



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104663003 B

(45)授权公告日 2017.10.10

(21)申请号 201380050677.X

(22)申请日 2013.07.25

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 104663003 A

(43)申请公布日 2015.05.27

(30)优先权数据  
61/676,377 2012.07.27 US  
13/949,459 2013.07.24 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日  
2015.03.27

(86)PCT国际申请的申请数据  
PCT/US2013/051942 2013.07.25

(87)PCT国际申请的公布数据  
W02014/018706 EN 2014.01.30

(73)专利权人 麻省理工学院  
地址 美国麻萨诸塞州

(72)发明人 L.布隆伯格 J.V.米纳维尼  
A.L.拉多文斯基 P.C.迈克尔

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司  
72001  
代理人 申屠伟进 张懿

(51)Int.Cl.  
H05H 13/00(2006.01)

(56)对比文件  
US 2010/0171047 A1,2010.07.08,  
US 2009/0140671 A1,2009.06.04,  
US 5440210 A,1995.08.08,  
US 2010/0045213 A1,2010.02.25,  
CN 101061759 A,2007.10.24,  
EP 0351970 A1,1990.01.24,  
JP 特开平11-329800 A,1999.11.30,

审查员 刘时雄

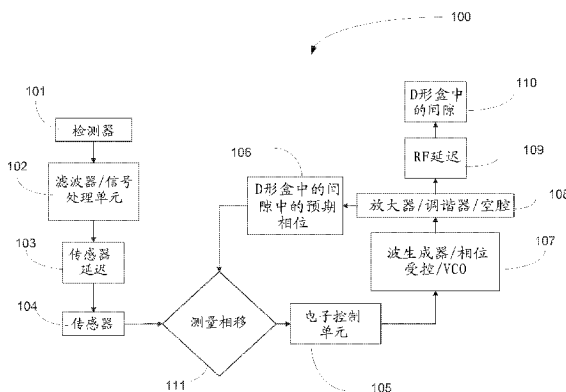
权利要求书2页 说明书14页 附图12页

(54)发明名称

同步回旋加速器射束轨道和RF驱动同步回旋加速器

(57)摘要

本发明规定在同步回旋加速器的射频(RF)驱动中使用反馈,控制加速场的相位和/或幅度作为确保射束的最优加速、提高平均射束电流以及改动射束轨道的措施,以便随着射束能量的变化允许适当的提取。通过射束的快速加速和提取减小空间电荷的效应,并且可以提高脉冲的重复速率。提出了几种措施用于监测同步回旋加速器中的射束的相位,并且调节RF的相位和幅度,以便优化射束的加速并且调节射束的提取和注入。还描述了使用与同步回旋加速器的接受窗口匹配的脉冲离子源。



1. 一种从回旋加速器产生和提取具有预定能量的离子束的方法,包括:  
将离子引入到所述回旋加速器中;  
利用RF驱动对离子进行加速,以便在所述回旋加速器中作为离子束移动;  
在所述加速期间感测所述离子束在所述回旋加速器中相对于RF驱动的相位的位置;  
利用所述离子束的所述位置改动所述RF驱动,以便保持所期望的加速;以及  
通过激励非轴对称脉冲磁场来提取所述离子束。
2. 权利要求1的所述方法,其还包括通过对回旋加速器线圈施加电流来在所述回旋加速器中建立磁场,所述磁场被用来确定所述离子束的所述预定能量。
3. 权利要求1所述的方法,其中,所述RF驱动包括频率、相位和幅度,并且其中所述RF驱动的所述相位被改动,和/或所述RF驱动的所述频率被改动,和/或所述RF驱动的所述幅度被改动。
4. 权利要求1所述的方法,其中,当所述离子束达到预定位置和速度时激励所述非轴对称脉冲磁场。
5. 权利要求1所述的方法,其中,利用开环控制实施所述激励。
6. 权利要求5所述的方法,其中所述开环控制利用从由离子质量、离子质荷比以及所期望的离子束能量构成的组当中选择的信息来激励所述磁场。
7. 权利要求1所述的方法,其中,利用锁相环控制实施所述激励。
8. 权利要求1所述的方法,其中,所述离子束的所述预定能量被用来确定将要如何改动所述RF驱动。
9. 一种回旋加速器,包括:  
被部署为检测离子束的存在的射束检测器;  
与所述射束检测器通信的射束传感器;  
具有可变幅度、相位和/或频率输出的RF波生成器;所述输出被定义为RF驱动;  
与所述RF驱动通信的RF空腔或D形盒;  
用以生成非轴对称脉冲磁场以便提取所述离子束的冲击线圈;以及  
电子控制单元,与所述射束传感器通信并且具有与所述RF波生成器通信的输出以便控制所述RF驱动,从而控制所述离子束的速度和位置。
10. 权利要求9所述的回旋加速器,其中,所述电子控制单元与所述冲击线圈通信,并且在所述离子束达到预定位置和速度时激励所述冲击线圈。
11. 权利要求10所述的回旋加速器,其中,所述电子控制单元利用开环控制来激励所述冲击线圈以便生成所述磁场。
12. 权利要求11所述的回旋加速器,其中,所述开环控制包括从由离子质量、离子质荷比以及所期望的离子束能量构成的组当中选择的信息。
13. 权利要求10所述的回旋加速器,其中,所述电子控制单元利用来自所述射束传感器的信息来激励所述线圈生成所述磁场。
14. 权利要求9所述的回旋加速器,其中,所述射束检测器被部署在所述RF驱动的改变速率最小的位置,或者所述射束检测器被部署在所述RF驱动最小的位置。
15. 权利要求9所述的回旋加速器,还包括被用来生成磁场以便约束所述离子束并且确定所述离子束在提取时的最终能量的回旋加速器线圈,并且还包括第二冲击线圈,使得所

述冲击线圈和所述第二冲击线圈对于所述回旋加速器线圈具有零互感。

## 同步回旋加速器射束轨道和RF驱动同步回旋加速器

[0001] 本申请要求2012年7月27日提交的美国临时申请序列号61/676,377以及2013年7月24日提交的美国专利申请序列号13/949,459的优先权,这两个申请的公开内容通过引用以其整体被合并在此。

### 背景技术

[0002] 利用同步回旋加速器的离子加速是一种成熟的技术,其非常适合于产生高能量但是相对较低平均离子束电流。加速是通过在离子束群(ion beam packet)从轴对称静态磁场的中心向外螺旋行进时对其施加高频(通常是射频(RF))电场而实现的。众所周知的是,随着离子束被加速,需要调节同步回旋加速器中的RF驱动的频率。RF驱动可以被扩展为包括可变频率RF生成器、一个或多个RF功率放大器以及磁场内部的一个或多个结构(比如RF空腔或D形盒(dee)),其中对离子束群施加加速电场。因为RF频率在加速期间发生变化,所以通常在任一时间在器件中仅有一束离子。回旋加速频率发生变化,以便随着被加速粒子的能量在加速以及磁场发生径向变化以便提供射束聚焦的事实期间增加而补偿其相对论质量的改变。机器的孔中的磁场对于轨道稳定性需要满足以下要求。磁场的数值需要随着半径的增加而减小,同时在加速区段上保持以下数值:

$$[0003] \quad 0 < 2v_z < 0.5v_r$$

[0004] 其中

$$[0005] \quad v_z = n^{1/2}$$

$$[0006] \quad v_r = (1-n)^{1/2}$$

[0007] 并且

$$[0008] \quad n = -d \log(B) / d \log(r)$$

[0009] 并且其需要在提取区段中随着半径快速升高。

[0010] 关于控制RF加速的频率存在大量文献。现有技术的目的是调节RF频率以便匹配离子束的回旋加速频率,同时监测提取后的射束电流的改变。此外,现有技术的另一个目的是将谐振电路及其所生成的RF驱动匹配到所需的频率。尚未做出监测离子束轨道的相位相对于RF驱动的相位的努力,也没有做出在注入、加速或提取期间调节RF驱动和离子束的相位和幅度的努力。在这种情况下,RF驱动的幅度实际上指的是由RF结构对射束施加的加速电场的量值。众所周知的是,如果离子束轨道与RF驱动之间的相对相位导致相当大的相位差,则RF驱动不会增加射束能量,而是相反地会通过从其中提取能量而减小离子束的能量。离子束持续失去能量,直到其在相位和频率方面漂移得足以再次匹配RF驱动的相位和频率为止:由于粒子正在减速,他们正移动到磁场不断增加的区段中(处于更小的半径),这些区域对于同步性需要更高的频率,但是所施加的RF场的频率正在降低,因此粒子最终足够减速到与RF场再次同相的程度并且恢复加速。虽然最终射束群得以加速,但是射束质量受损并且平均射束电流减小。RF驱动的相位和射束轨道的相位在注入、加速和提取过程期间始终同步的情况将是最佳的,尤其对于最终射束能量发生变化(通过调节回旋加速器线圈中的

电流)的状况。对于操作,回旋加速器中的所有线圈中的电流以相同的比率变化,对所述比率进行调节从而改变射束的最终能量。在传统的机器中,通常仅有来自RF驱动的大约50%的电场可用于射束加速。

[0011] 对于使用大量铁来生成加速场并且对其进行定形的同步回旋加速器,线圈电流的改变(例如为了改变射束能量)不仅改变磁场的强度,而且还改变磁场分布。因此,在不使用降能器或内部靶(为了调节离子的电荷)的情况下,含铁回旋加速器不适合于产生其中所提取的射束能量可以发生变化的射束。

[0012] 在同步回旋加速器中,通过RF驱动来控制射束轨道。这是RF驱动的频率缓慢变化时的情况。当RF的频率快速提高时(例如当希望更大的平均电流时),射束可能与RF能量失去同步,其结果是加速非常小或者完全没有电流。此外还将有益的是在离子束的注入期间以及在提取期间控制RF相位和幅度。可以通过对射束进行预聚束(pre-bunching)来对注入控制进行外部调节,从而使其匹配回旋加速器加速场的接受角(acceptance angle)。当然将使预聚束器的控制与在加速循环的初始射束轨道期间施加的RF驱动的相位相协调。但是对于提取,机会非常有限。在提取之前的最后几个轨道期间对于离子束的离子能量、相位和位置的调节将允许更好的提取效率,并且最小化影响辐射安全性的射束损失、对于内部组件的加热和辐射破坏。在同步回旋加速器中精确地控制射束提取的能力对于无铁机器特别重要,无铁机器可以被设计为在宽能量范围上从单一机器递送输出射束而不需要输出射束路径中的降能器(通过回旋加速器线圈中的电流的变化)。

[0013] 因此,本公开内容的目标是能够直接改变从单一回旋加速器提取的射束的最终能量。另一个目的是保持高提取效率而不管最终射束能量如何。通过改变回旋加速器线圈中的电流以及调节回旋加速器中的主磁场(main field)来促进可变能量。最终射束能量是回旋加速器中的磁场量值的函数。

## 发明内容

[0014] 锁相环技术对于确保高效地提取射束是有用的。随着能量的变化实现高提取效率的一种措施是基于对射束位置的连续监测来调节RF驱动的幅度、相位(关于射束)和频率,从而使得射束轨迹在整个加速过程中保持相同而不管最终射束能量如何。

[0015] 所提出的本发明的一个实施例规定了对于RF驱动、注入电路和提取电路中的至少之一的锁相环控制,从而利用关于射束状态的信息在射束注入、加速和/或提取过程期间始终控制RF驱动(相位、频率和幅度)、注入和提取电路。所述控制环路包含以相对于RF加速驱动的适当相位关系将射束群注入到器件中,以及对于具有所期望的最终能量的离子束的受控的高效率提取。

[0016] 根据另一个实施例,公开了一种从回旋加速器产生和提取具有预定能量的离子束的方法。所述方法包括:将离子引入到回旋加速器中;利用RF驱动对离子进行加速以便在回旋加速器中作为离子束移动;在加速期间感测离子束在回旋加速器中的位置;利用离子束的位置改动RF驱动以便保持所期望的加速;以及激励非轴对称的脉冲磁场(冲击磁场)以便提取离子束。

[0017] 根据另一个实施例,公开了一种回旋加速器,其包括:被部署为检测离子束的存在的射束检测器;与射束检测器通信的射束传感器;具有可变相位或频率输出的RF波生成器;

被定义为RF驱动的输出；与RF驱动通信的RF空腔或D形盒；以及电子控制单元，与射束传感器通信并且具有与RF波生成器通信的输出以便控制RF驱动，从而控制离子束的速度和位置。在本上下文中，所述电子控制单元可以包括模拟电路、数字电路和处理器，或者更加典型地是二者的混合组合。在另一个实施例中，所述回旋加速器还包括用以生成非轴对称的脉冲磁场以便提取离子束的冲击线圈。在一个实施例中，所述电子控制单元与冲击线圈通信，并且当离子束达到预定位置和速度时激励冲击线圈。

## 附图说明

- [0018] 为了更好地理解本公开内容，参照通过引用被合并在此的附图，并且其中：
- [0019] 图1是用于最优射束加速的同步回旋加速器中的射束的锁相环控制的示意图，其中根据射束信息来调节RF驱动的相位和/或幅度。
- [0020] 图2是示出了用以向控制系统提供附加信息的查找表的存在示意图。
- [0021] 图3是示出了确定包括相位和形状的射束参数的监测系统的示意图。
- [0022] 图4示出了加速RF的不同阶段处的关于加速间隙的位置的射束位置。
- [0023] 图5示出了系统中的环路传感器的可能位置。
- [0024] 图6示出了其中RF场的幅度最小的各个位置当中的一个位点处的检测环路。
- [0025] 图7示出了被部署成使得由两个传感器获得的RF邻近干扰 (pickup) 彼此抵消的两个传感器的位置。
- [0026] 图8示出了用于感测离子束的偶极天线的可能位置。
- [0027] 图9是示出了在射束提取之前增加匝到匝 (turn-to-turn) 距离的措施的说明性图。
- [0028] 图10是示出了未在径向方向上对准的射束传感器 (比如环路) 的图示。
- [0029] 图11示出了可以被用来控制非轴对称场的幅度以便提供充足的提取的说明性控制算法。
- [0030] 图12示出了具有加速间隙、提取通道以及冲击线圈的系统，以便在提取过程期间改动离子束的轨道。

## 具体实施方式

[0031] 为了确定射束位置以及为了最优地加速、注入和提取离子，希望将RF驱动的相位同步到离子束轨道的相位，并且调节RF场的幅度。在后面描述被用于同步的步骤。RF驱动的相位虽然在来源处是固定的，但是横跨间隙 (其被定义为横跨器件的D形盒的间隔) 发生变化，这是由于电磁波的传播速度有限，并且因为加速间隙可能不是径向的 (比如作为半径的函数改变方位角方向的加速间隙)。D形盒是被用来生成RF驱动的电极。虽然在这里可能使用了术语“D形盒”，但是应当理解的是，这一术语指的是可以用来将RF驱动注入到系统中的任何机构。在一些实施例中，对使用D形盒的一种替换方案是使用RF空腔。因此，除非另行指示，否则术语“D形盒”被用来表示D形盒和RF空腔二者。

[0032] 在每一个径向位置处，可以将RF驱动的相位标识为 $\Delta\phi_{RF}$ 。应当理解的是，所述相位是射束半径的函数。 $\Delta\phi_{RF}$ 是RF驱动在任何给定时间相对于来源的相位的相移。应当注意的是， $\Delta\phi_{RF}$ 是射束的径向位置 (也就是离子束的能量) 的函数，取决于RF如何被馈送到加速D形

盒。

[0033] 为了最优地加速离子束,有必要监测离子束的实时相位。假设离子束在时间  $t_{\text{beam}} + \sum (2\pi/\omega_n)$  穿过检测器,其中  $\omega_n$  是(第n匝处的)离子束的径向位置处的回旋加速频率。如在RF驱动的情况中那样,在离子束激发监测器件(“检测器”)的时间与相位检测点(“传感器”)之间存在相位滞后。应当理解的是,可以有多于一个检测器元件,其在被组合时标识为“检测器”。此外,射束监测器件的方位角位置与RF驱动的方位角位置分开。从检测器到传感器的延迟被定义为  $t_{\text{sensor}}$ 。在系统感测到离子束的时间,假设来源处的RF波的相位是  $\Phi_{\text{source}}$ 。因此,当离子束被系统感测到时,RF来源处的电场是

$$[0034] \quad E_{\text{source}} = \exp[i\omega(t_{\text{beam}} + \sum (2\pi/\omega_n) + t_{\text{sensor}}) + i\Phi_{\text{source}}]$$

[0035] 具体来说,可能希望在接地电极下方的方位角位置处测量离子束相位,以便最小化由于RF驱动而导致的信号邻近干扰。

[0036] 在离子束穿过检测器之后,存在一定延迟,直到离子束到达加速间隙,其被称作  $t_{\text{beam-gap}}$ 。于是当射束穿过间隙时,间隙中的RF场是如下:

$$[0037] \quad E_{\text{gap beam crossing}} = \exp[i\omega(t_{\text{beam}} + \sum (2\pi/\omega_n) + t_{\text{beam-gap}}) + i\Phi_{\text{source}} - i\Delta\phi_{\text{RF}}]$$

[0038] RF项中的负号是由于如下事实:间隙处的RF驱动比来源处的RF驱动滞后  $\Delta\phi_{\text{RF}}$ 。

[0039] 为了最大化在同步回旋加速器中离子束的加速,RF驱动的相位需要与离子束轨道的相位保持同步。已经知道,相对较窄的相位范围导致离子束的最佳加速,具有良好的相位稳定性。具体来说,离子束应当在间隙中的电场正在增加时穿过加速间隙。通过这种方式,滞后于射束主体部分的粒子与主体部分相比将被更强地加速,并且他们将赶上主体部分。类似地,领先于主体部分的那些粒子将经历较低的电场,并且因此他们的加速将小于主体部分并且减速直到主体部分赶上他们为止。用于射束加速的间隙中的电场的最优相位被称作  $\Phi_{\text{optimal}}$ 。

[0040] 因此,当射束到达间隙时,希望RF驱动的相位是:

$$[0041] \quad \omega(t_{\text{beam}} + \sum (2\pi/\omega_n) + t_{\text{beam-gap}}) + \Phi_{\text{source}} - \Delta\phi_{\text{RF}} = \Phi_{\text{optimal}}$$

[0042] 因此,可以如下获得  $\Phi_{\text{source}}$ :

$$[0043] \quad \Phi_{\text{source}} = \Phi_{\text{optimal}} + \Delta\phi_{\text{RF}} - \omega(t_{\text{beam}} + \sum (2\pi/\omega_n) + t_{\text{beam-gap}})$$

[0044] 随后,在由系统感测到离子束的时间,来源处的RF驱动的相位应当是:

$$[0045] \quad \Phi_{\text{sensor}} + \Phi_{\text{optimal}} + \Delta\phi_{\text{RF}} - \Phi_{\text{beam-gap}}$$

[0046] 其中,  $\Phi_{\text{sensor}} = \omega t_{\text{sensor}}$ ,并且是由系统感测到离子束的时间与离子束穿过检测器的时间之间的相位滞后,并且  $\Phi_{\text{beam-gap}} = \omega t_{\text{beam-gap}}$  是离子束在他穿过检测器之后到达加速间隙所需的相位滞后。 $\Phi_{\text{beam-gap}}$  因此恰好是检测器的位置与间隙的位置之间的角度。

[0047] 应当理解的是,前面的算法是说明性的,并且用以控制相位的替换的、同样有效的公式是可能的。一般来说,优化射束加速的来源处的相位是这些参数的函数:

$$[0048] \quad \Phi_{\text{source}} = f(\Phi_{\text{sensor}}, \Phi_{\text{beam-gap}}, \Phi_{\text{beam}}, \Phi_{\text{RF}}, \Phi_{\text{optimal}})$$

[0049] RF驱动的控制系統使用反馈系統来控制间隙处的相位和幅度,从而在加速、注入和提取过程期间始终将其保持在接近最优。与射束旋转相比,相位缓慢变化,这是因为需要花费时间在谐振电路中实施相位改变。但是有可能改变谐振电路的频率以实现更快的相位调节。

[0050] 如前所述,在回旋加速器中,有可能提供RF结构(空腔)而不是使用D形盒来进行射束加速。在空腔而不是D形盒的情况下,RF驱动的相位不会随单元变化(也就是说,在空腔中的谐振处,电场具有单一相位)。因此,不必要计及由于经过生成加速电压的狭缝的传输中的延迟而导致的相位差。

[0051] 在前面的描述中描述了用于在加速期间控制射束的算法。有可能调节加速RF场的幅度、频率和相位,以便调节提取。为了实现适当的提取,射束应当以适当的能量并且以适当的方向到达提取区段。可能希望调节(增加或减小)离子束的在其围绕轴旋转时能量增加的速率,特别在利用生成电子感应加速振荡(接近圆形离子轨道的进动(precession))的非轴对称组件激发离子束时。可以通过控制关于离子束的RF驱动的相位、加速RF场的幅度或者这全部二者来调节能量增加的速率。

[0052] 图1图示了控制系统100的一个可能的实施例。后面将描述的检测器101在离子束穿过时被离子束激发。滤波器或滤波器序列102对信号进行处理,其由于信号的有限传播速度而具有固有延迟103。信号处理单元102还可以是放大器或差分放大器,或者其可以组合来自多个检测器101的信号。多个检测器101可以被用来减小RF干扰,从而减小或消除由RF场导致的检测器中的信号,并且检测具有更高信噪比的射束定相。通过传感器104来感测信号,传感器104可以使用图中未示出的高级信号处理方法,包括用以确定射束的定时/定相的锁定放大,以及关于参考信号确定相位。所述参考信号可以是差信号,但是在本申请中,将经过放大的信号用作参考可能是有用的。电子控制单元105感测D形盒106处的预期信号与通过传感器104测量的信号之间的偏移111,并且调节RF生成器107,从而使得在预期射束穿过D形盒的时间在D形盒110中的间隙处将生成所期望的信号。在一些实施例中,RF波生成器107响应于来自电子控制单元105的输入修改其输出相位和/或幅度。在其他实施例中,RF波生成器107基于来自电子控制单元105的输入修改其输出频率。在再其他实施例中,可以控制其他相位、幅度和/或频率。放大器108被用来提高RF驱动功率,同时使用调谐器来细微地调节频率。RF系统可以实际上对RF空腔进行馈送,RF空腔可以直接驱动间隙110(即空腔替代间隙),或者其可以提供用于回旋加速器中的加速结构的RF驱动。在后一种情况下,以及当RF系统驱动D形盒时,在放大器108与间隙110之间存在相位滞后109。相位滞后(RF延迟)109可能是由于有限的传输速度,或者是由于放大器/调谐器108或传输线中的电容性/电感性元件。

[0053] 在图1中未示出回旋加速器主线圈。这些主线圈围绕回旋加速器,提供将射束约束在回旋加速器中并且确定将要提取的离子束的最终能量所需的磁场和场梯度。因此,为了产生具有预定能量的离子束,通过向主线圈供应特定电流在回旋加速器中建立磁场。基于这一电流水平,产生适当的磁场。这一磁场确定提取处离子束的最终能量。

[0054] 在注入、加速或提取过程期间,可能不必要每一个循环都对于RF驱动的相位或幅



度进行监测或调节,并且可以使用平均来确定所述波的适当的相位、幅度和/或频率。改变离子束的相位或幅度所需的更长的时间尺度允许改进离子束的属性的采集(通过平均),以便补偿系统中的噪声。此外,除了反馈之外,还可以使用作为射束能量的函数的所需相位/频率的查找表。其可以被用来确保离子束被适当地感测到以及在来自射束的信号小时、或者在相位测量单元正在重置时或者在难以确定射束相位的时间期间(比如紧接在把射束注入到加速区段中之后)提供信息这两者。图2示出了控制环路中的查找表112的存在,用于提供丢失的或者不佳地测量的信息,以及确保控制单元105的适当性能。

[0055] 如前所述,延迟103、109中的一些是离子束能量的函数,这是因为离子束关于传感器104和加速D形盒这两者的径向位置随着离子束能量而改变。可以使用查找表112来存储所述延迟的数值,该数值可以被测量或计算。此外,有可能随着能量改变离子束的最优相位,因为离子束的稳定性标准随着能量改变。因此,在较低能量处,可能希望调节相位以改进离子束的聚束,而在更高能量处,一旦离子束被相对较好地聚束,则可以调节相位以增加D形盒中的每次穿过的加速电压。有可能根据RF驱动的频率确定给定旋转处的射束能量,并且因此确定离子束的近似半径和位置(在轨道不太圆并且由于电子感应加速振荡而存在进动的情况下)。

[0056] 除了监测射束相位和能量的平均增加之外,还有可能测量射束“健康”(利用诸如射束脉冲高度、射束脉冲宽度和射束脉冲尾部之类的参数)。没有显著尾部(指示已失去同步的粒子)的窄射束脉冲将指示健康的射束。随着粒子与RF驱动失去同步,其角度会发散,从而改变由探测器测量的信号的特性(信号的高度更小、宽度更大)。离子束加速速率与离子束“健康”之间关系的进一步分析可以避免调节不同元件的相位延迟的改变的需要。目的将是稳定地最大化离子束加速,这通过监测每次旋转或者每若干次旋转的能量增加,并且随后调节相位以便获得具有良好离子束“健康”的最大稳定加速。可以利用射束的特性(高度、宽度)与所测量的能量增加速率相结合来调节RF驱动的相位。在射束的加速阶段的至少一部分期间,可以使用这种方法而不是使用查找表来控制RF。

[0057] 图3示出了RF控制系统150,其图示了这种类型的控制。尽管仍然有传感器延迟103和RF延迟109,但是通过监测射束参数和能量增加速率,如方框120中所示,有可能避免知道传感器延迟103和RF延迟109如何随能量变化。如方框130中所示,相位围绕基线相位缓慢地“颤振(dither)”,并且监测对于射束加速的影响。在加速过程期间,基线相位常常被重置。可以有查找表(参见图2)以便帮助加速过程。控制系统150还可以包括进行学习的自适应系统,以这样的方式主动地调节查找表中的一些参数。

[0058] 控制系统150相对于基线相位改变(颤振)相位以便确定最优相位,并且在加速期间周期性地重置基线相位。由于加速期间的大量匝数,最优相位从一个循环到下一个循环不发生显著改变。

[0059] 电子控制单元105可以生成具有适当的相位、幅度和/或频率的信号,或者替代地,其可以调节传统电力供给装置的参数。举例来说,如果相位滞后,则其可以临时提高信号的频率以便“赶上”相位。类似地,如果相位过于提前,控制器可以暂时降低频率,以便减速到所需的相位。应当注意的是,没有必要提供关于信号频率的反馈,这是因为对于相位的控制是足够的,并且频率的提高类似于相位改变速率的提高。可以通过相位的二次改变提供频率的线性改变,否则频率是恒定的。也就是说:

$$[0060] \quad \exp[i(\omega_0 + \Delta\omega t)t + i\varphi_0] = \exp[i\omega_0 t + i(\varphi_0 + \Delta\omega t^2)]$$

[0061] 在原理上,可以有可能对软件进行调节,从而使得一旦确定算法,在所述注入、加速和提取步骤的全部或一部分当中,不需要对离子束进行连续反馈监测。还有可能的情况是,一旦对于一台机器完成,可以在其他机器中利用相同的算法。在不需要铁来进行定形的机器中对这种方法特别有兴趣,这是因为预期在机器之间可以非常准确地再现场分布。

[0062] 还有可能重置所述等式的频率/相位,以便防止非常大的时间平方(相移作为时间平方尺度)。在这一过程中,查找表112可能是有用的。

[0063] 在谐振腔替代D形盒的情况下,电力供给装置缓慢地改变RF驱动的相位和/或幅度。在具有变化的谐振频率的RF空腔的情况下,通过修改空腔或电路属性以改变电场的相位可以实现更快的响应。

[0064] 射束传感器

[0065] 有必要确定射束关于RF场位于何处。射束传感器是对于本发明的成功实施的关键促成因素。

[0066] 对于本申请可能有几个传感器类型。举例来说,有可能具有一个或更多电感性环路。当离子束经过一个电感性环路时,其在环路中感生出电动势并且延迟到传感器中。有可能使用一个或更多环路。所述环路可以呈平面状,或者其可以是盘绕环路,如在Rogowski线圈的情况中。可以使用单一环路或者多个环路或线圈。可能希望把所述环路放置在(在检测时间期间)由D形盒感生出的电场小的区段中,以便最小化环路对于RF驱动信号的邻近干扰。在射束通过回旋加速器的时间期间,在间隙的下游和上游都存在场为0的区段,并且所述环路可以被放置在该处。取决于 $\varphi_{\text{optimal}}$ 的定义,检测将在离开间隙的 $\pi/2 + \varphi_{\text{optimal}}$ 或 $\pi/2 - \varphi_{\text{optimal}}$ 附近发生。

[0067] 减少噪声的另一种可能方式是使用两个环路,其被放置成使得他们关于加速间隙是对称的(并且是反向的)。通过这种方式,可以消除(归零)由加速电压导致的电动势。此外,每个循环在传感器中将存在两个射束脉冲,从而可能改进对于离子束相位的检测。

[0068] 所述环路的另一个可能位置关于加速间隙旋转。沿着射束轨道有两个角度位置,在射束经过所述角度位置的时间,该处的D形盒中的场正在经历反转。在这两个位置处,场的改变速率小,并且尽管场较高,但是场的改变速率小。当所述环路位于这两个位置的其中之一处时,检测器的灵敏度可以得到改进。

[0069] 图4示出了回旋加速器的加速区段的示意图,示出了一个或多个环路的可能位置。指示了加速间隙200的位置。为了简单起见,只示出了一个加速间隙。但是取决于对于同步回旋加速器所期望的期望射束能量范围,可能希望对于每个射束轨道包括多个加速间隙和感测环路,以便限制对于RF驱动系统的所需频率范围的需求。众所周知的是,在射束经过之后达到间隙200中的峰值加速场,以便改进射束脉冲(导致聚束)。在间隙中的加速场最高的时间的离子束位置的位点210被示出。还示出了当间隙200中的减速场最小时的离子束位置的位点220。在RF场的改变速率最小的时间期间,离子束处于这些位点处。

[0070] 在图4中还示出了当RF电场为0时的离子束位置的位点230。可能有利的是将传感器放置在这些位点处。但是在这种情况下,电场的改变速率最大,并且如果存在RF邻近干扰,则其可能在相位检测系统中生成显著的噪声。

[0071] 图5示出了当电场具有最小改变速率时的射束位置的位点220之一处的检测器环路250,最小改变速率当然是在RF电场是最大值和最小值时发生。在该位置处,当射束经过传感器250时,RF场的改变速率处于其最小值。

[0072] 根据另一个实施例,图6示出了当电场的幅度最小时的射束的位点230之一处的检测环路260。在该位置处,当离子束经过传感器260时RF场最小。

[0073] 图7示出了使用多于一个环路集合的情况。在该情况中图示了两个环路集合270、280。环路270、280被设置成使得经过其中一个环路的通量的改变速率与另一个相反,因此其应当示出与电场的最小耦合。这些环路270、280串联连接。在这种情况下,对于围绕回旋加速器的射束的每个循环,在检测环路中存在两个信号。环路270、280可以被部署成使他们具有离开位点220或位点210的相同的对应角度旋转(但是在相反的方向上)。

[0074] 通过使用图7的配置,当射束经过每一个传感器270、280时,可以从两个信号中标识出射束相位。

[0075] 应当理解的是,在所有这些实施例中,术语“环路”还指代Rogowski线圈。虽然所述环路被设置成使得双绞电流引线出现在环路的大半径处,但是并不排除围绕环路的双绞线的其他位置。此外,虽然仅仅在一半的回旋加速器中示出了所述环路或Rogowski线圈,但是其也可以沿着直径放置。在这种情况下,有可能通过射束腔室的相对侧返回所述线圈或环路,以便最小化常见噪声(common-noise)并且提高信噪比。

[0076] 一种替换的射束相位和/或位置传感器是偶极天线,其不具有环路。如果其是优选的检测器的话,有可能使用相同的位置用于定位偶极天线。存在被使用的多个的天线,最简单的是偶极天线,其基本上是暴露于来自经过的离子束的电磁场的裸导体。可以使用其他类型的电场感测天线。在偶极天线的情况下,有可能在天线末端之间实施天线连接,正如图8中所示出的那样。

[0077] 图8示出了用于感测射束的偶极天线300的可能位置。在该情况中,偶极天线300位于当射束经过时RF最小的位点230处。去到天线的连接(其可以是同轴电缆310)不一定处于天线300的末端,而其可以是沿着天线300的某处。

[0078] 此外,虽然在图4-8中所示的每一个实施例中径向地示出了射束检测器,但是可能有利的是检测器385是弯曲的,正如图10中所示出的那样。

[0079] 通过偏离径向,将有可能在传感器385中建立取决于射束能量的相位差(更高能量的射束在更大半径处旋转)。通过这种方式,例如由于射束能量的改变而导致的感测延迟  $t_{\text{sensor}}$  的改变(以及射束径向位置的改变)可以通过在适当的位置处感测射束来补偿,并且不需要软件调节。此外,虽然加速间隙200被径向地示出,但是有可能包括并非径向而是具有随着半径变化的方位角角度的加速间隙。加速间隙200意图包括通过空腔的加速,其中在空腔/谐振器中产生强电场。

[0080] 还可以可能将其他相位补偿器建立到硬件中。一种简单的相位补偿器将是利用更长的线缆或者在线路中提供不同阻抗。

[0081] 虽然仅仅描述了偶极和环路,但是可以使用其他类型的检测器,包括固态检测器、光纤、云室等等。对于这些传感器可能有必要具有非常快速的响应,以便确定射束的相位。

[0082] 类似地,对于其中使用电子感应加速振荡来进行射束提取控制的应用,将需要用以确定射束的径向位置的传感器。类似的传感器可以被用来确定回旋加速器中的电子感应

加速轨道的特性。

[0083] 加速期间的调节

[0084] 本发明的非常具有吸引力的特征在于,在单一同步回旋加速器中最终射束能量变化的情况下,对于加速的闭环控制实现了充足的注入、加速和提取的可能性。对于一些应用(包括辐射束治疗)来说,有用的将是调制离子束的能量,从而避免需要体模(phantom)或降能器。通过使用无铁的机器,通过回旋加速器线圈中的电流变化(其在保持规范化场分布的同时改变回旋加速器磁场幅度),实现所提取的射束能量的变化。与锁相环射束加速相结合地操作的无铁同步回旋加速器可以容易地提供所提取的射束能量中的所期望的变化,而不需要附加的子系统组件。

[0085] 改变射束的能量需要对回旋加速器操作做出几项修改,其中一些通过使用闭环控制来实现。改变离子束的能量同时保持提取的半径需要在器件的磁场中发生改变。带电粒子在磁场中的相对论回转半径是  $r_{\text{gmo}} = \gamma m v / qB$ , 其中  $\gamma$  是相对论质量校正,  $m$  是带电粒子的静止质量,  $v$  是其速度,  $q$  是其电荷, 并且  $B$  是磁场的量值。粒子的能量由  $E = mc^2(\gamma - 1)$  给出, 其中  $c$  是光速。对于非相对论粒子,  $E = \frac{1}{2}mv^2$ , 并且回转半径由  $r_{\text{gmo}} = (2Em)^{1/2} / qB$  给出。对于恒定的提取半径(也就是所对于给定的回旋加速器), 粒子的能量按照  $E \sim B^2$  缩放。因此, 磁场的相对较小的改变导致离子束能量的显著改变。

[0086] 改变射束能量时的第二操作改变是调节RF驱动的频率。对于非相对论粒子, 频率随着场线性地缩放 ( $f \sim B$ )。可能需要RF电路具有较大的带宽来适应磁场的改变。在同步回旋加速器的情况下, 在改变射束能量时需要调节频率范围。频率范围随着回旋加速器线圈中的电流缩放, 也就是说, 较低频率随着回旋加速器线圈电流缩放, 并且最高频率也随着回旋加速器线圈电流缩放。因此, 用于同步回旋加速器的RF电路的可调谐频率的总范围是从最低场处的最低频率到最高场处的最高频率: 存在对于单一离子“群”的加速所需的快速频率斜坡变化(对于给定的射束能量), 以及所述频率斜坡变化的频率限制的较慢改变, 其与不断改变的磁场相关联(并且因此与射束能量相关联)。

[0087] 通过使用多个加速间隙将有可能实现大的能量可变性, 从而减小在单一加速间隙的情况下所需的RF的大带宽。但是这将需要对每一个间隙进行单独的控制。所述过程可以连同RF空腔一起被用于加速, 以及用于D形盒。为了实现较低的加速能量, 随着射束在较低频率下围绕回旋加速轨道运行, 取代降低频率, 将有可能激活空腔或D形盒, 并且因此防止射束减速。在这种情况下, 对于一些射束能量, 每个射束轨道将有多于一个RF循环, 但是仅有限的几个间隙将被激活以便继续加速(如果其他空腔将被激活, 则射束在穿过所述空腔或者被去激活的D形盒之间的间隙时将会减速, 并且因此产生不良效果)。通过去激活减速空腔或D形盒, 有可能将频率保持高于本来将需要的频率, 从而限制加速RF驱动的所需带宽。应当注意的是, 当射束的加速仅在RF循环的一部分期间发生时, 将有可能减速多个射束群。可能的射束群的数目与带电粒子的每个轨道的RF循环的数目相同。

[0088] 换句话说, 通过将RF驱动应用到沿着轨道轨迹的多个RF空腔, 有可能在与仅使用单一加速间隙时将使用的频率不同的频率下操作RF驱动。这允许RF驱动具有更窄的操作频率范围, 这是因为使用多个RF空腔导致与利用单一注入间隙实现的频率改变相同的效果。

[0089] 除了改变射束能量之外, 还有可能调节RF幅度和RF频率, 以便适应不同粒子的加

速。因此有可能对氢、氘或碳进行加速。在碳的情况下,将希望对 $C^{6+}$ 进行加速,这将具有与氘类似的加速RF频率,因为其具有相同的荷质比。

[0090] 利用外部离子源在注入期间进行调节

[0091] 在回旋加速器中,有必要将粒子引入到加速区段。传统的注入方法包括使用静电反射镜或螺旋偏转器(spiral inflector)。需要对螺旋偏转器进行重新调节以便适应回旋加速器线圈中的电流改变。对参数进行调节从而在回旋加速器线圈电流发生变化时使得螺旋偏转器有效的一种方式:同时调节所注入的射束能量以及施加到偏转器的电场。如果回旋加速器线圈电流改变 $n$ ,电场改变 $n^2$ ,并且所注入的射束能量改变 $n^2$ ,则螺旋偏转器将作为将带电粒子引入到回旋加速器中的装置保持有效,尽管回旋加速器线圈中的电流已发生改变。

[0092] 类似地,当回旋加速器中的磁场幅度发生改变时,将有可能对于具有不同荷质比或能量的带电粒子束利用螺旋偏转器来适应注入。通过随着磁场和荷质比发生改变来调节所注入的粒子能量和偏转器中的电压,有可能通过相同的偏转器以足够的效率引入具有不同荷质比的粒子。

[0093] 用于允许具有不同能量或不同荷质比的粒子进入的一种更简单的解决方案将是通过使用静电反射镜。另一种替换方案将是使用内部离子源。使用内部来源对于碳 $^{6+}$ 离子的情况是不切实际的。但是应当注意的是,可以有可能将电子束离子阱或电子束离子源EBIT/EBIS与回旋加速器耦合。

[0094] 内部离子源

[0095] 避免到回旋加速器中的注入的问题的一种方式提供内部离子源。任何类型的离子源都将适合与可变能量同步回旋加速器一同使用。理想的情况将是把内部离子源匹配到回旋加速器中的RF驱动在接受窗口,以便在离子加速的早期阶段期间最小化空间电荷。这对于同步回旋加速器特别重要,因为射束接受占空比小。还理想的将是在没有电极的情况下使用来源,其具有有限的寿命并且需要频繁的维护。

[0096] 除了使用电极的离子源之外,存在正在开发的脉冲源,比如激光离子源,以用于生成注入到(回旋加速器或RFQ的)加速结构中的离子。这一工作的一部分与生成低能量质子相关。

[0097] 对将被激光烧蚀的材料的选择可能是重要的。所述材料应当具有足够的透明度,从而使得激光束无法穿过所述材料。因此,已经显示的是,C-H化合物(蜂蜡、聚乙烯)在以大约 $10^9W/cm^2$ 被照射时没有显示出击穿迹象。在这种情况下,不会有质子产生。但是当使用可以吸收射束能量的水合物时,生成带电粒子,但是具有低效率。大约 $10^{10}W/cm^2$ 的略微更高的能量会导致良好的发射,即使在聚乙烯中也是如此。在这种情况下,离子能量大约是150eV,仍然略高于在高性能同步回旋加速器中使用的理想情况。在非常高能量的情况下,甚至聚乙烯也可以被用于质子生成。应当注意的是,在功率足够的情况下,将材料(纳米粒子)添加到聚乙烯不会导致改进的氢生成。

[0098] 通过使用更高频率的激光可以解决击穿的问题,比如通过将红外激光的频率提高到两倍或者更好的情况,提高到三倍,比如NdYAG,或者通过在烧蚀材料中放置固体材料,比如纳米粒子或纳米管。在理想情况下,离子源处的离子能量应当低,以便提供加速后的离子束的更高亮度。非常高强度的激光离子源(即大约 $10^{16}W/cm^2$ )产生能量非常高的离子(高达

几MeV),并且将不会被同步回旋加速器良好地接受。

[0099] 对于应用到同步回旋加速器,不会导致涉及维护操作的沉积物的烧蚀材料是符合期望的。碳-氢烧蚀材料是不理想的,因为碳或含碳材料可能会在射束腔室内部的组件中建立。不会在射束腔室中导致稳定固体的氢化合物是符合期望的。两种这样的化合物是水和氨水。在全部两种情况下,需要在冻结状况下把所述化合物馈送到射束腔室中,以便最小化材料的升华。有限的升华是可允许的。为了防止水的升华,大约200K或更低的温度是符合期望的。类似地,需要将氨水保持得冷却以便防止升华。在全部两种情况下,水或其副产品(氧离子、原子和水簇)以及氨水及其副产品(氮、铵簇等等)将不在机器中形成。

[0100] 在理想情况下,内部离子源将被沿着轴放置,靠近机器的中平面。

[0101] 射束提取

[0102] 离子束的提取对于可变能量、无铁同步回旋加速器提出了最大的挑战。通过在提取半径附近扰动局部磁场而在几个轨道的路线上进行射束提取是一种可能性。应当通过与回旋加速器磁场成线性的元件来产生所需的扰动,比如超导单块材料(monolith)或者小的缠绕线圈,其场可以被编程为匹配机器的其他特性。

[0103] 发明人已经表明,如果磁场和RF电压被调节,通过回旋加速器线圈中的电流改变,有可能在同步回旋加速器中保持完全相同的轨道,其从相同的位置开始并且具有经过调节的初始能量。用于获得完全相同的轨道的算法与前面针对加速所描述的算法相同。因此,可以有可能保持包括提取在内的完全相同的轨道。但是有可能的情况是,由于大量的循环,将有必要调节加速电压的幅度、相位或全部二者,以便确保在提取之前以及在提取期间轨道对于类似的射束提取(对于具有不同能量或者甚至荷质比的粒子)保持相同。

[0104] 一种替换的解决方案是将电子感应加速振荡与加速的锁相环控制相组合,正如图9中说明性地示出的那样。图9是射束提取的反馈控制的示意图,其中调节磁凸起(magnetic bump)的幅度以便控制射束提取的位置。所述磁凸起可以是单一磁凸起,或者其可以与实现提取的第二凸起相互作用。

[0105] 电子感应加速振荡使具有最大半径的轨道(具有不同于磁场中心的中心的回旋加速轨道)上的点旋转。在图9中示出了具有最大半径的轨道中的点的位置410,以及该最大半径在几个轨道上的进动。还示出了被引入来提取射束的提取凸起400的位置。图9夸大了轨道间隔以及进动,以便图示为了实现适当的提取而需要在轨道上进行的调节。通过在加速时段期间调节RF驱动(电场的幅度以及关于射束的相位二者),特别在接近加速过程的末尾时,有可能使得具有正确能量的粒子处在用于提取的正确位置处(径向和方位角)。通过使用这种技术可以有可能实现大得多的间隔,这是因为在相同的最外侧位置处的邻近轨迹之间可以发生多次加速。所述提取方法使用比回旋加速轨道频率更慢的电子感应加速振荡来调节粒子何时达到全能量并且可以进入提取边界。因此有可能调节提取位置。通过这种方式可以实现提高的射束提取效率。

[0106] 还有可能在提取过程期间增加RF加速场,以便增加匝到匝间隔。通过仅在加速的最后阶段期间增加RF场,有可能保持低平均功率要求。可能没有必要提高电力供给装置的电力处置容量,这是因为仅在射束注入、加速和提取时段的一小部分期间仅需要峰值,因此在该高功率的操作具有低占空比。

[0107] 可以对电子感应加速振荡的幅度进行调节,这是通过将射束引入到回旋加速器中

从而使得离子的回旋管 (gyrotron) 运动的中心关于回旋加速器的磁轴发生位移而实现的, 或者是通过回旋加速场中的受控磁扰动而实现的。可以通过修改磁场的分布来调节电子感应加速振荡, 这在不具有铁的器件的情况下是可能的。其还可以通过在回旋加速器中引入非轴对称磁场的线性磁性元件 (线性在于他们可以随着磁场变化) 来产生。

[0108] 图9是示出了在提取射束之前增加匝到匝距离的措施的说明性图。使用射束传感器 (未示出) 来确定射束的位置, 并且调节 (通过D形盒或空腔的) 加速电场的相位、幅度或全部二者, 以便在提取部位为射束提供正确的能量和位置 (在图9中未示出加速结构)。

[0109] 前面的讨论提供了在由于电子感应加速振荡而导致的进动期间控制射束能量的措施 (通过调节RF场的相位和/或幅度)。但是有可能通过调节回旋加速器中的脉冲非轴对称场的幅度来激发将导致射束提取的电子感应加速振荡。

[0110] 作为针对使用静止磁凸起的传统措施 (具有随着回旋加速器的主磁场线性地变化的场, 被调节以获得可变能量) 的替换或补充, 相位环路控制 (其提供关于离子聚束的状态的信息) 允许通过使用快速改变的冲击磁场进行提取的可能性。该冲击场是由被称作冲击线圈的一个或更多线圈生成的非轴对称脉冲磁场。快速指的是在几个回旋加速轨道或者 (电子感应加速振荡的) 几个进动轨道的尺度上。非轴对称指的是扰动变化场具有方位角变化。使用冲击场用于提取的优点在于, 在射束达到所期望的提取能量之前, 射束轨道不受扰动。所述冲击场可能需要穿过回旋加速器的多个离子轨道以用于提取, 并且其在提取之前不限于单一轨道。

[0111] 这种方法的一个问题在于快速改变冲击场的量值所需的功率。允许冲击磁场的快速改变的一个实施例是使用对于主回旋加速器线圈具有零互感的冲击线圈集合 (其生成脉冲非轴对称扰动磁场)。可以存在具有多个环路的一个或多个线圈, 其电流串联连接。该设置可以包括完全相同、但是围绕回旋加速器的主轴旋转并且利用在相反方向 (旋向性) 上流动的电流来操作的非轴对称场生成线圈的集合。可以存在由两个非轴对称线圈构成的集合或者更大的线圈集合, 具有偶数个扰动线圈。替代地, 可以通过使用外部变压器使得两个线圈之间的互感为零。在另一个实施例中, 可以使用所述两种方法的组合, 从而导致两个线圈集合之间的零互感。由于零互感, 生成冲击场所需的能量随着扰动场的平方缩放, 并且其远小于互感不低的情况下本来将需要的能量。在电路中不存在铁使得对射束变化的控制变得容易 (消除了非线性元件), 以及减少了由于快速变化的速率而导致的可能损耗。

[0112] 有可能的是, 冲击线圈是关于中平面对称的, 在这种情况下, 可以存在由4个线圈构成的集合, 或者他们可以是其中一个 (冲击线圈) 高于中平面并且另一个 (补偿冲击线圈) 低于中平面, 其中主回旋加速器绕组串联, 在这种情况下, 全部两个线圈集合 (冲击线圈和主回旋加速器线圈) 的互感为0。

[0113] 可以调节冲击场的斜坡变化速率以及发起斜坡变化的时间 (关于非轴对称场的斜坡变化在其中开始的轨道中的射束能量和相位), 以便提供射束的充足提取。可以生成查找表, 其提供与对应于几个射束能量的斜坡变化速率和斜坡变化定时有关的信息。可以使用来自射束传感器的信息 (位置、能量) 来发起冲击场的斜坡变化。还可以通过使用来自射束传感器的信息使用锁相环技术来调节斜坡变化速率。替代地, 随着磁场的变化调节斜坡变化速率, 以便调节具有不同能量的射束的轨迹, 从而使得具有不同能量的射束的轨道是相同的。通过确保射束轨迹对于不同射束能量的状况是相同的, 确保离子束提取对于具有不

同能量的离子束是相同的。

[0114] 可以通过薄导电元件防止超导线圈上的磁场变化,该薄导电元件屏蔽超导线圈免遭生成冲击场的线圈的影响。

[0115] 由于冲击线圈是在脉冲工作状态中的,因此有可能在短时间段内产生相对较高的场,高于在传统磁场凸起情况下将可能的情况。所述线圈可以是超导的,但是具有较短脉冲持续时间的电阻性线圈也是可行的,这是通过冲击线圈的低占空比而实现的。

[0116] 一个替换的设计实施例是使用脉冲静电偏转器来扰动射束光学器件从而导向提取点。对于静电偏转器,与主磁场没有感应耦合。与磁扰动场所需的能量相比,激活静电偏转器所需的能量非常小,甚至在非轴对称扰动场与主回旋加速器线圈之间没有耦合的情况下也是如此。

[0117] 图11示出了可以被用来控制非轴对称场的幅度以便提供充足提取的说明性控制算法。该方案允许控制扰动场(磁凸起),以便在射束加速的最终阶段期间提供充足的离子轨道以用于提取。由于通过射束传感器510(其可以包括多于一个检测器500)实时地知道射束的位置,因此可以计算提供去到导致良好射束提取的提取区段的途径所需的场扰动,并且随后激活实现轨道修改所需的扰动(非轴对称)场。情况是动态的,并且可以实时地计算关于离子束路径和所需场扰动的进一步估计。举例来说,可以利用射束检测器500和射束传感器510确定射束的位置和速度。为了成功地提取射束,必须通过可预测的方式改动其在最后几个循环期间的轨道。举例来说,基于查找表或第二锁相环,电子控制单元540(其可以是与参照图1描述的相同的电子控制单元)可以预测射束在特定时间需要位于何处以用于提取(参见方框530)。电子控制单元540随后与可控电力供给装置550通信,以便改动磁凸起线圈560。这些线圈560的激励用来改动离子束的轨道520。基于新的轨道,电子控制单元540再次预测射束需要位于何处(参见方框530),并且改动供应到磁凸起线圈560的功率。

[0118] 虽然图11示出了使用磁凸起线圈来改动离子束的轨道,但是应当理解的是,可以使用任何轨道改动机制或者任何非轴对称场修改器。举例来说,除了磁凸起线圈之外,还可以使用脉冲静电偏转器或者由线圈生成的快速改变的非轴对称脉冲磁场。

[0119] 因此,在一些实施例中,回旋加速器可以包括至少两项功能。在图12中示出了这两项功能。首先,回旋加速器必须将离子束加速到预定义的能量水平或加速度。其次,回旋加速器必须通过提取通道460提取该离子束。使用锁相环可以使得全部两项功能更加可预测。如前所述并且如图1-3中所示,回旋加速器可以包括射束检测器101、射束传感器104、电子控制单元105、RF波生成器/相位控制器VCO 107以及放大器108。图12示出了环路天线250的可能位置,但是也可以使用其他位置。这些组件允许回旋加速器在加速阶段期间监测离子束的轨道。因此,通过使用锁相环,有可能在加速阶段期间确定离子束在回旋加速器内的确切位置和速度。此外,电子控制单元能够通过修改RF驱动来调节或改变离子束轨道、速度或位置,其可以在加速间隙200处被注入。

[0120] 关于确切射束位置和速度的这一知识可以允许发生更加可预测并且可重复的提取。如图9中所示,对于适当的提取,必须改动离子束的轨道,从而使其在一侧进一步向外移动。这一非对称的轨道被用来使得离子束越来越靠近提取点。这一非对称性是通过使用非轴对称场修改器而产生的。该场修改器(其可以通过多种方式来实施)必须确保离子束遵循用于成功提取的预定路径。在图12中所示的一个实施例中,所述场修改器可以被实施为冲



击线圈集合450。

[0121] 在一个实施例中,所述场修改器是开环系统。通过知道离子束在回旋加速器内的确切位置和速度,有可能在离子束处于特定位置和速度时激励场修改器。如果通过可重复方式激励场修改器,并且离子束在这一激励发生时处于相同的位置和速度,则离子束可以遵循通过提取通道460的成功提取所需的预定路径。换句话说,通过使用锁相环使得离子束达到特定位置和速度,可以使得提取过程是可重复的。可以使得这一开环行为成为可能还因为所述过程的提取部分可以仅构成几个的轨道,比如少于100个轨道。因此,在该实施例中,电子控制单元可以利用查找表或其他信息来控制场修改器。这一查找表或其他信息可以利用例如离子质量、离子的质荷比以及所提取离子束的所期望能量之类的数据来确定场修改器的适当控制。

[0122] 在另一个实施例中,使用第二锁相环来控制场修改器。正如锁相环被用来在加速期间控制RF驱动那样,锁相环可以在提取期间控制非轴对称场修改器。在该实施例中,射束检测器和传感器被用来确定射束的位置和速度。电子控制单元随后利用该信息来确定对于场修改器的适当改动。这些改动也基于比如离子质量、离子的质荷比以及所提取离子束的所期望的能量之类的数据。所有该信息都被用来确定对场修改器的适当控制。这些改变随后被相应地应用于场修改器。如前所述,该场修改器可以是如图12中所示的冲击线圈集合460。但是也可以使用其他机制来修改用于提取的场。

[0123] 虽然在本公开内容中的一些示例中对于锁相环的实施方式的讨论涉及用于加速结构的D形盒,但是应当理解的是,在使用RF空腔时适用相同的原理。因此,这里所描述的锁相环技术可以与任何适当的加速器件一起使用。

[0124] 因此,本系统允许产生可以提取具有任何所期望的能量的离子束的系统。如前所述,建立通过使电流经过回旋加速器线圈而产生的磁场以便把离子束约束在回旋加速器中。该磁场的量值还建立所提取离子束的最终能量。

[0125] 回旋加速器还包括锁相环,其监测离子束在回旋加速器中的位置和速度,并且根据离子束信息调节RF驱动。锁相环包括射束检测器、传感器、电子控制单元和RF波生成器。基于接收自射束检测器的数据,电子控制单元利用RF波生成器改动RF驱动。所述锁相环被用来使得离子束遵循回旋加速器内的预定路径。

[0126] 一旦离子束到达回旋加速器内的特定位置和速度,电子控制单元就开始提取过程。这可以通过利用冲击线圈激励非轴对称脉冲磁场来实现。该非轴对称脉冲磁场朝向提取点偏移离子束,从而使得离子束以特定轨迹离开回旋加速器。来自冲击线圈的磁场的量值与回旋加速器中的磁场的量值成正比例地变化,以便确保所提取的射束遵循固定轨迹离开回旋加速器而不管最终能量如何。

[0127] 本公开内容的范围不受这里所描述的具体实施例的限制。实际上,除了这里所描述的那些实施例之外,根据前面的描述和附图,本公开内容的其他各种实施例和修改对本领域普通技术人员来说将是显而易见的。因此,这样的其他实施例和修改意图落在本公开内容的范围之内。此外,虽然这里在用于特定目的的特定环境中的特定实现方式的情境中描述了本公开内容,但是本领域普通技术人员将认识到其用途不限于此,并且可以在用于任何数量目的的任何数量的环境中有益地实施本公开内容。因此,应当按照这里所描述的本公开内容的完全宽度和精神来解释后面阐述的权利要求。

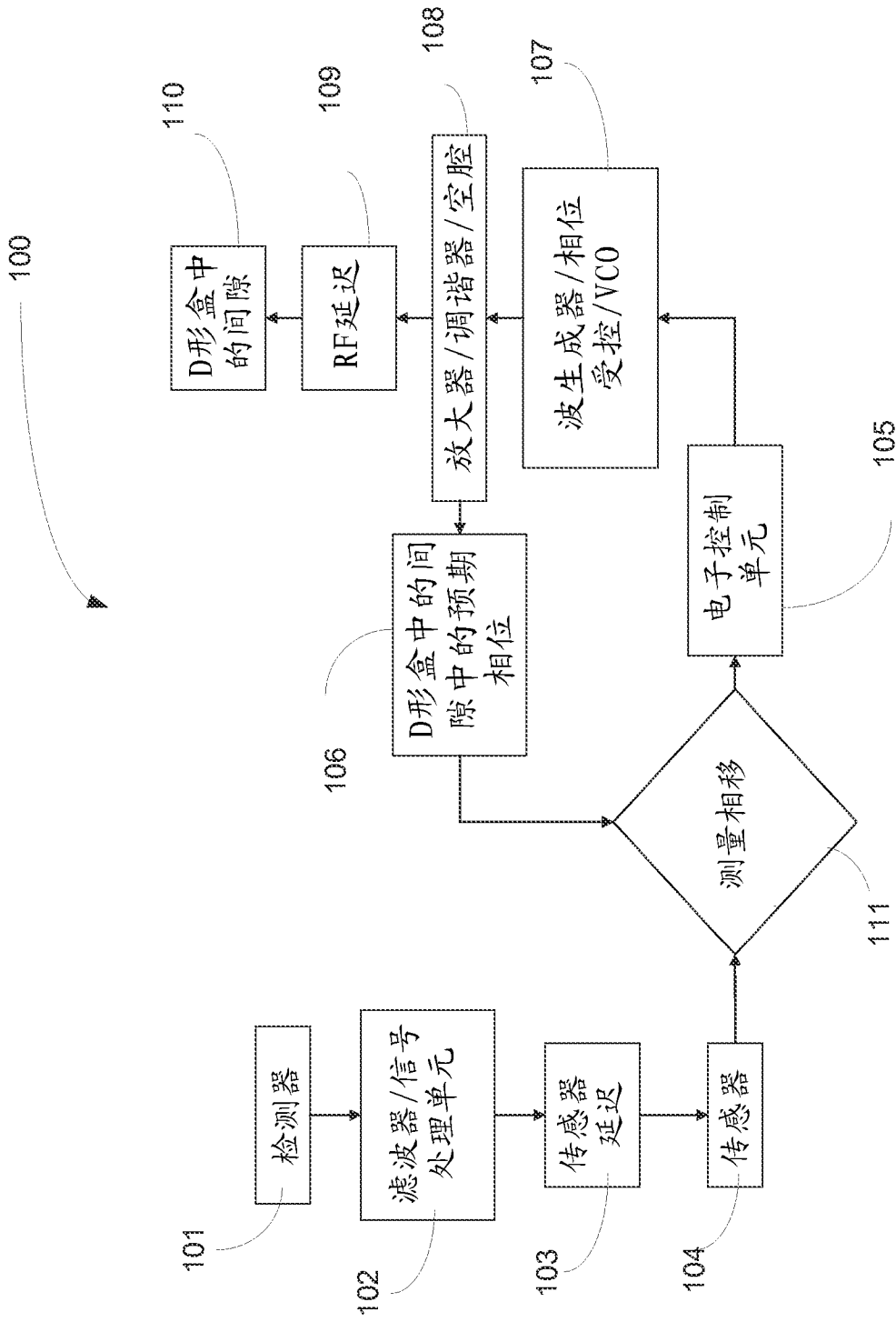


图 1

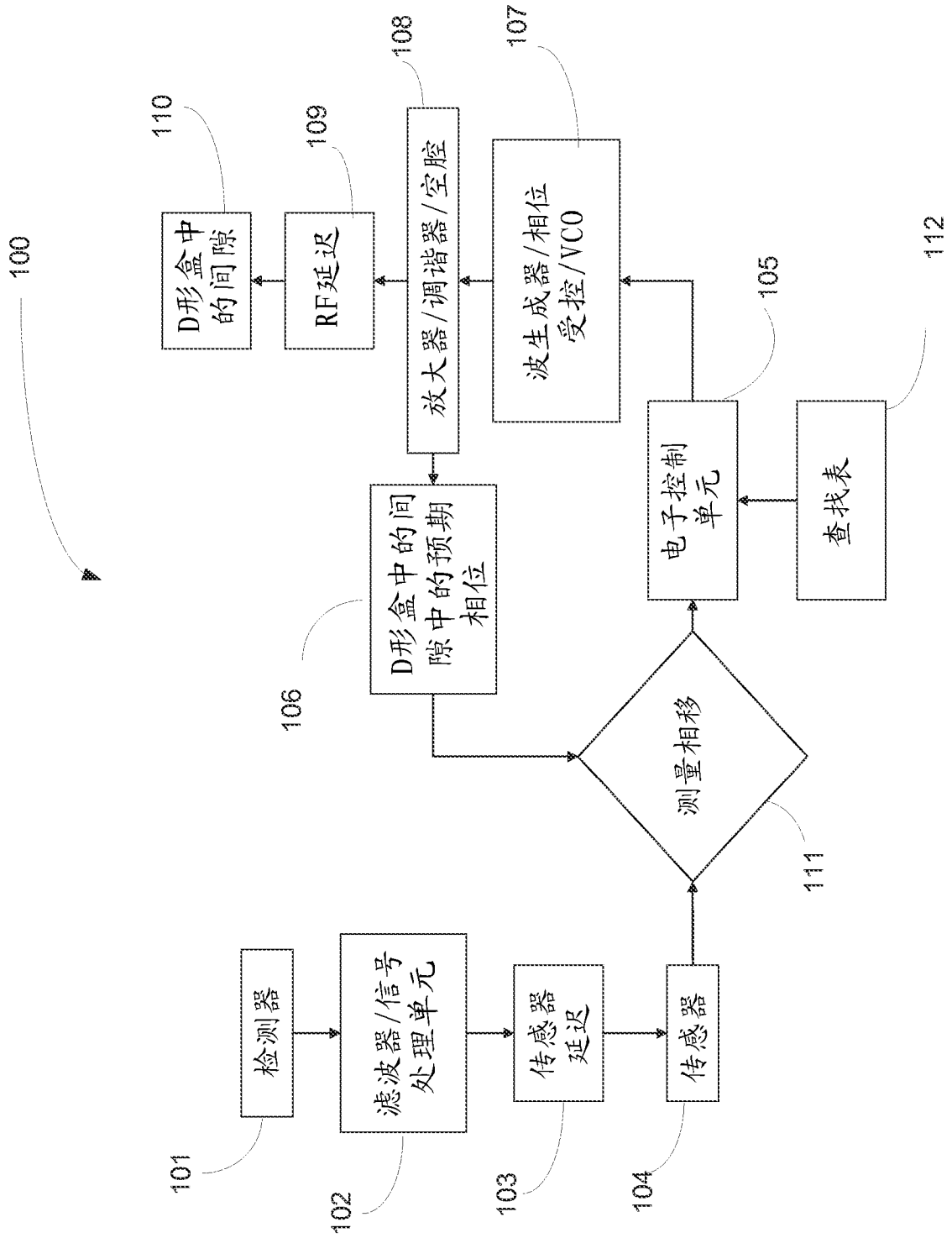


图 2

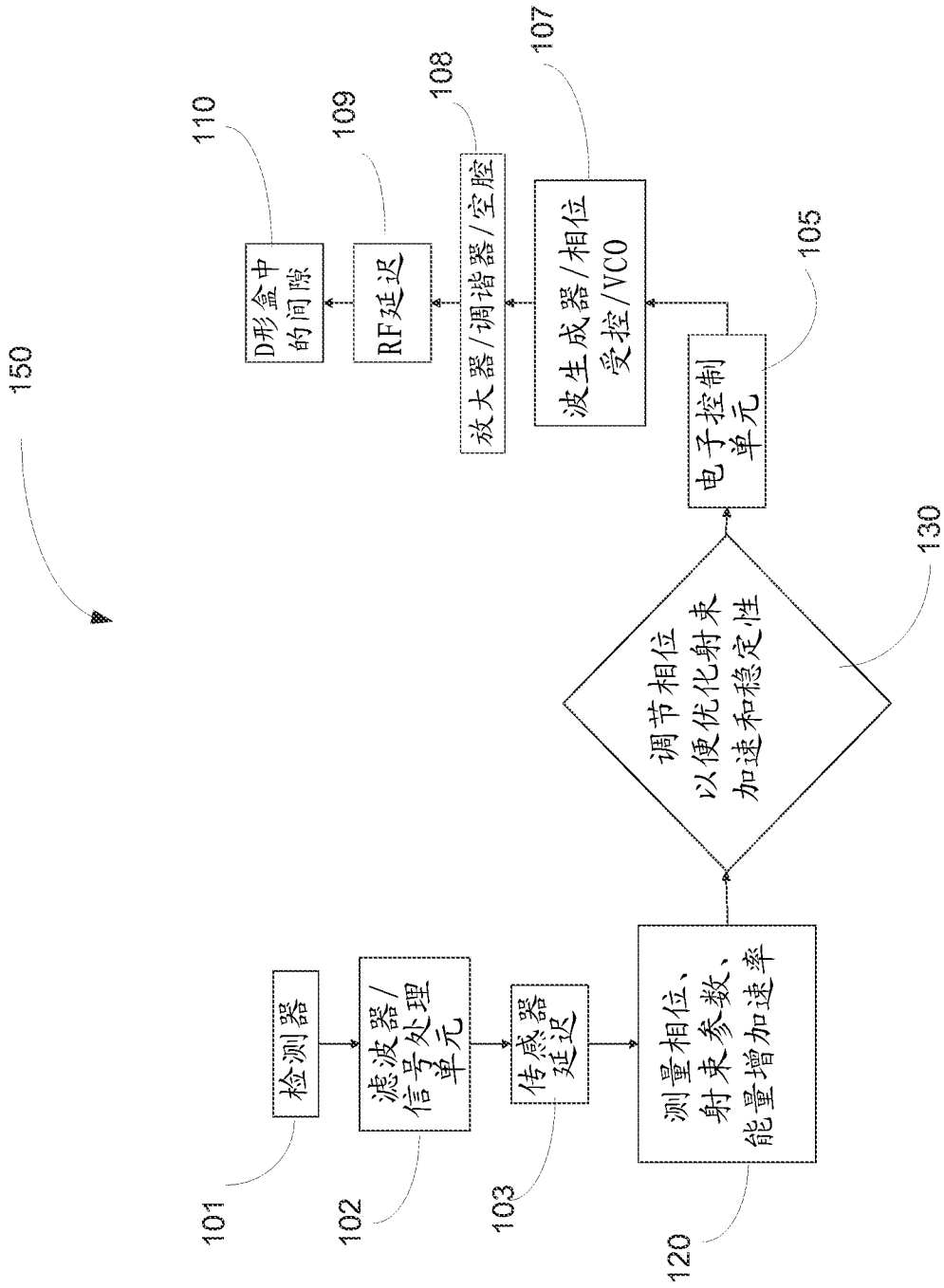


图 3

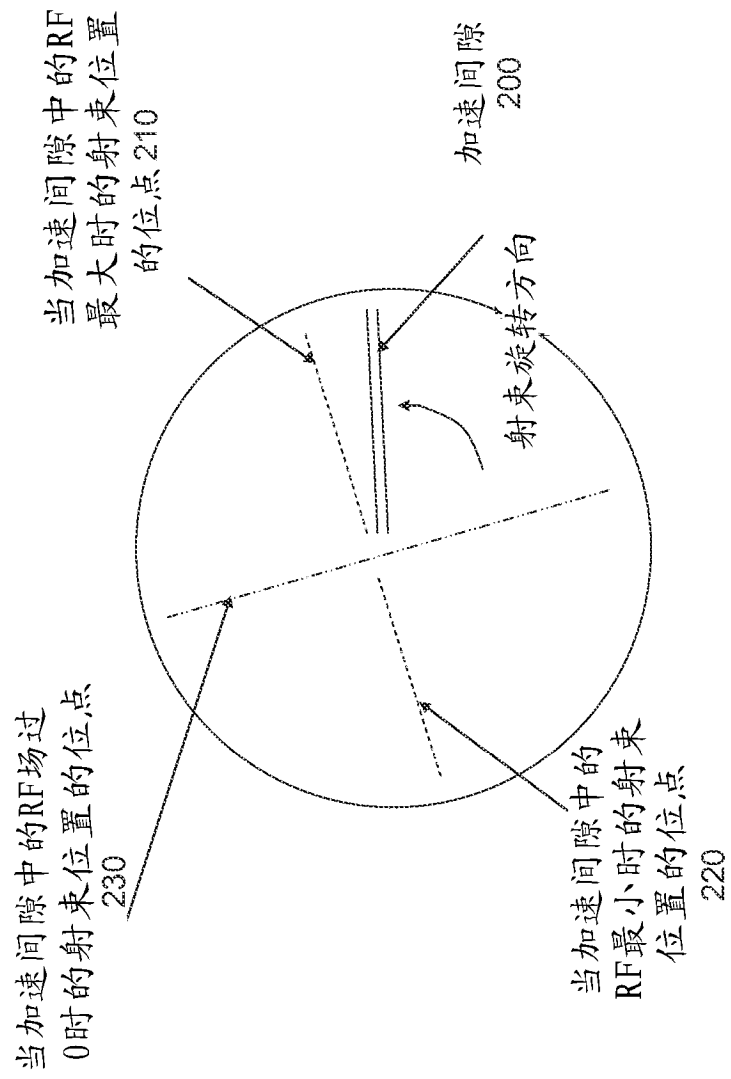


图 4

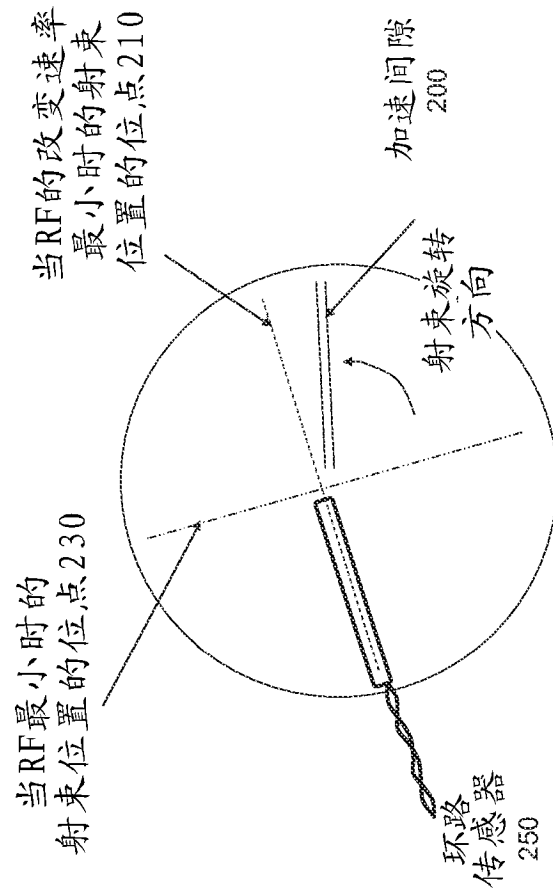


图 5

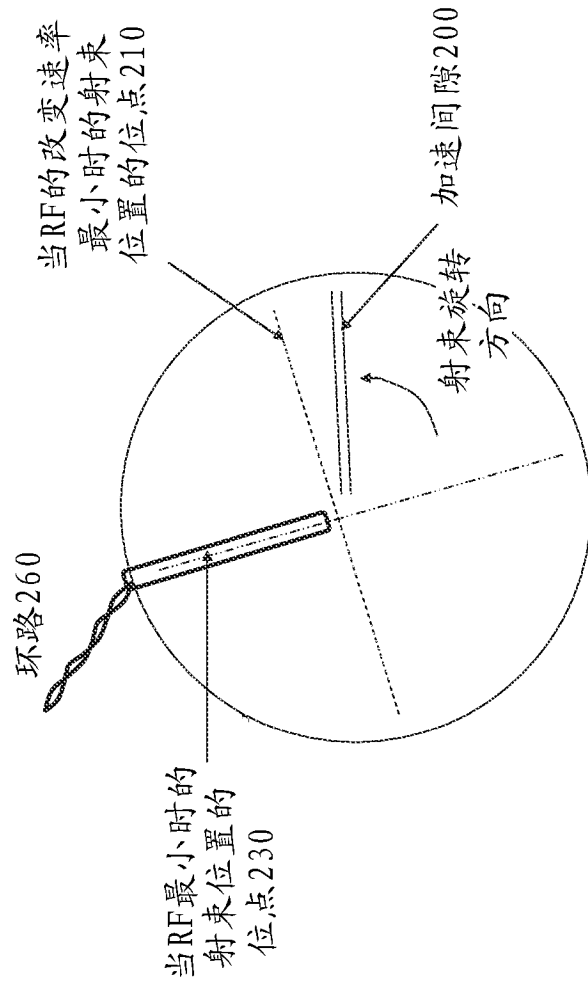


图 6

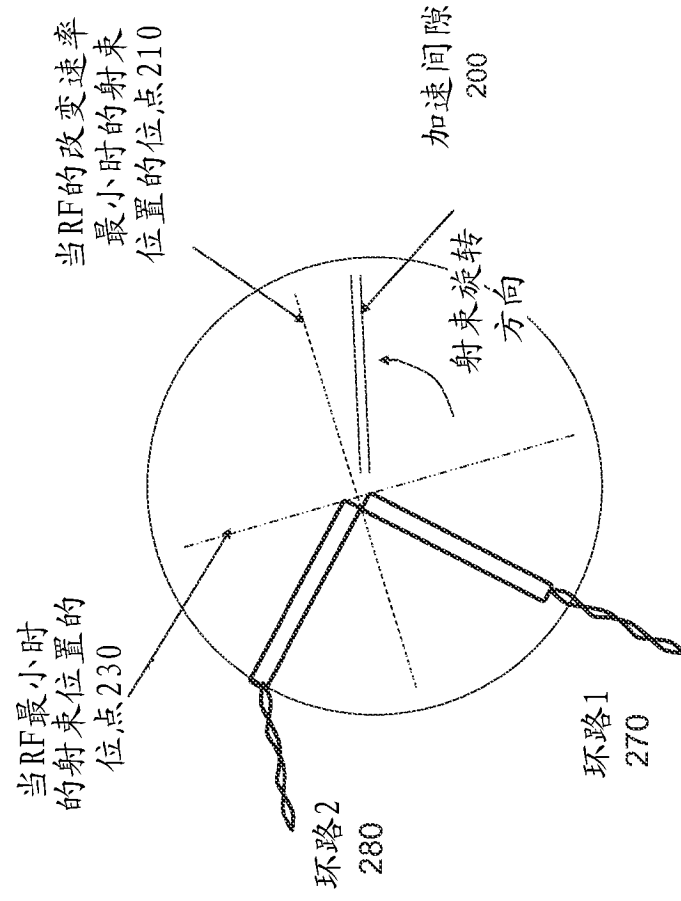


图 7



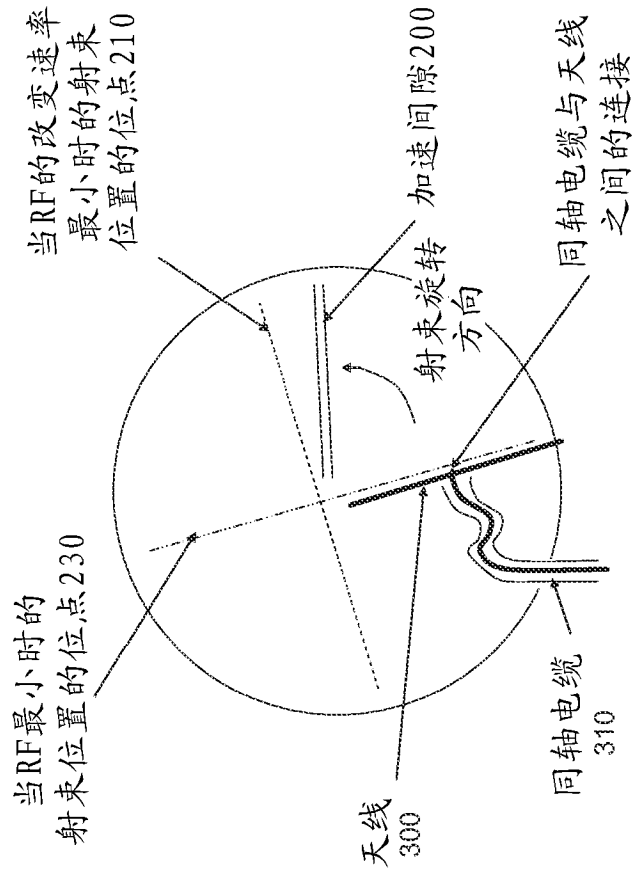


图 8

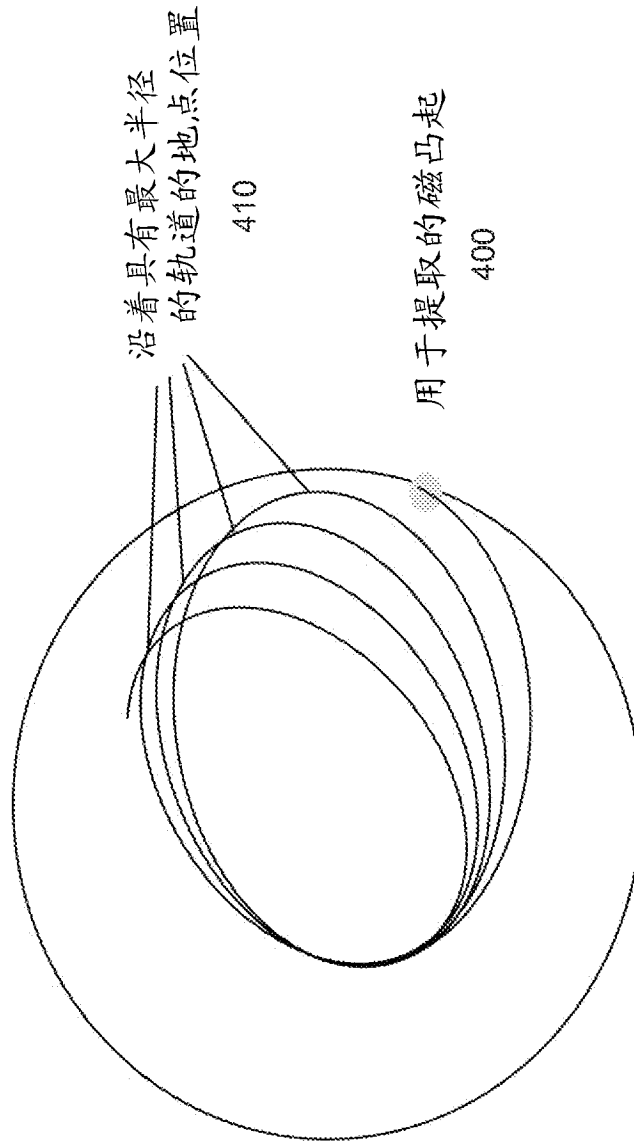


图 9

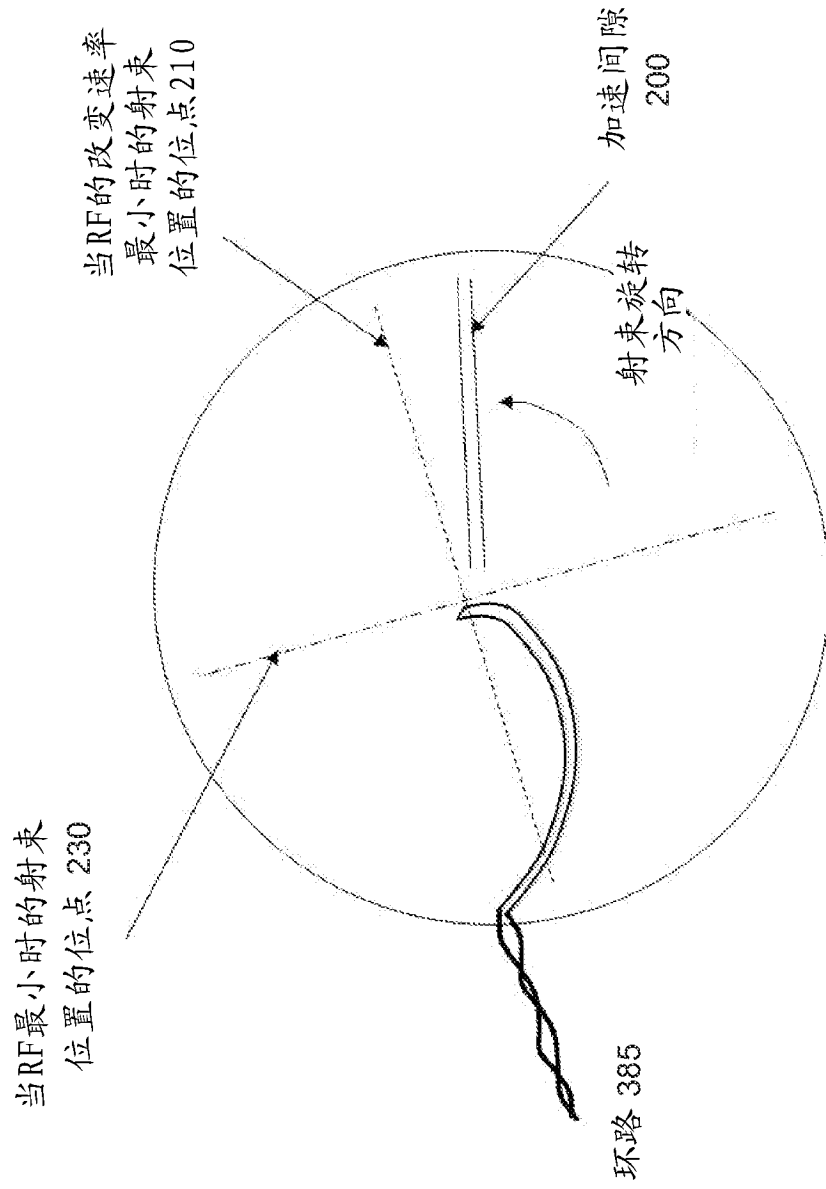


图 10

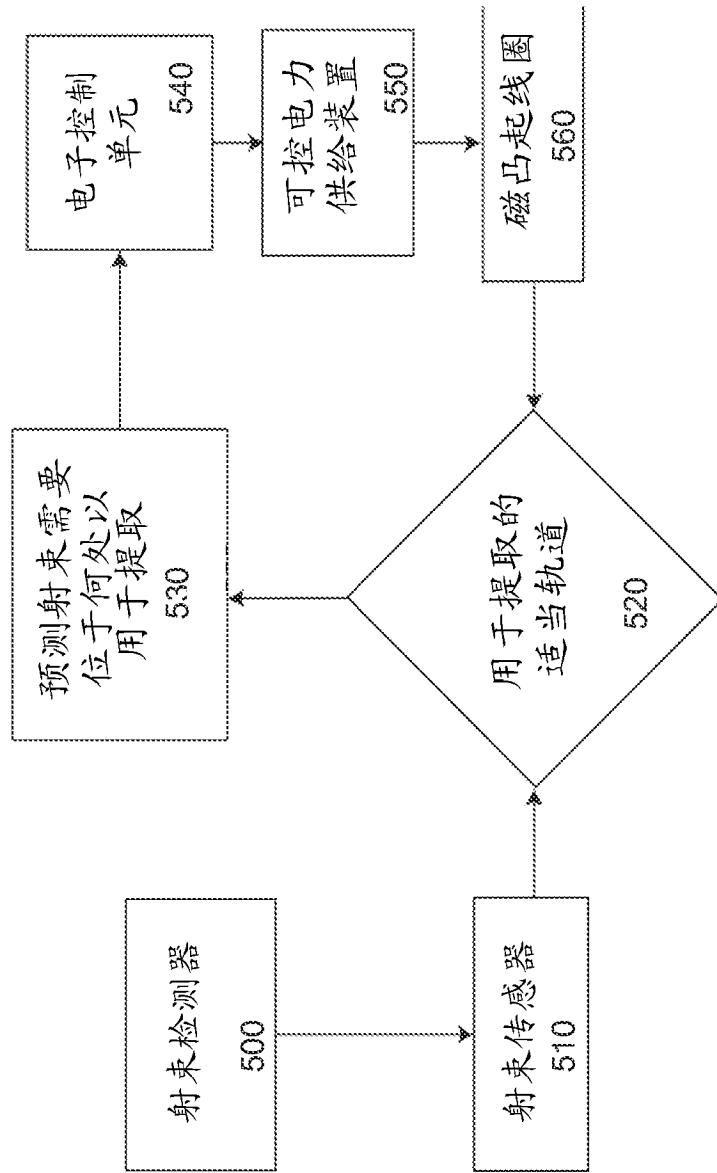


图 11

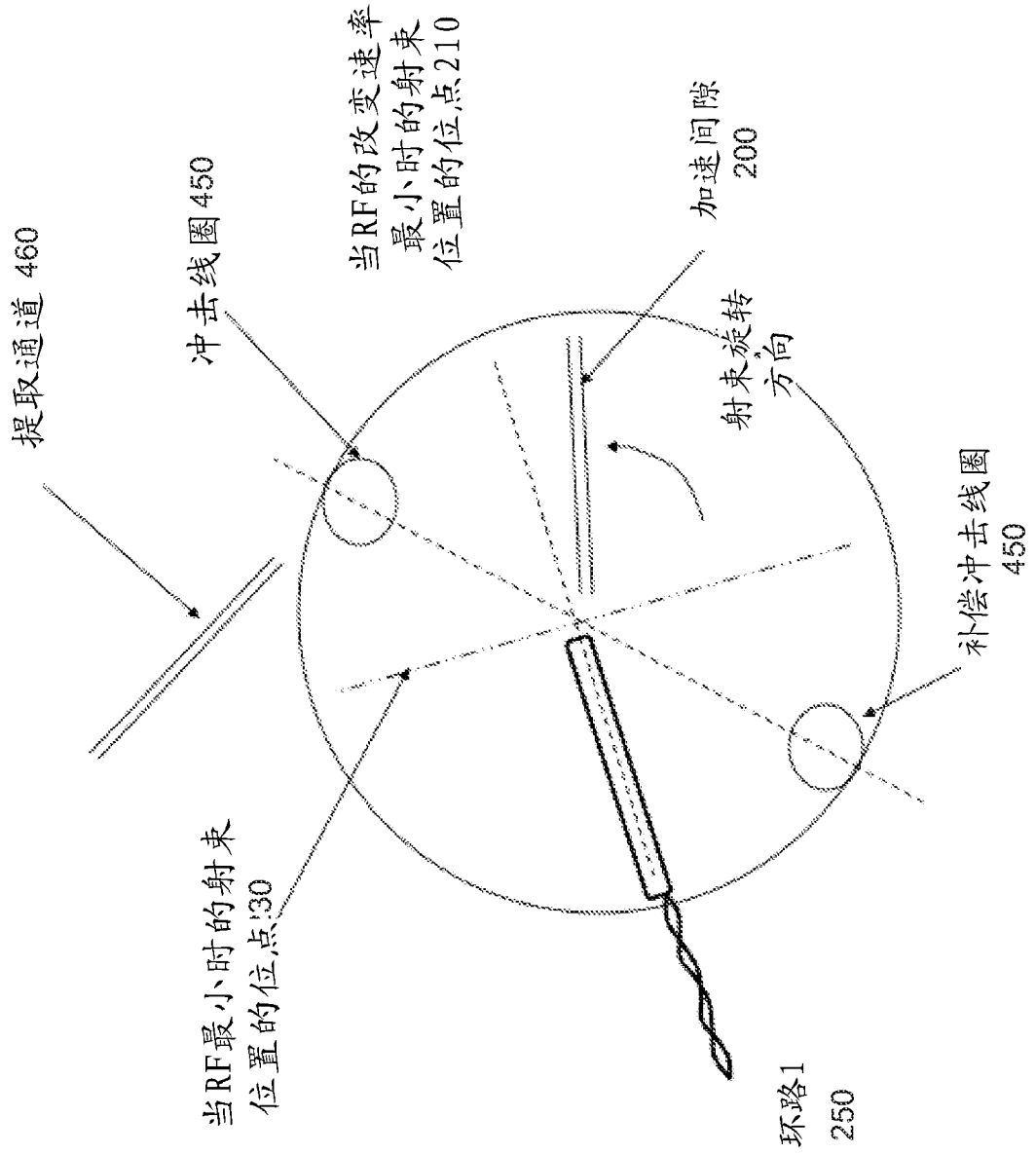


图 12