

一个用于束流脉宽压缩的Mobley型宽窗磁铁

袁锁祥 杨绍羽 史维东 林锡刚

(四川大学核科学技术研究所)

本文描述的 Mobley 型宽窗磁铁是安装在我所 2.5MeV 质子静电加速器中,为获取 1ns 脉冲束装置的一个关键设备。在加速器电压为 1.5~2.3MeV、粒子能散度 0.5% 左右时,对 H^+ 和 D^+ 束可分别将 10~15ns 脉冲束压缩成 0.9~1.1ns 和 1.3~1.5ns,靶上最佳束斑 $3 \times 4 \text{mm}^2$ 。

关键词: Mobley 型宽窗磁铁 质子静电加速器 毫微秒脉冲束流 时间压缩 空间聚焦 二级象差 磁场不均匀度 $\Delta B/B_0$ 。

一、束流脉宽压缩的工作原理及磁铁主要参数

如图 1 所示,在对称双聚焦磁铁的物点处放置一对扫描板,板间加频率为 12MHz、峰值为 0~40kV 的正弦扫描电压,具有同一能量的 10ns 脉冲粒子,经过扫描板以 $\pm\beta$ 角扫开,使脉冲前沿粒子通过磁铁时走最长路程,而脉冲后沿粒子走最短路程,脉冲中间粒子走中央轨道等等,这样脉冲中所有粒子几乎同时到达靶上而形成一个短脉冲。由于粒子以 $\pm\beta$ 角(最大 $\pm 2.5^\circ$)扫开,因而二级象差较大。既要保证在时间上的压缩、又要满足在空间上的聚焦,故对磁铁有较严格的要求。磁铁的主要参数列于下表。

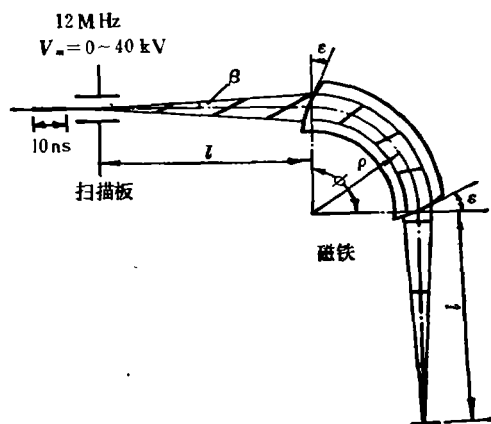


图 1 磁时间压缩系统原理图

二、磁铁的主要特点

1. 工作场强低

根据时间压缩的设计公式^[1]:

$$\beta = T v_0 / 8 \rho \quad (1)$$

$$V_m = h E_m = 2 B V_0 h / \left(\frac{\sin \rho_l / 2}{\rho_l / 2} \right) \cdot L \sin \varphi_c \quad (2)$$

$$B = \frac{144.5}{\rho} \sqrt{\frac{m V_0}{Z}} \quad (3)$$

式中, β 为束被扫开的角度; T 为磁铁可容纳的脉冲宽度; v_0 为粒子速度; ρ 为磁铁偏转半径; h 为扫描板间隙; E_m 和 V_m 为高频峰值场强和电压; V_0 为粒子加速电压; L 为扫描板长度; ρ_l 为粒子在扫描板中渡越相位; φ_c 为粒子到达扫描板中心处相位; m 为粒子质量数; Z 为粒子单位电荷数。由(1)、(2)式可知, β 反比于 ρ , V_m 正比于 β , 所以 V_m 与 ρ 成反比。合理选择 ρ 为 75cm, 当 H^+ 能量为 2.5~3MeV 时, V_m 为 35~46kV, 如 ρ 选得太小, V_m 太高, 将难于获得。再由(3)式, 当 ρ 为 75cm、 m 为 1~3、 V_0 为 0.5~3MeV、 Z 为 1 时, 则 B 为 1000~6000Gs 左右, 磁铁工作场强低。故磁铁角边没有采用儒柯夫斯基倒角。

2. 磁极面和场均匀区较宽

(1) 10ns 脉冲束经过扫描板扫成 $\beta_{\max} = \pm 2.5^\circ$ 的散角, 因而束流在磁铁中心处的水平最大束宽为 19.4cm, 取场均匀区为 20cm。在垂直平面内, 由束流固有散角 0.0025rad 决定最大垂直束高为 17.5mm。真空盒内净空间尺寸为 $2.5 \times 22 \text{cm}^2$, 上下壁厚为 0.9cm, 两侧壁厚为 1.2cm, 内部抽真空后的最大挠度为 0.25mm, 考虑磁极与真空盒之间留 2mm 间隙, 故取极间隙 D 为 4.5cm。

表 磁铁主要参数

偏转半径 ρ	75cm	上下极间允许位移	<0.1mm
偏转角度 ϕ	90°	垫块加工精度、材料	<5 μ m, 1Cr18Ni9Ti
磁极间工作气隙 D	4.5cm	磁极、轭的材料	国产 A ₃ 钢
极间场强 B	1000~6000Gs	导线材料	$\phi 10 \times 2$ 空心紫铜管
磁场不均匀度 $\Delta B/B_0$	设计值 $\pm 5 \times 10^{-4}$ (实测 3×10^{-4})	磁铁重	3.7t (不包括底座 2t)
磁极间平行度	设计 ± 0.02 mm (实际 ± 0.01 mm)	最大功耗	7.7kW
极宽 b	32cm	电流(直流)	最大 200A
极出入口两端边缘曲率半径 R	2.1m	电压(直流)	最大 39V
		电流稳定度	$1 \sim 2 \times 10^{-4}/4h$

(2) 极宽 $b = b' + 2\delta D = 32$ cm

式中, $b' = 20$ cm, 为场均匀区; $\delta = 1.3$, 为场不均匀因子; $D = 4.5$ cm. 根据文献[2], 当 $b/D = 3.5 \sim 4$ 时, $\delta = 1.2 \sim 1.7$ 为宜; 如果 $b/D > 4$, 则在场均匀区出现向下凹的现象. 本磁铁虽然 $b/D > 7$, 但由于采用了均匀化气隙, 由测量曲线(图4)可以看出, 此现象有所改善.

(3) 由于边缘场的存在, 等效边界与磁极的机械边界之间的距离为 $\Delta L = S_0 D$, 为了保证束流偏转 90°, 磁极出入口端必须分别切掉一段 ΔL . 我们参考国内同类型磁铁实测数据, 取 $S_0 = 0.407$. 则 $\Delta L = 1.83$ cm.

3. 在场均匀区内要求场不均匀度 $\Delta B/B_0 \leq 5 \times 10^{-4}$

根据 K. Yagi^[3] 的计算, 由场不均匀而产生的象变宽

$$\Delta = \Delta \phi (\rho^2 + l_1^2)^{1/2} \sum_{i=1}^n \Delta v_{n+1-i} \sin(i\Delta\phi + \xi) + \Delta \phi l_1 \Delta v_n \quad (4)$$

式中, $\Delta v_i = \Delta B_i/B_0$ 表示第 i 段内场的均匀度; l_1 为象到磁极出口边的距离, 对称双聚焦磁铁 $l_1 = 2\rho$, $\xi = \tan^{-1}(l_1/\rho) = 63.5^\circ$; 现将磁场沿角向等分为九份, 即 $n=9$, 则 $\Delta\phi = 10^\circ$; 并假设 $\Delta v_i = \Delta B_i/B_0 = \text{常数}$, 由(4)式可估算出由于场不均匀而产生的象变宽:

当 $\Delta v = \Delta B/B_0 = 5 \times 10^{-4}$ 时, $\Delta = 1.1$ mm,

$\Delta v = \Delta B/B_0 = 1 \times 10^{-3}$ 时, $\Delta = 2.2$ mm.

因而从聚焦方面要求 $\Delta B/B_0 = 5 \times 10^{-4}$ 是必要的, 此时对脉冲宽度的影响则可忽略^[4].

4. 采用积木式结构、均匀化气隙^[5]、圆弧形内外磁轭

图2给出了磁铁结构图, 磁极和上下轭不采用通常的刚性连接, 而是积木式结构. 在轭和极之间、极与极之间用精密的非导磁金属块垫起. 为了防止磁动力和外力引起极间位移, 在上轭打六个孔, 穿入六根与轭同材料的钢棒压在上极和上轭间的不锈钢垫块上, 并用六根弹簧(每根 200kg)压紧. 在上下轭内外圆弧间用七只螺钉连接, 并配合导向杆供起吊和安装时作对准用.

在上下轭和上下极之间分别留有 4mm 均匀化气隙, 特别在极面较宽的情况下采用均匀化气隙可使场均匀度提高一个数量级. 均匀化气隙一般为工作气隙的 1/10 或更小些. 采用均匀化气隙的缺点是增加了励磁功率, 本磁铁增加了 18%.

采用积木式结构和均匀化气隙后带来的有利因素:

(1) 消除了磁动力的影响. 由于上磁极同时受向下和向上的磁吸力, 因而基本处于平衡状态. 对下磁极也同样. 所以上下磁轭基本上不受磁动力的作用.

(2) 容易保证极间平行度. 磁极的加工精度为 0.01mm (极表面用精密磨床研磨), 极间六只垫块精度为 5 μ m. 因而极间平行度可保证在 0.01~0.02mm 之内.

(3) 适当调整垫片厚度来改善场的分布. 采用 H 型结构和圆弧形内外磁轭, 可减小由于漏磁不均和磁路长度不同对场产生的影响. 但测量结果表明, 磁场随半径增加而减小, 场不均匀度 $\Delta B/B_0 = 7 \times 10^{-4}$. 适当调整垫块厚度, 可使场不均匀度 $\Delta B/B_0 \leq 3 \times 10^{-4}$.

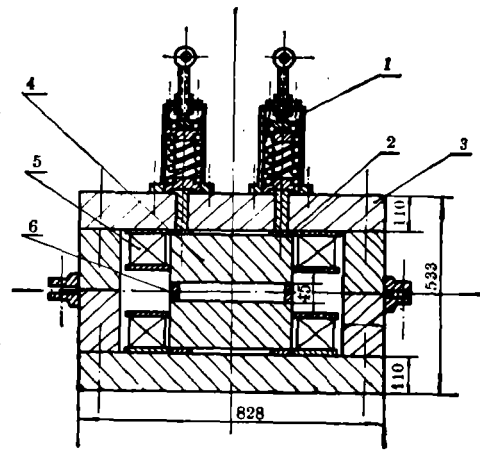


图2 时间压缩磁铁结构图

1. 压紧装置 2. 垫片 3. 轭 4. 磁极
5. 线包 6. 垫块

5. 二级象差的消除^[6]

在高频扫描板的作用下,束流的水平散角最大为 $\pm 2.5^\circ$,如此大的散角将产生较大二级象差,为了消除它,我们采用下列措施:

(1) 磁极进出口端面和对应的磁屏蔽端面都做成曲率半径为 2.1m 的圆弧。在一级聚焦的情况下所存在的二级象差的计算公式为:

$$\Delta B_2 = -\eta \rho \left(C_1 + C_2 - \frac{v_1}{R_1} \rho - \frac{v_2}{R_2} \rho \right) \beta^2 \quad (5)$$

其中

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \frac{l_1^2 l_2}{\rho^3} \left[1 + \left(\frac{\rho}{l_1} + \tan \varepsilon_1 \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{\rho}{l_2} + \tan \varepsilon_2 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$C_1 = \frac{\rho^2}{l_1^3} \cdot \frac{\rho/l_1 + 3 \tan \varepsilon_1}{[1 + (\rho/l_1 + \tan \varepsilon_1)^2]^{3/2}} \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{\rho^2}{l_2^3} \cdot \frac{\rho/l_2 + 3 \tan \varepsilon_2}{[1 + (\rho/l_2 + \tan \varepsilon_2)^2]^{3/2}} \quad (8)$$

$$v_1 = 1/\cos^2 \varepsilon_1 [1 + (\rho/l_1 + \tan \varepsilon_1)^2]^{3/2} \quad (9)$$

$$v_2 = 1/\cos^2 \varepsilon_2 [1 + (\rho/l_2 + \tan \varepsilon_2)^2]^{3/2} \quad (10)$$

由(5)式可知,二级象差 ΔB_2 正比于束张角 β 的平方。对称双聚焦磁铁, $l_1 = l_2 = 2\rho$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 26.5^\circ$, R_1 、 R_2 为磁极进出口端圆弧的曲率半径, $\beta = 2.5^\circ$ 。要消除二级象差则令 $\Delta B_2 = 0$,由(5)~(10)式求得 $R_1 = R_2 = 2.1\text{m}$;对直线边界 $R_1 = R_2 = \infty$,则由(5)~(10)式求得二级象差 $\Delta B_2 = 4.8\text{mm}$ 。

(2) 平移和旋转磁屏蔽,可显著减小象差,达到良好聚焦的效果。因为 10ns 脉冲束被扫开后,在磁极进出口端束横向尺寸最大可达 12cm,如果磁极和束流的位置吻合得不好,将引起靶上束斑增大,有时可增加几倍且奇形怪状。细致调节磁屏蔽和磁极间位置,可以明显地改善聚焦性能,最好时可得到 $3 \times 4\text{mm}^2$ 的束斑。磁屏蔽调节示意图如图 3 所示。

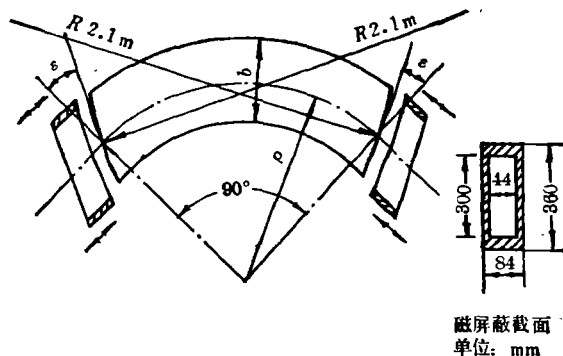


图 3 磁屏蔽调节示意图

6. 磁铁调节方便^[7]

磁铁放在一个支架上,支架在 X、Y、Z 三个方向上调整,在水平面内可以旋转 $\pm 10^\circ$ 。

三、磁场测量结果^[8]

1982 年 7 月对磁场进行测量。在均匀场区用核磁共振法测量,边缘场用霍尔差值法测量。均匀场测量范围是中央轨道径向 $\pm 10\text{cm}$ 内,在场强值为 5300Gs 左右进行测量。在未调整垫块厚度之前,测得均匀场区的不均匀度 $\Delta B/B_0$ 为 $\pm 7 \times 10^{-4}$,由于场强随着半径减小普遍提高而产生误差。通过对六个垫块厚度作适当调整(用薄铜皮垫),场的不均匀度达 $\pm 3 \times 10^{-4}$,好于设计要求。磁场测量结果见图 4。

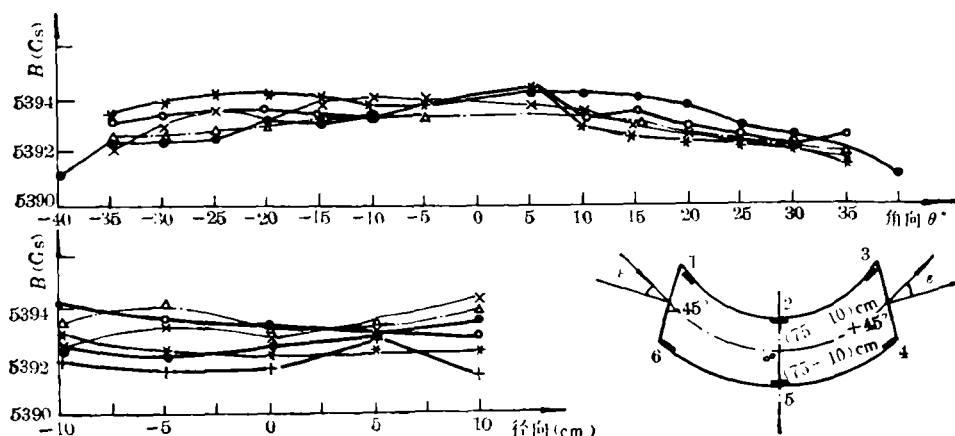


图4 磁场测量曲线

垫块加厚:

1* 0.1mm 2* 0.1mm 3* 0.06mm 6* 0.05mm
 —●— —35° ρ=75-10 —×— —25° ρ=75-5 —△— —10° ρ=75
 —○— —10° ρ=75+5 —*— —25° ρ=75+10 —+— —35° (ρ为偏转半径(cm))

参 考 文 献

- [1] 成都720研究所质子静电加速器组, 粒子加速器(1979年全国加速器技术交流会论文选集), p.85.
- [2] В. И. Зингерман, Измерительная Техника, 2, 19 (1964).
- [3] K. Yagi, Nucl. Instr. Meth., 39, 88 (1966).
- [4] 四川大学七二〇所质子静电加速器束流毫微秒脉冲化研制组, 2.5MeV 质子静电加速器毫微秒脉冲化装置设想(资料), 1976年11月.
- [5] H. Enge, Nucl. Instr. Meth., 28, 119 (1964).
- [6] J. Berggreen et al., Nucl. Instr. Meth., 24, 1 (1963).
- [7] 中国科学院原子能研究所七室, 均匀场双聚焦磁分析器的物理设计(资料).
- [8] 史维东, 1983年磁场技术论文汇编, 二分册, 磁体设计与磁场测量及数据处理.

(1983年7月19日收到)

简 讯

全国第二次活化分析会议论文选编征订启事

本选编汇集了1981年12月中国核物理学会在上海市召开的全国第二次活化分析会议上收到的128篇论文中的89篇。会议论文反映了自全国第一次活化分析会议以来的三年多时间里,我国在活化分析方面所取得的进展。如堆中子活化分析不仅在材料、岩矿方面大量应用,而且还应用于生物医学、环境保护、考古等方面。14MeV快中子活化分析法,已用于大量地质矿样的常规分析;用于植物和食物中成分的测定,促进了农业的研究。离子束分析,如质子激发X射线分析、背散射分析、核反应分析和带电粒子分析以及同位素源激发X射线分析等,已在材料科学、生物医学、环境保护等方面都得到了很好的应用。此外,活化分析方法本身也得到了很大的发展,如中子活化分析中单比较器法的研究、X射线谱的计算机解谱、样品的自动传送系统及安全中子源的研制等。

选编在《核技术》1982年第4期上发表。现有少量存刊,每册0.60元,欲购者将款汇上海市8204信箱《核技术》编辑部。

(本刊讯)

Keywords: MWPC curved crystal spectrometer

Fitting efficiency curve of Gamma-ray spectrometric instrument by spline

Liu Chengan Tang Naixun Feng Xizhang

(General Research Institute for Non-ferrous Metals)

The cubic spline has been used as the efficiency curve model of Ge(Li) gamma-ray spectrometric instrument and improved the algorithm of stepwise regression. Methods such as AIC test etc have also been employed to majorize the model. Thus the problems of the numbers of the partition points, the locations of the best points and the continuity of fitting function at these points are solved. This model contains fewer parameters and better precision than those old ones.

We have used this method to do efficiency calibration for our 185 cm³ Ge(Li) coaxial detector. The every model obtained contains only three parameters and the precision is about 2.5% in the region from 59 keV to 1408 keV. The deviation of ¹⁵²Eu emission-rate measured by our calibrated system from the international comparision at 1978 is equal to or less than 3%.

Keywords: fitting a curve efficiency calibration γ -spectrum spline stepwise regression minimum information theoretic criterion

A broad window Mobley type magnet for compressing pulsed beam

Yuan Suoxiang Yang Shaoyu Shi Weidong Lin Xigang

(The Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University)

This Mobley type magnet is installed on the 2.5MV Van de Graaff machine in our institute. It is a main facility for obtaining about 1 ns pulsed beam. The 10—15 ns pulsed beam can be compressed into 0.9—1.1 ns and 1.3—1.5 ns for H⁺ and D⁺, respectively. The observed optimum beam spot size is about 3×4 mm² at the target. The energy both for H⁺ and D⁺ ions ranges from 1.5 to 2.3 MeV with the energy resolution about $\pm 0.5\%$.

Keywords: broad window magnet Van de Graaff accelerator

Determination of the content of ash in peat by using low energy X-ray backscattering method

Liu Shouzheng

Han Wenxin

(Heilongjiang Institute of Technical Physics) (University of Science and Technology of Harbin)

The content of ash in peat is determined by using the X-ray backscattering method. The radioactive source used is ²³⁸Pu. The average standard error is about 3% compared with those of chemical methods, and the causes of the error are discussed.

Keywords: X-ray backscattering peat photoelectric effect spectrum bulk density