

文章编号: 1007-4627(2015)03-0301-04

31.02 MHz回旋加速器谐振腔Dee电压的标定

金鹏, 王贤武, 田瑞霞, 许哲, 冯勇, 兰涛

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 中国科学院近代物理研究所医用重离子加速器(HIMM)高频系统31.02 MHz回旋加速器谐振腔已完成设计加工和腔体的老炼, 并投入正常运行。高频腔体的设计峰值Dee电压要求达到70 kV, 但是Dee电压准确计算比较困难, 可以通过CST仿真软件对腔体进行模拟得到高频腔体的 R_P/Q_0 值, 结合输入到腔体的实际功率, 计算出腔体的实际电压值。为了验证Dee电压的准确性, 在相同的腔体输入功率条件下, 利用韧致辐射法测量腔体电压, 测量结果与计算结果误差在0.6%以内。

关键词: 回旋加速器; 品质因数; Dee电压; 分路阻抗; 韧致辐射法

中图分类号: TL503.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.03.301

1 引言

回旋加速器是核物理实验的主要工具, 伴随着交叉学科的发展, 回旋加速器在核医学、天体物理、材料科学、能源领域、生物学以及工业加工领域发挥着越来越重要的作用。核医学领域是回旋加速器近年来最为活跃的应用领域。回旋加速器高频系统是回旋加速器重要组成部分, 谐振腔为粒子加速提供必要能量, 腔体的射频电压难于直接测量, 以往国内外各回旋加速器谐振腔Dee电压的标定方法主要是通过韧致辐射法来标定, 由于韧致辐射法测量过程比较复杂, 且测量成本较高, 因此本文拟寻找到一种更为简捷的方法来进行腔体Dee电压的标定。

本文所设计的31.02 MHz回旋加速器谐振腔主要用于中国科学院近代物理研究所医用重离子加速器(HIMM)。回旋加速器高频系统包括两个独立的谐振腔体, 设计要求谐振频率为31.02 MHz, Dee电压为70 kV。两谐振腔的结构设计完全相同, 但由于加工工艺等原因, 实际两谐振腔的高频性能有一定差别, 如品质因数、并联阻抗值与 S 参数等等。鉴于上述原因要使两谐振腔的Dee电压达到70 kV, 所需要的功率大小也会不同, 为此必须对两腔Dee电压值分别进行标定。

2 韧致辐射法测量Dee电压原理

在加速器无束流注入的情况下, 当高频谐振腔上激起数十千伏的高频峰值电压时, 高频电极间的场致发

射电子会被高频电场加速。当这些被加速的电子碰到加速电极材料时, 会与材料物质原子核库仑场相互作用发生非弹性碰撞而损失能量, 引起原子内层电子的跃迁而发射出电磁波, 产生一种连续能谱的X射线, 即“韧致辐射”^[1-3](见图1)。入射电子在碰撞过程中传递给辐射光子的能量可以从零到电子的全部动能。因此, 这种X射线连续能谱的能量极值对应着入射电子的最大动能, 测得能谱的能量最大值, 也就是测定了谐振腔的峰值电压。当入射电子能量较高时, 韧致辐射光子的动能较大, 倾向于向前发射。而当电子能量较低时, 辐射角度分布近似各向同性。所以, 可在真空室观察窗外附近进行韧致辐射能谱的探测。

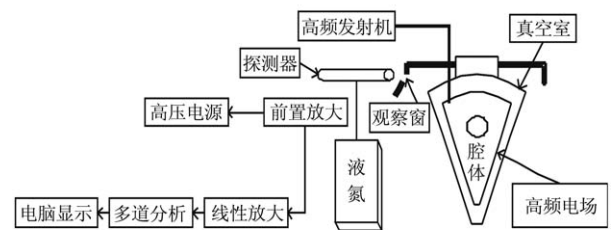


图1 用韧致辐射能谱法测定腔体电压示意图

3 谐振腔的电压计算方法与CST仿真计算结果

3.1 谐振腔电压计算方法

谐振腔Dee电压是通过腔体损耗功率和分路阻抗值

收稿日期: 2014-09-09; 修改日期: 2014-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(1107Y505020)

作者简介: 金鹏(1982-), 男, 甘肃兰州人, 工程师, 从事高频腔体的研究设计, Email: jinp@impcas.ac.cn.

来计算的, 因此只要获得实际准确的腔体分路阻抗, 就可以得知 Dee 电压和功率的对应关系。同时, 腔体的实际分路阻抗与 CST 计算得到的理论分路阻抗又呈一定的比例关系。腔体在形状一定的情况下, 其分路阻抗 R_P 和无载 Q_0 的比值是固定的。由于加工工艺的差别, 使得两腔表面性能具有一定的区别, 所以这里引入 $R_P/Q_0^{[4]}$ 这个不受腔体制作工艺带来的表面性能差别影响的量来进行分析。 Q_0 值的大小主要由腔体的加工材料及其表面的加工工艺决定, 对于同一形状的腔体, 腔体表面工艺状况越好, 则腔体的无载 Q_0 值越高。因此通过损耗功率和分路阻抗值就可以计算得到腔体电压:

$$\frac{\eta U_R^2}{P_t} = \frac{U_{实}^2}{2P_{实}}。$$

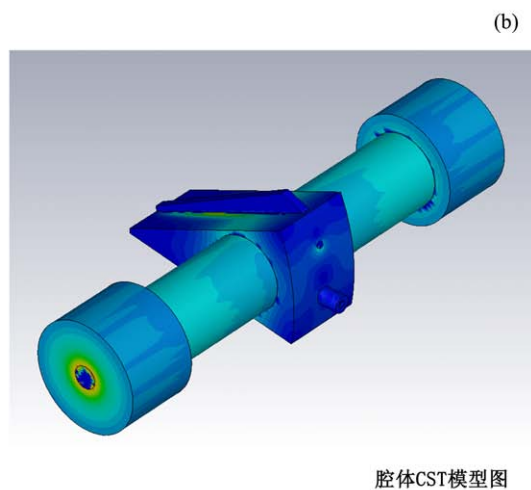
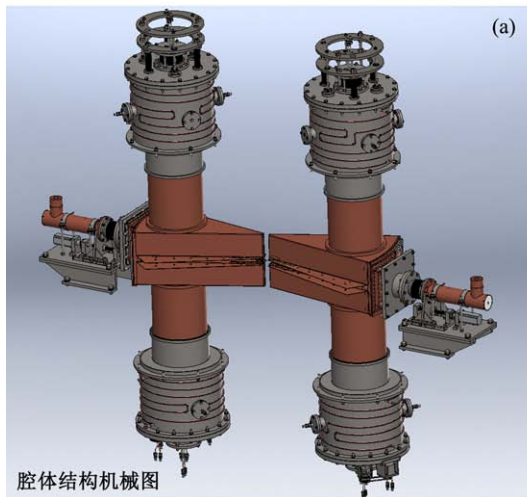


图 2 (在线彩图) 腔体结构示意图

表 1 CST 仿真计算结果

参数	频率/MHz	功率损耗/kW	分路阻抗/kΩ	极间电压/kV	$(R_P/Q_0)/\Omega$	Q_0
仿真结果	31.02	26.8	266.1	84.45	36.704	7 250

行冷态测试。测试内容包括谐振频率、 Q_0 值及 S 参数 (测试结果见表 2)。同时, 测试得到南腔信号输入线的衰减量为 1.1 dB, 北腔信号输入线衰减量为 0.9 dB, 两腔信号幅值通过幅度稳定输出衰减量同为 14 dB。

表 2 回旋加速器谐振腔的测试参数

参数	测试值(南腔)	测试值(北腔)
谐振频率/MHz	31.018 8	31.017 5
品质因数 Q	6 320	5 994
S_{11}/dB	-47.2	-37.7
S_{21}/dB	-39.4	-39.7

上式 P_t 和 U_R 由 CST 计算得到, 其中 P_t 为整腔损耗功率、 U_R 为腔体电压有效值; $U_{实}$ 为实际设计峰值电压; η 为实际 Q 值与理论 Q_0 值比率。

3.2 谐振腔的 CST 仿真计算

31.02 MHz 回旋加速器谐振腔由两个 $\lambda/4$ 谐振腔并联组成。频率粗调通过移动短路片调节频率, 频率细调通过调谐电感环实现频率微调, 功率耦合则是通过电容耦合来实现。

谐振腔体的结构示意图如图 2 所示。CST^[5] 的仿真计算结果如表 1 所列。

回旋加速器谐振腔组装完成后, 在主磁场 1.2 T 及真空度 10^{-5} Pa 的条件下, 利用网络分析仪对谐振腔进

4 利用仿真结果及测试结果进行电压标定

4.1 腔体分路阻抗计算

由 CST^[5] 仿真计算得到的腔体 $R_P/Q_0=36.7 \Omega$, 再根据实际测试得到的腔体 Q 值 (南腔为 Q_{01} , 北腔为 Q_{02}) 可计算得到两腔的实际分路阻抗值, 则南腔实际分路阻抗为

$$R_{P1} = \frac{R_P}{Q_0} \times Q_{01} = 231.94 \text{ k}\Omega ; \quad (1)$$

北腔实际分路阻抗为

$$R_{P2} = \frac{R_P}{Q_0} \times Q_{02} = 219.98 \text{ k}\Omega 。 \quad (2)$$

4.2 腔体的电压计算

腔体的实际电压值是通过其实际分路阻抗值和实际输入功率值计算得到的, 两腔的实际分路阻抗值在4.1节已经计算给出, 则两腔的实际功率值则可通过示波器得到电压及腔体总衰减量来计算。

4.2.1 南腔电压计算

南腔示波器测试得到的电压值 $V_{\text{示}P-P}=3.76$ V, 在 50Ω 阻抗下功率为

$$P_{\text{示}} = \frac{V_{\text{示}}^2}{8R_0} = \frac{3.76^2}{8 \times 50} = 0.035344 \text{ W}。$$

南腔衰减量包括腔体取样衰减 (39.4 dB)、 50Ω 同轴测量线衰减 (1.1 dB) 及幅度稳定取样衰减 (14 dB), 因此其总衰减量为 54.5 dB, 根据示波器测试得到的功率可计算出南腔实际损耗功率 P_{d1} :

$$10 \lg \frac{P_{\text{示}}}{P_{d1}} = -54.5 \text{ dB} ,$$

$$P_{d1} = P_{\text{示}} \times 10^{5.45} = 9.96 \text{ kW}。$$

根据公式(1)计算得出南腔实际分路阻抗为 231.94 k Ω , 则南腔腔体 Dee 电压为

$$V_{\text{Dee}} = \sqrt{2 \times P_{d1} \times R_{P1}} = 67.98 \text{ kV}。$$

4.2.2 北腔电压计算

北腔示波器测试得到的电压值 $V_{\text{示}P-P} = 3.76$ V, 在 50Ω 阻抗下功率为

$$P_{\text{示}} = \frac{V_{\text{示}}^2}{8R_0} = \frac{3.76^2}{8 \times 50} = 0.035344 \text{ W}。$$

北腔衰减量包括腔体取样衰减 (39.7 dB)、 50Ω 同轴测量线衰减 (0.9 dB) 及幅度稳定取样衰减 (14 dB), 因此其总衰减量为 54.6 dB, 根据示波器测试得到的功率可计算出北腔实际损耗功率 P_{d2} :

$$10 \lg \frac{P_{\text{示}}}{P_{d2}} = -54.6 \text{ dB} ,$$

$$P_{d2} = P_{\text{示}} \times 10^{5.46} = 10.19 \text{ kW}。$$

根据公式(2)计算得出北腔实际分路阻抗为 219.97 k Ω , 则北腔腔体电压为

$$V_{\text{Dee}} = \sqrt{2 \times P_{d2} \times R_{P2}} = 66.96 \text{ kV}。$$

5 韧致辐射法进行腔体Dee电压测量

5.1 测量结果

将两腔电压加至示波器电压取样峰峰值为 3.76 V 时, 利用 X 射线对两腔电压进行测量得到南腔能谱的能

量最大值为 68.39 keV, 即南腔峰值电压为 68.39 kV, 同理可测试得到北腔峰值电压为 67.32 kV。两谐振腔的能谱的能量最大值测试曲线分别如图3与图4所示。

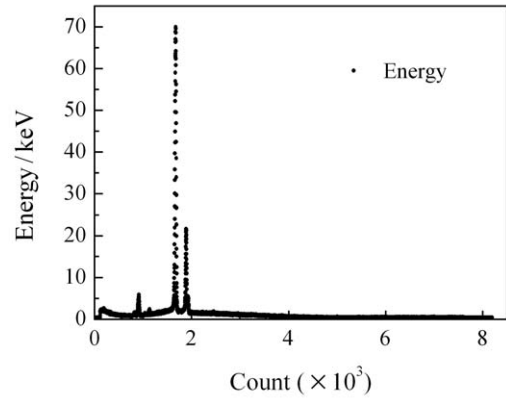


图3 南腔能谱测试曲线

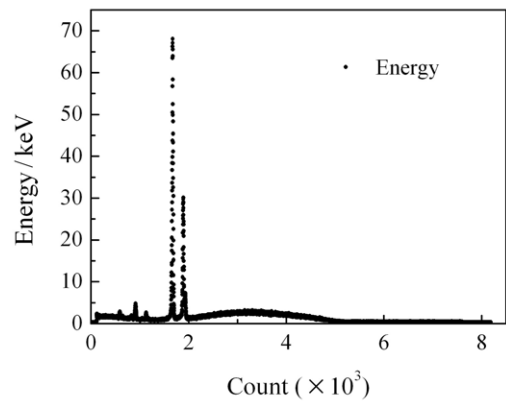


图4 北腔能谱测试曲线

5.2 误差分析

通过上述腔体电压计算值和实际测试值, 分别计算得到两腔电压实际测试值与仿真计算值的误差。

南腔电压误差为

$$\Delta_{\text{南}} = \frac{68.39 - 67.98}{68.39} \times 100\% = 0.6\% ,$$

北腔电压误差为

$$\Delta_{\text{北}} = \frac{67.32 - 66.96}{67.32} \times 100\% = 0.53\%。$$

利用韧致辐射法测量得到的两腔电压峰值与之前计算得到的电压峰值误差在 0.6% 以内 (见表3)。这也证明了用 CST 软件仿真计算结果结合对腔体的测试结果计算得到的腔体电压值的方法是准确的。

表 3 回旋高频腔体的计算数据与测试数据对比

腔体	取样电压/V	输出功率/kW	衰减量/dB	分路阻抗/k Ω	腔体电压/kV	腔体电压(X-ray)/kV	电压误差/%
南腔	3.76	9.9613	-54.5	231.94	67.98	68.39	0.60
北腔	3.76	10.1930	-54.6	219.97	66.96	67.32	0.53

6 结论

通过CST软件仿真计算得到腔体的 R_p/Q_0 值, 同时实际测量得到的腔体 Q 值, 就可以计算出腔体的分路阻抗值; 再根据输入到腔体功率大小, 可计算得到腔体上实际的高频电压值。为了验证上述方法得到的腔体电压值的准确性, 利用韧致辐射法对两腔电压进行了测量标定并与计算结果进行了比较, 在示波器输出相同取样腔体高频电压值的条件下, 韧致辐射法测量结果与实际计算值误差在 0.6% 以内。这为今后腔体电压的校准提供了一种更为便捷的方法。

参考文献:

- [1] YU Mingfeng, GAO Yihai, ZHANG Shenghu. Nuclear Techniques, 2001, **24**(8): 696. (in Chinese)
(俞鸣峰, 高宜海, 张生虎. 核技术, 2001, **24**(8): 696.)
- [2] ZHENG Qiwen, ZHANG Shenghu, GAO Yihai. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2002, **2**(6): 524. (in Chinese)
(郑启文, 张生虎, 高宜海. 核电子学与探测技术, 2002, **2**(6): 524.)
- [3] WANG Xianwu, XU xiao, SU Xueming. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2000, **20**(6): 477. (in Chinese)
(王贤武, 徐啸, 苏学明. 核电子学与探测技术, 2000, **20**(6): 477.)
- [4] LI Zhihui. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2006, **30**(7): 680. (in Chinese)
(李智慧. 高能物理与核物理, 2006, **30**(7): 680.)
- [5] <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>. [EB/OL]. [2014-08-09]. A specialist tool for the 3D EMsimulation of high frequency components.

Dee Voltage Calibration of 31.02 MHz Cyclotron Resonance Cavity

JIN Peng¹⁾, WANG Xianwu, TIAN Ruixia, XU Zhe, FENG Yong, LAN Tao

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The 31.02 MHz cyclotron RF system of Heavy Ion Medical Machine (HIMM) in IMP(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences) has completed the design and commissioning, and now has already been put into operation. Its peak voltage requires 70 kV, but the precise calculation of the Dee voltage is still a difficulty problem, we can get the value R_p/Q_0 of the cavity by CST simulation, and then combining the actual input power for cavity to calculate the real Dee voltage. In order to verify its accuracy, we use the bremsstrahlung method to test the cavity voltage under the condition of same input power. The error between test results and calculation is less than 0.6%.

Key words: cyclotron; quality factor; dee voltage; shunt impedance; bremsstrahlung method

Received date: 9 Sep. 2014; Revised date: 21 Nov. 2014

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(1107Y505020)

1) E-mail: jinp@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>