

文章编号: 1007-4627(2018)02-0140-07

CSR-LINAC IH-RFQ 的高频电磁设计

李钟汕^{1,2}, 杜衡^{1,2,†}, 殷学军^{1,†}, 夏佳文¹, 原有进¹, 杨建成¹, 李小妮^{1,2}, 李朋¹, 李杰¹,
郑文亨^{1,2}, 葛文文^{1,2}, 曲国锋^{1,2}, 申国栋¹, 张小虎¹, 乔舰^{1,2}, 王科栋^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 中国科学院近代物理研究所在 CSR-LINAC 项目中设计了一台 108.48 MHz 的 IH 型 RFQ 直线加速器。该 RFQ 可以将质荷比为 3~7 的离子从 4 keV/u 加速到 300 keV/u。在完成束流动力学设计的基础上, 主要针对 RFQ 腔体的高频电磁设计展开了研究, 同时利用了电磁场仿真和束流动力学模拟来研究腔体的四极场不平整度和二极场及其动力学影响。未经调谐的情况下, 腔体的谐振频率为 108.15 MHz, 腔体空载品质因子 Q_0 为 5910, 腔体功耗为 123 kW。通过在支撑板两端增加底切的设计, 将腔体的四极场不平整度由 $-21\% \sim 12\%$ 优化至 $\pm 2.5\%$, 满足了束流动力学要求。腔体的二极场为 $-3\% \sim -2.2\%$, 使得束流在垂直方向小幅振荡, RFQ 的垂直方向接受度减小 5%。为了保证功率馈入时反射较小, 将耦合器设置在临界耦合状态, 耦合面积为 940 mm^2 。为了补偿腔体的频率偏差和漂移, 设计了调谐量分别为 707 和 132 kHz 的固定调谐器和可动调谐器。

关键词: 重离子射频四极场加速器; 电磁场仿真; 四极场不平整度; 耦合器; 调谐器

中图分类号: TL53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.35.02.140

1 引言

为了提高兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)^[1]的整体性能, 中国科学院近代物理研究所计划新建一台占空比为 0.4% 的高电荷态脉冲重离子直线加速器(CSR-LINAC)^[2, 3]作为 HIRFL-CSR 的注入器, 用以代替旧注入器——螺旋扇形回旋加速器(SFC), 如图 1 所示。该注入器建成后, HIRFL-CSR 的引出流强将提高 10~100 倍, 铀束的最大引出能量由目前的 120.3 MeV/u 提高到 408.1 MeV/u, 束流品质、长期稳定性和重复性将大大改善, 供束时间将提高近 50%。

CSR-LINAC 由电子回旋共振(ECR)离子源、低能传输线(LEBT)、射频四极场直线加速器(RFQ)、中能传输线(MEBT)、交叉指型漂移管型直线加速器(IH 型 DTL)和高能传输线(HEBT)组成, 可以提供从 C 到 U 之间全部重离子束。

做为 CSR-LINAC 的前端加速器, CSR-LINAC RFQ 的主要作用是将 ECR 离子源引出的直流离子束(能量为 4 keV/u)俘获成一个个束团, 并加速到 300 keV/u, 以满足后续加速器 DTL 的注入要求。

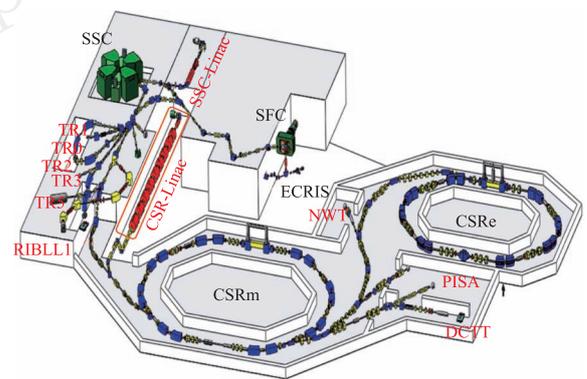


图 1 (在线彩图) HIRFL-CSR 升级建设总体布局图

目前, 国内外正在设计建造和已经建造完成的重离子直线注入器大多采用 RFQ 作为前端加速器。例如, 中国科学院近代物理研究所 SSC-LINAC 项目 53.667 MHz 四杆型 RFQ, 用于加速质荷比小于 7 的重离子束^[5, 6]; 强流重离子加速(HIAF)项目 81.25 MHz 四翼型 RFQ, 可将 U^{34+} 加速到 400 keV/u^[7, 8]; 德国 GSI 的 108 MHz HLI-RFQ, 采用四杆型谐振结构, 用于加速 U^{28+} ^[9, 10]; HSI-RFQ, 其工作频率为 36 MHz, 采用 IH 型谐振腔, 可以将 16.5 emA 的 U^{4+} 加

收稿日期: 2017-07-19; 修改日期: 2017-10-12

基金项目: 广东省引进创新创业团队计划资助项目(2016ZT06G373); 国家自然科学基金资助项目(11375243, 11475235, 11405237)

作者简介: 李钟汕(1969-), 男, 湖南邵阳人, 在读博士研究生, 从事核技术及应用研究; E-mail: lizhsh89@impcas.ac.cn

† 通信作者: 殷学军, E-mail: yinxj@impcas.ac.cn; 杜衡, E-mail: duheng@impcas.ac.cn.

速到 120 keV/u^[11, 12]; 加拿大 TRIUMF 的 35 MHz ISAC RFQ, 可将质荷比小于 30 的重离子加速到 150 keV/u^[13, 14]。

本文在完成 CSR-LINAC RFQ 的束流动力学设计基础上, 主要就 CSR-LINAC IH-RFQ 的高频电磁设计及其关键参数的优化开展研究工作。

2 束流动力学

CSR-LINAC RFQ 用于加速质荷比在 3~7 之间(从 C 到 U)的所有离子, 工作频率为 108.48 MHz, 设计束流强度为 3 emA。根据中国科学院近代物理研究所离子源的运行经验, ECR 离子源引出的重离子束的自然发射度(包含 99% 束流)小于 200 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$, 即将 RFQ 的全发射度选为 200 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。由于 RFQ 是占空比为 0.4% 的低占空比脉冲加速器, 因此可以选择较高的 K_p 值^[4], 即可以选择较高的极间电压以提高加速梯度, 使得 RFQ 更紧凑。为了避免 RFQ 运行时严重打火对电极造成不可逆的破坏, 将 K_p 值选为 2.0, 极间电压选为 68.8 kV。考虑到离子源引出高压的限制和 RFQ 对入口能量的要求, 将 RFQ 的入口能量选为 4 keV/u。为了保证 DTL 加速单元加工的可行性, DTL 的加速单元长度必须大于 20 mm, 即 RFQ 的最长加速单元大于 20 mm。RFQ 出口能量选为 300 keV/u, 即最长加速单元为 34.9 mm, 以降低 DTL 的加工难度

和风险。

CSR-LINAC RFQ 的束流动力学设计以 RFQGen 软件^[15]为设计模拟平台进行。RFQGen 作为国际上应用最广泛的 RFQ 设计软件, 其可靠性已得到国内外多台 RFQ 的实验验证。CSR-LINAC RFQ 采用了“新四段论”方法设计^[2, 16-18]: RFQ 的横向聚焦强度 B 沿着束轴变化, 以保证足够的横向聚焦力; 保证横向相移和纵向相移都足够光滑, 以避免束流通过 RFQ 加速通道时因失配而损失; 保证 $\sigma_{0T} > \sigma_{0L}$, 以避免一阶参数共振。 σ_{0T} 和 σ_{0L} 分别为零流强横向相移和零流强纵向相移, 其定义如下:

$$\sigma_{0T}^2 = \frac{B^2}{8\pi^2} - \frac{\sigma_{0L}^2}{2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{0L}^2 = -\frac{\pi^2 qeAV \sin \phi_s}{m_0 c^2 \beta^2}, \quad (2)$$

其中: q 为粒子的电荷态; A 为加速效率; V 为极间电压; ϕ_s 为同步相位; m_0 为粒子的静止质量; $\beta = v/c$, v 为粒子速度, c 为光速。图 2 给出了 RFQ 主要动力学参数沿束轴的分布。图 3 为 RFQ 的束流包络分布图。图 4、5 分别为 RFQ 入口和出口束流相空间分布。CSR-LINAC RFQ 由 311 加速单元组成, 电极长度为 307 cm, 最大调制系数 m 为 2.124, 传输效率达到了 98.9%, 出口能散为 $\pm 2.4\%$, 能够满足 CSR-LINAC 项目的要求。

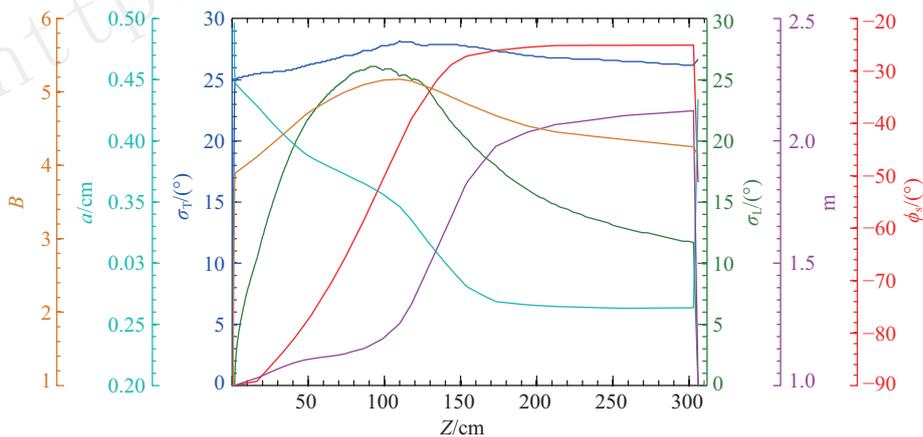


图 2 (在线彩图) RFQ 主要动力学参数沿束轴的分布

3 电磁设计

基于动力学设计的结果, 本文采用 CST Microwave Studio (MWS)^[21]软件完成了 RFQ 腔体的电磁设计, 其主要包括腔体建模、电磁场仿真及优化、功率耦合器和调谐器的设计。

CSR-LINAC RFQ 采用了交叉指 (IH) 型谐振结

构^[19, 20], 如图 6 所示。IH 型 RFQ 由 4 根微翼型电极、若干个环形支撑杆、2 个支撑板和 1 个圆柱形腔筒构成。得益于表面电流都要经过腔壁形成回路, 它具有分路阻抗高和腔体尺寸小等特点, 反对称的谐振结构使得其极场成分较小。作为一种四杆型 RFQ, 它易于调节, 可根据需求更换电极, 加工难度小, 造价便宜。

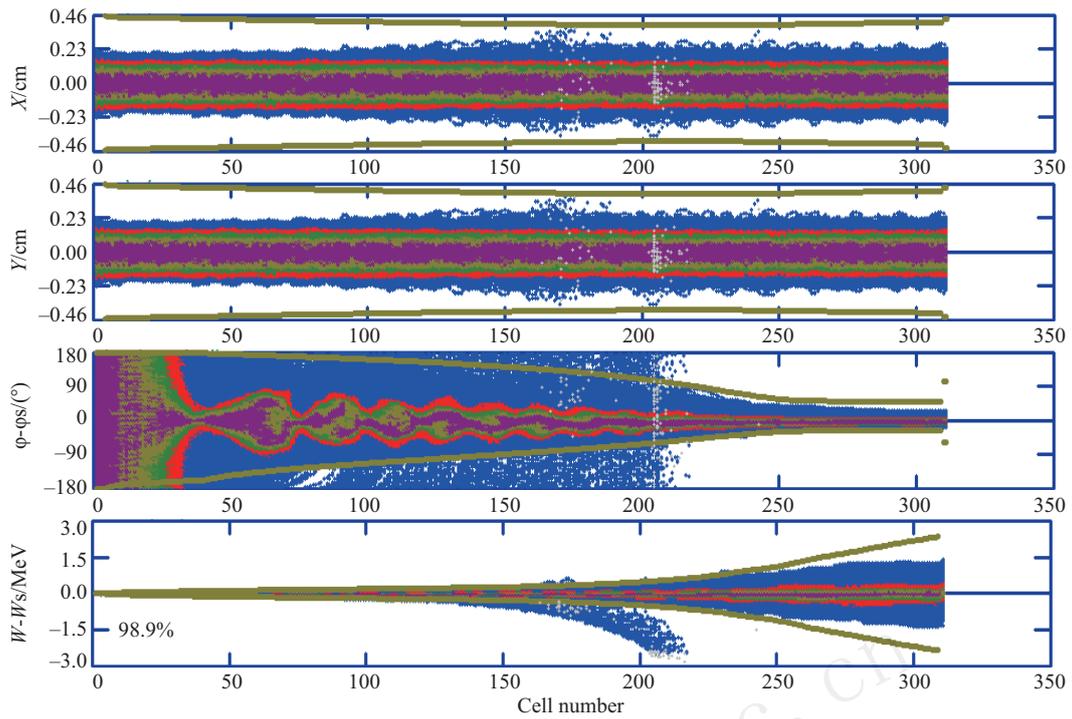


图 3 (在线彩图) RFQ束流包络图
从上至下分别为水平方向束流包络、垂直方向束流包络、束流纵向相宽和能量分布。

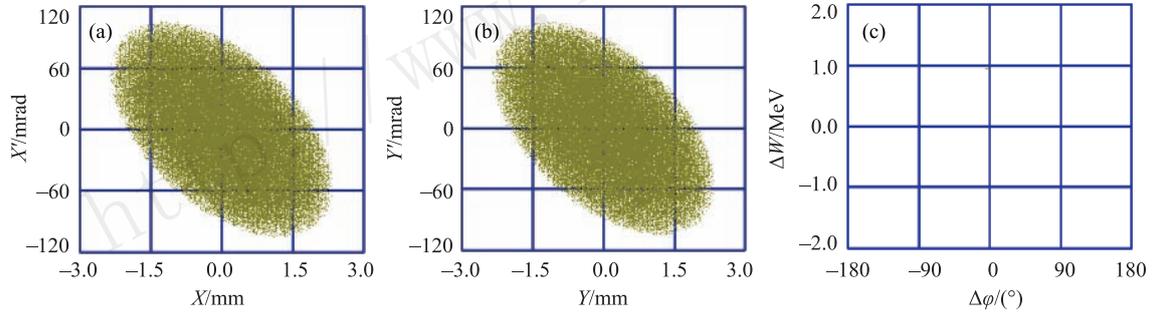


图 4 (在线彩图) RFQ入口束流相空间分布
(a)、(b)、(c)分别为入口水平方向、垂直方向和纵向相空间。

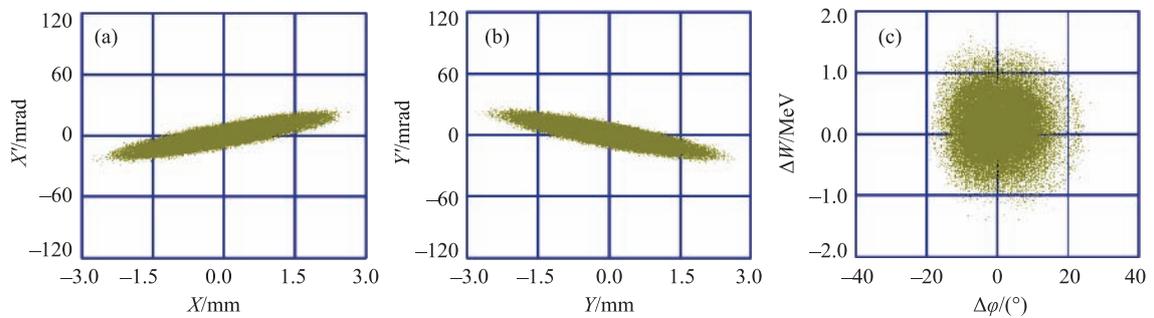


图 5 (在线彩图) RFQ出口束流相空间分布
(a)、(b)、(c)分别为入口水平方向、垂直方向和纵向相空间。

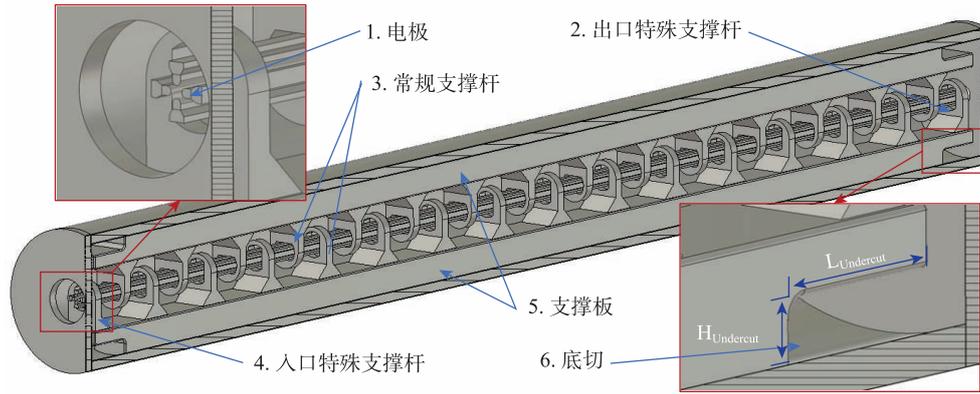


图 6 (在线彩图) CSR-LINAC RFQ IH 腔体模型

考虑到加工表面的光洁度和安装接触面的接触电阻等因素的影响, 在模拟计算时将无氧铜的电导率设定为 5×10^7 S/m。基本高频特性仿真将采用不带调制的电极结构, 这是因为考虑电极调制后的电极曲面变得非常复杂, 网格划分误差将大大增大, 腔体谐振频率、分路阻抗 R_s 和品质因子 Q_0 的计算精度很差^[22]。CSR-LINAC RFQ 高频特性参数如表 1 所列。在未经调谐的情况下, 腔体的设计谐振频率选为 108.15 MHz, 低于实际的工作频率, 以便于调谐。此时腔体功耗为 123 kW, 考虑到实际老炼时功率还会更高, 因此需要一台 200 kW 的射频功率源为 RFQ 提供射频功率。

表 1 CSR-LINAC RFQ 射频特性参数

RF 特性参数	CST 模拟值
谐振频率	108.15 MHz
品质因子 Q_0	5 910
功率	123 kW
网格数	16×10^6

3.1 不理想场的影响与优化

由于电极电容分布不均匀、寄生电容和谐振结构反对称性的影响, IH 型 RFQ 实际电场分布与动力学设计的电场分布有一定区别, 这就是腔体的不理想场, 其主要表现为四极场不平整度和二极场的存在。因此, 电磁设计时必须研究腔体的不理想场及其对束流动力学的影响。CSR-LINAC RFQ 不理想场分布由 CST MWS 软件仿真得到, 而不理想场的束流动力学影响采用 TraceWin^[23] 完成。四极场不平整度定义如下:

$$Unflatness = \frac{V_n - \bar{V}}{\bar{V}}, \quad (3)$$

式中 V_n 为第 n 象限的极间电压, \bar{V} 为平均极间电压, 象限的定义如图 7 所示。二极场则表示为

$$Dipole = \frac{(V_1 + V_2 - V_3 - V_4)/2}{\bar{V}}. \quad (4)$$

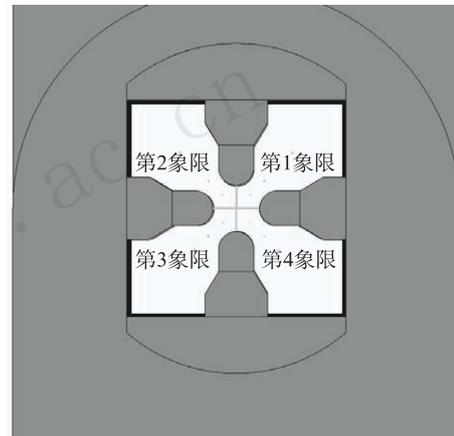


图 7 象限的定义

如图 8 所示, 在初步设计时发现未经调整的四极场不平整度为 $-21\% \sim 12\%$, 这样会不利于束流在 RFQ 中的传输和加速。将四极场不平整度的分布导入 TraceWin 中, 进行束流动力学模拟。模拟结果显示: RFQ 出口能量降低了 7.7 keV/u, 超出了后续 DTL 的能量接受范围。另外, 四极场不平整导致 K_p 值增加

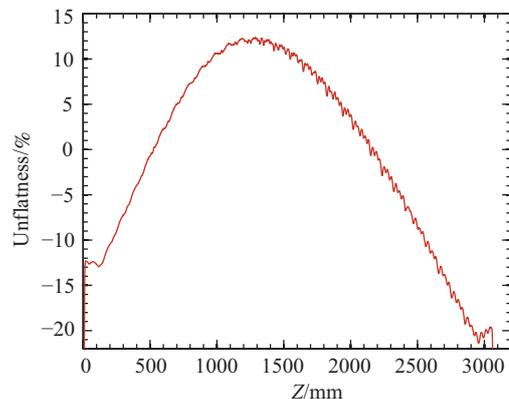


图 8 (在线彩图) 优化前四极场不平整度沿束轴的分布

至 2.24, 增加了 RFQ 运行时的打火风险。为了减小四极场不平整度, 我们通过在支撑板两端开底切来优化沿轴向的四极场的分布, 如图 6 中所示。图 9 给出了平整度优化的结果。经过计算分析发现, 当底切高度 H_{Undercut} 为 40 mm, 长度 L_{Undercut} 分别为 120 mm (RFQ 入口的底切) 和 170 mm (RFQ 出口的底切) 时, 四极不平整度最小 ($\pm 2.5\%$), 对束流在 RFQ 中传输和加速的影响可以忽略, 能够满足束流动力学设计的要求。

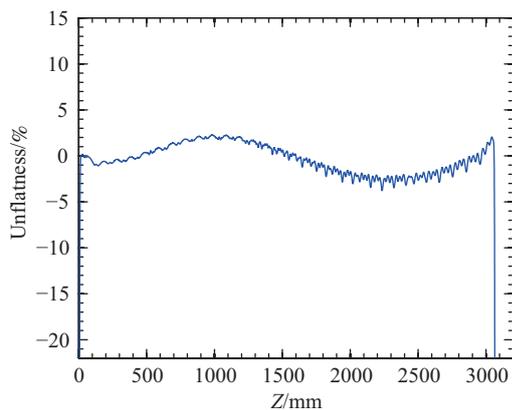


图 9 (在线彩图) 优化后四极场不平整度的分布

二极场的存在会使得束流中心在垂直方向产生准周期性的振荡。图 10 给出了二极场沿束轴方向的分布。可以看出二极场基本上在 $-3\% \sim -2.2\%$ 之间。如图 11 所示, 考虑二极场后, 束流中心在垂直方向振荡幅度小于 0.2 mm, 从而使得 RFQ 的垂直方向接受度减小 5%。但 RFQ 的束流传输效率仍为 98.9%。由此可得, 二极场对束流传输的影响很小, 故无需优化腔体的二极场。

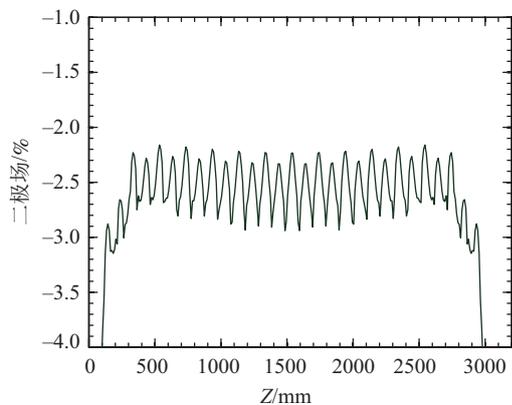


图 10 二极场沿束轴的分布

3.2 功率耦合器设计

功率耦合器的主要作用是完成射频功率源与腔体之间的阻抗匹配, 使得来自功率源的射频功率可以无反

射或者极少功率反射的馈入 RFQ 腔体。CSR-LINAC RFQ 的束流功率很小, 耦合器设计时不需要考虑束流负载对耦合器耦合状态的影响。该 RFQ 支撑板周围以磁场分布为主, 电场强度极弱, 适合采用环形磁耦合功率耦合器^[24], 初步设计如图 12 所示。

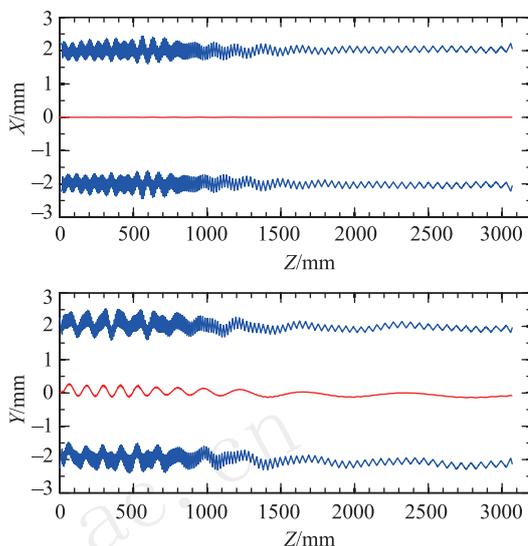


图 11 (在线彩图) 考虑二极场后的束流包络与束流中心沿束轴的分布

蓝色曲线表示束流包络, 红色曲线表示束流中心位置。

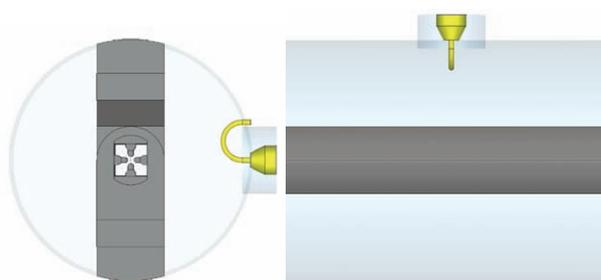


图 12 (在线彩图) CSR-LINAC RFQ 功率耦合器

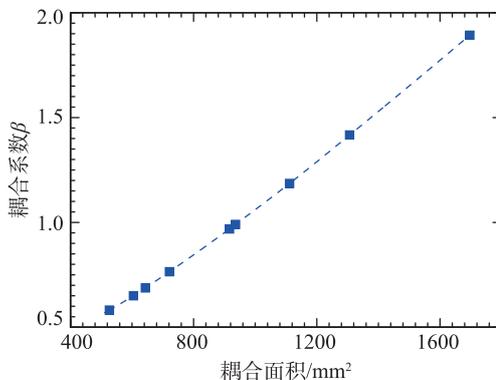


图 13 (在线彩图) 耦合系数和反射系数与耦合环面积的关系

环形耦合器是通过调整耦合面积达到临界耦合状态来实现阻抗匹配。CST 求解临界耦合面积的方

法是: 采用本征模求解器计算 Q_e , 再求得耦合系数 $\beta (\beta = Q_0/Q_e)$, 当耦合系数为 1 时, 耦合环的面积即为临界耦合面积。耦合器的仿真结果如图 13 所示, 据本征模求解器所得到的临界耦合面积为 940 mm^2 。

3.3 调谐器设计

RFQ 的调谐器分为固定调谐器和可动调谐器两种。固定调谐器的调谐量相对较大, 通常用来弥补因 CST 仿真以及腔体加工安装误差造成的频率偏差; 可动调谐器的调谐量较小, 则用于补偿因环境温度变化、冷却水温水压变化以及腔体功率变化等因素造成的频率漂移。如图 14 所示, CSR-LINAC RFQ 的固定调谐器和可动调谐器都采用了杆型调谐器, 其主要是通过微扰腔体磁场分布来改变谐振频率。固定调谐器在耦合器对侧, 由 5 根直径为 60 mm 的圆柱杆构成; 可动调谐器由 4 根直径为 30 mm 的圆柱杆构成, 与耦合器同侧。调谐杆插入腔体的长度为调谐器的位置。图 15 给出了调谐器的 CST 仿真结果, 当固定调谐器和可动调谐器的位置均为 80 mm 时, 其调谐量分别为 707 和 132 kHz, 足以用来补偿频率偏差和漂移。

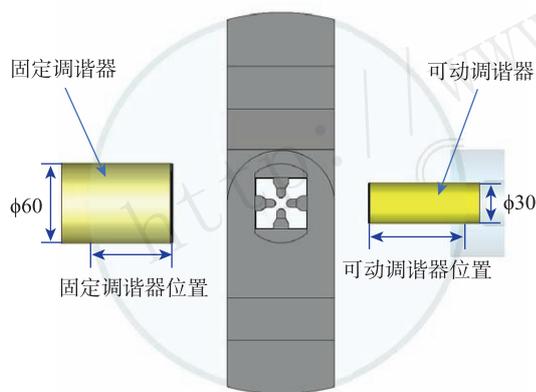


图 14 (在线彩图) CSR-LINAC RFQ 调谐器模型

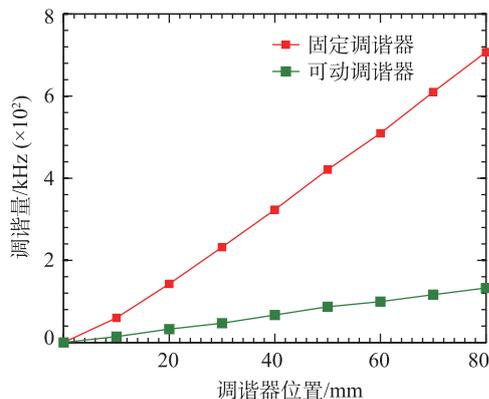


图 15 (在线彩图) 调谐量与调谐器位置的关系

4 结论

根据束流动力学设计的要求, 本文完成了 CSR-LINAC RFQ 的电磁设计。该 RFQ 采用了 IH 型谐振结构。经过优化设计, 腔体的四极场不平整度从 $-21\% \sim 12\%$ 优化到了 $\pm 2.5\%$, 满足了束流动力学的设计要求。腔体未经调谐的谐振频率为 108.15 MHz, 与实际工作频率仅相差 330 kHz。腔体零负载品质因子 Q_0 为 5910, 射频功率损耗为 123 kW, 一台 200 kW 的脉冲射频功率源即可满足 RFQ 的功率需求。功率耦合器采用环形磁耦合设计, 其临界耦合面积为 940 mm^2 。考虑到多种因素影响, 可动调谐器和固定调谐器采用杆型调谐器设计, 其总调谐量为 839 kHz, 完全覆盖了设计频率与实际工作频率偏差的范围, 能够满足频率调谐的要求。

参考文献:

- [1] XIA Jiawen, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, et al. *Nucl Instr Meth A*, 2002, **488**(1): 11.
- [2] ZHANG Xiaohu, YUAN Youjin, XIA Jiawen, et al. *Chinese Physics C*, 2014, **38**(10): 74.
- [3] ZHANG Xiaohu. Beam dynamics design and research of the Linac injectors in HIRFL[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 127. (in Chinese)
- [4] 张小虎. HIRFL重离子直线注入器的动力学设计与研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2014: 127.
- [5] JAMESON R A. *NATO ASI Series B: Physics*, 1988, **178**: 497.
- [6] LIU G, LU Y R, HE Y, et al. *Nucl Instr Meth A*, 2013, **701**(3): 186.
- [7] YIN X J, YUAN Y J, XIA J W, et al. *Phys Rev ST Accel Beams*, 2016, **19**(1): 010402.
- [8] LI C, SUN L, HE Y, et al. *Nucl Instr Meth A*, 2013, **729**(1-2): 426.
- [9] WANG Z J, HE Y, JIA H, et al. Proceedings of LINAC2012[C]. Tel-Aviv, Israel, 2012.
- [10] KLABUNDE J. Proceedings of the 1988 Linear Accelerator Conference[C]. Williamsburg, Virginia, USA, 2012.
- [11] KLABUNDE J. Proceedings of the 1992 Linear Accelerator Conference[C]. Ottawa, Ontario, Canada, 1992.
- [12] RATZINGER U, KASPAR K, MALWITZ E, et al. *Nucl Instr Meth*, 1998, **415**(1): 281.
- [13] KASPAR K, RATZINGER U. DESIGN OF THE GSI 36 MHz RFQ ACCELERATOR ON THE BASE OF MAFIA CALCULATIONS, 1996.
- [14] KOSCIELNIAK S, LAXDAL R E, LEE R, et al. Particle Accelerator Conference, 1997[C]. Vancouver, British Columbia, Canada, 1997: 1102.
- [15] LAXDAL R E, BAARTMAN R A, ROOT L. Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference[C]. New York,

- 1999: 3534.
- [15] CRANDALL K R. Proceedings of the 1979 Linear Accelerator Conference[C]. Montauk, New York, USA, 1979: 205.
- [16] ZHANG C, SCHEMPP A. *Nucl Instr Meth A*, 2008, **586**(2): 153.
- [17] ZHANG C, SCHEMPP A. *Nucl Instr Meth A*, 2009, **609**(2-3): 95.
- [18] CHUAN ZHANG. Linac Design for Intense Hadron Beams[D]. Frankfurt am Main, 2009(12): 54.
- [19] KASPAR K, RATZINGER U. the 5th European Particle Accelerator Conference[C]. Sitges, Barcelona, Spain, 1996.
- [20] RATZINGER U, KASPAR K, MALWITZ E, *et al.* *Nucl Instr Meth A*, 1998, **415**(1): 281.
- [21] CST - Computer Simulation Technology. www.cst.com.
- [22] LIU Ge. Study on the Theoretical Design and Experimental Research of a Continuous Wave High Charge State Heavy Ion RFQ[D]. Beijing: Peking University, 2014: 68. (in Chinese)
(刘戈. 连续波高电荷态重离子RFQ加速器的理论设计与实验研究[D]. 北京大学, 2014: 68.)
- [23] URIOT D. TraceWin[M]. CEA Saclay, 2013.
- [24] BAILEY R. Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: RF for accelerators, Ebeltoft, Denmark, 2011: 125.

RF Structure Design for CSR-LINAC IH-RFQ

LI Zhongshan^{1,2}, DU Heng^{1,2,†}, YIN Xuejun^{1,†}, XIA Jiawen¹, YUAN Youjin¹, YANG Jiancheng¹, LI Xiaoni^{1,2}, LI Peng¹, LI Jie¹, ZHENG Wenheng^{1,2}, GE Wenwen^{1,2}, QU Guofeng^{1,2}, SHEN Guodong¹, ZHANG Xiaohu¹, QIAO Jian^{1,2}, WANG Kedong^{1,2}

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The 108.48 MHz IH type RFQ for CSR-LINAC project is under design at Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences. This RFQ can accelerate heavy ions with mass to charge ratio of 3~7 from 4 keV/u to 300 keV/u. According to the beam dynamics requirement, the RF structure design has been finished. The quadrupole field unflatness and dipole field of the cavity were studied by electromagnetic simulation and beam dynamics simulation. The frequency of the cavity without tuning is 108.15 MHz, the Q_0 of the cavity is 5910, and the RF power loss is 123 kW. The quadrupole field unflatness of $\pm 2.5\%$, which was $-21\% \sim 12\%$ before optimizing, is achieved to meet dynamics requirement through the undercuts in cavity supporters. The dipole field of $-3\% \sim -2.2\%$ causes the oscillation of the beam center and acceptance reduction of 5%. The power coupler must be in critical coupling state with the coupling area of 940 mm² for minimum reflection coefficient. The tuners, consist of coarse and fine tuners with frequency shift of 707 and 132 kHz respectively, is used for tuning of frequency deviation of the cavity.

Key words: heavy ion radiofrequency quadrupole accelerator; electromagnetic simulation; unflatness of quadrupole field; power coupler; tuner

Received date: 19 Jul. 2017; **Revised date:** 12 Oct. 2017

Foundation item: Guangdong Innovative and Entrepreneurial Research Team Program (2016ZT06G373); National Natural Science Foundation of China (11375243, 11405237, 11475235)

† **Corresponding author:** YIN Xuejun, E-mail: yinxj@impcas.ac.cn; DU Heng, E-mail: duheng@impcas.ac.cn.