

BPL-RFQ 加速器束流动力学设计研究

罗紫华 王书鸿

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1994-04-13 收稿

摘 要

描述北京质子直线加速器 RFQ 的参数选择及束流动力学设计研究, 给出了 BPL-RFQ 的主要参数。

关键词 RFQ, 束流动力学, 发射度, 传输效率, 匹配。

近十多年来 RFQ 发展十分迅速, 目前世界上的许多中高能质子加速器采用 RFQ 作注入器。北京质子直线加速器 (BPL) 的注入器——750keV 高压倍加器已运行了十多年。1993 年已正式批准建造 BPL-RFQ 来替代它。本文将介绍国内第一台用于加速质子的 BPL-RFQ 动力学设计研究。

1 BPL-RFQ 组成及主要技术要求

BPL-RFQ 系统包括 RFQ 本体、离子源 (IS) 与 RFQ 匹配段以及 RFQ 与漂移管加速器 (DTL) 匹配段三大部分。图 1 是这一系统的示意图。表 1 给出了这台加速器的主要技术要求。

表 1 BPL-RFQ 主要技术要求

粒子种类	质子
工作频率 (MHz)	201.25
注入能量 (keV)	40
出口能量 (keV)	750
注入流强 (mA)	>100*
出口流强 (mA)	>60
束流脉宽 (μ s)	180
重复频率 (Hz)	1, 2, 5, 10, 12.5
注入束流横向归一化发射度 ($\pi, \text{cm} \cdot \text{mrad}$)	<0.2
出口束流横向归一化发射度 ($\pi, \text{cm} \cdot \text{mrad}$)	<0.4
出口束流能散 (keV)	$\sim \pm 25$

* 指 RFQ 采用四杆电极结构时的值。

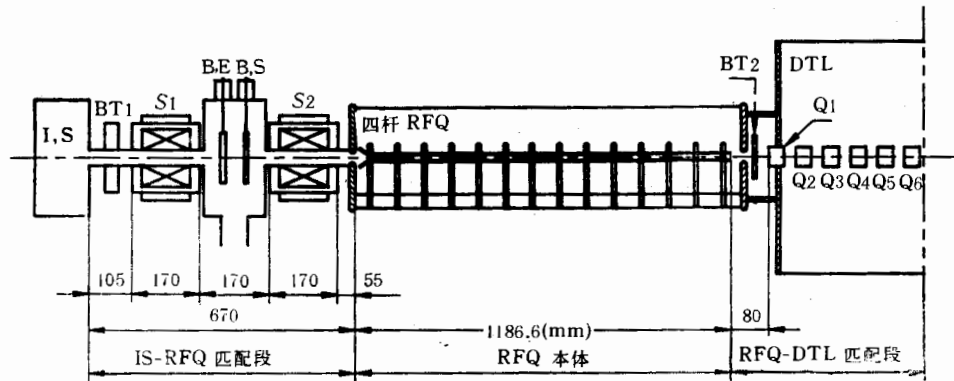


图 1 BPL-RFQ 系统示意图

2 BPL-RFQ 束流动力学设计

2.1 BPL-RFQ 选型及基本参数选择

2.1.1 选型

四翼型和四杆型电极结构 RFQ 均可满足 BPL-RFQ 的技术要求。四翼型结构的特点是束流性能好、束流传输效率高,但其制造加工要求严,造价高、调试较难;四杆型结构则加工容易、调试方便、电极冷却容易,造价约为前者的 $1/5-1/10^{[1]}$,但其束流性能及束流传输效率差些。综合比较后,决定 BPL-RFQ 选用四杆型电极结构。

2.1.2 正常运行束流强度 I_N

正常运行束流强度指 RFQ 正常工作状态下所加速的流强。四翼型 RFQ 的束流传输效率 η_{vac} 一般可高达 90% 左右,四杆型 RFQ 的束流传输效率 η_{rod} 则低些。在同样极顶尺寸的情况下,根据文献 [2] 中所列的实验结果可知,后者的束流传输效率约为前者的 75%—80%。由此可见,要使 RFQ 出口流强达到 60mA,如果采用四杆型结构,其对应的 RFQ 入口流强约为 $60\text{mA} \times (1/0.9) \times (1/0.75-1/0.8) = (89-83)\text{mA}$ 。考虑到留有余地以及束流从离子源传输到 RFQ 时有一定损失,故选取离子源出口质子流大于 100mA。

2.1.3 极限流强 I_{limit}

极限流强指 RFQ 加速器所能加速到的理论最大流强。在 RFQ 设计中,选择合适的极限流强与正常运行流强之比 K_1 ,对于确定合适的 RFQ 几何参数和电参数十分重要。 K_1 选得越大,越能确保获得正常运行束流值。但是, K_1 越大,RFQ 加速流强的裕量越大,故越不经济。一般说来, I_N 越大, K_1 应选得越小。通常 K_1 为 2 左右。经过反复计算表明,对于正常运行流强 100mA 的 RFQ,取极限流强 160mA 比较合适。

2.1.4 注入能量 W_i

注入能量大小直接影响 RFQ 能加速到最终的流强、束流传输效率及发射度增长。一般说来,束流强度越大,所需的注入能量越高,其对应的束流相振荡绝热加速阻尼作用和聚束作用越弱,故所需的整形聚束段的长度越长,RFQ 的总长度越长,即对应的腔

体和电极的长度也越长,所需的高频功率也越多。对于100mA注入流强的201.25MHz RFQ,选择40keV注入能量较为合适。

2.1.5 离子源发射度 $\epsilon_{s,N}$

RFQ加速器要求注入束流的发射度一般都较小,以使束流包络小而能顺利穿过RFQ电极孔,提高束流传输效率。 $\epsilon_{s,N}$ 越小,束流通道孔越小,也有利节省高频功率以及提高加速效率,缩短加速器长度。 $\epsilon_{s,N}$ 主要取决于流强和离子源的几何结构及其电参数。在40kV,100mA下,选取 $\epsilon_{s,N} \lesssim 2\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。这一要求并不苛刻。如CERN-RFQ2,其离子源在100kV 250mA下, $\epsilon_{s,N}$ 为 $1.5\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}^{[3]}$; DESY-RFQ离子源在18kV(50—70)mA下,其85%束流发射度均小于 $1\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}^{[11]}$ 。

2.1.6 RFQ电极表面最大电场 $E_{i,\max}$

$E_{i,\max}$ 与相邻电极电压 V_0 及特征半径 r_0 有如下关系:

$$E_{i,\max} = K \cdot V_0 / r_0 [\text{MV/m}], \quad (1)$$

其中K为电极几何因子,对于理想电极 $K = 1.36$ 。从(1)式可知, $E_{i,\max}$ 越大 V_0 就越大。因此,选择较大的 $E_{i,\max}$ 有利于提高粒子加速率,缩短加速器长度。 $E_{i,\max}$ 应小于击穿场强,才能保证加速器不因高频击穿影响而稳定运行。

击穿场强 E_K 与工作频率关系由Kilpatrick在五十年代得到经验公式[4]:

$$f = 1.64 E_K^2 e^{-8.5/E_K}, \quad (2)$$

式中 f 和 E_K 的单位分别为[MHz]和[MV/m]。对于200MHz而言, $E_K \sim 15\text{MV/m}$ 。这偏于保守,随着加工工艺及真空技术的提高,现在实际达到的击穿场强为上式计算值的1—3倍。CERN-RFQ2取 $E_{i,\max} = 35\text{MV/m}^{[3]}$;美国LBL-RFQ取 $E_{i,\max} = 27\text{MV/m}^{[5]}$ 。BPL-RFQ取 $E_{i,\max} = 24.9\text{MV/m}$,为 $1.67E_K$ 。

2.2 BPL-RFQ束流动力学设计结果

BPL-RFQ本文由四段组成,即开头的径向匹配段(RMS),束团成形段(SHS)、慢聚束段(GBS)和加速段(ACS)。设计中利用了RFQ程序包,它内含CULI,IMS,OPTI,PARH,OUTQ五个程序,功能不一。其中:

CULI——用于计算RFQ极限束流下在GBS末的最佳参数 a (极间孔半径), m (电极调制参数), V_0 , B (横向聚焦参量), r_0 。

IMS——用于计算各种流强下RMS的入口接受度椭圆参数。

OPTI——用于求得SHS,GBS,ACS中的最佳参数。这些参数将直接影响RFQ束流性能及RFQ的长度等。

PARH——用于求得RFQ各单元的几何参数及粒子能量等,并模拟束流在RFQ中运动情况。

OUTQ——用于计算和输出RFQ的主要束流动力学参数(横向和纵向发射度)、束流沿途丢失情况等。

表2和表3分别给出了BPL-RFQ的主要参数和束流性能参数。图2至7给出BPL-RFQ参数沿 z 变化及各种参数(N_{RMS} , B_i , I_N , ϵ_{iN})与束流传输效率的关系以及束流横向发射度增长与 I_N 关系。

表 2 BPL-RFQ 主要参数

注入能量 W_i (keV)	40
出口能量 W_f (keV)	750
同步相位 φ_s (°)	-90—-30
极限流强 I_{limit} (mA)	160
正常流强 I_N (mA)	100
总单元数 N_{TOT}	115
径向匹配段单元数 N_{RMS}	4
横向聚焦参量 B	0.8—6.14
电极调制参量 m	1—1.824
电极孔径 a (cm)	1.962—0.492
最小电极孔径 a_{min} (cm)	0.492
特征半径 r_0 (cm)	0.708
理论电极总长度 $L_{T,T}$ (cm)	118.66
实际电极总长度 $L_{T,A}$ (cm)	117.55
电极最大电场 $E_{s,max}$ (MV/m)	24.9
电极极间电压 V_0 (kV)	130.2
工作频率 f (MHz)	201.25

表 3 BPL-RFQ 束流性能设计参数 (90% 束流)

	入 口	出 口
质子能量 (keV)	40	750
正常流强 (mA)	100	92.2*
* 横向归一化发射度 $\epsilon_{x,N}$ ($\pi \cdot \text{cm} \cdot \text{mrad}$)	0.138	0.258
α_x	1.275	2.483
β_x (cm)	5.619	17.10
x-均方根归一化发射度 $\epsilon_{rms,x}$ ($\pi \cdot \text{cm} \cdot \text{mrad}$)	<0.034	<0.0561
y-横向归一化发射度 $\epsilon_{y,N}$ ($\pi \cdot \text{cm} \cdot \text{mrad}$)	0.134	0.239
α_y	1.39	-1.634
β_y (cm)	5.80	13.19
y-均方根归一化发射度 $\epsilon_{rms,y}$ ($\pi \cdot \text{cm} \cdot \text{mrad}$)	<0.032	<0.054
能散 (keV)	0	±20.9
相散(°)	±180	±27.9
纵向均方根归一化发射度 ($\pi \cdot \text{Deg} \cdot \text{keV}$)	0	<89.6
束流包络 x_{en} (cm)	0.294	0.333
束流包络 y_{en} (cm)	0.291	0.287

* 表示计算中按理想电极考虑的。

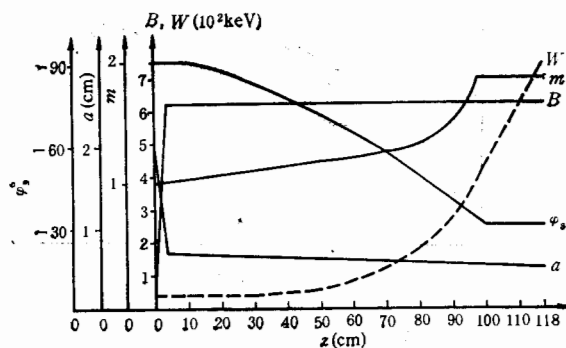
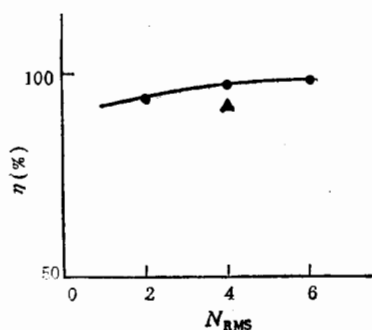
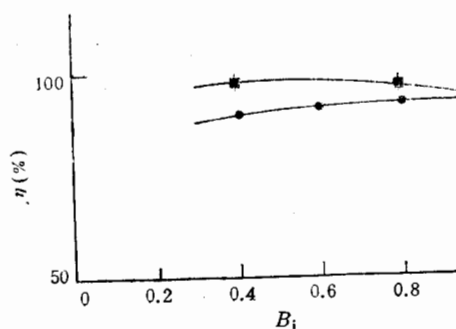


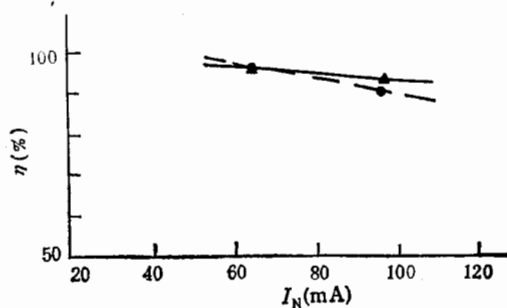
图 2 BPL-RFQ 参数随 z 的变化

图3 $\eta-N_{RMS}$ 曲线

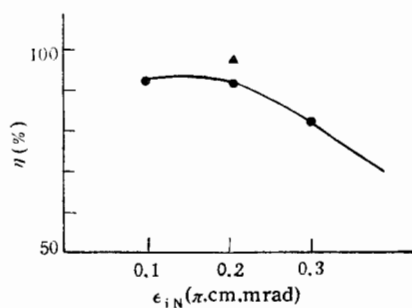
$\epsilon_{iN} = 0.2\pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$, $\blacktriangle B_i = 0.8$, $I_N = 100 \text{ mA}$,
 $\bullet B_i = 0.4$, $I_N = 60 \text{ mA}$.

图4 $\eta-B_i$ 曲线

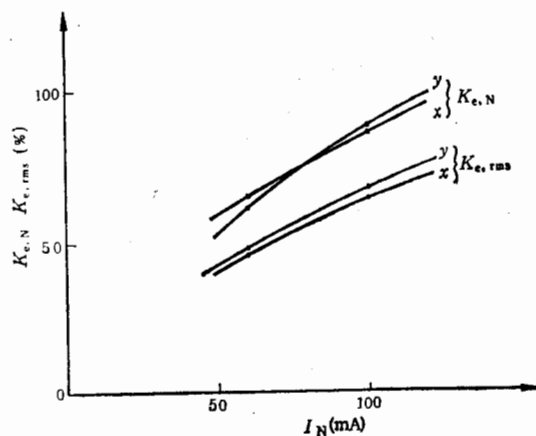
$\epsilon_{iN} = 0.2\pi \cdot \text{cm} \cdot \text{mrad} \cdot N_{RMS} = 4$,
 $I_N = 100 \text{ mA} (\bullet)$, $60 \text{ mA} (\blacktriangle)$.

图5 $\eta-I_N$ 曲线

$\epsilon_{iN} = 0.2\pi \cdot \text{cm} \cdot \text{mrad}$, $N_{RMS} = 4$,
 $B_i = 0.8 (\blacktriangle)$, $0.4 (\bullet)$.

图6 $\eta-\epsilon_{iN}$ 曲线

$B_i = 0.8$, $N_{RMS} = 4$, $I_N = 100 \text{ mA} (\bullet)$,
 $60 \text{ mA} (\blacktriangle)$.

图7 横向发射度增长随 I_N 变化

$$K_{e,N} = \left(\frac{\epsilon_{iN} - \epsilon_{iN}}{\epsilon_{iN}} \right) \times 100\%, \quad K_{e,rms} = \left(\frac{\epsilon_{i,rms} - \epsilon_{i,rms}}{\epsilon_{i,rms}} \right) \times 100\%.$$

BPL-RFQ 动力学设计方案有如下几个特点。首先,束流传输效率高。在正常运行流强 0 和 100mA 时,束流传输效率分别高达 97% 和 92%;其次,选择了较高的入口横向聚焦参量 $B_i = 0.8$, 并取径向匹配单元数 $N_{RMS} = 4$, 这样在四杆电极入口端弯曲度小些,以利电极加工,并从动力学计算表明、有利提高 η ;第三, $E_{s,max}$ 较高, $L_{T,T}$ 较短,电极总长约 118cm。第四,设计的运行流强高达 100mA, 而注入能量较低为 40keV;第五,横向发射度增长较小。在 100mA 40keV 注入下,归一化发射度只增长了约 90%, 均方根归一化发射度增长约 60%。在较低注入能量及较强流强下要做到这一点,也是不容易的。

3 离子源与 RFQ 束流匹配段设计

设离子源出来的束流是连续轴对称束,离子源与 RFQ 之间的束流匹配只需考虑横向运动,并且只需两个匹配元件。这里选用两个螺旋管线圈作为匹配元件,并采用了 CERN-RFQ1 及 DESY-RFQ 上使用的螺旋管结构^[6,7],它的最大磁场 1.0T,孔径 $\phi 4.5$ cm,由 8 个不同直径的线圈饼组成,以形成一个沿轴上分布较为均匀的磁场形态。离子源与 RFQ 之间总长约 67cm,其总体布局及主要元件如图 1 所示。利用计入空间电荷作用的四维 TRANSPORT 程序进行了束流匹配计算,束流包络变化及相应的两个螺旋管磁场 H_{S1} 和 H_{S2} 见图 8。

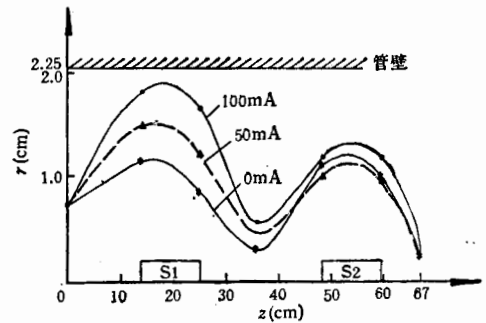


图 8 离子源至 RFQ 的匹配束流包络变化

* $H_{S1} = 0.544T, H_{S2} = 0.641T, \blacktriangle H_{S1} = 0.628T, H_{S2} = 0.763T, \bullet H_{S1} = 0.661T, H_{S2} = 0.791T.$

4 RFQ 与 DTL 束流匹配段设计

RFQ 与 DTL 之间的束流匹配必须兼顾横向和纵向运动两个方向。

4.1 横向运动匹配

利用 DTL 的前 6 个四极磁铁,通过调节它们的磁场梯度,可以实现 RFQ 与 DTL 之间的束流横向匹配。表 4 给出其束流匹配磁场梯度值,图 9 给出匹配束流包络的变化。

表 4 RFQ 与 DTL 匹配磁场梯度值

四极磁铁 H'	H_{Q1}	H_{Q2}	H_{Q3}	H_{Q4}	H_{Q5}	H_{Q6}
允许值 (T/m)	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0
匹配值 (T/m)	80.3	87.1	47.2	43.8	66.5	78.0

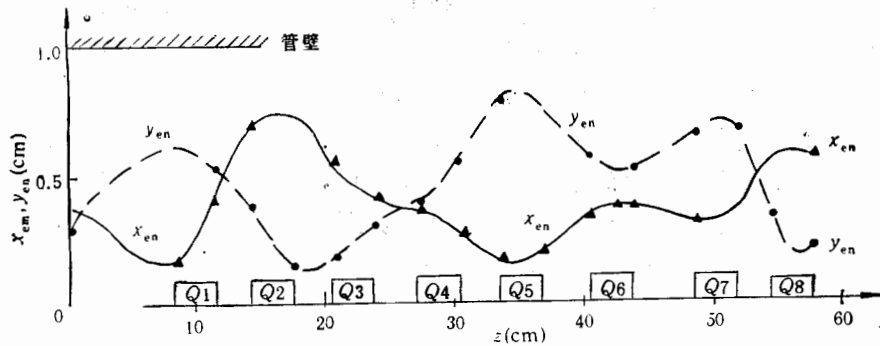


图9 RFQ 出口至 DTL-Q₈ 的匹配束流包络变化

应当指出: 在 DTL 和 RFQ 中束流横向聚焦分别是利用磁聚焦和电聚焦作用来实现的。在确定 RFQ 电极横向安放方式和 DTL 磁极横向安放方式时, 必须考虑到两者作用方向应相吻合。否则, 不可能实现 DTL 与 RFQ 之间的横向匹配, 影响束流传输效率。

4.2 纵向运动匹配

为节省资金, BPL-RFQ 系统不考虑另加 RFQ 与 DTL 间的纵向匹配元件。因此, 严格来讲, RFQ 与 DTL 间不可能真正实现纵向运动匹配。这必将影响 BPL 的束流性能及传输效率。一种补救办法是, 通过合理仔细地选择 RFQ 参数, 以求得 RFQ 出口处的纵向发射度尽可能小, 选择尽可能短的 RFQ 与 DTL 之间距离 d_{RD} (自 RFQ 出口至 DTL 的第一加速间隙中心约 12cm), 使得 RFQ 出来的束流经过这段距离后所产生的附加相散^[8] $\Delta\varphi_{ad}$ 尽可能小。

$$\Delta\varphi_{ad} = \frac{360 \cdot \Delta W_f \cdot d_{RD}}{m_0 c^2 \beta_f^3 \gamma_f^3 \lambda} \quad (^\circ) \quad (3)$$

式中 $\gamma_f = (1 - \beta_f^2)^{-1/2}$, β_f 为粒子相对速度, $m_0 c^2$ (MeV) 为质子静止能量, λ (m) 为高频波长, ΔW_f (MeV) 为 RFQ 出口束流能散, d_{RD} (m) 为 RFQ 与 DTL 距离。

BPL-RFQ 出口束流 100mA 中的 90% 的相散和能散分别为 $\Delta\varphi_f = \pm 27.9^\circ$, $\Delta W_f = \pm 20.9$ keV。此束流经过 12cm 漂移后, 按 (3) 式可得 $\Delta\varphi_{ad} = 10.5^\circ$ 。因此, 束流进入 DTL 的第一加速间隙时的最大相散 $\Delta\varphi_{max} = |\Delta\varphi_f| + \Delta\varphi_{ad} = 38.4^\circ$, 和最大能散 $\Delta W_{max} = 20.9$ keV。它们都小于 DTL 入口的纵向接受度^[9]

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{ac} = |\varphi_s| = 40^\circ \\ \Delta W_{ac} = \sqrt{\frac{2eE_0 T m_0 c^2 \beta_f^3 \gamma_f^3 \lambda}{\pi}} (\varphi_s \cos \varphi_s - \sin \varphi_s) = 81 \text{ keV}. \end{cases} \quad (4)$$

这意味着束团进入 DTL 时其纵向发射度落入接受度内而不损失, 可不必另加纵向匹配元件。

4.3 束流运动模拟

利用 PARMILA 程序模拟了 100mA 束流从 RFQ 出口直至 DTL 加速腔末端的运

动情况。按照 BPL 原来所选的工作路线所对应的四极磁铁磁场梯度值^[9],并将其中前 6 个四极磁铁的磁场梯度值改按表 4 的新匹配值来模拟,结果表明: 98mA 的束流可顺利加速到 BPL 的末端,即传输效率达 98%。这也说明,当 RFQ 紧靠 DTL 时,利用 DTL 中的前 6 个四极磁铁来进行 RFQ 与 DTL 匹配是可行的。

5 四杆型 RFQ 电极设计原则

这里简介从束流动力学来考虑四杆型 RFQ 电极设计原则。当理想形状的 RFQ 电极过渡到四杆型电极(图 10)时,应考虑几点: 第一,先按理想形状电极设计出所需的 RFQ 加速器参数,如 W_f , W_i , a , m , r_0 , N_{TOT} , L_c (加速单元长度)等; 第二,应维持理想形状电极下得到的 a , m , r_0 , N_{TOT} , L_c 不变; 第三,选择合适的电极半径系数 f_r , 使非理想形状的四杆型电极所引起的高阶势函数系数尽可能小, 即对动力学参量的影响尽可能小。这里的 f_r 与四杆电极中心轴距离 R_0 满足关系式

$$R_0 = (f_r + 1)r_0. \quad (5)$$

通常取 f_r 约为 1; 第四,高阶势函数对束流能量的影响,可以通过改变运行的高频功率,即改变极间电压 V_0 来调节。

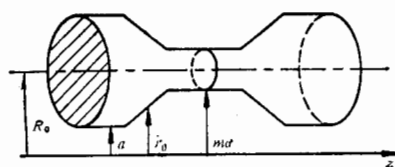


图 10 四杆型电极形状之一

6 小 结

围绕 BPL-RFQ 束流动力学设计研究,描述了该加速器的设计思想,设计步骤和方法,参数选择方法,以及提出了四杆型 RFQ 电极设计原则。本文所给出的 BPL-RFQ 参数以及 RFQ 与 DTL 匹配参数,经过了多粒子模拟程序检验,因此是可靠的,有着实际应用价值。现在 BPL-RFQ 已按本设计的参数进行设备加工。

参加 BPL-RFQ 工作的同志,曾对本设计研究进行反复的、十分有益的讨论,作者对此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] A. Schempp et al., *N. J. M.*, **B10/11**(1985).
- [2] A. Schempp et al., *Proc. of 1988 European Part. Acc. Conference*, 1988.
- [3] C. Biscari et al., *Proc. of 1984 Linac Conf.*, 1984.
- [4] D. T. Warner et al., *Proc. of 1976 Proton Linac Conf.*, 1976.
- [5] R. A. Gough. *Proc. of 1984 Linac Conf.*, 1984.
- [6] E. Braunersreuther, *PS/LI/Note 82-5*, 1982.
- [7] Wang Shuhong. *DESY 84-092*, 1984.
- [8] 罗紫华, *高能物理与核物理*, **6**(1982)507.
- [9] 王书鸿、罗紫华、罗应雄,《质子直线加速器原理》,原子能出版社,1986年.
- [10] 罗紫华、王书鸿, *高能物理与核物理*, **12**(1988)793.
- [11] 张华顺, *HERA 工程用 H⁻ 离子源、低能输运段、发射度测量仪的调整与 RFQ 束性能的测试*, 1988.

Design and Study of Beam Dynamics for the BPL-RFQ

Luo Zihua Wang Shuhong

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

Received 13 April 1994

Abstract

The choices of parameters and design study of beam dynamics for the BPL-RFQ are described in this paper. And the basic parameters of the BPL-RFQ system have been also given.

Key words RFQ, beam dynamics, emittance, transmission efficiency, match.