

# 四杆型 RFQ 加速腔高频特性的 数值模拟与实验研究

朱昆 郭之虞 方家驹 高淑丽 宋翔翔

(北京大学重离子研究所重离子物理教育部重点实验室 北京 100871)

**摘要** 为设计一个高负载因子、高流强的 RFQ 加速器,使用三维电磁场计算程序 MAFIA 对加速腔的高频特性进行了模拟计算.本文主要研究 RFQ 支撑板高度、宽度、间距、电极形状等结构参数对高频腔体高频特性的影响,根据 RFQ 加速器的比分路阻抗以及电磁场分布的要求,对 RFQ 的结构参数进行优化设计,然后根据模拟计算结果加工冷模,进行冷模测量并将测量结果与计算结果加以比较.

**关键词** RFQ 加速器 比分路阻抗 二极场分量 冷模测量

## 1 引言

低能强流加速器是目前国际上加速器发展的主流方向之一,RFQ 加速器是低能强流离子直线加速器的首选机型,在强流离子注入、加速器驱动洁净核能系统、肿瘤治疗和强中子发生器等方面有着重要的应用前景.为了研制一个强中子发生器,北京大学重离子所对一台高负载因子、高流强的用于加速氦的 RFQ 加速器进行了预研工作.RFQ 加速器分为四杆型和四翼型两种<sup>[1]</sup>,四杆型的适宜工作频率在 20—200MHz,四翼型的适宜工作频率在 200—425MHz.四杆型的加速器具有结构简单,易于加工安装,成本较低,场型便于调节的优点,而四翼型的加速器场的对称性较好,但是加工安装难,场型的调节比较复杂.根据我们的实际情况,选择四杆型加速器.设计的 RFQ 加速器的技术指标为:工作频率为 200MHz,将 D<sup>+</sup> 加速到 2MeV,传输效率应大于 95%,负载因子为 10%,射频发射机的峰值功率为 400kW.为了降低设计成本,减少制造冷模的数量,使用三维电磁场模拟程序 MAFIA 对四杆型加速器的结构进行了优化设计,并根据设计结果加工了冷模,通过冷模的测量结果对 MAFIA 计算结果加以验

证.本文主要介绍使用 MAFIA<sup>[2]</sup>对 RFQ 腔体的电磁场优化设计以及冷模测量的结果.

## 2 RFQ 腔体的结构设计及优化

根据 RFQ 动力学的设计,电极头部半径为 2.7mm,电极间孔径大小为 3.6mm,极间电压是 80kV,RFQ 加速器的长度为 2.71m.在此基础上对 RFQ 腔体结构进行优化,有 4 个方面的目标:(1)使腔体的谐振频率达到设计的工作频率的要求.(2)尽量提高比分路阻抗.(3)尽可能减小 RFQ 腔体结构产生的四极场中二极场分量.(4)调节四极场的平整度.整个 RFQ 加速腔在高频特性上可以看作一系列有耦合的 LC 振荡回路单元链<sup>[3]</sup>,其中的每一个 LC 回路对应于一个谐振单元,一个谐振单元是由两个相邻的支撑板和两对电极组成的.图 1 给出了 RFQ 高频腔的基本结构,其中黑框选中的部分是一个谐振单元,腔的两端侧面标出了垫补部分,用来调节四极场的平整度.RFQ 加速器的工作频率主要由谐振单元的谐振频率和谐振单元的数目决定的.在谐振单元结构不变的情况下,随着谐振单元数目的增加,RFQ 加速腔的工作频率也增加,但是工作频率的增

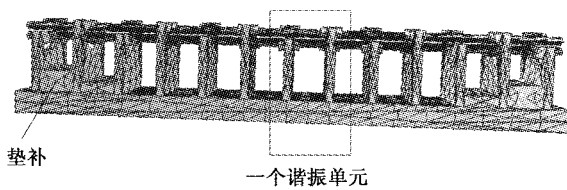


图 1 RFQ 加速腔结构示意图

长幅度不断的减小.虽然 RFQ 加速腔的谐振频率随着谐振单元的数目增加而增加,但是谐振单元是 RFQ 的基本结构单元,它的高频特性可以反映整个 RFQ 的高频特性,因此可以通过对少数目的谐振单元的研究来了解整个 RFQ 加速腔的高频特性. RFQ 腔体的比开路阻抗是 RFQ 加速腔的一个重要参数,定义是<sup>[4]</sup>

$$R_s = \frac{V_p^2}{2P/l} \quad (1)$$

其中  $V_p$  是极间峰值电压,  $P$  是功率损耗,  $l$  是 RFQ 加速腔的长度.它用来衡量高频腔体所需的高频功率.拟使用的高频机的峰值功率为 400kW,由于高频机峰值功率的限制,要求比开路阻抗尽可能的大,以使高频机的功率能够满足 RFQ 加速器的功率要求.因此加速器的比开路阻抗应该大于 43.36  $k\Omega \cdot m$ .影响比开路阻抗的因素有很多种,其中最主要的是电极形状,支撑板宽度,支撑板高度,支撑板中心距,腔体外壳尺寸.二极场分量可以影响束流的传输品质,降低传输效率.影响二极场分量的因素主要有支撑板斜角的角度和支撑板臂的宽度.由于末端效应的影响,RFQ 加速腔产生的四极场沿轴向是不平整的,这会导致束流传输品质变坏,降低传输效率,必须通过调节两端的谐振单元的谐振频率来使四极场平整.因为优化时有多个参量,这些参量之间存在相互影响,所以优化过程中需要反复的迭代计算.经过一系列的计算,找出了一个最优结果,最后确定的基本参数在表 1 中列出.

表 1 RFQ 腔基本参数的模拟计算优化值

参数	单位	数值
支撑板间距	mm	75
支撑板宽度	mm	100
支撑板高度	mm	110
腔体半径	mm	150
支撑板厚度	mm	15
工作频率	MHz	200.9
比开路阻抗	$k\Omega \cdot m$	52.52
Q 值		3897

## 2.1 MAFIA 程序建模

四杆型 RFQ 腔体结构是一个非对称的三维结构,只能用三维电磁场计算程序进行模拟计算. MAFIA 程序是一种比较完善的电磁场计算程序,采用它对四杆型 RFQ 加速器高频特性进行模拟计算.因为 RFQ 电极几何形状的微小改变都会对 RFQ 腔体的高频特性产生显著的影响,并且 MAFIA 程序计算所采用的网格是阶梯型的网格,所以电极附近的网格需要划分的很密,才能比较精确的模拟出电极的几何边界,得出精度较高的计算结果.在支撑板部分和腔体的真空部分,几何形状的微小改变不会对 RFQ 高频特性产生显著的影响,网格可以划分的比较稀疏而不影响计算精度.为此,在使用 MAFIA 进行模拟计算时,为了确保计算的精度并同时提高运算速度,采用了手动划分网格的方法,在电极附近网格划分的比较密,在其他部分,则划分得比较稀疏.

## 2.2 电极形状的确定

在电极间孔径和电极头半径确定了的情况下,极间电容的大小主要是由电极形状决定的,极间电容减小有利于提高 RFQ 加速器的工作频率和比开路阻抗.在确定 RFQ 加速器电极形状时,主要问题就是提高 RFQ 加速腔的频率以达到所设计的工作频率,同时尽可能提高 RFQ 加速腔的比开路阻抗,为此要尽量减小极间电容.由于所设计的 RFQ 加速器是高功率高负载因子的加速器,设计电极时必须考虑电极的水冷问题,预留出水冷管的位置.因为当 RFQ 加速器的谐振单元大于 9 个以后,随着谐振单元数目的增加,工作频率的增长已经比较缓慢.为了节省计算时间,在 9 个谐振单元、固定了支撑板形状的情况下,进行了设计计算.计算时选择支撑板间距 75mm,宽 100mm,高 110mm.最后确定了一个能够满足工作频率和分路阻抗要求的电极(见图 2).计算结果在表 2 中给出.在后面的计算中都使用这种电极.

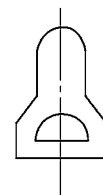


图 2 电极示意

表 2 电极计算结果

	工作频率/MHz	比分路阻抗/ $k\Omega \cdot m$
电极	190.2	48.777

### 2.3 支撑板间距的影响

支撑板的间距是 RFQ 加速器的一个重要参数, 增加支撑板间距相当于增加 LC 回路的电感, 会降低 RFQ 高频腔的工作频率, 增加比分路阻抗, 为此, 需要求出一个优化的支撑板中心距. 为了提高计算速度, 在两个谐振单元的情况下对 RFQ 加速腔进行了优化计算. 选择支撑板宽 100mm, 高 110mm, 支撑板形状不变, 只改变支撑板的中心距, 计算它的工作频率和比分路阻抗. 得到的结果在表 3 中给出, 比分路阻抗和工作频率两者基本上是随支撑板中心距呈线性变化的. 从提高分路阻抗的角度出发, 希望板中心距比较大, 但是为了使 RFQ 加速器的工作频率达到 200MHz, 板中心距又不能过大, 综合考虑, 最后选择支撑板中心距为 75mm.

表 3 支撑板中心距的影响

支撑板中心距/mm	工作频率/MHz	比分路阻抗/ $k\Omega \cdot m$
70	174.3	54.80
75	164.4	60.40
80	155.6	65.93
85	147.8	71.38
90	140.8	76.74

### 2.4 支撑板宽度的影响

支撑板的宽度对 RFQ 加速器的工作频率和比分路阻抗都有影响, 增加宽度相当于减小 LC 回路中的电感, 能提高工作频率, 但会使比分路阻抗降低. 为了提高比分路阻抗, 支撑板宽度越窄越好, 但是为了防止 RFQ 打火, 需要给 RFQ 电极和支撑板之间留出足够的空间, 同时支撑板的两臂需要足够的宽度以保证两臂的强度. 为了提高计算速度, 在 2 个谐振单元的情况下研究了宽度变化对工作频率和比分路阻抗的影响. 固定支撑板的形状, 选择支撑板的高度 110mm, 支撑板间距 75mm, 计算了宽度从 90—120mm 之间的变化, 得到的结果在表 4 中给出. 综合考虑各种因素, 宽度最后确定为 100mm.

表 4 支撑板宽度的影响

支撑板宽度/mm	工作频率/MHz	比分路阻抗/ $k\Omega \cdot m$
90	161	62.815
100	164.4	60.402
110	167.5	58.415
120	170.4	56.76

### 2.5 支撑板高度的影响

增加支撑板的高度相当于增加了 LC 回路的电感, 会提高 RFQ 加速器的比分路阻抗, 但会降低它的工作频率. 在 2 个谐振单元的情况下研究了 RFQ 加速器的工作频率和比分路阻抗随支撑板高度变化的规律, 在支撑板中心距 75mm, 支撑板宽度 50mm 的情况下, 计算了高度从 90—120mm 之间的变化. 得到的结果在表 5 中给出. 为了使设计的 RFQ 加速器的工作频率达到设计要求, 最后确定支撑板高度为 110mm.

表 5 支撑板高度的影响

支撑板高度/mm	工作频率/MHz	比分路阻抗/ $k\Omega \cdot m$
90	178.6	53.55
100	171.0	56.88
110	164.4	60.40
120	158.5	63.44

### 2.6 减小二极场分量做的优化

由于四杆型 RFQ 的几何结构不对称, 导致了产生的四极场中存在二极场分量, 从而使 RFQ 加速器的束流品质降低, 为此希望四极场形状的不对称尽可能的小. 通过改变支撑板的斜角<sup>[5]</sup>和支撑板两臂的宽度来调节四极场的不对称(见图 3), 经过调节后上下电极之间的电压差从 14% 降到 7%.

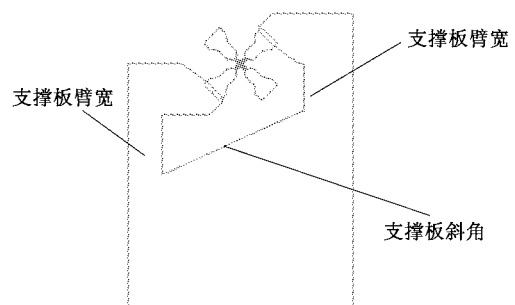


图 3 支撑板形状示意图

### 2.7 腔体外壳的影响

如果选择一个足够大的腔体外壳,那么 RFQ 腔芯和腔壳之间的电容非常小,腔体外壳上的腔壁电流和功率损耗就会相应的减小.表 6 给出了品质因数和比分路阻抗随着腔体外壳半径变化的数据,从表中显示腔体外壳半径增大到 140mm 或更大的时候,腔体半径的变化对比分路阻抗和品质因数的影响比较小,是比较合适的值.最终选择腔体外壳半径为 150mm.

表 6 腔体外壳半径的影响

腔体半径/mm	比分路阻抗/ $k\Omega \cdot m$	品质因数
120	53.4	3763
130	56.8	3933
140	58.3	4009
150	59.2	4053
160	59.8	4086

### 2.8 四极场平整度的调节

由于末端效应的影响,四极场沿纵向的分布是一个两端高中间低的形状,这样对束流传输效率和束流传输品质都有较大的影响,因此必须调整四极场的平整度.通常是通过改变两端谐振单元的支撑板高度(垫补)和支撑板间距等方法改变两端谐振单元的谐振频率,以达到使四极场平整的目的.根据我们设计的 RFQ 加速腔,对两端所需的垫补做了计算.图 4 给出了第一象限中垫补前和垫补后四极场沿纵向的分布,其他几个象限的情况和第一象限情况类似.

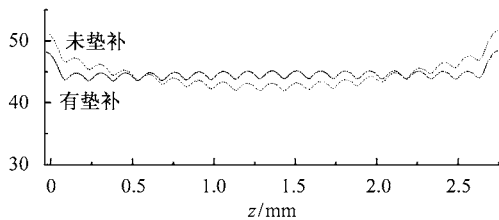


图 4 垫补前与垫补后电场沿 z 轴的分布

## 3 冷模测量

使用 MAFIA 程序进行 RFQ 高频结构的设计在北京大学重离子所尚是首次,模拟计算 RFQ 加速腔

高频结构的经验不足.需要建造冷模并对其进行测量,将测量结果和模拟计算结果相比较,以掌握使用 MAFIA 进行 RFQ 高频结构设计的经验.以前进行冷模测量时使用矢量伏特计,测量精度不高,现已建立一套通过计算机控制的使用网络分析仪测量的新的冷模测量系统,以提高测量精度.为此利用已有腔体,加工了全长 1725mm 的冷模模型,利用小球微扰法对冷模的谐振频率和场分布进行了测量<sup>[6]</sup>.

### 3.1 测量装置简介

测量装置由 RFQ 加速腔,网络分析仪,控制计算机和小球走线装置组成的.利用网络分析仪测量腔体的谐振频率以及 RFQ 腔体中的电场分布,控制计算机使用 GPIB 卡和网络分析仪进行通讯,用于从网络分析仪中读取数据,同时通过控制步进电机来控制小球的移动.

### 3.2 测量结果

在支撑板中心距为 75mm 的情况下,分别测量了支撑板高 140mm、支撑板高 110mm 以及支撑板高 110mm 有垫补 3 种情况下 RFQ 的谐振频率和品质因数.结果在表 7 中给出.可以看出使用 MAFIA 程序计算的谐振频率和冷模实验测量出的谐振频率吻合较好.冷模测量出的品质因数只有 MAFIA 计算出的品质因数的一半左右,主要有两点原因导致品质因数下降,(1)MAFIA 计算时使用的材料是铜,冷模加工时使用的材料是铝合金,铝合金的电阻率比铜大.(2)MAFIA 计算时认为支撑板与电极、支撑板与基座之间紧密接触,各部件之间没有接触电阻,冷模安装时使用螺钉联接,各部件之间存在接触电阻.

表 7 测量结果和计算结果的比较

支撑板高度/mm	140	110	110(垫补)
测得的谐振频率/MHz	171.8	183.25	190.139
计算的谐振频率/MHz	170.05	182.9	190.226
测得的品质因数	1600	1400	1550
计算的品质因数	3550	3388	3748

测量 RFQ 高频腔体内的场分布是 RFQ 冷模测量的一个重要内容,使用小球微扰法对 RFQ 冷模的场分布进行了测量.测量了支撑板间距为 75mm、支撑板高度为 110mm、有垫补情况下 RFQ 冷模的电场分布.测量结果与模拟计算结果基本吻合.

## 4 结论

为了设计一台四杆型 RFQ 加速腔,我们使用 MAFIA 程序对它进行了模拟计算及优化,并且根据优化结果设计了冷模来对四杆型 RFQ 加速腔加以分析.通过 MAFIA 模拟计算确定了以下几个参数:支撑板的中心距、支撑板的宽度、支撑板的高度、支撑板斜角、支撑板的臂宽以及腔体的半径.通过对 RFQ 腔体的冷模测量检验了使用 MAFIA 程序计算 RFQ 加速腔的高频特性的计算结果的可靠性,从冷

模测量结果和 MAFIA 计算结果的比较中看出,MAFIA 计算出的谐振频率和冷模测量出的谐振频率吻合的很好.场分布也基本吻合.通过 MAFIA 程序的模拟计算和冷模的实际测量,确定了 RFQ 加速腔的基本结构参数,并将根据这些基本参数进行 RFQ 加速腔的建造.

作者感谢郭菊芳教授、李纬国教授和于茂林高级技师在 RFQ 腔的结构、冷模及其测量中给予的帮助和有益的讨论.

## 参考文献 (References)

- 1 Letchford A, Schempp A. A Comparison of 4-Rod and 4-Vane RFQ Fields. Proc. of EPAC 1998. 1204
- 2 Vormann H, Schempp A, Wunsch E et al. RF Tuning of The ISIS-RFQ. Proc. of EPAC 2000. 869
- 3 FANG J X, Schempp A. Equivalent Circuit of a 4-Rod RFQ. Proc. of EPAC 2002. 1331
- 4 Bricault P G. Simulation of the Triumf Split-Ring 4-ROD RFQ with Mafia. Proc. of PAC 95. 1125
- 5 Bechtold A. Design Studies of an RFQ-injector of Medicine-Synchrotron. Proc. of PAC 2001. 2485
- 6 LUO Zi-Hua, ZHOU Li-Nong, DING Yi et al. Calculation of BPL 4-Rod RFQ Cavity and Field Measurement and Tune of Cold Model The 2nd Accelerator Technology Conference. 1998. 324 (in Chinese) (罗紫华,周立农,丁义等. BPL 四杆型 RFQ 结构计算及模型装置场分布测量与调整.第二届全国加速器技术学术交流会论文集. 1998. 324)

## Simulation and Experimental Studies on a 4 Rod RFQ RF Property

ZHU Kun GUO Zhi-Yu FANG Jia-Xun GAO Shu-Li SONG Xiang-Xiang

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** A 4-Rod RFQ cavity was simulated with MAFIA code for the design of a high current, high duty factor RFQ accelerator. The influence of distance, wide, height and shape of stems on the cavity's RF property were studied. The structure parameters of the RFQ cavity were optimized by the requirements of the shunt impedance and the electromagnetic field distribution in the RFQ accelerator. Based on the simulation result, a cold cavity model was built, measured and the result was compared with the simulation.

**Key words** RFQ accelerator, specific shunt impedance, dipole components, cold model measurement