

铁氧体填充不调谐加速腔模型研究*

张沐天 乔际民 周立农 许文武
张宗花 王黎明 李 健

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 在医用质子同步加速器方案中,采用铁氧体加载的不调谐高频加速腔.为进行原理验证和实验研究,制作了一台不调谐腔模型.模型腔为圆柱形同轴腔,腔内用铁氧体环填充.在同步加速器工作频率范围内,模型腔可基本实现与功率源的阻抗匹配.

关键词 不调谐加速腔 质子同步加速器 铁氧体

1 不调谐腔设计

质子同步加速器的加速腔,通常采用铁氧体填充的可调谐加速腔,使用偏流线圈的磁场调节腔中铁氧体的磁导率,从而改变加速腔的谐振频率,使其为束团回旋频率的整数倍.这种腔加速电压高,腔的阻抗和品质因数 Q 值都比较高,对铁氧体材料的要求是相对低的磁导率和较高的 Q 值.在医用的小型质子同步加速器中,高频腔的加速电压低,工作频率变化大,所以采用结构相对简单,功耗低的铁氧体加载不调谐加速腔(下称不调谐腔)^{1) [1]}.不调谐腔因频率变化范围大及阻抗匹配的需要,要求铁氧体材料具有高磁导率.

在执行攀登计划B研究项目时,设置了医用质子同步加速器优化设计和不调谐腔模型研究的课题,在国内首次开展了不调谐腔的实验研究.医用质子同步加速器设计为强聚焦分离型,周长约35m,注入能量3MeV,引出能量70—200MeV,加速周期0.5s,重复频率1—2Hz,每脉冲引出 5×10^{10} 以上个质子²⁾.由此可确定加速腔的主要参数:工作频率0.7—4.9MHz,峰值加速电压400V.不调谐腔模型设计为单加速间隙的圆柱型同轴腔,加速间隙置于腔的一端,其余部分由铁氧体环填充,形成电感加载区,如图1所示.铁氧体环的尺寸为外径50cm,内径25cm,厚度2.5cm.根据铁氧体环的尺寸和同步加速器直线节的空间,确定了模型腔的机械尺寸:腔长60cm,外径60cm,内导体直径13cm,腔内放置

1997-08-21收稿,1997-11-21收修改稿

* 国家攀登计划B资助课题

1) LLUMC Proton Therapy Facility Engineering Design Report. Fermilab, February 1987

2) 郁庆长等. Conceptual Design of Beijing Proton Therapy Synchrotron. 高能所物理研究内部资料, 1996.6

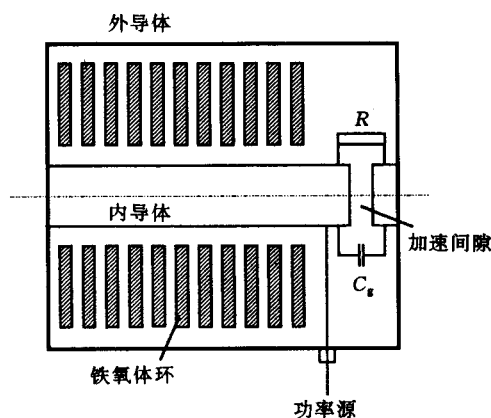


图 1 不调谐腔模型示意图

11 块铁氧体环, 环间距离为 1.5cm. 不调谐腔的功率输入采用直接耦合方式, 同轴馈线的内外导体分别与腔体内外导体连接. 由于准备使用输出阻抗 50Ω 的功率源, 需要将腔在工作频率范围内的阻抗调整到 50Ω. 腔内放置铁氧体环后, 谐振频率约为 30MHz, 在工作频率范围内与功率源严重失配. 为调整腔的阻抗, 可在加速间隙上跨接电阻 (R) 和电容 (C_g), 高频信号用同轴线直接耦合到内外导体. 这样, 加速腔可以等效为 LRC 并联回路. 经计算, 空腔时的电感约为 $1.7 \times 10^{-7} \text{H}$, 电容约 22pF. 加入铁氧体环后, 可以推导出铁氧体环所处位置的单位长度电感和电容分别为

$$L_t = \frac{\mu_e \mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_4}{r_1}, \quad C_t = \frac{2\pi \varepsilon_e \varepsilon_0}{\ln(r_4 / r_1)}, \quad (1)$$

式中 μ_0 和 ε_0 为真空中的磁导率和介电常数, μ_e 和 ε_e 分别表示铁氧体加载部分的等效相对磁导率和介电常数, 其表达式为

$$\mu_e = \frac{1}{\ln(r_4 / r_1)} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + \ln \frac{r_4}{r_3} + \mu \ln \frac{r_3}{r_2} \right), \quad \varepsilon_e = \frac{\varepsilon \ln(r_4 / r_1)}{\ln \frac{r_3}{r_2} + \varepsilon \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + \ln \frac{r_4}{r_3} \right)}, \quad (2)$$

式中 μ 和 ε 分别代表铁氧体环的相对磁导率和相对介电常数, r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 分别为内导体半径、铁氧体环内、外半径、外导体半径. 将实际参数代入后, 得: $\mu_e = 0.6\mu + 0.4$, $\varepsilon_e = 25\varepsilon / (1.5 + \varepsilon)$.

2 测试结果

使用网络分析仪和示波器等仪器, 对不调谐腔模型进行了高频测试. 为研究腔阻抗与并联电阻的关系, 及腔阻抗与功率源的匹配, 在加速间隙不跨接电容时, 分别使加速间隙的并联电阻为 50Ω、100Ω、250Ω, 测试腔的各种参数. 图 2 和图 3 分别为电阻 R 为 50Ω、100Ω、250Ω, 加速间隙不跨接电容时, 腔阻抗 Z 、电压反射系数 Γ 与频率的关系.

在 $R = 50\Omega$ 时, 为使腔与输出阻抗 50Ω 的功率源匹配, 调整加速间隙上跨接电容 C_g , 当 $C_g = 140\text{pF}$ 时, 加速腔在 2—7MHz 范围内近似为 50Ω 纯电阻. 此时腔的阻抗相角、电压反射系数均比不跨接电容时明显减小. 图 4 和图 5 分别为 $R = 50\Omega$ 时, 腔的阻抗相角及输入端驻波比图, 腔阻抗的最小相角为 2.4° , 最小反射系数 0.02, 最小驻波比 1.04. 图 6 是用示波器测出的 50Ω 阻抗腔在不同频率下加速电压相对幅度. 测试表明, 调整参数 R 和

C_g 后, 腔与 50Ω 阻抗功率源可实现较好的匹配.

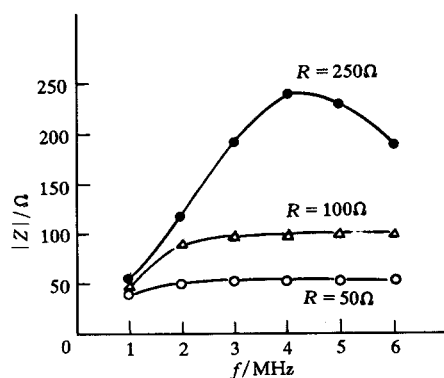


图 2 腔阻抗与频率的关系

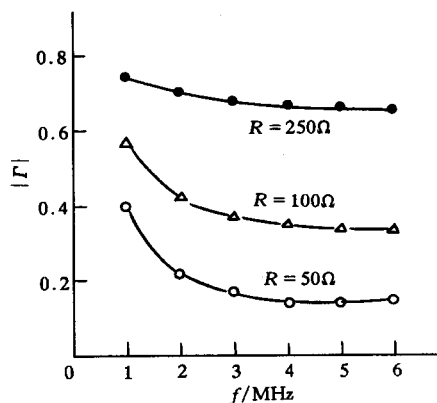


图 3 电压反射系数与频率的关系

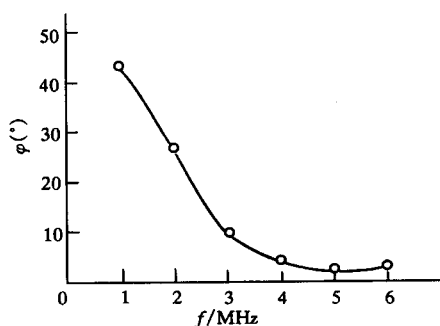


图 4 匹配腔阻抗相角与频率的关系

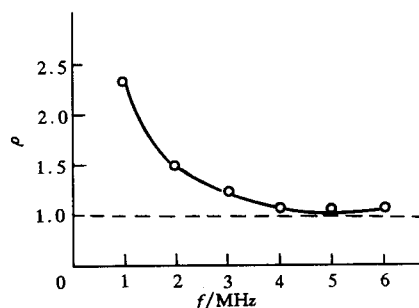


图 5 匹配腔驻波比与频率的关系

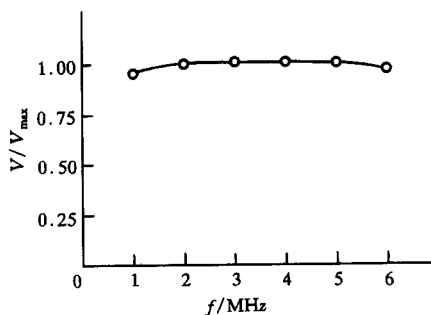


图 6 加速电压相对幅度与频率的关系

3 铁氧体环磁导率的估算

实验腔使用的铁氧体环, 没有磁导率的原始测量数据. 我们用解等效回路方程的办法, 估算出铁氧体材料的磁导率. 铁氧体的复数磁导率通常记为 $\mu = \mu' - j\mu''$. 在同轴腔中, 铁氧体引起的电感量为

$$L = L' - jL'' = \frac{\mu_0 l \ln(r_4 / r_1)}{2\pi} (\mu_e' - j\mu_e''), \quad (3)$$

式中 μ_e' 和 μ_e'' 为等效相对磁导率的实部和虚部, l 为铁氧体环总厚度. 由于铁氧体环引起的电感量远大于空腔电感量, 在等效回路中空腔电感量可忽略不计. 当加速缝上不接电阻时, 等效回路方程可写为

$$1/Z = j\omega C + 1/j\omega(L' - jL''), \quad (4)$$

式中 ω 表示腔工作的角频率. 将上式展开, 得

$$\operatorname{Re}Z = \frac{\omega L''}{(1 - \omega^2 CL')^2 + (\omega^2 CL'')^2}, \quad \operatorname{Im}Z = \frac{\omega L' - \omega^3 C(L'^2 + L''^2)}{(1 - \omega^2 CL')^2 + (\omega^2 CL'')^2}. \quad (5)$$

从以上两式推导出

$$L'' = \frac{\operatorname{Re}Z}{\omega[(\omega C \operatorname{Im}Z + 1)^2 + \omega^2 C^2 \operatorname{Re}^2 Z]}, \quad (6)$$

$$L' = \frac{1}{\omega^2 C} \mp \frac{1}{\omega^2 C} \sqrt{\frac{\omega L''}{\operatorname{Re}Z} - (\omega^2 CL'')^2}. \quad (7)$$

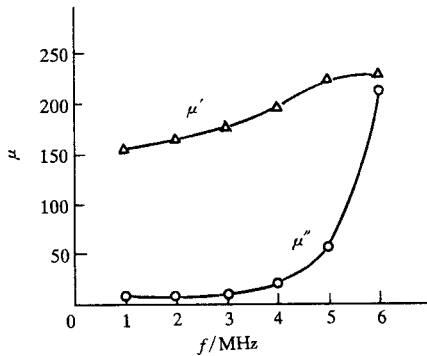


图 7 铁氧体磁导率与频率的关系

可见, 测出某一频率下腔的阻抗, 就可以利用以上两式及 (1) — (3) 式计算铁氧体的磁导率. 经测试, 求得铁氧体环在不同频率下的 μ' 和 μ'' 值, 如图 7.

由于研制经费的限制, 在制作模型腔时使用了库存的材料, 是八十年代初为北京 50GeV 质子同步加速器调谐加速腔研制的铁氧体环, 其起始磁导率约为 200, 工作频率为 2—6MHz, μ' 值基本在 200 附近¹⁾. 由于铁氧体磁导率较低, 所以模型腔在低频端 (频率低于 2MHz) 阻抗偏小. 有两种方法可提高不调谐腔在低频端的性能, 一是选用磁导率足够大的铁氧体环, 二是增大腔的长度. 增加腔长度会占用更多的直线节空间, 并使造价大幅度提高, 所以不宜采用. 使用高磁导率的铁氧体环是可行的办法, 根据计算, 腔长为 60cm 时, 为使腔在低频端也能获得 50Ω 的阻抗, 铁氧体的磁导率至少应为 1000 以上.

高能物理研究所九室李建国同志提供了实验所需的铁氧体环, 秦玖研究员与作者就设计工作进行过有益的讨论, 特此致谢.

1) 秦玖等. 质子同步加速器用铁氧体大环特性的动态测试. 高能物理研究所内部资料, 1983.10

参 考 文 献

- [1] Muto K, Fukumoto S. Ferrite Loaded Untuned RF Cavity for Synchrotron. Proc. of 1989 IEEE PAC. 234—235

**Experimental Study of a Prototype of Ferrite
Loaded Untuned RF Cavity***

Zhang Mutian Qiao Jimin Zhou Linong Xu Wenwu

Zhang Zonghua Wang Liming Li Jian

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract In the conceptual design of a dedicated medical proton synchrotron, a ferrite-loaded untuned RF cavity is used. A prototype of cylindrical cavity is made and studied. Within operation frequency region, the prototype matches power source.

Key words untuned RF cavity, proton synchrotron, ferrite