

# 100MeV强流质子回旋加速器高频腔公差研究

毕远杰<sup>1,2;1)</sup> 张天爵<sup>1</sup> 纪彬<sup>1</sup> 姚红娟<sup>1,2</sup> 安世忠<sup>1</sup> 邢建升<sup>1</sup> 唐传祥<sup>2</sup>

1 (中国原子能科学研究院串列加速器升级工程技术部 北京 102413)

2 (清华大学工程物理系 北京 100084)

**摘要** 针对中国原子能科学研究院正在设计的100MeV强流质子回旋加速器, 研究并提出高频腔公差. 高频腔的误差包括加工安装的误差和重力引起的D板变形. 加工安装误差的存在干扰束团的径向和轴向运动, 用理论分析和数值模拟相结合的方法给出加工安装的公差; D板的重力变形引起加速间隙的轴向错位从而使束团产生轴向的相干振荡, 计算结果表明目前结构的D板变形在允许范围内.

**关键词** 回旋加速器 高频腔 公差 重力变形

## 1 引言

中国原子能科学研究院正在进行HI-13串列加速器升级工程的设计, CYCIAE-100强流质子回旋加速器为该工程的主工艺设备, 其设计目标是引出75MeV—100MeV, 200μA的强流质子束<sup>[1]</sup>.

本文详细讨论了高频腔在设计安装过程中可能存在的各种公差及其对束流品质的影响, 给出其设计要求, 并研究了重力引起的D板变形是否满足束流动力学的要求. 在国际上, Richardson, Mackenzie和Craddock等人对类似问题作过分析<sup>[2-4]</sup>, 但是他们的研究是基于简单加速结构, 而且没有和实际设计中高频腔的各种误差相联系, 本文首次系统地针对复杂加速结构的高频腔公差进行了分析.

## 2 加工和安装误差的允许范围

CYCIAE-100高频腔的整体结构示于图1, 它由两个独立的腔体组成, 每个腔体有两个加速间隙. D盒的张角α为36°, D板的材料为紫铜, 厚2cm, 半径约为1.8m. 左右两个腔体由两台独立的高频机提供功率,

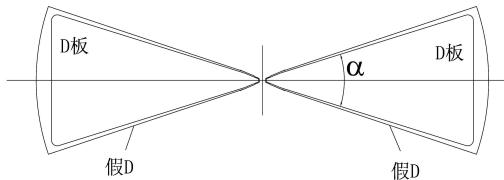


图1 高频腔的结构图

电压不可避免地会存在偏差.

两个腔体的不对称电压和一次谐波存在着一定的等效关系<sup>[1]</sup>. 如图2所示, 加速电压左边弱右边强, 相当于括号中所表示的磁场上面弱下面强. 两者产生的效果都是使回旋的中心向左移动.

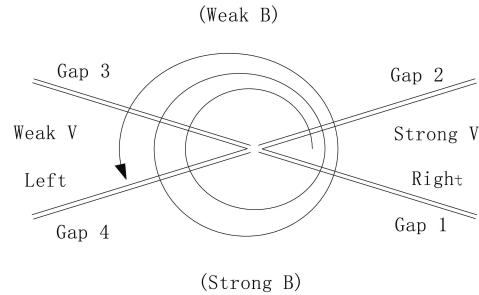


图2 加速电压不对称性和磁场不对称性的等效定义:

$$\delta u = \frac{\delta V}{V} = \frac{V_r - V_l}{V_l + V_r}, \quad \delta b = \frac{\delta B}{B} = \frac{B_d - B_u}{B_d + B_u},$$

由电压左右不对称性引起曲率半径的变化

$$\frac{\delta \rho}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{\delta T_n}{T_n} = \frac{1}{2} \frac{\delta V}{nV} = \frac{\delta u}{4N + 2}, \quad (1)$$

其中  $T_n$  为第  $n$  个半圈的动能,  $N = 2n + 1$  为圈数. 由磁场上下不对称性引起曲率半径的变化

$$\delta \rho / \rho = -\delta B / \bar{B} = -\delta b = -\pi b_1 / 4, \quad (2)$$

其中  $b_1$  为  $\delta b$  等效一次谐波幅值. 由式(1)和(2)

$$b_1 = -\delta u / \pi / (N + 1/2), \quad (3)$$

存在一次谐波的径向运动方程为

$$d^2x/d\theta^2 + \nu_r^2 x = b_1 \cos(\theta + \phi_1), \quad (4)$$

其中  $x$  为径向偏离平衡轨道的值, 单位是轨道半径,  $\phi_1$  为一次谐波峰值的角度. 方程(4)的解为

$$x = b_1(\cos\theta - \cos\nu_r\theta)/(\nu_r^2 - 1), \quad (5)$$

计算结果如图3的曲线2所示, 均匀的不对称电压将使束团中心在径向产生振幅衰减的振荡.

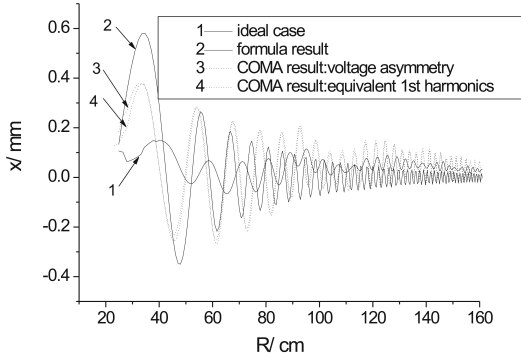


图3 COMA和公式的计算结果比较 ( $\delta u = 1\%$ )

在多粒子跟踪程序COMA<sup>[5]</sup>中加入左右不对称的电压<sup>[3]</sup>, 如图3曲线3所示. 曲线3和曲线2的结果比较接近, 说明公式估算可以很好地反映束团的变化规律, 两者存在差别的主要原因在于求解公式(4)时近似认为  $b_1, \nu_r$  为常数, 实际上  $b_1$  为一个逐渐减小的量,  $\nu_r$  为随半径增加的量.

根据(3)式将电压差等效成一次谐波, 直接加入COMA的磁场中模拟束流的运动情况, 结果如图3的曲线4所示. 曲线4和曲线3符合得很好, 因而不对称电压可以通过适当的一次谐波来补偿.

综上, 1%的电压差在引出区引起的振幅约为0.04mm. 在整个加速的过程中, 我们要求  $N$  种效应引起的振幅小于0.3mm, 每种效应的贡献要小于  $0.3\text{mm}/\sqrt{N}$ , 若  $N = 9$ , 则要控制电压差在2.5%以内.

单个腔体的误差包括: 安装时D板围绕加速器中心旋转一个小角度, 导致两个加速间隙电压差; 加工时D板的张角  $\alpha$  偏小或偏大, 使得电压偏高或偏低. COMA模拟结果显示: D板转  $0.2^\circ$  引出区径向振幅增加0.03mm. D板窄  $0.1^\circ$  和宽  $0.1^\circ$ , 引出区径向振幅增加0.024mm和0.028mm. 实际上加工安装可以控制在  $0.05^\circ$ , 满足束流动力学要求.

### 3 加速间隙的轴向错位

高频腔D板铜板由两根内杆支撑, 如图4所示, 变形主要在大半径处, 最大值约为0.35mm.

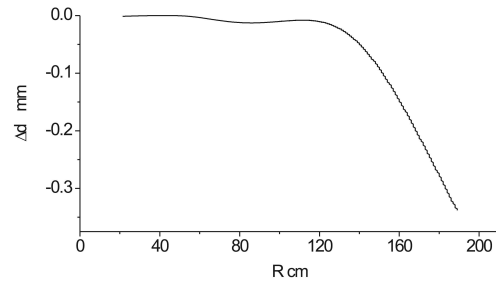


图4 D板因重力变形

高频D板的重力变形及安装过程中的误差导致加速间隙轴向错位, 产生轴向电场<sup>[4]</sup>, 影响束流轴向运动. 图5为轴向错位后加速间隙的电势分布.

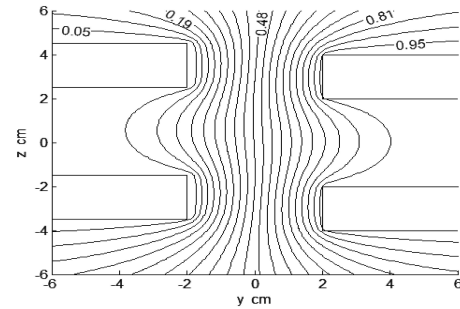


图5 加速间隙的错位

$$E_y = V(\cos(\pi y/g) + 1)/2g, \quad (6)$$

其中  $V$  为加速电压,  $g$  为  $E_y$  的半高宽. 对于一个加速间隙, 将  $E_z$  沿错位后新的中心平面做 Taylor 展开, 得到对应于  $\Delta d$  的错位的  $\Delta P_z$  为

$$\Delta P_z = -\frac{q}{2}\Delta d \left( \int_{-\infty}^0 - \int_0^{\infty} \right) \frac{\partial E_z}{\partial z} \cos(\omega t + \phi_c) dt, \quad (7)$$

其中  $\phi_c$  是在  $y = 0$  粒子相对于高频的相位. 错位导致的  $\Delta P_z$  和  $\Delta d$  成正比, 和  $z$  没有关系. 对加速间隙的两边, 假设粒子的曲率半径和动能分别是  $R_1, T_1$  和  $R_2, T_2$ , 则再由  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$  及  $\partial E_x / \partial x \approx 0$  得到

$$\left( \frac{\Delta P_z}{P} \right)_{1,2} = \frac{qV\Delta d}{8gT_{1,2}} \left[ \frac{\cos\phi_c + \cos(\phi_c \mp hg/R_{1,2})}{1 - (hg/\pi R_{1,2})^2} \right], \quad (8)$$

其中  $h$  为高频的谐波数.

粒子在一圈中会遇到4个加速间隙, 第一个加速间隙的位置为  $\theta_1$ , 第二个加速间隙的位置是  $\theta_2 = \theta_1 + \alpha$ . 在两个加速间隙之间, 轴向运动方程为

$$d^2z/d\theta^2 + \nu^2 z = 0, \quad (9)$$

在  $\theta = \theta_j$  ( $j = 1, 2$ ) 的边界条件为

$$dz/d\theta|_{\theta=\theta_j(j=1,2)} = \beta_j z_j, \quad (10)$$

式中  $\beta_j = \Delta P_z / m\omega\Delta d$ .

由公式和 COMA 计算得到轴向振幅增加分别为 0.003mm 和 0.004mm, 两者基本一致. 可见, 高能端的变形不会对束流产生影响, 目前的 D 板结构不必担心重力变形的问题. 除中心区以外的 D 板在安装的过程中整体偏移  $\Delta d=1\text{mm}$ , 中心粒子的轴向振幅增加 0.5mm, 我们要求  $\Delta d$  不超过 0.2mm.

## 4 结论

本文理论分析并用程序模拟了两个腔体的电压差及单个腔体因加工安装过程中的误差而导致的电压变化对束流的影响, 分析计算结果得出如下结论: 左右

腔体电压差要控制在 2.5% 以内; 加工和安装时 D 板的角偏差可以控制在  $0.05^\circ$ , 满足束流动力学的要求.

D 板重力变形主要在大半径处, 最大值约为 0.35mm, 使束团轴向振荡幅度增加约 0.004mm, 因此目前结构的 D 板变形不会对束流产生大的影响. 中心区以外的 D 板在安装的过程中整体偏移会对束团产生大的扰动, 我们要求偏移量不超过 0.2mm.

感谢 G. Mackenzie, Y. N. Rao 和 G. Dutto 的有益讨论和指导, 感谢杨梅、许瑶瑶在工作过程中的帮助.

## 参考文献(References)

- 1 ZHANG T J et al. Proceeding of the APAC, 2004, 267—269
- 2 Richardson J R. TRI-DN-69-1, 1969
- 3 Mackenzie G et al. TRI-DN-73-17, 1973
- 4 Craddock M K et al. Proceedings of the 6th International Cyclotron Conference, AIP #9, 1972
- 5 Kost C J, Mackenzie G H. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.NS-22, No.3, TRIUMF, June 1975

# Research on RF Cavity Tolerance of CYCIAE-100

BI Yuan-Jie<sup>1,2;1)</sup> ZHANG Tian-Jue<sup>1</sup> JI Bin<sup>1</sup> YAO Hong-Juan<sup>1,2</sup>  
AN Shi-Zhong<sup>1</sup> XING Jian-Sheng<sup>1</sup> TANG Chuan-Xiang<sup>2</sup>

1 (Technology Division of BRIF, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2 (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** The tolerances of the manufacture and installation errors and Dees deformation caused by gravity in RF cavity of CYCIAE-100 are investigated. Both the analytic treatment and numerical simulation are carried out to give the tolerance of the manufacture and installation errors which disturb the radial and vertical motion of the beam. The Dees deformation caused by gravity leads to axial misalignment of the Dees and then induces the build-up of coherent axial oscillations. However, the calculated results show that the deformation of our Dees is acceptable.

**Key words** cyclotron, RF cavity, tolerance, gravitational deformation