

强流 RFQ 的稳定性设计研究*

欧阳华甫¹⁾ 傅世年 关遐令 许文武

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 对强流 RFQ 耦合间隙的确定、二极模稳定杆的设计进行了详细的研究和讨论. 利用现有的 RFQ 冷模, 进行了本征模频率的测量、场分布的调试和测量、二极模稳定杆的试验. 并通过与模拟结果的比较, 验证了模拟程序在 RFQ 腔体设计中的可靠性. 同时, 对影响 RFQ 稳定性设计的物理进行了有益的探讨.

关键词 RFQ 耦合间隙 二极模稳定杆 稳定性加速结构

1 引言

用于洁净核能系统(ADS)的四翼型射频四极子加速器(RFQ)其工作频率为 352.2MHz, 它将离子源出来的脉冲流强为 50mA 的束流从 75keV 加速至 3.5MeV, 平均流强为 3mA. RFQ 的长度为 4.75m, 约为 RF 波长(约为 85.18cm)的 5.57 倍. 对于这么长的加速结构, 传统的非分段的 RFQ 显然是不可行的. 这是因为加速模(TE_{210})和与之相邻四极模(TE_{211})之间的频率间隔与 RFQ 长度的平方成反比关系^[1], 同时加速模和相邻四极模之间的频率间隔大小直接影响 RFQ 的稳定性. 为克服以上加速结构长的缺陷, 美国 Los Alamos 实验室的加速器专家首次提出了 RFQ 的分段共振耦合概念, 并应用到实际 RFQ 的设计和建造中^[2,3]. 对 RFQ 分段, 一方面可以增大加速模和相邻四极模之间的频率间隔; 另一方面, 分段所分化出来的部分耦合模式的频率可以低于加速模的频率, 为进行补偿性加速结构或稳定性加速结构设计^[4]创造了条件. 就我们的 RFQ 而言, 就是将 4.75m 长的 RFQ 分为 2 段(每段由两节组成), 这样, 可使加速模式和相邻四极模的频率间隔增大一倍. 段、段之间的耦合是通过隔

开相邻段的金属耦合板及相邻段电极头之间的微小间隙来实现的. 金属耦合板保证了 RFQ 一段中的磁场不能进入另一段. 位于耦合板中央的开孔可使相邻段的电极头几乎相接触, 相邻段电极头之间特意空出的这一微小间隙起着电容的作用, 为相邻段提供 RF 耦合. 调节耦合间隙的宽度, 可以改变工作模和与之相邻的左右两个四极模之间的频率间隔, 并使之相等. 由微扰理论^[5]可知, 这时, 加速结构对机械加工、焊接等过程中产生的各种误差不敏感, 即加速结构的稳定性最好. 这就是所谓的补偿性加速结构或稳定性加速结构设计.

事实上, 影响 RFQ 稳定性的因素除了与工作模相邻的其他四极模外, 还有与工作模相邻的二极模(TE_{11n})系列. 如果在工作四极模中含有二极模的成分, 将破坏 RFQ 工作四极模场分布的对称性, 其对束流传输效率的影响甚至比相邻四极模还大. 但是, 以上所述的 RFQ 分段耦合的设计只是针对相邻四极模的影响进行的, 对相邻二极模的影响并未考虑. 因此, 在 RFQ 设计时, 必须采取措施减小与工作模相邻的二极模的影响, 确保场分布的对称性. 目前主要采用翼耦合环^[6](vane coupling ring), PI 模稳定环^[7](PI-mode stabilizing loops)和二极模稳

2003-10-17 收稿

* 国家 973 能源领域课题(G1999022604)资助

1) E-mail: ouyanghf@mail.ihep.ac.cn

定杆^[3](dipole mode stabilizer rods)来压制二极模. 翼耦合环现在已极少采用, 后二者则各有利弊. 拟采用二极模稳定杆, 就是在 RFQ 的入口端板、耦合板及出口端板上各安装 4 根与束线平行的金属杆. 二极模稳定杆在板上的位置需通过模拟计算确定, 以确保二极模稳定杆对工作四极模的频率及场分布没有影响, 而对二极模的频率和场分布有很大的影响. 这样, 就可以通过调节杆的长度, 让相邻二极模远离工作模, 从而减小甚至消除二极模的影响.

由于 RFQ 的极间电压设计成沿轴线不变, 所以必须确保 RFQ 沿轴线方向上各处的局域频率相同. 在进行 RFQ 端部单元和耦合单元设计时, 端部单元和耦合单元的谐振频率等于 RFQ 的截止频率 (351MHz). 截止频率与工作频率相差的 1.2MHz 由调谐器来调整. 由于端部单元、耦合单元及调谐器等的存在破坏了 RFQ 在轴线方向的对称性, 因此必须用 MAFIA 和 HFSS 等三维程序设计以上部件. 在文献[8]中已用 MAFIA 对端部单元、耦合单元、调谐器等进行了设计, 这里主要讨论耦合间隙的选取及二极模稳定杆的设计, 使用的模拟程序则为 HFSS.

2 耦合间隙的确定

由于 RFQ 电极间的电压设计为沿轴线(束线)方向不变, 对工作模(${}^0\text{TE}_{210}$)而言, 耦合间隙之间不存在电容, 所以耦合间隙的存在并不影响工作模的频率和 RF 场分布. 但正如在引言中提到的那样, 通过调节耦合间隙的宽度可以改变与工作模相邻的四极模的频率, 最终使工作模与其左右相邻的两个四极模的频率, 最终使工作模与其左右相邻的两个四极模之间的频率间隔相等, 以达到最优化设计. 就我们的由两段组成的 RFQ 而言, 与工作模左右相邻的两个四极模分别为 TE_{210} 的 π 模 (${}^\pi\text{TE}_{210}$) 和 TE_{211} 的 0 模 (${}^0\text{TE}_{211}$). 模拟发现, 当耦合间隙的宽度 $g = 1.8\text{mm}$ 时, ${}^\pi\text{TE}_{210}$, ${}^0\text{TE}_{210}$ 之间的频率间隔与 ${}^0\text{TE}_{210}$, ${}^0\text{TE}_{211}$ 之间的频率间隔基本相等. 表 1 给出的是无二极模稳定杆时 RFQ 中前 5 个本征四极模与本征二极模的频率和 Q 值. 表中工作模的频率小于工作频率 352.2MHz 是因为模拟精度尚不够高, 但这对本征模之间的频率间隔影响可以忽略. 从表中可以看出 ${}^0\text{TE}_{210}$, ${}^\pi\text{TE}_{210}$ 之间的频率之差为 3.102MHz, 而 ${}^0\text{TE}_{211}$, ${}^0\text{TE}_{210}$ 之间的频率之差为 3.135MHz, 二者基本相等. 因此对四极模来说, 已

达到了最佳设计. 但从表 1 中二极模的分布来看, 与工作模相邻的两个二极模 ${}^0\text{TE}_{111}$ 和 ${}^\pi\text{TE}_{111}$ 与工作模之间的频率间隔分别只有 1.176MHz, 1.343MHz. 同时也注意到, 与工作模相比, 二极模的 Q 值并不小. 因此, ${}^0\text{TE}_{111}$ 和 ${}^\pi\text{TE}_{111}$ 模对 RFQ 的稳定性工作是一个极大的威胁. 这也是必须采用二极模稳定杆的原因.

表 1 无二极模稳定杆时 RFQ 中前 5 个本征四极模与本征二极模的频率和 Q 值

四极模	频率/MHz	Q 值	二极模	频率/MHz	Q 值
${}^\pi\text{TE}_{210}$	349.010	8013	${}^\pi\text{TE}_{110}$	343.392	8787
${}^0\text{TE}_{210}$	352.112	9362	${}^0\text{TE}_{110}$	344.493	9019
${}^0\text{TE}_{211}$	355.247	7790	${}^0\text{TE}_{111}$	350.936	7169
${}^\pi\text{TE}_{211}$	357.781	7588	${}^\pi\text{TE}_{111}$	353.455	7281
${}^\pi\text{TE}_{212}$	371.303	5376	${}^\pi\text{TE}_{112}$	367.427	5260

另外, 在图 1 中给出了工作模的归一化 RF 电场沿 RFQ 轴向的分布. 除了端部间隙(端部间隙约为 1cm)处场有较大的降幅处, 场的平整度约为 1.2%, 满足束流动力学对场的平整度要求. 场的平整度定义为 $(E_{\max} - E_{\min})/E_{\max}$. 场非常平整从另一方面反映了端部单元、耦合单元的谐振频率确实等于 RFQ 的截止频率. 在耦合间隙处, 场也理应有较大的降幅, 但因程序在 RFQ 轴向方向划分的网格尺寸大于耦合间隙的尺寸, 故该处场的幅度的变化未能显示出来.

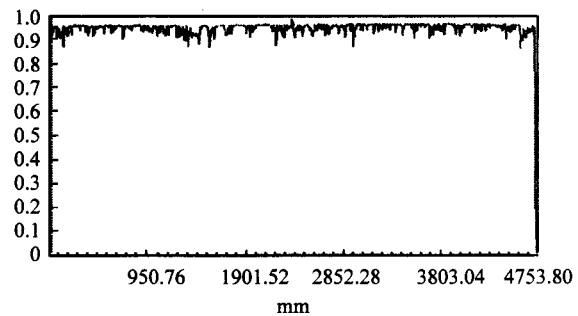


图 1 无杆时, 工作模的归一化电场幅值沿 RFQ 轴向的分布

3 二极模稳定杆的确定

二极模稳定杆的形状为圆柱形, 其直径的选取应满足以下两点: 一是不能太大, 否则容易对工作四极模产生影响; 同时必须满足机械和水冷的要求; 其

直径一般在 10mm 到 20mm 之间选取, 这里取 15mm. 稳定杆在端板、耦合板上的安装位置则必须通过程序模拟计算确定, 以确保稳定杆对工作四极模的频率和场分布没有影响. 因此, 根据 Slater 的微扰理论^[4]可知, 稳定杆应处于对 RF 电场和磁场微扰作用相同的地方. 显然, 该位置在与电极中心线成 45° 角的某个地方. 如果不考虑端部单元和耦合单元对 RFQ 轴向对称性的影响, 则可用 SUPERFISH 模拟如图 2 所示的 RFQ 八分之一象限求解. 当稳定杆位于距离中心 $r = 42.3\text{mm}$ 处时, RFQ 的截止频率为 350.98MHz, 与无杆时 RFQ 的频率仅相差 0.02MHz. 因此可以认为在模拟计算误差范围内, 二极管稳定杆对工作模的频率没有影响.

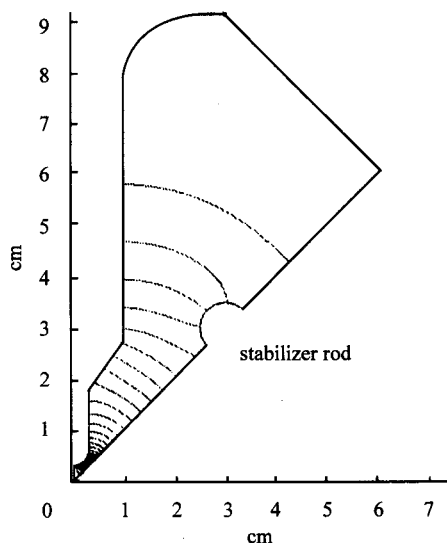


图 2 有稳定杆时 SUPERFISH 模拟的 RFQ 八分之一象限

端部单元和耦合单元的存在破坏了 RFQ 在轴线方向的对称性, 这里的 RF 电磁场分布与 RFQ 其他地方的场分布不同. 因此二极管稳定杆的位置与 SUPERFISH 得到的应有所不同, 并且其位置还应与杆的长度有关. 但由于端部单元和耦合单元的底切在轴线方向的长度约为 5cm, 所以当二极管稳定杆的长度远大于这个长度时, 稳定杆的位置应与 SUPERFISH 得到的基本相同. 稳定杆长度不同, 其对二极管的影响也不同. 因此, 可以暂时用 SUPERFISH 给出的二极管稳定杆的位置, 根据本征二极管的分布, 先找到二极管稳定杆的长度, 然后再用三维程序 HFSS 模拟计算出杆的位置. 模拟发现, 当稳定杆的长度等于 15cm 时, HFSS 模拟得到的二极管稳定杆在端部单元和耦合单元的位置都是 $r = 43.43\text{mm}$, 与 SUPERFISH 得到的结果只相差

1.1mm. 表 2 给出的是: 当稳定杆的长度为 15cm 时, RFQ 中前 5 个本征四极模与本征二极管模的频率和 Q 值. 从表中可以看到, 与无稳定杆时相比, 所有的本征二极管模的频率都往低频方向有较大的偏移. 当然, 每个二极管模因其在 RFQ 中场分布不同, 其频率偏移量也不同. ${}^{\pi}\text{TE}_{111}$ 和 ${}^{\pi}\text{TE}_{112}$ 现成为离工作四极模最近的二极管模, ${}^{\pi}\text{TE}_{111}$ 和 ${}^0\text{TE}_{210}$ 之间、 ${}^{\pi}\text{TE}_{112}$ 和 ${}^0\text{TE}_{210}$ 之间的频率间隔分别为 4.839MHz 和 5.014MHz, 比没有二极管稳定杆时的间隔大得多, 也比工作模和相邻四极模之间的频率间隔大. 而四极模当中, 除 ${}^{\pi}\text{TE}_{212}$ 模式外(为模拟错误), 其他模式的频率基本上都不变. 四极模频率的这种微小变化主要是因为杆和无杆时程序的模拟精度会有所不同, 同时在杆的位置上也会存在一定的计算误差. 图 3 显示的是, 有杆时工作模的 RF 电场沿轴向的分布. 场的平整度约为 3.15%, 比无杆时的 1.2% 稍大, 其中, 耦合板处场分布出现的台阶占很大的比例. 由文献[9]知, 台阶产生的原因是耦合单左右的局域频率不一样. 显然, 这种局域频率的差异是由程序的模拟精度导致的.

表 2 二极管稳定杆长度为 15cm 时, RFQ 中前 5 个本征四极模与本征二极管模的频率和 Q 值

四极模	频率/MHz	Q 值	二极管模	频率/MHz	Q 值
${}^{\pi}\text{TE}_{210}$	348.863	7768	${}^{\pi}\text{TE}_{110}$	337.004	6582
${}^0\text{TE}_{210}$	351.971	9163	${}^0\text{TE}_{110}$	341.209	8281
${}^0\text{TE}_{211}$	355.089	7569	${}^0\text{TE}_{111}$	342.606	7055
${}^{\pi}\text{TE}_{211}$	357.637	7351	${}^{\pi}\text{TE}_{111}$	347.132	6919
${}^{\pi}\text{TE}_{212}$	362.748	4698	${}^{\pi}\text{TE}_{112}$	356.985	5263

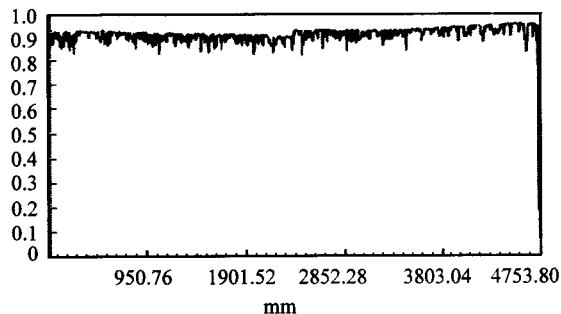


图 3 有二极管稳定杆时, 工作模的归一化电场幅值沿 RFQ 轴向的分布

4 试验与模拟计算的比较

为摸索强流 RFQ 的加工工艺和焊接工艺、检验

三维模拟程序的可靠性,加工了长为 118.845cm 的一节 RFQ 冷模. 加速腔的材料为无氧铜,其横向尺寸和实际的 RFQ 完全的一样. 加速腔带有 16 个调谐器和 4 个真空口,但电极是不调制的. 加速腔是用 MAFIA 设计的,后又用 HFSS 重新计算. 利用该冷模,进行了本征模频率的测量、场分布的调试和测量、二极模稳定杆的试验. 表 3 列出了调谐器和加速腔内表面齐平时,测量得到四极模 TE_{210} 及二极模 TE_{110} (包括一、三象限的二极模 D_{13} 及二、四象限的二极模 D_{24}) 的频率,为便于比较,MAFIA 和 HFSS 的模拟结果也在表中同时列出. 从表中可以看出模拟得到的四极模频率和实际测量的频率之间的差别, HFSS 和 MAFIA 分别只有 0.30MHz 和 0.15MHz,说明两个程序都可以用来进行 RFQ 的腔体设计. 测量得到的两个二极模之间频率有较大的差异,其中, D_{24} 的测量频率与模拟结果较接近,只有 0.69MHz 的差异. 但这与模拟的精度无关,说明四个象限之间的对称性方面有较大的加工误差. 事实上, RFQ 的不对称性误差在准直时从准直望远镜中就能看出来,主要是在工装焊接时产生的. 不过,这种误差对二极模稳定杆的试验并无太大的妨碍.

考虑到实际 RFQ 的每一段由两节组成,而且二极模稳定杆安装在端板和耦合板上的事实. 在进行

稳定杆的试验时,只在 RFQ 冷模的一端安装了二极模稳定杆. 这样二极模稳定杆的安装情况与 RFQ 的实际情况相一致,可以进行模拟结果与测量结果的直接比较. 表 4 列出了二极模稳定杆长度为 15cm 时,四极模、二极模的测量频率及相应的 HFSS 模拟结果. 为便于比较,无杆时的情况也在表中列出. 测量结果表明,二极模稳定杆对四极模频率的影响确实很小,其频率变化量只有 0.03MHz,可以忽略. 但对二极模频率的影响却非常大,测量得到的 D_{13} , D_{24} 频率变化分别为 6.14MHz 和 5.88MHz,两者的变化量较接近,同时与 HFSS 模拟得到的频率变化量 5.88MHz 差不多. 因此,尽管在以后的实际 RFQ 中二极模稳定杆的长度最终须由试验来确定,但 RFQ 的冷模试验表明, HFSS 的模拟在确定二极模稳定杆的长度方面仍然具有很高的可靠性.

表 3 四极模、二极模的测量频率及相应的 MAFIA, HFSS 模拟结果

模式	测量频率/MHz	HFSS 模拟 频率/MHz	MAFIA 模拟 频率/MHz
TE_{210}	350.85	351.15	351.00
$TE_{110}(D_{13})$	344.82	347.81	
$TE_{110}(D_{24})$	348.50	347.81	

表 4 杆长 15cm 时,四极模、二极模的测量频率及相应的 HFSS 模拟结果

稳定杆的 长度/cm	TE_{210} 的测量 频率/MHz	TE_{210} 的模拟 频率/MHz	D_{13} 的测量 频率/MHz	D_{13} 的模拟 频率/MHz	D_{24} 的测量 频率/MHz	D_{24} 的模拟 频率/MHz
0	350.85	351.15	344.82	347.81	348.50	347.81
15	350.82	351.15	338.68	341.93	342.49	341.93

5 讨论

分段共振耦合 RFQ 的一段长度和耦合间隙的大小决定了工作四极模与相邻四极模之间的频率间隔,在单段长度一定的情况下,耦合间隙大小则唯一地决定了工作四极模与相邻四极模之间的频率间隔. 因此,耦合间隙的选取非常的关键. 由于耦合间隙本身的宽度只有 1.8mm,而 RFQ 的长度为 4.75m,两者之间相差数千倍,同时,三维程序的模拟计算由于受计算机计时和内存的限制,程序对

RFQ 的总体剖分,其网络的尺寸不可能太小,模拟精度必然受到限制. 为提高模拟精度,可以手工剖分耦合间隙局部,而其他地方可仍然采用程序的自动剖分功能进行剖分. 另外,如引言所指出的那样,比照二维程序 SUPERFISH 的模拟结果建立一个标准,模拟精度会得到进一步的提高. 相对耦合间隙而言,由于二极模稳定杆最终的长度可通过实际 RFQ 的试验确定,模拟所确定的长度只具有参考价值,所以模拟的精度要求并非很高. 试验表明,二极模稳定杆安装在模拟所确定的位置上,稳定杆对工作四极模的影响确实很小,因此可以认为可靠.

参考文献 (References)

- 1 Wangler T P. Principles of RF Linear Accelerators. John Willy & Sons, INC, 1998. 245—247
- 2 Brown M J, Young L M. Proc. of the 1990 Linear Accelerator Conference: LA-12004-C. 1990. 70—72
- 3 Young L M Proc. 1994 Int. Linac Conf. Tsukuba, 1994. 178—180
- 4 Dome G. Review and Survey of Accelerating Structure. P. M. Lapostolle and A. L. Septier. Linear Accelerators. Wiley, New York, 1970. 667
- 5 Slater J C. Microwave Electronics. D. Van Nostrand, Princeton, N. J., 1950. 80—81
- 6 Schneider H R, Lancaster H. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983, NS30: 3007—3010
- 7 Ueno A et al. Beam Test of the Pre-Injector and the 3-MeV H-RFQ with a New Field Stabilizer PISL. Linac 96, Geneva, 1996. 273—297
- 8 OUYANG Hua-Fu et al HPLPB, 2003, 15:195—198 (in Chinese) (欧阳华甫等. 强激光与粒子束, 2003, 15:195—198)
- 9 OUYANG Hua-Fu, FU Shi-Nian, HEP & NP, 2003, 27:551—554 (in Chinese) (欧阳华甫, 傅世年. 高能物理与核物理, 2003, 27:551—554)

**Study on the Design of an Intense-Beam
RFQ with Stabilization ***

OUYANG Hua-Fu¹⁾ FU Shi-Nian GUAN Xia-Ling XU Wen-Wu
(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract Detailed studies and discussions on the determination of coupling gap and designing of the dipole mode stabilizer rods in an RFQ with intense beams have been done. By taking use of the existent cold model of one section RFQ, measurements of the eigenfrequencies of the eigen quadrupole and dipole modes, tuning and measurement of the RF field distribution and experiments of the dipole mode stabilizer rods are carried out. By making comparison between the results from the experiments and from simulations, the reliability and creditability of the code used in designing the RFQ cavity is proved. In the same time, a brief discussion on the design of RFQ with stabilization is given.

Key words RFQ, coupling gap, dipole mode stabilizer rods, stable accelerator structure

Received 17 October 2003

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G1999022604)

1) E-mail:ouyanghf@mail.ihep.ac.cn