

文章编号: 1007-4627(2013)02-0147-04

RFQ 结构参数 ρ/R 对电极最大表面电场及极间电场的影响

侯尧^{1,2}, 原有进¹, 杨建成¹, 张小虎^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于 CST 微波工程软件对四杆型 RFQ 的模拟运算, 分析了在不同情况下不同的 RFQ 结构参数 ρ/R 与电极最大表面电场 E_{\max} 之间的关系, 发现对应于不同 RFQ 孔径下的最小的 E_{\max} , 其结构参数 ρ/R 的值是不同的。同时发现改变 ρ/R , RFQ 极间电场线性度始终保持在 99.5% 以上, 但 ρ/R 变大会小幅提升极间电场线性度。

关键词: RFQ; ρ/R ; 最大表面电场; 极间电场线性度

中图分类号: TL593 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.02.147

1 引言

RFQ 是一种广泛应用于各种粒子加速器中的高频高压设备^[1-2], 它利用 4 个调制电极来产生调频电场以实现对带电粒子的聚焦、聚束以及加速, 可通常用作各种加速器的注入器或预注入器^[3-5]。RFQ 设计的结构参数中, RFQ 的电极曲率半径与 RFQ 腔体的物理孔径的比值 ρ/R 是一个很重要的参数, 它影响着电极的 E_{\max} 和极间电场的线性度, 而 E_{\max} 又影响着束流的能量、高频馈入和设备造价等方面^[6], 目前国际上和国内在设计 RFQ 时通常采用 $\rho/R \sim 0.75$ ^[7] 的取值范围。本文通过利用 CST 软件进行 RFQ 的建模和模拟运算, 分析各孔径 R 下 E_{\max} ^[8] 和极间电场的线性度, 同时着重于分析 ρ/R 对 RFQ 上述各属性的影响。

2 模型参数

为了提高 CST 的运行效率, 本文中使用的是无匹配段的无电极调制的 RFQ 模型。模型的主要参数如表 1 所列。该 RFQ 模型主体是两个支架支撑的电四极, 支架垫在厚为 30 mm 的底座上, 距离端口 500 mm, 如图 1 和图 2 所示。

其中, 图 1 是腔体内部主要结构图, 图 2 是电极区域的近图, 图 2 中各线条即是为计算电极表面电

场、极间电场的线性度而设定的。

表 1 RFQ 模型的主要参数

名称	参数
R/mm	4.0, 4.5, 5.0, 5.5
ρ/R	0.4~1.3
腔长/mm	1500
内半径/mm	570
支杆高/mm	367
支杆厚/mm	30
支杆宽/mm	220
支杆距离/mm	500
底座厚度/mm	68
模拟网格数	343 332

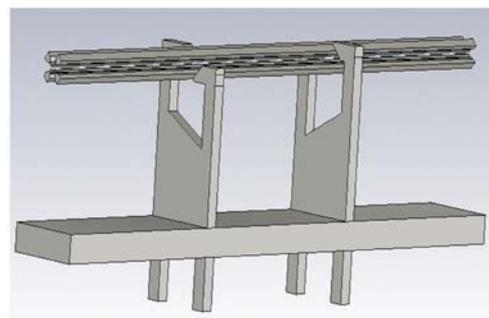


图 1 (在线彩图) RFQ 腔体内部主要结构

收稿日期: 2012-10-08; 修改日期: 2012-11-09

基金项目: 国家自然科学基金委群体科学基金资助项目(10921504)

作者简介: 侯尧(1986-), 男, 湖北荆门人, 硕士研究生, 从事加速器技术与应用研究; E-mail:houyao@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>

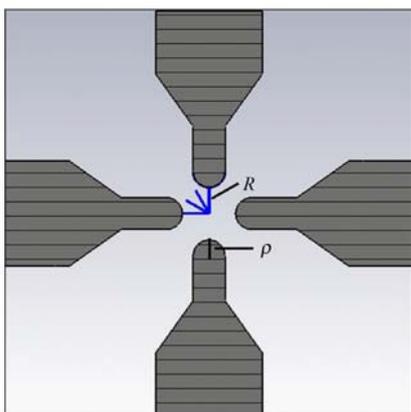


图 2 (在线彩图)RFQ 电极区域近图

为了保证模拟的准确性，对 RFQ 腔体进行了局部网格数加密，全局加密情况和电极区域加密情况如图 3 和图 4 所示。

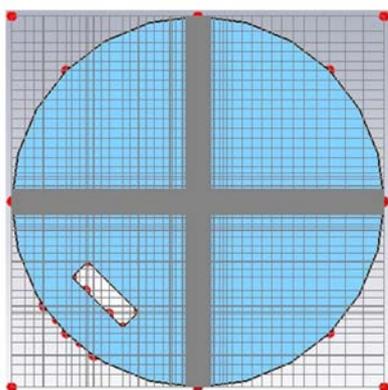


图 3 (在线彩图)全局加密情况

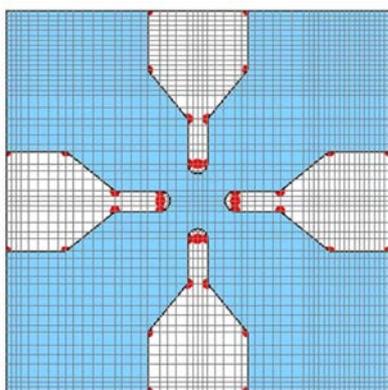


图 4 (在线彩图)电极区域加密情况

经过如图 3 和图 4 所示的 RFQ 模型局部网格加密，将模型的网格数从未加密时的 75 200 增加到了 343 332，从而有效地提高了模拟的准确度。

3 模拟计算

使用 CST 软件对 R 分别取 4, 4.5, 5 和 5.5 mm 的固定值时，改变 ρ 值使 ρ/R 在 0.4~1.3 之间变化，得到在不同的 R 值下随着 ρ/R 的变化，即沿电极的表面电场分布、极间电场分布的情况。

需要指出的是，按照表 1 所列的参数建模，在不同的 ρ/R 情况下，RFQ 的本征频率和极间电压实际是不一样的，这样 RFQ 的性能参数不是单一变量变化。为此需要采取有效的措施使各 ρ/R 条件下腔体的本征频率和极间电压都保持不变。

对于 RFQ 的腔体极间电压，由公式^[9]

$$R_s = \frac{V^2}{2P_0}$$

(式中： R_s 为 RFQ 特性阻抗，只与腔体几何形状有关； V 为电极极间电压的幅值； P_0 为腔体的馈入功率)可以看到，尽管因为改变 ρ/R 会使 RFQ 特性阻抗发生改变，但是通过调整馈入功率 P_0 ，仍然能够使电极极间电压保持不变(这里可将极间电压保持为恒定的 100 kV)。

对于 RFQ 的腔体运行频率，可以通过改变 RFQ 的垫块厚度和支撑杆的间距来实现。在实际的模拟运行中发现，通过改变支撑杆的间距调整腔体本征频率时，电极的最大表面电场 E_{max} 几乎不受影响(对频率变化的影响约是对电极最大表面电场 E_{max} 的影响的 1000 倍以上)。所以在模拟过程中采用统一的(如表 1)建模参数时，可以忽略因不同 ρ/R 情况下本征频率不同带来的影响。

3.1 E_{max} 随 ρ/R 变化的情况

图 5 分别给出了腔体孔径 $R=4, 4.5, 5$ 和 5.5 mm 时 E_{max} 随 ρ/R 变化的散点图及拟合线。其中，实线为全部模拟运算数据的拟合曲线，虚线为删除偏差过大点后的拟合曲线，拟合线均采用六次方程拟合； R^2 为曲线拟合度，值大者为虚线拟合线的拟合度，值小者为实线拟合线的拟合度。

通过图 5 可以看到，删除部分偏差过大的点后拟合曲线的拟合度大大提高，能较好地反映出 $\rho/R-E_{max}$ 的关系。从图 5 的虚线拟合曲线中寻找最小的 E_{max} ，得到各 R 值下 $\rho/R-E_{max}$ 的关系如表 2 所列。

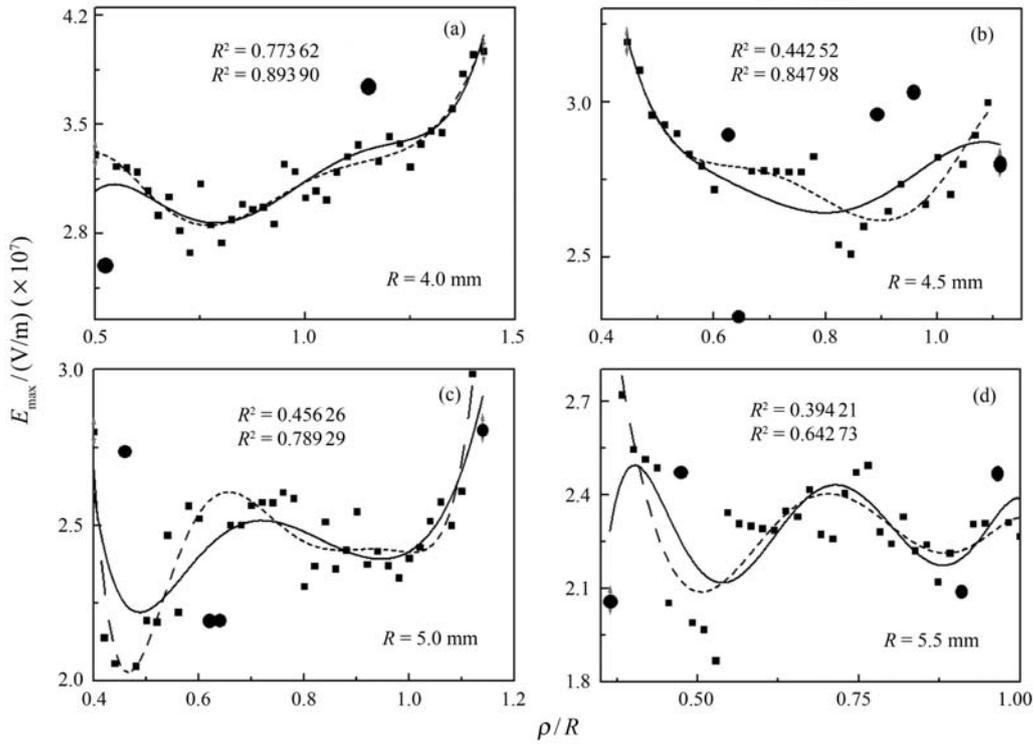


图 5 不同腔体孔径时的 ρ/R - E_{max} 关系图

表 2 ρ/R - E_{max} 的关系

R/mm	E_{max} 极小时 ρ/R 范围	E_{max} 最小值点 ρ/R
4.0	0.70~0.85	0.725
4.5	0.80~0.85	0.825
5.0	0.45~0.50	0.475
5.5	0.475~0.550	0.525

综合上面不同 R 值下的最大表面电场分布特点, 我们发现 E_{max} 与 ρ/R 的关系并不如经验参数那样是在 $\rho/R = 0.75$ 附近时得到最小的 E_{max} 。这一模拟结果表明在设计 RFQ 时, 单纯从取得最小的 E_{max} 的角度看来, 在选取 E_{max} 参数时应该进行更细致精确的模拟分析。但是从本文的模拟结果, 在兼顾到 RFQ 工程时电极的强度和水冷效果时, $\rho/R = 0.75$ 仍然是较好的折中选择。

3.2 极间径向电场线性度随 ρ/R 变化的情况

以 $R = 4 \text{ mm}$ 的模型为例, 当 ρ/R 取值在 $0.65 \sim 0.8$ 之间时, 取 $\theta = 0, \pi/6, \pi/3$ 和 $\pi/2$, 对极间电场沿各 θ 角度的模拟参数采用零截距一次方程拟合, 极间电场的径向线性度可由拟合曲线的拟合度表征, 各参数拟合度如图 6 所示。

从图 6 可以看到, 各拟合曲线的拟合度都非常高,

均在 99.5% 以上。由此看出, 极间电场在径向上基本保持线性增长, 显示出极好的线性度。同时也注意到在 ρ/R 比较大时, RFQ 腔体的极间电场在径向上的线性

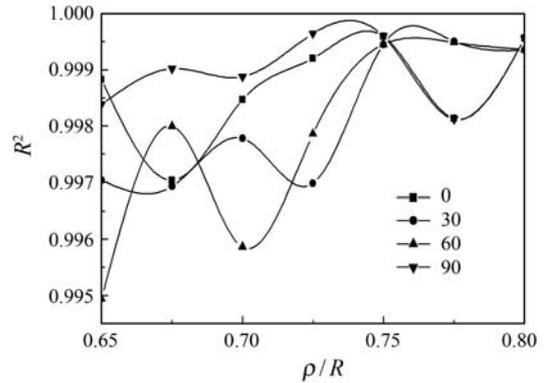


图 6 极间电场线性度的拟合度随 ρ/R 变化图

度整体会比较一些。在研究极间电场线性度时, 发现在 θ 取不同值时, 拟合曲线的斜率并不严格相同, 说明极间电场在角向不能保持严格的线性度。

4 结论

根据以上的分析, 在 RFQ 设计时对于不同的 RFQ 孔径 R , 对应于最小的 E_{max} , 结构参数 ρ/R 的值并不是固定不变的, 这就要求在设计 RFQ 时, 对不同的

孔径 R 需要进行详细的模拟运行和分析。上面的分析表明, 对于不同的结构参数 ρ/R 和同一角度 θ 来说, RFQ 极间电场在径向保持着极高的线性度(拟合度不低于 99.5%), 而对于不同的 θ , 径向电场的电场梯度有着一定程度上的差别。

参考文献(References):

- [1] OSTROUMOV P N, ASEEV V N, KOLOMIETS A A. JINST, 2006, **1**: 04002.
- [2] KAPCHINSKIV I M, TEPLYAKOV V. Priboryi Tekhnika Eksperimenta, 1970, **119**(2): 19.
- [3] FU Shinian, GUAN Xialing. Atomic Energy Science and Technology, 2009, **43**(Suppl. 1): 159.
- [4] ZHANG Zhouli, JAMESON R A, ZHAO Hongwei, *et al.* Chinese Physics C, 2010, **34**(3): 398.
- [5] YANG Guojun, ZHANG Zhuo, HE Xiaozhong. High Power Laser and Particle Beams, 2007, **19**(9): 1533.
- [6] CHEN Jia'er, FANG Guoxun. Progress in Natural Science, 2001, **11**(11): 1121.(in Chinese)
(陈佳洱, 方家驹. 自然科学进展, 2001, **11**(11): 1121.)
- [7] CRANDALL K R, WANGLER T P, YOUNG L M. LANL Report, 2000.1.8, LA-UR-96-1836.
- [8] SWENSON D R, DEGENKOLB E, INSEPOV Z, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2005, **241**(1/4): 641.
- [9] ZHAO Jijiu, YING Zhaosheng. Particle Accelerator Technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 197.(in Chinese)
(赵籍九, 尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 197.)

Effect of RFQ's Structure Parameter ρ/R on Maximum Electric Field and Inter-electrode Field of RFQ

HOU Yao^{1, 2, 1)}, YUAN Youjin¹, YANG Jiancheng¹, ZHANG Xiaohu^{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: Based on the simulation on 4-rods RFQ by the CST MWS software, we analyzed the relationship between the RFQ's structure parameter ρ/R and the maximum electrode field E_{\max} , and found that as the aperture R varies, the value of ρ/R corresponding to the minimum E_{\max} does not necessarily keep constant. We also found that the RFQ inter-electrode field linearity maintains over 99.5% as ρ/R varies, although it slightly increases as ρ/R increases.

Key words: RFQ; ρ/R ; maximum electrode field; inter-electrode field linearity

Received date: 8 Oct. 2012; Revised date: 9 Nov. 2012

Foundation item: Science Fund for Innovative Research Group of National Natural Science Foundation of China(10921504)

1) E-mail: houyao@impcas.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>