



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110140182 A

(43)申请公布日 2019.08.16

(21)申请号 201780081502.3

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001

(22)申请日 2017.10.30

代理人 邹松青 刘茜

(30)优先权数据

62/414574 2016.10.28 US

(51)Int.Cl.

G21B 1/15(2006.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

G21B 1/00(2006.01)

2019.06.28

G21B 1/05(2006.01)

(86)PCT国际申请的申请数据

G21B 1/11(2006.01)

PCT/US2017/059067 2017.10.30

G21B 1/19(2006.01)

(87)PCT国际申请的公布数据

H05H 1/10(2006.01)

W02018/081724 EN 2018.05.03

H05H 1/16(2006.01)

(71)申请人 阿尔法能源技术公司

地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 A.杜奈夫斯基 S.普文斯基

权利要求书5页 说明书26页 附图33页

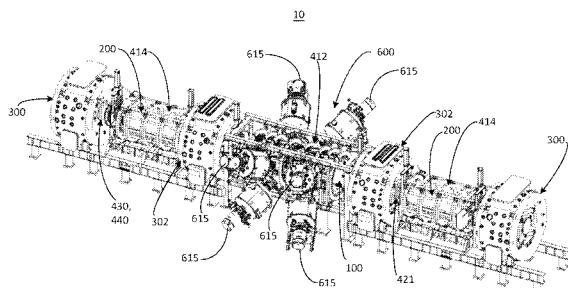
A.N.斯米尔诺夫 M.W.宾德鲍尔

(54)发明名称

用于利用具有可调节束能量的中性束注入器改善支持高性能FRC升高的能量的系统和方法

(57)摘要

有利于形成和维持具有优异稳定性以及粒子、能量和通量约束的FRC的系统和方法，并且更具体地，利用具有可调节束能量能力的中性束注入器来有利于形成和维持具有升高的系统能量和改善的支持的FRC的系统和方法。



1. 一种用于产生和维持具有反场构型(FRC)的磁场的方法,所述方法包括以下步骤:  
在约束室中关于等离子体形成FRC,以及  
将多个中性束注入到FRC等离子体中,在此期间,在第一束能量和第二束能量之间调节所述多个中性束的束能量,其中,所述第二束能量不同于所述第一束能量。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述第二束能量高于所述第一束能量。
3. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述多个中性束在注入发射持续时间期间在所述第一束能量和所述第二束能量之间切换。
4. 根据权利要求1至3所述的方法,其中,所述第一和第二束能量在大约15至40 keV的范围内。
5. 根据权利要求1至3所述的方法,所述方法还包括如下步骤:通过从主动反馈等离子体控制系统接收的反馈信号控制所述多个中性束的束能量。
6. 根据权利要求4所述的方法,所述方法还包括如下步骤:通过从主动反馈等离子体控制系统接收的反馈信号控制所述多个中性束的束能量。
7. 根据权利要求5所述的方法,其中,控制所述多个中性束的束能量的步骤包括:调整所述多个中性束的束能量以调整径向束功率沉积分布以调整压力梯度值。
8. 根据权利要求6所述的方法,其中,控制所述多个中性束的束能量的步骤包括:调整所述多个中性束的束能量以调整径向束功率沉积分布以调整压力梯度值。
9. 根据权利要求1至3以及6至8所述的方法,所述方法还包括:通过朝向所述约束室的中间贯穿平面成角度地将快中性原子的束从中性束注入器注入到FRC等离子体中来维持所述FRC处于恒定值或大约恒定值而不衰减,并将等离子体温度升高到高于大约1.0 keV。
10. 根据权利要求4所述的方法,所述方法还包括:通过朝向所述约束室的中间贯穿平面成角度地将快中性原子的束从中性束注入器注入到FRC等离子体中来维持所述FRC处于恒定值或大约恒定值而不衰减,并将等离子体温度升高到高于大约1.0 keV。
11. 根据权利要求5所述的方法,所述方法还包括:通过朝向所述约束室的中间贯穿平面成角度地将快中性原子的束从中性束注入器注入到FRC等离子体中来维持所述FRC处于恒定值或大约恒定值而不衰减,并将等离子体温度升高到高于大约1.0 keV。
12. 根据权利要求9所述的方法,其中,所述升高等离子体温度的步骤包括:将温度从大约1.0 keV升高到大约3.0 keV。
13. 根据权利要求10和11所述的方法,其中,所述升高等离子体温度的步骤包括将温度从大约1.0 keV升高到大约3.0 keV。
14. 根据权利要求9所述的方法,所述方法还包括以下步骤:利用围绕所述约束室延伸的准直流线圈来在所述约束室内产生磁场,并且利用围绕所述约束室的相对两端延伸的准直流镜线圈来在所述约束室的相对两端内产生镜磁场。
15. 根据权利要求10和11所述的方法,所述方法还包括以下步骤:利用围绕所述约束室延伸的准直流线圈来在所述约束室内产生磁场,并且利用围绕所述约束室的相对两端延伸的准直流镜线圈来在所述约束室的相对两端内产生镜磁场。
16. 根据权利要求14所述的方法,其中,形成所述FRC的步骤包括:在联接到所述约束室的相对的第一和第二生成部分中形成生成FRC,并且使所述生成FRC从所述第一和第二生成部分朝向所述约束室的中间贯穿平面加速,在所述约束室处所述两个生成FRC合并以形成

所述FRC。

17. 根据权利要求15所述的方法,其中,形成所述FRC的步骤包括:在联接到所述约束室的相对的第一和第二生成部分中形成生成FRC,并且使所述生成FRC从所述第一和第二生成部分朝向所述约束室的中间贯穿平面加速,在所述约束室处所述两个生成FRC合并以形成所述FRC。

18. 根据权利要求16和17所述的方法,其中,形成所述FRC的步骤包括以下中的一者:形成生成FRC,同时使所述生成FRC朝向所述约束室的中间贯穿平面加速;以及形成生成FRC,然后使所述生成FRC朝向所述约束室的中间贯穿平面加速。

19. 根据权利要求16和17所述的方法,其中,使所述生成FRC从所述第一和第二生成部分朝向所述约束室的中间贯穿平面加速的步骤包括:使所述生成FRC从所述第一和第二生成部分传送通过联接到所述约束室的相对两端的第一和第二内部偏滤器,所述第一和第二内部偏滤器夹设在所述约束室与所述第一和第二生成部分之间。

20. 根据权利要求19所述的方法,其中,使所述生成FRC从所述第一和第二生成部分传送通过第一和第二内部偏滤器的步骤包括:当来自所述第一和第二生成部分的所述生成FRC传送通过所述第一和第二内部偏滤器时使所述第一和第二内部偏滤器不激活。

21. 根据权利要求19所述的方法,所述方法还包括如下步骤:将所述FRC的磁通量表面引导到所述第一和第二内部偏滤器中。

22. 根据权利要求18所述的方法,所述方法还包括如下步骤:将所述FRC的磁通量表面引导到第一和第二外部偏滤器中,所述第一和第二外部偏滤器联接到所述生成部分的端部。

23. 根据权利要求22所述的方法,所述方法还包括如下步骤:利用围绕所述生成部分和偏滤器延伸的准直流线圈来在所述生成部分以及所述第一和第二外部偏滤器内产生磁场。

24. 根据权利要求21所述的方法,所述方法还包括如下步骤:利用围绕所述生成部分和偏滤器延伸的准直流线圈来在所述生成部分以及第一和第二内部偏滤器内产生磁场。

25. 根据权利要求23所述的方法,所述方法还包括如下步骤:利用准直流镜线圈来在所述第一和第二生成部分与所述第一和第二外部偏滤器之间产生镜磁场。

26. 根据权利要求23所述的方法,所述方法还包括如下步骤:利用围绕在所述生成部分与所述偏滤器之间的收缩部延伸的准直流镜塞线圈来在位于所述第一和第二生成部分与所述第一和第二外部偏滤器之间的收缩部内产生镜塞磁场。

27. 根据权利要求24所述的方法,所述方法还包括如下步骤:利用准直流镜线圈来在所述约束室与所述第一和第二内部偏滤器之间产生镜磁场,以及利用准直流低轮廓颈缩线圈来在所述第一和第二生成部分与所述第一和第二内部偏滤器之间产生颈缩磁场。

28. 根据权利要求9的任一项所述的方法,所述方法还包括如下步骤:利用联接到所述室的鞍形线圈来在所述室内产生磁偶极场和磁四极场中的一者。

29. 根据权利要求10和11中的任一项所述的方法,所述方法还包括如下步骤:利用联接到所述室的鞍形线圈来在所述室内产生磁偶极场和磁四极场中的一者。

30. 根据权利要求9所述的方法,所述方法还包括如下步骤:利用吸气系统来处理所述室的内表面以及第一和第二生成部分的内表面、夹设在所述约束室与所述第一和第二生成部分之间的第一和第二偏滤器的内表面、以及联接到所述第一和第二生成部分的第一和第

二外部偏滤器的内表面。

31. 根据权利要求30所述的方法,其中,所述吸气系统包括钛沉积系统和锂沉积系统中的一者。

32. 根据权利要求9所述的方法,所述方法还包括如下步骤:将等离子体从轴向安装的等离子体枪轴向地注入到所述FRC中。

33. 根据权利要求9所述的方法,所述方法还包括如下步骤:控制所述FRC的边缘层中的径向电场分布。

34. 根据权利要求33所述的方法,其中,所述控制所述FRC的边缘层中的径向电场分布的步骤包括:利用偏压电极向所述FRC的一组开放通量表面施加电势分布。

35. 根据权利要求1所述的方法,所述方法还包括如下步骤:在正交于所述约束室的纵向轴线的径向方向上使所述FRC等离子体稳定化以将所述FRC等离子体定位成关于所述纵向轴线轴对称,以及在沿所述纵向轴线的轴向方向上使所述FRC等离子体稳定化以将所述FRC等离子体定位成关于所述约束室的中间平面轴对称。

36. 根据权利要求35所述的方法,所述方法还包括如下步骤:利用围绕所述室延伸的准直流线圈在所述室内产生施加的磁场。

37. 根据权利要求35所述的方法,其中,所述在径向方向上使所述FRC等离子体稳定化的步骤包括:调节所施加的磁场以在所述FRC等离子体中引发径向稳定性和轴向不稳定性。

38. 根据权利要求35至37所述的方法,其中,使所述FRC等离子体轴向地稳定化的步骤包括:产生第一和第二径向磁场,其中,所述第一和第二径向磁场与所述FRC相互作用以轴向地移动所述FRC等离子体,以将所述FRC等离子体定位成关于所述中间平面轴对称。

39. 根据权利要求1至3和6至8所述的方法,所述方法还包括:将紧凑环(CT)等离子体从第一和第二CT注入器朝向所述约束室的中间平面成角度地注入到所述FRC等离子体中,其中,所述第一和第二CT注入器在所述约束室的中间平面的相对两侧上正好相对。

40. 根据权利要求4所述的方法,所述方法还包括:将紧凑环(CT)等离子体从第一和第二CT注入器朝向所述约束室的中间平面成角度地注入到所述FRC等离子体中,其中,所述第一和第二CT注入器在所述约束室的中间平面的相对两侧上正好相对。

41. 根据权利要求5所述的方法,所述方法还包括:将紧凑环(CT)等离子体从第一和第二CT注入器朝向所述约束室的中间平面成角度地注入到所述FRC等离子体中,其中,所述第一和第二CT注入器在所述约束室的中间平面的相对两侧上正好相对。

42. 根据权利要求9所述的方法,所述方法还包括:将紧凑环(CT)等离子体从第一和第二CT注入器朝向所述约束室的中间平面成角度地注入到所述FRC等离子体中,其中,所述第一和第二CT注入器在所述约束室的中间平面的相对两侧上正好相对。

43. 根据权利要求10至12所述的方法,所述方法还包括:将紧凑环(CT)等离子体从第一和第二CT注入器朝向所述约束室的中间平面成角度地注入到所述FRC等离子体中,其中,所述第一和第二CT注入器在所述约束室的中间平面的相对两侧上正好相对。

44. 一种用于产生和维持具有反场构型(FRC)的磁场的系统,所述系统包括:

约束室,

第一和第二正好相对的FRC生成部分,所述第一和第二FRC生成部分联接到所述第一和第二正好相对的内部偏滤器,

第一和第二偏滤器，所述第一和第二偏滤器联接到所述第一和第二生成部分，以下中的一者或者多者：多个等离子体枪、一个或多个偏压电极、以及第一和第二镜塞；其中，所述多个等离子体枪包括可操作地联接到所述第一和第二偏滤器、所述第一和第二生成部分以及所述约束室的第一和第二轴向等离子体枪；其中，所述一个或多个偏压电极被定位于如下中的一者或者多者内：所述约束室、所述第一和第二生成部分以及所述第一和第二外部偏滤器；并且其中，所述第一和第二镜塞被定位于所述第一和第二生成部分与所述第一和第二偏滤器之间，

吸气系统，所述吸气系统联接到所述约束室和所述第一和第二偏滤器，

多个中性原子束注入器，所述多个中性原子束注入器联接到所述约束室并且朝向所述约束室的中间平面成角度，其中，所述多个中性原子束注入器中的一个或多个能够在第一束能量和第二束能量之间调节，其中，所述第二束能量不同于所述第一束能量；以及

磁系统，所述磁系统包括被定位成围绕所述约束室、所述第一和第二生成部分以及所述第一和第二偏滤器的多个准直流线圈，以及被定位于所述第一和第二生成部分与所述第一和第二偏滤器之间的第一组和第二组准直流镜线圈。

45. 根据权利要求44所述的系统，其中，所述第二束能量高于所述第一束能量。

46. 根据权利要求44所述的系统，其中，所述多个中性束配置成在注入发射的持续时间期间在所述第一和第二束能量之间切换。

47. 根据权利要求44至46所述的系统，其中，所述第一和第二束能量在大约15至40 keV的范围内。

48. 根据权利要求44至46所述的系统，所述系统还包括：主动反馈等离子体控制系统，所述主动反馈等离子体控制系统被配置成控制所述多个中性束的束能量。

49. 根据权利要求44所述的系统，其中，所述系统被配置为：在将所述中性束注入到所述等离子体中的同时产生FRC并维持所述FRC而不衰减，以及将等离子体温度升高到大约1.0 keV至3.0 keV。

50. 根据权利要求44所述的系统，其中，所述第一和第二偏滤器包括夹设在所述第一和第二生成部分与所述约束室之间的第一和第二内部偏滤器，并且还包括联接到所述第一和第二生成部分的第一和第二外部偏滤器，其中，所述第一和第二生成部分夹设在所述第一和第二内部偏滤器与所述第一和第二外部偏滤器之间。

51. 根据权利要求50所述的系统，所述系统还包括：第一和第二轴向等离子体枪，所述第一和第二轴向等离子体枪可操作地联接到所述第一和第二内部以及外部偏滤器、所述第一和第二生成部分以及所述约束室。

52. 根据权利要求51所述的系统，所述系统还包括：两个或更多个鞍形线圈，所述鞍形线圈联接到所述约束室。

53. 根据权利要求44所述的系统，其中，所述生成部分包括：模块化生成系统，所述模块化生成系统用于产生FRC并使所述FRC朝向所述约束室的中间平面平移。

54. 根据权利要求44所述的系统，其中，偏压电极包括以下中的一者或者多者：一个或多个点电极，所述一个或多个点电极被定位于所述约束室内以接触开放场线；成组的环形电极，所述环形电极在所述约束室与所述第一和第二生成部分之间，以便以方位角对称的方式向远边缘通量层充电；多个同心堆叠电极，所述同心堆叠电极被定位在所述第一和第二

偏滤器中以对多个同心通量层充电；以及等离子体枪的阳极，所述等离子体枪的阳极用于拦截开放通量。

55. 根据权利要求44所述的系统，所述系统还包括控制系统，所述控制系统可操作地联接到准直流线圈和所述第一和第二径向磁场线圈，所述控制系统包括联接到非暂时性存储器的处理器，所述非暂时性存储器包括多个指令，当执行所述指令时引起所述处理器调节由多个准直流线圈和所述第一和第二径向场线圈产生的磁场，以在正交于所述室的纵向轴线的径向方向上使FRC等离子体稳定化以将所述FRC等离子体定位成关于所述纵向轴线轴对称，以及在沿所述纵向轴线的轴向方向上使所述FRC等离子体稳定化以将所述FRC等离子体定位成关于所述中间平面轴对称。

56. 根据权利要求55所述的系统，其中，所述系统被配置成产生FRC并在将中性原子束注入到所述FRC中的同时维持所述FRC处于恒定值或大约恒定值而不衰减。

57. 根据权利要求55所述的系统，其中，所述第一和第二径向磁场关于所述中间平面是反对称的。

58. 根据权利要求44至46和49至57所述的系统，所述系统还包括：第一和第二紧凑环(CT)注入器，所述第一和第二紧凑环(CT)注入器朝向所述约束室的中间平面成角度地联接到所述约束室，其中，所述第一和第二CT注入器在所述约束室的中间平面的相对两侧上正好相对。

59. 根据权利要求47所述的系统，所述系统还包括：第一和第二紧凑环(CT)注入器，所述第一和第二紧凑环(CT)注入器朝向所述约束室的中间平面成角度地联接到所述约束室，其中，所述第一和第二CT注入器在所述约束室的中间平面的相对两侧上正好相对。

60. 根据权利要求48所述的系统，所述系统还包括：第一和第二紧凑环(CT)注入器，所述第一和第二紧凑环(CT)注入器朝向所述约束室的中间平面成角度地联接到所述约束室，其中，所述第一和第二CT注入器在所述约束室的中间平面的相对两侧上正好相对。

## 用于利用具有可调节束能量的中性束注入器改善支持高性能 FRC升高的能量的系统和方法

### 技术领域

[0001] 本文描述的主题总体上涉及具有反场构型(FRC)的磁等离子体约束系统,且更具体地涉及有利于形成和维持具有优异稳定性以及粒子、能量和通量约束的FRC的系统和方法,且更具体地涉及利用具有可调节束能量能力的中性束注入器来有利于形成和维持具有升高的系统能量和改善的支持的FRC的系统和方法。

### 背景技术

[0002] 反场构型(FRC)属于被称作紧凑环(CT)的磁等离子体约束拓扑的类别。它主要展现极向磁场并具有为零或者小的自生环形场(见M. Tuszewski, Nucl. Fusion 28, 2033 (1988))。这种构型的吸引力在于其简单的几何形状以便于构造和维护,用于有利于能量提取和灰移除的自然不受限制的偏滤器,以及非常高的 $\beta$ ( $\beta$ 是FRC内平均等离子体压力与平均磁场压力的比率),即,高功率密度。高 $\beta$ 性质对于经济的操作以及对于使用先进的、无中子燃料(诸如,D-He<sup>3</sup>和p-B<sup>11</sup>)是有利的。

[0003] 形成FRC的传统方法使用反场角向箍缩技术,产生热的高密度等离子体(见A.L.Hoffman and J.T.Slough,Nucl.Fusion 33, 27(1993))。对此的一变型是平移捕获方法,其中在角向箍缩“源”中产生的等离子体或多或少地立即从一端喷射出到约束室中。然后将平移的等离子体团捕获在室的端部处的两个强镜之间(见,例如,H.Himura, S.Okada, S.Sugimoto and S.Goto, Phys.Plasmas 2, 191(1995))。一旦在约束室中,则可以施加各种加热和电流驱动方法,诸如,束注入(中性的或中和的)、旋转磁场、RF或欧姆加热等。源和约束功能的这种分离为潜在的未来聚变反应器提供关键的工程优点。FRC已被证明极为稳健,适应于动态形成、平移和剧烈捕获事件。此外,它们示出倾向于呈现优选的等离子体状态(见例如H.Y.Guo, A.L.Hoffman, K.E.Miller and L.C.Steinbauer, Phys.Rev.Lett.92, 245001(2004))。在过去十年中,在研发其他FRC形成方法方面已取得了显著进展:合并具有反向螺旋性的球马克(见例如Y. Ono, M.Inomoto, Y.Ueda, T.Matsuyama和T.Okazaki, Nucl.Fusion 39, 2001(1999))和通过用旋转磁场(RMF)来驱动电流(见例如I.R. Jones, Phys.Plasmas 6, 1950(1999)),其也提供附加的稳定性。

[0004] 最近,很久以前提出的碰撞合并技术(见例如D.R. Wells, Phys. Fluids 9, 1010(1966))已经显著地进一步发展:在约束室的相对两端处的两个单独的角向箍缩同时产生两个等离子体团并使等离子体团朝向彼此以高速加速;它们然后在约束室的中心处碰撞并合并以形成复合FRC。在迄今为止最大的FRC实验之一的构造和成功操作中,常规的碰撞合并方法被示出为产生稳定、长寿命、高通量、高温的FRC(见例如M. Binderbauer, H.Y. Guo, M.Tuszewski等,Phys.Rev.Lett.105, 045003(2010))。

[0005] FRC包括分界面内的闭合场线的环和正好在分界面外的开放场线上的环形边缘层的环。边缘层合并成超过FRC长度的射流,提供自然偏滤器。FRC拓扑与反场镜等离子体的拓扑一致。然而,显著差异在于FRC等离子体具有大约为10的 $\beta$ 。固有的低内部磁场提供某些固

有的动力学粒子群体(population),即,具有与FRC小半径相当的、大的拉莫尔半径的粒子。正是这些强动力学作用呈现为至少部分地有助于过去和现在的FRC(诸如,在碰撞合并实验中产生的那些)的总体稳定性。

[0006] 典型的过去的FRC实验已受对流损失主导,其中能量约束在很大程度上由粒子传输确定。粒子主要径向地从分界面容积扩散出来,并且然后轴向地损失在边缘层中。因此,FRC约束取决于封闭和开放场线区域两者的性质。到分界面外的粒子扩散时间尺度为(scales as)  $\tau_{\perp} \sim a^2/D_{\perp}$  ( $a \sim r_s/4$ , 其中  $r_s$  为分界面半径), 并且  $D_{\perp}$  是特征FRC扩散率, 诸如,  $D_{\perp} \sim 12.5\rho_{ie}$ , 其中  $\rho_{ie}$  表示离子回旋半径(gyroradius), 其在外部施加的磁场下进行评估。边缘层粒子约束时间  $\tau_{\parallel}$  在过去的FRC实验中基本上是轴向通过时间。在稳态中, 径向与轴向粒子损失之间的平衡产生分界面密度梯度长度  $\delta \sim (D_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$ 。对于在分界面处具有相当大密度的过去的FRC, FRC粒子约束时间尺度为  $(\tau_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$  (见例如M. TUSZEWSKI, "Field Reversed Configurations", Nucl. Fusion 28, 2033 (1988))。

[0007] 现有FRC系统设计的另一缺点是需要使用外部多极来控制旋转不稳定性, 诸如, 快速增长的  $n = 2$  交换不稳定性。以这种方式, 典型的外部施加的四极场提供了所需的磁恢复压力以抑制这些不稳定模式的增长。虽然这种技术足以用于热体(thermal bulk)等离子体的稳定性控制, 但它对于对于动能更高的FRC或高级混合FRC(其中高动能大轨道粒子群体与通常的热等离子体结合)呈现了严重的问题。在这些系统中, 由于这种多极场引起的轴对称磁场的扭曲导致经由无碰撞随机扩散的显著的快粒子损失, 这是失去正则角动量守恒的结果。因此, 提供稳定性控制而不增强任何粒子的扩散的新颖解决方案对于利用这些从未探索过的高级FRC构思的更高性能潜力是重要的。

[0008] 鉴于前述内容, 因此, 期望改善FRC的支持以便使用具有升高能量的系统的稳态FRC作为通向用于未来一代能源的轻核聚变的反应器芯的路径。

## 发明内容

[0009] 本文提供的本实施例涉及有利于形成和维持具有优异稳定性以及粒子、能量和通量约束的FRC的系统和方法, 并且更具体地涉及利用具有可调节束能量能力的中性束注入器来有利于形成和维持具有升高的系统能量和改善的支持的FRC的系统和方法。根据本公开的实施例, 用于产生和维持具有反场构型(FRC)的磁场的方法包括: 在约束室中形成关于等离子体的FRC, 以及将多个中性束注入到FRC等离子体中, 同时在第一束能量和第二束能量之间调节多个中性束的束能量, 其中, 第二束能量不同于第一束能量。

[0010] 根据本公开的又一实施例, 多个中性束在注入发射的持续时间期间在第一和第二束能量之间切换。

[0011] 根据本公开的又一实施例, 该方法包括调整多个中性束的束能量以调整径向束功率沉积分布以调整压力梯度值。

[0012] 根据本公开的又一实施例, 该方法还包括: 通过朝向约束室的中间贯穿平面成角度地将快中性原子的束从中性束注入器注入到FRC等离子体中来维持FRC处于恒定值或大约恒定值而不衰减并将等离子体温度升高到高于大约1.0 keV。

[0013] 根据本公开的又一实施例, 该方法还包括: 将紧凑环(CT)等离子体从第一和第二CT注入器朝向约束室的中间平面成角度地注入到FRC等离子体中, 其中, 第一和第二CT注入

器在约束室的中间平面的相对两侧上正好(diametrically)相对。

[0014] 根据本公开的实施例,用于产生和维持具有反场构型(FRC)的磁场的系统包括:约束室;第一和第二正好相对的FRC生成部分,其联接到第一和第二正好相对的内部偏滤器;第一和第二偏滤器,其联接到第一和第二生成部分;以下中的一者或多者:多个等离子体枪、一个或多个偏压电极以及第一和第二镜塞(plug),其中,多个等离子体枪包括可操作地联接到第一和第二偏滤器、第一和第二生成部分以及约束室的第一和第二轴向等离子体枪;其中,一个或多个偏压电极被定位于以下中的一者或多者内:约束室、第一和第二生成部分以及第一和第二外部偏滤器;并且其中,第一和第二镜塞被定位于第一和第二生成部分与第一和第二偏滤器之间;吸气(吸杂,gettering)系统,其联接到约束室以及第一和第二偏滤器;多个中性原子束注入器,其联接到约束室并朝向约束室的中间平面成角度,其中,多个中性原子束注入器中的一个或多个可在第一束能量和第二束能量之间调节,其中,第二束能量不同于第一束能量;以及磁系统,其包括多个准直流线圈,该准直流线圈被定位成围绕约束室、第一和第二生成部分以及第一和第二偏滤器,以及第一组和第二组准直流镜线圈,该准直流镜线圈被定位于第一和第二生成部分与第一和第二偏滤器之间。

[0015] 根据本公开的又一实施例,该系统还包括:第一和第二紧凑环(CT)注入器,其朝向约束室的中间平面成角度地联接到约束室,其中,第一和第二CT注入器在约束室的中间平面的相对两侧上正好相对。

[0016] 在观察以下附图以及详细描述之后,示例实施例的系统、方法、特征和优点对于本领域技术人员将显而易见或将变得显而易见。所意图的是,所有此类附加的方法、特征和优点都被包括在此描述内,并且由所附权利要求保护。还意图的是,权利要求不限于需要示例实施例的细节。

## 附图说明

[0017] 作为本说明书的部分而被包括的附图图示了本示例实施例,并且与上文给出的总体描述以及下文给出的示例实施例的详细描述一起用于解释和教导本发明的原理。

[0018] 图1图示了在本FRC系统中在高性能FRC机制(regime)(HPF)下相对于在常规FRC机制(CR)下以及相对于其他常规FRC实验的粒子约束。

[0019] 图2图示了本FRC系统的部件以及本FRC系统中可产生的FRC的磁拓扑。

[0020] 图3A图示了如从顶部观察的本FRC系统的基础布局,包括中心约束容器、生成部分、偏滤器、中性束、电极、等离子体枪、镜塞和弹丸注入器的优选布置。

[0021] 图3B图示了如从顶部观察的中心约束容器,并且示出了以正交于中心约束容器中的主对称轴线的角度布置的中性束。

[0022] 图3C图示了如从顶部观察的中心约束容器,并且示出了以小于与中心约束容器中的主对称轴线正交的角度布置并被引导成朝向中心约束容器的中间平面注入粒子的中性束。

[0023] 图3D和图3E分别图示了本FRC系统的替代性实施例的基础布局的顶视图和透视图,包括中心约束容器、生成部分、内部和外部偏滤器、以小于与中心约束容器中的主对称轴线正交的角度布置的中性束、电极、等离子体枪和镜塞的优选布置。

[0024] 图4图示了生成部分的脉冲功率系统的部件的示意图。

- [0025] 图5图示了单独的脉冲功率生成撬(skid)的等距视图。
- [0026] 图6图示了生成管组件的等距视图。
- [0027] 图7图示了中性束系统和关键部件的部分截面等距视图。
- [0028] 图8图示了在约束室上的中性束布置的等距视图。
- [0029] 图9图示了钛和锂吸气系统的优选布置的部分截面等距视图。
- [0030] 图10图示了被安装在偏滤器室中的等离子体枪的部分截面等距视图。还示出了相关的磁镜塞和偏滤器电极组件。
- [0031] 图11图示了在约束室的轴向端处的环形偏压电极的优选布局。
- [0032] 图12图示了从在两个反场角向箍缩(reversed-field-theta-pinch)生成部分处的一系列外部抗磁圈以及被嵌入在中心金属约束室内的磁探头获得的FRC系统中排斥通量半径的演变。时间从生成源中同步场反向的时刻开始测量，且距离z相对于机器的轴向中间平面给出。
- [0033] 图13A、图13B、图13C和图13D图示了来自本FRC系统上的代表性非HPF、无支持的放电的数据。被示出为时间的函数的是(图13A)在中间平面处的排斥通量半径，(图13B)来自中间平面CO<sub>2</sub>干涉仪的线积分密度的6条弦，(图13C)来自CO<sub>2</sub>干涉仪数据的阿贝尔反演密度径向分布，以及(图13D)来自压力平衡的总等离子体温度。
- [0034] 图14图示了对于图13A、图13B、图13C和图13D中所示的本FRC系统的相同放电在所选择的时间处的排斥通量轴向分布。
- [0035] 图15图示了被安装在约束室外的鞍形线圈的等距视图。
- [0036] 图16A、图16B、图16C和图16D图示了FRC寿命和所注入的中性束的脉冲长度的相关性。如所示出的，更长的束脉冲产生了更长存活的FRC。
- [0037] 图17A、图17B、图17C和图17D，FRC系统的不同部件对于FRC性能和HPF机制的获得的单独的和组合的影响。
- [0038] 图18A、图18B、图18C和图18D图示了来自本FRC系统上的代表性HPF、无支持的放电的数据。被示出为时间的函数的是(图18A)在中间平面处的排斥通量半径，(图18B)来自中间平面CO<sub>2</sub>干涉仪的线积分密度的6条弦，(图18C)来自CO<sub>2</sub>干涉仪数据的阿贝尔反演密度径向分布，以及(图18D)来自压力平衡的总等离子体温度。
- [0039] 图19图示了作为电子温度(T<sub>e</sub>)的函数的通量约束。其代表了HPF放电的新建立的优异换算(scaling)机制的图形化表示。
- [0040] 图20图示了对应于非成角度和成角度注入的中性束的脉冲长度的FRC寿命。
- [0041] 图21A、图21B、图21C、图21D和图21E图示了成角度注入的中性束的脉冲长度和对应于成角度注入的中性束的脉冲长度的等离子体半径、等离子体密度、等离子体温度的和磁通量的FRC等离子体参数的寿命。
- [0042] 图22A和图22B图示了紧凑环(CT)注入器的基础布局。
- [0043] 图23A和图23B图示了中心约束容器，示出了被安装到中心约束容器的CT注入器。
- [0044] 图24A和图24B图示了具有联接到其上的漂移管的CT注入器的替代性实施例的基础布局。
- [0045] 图25图示了用于可调节能量束输出的中性束系统和关键部件的截面等距视图。
- [0046] 图26是图示具有可调节能量束输出的中性束系统的示意图。

- [0047] 图27是图示约束容器(CV)内的FRC等离子体的轴向位置控制机构的示意图。
- [0048] 图28是通用滑动模式控制方案的流程图。
- [0049] 图29是滑动模式轴向位置控制模拟的示例的复合图。
- [0050] 图30是滑动模式轴向位置控制模拟的示例的复合图。
- [0051] 应注意到的是,附图并不一定按比例绘制,且贯穿附图,类似结构或功能的元件通常由相似附图标记来代表以用于说明目的。还应注意到的是,附图仅意图有利于描述本文中所描述的各种实施例。附图并不一定描述本文中所公开的教导的各个方面并且不限制权利要求的范围。

## 具体实施方式

[0052] 本文提供的本实施例涉及有利于形成和维持具有优异的稳定性以及粒子、能量和通量约束的FRC的系统和方法。本实施例中的一些涉及利用具有可调节束能量能力的中性束注入器来有利于形成和维持具有升高的系统能量和改善的支持的FRC的系统和方法。本实施例中的一些还涉及独立于FRC等离子体的平衡的轴向稳定性特性而有利于FRC等离子体在径向和轴向方向两者上的稳定性以及FRC等离子体沿FRC等离子体约束室的对称轴线的轴向位置控制的系统和方法。

[0053] 现在将参考附图更详细地描述本文中所描述的实施例的代表性示例,这些示例单独地以及组合地利用这些附加的特征和教导中的许多。此详细描述仅意图教导本领域技术人员用于实践本教导的优选方面的进一步细节,且不意图限制本发明的范围。因此,在最广泛的意义上,在以下细节描述中公开的特征和步骤的组合对于实践本发明来说可能并非必要的,而是相反地仅被教导来具体地描述本教导的代表性示例。

[0054] 此外,代表性示例和从属权利要求的各种特征可以以未具体地且明确地列举的方式组合,以便提供本教导的附加的有用实施例。此外,明确指出的是,出于原始公开的目的、以及出于独立于实施例和/或权利要求中的特征的组成来限制所要求保护的主题的目的,在说明书和/或权利要求中所公开的全部特征都意图被单独地且彼此独立地公开。还明确指出的是,出于原始公开的目的以及出于限制所要求保护的主题的目的,所有的值范围或者实体组的指示都公开了每个可能的中间值或者中间实体。

[0055] 在转到有利于FRC等离子体在径向和轴向方向两者上的稳定性以及沿FRC等离子体约束室的对称轴线的FRC等离子体的轴向位置控制的系统和方法之前,提供对于用于形成和维持与常规FRC相比具有优异稳定性以及优异粒子、能量和通量约束的高性能FRC的系统和方法的讨论。这种高性能FRC提供了到各种各样的应用的途径,包括紧凑中子源(用于医用同位素生产、核废料治理、材料研究、中子射线照相和断层摄影)、紧凑光子源(用于化学生产和处理)、质量分离和浓缩系统、以及用于未来能量产生的光核聚变的反应器芯。

[0056] 已经探索了各种辅助系统以及操作模式来评估在FRC中是否存在优异的约束机制。这些努力已经引起突破性的发现以及本文所描述的高性能FRC范例的研发。根据此新范例,本系统和方法组合了大量新颖的理念和手段来显著地改善FRC约束,如图1中所示,以及提供没有负面副作用的稳定性控制。如下文更详细地讨论的那样,图1描绘了下文描述的FRC系统10(见图2和图3)中的粒子约束,其根据用于形成和维持FRC的高性能FRC机制(HPF)

进行操作,相比于根据用于形成和维持FRC的常规机制CR进行操作、以及相比于在其他实验中使用的根据用于形成和维持FRC的常规机制的粒子约束。本公开将概述并详解FRC系统10和方法的创新性单个部件以及它们的综合作用。

### [0057] FRC系统

#### 真空系统

图2和图3描绘了本FRC系统10的示意图。FRC系统10包括中心约束容器100,其由两个正好相对的反场角向箍缩生成部分200、以及在生成部分200之外的两个偏滤器室300围绕,偏滤器室300用于控制中性密度以及杂质污染。本FRC系统10被构建成适应超高真空并且以 $10^{-8}$ 托的典型基础压力操作。这种真空压力需要使用配合部件之间的双泵送配合凸缘、金属O形环、高纯度内壁,以及在组装之前所有零件的细致初始表面处理,诸如,物理和化学清洁,之后是24小时250 °C真空烘烤以及氢辉光放电清洁。

[0058] 反场角向箍缩生成部分200是标准的反场角向箍缩(FRTP),尽管具有下文详细讨论的先进脉冲功率生成系统(见图4到图6)。每个生成部分200由标准不透明的工业级石英管制成,其包括2毫米的超纯石英内衬这一特征。约束室100由不锈钢制成,以允许多个径向和切向端口;其还用作下文描述的实验的时间尺度上的通量保持器(flux conserver)并限制快速磁瞬变。用一组干式涡旋低真空泵、涡轮分子泵和低温泵在FRC系统10内产生并维持真空。

### [0059] 磁系统

图2和图3中图示了磁系统400。除了其他特征之外,图2图示了与可由FRC系统10产生的FRC 450有关的FRC磁通量和密度廓线(作为径向和轴向坐标的函数)。使用被研发为用以模拟与FRC系统10对应的系统和方法的代码通过2-D电阻Hall-MHD数值模拟来获得这些廓线,并且该廓线与测量的实验数据良好地吻合。如图2中所见,FRC 450包括在分界面451内在FRC 450的内部453处的闭合场线的环,以及正好在分界面451外侧在开放场线452上的环形边缘层456的环。边缘层456在FRC长度之外合并成射流454,从而提供自然偏滤器。

[0060] 主磁系统410包括沿着FRC系统10的部件(即,沿着约束室100、生成部分200和偏滤器300)位于特定轴向位置处的一系列准直流线圈412、414和416。准直流线圈412、414和416由准直流开关电源馈送,并且在约束室100、生成部分200和偏滤器300中产生大约0.1 T的基础磁偏压场。除了准直流线圈412、414和416之外,主磁系统410还在约束室100的每端与邻近的生成部分200之间包括准直流镜线圈420(由开关电源馈送)。准直流镜线圈420提供高达5的磁镜比,并且可以被独立地激励以用于平衡成形控制。另外,镜塞440被定位在每个生成部分200与偏滤器300之间。镜塞440包括紧凑准直流镜线圈430和镜塞线圈444。准直流镜线圈430包括三个线圈432、434和436(由开关电源馈送),它们产生附加的引导场来使磁通量表面455朝向穿过镜塞线圈444的小直径通道442聚焦。围绕小直径通道442包绕并且由LC脉冲功率电路馈送的镜塞线圈444产生高达4 T的强磁镜场。该整个线圈布置的目的是紧密束集并且引导磁通量表面455和端部流动的等离子体射流454进入偏滤器300的边远的室310。最后,成组的鞍形线圈“天线”460(见图15)位于约束室100外侧,两个在中间平面的每侧上,并且由直流电源馈送。鞍形线圈天线460可以被构造成提供大约0.01 T的准静态磁偶极或者四极场,以用于控制旋转不稳定性和/或电子电流控制。取决于所施加的电流的方向,鞍形线圈天线460可灵活地提供关于机器的中间平面对称抑或反对称的磁场。

### [0061] 脉冲功率生成系统

脉冲功率生成系统210基于修改的角向箍缩原理来操作。存在各自为生成部分200中的一个提供能量的两个系统。图4到图6图示了生成系统210的主构建块和布置。生成系统210包括模块化脉冲功率布置，该模块化脉冲功率布置包括单独的单元(=撬)220，其各自激励围绕生成石英管240包绕的带组件230(=带)的线圈232的子集。每个撬220包括电容器221、电感器223、快速大电流开关225和相关联的触发器222以及转储电路(dump circuitry)224。总体上，每个生成系统210存储350–400 kJ之间的电容能量，其提供高达35 GW的功率以形成并加速FRC。这些部件的协调操作经由最先进的触发器和控制系统222和224来实现，其允许在每个生成部分200上的生成系统210之间的同步正时并且将切换跳动最小化至数十纳秒。此模块化设计的优点是其灵活的操作：FRC可以原位形成并且之后被加速和注入(=静态形成)或者同时形成并加速(=动态形成)。

### [0062] 中性束注入器

在FRC系统10上部署了中性原子束600来提供加热和电流驱动以及形成快粒子压力。如图3A、图3B和图8中所示，包括中性原子束注入器系统610和640的单独的束线位于围绕中心约束室100并且切向于FRC等离子体(且垂直于中心约束容器100中的主对称轴线或者以与中心约束容器100中的主对称轴线正交的角度)以碰撞参数注入快粒子，使得目标捕获区很好地位于分界面451(见图2)内。每个注入器系统610和640能够将高达1 MW的中性束功率注入到具有20与40 keV之间的粒子能量的FRC等离子体中。系统610和640基于正离子多孔提取源，并且利用几何聚焦、离子提取栅(grid)的惯性冷却和差动泵送。除了使用不同的等离子体源，系统610和640主要的区别在于它们的物理设计以满足它们相应的安装位置，从而产生侧面和顶部注入能力。这些中性束注入器的典型部件在图7中针对侧部注入器系统610具体地进行了图示。如图7中所示，每个单独的中性束系统610包括位于输入端(这在系统640中用弧源替代)处的RF等离子体源612，且磁屏614覆盖该端。离子光源和加速栅616联接到等离子体源612并且闸阀620被定位在离子光源和加速栅616与中和器622之间。偏转磁体624和离子转储628位于中和器622和在出口端处的瞄准装置630之间。冷却系统包括两个低温制冷机634、两个低温板636以及LN2护罩638。此灵活的设计允许在宽范围的FRC参数上操作。

[0063] 用于中性原子束注入器600的替代性构造是这样的构造：切向于FRC等离子体、但是相对于中心约束容器100中的主对称轴线具有小于90°的角度A地注入快粒子。束注入器615的这些类型的取向在图3C中示出。另外，束注入器615可被取向成使得在中心约束容器100的中间平面的每侧上的束注入器615朝向中间平面注入它们的粒子。最终，这些束系统600的轴向位置可被选择成更靠近中间平面。这些替代性注入实施例有利于更中心的加料选项，其提供束的更好的耦合以及被注入的快粒子的更高捕获效率。此外，取决于角度和轴向位置，束注入器615的此布置允许对FRC 450的轴向伸长和其他特征的更直接和独立的控制。例如，以相对于容器的主对称轴线的浅角度A注入束将产生具有更长的轴向延伸以及更低温度的FRC等离子体，而选取更垂直的角度A将导致轴向更短但是更热的等离子体。以这种方式，束注入器615的注入角度A和位置可以针对不同的目的而优化。另外，束注入器615的这种成角度和定位可以允许具有更高能量的束(其对于以更少的束发散来沉积更多功率通常是更有利的)被注入到与以其他方式要捕获这种束将必要的相比更低的磁场中。这是

由于以下事实：决定快离子轨道尺度（其在恒定束能量下随着相对于容器的主对称轴线的注入角度减小而逐渐变得更小）的是能量的方位角分量。此外，朝向中间平面成角度的注入并且其中轴向束位置靠近中间平面改善了束-等离子体耦合，即使在注入时期期间当FRC等离子体缩短(shrink)或者以其他方式轴向地收缩时也是如此。

[0064] 转到图3D和图3E，FRC系统10的另一替代性构造除了成角度的束注入器615之外还包括内部偏滤器302。内部偏滤器302被定位在生成部分200与约束室100之间，并且基本上类似于外部偏滤器300构造和操作。其中包括快速切换磁线圈的内部偏滤器302在形成过程期间被有效地不激活(inactivate)，以使得当生成FRC(formation FRC)朝向约束室100的中间平面平移时生成FRC能够穿过内部偏滤器302。一旦生成FRC穿过了内部偏滤器302进入约束室100中，内部偏滤器就被激活以基本上类似于外部偏滤器操作，并且将约束室100与生成部分200隔离。

#### [0065] 弹丸注入器

为了提供注入新粒子和更好地控制FRC粒子存量的手段，在FRC系统10上利用了12筒弹丸注入器700（例如见I. Vinyar等人的“Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE, and HL-2A”，第26届聚变科学与技术座谈会论文集，09/27至10/01(2010)）。图3图示了弹丸注入器700在FRC系统10上的布局。柱形弹丸( $D \sim 1 \text{ mm}$ ,  $L \sim 1-2 \text{ mm}$ )以在150–250 km/s范围中的速度被注入到FRC中。每个单独的弹丸包含大约 $5 \times 10^{19}$ 个氢原子，其与FRC粒子存量相当。

#### [0066] 吸气系统

众所周知的是，中性光晕气体在所有约束系统中都是严重的问题。电荷交换和回收（从壁释放冷的杂质材料）过程可能会对能量和粒子约束具有毁灭性影响。另外，在边缘处或边缘附近任何大密度的中性气体都将导致所注入的大轨道（高能量）粒子的快速损失或者至少严重缩短其寿命（大轨道指的是具有在FRC拓扑结构的尺度上的轨道、或者至少具有远大于特征磁场梯度长度尺度的轨道半径的粒子），这是对于所有高能等离子体应用（包括经由辅助束加热的聚变）不利的事实。

[0067] 表面处理是能够通过其来在约束系统中控制或者减小中性气体和杂质的不利作用的手段。为此目的本文提供的FRC系统10采用钛和锂沉积系统810和820，它们用钛和/或锂的膜（数十微米厚）涂覆约束室（或容器）100以及偏滤器300和302的面向等离子体的表面。经由气相沉积技术来实现涂层。固体锂和/或钛被蒸发和/或升华并且喷洒到附近的表面上以形成涂层。源是原子炉，其具有引导喷嘴（在锂的情况下）822或者带有引导护罩（在钛的情况下）812的加热的固体球。锂蒸发器系统典型地以连续模式操作而钛升华器大多数在等离子体操作之间间歇地操作。这些系统的操作温度高于600 °C以获得快速沉积速率。为了实现良好的壁覆盖，多个策略性定位的蒸发器/升华器系统是必要的。图9详细示出了FRC系统10中吸气沉积系统810和820的优选布置。涂层充当吸气表面并且有效地泵送氢类原子和分子种类物(H和D)。涂层还将诸如碳和氧的其他典型杂质减小到无关紧要的水平。

#### [0068] 镜塞

如上文所陈述的，FRC系统10采用如图2和图3中所示的成组镜线圈420、430和444。第一组镜线圈420位于约束室100的两个轴向端处并且独立于主磁系统410的直流约束、生成和偏滤器线圈412、414和416地被激励。第一组镜线圈420主要帮助在合并期间引导并轴向地

包含FRC 450，并且在支持期间提供平衡成形控制。第一镜线圈组420产生比由中心约束线圈412所产生的中心约束场名义上更高的磁场(大约0.4到0.5T)。包括三个紧凑准直流镜线圈432、434和436的第二组镜线圈430位于生成部分200和偏滤器300之间，并且由公共的开关电源驱动。镜线圈432、434和436与更紧凑的脉冲镜塞线圈444(由电容性电源馈送)以及物理收缩部442一起形成镜塞440，其提供具有非常高的磁场(在2至4T之间且上升时间为大约10至20 ms)的狭窄低气体传导路径。与约束线圈412、414和416的一米以上尺度(meter-plus-scale)的孔和煎饼形设计相比，最紧凑的脉冲镜线圈444具有紧凑的径向尺寸、20cm的孔以及类似的长度。镜塞440的目的是多重的：(1)线圈432、434、436和444紧密地束集并且引导磁通量表面452以及端部流动的等离子体射流454进入边远的偏滤器室300。这确保了排放粒子适当地到达偏滤器300并且存在从中心FRC 450的开放场线452区域一直沿溯到偏滤器300的连续通量表面455。(2)FRC系统10中的物理收缩部442对来自安放于偏滤器300中的等离子体枪350的中性气体流提供阻碍，线圈432、434、436和444通过物理收缩部442使得磁通量表面452和等离子体射流454能够通过。同样，收缩部442防止气体从生成部分200到偏滤器300的回流，从而减少了当开始FRC的启动时必须被引入到整个FRC系统10中的中性粒子的数量。(3)由线圈432、434、436和444产生的强轴向镜减少了轴向粒子损失并且由此减少了在开放场线上平行粒子扩散性。

[0069] 在图3D和图3E中所示的替代性构造中，成组的低轮廓颈缩(necking)线圈421被定位在内部偏滤器302与生成部分200之间。

#### [0070] 轴向等离子体枪

来自被安装在偏滤器300的偏滤器室310中的枪350的等离子体流意图改善稳定性和中性束性能。如图3和图10中所示，枪350被安装在偏滤器300的室310内的轴线上，并且产生在偏滤器300中沿着开放通量线452流动且朝向约束室100的中心流动的等离子体。枪350在垫圈堆叠通道中以高密度气体放电操作并且被设计成产生数千安培的完全电离的等离子体达5至10 ms。枪350包括脉冲磁线圈，其使输出等离子体流与约束室100中的期望尺寸的等离子体匹配。枪350的技术参数的特征在于，具有5到13厘米的外直径和高达大约10厘米的内直径的通道，并且在400–600 V下提供10–15 kA的放电电流，其中枪内磁场为0.5至2.3 T之间。

[0071] 枪等离子体流可以穿透镜塞440的磁场并且流动到生成部分200和约束室100中。随着在枪350与塞440之间的距离减小以及通过使塞440更宽且更短，通过镜塞440的等离子体转移的效率增加。在合理的条件下，枪350可以分别在大约150至300 eV和大约40至50 eV的高离子和电子温度的情况下各自输送大约 $10^{22}$ 个质子/s通过2至4 T的镜塞440。枪350提供FRC边缘层456的显著重新加料，以及改善的整体FRC粒子约束。

[0072] 为了进一步增大等离子体密度，可利用气体箱来将附加的气体充入来自枪350的等离子体流中。此技术允许所注入的等离子体密度的数倍的增加。在FRC系统10中，被安装在镜塞440的偏滤器300侧上的气体箱改善了FRC边缘层456的重新加料、FRC 450的形成以及等离子体线捆(line-tying)。

[0073] 考虑到上文讨论的全部调整参数并且也考虑到用仅一个枪或者用两个枪的操作都是可能的，容易地显而易见的是，可获得宽范围的操作模式。

#### [0074] 偏压电极

开放通量表面的电偏压可以提供径向电势,该径向电势引起方位角 $E \times B$ 运动,这提供了类似于转动旋钮的控制机制,以经由速度剪切来控制开放场线等离子体以及实际FRC芯450的旋转。为了实现此控制,FRC系统10采用策略性地放置在机器的各种部分中的各种电极。图3描绘了在FRC系统10内定位在优选位置处的偏压电极。

[0075] 原理上,存在4类电极:(1)约束室100中的点电极905,其与FRC 450的边缘中特定的开放场线452接触以提供局部充电,(2)在约束室100和生成部分200之间的环形电极900,以便以方位角对称的方式向远边缘通量层456充电,(3)偏滤器300中同心电极910的堆叠,以便给多个同心通量层455充电(其中通过调整线圈416来调整偏滤器磁场以便在合适的电极910上终止期望的通量层456而使层的选择是可控的),以及最终(4)等离子体枪350的阳极920(见图10)自身(其在FRC 450的分界面附近拦截内开放通量表面455)。图10和图11示出了对于这些电极的其中一些的一些典型设计。

[0076] 在所有情况下,这些电极都由脉冲式电源或直流电源以高达大约800 V电压驱动。取决于电极尺寸以及与什么通量表面相交,可以汲取在千安培范围内的电流。

#### FRC系统的无支持的操作-常规机制

在FRC系统10上的标准等离子体形成遵循发展完备的反场角向箍缩技术。用于启动FRC的典型过程通过将准直流线圈412、414、416、420、432、434和436驱动至稳态操作开始。然后,脉冲功率生成系统210的RFTP脉冲功率电路驱动脉冲快速反向磁场线圈232以在生成部分200中产生大约-0.05 T的临时反向偏压。此时,经由位于生成部分200的外端上的凸缘处的一组方位角取向的充入谷(puff-vale),在9–20 psi下将预定量的中性气体注入到由(北和南)生成部分200的石英管室240限定的两个生成容积中。接下来,从石英管240的表面上的一组天线产生小的RF(~数百千赫兹)场,以在中性气体柱内产生呈局部种子电离区域(seed ionization region)形式的预电离。这之后是在驱动脉冲快速反向磁场线圈232的电流上施加角向振荡调制(theta-ringing modulation),这导致气体柱更全面的预电离。最终,激活脉冲功率生成系统210的主脉冲功率组以驱动脉冲快速反向磁场线圈232,从而产生高达0.4 T的前向偏压场。此步骤可以是按时间顺序的,使得贯穿生成管240的长度均匀地产生前向偏压场(静态形成),或者使得沿着生成管240的轴线实现连续蠕动场调制(动态形成)。

[0078] 在此整个形成过程中,等离子体中实际的场反向在大约5μs内快速地发生。被输送至形成的等离子体的数千兆瓦的脉冲功率容易地产生热的FRC,热的FRC然后经由施加前向磁场的时间顺序调制(磁蠕动)或者在生成管210的轴向外端附近的线圈组232的最后的线圈中的临时增加的电流(形成轴向地指向约束室100的轴向磁场梯度)而从生成部分200被喷射。如此形成并加速的两个(北和南)生成FRC然后扩展到较大直径的约束室100中,在约束室100中准直流线圈412产生前向偏压场以控制径向扩展并且提供平衡的外部磁通量。

[0079] 一旦北和南生成FRC到达约束室100的中间平面附近,FRC就碰撞。在碰撞期间,北和南生成FRC的轴向动能随着FRC最终合并成单个FRC 450而在很大程度上热能化。在约束室100中一大组等离子体诊断是可用的,以研究FRC 450的平衡。FRC系统10中典型的操作条件产生复合FRC,其具有大约0.4 m的分界面半径和大约3 m的轴向延伸。进一步的特征是大约0.1 T的外部磁场、大约 $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  的等离子体密度、以及高达1 keV的总等离子体温度。在没有任何支持、即没有经由中性束注入或其他辅助手段的加热和/或电流驱动的情况下

下,这些FRC的寿命限于大约1 ms,即固有特征构型衰减时间。

[0080] 无支持操作的实验数据-常规机制

图12示出了排斥通量半径 $r_{\Delta\Phi}$ 的典型时间演变,其接近分界面半径 $r_s$ ,以图示FRC 450的角向箍缩合并过程的动态。两个(北和南)单独的等离子体团同时产生并且然后以超音速 $v_z \sim 250$  km/s被加速离开相应的生成部分200,且在中间平面附近在 $z = 0$ 处碰撞。在碰撞期间等离子体团轴向地压缩,继之以快速的径向和轴向扩展,之后最终合并以形成FRC 450。合并的FRC 450的径向和轴向动态两者通过详细的密度分布测量以及基于辐射热计的断层摄影而表明。

[0081] 来自FRC系统10的代表性无支持放电的数据在图13A、图13B、图13C和图13D中被示出为时间的函数。FRC起始于 $t = 0$ 处。在机器的轴向中间平面处的排斥通量半径在图13A中示出。此数据从正好位于约束室的不锈钢壁内的磁探头阵列获得,所述磁探头阵列测量轴向磁场。钢壁在此放电的时间尺度上是良好的通量保持器。

[0082] 图13B中示出了线积分密度,来自位于 $z = 0$ 处的6弦CO<sub>2</sub>/He-Ne干涉仪。考虑到竖直(y)FRC移位,如通过辐射热测定断层摄影所测量的,Abel反演产生了图13C的密度廓线。在第一个0.1 ms期间的一些轴向和径向晃动之后,FRC以中空的密度分布稳定。此分布相当平坦,在轴线上具有相当大的密度,如典型的2-D FRC平衡所需要的那样。

[0083] 图13D中示出了总的等离子体温度,其由压力平衡得到并且与汤姆森散射以及光谱学测量完全一致。

[0084] 来自整个排斥通量阵列的分析指示,FRC分界面的形状(由排斥通量轴向分布近似)从跑道形逐渐演变至椭圆形。图14中所示的此演变与从两个到单个FRC的逐渐磁重联一致。实际上,粗略估计表明在此特定情形中两个初始FRC磁通量的大约10%在碰撞期间重联。

[0085] FRC长度在FRC寿命期间从3m平稳地缩短至大约1m。从图14可见的此缩短表明主要是对流性的能量损失主导了FRC约束。由于分界面内的等离子体压力比外部磁压力更快地下降,端部区域中的磁场线张力轴向地压缩FRC,从而恢复轴向和径向平衡。对于图13和图14中所讨论的放电,当FRC平衡呈现消退时,FRC磁通量、粒子存量以及热能(分别为大约10 mWb,  $7 \times 10^{19}$ 个粒子以及7 kJ)在第一毫秒内减少大约一个数量级。

[0086] 受支持的操作- HPF机制

图12至图14中的示例是没有任何支持的衰减FRC的特征。然而,在FRC系统10上部署了若干技术来进一步将FRC约束(内芯和边缘层)改善至HPF机制并支持该构型。

[0087] 中性束

首先,快(H)中性粒子垂直于 $B_z$ 以来自八个中性束注入器600的束注入。快中性粒子的束从北和南生成FRC在约束室100中合并成一个FRC 450的时刻被注入。主要由电荷交换产生的快离子具有增加FRC 450的方位角电流的电子感应加速器轨道(具有在FRC拓扑的尺度上或者至少远大于特征磁场梯度长度尺度的主要半径)。在一部分放电后(在进入发射后0.5到0.8 ms),足够大的快离子群体显著地改善了内FRC的稳定性和约束性质(例如见M.W. Binderbauer和N. Rostoker, Plasma Phys. 56, part 3, 451 (1996))。此外,从支持的角度,来自中性束注入器600的束也是用于驱动电流和加热FRC等离子体的主要手段。

[0088] 在FRC系统10的等离子体机制中,快离子主要在等离子体电子上减慢。在放电的早期部分,快离子的典型轨道平均的减慢时间是0.3-0.5 ms,这导致主要是电子的显著的FRC

加热。快离子在分界面外产生大的径向漂移,这是因为内部FRC磁场固有地低(对于0.1 T的外部轴向场为平均大约0.03T)。如果在分界面外中性气体密度过高的话,则快离子将易受电荷交换损失。因此,部署在FRC系统10上的壁吸气以及其他技术(诸如,等离子体枪350和镜塞440,除其他之外,它们有助于气体控制)倾向于使边缘中性粒子最小化并且使得能够实现所需要的建立快离子电流。

#### [0089] 弹丸注入

当在FRC 450内建立了显著的快离子群体时,以更高的电子温度和更长的FRC寿命,将冷冻的H或D弹丸从弹丸注入器700注入到FRC 450中,以支持FRC 450的FRC粒子存量。预期的消融时间尺度充分短以提供显著的FRC粒子源。此速率也可通过扩大注入件的表面面积来增加,这通过在弹丸注入器700的筒或者注入管中时并且在进入约束室100之前使单独的弹丸破碎成更小的碎片来实现,这是可以通过收紧正好在进入到约束室100中之前的注入管的最后部段的弯曲半径而增大在弹丸和注入管的壁之间的摩擦而实现的步骤。借助于改变12个筒(注入管)的激活顺序和速率以及碎片化,有可能调节弹丸注入系统700来提供正好期望水平的粒子存量支持。继而,这帮助维持FRC 450中的内部动压力以及FRC 450的受支持操作和寿命。

[0090] 一旦消融的原子在FRC 450中遇到大量的等离子体,它们就变得被完全电离。所得到的冷的等离子体成分然后被固有的FRC等离子体碰撞地加热。对于维持期望FRC温度来说所必要的能量最终由束注入器600供应。在此意义上弹丸注入器700与中性束注入器600一起形成维持稳态并支持FRC 450的系统。

#### [0091] CT注入器

作为对弹丸注入器的替代,提供了紧凑环(CT)注入器,其主要用于为反场构型(FRC)等离子体加料。CT注入器720包括磁化同轴等离子体枪(MCPG),如图22A和图22B中所示,其包括:同轴筒形内电极722和外电极724;定位于内电极内部的偏压线圈726;和在与CT注入器720的放电相反的端上的电破碎器(electrical break)728。气体通过气体注入端口730被注入到在内电极722与外电极724之间的空间,且球马克状等离子体由此通过放电产生并且通过洛伦兹力从枪被推出。如图23A和图23B中所示,一对CT注入器720在容器100的中间平面附近并且在中间平面的相对两侧上联接到约束容器100,以将CT注入到约束容器100内的中心FRC等离子体中。与中性束注入器615类似,CT注入器720的放电端被引导成相对于约束容器100的纵向轴线成角度地朝向约束容器100的中间平面。

[0092] 在替代性实施例中,如图24A和图24B中所示,CT注入器720包括漂移管740,漂移管740包括联接到CT注入器720的放电端的伸长筒形管。如所描绘的,漂移管740包括围绕该管定位并且沿着该管轴向间隔开的漂移管线圈742。沿着管的长度描绘了多个诊断端口744。

[0093] CT注入器720的优点是:(1)每次注入的CT的粒子存量的控制和可调整性;(2)沉积热的等离子体(而不是冷冻的弹丸);(3)系统可以以重复率(rep-rate)模式操作,以便允许连续加料;(4)系统也可以恢复一些磁通量,因为所注入的CT承载嵌入的磁场。在用于实验用途的实施例中,外电极的内直径是83.1 mm且内电极的外直径是54.0 mm。内电极722的表面优选地用钨涂覆以便减小从电极722出来的杂质。如所描绘的,偏压线圈726被安装在内电极722内。

[0094] 在最近的实验中,实现了高达~100 km/s的超音速CT平移速度。其他典型的等离子

体参数如下：电子密度 $\sim 5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ，电子温度 $\sim 30\text{--}50 \text{ eV}$ ，且粒子存量为 $\sim 0.5\text{--}1.0 \times 10^{19}$ 。CT的高动压力允许所注入的等离子体深深穿透到FRC中并且在分界面内沉积粒子。在最近的实验中FRC粒子加料已经引起通过CT注入器提供 $\sim 10\text{--}20\%$ 的FRC粒子存量，这成功地展示能够在不破坏FRC等离子体的情况下容易地实施加料。

#### [0095] 鞍形线圈

为了实现稳态电流驱动和维持所需要的离子电流，期望的是防止或者显著地减少由于电子-离子摩擦力（由碰撞的离子电子动量转移导致）导致的电子加快自旋。FRC系统10利用创新的技术来经由外部施加的静态磁偶极或者四极场提供电子破碎。这经由图15中所描绘的外部鞍形线圈460来实现。从鞍形线圈460横向施加的径向磁场在旋转FRC等离子体中引发轴向电场。所得到的轴向电子电流与径向磁场相互作用，从而在电子上产生方位角破碎力， $F_\theta = -\sigma V_{e\theta} \langle |B_r|^2 \rangle$ 。对于FRC系统10中的典型条件，等离子体内所需要施加的磁偶极（或四极）场仅需要为0.001 T的量级以提供充分的电子破碎。大约0.015T的对应的外部场足够小以不会导致明显的快粒子损失或者以其他方式负面影响约束。实际上，所施加的磁偶极（或四极）场有助于抑制不稳定性。结合切向中性束注入和轴向等离子体注入，鞍形线圈460提供关于电流维持和稳定性方面附加的控制水平。

#### [0096] 镜塞

镜塞440内脉冲线圈444的设计允许以适度（大约100kJ）的电容能量局部产生高磁场（2到4T）。为了形成FRC系统10的本操作的典型磁场，生成容积内的全部场线都在镜塞440处穿过收缩部442，如由图2中磁场线所表明的，并且不发生等离子体壁接触。此外，与准直流偏滤器磁体416串联的镜塞440可以进行调整以便将场线引导到偏滤器电极910上，或者使场线以端部尖头（cusp）构型（未示出）张开。后者改善稳定性并且抑制平行电子热传导。

[0097] 镜塞440本身也有助于中性气体控制。镜塞440允许更好地利用在FRC形成期间被充到石英管中的氘气，因为到偏滤器300中的气体回流被塞的小的气体传导（微薄的500L/s）显著地减小。生成管210内的残余充入气体的大部分被迅速电离。另外，流动通过镜塞440的高密度等离子体提供有效的中性粒子电离，因此提供有效的气体屏障。结果，在偏滤器300中的从FRC边缘层456回收的中性粒子的大部分不返回到约束室100中。另外，与等离子体枪350的操作相关联的中性粒子（如下文所讨论）将大部分被约束于偏滤器300中。

[0098] 最后，镜塞440倾向于改善FRC边缘层约束。利用在20到40范围中的镜比（塞/约束磁场），且利用在北和南镜塞440之间的15m的长度，边缘层粒子约束时间  $\tau_{||}$  被增加多达一个数量级。改善  $\tau_{||}$  容易地增大了FRC离子约束。

[0099] 假定来自分界面容积453的径向扩散(D)粒子损失被来自边缘层456的轴向损失( $\tau_{||}$ )平衡，则获得  $(2\pi r_s L_s)(D n_s / \delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s / \tau_{||})$ ，由此分界面密度梯度长度可被重写为  $\delta = (D \tau_{||})^{1/2}$ 。这里  $r_s$ 、 $L_s$  和  $n_s$  分别是分界面半径、分界面长度和分界面密度。FRC粒子约束时间是  $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(D n_s / \delta)] = (\langle n \rangle / n_s)(\tau_{\perp} \tau_{||})^{1/2}$ ，其中  $\tau_{\perp} = a^2 / D$  且  $a = r_s / 4$ 。物理上，改善  $\tau_{||}$  导致增加的  $\delta$ （减小的分界面密度梯度和漂移参数），并且因此导致减少的FRC粒子损失。在FRC粒子约束上的总体改善通常略微小于二次方，因为  $n_s$  随  $\tau_{||}$  增加。

[0100]  $\tau_{\parallel}$  中的显著改善也需要边缘层456保持非常稳定(即,没有n=1槽、消防带型(firehose)或者对于开放系统典型的其他MHD不稳定性)。等离子体枪350的使用提供了此优选的边缘稳定性。在此意义上,镜塞440和等离子体枪350形成了有效的边缘控制系统。

#### [0101] 等离子体枪

等离子体枪350通过线捆改善FRC排放射流454的稳定性。来自等离子体枪350的枪等离子体在没有方位角动量的情况下产生,其在控制FRC旋转不稳定性方面被证明是有用的。如此,枪350是控制FRC稳定性的有效手段,而不需要更老的四极稳定化技术。结果是,等离子体枪350使得有可能利用快粒子的有益效果,或者使用如本公开中所概述的先进混合动力学FRC机制。因此,等离子体枪350使得FRC系统10能够以这样的鞍形线圈电流操作:该鞍形线圈电流正好足以进行电子破碎,但是在将导致FRC不稳定性和/或导致显著的快粒子扩散的阈值之下。

[0102] 如在上文的镜塞讨论中所提及的,如果可以显著改善  $\tau_{\parallel}$ ,则所供应的枪等离子体将与边缘层粒子损失速率( $\sim 10^{22} / \text{s}$ )相当。FRC系统10中枪产生的等离子体的寿命在毫秒范围内。实际上,考虑具有 $n_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 的密度和大约200 eV的离子温度、被约束在端部镜塞440之间的枪等离子体。捕获长度L和镜比R分别是大约15 m和20。由于库伦碰撞导致的离子平均自由程为 $\lambda_{ii} \sim 6 \times 10^3 \text{ cm}$ ,并且,因为 $\lambda_{ii} \ln R / R < L$ ,所以离子被约束在气体动态机制中。等离子体约束时间在此机制中是 $\tau_{gd} \sim RL / 2V_s \sim 2 \text{ ms}$ ,其中 $V_s$ 是离子声速。作为比较,对于这些等离子体参数,传统的离子约束时间将是 $\tau_c \sim 0.5\tau_{ii}(\ln R + (\ln R)^{0.5}) \sim 0.7 \text{ ms}$ 。原理上,异常横向扩散可缩短等离子体约束时间。然而,在FRC系统10中,如果我们假定玻姆扩散率,则对于枪等离子体估计的横向约束时间为 $\tau_{\perp} > \tau_{gd} \sim 2 \text{ ms}$ 。因此,枪将提供FRC边缘层456的显著重新加料以及改善的总体FRC粒子约束。

[0103] 此外,枪等离子体流可以在大约150到200微秒中开启,这允许在FRC启动、平移以及合并到约束室100中使用。如果在 $t \sim 0$ (FRC主组(main bank)起始)附近开启,则枪等离子体帮助支持本动态地形成并合并的FRC 450。来自生成FRC以及来自枪的组合粒子存量足够用于中性束缚捕获、等离子体加热以及长期支持。如果在-1至0 ms范围内的t处开启,则枪等离子体可用等离子体填充石英管210或者电离充到石英管中的气体,从而允许具有减少的充入气体或者甚至可能零充入气体的FRC形成。后者可能需要足够冷的生成等离子体来允许反向偏压磁场的快速扩散。如果在 $t < -2 \text{ ms}$ 处开启,则等离子体流可用数 $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 的目标等离子体密度填充生成部分200和约束室100的形成和约束区域的大约1到3 m<sup>3</sup>的场线容积,这足以允许在FRC到达前的中性束建立。生成FRC然后可被形成并平移到所得到的约束容器等离子体中。以这种方式,等离子体枪350使得能够实现多种多样的操作条件和参数机制。

#### [0104] 电偏压

在边缘层456中径向电场分布的控制以各种方式有益于FRC稳定性和约束。借助于FRC系统10中部署的创新的偏压部件,有可能将多种深思熟虑的电势分布施加于来自约束室100中的中心约束区域完全外部的区域的贯穿机器的一组开放通量表面。以这种方式可以正好在FRC 450外部跨越边缘层456产生径向电场。这些径向电场然后改变边缘层456的方位角旋转并且经由E×B速度剪切实现其约束。于是,在边缘层456与FRC芯453之间的任何差动旋转都可通过剪切而传播到FRC等离子体内部。结果是,控制边缘层456直接影响FRC芯

453。另外,由于等离子体旋转中的自由能也可能会造成不稳定性,此技术提供了用于控制不稳定性起始和成长的直接手段。在FRC系统10中,适当的边缘偏压对开放场线传输和旋转以及FRC芯旋转提供有效控制。各种所提供的电极900、905、910和920的位置和形状允许控制不同组通量表面455并且处于不同且独立的电势。以这种方式可以实现大量组合的不同电场构型和强度,每个都对于等离子体性能具有不同的特征影响。

[0105] 所有这些创新的偏压技术的关键优点在于如下事实:能够从FRC等离子体的完全外部影响芯和边缘等离子体的表现,即,不需要使任何物理部件与中心的热等离子体接触(接触对于能量、通量和粒子损失将具有严重的影响)。这对于HPF构思的性能和全部潜在应用具有重大的有益影响。

[0106] 实验数据-HPF操作

经由来自中性束枪600的束注入快粒子在使得能够实现HPF机制中起到重要的作用。图16A、图16B、图16C和图16D图示了此事实。所描绘的是示出FRC寿命如何与束脉冲的长度相关联的一组曲线。对于包括此研究的全部放电,全部其他的操作条件都保持恒定。数据在多次发射上进行平均并且因此代表了典型的表现。清楚地显而易见的是,更长的束持续时间产生了更长存活的FRC。考虑此证据以及在此研究期间的其他诊断,其展示了束增加了稳定性并且减少了损失。束脉冲长度与FRC寿命之间的相关性并不是完美的,因为在一定等离子体尺寸之下束捕获变得低效,即,当FRC 450在物理尺寸上缩短时,并不是所有被注入的束都被拦截和捕获。FRC的缩短主要是由于以下事实:对于特定的实验设置而言,在放电期间来自FRC等离子体的净能量损失(放电中大约中途时~ 4 MW)略微大于经由中性束馈送到FRC中的总功率(~2.5 MW)。将束定位在更靠近容器100的中间平面的位置处将倾向于减小这些损失并且延长FRC寿命。

[0107] 图17A、图17B、图17C和图17D图示了不同部件对于实现HPF机制的影响。其示出了一系列典型的曲线,它们描绘了作为时间的函数的FRC 450的寿命。在所有情况下,对于每次放电的整个持续时间注入恒定的、适量的束功率(大约2.5 MW)。每条曲线代表部件的不同组合。例如,在没有任何镜塞440、等离子体枪350或者来自吸气系统800的吸气的情况下操作FRC系统10导致旋转不稳定性以及FRC拓扑的损失的快速起始。仅增加镜塞440延迟了不稳定性起始并且增加了约束。利用镜塞440和等离子体枪350的组合进一步减小了不稳定性并且增加了FRC寿命。最后,在枪350和塞440之外增加吸气(在此情况下是钛)产生了最好的结果——所得到的FRC没有不稳定性并且展现最长的寿命。从此实验展示清楚的是,部件的完整组合产生了最好的效果并且为束提供了最佳目标条件。

[0108] 如图1中所示,新发现的HPF机制展现出显著改善的传输表现。图1图示了在常规机制和HPF机制之间FRC系统10中的粒子约束时间上的改变。如可看到的那样,在HPF机制中其已经被改善了超过5倍。另外,图1详细描绘了在FRC系统10中的粒子约束时间相对于在现有常规FRC实验中的粒子约束时间。关于这些其他的机器,FRC系统10的HPF机制已经使约束改善了在5与接近20之间的倍数。最后并且最重要的是,在HPF机制中FRC系统10的约束换算(confinement scaling)的性质显著地不同于所有现有测量。在FRC系统10中建立HPF机制之前,在现有FRC实验中,从数据得到各种经验性换算规律以预测约束时间。全部那些换算规则主要取决于比率 $R^2/\rho_i$ ,其中R是零(null)磁场的半径(机器的物理尺度的不精确测量),且 $\rho_i$ 是在外部施加的场中评估的离子拉莫尔半径(所施加磁场的不精确测量)。从图1

清楚的是,在常规FRC中,长约束仅仅在大机器尺寸和/或高磁场下才是可能的。以常规FRC机制CR操作FRC系统10倾向于遵循这些换算规则,如图1中所示。然而,HPF机制极其优异,并且示出可在没有大的机器尺寸或者高磁场的情况下获得好得多的约束。更重要地,从图1还清楚的是,与CR机制相比,HPF机制以减小的等离子体尺寸产生改善的约束时间。如下文所描述的,对于通量和能量约束时间,也可见类似的趋势,在FRC系统10中它们也已增加了超过3-8倍。因此,HPF机制的突破使得能够使用适度的束功率、更低的磁场以及更小的尺寸来支持并维持FRC系统10以及未来更高能量的机器中的FRC平衡。与这些改善联袂而至的是更低的操作和构造成本以及降低的工程复杂度。

[0109] 为了进一步比较,图18A、图18B、图18C和图18D示出了来自FRC系统10中的代表性HPF机制放电作为时间的函数的数据。图18A描绘了在中间平面处的排斥通量半径。对于这些更长的时间尺度,传导性钢壁不再是那么良好的通量保持器,并且壁内部的磁探头以壁外部的探头扩增来适当地考虑穿过钢的磁通量扩散。与常规机制CR中的典型性能相比,如图13A、图13B、图13C和图13D中所示,HPF机制操作模式展现出超过400%的更长的寿命。

[0110] 图18B中示出了线积分密度迹线的代表性弦,且图18C中示出了其阿贝尔反演补体、密度廓线。如图13A、图13B、图13C和图13D中所示,与常规FRC机制CR相比,等离子体贯穿脉冲更加平静,这指示非常稳定的操作。如图18D中所示,在HPF发射中峰密度也略微更低——这是更热的总等离子体温度(高达2倍)的结果。

[0111] 对于图18A、图18B、图18C和图18D中所图示的相应的放电,能量、粒子和通量约束时间分别是0.5 ms、1 ms和1 ms。在进入放电1 ms的参考时间处,存储的等离子体能量是2 kJ而损失是大约4 MW,使得此目标非常适合用于中性束支持。

[0112] 图19总结了呈新建立的实验HPF通量约束换算形式的HPF机制的全部优点。如图19中可见的,基于在 $t = 0.5$  ms之前和之后(即, $t \leq 0.5$  ms和 $t > 0.5$  ms)所取的测量,对于给定分界面半径( $r_s$ ),通量约束(以及类似地,粒子约束和能量约束)以大致电子温度( $T_e$ )的平方换算。具有为 $T_e$ 的正幂(而不是负幂)的此强换算与由常规托卡马克所展现的换算完全相反,在常规托卡马克中约束典型地与电子温度的某次幂成反比。此换算的表现是HPF状态和大轨道(即,在FRC拓扑尺度上和/或至少特征磁场梯度长度尺度上的轨道)离子群体的直接结果。根本上,此新的换算实质上有利于高操作温度并使得能够实现相对适度尺寸的反应器。

[0113] 利用HPF机制所呈现的优点,可实现由中性束驱动的FRC支持或者稳态,意味着诸如等离子体热能、总粒子数、等离子体半径和长度以及磁通量的总体等离子体参数都可支持在合理的水平而没有实质性的衰减。为了比较,图20在曲线图A中示出了来自FRC系统10中的代表性HPF机制放电的作为时间的函数的数据,并且在曲线图B中示出了FRC系统10中的所投射的代表性HPF机制放电的作为时间的函数的数据,其中FRC 450贯穿中性束脉冲的持续时间被支持而没有衰减。对于曲线图A,对于大约6 ms的活动束脉冲长度,具有在大约2.5-2.9 MW范围内的总功率的中性束被注入到FRC 450中。曲线图A中所描绘的等离子体抗磁寿命为大约5.2 ms。更近期的数据示出利用大约7 ms的活动束脉冲长度可实现大约7.2 ms的等离子体抗磁寿命。

[0114] 如上文关于图16A、图16B、图16C和图16D所指出的,束脉冲长度和FRC寿命之间的相关性并不是完美的,因为在一定等离子体尺寸之下束捕获变得低效,即,当FRC 450在物

理尺寸上缩短时并不是所有被注入的束都被拦截和捕获。FRC的缩短或衰减主要是由于以下事实：对于特定的实验设置而言，在放电期间来自FRC等离子体的净能量损失（在放电中大约中途时~ 4 MW）略微大于经由中性束馈送到FRC中的总功率（~2.5 MW）。如关于图3C所指出的，从中性束枪600朝向中间平面的成角度的束注入改善了束-等离子体耦合，即使在注入时期期间FRC等离子体缩短或者以其他方式轴向收缩也是如此。另外，适当的弹丸加料将维持必需的等离子体密度。

[0115] 曲线图B是使用大约6ms活动束脉冲长度和来自中性束枪600的略微大于大约10 MW的总束功率的模拟运行的结果，其中中性束应注入具有大约15 keV粒子能量的H（或D）中性粒子。由束中的每个注入的等价电流为大约110A。对于曲线图B，相对于装置轴线的束注入角度为大约20°，目标半径为0.19 m。注入角度可在15°– 25°的范围内改变。束将沿平行流（co-current）的方向以方位角注入。来自中性束动量注入的净侧向力以及净轴向力应被最小化。如曲线图A的情况那样，快（H）中性粒子从北和南生成FRC在约束室100中合并成一个FRC 450的时刻从中性束注入器600被注入。

[0116] 作为曲线图B的基础的模拟使用多维霍尔-MHD解算器用于背景等离子体和平衡，基于完全动力学蒙特-卡罗的解算器用于能量束分量和全部散射过程，以及大量耦合的传输方程用于全部等离子体种类来对交互损失过程建模。传输分量相对于实验数据库被广泛地测定基准和经验性地校准。

[0117] 如由曲线图B所示，FRC 450的稳态抗磁寿命将为束脉冲的长度。然而，重要的是注意到，关键相关性曲线图B示出当束被关断时，等离子体或FRC在那时开始衰减，而不是在之前开始衰减。衰减将类似于在并非由束所辅助的放电（可能在超出束关断时间1 ms左右）中所观察到的，并且仅仅是由本征损失过程驱动的等离子体的特征衰减时间的反映。

[0118] 转到图21A、图21B、图21C、图21D和图21E，图中所图示的实验结果指示由成角度的中性束驱动的FRC支持或稳态的实现，即，总体等离子体参数（诸如，等离子体半径、等离子体密度、等离子体温度以及磁通量）都可支持在恒定的水平，没有与NB脉冲持续时间相关的衰减。例如，这种等离子体参数基本上保持恒定达~5 + ms。这种等离子体性能，包括支持特征，具有强相关NB脉冲持续时间，其中由于积聚的快离子，甚至在NB终止几毫秒之后仍有抗磁存留。如所图示的，等离子体性能仅受由许多关键系统（诸如，NB注入器以及其他系统部件）的相关联的电源中的有限的所存储能量引起的脉冲长度约束的限制。

#### [0119] 中性束可调节束能量

如上文关于图3A、图3B、图3C、图3D、图3E和图8所提到的，中性原子束600被部署在FRC系统10上以提供加热和电流驱动以及产生快粒子压力。包括中性原子束注入器系统600的各个束线位于中心约束室100周围，并且如图3C、图3D和图3E中所示，优选地成角度以朝向约束室100的中间平面注入中性粒子。

[0120] 为了进一步改善FRC支持并展示FRC斜升到高等离子体温度和升高的系统能量，本FRC系统10包括功率升高和脉冲长度扩展的中性束注入器（NBI）系统600，例如，仅用于示例性目的，功率为大约20+MW，具有高达30 ms的脉冲长度。NBI系统600包括多个基于正离子的注入器615（参见图3D和3E），特征在于灵活的模块化设计，其中NBI注入器615的子集，例如八（8）个NBI注入器615中的四（4）个具有在从初始较低束能量到升高束能量（例如，在恒定束电流下从大约15keV到大约40keV）的发射期间调节束能量的能力。NBI注入器615的这种

能力是期望的,以便实现更高效的加热和对等离子体芯450的因而发生的加压。特别地,与低能级相比,这种能力使得能够实现在峰值能量操作水平上的非常期望的性能改善:例如,(i)高达2倍的更高的加热功率;(ii)电荷交换损失减少至接近1/5;以及(iii)高达两倍的加热效率。另外,可由NBI注入器615产生的连续可变束能量使得在斜升过程期间能够实现被注入并且然后被捕获的快离子的轨道参数相对于瞬时磁压力分布的最佳匹配。最后,允许0.1-10ms斜升持续时间的快速渐变速率与NBI注入器615的束能量和功率的快速(大约1ms或更短)可调节性一起提供了额外的有效“控制旋钮”,即,可控制的特征,以用于经由调制束能量和功率来对等离子体进行等离子体成形和主动反馈控制。

[0121] 需要足够的加热功率以使得能够实现FRC 450的加热和加压,用于支持以及斜升到高等离子体温度和升高的系统能量两者。假定足够低的损失速率,则斜升的速率主要是以下的函数:在任何给定时间能够由NBI注入器615在FRC芯450中沉积多少功率。因此,总是期望通过注入端口的较高的主中性束功率。

[0122] 此外,由于NBI注入器615引起的有效加热速率是所注入的束的特性与随后持续的所有物质的温度、电子和离子密度、中性粒子浓度以及跨FRC芯450的磁场的瞬时分布之间的复杂相互作用。其中磁场分布由控制系统在斜升期间在亚毫秒时间尺度上故意改变,而动压力相关的分布经由衍生自等离子体内的自组织过程和湍流的内在改变以及通过注入过程沉积的能量而演变。束的可调节性提供了最佳地适应于这些变化条件的手段。

[0123] 例如,电荷交换截面(即,由快离子捕获电子以形成中性原子的概率)是束能量的强函数。对于15-40keV的范围,主要的电荷交换速率作为束能量的函数而急剧下降。因此,在任何给定水平的场下,当以与这样的场水平相容的最高能量注入粒子时,等离子体中的能量保留是最高的(除此之外,这需要注入的粒子的能量引起在约束系统内壁内合适的被捕获离子轨道半径)。

[0124] 分布对整体加热效率的影响的另一示例与功率沉积的位置有关。较高的束能量通常将导致FRC周边相对于芯的能量沉积相对较高。提高磁场但保持束能量相同将引起更紧密的被捕获离子轨道并相称地引起更高功率耦合到FRC芯等离子体。这些事实于是对能量保留也有很强影响——例如,周边沉积的能量沿着开放的场线结构传输出系统容易得多,而由于较低的跨场传输时间,芯沉积的能量相对更慢地损失。因此,期望磁场渐变和束能量的适当增加的紧密协调。

[0125] 束系统600被设计成电压在0.1-10ms的范围内快速渐变。这提供了将离子和电子温度分别增加至2倍和10倍的可能,并且在比典型的宏观不稳定性成长时间更短的时间尺度上这样做。因此,根本上增加了等离子体稳定性,操作可靠性和再现性也是如此。

[0126] 0.05至1 ms的可变电压上升时间提供足够快的响应时间,使得束可以用作有源反馈系统的一部分。以这种方式,束调制可用于控制宏观和微观稳定性。例如,通过改变束能量(并由此变换径向能量沉积模式)而暂时变换径向功率沉积分布,能够影响压力梯度,其可以抵消不稳定等离子体模式的开始。图3D和图3E中所示的FRC系统10利用这种能力以及快速磁反馈来控制内部倾斜、旋转速率、漂移波发展和其他操作场景。

[0127] 图25描绘了本FRC系统10的NBI注入器615的图示。在示例性实施例中,NBI注入器615被示出为包括:弧驱动器650;等离子体箱651;离子光学系统652,其包括提取栅和加速栅的三极管或四极管组;瞄准平衡环(gimbal)653;中和器654,其包括弧蒸发器655(诸如例

如,Ti弧蒸发器);具有表面结构(诸如例如,肋状表面结构)的低温泵656,其被配置用于增加低温泵送;以及用于去除非中和离子的偏转磁体656;以及准直孔658,其包括可插入的量热计659,以用于间歇束表征、诊断和重新校准。

[0128] 更具体地并且参考图26,如所示出的,可调节束系统的实施优选地基于三极管型离子光学系统(= IOS)660。理念是加速-减速方案。如图26中所图示的,第一栅G1被设定为电压V1,而第二栅G2被设定为电压V2,并且最终栅G3被设定为电压V3。所提取的离子首先被加速到能量 $E_1 = e * (V_1 - V_2)$ ,同时横越穿过在G1和G2之间的间隙(这里e指的是离子的电荷)。然后它们在位于G2和G3之间的间隙中减速,使得 $E_2 = E_1 + e * (V_2 - V_3)$ 。通常调整电压使得 $V_1 > V_2 < V_3$ 。基于适当的单独电源PS1、PS2、PS3,可以在脉冲期间以增量调整栅电压,以便改变发射的离子662的输出。例如,为了开始氢原子的束脉冲,工作电压可以被调整到 $V_1 = 15\text{kV}$ 、 $V_2 = -25\text{kV}$ 和 $V_3 = 0\text{V}$ 。初始束离子将是首先加速到40keV,并且然后以15keV的能量从IOS中出来。在脉冲的后期,可以切换电源以提供 $V_1 = 40\text{kV}$ 、 $V_2 = -1\text{kV}$ 、 $V_3 = 0\text{V}$ 。于是将实际上不存在第二间隙中的束减速,从而产生大约40 keV的输出束能量。电源是各自可单独控制的,并提供适当的电压调制。初始束离子从多个标准的基于RF或弧的等离子体源PS中抽出。从IOS 660出来后,束离子662横越中和器664,其中快离子经由离开中和器664中存在的冷中性气体的电子的电荷交换而转换成中性离子。适当的低温泵送防止中性气体从中和器664的下游孔口流出。在中和器的端部处还存在适当的弯曲磁体666,其提供未中和的快离子663的去除,以及相关的离子转储器668,以用于吸收快离子及其能量。然后,出现的原子束670传送通过适当的孔6720,以减少束发散,并朝向反应器的芯提供良好准直的中性原子流。

[0129] 在替代变型中,IOS基于四极管设计。在这种情况下,IOS包括四个栅,这些栅具有与针对三极管情况所解释的相同的加速-减速原理。本领域技术人员将容易地认识到系统部件和操作原理之间的相似性。第四栅的引入提供了进一步的微调可能性和总体更多的操作灵活性。

[0130] 本文提供的示例实施例已在美国临时专利申请号62 / 414,574中描述,该申请通过引用并入本文。

### [0131] 等离子体稳定性和轴向位置控制

对于FRC不稳定性常规解决方案典型地以径向方向上不稳定为代价而提供轴向方向上的稳定性,或者以轴向不稳定为代价而提供径向方向上的稳定性,但是不会同时在两个方向上都提供稳定性。对于一阶,以轴向不稳定为代价,其中等离子体位置横向或径向稳定的平衡具有轴对称的期望特性。考虑到前述内容,本文提供的实施例涉及有利于FRC等离子体在径向和轴向方向两者上的稳定性、以及独立于FRC等离子体的平衡的轴向稳定性特性沿着FRC等离子体约束室的对称轴线对FRC等离子体的轴向位置控制的系统和方法。然而,轴向位置不稳定性使用控制FRC等离子体轴向位置的成组的外部轴对称线圈来主动控制。通过作用在被施加于与等离子体同心的成组的外部线圈上的电压上和使用非线性控制技术,该系统和方法提供独立于等离子体平衡的稳定性特性的FRC等离子体轴向位置的反馈控制。

[0132] 本文呈现的实施例利用FRC的轴向不稳定平衡来增强径向稳定性,同时稳定化或者控制轴向不稳定性。以这种方式,可以获得轴向和径向方向两者上的稳定性。控制方法被

设计成变更外部或平衡磁场来以轴向不稳定为代价而使FRC等离子体径向或横向地稳定，且之后作用在径向场线圈电流上以便迅速地朝向中间平面恢复FRC等离子体位置，同时最小化在约束室的中间平面周围的过调(overshooting)和/或振荡。此解决方案的好处在于，其降低了用于控制所需要的致动器的复杂度。与具有多个自由度的常规解决方案相比，本文呈现的实施例的方法将复杂度降低至沿着FRC等离子体回转轴线的具有一个自由度的控制问题。

[0133] 导致轴向不稳定等离子体的线圈电流中的波形、加料和中性束功率的组合限定了将等离子体置于轴向不稳定情形中的等离子体控制场景。该场景可以使用模拟或实验的先验知识、或者被控制用来保持轴向不稳定的平衡的反馈来预先编制。在放电期间等离子体位置应独立于平衡的稳定性特性被控制，例如，控制方案应对于轴向稳定或者轴向不稳定的等离子体都有用，直至极限。可被控制的轴向最不稳定的等离子体具有与容器的趋肤时间(skin time)相当的成长时间。

[0134] 现在转向有利于FRC等离子体在径向和轴向方向两者上的稳定性以及沿着FRC等离子体约束室的对称轴线的FRC等离子体的轴向位置控制的系统和方法，图27示出了简化的方案来图示轴向位置控制机构510的示例实施例。被示出在约束室100内的旋转FRC等离子体520具有等离子体电流522和轴向移位方向524。在室100内通过对称的电流部件产生平衡场(未示出)，对称的电流部件诸如例如准直流线圈412(见图2、图3A、图3D以及图3E)。平衡场沿轴向移位方向524不产生净力，但是可以被调节以产生横向/径向或轴向稳定的等离子体。为了本文呈现的实施例的目的，平衡场被调节以产生横向/径向稳定的FRC等离子体520。如上文所指出的，这导致轴向不稳定性，并且因此导致FRC等离子体520沿轴向移位方向524的轴向移位。当FRC等离子体520轴向移动时，其引发反对称(即，在约束室100的中间平面的每侧上在约束室100的壁中沿相反的方向)的电流514和516。FRC等离子体520将在容器以及在外部线圈两者中引发这些类型的电流分量。此反对称电流分量514和516产生与环形等离子体电流522相互作用的径向场，以产生与FRC等离子体520的运动相反的力，并且此力的结果是其减慢了等离子体轴向移位。由于约束室100的电阻，这些电流514和516随着时间逐渐消散。

[0135] 围绕约束室100在中间平面的每侧上设置的径向场线圈530和531提供附加的径向场分量，它们由于在线圈530和531中沿相反方向引发的电流532和534而产生。径向场线圈530和531可包括成组的轴对称的线圈，它们可被定位在约束室100内部或者外部。径向线圈530和531被示出为与准直流线圈412(见图2、图3A、图3D以及图3E)类似地被定位在约束容器100外部。线圈530和531中的每个或者成组线圈，可以与在中间平面的相对侧上的线圈承载不同电流，但是这些电流关于约束容器100的中间平面是反对称的，并且产生沿着中间平面具有 $B_z \neq 0$ ,  $B_r = 0$ 的磁场结构。径向场线圈530和531产生补充性的径向场分量，其与环形等离子体电流522相互作用以产生轴向力。轴向力继而使等离子体朝向约束室100的中间平面往回移动。

[0136] 控制机构510包括控制系统，控制系统被配置成作用在径向场线圈电流上，以便朝向中间平面迅速恢复等离子体位置，同时最小化在机器中间平面周围的过调和/或振荡。控制系统包括处理器，该处理器可操作地联接到径向场线圈530和531、准直流线圈412、它们的相应电源以及其他部件(诸如例如，磁性传感器)，从而提供等离子体位置、等离子体速度

以及活动线圈电流测量。处理器可被配置成执行本申请中所描述的计算和分析并且可包括或者被通信地联接到包括非易失性计算机可读取介质的一个或更多存储器。它可包括基于处理器或者基于微处理器的系统，包括使用微控制器、精简指令集计算机(RISC)、专用集成电路(ASIC)、逻辑电路以及能够执行本文所描述功能的任何其他电路或处理器的系统。上文的示例仅仅是示例性的，并且因此不意图以任何方式限制术语“处理器”或“计算机”的定义和/或含义。

[0137] 处理器的功能可以使用软件例程、硬件部件或它们的组合来实施。硬件部件可使用多种技术来实施，该多种技术例如包括集成电路或者离散的电子部件。处理器单元典型地包括可读取/可写入的存储器存储装置，并且典型地还包括用于写入和/或读取该存储器存储装置的硬件和/或软件。

[0138] 处理器可包括计算装置、输入装置、显示单元和接口，该接口例如用于访问因特网。计算机或者处理器可包括微处理器。微处理器可连接到通讯总线。计算机或者处理器还可包括存储器。存储器可包括随机存取存储器(RAM)和只读存储器(ROM)。计算机或者处理器还可包括存储装置，其可以是硬盘驱动器或者可移除存储驱动器，诸如，软盘驱动器、光盘驱动器等。存储装置也可以是用于将计算机程序或者其他指令加载到计算机或处理器中的其他类似装置。

[0139] 处理器执行被存储在一个或更多存储元件中的一组指令，以便处理输入数据。存储元件也可按期望或需要存储数据或者其他信息。存储元件可呈信息源或处理机器内的物理存储器元件的形式。

[0140] 使用径向场线圈致动器控制轴向稳定或不稳定FRC构型的位置的问题使用被已知为滑动模式控制的非线性控制理论的分支来解决。系统状态的线性函数(滑动表面)充当具有期望渐近稳定(滑动)表现的误差信号。使用李亚普洛夫理论(Liapunov theory)设计滑动表面，以在宽范围的FRC动态参数中展现渐近稳定性。所提出的控制方案于是可用于轴向稳定和不稳定等离子体两者，而不需要重新调节在滑动表面中使用的参数。此特性是有益的，因为如前文所提及的那样，平衡可能必须在FRC放电的不同阶段上在轴向稳定和轴向不稳定平衡之间转换。

[0141] 图28中示出了控制方案500的配置。低通过滤器将切换频率限制在期望的控制带宽内。假定需要以一个采样延迟进行采样和信号传输的数字控制回路。误差信号(滑动表面)是线圈电流、等离子体位置和等离子体速度的线性组合。等离子体的等离子体位置和速度由外部磁测量获得。活动线圈系统中的电流可通过标准方法来测量。

[0142] 需要线圈电流和等离子体位置以实施位置控制。需要等离子体速度以改善性能，但这是可选的。此误差信号的非线性函数(中继控制原理)对于连接到中间平面对称线圈的每对电源产生离散的电压水平。中间平面对称线圈被馈送有相同强度但是相反符号的中继电压。这产生了径向场分量来朝向中间平面恢复等离子体位置。

[0143] 为了展示控制方案的可行性，使用刚性等离子体模型来模拟等离子体动态。该模型利用磁体几何形状。当仅考虑等离子体和容器时，等离子体电流分布对应于轴向不稳定平衡，具有2 ms的成长时间。假定电源以离散的电压水平工作，典型地以800 V的步级。

[0144] 图29示出了若干等离子体控制模拟，其突出了向线圈施加的电压与等离子体位置稳定时间之间的关系，以及将轴向移位20 cm的等离子体带回到中间平面所需要的线圈

峰值电流和渐变速率。这些滑动模式轴向位置控制模拟示例在0.3T下使用四对外部修整线圈进行。示出了四个情况，其对应于具有以200V(实心正方形)、400V(实心圆)、800V(实心三角形)和1600V(中空正方形)为步级的离散电压水平的电源。对于全部四个情况，控制带宽是16 kHz并且采样频率是32 kHz。示出了等离子体位置(顶部图)、最外面的线圈对中的电流(中间)以及线圈电流渐变速率(底部)。允许等离子体移位变得不稳定直至其到达20 cm。此时应用反馈控制。

[0145] 模拟结果表明：

- 1.要在5 ms(实心正方形迹线)内将等离子体带回中间平面,0.5 MA/s的线圈斜升速率足够,需要200 V的电源;
- 2.要在2.3 ms(实心圆形迹线)内将等离子体带回中间平面,1MA/s的线圈斜升速率足够,需要400 V的电源;
- 3.要在1.3 ms(实心三角形迹线)内将等离子体带回中间平面,2 MA/s的线圈斜升速率足够,需要800 V的电源;
- 4.要在1.0 ms(中空正方形迹线)内将等离子体带回中间平面,4 MA/s的线圈斜升速率足够,需要1600 V的电源。

[0146] 对于上文研究的第三种情况(2 MA/s的渐变速率情况)对于全部修整线圈的峰值电流也在图30中作为修整线圈位置的函数示出。滑动模式轴向位置控制模拟示例以0.3 T使用四对外部修整线圈使用具有三级(+800V, 0, -800V)的电源、16kHz的控制带宽和32kHz的采样率来进行。为了在1.3ms内将等离子体带回到中间平面,需要2 MA/s的线圈斜升速率。在所有线圈对中所需要的峰值电流小于1.5 kA。所需要的实际切换频率(大约2 kHz)远低于控制系统带宽。

[0147] 控制系统也可实施目标表面,其仅为线圈电流以及等离子体速度的函数,而非等离子体位置的函数。在这种情况下,轴向位置控制回路仅提供轴向动态的稳定化,而不是控制。这意味着等离子体处于亚稳定的情形中并且可能会沿着其轴线缓慢地漂移。然后使用附加的反馈回路提供位置控制,该附加的反馈回路控制在等离子体分界面与容器之间的等离子体间隙,因此其同时执行等离子体形状和位置控制。

[0148] 使用了类似控制系统的另一等离子体约束装置是托卡马克装置。为了维持等离子体约束,托卡马克装置中的等离子体电流必须被保持在分别与等离子体密度以及环向场大致成比例的下限和上限之间。为了在高等离子体密度下操作必须增大等离子体电流。同时必须保持极向场尽可能低以便q安全系数高于q=2。这是通过沿着机器轴线方向伸长等离子体从而允许适合大等离子体电流(且因此允许高等离子体密度)而不使边界磁场增大到高于其安全极限而实现的。这些伸长的等离子体沿着机器轴线方向(在托卡马克装置行话中称为竖直方向)是不稳定的,并且也需要等离子体稳定化机构。托卡马克装置中竖直等离子体位置控制也使用成组的径向场线圈恢复,因此其极其类似RFC位置控制问题。然而在托卡马克装置中和FRC中需要稳定化的原因是不同的。在托卡马克装置中,等离子体竖直不稳定是以大的等离子体电流操作要付出的惩罚,其需要等离子体伸长来以高环向场操作。在FRC的情况下,等离子体不稳定性是获得横向稳定性要付出的惩罚。托卡马克装置具有使该构型稳定化的环向场,因此它们不需要横向稳定化。

[0149] 根据本公开的实施例,用于产生和维持具有反场构型(FRC)的磁场的方法包括:在

约束室中关于等离子体形成FRC,以及将多个中性束注入到FRC等离子体中,同时在第一束能量和第二束能量之间调节多个中性束的束能量,其中,第二束能量不同于第一束能量。

[0150] 根据本公开的又一实施例,第二束能量高于第一束能量。

[0151] 根据本公开的又一实施例,多个中性束在注入发射的持续时间期间在第一和第二束能量之间切换。

[0152] 根据本公开的又一实施例,第一和第二束能量在大约15至40 keV的范围内。

[0153] 根据本公开的又一实施例,该方法还包括通过从主动反馈等离子体控制系统接收的反馈信号来控制多个中性束的束能量。

[0154] 根据本公开的又一实施例,该方法还包括通过从主动反馈等离子体控制系统接收的反馈信号来控制多个中性束的束能量。

[0155] 根据本公开的又一实施例,控制多个中性束的束能量包括调整多个中性束的束能量以调整径向束功率沉积分布以调整压力梯度值。

[0156] 根据本公开的又一实施例,该方法还包括:通过朝向约束室的中间贯穿平面成角度地将快中性原子的束从中性束注入器注入到FRC等离子体中来维持FRC处于恒定值或大约恒定值而不衰减,并将等离子体温度升高到高于大约1.0 keV。

[0157] 根据本公开的又一实施例,升高等离子体温度包括将温度从大约1.0 keV升高到大约3.0 keV。

[0158] 根据本公开的又一实施例,升高等离子体温度包括将温度从大约1.0 keV升高到大约3.0 keV。

[0159] 根据本公开的又一实施例,该方法还包括:利用围绕约束室延伸的准直流线圈在约束室内产生磁场,并且利用围绕约束室的相对两端延伸的准直流镜线圈在约束室的相对两端内产生镜磁场。

[0160] 根据本公开的又一实施例,该方法还包括:利用围绕约束室延伸的准直流线圈来在约束室内产生磁场,并且利用围绕约束室的相对两端延伸的准直流镜线圈来在约束室的相对两端内产生镜磁场。

[0161] 根据本公开的又一实施例,形成FRC包括在联接到约束室的相对的第一和第二生成部分中形成生成FRC,以及使生成FRC从第一和第二生成部分朝向约束室的中间贯穿平面加速,在约束室处两个生成FRC合并以形成FRC。

[0162] 根据本公开的又一实施例,形成FRC包括以下中的一者:形成生成FRC,同时使生成FRC朝向约束室的中间贯穿平面加速;和形成生成FRC,然后使生成FRC朝向约束室的中间贯穿平面加速。

[0163] 根据本公开的又一实施例,使生成FRC从第一和第二生成部分朝向约束室的中间贯穿平面加速包括:使生成FRC从第一和第二生成部分传送通过联接到约束室的相对两端的第一和第二内部偏滤器,第一和第二内部偏滤器夹设在约束室与第一和第二生成部分之间。

[0164] 根据本公开的又一实施例,使生成FRC从第一和第二生成部分传送通过第一和第二内部偏滤器包括:当来自第一和第二生成部分的生成FRC传送通过第一和第二内部偏滤器时使第一和第二内部偏滤器不激活。

[0165] 根据本公开的又一实施例,该方法还包括:将FRC的磁通量表面引导到第一和第二

内部偏滤器中。

[0166] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：将FRC的磁通量表面引导到联接到生成部分的端部的第一和第二外部偏滤器。

[0167] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：利用围绕生成部分和偏滤器延伸的准直流线圈来在生成部分和第一和第二外部偏滤器内产生磁场。

[0168] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：利用围绕生成部分和偏滤器延伸的准直流线圈在生成部分和第一和第二内部偏滤器内产生磁场。

[0169] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：利用准直流镜线圈在第一和第二生成部分与第一和第二外部偏滤器之间产生镜磁场。

[0170] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：利用围绕在生成部分与偏滤器之间的收缩部延伸的准直流镜塞线圈来在位于第一和第二生成部分与第一和第二外部偏滤器之间的收缩部内产生镜塞磁场。

[0171] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：利用准直流镜线圈来在约束室与第一和第二内部偏滤器之间产生镜磁场，以及利用准直流低轮廓颈缩线圈来在第一和第二生成部分与第一和第二内部偏滤器之间产生颈缩磁场。

[0172] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：利用联接到室的鞍形线圈来在室内产生磁偶极场和磁四极场中的一者。

[0173] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：利用吸气系统来处理室的内表面以及第一和第二生成部分的内表面、夹设在约束室与第一和第二生成部分之间的第一和第二偏滤器的内表面、以及联接到第一和第二生成部分的第一和第二外部偏滤器的内表面。

[0174] 根据本公开的又一实施例，吸气系统包括钛沉积系统和锂沉积系统中的一者。

[0175] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：从轴向安装的等离子体枪将等离子体轴向地注入到FRC中。

[0176] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：控制FRC的边缘层中的径向电场分布。

[0177] 根据本公开的又一实施例，控制FRC的边缘层中的径向电场分布包括：利用偏压电极向FRC的一组开放通量表面施加电势分布。

[0178] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：在正交于约束室的纵向轴线的径向方向上使FRC等离子体稳定化以将FRC等离子体定位成关于纵向轴线轴对称，以及在沿纵向轴线的轴向方向上使FRC等离子体稳定化以将FRC等离子体定位成关于约束室的中间平面轴对称。

[0179] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：利用围绕室延伸的准直流线圈在室内产生施加的磁场。

[0180] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：在径向方向上使FRC等离子体稳定化包括调节所施加的磁场以在FRC等离子体中引发径向稳定性和轴向不稳定性。

[0181] 根据本公开的又一实施例，使FRC等离子体轴向地稳定化包括产生第一和第二径向磁场，其中，第一和第二径向磁场与FRC相互作用以轴向地移动FRC等离子体以将FRC等离子体定位成关于中间平面轴对称。

[0182] 根据本公开的又一实施例，该方法还包括：将紧凑环(CT)等离子体从第一和第二CT注入器朝向约束室的中间平面成角度地注入到FRC等离子体中，其中，第一和第二CT注入

器在约束室的中间平面的相对侧上正好相对。

[0183] 根据本公开的又一实施例，用于产生和维持具有反场构型(FRC)的磁场的系统包括：约束室；第一和第二正好相对的FRC生成部分，其联接到第一和第二正好相对的内部偏滤器；第一和第二偏滤器，其联接到第一和第二生成部分；以下中的一者或多者：多个等离子体枪、一个或多个偏压电极以及第一和第二镜塞，其中，多个等离子体枪包括可操作地联接到第一和第二偏滤器、第一和第二生成部分以及约束室的第一和第二轴向等离子体枪；其中，一个或多个偏压电极被定位于如下中的一者或多者内：约束室、第一和第二生成部分以及第一和第二外部偏滤器；并且其中，第一和第二镜塞被定位于第一和第二生成部分与第一和第二偏滤器之间；吸气系统，其联接到约束室以及第一和第二偏滤器；多个中性原子束注入器，其联接到约束室并朝向约束室的中间平面成角度，其中，多个中性原子束注入器中的一个或多个可在第一束能量和第二束能量之间调节，其中，第二束能量不同于第一束能量；以及磁系统，其包括被定位成围绕约束室、第一和第二生成部分以及第一和第二偏滤器的多个准直流线圈以及被定位于第一和第二生成部分与第一和第二偏滤器之间的第一组和第二组准直流镜线圈。

[0184] 根据本公开的又一实施例，第二束能量高于第一束能量。

[0185] 根据本公开的又一实施例，多个中性束被配置成在注入发射的持续时间期间在第一和第二束能量之间切换。

[0186] 根据本公开的又一实施例，第一和第二束能量在大约15至40 keV的范围内。

[0187] 根据本公开的又一实施例，该系统还包括主动反馈等离子体控制系统，其被配置成控制多个中性束的束能量。

[0188] 根据本公开的又一实施例，该系统被配置为：在将中性束注入到等离子体中的同时产生FRC并维持FRC而不衰减，并将等离子体温度升高到大约1.0 keV至3.0 keV。

[0189] 根据本公开的又一实施例，第一和第二偏滤器包括夹设在第一和第二生成部分与约束室之间的第一和第二内部偏滤器，并且还包括联接到第一和第二生成部分的第一和第二外部偏滤器，其中，第一和第二生成部分夹设在第一和第二内部偏滤器与第一和第二外部偏滤器之间。

[0190] 根据本公开的又一实施例，该系统还包括：第一和第二轴向等离子体枪，其可操作地联接到第一和第二内部以及外部偏滤器、第一和第二生成部分以及约束室。

[0191] 根据本公开的又一实施例，该系统还包括：联接到约束室的两个或更多个鞍形线圈。

[0192] 根据本公开的又一实施例，生成部分包括模块化生成系统，该模块化生成系统用于产生FRC并使该FRC朝向约束室的中间平面平移。

[0193] 根据本公开的又一实施例，偏压电极包括以下中的一者或多者：一个或多个点电极，其被定位于约束室内以接触开放场线；成组的环形电极，其在约束室与第一和第二生成部分之间以便以方位角对称的方式向远边缘通量层充电；多个同心堆叠电极，其被定位在第一和第二偏滤器中以对多个同心通量层充电；以及等离子体枪的阳极，其用于拦截开放通量。

[0194] 根据本公开的又一实施例，该系统还包括可操作地联接到准直流线圈以及第一和第二径向磁场线圈的控制系统，该控制系统包括联接到非暂时性存储器的处理器，非暂时

性存储器包括多个指令,当执行该指令时引起处理器调节由多个准直流线圈以及第一和第二径向场线圈产生的磁场,以在正交于室的纵向轴线的径向方向上使FRC等离子体稳定化以将FRC等离子体定位成关于纵向轴线轴对称,以及在沿纵向轴线的轴向方向上使FRC等离子体稳定化以将FRC等离子体定位成关于中间平面轴对称。

[0195] 根据本公开的又一实施例,该系统被配置为产生FRC并在将中性原子束注入到FRC中的同时将FRC维持在恒定值或大约恒定值而不衰减。

[0196] 根据本公开的又一实施例,第一和第二径向磁场围绕中间平面是反对称的。

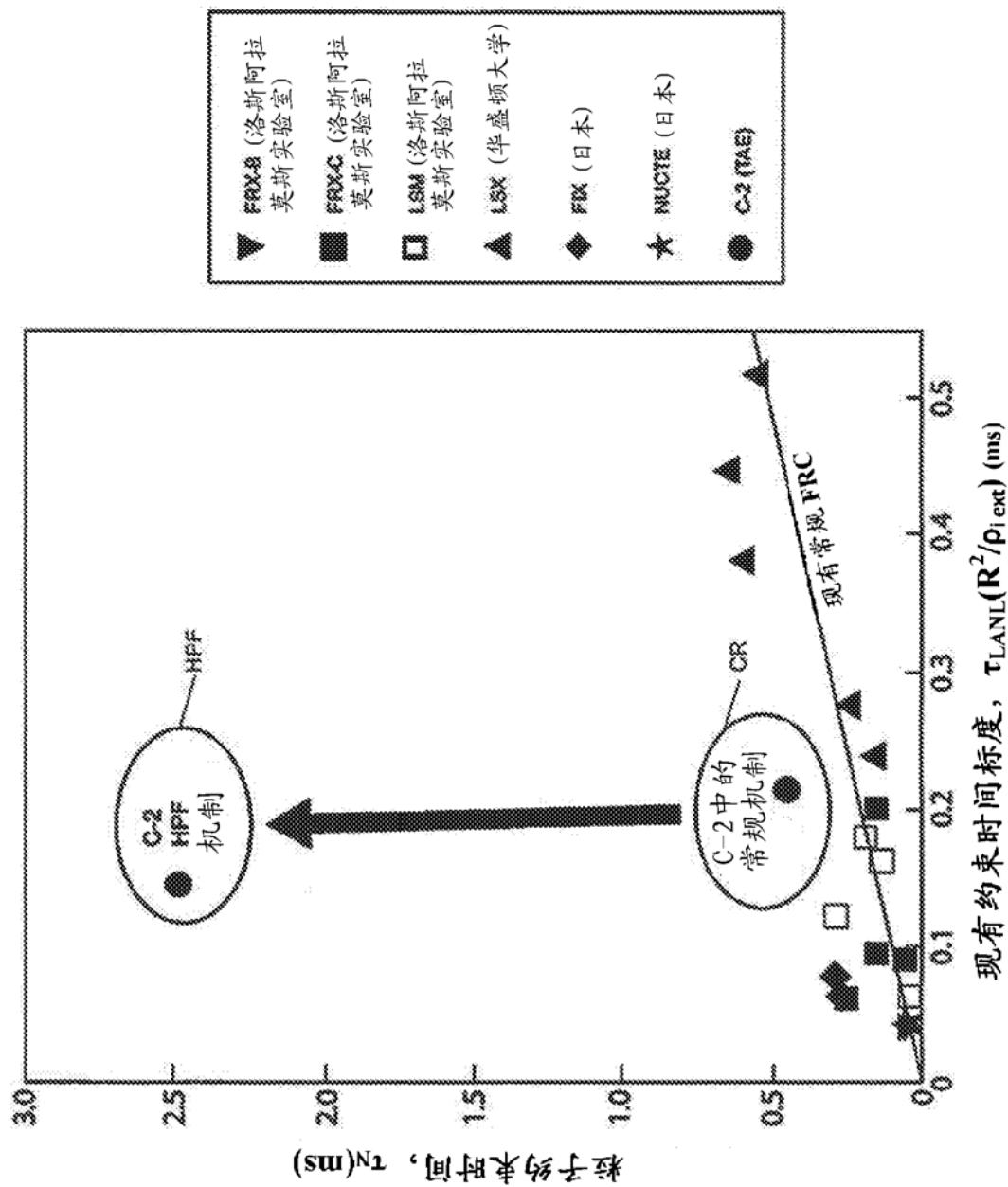
[0197] 根据本公开的又一实施例,该系统还包括第一和第二紧凑环(CT)注入器,其朝向约束室的中间平面成角度地联接到约束室,其中,第一和第二CT注入器在约束室的中间平面的相对两侧上正好相对。

[0198] 然而,本文提供的示例实施例仅仅意图作为说明性示例并且不以任何方式是限制性的。

[0199] 关于本文提供的任何实施例所描述的所有特征、元件、部件、功能和步骤都意图能够自由组合并且能够用来自任何其他实施例的那些替代。如果关于仅一个实施例描述了某些特征、元件、部件、功能或步骤,则应理解的是,该特征、元件、部件、功能或步骤可以与本文所描述的每个其他实施例一起使用,除非另外明确地陈述。此段落因此在任何时候用作用于引入组合了来自不同实施例的特征、元件、部件、功能和步骤或者用另一实施例的特征、元件、部件、功能和步骤替代来自一个实施例的那些的权利要求的引用基础和书面支持,即使以下描述并没有在特定情形中明确陈述这种组合或替代是可能的。明确详述每种可能的组合和替代过于累赘,尤其是考虑到本领域普通技术人员在阅读此描述后将会容易地认识到每个和每一个这种组合和替代的容许性。

[0200] 在许多情形中实体在本文中被描述为联接到其他实体。应理解的是,术语“联接”和“连接”(或者它们的任何形式)在本文中可互换地使用,并且在两种情况下,对于两个实体的直接联接(没有任何不可忽略的(例如,寄生的)介于中间的实体)和两个实体的间接联接(具有一个或更多不可忽略的介于中间的实体)是通用的。在实体被示出为直接联接在一起的情况下,或者被描述为联接在一起而没有描述任何介于中间的实体的情况下,应理解的是,那些实体也可以间接地联接在一起,除非上下文清楚地另外规定。

[0201] 虽然实施例易受各种改型和替代形式,但是其特定示例已经在附图中示出并且在本文详细描述。然而,应理解的是,这些实施例不限于所公开的特定形式,而是相反,这些实施例将覆盖落入本公开的精神内的全部改型、等价物和替代方案。此外,实施例的任何特征、功能、步骤或元件,以及通过不在权利要求的创新性范围内的特征、功能、步骤或元件限定权利要求的创新性范围的负面限制都可以在权利要求中记载或者被添加到权利要求中。



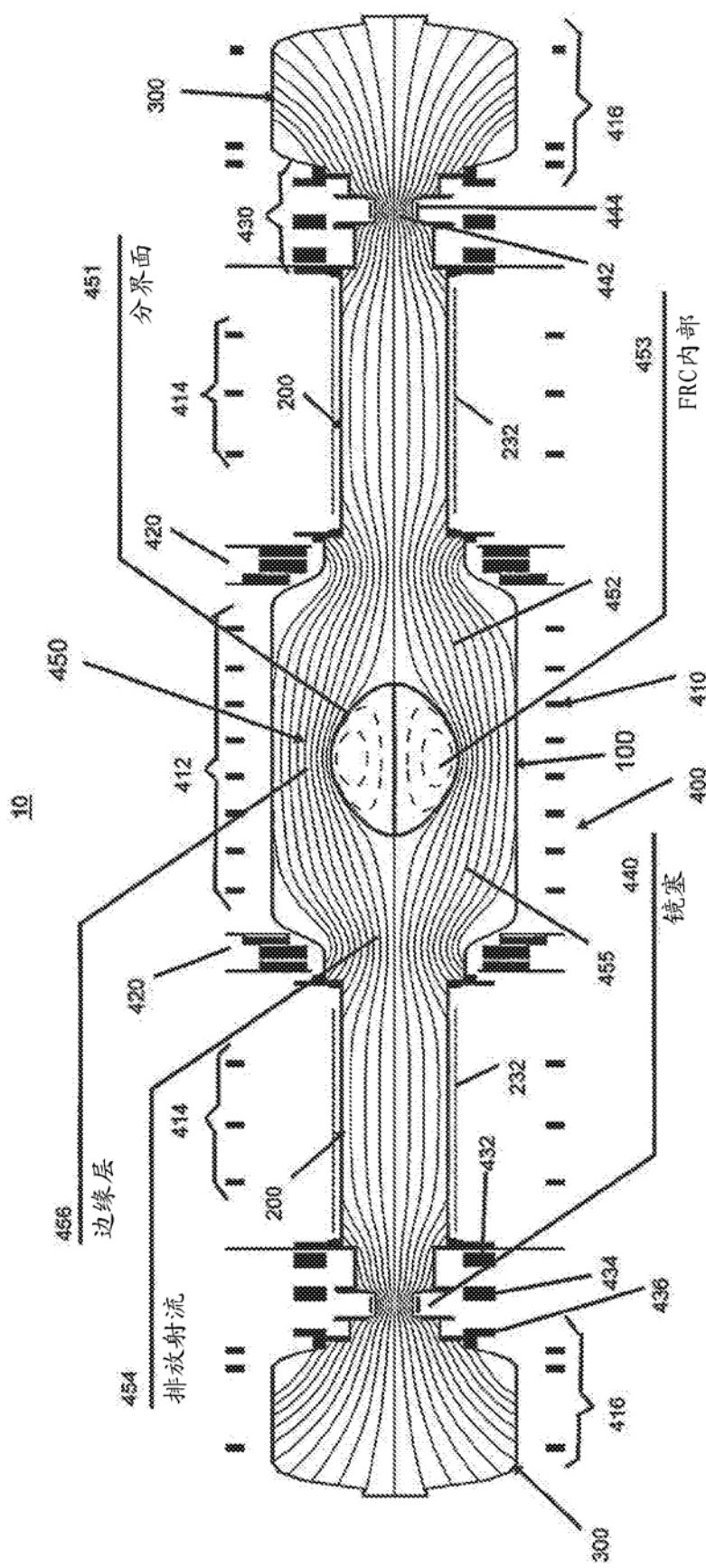


图 2

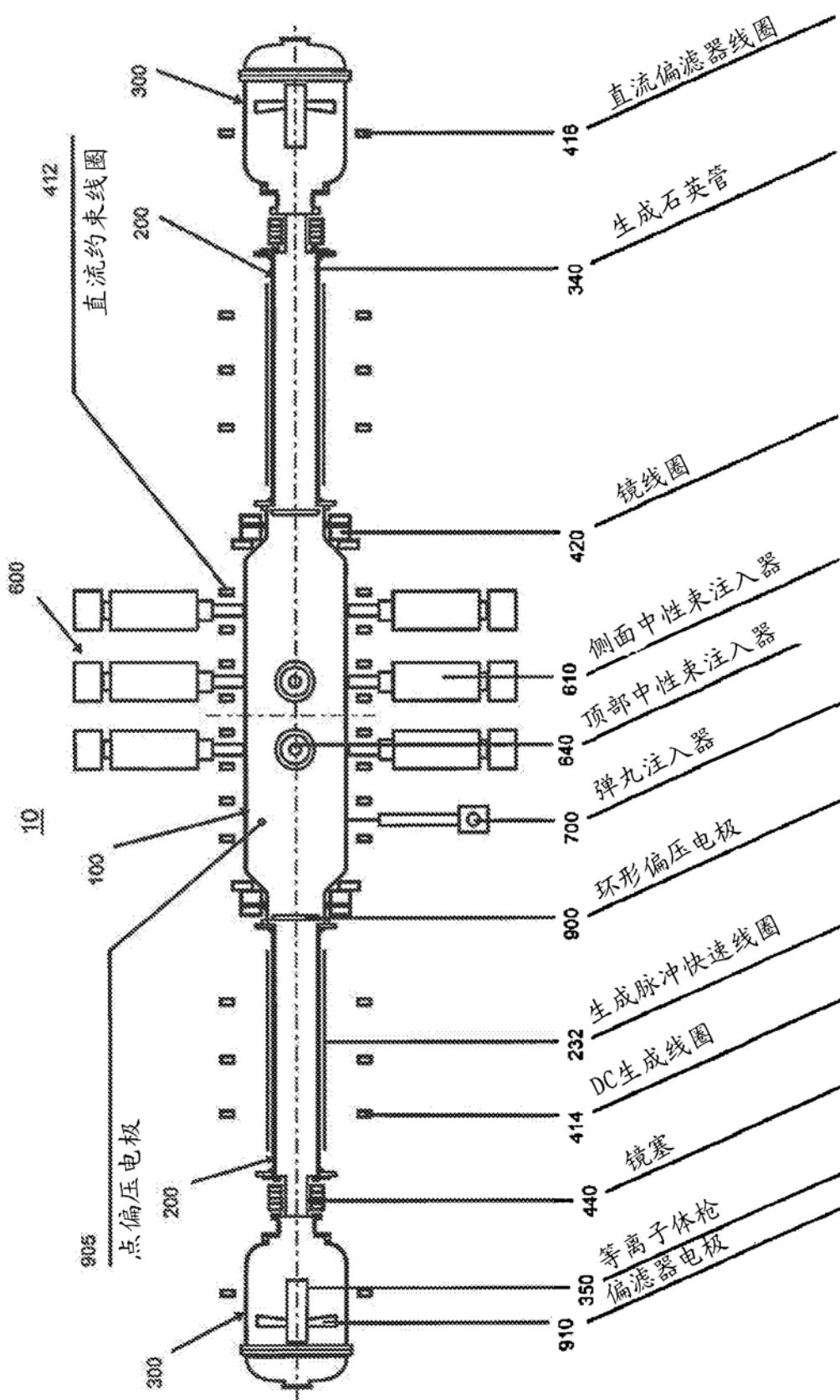


图 3A

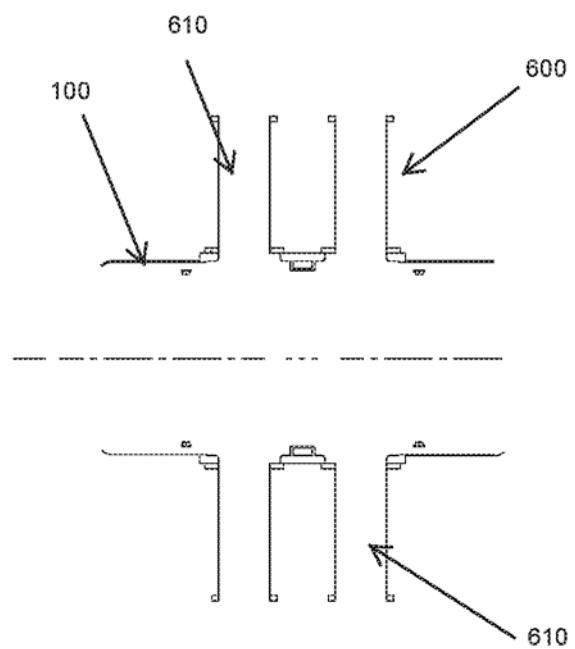


图 3B

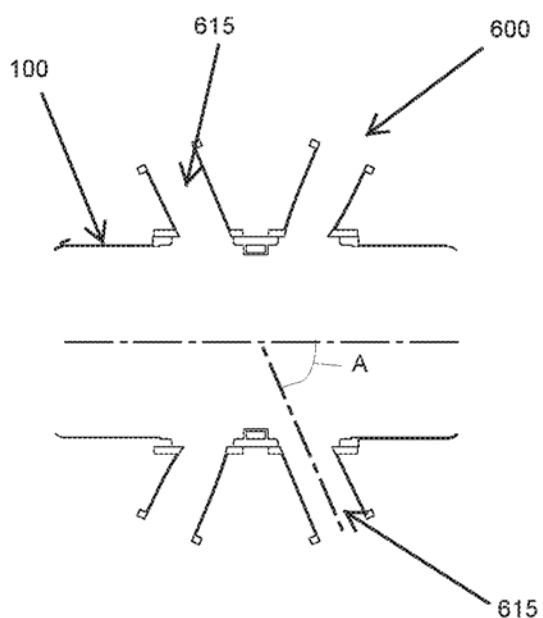


图 3C

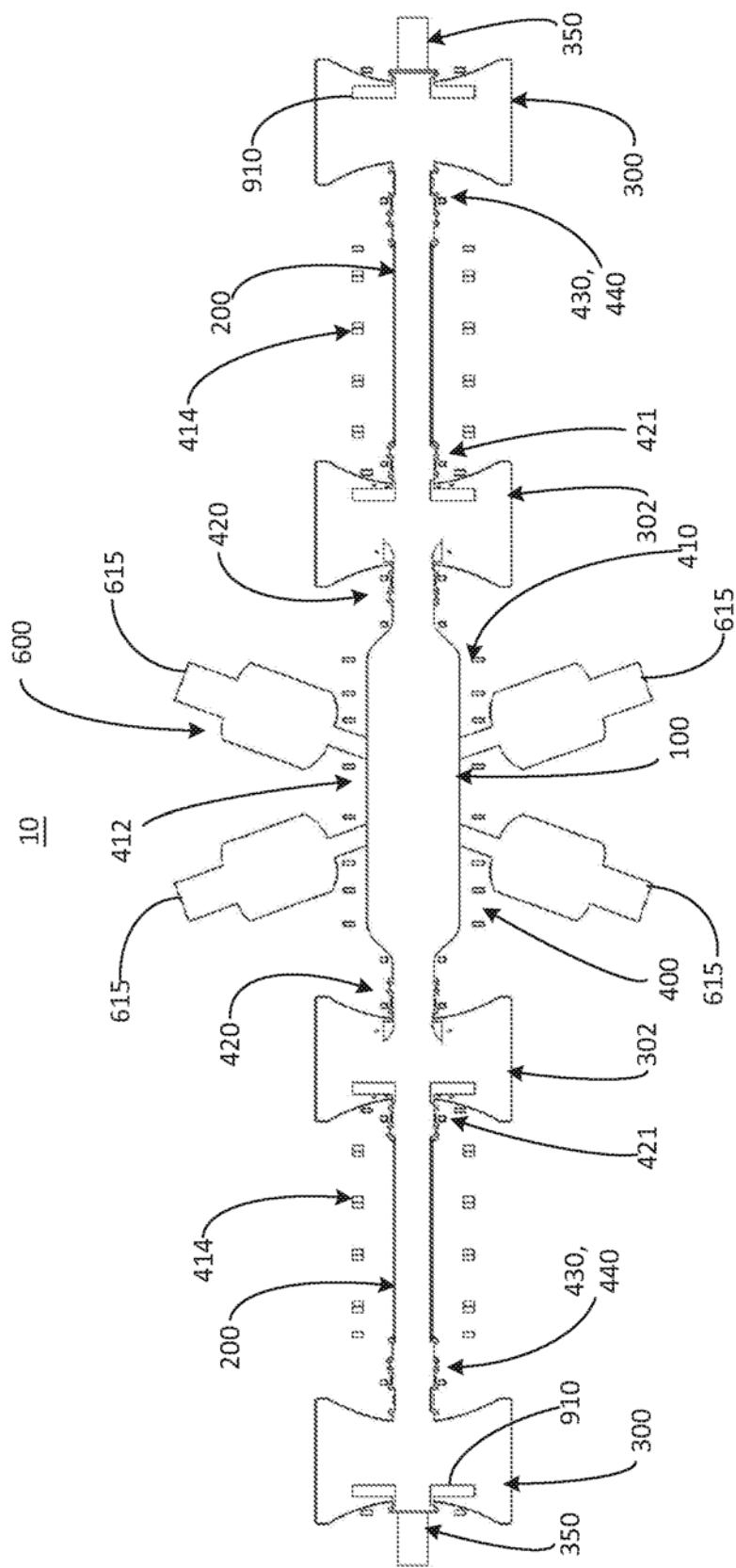


图 3D

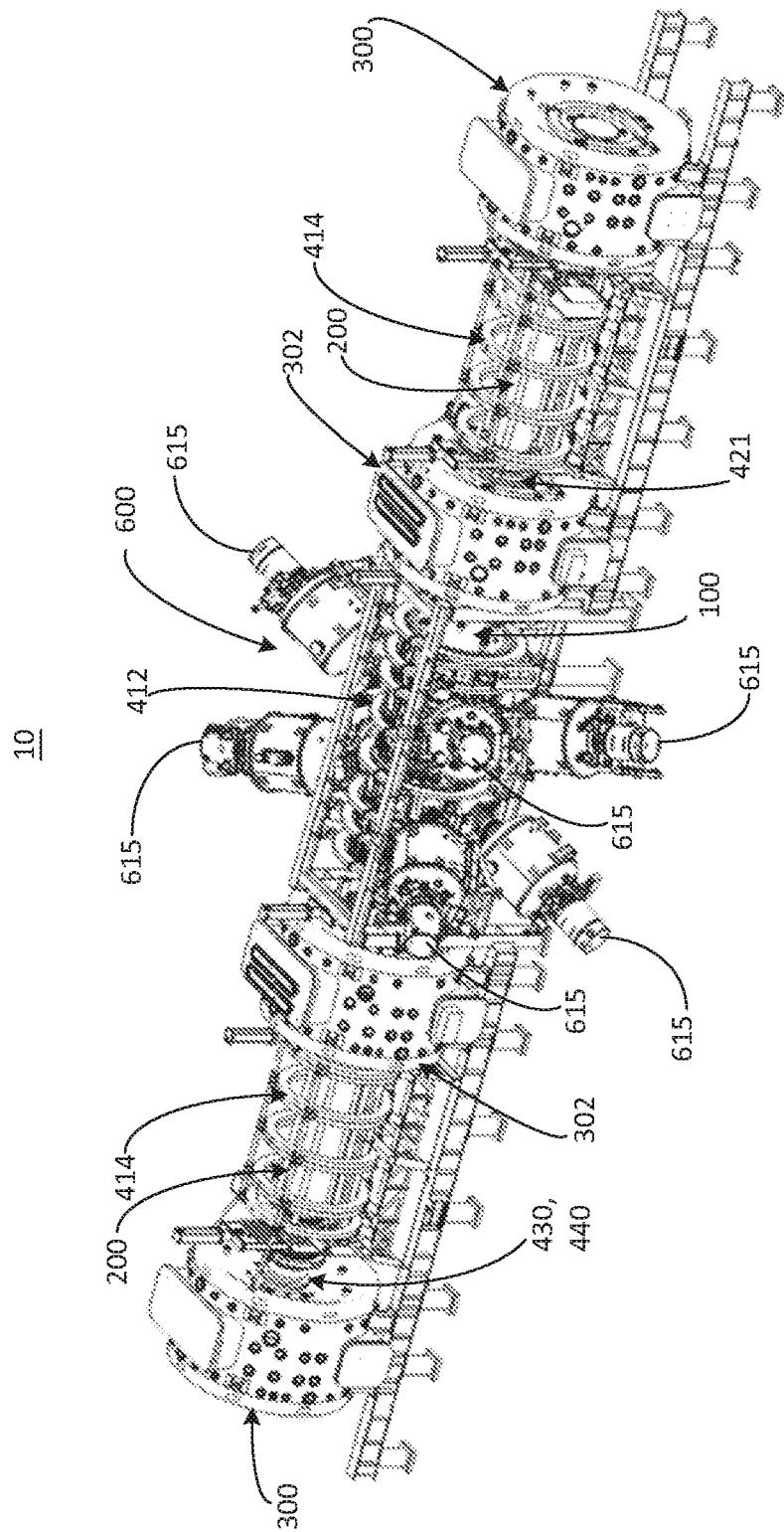


图 3E

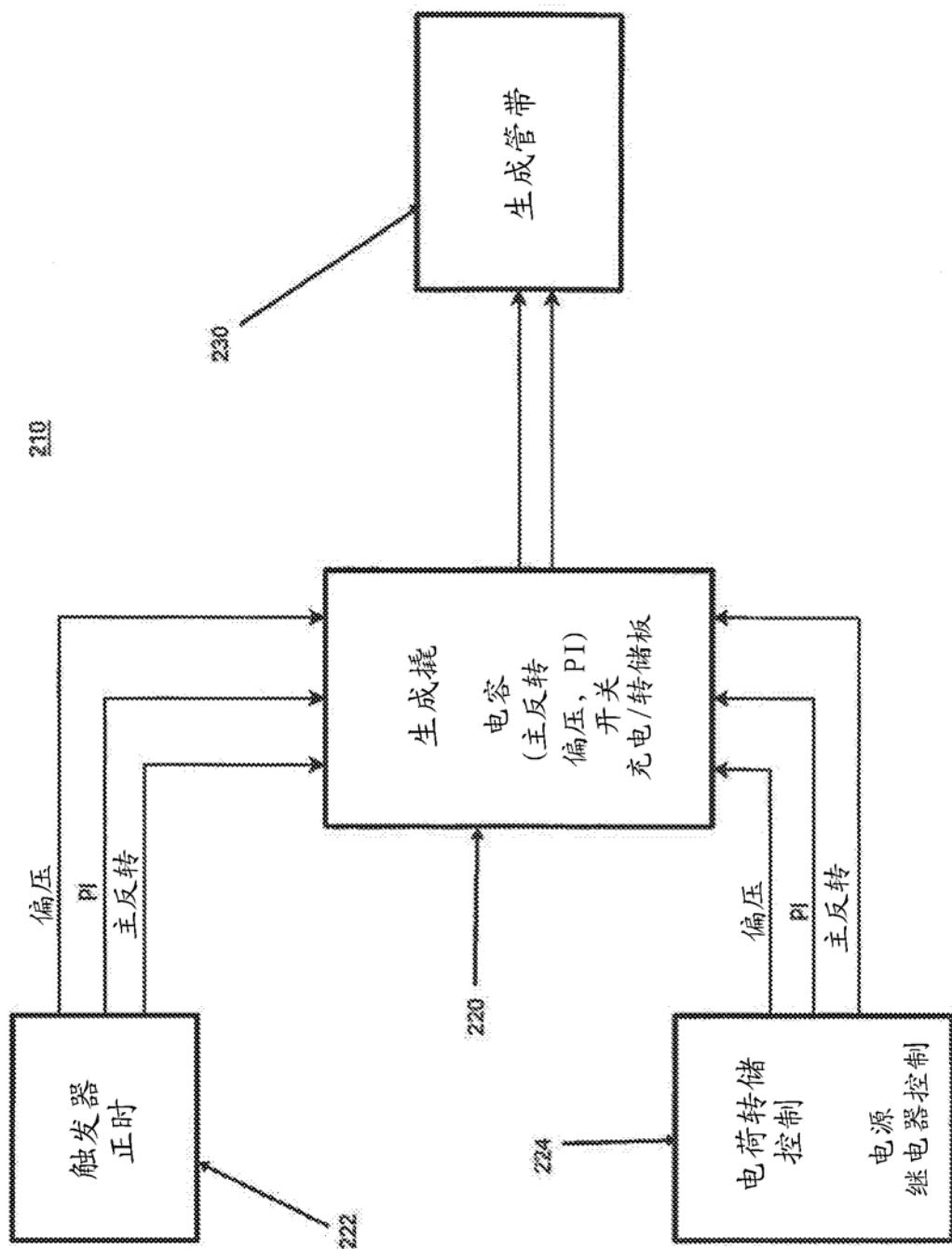


图 4

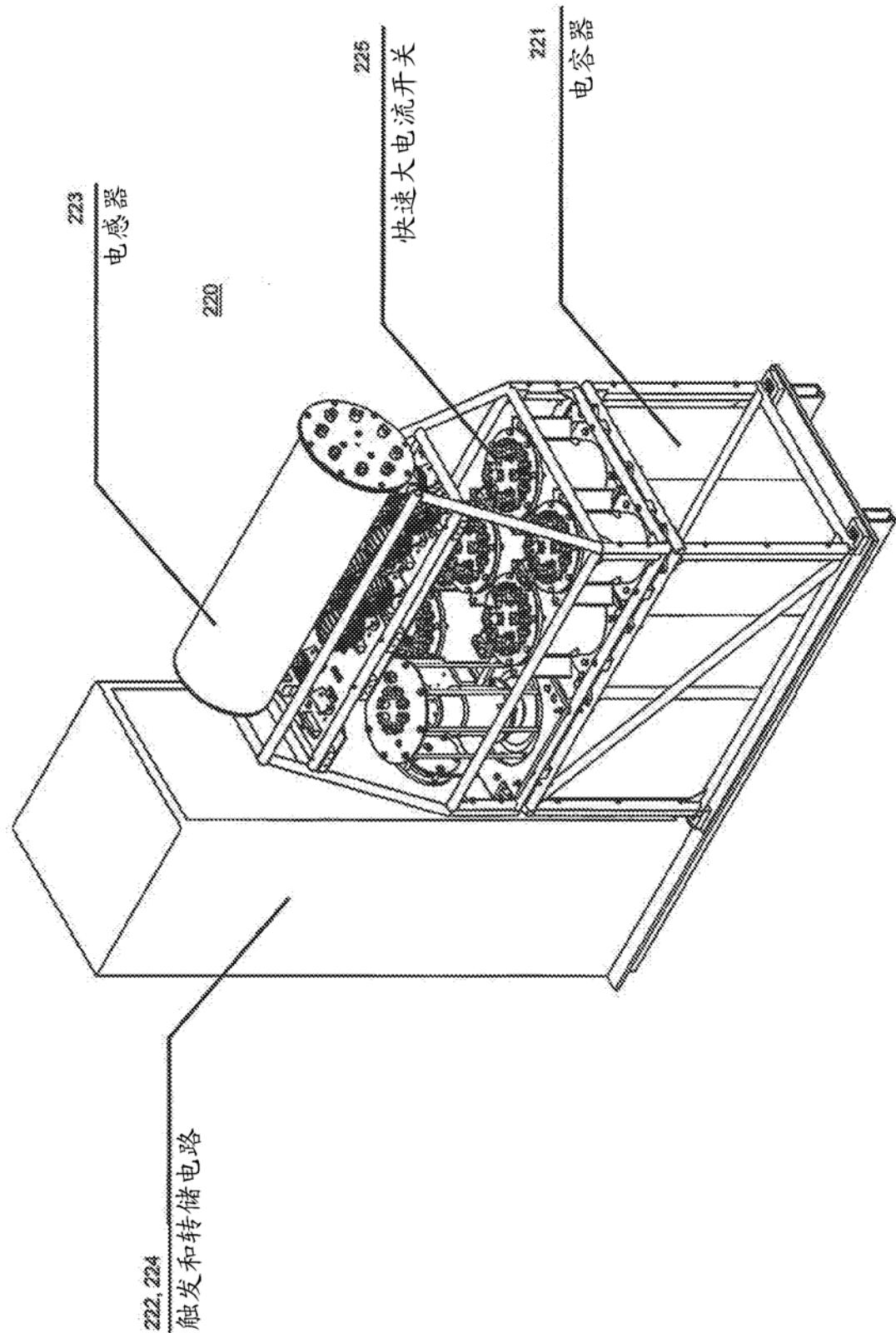


图 5

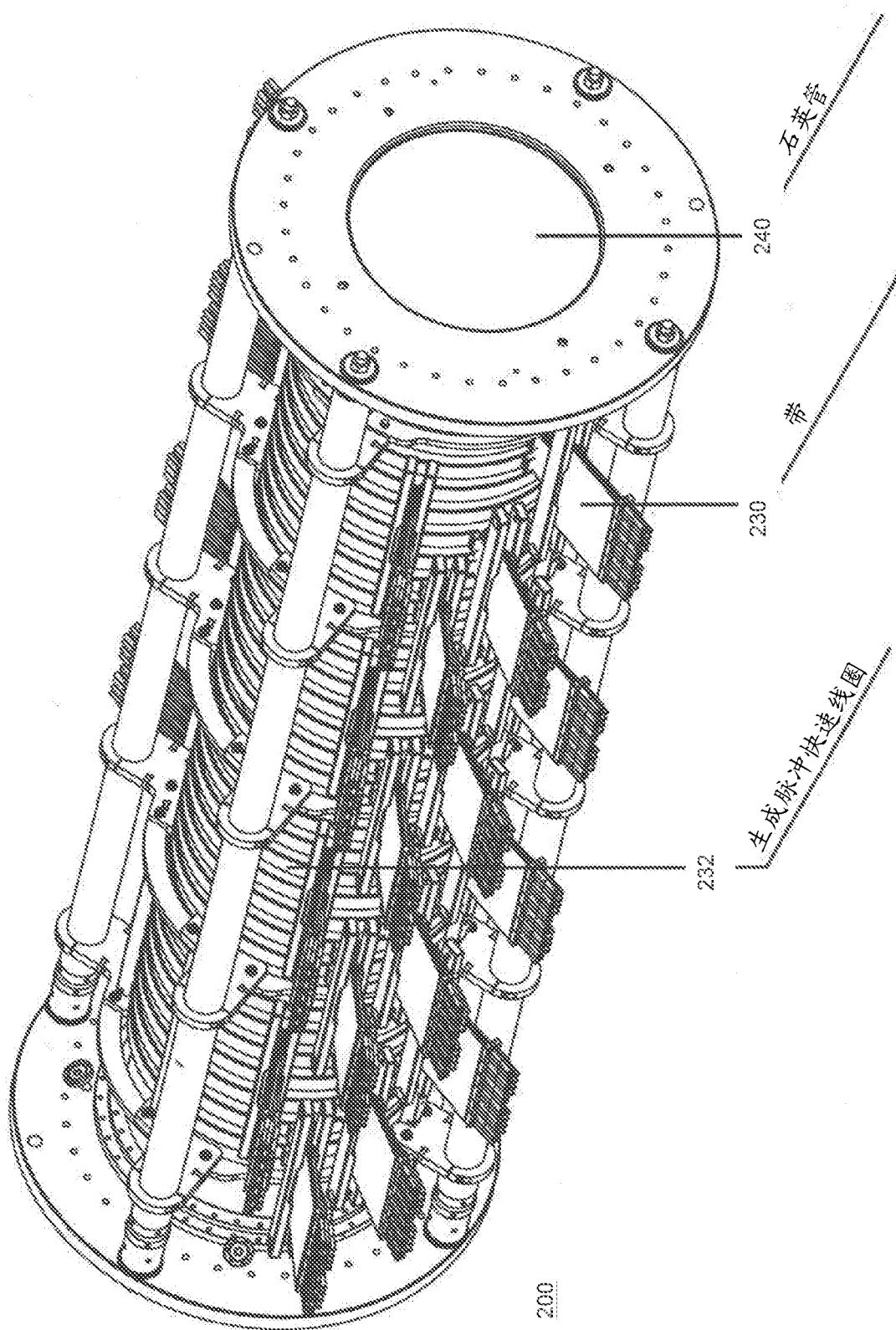


图 6

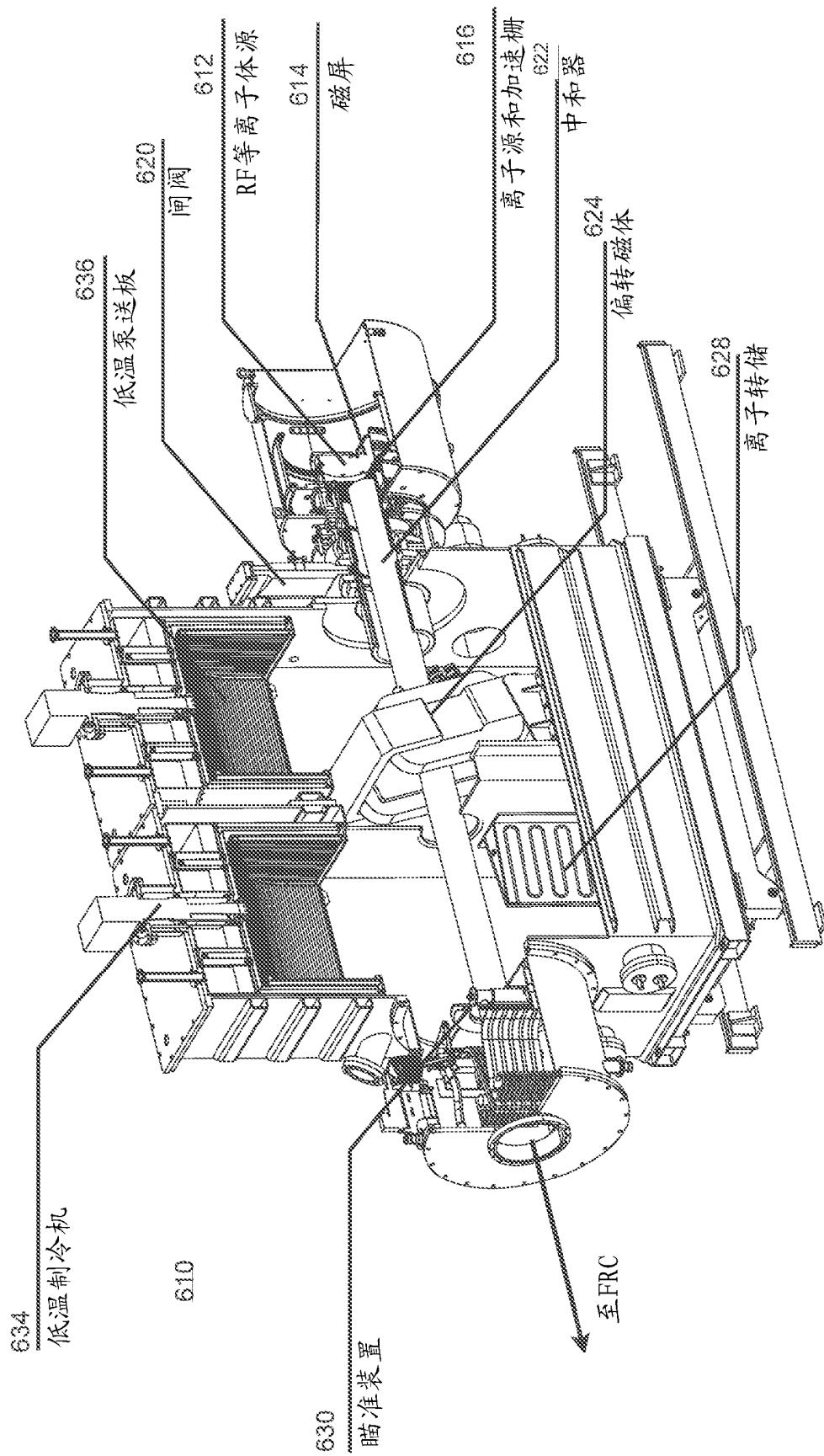


图 7

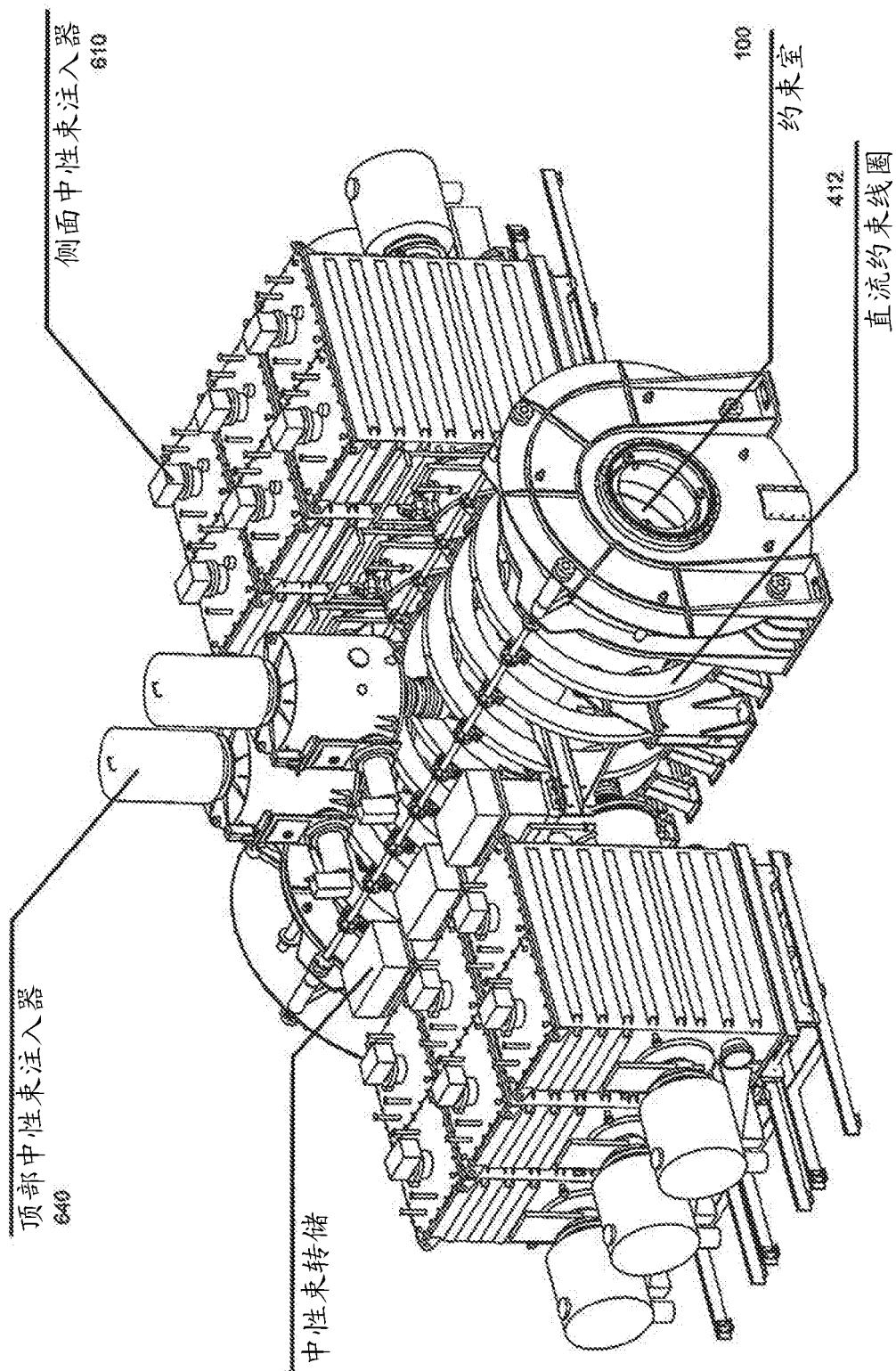


图 8

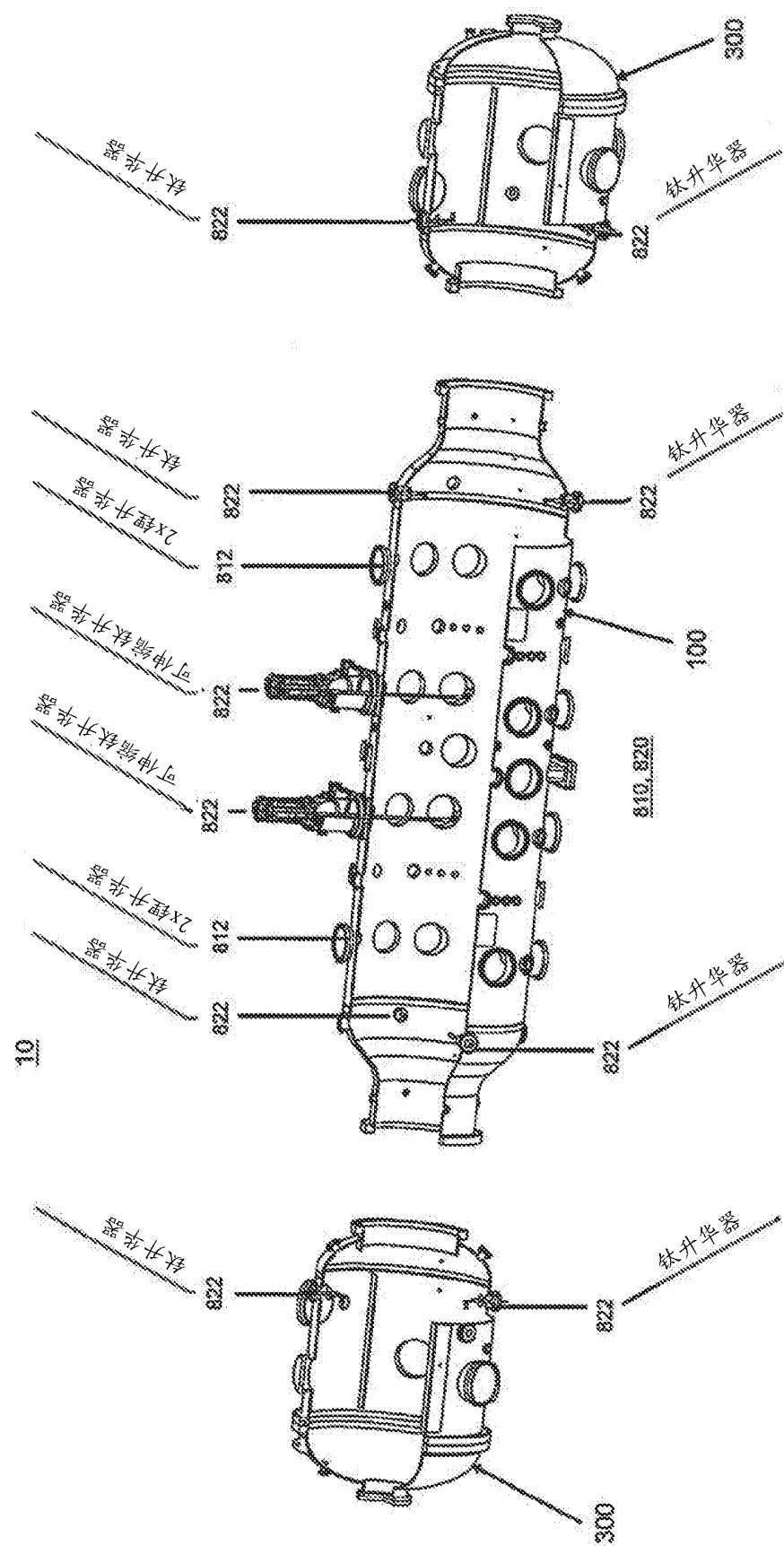


图9

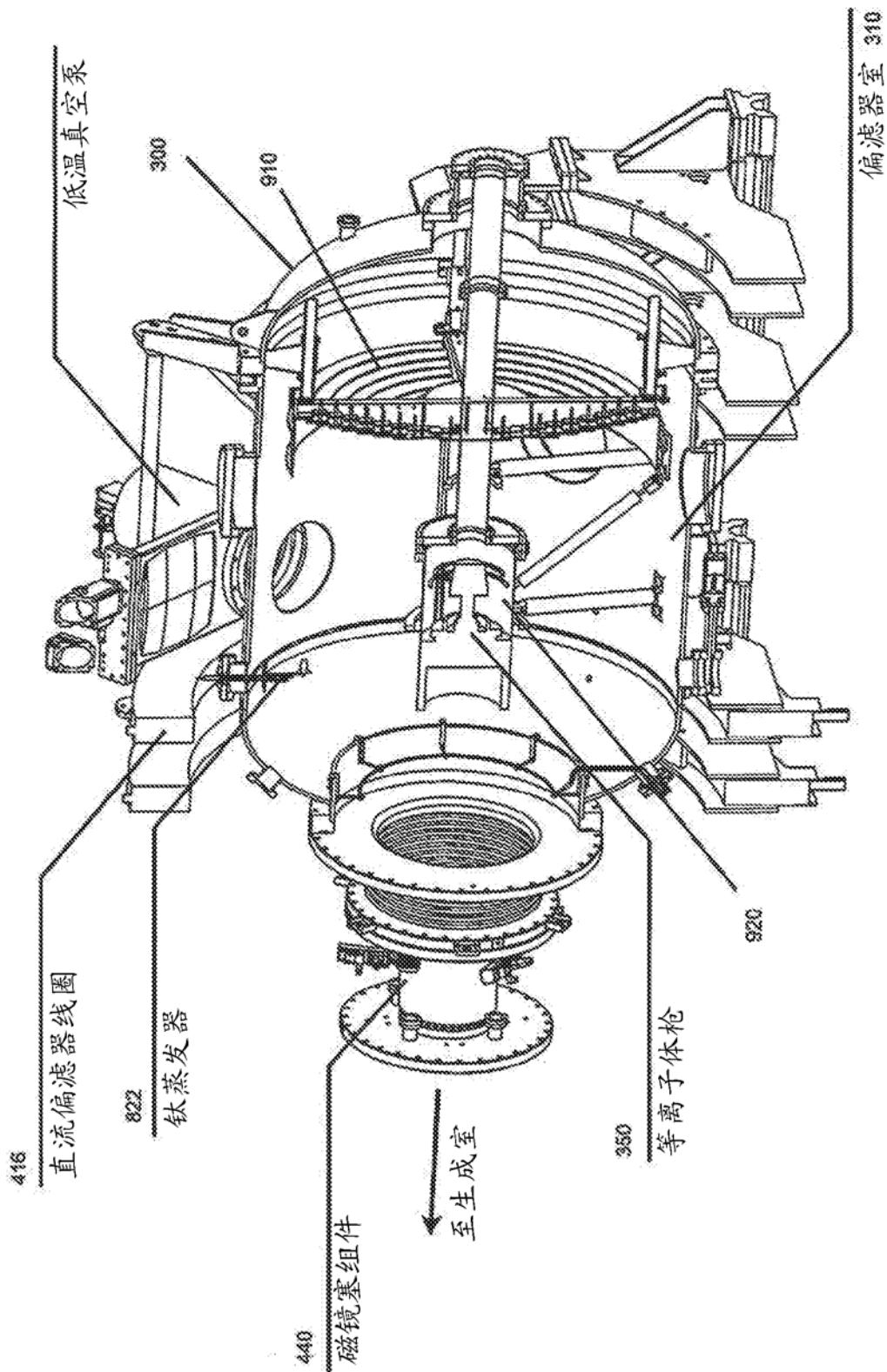


图 10

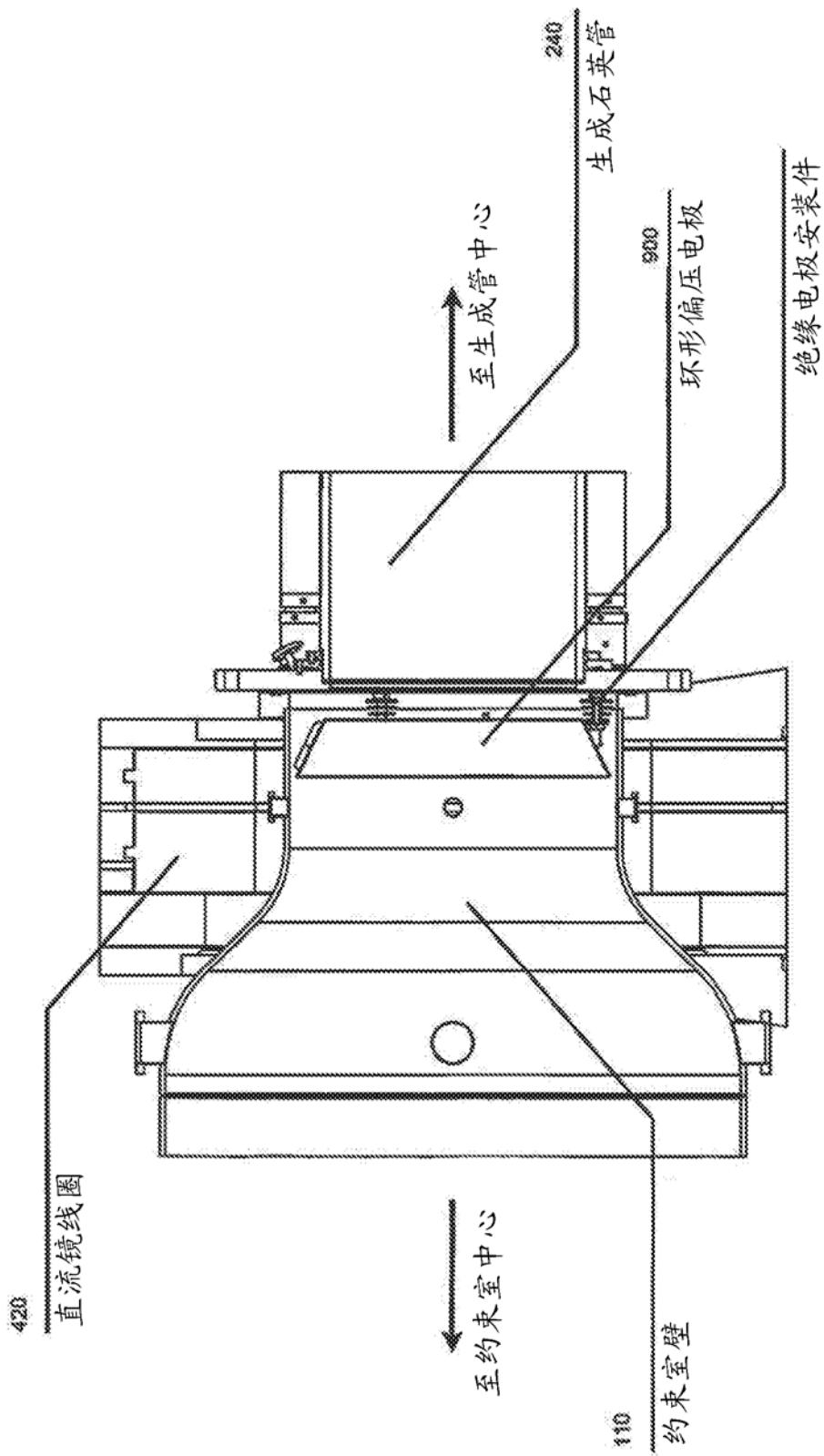


图 11

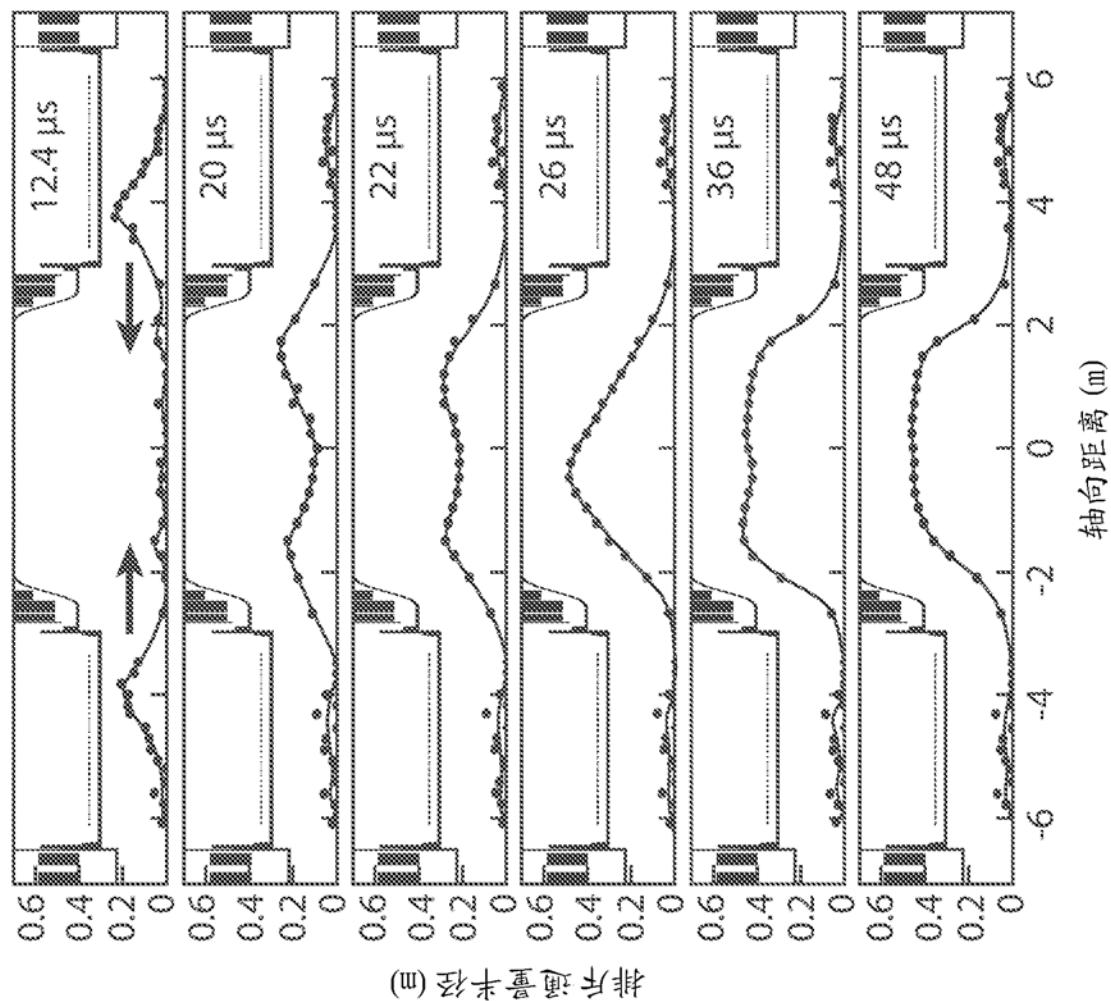


图 12

图 13A

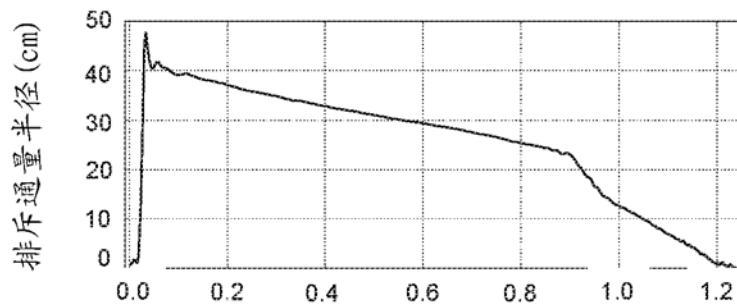


图 13B

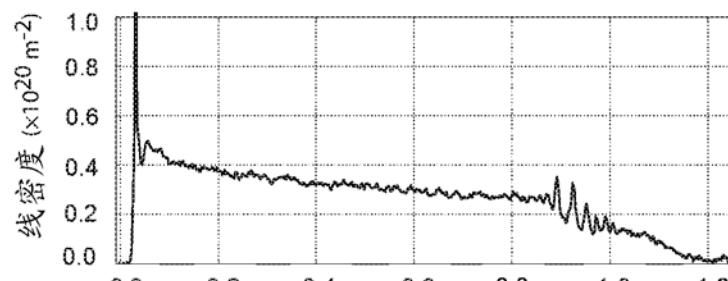


图 13C

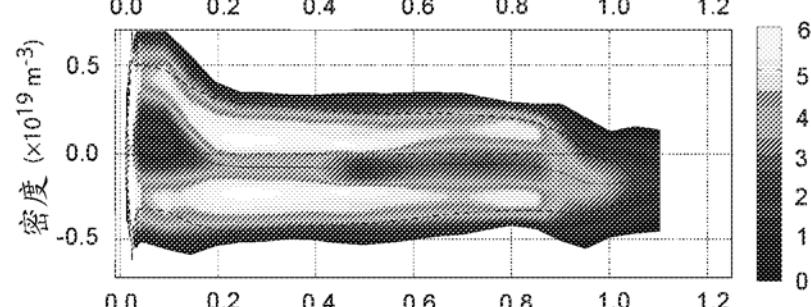
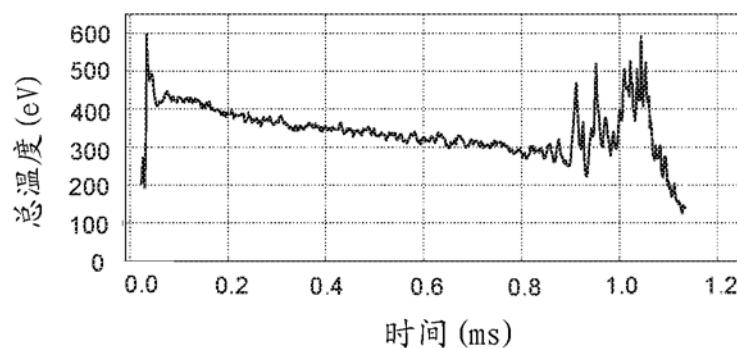


图 13D



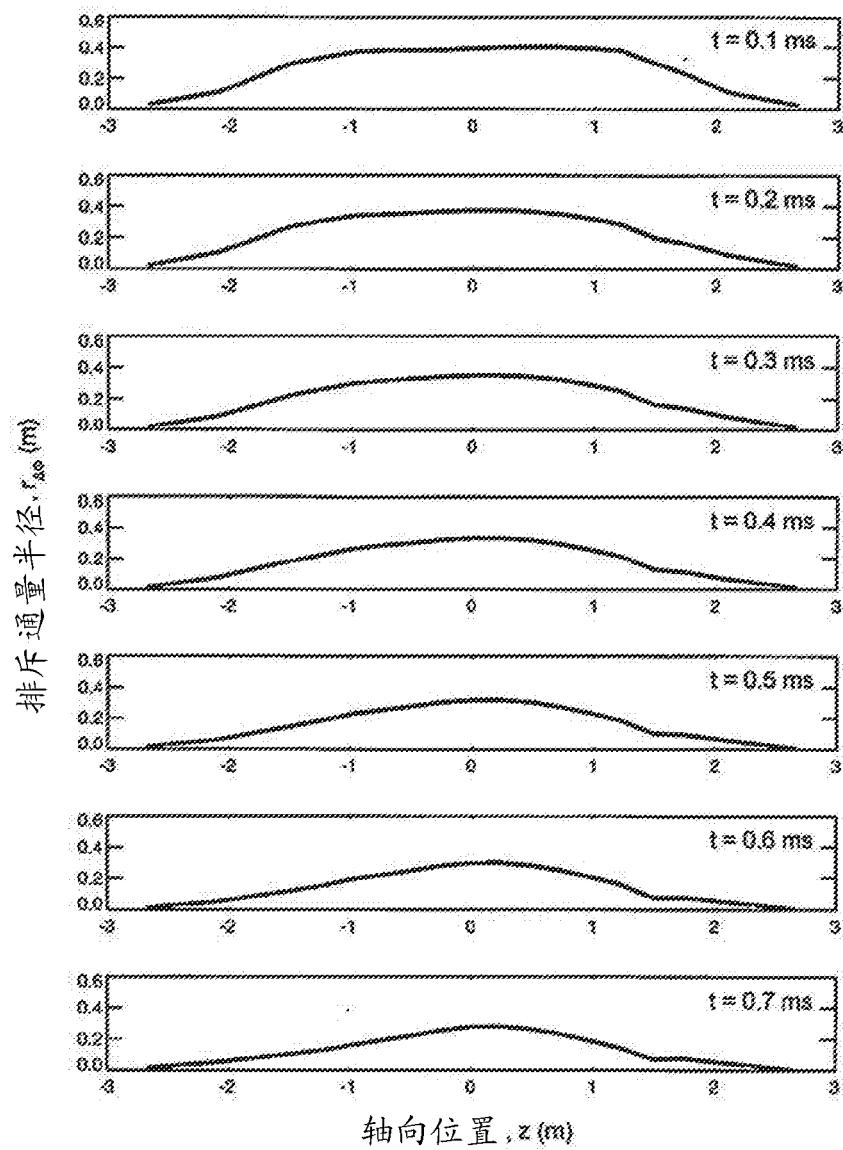


图 14

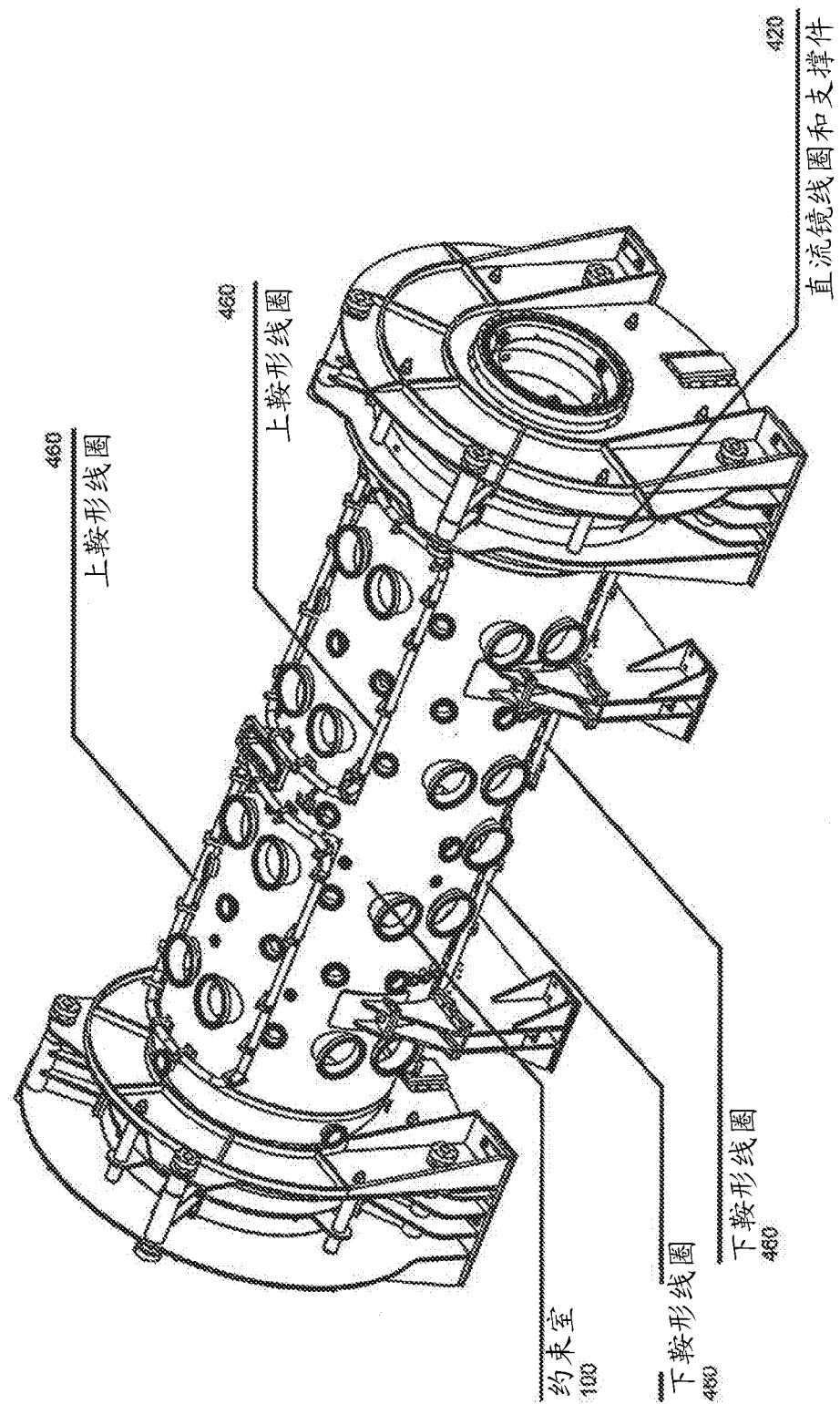


图 15

图 16A

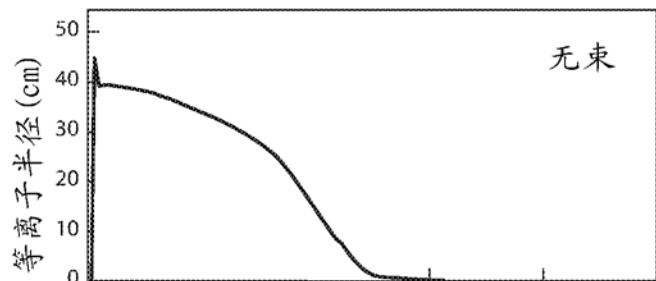


图 16B

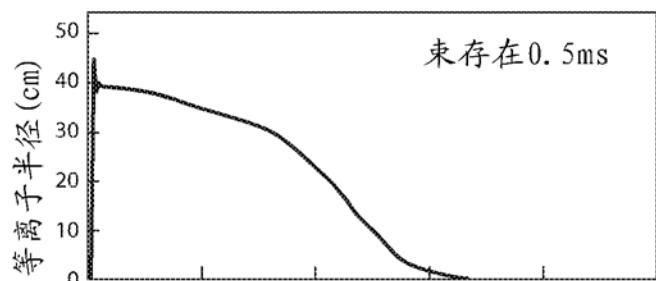


图 16C

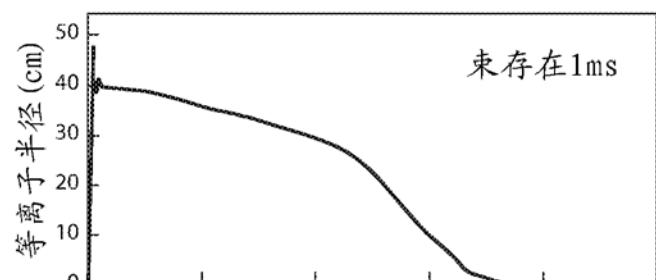


图 16D

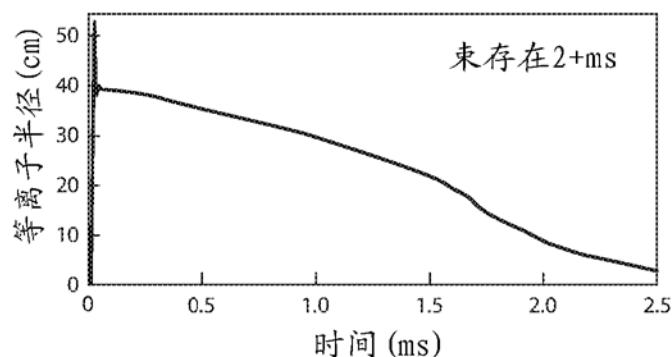


图 17A

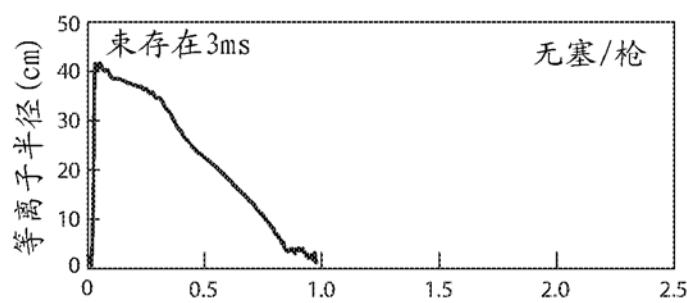


图 17B

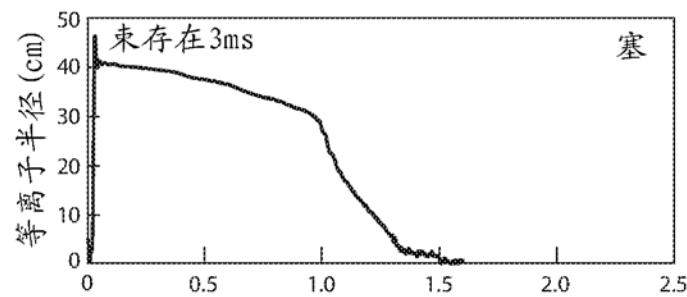


图 17C

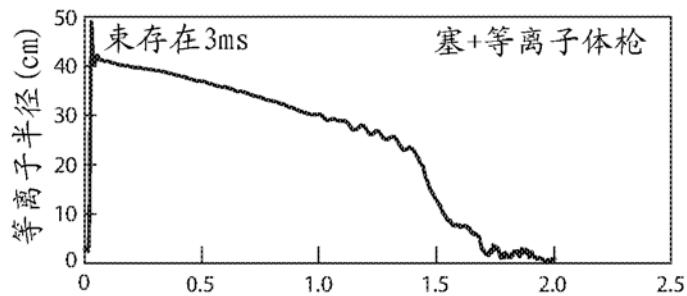


图 17D

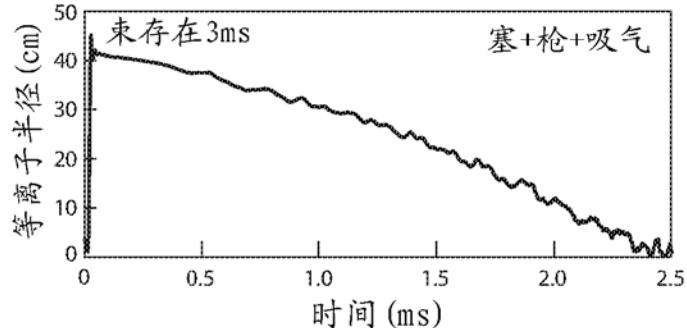


图 18A

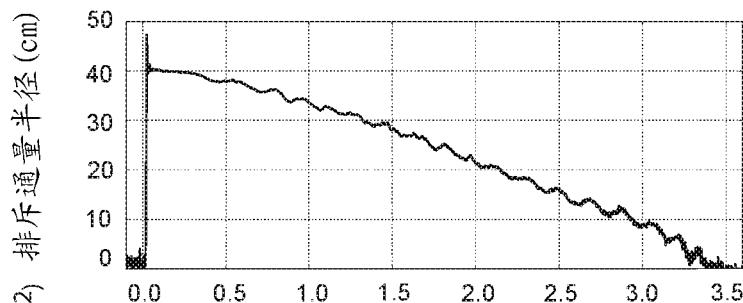


图 18B

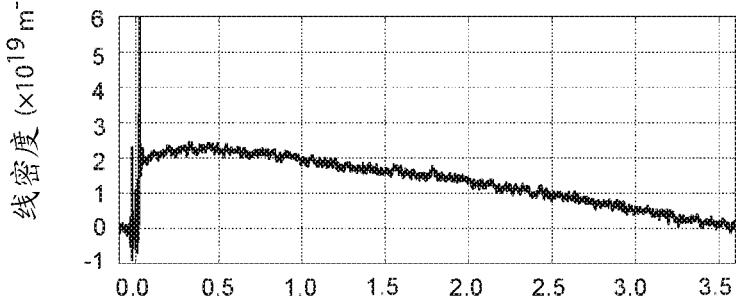


图 18C

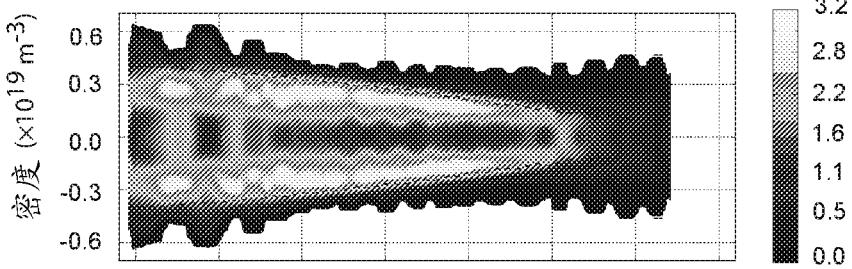
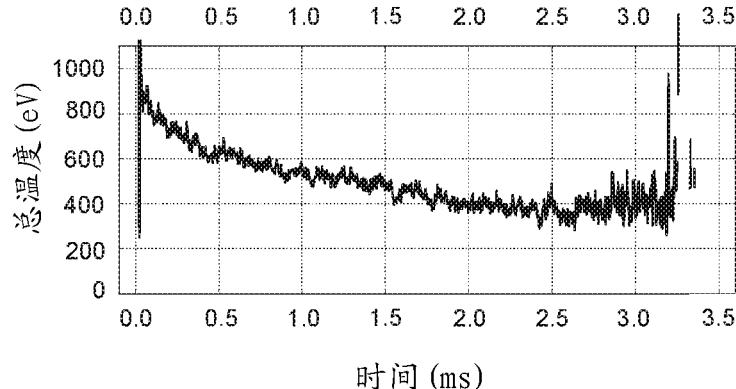
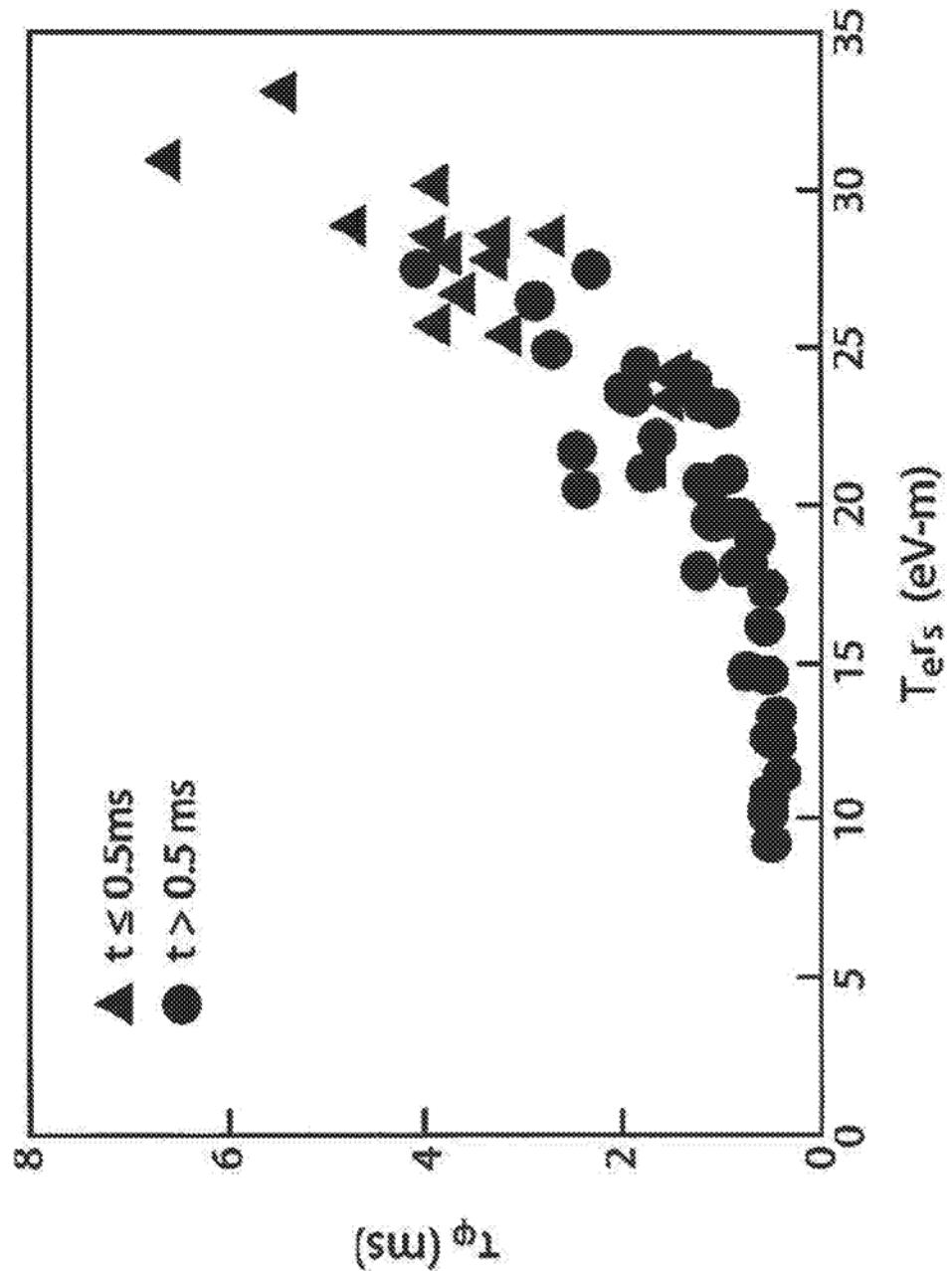


图 18D





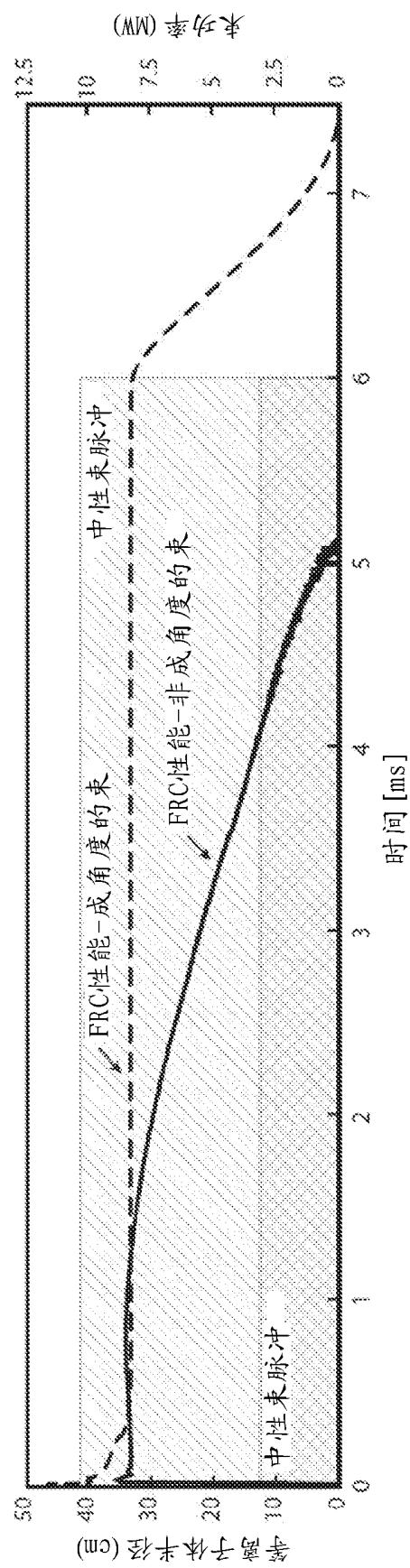


图 20

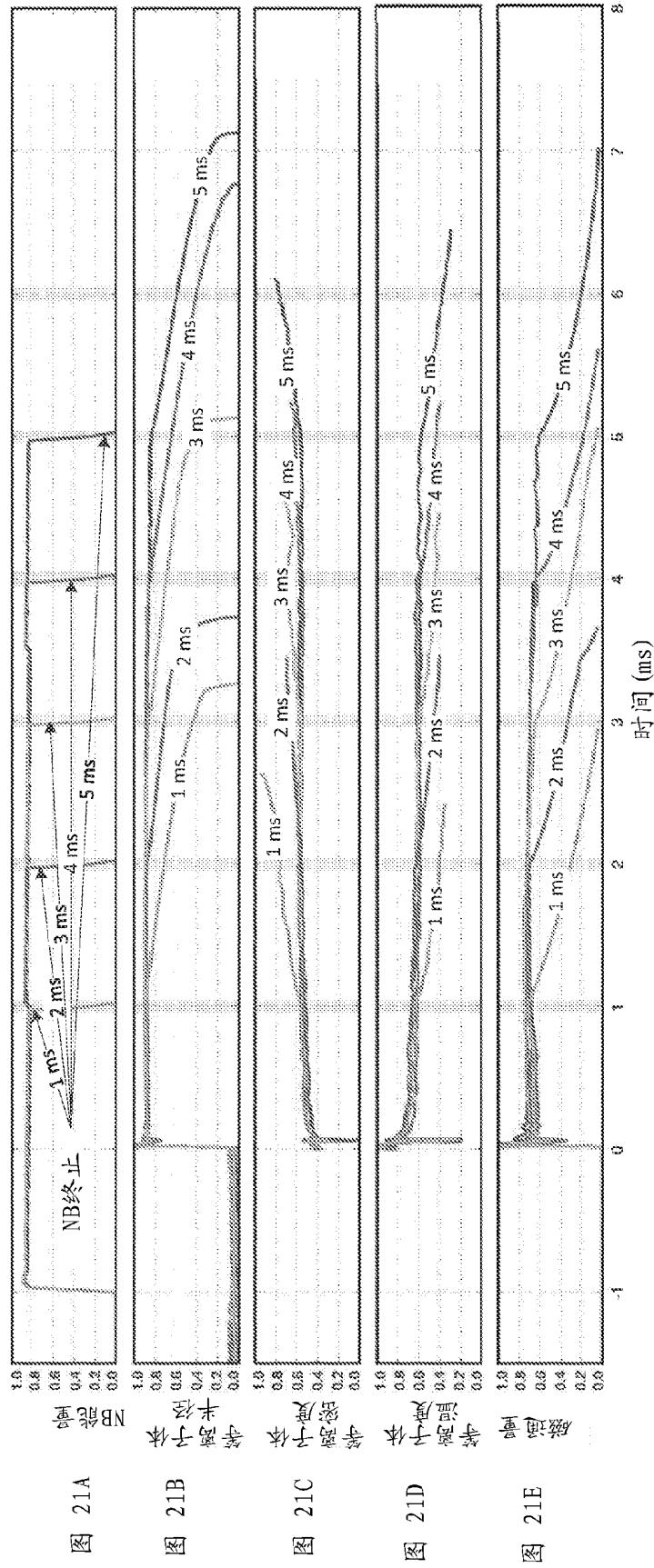


图 21A

图 21B

图 21C

图 21D

图 21E

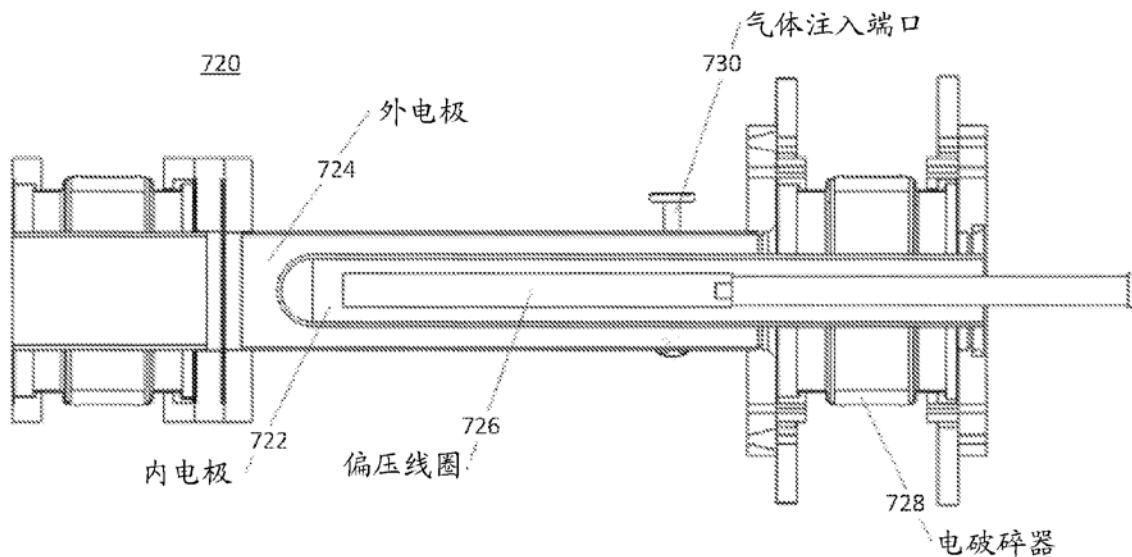


图 22A

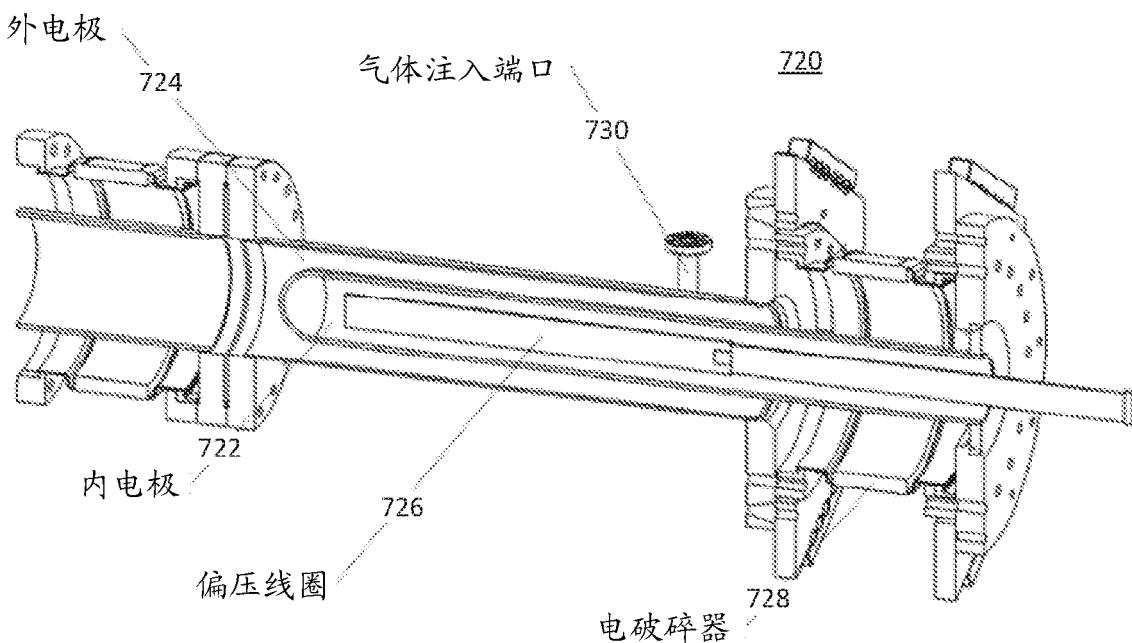


图 22B

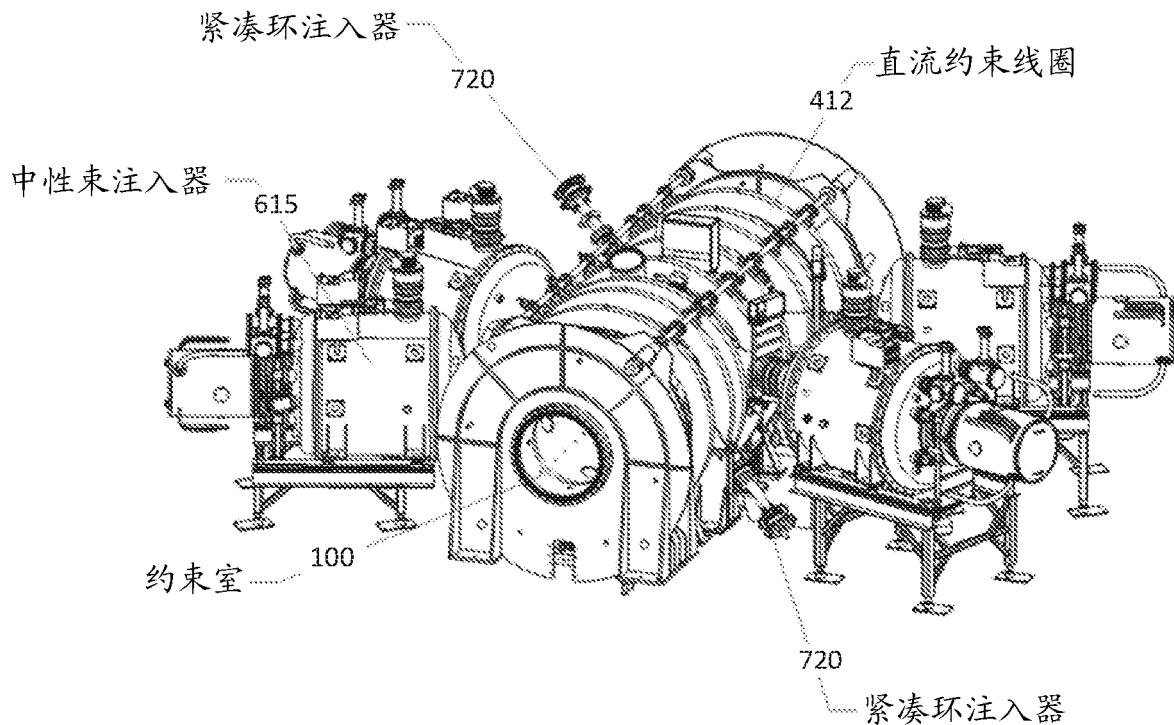


图 23A

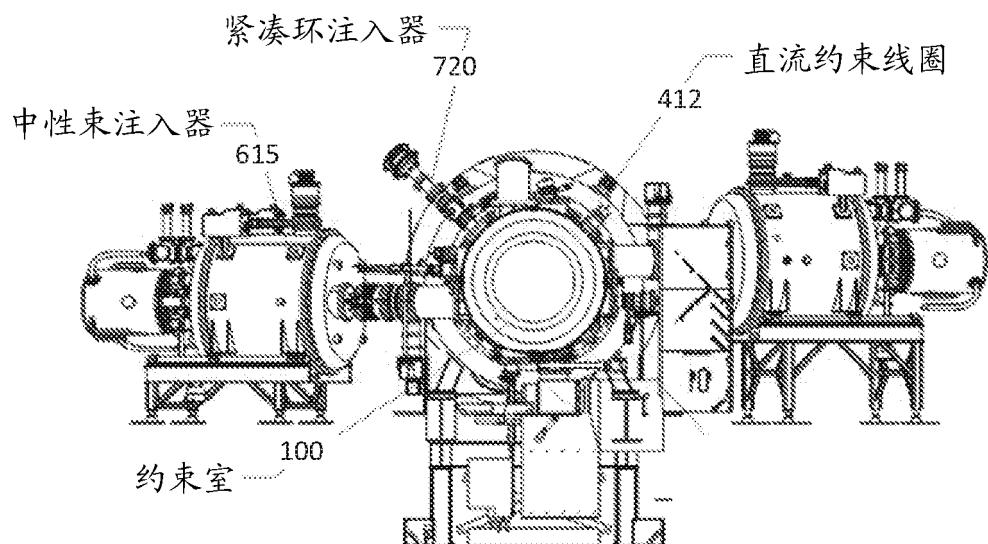


图 23B

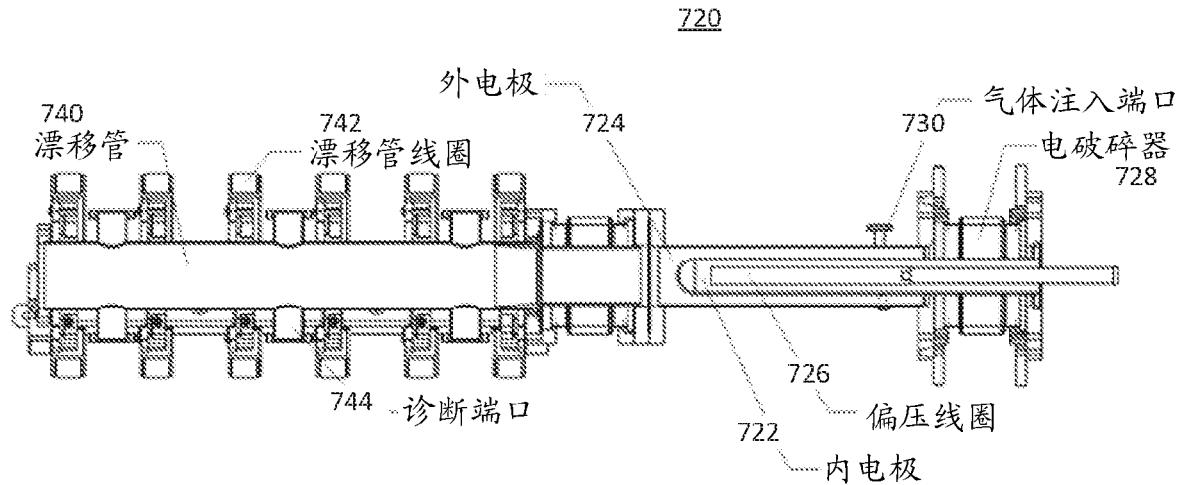


图 24A

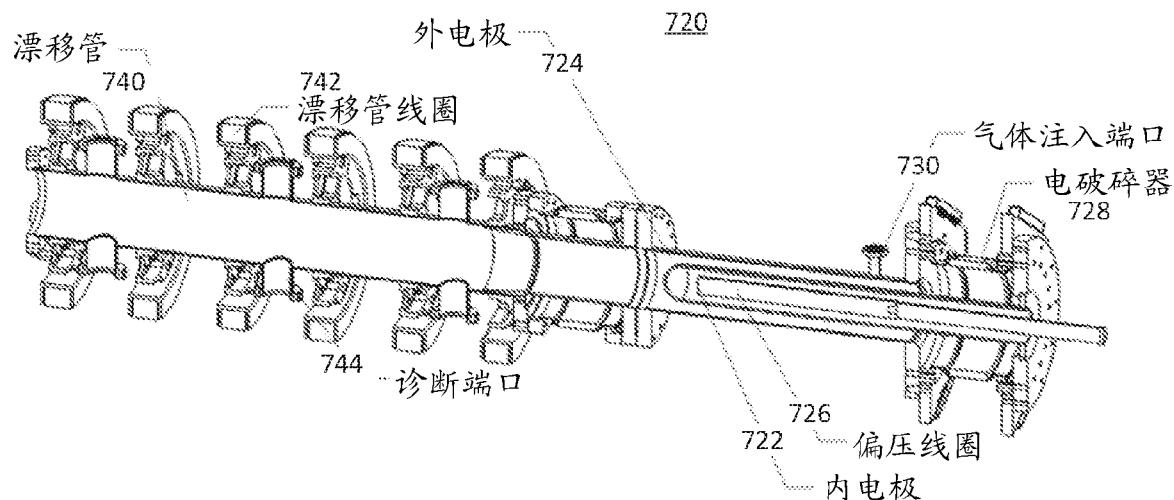


图 24B

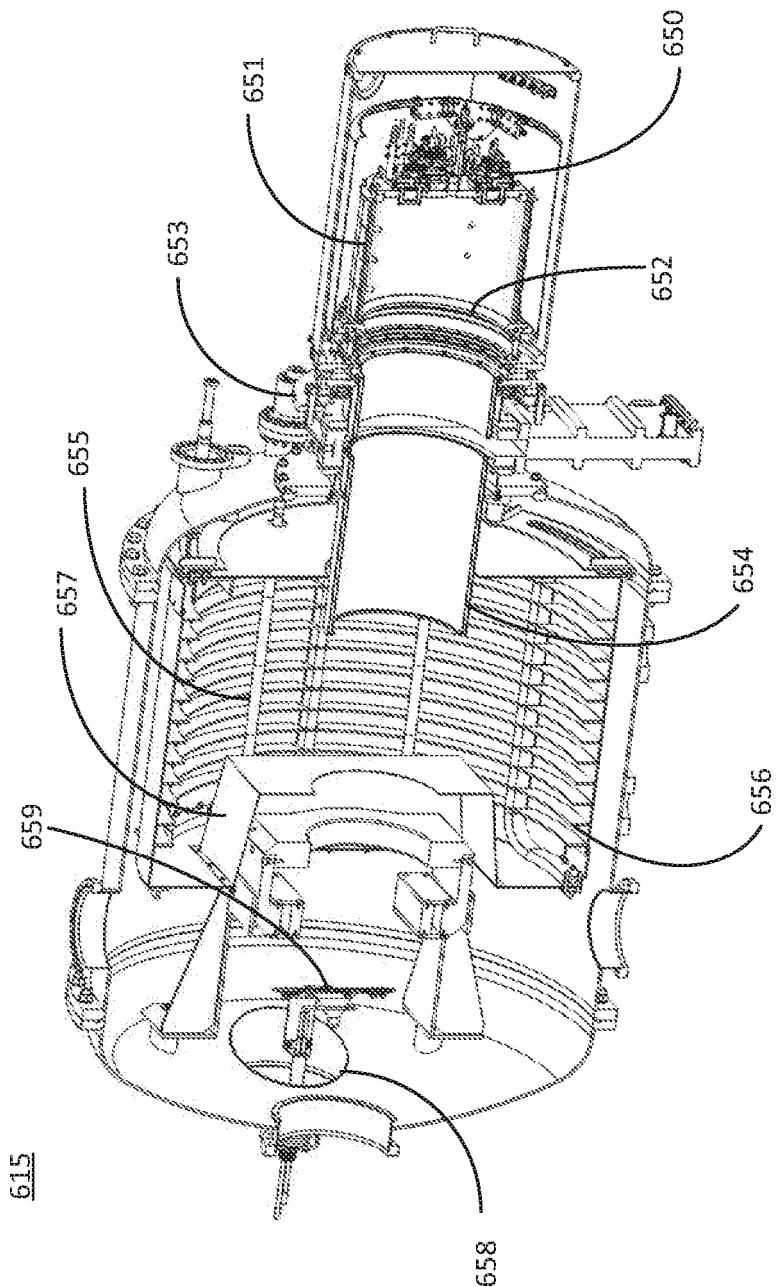


图 25

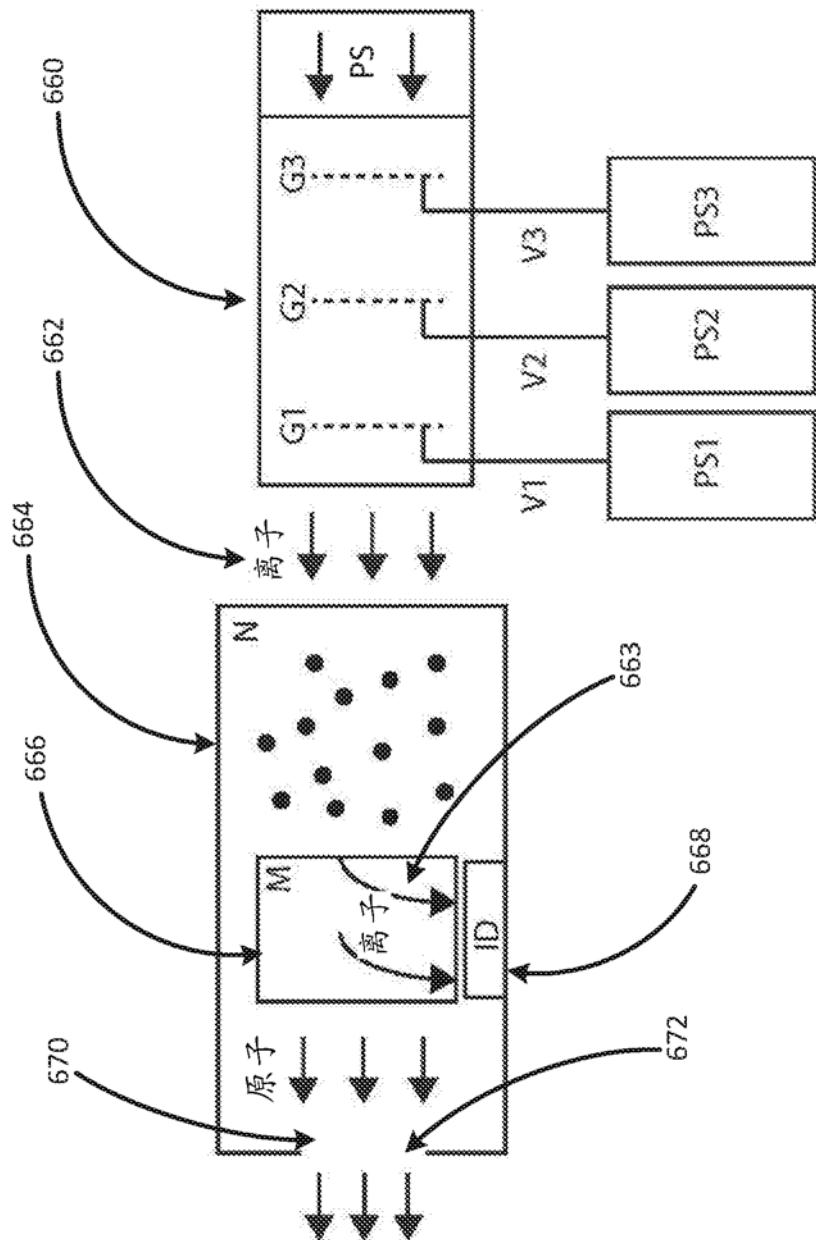


图 26

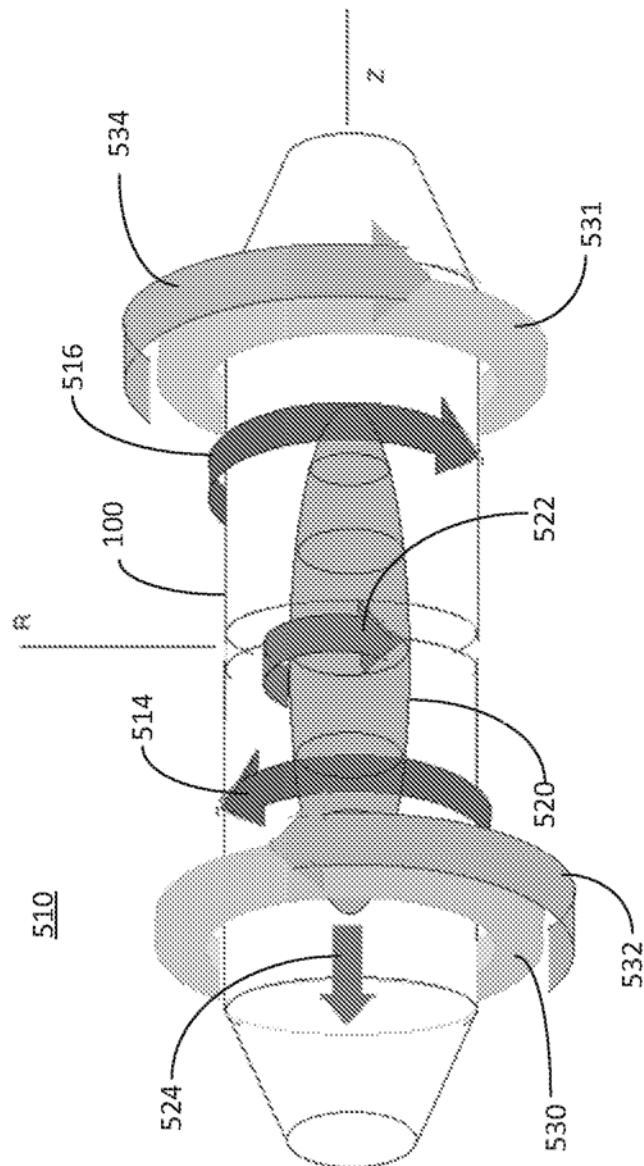


图 27

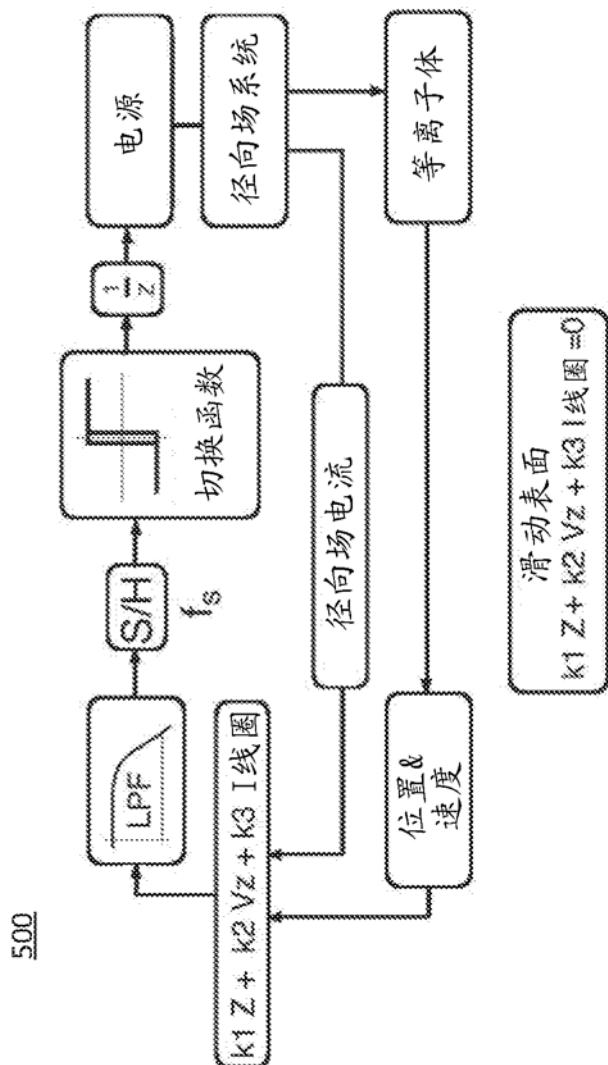


图 28

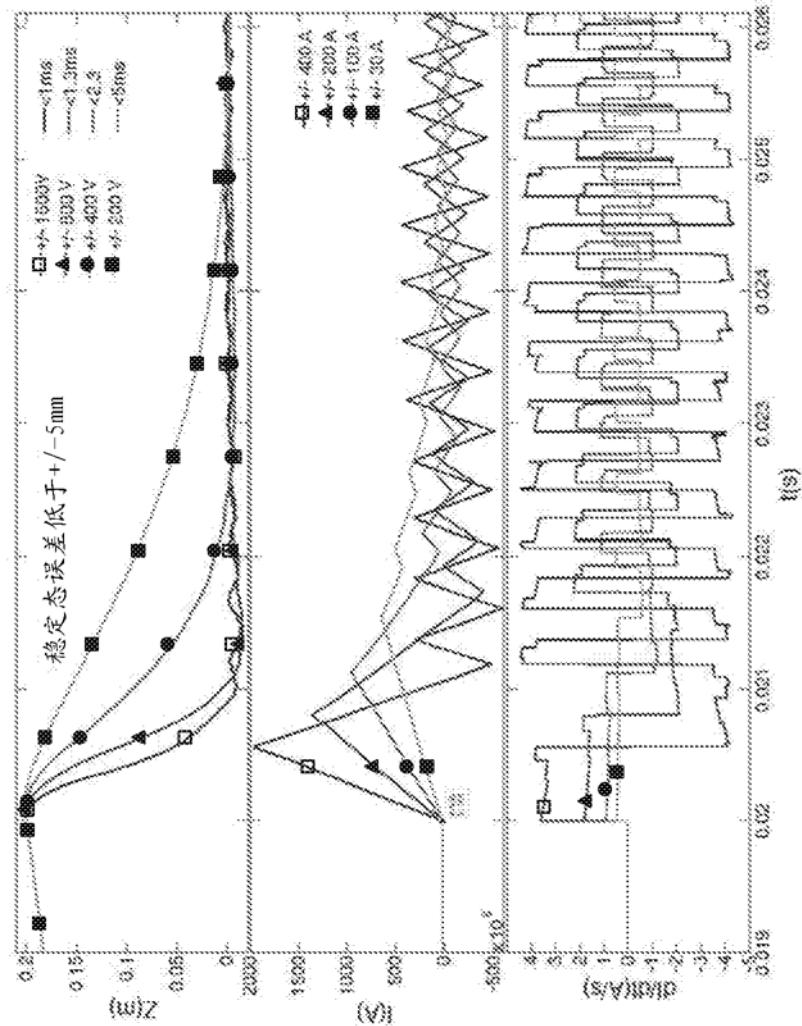


图 29

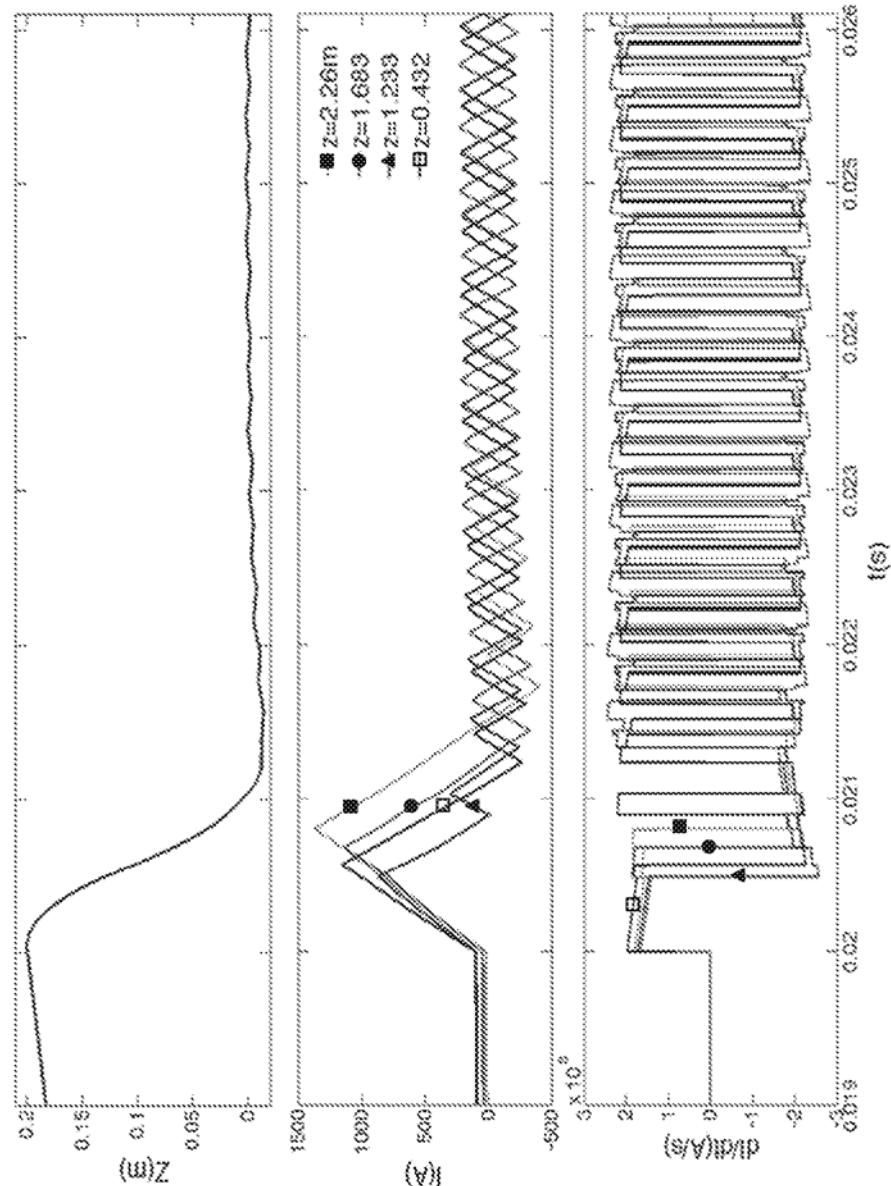


图 30