

S 波段 2MeV 轴耦合驻波加速管参数冷测调试*

刘婕¹⁾ 柏伟 陈亚男 许州 黎明 杨兴繁

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

摘要 介绍了用于工业 CT 的 S 波段 2MeV 驻波电子直线加速管的微波冷测及调整,并详细描述了加速管频率的测量与调谐,加速管与矩形波导匹配,加速管品质因数及加速管整管场分布的测量,给出了加速管微波调试及调整的结果.结果如下:加速管的频率一致性达到 $\pm 0.3\text{MHz}$ 以内,过饱和状态下的耦合度为 1.14,加速管单腔的品质因数约为 12000 ± 200 ,场分布的比值 1:2.2:2.结果表明微波调试满足物理设计的要求.

关键词 S 波段 驻波加速管 微波调试

1 引言

近年来,低能电子直线加速器物理研究及应用引起了世界各国研究者的很大关注,在我国也受到了重视,低能电子直线加速器已广泛应用于医疗卫生、无损检测和海关集装箱等领域^[1-4].加速器小型化的发展使得驻波电子直线加速器倍受关注.早在 20 世纪 50 年代末期,美国麻省理工学院等人指出:当加速结构比较短时,驻波方式加速是比较有利的.在相同微波功率和加速结构情况下,可以使电子获得较高的能量.

针对 CT 成像对高能 X 射线源的要求,延续了以往加速管的结构^[5],设计出符合要求的新加速结构.在耦合腔中设置柱形鼻锥结构,去掉了加速腔中的鼻锥,这种结构使得加速腔中径向电场的强度降低,加速电场自身的聚焦力增强.

2 加速管结构

2MeV 轴耦合加速管腔型优化设计采用了 SUPERFISH 软件进行计算,束流横向动力学研究进行动力学模拟.该加速管由 3 个加速腔和 2 个耦合腔组成,长约 13cm,设计馈入微波功率源为 2.0MW 磁控管.数值模拟表明,该加速管脉冲电流约 150mA,俘获效率约 30%.对电子的横向分布进行非线性拟合,得到束斑直径约 1mm.

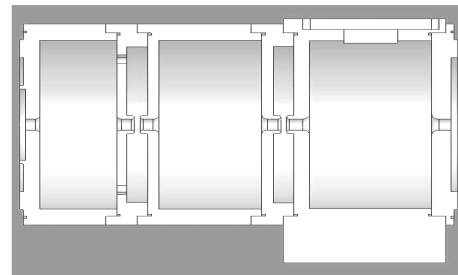


图 1 S 波段 2MeV 加速管剖面图

3 加速管参数的微波测量

3.1 腔列频率的测量和调谐

测试腔体的频率特性时,我们采用扫频法进行频率的测量.其测量原理如图 2 所示.利用 HPE8362B 矢量网络分析仪进行谐振频率的测量.因腔体的谐振频率会随温度而改变,所以测量时尽量保持恒定的环境温度.测量加速腔和耦合腔时,将两只与网络分析仪连接的同轴探针分别从被测腔的两侧沿束流孔插入,并将被测加速腔或耦合腔两端的其余腔短路,利用网络分析仪 S_{21} 传输参数测量功能,由谐振波形的尖峰位置测出该腔的谐振频率.

因 SUPERFISH 只能求解二维圆柱对称系统的问题,无法考虑开耦合孔的非轴对称因素,而且开耦合孔也将引起腔体谐振频率的下降.因此,在腔体的实际机械加工中必须留有合适的余量.在调试各腔谐振频率时,根据测得各腔的谐振频率,选定一个接近设计

2008 - 01 - 07 收稿

* 中国工程物理研究院预研基金资助

1) E-mail: chengang@caep.ac.cn

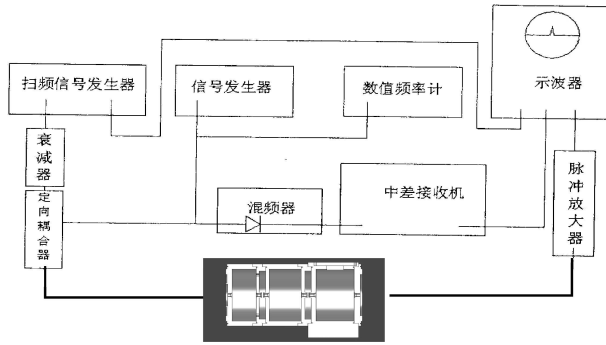


图 2 扫频法测量谐振频率示意图

要求的频率作为标准, 可以通过修改腔体内径和磨鼻锥的方法, 使之频率等于或接近标准频率值。

最终的调谐结果如表 1 所示。

表 1

腔号	频率/MHz
1	2997.09
2	2997.04
3	2997.05
4	2997.22
5	2996.9

调谐结果表明, 各腔频率一致性可达 $\pm 0.3\text{MHz}$ 以内, 通过大量的工作和精心的调整, 各腔的频率调整达到了一致性的要求。

3.2 耦合度的测量

根据设计指标, 要求耦合度 $\beta \sim 1.4$ 。耦合度的正确设计是非常重要的。如果耦合度达不到设计要求或是大于设计指标, 在加速管中就会引起功率反射。严重时, 加速管就不能正常工作。

耦合度测量原理是通过测量矩形波导中输入微波驻波比(VSWR)的频率特性曲线($\rho \sim f$)曲线, 确定耦合度 β , 根据驻波比相位变化情况, 可以判知 $\beta > 1$ (过耦合)还是 $\beta < 1$ (欠耦合),

$$\beta = \rho(\beta > 1) \quad \text{或} \quad \beta = 1/\rho(\beta < 1). \quad (1)$$

在调试过程中, 网络分析仪利用扫频法, 测量反射系数 S_{11} 可以获得驻波比, 根据驻波比变化情况可以判断是过耦合状态还是欠耦合状态。通过调整耦合孔的尺寸, 最终将 β 调配到设计值。由于加速管在焊接完之后耦合度会略大于冷测值, 所以将耦合度留有余量。最后在过饱和状态下测量的驻波比为 1.14。

3.3 品质因数的测量

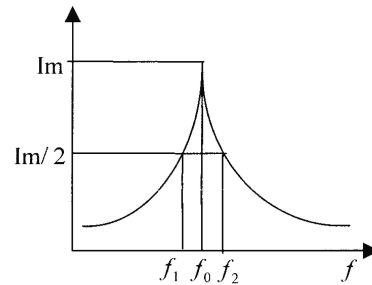
对于一个加速结构, 总希望在输入一定的微波功率条件下, 输出的电子束流功率(能量和流强)尽可能大, 结构本身的功率损耗小, 效率尽可能高。因此在加速管的调试过程中, 品质因数 Q 也是一个需要测试的重要物理量。通过网络分析仪, 采用半功率点法测量腔体的 Q 值。

测量峰值 I_m 的频率 f_0 半功率点 $I_m/2$ 所对应的频率 f_1 和 f_2 , 则有载品质因数 Q_L 为

$$Q_L = \frac{f_0}{|f_1 - f_2|}, \quad (2)$$

Q_L 和 Q_0 的关系为 $Q_0 = Q_L(1 + \beta)$, β 是耦合度, Q_0 是谐振腔的固有品质因数。

经网络分析仪测量, 加速管单腔固有品质因数约为 12000 ± 200 。

图 3 半功率点法测 Q 值

3.4 整腔链谐振谱曲线的测量

测量加速管谐振谱的对称性是检测一个加速管是否调谐好的判据之一, 实质上是测量加速管的色散曲线, 要求禁带闭合。用HPE8362B网络分析仪测得腔链通带特性曲线如图4所示。从图中可以看出, 加速管的谐振谱线对称性较好。

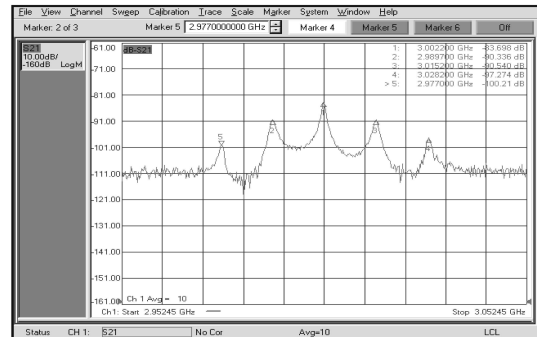


图 4 实验测得的腔列频谱图

3.5 场分布的测量

随着加速器技术的发展, 高频加速结构在各种各样的加速器中得到越来越广泛的应用。加速腔是靠分布其中的微波电场来加速带电粒子。因此, 了解加速腔中微波场的分布, 对于加速结构的设计、调试和腔型优化都有极其重要的意义。在加速管的研制和生产过程中, 腔链场分布测量也是重要的环节。通过这些测量, 可以为腔的加工修改提供依据。

场分布测量的基本原理是微扰法。根据微扰理论, 微扰体穿过微波腔链时将引起腔体谐振频率的微小变

化. 根据它的变化值可以知道微扰体穿行路径电场分布. 电场值与频率变化量之间有如下关系:

$$\frac{E(Z)}{E(0)} = K \sqrt{\frac{\Delta f(Z)}{\Delta f(0)}}, \quad (3)$$

其中 $E(Z)$ 是轴向电场的分布值, $\Delta f(Z) = f_0 - f(Z)$ 为微扰体在不同的轴向位置 Z 是所引起的频率的变化量, f_0 是微扰体未进入腔体时的腔的谐振频率, $\Delta f(0) = f_0 - f_{\min}$ 是微扰体在穿行腔链过程中所引起的最大频率偏移, $E(0)$ 为最大频率偏移处的电场, 因此 $\sqrt{\Delta f(z)/\Delta f(0)} \sim Z$ 的关系就表示了沿轴线上的电场分布情况. 用上述方法测量了该加速管目前调试的轴向电场分布, 结果如图5所示. 由该图可以分析得出: 加速管3个加速腔的场分布调到了1:2.2:2, 满足了物理设计的要求.

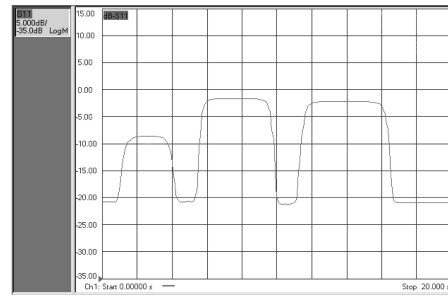


图5 加速管轴上电场分布

4 结束语

这支加速管按物理设计要求完成了微波冷测调试工作, 结果表明加速管每个腔的谐振频率、耦合度、轴上场分布等参数都能满足设计要求, 为2MeV电子直线加速器的热测调试成功提供了有利的保证.

参考文献(References)

- 1 GU G B. Electron Linear Accelerator. Beijing: Science Press, 1985 (in Chinese)
(顾本广. 电子直线加速器. 北京: 科学出版社, 1985)
- 2 LIN Y Z. Principles of Low Energy Linear Accelerator. Beijing: Tsinghua University, 1999 (in Chinese)
(林郁正. 低能直线加速器. 北京: 清华大学工程物理系, 1999)
- 3 XU Z. Physical and Experimental Study of Thermionic Cathode Microwave Electron Gun. Doctor Thesis. Graduate School of CAEP, 1997, 10 (in Chinese)
(许州. 热阴极微波电子枪物理与实验研究. 博士论文. 中国物理研究院, 1997, 10)
- 4 GU G B. Investigations of Low Back Bombardment High Gradient Standing Wave Linear Accelerators. Beijing Medical Instrument Institute, 1996 (in Chinese)
(顾本广. 低反轰高梯度驻波加速管的研究. 北京医疗器械研究所, 1996)
- 5 CHEN H. Theory and Experiment Investigation of a New Type X-Ray Source for High Energy Industrial CT, Master thesis, 2004 (in Chinese)
(陈浩. 高能工业CT用新型加速器X射线源理论及实验研究, 硕士论文, 2004)

Microwave Cold Test Debug of an S-Band 2MeV on-Axis Coupling SW Accelerator*

LIU Jie¹⁾ BAI Wei CHEN Ya-Nan XU Zhou LI Ming YANG Xing-Fan
(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract This paper presents the model cavity tune and cold test of an S-band 2MeV on-axis coupling SW accelerator. The measurement of the model cavity's frequency, degree of coupling, Q value and on-axis field distribution are described in detail. In addition, the results of cavity tune and cold test of the accelerating tube are given. The frequency consistency of the accelerator is within $\pm 0.3\text{MHz}$, the coupling degree in the supersaturation state 1.14, the quality factor of the accelerator 12000 ± 200 , and the field distribution ratio 1:2.2:2. All the results observed show that the accelerator satisfies the physics design with microwave debugging.

Key words S-band, standing wave accelerating tube, model cavity

Received 7 January 2008

* Supported by Sci. & Tech. Funds of CAEP

1) E-mail: chengang@caep.ac.cn