

强流RFQ加速器的匹配设计方法研究*

颜学庆¹⁾ 方家驹 郭之虞 陈佳洱

(北京大学物理学院重离子物理研究所 北京 100871)

摘要 模拟计算和束流实验证明不匹配是直线加速器中强流束产生束晕的直接原因. 束晕的产生将导致束流品质下降和束流丢失, 也使得不匹配成为引起束流丢失的主要原因. 为了提高强流RFQ加速器中束流的传输品质和提高传输效率, 在分析了RFQ加速器中束流不匹配的原因之后, 提出了基于常规四部曲方法的匹配动力学设计方法. 该设计方法可以有效地抑制发射度增长和提高束流的传输效率.

关键词 不匹配 束晕 RFQ

1 引言

射频四极场(RFQ)加速器能直接加速从离子源中引出的低能离子, 并将加速、纵向群聚、横向聚焦与匹配等多种功能汇集于一个结构之中, 高效率地将数十毫安、数百毫安乃至安培级的强流离子束加速至几个MeV/核子. 因而适合于高能加速器的注入器及强流中子源等, 甚至成了低能强流加速器的一种通用的前级加速器, 获得了广泛的应用.

RFQ的动力学设计通常采用美国LANL的K.R.Crandall等人提出的“四部曲方法”. 根据同步相位和电极调制的变化将RFQ加速器分成4个部分: 径向匹配段、成形段、微聚束段和加速段^[1]. 为了抑制空间电荷引起的发射度增长和提高加速效率Yamada^[2]和Schempp^[3, 4]在该方法的基础上做了进一步的扩展, 对其中的微聚束段的设计方法进行了优化. 然而这些设计方法并没有考虑束流和其加速通道之间的匹配关系, 这将引起束流包络的大幅度振荡, 从而影响束流的传输品质, 甚至导致束流丢失. 为了抑制束流发射度增长和提高束流的传输效率, 常规设计方法需要调节各个加速单元的结构参数(如孔径 a 、电极调制 m 和相位 ϕ_s 等)来实现. RFQ加速器通常由几百个加速单元构成, 这个调节优化过程非常繁琐; 而且即使能够实现高的传输效率, 由于并没有满足束流匹配条件, 仍然可能造成明显的大幅度束流包络振

荡和发射度增长. 因此本文在分析四部曲方法中束流不匹配的原因之后给出了匹配的匹配动力学设计方法.

2 四部曲方法中的束流失配问题

“四部曲方法”根据同步相位和电极调制的变化将RFQ加速器分成4个部分: 径向匹配段、成形段、微聚束段和加速段. 假设一束流经过径向匹配段之后处于匹配状态, 则满足匹配方程^[5]:

$$\varepsilon_{tn} = \frac{\alpha^2 \sigma_t \gamma}{\lambda}, \quad (1)$$

$$\sigma_t^2 = \frac{B^2}{8\pi} + \Delta - \frac{I\lambda^3(1-ff)}{a^3 b \gamma^3} k. \quad (2)$$

其中 σ 为考虑空间电荷效应后的相移, t 表示横向 x 和 y 方向, ε 是归一化均方根发射度, a 和 b 表示束团的横向和纵向均方根半径(假设束团形状为三维椭球). B 为RFQ加速器中的聚焦系数, λ 为波长, I 为束流流强, $ff \approx a/3\gamma b$ 为束团的形状因子, γ 和 β 分别为相对论因子和相对速度, $k = \frac{3 \times 10^{-6}}{8\pi} \frac{z_0 q}{mc^2}$, $z_0 = 376.73\Omega$.

Δ 表示射频散焦系数, 定义如公式(3). A , V_0 , ϕ_s 分别为加速系数、极间电压和同步相位.

$$\Delta = \frac{\pi^2 q V_0 A \sin \phi_s}{2mc^2 \beta^2 \gamma}. \quad (3)$$

在成形段, 射频散焦系数 $|\Delta|$ 随着纵向加速电场上升而逐渐增加. 而在RFQ动力学设计中通常采用

* 国家自然科学基金(10455001)资助

1) E-mail: X.Yan@pku.edu.cn

恒定的平均孔径和聚焦系数 B , 这使得横向相移减小, 横向聚焦变弱从而使得束流包络不断变大. 从而导致束流和加速通道之间的不匹配(失配), 进而影响了束流的品质和传输效率. 为了减小纵向压缩束团时空间电荷效应引起的发射度增长, 在微聚束段中射频散焦系数 $|\Delta|$ 和束团的长度保持不变以维持束团中空间电荷分布不变. 由公式(2)可知, 在该段聚焦系数 B 取为常量就可以满足束流的匹配条件. 而在之后的加速段, 由于粒子的速度不断增加, 加速系数 A 和同步相位基本为常量, 从而射频散焦系数 $|\Delta|$ 将减小, 而横向相移将不断增加. 这将导致束流失配和束流包络的减小.

以一台 350MHz 质子 RFQ 的动力学设计为例来说明以上过程, 其基本参数见表1. 采用四部曲方法进行设计, 图1给出了该动力学设计的主要参数.

表1 一台质子 RFQ 加速器的基本参数

frequency/MHz	350
input energy/MeV	0.05
output energy/MeV	2.00
peak beam current/mA	50
input emittance [trans., Norm, rms]/(π ·mm·mrad)	0.2
kilpatrick voltage	1.8
focusing factor B	6.1

在 PARMTEQM^[8] 中为图1所示的动力学方案进行了模拟传输计算. 随着横向相移 pat 在成形段中不断减小(如图1所示), 在图2中可以看到束团包络在该段迅速增大. 在微聚束段, 射频散焦系数和横向相移基本为常量, 所以束流包络只是维持小幅度振荡. 而在加速段, 纵向相移迅速减小, 横向相移 pat 则不断增加, 较强的横向聚焦力将引起束流不匹配和不断压缩束团包络. 上面的分析中可以看到, 常规四部曲方法将引起束团和加速结构之间的不匹配, 从而导致束团的大幅度振荡, 将严重影响束流的品质, 也限制了传输效率的进一步提高.

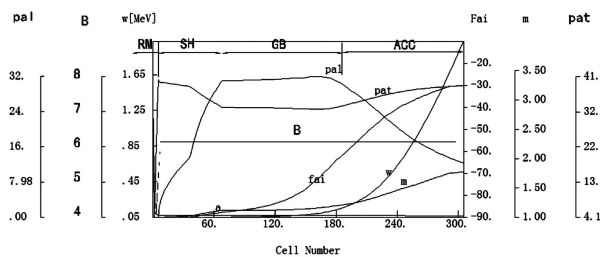


图1 质子 RFQ 加速器的动力学设计参数

I -Radial Matching Section (RM); II-Shaper Section(SS); III-Gentler Bunching Section (GB); IV-Accelerating Section (ACC).

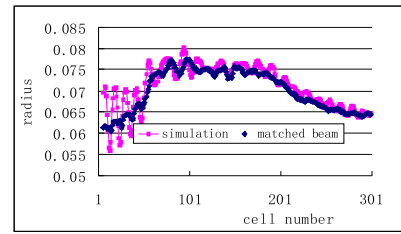


图2 每个单元中的束团包络(matched beam为该动力学设计下的理想匹配束流半径)

3 匹配条件的实现

为了降低 RFQ 加速器中束团包络的大幅度振荡和提高束流传输效率, 需要使束流始终处于匹配状态下. 必须调整参数以维持 RFQ 加速器中每个单元的横向相移不变, 因而聚焦系数 B 的调节需要考虑射频散焦系数和空间电荷效应的影响, 可以根据式(2)进行相应调节. 为此, 修改前面的质子 RFQ 设计方案, 聚焦系数 B 按照图3进行调整. 之后采用 PARMTEQM 进行模拟, 计算结果见图4.

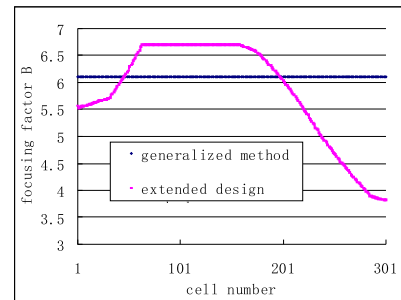


图3 两种方案中聚焦系数 B 和加速单元之间的关系

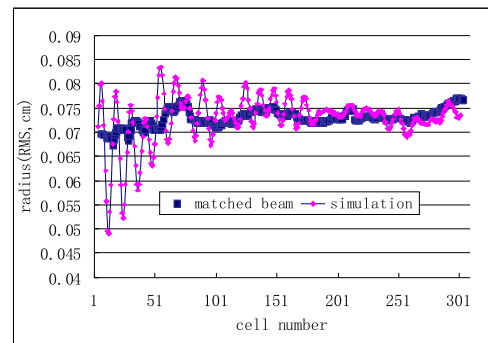


图4 每个单元中的束团包络

在修改后的动力学方案中束团将始终处于近似的匹配状态中, 大幅度的包络振荡完全消失了. 虽然束流在成形段仍然存在着快速的包络振荡, 这是由于纵向运动和横向运动之间的强烈的耦合共振导致的^[7, 8], 由于篇幅有限这里不作详细介绍. 表2中的对比结果说明, 匹配设计方法可以有效地抑制束流的横向发射

度增长. 尽管新方法中纵向发射度要略大于常规四部曲方法, 但是粒子更容易在横向丢失, 所以该方法可以显著地提高束流的理论传输效率.

表 2 两种设计方法的动力学模拟计算结果比较

design method		old	new
synchronous phase/(°)		-90—-30	-90—-30
vane modulation		1—1.8	1—1.8
intervane voltage/kV		75	75
particle number		3000	3000
output	$x/(\pi\text{-mm}\cdot\text{mrad})$	0.220	0.201
emittance	$y/(\pi\text{-mm}\cdot\text{mrad})$	0.221	0.200
$/(N\cdot\text{rms})$	$z/(\text{MeV}\cdot\text{deg})$	0.124	0.135
minimum aperture/cm		0.232	0.235
cell numbers		301	300
beam transmission (%)		96.1%	99.2%
length/m		2.98	2.92

4 结论

由于不匹配是直线加速器中引起束流丢失的主要原因之一^[9, 10], 在分析了常规四部曲方法中束流不匹配的原因, 进而在此基础上引入了束流匹配条件和提出了匹配动力学设计方法. 该设计方法考虑束团包络的几何参数和加速器结构参数之间的关系, 使得束流始终满足横向匹配条件, 以维持束团半径不变或只是缓慢地增加, 以此来抑制束流的发射度增长. 模拟计算表明该方法可以明显提高传输效率和改善输出束流的品质.

参考文献(References)

- 1 Crandall K R, Stokes R H et al. RF Quadrupole Beam Dynamics Design Studies, Proc. 1979 Linear Accelerator Conf. BNL-51134, 205
- 2 Yamada S. Buncher Section Optimization of Heavy Ion RFQ Linac Proc.1981, Linear Accelerator Conf.
- 3 Schempp A. Proc. of EPAC88, 1989, 464
- 4 Schempp A. Proc. of PAC89, IEEE89, CH2669-0, 1989, 1093
- 5 Reiser M. Theory and Design of Charged Particle Beams, Wiley (1994)
- 6 Crandall K R et al. RFQ Design Codes, Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-96-1836 (revised February 12, 1997)
- 7 Jameson R A. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1981, **NS-28**: 2408
- 8 Jameson R A. On Scaling & Optimization of High Intensity, Low Beam-Loss RF Linacs for Neutron Source Drivers, AIP Conf. Prof. 279 1992. 969
- 9 Gluckstern R L. Phys. Rev. Lett., 1994, **73**(9): 1247
- 10 Allen C K et al. Physical Review Letters, 2002, **89**(21): 4082

Matching Design Method for High Intensity RFQ Accelerators*

YAN Xue-Qing¹⁾ FANG Jia-Xun GUO Zhi-Yu CHEN Jia-Er

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

Abstract As the beam envelope mismatch is the major source of the halo formation and the related emittance growth in high intensity linac, some extensions based on the four-step method are developed, and the causes of beam mismatch in RFQ are analyzed and a matching dynamics method is proposed to minimize the emittance growth and the related beam loss. A dynamics example is given to prove this design method.

Key words mismatch, RFQ, halo

*Supported by NSFC (10455001)

1) E-mail: X.Yan@pku.edu.cn