

强流回旋加速器静电注入偏转板 设计方法研究

张天爵 樊明武

(中国原子能科学研究院电物理和激光研究所, 北京, 102413)

从离子在回旋加速器静电注入偏转板中的运动方程出发,对注入偏转板完成了计算机辅助设计,并给出辅助加工数据。计算设计和束流仿真过程全部在PC-486微机上完成,形成一个注入偏转板设计软件包,并且可以与已开发的“智能化回旋加速器主磁铁CAE系统”配套使用,使回旋加速器的整机开发前进了一步。

关键词 回旋加速器 静电注入偏转板 计算机辅助设计

在新一代的回旋加速器中,常用外部离子源。这是因为:外部离子源不污染回旋加速器的主体,经过筛选的离子注入到加速器的中心区,与内离子源相比,易于维护。这些优点,对于回旋加速器非常重要。但外离子源带来了一个新的问题——注入,方法之一是轴向注入,离子束沿回旋加速器主磁铁的主轴垂直注入,用静电偏转板偏转离子束方向,使其到达气隙中心面时正好偏转 90° ,由回旋加速器的D电压吸引,开始同步加速。

在轴向注入系统中,偏转板是关键部件,由于空间的限制,采用静电偏转。静电偏转板由两个电极组成,极间的电场对离子轨迹产生必要的偏转。离子除了受电场作用外,还受到加速器主磁场的作用,离子在交叉场中的运动比较复杂,因此偏转板的设计具有较大的难度。

偏转板的设计必须满足以下两个要求:

(1)从物理上考虑,其静电通道的弯曲必须与中心离子运动轨迹一致,入口与出口也必须与注入系统和D盒相匹配,并且要求出口处中心轨迹落在主磁铁的磁中心平面上。

(2)从工程上考虑,电极间电压要尽量小,电极曲面可用标准数控铣床加工,并要求几何尺寸足够小,以便安装于空间有限的中心区(CYCIAE 30中心区尺寸为:中心的垂直孔径30 mm,气隙高度30 mm)。

1 螺旋形偏转板的设计方法

要将离子束偏转 90° ,在不考虑磁场影响的情况下,电极的结构就是一个圆柱形电容器,在磁场作用下,离子作回旋运动,则要求偏转的形状为一个被扭成螺旋状的圆柱形电容器,因

* 核工业科学基金资助项目

收稿日期:1995-06-13 收到修改稿日期:1995-8-14

此,称为螺旋形偏转板。

为设计方便,假定偏转板中的电场 E 总是与中心离子的速度矢量 v 垂直,那么中心离子轨迹将总是在等位面上,并且在偏转板中,电场只改变离子运动方向,因而离子能量为常数,同时忽略偏转板入口处的边缘场效应。由于中心区磁场分布十分复杂,无法使用文献[1,2]中的解析理论,必须应用数值方法设计偏转板。

1.1 离子在偏转板中的运动方程

在设计过程中,选用右手笛卡儿坐标系统。坐标原点位于回旋加速器的中心, x 轴的正向与有吸极的D形盒对称轴一致。 z 轴与加速器的主轴重合。中心轨迹的运动方程可写成

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(m \frac{dx}{dt} \right) &= q \left[\frac{dy}{dt} B_z - \frac{dz}{dt} B_y \right] + q E_x \\ \frac{d}{dt} \left(m \frac{dy}{dt} \right) &= q \left[\frac{dz}{dt} B_x - \frac{dx}{dt} B_z \right] + q E_y \\ \frac{d}{dt} \left(m \frac{dz}{dt} \right) &= q \left[\frac{dx}{dt} B_y - \frac{dy}{dt} B_x \right] + q E_z \end{aligned} \quad (1)$$

对运动方程作180步R-K积分,步长为 0.5° ,即 v 由垂直向下转到水平方向。在积分过程中,需要求解空间中某一点的电磁场,方法如下。

1.2 磁场

磁场的计算有两种方法:在没有实测数据的情况下,采用“智能化回旋加速器主磁铁CAE系统”^[3]设计结果的磁场数据;有实测数据时,可根据测磁数据做Taylor展开来计算磁场。根据测磁数据计算磁场,方法随场点的位置而异。在轨迹的初始位置,基于沿 z 轴测量的磁场,这时可假定磁场不随方位角变化,只有 r 和 z 分量, $\mathbf{V} \cdot \mathbf{B} = 0$,作关于变量 r 的Taylor级数展开,可得到:

$$B_r(z, r) = -\frac{r}{2} \frac{\partial B_z(z, r)}{\partial z} \Big|_{r=0} - \frac{r^2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial B_z(z, r)}{\partial r} \Big|_{r=0} \right) - \dots \quad (2)$$

对于接近 z 轴的离子,只需取右边第一项,求解磁场沿 z 的变化,采用了拉格朗日插值函数。当轨迹接近中心面时,用中心面上的磁场测量值来计算磁场分量,由 $\mathbf{V} \times \mathbf{B} = 0$,并且认为磁场关于 $z=0$ 平面对称,在柱坐标系中,作Taylor展开后,可得到:

$$\begin{aligned} B_r &= z \left(\frac{\partial B_z}{\partial r} \right) \Big|_{z=0} + z^3 \dots \\ B_\theta &= \frac{z}{r} \left(\frac{\partial B_z}{\partial \theta} \right) \Big|_{z=0} + z^3 \dots \end{aligned} \quad (3)$$

$$B_z(r, \theta, z) = B_z(r, \theta, z=0) - \frac{z^2}{2} \left(\frac{\partial^2 B_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial B_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 B_z}{\partial \theta^2} \right) \Big|_{z=0} + \dots$$

由于测磁是在柱坐标系中进行的,因此求得上述的各个磁场分量后,需要转换为直角坐标系的磁场分量。基于测磁数据的两种磁场计算方法,当轨迹距垂直轴的距离小于距中心面的距离时,用第一种方法,随着离子的偏转,第一个距离越来越大,而第二个越来越小,当第二个距离小于第一个时,用第二种方法。

1.3 电场

由于假定了电场 E 的大小一定,方向总是保持垂直于中心离子的速度 v (图1),则有:

$$E_z = E \frac{v_r}{v}$$

$$E_x = -E \frac{v_x v_x}{v v_r} \tag{4}$$

$$E_y = -E \frac{v_x v_y}{v v_r}$$

根据上述的场值,可用数值方法求解方程(1),积分 180 步后,中心轨迹最后一点的速度虽然转为水平方向,但它的位置和其他的速度分量不一定符合要求,因此需要根据此点的位置和速度分量,优化偏转电压,用数值方法优化电场,然后重新求解运动方程,如此循环,直到满足条件。

1.4 螺旋形偏转板电极曲面

计算螺旋形偏转板电极曲面的形状时,首先,基于优化过的偏转电压,在偏转板中对运动方程进行 180 步 R-K 积分,计算中心离子运动轨迹 x_c, y_c, z_c , 然后,给定偏转板的半气隙 $D_{1/2}$ 和电极半宽度 $W_{1/2}$, 并结合中心离子运动轨迹上各点的电场分量,可求出偏转板两个电极四个顶点的曲线,分别用坐标表示为:

上电极外边缘顶点曲线: $x_{uo}(i), y_{uo}(i), z_{uo}(i)$;

下电极外边缘顶点曲线: $x_{lo}(i), y_{lo}(i), z_{lo}(i)$;

上电极内边缘顶点曲线: $x_{ui}(i), y_{ui}(i), z_{ui}(i)$;

下电极内边缘顶点曲线: $x_{li}(i), y_{li}(i), z_{li}(i)$;

由上述顶点曲线构成了电极曲面。同时,还计算了偏转板电极曲面与主磁铁的距离,以判断回旋加速器中心区是否有足够的空间安放偏转板。

2 偏转板的计算机辅助加工

可用一铜的圆柱体来加工螺旋形偏转板。首先需要计算圆柱体的外表面最小半径和加工圆柱体内表面的半径,以及相应的轴线位置,然后将曲面数据变换到加工坐标系中,生成数控铣床用的数据。

2.1 求圆柱半径和轴线位置

设定一初始轴线位置 $O(x_o, y_o)$, 计算偏转板上、下电极曲面外边缘上各点与 O 点的距离,从而求出圆柱体的外表面当前的最小半径,自动优化 O 点位置,经迭代最终得到用于加工偏转板的铜圆柱体的最小半径及相应的轴线位置 $O(x_o, y_o)$ 。

用 $O'(x'_o, y'_o)$ 表示加工圆柱体内表面的轴线位置,以 $O(x_o, y_o)$ 的位置初始化 $O'(x'_o, y'_o)$ 的位置,计算下电极曲面内边缘上各点与 O' 点的距离,经迭代求出最佳 O' 点位置及相应的内表面加工半径。

2.2 电极曲面的加工数据

在偏转板电极曲面的加工计算时,以 O 点为原点, z 轴指向圆柱体的上方,以起始位置电极边缘的方向为 x 轴的方向,这个坐标系称为加工坐标系。将电极曲面的所有数据转换到加工坐标系中,先平移,平移量为:

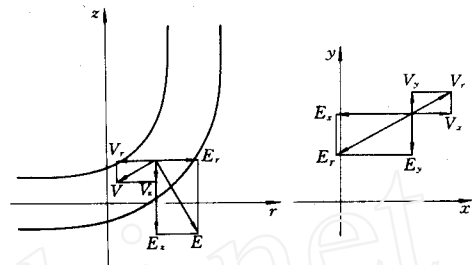


图1 偏转板中的电场分量

Fig.1 The component of electric field in the inflector

$$T_x = x_0 \quad T_y = y_0$$

再旋转, 旋转角为:

$$\alpha = \arctan \frac{y_{ui}(i) - y_{uo}(i)}{x_{uo}(i) - x_{ui}(i)}$$

根据加工坐标系下的电极曲面数据 $x_{uo}(i)$ 、 $y_{uo}(i)$ 、 $x_{ui}(i)$ 、 $y_{ui}(i)$, 生成数控加工的数据, 每个加工数据结构为:

$\alpha, \Delta, z, x_{out}, x_{in}$

其中: $\alpha = \arctan \frac{y_{ui}(i) - y_{uo}(i)}{x_{uo}(i) - x_{ui}(i)}$, 为圆柱段(加工平台)的旋转角; $\Delta = -\sin\alpha \cdot x_{uo}(i) + \cos\alpha \cdot y_{uo}(i)$, 为圆柱段沿 y 轴的位移; z 为铣刀轴线高度; x_{out}, x_{in} 为电极两端点旋转后的 x 坐标。加工过程的计算机模拟示于图 2。

3 计算结果

基于上述方法而编写的程序, 同时还考虑了其他一些工程加工的因素, 例如计算铣刀的最大半径, 计算偏转板与 D 形盒、主磁铁的相对位置等, 可满足偏转板一般工程设计的需要。

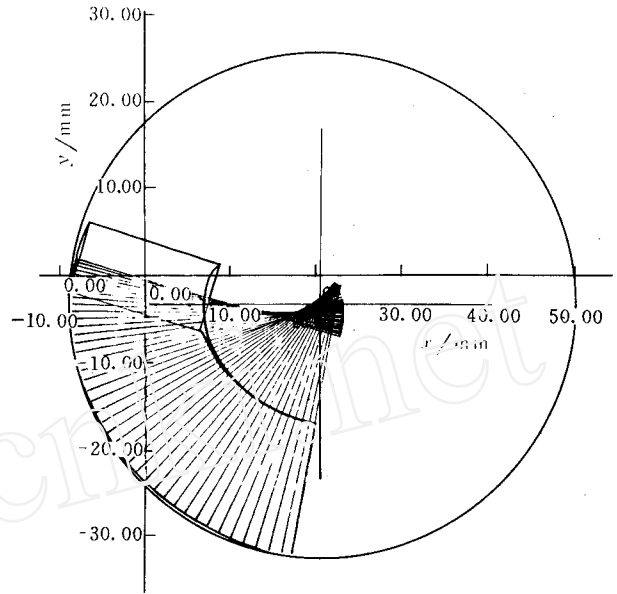


图 2 电极曲面的加工过程

Fig.2 The machining process of the electrode surface

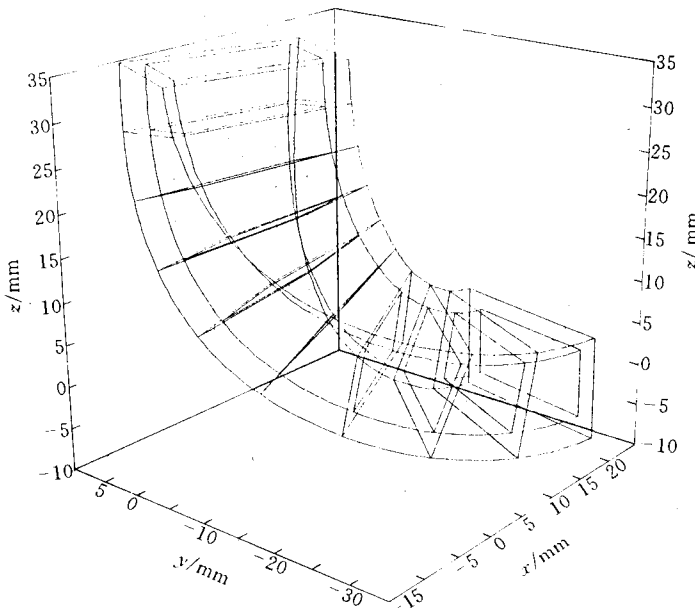


图 3 30 MeV 回旋加速器偏转板

Fig.3 The inflector for a 30 MeV cyclotron

CYCIAE 30 回旋加速器偏转板设计结果示于图 3。有关数据提供给 CYCIAE 30 回旋加速器工程调束参考。70 MeV 强流 H^- 回旋加速器偏转板的计算结果示于图 4, 这为中国原子能科学研究院“北京放射性核束装置”申请项目中的回旋加速器设计做了一些初步的技术积累工作。

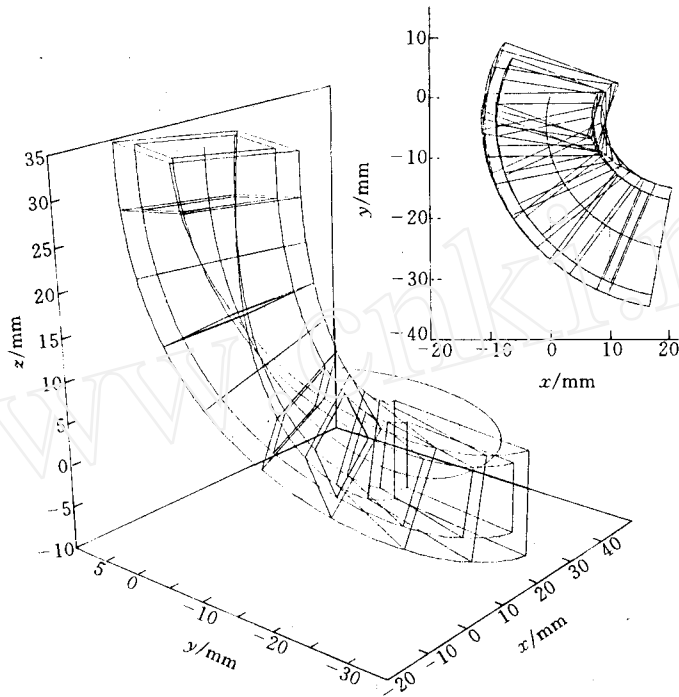


图 4 70 MeV 强流 H^- 回旋加速器偏转板及其在 x - y 平面上的投影

Fig.4 The inflector and the projection on x - y plant for a 70 MeV H^- cyclotron

参 考 文 献

- 1 Belmont JL Pabot JL. Study of Axial Injection for the Grenoble Cyclotron. IEEE Trans on Nucl Sci, 1966, NS - 13(4):191
- 2 Root LW. Design of an Inflector for the TRIUMF Cyclotron [thesis]. University of British, 1972.
- 3 Zhang T, Cheng Y, Fan M. Intelligent Main Magnet CAE System of CYCLONE Type Cyclotron and Its Applications. Proc of Third European Particle Accelerator Conference. Berlin, 1992, 1364 - 1366.

DESIGN STUDY OF ELECTROSTATIC INFLECTOR IN COMPACT CYCLOTRON INJECTION SYSTEM

Zhang Tianjue Fan Mingwu

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

ABSTRACT

The beam dynamics behaviour in electrostatic inflector is investigated for a vertical type injection system to a compact cyclotron. The computer aided design and machining of the inflector are based on the simulation of computed beam orbit. Modeling and simulation are done on PC-486 to form a software package. The software package can be used to develop a new type cyclotron design combining with the software package CYCCA developed by China Institute of Atomic Energy three years ago.

Key words Cyclotron Electrostatic inflector CAD

《核物理学家王淦昌》一书出版

《核物理学家王淦昌》一书,近日已由原子能出版社出版。该书用大量翔实、生动的资料,记述了王淦昌院士从一个丧失双亲的少年成长为著名科学家的历程,介绍了王老对核物理、基本粒子物理、惯性约束聚变研究等领域的杰出成就,及在促进我国核工业和高科技发展方面的卓越贡献。书中以丰富的史料,从不同侧面展现了他诚挚坦荡的品格和热爱祖国,热爱科学的高尚品德。中国科学院院长周光召院士在为该书所作的序言中指出,该书的出版“不仅对我国现代科学史的研究有重要价值,而且对促进我国的精神文明建设和在青少年中形成“学科学、爱科学”的风气也是很有意义的”。

摘自中国原子能科学研究院院报