

等时性迴旋加速器译文集

一机部机械工业自动化研究所

一九八〇年十二月

目 录

1. 等时性迴旋加速器简介..... (1)
2. 在等时性旋转对称磁场的中心平面上考虑了电场影响的离子运动动力学..... (13)
3. 离子在迴旋加速器中心区的运动..... (25)
4. 计算迴旋加速器中沿方位角周期变化磁场的解析近似法
..... (31)
5. 关于CS-15 紧凑型迴旋加速器的离子源和内束流..... (45)
6. 紧凑型等时性迴旋加速器的运行和性能..... (57)
7. 小型冷阴极高密度迴旋加速器离子源..... (65)
8. 小型紧凑的 30英寸等时性迴旋加速器的高频系统..... (71)
9. 密执安大学 88英寸迴旋加速器的高频系统..... (77)
10. 橡树岭相对论性等时性迴旋加速器的磁场设计..... (85)

等时性迴旋加速器简介

(三室科情组、情报室)

本文主要简述等时性迴旋加速器的工作原理、结构特征、用途、现状及今后的发展方向。

一、引言

自1930年劳伦斯(E. O. Lawrence)提出建造迴旋加速器的建议之后,于1932年建成了世界上第一台迴旋加速器,能把质子加速到1.22兆电子伏。在串列式静电加速器建成以前,从几兆电子伏至20兆电子伏能区的核物理实验主要依靠迴旋加速器来进行。迴旋加速器是一种用途很广的加速器。迴旋加速器的最大特点是平均粒子流强很强,内靶粒子流可达1毫安左右,甚至3毫安,引出粒子流强度可达200-300微安,约为同步迴旋加速器的1千倍。现在利用普通的迴旋加速器可以把质子加速到20兆电子伏。建造能量更高的普通迴旋加速器是不经济的,而且随着粒子能量的增加,粒子的迴旋周期也逐渐变长,粒子相角不断增大,最后落到减速区,就不能继续加速。这是因为在普通迴旋加速器中,粒子的轴向聚焦是依靠随半径增大而下降柱对称磁场来解决的。在这类普通的迴旋加速器中,由于相对论效应,粒子质量的增加随着粒子能量的增加愈来愈显著,最后破坏了谐振条件,使被加速粒子落到减速区。如果能设计出一种磁场既能使粒子的迴旋周期保持不

变（即等时性），而又能使轴向聚焦得到满足，就可把粒子加速到更高的能量。能满足这两个条件的加速器就是等时性回旋加速器。

二、等时性回旋加速器的工作原理和结构特征

我们知道粒子在均匀磁场中，粒子的旋转周期 T 为 ⁽¹⁾

$$T = \frac{2\pi m}{Z_0 B} = \frac{2\pi E}{Z_0 B c^2} \quad (1)$$

这里， E 为粒子的能量， B 为轨道上的磁感应强度。要使粒子的旋转周期不变， E/B 必须保持不变，也就是说磁感应强度要随粒子能量的增加而增加。粒子的能量与它的速率之间的关系是

$$E = E_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

其中， v 是粒子的速率。如果粒子回旋角速度为 ω ，轨道半径为 r ，则 $v = r\omega$ 。在等时性回旋加速器里，粒子回旋速率保持不变，假定它等于 ω_0 ，于是得到

$$E = E_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r^2 \omega_0^2}{c^2}}} \quad (3)$$

若设加速器中心的磁感应强度为 B_0 ，那么按等时性条件应有

$$\frac{B}{E} = \frac{B_0}{E_0} = \text{常数} \quad (4)$$

这里 B 是粒子能量为 E 时，粒子轨道上的磁感应强度。由(3)和(4)，得

$$B = B_s \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\omega_0^2}{c^2} r^2}} \quad (5)$$

这就是满足等时性要求的磁场分布形式。但是(5)式所描述的磁场，其降落指数 n 为

$$n = -\frac{r}{B} \frac{\partial B}{\partial r} = 1 - \frac{\xi^2}{\xi_0^2} \quad (6)$$

可知 $n \leq 0$ ，而且是粒子能量的函数。由于这种磁场是旋转对称的，粒子的轴向运动将是不稳定的，不满足轴向聚焦的要求。轴向聚焦与等时性条件的矛盾是设计等时性回旋加速器的关键，处理得好，加速器的性能指标就好，要最大限度的满足等时性条件，适当地满足轴向聚焦 ($Q_U = 0.1 \sim 0.12$)。

1938年托马斯 (L. H. Thomas) 提出了使磁场沿方位角变化，产生一项轴向聚焦力，以满足轴向聚焦；而平均磁场则从中心到边缘随半径的增加逐渐增加，以满足等时性要求。如果设 $\bar{B}$ 是粒子封闭轨道上的平均磁感应强度，代入(5)，那么我们可以由(5)和 $\omega_0 = \frac{v}{r}$ 得

$$\bar{B} = B_s \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (6)$$

这就是沿方位角调变的磁场中的等时性条件。

然而托马斯提出的这一建议，限于当时的条件，没有能立即实现。后来直到1956年，由于加速器技术的发展，以及对强流加速器的迫切需要，才得到实现。自1956年建成第一台等时性回旋加速器之后，这种类型的回旋加速器发展很快。目前已建成的和

处于建造中的等时性迴旋加速器有 95 台，能量多为几十兆电子伏，有三台大型的已达几百兆电子伏。还有数台能量更高的这类加速器正在建造或研究设计中。

常见的等时性迴旋加速器有两种结构，一种是托马斯型迴旋加速器，另一种是螺旋线型等时性迴旋加速器。在这两种加速器里平均磁场（沿封闭轨道的平均值）都是随半径增大而增强，以满足等时性要求，轴向聚焦力靠沿方位角调变磁场来产生。其主要不同点是，托马斯型加速器的磁场峰值是沿着某个半径出现，螺旋线型等时性迴旋加速器的磁场峰值却不出现在同一个方位角上，而是形成一定形状的曲线。因此其垫铁（或线圈）的边棱就有所不同，前者的边棱是径向直线，后者的边棱却为特殊形状的曲线，如图 1 所示。

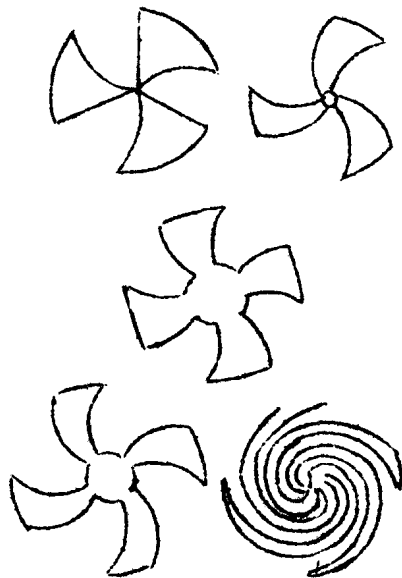


图 1 几种螺旋线型等时性迴旋加速器的扇形垫铁示意图

螺旋线形的结构除了产生托马斯聚焦力之外，还产生一种新的轴向聚焦力。由于有了这些新的轴向聚焦力，在螺旋线形迴旋加速器里，磁场沿方位角的调变度可以小一些，仍能保证聚焦。磁场调变度愈小，平均磁场强度可以愈高，加速器的直径便可愈小。所以尽管螺旋线形的磁场分布要比托马斯型加速器复杂，建造技术要困难一些，但大多数等时性迴旋加速器还是采用了这种型式。

等时性迴旋加速器的能量主要受径向振盪的共振现象所限。在等时性迴旋加速器中，粒子每迴旋一圈的径向振盪数目 Q_r ，随着粒子能量的增长而变化，在加速过程中可能会发生共振现象。例如最终能量与静止能量之比 $\varepsilon/\varepsilon_0 = 1.5$ 和 2 时，都会发生共振。而且 $Q_r = 2$ 的共振很难克服。

等时性迴旋加速器的最大能量与 q/A 有关^[3]，而且由 $T_n \cong Kq^2/A^2$ 确定。这里 T_n 为单核能，它不是粒子的总能量 T ，而是定义为 $T_n = T/A$ 。其中 A 是离子的质量数。对于某一特定的加速器来说， K 为一常数。在非相对论范围内， $T_n \cong Kq^2/A^2$ 是严格成立的。在目前的等时性迴旋加速器中，很少有总能量与静止能量之比大于 1.02 的，因此常用 K 来表示某一台等时性迴旋加速器的能量。

在等时性迴旋加速器中粒子的迴旋周期是常数，与粒子能量无关。如果加速电压的频率不等于设计时所选定的频率，或平均磁场沿半径的分布曲线不完全满足等时性要求，就会发生相移现象。如

误差较大，可能加速到一定能量以后，粒子的相角就移到减速区以外，不能再继续加速。所以加速电压频率和中心磁感应强度 B ，必须严格满足谐振加速的要求，磁场和加速电压频率都要高度稳定；平均磁场强度沿半径的分布情况要尽可能满足等时性要求。从目前已运行的等时性迴旋加速器来看，磁铁电源的电流稳定度在 10^{-5} 、加速电压的频率稳定度多数都在 10^{-6} 或更高。

等时性迴旋加速器与普通迴旋加速器在结构上的主要区别在于，为了形成沿方位角调变的等时性磁场，在磁极表面有特殊形状的垫铁和垫补磁场用的线圈。环形垫铁及环形线圈可以用来垫补平均场沿半径的分布；扇形磁铁及线圈可以用来垫补磁场沿方位角的调变。有的等时性迴旋加速器的磁铁不是整体的，而是分成几段，如四、六或八段，由磁场沿轨道调变的周期数目决定（这类加速器又称为分离扇形迴旋加速器）。如瑞士原子核研究所 1974 年建成的 590 兆电子伏加速器采用 8 块分离扇形结构，美国印第安大学 1975 年建成的 200 兆电子伏加速器采用 4 扇块结构。大型迴旋加速器采用这种分离结构，在各段磁铁之间，可以装 D 形电极或引出、注入粒子是比较经济的方案。所以正在建造或设计中的几台大型重离子加速器都采用了这种分离结构，如加拿大巧克河实验室计划于 1981 年建成一台 $K=520$ 的超导磁铁分离扇形（4 块）迴旋加速器；在法国的卡昂和格林诺布尔也分别要在 1982 年和 1980 年建成 $K=400$ 和 $K=120$ 的分离扇形迴旋加速器。有的国家还提出了建造更高能量

分离扇形迴旋加速器的设想。如德国的慕尼黑技术大学、美国的密执安大学和橡树岭国立实验室都分别要在1985和1984年建成 $K=1200$ 的超导分离扇形迴旋加速器^[4]。

较高能量的等时性迴旋加速器，一般都采用比较高的入射能量，因此通常都采用多级组合系统。可以用串列式静电加速器、直线加速器或一台小型的等时性迴旋加速器作注入器。如加拿大巧克河的 $K=520$ 超导分离扇迴旋加速器就用一台MP串列式静电加速器作注入器，日本物化研究所的 $K=620$ 分离扇迴旋加速器，打算用一台可变频率的直线加速器作注入器，美国密执安大学的 $K=1200$ 超导迴旋加速器将用一台 $K=500$ 的超导迴旋加速器作注入器。

要把离子注入到最里面的轨道，现在有很多方法，最简单的办法是把离子源放到迴旋加速中心。源的直径很小，而D电压应足够大，这样第一圈轨道从离子源背后通过，而不会碰到离子源上。另一种措施就是把离子源放在磁铁外面（即外注入）。其中一种方法是在磁极中心沿轴线方向穿一孔，粒子沿这个孔注入到真空室，这就是所谓的轴向注入，再一种方法是沿半径方向入射，即径向入射。在大型分离扇迴旋加速器中还使用了另一种办法。用迴旋加速器或串列式静电加速器预加速后的离子注入，这些离子的能量较高，因而它的第一圈轨道半径较大。

三、等时性迴旋加速器的用途及现状

等时性迴旋加速器是一种用途较广的加速器。近年来迴旋加速

器在能量均匀度、平滑调节能量方面又取得了不少成绩，使得它仍然是核物理实验方面的一种重要设备。低能迴旋加速器能产生较强的中子流，产额可达 10^{12} n/秒。能产生单能中子，短脉冲中子流，是进行中子物理研究的有力设备。

迴旋加速器还用来生产放射性同位素，例如，用迴旋加速器产生的 50 兆电子伏质子打铀靶，便能产生 Pu^{236} 和 Pu^{237} 等同位素。最适合于生产放射性同位素的加速器是质子能量约为 30~40 兆电子伏特的迴旋加速器。高能加速器的基建和运行费用太高，而且在高能粒子轰击下，生成的同位素种类较多，需要用复杂的化学过程将它们分离。倍压加速器和静电加速器的能量又太低，反应产额小，生产不经济〔5〕。近年来轻便紧凑的等时性迴旋加速器已工业规模生产，在生产和医疗上得到广泛应用。医院安装迴旋加速器的用途有多种，如生产短寿命的医用同位素、中子活化分析、放射生物学、放射物理学及快中子治癌等。迴旋加速器提供的中子束具有足够的穿透本领和剂量率，所以目前较常用于中子治疗的加速器仍是迴旋加速器〔6〕。

医用迴旋加速器发展很快，在 1955 年时，英国哈默、史密斯医院安装了一台，1967 年世界上有 4 台，1974 年有 14 台，1975 年已有 20 台。目前，医用迴旋加速器已进一步商品化，主要型号见表 1。

国家	美	国	法	国	北	欧		
型号	OS-22	OS-30	OV-28	Actitron	Th-esf	MO-20	MO-35	MO-40
能量 (兆电子伏)								
粒子种类								
P	22	26	2-24	6-19	8-70	2.5-20	2-35	9-40
d	12	16	2-14	3-11	11-35	1.5-10	3.8-18	4.5-20
^3He	31	39	5-36	3-28	18-93	3.0-77	5.6-48	7-53
α	24	30	6-28	6-22	22-70	2.5-20	7.5-35	9-40

表1 医用迴旋加速器的几种型号

仅美国迴旋加速器公司 (TCC——The cyclotron - Corporation) 自1967年到目前为止 (1980年), 就制造了26台等时性迴旋加速器, 其中15台在美国, 2台在英国, 2台在日本, 4台在西德, 2台在加拿大, 2台在巴西, 1台在澳大利亚, 1台在沙特阿拉伯。美国迴旋加速器公司的产品型号及主要性能指标见表2。这些小型轻便的等时性迴旋加速器, 主要供医院作快中子治疗 (治疗癌症) 和生产短寿命放射性同位素 (如 ^{11}O 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F 等), 亦可用于中子物理和核物理实验。所生产的这些短寿命放射性同位素可作正电子辐射源, 适合于新近发展起来的湮没符合X层析照相技术, 并且其中有三种同位素是构成有机物基本成份的稳定性同位素。OV-70型等时性迴旋加速器, 除了加速P、d、 α 外, 还可以加速O、N、O等重离子, 能量可调, 主要用于核物理、中子物理和生物医学研究〔7〕。OP-30, OP-42为负离子迴旋加速器。

四、等时性迴旋加速的发展方向

等时性迴旋加速器今后的发展有很多方向可采取, 归纳起来大致有三: 已经肯定的、有希望的, 和希望有的但至今尚未提出的方向。

1. 已经肯定的方向, 这里主要指把重离子加速到20兆电子伏核子的迴旋加速器 (包括普通的和超导的两类)。这些加速器既可以作其它迴旋加速器 (或其它加速器) 的注入器; 也可以作两级 (或三级) 串级加速装置的第二级或末级加速器。用于同位素生产和 (或) 中子

表2 1980公司回旋加速器产品型号及主要指标 1980.2

型号	加速粒子		能 量		流 强 μA				能 散	外束散度 mmrad	磁极直径cm	加速器重量吨
					外 内							
OV-70	P	d	$3H^+$ $4He^+$	8-18-24-32- 60 35 93 70	-	50 38 40			0.25%	20	190	115
OV-28	P	d	$3H^+$ $4He^+$	2-4-6-8- 24 14 38 28	60 100	5-8- 50 40	200 300	135 90	1%	50	96.5	30.16
CS-30	P	d	$3H^+$ $4He^+$	26 15 38 30 60	100	6 4 200 300	135 90	1%	50	96.5	28.6	
CS-15	P	d	$3H^+$ $4He^+$	15 8 20 16 60	100	60 40 200 300	135 90	1%	50	81	22	
CP-30	H	D		8-5- 30 17	200 50				1%	30	105	34
CP-42	H	D		11-6- 42 24	200 50				1%	30	120	45.5

治疗的商业产品等时性迴旋加速器也属这类。迴旋加速器的商业产品数量在今后数年内无疑还会继续增加。

目前看来，美国印第安纳创建的开式径向扇形迴旋加速器尤其适合于加速重离子，因为这种结构在注入和引出离子方面都特别方便。对于加速重离子来讲，采用两级或更多的级，其优点是显著的，因为加速过程中需要改变离子的电荷态，以提高离子的最终能量和流强。

从目前各国提出的设想来看，重离子加速器今后的发展方向似乎还是集中在超导方案。这类迴旋加速器目前正在建造之中的有两台，一台在加拿大的巧克河，另一台在美国的密执安州；正在紧张设计和模型试验之中的也有两台，一台在意大利米兰，一台在美国的密执安州。在这些超导迴旋加速器中只有主磁铁线圈被冷却到低温，迴旋加速器的其余部份都工作在常温。这类迴旋加速器也许不象印第安型开式扇形加速器那样方便，易于使用，但是它们却大大节省了投资和电力。所以今后要建的大多数重离子迴旋加速器很可能均属超导型加速器。

2. 有希望的方向，是指相对论性重离子迴旋加速器，它能把很重的离子加速到20兆电子伏/核子能量以上。国外已提出建造这类加速器的设想，如上面提出的几台 $K=1200$ 的超导等时性迴旋加速器就属此类。

3. 很有希望的但至今还没有具体提出的，这里主要指中能等时性迴旋加速器作大型超导等时性迴旋加速器的注入器、提高现有

在等时性旋转对称磁场的中心平面上

考虑了电场影响的离子运动动力学

М. КУЗМИАК И. ГОЛОУБЕК А. ГРДА

摘 要

在本文中推导出了在轴对称等时性磁场的中心平面上螺旋线型平衡轨道的方程式。推导出了在平衡轨道附近考虑了加速电场的径向振动方程式。提到了中心平面上磁场的同步增长。

1. 运动方程式

研究粒子运动，从叙述既包含电场分量也包含磁场分量的有关运动方程式开始是合理的。粒子能量随时间的变化与力 $\vec{F}$ 的关系，以关系式

$$\frac{dw}{dt} = (\vec{F} \cdot \vec{v}) \quad (1)$$

表示。按照相对论理论〔1〕，对于粒子的能量有

$$W = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

式中

$$W = W_0 + W_K$$

动量和力之间的关系可以描述如下，

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} \quad (3)$$

式中

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{U}}{\sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}}} \quad (4)$$

将方程式(3)乘以 $\vec{U}$ ，而后与关系式(4)比较，我们得到

$$\frac{dW}{dt} = \vec{U} \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (5)$$

在电磁场中作用在带电粒子上的劳伦茨力等于

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{E} + \frac{e}{c} [\vec{U} \cdot \vec{H}] \quad (6)$$

把(6)代入方程式(5)之后，我们得到

$$\frac{dW}{dt} = e (\vec{U} \cdot \vec{E}) \quad (7)$$

利用方程式(2)和(4)我们得到 $\vec{p}$ 的关系式

$$\vec{p} = \frac{\vec{U} W}{c^2} \quad (8)$$

把关系式(7)和(8)相应地代入方程式(6)之后，我们将得到描述离子加速度的方程式〔2〕

$$\frac{d\vec{U}}{dt} = \frac{e}{m_0} \sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}} \left\{ \vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{U} \cdot \vec{H}] - \frac{\vec{U}}{c^2} (\vec{U} \cdot \vec{E}) \right\} \quad (9)$$

研究离子在迴旋加速器中运动时，使用圆柱坐标系更方便些。

为此我们引入座标 (r, φ, z) 。

2. 离子在中心平面上的运动

离子在中心平面上的运动取决于磁场强度的轴向分量和电场强度的方位角分量。对于中心平面（即 $z = 0$ ）说来，方程式(9)有下面形式

$$\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 = \frac{e}{m_0} \sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}} \left\{ -\frac{1}{c} r\dot{\varphi} H_z - \frac{1}{c^2} r\dot{r}\dot{\varphi} E_{\varphi} \right\} \quad (10)$$

$$r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi} = \frac{e}{m_0} \sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}} \left\{ E_{\varphi} + \frac{1}{c} \dot{r} H_z - \frac{1}{c^2} (r\dot{\varphi})^2 E_{\varphi} \right\} \quad (11)$$

式中 $U = \sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\varphi})^2}$. (12)

将关系式

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 + \frac{U^2}{c^2}}} \quad (13)$$

$$\vec{p} = m \vec{U} \quad (14)$$

代入方程式(10)和(11)之后, 我们得到

$$\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 = -\frac{eU}{c\rho} \left\{ r\dot{\varphi} H_z + \frac{1}{c} r\dot{r}\dot{\varphi} E_{\varphi} \right\}, \quad (15)$$

$$r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi} = \frac{eU}{c\rho} \left\{ cE_{\varphi} + \dot{r} H_z - \frac{1}{c} (r\dot{\varphi})^2 E_{\varphi} \right\}. \quad (16)$$

在方程式(12)、(15)、(16)中, 我们用作为新自变量的方位角 φ 来代替时间 t 。为此利用关系式

$$r = \frac{dr}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = r' \dot{\varphi}, \quad (17)$$

$$\ddot{r} = \frac{d^2 r}{d\varphi^2} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \frac{dr}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) = r'' \dot{\varphi}^2 + r' \dot{\varphi} \dot{\varphi}'. \quad (18)$$

变换之后, 方程式(12)有

$$U = r\dot{\varphi} \sqrt{1 + \left(\frac{r'}{r} \right)^2} \quad (19)$$

的形式。