

文章编号: 1007-4627(2013)04-0420-05

## 四杆与四翼型 RFQ 内的二极场研究

杜小楠<sup>1,2</sup>, 何源<sup>1</sup>, 石爱民<sup>1</sup>, 孙列鹏<sup>1,2</sup>, 张周礼<sup>1,2</sup>, 潘刚<sup>1,2</sup>, 施龙波<sup>1,2</sup>

(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:** RFQ(射频四极透镜)是直线加速器中最重要的前级聚焦加速结构,其工作模式下束流孔中的电场四极对称性是保证束流品质及加速效率的关键。为了解决其各自存在的工作模式下四极场的不对称问题,分别对四杆型 RFQ 和四翼型 RFQ 的结构和模式谐振特性做了研究。针对四翼型 RFQ,模拟显示双端口对称耦合的方式从抵消二极模式和提高结构对称性两方面来达到削弱工作模式下的场分布中二极量的目的,对一个 1 m 段四翼 RFQ 模型腔的测量证实了双端口对称耦合抵消腔内二极模式的有效性;针对四杆型 RFQ 的二极场,以 SSC-Linac 项目的 RFQ 为原型,利用三维模拟计算软件 CST-MWS 进行模拟,通过改进支撑板的结构并调整参数,完全地消除了工作模式下的极间二极场,且理论上此种改进方法对支撑板结构的四杆型 RFQ 均有效。

**关键词:** 直线加速器; 四杆型 RFQ; 四翼型 RFQ; 二极模; 有限元模拟

**中图分类号:** O572.21+1      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.04.420

### 1 引言

射频四极镜(Radio Frequency Quadrupole, 简称 RFQ)是广泛用于粒子前级加速的直线加速谐振腔,其兼顾了束团的纵向、横向聚焦以及纵向加速<sup>[1]</sup>。根据高频结构的不同,RFQ 可分为四翼型 RFQ 和四杆型 RFQ。四翼型 RFQ 能够提供较小的束流孔及极头尺寸,且结构紧凑;四杆型 RFQ 加工难度小,但是两种结构都存在二极场的问题。四翼型 RFQ 因为其谐振模式复杂,在遇到加工及安装误差及耦合环的非对称微扰时,就会破坏工作模式下的四极对称场分布,产生不对称及不平整性;四杆型 RFQ 的电感部分为非轴对称结构,因此造成上部极头电压大于下部极头电压,也相当于在四极对称谐振场的基础上叠加了一个特定相位的横向二极谐振场。二极场的存在破坏了束流的聚焦稳定性,是实际 RFQ 腔体束流损失大于设计值的主要诱因。因此必须采取一定的手段来减小二极场的比例,使其分量小于或等于 2%。本文利用三维有限元模拟软件 CST-MWS<sup>[2]</sup>,结合理论分析与实际测

量,分别给出了针对两种腔型二极模式分量的优化方案。

### 2 四翼型 RFQ 二极模式及二极场

四翼型结构的横截面等效电路如图 1 所示。通过对此传输线模型等效电路的分析<sup>[3]</sup>,可以得出在安装误差及其他非对称微扰的情况下,RFQ 四极模式场分布的表达式为

$$\Delta\bar{U} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega_0}{\omega_0 - \omega_{qn}} \bar{b}_{qn} \phi_{qn} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega_0}{\omega_0 - \omega_{dn}} \bar{b}_{dn} \phi_{dn}, \quad (1)$$

其中:  $\bar{U} = [u_1, u_2, u_3, u_4]$  是 4 个象限的极间电压;  $\omega_0$  是工作模式的谐振频率;  $\omega_{dn}$  是所有的二极模式频率;  $\omega_{qn}$  是所有的四极频率;  $\phi_{qn}$  和  $\phi_{dn}$  是其他四极模式及二极模式的极间电压分布;  $\bar{b}_{qn}$  和  $\bar{b}_{dn}$  为通过微扰分析得出的系数,大小与等效电路中的电感矩阵  $\bar{L}$  及其微扰  $\delta\bar{L}$ 、电容矩阵  $\bar{C}$  及其微扰  $\delta\bar{C}$  相关。由于通常距离工作模式频率最近的模式为  $d_0$  和  $d_1$ ,在微扰作用下,二极模式成为破坏四极模式的主要因素。

收稿日期: 2013-01-20; 修改日期: 2013-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11079001)

作者简介: 杜小楠(1982-),男,甘肃靖远人,助理工程师,博士研究生,从事加速器技术及应用研究; E-mail: duxn@impcas.ac.cn.

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

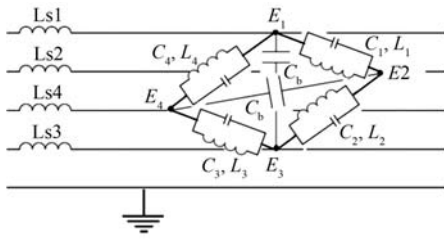


图 1 四翼 RFQ 传输线模型的等效电路图

为了减弱二极场的副作用，传统的做法是改变 RFQ 的部分结构，例如在腔体上插入  $\pi$  模稳定杆，在端部插入二极模稳定杆，其作用和原理是改变相对极头间的电容或者电感，从而改变  $\omega_{dn}$ ，

使  $\omega_0/(\omega_0 - \omega_{dn})$  减小至可以忽略<sup>[4]</sup>。但是这种改变结构引发的问题会增加腔体的复杂度及功耗、增加有限元模拟设计时的频率误差。通过对工作模式和二极模进行深入分析，期望找到一种更好的方式来解决工作模式下混杂的二极模式场分量。

图 2 显示了四翼型 RFQ 中的四极模式和二极模式具有完全不同的电场分布形式和磁场分布形式。磁场垂直于横切面，四极模式下相对象限的磁场方向相同，二极模式下相对象限的磁场方向相反；电场方向平行于横切面，四极模式下相对象限电场方向相反，二极模式下相对象限电场方向相同。

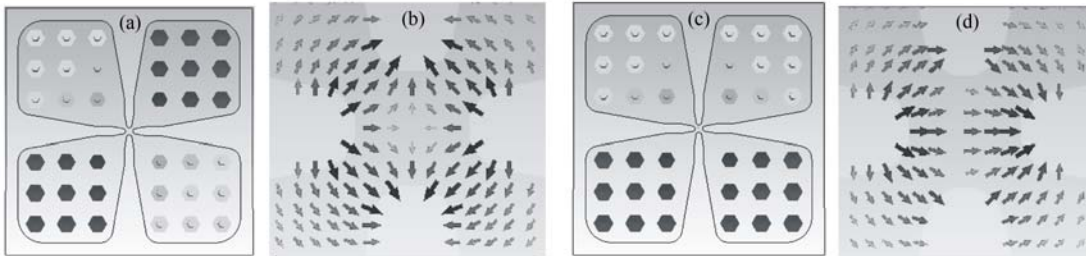


图 2 四翼型 RFQ 截面中四极模式和二极模式的磁场和电场分布

(a) 截面上四极模式的法向磁场分布，(b) 截面上四极模式的切向电场分布，(c) 截面上二极模式的法向磁场分布，(d) 截面上四极模式的切向电场分布。

由磁场的象限分布性质，研究了对称耦合的方式对二极模式的抵消作用。将两个相同的耦合环旋转对称地置入腔体的第一象限和第三象限进行耦合，两个耦合口馈入等相位、等幅值的高频功率(或信号)，则两个耦合器所激励的四极模式因相位相同会叠加，但因为两个耦合环各自在 RFQ 腔体内激发出相位完全相反的二极模式，所以这两个二极模式会互相抵消。CST-MWS 的时域模拟和模型腔的实际测量均验证了此方法可以有效地完全抵消二极模式，图 3 给出了模

拟单耦合以及双耦合的 S11 参数结果对比。

图 3 中 S11 为只有一个耦合端口及耦合环的情况下从此端口提取到的信号。虽然没有达到匹配，但可以明显看出有 0.15 和 0.159 GHz 两个谐振模式存在，且本征模求解显示较低频率为二极模式，较高频率为四极模式。S1(2, 1) 为 1, 2 两个耦合端口馈入等幅值、等相位的信号，从 1 端口提取到两个耦合环激发的混合信号。

实际测量利用了一段 1 m 长、频率为 162.5 MHz 的铝制四翼 RFQ 模型腔，单端口的 S11 显示在  $(164.3 \pm 2)$  MHz 的范围内存在 3 个谐振峰，模拟显示后面两个为二极模式，如图 4(a) 所示。在对称象限固定两个相同大小的耦合环，利用功分器及等长度的信号线将网分仪上的激励信号等幅值、等相位地分配到两个耦合端口，观察网络分析仪上的 S21 参数，当调节两个耦合环的角度时，二极模式对应的共振峰逐渐消失，最终在  $(163.42 \pm 3)$  MHz 的范围内只找到四极模式的谐振频率，如图 4(b) 所示，因此可以判定由两个耦合环分别产生的二极模式信号等幅并且反向地抵消了。

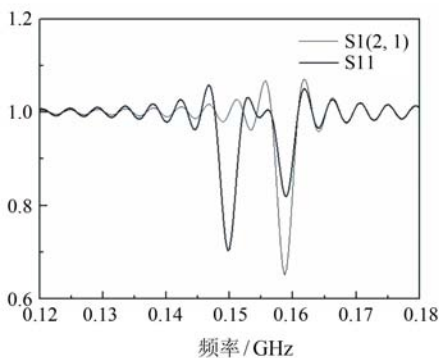


图 3 单端口耦合与对称耦合的对比 CST-MWS 的时域模拟 S11 及 S1(2, 1) 结果。

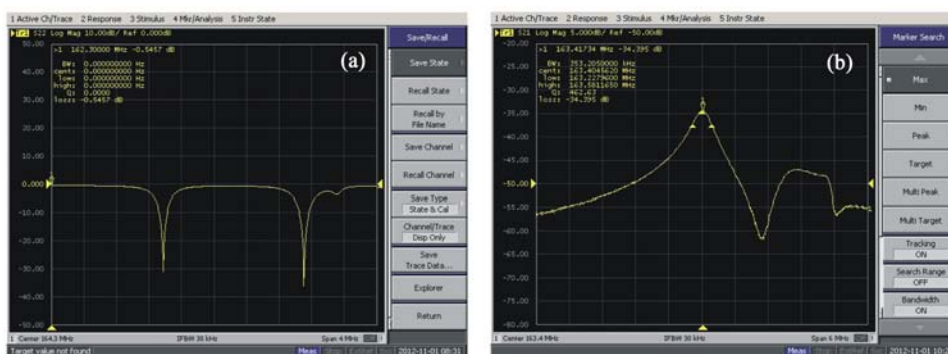


图 4 (在线彩图)单端口耦合与双端口对称耦合的对比  
(a)为单端口耦合时测得的S11, (b)为双端口对称耦合时测得的S21曲线。

因此, 模拟和实测均证实双端口对称耦合能将二极模式的共振模式消除, 反映在S21的测量数据上就是二极模式频率对应的谐振峰消失。双端口对称耦合使公式(1)中二极模式的极间电压沿轴向分布 $-\phi_{dn}(z) + \phi_{dn}(z) = 0$ , 四极模式 $\phi_{qn}(z) + \phi_{qn}(z) = 2\phi_{qn}(z)$ 。这种方法的难点在于需要仔细调节两个耦合环的位置、角度及耦合度, 确保它们所产生的二极场完全抵消。同时为了保持腔体结构的对称性, 两个耦合环的旋转角度还必须保持一致, 略微的耦合非对称性都会让二极模式出现, 因此对耦合结构的稳定性要求较高。理论上当调节至两个耦合环激发的二极模式完全抵消的时候, RFQ任意位置的截面上都将为严格的四极对称场, 剩余的工作为通过调谐器调节四象限的场平整度。

### 3 消除板支撑的四杆型 RFQ 二极场

图 5 给出了典型的四杆型 RFQ 的局部模型和等效电路图。四杆型 RFQ 的两个相邻支撑板、其间的底座和极头构成完整的谐振单元。由于连接上部两个电极的电感 $L_1$  大于连接下部两个电极的电感 $L_2$ , 造成

上部电极之间 $C_1$ 的极间电压 $U_1$  大于下部两个电极之间 $C_2$ 的电压 $U_2$ , 因而造成本应该四极对称的场有了横向的二极分量, 其大小一般为 14%, 通过支撑板上的斜切可以将二极场分量的比例降到 7%<sup>[5]</sup>。但是这种斜切的处理在理论上只是使 $L_2$  更靠近 $L_1$ , 只能部分地减弱二极模式, 无法完全消除。

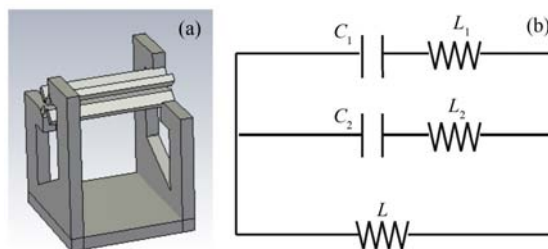


图 5 (在线彩图)(a) 四杆型 RFQ 结构一个谐振单元的结构图, (b) 为四杆型 RFQ 一个谐振单元的等效电路

通过对等效电路的研究和不断的尝试, 提出了如图 6 所示的新的支撑板结构, 通过调节支撑板上的台阶厚度 $h$ , 能够有效地消除二极场。支撑板上高出的部分能够有效地使 $L_2$  进一步降低至等于甚至低于 $L_1$ , 使 $U_1/U_2$  也得到调整。

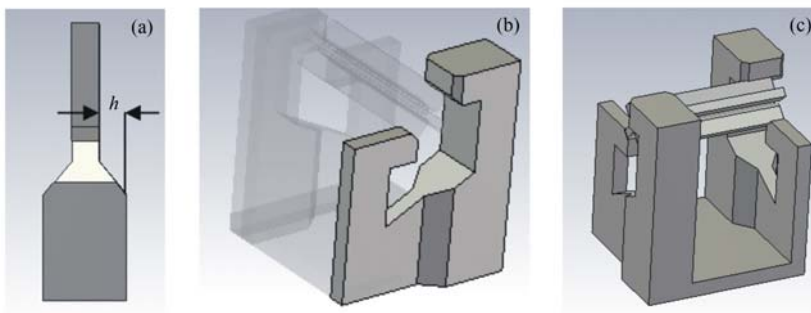


图 6 (在线彩图)改进后的四杆型 RFQ 支撑板结构  
(a)为顶部视角, (b)和(c)为侧面视角。

SSC-Linac 重离子直线注入器项目的RFQ为支撑板型的四杆结构, 工作频率为53.667 MHz。以此RFQ作为原型做支撑板结构的改进尝试, 用三维电磁模拟软件验证其效果。固定其他参数并对图6支撑板结构中参数 $h$ 的厚度做参数扫描, 便可得到上下象限的电压比例的变化曲线, 如图7所示。当 $h=7\text{ mm}$ 时,  $U_1/U_2=1$ , RFQ极间电场达到四极对称, 同时此段RFQ的 $Q$ 值也从初始的5802上升到6016。

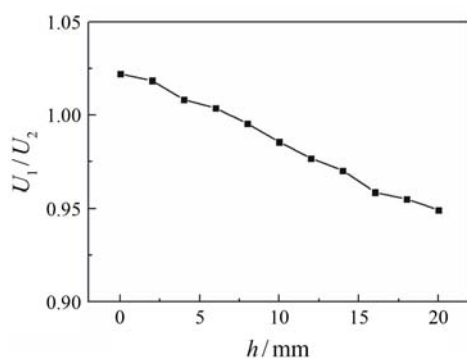


图7 上极间电压与下极间电压之比 $U_1/U_2$ 随支撑板参数 $h$ 的变化曲线

在达到消除二极场的目的之后, 支撑板的台阶会使RFQ的谐振频率会略微变化, 因此需要调节支撑板间距以将频率重新调回。对比改进之前, 不仅二极场得到了优化, 并且 $Q$ 值也得到了约3%的提升。

理论上对于任意频率的此种结构的四杆型RFQ, 只要调节台阶厚度 $h$ 到合适的值, 总能使二极分量完全消除( $U_1/U_2=1$ ), 代价只是增加支撑板的复杂度。因此, 图6结构的支撑板可以认为是一种能够有效消

除此种RFQ二极场的手段。

## 4 结论

通过对四翼型RFQ和四杆型RFQ二极场的特性分析, 我们研究了四翼型RFQ的对称耦合对RFQ腔体内二极模式的抵消作用, 理论分析、三维电磁模拟及模型腔测量均证实这一现象。因此得出结论, 双端口对称耦合不仅能增加腔体的结构对称度, 而且从削弱二极模式的方面也改善了腔体的性能。四杆型RFQ以SSC-Linac的RFQ为原型, 通过三维电磁模拟研究了改进支撑板结构来完全消除了二极场的新方法, 证实其具有一定的实用价值。

### 参考文献(References):

- [1] CHEN Jiaer, GUO Zhiyu, FU Shinian, *et al.* Chinese Physics C, 2009, **33**(10): 926.
- [2] Computer Simulation Technology-Micro Wave Studio[EB/OL]. [2012-11-05]. <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>.
- [3] PALMIERI A. Proceedings of IPAC'10, Japan, MOPEC062: 606.
- [4] FU Shinian OUYANG Huafu, XU Taoguang. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005, **29**(3): 295. (in Chinese)  
(傅世年, 欧阳华甫, 徐韬光. 高能物理与核物理, 2005, **29**(3): 295.)
- [5] ZHU Kun, GUO Zhiyu, FANG Jiayun, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005, **29**(5): 512. (in Chinese)  
(朱昆, 郭之虞, 方家驯, 等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(5): 512.)

## Dipole Field in Four Vane and Four Rod RFQ

DU Xiaonan<sup>1, 2, 1)</sup>, HE Yuan<sup>1</sup>, SHI Aimin<sup>1</sup>, SUN Liepeng<sup>1, 2</sup>, ZHANG Zhouli<sup>1, 2</sup>, PAN Gang<sup>1, 2</sup>, SHI Longbo<sup>1, 2</sup>

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

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

**Abstract:** Radio Frequency Quadrupole(RFQ) is the most important front-end acceleration structure in linear accelerators. It can focus and accelerate beam in longitudinal and transversal direction, simultaneously. Symmetric of electric field in acceleration aperture is very important for the beam dynamics. To an idea RFQ, there is only quadrupole electric field in the acceleration aperture. The dipole field in aperture is harmful and need be as small as possible. The methods to reduce it are studied in a four-rod RFQ and a four-vane RFQ in the article independently. To a four-vane RFQ, the symmetrical double-port couplers are employed to counteract the neighboring dipole modes. The availability is confirmed by the simulation with the 3-D Finite Element tool, CST-MWS. And it is also observed by measuring a model-cavity with a symmetrical double-port couplers. To a four-rod RFQ, a new structure of stems is proposed to reduce the dipole mode. Taking the RFQ for the SSC-LINAC project as example, the dipole mode contributions to the electric field is completely eliminated by selecting stem's parameters carefully. It is confirmed by the simulation of CST-MWS. Theoretically, this method is independent with the frequency of an RFQ and serves for all RFQs with 4-rod or 4-vane structure.

**Key words:** Linear accelerator; 4-rod RFQ; 4-vane RFQ; Dipole Mode; finite-element simulation

---

**Received date:** 20 Jan. 2013; **Revised date:** 19 Mar. 2013

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(11079001)

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

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