

电子储存环慢加速过程中弯转磁铁的涡流效应

裴国玺¹⁾ 张武 田宝瑛

(中国科学技术大学)

徐建铭

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

用双线圈感应法,我们对合肥同步辐射装置的块状模拟弯铁的磁场分布进行了测量.从实验的角度对电子储存环慢加速过程中弯转磁铁的涡流效应做了探讨,论证了存在慢加速过程时块状弯铁应用的可行性.

一、引 言

慢加速的电子储存环实际上是一种圆型谐振加速器.电子在弯转磁铁的作用下,沿闭合轨道运动.为了保证同步加速,弯转磁铁的磁感应强度 $B(T)$ 应满足^[1]:

$$r = \frac{[W(W + 2\epsilon_0)]^{\frac{1}{2}}}{300B} \quad (1)$$

式中 $W(\text{MeV})$ 是电子的能量, ϵ_0 是电子静止能量, $r(M)$ 是电子运行轨道的曲率半径.如果偏转磁场 B 同设计值有偏离,电子的轨道就不再是原设计的轨道,而是一条与设计轨道有偏离的另一条闭合轨道,将产生闭轨畸变^[1,2].

由于真空室的尺寸是按理想闭合轨道设计的,闭轨畸变不能太大,这就提出了对磁场偏离 $\frac{\Delta B}{B}$ 的要求.为了满足 $\frac{\Delta B}{B} \leq \pm 5 \times 10^{-4}$ 的设计指标,除对制造公差和安装公差提出要求外,还要考虑到其他原因可能引起的问题,如涡流、真空室材料,制造工艺等.对合肥同步辐射装置,200MeV 的电子从 LINAC 注入到储存环,在环中把电子能量提高到 800MeV,按公式(1),相应的磁场 B 将从 0.3T 增加到 1.2T.加速过程中磁场的上升,在弯铁和真空室壁中将产生涡流,此涡流必然影响磁铁磁场.涡流的影响程度如何一直是加速器工作者所关心的问题.到目前为止,文献上还没有这方面的报导.

为了避免涡流效应的影响,可采用迭片结构的磁铁.然而,由于整块磁铁工艺简单、

1) 此人现在高能物理所八室.
本文 1985 年 1 月 29 日收到.

成熟,投资较少,只要设法减小涡流影响,整块铁仍有很大的使用价值。

二、实验方法和过程

为了探讨涡流效应对场分布的影响,必须对动态场分布做精确的测量。方法有很多^[2],我们采用的是双线圈感应法^[3],因为这种方法简单,测量方便,我们实验室也有这方面的测量经验,实验设备和条件都具备。

这种方法是两个感应线圈反接把两线圈中感应电动势之差 ΔV 经过积分以求得线圈所测两“点”的 ΔB ,从而测得磁场分布。为了求得相对量 $\frac{\Delta B}{B}$ 随着时间的变化,可以采用两种办法,一是对输出的 $\Delta B(t)$ 准确定时,从 $B(t)$ 随时间变化的曲线上查找 B 值;二是采用另一套设备,测量 ΔV 的同时从单个线圈上取感应电动势 V 。我们采用的是后一种方法。

为了对场分布进行“点”测,感应线圈的面积要小。我们采用的线圈骨架是高 1.5cm,直径 1cm 的有机玻璃骨架,绕线是 0.07 漆包线,匝数 1 万。线圈的感应电动势 V 为:

$$V = -Ns \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

对此线圈,若 dB/dt 取为 $4 \times 10^{-2} T/S$,则 V 约为 40mV,而两点的反差信号就只有几个 μV 。我们是利用一台高灵敏度数字电压表 JMT-5 来完成采样的最低量程 10mV,灵敏度 $0.1 \mu V$,时漂 $0.2 \mu V/24$ 小时。为保证采样和电源启动的同时性,用来自同一触发控制板的信号控制它们。图 1 是控制线路图。从带 RC 的环形振荡器出来的矩形脉冲,经六缓冲驱动器 SN7407,一路送到采样数字电压表,另一路经过放大去开启电源。

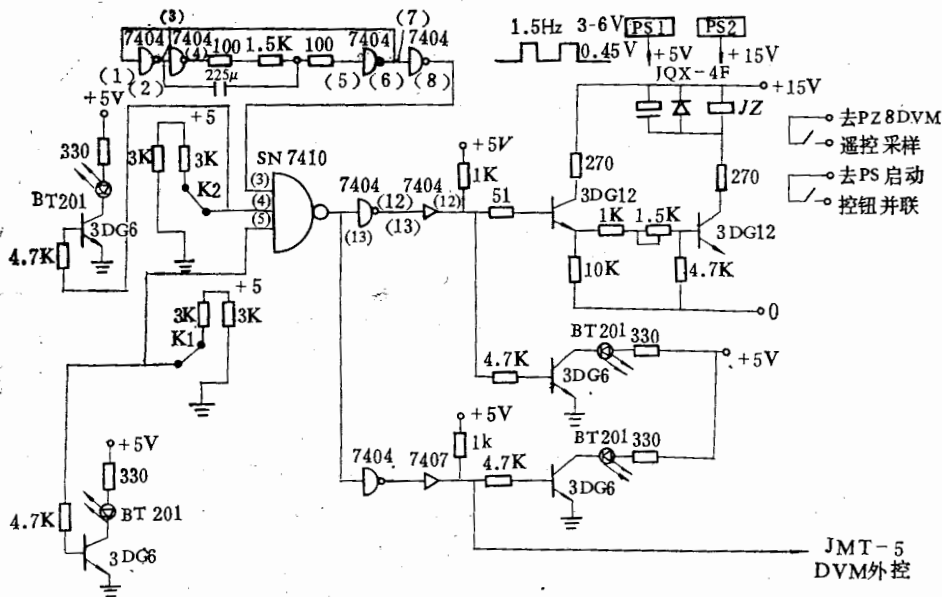


图 1 控制线路图

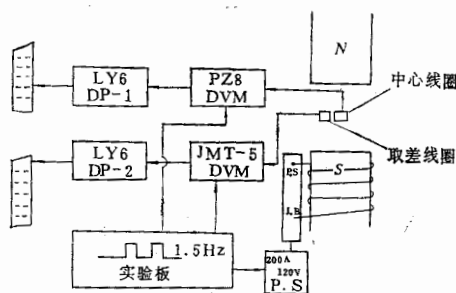


图 2 实验装置框图

图 2 是实验装置框图。具体安排是,中心线圈固定在磁铁极头间隙中间,动线圈固定在三坐标机械传动装置上。两线圈头头相接,尾尾引到 JMT-5DVM 上取反差信号,单从中心线圈引出的信号接到 PZ8DVM 上,然后用两台配套打印机分别打出电压数值 ΔV 和 V 。如果仅需空间某点相对于中间点的 $\Delta B/B$,只要对(2)式求和就行了。

$$\Delta V = N_1 S_1 \frac{dB_1}{dt} - N_2 S_2 \frac{dB_2}{dt} \geq NS \frac{d(\Delta B)}{dt},$$

或者: $\Delta B = \frac{1}{NS} \int \Delta V dt$, 用求和代替积分: $\Delta B = \frac{\Delta t}{NS} \Sigma \Delta V$, 同理, $B = \frac{\Delta t}{NS} \Sigma V$, 所以:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Sigma \Delta V}{\Sigma V}. \quad (3)$$

还要知道 B 或者 ΔB 绝对值的话,就要用核磁共振仪进行定标,给出系数 NS 。

实验之前,要对两个线圈进行校准。方法是把动线圈和中心线圈互相靠近,调节线圈的匝数和倾角,然后开启电源,使两线圈的反差信号接近于零,这时我们就认为两线圈的有效 NS 相等。这种校准是近似的,其可行性是基于物理上的对称性。线圈校好后,把动线圈拉到需测点就可以进行测量。因为是小信号测量,实验时应尽量避免外界的扰动,如附近用电器的启闭,人在仪器旁走动,机械振动等。

为了比较不同电流上升时间下的涡流效应,电流上升的时间要能改变和控制,这是通过一套皮带传动装置来完成的。整个实验所用的仪器有: PZ8 型直流数字电压表两台, JMT-5 型直流数字电压表一台, HC-1 霍尔测磁仪一台, LY6 数字打印机两台,核磁共振仪一台,控制线路实验板,测量线圈和三坐标机械传动装置等。

三、实验结果及分析

1. 场的滞后现象

让电流 28 秒从零上升到 74 安培,然后维持 3 分钟左右,这样重复 7 次,每次都利用 PZ8DVM 采样记录,对测得的数据进行处理。利用平均值

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i, \quad (4)$$

代表真值,同时给出均方根偏差(贝塞尔法)^[4]

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad (5)$$

其中残差 $v_i = l_i - \bar{L}$ 。定标是场稳定时用核磁共振仪完成。得出表 1 的结果,图 3 是相应的曲线,其中静磁部分是以前用霍尔片测得的结果。

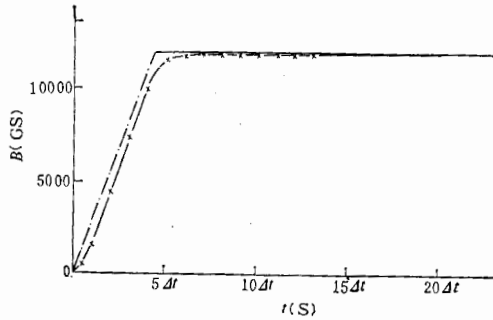


图 3 加速时间为 28 秒时极间隙中心点场随时间的变化曲线 ($\Delta t = 6.52$)

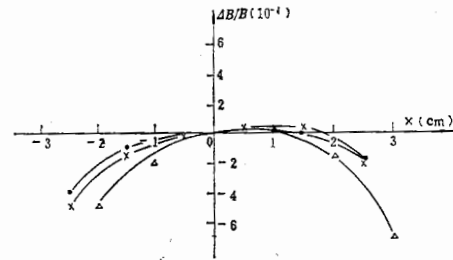


图 4 动态场分布曲线

— · — 静态情况 — × — 动态情况
— · — 加速时间 28 秒 — × — 加速时间 92 秒
— △ — 静态场

表 1 中心场随时间的变化曲线

$t(s)$	6.5	13.0	19.6	26.1	32.6	39.1	45.6	52.2	58.7	65.2	71.7	84.8	91.3	97.8	104.3	110.8	117.4	123.9
$B(Gs)$	1542	4459	7748	10248	11615	11842	11912	11937	11949	11955	11959	11962	11964	11975	11977	11979	11981	11983
$\sigma(Gs)$	51.4	66.8	71.6	77.3	81.9	88.1	94.1	96.7	98.0	98.6	98.8	98.9	98.8					

从图 3 中可以看到,在电流上升阶段,动态场同静态场基本上都保持线性上升,以后动态场则按指数规律变化,在电流达到最大值的瞬间,静态场同动态场差 600 多高斯,说明了涡流场的存在。大约 2 分钟左右,涡流场才逐渐消失。

2. 动态场的分布

在电源励磁电流上升时间为 92 秒的情况下,把两线圈靠近校准,然后用三坐标机械传动装置把线圈拉到不同点进行测量。测好后,再把动线圈送回校准位置。如果能重复

表 2 加速时间为 28 秒时动态场分布曲线

$X(cm)$	-2.5	-1.5	-0.5	0	0.5	1.5	2.5
$\frac{\Delta B}{B} (10^{-4})$	-3.39	-0.48	0.40	0.449	0.53	0.41	-1.51
$\sigma(10^{-2})$	0.27	1.99	1.72	0.24	1.5	0.28	1.17

原校准的结果,就认为这次测量数据可取。隔一段时间,再对上实验重复,以看重重复程度如何。表 2 和表 3 是电流上升时间为 28 秒和 92 秒时动态场的分布曲线,图 4 是相应的

表 3 加速时间为 92 秒时动态场分布曲线

X(cm)	-2.5	-1.5	-0.5	0	0.5	1.5	2.5
$\frac{\Delta B}{B} (10^{-4})$	-4.87	-1.53	-0.13	-0.112	0.34	0.31	-2.12
$\sigma (10^{-4})$	1.61	0.70	0.23	0.02	0.99	0.89	0.05

图形。可以看出,二种情况下涡流效应对场分布影响都非常小,实验的重复性较好,最大均方根偏差为 2.0×10^{-5} 。

四、结 论

以上实验结果已经说明,励磁电流上升时间为 28 秒的情况下,涡流对场的均匀的影响在允许范围以内,块状弯铁可以用于慢加速的电子储存环。国外有的实验室的运行经验是电流上升时间为 2 分钟左右时(相对于我们实验室的模拟弯铁),块状弯铁中涡流影响可以忽略,这同我们的结论基本相符。日本的 UVSOR 环^[5]已开始运行,它的储存能量 630MeV,注入能量 300MeV,也采用了块状弯铁。这一事实也提供了一个旁证。

参 考 文 献

- [1] 徐建铭《加速器原理》,科学出版社。
- [2] “合肥同步辐射装置的理论设计”(内部资料)。
- [3] J. J. Muray and R. A. Schall “Precision Measurements in Time-Varying Magnetic Fields”, IEEE TRANS ON INSTR and MEASURE, MI-13, 1964.
- [4] 刘智敏《误差分析与数据处理》,原子能出版社,1985。
- [5] “わが国最大規模の 600MeV 電子蓄積リング,電子蓄積に成功”,電磁研ニエース, 385 号, 1982。

THE EDDY-CURRENT EFFECTS OF A BENDING MAGNET ON AN ELECTRON STORAGE RING DURING SLOW ACCELERATION

PEI GUO-XI ZHANG WU TIAN BAO-YING

(University of Science and Technology of China)

XU JIAN-MING

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The magnetic field distribution of a C-type solid yoke bending magnet—a model magnet used on the Hefei synchrotron is measured and the eddy-current effects of a bending magnet on an electron storage ring during slow acceleration are investigated by two coil induction approach. When slow acceleration exists, possibility of applying a solid yoke bending magnet is verified.