

F

# 永磁四极透镜在加速器束流 输运与聚焦中的应用

袁勤良 王友智 石才土 陈冠雄

张淑香 陈仁怀 刘茂三

(中国科学院高能物理研究所)

of plastic  
h voltage  
lied. The  
wo peak  
wo sides  
ut mode

## 摘 要

本文介绍了永磁四极透镜作束流输运元件的优点、结构及有关参量,以及永磁透镜应用于加速器束流传输线上的实际连接与调试方法。经联调,得到了: 15 MeV 电子束流经 43 cm 传输后,束流截面比初始减小 20%—50% 的初步结果。

## 一、引 言

在加速器束流输运中,四极透镜是必不可少的聚焦元件,它可使束流横向聚焦。传统的方法是采用电磁四极透镜,缺点是体积大,消耗功率大,易发生故障等。而永磁四极透镜体积小,结构简单,不消耗励磁功率,维护简便,特别是在相同孔径与梯度的情况下,永磁透镜的几何尺寸和重量都远小于电磁透镜。为此,我们在理论研究与实验的基础上,参照了国外永磁透镜的有关结构<sup>[1,2]</sup>,制作了 16 体渐变磁化型永磁四极透镜,并根据具体要求(对约 15 MeV 电子束经 40 cm 传输后,束截面变小),首次在我所中关村 30 MeV 电子直线加速器上进行实际调试。结果是: 加速器输出的 15 MeV 电子束,经两对永磁四极透镜作用,在距加速器出口 43 cm 处束半径(90% 束流)由初始值:  $x_0 = 0.79\text{cm}$ ;  $y_0 = 0.77\text{cm}$ , 汇聚到:  $x = 0.41\text{cm}$ ;  $y = 0.63\text{cm}$ 。

## 二、永磁四极透镜的结构和有关参量

在实验中,永磁( $\text{Sm} \cdot \text{Co}_5$ )四极透镜采用 16 体渐变磁化型结构,以内外两环套装实现磁场梯度可变的要求(见图 1),整个透镜由 64 块磁体组成(每环 32 块),每块磁体均加工成梯形,长度 12.5 mm,张角为 22.5 度。其内外两环的主要参数见表 1。在内外环的一端面 90° 范围内刻有标度线,两环最大相对旋转范围为 90°,其对应的磁场梯度约 150—2100 Gs/cm,见表 2(其中一个透镜)。透镜的等效厚度约 33.8 mm,对于偏离磁中心 0.6R

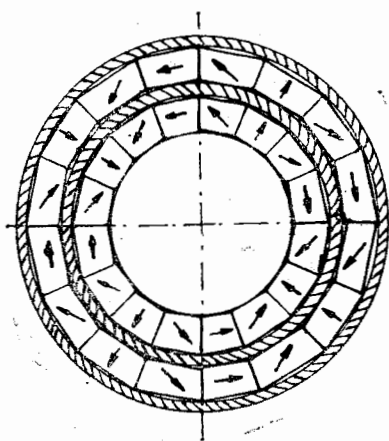


图 1 永磁四极透镜结构示意图

表 1

参数 (mm)	透 镜	
	内 环	外 环
名 称		
磁体内切圆直径	$\phi 40$	$\phi 54$
磁体外接圆直径	$\phi 51$	$\phi 74$
撞环厚度	1.5	3
透镜几何厚度	25	25

表 2

角度(度)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
梯 度 (Gs/cm)	2091	2095	2077	1984	1829	1629	1378	1079	762	418	137

表 3

最大谐波分量(%)	透 镜 编 号			
	1	2	3	4
位 置				
0.6R	0.4	0.82	0.98	0.4
0.8R	0.5	1.3	1.29	0.45

和 0.8R (R 为透镜孔半径) 处的谐波, 经一定间隔逐点测量后, 由计算机处理分析出 35 次谐波分量. 表 3 给出了四个透镜最大谐波分量的百分比.

### 三、实验调试方法及误差来源

实验如图 2 与图 3 所示联接, 加速器束流经铝箔输出窗和无阻拦束流强度监测器后, 进入无磁不锈钢输运管道. 为保证束流有效地传输和实验的方便, 管道内孔径为  $\phi 35$  mm, 外径为  $\phi 39$  mm, 并由滑管和定管两部分组成. 总长从 38.5cm ~ 47cm 可调(实物照片见图 3). 透镜与束同轴地套在管道的外壁上, 透镜的磁场方向, 梯度和间隔在一定范围内自由选择. 整个输运段的真空度为  $6 \times 10^{-3}$  托.

实验调试前, 根据束流输运理论<sup>[3,4,5]</sup>知道, 束流输运的矩阵表示为:

$$\sigma_i = M_i \sigma_{i-1} M_i^T \quad (1)$$

其中

由空  
初始  
包络  
场梯  
用单  
面).

曲轴

果误

&lt;0.0

外环

φ54

φ74

3

25

90

137

4

1.4

1.45

出 35 次

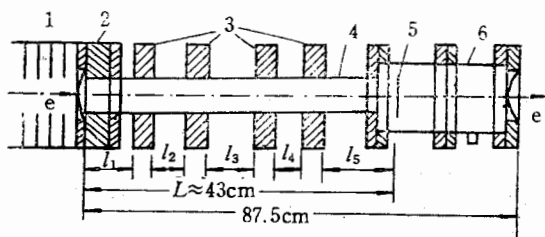


图 2 永磁四极透镜实际调试示意图

1. 加速器, 2. 无阻拦束流监测器, 3. 永磁四极透镜
4. 运输管道, 5. 扫描单丝, 6. 抽真空三通管道

其中  $\sigma_i = \begin{pmatrix} \sigma_{i11} & \sigma_{i12} \\ \sigma_{i21} & \sigma_{i22} \end{pmatrix}$  为结果矩阵,  $\sigma_{i-1}$  为初始条件,  $M_i = \begin{pmatrix} M_{i11} & M_{i12} \\ M_{i21} & M_{i22} \end{pmatrix}$  是四极透镜及自由空间的传输矩阵,  $M_i^T$  是  $M_i$  的转置矩阵. 把式(1)编成 BTR6 计算机程序, 根据加速器初始束流发射度——即  $\sigma_{i-1}$  矩阵元 ( $\sigma_{011}, \sigma_{012}, \sigma_{022}$ ), 加上限制条件算出运输过程中束流的包络和最终状态, 给出满足我们条件的理论数据. 然后参照理论数据, 调节四极透镜的磁场梯度  $G_i$  和透镜间隔  $l_i$ . 同时, 为观察经传输聚焦后的束流密度分布, 在所要求的位置用单丝扫描仪分别测量束流  $x$  方向(横向)和  $y$  方向(垂直方向)的相对密度分布(束截面). 并用函数记录仪记录结果.

束流截面的监测方法如图 4 所示, 单丝扫描传动机构如图 5 所示. 匀速圆周运动的曲轴带动测量框架作非匀束直线运动进行扫描.

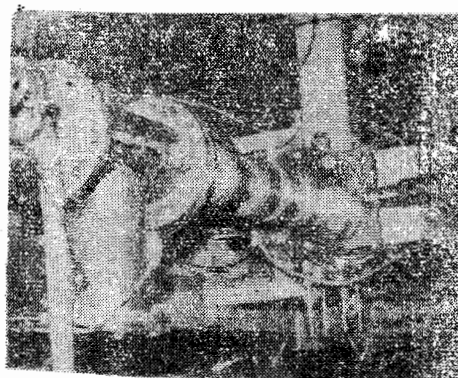


图 3 永磁四极透镜的实验联接

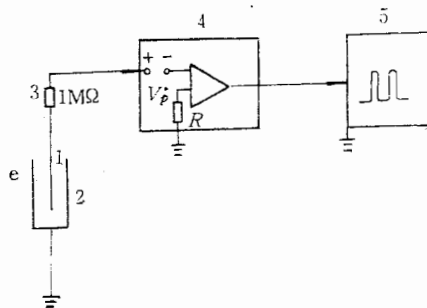


图 4 束流截面测量示意图.

1. 扫描单丝, 2. 收集极 3. 匹配电阻
4. 束流积分器, 5. 函数记录仪

由以上方法引起的误差主要来自:

- (1) 单丝扫描的非匀速直线运动与函数记录仪记录时的匀速直线运动引起的修正结果误差(下述误差均指修正后的结果误差)小于 0.17mm;
- (2) 确定记录束宽时产生的误差小于 0.43mm;
- (3) 在定位“A”点时记录仪与单丝不同位引起的误差小于 0.16mm;
- (4) 可忽略的误差: 由于马达带动曲轴转动不均匀, 即  $\omega$  与常数偏离引起误差  $< 0.02$  mm; 记录仪记录速度及精度经定标后, 在一个周期内的偏差  $< 0.01$  mm; 由单丝直

(1)

测器后,  
至为 φ35  
!(实物照  
在一定范

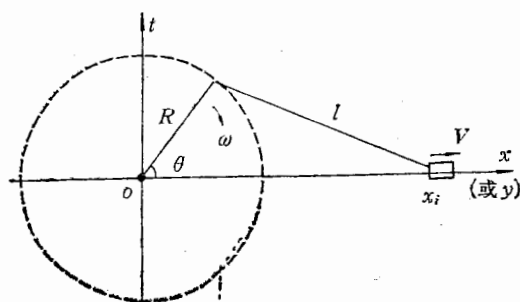


图 5 单丝扫描,运动示意图

径远小于被测束宽而假定单丝是理想细丝等引起的误差均远小于前三项而忽略不计。所以测量结果总误差为:

$$\delta = \sqrt{0.17^2 + 0.43^2 + 0.16^2} \approx 0.49 \text{ mm}$$

#### 四、实验结果和讨论

在加速器能量约为 15 MeV, 脉冲流强为 120mA 时, 用两对永磁四极透镜得到了束半径 (90% 束) 由加速器出口处的  $x_0 = 0.79 \text{ cm}$ ,  $y_0 = 0.77 \text{ cm}$ , 经传输聚焦在距加速器出口 43cm 处, 汇聚到  $x = 0.41 \text{ cm}$ ,  $y = 0.63 \text{ cm}$ , (参见图 6)。并把实验结果与理论数据的比较列于表 4。

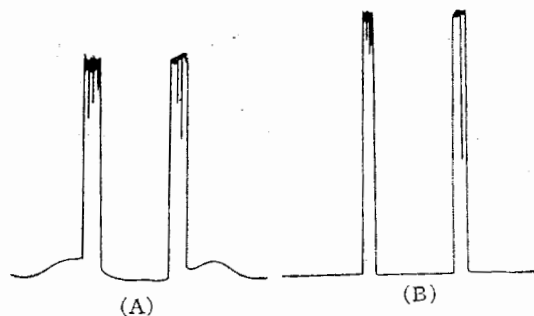


图 6 束流截面测量记录: (A) y 方向; (B) x 方向

表 4

	透镜等效间隔 (cm)					透镜等效厚度 (cm)				总长度 (cm)	磁场梯度 (Gs/cm)				束半径 (cm)	
	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$		$L$	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$	$x$
理论值	3	5	3	9	9	3.61	3.38	3.54	3.36	42.89	700	2100	2100	1050	0.57	0.80
实测值	3.35	5.11	3.14	9.25	8.17	3.61	3.38	3.54	3.36	42.91	700	2058	2091	1000	0.41	0.63

右  
表略)  
误差 $\leq$   
 $\delta y <$   
验精度  
日  
性与日  
计算中  
中, 度, 使  
在束

子直  
感谢。

[1]  
[2]  
[3]  
[4]  
[5]

quac  
of c  
43 c

在实际调试中,测量结果具有较好的重复性。对选用不同理论数据与实际值比较(数表略),由于给出参量的误差,如:加速器束流能量  $15 \pm 1$  MeV;透镜实际磁场梯度的调试误差  $\leq 50$ Gs,透镜间隔理论值与实际值误差  $\leq 5$ mm;初始束流发射度数据误差 ( $\delta x < 18\%$ ,  $\delta y < 6\%$ ),使得到的实际值与理论值在变化趋势上具有较好的符合。由此,若能提高实验精度,把前三个误差再减小 50%,预计理论值与实际值就能做到较好的符合。

由上我们认为:把永磁透镜应用于加速器束流运输与聚焦,在我国是可行的,其优越性与电磁透镜相比是明显的;我们这次的设计和调试是成功的;同时,采用束流运输理论计算四极透镜中束流运输和聚焦的方法对永磁透镜也完全适用。但对我们目前实际使用中,永磁四极透镜在连续可调方面还不太方便(由手动操作),在提高束流截面确定的精度,使各种误差减到最小等方面还要作不少工作,这些有待今后进一步完善。从永磁透镜在束流运输中的普遍应用来说,更有许多工作有待进一步探讨和落实。

## 五、致 谢

此项工作在研制与测试实验中,北京钢铁研究总院、高能所工厂和中关村 30 MeV 电子直线加速器组全体同志在磁铁制造及实验调试中给予大力协作与帮助,在此表示深切感谢。

## 参 考 文 献

- [1] K. Halbach, *N. J. M.*, 169(1980), 1.
- [2] 刘茂三等, 高能物理与核物理, 4(1980), 774.
- [3] A. B. el-Karch and J. C. el-Karch, *Electron beams lenses and Optics* 1970.
- [4] Klaus, G. Steffen, *High energy beam Optics*.
- [5] 魏开煜, 带电束流传输理论(讲义) 1978.

## APPLICATION OF PERMANENT MAGNET LENSES IN ACCELERATORS BEAM TRANSPORT AND FOCUSING

YUAN QIN-LIANG WANG YOU-ZHI SHI CAI-TU CHEN GUAN-XIONG

ZHANG SHU-XIANG CHEN REN-HUAI LIU MAO-SAN

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

This paper presents the characteristics, structure and parameters of the permanent magnet quadrupole lenses which have been used as a beam transport element in our linac. The methods of connection and adjustment are discussed. After transporting 15 MeV electron beams by 43 cm, a improvement of 50%—80% of the primary beam profile was obtained.

束半径  
(cm)

x	y
1.57	0.80
1.41	0.63

不计。所

到了束半  
器出口  
的比较