

# 医用质子加速器注入器 714MHz RFQ 的设计研究\*

郭伟明 郁庆长

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 结合近几年来 RFQ 研究的进展,探讨了进一步提高 RFQ 工作频率上限的可能性.通过讨论得出了一台 714MHz-0.8MeV RFQ 的设计参数.动力学模拟计算表明,对医用弱流加速器,RFQ 在 714MHz 频率仍能保持传输效率高,发射度增长小等优良性能.

**关键词** 714MHz-0.8MeV RFQ 横向聚焦 参数优化 动力学模拟

## 1 引言

医用质子束的主要性能要求为:输出能量在 70—200MeV 之间可调,平均流强为  $10\text{nA}^{[1]}$ . 目前提出的实现办法有回旋加速器,小型同步加速器方案等.传统的直线加速器体积庞大,价格昂贵,因而无法与上述方案竞争.但如果工作在 S 波段,则加速器的造价可以大幅度降低,同时输出束流品质优良,发射度小,有利于减小输运系统和转动机架的尺寸,从而降低总体造价.我们提出的 S 波段直线加速器设计方案中,利用 RFQ 作为注入器将束流加速至 0.8MeV,在 RFQ 之后依次为 714MHz-7MeV 高频聚焦漂移管加速器(RFD);2856MHz-70MeV 的边耦合漂移管加速器(SCDTL);2856MHz-200MeV 的边耦合腔加速器(SCL);设计重复频率为 200Hz,脉冲长度  $3\mu\text{s}$ ,占空因子 0.06%,脉冲流强 1mA,平均流强  $20\text{nA}^{[2]}$ .其 RFQ 工作在 714MHz 可以缩小腔体积,减少制造和运行费用.本文主要讨论在 714MHz 频率下 RFQ 的设计.

## 2 714MHz RFQ 基本参数的选取

受加工精度、流强、发射度和聚焦要求的限制,一般认为 RFQ 的适宜工作频率为 50—400MHz.低频端适用于加速重离子,更低频率导致加速腔体积非常大;高频端用来加速质子等较轻粒子,频率更高时主要是横向聚焦困难.对于医用加速器,由于流强要求不高,束流发射度很小,因此 RFQ 的孔径可以小至接近极限值.近年来一些实验室在重

1999-02-04 收稿

\* 国家攀登计划-B 资助项目

离子 RFQ 方面的研究使 RFQ 在制造工艺上也有较大进展<sup>[3]</sup>, 上述因素使 RFQ 的工作频率进一步上推成为可能. 下面逐一讨论提高 RFQ 工作频率的限制以及 714MHz RFQ 主要参数的选择.

## 2.1 横向聚焦

RFQ 的横向运行方程为<sup>[4]</sup>

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} + [B\sin 2\pi\tau + \Delta_{rf}]x = 0, \quad (1)$$

其中

$$\tau = (\omega + \varphi_s)/2\pi, \quad (2)$$

聚焦因子

$$B = \frac{e}{\gamma M_0 c^2} \frac{\lambda^2}{a^2} XV, \quad (3)$$

高频散焦因子

$$\Delta_{rf} = \frac{\pi^2 e}{2\gamma\beta^2 M_0 c^2} A \sin(\varphi_s) V, \quad (4)$$

RFQ 加速系数

$$A = \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)}, \quad (5)$$

RFQ 聚焦系数

$$X = 1 - AI_0(ka). \quad (6)$$

$\varphi_s$  为同步相位,  $V$  为相邻电极间的电压,  $\beta$  为以光速为单位时粒子的速度,  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ ,  $M_0$  为静止质量,  $c$  为光速,  $m$  为 RFQ 调变度,  $a$  为 RFQ 孔半径.

由(3)式聚焦因子  $B \propto \lambda^2 \propto \frac{1}{f^2}$  随频率升高迅速减小, 而高频散焦项  $\Delta_{rf}$  中不显含频率, 因此频率升高所带来的主要困难是横向聚焦. 观察(3)式, 可以通过增大  $V, X$  或减小  $a$  来增大  $B$ . 极间电压和击穿场强之间有如下关系<sup>[5]</sup>

$$V = \frac{E_s a}{K_g}, \quad (7)$$

$E_s$  为击穿场强,  $K_g$  是几何结构因子, 随电极间距离, 频率和聚焦电极极面横向半径变化.  $K_g$  取值在 1.2—1.6 之间,  $K_g$  值小时将加重 RFQ 中高次谐波分量<sup>[5]</sup>. 为了增大  $B$ , 这里取  $K_g = 1.3$ .

$E_s$  和频率间有如下关系

$$E_s = K_e E_k. \quad (8)$$

$E_k$  满足 Kilpatrick 关系

$$f = 1.64 E_k^2 e^{-8.5/E_k}. \quad (9)$$

(9)式中  $E_k$  的单位为 MV/m,  $f$  MHz. 由于清洁工艺和真空技术的提高, 实际击穿场

强为  $E_{ki}$  的 1—3 倍. 对工作在脉冲状态的加速器, 根据脉冲长度和重复频率, 甚至可以取  $E_s = 5E_{ki}$  [6]. 在重离子 RFQ 的研究中, 由于粒子的荷质比较小而同样遇到聚焦困难. 文献[3]中, 对一台占空因子为 20%, 频率为 25.5MHz 重离子 RFQ 实验测试表明,  $K_a$  可取 2.66. 对 714MHz RFQ, 设计脉冲长度为  $3\mu s$ , 重复率为 200Hz, 理论上  $K_a$  应可以取得更大, 为保险起见, 这里仍然取  $K_a = 2.66$ .

由(6)式,  $X$  增大将导致  $A$  减小, 直接影响加速效率, 因此我们不希望  $X$  很小. 由方程(1)可得 RFQ 的横向稳定关系为:

$$\frac{eV\beta^2}{\gamma M_0 c^2} > \frac{4\pi^4 A}{X^2} \left(\frac{a}{\lambda}\right)^4, \quad (10)$$

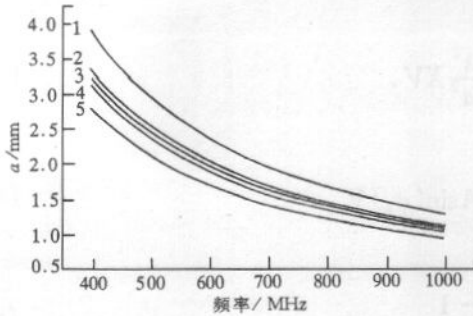


图1 稳定区边界对应的频率和孔半径值

- 1  $m = 1.5, \beta_{GB} = 0.0292$ ;
- 2  $m = 1.7, \beta_{GB} = 0.0310$ ;
- 3  $m = 1.7, \beta_{GB} = 0.0292$ ;
- 4  $m = 1.7, \beta_{GB} = 0.0273$ ;
- 5  $m = 1.9, \beta_{GB} = 0.0292$ .

$\gamma, \beta$  为对应 RFQ 聚束节末端值. 图 1 为改变调变度  $m$  (从而改变  $X$ ) 和  $\beta$  时, 稳定区边界对应的  $f$  和  $a$  值. 由图 1 可见, 相对  $m$  的改变,  $\beta$  的改变对  $f$  和  $a$  的影响较小. 当  $m = 1.7, \beta = 0.029, a = 1.5\text{mm}$  时, RFQ 在 750MHz 仍可以保持横向稳定.  $m, a, \beta$  取上述值时, 714MHz RFQ 工作路线如图 2 所示, 图中折线为 RFQ 的工作路线, 竖线代表径向匹配节. 图 2 表明 714MHz RFQ 避开了最危险的  $q = 0.5$  共振线.

## 2.2 分路阻抗 $Z_s$ 和 $Q$ 值

对四翼型 RFQ, 定义  $\rho = Z_s L, L$  为腔长, 则 [7]

$$\rho = \frac{\gamma_0^{0.3}}{1.47 \cdot 10^{-18} \cdot f^{3/2}}, \quad (11)$$

$\gamma_0$  为 RFQ 的特征半径, (11) 式表明随频率升高,  $Z_s$  将有所下降. 而对 RFQ 整腔,  $Q \propto f^{-1/2}$  [8], 即频率升高,  $Q$  值减小, 腔内单位面积上的热负载增加. 图 3 为用于 SUPERFISH 计算的 RFQ 四分之一腔, 其输入参数如图中所示. 计算得  $Q = 7764.28, Z_s = 33.07\text{k}\Omega/\text{m}$ , 功率损耗为  $278\text{kW}/\text{m}$ . 对强流加速器, 功率损耗的增加将影响极面温度恒定 [9], 但本设计中 RFQ 的占空因子很小, 峰值功率的增加对散热的影响并不大.

## 2.3 入射能量

在空间电荷效应的作用下, 为了保持束团的稳定性, 要求入射端单元长和孔径  $a$  之比

$$\eta = \frac{1}{2} \beta a / a, \quad (12)$$

应至少大于 1 [6]. 目前已有的 RFQ 其取值在 1.47—2.17 之间 [10]. 714MHz RFQ 入口端  $a = 2.0\text{mm}$ , 对应最低入射能量为 42.5keV. 入射能量低时空空间电荷效应严重, 影响极束流和传输效率, 而且导致高频散焦项较大; 入射能量太高不易于聚束且对离子源选择不

利. 另外, 动力学计算程序对入射能量也很敏感<sup>[3]</sup>. 用动力学程序反复计算表明, 取入射能量为 80keV 有利于缩短 RFQ 的长度并提高传输效率

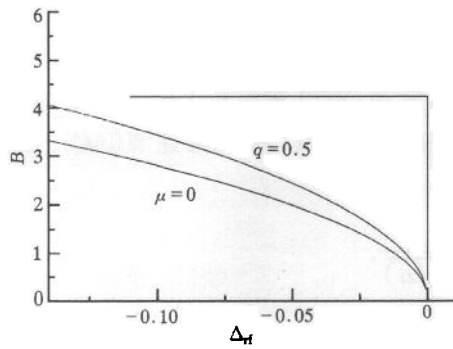


图 2 714MHz RFQ 工作路线

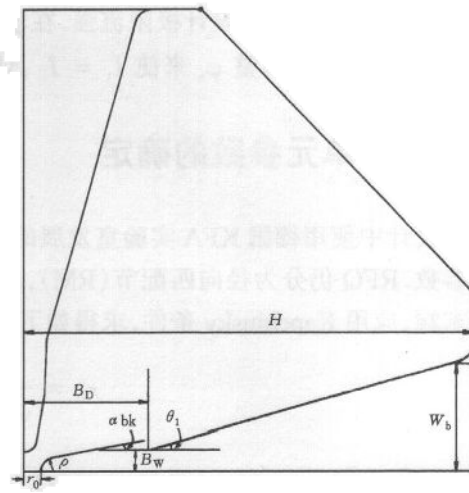


图 3 714MHz RFQ1/4 腔

$H=4.987\text{cm}, W_b=1.2\text{cm}, r_0=0.275\text{cm}, \rho=0.22\text{cm},$   
 $B_W=0.24\text{cm}, B_D=1.4\text{cm}, \alpha_{bk}=10^\circ, \alpha_1=16^\circ.$

### 2.4 极限流强的计算及同步相位的确定

当束流达到一定强度时, 空间电荷排斥力和外界聚焦力抵消, 从而使束流的运动不再稳定. 这时的流强称作极限流强, RFQ 中横向和纵向极限流强分别为<sup>[11]</sup>

$$I_t = \frac{\mu_t \beta |\varphi_s| r_b^2 m_0 c^2 [B^2 + 8\pi^2 \Delta_H]}{720\pi^3 \lambda^2 q [1 - f_b]}, \quad (13)$$

$$I_l = \frac{\mu_l \varphi_s^2 |\sin \varphi_s| AV r_b}{120\beta \lambda}, \quad (14)$$

式中  $B, \Delta_H, A, V, \varphi_s$  等意义与前文相同,  $\mu_t, \mu_l$  为空间电荷力与聚焦力之比, 最大值为 0.84,

$$r_b = \frac{a}{\sqrt{\xi}} \quad (15)$$

为束团横向平均半径;

$$\xi = \frac{1 + \frac{B}{4\pi^2}}{1 - \frac{B}{4\pi^2}}, \quad (16)$$

为束流横向振荡振幅最大与最小之比;

$$f_b = \frac{2\pi r_b}{3\beta \lambda |\varphi_s|} \quad (17)$$

为束团形状因子.

一般通过调整  $m$  和  $A$ , 使误差函数  $\delta = \sqrt{(I_t - C_t)^2 + (I_l - C_l)^2}$  最小, 其中  $C_t = C_l$  分别为横向和纵向设计极限流强. 在本设计中, 为满足横向聚焦要求  $m$  和  $A$  值已经预先确定, 所以通过调整  $\varphi_s$  来使  $I_t = I_l$ , 计算得到  $\varphi_s = -28.1^\circ$ .

### 3 RFQ 单元参数的确定

设计中使用德国 KFA 实验室发展的 CULI, IMS 和 OPTI 程序来优化计算 RFQ 的单元参数. RFQ 仍分为径向匹配节(RM), 成形节(SH), 聚束节(GB)和加速节(AC). 在 GB 节末端, 应用 Kapchinsky 条件, 求得如下常数

$$r_0 = \frac{a}{\sqrt{1 - AI_0(ka)}}, \tag{18}$$

$$C_1 = \frac{A \sin \varphi_s}{\beta^2}, \tag{19}$$

$$C_2 = \Psi(\varphi_s) \beta_s. \tag{20}$$

由于入射束流较弱, 发射度很小, RM 节取两个单元<sup>[12]</sup>, 设 RM, SH, GB 节的长度分别为  $l_0, l_1, l_2$ . 在 SH 节中, 当  $z \leq l_0 + l_1 + l_2 - \Delta l$  时, 保持  $r_0$  为常数,  $A$  按下式变化,

$$A(z) = -C_1 \cdot \frac{z - l_0}{l_1 + l_2 - \Delta l} \cdot \frac{\beta^2(z)}{\sin \varphi}, \tag{21}$$

其中  $\Delta l$  为调变系数, 得到  $A(z)$  后代求出  $m$ . 当  $z > l_0 + l_1 + l_2 - \Delta l$  时,  $\varphi$  的变化规律与 GB 节中相同, 这是为了避免纵向束流损失<sup>[3]</sup>. GB 节中, 调变度  $m$  和同步相位  $\varphi$  同时变化, 相宽和  $\varphi$  变化规律如下

$$\Psi(z) = \left[ C_2 + (2\pi\beta_i - C_2) \times \left( \frac{z - l_0}{l_1 + l_2} - 1 \right)^2 \right] / \beta(z), \tag{22}$$

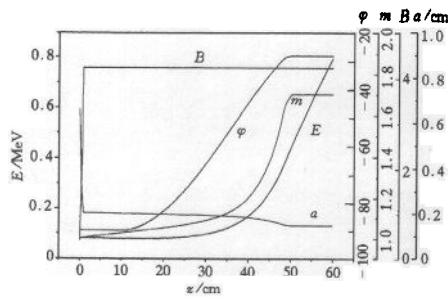


图 4 714MHz RFQ 参数随  $z$  的变化

$$\varphi = \arctg \frac{\sin \Psi(z) - \Psi(z)}{1 - \cos \Psi(z)}, \tag{23}$$

(22)式中  $\beta_i$  对应入射能量. 求出  $\varphi$  后代入(21)式求出相应  $m$  值. 在 GB 节末端,  $\varphi$  和调变度  $m$  达到最大值  $\varphi_s$  和  $m_0$ . AC 节中  $\varphi_s$  和  $m$  不再变化, 一直将束流加速至出口能量. 表 1 列出了 714MHz RFQ 主要参数, 图 4 为设计参数随  $z$  变化曲线

表1 714MHz RFQ主要参数

注入能量 $E_i$ (keV)	80
出口能量 $E_f$ (keV)	800
同步相位 $\varphi_s$ (°)	-90—-28.1
设计流强 $I$ (mA)	1
总单元数	170
径向匹配段单元数	2
横向聚焦参数 $B$	0.4—4.23
电极调制参数 $m$	1—1.7
电极孔半径 $a$ (cm)	0.659(RM) - 0.2027(SH) - 0.20(GB) - 0.1509(AC) - 0.1477
特征半径 $r_0$ (cm)	0.275
电极总长度 (cm)	59.996
表面最大电场 $E_{s,max}$ (MV/m)	61.875 ( $K_s = 2.66$ )
电极间电压 $v_0$ (kV)	92.6

## 4 动力学模拟计算结果

计算使用 PARMTEQ 程序,入射和出射束流参数如表2所示.其传输效率为92%,发射度的增长为1.29倍,这表明714MHz RFQ的设计参数是合理的.

表2 束流性能参数(90%粒子)

	入口	出口
脉冲流强 (mA)	1.0	0.92
归一化发射度 ( $\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ )	0.144	0.187
束流包络 $x_{max}$ (mm)	0.386	0.427
$y_{max}$ (mm)	0.367	0.429
发射度椭圆 $\alpha_x$	0.121	-1.574
$\beta_x$	1.373	3.974
$\alpha_y$	0.205	1.515
$\beta_y$	1.239	4.762
纵向归一化均方根发射度 ( $\pi \cdot \text{deg} \cdot \text{keV}$ )	0	<191.8
能散 (keV)	0	36.9
相散 (°)	360	29.66

## 5 结论

本文重点讨论了714MHz RFQ的参数设计,动力学模拟计算表明,以上设计参数是可行的.关于714MHz频率的RFQ能否实现在很大程度上仍然是一个工艺问题.例如,如何在孔径接近极限值的情况下减小由安装误差引起的高次模分量等,希望我们能在将来的工作中进一步深入研究.

本文的计算程序由罗紫华研究员提供并指导使用,在此表示衷心感谢.

**参考文献(References)**

- 1 YU QingChang. Nature Magazine(in Chinese), 1998, 20:34  
(郁庆长. 自然杂志, 1998, 20:34)
- 2 GUO WeiMing et al. An S-band Proton Linac Designed for Medical Application, National Proton & Heavy Ion Therapy Technology Symposium(in Chinese), 1998. 22  
(郭伟明等. 一台 S 波段医用质子直线加速器的设计. 全国质子重离子技术研讨会, 1998. 22)
- 3 Tokuda M. Particle Accelerators, 1994. 47:171—189
- 4 For Example, Proceedings of CERN Accelerator School, CERN 95-06, 1995. 2:974
- 5 Chidley B G et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1983, NS-30(4):3560
- 6 Gerhard A. Proceedings of 13th ISDE IV, Paris, 1988. 492
- 7 Klein H. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1983, NS-30(4):3313
- 8 Haimson J. Proceedings of the 1966 Linear Accelerator Conference, 1966. 309
- 9 Veno A et al. Low-Power RF Characteristics of a 432-MHz, 3MeV RFQ Stabilized with PISLs, KEK Preprint 94-116, October 1994. A
- 10 Tepliakov V A. Proceedings of Linac Conference 1992. 21
- 11 Wangler T P. Los Alamos National Lab. Report, 1980, La-8399
- 12 WANG ShuHong. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1993, 17(4):318  
(王书鸿. 高能物理与核物理, 1993, 17(4):318)

**Design Study of an Injector of Proton Accelerator 714MHz RFQ\***

GUO WeiMing      YU QingChang

*(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)*

**Abstract** With the recent research progress of RFQ, the upper limit of RFQ's working frequency is expected to be put upward in proton accelerator for medical application. The main parameters of a 714MHz-0.8MeV RFQ are discussed and then checked with PARMTEQ. The multiparticle simulation results indicate that RFQ will work properly in such relatively higher frequency.

**Key words** 714MHz RFQ, transverse focusing, parameters optimization, dynamical simulation

---

Received 4 February 1999

\* Project supported by National Climb-B Plan