

北京大学 1MeV RFQ 加速器性能优化研究*

刘伟¹⁾ 郭之虞 颜学庆 陆元荣 朱昆 高淑丽

方家驹 R.A.Jameson 陈佳洱

(北京大学重离子物理教育部重点实验室 北京 100871)

摘要 在入口归一化均方根发射度为 0.05mm·mrad 时, 北京大学 1MeV 射频四极场加速器 ISR-1000 束流传输效率为 97%. 当更换新的 ECR 源时发射度增加到 0.2mm·mrad, 此时束流传输效率下降为 89%. 在不改变腔体结构的前提下, 对入口参数及极间电压进行了优化调整, 将效率提高到 98%. 还进行了 ISR-1000 对入射束流参数的敏感性分析, 给出了各参数允许的变化范围.

关键词 整体分离环 射频四极场 匹配 均温

1 引言

射频四极场(Radio Frequency Quadrupole, RFQ)加速器^[1]是一种能同时用其射频电场的径向分量进行聚焦和纵向分量进行加速、适用于从质子到铀离子等各种低速带电粒子的高效直线加速结构. 随着重离子物理研究和技术应用的发展, 近年来重离子 RFQ 加速器, 特别是 MeV 量级的重离子 RFQ 加速器, 又得到迅速的发展. 它将在半导体器件的研究与生产、材料改性、惯性压缩热核聚变等方面起到重要的作用. 而四翼型 RFQ 在加速重离子时则显得结构笨重、电稳定性差, 因此北京大学提出一种新的重离子 RFQ 加速结构——“整体分离环型(ISR)射频四极场‘RFQ’加速结构”, 在国家自然科学基金委的资助下, 对这种加速器结构进行了系统的研究, 并相继建成了两台整体分离环 RFQ 加速器 ISR-300 和 ISR-1000^[2-4]. 其中 ISR-1000 具有很高的效率, 只用了 25kW 的功率就能将氧离子加速到 1MeV 以上. 为了进一步探索提高 RFQ 加速器加速效率的可行性, 北京大学继续开展了新型低能加速结构的研究, 将要建造 1 台分离作用 RFQ 加速器(SFRFQ)实验腔^[5]. 这需要对 ISR-1000 RFQ 的离子源和低能输运段进行升级, 以提供 mA 级的平均流强用于 SFRFQ 实验腔束流实验.

2 匹配优化

在入口归一化均方根发射度为 0.05mm·mrad 时, 北京大学 1MeV RFQ 加速器 ISR-1000 束流传输效率为 97%. 当更换新的 ECR 源时发射度增加到 0.2mm·mrad, 此时束流传输效率降到 89%. 为了抑制束流输运过程中束流发射度增长和提高束流的传输效率, 在不改变腔体结构的前提下, 对入口参数进行了优化. 在 PARMTEQM 程序中用 10000 个宏粒子进行多次传输模拟, 记录传输效率随入口椭圆参数 α 和 β 的变化关系, 模拟结果如图 1 所示. 当入射束流发射度为 0.2mm·mrad, 极间电压为 70kV 时, 将入口束流的 α 和 β 由初始的 0.87 和 4.84cm/rad 分别调整为匹配值 0.62 和 3.14cm/rad, 可将传输效率提高到 93.64%.

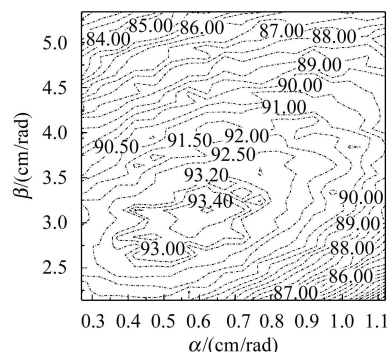


图 1 传输效率随入口 α 和 β 变化图

2006 - 11 - 21 收稿

* 国家自然科学基金(10455001, 10605003)资助

1) E-mail: w.liu@pku.edu.cn

对于一台RFQ加速器不仅希望尽可能不丢失束流,而且希望输出束流的品质也要好,即最终的发射度大小 ε 相对入口时的增长越小越好.为便于对束流的传输过程进行分析,用pteqHI程序¹⁾进行了传输模拟.图2给出了优化后和原设计束流的横向归一化发射度沿RFQ的变化(图中matched对应的是入口处 α 和 β 值分别为0.62和3.14cm/rad,极间电压为设计值70kV的情况),匹配入射的情况下RFQ出口的发射度降低了7%,从而使束流的品质进一步提高.

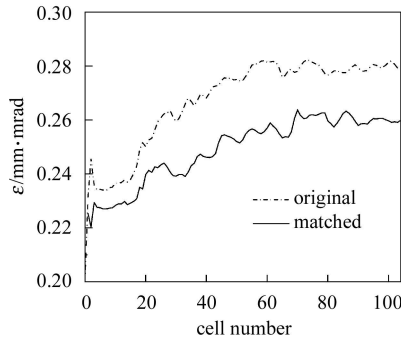


图2 束流的横向发射度随RFQ的变化

3 ISR-1000入射束流参数响应分析

对于1台RFQ加速器来说,机器的稳定性即对非理想入射束流条件的不敏感性十分重要.由于实际情况中离子源或低能传输段提供的入射束流参数与设计值会有所偏差,另外ISR-1000还将作为北京大学SFRFQ的注入器,所以稳定性分析尤其重要.因此用PARMTEQM程序对ISR-1000的稳定性进行了分析.为了便于比较,分析的前提条件:一是不改变设计的电极结构,二是在研究入射束流的某一参数变化对传输效率的影响时其他初始参数保持恒定.理想入射束流归一化发射度为0.2mm·mrad, α 和 β 值分别为0.62和3.14cm/rad,能散为0,流强为5mA.

入射束流匹配椭圆的Twiss参数 α 和 β 在非理想情况时对传输效率造成的扰动如图3所示.在入口归一化均方根发射度为通常的0.2mm·mrad情况下,ISR-1000匹配的 α 和 β 值分别为0.62和3.14cm/rad.图3给出的是 α 和 β 值分别在0.12—1.12和2.14—4.14cm/rad范围内均匀变化20步对应的传输效率变化曲线.由图可见:ISR-1000对入射束流Twiss参数 α 和 β 的敏感度低, α 和 β 在选定范围内变化时传输效率变化在3%以内,即ISR-1000的束流动力学方案对入射束流匹配椭圆的Twiss参数具有较高的稳定性.

入射束流参数偏离设计值时,束流的传输效率下降不明显,因而可以放宽离子源的匹配要求,为离子源的调试留出了更广泛的空间.

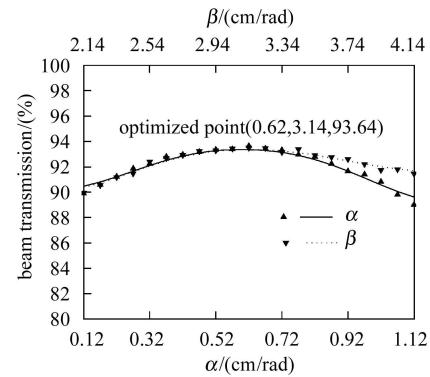


图3 非匹配Twiss参数 α 和 β 对传输效率的影响

图4给出了入射粒子能散 ΔW 和入射发射度 ε 与传输效率的关系曲线.先考虑 ΔW 从入射粒子能散为0均匀变化到 $\pm 5\text{keV}$ 的10种情况,采用的粒子分布为随机分布.由图可见,传输效率对于入射粒子能散度在一定范围内不敏感,当 $\Delta W/W$ 在14%以内变化的情况下,传输效率均在90%以上,但在能散度超过14%后,传输效率迅速降低,这就要求离子源提供的束流能散度必需保证在14%内.接下来将入射发射度围绕设计值0.2mm·mrad左右共变化10个数值,步长为0.01mm·mrad.数值研究结果显示,在选定范围内,传输效率的变化幅度为14%.

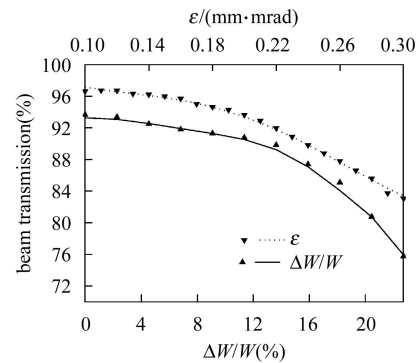


图4 入射粒子能散度与不同入射发射度对传输效率的影响

最后,测试了从0—10mA间不同入射束流强度 I 对传输效率的影响,随着流强的增长传输效率光滑而比较缓慢地下降,但是我们的设计点5mA位于一个比较安全的区域.

总之,以上的所有分析表明北京大学整体分离环型RFQ加速器ISR-1000对于非理想入射束流条件扰动是比较稳定的.

1) Jameson R. A. LANL Technical Report LA-CP-97-54, 1997

4 改变极间电压

束流在横向和纵向的振荡可以用温度来表述：即横向温度 $T = \frac{1}{5} \frac{\epsilon_{tn}}{\gamma a} mc^2$ 和纵向温度 $T = \frac{1}{5} \frac{\epsilon_{ln}}{\gamma^3 b} mc^2$ [6]。其中 ϵ_{ln} 和 ϵ_{tn} 分别表示纵向和横向的归一化均方根发射度， a 、 b 分别为束流的横向和纵向束流包络， γ 为相对论因子。当不同自由度之间的振荡能量不平衡时，能量将在不同自由度之间进行交换，趋向于“热平衡”，称之为均温过程 [7, 8]。这一过程导致不同方向上的运动产生耦合作用，结果造成发射度增长和束流品质下降。而在均温条件下，束流的传输效率将明显提高。

在 RFQ 结构已定的情况下，图 5 所示的模拟计算表明可以通过提高极间电压来改善束流的传输效率。当极间电压提高到 84kV 时，束流的传输效率可提高到 98%。这是因为随着极间电压的升高纵向发射度增长变慢，而且横向聚焦显著增强，横向包络减小，束流更加趋向于均温条件 $\frac{a\epsilon_{ln}}{b\epsilon_{tn}} = 1$ [7, 8]，如图 6 所示。

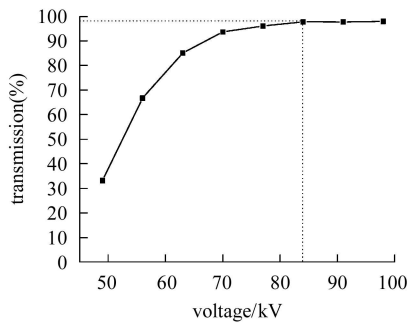


图 5 传输效率随极间电压的变化

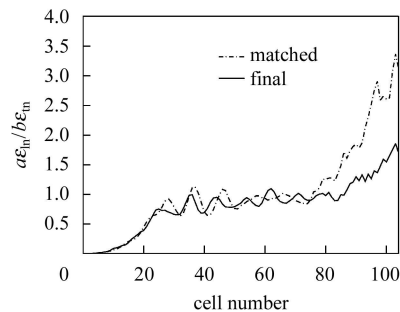


图 6 均温情况

在极间电压增大到一定程度时，传输效率达到了平顶，继续增大电压而效率没有明显提高，只是增加功率损耗。对于 ISR-1000 可以将电压提高到 84kV，优

化后束流的包络显著减小，图 7 为电压分别为原始值 70kV 以及优化后的 84kV 时束流横向及纵向的尺寸沿 RFQ 的变化，由图 7 可以看出，在极间电压提高到 84kV 的情况下，束流的横向包络明显减小，尤其在电压为 70kV 时束流包络明显高于优化后的束流包络，而这部分 RFQ 的孔径较小，极易造成束流损失，导致传输效率降低。图 6 和图 7 是用 pteqHI 程序进行模拟研究得到的。

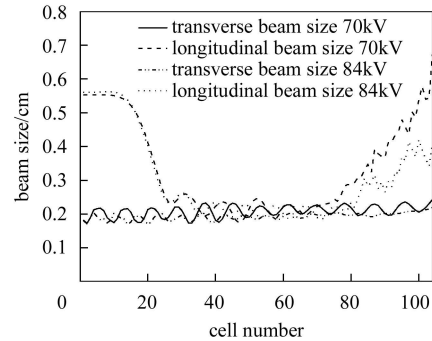


图 7 束流的横向及纵向尺寸变化比较

5 结论

在 RFQ 加速器中，束流的失配是引起发射度增长和束流损失的重要原因。经过对入口参数的优化，得到匹配的束流参数，从而将 ISR-1000 的传输效率提高到近 94%，束流的品质也得到了改善。对正常极间电压下的稳定性分析表明，该 RFQ 对入射束流的 α 和 β 值具有较高的稳定性，但入射束流的能散度需控制在 14% 以内。这为 ISR-1000 RFQ 加速器的离子源和低能输运段的升级改造提供了理论依据。此外，通过增大极间电压，将 ISR-1000 推向均温状态，其传输效率进一步提高到 98%，表 1 给出了优化前后有关参数的对比。对于一个非均温的 RFQ 动力学设计，在进行入口参数匹配优化和改变设计的极间电压后，束流可以趋近于均温状态，传输效率和束流品质可以得到一定的改善，从理论上证明了均温理论可以为降低束流发射度增长和改善品质提供帮助。

表 1 优化前后参数比较

	$\alpha/$ (cm/rad)	$\beta/$ (cm/rad)	列极间电 压/kV	传输 效率	横向包 络/cm	出口发射度/ (mm-mrad)
优化前	0.87	4.84	70	89%	0.24	0.28
优化后	0.62	3.14	84	98%	0.22	0.27

参考文献(References)

- 1 Kapchinskij I M, Tepiyakov V A. Prib. Tech. Eksp., 1970, **4**: 19
- 2 CHEN Jia-Er, FANG Jia-Xun, LI Wei-Guo et al. Progress in Natural Science, 1994, **4**(3): 271—277 (in Chinese)
(陈佳洱, 方家训, 李纬国等. 自然科学进展, 1994, **4**(3): 271—277)
- 3 CHEN Jia-Er, FANG Jia-Xun, YU Jin-Xiang et al. Progress of RFQ for Ion Implantation at Peking University. In: Proc. of EPAC2000. Vienna, Austria, 2000. 1850—1852
- 4 LU Yuan-Rong, CHEN Jia-Er, FANG Jia-Xun et al. NIM, 2003, **A515**: 394—401
- 5 YAN Xue-Qing, CHEN Jia-Er, FANG Jia-Xun et al. NIM, 2005, **A539**(3): 606
- 6 Reiser M. Theory and Design of Charged Particle Beams. New York: John Wiley & Sons, 1994
- 7 Jameson R A. AIP Conf. Prof., 1992, **279**: 969
- 8 Jameson R A. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1981, **NS-28**: 2408

Optimization Study of the 1MeV RFQ at Peking University^{*}

LIU Wei¹⁾ GUO Zhi-Yu YAN Xue-Qing LU Yuan-Rong ZHU Kun GAO Shu-Li
FANG Jia-Xun R. A. Jameson CHEN Jia-Er

(MOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract ISR-1000 will be used as the injector of the SFRFQ, which is under development at Peking University. The possibility to improve its transmission has been investigated. In order to get better transmission, the input beam parameters and the vane voltage have been optimized without changing the structure of the RFQ. In addition, the error study on input beam parameters of ISR-1000 has been carried out. The sensitivity of those parameters has been obtained by simulation.

Key words integral split ring, RFQ, matching, equipartition

Received 21 November 2006

^{*} Supported by NSFC (10455001, 10605003)

1) E-mail: w.liu@pku.edu.cn