

# RFQ 加速器的束流动力学和高频结构

王书鸿

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

## 摘 要

本文描述了 RFQ 加速器的特点, 说明了束流动力学设计研究对于形成这些特点的贡献. 给出了它的五个设计极限. 综述了近 10 年来国内外在 RFQ 束流动力学和高频结构方面的若干主要发展.

## 一、引 言

自 1970 年 I. M. Kapchinskij 和 V. A. Teplyakov<sup>[1]</sup> 提出用 RFQ (Radio Frequency Quadrupole) 加速低能粒子的思想以来, 由于它显著的优越性, 吸引了世界上许多学者作进一步研究并力求实现. 至七十年代末, RFQ 的束流动力学和建造技术的研究有了重大突破. 美国 LASL 实验室成功地研制了第一台载束样机<sup>[2]</sup>, 从而在国际加速器界掀起了一场革命: RFQ 的研究、设计、建造和应用, 在国际上得到了广泛和迅速的发展.

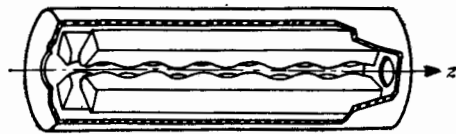


图 1 四叶型 RFQ 示意图

本文先以四叶型 (Four-Vane) 结构为例, 说明 RFQ 的主要优势和普适的束流动力学特性. 图 1 给出了这种结构的示意图, 四叶片周向对称地安置在一圆柱腔内. 在腔内激励的主模为类  $TM_{210}$ , 它在四叶形成的中心孔区, 产生四极电场, 用以径向聚焦束流.

若叶片的极头沿轴向是调变的, 则产生一个纵向电场分量, 以聚束和加速粒子<sup>[3]</sup>. 于是, 只有一个结构, 同时实现了对粒子束的聚束、聚焦和加速. 在圆柱坐标中, RFQ 轴心区的高频场分布为<sup>[2]</sup>:

$$\begin{aligned} E_r &= \left[ -\frac{XV}{a^2} r \cos 2\psi - \frac{KAV}{2} I_1(kr) \cos kz \right] \cdot \sin(\omega t + \varphi); \\ E_\psi &= \frac{XV}{a^2} r \sin 2\psi \cdot \sin(\omega t + \varphi); \\ E_z &= \frac{KAV}{2} I_0(kr) \sin kz \cdot \sin(\omega t + \varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

其中

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

$$X = 1 - AI_0(ka) \quad (\text{聚焦系数}).$$

并可得到

$$E_0 = \frac{2AV}{\beta\lambda} \quad (\text{轴上平均加速电场}), \quad (3)$$

$$B = \frac{XV}{a^2} \frac{q\lambda^2}{mc^2} \quad (\text{径向聚焦强度}).$$

由上述方程可见, 加速参数  $A$  和聚焦参数  $X$  是互相制约的. 前者增大则后者减小, 反之亦然. 若四叶的极头在径向以正弦形式随  $z$  轴调变, 相对两极头间距的最大和最小值分别为  $ma$  和  $a$ , 其中  $m$  为调变系数; 垂直方向和水平方向两对极头间的距离在轴向交替变化, 当前者为  $ma$  时, 后者为  $a$ , 反之亦然. 于是, 某最大值和相邻最小值之间的轴向距离, 构成了一个加速单元, 其长度  $L = \beta\lambda/2$ , 如图 2 所示. 在每单元上的粒子能量增益为

$$\Delta W = qE_0 L T \cos \varphi, \quad (4)$$

其中  $q$  为粒子的电荷数.  $T$  为渡越时间因子, 根据上述极头几何形状,  $T = \pi/4$ .  $\varphi$  为粒子到达单元中心时的相角. 为了兼顾加速效率和聚焦强度, 应折中地选择极头调变参数  $m$ , 通常取  $1 \leq m \leq 2$ .

若粒子的种类、能量和结构的频率确定, 则 RFQ 束流动力学研究的基本参数是: 相邻极间的工作电压  $V$ , 加速同步相角  $\varphi_s(z)$ , 极头构成的束流通道的最小半径  $a(z)$  和调变系数  $m(z)$ .

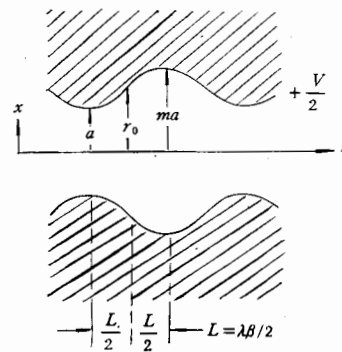


图 2 极头的调变示意图

## 二、RFQ 的特性

### 1. 径向聚焦力强

与磁场不同, 由电场梯度产生的聚焦力与粒子的速度无关, 这对于聚焦低  $\beta$  ( $= v/c$ ) 的束流是极有利的. 其场的利用率为磁场的  $1/\beta$  倍, 若  $\beta = 0.01$ , 则为 100 倍. 此外, 高频电场具有较高的击穿电压, 可使选用的电场幅值很高, 因而使径向电聚焦力很强. 再者, 由于高频四极电场随时间交变, 当粒子沿轴向运动时, 在径向的垂直和水平两个方向上, 同时受到交变梯度聚焦作用, 因而构成了强聚焦结构, 其聚焦周期长度为  $\beta\lambda$ .

不难得到, 粒子的径向运动线性方程为<sup>[3]</sup>:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + (B \cos \omega t + \Delta_{rf} + \Delta_{sc})r = 0, \quad (5)$$

其中聚焦参数  $B$  由 (3) 式确定,  $\Delta_{rf}$  为高频散焦参数,  $\Delta_{sc}$  为线性空间电荷散焦参数. 在 RFQ 中, 可选择  $B$  值远大于  $\Delta_{sc}$  和  $\Delta_{rf}$ , 它可使 100 mA 流强的低速束流截面聚焦到  $< 5$  mm.

## 2. 束流传输效率高

可选择调变参数  $m(z)$  和同步相角  $\varphi_s(z)$  沿  $z$  轴的分布, 实现 RFQ 的高传输效率. 在 RFQ 入口端, 选择调变参数  $m$  稍大于 1 (如 1.005), 并令其沿轴向渐渐地增大, 从而产生一个微小的并沿  $z$  轴缓慢增强的纵向电场分量. 这个由弱渐强的纵向电场分量, 用于调制注入束的能量, 以形成一个绝热群聚过程. 同时, 在 RFQ 入口端选用  $\varphi_s = -90^\circ$ , 然后令其沿轴向渐增, 使纵向运动的稳定区由最大值渐渐收缩, 以构成一个绝热俘获过程. 这两个绝热过程, 使 RFQ 的束流传输效率接近 100%, 这是在所有高频(微波)加速器中俘获效率最高的. 它的具体实现, 是靠在 RFQ 中设置一个成形节 (Shaper Section, 简称 SH) 来完成的. 在这一节内, 调变参数  $m$  由 1.0 渐增至 1.2 左右; 而  $\varphi_s$  由  $-90^\circ$  渐增至  $-70^\circ$  左右.

## 3. 径向归一化发射度增长小

在粒子加速器中, 束流径向归一化发射度的增长, 通常是由两种机制引起的. 一是非线性空间电荷效应, 引起纵向与径向运动的耦合, 使一部分纵向能量转到径向, 导致径向归一化发射度的增长. 二是束流的发射度与机器的接受度不匹配, 导致径向有效发射度的增长. 而在 RFQ 中, 上述两种机制导致的发射度增长, 是可以通过巧妙的束流动力学设计加以控制的.

克服非线性空间电荷力引起发射度增长的有效办法, 是在束流的聚束过程中控制电荷密度分布使其几乎不变. 这在束流动力学中, 就是保持纵向小角度振荡的频率  $\Omega_0^2$  不变和束团长度  $Z_b$  不变<sup>[2]</sup>, 即

$$\begin{aligned} \Omega_0^2 &= \frac{qVA\omega^2 \sin |\varphi_s|}{4m_0c^2\beta} = \text{Const.}, \\ Z_b &= \frac{\beta\lambda}{2\pi} \phi = \text{Const.}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $\phi$  为束团的相宽, 它满足

$$\text{tg } \varphi_s = \frac{\sin \phi - \phi}{1 - \cos \phi}.$$

(6) 式的具体实现, 是靠在 RFQ 中设置一个和缓聚束节 (Gentle Buncher, 简称 GB) 来完成的. GB 节紧接在 SH 节的下游. 由方程 (6), 且取  $B(z) = \text{Const.}$ , 可确定在 GB 节内的  $m(z)$ ,  $\varphi_s(z)$  和  $a(z)$  的变化律.

克服径向不匹配导致发射度增长的有效办法, 是在 RFQ 中专门设置一个径向匹配节 (Radial Matching, 简称 RM)<sup>[2]</sup>. 它的任务, 是将与时间无关的束流发射度与时间有关的径向接受度匹配. 后者是因为 RFQ 的径向聚焦电场是随时间以正弦波形式交变的. 显然, 要实现这一匹配, 必须在 RFQ 入口处产生一个“与时间无关”的接受度. 将

RM 节置于 SH 节的上游,它应具有这样的特性,那就是在 RM 节出口位置上,处在不同高频相位上的接受度椭圆(如  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  等)按传输矩阵转换到入口处时,具有基本相同的接受度椭圆形状. 这个椭圆形状,就成为在 RFQ 入口处的与时间无关的接受度. 它的形成,是靠选取 RM 节入口处四个极头间的孔径相对很大,并沿 RM 节迅速变小来实现的. 例如,仅在几个  $\beta\lambda$  的长度上,使孔径缩小好几倍. 其机理是用聚焦场的空间迅变,来“掩盖”随时间变化的影响. 或者说,使空间分量的作用远强于时间分量. 图 3 上方右边的三个椭圆,分别对应 RM 节出口处在  $x-x'$  相平面上处于  $0^\circ$  和  $\pm 90^\circ$  的三个高频相位上的接受度. 图 3 上方左边,则是这三个椭圆通过孔径迅变的 RM 节转换到入口处的椭圆,毕竟由于时间分量的差别,它们不可能完全重合,但由于空间分量的作用却近乎相同. 同样,图 3 中部给出了在  $y-y'$  相平面上的接受度椭圆变换,而且可以看出,在 RM 节入口处,两个相平面上的接受度几乎相同,这是因为 RM 节内的孔径迅变,在两个方向上是完全对称的. 图 3 下方,则是在 RM 节出口处,处在不同时间的束流包络,转换到 RM 节入口处的沿途变化情况.

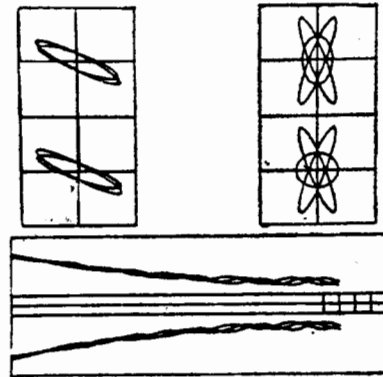


图 3 RM 节作用示意图

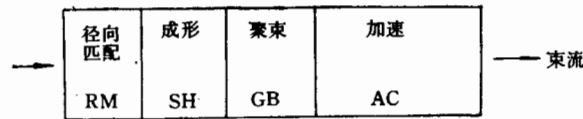


图 4 RFQ 的四节位置图

有了 RM 节产生的与时间无关的 RFQ 接受度,只要调节处在离子源与 RFQ 之间的聚焦元件,就可使束流的发射度与 RFQ 的接受度匹配. 这样的匹配,有利于克服在 RFQ 内束流径向归一化发射度的增长.

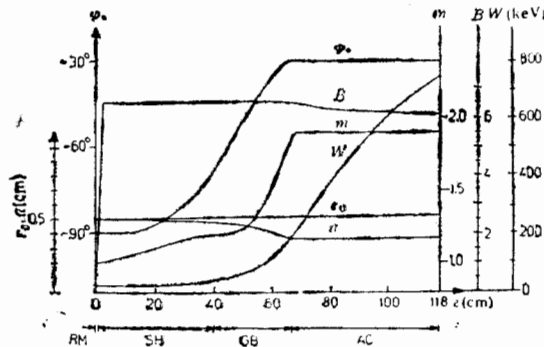


图 5 DESY-RFQ 参数沿轴向变化曲线

最大值(如  $-30^\circ$  左右),从而开始了最大的加速率. 因此在加速节内,只要保持  $\phi_s$ 、 $m$ ,

由上可见, RFQ 加速器的设计,按其功能可以分成四节来优化. 除上面已提到的三节 (RM、SH、GB) 外,设在 RFQ 的第四节,就是加速节 (Acceleration, 简称 AC). 它紧接在 GB 节的下游. 在 GB 节出口处,束流已完全群聚,其  $m$  值已渐变到最大,  $\phi_s$  也已增到

表1 DESY-RFQ 参数

节名	RM	SH	GB	AC	
轴向位置(m)	0	0.01	0.04	0.67	1.18
单元数序	0	2	83	113	135
$\varphi_s(\text{deg.})$	—	-90	-68	-30	-30
$m$	1	1	1.18	1.88	1.88
$a(\text{mm})$	20.3	5.0	4.7	3.5	3.5
$r_0(\text{mm})$	20.3	5.0	5.0	5.2	5.2
$B$	0.4	6.5	6.5	6.5	6.1
$E_0(\text{MV/m})$	0	0	0.50	2.12	1.27
$W(\text{keV})$	18	18	30	212	750

极间电压 70.5kV

最大表面电场 21.9 MV/m

表2 DESY-RFQ 束流性能参数(90% 粒子)

	入口	出口
能量 (keV)	18	750
正常流强 (mA)	20	19
极限流强 (mA)	—	60
归一化发射度 ( $\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ )	0.7	1.0
归一化均方根发射度 ( $\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ )	0.17	0.22
束流包络 $\hat{x}(\text{mm})$	1.8	2.1
$\hat{y}(\text{mm})$	1.8	1.8
发射度椭圆参数 $\alpha_x$	0.569	2.41
$\beta_x(\text{cm})$	2.06	15.7
$\alpha_y$	0.569	-1.46
$\beta_y(\text{cm})$	2.06	12.0
归一化纵向均方根发射度 ( $\pi\text{deg} \cdot \text{keV}$ )	0	50
能散 (keV)	0	10.4
相散 (deg.)	360	22.6

$\alpha$  等不变,就能以最短的距离将束流加速到最终能量。图4给出了这四个节在 RFQ 中的位置。图5列举了本文作者为德国 DESY 实验室设计的 RFQ 参数随轴线的变化曲线;表1和表2是相应的束流动力学设计参数<sup>[9]</sup>。可见,经优化设计可使 RFQ 获得~96% 的传输效率,其径向归一化发射度的增长很小,只有1.4倍,这对于低能强流,即存在强空间电荷力的情况下,是很不易的。

### 三、RFQ 的设计极限

#### 1. 极限流强

当被加速的束流强度达到一定的程度,它产生很强的空间电荷排斥力,完全抵消了外场提供的纵向和径向的聚焦力,从而使束流的运动不再稳定。这时的流强,称作极限流强。不难得到,在 RFQ 中的径向和纵向极限流强分别为<sup>[21]</sup>:

$$I_t = \frac{\beta |\varphi_s| r_b^2 m_0 c^2 [B^2 + 8\pi^2 \Delta_{rf}]}{720\pi^3 \lambda^2 q [1 - f_b]},$$

$$I_t = \frac{AV |\varphi_s|^3 r_b}{120\lambda},$$
(7)

其中  $r_b^2 = r_x \cdot r_y$ ,  $f_b$  为束团形状因子。显然流强的极限值出现在 GB 节末端, 因为在那儿束流已完成了群聚, 但能量仍较低(还未进入加速节), 因而是空间电荷力最强的地方。可选择聚焦强度  $B$ , 使  $I_t = I_{t1}$ 。设计的正常运行流强, 应小于极限值, 并约为极限值的 50—60%。

## 2. 径向振荡的相移极限

定义零电流下的径向振荡在每聚焦周期内的相移  $\sigma_0$ , 它是不计空间电荷效应, 完全由聚焦周期外场决定的相移。研究表明, 它的极限值为  $\pi/2$ , 即应取  $\sigma_0 < \pi/2^{[9]}$ , 以确保径向振荡包络的稳定性。因为如果  $\sigma_0$  接近或大于  $\pi/2$ , 非线性效应引起的参数共振将在交变梯度聚焦周期结构中导致包络的不稳定性。

## 3. 极头表面电场极限

在 RFQ 中, 适当增大极间电压  $V$ , 对于提高纵向加速率和径向聚焦力都是有利的。但它有一个极限, 那就是必须使相应的极头表面的最大电场  $E_{s,max}$  小于击穿场强  $E_k$ 。Kilpatric 在五十年代进行了旨在寻找击穿场强与工作频率关系的实验, 并由此得出  $E_k$  的经验公式为<sup>[6]</sup>

$$f = 1.64 E_k^2 \cdot e^{-0.5/E_k},$$
(8)

实验时的真空度为  $\sim 10^{-3}$  Pa。由于现代加速腔工艺水平和真空度的提高, 上述  $E_k$  表式是较保守的。实际上可取  $E_{s,max} = (1-3)E_k$ 。根据极头几何形状, 由计算腔内场分布的 SUPERFISH 程序, 可得到

$$E_{s,max} = \alpha E_p = \alpha \frac{V}{r_0},$$
(9)

其中  $E_p$  为极头顶端的电场,  $\alpha$  由几何形状决定,  $r_0$  为束流通道孔径的平均半径。应选择几何形状, 使  $\alpha$  尽可能小。

## 4. 加速效率极限

定义单位长度上的能量增益为加速效率, 它在 RFQ 中的表式为

$$\frac{dW}{dz} = \frac{\pi}{4} q E_0 \cos \varphi_s,$$
(10)

其中  $E_0 = \frac{2AV}{\beta\lambda}$  为一个加速单元内的轴上平均电场。可见, RFQ 的加速效率随  $\beta$  增长而线性下降, 因此 RFQ 的优势仅在于加速低  $\beta$  粒子。例如, 当质子能量为 3MeV, 若取  $f = 200\text{MHz}$ ,  $V = 70\text{kV}$ ,  $A = 0.5$ , 则相应的加速效率  $< 1\text{MeV/m}$ , 因而低于通常的 Alveraz 加速结构。

### 5. 加速腔长度极限

由于极头的加工和安装误差,产生极间电容的局部改变  $\delta C/C$ ,因而导致极间电压的误差为<sup>[7]</sup>

$$\frac{\delta V}{V} = -\frac{1}{6} \frac{L_i^2}{\lambda^2} \frac{\delta C}{C}, \quad (11)$$

它与加速腔长度  $L_i$  的平方成正比。如果腔体太长,将使过大的  $\frac{\delta V}{V}$  难于从极头位置的调整中降低到允许值 ( $< \pm 1\%$ )。调整经验表明,通常应取  $L_i \leq 2\lambda$ 。

## 四、RFQ 的新发展

近十年来,RFQ 的高频结构及束流动力学,又有了很大的发展,这里将评述主要的几个方面。

### 1. 叶耦合环 (Vane Coupling Ring, 简称 VCR) 的采用

为了产生较强的纵向加速场和径向聚焦场,RFQ 中四个叶片的极头所围成的束流通道孔径很小,平均半径约 5mm。为了避免使束流整体偏轴的径向二极场分量,对极

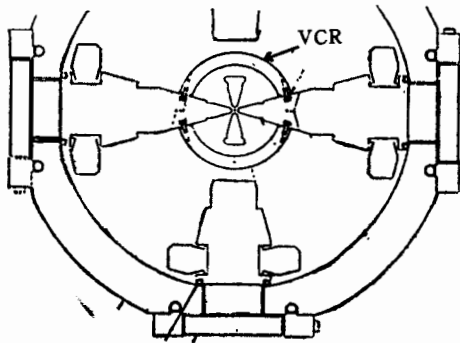


图 6 VCR 结构示意图

头的加工和安装精度要求很严,而且场的调整也相当困难。为了尽可能抑制二极场分量,减少加工和调整的困难,采用 VCR 是一个有效的途径。设一个金属圆环  $R_1$  与水平方向两相对极头相连;在轴向靠近  $R_1$  环处,用另一个金属圆环  $R_2$  与垂直方向两相对极头相连,如图 6 所示。这一对圆环  $R_1$ 、 $R_2$ ,使两相对极头处在同电位上。若沿 RFQ 轴线放置二、三对这样的环,就可以有效地抑制二极场分量。美国 LBL 实验室首先采用这种办法,它可使四个象限内场的不对称性由原先的  $\pm 30\%$  降低到  $\pm 2.5\%$ <sup>[8]</sup>,这对于

RFQ 电场的调整是极有利的。

### 2. 四杆型结构 (Four-Rod)

前面是以四叶型为例,描述 RFQ 高频结构的。近几年来,德国法兰克福大学发展了一种更为简易的四杆型结构<sup>[9]</sup>,如图 7 所示。它用四根杆代替四个叶片。每根杆的直径与叶片极头一样,随轴向调变,因此其束流动力学与四叶结构完全相同。它在电性能上,是一种具有周期性电感负载的四导体的 TEM 传输线。若每一电感元件与相对两杆相连,则这样的电感元件又具有上述 VCR 环的功能,以有效地抑制径向二极场分量。

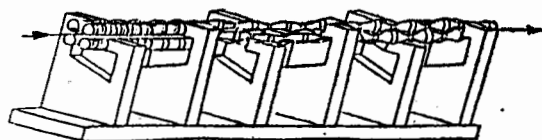


图 7 四杆型结构示意图

四杆结构的优点在于较简单、经济;可预先在腔外调整好四根杆的平直度和周向对称性,然后再放进腔内,使场的校对和调整较方便。法兰克福大学首次成功地用具有直臂支撑的四杆 RFQ 结构加速质子,其工作频率为 202 MHz,能量 750 keV,出口流强 35 mA,结构所用物理参数与表 1、表 2 和图 3 相同<sup>[10]</sup>。它的  $Q$  值约为四叶型结构的 75%。实际上,对于工作频率  $< 150$  MHz 的重离子 RFQ 来说,四杆结构更具有优势;而对工作频率  $> 150$  MHz 的轻离子(如质子) RFQ,则选用四叶型较有利。

### 3. 整体分离环型结构

这是北京大学提出的加速重离子的新型结构<sup>[11]</sup>。他们在研究耦合分离环漂移管型加速腔的基础上,用四杆型电极取代漂移管,并把左旋臂和右旋臂分别联成一个整体,从而

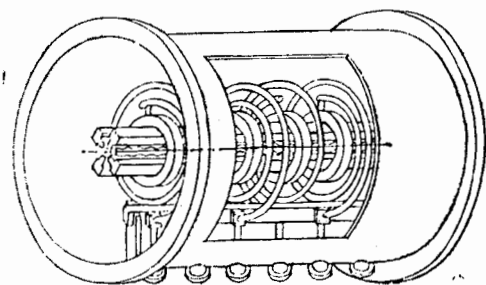


图 8 整体分离环结构示意图

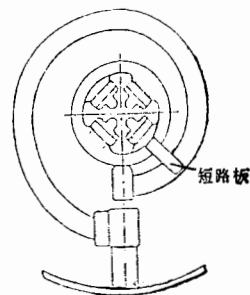


图 9 移动短路板改变工作频率示意图

构成整体分离环 RFQ,如图 8 所示。这种结构具有机械强度高、稳定性好、工作频率低、体积小、公差要求较松、易加工调整和适用于加速重离子等特点。北京大学对这种结构进行了较系统的理论分析和实验研究,并建成了一台高功率试验样机。其工作频率为 25.7 MHz,腔内径 50 cm,长度 85 cm。经高功率测试,证实了这种结构的优点和可行性。当实际馈入腔内的功率为 20—45 kW 时,测得极间电压为 64—82 kV,相应的分路阻抗为 240—184 k $\Omega$ /m。经特殊工艺研究,冷却水可通到电极杆内,使工作的占空比达 1/6 以上。

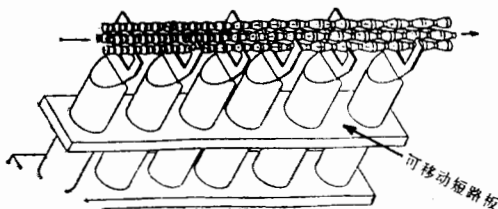


图 10 四杆型可变频率结构示意图



还应指出的是,这种结构的工作频率与弯臂的长度有关,如图9所示。移动短路板,可改变臂的长度  $S_0$ ,从而改变工作频率,使结构可用于加速不同粒子种类和能量的 RFQ。北京大学在高功率试验腔中的冷测表明,当  $S_0$  由 179.0 cm 调至 44.2 cm 时,其工作频率由 14.67 MHz 变到 41.30 MHz。德国法兰克福大学正致力于可变频率结构的进一步研究<sup>[12]</sup>,其短路板结构如图10所示。

#### 4. 束流动力学计算程序的完善

普遍用于研究 RFQ 的束流动力学程序为 PARMTEQ (Phase And Radial Motion in Transverse Electric Quadrupole),它是由美国 LASL 实验室将 PARMILA 程序改造后发展起来的。近几年来,德国 KFA 实验室发展了三个附加的子程序 CULI、IMS、OPTI,以进一步完善和优化 PARMTEQ 的计算<sup>[13]</sup>。

表3 DESY-RFQ 的设计与运行束流性能比较(90% 粒子)

	设计值	测量值
能量 (keV)	750	750
流强 (mA)	19	19
归一化发射度 ( $\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ )	1.0	1.0
束流包络 $\hat{x}(\text{mm})$	2.1	2.3
$\hat{y}(\text{mm})$	1.8	1.5
发射度椭圆参数 $\alpha_x$	2.41	2.04
$\beta_x(\text{cm})$	15.7	16.9
$\alpha_y$	-1.46	-0.68
$\beta_y(\text{cm})$	12.0	4.1
能散 (keV)	10.4	14.3
相散 (deg.)	22.6	29.0

CULI 程序 用于计算极限流强。而它的实际用处,则是给定极限流强  $I_t$ ,  $I_1$ , 反算出在 GB 节末端的最佳参数  $a, m, A, V, B$  和  $r_0$  等。因为如上所述,极限流强出现在束流已被群聚好的 GB 节末端。

IMS 程序 用于计算在 RFQ 入口端即 RM 节始端的接受度椭圆参数  $\alpha, \beta$ 。计算时先选定正常运行束流  $I_0$ 、入射粒子速度和发射度、参数  $r_0$  和  $B$  以及 RM 节内的单元数等。研究计算表明,对较低的人射能量(如 DESY-RFQ,注入质子能量仅为 18 keV,流强 20 mA),选择较短的 RM 节是有利的(如只有 2 个单元,即  $1\beta\lambda = 9\text{mm}$ )。因为较短的 RM 节要求粒子束的最大入射角度较小,即椭圆参数  $\alpha$  较小,如图 11 所示。事实上,对于入射能量较低、流强较高,因而空间电荷排斥力较强的人射束来说,要在 RFQ 入口处形成一个很陡的入射角是相当困难的。而且束流动力学计算表明,较长的 RM 节,无助于 RFQ 出口束流性能的改进<sup>[4]</sup>。

OPTI 程序 用于求得在 SH、GB 和 AC 节中的最佳基本参数。在求得每节中最佳参数的基础上,利用 PARMTEQ 中的子程序 RFQGEN,计算轴上同步粒子的纵向运动,以产生 RFQ 的纵向几何尺寸。然后用另一子程序 RFQDYN,模拟束流在 RFQ 中运动的全过程,计算中计入了非线性高频场和非线性空间电荷场。

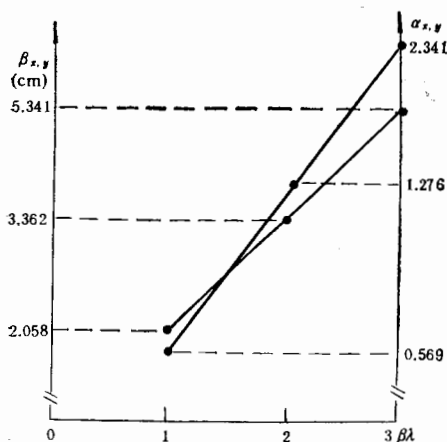


图 11 DESY-RFQ 入口接受度椭圆参数与 RM 节长度的关系

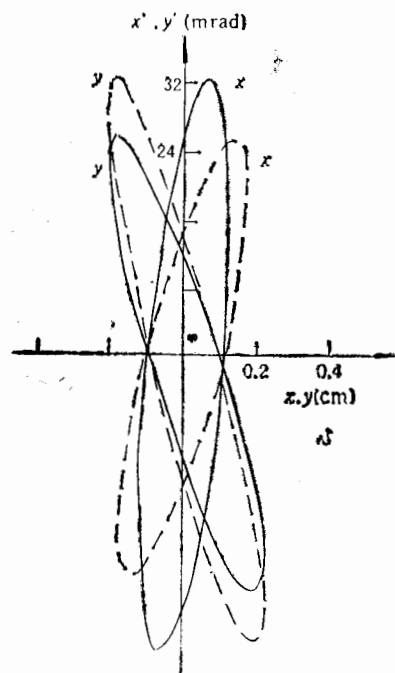


图 12 DESY-RFQ 出口束流发射度  
——实测 ——设计

表 3 比较了 DESY-RFQ 的设计性能和实际运行性能，图 12 比较了在 RFQ 出口设计发射度与实测发射度<sup>[4]</sup>。可见，设计和实测都符合得很好。说明 RFQ 束流动力学的设计计算是相当完善和可靠的。

### 5. 离子源束流与 RFQ 的匹配

RFQ 的特点之一，是可加速很低速的粒子。因此，可直接加速来自离子源的、能量仅几十千伏的离子束。如前所述，在 RFQ 入口处，在  $x-x'$  和  $y-y'$  两相平面上的接受度椭圆几乎相重。如果来自离子源的束流，其发射度在  $x-x'$  和  $y-y'$  两相平面上不相重，则需用四个匹配元件，将束流匹配入 RFQ。由于粒子的速度很低（如 18 keV 的质子， $\beta = 0.0062$ ）空间电荷力又很强，若采用四极磁铁作为聚焦匹配元件，则要求磁场的梯度很高、孔径很大。而采用螺旋线圈作为聚焦和匹配元件较为有利，因为它们无论在  $x$  或  $y$  方向上都是聚束的。如果来自离子源的束流发射度在  $x-x'$  和  $y-y'$  两相平面上基本重合，或加以改造后令其相重，则在离子源与 RFQ 之间的束流运输匹配段上，只需两个螺旋线

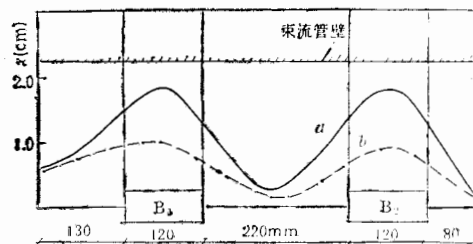


图 13 DESY 离子源与 RFQ 间的匹配段束流包络图

——18keV, 20mA,  $B_1 = 0.467T$ ,  $B_2 = 0.525T$   
 ----18keV, 0mA,  $B_1 = 0.353T$ ,  $B_2 = 0.451T$ ,  
 对应空间电荷中性化的情况

圈就可以实现在 RFQ 入口的束流匹配,因而可缩短运输匹配段的长度,有利于减少非线性空间电荷力在这一区域内引起的径向归一化发射度的增长。图 13 给出了 DESY 的离子源与 RFQ 间的运输匹配段束流包络图。只需调节两螺旋线圈的励磁电流,就可以实现在不同注入流强时的束流匹配,图中  $B_1$ 、 $B_2$  表示两螺旋线圈的位置。

## 五、结 论

RFQ 对于加速低  $\beta$  粒子具有显著的优势: 聚焦、聚束和加速合为一体; 结构简单小巧; 束流传输效率高; 归一化发射度增长很小等。从而使它成为现代最有吸引力的加速器之一。由于国际加速器界对它的深入研究, 使 RFQ 的束流动力学和高频结构有了许多很好的发展。国际上绝大多数实验室已用 RFQ 代替庞大的高压倍加器, 作为高能加速器的预注入器。美国送上太空进行束流试验的第一台加速器, 也是 RFQ 加速器<sup>[1]</sup>。它只有 1 米长, 将 25 mA 的质子束加速到 1 MeV。RFQ 还可用于材料改性, 微电子器件的研究, 离子混熔、退火以及惯性热核聚变等的研究。RFQ 的研究发展, 特别是在加速重离子和可变能量方面, 仍在继续深入之中。

## 参 考 文 献

- [1] I. M. Kapchinskij and V. A. Teplyakov, *Prib. Tek. Eksp.* 119, 19—22. 1970.
- [2] K. R. Crandall, R. E. Stokes and T. P. Wangler, *Proc. of 1979 Linear Accelerator Conf.* 1979.
- [3] 王书鸿, *高能物理与核物理*, 6(1982), 428.
- [4] Wang Shu-Hong, DESY 84—092, 1984.
- [5] L. Smith, *Proc. of 1977 Particle Accelerator Conf.*
- [6] W. D. Kilpatrick, *Rev. Sci. Instr.* 28, (1975), 824.
- [7] R. A. Jameson, *Proc. of 1984 Linear Accelerator Conf.* 1984.
- [8] H. Lancaster, et al, *Proc. of 12th international Conf. on high energy accelerator*, 1983.
- [9] A. Schempp, et al, *Proc. of 1984 Linear Accelerator Conf.* 1984.
- [10] A. Schempp, et al, *Proc. of Ecaro. Part. Acc. Conf, Rome*, 1988.
- [11] Chen Chia-Erh, Fang Jia-Xun, et al, *Proc. on Second Euro. Part. Accel. Conf. Nice, France, June, 1990.*
- [12] A. Schempp, *Proc. of 1988 Linear Accelerator Conf.* 1988.
- [13] R. Lehmann, kfk 334b, 1983.
- [14] Zhang Hua-Sun, DESY PLIN-Note, 1987.
- [15] *Aiation Week and Space Technology*, July 24, 1989.

## RFQ's Beam Dynamics and RF Structure

WANG SHUHONG

*(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)*

### ABSTRACT

The advanced properties of RFQ are commented in this paper. The contribution of the design research on the beam dynamics to these advanced properties is described. Five design limits are given. The main developments of RFQ's beam dynamics and r.f structures in the last 10 years are presented.