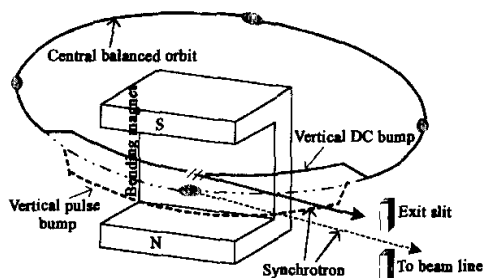


图1 凸轨方案示意

Fig.1 Scheme of the pulse bump

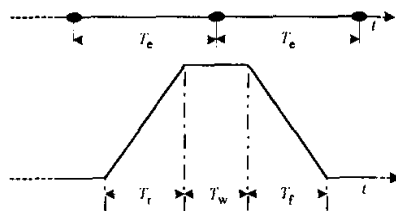


图2 快速磁场波形

Fig.2 Waveform of fast magnetic field

$$\begin{cases} T_r + T_w + T_f < 2T_e \\ T_w > l/c \end{cases} \quad (1)$$

式中, T_e 为储存环中的束团间隔, T_r 为波形的上升时间, T_w 为波形的平顶时间, T_f 为波形的下降时间, l 为脉冲凸轨的顶部跨距, c 为电子束团的运动速度(近似光速)。

为产生局部凸轨,假设冲击磁铁的踢角为 θ (rad),则冲击磁铁的磁感应强度 B (T)为(2)式

第一作者:樊宽军,男,1968年10月出生,2001年于中国科学技术大学获博士学位,助理研究员,加速器技术

收稿日期:2000-06-12,修回日期:2000-11-12

$$B = \frac{W\theta}{300L} \quad (2)$$

其中 L 为冲击磁铁的长度(m), W 为储存环中的电子能量(GeV)。

因为 HLS 的储存环周长小, 全环填充时束团间隔仅 $T_c = 5 \text{ ns}$, 冲击磁铁的响应难以到达如此快的速度。如果储存环运行在单束团模式时, 束团的间隔为 $T_c = 220 \text{ ns}$, 有可能实现上述设想。

2 脉冲调制器的设计

为了使调制器产生具有快速上升、下降沿的脉冲电流, 必须设法降低放电回路的分布电感。为此利用脉冲成型线(Pulse forming line, PFL)技术设计调制器^[2,3], 主电路见图 3。图中 V_0 为充电高压, K 为闸流管, R_0 为充电电阻, R 为匹配电阻, Z_0 为传输线的特性阻抗、 L 为冲击磁铁。

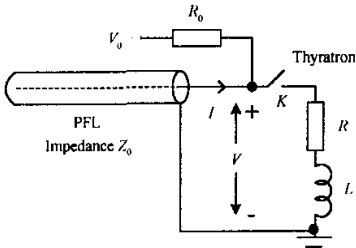


图 3 脉冲调制器电路

Fig.3 Pulse modulator circuit

由传输线理论知, 传输线上存在前向电压 V_+ 和反向电压 V_- 。当闸流管 K 导通时, 反向波 V_- 在 K 处立即向传输线的左端传播。负载上的电压为 V , 因此有

$$L \frac{dI}{dt} + RI = V = V_+ + V_- = V_+ + (V_+ - Z_0 I) \quad (3)$$

初始条件: $t = 0$ 时, $V_- = V_+ = V_0/2$, $I = 0$, 方程的解为

$$I = \frac{V_0}{R + Z_0} (1 - e^{-\frac{R+Z_0}{L}t}) \quad (4)$$

(4)式表示的是放电电流的上升沿。当反向波 V_- 到达传输线左边终端时, 发生开路反射, 经延迟后再次回到开关处, 此时反向波就又变成了前向波, 成为(3)式中的激励项。因此(3)的解为

$$I = \frac{V_0}{(R + Z_0)^2} \left[R - Z_0 + 2Z_0 \left(1 + \frac{R + Z_0}{L} t \right) e^{-\frac{R+Z_0}{L}t} \right] \quad (5)$$

(5)式描述的是放电电流的下降沿。这种电路的效率小于 50%, 因此为了获得强脉冲电流, 必须增加充电电压, 或降低放电回路的电阻。假设放电回路总的电感为 $0.2 \mu\text{H}$, 充电电压为 20 kV , 传输线的特性阻抗为 12.5Ω 匹配电阻为 12.5Ω , 利用 Pspice 模拟电路的放电波形见图 4。

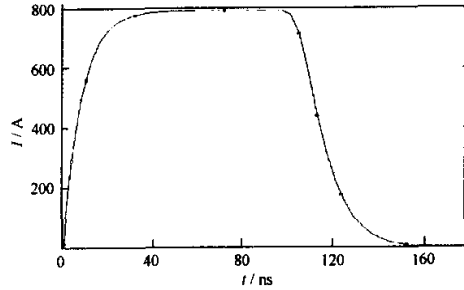


图 4 计算机模拟电路输出

Fig.4 Simulation of circuit output

3 冲击磁铁的设计

为了降低磁铁的电感量, 决定采用空芯结构的电流板作试验冲击磁铁。磁铁设计的基本原理是求解一组麦克斯韦维(Maxwell)方程组, 根据不同的边界条件求出相应的磁场分布^[4]。选择合理的电流板结构, 以产生符合要求的场型分布。商业电磁场计算软件 OPERA—3D 为磁铁设计提供了便捷的手段。计算多种空芯线圈结构的冲击磁铁, 经优化比较决定采用横截面如图 5 所示的结构, 长度为 20 cm 。实际冲击磁铁的照片见图 6。

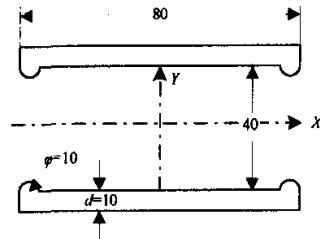


图 5 冲击磁铁的横截面

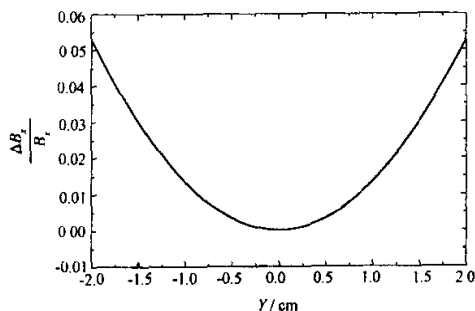
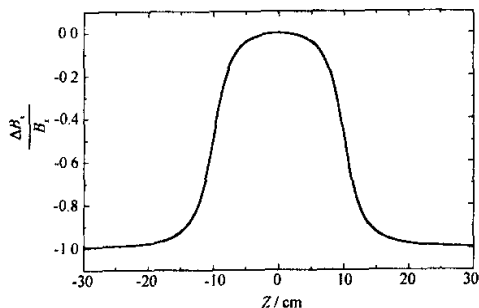
Fig.5 Transversal section structure of kicker



图 6 冲击磁铁照片

Fig.6 Picture of the kicker

因为束流经过冲击磁铁时将发生垂直偏转,故磁铁内的沿 Y 方向磁场 B_x 的分布是否均匀是磁铁设计的主要指标。当励磁电流为 1200 A 时,磁铁中心的磁感应强度 $B_x = 0.014$ T。磁场沿横向 Y 方向的归一化分布见图 7,其中 B_x 为磁铁中心的磁感应强度, ΔB_x 为沿 Y 轴的磁感应强度与磁铁中心磁感应强度差,1%均匀场的宽度约 1.6 cm。沿束流前进方向 Z 的积分场强度决定束流的偏转角,其归一化分布见图 8。

图 7 径向 Y 轴的归一化磁场分布Fig.7 Normalized distribution of magnetic field(Y)图 8 纵向 Z 轴的归一化磁场分布Fig.8 Normalized distribution of magnetic field(Z)

4 系统测试

4.1 冲击磁铁电感测量

因为冲击磁铁仅是两块电流板,因此磁铁的电阻可以忽略,但是磁铁的电感却对放电波形的前后沿有影响,必须准确测量。因为空芯线圈的冲击磁铁必须安装在真空室内,所以分别测量了磁铁在自由空间和真空室内的两种情况的电感量。磁铁电感量测试采用时域反射(Time domain reflectometry, TDR)系统^[5],图 9 所示的是测量冲击磁铁安装在真空室内时的电感量,其中真空室的内径 $\phi = 22$ cm。

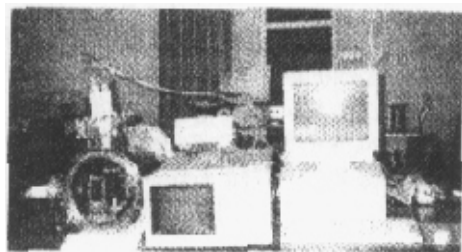


图 9 冲击磁铁电感量测试

Fig.9 Measurement of the kicker inductance

其中的 TDR 系统由 HP54120B、HP54124T 和计算机组成。因为传输线的阻抗不连续,所以会出现反射现象。对于电抗元件,反射波中有一段指数

曲线 $y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$, 通过对其时间常数的测量可以得到传输线上的电抗值。当波形失真时,可采用下述方法求出时间常数^[5]: 在指数波形上任意确定一点为零点,再找到幅度为该点 50% 的另一点,测出这两点的时间 t , 则时间常数 $\tau = 1.443t$ 。

实际测量冲击磁铁的 TDR 波形见图 10 和图 11, 经计算得两种情况下的冲击磁铁的电感,在自

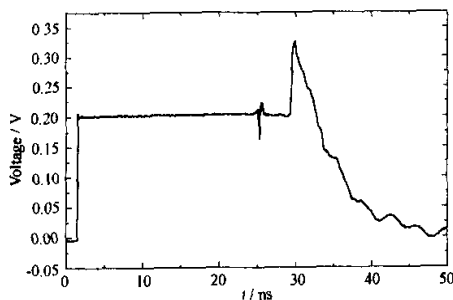


图 10 磁铁在自由空间时 TDR 波形

Fig.10 TDR waveform of the kicker in free space

由空间中 $L = 252 \text{ nH}$ ，在真空室内 $L = 469 \text{ nH}$ 。因为测量系统本身包含有引线，这将影响测量结果，实际的冲击磁铁电感量因小于测量值。

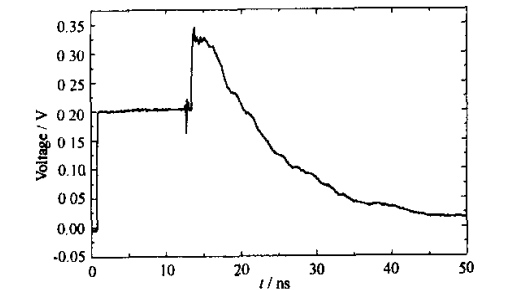


图 11 磁铁在真空室内的 TDR 波形
Fig.11 TDR waveform of the kicker in chamber

在真空室内，磁铁的边界条件发生变化，磁场的幅度会变小，这意味着需要更大的励磁电流。真空室的内径越小，磁场变化越大，详细的计算可参见文献[6]。

4.2 放电波形测量

为了进一步降低放电回路的电感量，减小放电波形的前后沿，把闸流管、匹配电阻置入金属圆形屏蔽室内，见图 12。其中 PFL 由四根高压脉冲电缆并联，电流测量采用 Rogowski 线圈(美国 Person 公司)作传感器，由示波器 TDS3032 读取测量线圈上感应的电压信号。计算机通过 GPIB 总线从示波器中获取数据，并在计算机上显示放电波形，测量软件由 HP VEE 编写。

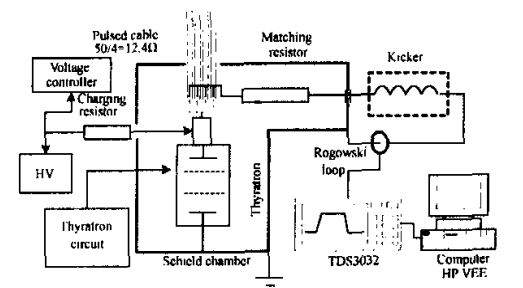


图 12 脉冲调制器电路
Fig.12 Circuit of pulse modulator

实测放电波形见图 13，此时放电电流约 950 A。波形的顶部略有小于 1% 的起伏，前沿(10%—90%)约 55 ns，后沿(10%—90%)约 65 ns。由于不完全匹配，匹配电阻小于传输线的特性阻抗，所以波形的后沿略有过冲。

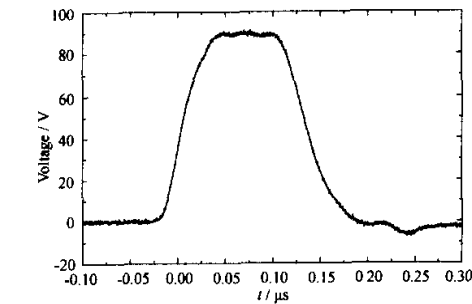


图 13 放电电流约为 950A 时的波形
Fig.13 Waveform of discharge current at 950A

4.3 冲击磁铁磁场分布测量

冲击磁铁产生的是高速脉冲磁场，所以采用点线圈法来测量磁铁内部的磁场分布^[7]。感应线圈上的电压为

$$V(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt} \tag{6}$$

式中 N 为线圈的匝数， $\phi(t)$ 为通过感应线圈的磁通量。如果线圈的面积足够小，则可以认为通过线圈的磁场是均匀的，因此(6)变成

$$V(t) = N \cdot S \cdot \frac{dB(t)}{dt} \tag{7}$$

由测量线圈感应信号，推算出磁场的大小。

当冲击磁铁在自由空间，磁铁的励磁电流约为 400A 时，测量磁铁内的磁场 B_x 分布。分别在磁铁的中心沿 Y 和 Z 方向测量出磁铁内磁场横向 Y 归一化分布和纵向 Z 归一化分布见图 14、15。图 14 中 B_x 为磁铁中心的磁感应强度，约 0.00432T， ΔB_x 为偏离中心的磁感应强度与中心磁感应强度的差，1%

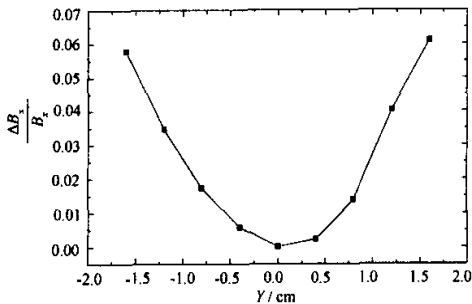


图 14 冲击磁铁磁场横向(Y)分布
Fig.14 Transverse (Y) distribution of magnetic field

均匀场的宽度约 1.4 cm。由于探头有一定的宽度,因此不能测出磁铁径向边缘的磁感应强度。探头的坐标定位有一定的误差,所测的结果仅近似反映磁铁内的磁场分布,与理论计算基本符合。

当磁铁在真空室内时,测量结果会略有变化。

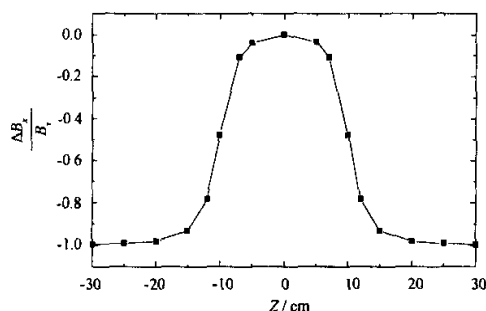


图 15 冲击磁铁磁场纵向(Z)分布

Fig.15 Longitudinal (Z) distribution of magnetic field

5 结论

快速磁铁系统产生的脉冲磁场流波形具有非常快速的上升和下降沿,而且脉冲宽度约 200ns,可满足储存环中有 2 个束团的运行。冲击磁铁的实验数据表明磁铁内部的磁场分布均匀范围和强度也基本符合设计要求。

本系统是一个初步试验系统。场型分布更好,效率更高的冲击磁铁,励磁电流波形更好的脉冲调制器,有待于进一步的研究和实验。

参考文献

1 Fan Kuanjun, Feng Guangyao, Pei Yuanji, *et al.* Nuclear

Science and Techniques (in China), 2000, 11(2): 124—129

2 廖承恩, 陈达章. 微波技术基础. 北京: 国防工业出版社, 1979

LIAO Chengen, CHEN Dazhang, Basic technology of microwave. Beijing: National Defence Industry Press, 1979

3 Grivet P 著, 黄鹤松等译, 高频传输线的物理基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984

Grivet P eds, HUANG Hesong *et al.*, translate, The Physics of Transmission Lines at high and Very High Frequencies, Shanghai: Shanghai Technology Press, 1984

4 王相兼. 800MeV 电子储存环注入冲击磁铁的研制. 中国科学技术大学硕士论文, 1982

WANG Xiangqi. Manufacture of injection kicker magnet of 800MeV electron storage ring, Master degree dissertation of University of Science and Technology of China, 1982

5 郭允晟, 苏秉炜. 脉冲参数与时域测量技术. 北京: 中国计量出版社, 1980

GUO Yunsheng, SU Bingwei. Pulse parameters and time domain measurement technology. Beijing: China metrology Press, 1980

6 Beth, Richard A. Air-core kicker magnets with and without metallic enclosure, PEP-264, Rai-Ko Sun, 1978

7 樊宽军, 王相兼, 尚雷, 等. 核技术, 1998, 21(3): 167—171

FAN Kuanjun, WANG Xiangqi, SHANG Lei, *et al.* Nucl Tech, 1998, 21(3): 167—171

Design of fast kicker system

FAN Kuanjun FENG Guangyao WANG Xiangqi PEI Yuanji ZHAO Feng

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

Abstract In HLS (Hefei synchrotron Light Source), some experimental stations need SR pulse with long interval, which far exceeds HLS can provide now. In order to satisfy their needs, we proposed a scheme of using local vertical bump to lengthen the interval of SR pulses. We have designed a fast kicker magnet system, in which the pulse modulator is designed based on PFL technology and the kicker is an air-core kicker magnet. Preliminary measurements denote that the kicker system can meet the requirements of design.

Key words Synchrotron, Interval, Local bump, Kicker magnet

CLC TL503.8