

# 突出电极对四杆型 RFQ 腔体并联 阻抗及场平整性的影响\*

张周礼<sup>1,2</sup>, 赵红卫<sup>1</sup>, R. A. Jameson<sup>3</sup>, 许哲<sup>1</sup>, 张生虎<sup>1</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. *Institute of Applied Physics, Goethe University, Max-von-Laue-Str 1, D60438, Frankfurt-am-Main, Germany*)

**摘 要:** 中国科学院近代物理研究所正在进行等离子体直接注入方案的研究, 以便为重离子物理研究提供稳定可靠的高流强束流。由于工作频率较低, 用于等离子体直接注入方案的 RFQ 腔体采用了适合于低频的四杆型结构。在完成束流动力学设计的前提下, 研究了 RFQ 腔体支撑臂的各参数对并联阻抗的影响。由于突出电极之间存在着一定大小的电容, 会对腔体的性能产生影响, 为使腔体达到最优化的设计, 进行了突出电极对并联阻抗及场平整性的影响的研究, 并给出了突出电极的取值范围。

**关键词:** 重离子加速器; MAFIA; 突出电极; 并联阻抗; 场平整性

**中图分类号:** TL503.2 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102202.0430

重离子同步加速器装置已经被应用到很多领域, 例如核物理研究和重离子癌症治疗。这些装置通常由电子回旋共振(ECR)离子源、直线注入器和主同步加速器构成, 而直线注入器部分由射频四极场(RFQ)加速器和漂移管直线加速器(DTL)组成; 特别地, 在离子源和 RFQ 加速器之间有一段低能束流传输线(LEBT)以供束流传输和发射度匹配。为累积高的流强, 主同步加速器一般采用多圈注入的方式。为了减小低能传输线中束流的空间电荷效应和损失, 日本的 Okamura 等人提出了一个新的注入方案——等离子体直接注入方案(DPIS)<sup>[1]</sup>。在此方案中, 激光离子源(LIS)与 RFQ 加速器之间省掉了低能传输线而直接相连, 从激光离子源中出来的束流直接进入 RFQ 加速器进行预加速和聚束。激光离子源有很高的流强, 能够产生 10~100 mA、脉冲持续时间 1~10 $\mu$ s 的带电粒子束, 这些特点正好满足对同步加速器进行单圈、单脉冲注入的要求<sup>[2]</sup>。

目前, 中国科学院近代物理研究所正在进行等离子体直接注入方案的研究, 以开展紧凑型碳离子治癌装置的研制以及对兰州重离子研究装置冷却储存环(HIRFL-CSR)<sup>[3]</sup>进行强流重离子束注入。将等离子体直接注入方案和交叉手指型漂移管直线加速器(IH-DTL)相接合, 采用单圈单脉冲注入方式, 我们可以建造一个结构紧凑、花费低的碳离子治癌同步加速器。另一方面, 假如使用等离子体直接注入方案加 IH-DTL 作为 HIRFL-CSR 的注入器, 采用多圈注入可以得到更强的束流。此外等离子体直接注入方案最重要的优点是其长期的可靠性、稳定性和重复性, 而这正是我们进行此项研究的主要目的之一。激光离子源在近代物理研究所已经建成出束, RFQ 加速器束流动力学设计也已经完成, 当前正在进行 RFQ 腔体的设计和建造。

## 1 RFQ 加速器主要参数

近代物理研究所 RFQ 加速器的动力学设计由一个新的动力学计算程序——LINACSRfq 完成<sup>[4]</sup>。根据实验目的要求和近代物理研究所现有的设备状况, 要求在 100 MHz 的频率下将 20 mA 的<sup>12</sup>C<sup>6+</sup>束流在 2 m 的长度内从能量 0.36 MeV 加速到 7.12 MeV。为达到设计要求, 采用了 120 kV 的加速电压。经过优化计算, 束流的最小孔径和电极的曲率半径分别为 7.1 mm 和 5.3 mm。电极调制系数从 1.0 增加到 2.1, 同步相位从 -90° 增大至 -20°。束流最终的传输效率达到了 94.8%。

## 2 RFQ 腔体支撑臂设计

由于四杆型 RFQ 腔体在低频率时具有结构简单、性能稳定和易于建造等优点, 近代物理研究所的 RFQ 腔体采用了四杆型结构, 如图 1 所示。图中, 腔体两端突出的长度为  $s$  的那段电极, 称为突出电极。为了确定 RFQ 腔体的结构参数, 得到最大的并联阻抗和平坦的电场分布, 使用电磁场模拟程序 MAFIA<sup>[5]</sup>进行了相关计

\* 收稿日期: 2009-04-03; 修订日期: 2009-10-26

作者简介: 张周礼(1981—), 男, 河南省浚县人, 博士, 从事重离子加速器研究; jolly@impcas.ac.cn.

算。为保证计算精度首先对 MAFIA 计算时使用的网格数进行了优化。由于四杆型 RFQ 腔体具有周期性<sup>[6]</sup>，同时为了使计算结果更接近实际情况，采用了图 1 所示的由 10 个支撑臂组成的结构进行计算。在计算过程中腔体频率 100 MHz 保持不变，支撑臂的宽度 10 cm 固定，支撑臂的高度跟随其它参数的改变而做相应的变化。计算结果表明，当支撑臂厚度  $t$  为 3 cm、突出电极长度  $s$  为 1 cm、支撑臂间距  $d$  为 16 cm 时，并联阻抗取得最大值，如图 2 所示。

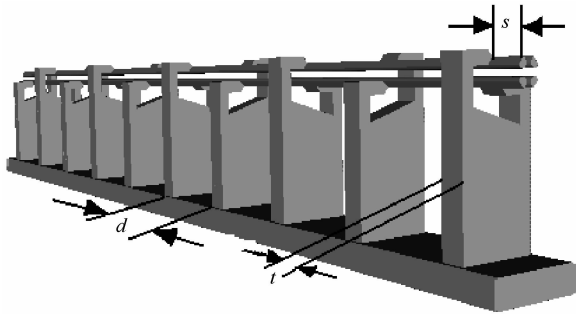


Fig. 1 4-rod RFQ structure with 10 stems  
图 1 10 个支撑臂长度的四杆型 RFQ 结构

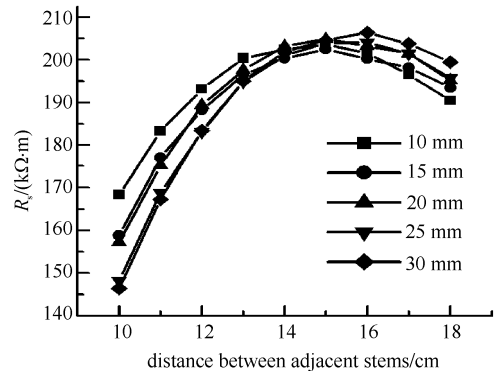


Fig. 2 Shunt impedance as a function of distance between adjacent stems and stem thickness

图 2 不同支撑臂间距和厚度下的并联阻抗

当腔体总长度  $L$  确定时，各结构参数有如下关系

$$L = (n - 1)d + t + 2s \quad (1)$$

式中： $n$  为支撑臂的数目。突出电极间分布着一定大小的电容，会对腔体的性能如并联阻抗和场平整性等产生影响，而且电容的大小取决于突出电极的长短。在进行优化设计时，根据式(1)中各参数的关系，突出电极尺寸的改变将直接导致支撑臂间距和厚度的变化。因此，在支撑臂厚度和间距使并联阻抗取得最大值时，研究了突出电极对并联阻抗和场平整性的影响。

### 3 突出电极对并联阻抗的影响

表 2 列出了在不同长度的突出电极时腔体的并联阻抗的大小。从表 2 中可以看出，并联阻抗的大小随突出电极长度的变化呈非线性变化。当突出电极长度从小到大变化时，腔体的总电容先从小到大，然后又从大到小发生变化，因此，存在一个最佳的突出电极的长度( $s=20$  mm)，使并联阻抗达到最大。

表 2 不同长度突出电极时的并联阻抗

Table 2 Shunt impedance at different electrode projecting lengths

$s/\text{mm}$	$R_s/(\text{k}\Omega \cdot \text{m})$
0	209.357
10	212.545
20	212.568
30	211.306
40	209.364

### 4 突出电极对场平整性的影响

图 3 示出了采用不同长度的突出电极时电场的平整性。电极突出长度不同，腔体总长度也略有差异，为了方便比较，所有长度的腔体都选取了同样的点数(21 个)进行电压取样，图中横坐标为腔体的归一化取点位置。图 3 显示，电极上电场的平整性随突出电极长度的改变而改变，并且在一定突出电极长度( $s=10$  mm)时，电场达到最平整。

### 5 结论

计算结果表明，在电极形状和腔体频率一定以及支撑臂的厚度、宽度和间距不变的情况下，不同长度的突出电极可以分别使腔体的并联阻抗和场平整性达到最优化。但是，计算结果同时也表明，在 0~40 mm 时突出电极长度的变化对并联阻抗的影响并不大。根据束流的能散度和传输效率的要求，电极间电压最大值和最小值间的振荡幅度不能超过平均值的 2%<sup>[7]</sup>，从这个角度讲，突出电极的长度最好在 0~20 mm。

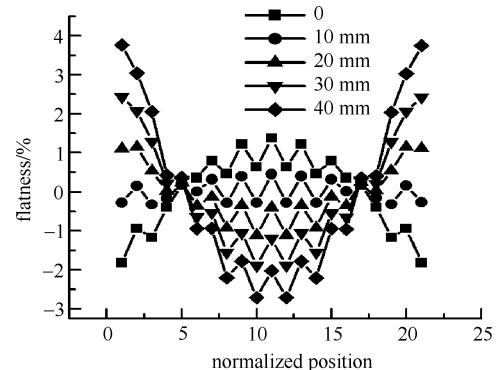


Fig. 3 Flatness at different electrode projecting lengths

图 3 不同长度的突出电极时电场的平整性

因此,在腔体频率和总长度一定的情况下,确定腔体的支撑臂厚度和间距必须兼顾突出电极的长度对整个腔体的性能的影响,这是一个比较复杂的设计过程。但是,从计算结果也可以看出,在不影响并联阻抗的条件下,我们可以仅改变突出电极长度而使四杆型 RFQ 取得平坦的电场分布。

### 参考文献:

- [1] Okamura M, Takeuchi T, Jameson R A, et al. Direct plasma injection scheme in accelerators[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, **79**(2):3141-3145.
- [2] Kondrashev S, Balabaev A, Konukov K, et al. New developments of a laser ion source for ion synchrotrons[C]//Proc of EPAC 2004. 2004: 1402-1404.
- [3] 夏佳文,詹文龙,魏宝文,等. 兰州重离子加速器冷却储存环[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(11):1787-1794. (Xia Jiawen, Zhan Wenlong, Wei Baowen, et al. Heavy ion cooler-storage-ring synchrotron in Lanzhou. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(11):1787-1794)
- [4] Zhang Zhouli, Jameson R A, Zhao Hongwei, et al. Beam dynamics design of an RFQ for a planned accelerator, which uses a direct plasma injection scheme[J]. *Nucl Instrum Meth A*, 2008, **592**(3):197-200.
- [5] 李智慧,郑启文,高宜海,等. SSC 高频腔数值模拟及分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, **29**(1):103-106. (Li Zhihui, Zheng Qiwen, Gao Yihai, et al. Numerical simulation and analysis of SSC RF cavity. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **29**(1):103-106)
- [6] 朱昆,郭之虞,方家驹,等. 四杆型 RFQ 加速腔高频特性的数值模拟与实验研究[J]. 高能物理与核物理, 2005, **29**(5):512-516. (Zhu Kun, Guo Zhiyu, Fang Jiaxun, et al. Simulation and experimental studies on a 4 rod RFQ RF property. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2005, **29**(5):512-516)
- [7] Pasini M, Kester O, Habs D, et al. RF design of the MAFF IH-RFQ[C]//Proc of EPAC 2004. 2004:1216-1218.

## Influence of projecting electrodes on shunt impedance and flatness of 4-rod radiofrequency quadrupole cavity

Zhang Zhouli<sup>1,2</sup>, Zhao Hongwei<sup>1</sup>, R. A. Jameson<sup>3</sup>, Xu Zhe<sup>1</sup>, Zhang Shenghu<sup>1</sup>

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 31, Lanzhou 730000, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Institute of Applied Physics, Goethe University Max-von-Laue-Str. 1, D60438, Frankfurt-am-Main, Germany)*

**Abstract:** Due to its advantages at low frequency, a 4-rod radiofrequency quadrupole(RFQ) structure has been adopted for the RFQ cavity at the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, which works at 100 MHz and is used for the direct plasma injection scheme. After the beam dynamics design, the parameters of the stems of the cavity were optimized to obtain the maximum shunt impedance. The capacitance existing in the projecting electrodes will affect the properties of the cavity, therefore, the influence of the projecting electrodes should be taken into account. Their influence on shunt impedance and flatness of the 4-rod RFQ cavity was studied, and the results show that the influence on shunt impedance can be neglected but it can not be neglected on flatness. In addition, the length range of the electrodes was presented for good flatness.

**Key words:** heavy ion accelerator; MAFIA; projecting electrodes; shunt impedance; flatness