

分段共振耦合 RFQ 场调谐方法研究*

傅世年

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 强流质子加速器需要采用分段共振耦合 RFQ 作为其低能加速结构,为减少束流损失,RFQ 加速器必须达到所要求的场分布.针对共振耦合结构的特殊性,在 RFQ 传输线模型的理论基础上,在一台 RFQ 冷模型上进行了场调谐的实验研究,获得了满意的实验结果.同时,也验证了作者用 LabVIEW 编写的 RFQ 场调谐程序的正确性.

关键词 RFQ 加速器 场调谐 传输线模型

1 引言

在国家“973 计划”的支持下,我国正在开展强流质子直线加速器低能段的研制.其中,建造一台强流 RFQ 加速器是十分重要的任务,它是强流质子加速器的一项关键技术.目前国际上开展强流质子加速器研制的实验室,无不把它作为建造大型质子直线加速器的前期技术攻关课题.RFQ 作为强流质子加速器的低能加速结构,能对来自离子源的低能强流束同时进行聚焦、聚束和加速,并且其结构本身又很紧凑,这一切,十分有利于克服强流束中的空间电荷效应.因此,加速器专家认为,正是由于 RFQ 加速器的发明和技术发展,才使得半个世纪前人们梦想的强流质子加速器在不远的将来能得以实现.

但是,强流 RFQ 加速器技术本身也是非常困难的.为严格控制束流损失和束流发射度的增长,束流动力学对 RFQ 的高频场分布的均匀性和有害模式分量的大小制定了苛刻的设计指标,因而对 RFQ 的加工和安装公差提出了很高的要求.而另一方面,RFQ 其后的 DTL 或 CCDTL 加速器还要求 RFQ 能输出较高的能量,这就需要采用较长的 RFQ 加速器.由关系式:

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{1}{12} \left(\frac{1}{\lambda} \right)^2 \frac{\delta g}{g} \quad (1)$$

可知,由于 RFQ 翼间距的误差 $\frac{\delta g}{g}$ 所引起的翼电压变化 $\frac{\delta V}{V}$,是和 RFQ 的长度 l 与波长 λ 之比的平方成正比的,长的 RFQ 必然会要求更低的加工和安装公差,以致于在工程上很难

2002-01-15 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目基金(G1999022600)和中国科学院百人计划经费资助

达到. 比如,一台能量为 5MeV 的 RFQ 加速器,采用 352MHz 的频率,如要求场分布的均匀性好于 2%,则由(1)式,翼间距的误差不得大于 $3\mu\text{m}$. 这对于需要加工、焊接、安装等若干工序的高导无氧铜腔体说来,的确是一个难以达到的要求.

L. Young 提出的分段共振结构可以有效地解决高能量 RFQ 的这个难题^[1]. 一台长 RFQ 加速器被分成几个短段,然后通过各段翼端之间的电容使它们在高频上耦合起来. 结果,整台加速器的场稳定性与一段的基本一样. 这种新方法的提出使得人们可以建造较高能量的长 RFQ 加速器. 采用这种结构,目前,美国 Los Alamos 国立实验室已经为其加速器产氚项目 APT 建成一台能量为 7MeV 的 RFQ, CW 流强达 100mA^{-2} . 另外,法国^[3]、意大利^[4]、韩国^[5]也正在建造这种结构的 RFQ 加速器. 我国也将采用这种先进的结构来建造洁净核能项目中的强流 RFQ 加速器.

加工出来和安装后的 RFQ 仍然会有一些误差,为消除它的影响,沿加速器要安装一些调谐器. 调谐器要尽量地多,以便更容易达到符合要求的场分布. 比如,在 Los Alamos 那台 8m 长的 RFQ 上,调谐器多达 128 个. 为指导场的调谐,L. Young 编写了 RFQ 的调谐程序 RFQTUNE,利用这个程序给出的调谐器插入深度,经过几个循环,使场达到了设计指标. 但不同于 Los Alamos 编制的其他 RFQ 程序,该调场程序并不对外发表. 因此,有必要自己编写程序,并进行 RFQ 冷模高频测量实验,以便研究调场方法和验证调谐程序的正确性. 为此,我们在 LabVIEW 平台上编写了 RFQ 高频测量和调场的分析程序^[6]. 本文将着重介绍我们利用该程序,研究场调谐方法方面的工作. 首先,简要描述分段共振 RFQ 的传输线模型,然后给出冷模实验的结果,并用传输线模型对比解释实验结果,指出正确的场调谐方法.

2 分段共振 RFQ 的传输线模型

采用集中参数的传输线模型来研究四翼型 RFQ 的公差对工作模的影响是一种实际而有效的方法. 这是因为,虽然我们可以通过 3D 程序,如 MAFIA,来模拟 RFQ 腔体,但由于需要采用精细的网格才能获得有意义的结果,计算机的模拟时间将会变得太长,因而实际上难以对误差问题做出系统的研究. 为此,人们发展了 RFQ 的传输线模型来描述分段耦合 RFQ 的高频电压传输特性^[7]. 对于一段均匀 RFQ 的四极模,其传输线模型如图 1 所示. 翼间电压 V 和翼上的纵向电流 I 满足方程

$$\frac{\partial V}{\partial z} = -j\omega LI(z), \quad (2)$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -\left(j\omega C_0 + \frac{1}{j\omega L_0}\right)V(z), \quad (3)$$

其中 L 是单位长度的耦合电感,它与翼上的纵向电流相关; C_0 是并联分路上单位长度的电容; L_0 是并联分路上的积分电感,它们是由 RFQ 腔的横截面形状决定的. 由方程(2)和

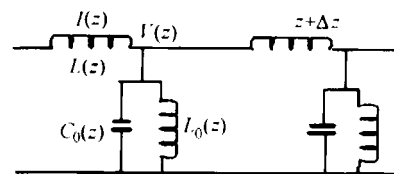


图 1 四翼型 RFQ 四极模的传输线模型

(3) 可得翼电压的波动方程

$$\frac{d^2 V}{dz^2} + k^2 V(z) = 0, \quad (4)$$

此处, 色散关系为

$$\omega^2 = \omega_0^2 + \frac{k^2}{LC_0}, \quad (5)$$

其中 $\omega_0^2 = \frac{1}{C_0 L_0}$ 是腔的截止频率. 方程(4)的解可用传输矩阵的形式写为

$$\begin{bmatrix} V \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kz & \frac{1}{k} \sin kz \\ -k \sin kz & \cos kz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V'_0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

它描述 RFQ 的工作模及其四极高次模的电压沿加速器的分布.

以上得到的只是一段均匀 RFQ 的传输矩阵, 而考虑分段时, 还必须给出实际 RFQ 端部底切以及段之间耦合单元的传输矩阵. 具有底切的端部传输矩阵为

$$M_{\text{end}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \xi(\kappa - x) & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

而耦合单元的传输矩阵为

$$M_c = \begin{bmatrix} 1 & -l\beta/x \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

上两式中, $x = \frac{\omega^2}{\omega_0^2}$, $\beta = \frac{\omega_c^2}{\omega_0^2}$, $\kappa = \frac{\omega_c^2}{\omega_0^2}$, $\xi = \frac{4\pi^2 C_c}{\lambda^2 C_0}$, l 是一段 RFQ 的长度, ω_c 是耦合频率 (不是耦合单元的共振频率, 还与 RFQ 的 C_0 相关), ω_c 是端部底切的共振频率, C_c 是端部电容. 这样, 当一台 RFQ 是由 N 段均匀 RFQ 共振耦合而成时, 整台 RFQ 的电压传输特性应该用它们的总装配矩阵描述:

$$M = M_{\text{end}} \cdot M_{\text{RFQ}} \cdot (M_{\text{end}} \cdot M_c \cdot M_{\text{end}} \cdot M_{\text{RFQ}})^{N-1} \cdot M_{\text{end}}. \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} V \\ V' \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} V_0 \\ V'_0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

而这台耦合 RFQ 四极模的本征模式由其两端的边界条件 $V'_0 = V' = 0$ 确定. 该条件实际上是要求 M 的元素 $M_{21} = 0$. 由此, 可解出各阶四极模的本征频率, 再把求解得到的各本征频率代入(10)式, 便可得到各阶模式的电压沿整台 RFQ 的变化规律. 同样方法, 运用分段共振耦合 RFQ 的传输线模型, 人们还可以研究二极模的本征模特性.

重要的是, 该模型不仅可以描述各阶本征模性质, 还可以直接用来研究各种微扰对本征模的影响, 这种微扰是指分段共振 RFQ 中, 各段之间、段与耦合单元之间或与端部底切之间的失谐扰动, 而这些情况, 正是这种结构的 RFQ 加速器 RF 调谐中所特有的难题. 弄清这些微扰对整台 RFQ 加速器场分布的影响, 对于正确指导调场过程是十分有益的.

我们以一台三分段的 RFQ 为例, 说明微扰的影响. 当它的第一段因为频率偏高而失谐, 由以上方法, 得到其场分布如图 2(a) 所示. 这与文献[8]中 Los Alamos 国立实验室的 LEDA RFQ 的实验结果是相符合的. 在 LEDA 的实验中, 第一段 RFQ 的频率由于温度误差

使其频率升高,文献[8]中图 4 所测得的场分布特性与本文图 2(a)完全一致.我们注意到,在图 2(a)中,频率偏高的第一段的场具有正的二阶导数,而二、三段中的场的二阶导数为负值,这符合我们在文献[6]给出的关系式: $\Delta f \propto V''$.二、三段频率偏低是因为本征频率由于第一段频率升高而升高的原因.图 2(b)是第三段频率偏高的情况.比较图 2(a),(b)两图可见,根据场在各段中上升或下降的趋势,人们可以直观地判断耦合共振 RFQ 中场倾斜的产生原因.

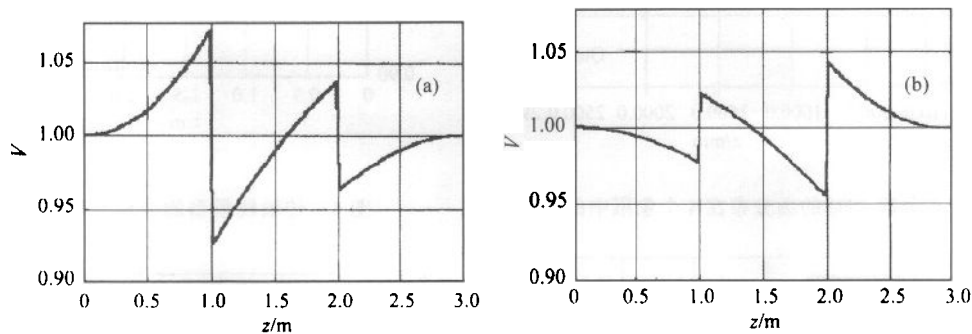


图 2 三分段共振耦合 RFQ 中,第一段频率偏高时(a)和第三段频率偏高时(b),传输线模型给出的场分布

3 调场方法研究

为了确定正确的调场方法,人们通常在加工 RFQ 加速器之前,要做一台具有相同射频特性(但不一定要具有相同尺寸)的 RFQ 冷模,来进行射频测量和调谐研究.在 LNL,几年前建造了一台铝模 RFQ,它分三段,每段 1 米长.为了 RF 调谐和调整场分布,每段上设置了 12 个调谐器,分布在四个象限上.在场调谐程序的指导下,通过调整调谐器,使各段中的场分布平整,但是,要达到三段整体的场平整,却一直是一个困难的任务.

下面,我们着重研究由于端部低切的共振频率偏离 RFQ 的共振频率所引起的场跃变问题,这是我们在 RFQ 冷模实验中所面对的一个主要难题.图 3 是这台三分段 RFQ 的场沿加速器的分布测量结果,它显示在分段处,各象限中的场有一阶梯式跃变.为了分析产生这种结果的原因,我们采用以上的传输线模型,使第一段 RFQ 结尾处的底切端部的共振频率 ω_c 高于 RFQ 的共振频率 ω_0 ($\omega_c = 1.05\omega_0$),而第二段 RFQ 头部底切的共振频率低于 ω_0 ($\omega_c = 0.95\omega_0$),并且,在第二段 RFQ 和第三段 RFQ 之间,也有同样的频率偏离,结果产生出分段之间的场分布台阶,如图 4 所示.这与图 3 的测量结果一致,说明实验测量中产生的台阶是由于底切处的加工与安装有误差.为了消除这些台阶,可以通过 RFQ 调谐来实现.我们降低了第一段 RFQ 的共振频率,同时,等量地升高了第三段的频率,测量结果如图 5 所示,这与传输线模型给出的模拟结果完全一致(见图 6).而这样的结果,与对一般非耦合腔的调谐方法得到的结果正好相反.

在这台 RFQ 冷模的调谐实验中,当得到图 5 的结果后,我们继续进行调谐使场调平,最后,得到了这台 RFQ 迄今为止最好的场分布,其结果如图 7 所示.从图 7 可见,段之间

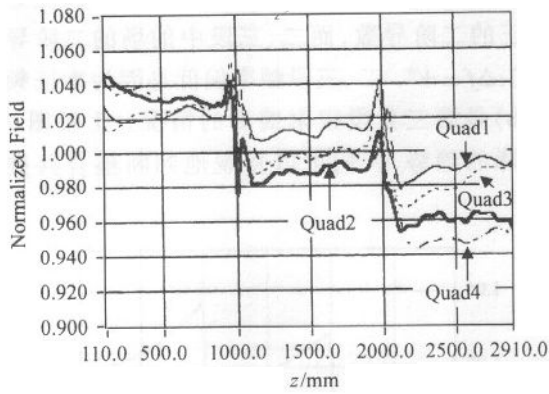


图 3 三分段 RFQ 的场分布在 4 个象限中的测量结果

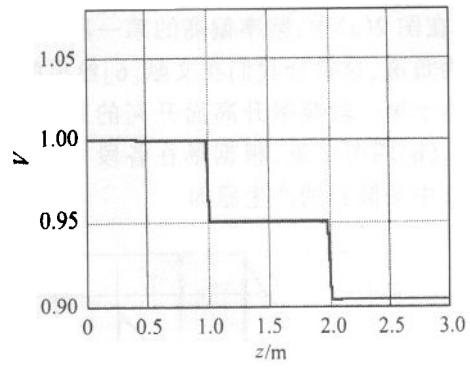


图 4 传输线模型的分析结果

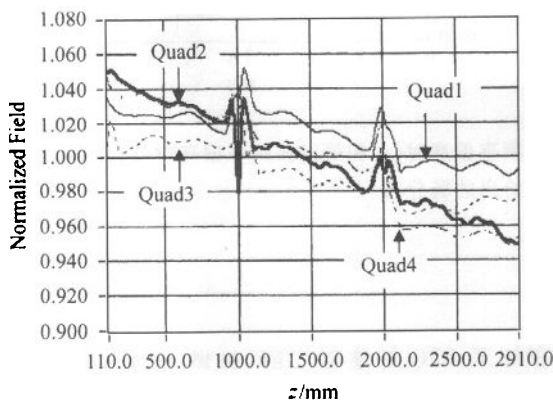


图 5 在图 3 的情况下,降低第一段频率,同时升高第三段的频率

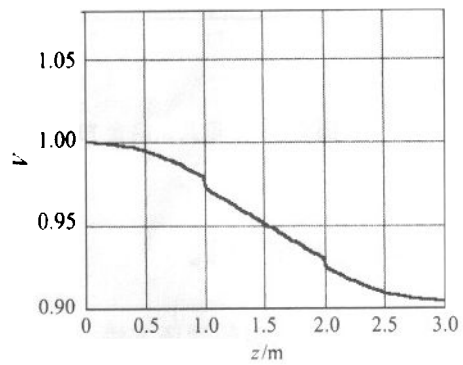


图 6 传输线模型模拟图 5 中的频率变化

的场阶梯基本上已经消除,除第四象限外,场分布的平整度大约在 $\pm 2\%$ 。实际上,还可以使第四象限的场更平整,由于调谐器的活动范围的限制,而没能得到更好的结果。当然,

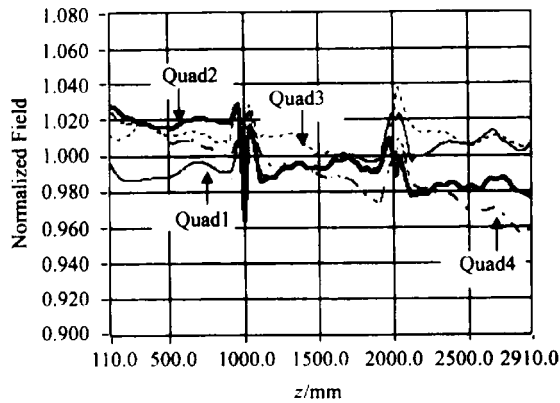


图 7 冷模 RFQ 调谐的最后结果

最好的办法应该是直接加工端部底切(因耦合板上未预留调谐块),使其频率回到 RFQ 的共振频率上来。

根据以上冷模调谐经验,我们认为,在建造实际 RFQ 加速器时,应该首先通过调谐器,使 RFQ 各段的频率分别调谐到设计值上,然后将它们耦合连接起来。为避免直接加工端部底切,可在易于装卸的耦合板两面设计两个调谐块,通过调谐块的几次“cut and try”,便可把端部频率调到设计值

上来,这样就能比较好地解决各段之间场跃变的难题.

4 结束语

本文采用冷模实验与传输线理论相结合的方法,对分段共振耦合 RFQ 的调谐问题进行了研究,分析了一些微扰对这种 RFQ 加速器场分布的影响,指出了正确的调谐方法,在意大利 LNL 的三分段 RFQ 冷模调谐中获得了迄今为止最好的实验结果.同时,也验证了作者用 LabVIEW 编写的 RFQ 场调谐程序的正确性.这些工作对于我们在高能所将要建造的强流 RFQ 具有重要的指导意义.

作者对意大利 LNL 的同事 Pisent 博士、Lamanna 博士等的愉快合作与支持表示真挚谢意.

参考文献 (References)

- 1 Young L. An 8-meter-long Coupled Cavity RFQ Linac. Proceedings of the Linear Accelerator Conference, 1994, 178
- 2 Young L. High Power Operation of LEDA. Proceedings of the Linear Accelerator Conference, 2000, 336—340
- 3 Beauvais P-Y, Bogard D, Ferdinand R et al. Status Report on the Saclay High-intensity Proton Injector Project (IPHI). Proceedings of EPAC, 2000, 283—285
- 4 Comunian M, Pisent A, Lamanna G. TRASCO RFQ Design. Proceedings of EPAC, 2000, 927—929
- 5 Han J, Kim K, Kim Y et al. A 350MHz CW RFQ Linac for the KOMAC/KTF. Proceedings of EPAC, 2000, 812—814
- 6 FU Shi-Nian. HEP & NP, 2002, 26(7):735 (in Chinese)
(傅世年. 高能物理与核物理, 2002, 26(7):735)
- 7 Pisent A. Equivalent Lumped Circuit Study for the Field Stabilization of a Long Four-Vane RFQ. Proc. of 1998 Linear Accelerator Conference, 1998, 968—970
- 8 Young L, Rybarcyk L. Tuning the LEDA RFQ 6.7MeV Accelerator. Proc. of Linear Accelerator Conference, 1998, 270—272

Study on the Field Tuning Method of a Resonantly Coupled RFQ^{*}

FU Shi-Nian

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

Abstract Resonantly coupled RFQ is commonly used as the low-energy accelerating structure for an intense-beam proton linac. It is essential that the field distribution meets the design requirement in order to minimize the beam losses. Based on the RFQ transmission line model, a study on the field tuning was conducted on the cold model RFQ, focusing on the characteristics of the resonantly coupled RFQ structure. A satisfactory result was achieved in the field stabilization, and it also demonstrated the validity of the RFQ tuning code on the platform of LabVIEW.

Key words RFQ accelerator, field tuning, transmission line model

Received 15 January 2002

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G1999022600) and 100 Talents Programme of CAS