

分段共振耦合 RFQ 的调谐与测量

欧阳华甫 傅世年

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 对一长度为 3m 的分段共振耦合 RFQ 冷模进行了多次调谐和测量,得到了 RF 电场平整度好于 4% 的场分布;解决了分段共振耦合 RFQ 调谐时耦合单元处 RF 电场分布出现的台阶问题;确定了分段共振耦合 RFQ 的调谐步骤.

关键词 RFQ 分段共振耦合 谐振频率 调谐块 耦合单元

1 引言

在意大利 INFN-LNL 实验室,为 TRASCO/ADS^[1] (意大利加速器驱动的核废料嬗变系统)项目中的强流四翼型射频四极加速器(RFQ)的成功研制和调谐,建造了一个长度为 3m 的分段共振耦合的四翼型 RFQ 铝模.该铝模由 3 段组成,每段长度 1m,段与段之间通过耦合单元连接在一起.每段 RFQ 上装有 12 个调谐块,每象限 3 个.利用 RFQ 上的 36 个调谐块,可以对 RFQ 进行调谐,使其工作频率与设计频率一致,同时,使腔内的 RF 电场分布满足动力学设计的要求.

测量所使用的方法仍为传统的小球法 (bead-pulling method),通过测量小球所在位置的 RF 电场的相位变化来确定该处的相对 RF 电场的大小.该测量的主要优点是受环境温度变化的影响非常小,因为对 RFQ 某一象限的测量在 40s 内便可以完成.测量后的数据处理和分析则由 Labview 所编的程序完成.该程序不但能显示 RFQ 中的 RF 电场分布,同时还能给出 36 个调谐块下次调谐时的设置. Labview 程序对 RF 电场的分析和处理是基于 RF 电场在 RFQ 中的分布满足以下方程^[2]:

$$\frac{\bar{\omega} - \bar{\omega}_i(z)}{\bar{\omega}_0} V_i(z) + \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{\lambda_0^2}{2} \frac{d^2 V_i(z)}{dz^2} + \frac{\bar{\omega}_0 - \bar{\omega}_d}{2\bar{\omega}_0} \{ [V_i(z) - V_{i+1}(z)] + [V_i(z) - V_{i-1}(z)] \} = 0. \quad (1)$$

这里 $\bar{\omega}$ 为测量得到的四极模截止频率, $\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_d$ 分别是设计的四极模和二极模的截止频率, $\bar{\omega}_i$ 为局域截止频率, V 为 RF 电场, λ_0 是与 $\bar{\omega}_0$ 相对应的 RF 电场的波长, i 代表 RFQ 4 个象限的次序.方程中除 $\bar{\omega}_i$ 外,其他参数或已知或可测.因此, $\bar{\omega}_i$ 可表达为

$$\bar{\omega}_i(z) = \bar{\omega} + \frac{\bar{\omega}_0}{2} \cdot \frac{\lambda_0^2}{(2\pi)^2} \frac{d^2 V_i(z)}{V_i(z) dz^2} + \frac{\bar{\omega}_0 - \bar{\omega}_d}{2V_i(z)} \{ [V_i(z) - V_{i+1}(z)] + [V_i(z) - V_{i-1}(z)] \}. \quad (2)$$

当 RF 电场在 RFQ 中沿轴向的分布均匀时, RFQ 沿轴向各处的局域频率 $\bar{\omega}_i$ 应相等.求解调谐块所在位置的局域频率 $\bar{\omega}_i$, 则可以得到下一次调谐时各调谐块的位置.这样,经过多次测量和调谐后,应得到满意的 RF 电场分布.显然,方程右边第二项促使 RF 电场沿轴向分布趋于均匀,第三项则使 RF 电场中的二极模成分变小.

必须指出的是,以上方程是从传统的非耦合的单段的四翼型 RFQ 得到,同时未考虑单极模的影响.当在分段共振耦合的 RFQ 中反复利用以上方程对所得到的 RF 电场进行分析并设置下一次调谐时调谐块的位置时, RFQ 中 RF 电场的分布会出现以下两种现象.其一, RF 电场在 RFQ 中每一段中的分布越来越平整和均匀,但各段 RF 电场的大小之间的差异也越来越大,最后, RF 电场的分布在耦合单

元的中心出现一个“台阶”;其二,RF 电场中的二极模成分变得越来越大,但单极模的成分并不减小,相反还变得更大.这两种现象的出现阻碍了 RFQ 的调谐.为此,我们在 Labview 程序中引入消台阶机制,解决了以上问题.最终得到了 RF 电场平整度 $((V_{\max} - V_{\min})/V_{\max})$ 好于 4% 的调谐结果.

2 RFQ 的调谐与测量

RFQ 调谐和测量前调谐块的初始状态是:36 个调谐块在 RFQ 腔体外的长度均为 51mm(腔内的长度为 15mm),这时测量到的工作模频率为 352.258281MHz,比设计的工作模频率 352.2MHz 稍大.原则上,只要测量频率不是远远偏离设计频率,调谐块的初始状态并不影响 RFQ 的最终调谐.图 1 显示的是 RF 电场在 RFQ 中的初始分布(图中 1,2,3,4 为象限标志).从图 1 可以看出,初始时 RF 电场在第 1,2 和 4 象限的分布非常差,远远不能满足 RFQ 动力学设计对场的平整度要求.基于测量所得到的 RF 电场分布,Labview 程序将自动给出下次调谐时 36 个调谐块的设置.重复以上调谐与测量过程,在第 5 次调谐与测量时,在 RFQ 中得到图 2 这样具有两个台阶的 RF 电场分布.图 2 显示,RF 电场在 RFQ 中每一段中的分布非常平整,尤其具体到某一象限,场的平整度在 2% 左右.但段与段之间 RF 电场的幅度有很大的差异,在耦合单元处出现一个很大的台阶.因此,如何在不改变每一段内 RF 电场分布的平整度的前提下,消除耦合单元处的台阶,是在整个 RFQ 腔内获得满意的 RF 电场平整度的关键.

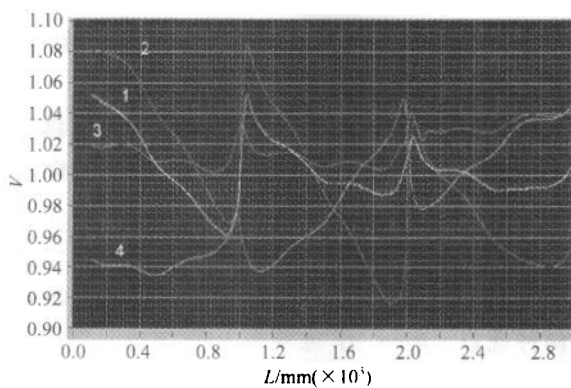


图 1 归一化 RF 电场在 RFQ 的初始分布

为此,必须对台阶形成的原因以及 RF 电场出现台阶分布时 RFQ 的状态进行分析.显然,当 RF

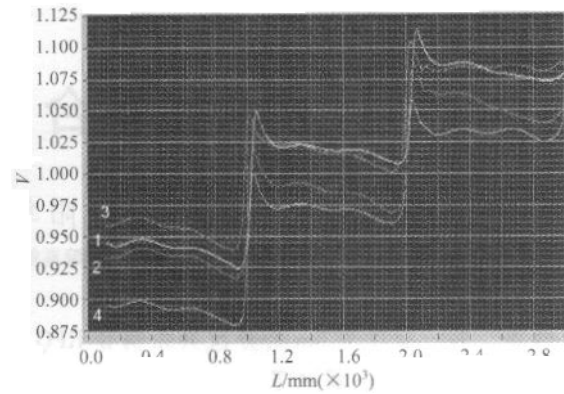


图 2 归一化 RF 电场的二台阶式分布

电场处于台阶分布时,RFQ 在每一段内各处的局域频率 ω_c 应处处相等.耦合单元作为一个整体,其局域频率也应与段内各处的局域频率相等,否则,RF 电场在每段内的分布不可能是平整的.但如果对耦合单元进行更细致的分析,将其分解为左边端部单元(包含临近的调谐块)、耦合间隙和右边端部单元,其左右单元的谐振频率并不相等,这正是台阶存在的原因.下一节将进一步定量讨论台阶的大小与左右单元谐振频率之间的关系.因此只要适当调节耦合单元旁边 8 个调谐块,就能经过一次调谐消除台阶.图 3 是经过一次调谐台阶被消除后,RF 电场在 RFQ 中的分布.如果不考虑 RF 电场在耦合单元及 RFQ 端部的大小,现在 RF 电场在整个 RFQ 中分布其平整度好于 4%.对流强为 30mA 的连续束的模拟跟踪表明,此时的粒子传输效率高于 95%^[1],满足 RFQ 的动力学设计要求.图中每段中出现的 3 个小谷对应 3 个调谐块的位置,同时,Labview 程序在对测量数据进行处理和分析时,已删除了 RFQ 入口处的数据.对 RF 电场中单极模和二极模的分析表明:以上消除台阶的调谐也大大降低了 RF 电场中的单极模和二极模成分.

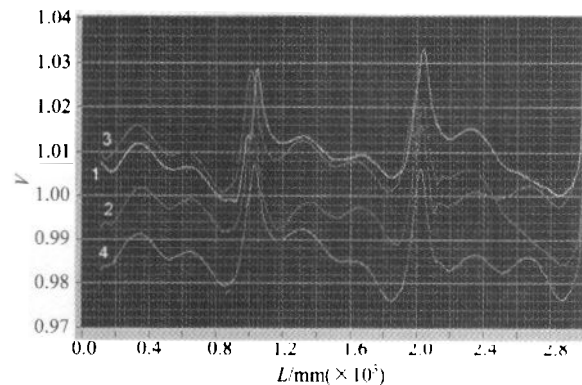


图 3 归一化 RF 电场的最后分布

3 台阶的形成及消台阶公式

正如引言部分已经提到的那样, Labview 程序对测量所得到的 RF 电场的分析是基于公式(1)和(2),而公式(1)和(2)是从单段的、非耦合的、传统的四翼型 RFQ 中得到的。因此当 Labview 程序用来分析分段共振耦合 RFQ 时,程序对 RFQ 各段中的 RF 电场的分析将是孤立的,即程序把每一段当成一独立的 RFQ 来加以考虑。这意味着 Slater 的微扰理论仍然成立^[4]。以图 1 中的 RF 电场分布为例,RF 电场在 RFQ 第一段第 1,2 象限中的分布是第一段入口处的场幅远远大于第一段出口处的场幅。因此, Labview 程序认为第一段入口处的局域频率小于第一段出口处的频率,所以入口处的调谐块将往里调,出口处的调谐块往外调,同时由于程序已考虑了 RFQ 的横向各象限间的耦合,最终的调谐结果是耦合单元左右两边的局域频率不等。但由于 RF 电场在 RFQ 中的分布各段平整,因此耦合单元作为一个整体,其局域频率仍与其他地方的局域频率相等。表 1 列出的是与图 2 二台阶 RF 电场分布相对应的调谐块的设置。从表 1 可以看出,与第一耦合单元邻近的左边的(第 3 列)调谐块在 RFQ 腔体外的长度明显大于右边的(第 4 列)调谐块在 RFQ 腔体外的长度,即耦合单元左边的局域频率明显小于其右边的频率。第二耦合单元的情况也是如此。

既然耦合单元两边的局域频率不一致是台阶存在的原因,那么左右局域频率与台阶的大小之间的定量关系又如何呢?为此,把耦合单元分解为由左边端部单元(包含临近的调谐块)、耦合间隙和右边端部单元,其传输矩阵可表达为

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ -\frac{1}{f_1} & 1 - \frac{d}{f_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_2} & d \\ -\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{d}{f_1 f_2} & 1 - \frac{d}{f_1} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

这里 f_1, d, f_2 分别为左边端部单元的焦距、耦合间隙的等效宽度和右边端部单元的焦距。当耦合单元两边的 RF 电场已经调平时(RF 电场呈台阶式分布时,可以认为各段 RF 电场已调平), V 及其导数 V' 通过耦合单元时满足

$$\begin{pmatrix} V_2 \\ V_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_2 \\ 0 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} V_1 \\ V_1' \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} V_1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(1 - \frac{d}{f_2}\right) V_1 \\ \left(-\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{d}{f_1 f_2}\right) V_1 \end{pmatrix}.$$

由(4)式可以得到,

$$\frac{V_2}{V_1} = -\frac{f_1}{f_2}. \quad (5)$$

当耦合单元的整体频率等于设计频率 $\tilde{\omega}_0$ 时, f_1, f_2 可表达为¹⁾

$$f_1 = -\frac{1}{(K_1 - 1)\xi_1}, f_2 = -\frac{1}{(K_2 - 1)\xi_2}. \quad (6)$$

式中 $K_1 = \frac{\omega_1^2}{\tilde{\omega}_0^2}, K_2 = \frac{\omega_2^2}{\tilde{\omega}_0^2}, \xi_1 = \frac{4\pi^2}{\lambda_0^2} \frac{C_1}{C}, \xi_2 = \frac{4\pi^2}{\lambda_0^2} \frac{C_2}{C}$, 其中 ω_1, ω_2 分别为端部单元 1,2 的谐振频率, C_1, C_2 分别为端部单元 1,2 的端板(耦合板)和电极间的电容, C 为 RFQ 的极间电容。假定 $\xi_1 = \xi_2$, 则有

$$\frac{V_2}{V_1} = -\frac{\omega_2^2 - \tilde{\omega}_0^2}{\omega_1^2 - \tilde{\omega}_0^2} = \frac{(\omega_2 + \tilde{\omega}_0)(\omega_2 - \tilde{\omega}_0)}{(\omega_1 + \tilde{\omega}_0)(\omega_1 - \tilde{\omega}_0)}. \quad (7)$$

当 RF 电场呈台阶分布时,耦合单元作为一个整体,其频率等于测量频率,同时也等于设计频率 $\tilde{\omega}_0$, 所以 $\omega_2 - \tilde{\omega}_0 = -(\omega_1 - \tilde{\omega}_0) = \delta\omega$ 。由(7)式可得

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{2\tilde{\omega}_0 + \delta\omega}{2\tilde{\omega}_0 - \delta\omega}.$$

表 1 RF 电场为二台阶分布时调谐块在 RFQ 腔体外的长度

(单位: mm)

象限	第一段			第二段			第三段		
1	44.965	58.226	65.749	44.943	63.862	62.137	46.506	58.813	52.226
2	37.204	52.198	56.078	38.820	50.687	58.617	40.499	54.301	49.387
3	52.988	57.418	62.733	43.835	61.155	59.404	48.789	63.006	50.857
4	45.093	50.776	59.220	39.213	52.900	52.018	37.947	50.241	40.793

1) Pisent A. Transmission line analysis of coupled RFQ, internal note

令 $\delta\omega = -\frac{\partial\omega}{\partial L}\Delta L$, 可得

$$\Delta L = \frac{2\bar{\omega}_0}{\alpha} \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}, \quad (9)$$

式中 ΔL 为调谐块在 RFQ 腔体外的长度变化量, $\alpha = \frac{\partial\omega}{\partial L}$ 反映耦合单元左右两部分的谐振频率对调谐块长度变化的敏感度. 所以, 要消除台阶, 耦合单元左右邻近调谐块在腔体外的长度调节量为

$$\Delta L_i' = \frac{2\bar{\omega}_0}{\alpha} \frac{V_i' - V_i}{V_i' + V_i}, \quad \Delta L_i'' = -\frac{2\bar{\omega}_0}{\alpha} \frac{V_i' - V_i}{V_i' + V_i}. \quad (10)$$

式中 V_i' , V_i 分别为第 i 象限耦合单元左右两边 RF 电场的大小. 实验发现当 $\alpha = 2.6 \times 10^6$ 时, 可以通过一次调谐消除台阶.

4 结论

尽管测量和调谐所用的 Labview 程序是基于公式(1)和(2), 而公式(1)和(2)是从传统的、单段的非耦合四翼型 RFQ 得到的, 但该程序仍然可用于分段共振耦合 RFQ 的测量和调谐. 详细分析了调谐和测量过程中 RF 电场出现台阶式分布以及台阶存在的原因, 得到台阶大小与耦合单元左右两边局域频率之间的定量关系式. 根据该关系式, 台阶可以通过一次调谐消除, 得到了场的平整度好于 4% 的 RF 电场分布, 确定了分段共振耦合 RFQ 的调谐方法和步骤, 为以后真正 RFQ 的调谐和测量创造了有利的条件.

参考文献 (References)

- 1 TRASCO AC Group. Status of TRASCO. Internal Report INFN-TC-00-23, 21—24
- 2 Wangler T P. Principles of RF Linear Accelerators. John Willy & Sons, INC, 1998, Chap. 8
- 3 Comunian M et al. TRASCO RFQ Design. EPAC2000, Vienna, 2000, 927—929
- 4 Slater J C. Microwave Electronics. D. Van Nostrand, Princeton, N. J., 1950, 80

Tuning and Measuring of RFQ with Resonantly Coupled Segments

OUYANG Hua-Fu FU Shi-Nian

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

Abstract Tuning and measuring on a 3-meter aluminum RFQ cold model with three resonantly coupled segments is carried out, RF electric field distribution with flatness better than 4 percent is obtained. The reason for the formation of RF electric distribution steps at the location of coupling cells is described, and the relation of the step size and the local resonant frequency difference between the two sides of coupling cell is also given. With this relation, the RF electric field distribution steps at the location of coupling cells can be removed in one tuning operation. The best tuning procedure is finally determined. Following this procedure, the tuning of RFQ with several resonantly coupled segments is easy and fast.

Key words RFQ, segmented resonantly coupling, resonant frequency, tuner, coupling cell