



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103766006 B

(45)授权公告日 2016.10.19

(21)申请号 201180073296.4

(22)申请日 2011.07.10

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 103766006 A

(43)申请公布日 2014.04.30

(30)优先权数据

13/178,421 2011.07.07 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2014.03.06

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2011/043483 2011.07.10

(87)PCT国际申请的公布数据

W02013/006182 EN 2013.01.10

(73)专利权人 艾昂耐提柯斯有限公司

地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 蒂莫斯·安塔亚

(74)专利代理机构 北京派特恩知识产权代理有

限公司 11270

代理人 武晨燕 张颖玲

(51)Int.Cl.

H05H 13/00(2006.01)

(56)对比文件

US 2009/0206967 A1,2009.08.20,

US 6683426 B1,2004.01.27,

US 2007/0101742 A1,2007.05.10,

JP 特开2010-212031 A,2010.09.24,

JP 特开2001-85199 A,2001.03.30,

US 2007/0171015 A1,2007.07.26,

JP 特开2011-34818 A,2011.02.17,

GB 1457860 A,1976.12.07,

D.L.Friesel等.Medical cyclotron.

《Reviews of Accelerator Science and Technology》.2009,第2卷

F. Marti等.Modifications to the injection system of the K800

superconducting cyclotron.《IEEE

Transactions on Nuclear Science》.1983,第NS-30卷(第4期),

审查员 刘时雄

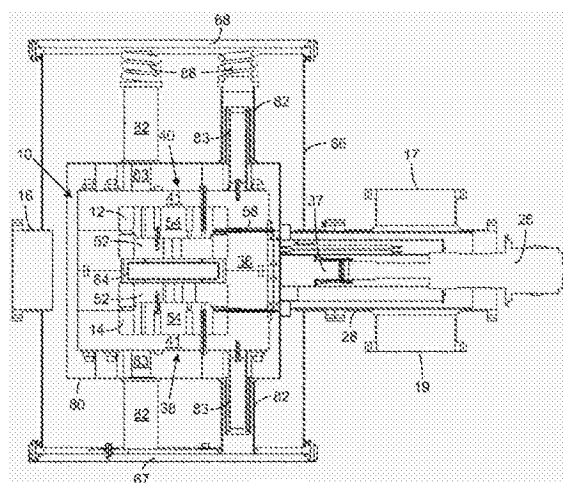
权利要求书3页 说明书12页 附图14页

(54)发明名称

紧凑型冷超导等时性回旋加速器

(57)摘要

一种紧凑型冷超导等时性回旋加速器在一个中央加速平面的多个对边可以包括至少两个超导线圈。一个磁轭环绕这些线圈和一个射束室的一部分,粒子在该射束室被加速。一个低温制冷机与这些超导线圈以及与该磁轭热耦合。该超导等时性回旋加速器还包括多个提供强聚焦的扇形磁极尖,这些扇形磁极尖可以具有一个螺旋形结构并且可以由一个稀土磁体形成。这些扇形磁体尖还可以被一种非磁性材料与该轭的剩余部分分离。在其他实施例中,这些扇形磁极尖可以包括一种超导材料。这些螺旋形磁极尖在这些扇形磁极尖的远离该中央加速平面的背侧上还可以包括多个切口。



1. 一种紧凑型冷超导等时性回旋加速器, 包括:

至少两个基本上关于一个中心轴对称的超导线圈, 其中, 这些线圈在一个中央加速平面的多个对边上;

一个环绕这些线圈并且包含一个射束室的至少一部分的磁轭, 其中, 该中央加速平面延伸通过该射束室, 其中, 该磁轭包括多个在该中央加速平面的每一侧形成多个丘并在这些丘之间形成多个谷的扇形磁极尖, 并且其中, 这些丘跨该中央加速平面径向地分离一个间隙, 该间隙比跨该中央加速平面将这些谷分离的一个间隙更窄;

一个低温制冷机, 与这些超导线圈并与该磁轭物理接触且热接触; 以及

低温恒温器, 其围绕所述磁轭安装并且容纳在体积内的所述线圈和所述磁轭, 在所述体积内, 所述线圈能通过所述低温制冷机维持在低于所述超导线圈的超导转变温度的温度, 且所述磁轭能通过所述低温制冷机维持在不大于50K的温度。

2. 如权利要求1所述的等时性回旋加速器, 其中, 该磁轭包括一对在该中央加速平面的多个对边的磁极, 这些磁极中的每一个包括一个磁极底座, 并且这些扇形磁极尖安装在该磁极底座上。

3. 如权利要求1所述的等时性回旋加速器, 其中, 这些超导线圈由该磁轭物理地支撑。

4. 如权利要求1所述的等时性回旋加速器, 其中, 这些超导线圈与该磁轭物理接触。

5. 如权利要求1所述的等时性回旋加速器, 其中, 这些扇形磁极尖中的每一个具有一个螺旋型结构。

6. 如权利要求5所述的等时性回旋加速器, 其中, 这些扇形磁极尖包括一种稀土铁磁材料。

7. 如权利要求6所述的等时性回旋加速器, 其中, 该磁轭进一步包括一种将这些扇形磁极尖与该磁轭的剩余部分分离的非磁性材料。

8. 如权利要求7所述的等时性回旋加速器, 其中, 这些扇形磁极尖在这些扇形磁极尖的远离该中央加速平面的一侧包括多个切口, 其中, 这些切口被构造成用于随着到该等时性回旋加速器的中心轴的半径的增加而增加磁场增益的大小。

9. 如权利要求1所述的等时性回旋加速器, 其中, 这些扇形磁极尖包括一种在一个至少4K的温度超导的材料。

10. 如权利要求1所述的等时性回旋加速器, 其中, 这些超导线圈包括一种在一个至少4K的温度超导的材料。

11. 如权利要求1所述的等时性回旋加速器, 其中, 该等时性回旋加速器被配置成用于产生一个轴向增加的磁场, 当这些超导线圈和该磁轭被冷却到一个不大于50K的温度时并且当电流在这些线圈的临界电流容量通过这些超导线圈时, 该磁场在该中央加速平面中在一个用于粒子引入的内半径至少为6特 斯拉。

12. 如权利要求11所述的等时性回旋加速器, 其中, 该等时性回旋加速器被配置成用于产生一个轴向增大的磁场, 当这些超导线圈和该磁轭被冷却到一个不大于50K的温度时并且当电流在这些线圈的临界电流容量通过这些超导线圈时, 该磁场在该中央加速平面中在一个用于粒子引出的外半径至少为7特斯拉。

13. 一种用于离子加速的方法, 包括:

采用一个等时性回旋加速器, 该等时性回旋加速器包括:

a)至少两个基本上关于一个中心轴对称的超导线圈,其中,这些线圈在一个中央加速平面的多个对边上;

b)一个环绕这些线圈并且包含一个射束室的至少一部分的磁轭,其中,该中央加速平面延伸通过该射束室,其中,该磁轭包括多个在该中央加速平面的每一侧形成多个丘并在这些丘之间形成多个谷的扇形磁极尖,并且其中,这些丘跨该中央加速平面径向地分离一个间隙,该间隙比跨该中央加速平面将这些谷分离的一个间隙更窄;

c)一个低温制冷机,与这些超导线圈并与该磁轭物理接触且热接触;

d)一个与一个射频电压源耦合并安装在该射束室中的电极;以及

f)低温恒温器,其围绕所述磁轭安装并且容纳所述线圈和所述磁轭,在一个内半径将一个离子引入该中央加速平面;

提供从该射频电压源到该电极的电流以在一个固定频率在跨该中央加速平面的一个扩张的轨道中将该离子加速;

用该低温制冷机将这些超导线圈和该磁轭冷却,其中,这些超导线圈被冷却到一个不大于其超导转变温度的温度,且所述磁轭被冷却到不大于50K的温度;

将一个电压提供给这些被冷却的超导线圈以在这些超导线圈中产生一个超导电流,该超导电流在该中央加速平面中产生来自这些超导线圈并来自该磁轭的一个径向增加的磁场;以及

在一个外半径将已加速的离子从该射束室引出。

14.如权利要求13所述的方法,其中,该磁轭被冷却到一个不大于50K的温度。

15.如权利要求13所述的方法,其中,在该中央加速平面中产生的该磁场随着从该用于离子引入的内半径到该用于离子引出的外半径的多个半径增大。

16.如权利要求15所述的方法,其中,在该中央加速平面中产生的该磁场在该用于离子引入的内半径至少为6特斯拉。

17.如权利要求13所述的方法,其中,该离子被以一个固定频率从该用于离子引入的内半径到该用于离子引出的外半径加速。

18.如权利要求13所述的方法,其中,该离子是一个质子。

19.如权利要求13所述的方法,其中,当该离子被加速时该射束室具有一个在约10℃到约30℃的范围中的温度。

20.一种紧凑型冷超导等时性回旋加速器,包括:

至少两个基本上关于一个中心轴对称的超导线圈,其中,这些线圈在一个中央加速平面的多个对边;

一个环绕这些线圈并且包含一个射束室的磁轭,其中,该中央加速平面延伸通过该射束室,其中,该磁轭包括多个在被非磁性材料与该磁轭的剩余部分分离并且在该中央加速平面的每一侧形成多个丘并在这些丘之间形成多个谷的扇形磁极尖,并且其中,这些丘跨该中央加速平面径向地分离一个间隙,该间隙比跨该中央加速平面将这些谷分离的一个间隙更窄;

一个低温制冷机,与这些超导线圈并与该磁轭物理接触且热接触;以及

低温恒温器,其围绕所述磁轭安装并且容纳在体积内的所述线圈和所述磁轭,在绝热体积内,所述线圈能通过所述低温制冷机维持在低于所述超导线圈的超导转变温度的温

度,且所述磁轭能通过所述低温制冷机维持在不大于50K的温度。

21.如权利要求20所述的等时性回旋加速器,其中,这些扇形尖包括一个稀土磁体。

22.如权利要求20所述的等时性回旋加速器,其中,这些扇形尖中的每一个具有一个螺旋形结构。

23.如权利要求20所述的等时性回旋加速器,其中,这些扇形尖中的每一个具有一个远离限定一个切口体积的表面。

24.如权利要求20所述的等时性回旋加速器,其中,这些扇形尖包括一种在至少4K的温度超导的材料。

紧凑型冷超导等时性回旋加速器

背景技术

[0001] 美国专利号1,948,384(发明人:欧内斯特欧·劳伦斯,专利颁发于1934年)中披露了一种用于在向外的螺旋中使用来自一对电极的电场脉冲加速离子(带电粒子)的回旋加速器和一种磁体结构。劳伦斯的加速器设计现在一般被称为“经典”回旋加速器,其中,这些电极提供了一个固定的加速频率,并且磁场随着半径的增大而减小,提供了用于维持在轨离子的竖直相位稳定性的“弱聚焦”。

[0002] 现代的回旋加速器中,一种类型是特征为“等时性的”分类,其中,正如经典回旋加速器一样,虽然磁场会随着半径的增大而增大以抵消相对性,但是这些电极提供的加速频率是固定的;并且在离子加速期间通过具有一个扇形周期性的波状铁磁极片得到的方位角地变化的磁场分量使用了一个轴恢复力。大多数等时性回旋加速器使用电阻式磁体技术并运行在一个从1-3特斯拉的磁场水平。一些等时性回旋加速器使用超导磁体技术,其中,超导线圈将为离子加速提供引导和聚焦场的热的铁极磁化。这些超导等时性回旋加速器可以运行在(对于质子)低于3特斯拉并且(当被设计成用于加速更重的离子时)高达3-5特斯拉的场水平。本发明人于20世纪80年代在密歇根州立大学从事第一个超导回旋加速器项目。

[0003] 另一类回旋加速器是同步回旋加速器。与经典回旋加速器或等时性回旋加速器不同,同步回旋加速器中的加速频率随着离子向外螺旋而减小。还不同于等时性回旋加速器(尽管与经典回旋加速器类似),同步回旋加速器中的磁场随着半径的增大而减小。同步回旋加速器(类似于现有超导等时性回旋加速器)具有提前预热的铁极和冷却的超导线圈,但是以一种不同的方式在加速期间保持射束聚焦,这种方式缩放到更高的场并可以相应地以一个例如9特斯拉的场运行。

发明内容

[0004] 在此描述了一种紧凑型冷超导等时性回旋加速器。这些装置和方法的构造和使用的多种实施例可以包括下文描述的元件、特征及步骤的一些或全部。

[0005] 这种紧凑型冷超导等时性回旋加速器在一个中央加速平面的多个对边上可以包括至少两个超导线圈。一个磁轭环绕这些线圈并且包含一个射束室的一部分,离子在该射束室内被加速,并且该中央加速平面延伸通过该射束室。一个低温制冷机与这些超导线圈并与该磁轭两者热耦合;例如,该磁轭可与来自该低温制冷机的热熔丝并与这些超导线圈热接触。该超导等时性回旋加速器还可以包括多个螺旋形磁极尖,这些螺旋磁极尖提供一个基于扇区的或方位角地变化的磁场以提供强大的聚焦以维持正在加速的离子的竖直稳定性;这些螺旋形磁极尖可以由一种稀土磁体形成并且可以从该轭磁的剩余部分悬浮(即,被非磁性组合物分离)。在其他实施例中,这些磁极尖可以包括一个超导体。这些磁极尖还可以在远离该中央加速平面的一个背侧包括多个切口,以使所产生的磁场的轮廓成形。

[0006] 在该等时性粒子加速器运行期间,一个离子在一个内半径被引入该中央加速平

面。来自一个射频电压源的电流被施加到一对安装在该磁轭内部的中央加速平面的对边上,以在跨该中央加速平面的一个扩张的轨道中将该离子加速。这些超导线圈被一个低温制冷机冷却到一个不大于这些超导线圈的超导转变温度的温度(例如,10到12K),并且该磁轭同样被冷却(例如,到 $\leq 50\text{K}$)。为这些冷却的超导线圈提供了一个电压以在产生一个在该中央加速平面将该离子加速的磁场的超导线圈中产生一个超导电流;并且这个已加速离子当到达一个外半径时被从该射束室引出。

[0007] 整个磁体结构(包括线圈、磁极、回传铁轭、调整线圈、超导磁体、成形的铁磁性磁极表面、和边缘场取消线圈或材料)可以安装在单个简单热支架上、安装在一个低温恒温器中以及在这些超导线圈的工作温度处或附近。由于该轭和这些线圈之间没有间隙,不需要这些支架的一个分离的机械支撑结构来减轻较大的离心力,通常在现有的超导回旋加速器中的高场遇到该离心力;此外,离心力基本上可以被减小或消除。

[0008] 可以同时使用该磁轭的这些冷磁体材料将使该场成形并结构地支撑这些超导线圈,进一步减小了复杂性并提高了该等时性回旋加速器的固有安全性。此外,因为所有的磁体都包含在该低温恒温器中,或者通过场取消超导线圈或者通过附装在该低温恒温器内的中间温度屏蔽的场取消超导表面,可以将外部边缘场取消而不会不利地影响加速场。

[0009] 在此描述的这些等时性回旋加速器设计可以对现有的超导等时性回旋加速器和现有的超导同步回旋加速器两者提供大量额外的优势,这些设计已经比常规的等价物更紧凑且更便宜。例如,可以将磁体结构简化,因为分离的支撑结构不需要维持磁路的成分之间的力平衡,这可以减少总体成本、提高整体安全性、并减少空间和主动保护系统管理外部磁场的需要。另外,这些等时性回旋加速器可以以一个较低的相对论性因子运行并且可以产生一个较高的磁场(例如,6特斯拉或以上)。另外,该装置不需要一个复杂的变频加速系统,因为这些等时性回旋加速器的设计可以运行在一个固定的加速频率。所以,本披露的等时性回旋加速器可以被用在移动环境以及更小的限制中。

附图说明

[0010] 图1是等时性回旋加速器和环绕结构的截面侧图解。

[0011] 图2是图1的等时性回旋加速器的放大的截面视图。

[0012] 图3是图1的等时性回旋加速器内部的电极和射束室的进一步放大的截面视图。

[0013] 图4是图1的等时性回旋加速器的透视的侧面截面视图。

[0014] 图5是图1的等时性回旋加速器的透视的顶部截面视图。

[0015] 图6是图1的等时性回旋加速器的顶部截面视图,示出了多个扇形磁极尖,而没有示出电极组件。

[0016] 图7是图1的等时性回旋加速器的顶部截面视图,示出了图6的扇形磁极尖上方的电极组件。

[0017] 图8是图1的等时性回旋加速器的侧面和顶部截面透视图。

[0018] 图9是图1的等时性回旋加速器的有角度的侧面截面透视图。

[0019] 图10是等时性回旋加速器的截面侧视图。

[0020] 图11是来自图10的部分70的放大视图。

[0021] 图12是包含图1的等时性回旋加速器的低温恒温器的表面透视图。

[0022] 图13是该等时性回旋加速器内部的离子轨道的轴向参考框架的绘图。

[0023] 图14是如正在加速的离子在该等时性回旋加速器内部的轨道中“看到”的磁极扇形的展开的截面图解。

[0024] 图15是多个磁极尖和一个磁极底座的一个替代性实施例的透视图,其中,这些磁极尖缠绕着超导体线圈环。

[0025] 图16是一个具有内部次级射束目标的等时性回旋加速器的顶部截面视图。

[0026] 图17是来自图16的部分98的放大视图。

[0027] 图18是一个用于离子引出的四极磁体的等时性回旋加速器的顶部截面视图。

[0028] 图19是来自图18的部分99的放大视图。

[0029] 在附图中,类似参考符号指代所有不同视图中相同或相似部件。这些图不必须定标,相反,下文讨论的重点放在示明具体原则上。

具体实施方式

[0030] 上述以及其他本发明多方面特征和优点将因下面对本发明更宽阔的界限的多种构思和具体实施例更具体的描述而更明显。鉴于主题不受限于任何具体实施方式,上文引入并在下文更详细讨论的主题的多个方面可以用很多方法中的任何一种实施。具体实现方式的例子和应用主要是为了说明的目的而提供的。

[0031] 除非另外在本文中定义、使用或表征,本文中使用的术语(包括技术术语和科学术语)将解释为与其在相关技术领域文献中被接受的相一致的意思,而不会解释为理想化或过分正式意义,除非在本文中特意定义。例如,如果引用了一种特定的组合物,这种组合物可以是实质性地(尽管不是完全)纯,由于实际有瑕疵的真实情况也适用;例如,至少潜在的痕量杂质(比如,至少质量或体积的1%或2%)的存在可以理解为在本说明书的范围内;同样地,如果引用了一个具体的形状,这个形状被规定为包括来自理想形状的不完美变形,比如,由于机器加工容差。

[0032] 尽管术语第一、第二、第三等可以用于本文来描述多种元件,这些元件不受这些术语的限制。这些术语仅用于将这些元件与彼此区别。因此,下文讨论的一个第一元件可以被称为一个第二元件而不背离这些示例性实施例的教导。

[0033] 空间相关的术语,比如“之上”、“上部”、“下方”、“之下”、“下部”等在此可以被用于使描述一个元件与另一个元件的关系的说明变得简单,如在图中所展示的。可以理解,这些空间相关的术语以及所展示的结构意指除在此描述和图中描绘的取向之外还包括使用和运行中的装置的不同指向。例如,如果将图中的装置翻过来,描述为在其他元件或特征“之下”或“下方”的元件则可以取向为在这些其他元件或特征的“上方”。从而,示例性术语“之上”可以包含之上和之下两个取向,并且该装置可以另外取向(例如,旋转90度或在其他取向),并且在此使用的空间相关的描述符号被相应地解释。

[0034] 更进一步地,在本披露中,当提到一个元件在另一个元件“上”、“连接”或“耦合”到另一个元件,该元件可能直接在该另一个元件上、连接或耦合到该另一个元件,除非另外说明,否则可能存在干预元件。

[0035] 在此所使用的术语用于描述特定实施例,并且不旨在限制示例性实施例。如在此所用,单数形式,比如“一个”和“一种”旨在同样包括复数形式,除概念以其他方式清晰表明

之外。另外,术语“包括”指定了所述的元件或步骤的存在,但是不排除一个或多个其他元件或步骤的存在或添加。

[0036] 在图1至图10中从不同的视角并通过不同的部分示出了一个等时性回旋加速器的一个实施例。该等时性回旋加速器包括:一个带有一对磁极38和40的磁轭10,这对磁极分别包括一个磁极帽41、一个磁极底座54、和多个螺旋形状的磁极尖52,以及包含一个射束室64的至少一部分的一个旁轭36,该射束室包含一个用于离子加速的中央加速平面的一部分。这些磁极38和40展示了跨该中央加速平面的近似的镜面对称并且通过一个旁轭36结合在该磁轭10的周界。

[0037] 如图1、图2和图4中所示的,该等时性回旋加速器的轭10由多个由一种热导性能较差的组合物形成的结构垫片82所支撑和定位,比如环氧玻璃复合材料、碳复合材料或薄壁金属(例如,不锈钢)结构,其中具有在该外部低温恒温器66与该中间热屏蔽80(例如,在45K)形成一个弯曲的结构通道的垫片延伸83以限制其间的热传递,因为垫片82和垫片延伸83在该外部低温恒温器66(由例如不锈钢或低碳钢形成并在所包含的体积中提供了一个真空屏障)和该热屏蔽80(由例如铜或铝形成)之间提供结构支撑。一个压缩弹簧88将该中间热屏蔽80和其中包含的等时性回旋加速器保持受压。

[0038] 一对超导磁性线圈12和14(即,可以产生磁场的线圈)包含在这些上部和下部磁极38和40中并分别与该上部进而下部磁极以及该磁轭10的旁轭36接触(即,没有被一个低温恒温器或被自由空间完全地分离开),这样使得,该轭10为这些超导磁性线圈12和14提供支撑并与其热接触。结果是,这些超导磁性线圈12和14不受外部离心力,并且张力熔丝不需要将超导磁性线圈12和14保持在该低温恒温器66内定中心。在替代性实施例中,磁性线圈12和14可以不与该轭10直接热接触,其中,该低温制冷机26可以分开冷却磁性线圈12和14以及该轭10(例如,线圈12和14可以与该低温制冷机的一个第二阶段在4K热耦合,同时该轭可以与该低温制冷机的一个第一阶段热在40K耦合)。在其他实施例中,热耦合可以包括放置在这些线圈12和14与该轭10之间的一个热屏蔽,虽然提供了这些线圈12和14与该轭10之间的一个温度差,仍然允许将该轭冷却到50K或更低。在再其他实施例中,热耦合可以包括与该低温制冷机26热接触并与该轭10和线圈12和14接触以为彼此提供冷却的液氮。

[0039] 这些超导线圈12和14通过一个电流引线被供应电流,该电流引线与一个电压源耦合并且通过该低温恒温器中的一个引线口17进行馈送以为低温导电熔丝58提供电流,该低温导电熔丝与这些线圈12和14热耦合。

[0040] 这些磁性线圈12和14包括超导体电缆或管道内电缆导体,其中,单独的电缆线股具有一个0.3mm到1.2mm(例如,0.6mm)的直径并被缠绕以提供一个(例如,4百万到6百万总安培匝)载流量。在一个管道内电缆导体的实施例中,当每个线股具有一个1,000-2,000安培的超导载流量时,在该线圈中设置该线股的3,000绕组以在该线圈中提供一个3百万到6百万的安培匝的量。在另一个实施例中,一个单线股电缆可以携带100-400安培并提供约一百万安培匝。总体上,该线圈可以被设计成具有与需要的一样多的线圈以产生一个希望的磁场水平所需要的安培匝数,而不超过该超导线股的临界载流量。这种超导材料可以是一种低温超导体,比如铌钛(NbTi)、铌锡(Nb₃Sn)、或铌铝(Nb₃Al);在具体实施例中,这种超导材料是一种第二类超导体,(具体地)Nb₃Sn具有一种A15晶体结构。还可以使用高温超导体,比如Ba₂Sr₂Ca₁Cu₂O₈、Ba₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀、MgB₂或YBa₂Cu₃O_{7-x}。

[0041] 这些线圈可以直接由超导体的电缆或管道内电缆导体形成。当是铌锡时,铌和锡(以3:1的摩尔比)的未反应的线股也可以被缠绕进电缆中。然后这些电缆被加热到一个约650℃的温度以让铌和锡反应以形成 Nb_3Sn 。然后这些 Nb_3Sn 电缆被焊接到一个U型铜通道中以形成一种复合导体。该铜通道在淬灭期间提供了机械支撑、热稳定性,以及当该超导材料正常时(即未超导),为该电流提供一个导电通路。然后该复合导体被包裹在玻璃纤维中,并且然后被缠绕在一个向外的布局中。由(例如不锈钢)形成的电热丝式加热器也可以被插在该复合导体的缠绕层之间,以便当磁体淬灭时提供快速加热,并且以便在淬灭发生后提供跨过该线圈的轴向横截面的温度平衡,将可能损坏这些线圈的热和机械的压力最小化。缠绕之后,应用一个真空,并且被缠绕的复合物导体结构被注满环氧树脂以在最终的线圈结构中形成一个纤维/环氧树脂复合填充物。缠绕的复合物导体嵌入其中的所产生的环氧玻璃复合物提供电绝缘和机械刚性。这些磁性线圈的特征及其结构在美国专利号7,696,847B2和美国专利申请公开号2010/0148895A1中进行了进一步的描述和展示。

[0042] 在其他实施例中,线圈12和14可以由单独的线股(小的圆导线)制成,并且湿绕着环氧树脂然后固化,或者干绕并在缠绕之后注满以形成一个复合线圈。

[0043] 每一个线圈12/14都被如美国专利申请序列号12/951,968中所描述的一种环氧树脂玻璃组合物的地面包装的额外的外部层和一种例如由铜或铝形成的胶带箔片的热外包装覆盖。该热外包装不仅与用于低温冷却的低温导电熔丝58还与该磁极帽41、磁极底座54和旁轭36热接触,虽然该热外包装与该磁极帽和该底座和该旁轭36之间的热接触可以在或可以不在该外包装的整体表面上(例如,直接或间接接触可以仅在邻接面上的有线数量的接触面积)。该低温导电熔丝58和该轭10表征为“热接触”是指,或者在该导电熔丝58与该轭之间有直接接触或者存在具有通过一种或多种热导型介入材料(例如,在运行温度具有一个大于0.1W/(mK)的热导率)的物理接触,比如,一种具有合适的差分的热收缩的热导性填充材料,该材料可以安装在该热外包装和该低温导电熔丝58之间并与之平齐,以用等时性回旋加速器冷却和变热适应热膨胀的差别。

[0044] 进而,该低温导电熔丝58与一个低温冷却器热熔丝37(图1和图4-8中所示)热耦合,该低温冷却器热熔丝进而与该低温冷却器26(图1和图4-10中所示)热耦合。所以,热外包装提供了低温冷却器26、该轭10和这些超导线圈12和14之间的热接触。

[0045] 最后,具有合适的差分热收缩的填充物材料可以安装在该热外包装与该低温导电熔丝58之间并与之平齐,以用磁体结构的冷却和变热来适应这些部件之间的热膨胀的不同。

[0046] 这些超导磁性线圈12和14在该中央加速平面18(见图14)的对边将该射束室64(离子在其中被加速)的区域包围,并用来在该中央加速平面18内直接产生极高的磁场。当通过一个外施电压被激活时,这些磁性线圈12和14进一步将该轭10磁化,从而使得该轭10也产生一个磁场,这个磁场可以被看成与这些磁性线圈12和14直接产生的场不同。

[0047] 这些磁性线圈12和14基本上(方位角地)关于一个中心轴16对称地安排,该轴在该中央加速面18(离子在其中加速)之上和之下等距。这些超导磁性线圈12和14被分开一个足够的距离,以允许至少一对FR加速电极板49和一个环绕的超级绝缘层在(该射束室64内)在其间延伸,在该射束室内部温度可以维持在或近似一个室内温度(例如,约10℃到约30℃)。每个线圈12/14包括一个在设计的运行温度超导的导体材料的连续路径,通常在4-40K范围

内,但也可以运行在2K以下,此时额外的超导性能和裕度是可获得的。当该回旋加速器要运行在较高的温度时,可以使用超导体,比如铋锶钙铜氧化物(BSCCO)、钇钡铜氧化物(YBCO)或MgB₂。

[0048] 本披露的一个被设计成产生12.5-MeV射束的紧凑型冷回旋加速器可以具有一个约10cm的内线圈半径和一个3.5cm宽和6cm高的横截面(在图1和图2的取向中)。线圈12和14还可以在该中央加速平面的对边被分开一个198mm的距离。该等时性回旋加速器可以通过增大这些线圈和该磁体结构的剩余部分的半径进行缩放以将离子加速到更高的电压。对于给定的磁体尺寸和场强,该装置也可以缩放用于比质子重的离子,加速之后一个更重的离子(例如,氘或更重的)的总能量将小于或等于一个加速质子的能量的一半,所以随着半径的更不竖直聚焦和更少的场增大可以由该磁体结构提供给更重的离子。

[0049] 因为这些较高的磁场,该磁体结构可以被做得异常小。在一个实施例中,该磁轭10的外半径约为从中心轴16到这些磁性线圈12和14的半径r的2.4倍,同时,该磁轭10的高度(平行于该中心轴测量)约为该半径r的两倍。

[0050] 同时,这些磁性线圈12和14以及该轭10(包括旁轭36、磁极帽41、磁极底座54(如果由一种磁性材料形成)、和一个扇形磁极尖52)在该中央加速表面18中在用于离子引入的内半径产生一个(例如,至少6特斯拉的)组合场,并且在更大的半径产生更高的场。当在这些磁极线圈施加一个电压以启动并维持一个通过这些超导磁性线圈12和14的连续的超导电流时,这些磁极线圈12和14可以在该中央加速平面中产生大量磁场(例如,大于3特斯拉)。该轭10被这些超导磁性线圈12和14产生的场磁化并且可以为用于离子加速的室中产生的磁场贡献多达另外的3特斯拉或更多(当这些磁极尖由一种稀土铁磁形成时)。

[0051] 这些磁场分量两者都(即,由这些线圈12和14直接产生的场分量和该磁轭10产生的场分量两者)如图12所示近似与该中央加速平面18正交地通过该中央加速平面18。由完全被磁化的轭10在该室中的中央加速平面18(甚至在这些磁颤振磁极尖)产生的磁场小于这些磁性线圈12和14在该中央加速平面18直接产生的磁场。该轭10被配置成用于使该磁场沿着该中央加速平面18成形,从而使得该磁场随着增加的半径(从该中心轴16到该半径)增加,在该半径处离子在该射束室64内被引出以抵消加速期间的相对论性粒子质量增益。

[0052] 保持离子加速的电压一直通过电流引线47提供到一对半圆高压电极板49,该高压电极板取向为平行于该射束室64内的该中央加速平面并在该中央加速平面之上和之下。该轭10被配置成用于为该射束室64和为该电极装置48提供充足的空间,该空间延伸通过一个真空通孔62。该电极装置由一种导电金属形成。在替代性实施例中,可以使用关于中心轴16隔开180°的两个电极。使用二电极装置可以产生在轨离子每匝的更大的增益以及离子的轨道更好地定中心,减少了振荡并产生了更好的射束质量。在该RF电流引线47旁边是一个RF高电压通孔42,该高电压通孔被用来激发D型物49在回旋加速频率或该回旋加速频率的整数倍具有一个振荡电压。

[0053] 在运行期间,这些超导磁性线圈12和14可以被保持在一个“干燥”条件下(即未浸入到液态制冷剂中);相反,这些磁性线圈12和14可以被一个或多个低温制冷机26(低温冷却器)冷却到一个低于该超导体的临界温度的温度(例如,多达该临界温度以下5K,或在同样的情况下该临界温度以下不到1K)。在其他实施例中,这些线圈可以与一种液体冷冻剂接触,用于从这些线圈12和14到该低温制冷机26的热传递。当这些磁性线圈12和14被冷却到

制冷温度时(例如,取决于成分在一个从4K到30K的范围内),由于该低温冷却器26、这些磁极线圈12和14和该轭10之间的热接触,该轭10同样被冷却到近似相同的温度。

[0054] 该低温冷却器26可以在吉福德-麦克马洪制冷循环中利用压缩氦,或者可以是一种具有一个较高温度第一阶段84和较低温度第二阶段86(如图5和图6中所示)的脉冲管低温冷却器设计。该低温冷却器26的该较低温度第二阶段86可以运行在约4.5K并且通过热熔丝37和58热耦合,这些热熔丝包括低温超导体电流引线(由,例如NbTi形成),这些低温超导体电流引线包括与这些超导磁性线圈12和14中的复合导体的相对端连接并与一个电压源连接以驱动流过这些线圈12和14的驱动电流。该低温冷却器26可以将每个低温的导电熔丝58和线圈12/14冷却到一个温度(例如,约4.5K),每个线圈中的导体在这个温度超导。可替代地,当使用一个较高温度超导体时,该低温冷却器26的该第二阶段86可以运行在例如4-30K。

[0055] 该低温冷却器26的较热第一阶段84可以运行在例如40-80K的温度,并且可以与该中间热屏蔽80热耦合,该中间热屏蔽被相应地冷却到例如约40-80K以在该磁体结构(包括轭10和其中包含的其他部件)与该低温恒温器66之间提供一个中温屏障,该屏障可以是在室内温度(例如,在约300K)。如图1、图2、图4和图8-10中所示的,该低温恒温器66在该圆柱形侧壁的相对端包括一个低温恒温器基板67和一个低温恒温器顶板68。该低温恒温器还包括一个真空端口19(如图1、图4和图5中所示),一个真空泵可以与该真空端口耦合以在该低温恒温器66内部提供一个高真空,并从而限制该低温恒温器66、该中间热屏蔽80和该磁体结构10之间的对流传热。该低温恒温器66、热屏蔽80和该轭10各自与彼此间隔开一个将热传导最小化的量并由多个绝缘垫片82结构地支撑。

[0056] 该磁轭10提供了一个磁路,该磁路将这些超导线圈12和14产生的磁通量携带到该射束室64。通过该磁轭10的磁路(具体地,这些扇形磁极尖52提供的方位角地变化的场)也为该射束室64中的离子的强聚焦提供场成形。该磁路还加强了通过将大多数磁通量包含在该磁路的外部部分中将离子加速的该射束室64的那一部分中的磁场水平。在具体实施例中,该磁轭10(除了可以由一种稀土磁体形成的磁极尖52)由一种低碳钢形成,并且该磁轭环绕着这些线圈12和14以及一个内部超级绝缘层,该超级绝缘层环绕着该射束室64并且由(从杜邦公司可获得的)镀铝Mylar聚酯薄膜和纸形成。纯铁可能太不坚固并且可能具备一个太低的弹性模量;结果是,铁可以掺杂足够量的碳和其他元素以提供足够的强度或者致使其不再那么刚性,同时保持希望的磁水平。在可替代实施例中,该外部轭可以由钨形成。

[0057] 在这种紧凑型冷超导等时性回旋加速器的具体实施例中(如例如图10所示),该中央加速平面的对边上的多个磁颤振磁极尖52之间距离可以约为56mm,同时,每个磁极底座54的高度(其中,如在此使用的“高度”是按照图中的取向竖直地测量)省略突出56可以约为84mm。同时,每个磁极帽41的高度可以约为40mm。该射束室64可以具有一个42mm的高度和一个230mm的宽度。这些线圈12和14中的每一个都可以具有一个约202mm的内径、一个约230mm的外径和一个60mm的高度。

[0058] 在具体实施例中,该磁极帽41和该磁极底座54由铁形成,同时这些磁极尖52可以由一种可以提供特别强的磁力的稀土金属(比如,钆、钕或镨)形成。当这些磁极尖52由一种稀土磁体形成时,可以在该中央加速平面中产生一个9特斯拉的场的磁体(相比之下,例如

6-8特斯拉,当这些磁极尖由铁形成时)。在具体实施例中,该磁极底座54和/或该磁极帽41也可以由一种稀土磁体形成。在一些实施例中,该磁极底座54由一种非磁性材料(例如,铝)形成以将这些磁极尖52“浮置”(这样使得这些磁极尖52被非磁性材料从该靶10的剩余部分空间地隔离开),并且以便促进这些磁极尖52的磁饱和。所展示的实施例在该中央加速平面18的每一侧包括三个磁极尖52,尽管其他实施例可以在该中央加速平面18的每一侧上包括例如四个或六个均匀地间隔开的磁极尖52。

[0059] 这些螺旋状磁极尖52充当扇形磁体以在该磁场中提供方位角的变化,其中,该螺旋形状加强了该场的变化(即,“颤振”)。这些螺旋形状的磁极尖52可以(如图10和图11所示)在与向内面向该中央加速平面18的这些尖52的表面相对的外侧上包括多个切口(腔)55。这些切口55在更大的半径允许增大的磁场,以得到希望的径向场轮廓;即,这些磁极尖52从一个切口55到这些磁极尖52的外半径的高度增长越大(在平行于该中心轴的z轴方向测量),磁场随着半径的增长越大。该磁极底座54(例如由铝形成)的与这些磁极尖交界的表面可以具有一个互补的轮廓,这样使得该磁极底座54的内表面的扇形朝向该中央加速表面延伸,以将这些切口55归入这些磁极尖52中,如图10所示。

[0060] 如这些磁颤振磁极尖52的放大的视图中所示(图11中提供的),这些尖52的三个主阶梯的高度为25mm、35mm、和50mm(在图11中从左向右移动),同时这三个阶梯的半径宽度(从最内的尖平面到最外的尖平面水平地测量)为74mm、39mm、和19mm。

[0061] 离子可以由定位在接近(即,稍微偏移)该靶的中心轴的一个内部离子源50(如图3和图7中所示)产生,或者可以由一个外部离子源通过一个离子注入结构提供。内部离子源50的一个示例可以是例如与一个电压源耦合并接近一个氢气源的一个加热的阴极。这些加速器电极板49通过一个导电通路与一个射频电压源耦合,该射频电压源产生一个固定频率的振荡电场以在从该射束室64中的一个中心轴的向外扩张的轨道中加速从该射束室64中的离子源50发射的离子。这些离子还经受这个平均轨迹周围的正交振荡。关于该平均半径的这些振荡被称为电子感应加速器振荡,并且它们限定了这些正在加速的离子的具体特征。

[0062] 一个轴向并径向的离子束探针20与一个内部次级射束目标24可以经由在该低温恒温器66一侧的入口22通该靶10被馈送(如图7,图16和图18中所示)。该轴向并径向的离子束探针20测量该等时性回旋加速器的诊断评估期间的电流VS正在被加速的离子的半径。在该等时性回旋加速器的正常运行期间,该轴向并径向的离子束探针20被从该中心轴收回并从这些正在加速的离子的路径离开,以便不干涉离子加速。

[0063] 在图16和图17中进一步展示了该内部次级射束目标24;并且它包括一种可互换的液体(例如, H_2O)、固体(例如, ^{11}B)、或气体的($^{14}N_2$)目标92,当该目标与一个来自一个外部轨道94(被在该等时性回旋加速器中加速之后)的质子相撞会产生一个次级离子(例如, $^{13}NH_3$);并且,该次级离子被从通过延伸通过该射束室64入口22的导线管96从该目标92的射束室移除。

[0064] 在一个替代性实施例中,如图18和图19所示,该被加速的离子被用一个外周磁体89(用于提供该磁场的本地加强)沿着通道93从其外部轨道94引出,并且然后用四极磁体90聚焦并且通过该射束室入口22中的通道97引导出该射束室64。

[0065] 该射束室64和该D形电极板49存在于上述内部超级绝缘层内部,该超级绝缘层在

该电极装置48(释放热量)和该低温冷却的磁轭10之间提供绝热。这些电极板49可以相应地运行在一个至少比该磁轭10和这些超导线圈12和14的温度高40K的温度。如图3所示,这些电极板49被包含在该射束室64内部的一个外部电接地板79(例如,以铜线的形式)中,其中,这些电极板49的边缘与该电接地板(如图7所示)的边缘之间的空间78充当一个加速间隙。

[0066] 加速系统射束室64和D型电极板49的尺寸可以被确定为例如以在一个固定的加速电压 V_0 (例如10–80kV)产生一个12.5-MeV质子束(电荷=1,质量=1)。该射束室64可以具有一个42mm的高度和一个230mm的宽度。这些铁磁性铁极38和40和旁轭36被设计成一个分开的结构以方便组装和维护;并且该轭具有一个从这些线圈12和14的中心轴到内半径的半径 r_p 的2.4倍或更少的外半径(例如,约为24cm,当 r_p 是10cm时),和一个约 $2r_p$ (例如,约20cm,当 r_p 为10cm时)的总高度。

[0067] 在运行中,在一个实施例中,一个电压(例如,足够在上述在该线圈中具有1,000个绕组的实施例的每个绕组中产生至少700A的电流)可以通过导电熔丝58中的电流引线施加到每个线圈12/14,以当这些线圈在4.5K时在接近该中央加速平面18中的中心轴的离子源处从这些线圈12和14和该轭10产生一个组合的(例如至少6特斯拉)磁场。在其他实施例中,可以提供更大数量的线圈绕组,并且该电流可以减小。该磁场包括一个来自这些完全磁化的铁极38和40(包括这些扇形磁极尖52)例如至少2特斯拉的贡献;该磁场的剩余部分(例如,至少约4特斯拉)由这些线圈12和14产生。

[0068] 相应地,此轭10和线圈12和14用来产生一个足够用于离子加速的磁场。离子的脉冲可以由该离子源(例如,通过将一个电压脉冲施加到一个加热的阴极)以产生要从该阴极被放电到氢气中的电子;其中,当这些电子与氢气分子碰撞时会发射质子。尽管该射束室64被抽空成真空压强(例如,小于 10^{-3} 大气压),氢气进入并被控制在允许保持低压的一个量,同时仍然为生产足够数量的质子提供足够数量的气体分子。

[0069] 在本实施例中,该电压源(例如,一个高频振荡电路)在该RF加速器电极装置48的板49两端维持一个交变或振荡电势差(例如,10到80千伏特)。该RF加速器电极板49所产生的电场在该中心轴对于一个4–9特斯拉场强具有一个与要被加速的质子离子的回旋加速器轨道频率匹配的固定频率(例如,60到140MHz)。这些电极板49产生的电场产生保持离子近似地在这些板的内部的区域的中央部分行进的聚焦作用,并且这些电极板49提供给这些离子的电场脉冲累积地增加发射的和在轨离子的速度。当这些离子由此在其轨道中被加速时,这些离子(与这些电场中的这些振荡共振或同步)连续绕转从该中心轴向外螺旋。

[0070] 具体地,当该离子离开该电极装置48时,这些电极板49具有一个与该在轨离子相反的电荷,以便通过一个相反电荷吸引力将该离子在其弧形路径中拉向该电极装置48。当该离子在其板之间经过以通过一个相同的电荷斥力在其轨道中将该离子发回时,该电极装置48被提供了一个与该离子相同符号的电荷;并且该循环被重复。在强磁场的影响下(到其路径为直角),该离子被引导在通过这些电极板49之间的一个螺旋路径中。当该离子逐渐向外螺旋时,该离子的动量正比于其轨道的半径的增大而增大,直到该离子最终到达一个外半径94;在该外半径,该离子可以被一个磁偏转器系统磁性地偏转(例如,包括一个外周磁体89,如图18和图19所示)到由四极磁体90所限定的一个收集器通道中,以允许该离子从该磁场向外地脱离并从该回旋加速器(以脉冲束的形式)朝例如一个外部目标撤回。

[0071] 等时性回旋加速器(包括在此描述的这些)在很多基本方面与同步回旋加速器不

同。第一,等时性回旋加速器中的加速频率是固定的,而当一个带电粒子在一个螺旋中从其被引入的内半径向用于引出的外半径向外加速时,同步回旋加速器中的加速频率会降低。第二,该等时性回旋加速器内部的磁场随着半径的增加而增加,以导致该被加速的粒子中的相对论性质量增加,而同步回旋加速器中的磁场(相反)随着半径的增加而减小。第三,等时性回旋加速器的加速平面中的磁场是不对称的,因为该场是随着扇形磁体方位角地变化,而同步回旋加速器的加速平面中的磁场(相反)是基本上圆形对称的。

[0072] 平均磁场 $B_z(r)$ 可以被定义为半径 r 的一个函数,定义为 $B_z(r) \equiv \gamma(r)B_z(0)$,其中, $\gamma(r)$ 是随半径而变的具有加速度的粒子质量增益的相对论性因子,并且 $B_z(0)$ 是离子被引入处的内半径的平均磁场。换句话说,在增大的半径处,磁场 $B_z(r)$ 正比于相对论性因子 γ

(r)的增大而增大。可以按如下方式计算该相对论性因子 γ : $\gamma = \frac{T+E_0}{E_0} = 1 + \frac{T}{E_0}$, 其中, T 是离子的动能;并且 E_0 是离子的静止质能并且等于 m_0c^2 ,其中, m_0 是离子的静止质量,并且 c 是光速。一个质子的静止质能 E_0 是938.27MeV。

[0073] 在此描述的该紧凑型冷超导等时性回旋加速器(当用于生产12.5MeV的质子时)可以在被加速的质子被引出的外半径具有一个相对论性因子 $\gamma_{\text{final}} = 1 + 12.5\text{MeV}/938.3\text{MeV} = 1.013$ 。具有这样一个较低的相对论性因子 γ ,与之前的等时性回旋加速器设计(具有一个例如1.27的 γ_{final})相比,相对论对离子的加速的影响相对较小。然而,该冷铁等时性回旋加速器也用于高的质子伽马。

[0074] 被加速离子在随着半径的增大(即, $\frac{dB_z}{dr} > 0$)而增大的该等时性磁场 B_z 中的竖直运动(如图12所示,正交于该中央加速平面18)(其中,场指数参数 n 可以表达为 $n = -\frac{r}{B} \left(\frac{dB}{dr} \right) < 0$, 并且其中 $B = \gamma B_0$)并不是固有地稳定,因此经典的和同步回旋加速器的弱聚焦并不适用。相应地,方位角地变化的 z 轴方向的磁力 F_z (即,其中 B_z 随 θ 而变,见图13以图解性参照在此使用的坐标系)被用于在多个扇区中在 z 轴方向提供一个回复力以将离子推回该中央加速平面18并相应地维持被加速离子的强聚焦。如图14所示,通过磁颤振磁极尖52在该等时性回旋加速器中提供这个方位角地变化的回复力。

[0075] 在图14中提供了跨过角度 θ 的范围的磁极轮廓的一种表示(即,犹如该离子在一个轨道中跨越的磁极轮廓被打开以在 z 轴和 θ 方向(在固定的半径)产生一个图的一个线性表达式,该轮廓与沿着在该等时性回旋加速器内部的一个轨道中被加速的离子跨越的轨道匹配)。如图14所示, z 轴方向比较高的磁场(用竖直的箭头表示)在这些磁极尖52之间产生,并且 z 轴方向比较低的场在谷53之间产生。

[0076] 可以按如下方式表达磁颤振磁极尖52所提供的磁颤振 f : $f = \frac{1}{2} \frac{\Delta B}{\langle B \rangle}$, 其中 $\Delta B = B_{\text{hill}} - B_{\text{valley}}$, 并且 $\langle B \rangle = \frac{1}{2\pi} \int B_z d\theta$ 。

[0077] 可以按如下方式表达该颤振场的均方根 F :

$$B_{\text{hill}} - B_{\text{valley}}, \text{ 并且 } \langle B \rangle = \frac{1}{2\pi} \int B_z d\theta$$

$$[0078] \quad F = \frac{1}{2\pi} \int d\theta \frac{[B_z(r, \theta) - \langle B_z(r, \theta) \rangle]^2}{\langle B_z(r) \rangle^2} \quad (1)$$

[0079] 当这些磁极具有一个螺旋形边缘角时,在如下等式中表达使被加速的离子回到轴向稳定性的颤振磁场校正: $v_z^2 = n + F^2(1 + 2\tan^2 \zeta) > 0$ 。在该等式中, v_z 是z轴方向被加速的离子的振荡频率,并且 ζ 是在螺旋形状的颤振磁极尖52的螺旋边缘的角(如图6所示)。可以按如下方式表达该螺旋形边缘角的切线 ζ :

$$[0080] \quad \tan^2 \zeta = r \frac{d\theta}{dr} = r \left(\frac{r}{a} \right) = \frac{r^2}{a} \quad (2)$$

[0081] 在其他实施例中,这些扇形磁极尖52可以具有一个饼(楔子)形状,如图15所示。这些磁极尖52中的每一个的周界都是具有输入和输出电流引线的超导体线圈的一个环72,这些输入和输出电流引线与一个电压源耦合以产生流过该超导体线圈环72的电流,由此产生一个高磁场。去往和来自每个磁极尖52的超导体线圈环72的电流引线可以与该电压源串联耦合。该超导体线圈所环绕的这些磁极尖52的内部部分可以由例如铁或一种稀土磁体形成。

[0082] 在该等时性回旋加速器中,当被加速离子的质量增加时, B_z 随着半径增加,其中 $\gamma = m/m_0$, 同时提供足够的颤振这样使得 $v_z^2 > 0$, 在这种情况下,

$$[0083] \quad f = \frac{1}{2} \frac{\Delta B}{\langle B_z(r) \rangle} \quad (3)$$

[0084] 当这些螺旋形颤振尖所提供的强聚焦将正在被加速的离子保持在该中央加速平面18中或附近的一个稳定的轨迹中,该等时性回旋加速器中的离子加速通过将能量增加随着半径的增加率与平均磁场中的增加匹配得到。当不存在相位稳定性时,能量增益被精确地控制。

[0085] 为了看到不存在相位稳定性,当离子向外加速以维持相位稳定的加速度时,旋转周期的分数变化可以如下表达:

$$[0086] \quad \frac{d\tau}{\tau} = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\gamma^2} \right) \frac{dp}{p} \quad (4)$$

[0087] 其中, α 是动量压缩(有多少动量随着半径改变),并且 p 是离子的动量。在该等式中, $0 \leq \alpha \leq 1$ 且 $\gamma \geq 1$ 。当 $B = \gamma B_0$, 则 $\alpha = \gamma^{-2}$, 并且 $d\tau/\tau = 0$, 因为

$$[0088] \quad \frac{d\tau}{\tau} = \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma^2} \right) \frac{dp}{p} = 0 \quad (5)$$

[0089] 由于周期和动量之间没有关系,不存在相位稳定性。在此,离子的每匝能量增益由该中央加速平面中的所产生的磁场的轮廓所控制;并且匝数(轨道数)(在等时性回旋加速器中离子将在其上被加速)由该等时性回旋加速器的设计所决定。操作者可以选择离子电荷 q 、离子的静止质量 m_0 、角频率 v_0 、和离子的动能 T 。然后确定了等时性回旋加速器中每匝的每次旋转的瞬时能量增益 ΔT_1 , 其中

[0090] $\Delta T_1 = gqV_e \sin \phi$, (6)

[0091] 其中, g 是加速间隙的数量(例如, g 对于 180° D 型物是 2); q 是被加速的离子的电荷; V_e 是电极电压; $\phi = \omega t - \theta$, 其中, ω 是离子的角速率, t 是时间, θ 是离子在回旋加速器中的角坐标。相应地, 当离子跨过这些加速间隙时, $\sin \phi$ 形成正弦电压的值。

[0092] 在描述本发明实施例的过程中, 为了清晰性, 使用了特定的术语。为了描述的目的, 特定的术语旨在至少包括技术的和功能等效物, 这些等效物以一种相似的方式操作从而实现一个相似的结果。另外, 在一些实例中, 本发明的一个具体实施例包含多个系统元素或方法步骤, 这些元素或步骤可以被替换为一个单一的元素或步骤; 同样, 一个单一的元素或步骤可以被替换为多个元素或步骤, 其目的是形同的。进一步, 除非另外说明, 当在此为本发明的实施例指定了不同特性的参数时, 这些参数可以上下调整 $1/100$ 、 $1/50$ 、 $1/20$ 、 $1/10$ 、 $1/5$ 、 $1/3$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ 等(或高达一个参数 2 、 5 、 10 等), 或其四舍五入的近似值。此外, 尽管已经参照其具体实施方式展示和描述了本发明, 本领域的技术人员将会理解, 可以做出形式和细节上的不同的替换和改变, 而不背离本发明的范围。仍进一步地, 其他一些方面, 一些功能和优点同样在本发明的范围内; 并且本发明的所有实施例不需要必须地获得所有这些优点或具有所有这些上述的特征。另外, 在此讨论的与一个实施例有关的这些步骤、元素和特征可以同样连同其他一些实施例被使用。包括参考文本、期刊文章、专利、专利申请书等且贯穿本文被引用的这些参考文档的内容通过引用以其全文结合在此; 并且来自这些参考文档的适当的部件、步骤、和特征可以可选地包含在或不包含在本发明的实施例中。仍进一步地, 在背景部分标识的这些部件和步骤与本公开是一体的, 并且可以与这些部件或步骤结合使用或替换使用, 这些部件和步骤在本公开的别处描述, 在本发明的范围之内。在方法权利要求中, 以一种特定的顺序直接引用一些阶段(增加或不增加一些有序的引语符号方便参考), 这些阶段并不是作为被暂时地受限于它们被直接引用的次序而被理解的, 除非另有说明或被这些术语和语法措辞所隐含。

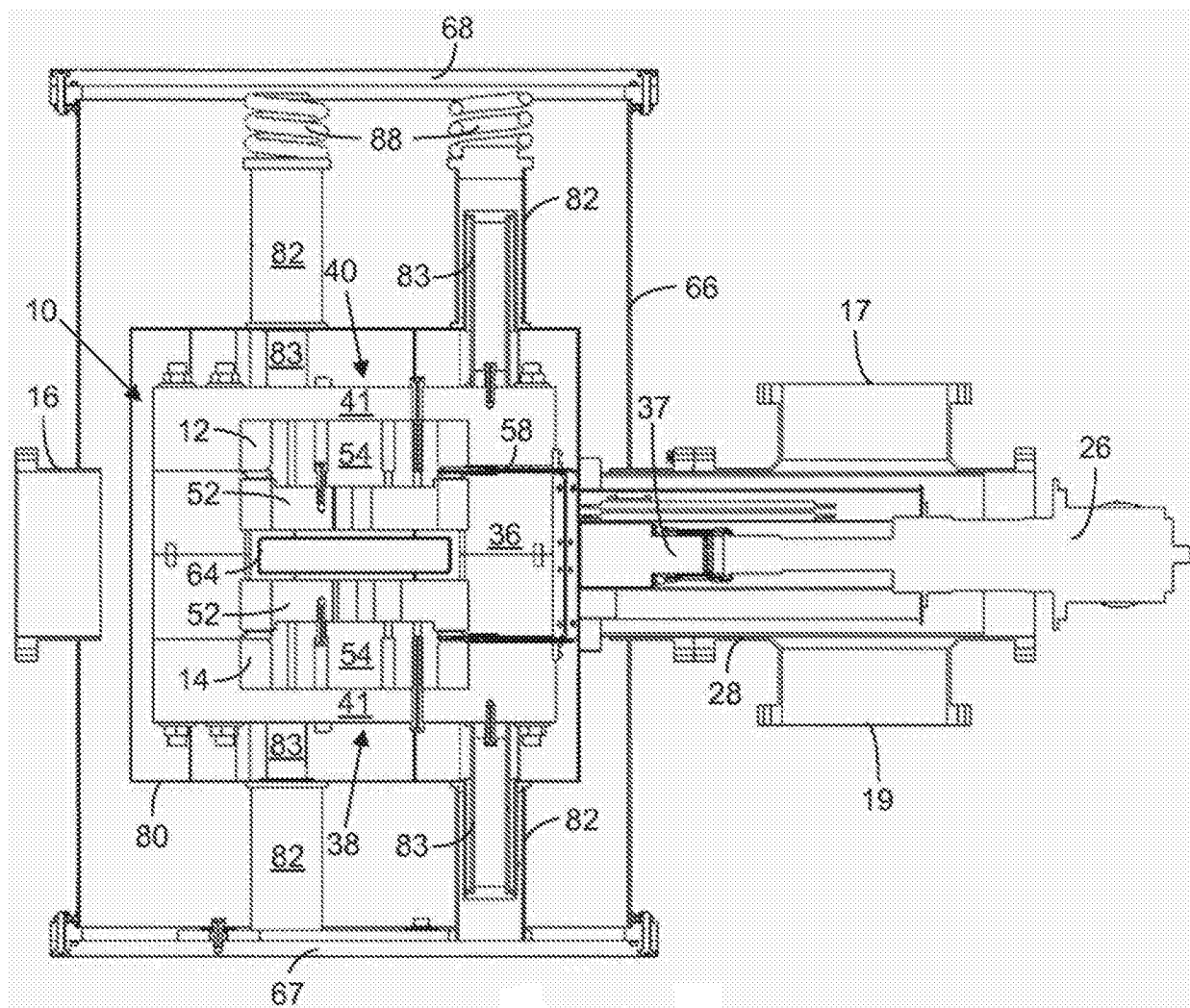


图 1

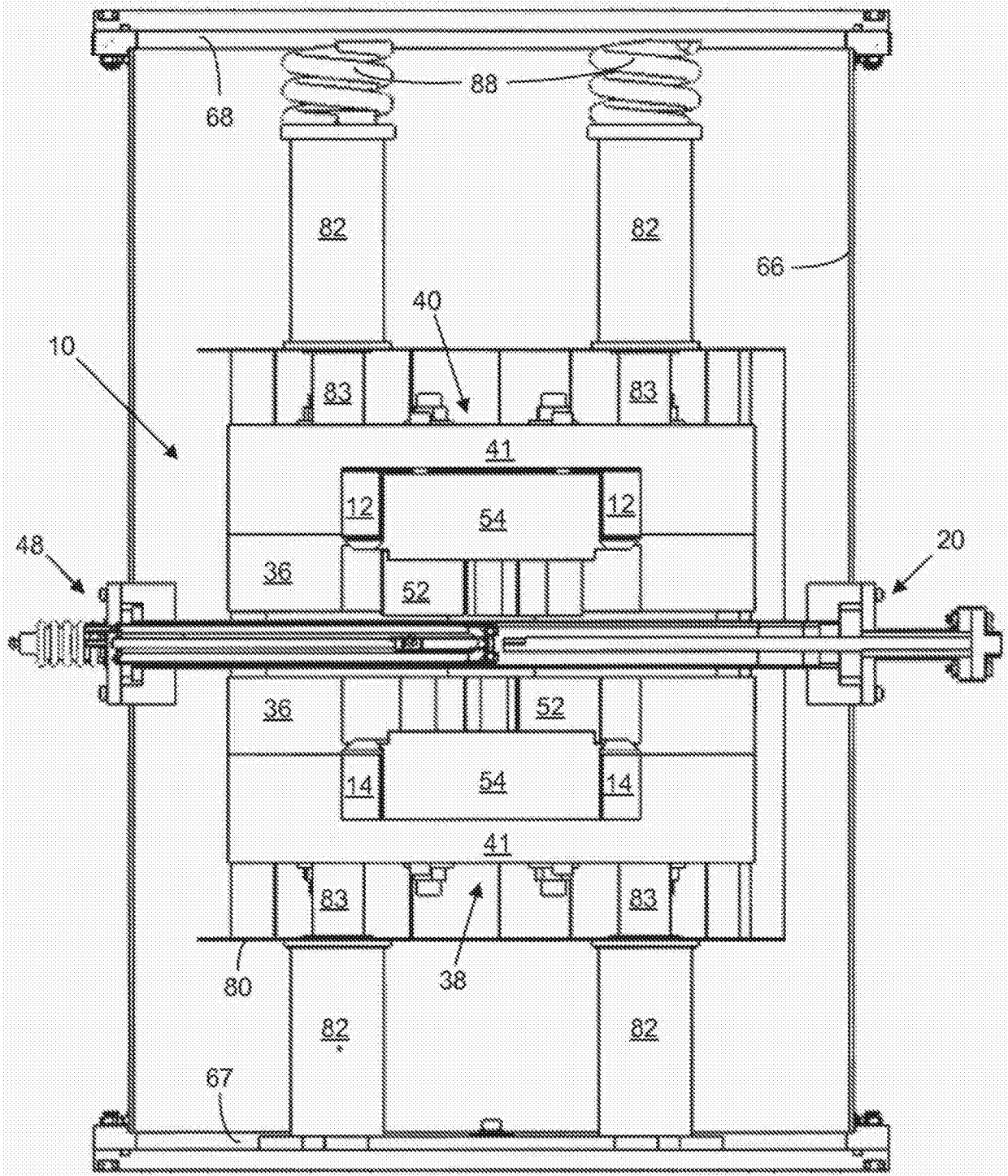


图2

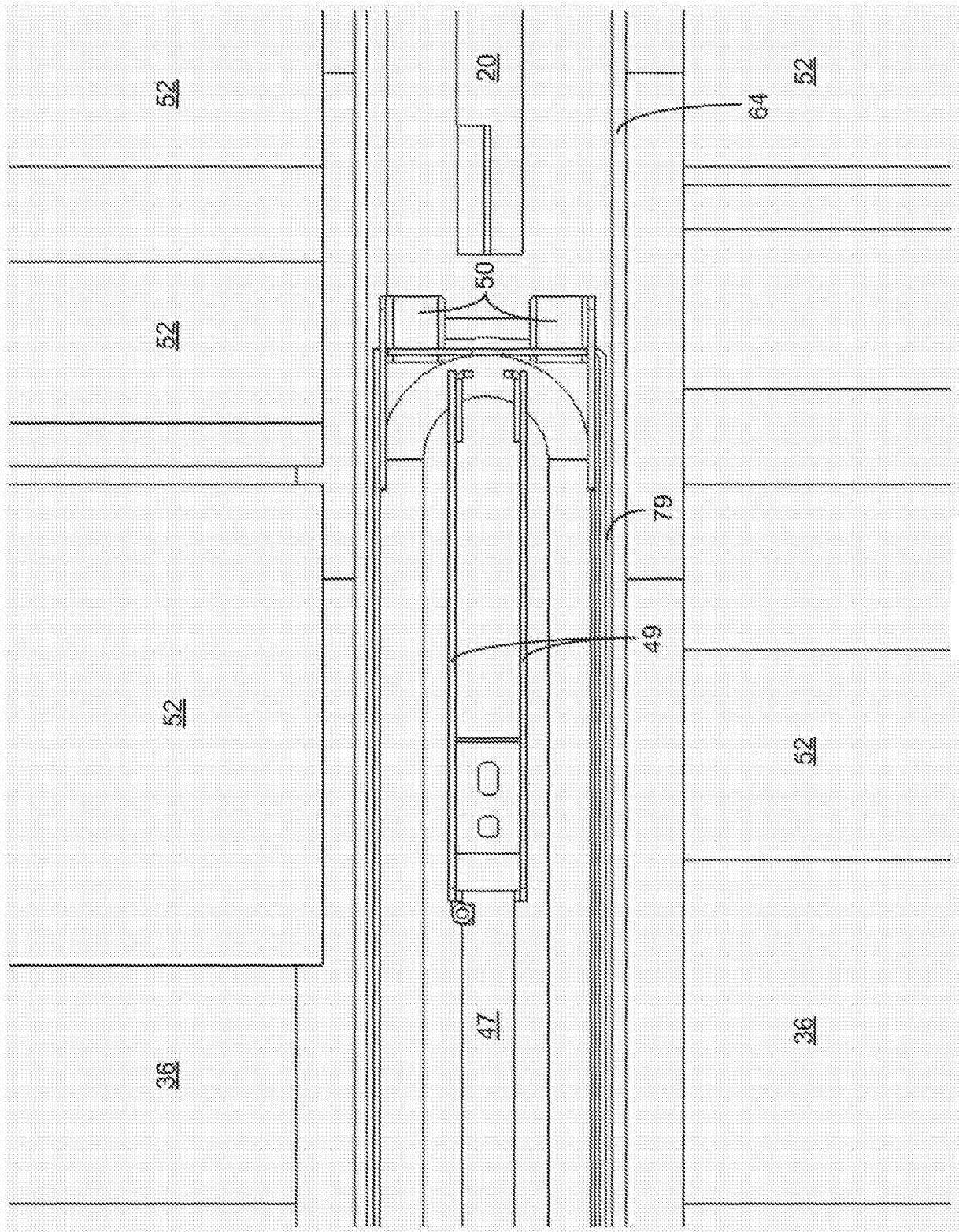


图3

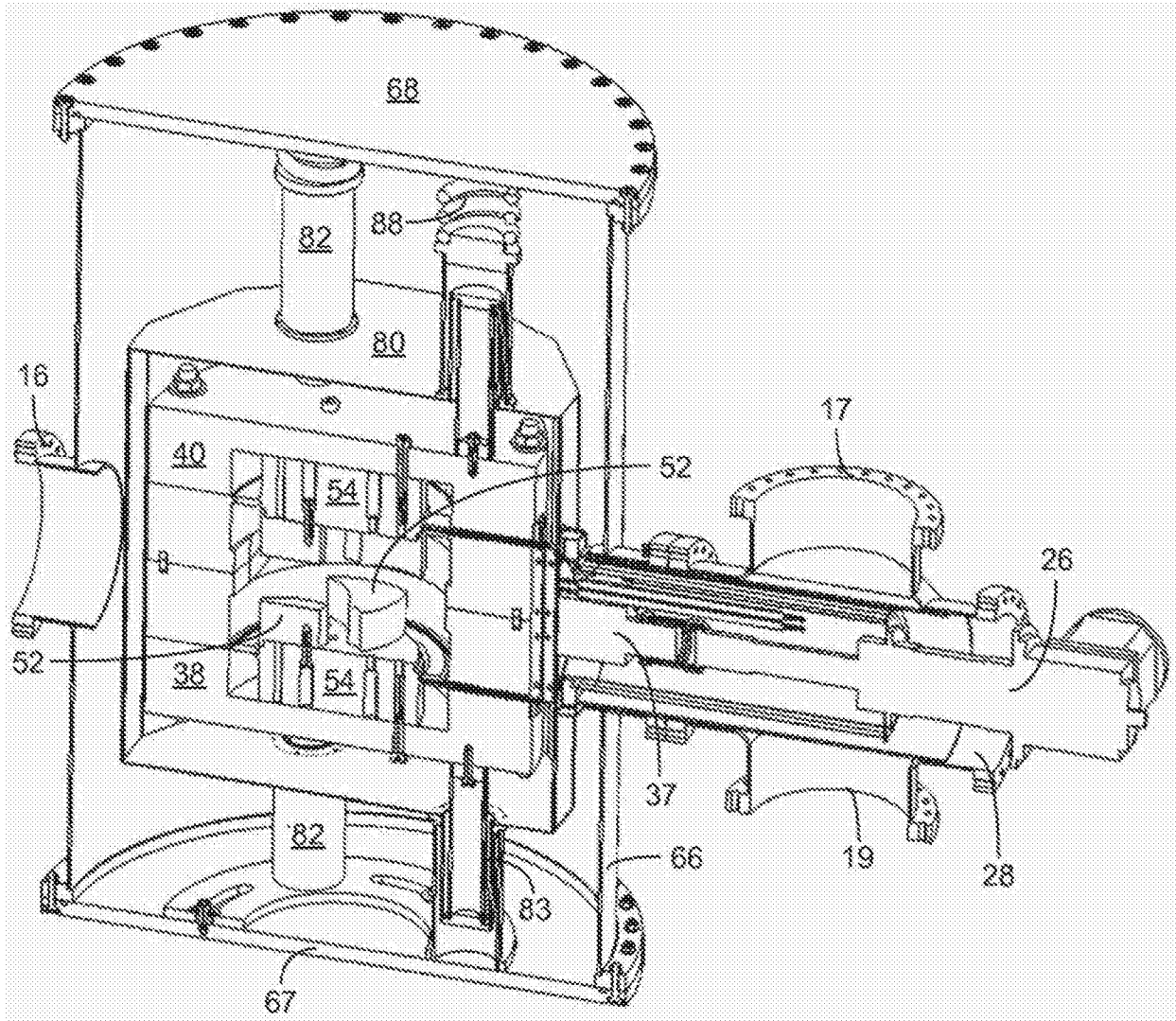


图4

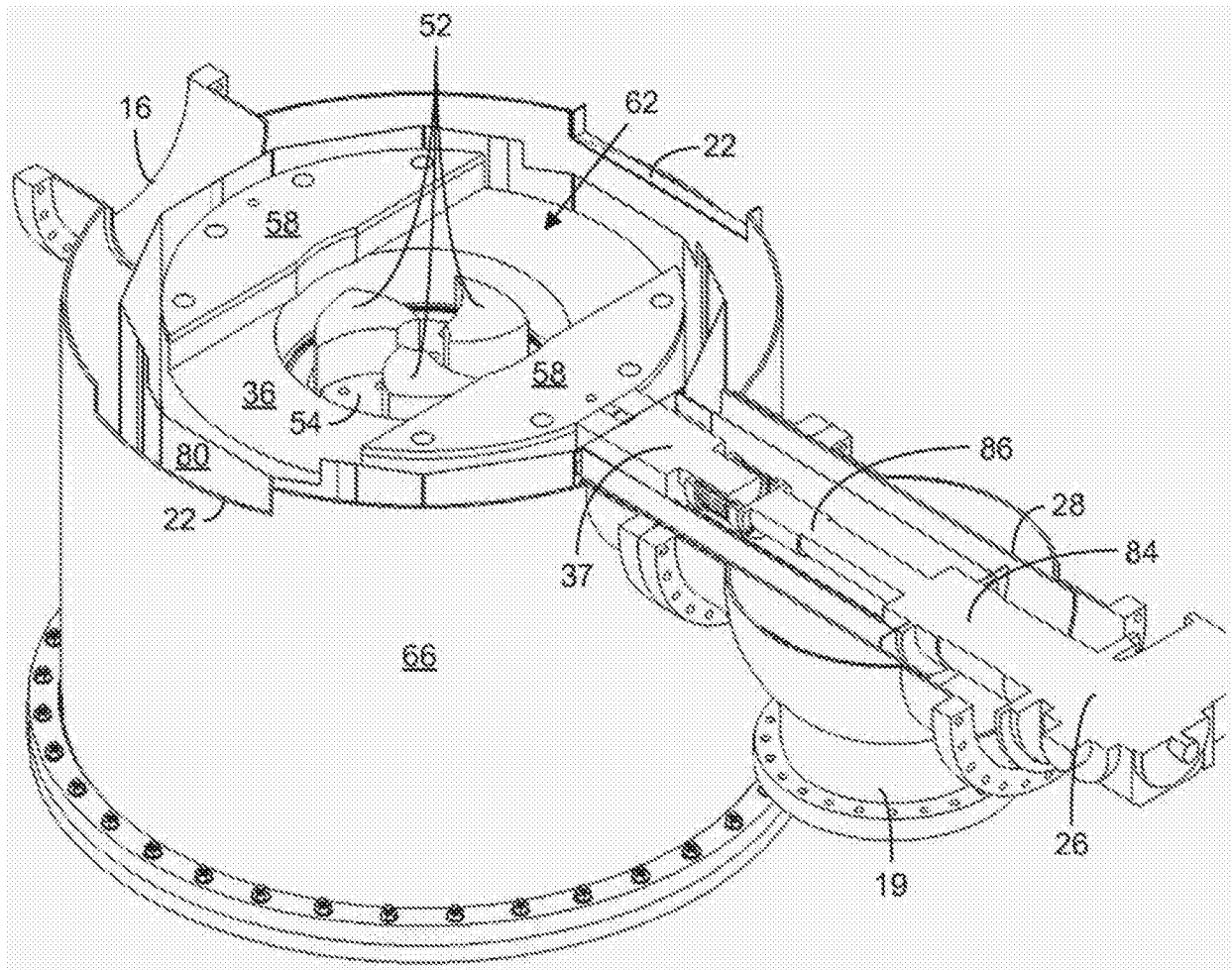


图5

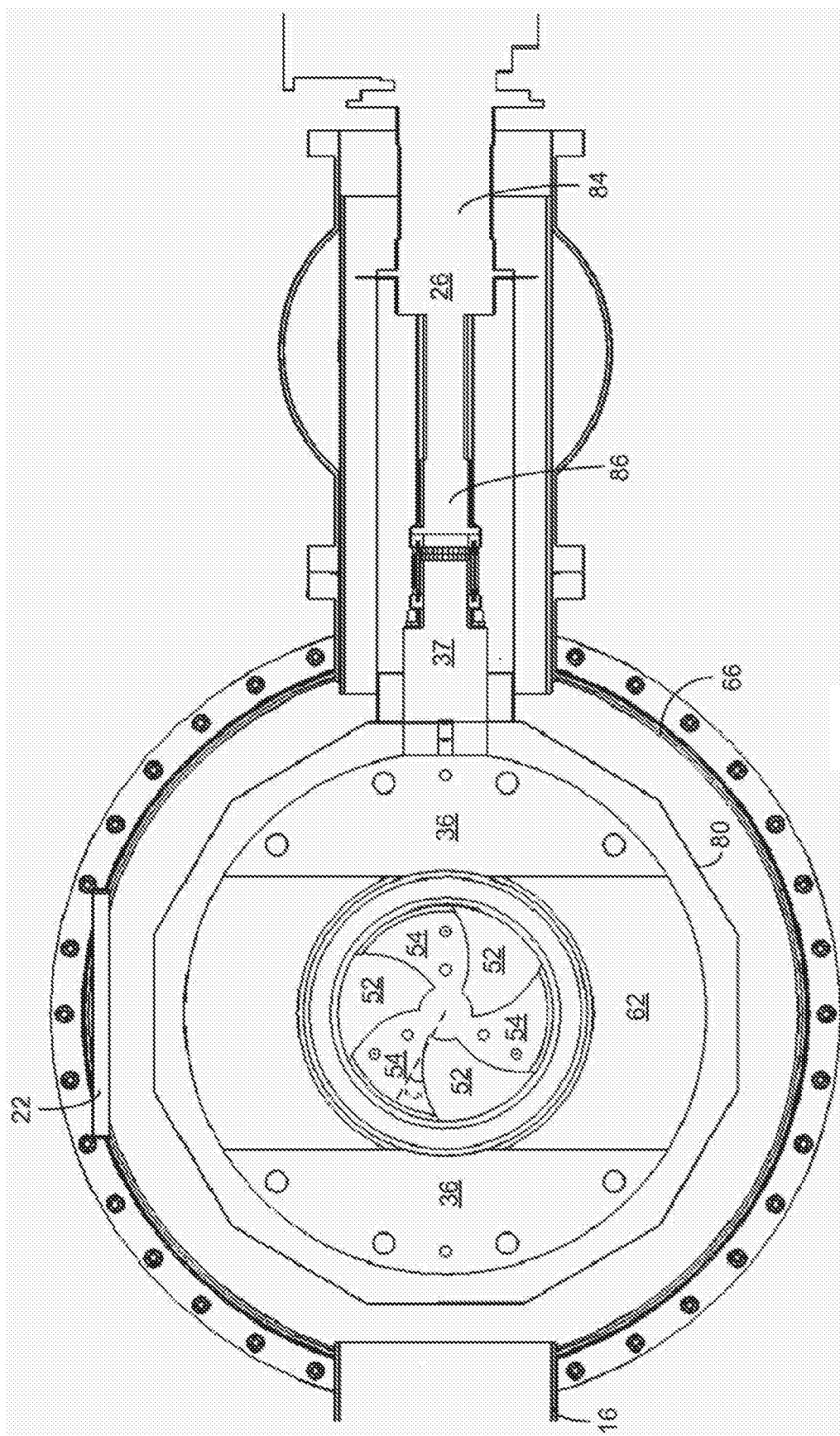


图6

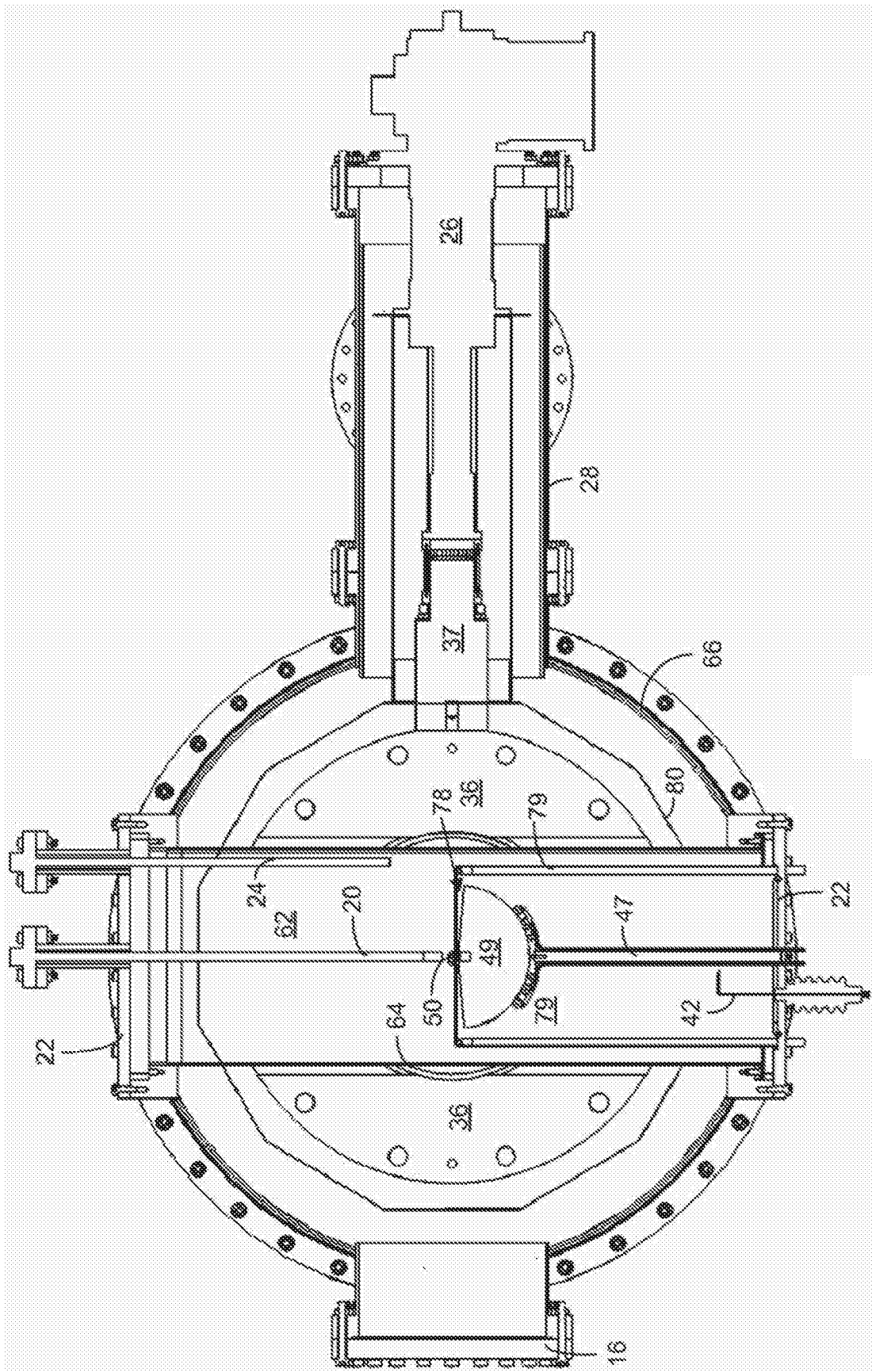


图7

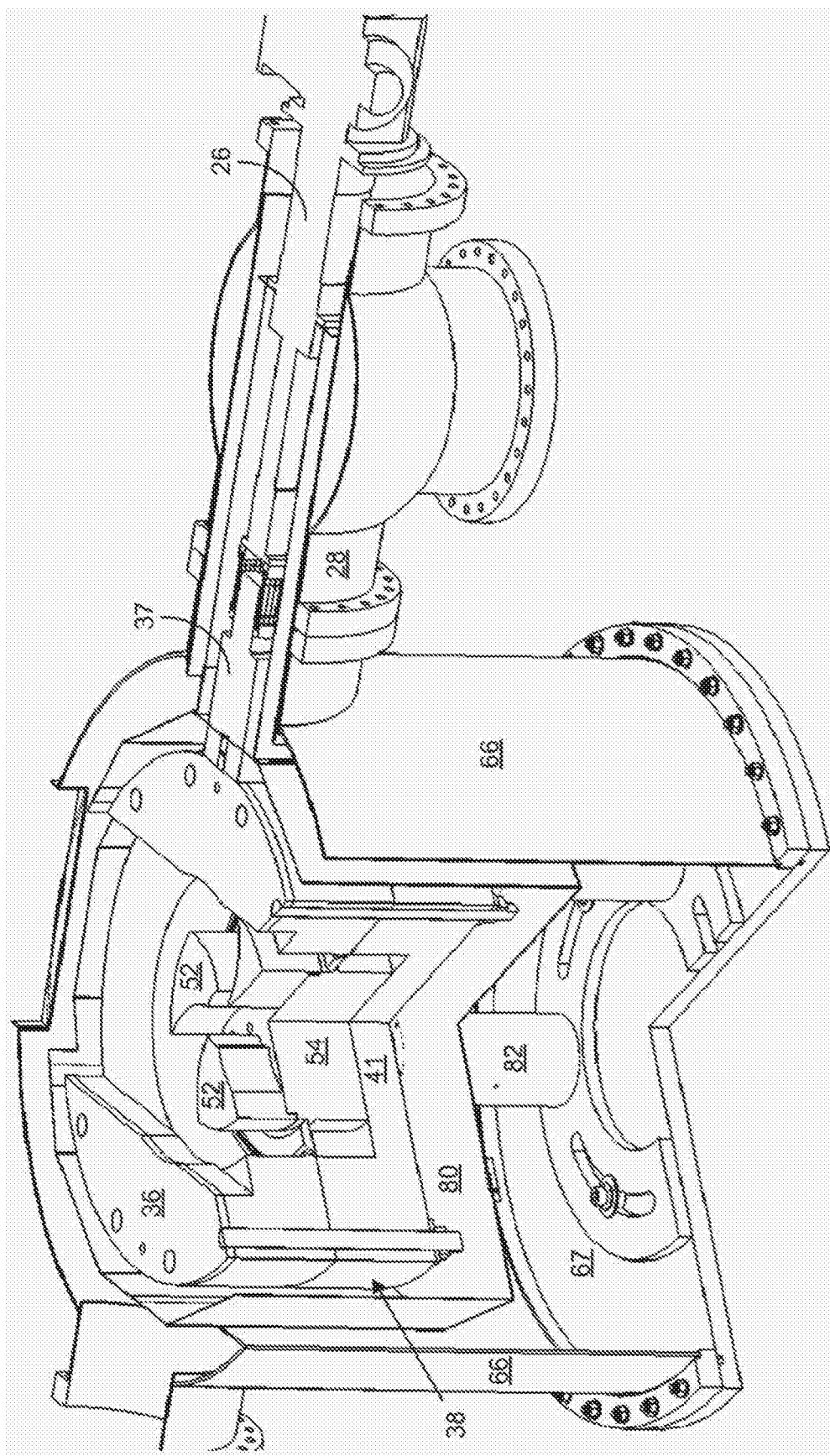


图8

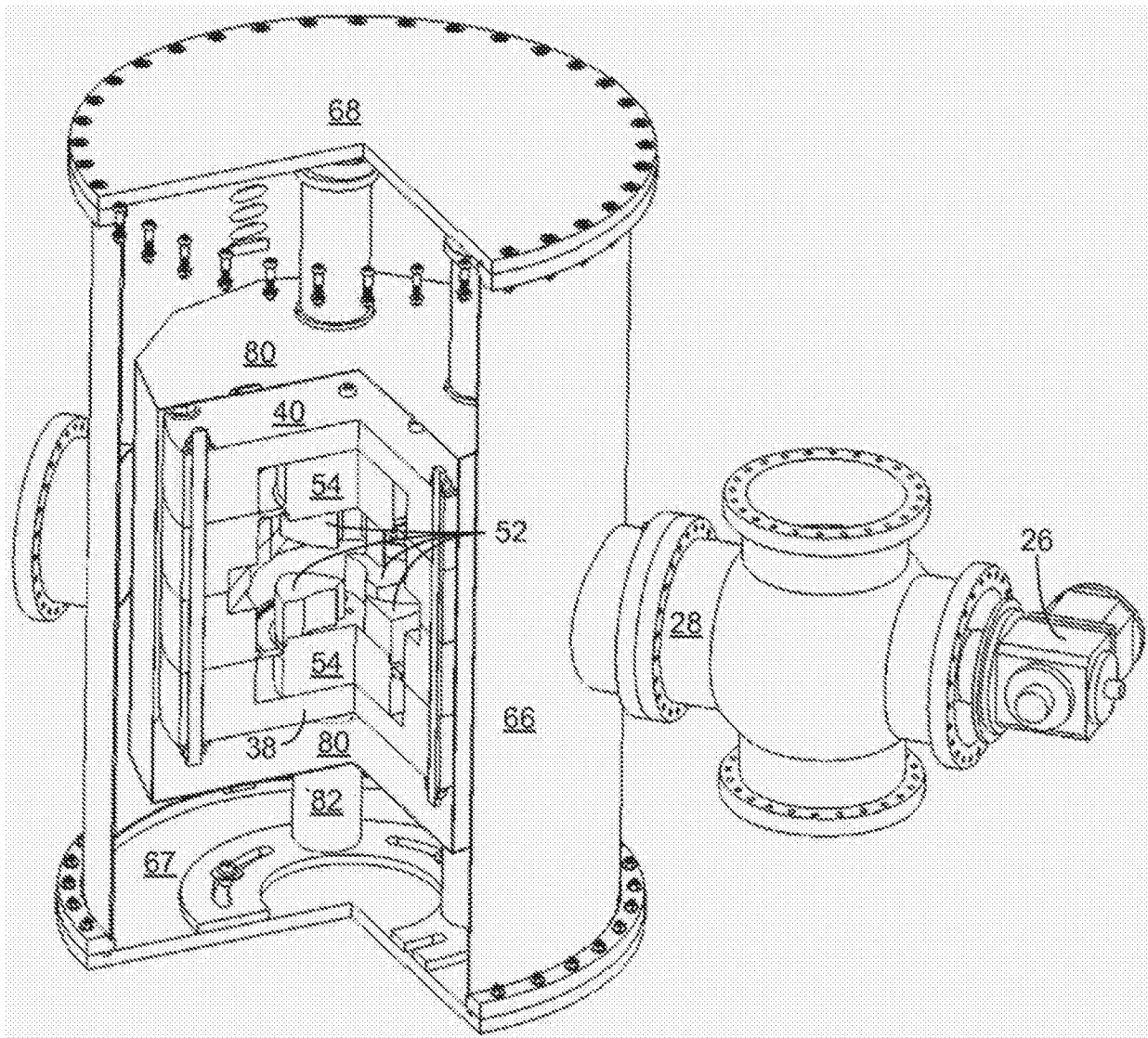


图9

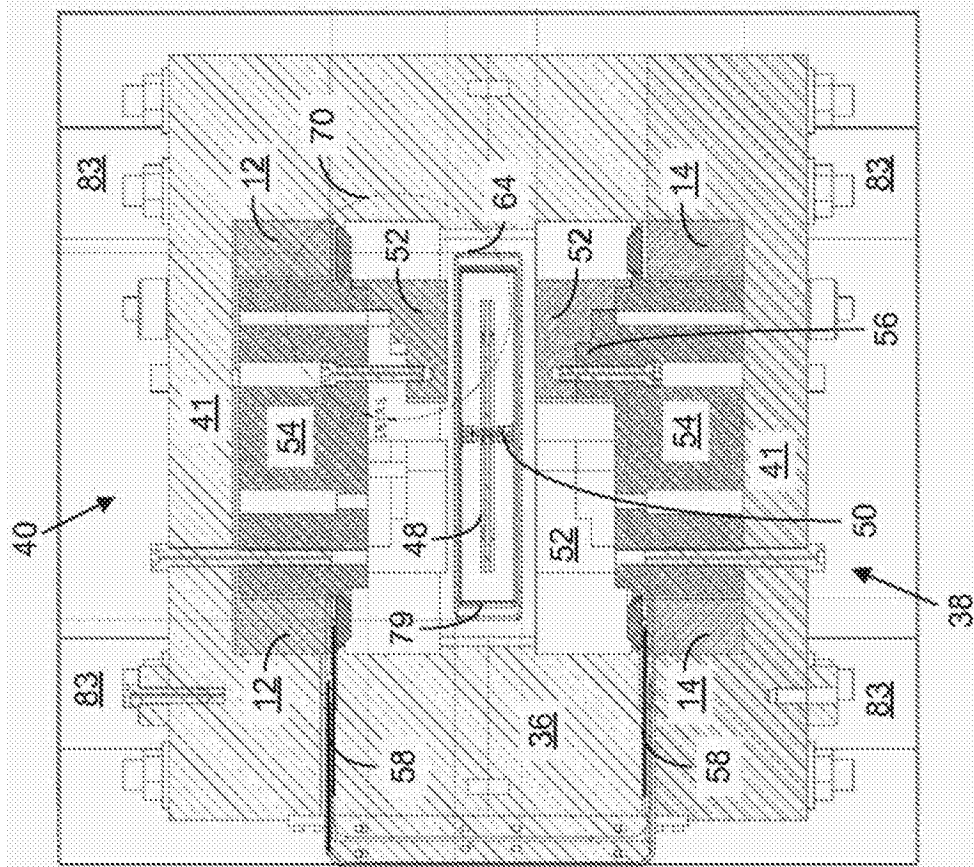


图 10

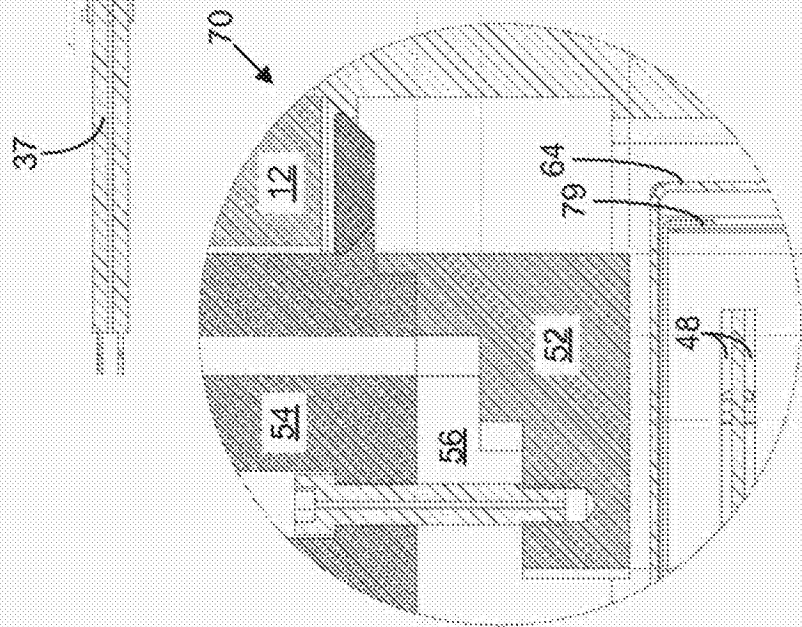


图 11

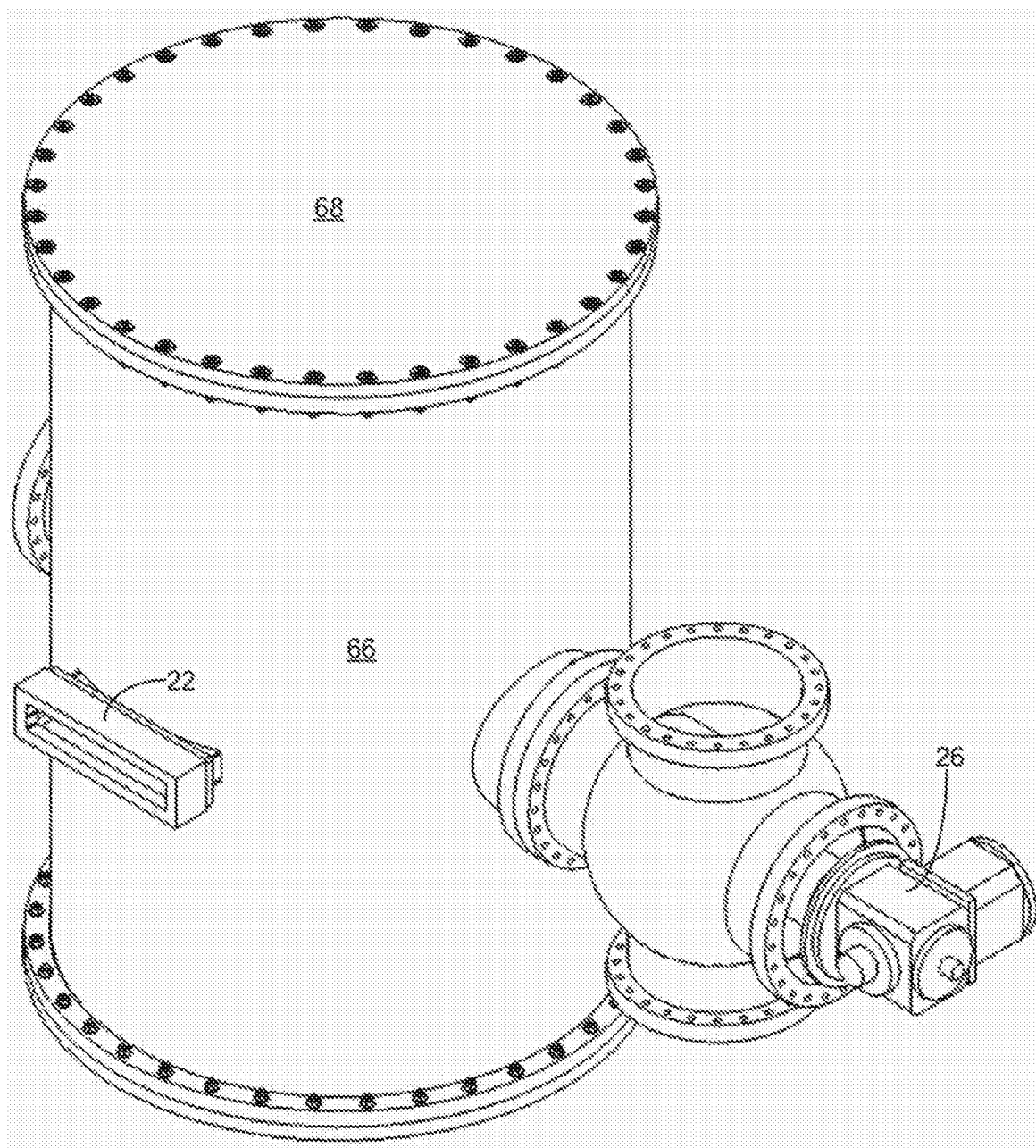


图12

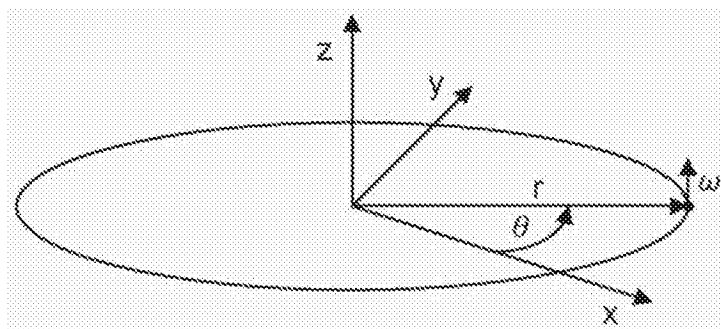


图13

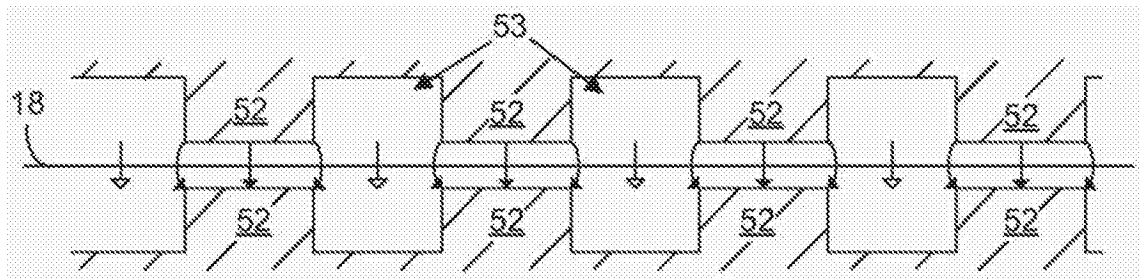


图14

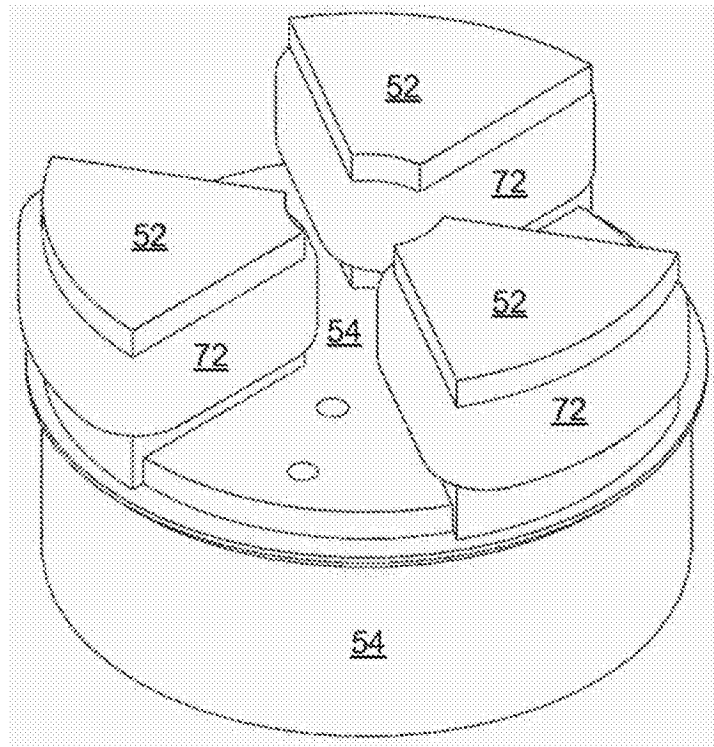


图15

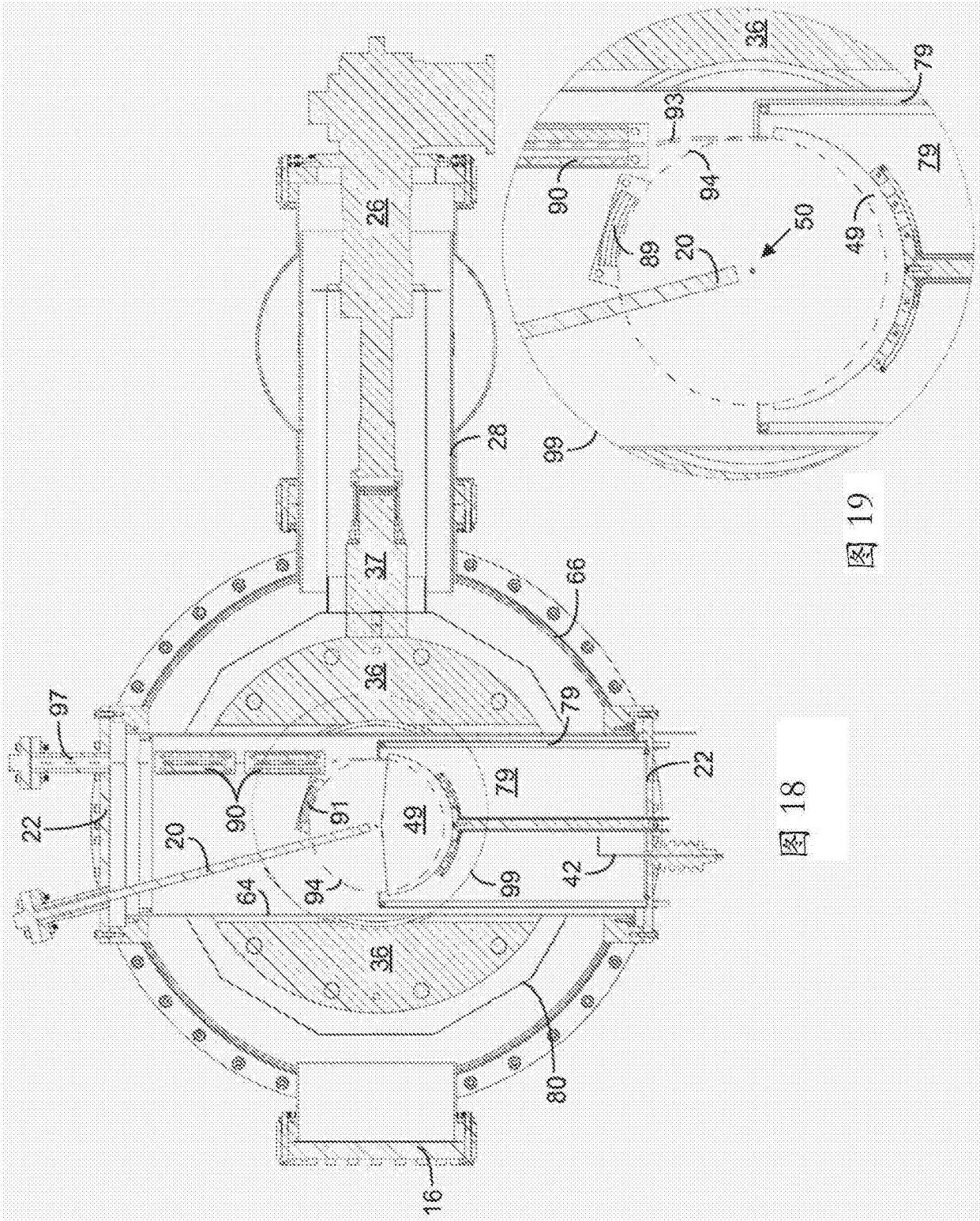


图 19

图 18