

70 MHz 回旋加速器谐振腔 高频性能的数值研究

纪彬, 张天爵, 彭朝华, 储诚节, 王修龙, 赵振鲁, 李振国, 吴隆诚

(中国原子能科学研究院 核技术与计算机应用研究所, 北京 102413)

摘要:介绍了用数值模拟手段设计加速腔体的方法。在设计 70 MHz 回旋加速器谐振腔的过程中,为满足回旋加速器磁铁的结构要求,对高频频率、 Q 值等高频参数进行了研究。在设计阶段,应用基于有限元方法的程序对高频实验进行模拟计算。回旋加速器腔体的初步设计结果将用于最终物理设计和工程设计。

关键词:回旋加速器;谐振腔;频率; Q 值

中图分类号: TL503.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)02-0121-04

Numerical Experiment of RF Performance for 70 MHz Cyclotron Cavity

J I Bin, ZHANG Tian-jue, PENG Zhao-hua, CHU Cheng-jie, WANG Xiu-long,
ZHAO Zhen-lu, LI Zhen-guo, WU Long-cheng

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-3, Beijing 102413, China)

Abstract: In the paper, some methods of numerical simulation of RF performance for accelerator cavity are introduced. In the design of a 70 MHz cyclotron cavity, to meet with the structure of magnet, RF frequency and Q value are researched, and a code based on finite element method is applied to simulate the process of RF experiment. The preliminary design of the cyclotron cavity will serve for the further physical and engineering design.

Key words: cyclotron; cavity; frequency; Q value

磁铁系统和高频系统是回旋加速器中最重要的两个部分,为带电粒子提供能量的高频系统在回旋加速器的设计与建造过程中占有重要位置^[1]。在某些紧凑型的回旋加速器设计中,因受空间限制,对高频系统的要求很高,要求其高频谐振腔能承受高功率馈入,能够稳定运行,并能提供均匀的加速电压。因此,需充分利用

主磁铁的结构特点设计异形高频谐振腔,以提高腔体 Q 值,优化加速电压分布。本工作采用数值仿真手段,模拟高频腔实验设计过程,对 1 台 70 MHz 回旋加速器腔体进行模拟计算。

1 计算方法选择

以现有的 30 MeV 回旋加速器高频谐振腔

收稿日期: 2003-06-02; 修回日期: 2003-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10125518)

作者简介: 纪彬(1979—),男,河北乐亭人,助理研究员,信息工程专业

为例,计算比较了传统的等阻抗传输线近似分析法和不同数值分析方法(包括时变场有限差分法和有限元法^[2])的结果。计算结果表明:基于有限元法的软件能更好地拟合像回旋加速器高频谐振腔这样具有复杂边界的腔体结构,计算相对误差较低。

2 70 MHz 高频谐振腔的基本参数确定

根据强流回旋加速器物理设计和磁铁设计的结果,考虑到高频腔体的频率,磁铁的谷区不再有足够的空间安放类三角形腔体,因此,研究提出结合类三角形腔体和同轴等阻抗传输线于一体的方法(图1),利用磁铁盖板上大孔的位置,放置腔体同轴线部分。根据这样的布局,初步确定高频谐振腔的如下基本结构参数:腔体的三角形部分的角度为 37.5° ;外半径为45 cm;高度为31.3 cm;同轴线部分外导体半径为10 cm;高度根据频率来调节。



图1 高频腔体结构图

Fig. 1 Structure of the cavity

3 70 MHz 高频谐振腔的初步计算

本设计主要考虑的特性参数有:谐振频率 f 、品质因数 Q 、功率损耗和加速电压分布^[3]。通过对高频腔体进行模拟计算,调节各个结构尺寸,研究其对谐振腔频率、 Q 值等的影响,并找出腔体频率、 Q 值随结构参数变化规律。

3.1 内杆半径对谐振频率的影响

在其它结构参数不变时,对内杆半径进行调节,使内杆半径在1~5.4 cm之间变化,此时,内杆长度 $L = 35$ cm,微调电容片距离 $l = 0.4$ cm。计算得到腔体频率随内杆半径 R 的变化规律示于图2。由图2可见,高频腔体的

谐振频率随着内杆半径的增大而增加。考虑到机械强度,内杆不能太细,故内杆半径选定为2.6 cm。

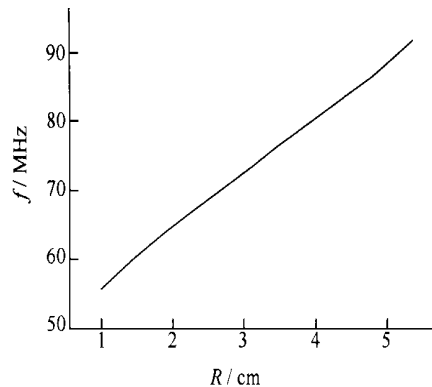


图2 不同内杆半径下的谐振频率

Fig. 2 Frequency of the cavity with radius of the bar

3.2 腔体高度对谐振频率的影响

在建模过程中,腔体的高度由内杆长度来控制,调节内杆的长度也即调节腔体高度。

在其它结构参数不变时,调节腔体高度,使内杆长度在24.85~41.55 cm之间变化,此时,内杆半径 $R = 2.6$ cm,微调电容片距离为0.4 cm。腔体频率随内杆长度的变化示于图3。由图3可见,高频腔体的谐振频率随着内杆长度的增大而减小。将内杆长度选定为35 cm。

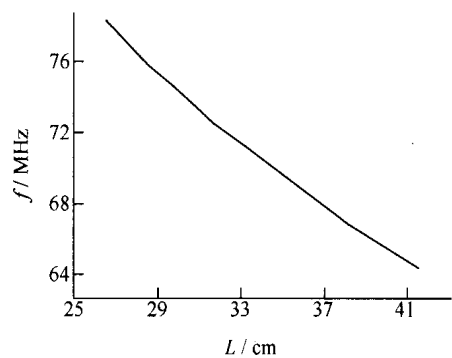


图3 不同腔体高度下的谐振频率

Fig. 3 Frequency of the cavity with height

3.3 微调电容片间距对谐振频率的影响

在其它结构参数不变的条件下,对微调电容片间距进行调节,使微调电容片间距在0.1~1.1 cm之间变化,此时,内杆长度 $L = 35$ cm,内杆半径 $R = 2.6$ cm。计算得到腔体

频率随电容片间距的变化示于图 4。由图 4 可见,高频腔体的谐振频率随着微调电容片间距的增大而升高。为防止高压打火,微调电容片间距不应太小。将其间距选定为 0.7 cm。

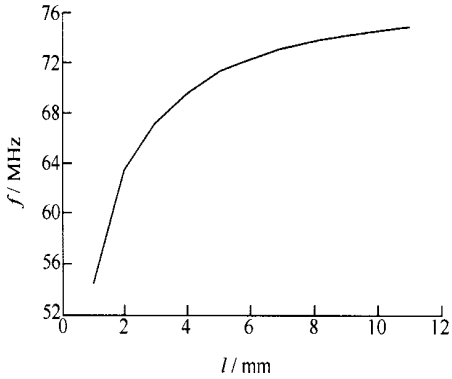


图 4 不同电容片间距下的谐振频率
Fig. 4 Frequency of the cavity with capacitance

3.4 高频腔体品质因数的计算

在腔体设计过程中,计算了多种不同的结构尺寸组合,以达到在所要求的谐振频率前提下,提高 Q 值,优化电压和功率损耗分布。表 1 列出几种不同腔体尺寸所对应的 Q 值。

表 1 70 MHz 回旋加速器高频谐振腔的主要技术参数
Table 1 Main parameters of 70 MHz cavity of cyclotron

R/cm	同轴线部分的高度/cm	腔体频率/MHz	Q 值
2.6	35	75.043 90	5 211. 845 536 75
3.6	35	83.950 19	6 461. 230 503 24
4.6	35	92.093 80	5 499. 469 125 49
5.6	35	101.347 84	5 327. 525 260 62
3.6	25	96.083 55	5 763. 220 732 60
3.6	35	83.950 19	6 461. 230 503 24
3.6	45	74.708 39	6 128. 111 315 32
3.6	55	67.319 64	5 587. 429 652 55

3.5 高频腔体的加速电压计算

在频率接近 70 MHz 时,选取模型进行加速电压的计算,根据计算结果得到加速电压 V

随粒子加速半径 r 的变化曲线(图 5)。

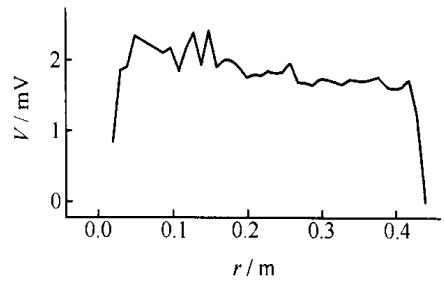


图 5 加速电压随粒子加速半径的变化
Fig. 5 Voltage with radius

4 70 MHz 高频谐振腔的优化设计

由以上初步计算并结合 30 MeV 腔体的实际经验可得出以下结论:初步计算的基本规律是符合实际情况的,但腔体品质因数计算值偏小,且加速电压分布不均匀,需进行优化设计。

4.1 腔体头部的优化设计

在以上初步计算中,对腔体的头部做了很大的简化,头部的加速间隙较小,略小于 5 mm, D 板与头部连接处的加速间隙也相对较小(图 6a)。这样小的距离易引起高频打火。引入对中心区的考虑,参考 30 MeV 高频腔体对腔体头部进行修改,修改后的腔体头部(图 6b)加速间隙为 0.8 ~ 0.9 cm,达到了实际腔体头部设计对间隙的要求。

4.2 外腔体、假 D 和 D 板的优化设计

在初步计算中,对假 D 的建模做了简化(图 7a),简化了与 D 板及与头部连接部分对应的假 D,使得腔体频率的计算结果偏高。为此,对模型进行优化,修改 D 板、外腔体和假 D 内杆等的结构和尺寸(图 7b)。修改后,加速间隙的变化更为均匀,满足了实际高频腔体要求。

4.3 微调电容片的优化设计

在初步计算中,微调电容片的间距为 0.7 cm,电容片半径为 3 cm。适当调整微调电容片间距为 1 cm,同时增大电容片半径为 3.6 cm,使微调电容的电容值保持不变^[4]。这主要是考虑到类似腔体的 RF 运行经验,为避免电容板之间的打火而进行的调整。

由初步计算所得的规律,调节内杆半径与腔体长度。当内杆半径为 2 cm、圆柱部分高度为 30.35 cm 时,腔体频率为 69.538 704 MHz,

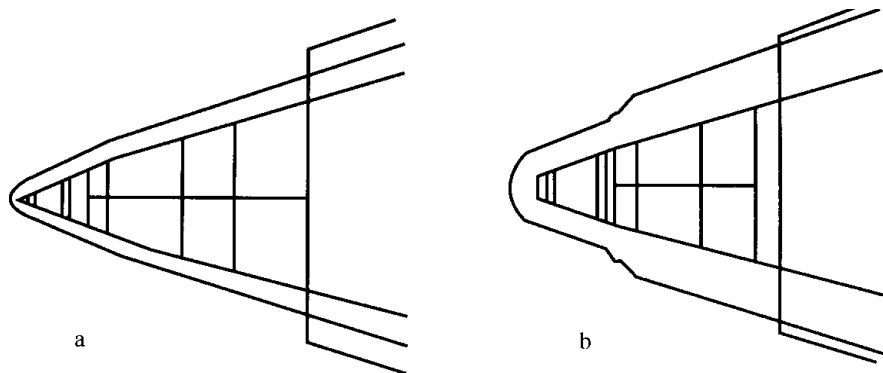


图6 修改前(a)、后(b)的腔体头部

Fig. 6 Head of the cavity before modification (a) and after modification (b)

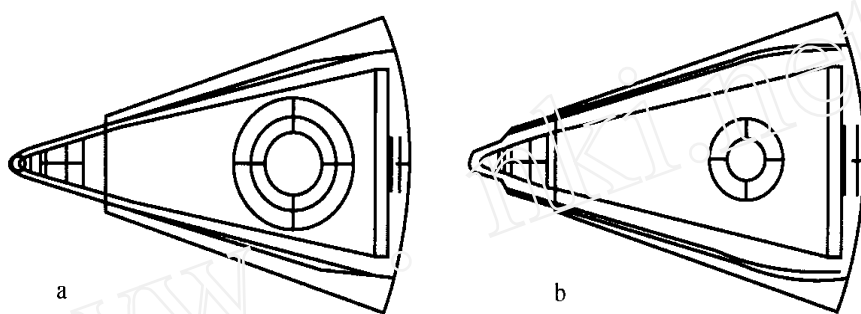


图7 修改前(a)、后(b)的腔体结构

Fig. 7 Structure of the cavity before modification(a) and after modification(b)

品质因数 Q 为 7 052。与初步计算的结果相比,在相同频率下, Q 值高出 1 000 左右,此时的加速电压随粒子加速半径的变化(图 8)比初步计算时的更加均匀。

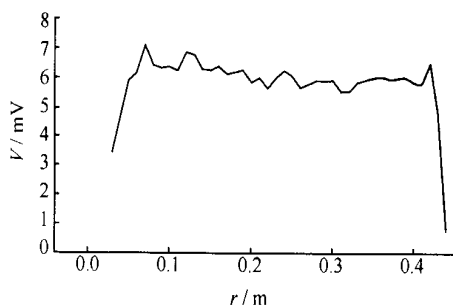


图8 优化设计后的加速电压分布图

Fig. 8 Voltage with radius after modification

5 结论

本工作采用高性能计算机数值分析手段,模拟传统的高频工程实验室试验过程,以提高高频谐振腔的设计水平,并对 70 MeV 异形谐振腔的高频性能进行了分析,研究了不同结构参数对该腔体各种高频性能的调控作用和它们之间的制约关系。数值计算结果表明,新设计

的谐振腔谐振频率为 69.538 704 MHz, Q 值为 7 052,并有着比较均匀的加速电压分布。根据这个设计,冷试验模型腔体已经开始加工,预计由于数值计算所得到的良好的高频性能,将可显著减少冷模试验的工作量,并为今后省略实验过程打好基础。

参考文献:

- [1] 桂伟燮. 荷电粒子加速器原理[M]. 北京:清华大学出版社,1994. 293 ~ 301.
- [2] 闫润卿,李英惠. 微波技术基础[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996. 224 ~ 276.
- [3] 陈振国. 微波技术及应用[M]. 北京:北京邮电大学出版社,1996. 1 ~ 17.
- [4] 谢处方,饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 北京:高等教育出版社,1997. 184 ~ 220.
- [5] 陈精一,蔡国忠. 电脑辅助工程分析——ANSYS 使用指南[M]. 北京:中国铁道出版社,2001. 170 ~ 183.