

超灵敏小型回旋加速器质谱计 主磁铁的非电垫补和磁场测量

张锡麟

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 叙述了SMCAMS磁场测量装置,分析磁场测量精度及非电垫补过程和结果。

关键词 磁场测量,测磁精度,磁场垫补

中图分类号 TL 542 A

1 SMCAMS的磁铁特点和磁场的物理要求

1.1 SMCAMS 磁铁特点

(1) 高调变度非均匀磁铁:为了让粒子在加速空间内有高的传输效率,我们摒弃了没有轴向聚焦能力的均匀磁铁,采用了高调变度非均匀磁铁。但非均匀磁铁的加工难度高,费用贵,周期长。特别是工作状态(真空和磁场)下磁铁形变大,磁场垫补复杂,等时性磁场使用范围窄。

(2) 磁场的非电垫补:SMCAMS要工作在倍频次数为16的目前世界上最高的倍频加速模式。相应地,就要求磁场有很高的等时性。首先,我们改进了国际上经典的理论等时性磁场计算方法,使精度提高了两个数量级,这样就得到了适合16次倍频的理论等时场值。其次,为了降低造价,方便运行、维护,没有采取通常的调补线圈、谐波线圈等手段来获得合乎要求的磁场,而是通过修正扇形磁铁叶片的边缘形状,即非电垫补的方法获得理想的磁场分布。我们在国内首次成功地采用了磁场非电垫补方法获得了等时场。这种方法国外在商品化的医用回旋加速器上使用着,并申请了专利。国外的方法只能说在4次倍频下被证明是正确的,而我们自己摸索的方法已被证明适用于16次倍频运行。还须指出我们的加速器不但未用调补线圈就得到了满意的等时性磁场,而且垫补后的一次谐波如此之小,以至于连谐波线圈也不用。粒子注入加速器后,无需调节轨道就被加速直至引出。而国外的医用加速器虽然不用调补线圈,但还是靠谐波线圈来调节轨道。

(3) 低磁场的测量:由于三角波加速电压的频率和幅值不能很高,这就限制了小回旋加速器的平均磁场只有2300Gs。低的平均磁场对达到高的测磁精度带来困难。一般回旋加速器上测磁精确到1Gs,而我们就要求精确到0.5Gs。因此,我们严格控制测磁系统各个部件的误差,充分发挥仪器的潜力,提高磁场测量精度。我们自己设计的微机控制的测磁系统在1°步长下50分钟能测完一次,磁场平均值的测量重复性不超过0.1Gs。但

是,磁场敏感元件霍尔片性能的长期稳定性不佳,减弱了测量结果的可靠性,所以最后结果经过了必要的光滑处理。

(4) 超灵敏小型回旋加速器质谱计的磁轭上与真空室合为一体,没有独立的加速真空室。因而在机械设计与测量磁场时,要采取措施,要考虑磁铁真空密封、大表面镀镍和大气压力下的形变,既要保证满足等时性,又要保证达到 $1\sim 3\times 10^{-7}$ 托的高真空。

1.2 SMCAMS 对磁场的物理要求

(1) 等时性区:从小于245mm至大于525mm;(2) 最高峰场:约0.4T;(3) 轴向聚焦频率: $\nu_z \geq 0.6$;(4) 等时场精度: $\pm 0.05\%$;(5) 等时场缺陷引起的相移允许量:粒子在加速过程中最大相移不超过 30° ,在禁区($R=390\text{mm}$)前的累计相移不超过 10° ,在引出前累计相移(不包括辅助电极引起的相位聚合)不超过 20° ;(6) 一次谐波幅值小于 $\pm 1\times 10^{-4}\text{T}$;二次谐波幅值小于 $\pm 15\times 10^{-4}\text{T}$;(7) 加速器运行条件下磁场稳定度优于 $5\times 10^{-5}/8\text{h}$;(8) 磁场重复性 $\pm 0.01\%$ 。

2 磁场测量装置与测磁精度分析

磁场测量是磁场垫补的基础,它也为粒子动力学计算提供必须的磁场实测数据。小型回旋加速器质谱计磁场强度低,而且磁场沿着方位角的变化强烈,另一方面,磁场等时性精度要求相当高,因此磁场测量的难度很大。测量重复性要求优于 $\pm 1\times 10^{-4}$,测量误差 $\pm 2\times 10^{-4}$ 。

磁场测量和垫补的周期长,数据量大,因此建立了一个磁场的测量数据获取和处理的自动化系统,本系统可以在50min内完成一次磁场测量。为了尽可能提高测量精度,必须严格控制各个部分和环节的误差。

由于质谱计工作磁隙小,只有25mm,而真空压力引起磁隙的变化很大(盖板中心位移0.18mm),无疑真空状态下的磁场分布与大气状态有很大差异,所以磁场测量必须在真空状态下进行。

2.1 磁场测量自动化系统

本系统采用多霍尔片(26片)探头,探头安装在测量悬臂上。霍尔片沿径向以13mm为间隔均匀分布,覆盖了所要求的等时性区域。串联的霍尔片由恒流源提供工作电流,密封在以紫铜板为均热板的恒温槽里,恒温槽温度由恒温控制器控制(图1)。

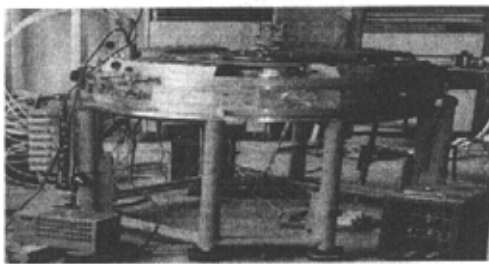


图1 串联的26霍尔片密封以紫铜板为均热板的恒温槽里

Fig.1 The probe of the multi-Hall plates

霍尔片相应于磁场强度的信号电压经多路开关由数字电压表测量,数据直接输入计算机进行各种数据变换和处理。计算机还控制步进电机,通过减速机构及蜗轮附来控制测量臂的转动(图2),使各霍尔片每隔一度取得磁场数据。各霍尔片输出电压与磁场强度的对应关系用核磁共振法事先在标准磁铁上进行定标。

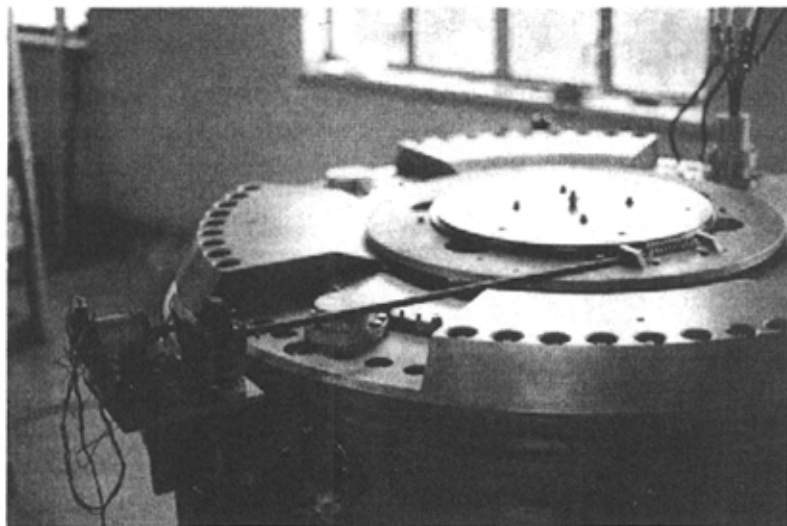


图2 在磁铁上就位的测磁机械装置与步进电机减速机构蜗轮附测量臂

Fig.2 The magnetic field measuring device on the magnet

2.2 霍尔元件及电子仪器

由于我们所研制的小回旋加速器质谱计的磁场平均值只有0.23T,峰值约0.4T,谷值只有0.4T,都远远小于通常的等时性回旋加速器的磁场。为了提高磁场测量的精度,在选择磁敏感元件时,尽可能选用高灵敏度、低温度系数、长期稳定性好的霍尔片。实际测量中所采用的霍尔元件型号为SBV579,其工作电流99.912mA,灵敏度 $> 1.1\text{V/A}\cdot\text{T}$ (实际为1.2~1.8),温度系数为 $-5\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ (实际约 $-4\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$),灵敏区 $1.5\text{mm}\times 1.5\text{mm}$ 。供给霍尔元件工作电流的稳流电源为382A电流/电压校准器,其输出电流稳定度不劣于 $2.5\times 10^{-5}/\text{h}$,但其长期稳定性达不到 $5\times 10^{-5}/\text{月}$ 的指标,因此在实际工作中,在其输出电流回路中串接一个 1Ω 标准电阻,并用高精度数字电压表监测其两端电压,还根据当时标准电阻所处的环境温度对标准电阻阻值进行校正,必要时适当调正电源的输出电流,从而保证磁场测量时的霍尔片工作电流和定标时的工作电流的一致性($\pm 3\times 10^{-5}$)。

霍尔元件受温度的影响必须受到特别注意。探头必须恒温,恒温槽温度波动 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ (环境温度变化 $\pm 5^{\circ}\text{C}$)。为进一步提高精度,对测温二极管的信号电压亦用数字电压表进行监测,必要时随时调节恒温控制器,保证测量磁场时的恒温槽温度和定标时的温度一致($\pm 0.05^{\circ}\text{C}$)。限于条件,只在均热板中部安置控温二极管,因为测磁是在真空状态下进行,而定标是在大气状态下进行的,均热板上温度分布是否一致,尚难下定论。

霍尔片电压用7075型高精度数字电压表测量,积分时间为100ms,测量读数误差为

$\pm 0.004 \pm 2 \mu\text{V}$, 1年, $20 \pm 5^\circ\text{C}$, 被测电压 $< 140\text{V}$, 估计其中读数随机误差为 $\pm 1 \mu\text{V}$ 。多路开关引入的附加误差信号 $\leq \pm 2 \mu\text{V}$, 同时有 $\leq \pm 2 \mu\text{V}$ 的随机误差。

2.3 霍尔片定标及定标曲线拟合

霍尔片输出信号电压与对应磁场之间的关系在中国科学院近代物理研究所的标准磁铁上用核磁共振法进行定标, 标准磁铁中心区域的均匀度为 $\pm 2 \times 10^{-5}$ ($\phi 20\text{mm}$ 范围内)。所用 B-NM-20 型核磁共振仪测量精度为 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 。

根据实际磁场的变化范围, 定标磁场强度范围为 $0.045 - 0.46\text{T}$, 定标点间隔 0.02T 。霍尔元件灵敏度以 $1.2\text{V}/\text{A} \cdot \text{T}$ 估计, 相应输出电压约为 $5.4 - 55\text{mV}$, 当用 7075DVM 测量时, 其随机误差 $\pm 1 \mu\text{V}$, 相对误差为 $\pm 1.9 \times 10^{-4} - 1.8 \times 10^{-5}$ 。

定标时霍尔片工作电流稳定度为 $\pm 2 \times 10^{-5}$ 。探头恒温槽温度波动 $\pm 0.03^\circ\text{C}$, 从而引起霍尔电压变化 $\pm 1.2 \times 10^{-5}$ 。假设所有误差因素均为均匀分布, 用方和根法合成, 总的定标点误差标准差为 $1.1 \times 10^{-4} - 2.1 \times 10^{-5}$, 亦即 $0.05 \times 10^{-4} - 0.1 \times 10^{-4}\text{T}$ 。误差限 $\pm 0.1 \times 10^{-4} - \pm 0.3 \times 10^{-4}\text{T}$ 。

为方便计, 认为各定标实验点等权, 用四次多项式拟合, 实验点无明显规律地分布在曲线附近, 一般偏离在 $0.2 \times 10^{-4}\text{T}$ 以内, 标准差 $\sigma = 0.04 \times 10^{-4} - 0.1 \times 10^{-4}\text{T}$ 。与定标点误差吻合。

在磁场测量和垫补过程中, 共进行了 3 次定标, 每次得到拟合曲线后, 都用相隔 0.4T 的磁场点作了校验, 时间相隔半天或一天, 一般与拟合曲线相差 $0.1 \times 10^{-4} - 0.2 \times 10^{-4}\text{T}$, 故此认为定标曲线可信区间为 $\pm 0.2 \times 10^{-4}\text{T}$ 。但从 3 次定标曲线的比较可以看出, 霍尔元件输出电压有 $1 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-4}\text{T}/\text{月}$ 的变化, 也就是说其长期稳定性不很理想。

2.4 磁场测量系统机械定位装置

小型回旋加速器质谱计的磁场是非均匀场, 特别是沿方位角方向的变化很大, 显然磁场灵敏元件的位置误差将引起磁场测量误差, 另外, 霍尔元件的输出电压还与其相对磁场方向的取向有关。所以, 磁场测量系统机械定位装置 (图 3) 必须具有很好的几何精度,



图 3 机械定位装置和测量臂在平台上校正, 平台上的电插头是低真空测磁用

Fig.3 The calibration of the magnetic field measuring device on the platform

以满足高精度的磁场测量要求。

机械定位装置的精度设计指标,即霍尔片灵敏中心位置精度,径向为 $\pm 0.01\text{mm}$,相对通过装置旋转中心的射线的偏差为 $\pm 0.2\text{mm}$,方位角转动时的定位精度为 $\pm 15''$,相对于加速器磁中心平面偏离 $\pm 0.3\text{mm}$ 。

霍尔片用502胶水粘贴在探头恒温槽的均热紫铜板上,此项工作在专用的定位装置上进行。此装置有精度为 $\pm 0.01\text{mm}$ 的数显仪器。测定磁针下的霍尔片的输出电压,对数据进行多项式曲线拟合,从而确定霍尔片灵敏中心的位置,其误差如表1所示。从表1看出,实际位置对理想位置的偏差超出了原定的径向 $\pm 0.05\text{mm}$ 、幅角方向 $\pm 0.2\text{mm}$ 的要求,所以对磁场测量的结果进行了必要的位置修正。

表1 霍尔片片时灵敏中心的定位误差

Table 1 The positioning error of the sensilive center of the Hall plates

r	dR	dY	r	dR	dY
227	-0.04	0.72	396	0.13	0.49
240	0.03	0.47	409	-0.09	0.65
253	0.00	0.32	422	-0.02	0.55
266	-0.01	0.62	435	-0.00	0.62
279	-0.03	0.53	448	-0.07	0.56
292	-0.10	0.44	461	-0.14	0.49
305	-0.05	0.67	474	0.05	0.54
318	0.12	0.43	487	-0.06	0.70
331	0.01	0.50	500	-0.02	0.49
344	-0.08	0.44	513	0.07	0.52
357	-0.14	0.35	526	-0.15	0.40
370	0.08	0.61	539	0.04	0.58
383	0.10	0.49	552	-0.13	0.39

霍尔元件灵敏中心相对装置旋转中心的径向定位误差由下列因素构成:参考起点相对旋转中心的距离的测量误差 $\pm 0.005\text{mm}$,粘贴时磁针与参考起点对齐时所产生的目测误差 $\pm 0.03\text{mm}$,霍尔元件灵敏中心不确定度为 $\pm 0.01\text{mm}$,测量悬臂中心孔与装置旋转轴的不同心度为 $\pm 0.02\text{mm}$ 。用方和根法合成,径向定位未定误差为 $\pm 0.04\text{mm}$ 。同上,估计相对通过装置旋转中心的射线的未定偏差亦为 $\pm 0.04\text{mm}$ 。图4是用经纬仪定位测量装置。

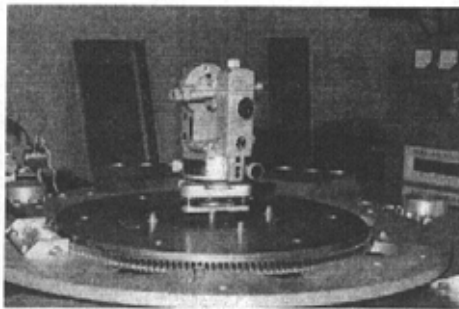


图4 用经纬仪定位测量装置

Fig.4 The positioning instrument of the angular error of the magnetic field measuring device

探头径向安装误差设计要求 $\pm 0.05\text{mm}$,实际上因利用了定位销,误差可以忽略。要求测磁机械定位装置转轴与加速器中心轴偏离 $<0.1\text{mm}$,是依靠装置部件与上盖板 $\phi 300\text{mm}$ 圆孔的紧密配合得到保证的。

引起霍尔元件灵敏中心相对加速器磁场中心平面偏离的因素有:(1)悬臂基准平面不平整度为 $\pm 0.02\text{mm}$;(2)均热紫铜板表面到基准面高度的测量误差为 $\pm 0.01\text{mm}$;(3)均热铜板表面不平整度为 $\pm 0.01\text{mm}$;(4)霍尔元件基板厚度公差为 $\pm 0.05\text{mm}$;(5)粘贴胶水厚度不均匀(估计)为 $\pm 0.05\text{mm}$;(6)基准面到扇形磁极面距离调整误差(大气、无磁)为 $0.35 \pm 0.02\text{mm}$;(7)1/2磁隙测量误差为 $\pm 0.02\text{mm}$;(8)磁极面高度跳动为 $\pm 0.03\text{mm}$;(9)测磁装置在真空压力下位移测量误差为 $\pm 0.02\text{mm}$;(10)测磁装置在工作磁场下位移测量误差为 $\pm 0.02\text{mm}$;(11)测磁装置在转动中轴向跳动为 $\pm 0.03\text{mm}$ (设计要求为基准平面同平面度为 $\pm 0.05\text{mm}/360^\circ$)。

综合以上因素,磁场灵敏中心相对于加速器磁场中心平面的偏离为 $0.35 \pm 0.08\text{mm}$ 。测量装置转轴相对加速器中心轴的夹角 $\delta \leq 5 \times 10^{-5}\text{rad}$ 霍尔元件平面法线与测量臂基准平面法线之间的夹角 $\gamma = 5 \times 10^{-3}\text{rad}$ (以基板厚度公差比基板边长估计),测量悬臂与转轴配合孔对基准平面垂直度的误差为 $2 \times 10^{-4}\text{rad}$;测磁机械装置转角定位偶然误差 $\Delta \phi_0$ 为 $\pm 20''$, (设计要求 $\pm \leq 15''$),周期性(一次谐波)振幅 $\Delta \phi = 6''$ 。

2.5 磁场测量精度

磁场测量的误差由电子学系统方面的误差和机械定位装置的误差构成。在一轮磁场测量过程(50min)中,电子学仪器的随机变动引起的某一半径上磁场平均值误差将相互抵消,可以忽略,影响测量结果的主要是参数相对于定标时状态的系统性偏离。

平均磁场约为 0.23T ,霍尔元件工作电流的偏离为 $\pm 3 \times 10^{-5}$,引起平均磁场误差为 ± 0.07 ,恒温槽温度偏离 $\pm 0.05^\circ\text{C}$,引起平均磁场误差为 $\pm 0.05 \times 10^{-4}\text{T}$,数字电压表读数精度为 $\pm 0.004\% \pm 2\mu\text{V}$, (读数)以其2倍估计,引起平均磁场误差为 $\pm 0.52 \times 10^{-4}\text{T}$ (霍尔系数 $k=1.2$) $-\pm 0.41 \times 10^{-4}\text{T}(k=1.8)$,多路开关引进了 $\pm 2\mu\text{V}$ 附加误差信号,相当于 $\pm 0.17 \times 10^{-4}\text{T}(k=1.2) - \pm 0.11 \times 10^{-4}\text{T}(k=1.8)$,再加上定标曲线的可信区间 $\pm 0.2 \times 10^{-4}\text{T}$,用方和根法合成,平均磁场误差为 $\pm 0.53 \times 10^{-4} - \pm 0.45 \times 10^{-4}\text{T}$,相当于 $\pm 2.3 \times 10^{-4} - 1.7 \times 10^{-4}$ 。

机械装置转角定位误差的一次谐波振幅 $\Delta \phi_1=6''$;随机误差 $\Delta \phi_0 \leq 20''$,机械误差因素:霍尔元件径向定位误差 $\Delta X_1 = \pm 0.04\text{mm}$; $\beta = 2 \times 10^{-4}\text{rad}$, $\delta = 5 \times 10^{-5}\text{rad}$, $\gamma = 5 \times 10^{-3}\text{rad}$,霍尔元件对磁场中心面的偏离 $z = 0.35 \pm 0.08\text{mm}$ 。

在上述条件下,机械误差因素引起的平均磁场测量误差主要有3项: ΔX_1 引起的误差 $dB/d\rho \cdot \Delta X_1$; $\Delta \phi_0$ 引起的误差 $3 \cdot \Delta \phi_0 / \sqrt{6N} \cdot \sqrt{\Sigma(k \cdot B_k)^2}$; $-1/2 \cdot d^2B/d\rho^2 \cdot z^2$ 。式中, B 和 B_k 分别表示半径为 ρ 的圆周上的平均磁场和 k 次谐波振幅。

综合电子仪器所产生的误差($\pm 0.53 \times 10^{-4}\text{T}$)和机械所产生的误差,除两端($R227\text{mm}$ 处误差 $\pm 0.6 \times 10^{-4}\text{T}$, $R552\text{mm}$ 处误差 $\pm 0.7 \times 10^{-4}\text{T}$)以外,平均磁场测量误差为 $\pm 0.56 \times 10^{-4}\text{T}$,相当于 $\pm 2.4 \times 10^{-4}$,基本达到了预定的目标。但是不幸的是霍尔片的长期稳定性不理想,测量结果还要进行处理。

2.6 霍尔片定位误差引起的磁场测量结果误差的修正

粘贴霍尔片产生位置误差,超出了原定的要求,因此必须对磁场测量的结果进行修正。横

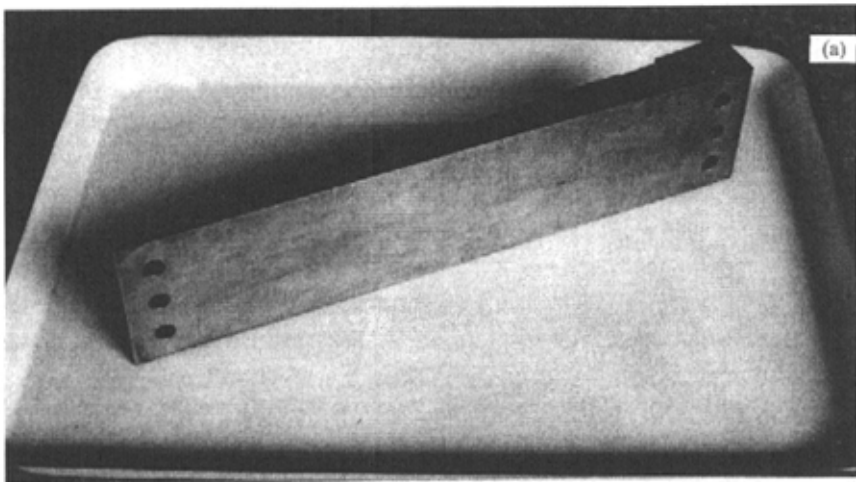
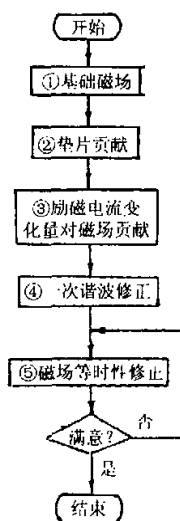
向误差的修正比较简单,就是修正磁场的谐波分量的角度。径向误差的修正,实际上是以实际的半径为自变量,磁场平均值和谐波分量的幅值为因变量,用4次拉格朗日多项式插值方法求得各个理论半径上的磁场。

3 磁场垫补过程

磁场垫补过程流程如右所示。垫补方法是:在八块扇形铁块相隔 90° 的侧面上的镶块作等时场垫补之用,而在另一侧面的八块镶块作一次谐波垫补之用。

(1) 垫补过程以测量基础磁场开始。激磁电流为70A,平均磁场约0.23T。扇形叶片镶块未经修正(图5(a))。

(2) 测定单位机械修正量引起的磁场变化。为此,整条镶块按霍尔片数沿径向分割成26个位置,把两块 $85\text{mm} \times 13\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的试验垫片上下对称地固定在一对扇形叶片侧面某个径向位置(图5(c)),调整激磁电流使叶片中央部分的磁场与没有垫片时一致,进行全磁场测量,把测得的磁场平均值及各次谐波分量与上述基础场相减,从而决定出这一位置上的垫片贡献。对称地移动试验垫片位置,重复测量,从而获得试验垫片在各半径位置的一系列的贡献值。由于霍尔片长期稳定性的限制,垫片贡献曲线族进行光滑处理,其中平均场贡献如图6所示。由于在不同磁场分布下,试验垫片的单位铁量所产生的磁场变化量会有所变化,因而在以后的等时性修正阶段,将根据加工后场的实际变化对垫片贡献作一定的修正,以期提高垫片贡献的准确性。注意,实际垫补时,不是加铁片,而是在镶块上切割出26个深浅不同的条形槽(如图5(b)所示)。



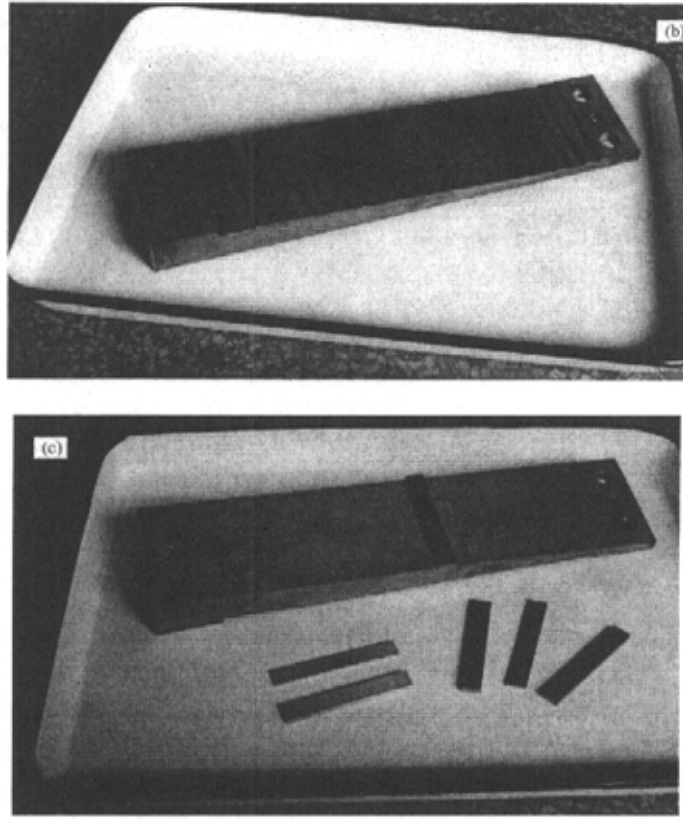


图5 扇形铁片旁的镶块(a)修正前,(b)修正后和(c)试验垫片

Fig.5 The attached pole tip on the side of the sector pole tip(a)before shaping (b)after shaping and (c) testing iron slot

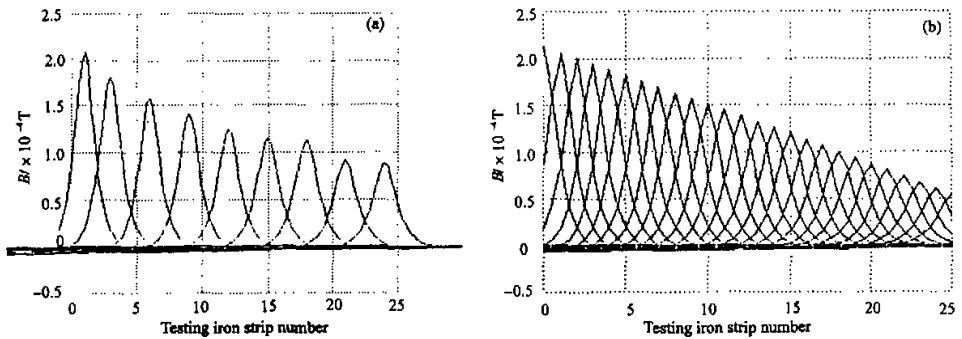


图6 试验垫片在各半径位置的一系列的贡献值(a)与垫片贡献曲线族进行光滑后的平均场贡献(b)
Fig.6 The contribution of a small iron slot on the different radius(a); The resulting contribution of all 26 pieces of small iron slot on the different radius

(3) 测定在所选定的激磁电流附近, 单位激磁电流变化所引起的磁场变化。

(4) 对一次谐波的修正只进行了一次, 而且加工后的表面仍是一个平面, 测量表明一次谐波幅度 $<1 \times 10^{-4}T$ 。

(5) 磁场等时性修正。磁场等时性修正是一个多次反复的过程。首先, 理想等时场不是一个固定目标。每一次都要根据现实磁场分布数据计算出理想的等时场, 经过修正后磁场发生了变化, 又提出了“新”的目标。其次, 铁量变化、激磁电流的变化对磁场的影响与实际磁场有关。因而, 在修正的过程中计算是近似的。每次根据实际场与理论场的偏差和垫片贡献、激磁电流贡献, 计算出叶片机械修正量以及激磁电流修正值。扇形叶片侧面边缘形状在实际工作中先后经过了5次修正, 其中前3次是由于计算程序有误和数控铣床加工误差, 实际只需修正2次即可。

(6) 测量磁场的判断。由于磁场测量精度达不到 $1 \times 10^{-4}T$, 而要求又是 $<1 \times 10^{-4}T$, 我们对测量磁场结果的判断是相邻2次测量的26个相对应的半径上的各自平均磁场值的差值均需 $<0.1 \times 10^{-4}T$ (图7)。

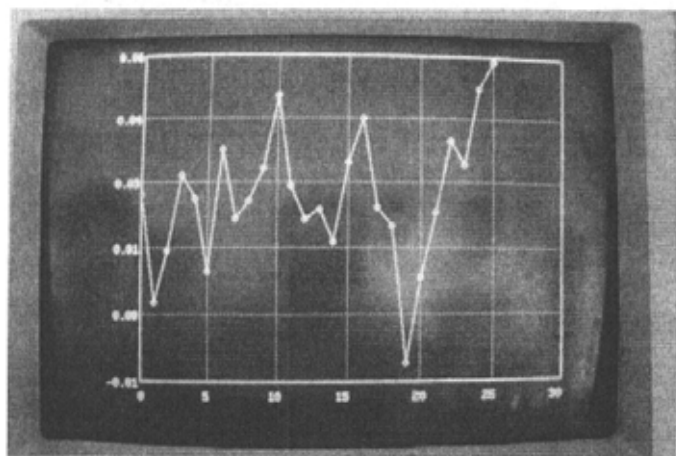


图7 对测量磁场结果的判断是相邻二次测量的26个相对应的半径上的各自平均磁场值的差值均需 $<0.1G$

Fig.7 The reproducibility of the average magnetic field on each 26 radii during the two neighboring measurements must be within $0.1Gs$

4 磁场测量和垫补的结果

(1) 磁铁磁化曲线如图8所示。从图8看到, ①一定激磁电流下实际的峰值磁强比计算值大20%左右; ②磁回路铁中磁饱和情况甚为轻微, 故激磁曲线弯曲很小。这是因为在设计磁路时是按当时采用减速模式方案计算的, 磁场强度是现在加速模式实际采用的1.4倍。(2) 磁场分布见表2和图9。(3) 磁场平均值与等时性场的偏差见图10。(4) 磁场缺陷引起的中心粒子相位移见图11, 粒子经过100圈加速, 累计相移(16次倍频)不超过 $\pm 16^\circ$ 。

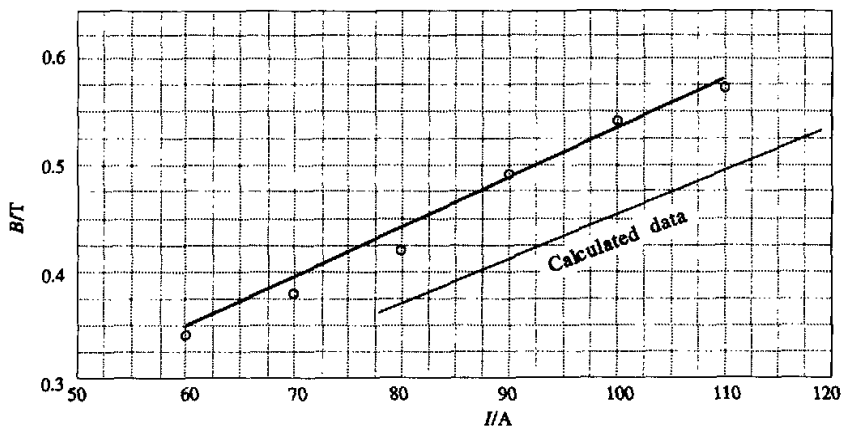


图8 磁铁激磁化曲线

Fig.8 Magnetization of the SMCAMS magnet

表2 磁场分布

Table 2 Result of measurement for magnet field													
No	Radius	B_{average} $1 \times 10^{-4} \text{T}$	Flutter	Amp-1 $1 \times 10^{-4} \text{T}$	Pha-1 $/(^{\circ})$	Amp-2 $1 \times 10^{-4} \text{T}$	Pha-2 $/(^{\circ})$	Amp-3 $1 \times 10^{-4} \text{T}$	Pha-3 $/(^{\circ})$	Amp-4 $1 \times 10^{-4} \text{T}$	Pha-4 $/(^{\circ})$	Amp-8 $1 \times 10^{-4} \text{T}$	Pha-8 $/(^{\circ})$
0	227.00	2241.299	0.37487	0.714	156.36	4.598	106.97	2.845	33.39	1845.364	-0.09	256.644	22.00
1	240.00	2294.602	0.38793	0.520	151.56	4.716	105.98	2.945	35.71	1930.642	-0.00	255.992	22.00
2	253.00	2295.294	0.39468	0.431	137.40	4.523	105.33	3.022	37.53	1930.648	0.11	263.386	-22.43
3	266.00	2293.670	0.40045	0.424	135.19	4.252	105.18	3.021	38.35	1954.051	0.14	282.045	-22.39
4	279.00	2293.111	0.40597	0.424	127.98	4.034	104.71	3.281	39.21	1962.312	0.14	302.081	-22.38
5	292.00	2295.493	0.40950	0.432	121.94	3.828	104.49	3.402	39.80	1969.039	0.14	318.760	-22.38
6	305.00	2294.456	0.41425	0.398	119.63	3.637	104.46	3.492	40.42	1975.770	0.14	334.883	-22.37
7	318.00	2293.723	0.41816	0.377	116.27	3.457	104.59	3.597	40.80	1980.267	0.13	350.640	-22.38
8	331.00	2294.696	0.42119	0.346	118.58	3.257	104.64	3.651	41.30	1984.422	0.12	365.856	-22.39
9	344.00	2295.174	0.42412	0.339	106.26	3.129	105.11	3.795	41.57	1988.071	0.10	379.768	-22.41
10	357.00	2294.815	0.42677	0.333	102.69	2.992	105.34	3.892	41.99	1990.496	0.09	392.390	-22.42
11	370.00	2294.962	0.42878	0.343	98.75	2.859	105.74	3.963	42.22	1991.947	0.08	404.071	-22.43
12	383.00	2296.626	0.43020	0.356	98.62	2.748	106.22	4.032	42.52	1993.398	0.06	415.045	-22.44
13	396.00	2295.816	0.43176	0.381	98.57	2.636	106.93	4.116	42.84	1993.122	0.04	424.838	-22.46
14	409.00	2296.787	0.43264	0.422	101.12	2.527	107.75	4.189	43.13	1992.979	0.03	433.439	-22.47
15	422.00	2298.174	0.43276	0.415	102.33	2.429	108.36	4.252	43.39	1991.558	0.02	440.839	-22.48
16	435.00	2300.176	0.43207	0.423	107.62	2.367	109.34	4.316	43.46	1988.957	0.01	446.786	-22.49
17	448.00	2297.875	0.43228	0.412	109.75	2.274	110.13	4.378	43.69	1984.838	0.01	451.272	-22.49
18	461.00	2301.280	0.43062	0.408	115.65	2.219	111.23	4.474	43.78	1981.500	0.01	454.742	-22.49
19	474.00	2300.986	0.42967	0.414	120.43	2.177	112.18	4.454	43.79	1976.664	0.01	457.076	-22.49
20	487.00	2303.441	0.42762	0.449	130.14	2.172	113.61	4.471	43.62	1972.037	0.02	457.773	-22.49
21	500.00	2302.010	0.42654	0.512	139.90	2.180	114.66	4.469	43.27	1966.801	0.03	457.417	-22.49
22	513.00	2307.252	0.42377	0.648	151.04	2.253	118.00	4.476	42.49	1961.261	-0.02	465.394	22.47
23	526.00	2304.449	0.42210	0.824	161.80	2.470	122.69	4.520	41.24	1948.297	-0.13	478.213	22.38
24	539.00	2258.123	0.42067	1.064	174.25	2.841	126.90	4.474	39.36	1886.322	-0.17	489.111	22.34
25	552.00	2220.867	0.42654	1.469	140.84	2.710	128.41	4.396	40.09	1858.326	-0.20	493.322	22.31

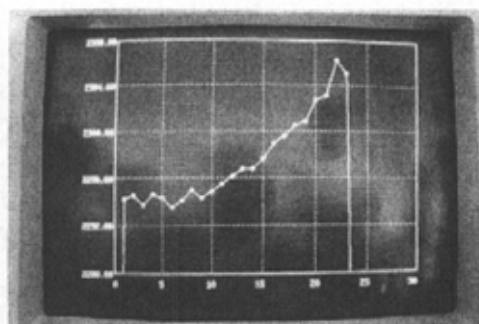


图9 磁场平均值

Fig.9 Measured average magnetic field distribution

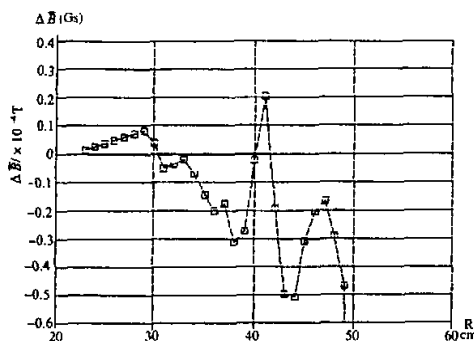


图10 磁场平均值与等时性场的偏差

Fig.10 The deviation between the measured magnetic field and the isochronous field

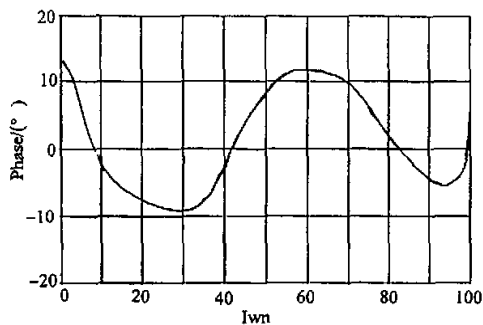


图11 粒子经过100圈加速, 累计相移(16次倍频)不超过±16°

Fig.11 The history of the phase shift of the particles during acceleration

The results of the measuring and non-electrical shaping the SMCAMS magnetic field

ZHANG Xilin

(Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract

The magnetic field measuring device is described in detail. The precision of measured SMCAMS magnetic field is analyzed. The process and its results of the non-electric shaping the magnetic field is introduced.

Key Words Magnetic field measurement, Precision of the measured magnetic field, Shaping of magnetic field

CLC TL 542