

20 ~ 100 MeV 紧凑型回旋加速器轴向注入系统 实验台架的物理设计

张天爵, 樊明武

(中国原子能科学研究院 核技术与计算机应用研究所, 北京 102413)

摘要:建立 20 ~ 100 MeV 紧凑型回旋加速器轴向注入系统实验台架,用以进行提高回旋加速器的注入流强与效率的实验研究。在该实验台架的物理设计与元件设计中,主要考虑 H^- 束从离子源引出后传输到回旋加速器中心区的输运线元件选用、物理参数匹配计算、物理元件设计等问题。设计对象是 22 MeV 和 70 MeV 回旋加速器的轴向注入系统,并将两者的布局、元件及几何尺寸、物理参数的选取统一,以便于实验台架的建立,从而形成适应性强的强流回旋加速器轴向注入系统。整个系统只需做少量调整就可满足能量为 20 ~ 100 MeV 的回旋加速器注入要求。

关键词:回旋加速器;注入;束流光学

中图分类号: TL542

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2002)03-0257-05

Design Aspects of a Test Stand for Axial Injection System of 20 ~ 100 MeV Compact Cyclotron

ZHANG Tian-jue, FAN Ming-wu

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-3, Beijing 102413, China)

Abstract: To increase the injection intensity and efficiency, a test stand is designed for the axial injection system of 20 ~ 100 MeV compact cyclotron so as to implement the experimental study. The design aspects of test stand, including the optics of the beam line, the elements design etc., are described in the paper. Mostly the elements selection for the beam transportation from the H^- source to the central region of the cyclotron, the matching calculation and the elements design are considered. To investigate the injection system of 22 MeV and 70 MeV cyclotrons experimentally by the test stand, the design goal is to keep the layout of injection line, the dimensions of elements, the operation parameters as close as possible so that the setup of the stand is more easily. The designed system can meet the need of the H^- beam injection for the cyclotron from 20 MeV to 100 MeV though the dimension of the solenoid, which is installed in the main magnet of the machine, should be changed due to the different size of the magnets.

Key words: cyclotron; injection; beam optics

收稿日期: 2001-04-20; 修回日期: 2001-07-09

作者简介: 张天爵(1964—), 男, 广东汕头人, 研究员, 博士, 加速器物理及应用专业

紧凑型回旋加速器的强流束注入通常采用轴向注入方式。加速器实际运行经验表明:轴向注入系统是束流损失的主要部位。因此,改善和提高回旋加速器注入系统的设计水平是其设计中的重要问题,国际上一些著名研究所,如 TRIUMF^[1]、PSI^[2]等,都建立了相应的实验室,进行相关技术研究。本工作基于中国原子能科学研究院现有工作基础^[3,4],主要考虑 22 和 70 MeV 紧凑型回旋加速器的轴向注入问题,对这些轴向注入系统进行物理设计,从而建立注入系统实验台架,以进行相关实验研究。

1 光学计算

1.1 基本要求

将 H⁻ 束流从离子源运输到回旋加速器中心区,需采用导向、聚焦、聚束、偏转、测束等元件。其中,导向和聚焦元件是一般输运线所常用的。针对轴向注入系统的束流能量低和在主磁铁中有一段较长运输距离的特点, x-y 导向磁铁设计成整体型,聚焦元件采用三圆筒静电透镜和螺旋管透镜。因回旋加速器中心区有一定的高频相位接收度,因此,需对从离子源引出的连续束进行纵向聚束,以提高注入效率。轴向注入的束流需在中心区偏转为水平方向,到达预定位置后才能被 D 电压吸引,并开始同步加速。因中心区空间很小,需采用静电偏转。在中心区磁场作用下,用以进行静电偏转的偏转板必须呈螺旋形。光学匹配除需考虑上述元件的位置、几何尺寸和物理参数的匹配以控制束流的输运方向、横向聚焦、纵向聚束外,还需考虑其他部件,如扩散泵、测束元件尺寸和位置,以便于实验台架的工程实施。

1.2 22 MeV 回旋加速器轴向注入系统光学计算

基于上述基本要求和 22 MeV 回旋加速器主磁铁的初步设计尺寸,轴向注入系统实验台架布局示于图 1。注入系统输运线的光学计算及元件的参数匹配,采用 OPTIC 36.3^[5]计算。计算所得束包络在 4 个关键点的 r_{max} 及有关元件参数列于表 1。计算结果用 TRANSPORT^[6]进行验证。计算中假定,束流在离子源出口处的发射度为 100 mm·mrad,这是 CYCIAE 30 回旋加速器离子源实验实测结果。匹配计算的约束条件是:从离子源出口到偏转板入口实现

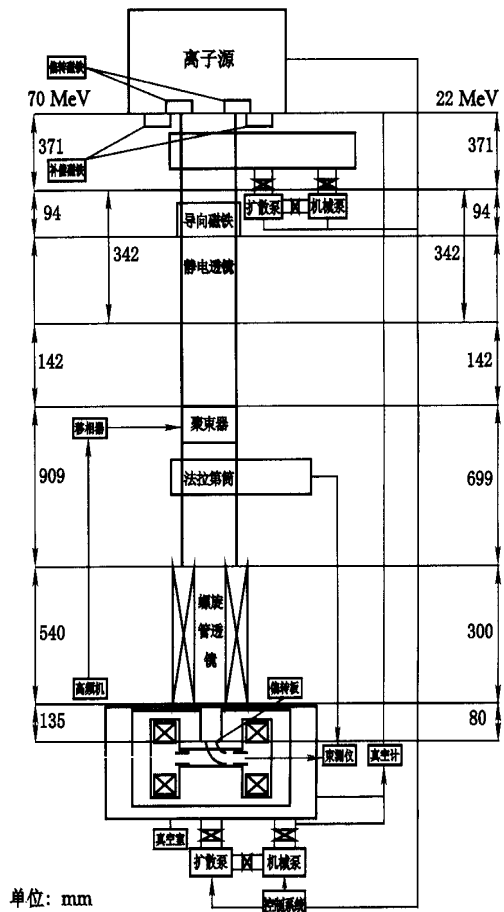


图 1 轴向注入系统实验台架布局示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the test stand for axial injection system

腰-腰传输;偏转板入口处束斑足够小,以便于注入到间隙宽度为 8 mm 的螺旋形静电偏转板中而被偏转为水平方向,开始同步加速。

1.3 70 MeV 回旋加速器轴向注入系统光学计算

对于 70 MeV 回旋加速器,主磁铁的高度比 22 MeV 回旋加速器的高,因此,传输距离更长。对此,采用与 22 MeV 相同的计算方法和束流初始条件,进行光学匹配计算。计算中选取更长的螺旋管透镜,束包络在 4 个关键点的 r_{max} 及有关元件参数也列于表 1。

2 元件设计

2.1 x-y 导向磁铁

x-y 导向磁铁对束流在 x-y 两个方向起导向作用。由于这时束流能量低,有较为明显的

表 1 22 和 70 MeV 回旋加速器注入系统的光学匹配计算结果

Table 1 The calculated results from optics matching of injection system for 22 and 70 MeV cyclotrons

注入系统	计算软件	束包络尺寸 r_{max}/mm				透镜参数					
		静电透镜出口	螺旋透镜入口	螺旋透镜出口	偏转板入口	螺旋管透镜		三圆筒静电透镜			
						长度/mm	场强/T	电压/kV	长度/mm	间隙/mm	内半径/mm
22 MeV 加速器	OPTIC	8.965	9.369	4.626	2.446	300	0.229 3	17.13	342	78	39
	TRANSPORT	8.970	9.360	4.660	2.480	300	0.229 3	17.13	342	78	39
70 MeV 加速器	OPTIC	9.783	10.792	5.123	3.391	540	0.134 5	16.08	342	78	39
	TRANSPORT	9.830	10.800	5.100	3.410	540	0.134 5	16.08	342	78	39

空间电荷效应,故将其设计为整体型(图 2),这样,既能对低能束提供足够强的导向能力,又能减短注入线的长度。励磁线圈选用 $\phi 1.8\text{ mm}$ 的漆包线绕制,共 9 层,每层 45 圈,总匝数为 405。磁轭为宽 152 mm 的正方形,厚度为 10 mm,沿束流方向(纵向)高度 60 mm,材料为低碳钢。磁场计算假定为平行平面场,应用 POISSON^[7]程序进行计算。计算出的磁场分布示于图 2,它在 92 mm \times 92 mm 范围内形成对束流运动起 360° 的导向作用的磁场。该磁场对束流在偏转板入口形成的束斑的位置所产生的调节量计算如下。

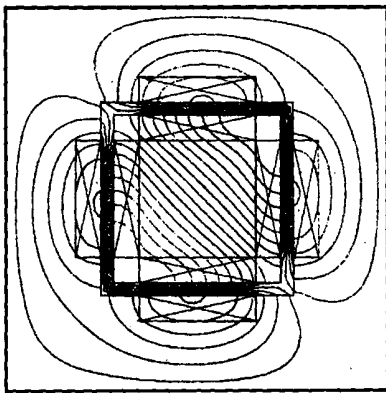


图 2 $x-y$ 导向磁铁磁场分布

Fig. 2 The magnetic field distribution of $x-y$ steering magnet

在磁场 B 中,带电粒子回旋半径为:

$$R = \frac{\sqrt{E_k(E_k + 2E_0)}}{300qB}$$

式中: E_k 为带电粒子的动能; E_0 为静止能量, MeV; q 为电荷数; 磁场 B , T; 半径 R , m。

偏转板入口处束斑位置的改变量 $D = L \tan \theta$ 。式中: L 为从 $x-y$ 导向磁铁出口到偏转板入口间的距离,对于 22 MeV 回旋加速器, $L = 1.469\text{ m}$,对于 70 MeV, $L = 1.974\text{ m}$; $\theta = 2 \arctan(L_{eff}/2R)$ 为经 $x-y$ 导向磁铁后束流运动方向的改变量。 L_{eff} 为 $x-y$ 导向磁铁的有效长度。

漆包线通不同励磁电流 I ($I = 0.5, 2, 2.5, 3\text{ A}$) 时,磁场及对束流的相应导向结果列于表 2,计算的离子为 H^- , 能量为 29 keV。

静电偏转板入口气隙为 8 mm \times 16 mm,因此,要求 $x-y$ 导向磁铁对偏转板入口处的束斑能有 $\pm 8\text{ mm}$ 的调节量,从表 2 可见,这约需 $\pm 0.5\text{ A}$ 的励磁电流。考虑到工程上可能出现的一些实际情况,如据现有 30 MeV 回旋加速器的运行经验从吸极引出的束流引出方向可能有较大偏差等,及扩展到 100 MeV 时引出能量需提高,同时又考虑到实验台架今后可能用作其他注入实验,因此,将 $x-y$ 导向磁铁扫描范围设计的比偏转板入口宽度大 5 倍(表 2)。

表 2 磁场及相应导向结果

Table 2 The magnetic field and their steering effect

I/A	$10^4 B_x/T$	$10^4 B_y/T$	R/m	$\theta/^\circ$	D_{22}/mm	D_{70}/mm
0.5	20.512	- 20.512	11.863	0.289 79	7.43	9.98
2.0	82.078	- 82.078	2.965	1.159 4	29.73	39.95
2.5	102.611	- 102.611	2.372	1.449 2	37.16	49.94
3.0	123.149	- 123.149	1.976	1.739 6	44.62	59.95

两个 405 匝线包漆包线总长 180 m,紫铜电阻率 $= 1.6 \times 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$,当 $\phi 1.8 \text{ mm}$ 的漆包线通 3 A 电流时,其电压为 3.5 V。因此,对 x - y 导向磁铁,并考虑了从电源到 x - y 导向磁铁间导线的压降,供电稳流电源应该是 2 台 10 V/ $\pm 3 \text{ A}$ 稳流电源。

2.2 三圆筒静电透镜

三圆筒静电透镜光学匹配的计算结果为总长度 342 mm,内径为 $\phi 78 \text{ mm}$,两电气隙间距为 78 mm,中间电极电压 17.13 kV。利用 DE2D 软件包计算其轴对称电场分布,结果示于图 3。结果表明:在静电透镜出入口处的束包络远小于 $\phi 20 \text{ mm}$,故在元件设计时,在维持透镜总长度不变条件下,应适当增加两电气隙的间距,以进一步提高静电透镜的聚焦力。

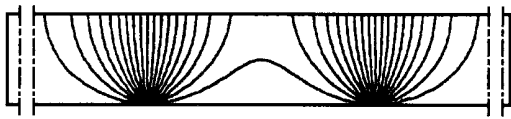


图 3 静电透镜电场分布

Fig. 3 The electrostatic field in Einzel lens



图 4 螺旋管透镜磁场分布

Fig. 4 The magnetic field distribution of the solenoid

2.3 螺旋管透镜

因螺旋管透镜安装在主磁铁芯柱中,镶条上部和主磁铁芯柱等磁性材料均对其磁场分布产生影响,故在设计 22 和 70 MeV 回旋加速器的螺旋管透镜前,先对 30 MeV 回旋加速器的螺旋管透镜的磁场分布进行计算。

分别在 2 种情况下计算磁场分布:1) 考虑主磁铁芯柱的尺寸,并将镶条近似等效为一定高度的轴对称结构,用 POISSON 软件进行计算;2) 部分考虑芯柱的影响,将螺旋管透镜的磁轭加宽,主磁铁的其他因素均不考虑。第 1 种情况下的计算结果示于图 4,以上两种情况下的计算结果比较示于图 5。图 5 中实线为轴线上的磁场,虚线为两种磁场的差值。由图 5 可见,主磁铁对螺旋管透镜磁场分布的影响很小,不影响其整体的聚焦性能。因此,对 22 和 70 MeV 回旋加速器螺旋管透镜的设计,可以不考虑主磁铁的影响,只需适当加宽其磁轭宽度,即主磁铁的磁芯柱起到螺旋管透镜部分磁轭的作用。

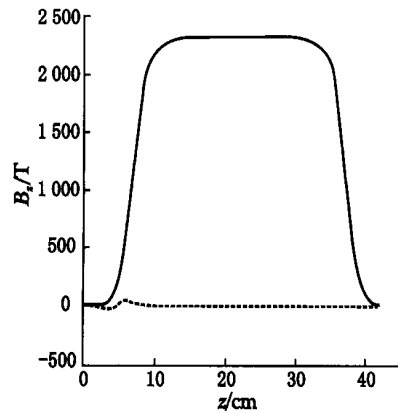


图 5 磁场计算结果比较

Fig. 5 The comparison of magnetic field between the real geometry and the simplification of the solenoid

22 MeV 螺旋管透镜总长 300 mm,两端部法兰厚 16 mm,线圈用 6 mm \times 6 mm \times $\phi 4 \text{ mm}$ 紫铜方管绕制,分 4 层,每层 37 匝,总匝数为 148。对应于不同励磁电流,磁场数值计算结果示于图 6(对称轴上)。

70 MeV 回旋加速器的螺旋管透镜总长为 540 mm,底部法兰 20 mm,上部法兰 18 mm 厚,线圈同样用 6 mm \times 6 mm \times $\phi 4 \text{ mm}$ 紫铜管绕制,分 4 层,每层 70 匝,总匝数为 280。当电流 I 分别为 150、200、250、300、330、360 和 400 A 时,对应的轴上磁场强度 B 的数值计算结果分别为 0.105 1、0.140 1、0.175 2、0.210 2、0.231 2、0.252 2、0.280 3 T。绕制线圈导线的

总长度约 38.59 m。当电流取最大值 400 A 时,电压为 11 V。因此,要求用一台 20 V/400 A 的稳流电源供电。该电源可同时作为 22 MeV 和 70 MeV 回旋加速器螺旋管透镜的供电电源。

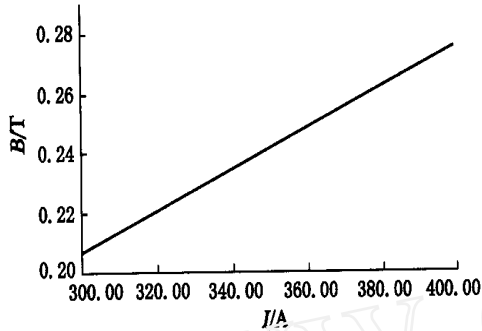


图 6 22 MeV 回旋加速器注入系统螺旋管透镜磁场
Fig. 6 The magnetic field intensity versus excitation of the solenoid of injection system for 22 MeV cyclotron

2.4 聚束器和螺旋形静电偏转板

为了将轴向注入的束流偏转为水平方向,并使其处在中心区接收度范围内,需设计好聚束器和螺旋形静电偏转板^[8]。偏转板的设计结果参见文献[3]。由离子源引出的连续束,在进入静电偏转板之前,先进行纵向聚束,可使注入效果提高 2~3 倍。聚束器是由两个接地栅网和中间两个加有与回旋加速器高频振荡频率相同电压的栅网组成,它对束流运动的作用详情参见文献[4],两个栅网中心间距是高频半周期内粒子的运动距离,与高频频率和注入能量有关。对于 22 和 70 MeV 回旋加速器, f 分别为 66.10 和 58.11 MHz。取注入能量为 28.4 keV,则两栅网中心间距 $d = v/2f$, 式中, v 为注入粒子的速度,对于 70 和 22 MeV 回旋加速器, d 分别为 20.08 和 17.66 mm。为更好地进行实验测量,要求 d 在 17~22 mm 内可调,且要求聚束器可整体上下移动 5 cm。

3 结论

在上述对轴向注入系统的物理设计和元件

设计中,有关物理参数可在比较宽的范围内灵活匹配,使得该注入系统的适应性强,只需少量调整便可适用于 20~100 MeV 的紧凑型回旋加速器。该物理设计充分考虑到工程的实施情况,对所有元件的加工工艺及配套设备的要求均建立在国内工业现有技术基础上。便于工程的实施。

实验台架及配套设备的加工与调试工作业已完成。无 Cs 注入时的引出束流为 5.2 mA,发射度为 105 mm·mrad,传输效率好于 80%。实验台架的上述调试结果表明,所设计的 20~100 MeV 紧凑型回旋加速器轴向注入系统具有较高的性能指标,是回旋加速器的整机技术集成的关键技术。

参考文献:

- [1] Cyclotron Operations Division. Annual Report 1995 [R]. Vancouver: TRIUMF, 1996.
- [2] Stambach T. High Intensity Problems — Revisited or Cyclotron Operation Beyond Limits[A]. Proceedings of the Fifteenth International Conference on Cyclotron and Their Applications [C]. France: Institute of Physics Publishing, 1998, 369~376.
- [3] 张天爵,樊明武. 强流回旋加速器静电注入偏转板设计方法研究[J]. 原子能科学技术, 1996, 30(5): 399~404.
- [4] 肖美琴,张天爵,樊明武. CYCIAE 型回旋加速器轴向注入系统的概念设计[J]. 原子能科学技术, 1996, 30(5): 392~398.
- [5] Larson JD. Preliminary Instruction Manual for Program OPTIC [Z]. Oak Ridge: Larson JD, 1998.
- [6] 茅乃丰,李增海,肖美琴. TRANSPORT-EM/PC 使用说明书[Z]. 北京:中国原子能科学研究院, 1986.
- [7] 张天爵,樊明武. POISSON/SUPERFISH 的理论基础[Z]. 北京:中国原子能科学研究院, 1997.
- [8] Snyder SL. Study and Redesign of the K500 Injection, Central Region and Phase Selection System [D]. East Lansing: Michigan State University, 1995.