



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108352199 B

(45) 授权公告日 2022. 09. 09

(21) 申请号 201680066243.2

(22) 申请日 2016.11.13

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 108352199 A

(43) 申请公布日 2018.07.31

(30) 优先权数据
62/255258 2015.11.13 US
62/309344 2016.03.16 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2018.05.11

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/US2016/061730 2016.11.13

(87) PCT国际申请的公布数据
W02017/083796 EN 2017.05.18

(73) 专利权人 阿尔法能源技术公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 J.A.R.冈萨雷斯

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
72001

专利代理师 金飞 傅永霄

(51) Int.Cl.

G21B 1/05 (2006.01)

H05H 1/14 (2006.01)

H05H 1/16 (2006.01)

G21B 1/00 (2006.01)

G21B 1/11 (2006.01)

G21D 7/00 (2006.01)

H05H 1/12 (2006.01)

审查员 卓晓峰

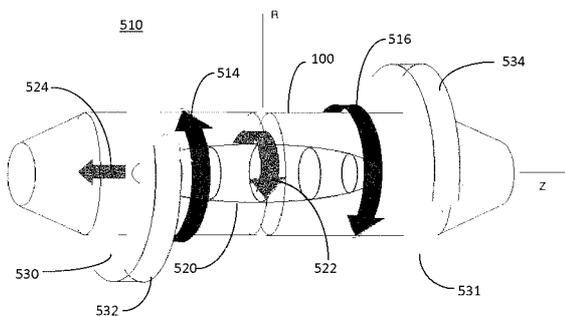
权利要求书2页 说明书19页 附图29页

(54) 发明名称

用于FRC等离子体位置稳定性的系统和方法

(57) 摘要

用于促进FRC等离子体在径向和轴向两个方向上的稳定性以及沿着FRC等离子体室的对称轴线对FRC等离子体的轴向位置控制的系统和方法。该系统和方法利用FRC的轴向不稳定均势来增强径向稳定性,同时稳定或者控制轴向不稳定性。该系统和方法通过作用在施加于与等离子体同心的一组外部线圈的电压上并且使用非线性控制技术,独立于等离子体均衡的稳定性而提供FRC等离子体轴向位置的反馈控制。



1. 一种用于稳定反场构型等离子体的方法,包括如下步骤:

在约束室中围绕旋转的等离子体形成反场构型磁场,以形成沿着所述约束室的纵向轴线邻近所述约束室的中间平面定位的反场构型等离子体,

通过调节所施加的磁场以在所述反场构型等离子体中引起径向稳定性和轴向稳定性,沿正交于所述纵向轴线的径向方向稳定所述反场构型等离子体,以关于所述纵向轴线轴对称地定位所述反场构型等离子体,以及

通过产生第一和第二径向磁场,沿着所述纵向轴线沿轴向方向稳定所述反场构型等离子体,其中,所述第一和第二径向磁场与反场构型相互作用以轴向地移动所述反场构型等离子体,以关于所述中间平面轴对称地定位所述反场构型等离子体。

2. 如权利要求1所述的方法,还包括在所述室内用围绕所述室延伸的准直流线圈产生所施加的磁场的步骤。

3. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述第一和第二径向磁场关于所述中间平面是反对称的。

4. 如权利要求3所述的方法,其特征在于,所述第一和第二径向磁场由于沿相反方向在围绕所述约束室定位的第一和第二径向线圈中感生的电流而产生。

5. 如权利要求1到4中任一项所述的方法,其特征在于,稳定所述反场构型等离子体的所述步骤包括监视所述等离子体的位置。

6. 如权利要求5所述的方法,其特征在于,监视所述等离子体的位置的步骤包括监视与所述反场构型等离子体相关的磁性测量值。

7. 如权利要求5所述的方法,还包括在所述第一和第二径向线圈中测量电流的步骤。

8. 如权利要求7所述的方法,还包括监视所述反场构型等离子体的速度的步骤。

9. 如权利要求1到4中任一项所述的方法,还包括通过从中性粒子束注入器以向着所述约束室的所述中间平面的角度将快中性原子的束注入所述反场构型等离子体,以及将紧凑等离子体环注入反场构型来将反场构型保持在恒定值或恒定值附近没有衰退。

10. 如权利要求9所述的方法,还包括在所述室的相对端部内用围绕所述室的相对端部延伸的准直流磁镜线圈产生磁镜磁场的步骤。

11. 如权利要求1到4中任一项所述的方法,其特征在于,形成所述反场构型的所述步骤包括在联接到所述约束室的端部上的形成部分中形成反场构型,以及向着所述室的所述中间平面加速所述形成反场构型以形成所述反场构型。

12. 如权利要求11所述的方法,其特征在于,形成所述反场构型的所述步骤包括在联接到所述约束室的第二端部上的第二形成部分中形成第二形成反场构型,以及向着所述室的所述中间平面加速所述第二形成反场构型,其中两个形成反场构型合并以形成所述反场构型。

13. 如权利要求11所述的方法,其特征在于,形成所述反场构型的所述步骤包括以下的其中一个:在向着所述室的所述中间平面加速所述形成反场构型时形成反场构型,以及形成反场构型然后向着所述室的所述中间平面加速所述形成反场构型。

14. 如权利要求12所述的方法,还包括将所述反场构型的磁通量表面引入联接到所述第一和第二形成部分的端部上的偏滤器的步骤。

15. 如权利要求1到4中任一项所述的方法,还包括用吸气系统调节所述室的内表面、形

成部分和偏滤器的步骤。

16. 如权利要求15所述的方法,其特征在于,所述吸气系统包括钛沉积系统和锂沉积系统的其中一个。

17. 如权利要求1到4中任一项所述的方法,还包括从轴向安装的等离子体枪将等离子体轴向地注入所述反场构型的步骤。

18. 如权利要求1到4中任一项所述的方法,还包括在所述反场构型的边缘层中控制径向电场轮廓的步骤。

19. 如权利要求18所述的方法,在所述反场构型的边缘层中控制所述径向电场轮廓的所述步骤包括用偏置电极将电势分布施加至所述反场构型的一组开口通量表面。

20. 一种用于产生并稳定具有反场构型的磁场的系统,包括:

约束室,

联接到所述约束室上的第一和第二正好相对的反场构型形成部分,所述形成部分包括用于产生反场构型并使所述反场构型向着所述约束室的中间平面移动模块化形成系统,

联接到所述第一和第二形成部分上的第一和第二偏滤器,

可操作地连接到所述第一和第二偏滤器、所述第一和第二形成部分以及所述约束室上的第一和第二轴向等离子体枪,

多个中性原子束注入器,其联接到所述约束室上,并且定向成以小于正交于所述约束室的纵向轴线的角度向着所述约束室的中间平面注入中性原子束,

磁性系统,其包括围绕所述约束室、所述第一和第二形成部分以及所述第一和第二偏滤器定位的多个准直流线圈,第一和第二组准直流磁镜线圈定位在所述约束室和所述第一和第二形成部分之间,并且第一和第二磁镜塞定位在所述第一和第二形成部分和所述第一和第二偏滤器之间,

联接到所述约束室和所述第一和第二偏滤器上的吸气系统,

第一和第二组径向磁场线圈,其配置成在室内产生第一和第二径向磁场,以及

可操作地联接到所述准直流线圈和所述第一和第二径向磁场线圈上的控制系统,所述控制系统包括联接到非易失性存储器上的处理器,非易失性存储器包括多个指令,所述多个指令在被执行时导致所述处理器调节由所述多个准直流线圈和所述第一和第二径向磁场线圈产生的磁场,从而通过调节所施加的磁场以在所述反场构型等离子体中引起径向稳定性和轴向稳定性,在正交于所述室的纵向轴线的径向方向上稳定反场构型等离子体,从而关于所述纵向轴线轴对称地定位所述反场构型等离子体,且通过产生第一和第二径向磁场,沿着所述纵向轴线在轴向位置上稳定所述反场构型等离子体,其中,所述第一和第二径向磁场与反场构型相互作用以轴向地移动所述反场构型等离子体,从而关于所述中间平面轴对称地定位所述反场构型等离子体。

21. 如权利要求20所述的系统,其特征在于,所述系统构造成产生反场构型并在中性原子束被注入所述反场构型时将所述反场构型维持于恒定值或其附近没有衰退。

22. 如权利要求20所述的系统,其特征在于,所述第一和第二径向磁场关于所述中间平面是反对称的。

用于FRC等离子体位置稳定性的系统和方法

技术领域

[0001] 本文描述的主题总体涉及具有反场构型 (FRC) 的磁性等离子体约束系统, 且更特别地, 涉及促进FRC等离子体在径向和轴向两个方向上的稳定性以及沿着FRC等离子体约束室的对称轴线对FRC等离子体位置的控制的系统和方法。

背景技术

[0002] 反场构型 (FRC) 属于称作紧凑等离子体环 (CT) 的磁性等离子体约束拓扑类别。其主要呈现极向磁场并具有为零或者小的自生环向磁场 (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建造和维护, 天然无限制的偏滤器用于促进能量提取和去灰, 以及非常高的 β (β 是FRC内平均等离子体压力对平均磁场压力的比值), 即高功率密度。高 β 特性对于经济的操作以及对于使用先进的、无中子燃料如D-He³和p-B¹¹是有利的。

[0003] FRC装置是封闭的、高真空的装置, 其依赖于磁场来约束高温等离子体, 尤其出于产生热核聚变能量的目的。磁场的分量必须由等离子体中的强环形电流产生, 其与由外部线圈对等离子体产生的磁场相互作用。与其他的磁性约束装置形成对比的是, FRC装置没有用来产生环向磁场的外部线圈。典型的FRC等离子体类似于回转椭面且其轴线沿着外部线圈轴线。椭面边界是等离子体分界面, 其限界紧凑等离子体环且其对称轴线沿着椭面的回转轴线。

[0004] 由于没有环向磁场, FRC等离子体倾向于轴对称分解, 如果不采取矫正措施, 这会导致增大的能量、密度以及约束损耗。最基础的不稳定性与FRC等离子体中等离子体流以与外部线圈电流相反的方向流动的事实相关, 该事实产生了沿着使等离子体流环与外部场对齐的方向做功的力矩 (倾斜不稳定性)。其他的轴对称分解涉及等离子体回转轴线径向移位 (径向变位), FRC腰部的椭圆形变形 (旋转模式) 组合径向变位和旋转 (摆动模式), 等离子体微观湍流以及其他。这些轴对称分解, 也称为等离子体不稳定性, 必须避免以便具有对等离子体质量和能量的良好约束。

[0005] 提出的沿径向方向实现稳定性的一种技术方案是基于如下事实, 即FRC均衡包含如下技术方案, 其中等离子体位置或者以在横向或径向方向上不稳定为代价而沿轴向方向稳定, 或者以轴向不稳定为代价而在径向方向上稳定, 但并不是同时两者都存在。在一阶近似条件下 (to the first order), 以轴向不稳定为代价, 其中等离子体位置横向稳定的均衡具有轴对称的期望特性。但是, 轴向位置不稳定性可以使用一组外部轴对称线圈主动控制来在轴向和径向方向都获得稳定性。

[0006] 根据前述内容, 因而期望的是提供系统和方法, 它们促进以独立于其均衡的轴向稳定性特性的方式来控制FRC等离子体的轴向位置。这是重要的, 因为在FRC放电的不同阶段上, 均衡可能必须在轴向稳定和与不稳定均衡之间转换, 例如在等离子体放电期间如果轴向不稳定性情境临时丧失并恢复。

发明内容

[0007] 本文提供的当前实施例针对系统和方法,它们促进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等离子体的均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。在一阶近似条件下,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均衡具有轴对称的期望特性。但是,轴向位置不稳定性使用控制FRC等离子体轴向位置的一组外部轴对称线圈来主动控制。

[0008] 本文呈现的实施例充分利用FRC的轴向不稳定均衡来增强径向稳定性,同时稳定或者控制轴向不稳定性。以这种方式,可以获得轴向和径向两个方向上的稳定性。控制方法设计成变更外部或均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向着中间平面恢复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和/或振荡。此技术方案的好处是其降低了用于控制所需的致动器的复杂度。与具有多个自由度的常规技术方案相比,本文呈现的实施例的方法降低了对于沿着具有一个自由度的FRC等离子体回转轴线的控制问题的复杂度。

[0009] 本文描述的系统和方法有利地提供了:通过作用在施加于与等离子体同心的一组外部线圈的电压上而对FRC等离子体轴向位置的反馈控制;使用非线性控制技术对于FRC轴向位置的反馈控制;以及,独立于等离子体均衡的稳定性特性对于FRC轴向位置的反馈控制。这是有利的独立性,因为在FRC放电的不同阶段上,均衡可能必须在轴向稳定和与不稳定均衡之间转换,例如在等离子体放电期间如果轴向不稳定性情境临时丧失并恢复。

[0010] 在查看以下附图以及详细描述之后,示例实施例的系统、方法、特征和好处对于本领域技术人员将变得显而易见。其意图在于所有此类附加的方法、特征和好处都被包括在此说明书内,并且由所附权利要求书保护。其意图也在于权利要求书不限于要求示例实施例的细节。

附图说明

[0011] 包括为本说明书的一部分的附图与以上给出的总体描述以及以下给出的示例实施例的详细描述一起说明了当前的示例实施例,用于解释并教导本发明的原理。

[0012] 图1图示了在当前FRC系统中在高性能FRC机制 (HPF) 下对在常规FRC机制 (CR) 下以及对其他常规FRC实验的粒子约束。

[0013] 图2图示了当前FRC系统的部件以及当前FRC系统中可产生的FRC的磁拓扑。

[0014] 图3A图示了当从顶部查看时当前FRC系统的基础布局,包括中性粒子束、电极、等离子体枪、磁镜塞和弹丸注入器的优选布置。

[0015] 图3B图示了当从顶部查看时的中心约束容器,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粒子束。

[0016] 图3C图示了当从顶部查看时的中心约束容器,并且显示了以小于正交于中心约束容器中的主对称轴线的角度布置并被引导向着中心约束容器的中间平面注入粒子的中性粒子束。图3D和3E图示了另一个备选构造。

[0017] 图4图示了用于形成部分的脉冲功率系统的部件的示意图。

[0018] 图5图示了单个脉冲功率形成网格的等距视图。

[0019] 图6图示了形成管组件的等距视图。

- [0020] 图7图示了中性粒子束系统和关键部件的部分横截面等距视图。
- [0021] 图8图示了在约束室上的中性粒子束布置的等距视图。
- [0022] 图9图示了钛和锂吸气系统的优选布置的部分横截面等距视图。
- [0023] 图10图示了安装在偏滤器室中的等离子体枪的部分横截面等距视图。还示出了相关的磁镜塞和偏滤器电极组件。
- [0024] 图11图示了在约束室轴向端部处的环形偏置电极的优选布局。
- [0025] 图12图示了在两个反场箍缩形成部分以及嵌入在中心金属约束室内的磁性探头处从一系列外部诊断回路获得的FRC系统中排除通量半径的演变。时间从形成源中同步场反转的时刻开始测量,且距离 z 相对于机器的轴向中间平面给出。
- [0026] 图13(a)到图13(d)图示了来自当前FRC系统上代表性非HPF、未受支持的放电的数据。示出为时间的函数的是(a)在中间平面处的排除通量半径,(b)来自中间平面CO₂干涉仪的线集成密度的6条弦,(c)来自CO₂干涉仪数据的阿贝尔反转密度径向轮廓,以及(d)来自压力平衡的总等离子体温度。
- [0027] 图14图示了对于图13中所示的当前FRC系统的相同放电在选定时刻的排除通量轴向轮廓。
- [0028] 图15图示了安装在约束室外侧的鞍形线圈的等距视图。
- [0029] 图16图示了FRC寿命和注入中性粒子束的脉冲长度的相互关联。如图所示,更长的束脉冲产生了更长存活的FRC。
- [0030] 图17图示了FRC系统的不同部件对于FRC性能和HPF机制的达成的单独和组合影响。
- [0031] 图18(a)到图18(d)图示了来自当前FRC系统上代表性HPF、未受支持的放电的数据。示出为时间的函数的是(a)在中间平面处的排除通量半径,(b)来自中间平面CO₂干涉仪的线集成密度的6条弦,(c)来自CO₂干涉仪数据的阿贝尔反转密度径向轮廓,以及(d)来自压力平衡的总等离子体温度。
- [0032] 图19图示了作为电子温度(T_e)的函数的通量约束。其呈现了对于HPF放电新建立的优异定标机制的图形化图示。
- [0033] 图20图示了对应于非成角度的和成角度的注入中性粒子束的脉冲长度的FRC寿命。
- [0034] 图21A和图21B图示了紧凑等离子体环(CT)注入器的基础布局。
- [0035] 图22A和图22B图示了示出安装到其上的CT注入器的中心约束容器。
- [0036] 图23A和23B图示了具有联接到其上的漂移管的CT注入器的一个备选实施例的基本布局。
- [0037] 图24是图示约束容器(CV)内FRC等离子体的轴向位置控制机构的示意图。
- [0038] 图25是通用滑动模式控制方案的流程图。
- [0039] 图26是滑动模式轴向位置控制模拟的示例的合成图。
- [0040] 图27是滑动模式轴向位置控制模拟的示例的合成图。
- [0041] 应该注意到附图并不一定按比例绘制,且贯穿附图类似结构的元件或功能通常由相似标号代表。还应该注意附图仅意图促进描述本文描述的不同实施例。附图并不一定描述本文公开的教导的每个方面并且不限制权利要求书的范围。

具体实施方式

[0042] 本文提供的当前实施例针对系统和方法,它们促进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等离子体的均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。现在将参考附图以进一步的细节描述本文所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许多这些附加的特征和教导。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,以下详细描述中公开的特征和步骤的组合不一定以最宽的意义实践本发明,并且相反地仅教导来特别地描述本教导的代表性示例。

[0043] 此外,代表性示例的各种特征以及从属权利要求可以以未具体且明确列举的方式组合,以便提供本教导的附加的有用实施例。此外,明确指出说明书和/或权利要求书中所公开的全部特征都意在出于原始公开的目的、并出于独立于实施例和/或权利要求书中的特征组成来限定所要求保护主题的目的而彼此分离且独立地公开。还要明确指出的是,出于原始公开的目的并出于限定所要求保护主题的目的,所有的值范围或者实体组的标示都公开了每个可能的中间值或者中间实体。

[0044] 对于FRC不稳定性的常规技术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,或者以轴向上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。在一阶近似条件下,以轴向上不稳定为代价,其中等离子体位置横向或径向稳定的均衡具有为轴对称的期望特性。考虑到前述内容,本文提供的实施例针对系统和方法,它们促进FRC等离子体在径向和轴向两个方向上的稳定性,以及独立于FRC等离子体的均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。但是,轴向位置不稳定性使用控制FRC等离子体轴向位置的一组外部轴对称线圈来主动控制。通过作用在施加于与等离子体同心的一组外部线圈上的电压上并使用非线性控制技术,该系统和方法独立于等离子体均衡的稳定性特性而提供FRC等离子体轴向位置的反馈控制。

[0045] 本文呈现的实施例利用FRC的轴向不稳定均衡来增强径向稳定性,同时稳定或者控制轴向不稳定性。以这种方式,可以获得轴向和径向两个方向上的稳定性。控制方法设计成变更外部或均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向着中间平面恢复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和/或振荡。此技术方案的好处是其降低了用于控制所需的致动器的复杂度。与具有多个自由度的常规技术方案相比,本文呈现的实施例的方法降低了对于沿着FRC等离子体回转轴线具有一个自由度的控制问题的复杂度。

[0046] 线圈电流中的波形、导致轴向不稳定等离子体的加料和中性粒子束功率的组合限定了等离子控制情境,该情境将等离子体置于轴向不稳定状况。该情境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均衡的反馈来预先编制。在放电期间等离子体位置应独立于均衡的稳定性特性被控制直至极限,例如,控制方案应该对于轴向稳定或者轴向不稳定的等离子体都有用。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)相当的生长时间。

[0047] 在转向促进FRC等离子体在径向和轴向两个方向上的稳定性以及FRC等离子体沿着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之前,提供对于用来形成

并保持与常规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提供了到一整系列应用的途径,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扫描)、紧凑光子源(用于化学生产和处理)、质量分离和浓缩系统、以及用于光核融合的反应器芯用于未来能量产生。

[0048] 已经开发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。这些努力已经导致突破性的发现以及本文所述的高性能FRC范例的开发。根据此新范例,当前系统和方法组合了大量新颖的理念和手段来如图1中所示显著地改善FRC约束,并提供没有负面副作用的稳定性控制。如以下更详细地讨论的那样,图1描绘了以下描述的FRC系统10中的粒子约束(见图2和图3),其与在其他实验中使用的根据用于形成并维持FRC的常规机制进行操作相比,并且与根据用于形成并维持FRC的常规机制的粒子约束相比,根据用于形成并维持FRC的高性能FRC (HPF) 机制进行操作。本发明公开将概述并详解FRC系统10和方法的创新性单个部件以及它们的综合效应。

[0049] FRC系统

[0050] 真空系统

[0051] 图2和图3描绘了当前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箍缩形成部分200围绕,并且在形成部分200之外,还有两个偏滤器室300,用来控制中性密度以及杂质污染。当前FRC系统10被建造来容纳超高真空并且以 10^{-8} 托的典型基础压力操作。这种真空压力要求使用配对部件之间的双泵配对凸缘、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修整,诸如物理和化学清洁,之后是24小时250 °C下真空烘培以及氢辉放电清洗。

[0052] 反场箍缩形成部分200是标准的反场箍缩(FRTPs),尽管以下讨论了先进脉冲功率形成系统(见图4到图6)。每个形成部分200都由标准不透明的工业级石英管制成,其特征在于2毫米的超纯石英内衬。约束室100由不锈钢制成,以允许多个径向和切向端口;其还用作以下描述的实验的时间尺度上的通量保存器(flux conserver)并限制快速磁性瞬变。用一组干式涡旋低真空泵、涡轮分子泵和低温抽气泵在FRC系统10内产生并保持真空。

[0053] 磁性系统

[0054] 图2和图3中图示了磁性系统400。除了其他特征,图2图示了可由FRC系统10产生的属于FRC 450的FRC磁通量和密度等位线(作为径向和轴向坐标的函数)。这些等位线通过2-D电阻Hall-MHD数字模拟而获得,该数字模拟使用被开发来模拟对应于FRC系统10的系统和方法、并且与测量的实验数据相当一致的代码。如图2中所见,FRC 450在分界面451内在FRC 450的内部453处包括闭合场线的环,以及正好在分界面451外侧在开口场线452上的环形边缘层456。边缘层456在FRC长度之外合并到射流454中,从而提供自然偏滤器。

[0055] 主磁性系统410包括沿着FRC系统10的部件位于特定轴向位置处的一系列准直流线圈412,414和416,即,沿着约束室100、形成部分200和偏滤器300。准直流线圈412,414和416由准直流开关电源供应,并且在约束室100、形成部分200和偏滤器300中产生大约0.1 T的基础磁性偏移场。除了准直流线圈412,414和416,主磁性系统410还在约束室100的任一端和邻近的形成部分200之间包括准直流磁镜线圈420(由开关电源供应)。准直流磁镜线圈420提供高达5的磁镜比,并且可以被独立地激励用于均衡形态控制。另外,磁镜塞(mirror plug) 440定位在每个形成部分200和偏滤器300之间。磁镜塞440包括紧凑准直流磁镜线圈

430和磁镜塞线圈444。准直流磁镜线圈430包括三个线圈432,434和436(由开关电源供应),它们产生附加的引导场来使磁通表面455向着穿过磁镜塞线圈444的小直径通道442聚焦。包绕小直径通道442并且由LC脉冲电源电路供应的磁镜塞线圈444产生高达4 T的强磁镜场。此整个线圈布置的目的是紧密束缚并且引导磁通表面455和端流等离子体射流454进入偏滤器300的远端室310。最后,一组鞍形线圈“天线”460(见图15)位于约束室100外,两个在中间平面的每侧上,并且由直流电源供应。鞍形线圈天线460可以构造成提供大约0.01 T的准静态磁偶极或者四极场,用于控制旋转不稳定性和/或电子流控制。取决于施加电流的方向,鞍形线圈天线460可灵活地提供关于机器的中间平面对称或者反对称的磁场。

[0056] 脉冲功率形成系统

[0057] 脉冲功率形成系统210以变更的箍缩原理操作。有两个系统,每个驱动其中一个形成部分200。图4到图6图示了形成系统210的主构件和布置。形成系统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(=滑轨)220,其各自激励束带组件230(=束带)的线圈232的子集,束带组件230包绕形成石英管240。每个滑轨220都包括电容221、电感223、快速大电流开关225和相关的触发器222以及转储电路(dump circuitry)224。总体上,每个形成系统210都存储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。这些部件的配合操作通过最先进的触发器以及控制系统222和224实现,触发器以及控制系统222和224允许形成系统210之间在每个形成部分200上的同步定时并且将切换抖动最小化至数十纳秒。此模块化设计的好处是其灵活的操作:FRC可以在现场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)。

[0058] 中性粒子束注入器

[0059] 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,单个束线包括中性原子束注入器系统610和640,它们位于中心约束室100周围并且切向于FRC等离子体(且垂直于或者以与中心约束容器100中的主对称轴线正交的角度)以碰撞参量注入快粒子,使得目标捕获区域很好地地位于分界面451内(见图2)。每个注入器系统610和640都能够将高达1 MW的中性粒子束功率注入具有20和40 keV之间粒子能的FRC等离子体。系统610和640基于正离子多孔提取源,并且利用几何聚焦、离子提取网格的惯性冷却和差动泵浦。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各自的安装位置,从而产生侧面和顶部注入能力。这些中性粒子束注入器的典型部件具体在图7中对于侧面注入器系统610进行了图示。如图7中所示,每个单独的中性粒子束系统610都包括位于输入端(这用系统640中的弧光源代替)的RF等离子体源612,且磁屏蔽614覆盖该端部。离子光源和加速网格616联接到等离子体源612上并且闸阀620定位在离子光源和加速网格616以及中和器622之间。偏转磁体624和离子转储628位于中和器622和位于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。

[0060] 用于中性原子束注入器600的一个备选构造是切向于FRC等离子体注入快粒子,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的构造。束注入器615的这些类型的定向示出在图3C中。另外,束注入器615可定向成使得束注入器615在中心约束容器100的中间平面的任一侧上向着中间平面注入它们的粒子。最终,这些束系统600的轴向位置可选择成更靠近中间平面。这些备选注入实施例促进更多的中心加料选项,其提供

束的更好的耦接以及被注入快粒子的更高的捕获效率。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性的更直接和独立的控制。例如,以相对于容器的主对称轴线浅的角度A注入束将产生具有更长的轴向伸展以及更低温度的FRC等离子体,而取更垂直的角度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和位置可以为不同的目的而优化。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沉积更多功率通常是更有利的)被注入到与否则要捕获这种束所需相比更低的磁场中。这是由于以下事实,即,是能量的方位角分量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减小而逐渐变得更小)。此外,向着中间平面成角度的注入并且随着轴向束位置靠近中间平面改善了束-等离子体耦合,即使在注入期间当FRC等离子体收缩或者另外轴向地缩短时也是如此。

[0061] 转向图3D和3E,另一个备选构造除了成角度的束注入器615还包括内偏滤器302。内偏滤器302定位在形成部分200和约束室100之间,并且大致类似于外偏滤器300构造和操作。其中包括快速开关磁性线圈的内偏滤器302在形成过程期间被有效地闲置,以使得当形成FRC向着约束室100的中间平面移动时,形成FRC能够穿过内偏滤器302。一旦形成FRC穿过了内偏滤器302进入约束室100,内偏滤器就被激活以大致类似于外偏滤器操作,并且将约束室100与形成部分200隔离。

[0062] 弹丸注入器

[0063] 为了提供注入新粒子和更好控制FRC存量粒子的手段,在FRC系统10上采用了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届核聚变科技座谈会议程,09/27到10/01(2010))。图3图示了弹丸注入器700在FRC系统10上的布局。圆柱形弹丸($D \sim 1 \text{ mm}$, $L \sim 1 - 2 \text{ mm}$)以在150-250 km/s范围中的速度注入FRC。每个单独的弹丸都包含大约 5×10^{19} 个氢原子,其与FRC存量粒子相当。

[0064] 吸气系统

[0065] 众所周知的是中性光环气体在所有约束系统中都是一个严重的问题。电荷交换和回收(从壁释放冷的杂质材料)过程会对能量和粒子约束具有毁灭性影响。另外,在边缘处或附近中性气体的任何大量密度都将导致注入大轨道(高能量)粒子的快速损耗或者至少其寿命的严重缩短(大轨道指的是粒子在FRC拓扑的级别上具有轨道,或者至少轨道半径远大于特征性磁场梯度长度级别)——这是对于所有高能等离子体应用不利的事实,包括通过辅助束加热的核聚变。

[0066] 表面修整是可以借助来控制或者减小约束系统中中性气体和杂质的不利影响的手段。为此目的本文提供的FRC系统10利用钛和锂沉积系统810和820,它们给约束室(或容器)100和偏滤器300以及302的面向等离子体表面涂覆钛和/或锂的薄膜(数十微米厚)。涂层通过气相沉积技术获得。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。源是具有引导喷嘴(在锂的情况下)822的原子炉或者具有引导护罩(在钛的情况下)812的加热固体球。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 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 以获得快速沉积速度。为了实现良好的壁覆盖,需要多个策略性定位的蒸发器/升华器系统。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浦原子和分子水成物类(H和D)。涂层也将诸如碳和氧的其他典型杂质减小到不明显的水平。

[0067] 磁镜塞

[0068] 如上所述, FRC系统10采用如图2和图3中所示的多组磁镜线圈420, 430和444。第一组磁镜线圈420位于约束室100的两个轴向端处并且独立于主磁性系统410的约束线圈412, 414和416激励。第一组磁镜线圈420主要帮助在合并期间引导且轴向地包含FRC 450, 并且在支持期间提供均衡成形控制。第一磁镜线圈组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(0.4到0.5T左右)。包括三个紧凑准直流磁镜线圈432、434和436的第二组磁镜线圈430位于形成部分200和偏滤器300之间, 并且由公共的开关电源驱动。磁镜线圈432, 434和436与更紧凑的脉冲磁镜塞线圈444(由电容性电源供应)以及物理收缩442一起形成磁镜塞440, 其提供具有极高磁场(在2到4T之间, 具有大约10到20毫秒的起发时间)的狭窄下气体引导路径。与约束线圈412, 414和416的计量加刻度(meter-plus-scale)孔和薄煎饼设计相比, 最紧凑的脉冲磁镜线圈444具有紧凑的径向尺寸、20cm的孔以及相似的长度。磁镜塞440的目的是多重的: (1) 线圈432, 434, 436和444紧密地束缚并且引导磁通表面452以及端流等离子体射流454进入远端偏滤器室300。这确保了排放粒子适当地到达偏滤器300并且有从中心FRC 450的开口场线452区域一直沿溯到偏滤器300的连续通量面455。(2) 线圈432, 434, 436和444通过其中的FRC系统10中的物理收缩442使得能够通过磁通表面452和等离子体射流454, 提供了对于来自位于偏滤器300中的等离子体枪350的中性气体流的阻碍。同样, 收缩442防止气体从形成部分200到偏滤器300的回流, 从而减少了当开始FRC的启动时必须引入整个FRC系统10的中性粒子的数量。(3) 由线圈432, 434, 436产生的强轴向磁镜减小了轴向粒子损耗并且因此减少了在开口场线上平行粒子扩散。

[0069] 在图3D和图3E中所示的备选构造中, 一组低剖面柱头线圈421定位在内偏滤器302和形成部分200之间。

[0070] 轴向等离子体枪

[0071] 来自安装在偏滤器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粒子束性能。如图3和图10中所示枪350安装在偏滤器300的室310内的轴线上, 并且产生沿着偏滤器300中的开口通量线452流动且流向约束室100的中心的等离子体。枪350在垫圈堆栈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离子化的等离子体5到10毫秒。枪350包括脉冲磁性线圈, 其与输出等离子体流匹配, 等离子体流在约束室100中具有等离子体的期望尺寸。枪350的技术参数的特征在于具有5到13厘米外径和高达大约10厘米内径的通道, 并且提供在400-600V下10-15kA的放电电流, 且枪内磁场为0.5到2.3T之间。

[0072] 枪等离子体流可以渗入磁镜塞440的磁场并且流入形成部分200和约束室100。通过使塞440更宽且更短, 通过磁镜塞400的等离子体传输的效率增加且枪350和塞440之间的距离减小。在合理的条件下, 枪350可以通过2到4 T的磁镜塞440各自输送大约 10^{22} 个质子/s, 分别具有大约150到300 eV和大约40到50 eV的高离子和电子温度。枪350提供FRC边缘层456的重要的加料, 以及改善的整体FRC粒子约束。

[0073] 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喷入来自枪350的等离子体流。此技术允许注入等离子体密度的数倍增加。在FRC系统10中, 气体箱安装在磁

镜塞440侧的偏滤器300上,改善了FRC边缘层456的加料、FRC 450的形成以及等离子体线捆(line-tying)。

[0074] 考虑到全部上述调整参数并且也考虑到可以用仅一个枪或者用两个枪的操作,非常明显的是可以利用宽的操作模式范围。

[0075] 偏置电极

[0076] 开口通量面的电偏置可以提供径向电势,这引起方位角 $E \times B$ 运动,这提供了一种控制机制,类似于旋转把手,来经由速度剪切来控制开口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不同部分中的不同电极。图3描绘了在FRC系统10内定位在优选位置处的偏置电极。

[0077] 原理上有4类电极:(1)约束室100中的点电极905,其与FRC 450的边缘中特定的开口场线452接触以提供局部放电,(2)约束室100和形成部分200之间的环形电极900,以便以方位角对称的方式给远边缘通量层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(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,从而层的选择是可控的),以及最终(4)等离子体枪350的阳极920(见图10)自身(其在FRC 450的分界面附近截断内开口通量面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。

[0078] 在所有情况下这些电极都由在高达大约800 V电压下的脉冲或者直流电源驱动。取决于电极尺寸以及截断的是什么通量面,电流可以在千安培范围内抽取。

[0079] FRC系统的无支持操作-常规机制

[0080] 在FRC系统10上的标准等离子体形成遵循发展完备的反场箍缩技术。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。脉冲功率形成系统210的RFTP脉冲功率电路之后驱动脉冲快速反转磁场线圈232来在形成部分200中产生大约-0.05 T的临时反转偏置。在这点上经由位于形成部分200的外端上的凸缘处的一组方位角定向的喷出谷(puff-valve),在9-20 psi下将预定量的中性气体注入由(北极和南极)形成部分200的石英管腔室240限定的两个形成体积中。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)场,以在中性气体柱内产生呈局部种子电离区域形式的预离子化。这继之以在驱动脉冲快速反转磁场线圈232的电流上施加西塔振荡调制(theta-ringing modulation),这导致气体柱更全局的预离子化。最终,脉冲功率形成系统210的主脉冲移动电源(power bank)被点燃以驱动脉冲快速反转磁场线圈232,从而产生高达0.4 T的前向偏置场。此步骤可以是时间序列的,使得贯穿形成管240的长度均匀地产生前向偏置场(静态形成),或者使得沿着形成管240的轴线实现连续蠕动场调制(动态形成)。

[0081] 在此整个形成过程中,等离子体中实际的场反转在大约 $5\mu\text{s}$ 内快速发生。被输送至形成等离子体的数千兆瓦的脉冲功率轻易地产生热的FRC,它们随后通过施加前向磁场的时序调制(磁蠕动),或者在靠近形成管210的轴向外端的线圈组232的最后面的线圈中临时增加的电流(形成轴向地指向约束室100的轴向磁场梯度),而从形成部分200注入。如此形成并加速的两个(北极和南极)形成FRC然后扩展到较大直径的约束室100中,这里准直流线圈412产生前向偏置场来控制径向扩展并且提供均衡的外部磁通量。

[0082] 一旦北极和南极形成FRC到达约束室100的中间平面附近,FRC就相撞。在相撞期间

北极和南极形成FRC的轴向动能随着FRC最终合并成单个FRC 450而大部分热能化。在约束室100中可使用一大组等离子体诊断法来研究FRC 450的均衡。FRC系统10中典型的操作条件产生具有大约0.4 m的分界面半径和大约3 m的轴向范围的复合FRC。进一步的特性是大约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。没有任何支持,即,没有通过中性粒子束注入或其他辅助手段的加热和/或电流驱动,这些FRC的寿命限于大约1 ms,固有特征构型衰减时间。

[0083] 无支持操作的实验数据-常规机制

[0084] 图12示出了排除通量半径 $r_{\Delta\phi}$ 的典型时间演变,其接近分界面半径 r_s ,以图示FRC 450的箍缩合并过程的动态变化。两个(北极和南极)单独的等离子体团同时产生并且之后以超音速 $v_z \sim 250 \text{ km/s}$ 被加速离开相应地的形成部分200,且在中间平面附近在 $z = 0$ 处相撞。在相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FRC 450的径向和轴向动态变化通过详细的密度轮廓测量以及基于辐射热计的断层摄影而显而易见。

[0085] 来自FRC系统10的代表性无支持放电的数据在图13中示出为时间的函数。FRC起始于 $t = 0$ 处。机器的轴向中间平面处的排除通量半径在图13(a)中示出。此数据从正好位于约束室的不锈钢壁内的一排磁性探头获得,它们测量轴向磁场。钢壁在此放电的时间标度上是良好的通量保存器(flux conserver)。

[0086] 图13(b)中示出了线积分密度,来自位于 $z = 0$ 处的6弦 $\text{CO}_2/\text{He-Ne}$ 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,阿贝尔变换产生了图13(c)的密度等位线。在第一个0.1 ms期间的一些轴向和径向晃动之后,FRC以空心的密度轮廓安定下来。此轮廓相当平坦,在轴线上具有相当大的密度,如典型的2-D FRC均衡所要求的那样。

[0087] 图13(d)中示出了总的等离子体温度,其源自压力平衡并且完全与汤姆森散射以及光谱学测量一致。

[0088] 来自整个排除通量排列的分析表明FRC分界面的形状(由排除通量轴向轮廓近似)逐步从跑道形向椭圆形演变。图14中所示的此演变与从两个到单个FRC的逐步磁性再连一致。实际上,粗略的估计暗示在此特定的时刻两个初始FRC磁通量的大约10%在相撞期间再连。

[0089] FRC长度在FRC寿命期间稳定地从3m缩短至大约1m。从图14可见的此缩短暗示主要是对流性的能量损耗支配了FRC约束。由于分界面内的等离子体压力下降得比外部磁性压力快,端部区域中的磁场线张力轴向地压缩FRC,从而重建轴向和径向均衡。对于图13和图14中所讨论的放电,FRC磁通量、存量粒子以及热能(分别为大约10 mWb, 7×10^{19} 个粒子以及7 kJ)在第一个毫秒内减少大约一个数量级,此时FRC均衡呈现消退。

[0090] 受支持的操作-HPF机制

[0091] 图12到图14中的示例是没有任何支持的衰退FRC的特性。但是,在FRC系统10上采用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。

[0092] 中性粒子束

[0093] 第一、快速(H)中性粒子垂直于 B_z 以来自八个中性粒子束注入器600的束注入。快速中性粒子的束从北极和南极形成FRC在约束室100中合并成FRC 450的时刻开始注入。主要由电荷交换产生的快速离子具有添加到FRC 450的方位角电流上的电子感应加速旗道

(具有在FRC拓扑的级别或者至少远大于特征磁场梯度长度级别的主半径)。在一部分放电后(在进入发射后0.5到0.8 ms),足够大的快速离子的数量极大地改善了内FRC的稳定性和约束特性(例如见M.W. Binderbauer和N. Rostoker, *Plasma Phys.* 56, 第3部分, 451 (1996))。此外,从支持的角度,来自中性粒子束注入器600的束也是驱动电流并且加热FRC等离子体的主要手段。

[0094] 在FRC系统10的等离子体机制中,快速离子主要在等离子体电子上减慢。在放电的早期部分,快速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明显的FRC加热。快速离子在分界面外产生大的径向偏移,因为内部FRC磁场天生低(对于0.1 T的外部轴向场平均大约0.03T)。快速离子将易受电荷交换损耗,如果中性气体密度在分界面外太高的话。因此,布置在FRC系统10上的壁吸气以及其他技术(诸如等离子体枪350和磁镜塞440,它们尤其促成气体控制)倾向于最小化边缘中性粒子并且使得能够实现快速离子流的所需累积。

[0095] 弹丸注入

[0096] 当在FRC 450内累积了大量的快速离子数量时,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FRC 450,以支持FRC 450的FRC存量粒子。预期的烧蚀时间标度充分短以提供大量的FRC粒子源。此速度也可通过增大注入件的表面面积、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之前将单个弹丸打碎成更小的碎片来增加,这是一个可以通过正好在进入约束室100中之前收紧注入管的最后一段的弯曲半径而增大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)的发射顺序和速度以及碎片化,可以调整弹丸注入系统700来提供正好期望水平的存量粒子支持。反过来,这帮助保持FRC 450中的内部动压以及FRC 450的受支持操作和寿命。

[0097] 一旦烧蚀的原子在FRC 450中遇到大量的等离子体,它们就变得被完全离子化。得到的冷等离子体成分然后被固有的FRC等离子体碰撞地加热。维持期望FRC温度所需的能量最终由束注入器600供应。在此意义上弹丸注入器700与中性粒子束注入器600一起形成保持稳态并支持FRC 450的系统。

[0098] CT注入器

[0099] 作为对弹丸注入器的备选,提供了紧凑等离子体环(CT)注入器,主要用于给反场构型(FRC)等离子体加料。CT注入器720包括磁性同轴等离子体枪(MCPG),如图21中所示,其包括同轴圆柱形内电极722和外电极724,位于内电极内的偏置线圈726和在CT注入器720的放电相反端上的电破碎器(electrical break)728。气体通过气体注入端口730注入内电极722和外电极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被洛伦兹力从枪推出。如图22A和22B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侧上联接到约束容器100上,以将CT注入到约束容器100内的中心FRC等离子体中。CT注入器720的放电端以与中性粒子束注入器615类似的相对于约束容器100的纵向轴线的角度指向约束容器100的中间平面。

[0100] 在一个备选实施例中,如图23A和图23B中所示,CT注入器720包括漂移管740,漂移管740包括连接到CT注入器720的放电端上的伸长圆柱形管。如图所绘,漂移管740包括围绕该管定位并且沿着该管轴向隔开的漂移管线圈742。沿着管的长度绘出了多个诊断口744。

[0101] CT注入器720的好处是:(1)经由注入的CT对于存量粒子的控制和可调节性;(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)系统也可以重建一些磁通量,因为注入的CT承载内嵌的磁场。在用于实验用途的一个实施例中,外电极的内径是83.1mm而内电极的外径是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。如图所绘,偏置线圈726安装在内电极722内。

[0102] 在最近的实验中,实现了高达~100 km/s的超音速CT移动速度。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~30-50 eV,且存量粒子为 $\sim 0.5-1.0 \times 10^{19}$ 个。CT的高动压允许注入的等离子体深深渗入FRC并且在分界面内沉积粒子。在最近的实验中FRC粒子加料已经导致通过CT注入器成功地提供~10-20%的FRC存量粒子,这表明加料可以轻易地在不破坏FRC等离子体的情况下实施。

[0103] 鞍形线圈

[0104] 为了实现稳态电流驱动并且保持所需的离子流,期望的是防止或者显著地减少由于电子-离子摩擦力(由相撞离子电子动量转移导致)导致的电子加快自旋。FRC系统10利用创新的技术来通过外部施加的静态磁偶极或者四极场提供电子破碎。这通过图15中所绘的外部鞍形线圈460来实现。从鞍形线圈460横向施加的径向磁场引起旋转FRC等离子体中的轴向电场。得到的轴向电子流与径向磁场相互作用,从而在电子上产生方位角破碎力, $F_{\theta} = -\sigma V_{e0} \langle |B_r|^2 \rangle$ 。对于FRC系统10中的典型条件,等离子体内所需施加的磁偶极(或四极)场仅需要大约0.001 T以提供充分的电子破碎。对应的大约.015T的外部场足够小以不会导致相当大的快粒子损耗或者另外负面地影响约束。实际上,施加的磁偶极(或四极)场有利于抑制不稳定性。结合切向中性粒子束注入和轴向等离子体注入,鞍形线圈460提供关于电流保持和稳定性方面附加的控制水平。

[0105] 磁镜塞

[0106] 磁镜塞440内脉冲线圈444的设计允许以适度(大约100kJ)的电容能局部产生高磁场(2到4T)。为了形成FRC系统10的当前操作的典型磁场,形成体积内全部场线都在磁镜塞440处经过收缩部442,如图2中磁场线所示,并且不发生等离子体壁接触。此外,与准直流偏滤器磁体416串联的磁镜塞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。

[0107] 磁镜塞440本身也有利于中性气体控制。磁镜塞440允许更好地利用FRC形成期间喷入到石英管中的氩气,因为气体到偏滤器300中的回流被塞的小的气体引导(微薄的500L/s)显著地减小。形成管210内大部分残余的喷出气体被快速离子化。另外,流过磁镜塞440的高密度等离子体提供充分的中性粒子离子化以及因此提供有效的气体屏障。结果,在偏滤器300中大部分从FRC边缘层450回收的中性粒子不返回到约束室100中。另外,与等离子体枪350的操作相关的中性粒子(以下讨论)将大部分限于偏滤器300中。

[0108] 最后,磁镜塞440意图改善FRC边缘层约束。对于在20到40范围中的磁镜比(塞/约束磁场),且对于北极和南极磁镜塞440之间15m的长度,边缘层粒子约束时间 τ_{\parallel} 被增加多达一个数量级。改善 τ_{\parallel} 轻易地增大了FRC离子约束。

[0109] 假设来自分界面体积453的径向散布性(D)粒子损耗被来自层边缘456的轴向损耗(τ_{\parallel})平衡,就获得 $(2\pi r_s L_s) (Dn_s/\delta) = (2\pi r_s L_s \delta) (n_s/\tau_{\parallel})$,由此分级面密度梯度长度可重写为 $\delta = (D\tau_{\parallel})^{1/2}$ 。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 $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s) (Dn_s / \delta)] = (\langle n \rangle / n_s) (\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$, 其中 $\tau_{\perp} = a^2 / D$ 且 $a = r_s / 4$ 。物理上, 改善 τ_{\parallel} 导致增加的 δ (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粒子损耗。在FRC粒子约束上的总体改善通常稍小于平方, 因为 n_s 随 τ_{\parallel} 增加。

[0110] τ_{\parallel} 上显著的改善也要求边缘层456保持总体稳定 (即, 没有对于开口系统典型的 $n=1$ 凹槽、消防带或者其他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, 磁镜塞440和等离子体枪350形成了有效的边缘控制系统。

[0111] 等离子体枪

[0112] 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的枪等离子体没有方位角动量而产生, 这证明在控制FRC旋转不稳定性方面是有用的。因此这样的枪350是控制FRC稳定性的有效手段, 不需要更老的四极稳定技术。结果, 等离子体枪350使得可以利用快粒子的有益效果, 或者如本发明公开中所概述的使用先进混合动能FRC机制。因此, 等离子体枪350使得FRC系统10能够以鞍形线圈流操作, 该鞍形线圈流正好足以进行电子破碎, 但是在将导致FRC不稳定性 and / 或导致急剧的快粒子扩散的阈值以下。

[0113] 如以上磁镜塞讨论中所提及的, 如果可以显著改善 τ_{\parallel} , 则供应的枪等离子体将与边缘层离子损耗率 ($\sim 10^{22}$ /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, 考虑枪等离子体具有 $n_e \sim 10^{13}$ cm⁻³的密度和大约200 eV的离子温度, 被限定在端部磁镜塞440之间。捕获长度 L 和磁镜比 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路径为 $\lambda_{ii} \sim 6 \times 10^3$ cm, 并且, 因为 $\lambda_{ii} \ln R / R < L$, 离子约束在气体动态机制中。等离子体约束时间在此机制中是 $\tau_{gd} \sim RL / 2V_s \sim 2$ ms, 其中 V_s 是离子声速。作为比较, 对于这些等离子体参数经典的离子约束时间将是 $\tau_c \sim 0.5 \tau_{ii} (\ln R + (\ln R)^{0.5}) \sim 0.7$ 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 $\tau_{\perp} > \tau_{gd} \sim 2$ ms。因此, 枪将提供FRC边缘层456的重要的加料, 以及改善的整体FRC粒子约束。

[0114] 此外, 枪等离子体流可以在大约150到200毫秒中打开, 这允许在FRC启动、移动以及合并到约束室100中使用。如果在 $t \sim 0$ (FRC主排 (main bank) 初始化) 附近打开, 则枪等离子体帮助支持当前动态形成并合并的FRC 450。来自形成FRC以及来自枪的组合存量粒子足够用于中性粒子束捕获、等离子体加热以及长期支持。如果在 t 在-1到0 ms范围处打开, 枪等离子体可用等离子体填充石英管210, 或者离子化喷入石英管的气体, 从而允许具有减少的喷出气体或者甚至可能零喷出气体的FRC形成。后者可能需要足够冷的形成等离子体来允许反转偏置磁场的快速扩散。如果在 $t < -2$ ms处打开, 等离子体流可用数 10^{13} cm⁻³的目标等离子体密度填充大约1到3 m³的形成场线体积, 以及形成部分200和约束室100的约束区域, 这足以允许在FRC到达前的中性粒子束累积。形成FRC之后可形成并移动到得到的约束容器等离子体中。以这种方式等离子体枪350使得能够实现宽范围的操作条件和参数机制。

[0115] 电子偏置

[0116] 在边缘层456中径向电场轮廓的控制以多种方式对于FRC稳定性和约束是有益的。借助FRC系统10中布置的创新的偏置部件, 可以从约束室100中中心约束区域很外面的区域对整个机器中一组开口通量面施加一系列深思熟虑的电势分布。以这种方式可以正好在FRC 450外侧跨越边缘层456产生径向电场。这些径向电场之后改变边缘层456的方位角旋

转并且通过E方位速度剪切影响其约束。从而边缘层456和FRC芯453之间任何不同的旋转都可通过剪切传播到FRC等离子体内部。结果,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对不稳定性负责,此技术提供了用来控制不稳定性开始和成长的直接手段。在FRC系统10中,合适的边缘偏置提供了开口场线输送和旋转以及FRC芯旋转的有效控制。各种提供的电极900,905,910和920的位置和形状允许控制不同组通量面455并且处于不同且独立的电势。以这种方式可以实现宽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性影响。

[0117] 所有这些创新的偏置技术的一个关键好处是如下事实,即,芯和边缘等离子体的特性可以从FRC等离子体的很外侧影响,即,不需要使任何物理部件来接触中心热的等离子体(这将对于能量、通量和粒子损耗具有严重的影响)。这对于HPF概念的性能和全部可能应用具有重大的有益影响。

[0118] 实验数据-HPF操作

[0119] 通过来自中性粒子束枪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16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特性。清楚明显的是更长的束持续产生了更长存活的FRC。查看此证据以及此研究期间的其他诊断,其证明了束增加了稳定性并且减小了损耗。束脉冲长度和FRC寿命之间的关联并不是完美的,因为在一定等离子体尺寸以下束捕获变得不足,即,当FRC 450在物理尺寸上缩短时并不是所有注入的束都被截断并且捕获。FRC的缩短主要是由于以下事实,即对于特定的实验设置而言,放电期间来自FRC等离子体的纯能量损耗(放电过程大约中途时~ 4 MW)要稍大于通过中性粒子束供应到FRC中的总功率(~2.5 MW)。将这些束定位在靠近容器100的中间平面的位置将倾向于减小这些损耗并且延长FRC寿命。

[0120] 图17图示了不同部件对于实现HPF机制的影响。其显示了一族典型的曲线,它们描绘了作为时间的函数FRC 450的寿命。在所有情况下,对于每次放电的整个持续时间都注入恒定的、适量的束功率(大约2.5 MW)。每条曲线都代表部件的不同组合。例如,没有任何磁镜塞440,等离子体枪350或者来自吸气系统800的吸气而操作FRC系统10导致旋转不稳定性的快速启动以及FRC拓扑的损耗。仅增加磁镜塞440延迟了不稳定性的启动并且增加了约束。利用磁镜塞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的顶部上增加吸气(在此情况下是钛)产生了最好的结果——得到的FRC没有不稳定性并且呈现最长的寿命。从此实验性示范清楚的是部件的完整组合产生了最好的效果并且给束提供了最佳目标条件。

[0121] 如图1中所示,新发现的HPF机制展示出极大改善的输送特性。图1图示了FRC系统10中在常规机制和HPF机制之间粒子约束时间上的变化。如可看到的那样,在HPF机制中其已经被改善了远多于5的因数。另外,图1详细描绘了在FRC系统10中相对于在现有常规FRC实验中粒子约束时间的粒子约束时间。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5到接近20之间的因数。最后并且最重要的是,HPF机制中FRC系统10的约束定标(confinement scaling)的特性极大地不同于所有现有测量。在FRC系统10中形成HPF机制之前,从数据得出各种经验性定标律,以预测现有FRC实验中的约束时间。全部那些定标规则主要都依赖于比值 R^2/ρ_i ,其中R是空磁场的半径(机器的物理规模的松散测量)且 ρ_i 是在

外部施加的场中评估的离子拉莫尔半径(所施加磁场的松散测量)。从图1清楚的是常规FRC中长约束仅仅在大机器尺寸和/或高磁场下才可能。以常规FRC机制操作FRC系统10,CR倾向于遵循这些定标规则,如图1中所示。然而,HPF机制极其优异,并且显示出可获得好得多的约束而没有大的机器尺寸或者高磁场。更重要地,从图1还清楚的是HPF机制导致与CR机制相比具有减小的等离子体尺寸的改善的约束时间。如以下所述,对于通量和能量约束时间也可见类似的趋势,在FRC系统10中它们也增加了超过3-8的因数。因此,HPF机制的突破使得能够使用适量的束功率、更低的磁场以及更小的尺寸来支持并保持FRC系统10中的FRC均衡以及未来更高能量的机器。与这些改善联袂而至的是更低的操作和建造成本以及降低的工程复杂度。

[0122] 为了进一步比较,图18示出了来自FRC系统10中代表性HPF机制放电作为时间的函数的数据。图18(a)描绘了在中间平面处的排除通量半径。对于这些更长的时间标度传导性钢壁不再是那么好的通量保存器,并且壁内部的磁性探头与壁外部的探头叠加来适当地负责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13中所示,HPF机制操作模式展示出超过400%的更长的寿命。

[0123] 图18(b)中示出了集成密度迹线的代表性弦线,且图18(c)中示出了其阿贝尔反补、密度等位线。如图13中所示,与常规FRC机制CR相比,在整个脉冲等离子体更加静止,表明非常稳定的操作。如图18(d)中所示,在HPF发射中峰密度也稍低——这是更热的总等离子体温度(多达2的因数)的结果。

[0124] 对于图18中图示的代表性放电,能量、粒子和通量约束时间分别是0.5 ms,1 ms和1 ms。在进入放电的1 ms的基准时间处,存储的等离子体能量是2 kJ而损耗是大约4 MW,使得此目标特别适合用于中性粒子束支持。

[0125] 图19概述了呈新建实验性HPF通量约束定标形式的HPF机制的全部好处。如图19中可见,基于在 $t = 0.5$ ms之前和之后所取的测量,即, $t < 0.5$ ms和 $t > 0.5$ ms,通量约束(以及类似地,粒子约束和能量约束)对于给定分界面半径(r_s)以大致电子温度(T_e)的平方而定标。具有为 T_e 的正功率(且不是负功率)的此强定标是与由常规托卡马克装置呈现的完全相反的,其中约束典型地与电子温度的一些功率成反比例。此定标的表现是HPF状态和大轨道(即,在FRC拓扑规模上和/或至少特征性磁场梯度长度规模上的轨道)离子数量的直接结果。根本上,此新的定标极大地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。

[0126] 利用HPF机制呈现的好处,可实现由中性粒子束驱动的FRC支持或者稳态并使用适当的弹丸注入,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等总体等离子体参数都可以保持在合理的水平而没有实质性的衰退。作为比较,图20示出了FRC系统10中来自代表性HPF机制放电的作为时间的函数曲线图A中的数据,以及对于FRC系统10中发射的代表性HPF机制放电的作为时间的函数曲线图B中的数据,其中FRC 450被支持而贯穿中性粒子束脉冲的持续时间没有衰退。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范围内总功率的中性粒子束被注入FRC 450。曲线图A中所绘的等离子体反磁性寿命为大约5.2 ms。更近的数据显示可获得具有大约7 ms的活动束脉冲长度的大约7.2 ms的等离子体反磁性寿命。

[0127] 如以上关于图16所指出的,束脉冲长度和FRC寿命之间的关联并不是完美的,因为

在一定等离子体尺寸以下束捕获变得不足,即,当FRC 450在物理尺寸上缩短时并不是所有注入的束都被截断并且捕获。FRC的缩短或衰退主要是由于以下事实,即对于特定的实验设置而言,放电期间来自FRC等离子体的纯能量损耗(放电过程大约中途时~ 4 MW)要稍大于通过中性粒子束供应到FRC中的总功率(-2.5 MW)。如关于图3C所指出的,从中性粒子束枪600向中间平面的成角度的束注入改善了束-等离子体耦合,即使注入阶段期间FRC等离子体缩短或者另外地轴向收缩。另外,适当的弹丸加料将保持必需的等离子体密度。

[0128] 曲线图B是使用大约6ms活动束脉冲长度和来自稍大于大约10MW的中性粒子束枪600的总束功率的模拟运行的结果,其中中性粒子束应注入H(或D)中性粒子且粒子能量为大约15 keV。由每个束注入的等价电流为大约110A。对于曲线图B,到装置轴线的束注入角度为大约 20° ,目标半径0.19m。注入角度可在 15° - 25° 的范围内变化。束沿平行电流的方向以方位角注入。来自中性粒子束动量注入的纯侧面力以及纯轴向力应该被最小化。如对于曲线图A那样,快(H)中性粒子从中性粒子束注入器600从北极和南极形成FRC在约束室100中合并成一个FRC 450时开始注入。

[0129] 模拟是其中用于曲线图B的基础使用多维霍尔-MHD解算器用于背景等离子体和均衡,基于结算器的完全动力学蒙特-卡罗模型用于能量束部件和全部分散过程,以及大量耦合的传输公式用于全部等离子体物类来建模交互损耗过程。传输部件被经验性的校准并且被对于实验数据库广泛地用作基准。

[0130] 如由曲线图B所示,FRC 450的稳态诊断寿命将为束脉冲的长度。然而,重要的是注意到曲线图B的关键关联显示了当束被关闭时,等离子体或FRC在那时而不是之前开始衰退。衰退将类似于在放电中所观察到的,它们并不是由束所协助的——可能在超出束关闭时间1 ms的级别——并且只是由固有损耗过程驱动的等离子体的特征衰退时间的反映。

[0131] 等离子体稳定性和轴向位置控制

[0132] 现在转向在径向和轴向两个方向上都促进FRC等离子体稳定性以及沿着FRC约束室的对称轴线FRC等离子体的轴向位置控制的系统和方法,图24示出了简化的图表来图示轴向位置控制机构510的一个示例实施例。示出在约束室100内的旋转FRC等离子体520具有等离子体流522和轴向移位方向524。在室100内通过对称的流部件产生均衡的场(未示出),对称的流部件比方说例如准直流线圈412(见图2和图3)。均衡的场沿轴向移位方向524不产生纯力,但是可以调整以产生横向/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,均衡的场被调整以产生横向/径向稳定的FRC等离子体520。如以上所指出的,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,其感生非对称的电流514和516,即,在约束室100的壁中在约束室100的中间平面的每侧上沿相反的方向。FRC等离子体520将在容器并且也在外部线圈中感生这些类型的流分量。此反对称流分量514和516产生与环形等离子体流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,这些流514和516随着时间逐渐消散。

[0133] 在中间平面的每侧上设置在约束室100周围的径向场线圈530和531提供附加的径向场分量,它们是由于沿相反方向在线圈530和531中感生的流532和534而产生。径向场线圈530和531可包括一组轴对称的线圈,它们可定位在约束室100内部或者外部。径向线圈530和531示出为与准直流线圈412类似地(见图2和图3)定位在约束容器100外部。每个线圈

530和531,或者多组线圈,可以与在中间平面的相对侧上的线圈承载不同电流,但是这些电流相对于约束容器100的中间平面是反对称的,并且沿着中间平面产生具有 $B_z \neq 0$, $B_r = 0$ 的磁场结构。径向场线圈530和531产生补充性的径向场分量,其与环形等离子体流522相互作用以产生轴向力。轴向力又使等离子体往回向着约束室100的中间平面移动。

[0134] 控制机构510包括控制系统,控制系统构造成作用在径向场线圈电流上,以便迅速重建朝向中间平面的等离子体位置,同时最小化机器中间平面周围的过调和/或碰撞。控制系统包括可操作地耦接到径向场线圈530和531、准直流线圈412、它们相应的电源以及其他部件比方说例如磁性传感器上的处理器,以提供等离子体位置、等离子体速度以及活动线圈电流测量。处理器可构造成执行本申请中所述的计算和分析并且可包括或者通讯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上。其可包括基于处理器或者基于微处理器的系统,该系统包括使用微控制器、精简指令集计算机(RISC)、特定用途集成电路(ASIC)、逻辑电路以及能够执行本文所述功能的任何其他电路或处理器的系统。以上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/或意思。

[0135] 处理器的功能可以使用软件程序、硬件部件或它们的组合而实施。硬件部件可使用多种技术实施,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/写入的记忆存储装置,并且典型地也包括硬件和/或该记忆存储装置要写入和/或读取的软件。

[0136] 处理器可包括计算装置、输入装置、显示单元和界面,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上。计算机或者处理器可包括存储器。存储器可包括随机存取存储器(RAM)和只读存储器(ROM)。计算机或者处理器也可包括存储装置,其可为硬盘驱动器或者可移动存储驱动器,比方说软盘驱动器,光盘驱动器等。存储装置也可为其他类似装置,用于加载计算机程序或者其他指令到计算机或处理器中。

[0137] 处理器执行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元件的形式。

[0138] 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称作滑动模式控制的非线性控制理论的一个分支而解决。系统状态的线性功能(滑动表面)充当具有期望渐近稳定(滑动)特性的误差信号。滑动表面设计成使用李亚普洛夫理论来呈现宽范围FRC动态参数中的渐近不稳定性。提出的控制方案之后可用于轴向稳定和与不稳定等离子体两者,而不需要重新调整在滑动表面中使用的参数。此特性是有益的,因为如以上所提及的那样,均衡可能必须在FRC放电的不同阶段上在轴向稳定和轴向不稳定均势之间切换。

[0139] 图25中示出了控制方案500的构造。低通滤波器将开关频率限制在期望控制带宽内。假设要求以一个样本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从外部磁性测量获得。活动线圈系统中的电流可通过标准方法测量。

[0140] 线圈电流和等离子体位置要求实施位置控制。等离子体速度要求改善性能但是是可选的。此误差信号的非线性功能(中继控制原理)对于连接到中间平面对称线圈上的每对

电源产生离散的电压水平。中间平面对称线圈被供应具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重建朝向中间平面的等离子体位置。

[0141] 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变化。该模型利用磁力几何。等离子体电流分布对应于轴向不稳定均势,当仅考虑等离子体和容器时具有2ms的生长时间。假设电源以离散的电压水平工作,典型地以800 V的步级。

[0142] 图26示出了若干等离子体控制模拟,其强调了向线圈施加的电压,和等离子体位置稳定时间,以及将轴向移位20cm的等离子体带回中间平面所需的线圈峰值电流和缓变率之间的关系。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。示出了对应于具有呈200V(实心正方形)、400V(实心圆)、800V(实心三角形)和1600V(空心正方形)步级的离散电压水平的电源的四个实例。对于全部四个实例控制带宽是16 kHz而取样频率是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)以及线圈电流缓变率(底部)。允许等离子体移位不稳定地增加直至其到达20cm。在此点上应用反馈控制。

[0143] 模拟结果表明:

[0144] 1. 要在5ms内将等离子体带回中间平面(实心正方形迹线),0.5MA/s的线圈上升率足够,需要200V的电源。

[0145] 2. 要在2.3ms内将等离子体带回中间平面(实心圆形迹线),1MA/s的线圈上升率足够,需要400V的电源。

[0146] 3. 要在1.3ms内将等离子体带回中间平面(实心三角形迹线),2MA/s的线圈上升率足够,需要800V的电源。

[0147] 4. 要在1.0ms内将等离子体带回中间平面(空心正方形迹线),4MA/s的线圈上升率足够,需要1600V的电源。

[0148] 对于全部修整线圈对于以上研究的第三种情况(2MA/s的缓变率情况)峰值电流也在图27中作为修正线圈位置的函数示出。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使用具有三级(+800V,0,-800V)、16kHz控制带宽和32kHz取样率的电源进行。为了在1.3ms内将等离子体带回中间平面,需要2MA/s的线圈上升率。在所有线圈对中所需的峰值电流小于1.5kA。所需的实际开关频率(大约2kHz)远低于控制系统带宽。

[0149] 控制系统也可实施目标表面,其为线圈电流以及等离子体速度单独的函数,没有等离子体位置。在这种情况下轴向位置控制回路仅提供轴向动态变化的稳定,但不是控制。这意味着等离子体处于相对稳定的情况下并且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等离子体分界面和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。

[0150] 其中使用了类似控制系统的另一个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保持在分别大致与等离子体密度以及环向磁场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。同时极向场必须保持尽可能低以便 q 安全系数高于 $q=2$ 。这是通过沿着机器轴线方向延长等离子体,允许适配大等离子体电流(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。这些延长的等离子体沿着机器轴线方向(在托卡马克装置中行话称为竖直方向)是不稳定的,并且也需要等离子体稳定机构。托卡马克装置中竖直等离

子体位置控制也使用一组径向场线圈恢复,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中需要稳定的原因是不同的。在托卡马克装置中,等离子体竖直不稳定性是以大的等离子体电流操作要付出的惩罚,它需要等离子体延长来以高环向磁场操作。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。托卡马克装置具有稳定该构型的环向磁场,因此它们不需要横向稳定。

[0151] 本文提供的示例实施例在美国临时专利申请No. 62/255,258和美国临时专利申请No. 62/309,344中已经描述,这些申请通过引用结合。

[0152] 但是,本文提供的示例实施例仅仅意图为说明性示例并且不以任何方式是限制性的。

[0153] 相对于本文提供的任何实施例描述的所有特征、元件、部件、功能和步骤都意图可自由组合并且可用来自任何其他实施例的那些替代。如果相对于仅一个实施例描述某些特征、元件、部件、功能或步骤,则应该理解的是该特征、元件、部件、功能或步骤可以与本文描述的每个其他实施例一起使用,除非明确地另外指出。此段落因此用作用来介绍权利要求书的前述基础和书面支持,任何时候,其都结合了来自不同实施例的特征、元件、部件、功能和步骤,或者其用来自另一个实施例的特征、元件、部件、功能和步骤替代一个实施例中的那些,即使以下描述并没有明确指出,在特定的实例中,这种组合或替代是可能的。明确表述每种可能的组合和替代过于累赘,尤其是考虑到本领域技术人员在阅读此说明书后将会容许轻易想到每个且每一种此类组合和替代。

[0154] 在许多实例中实体在本文中描述为联接到其他实体。应该理解的是术语“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)中介实体)和两个实体的间接联接(具有一个或更多不可忽略的中介实体)都是通用的。在实体显示为直接联接在一起的地方,或者描述为联接在一起而没有描述任何中介实体的地方,应该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指出。

[0155] 虽然实施例易受各种改型和备选形式影响,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,应该理解的是,这些实施例不限于所公开的特定形式,而是相反,这些实施例要覆盖落入公开精神内的全部改型、等价物和备选形式。此外,实施例的任何特征、功能、步骤或元件,以及通过不在该范围内的特征、功能、步骤或元件限定权利要求书的发明性范围的负面限制都可以在权利要求书中描述或者向其添加。

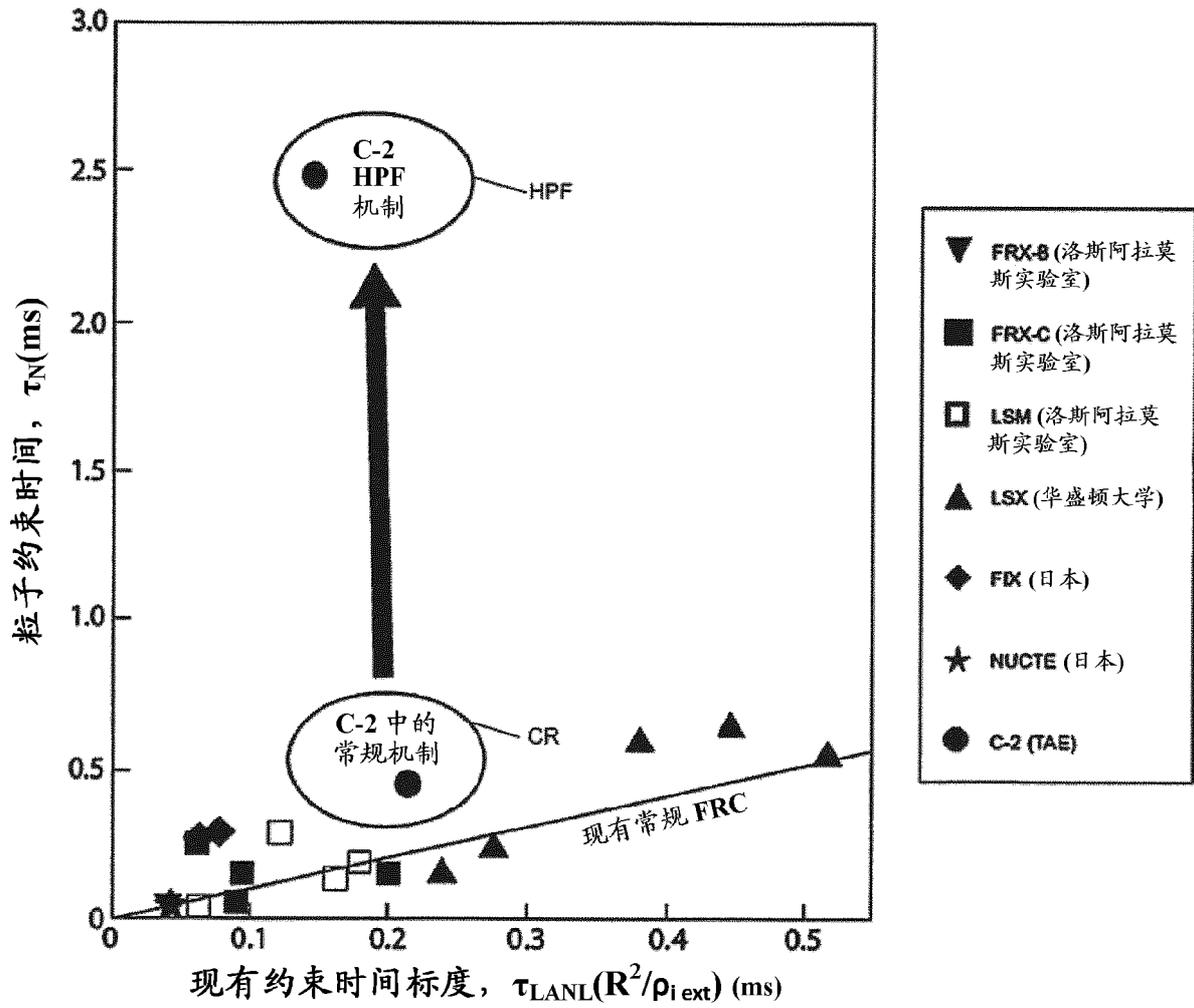


图 1

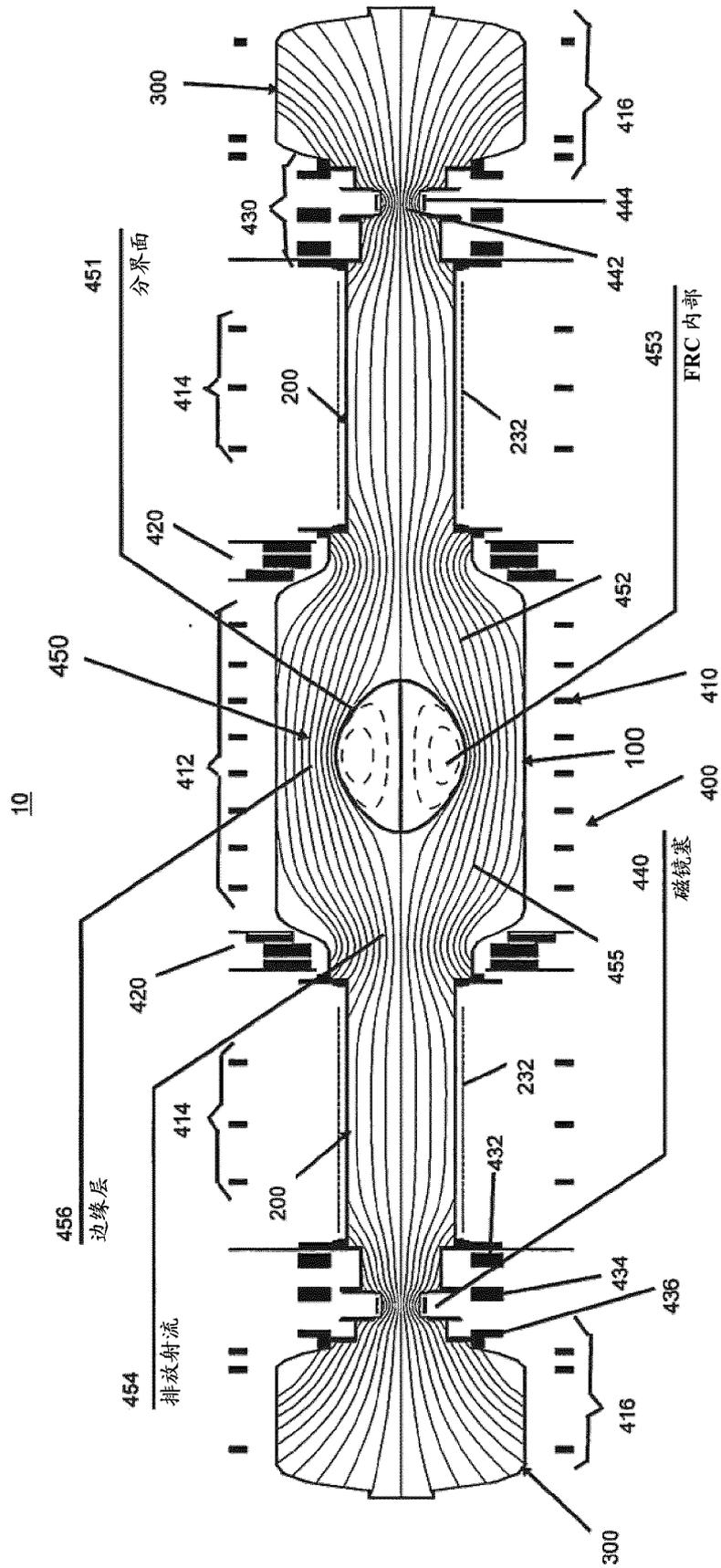


图 2

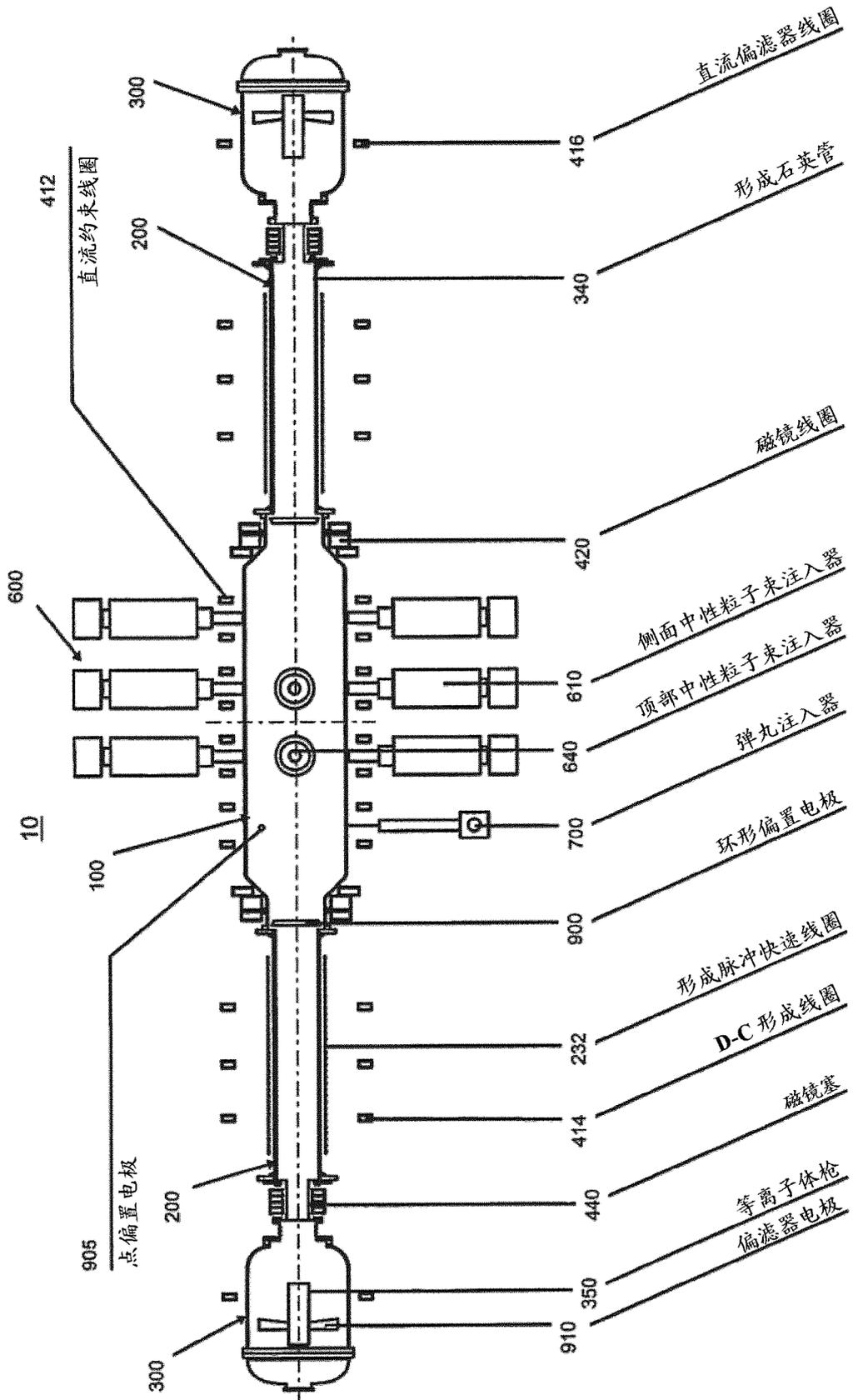


图 3A

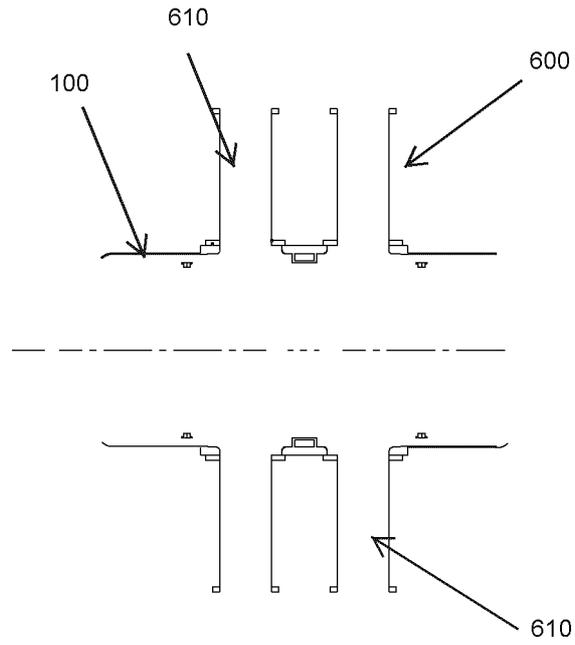


图 3B

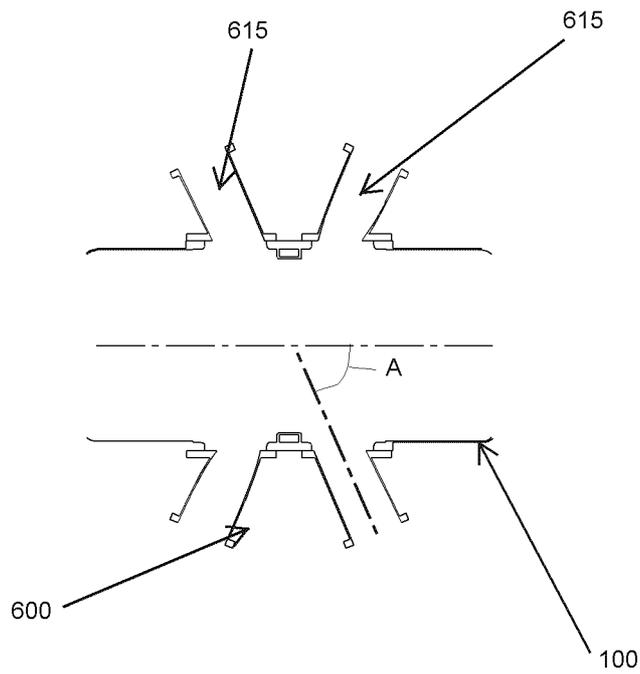


图 3C

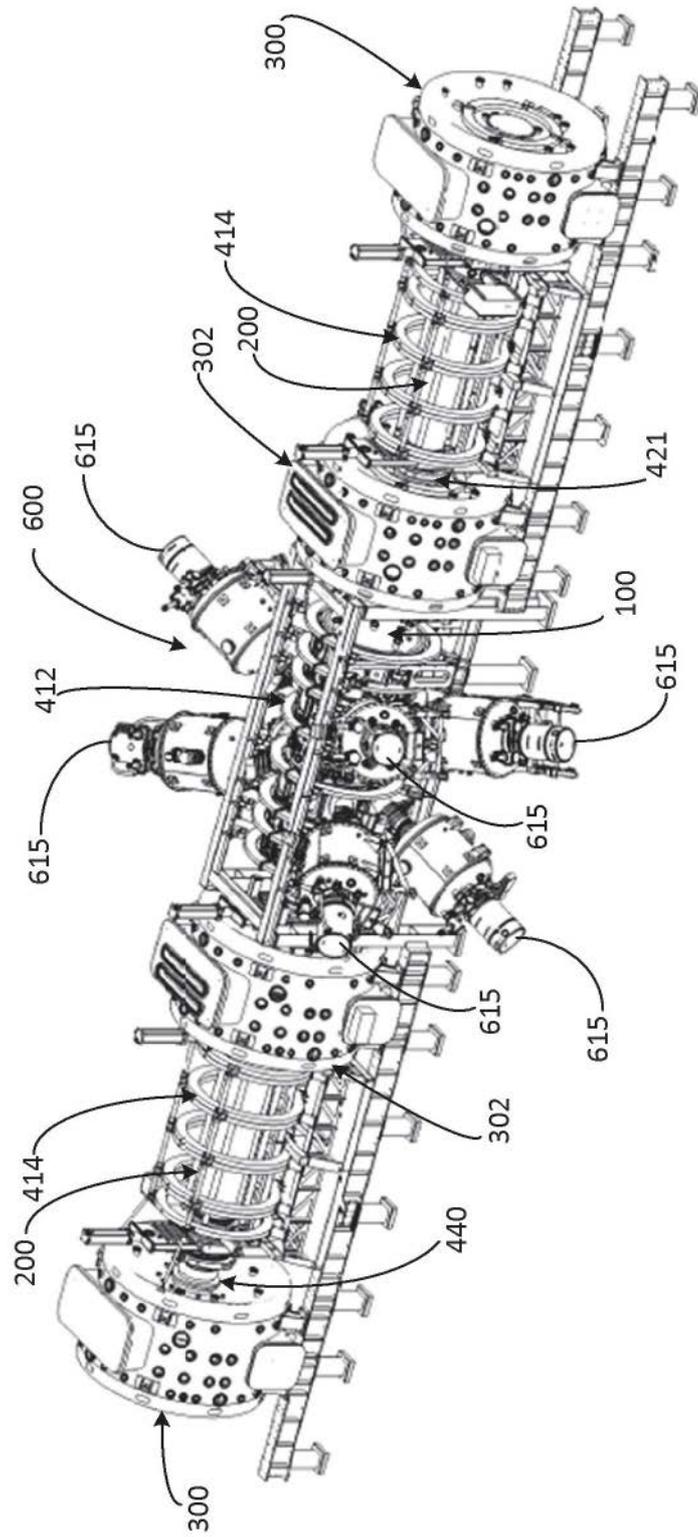


图 3E

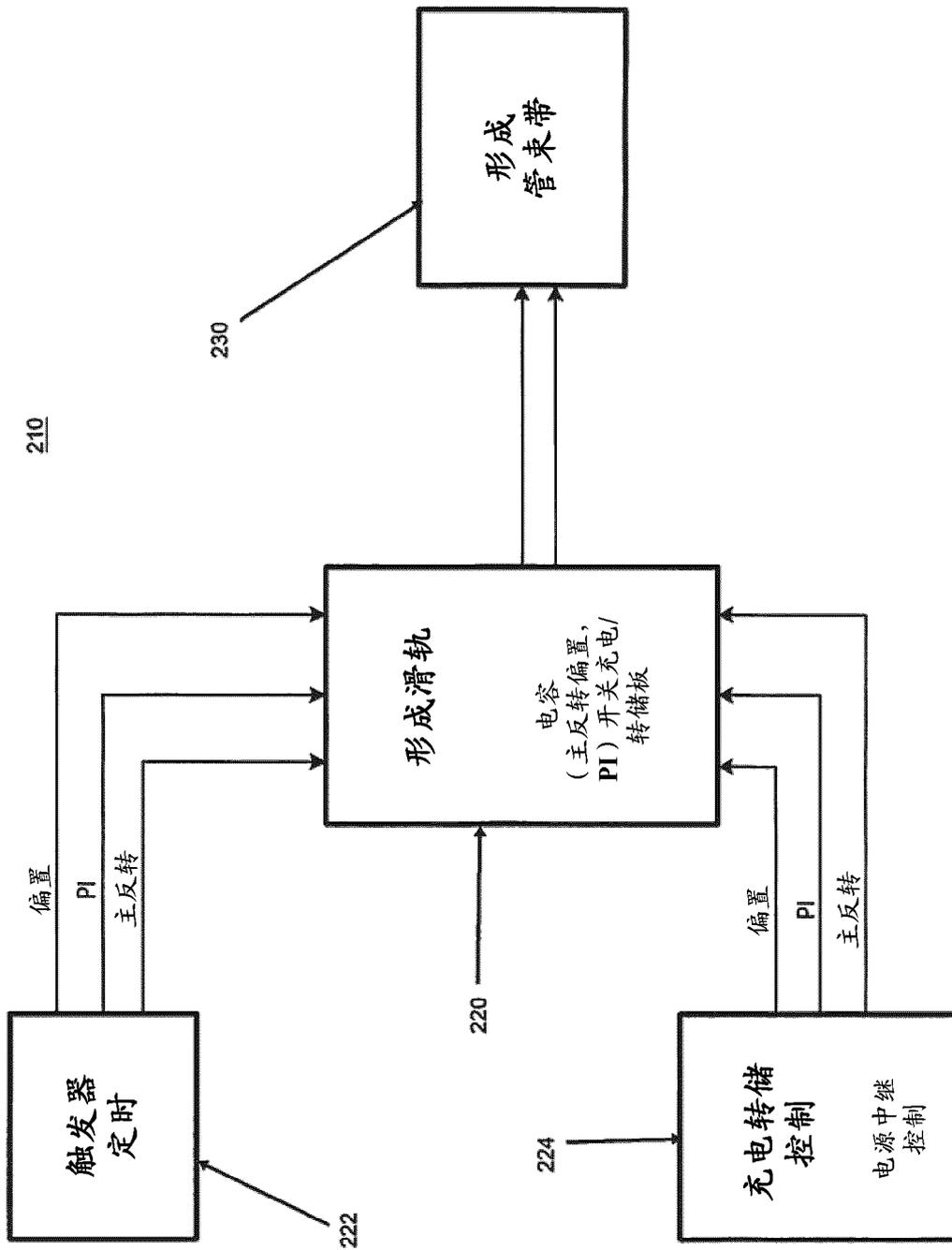


图 4

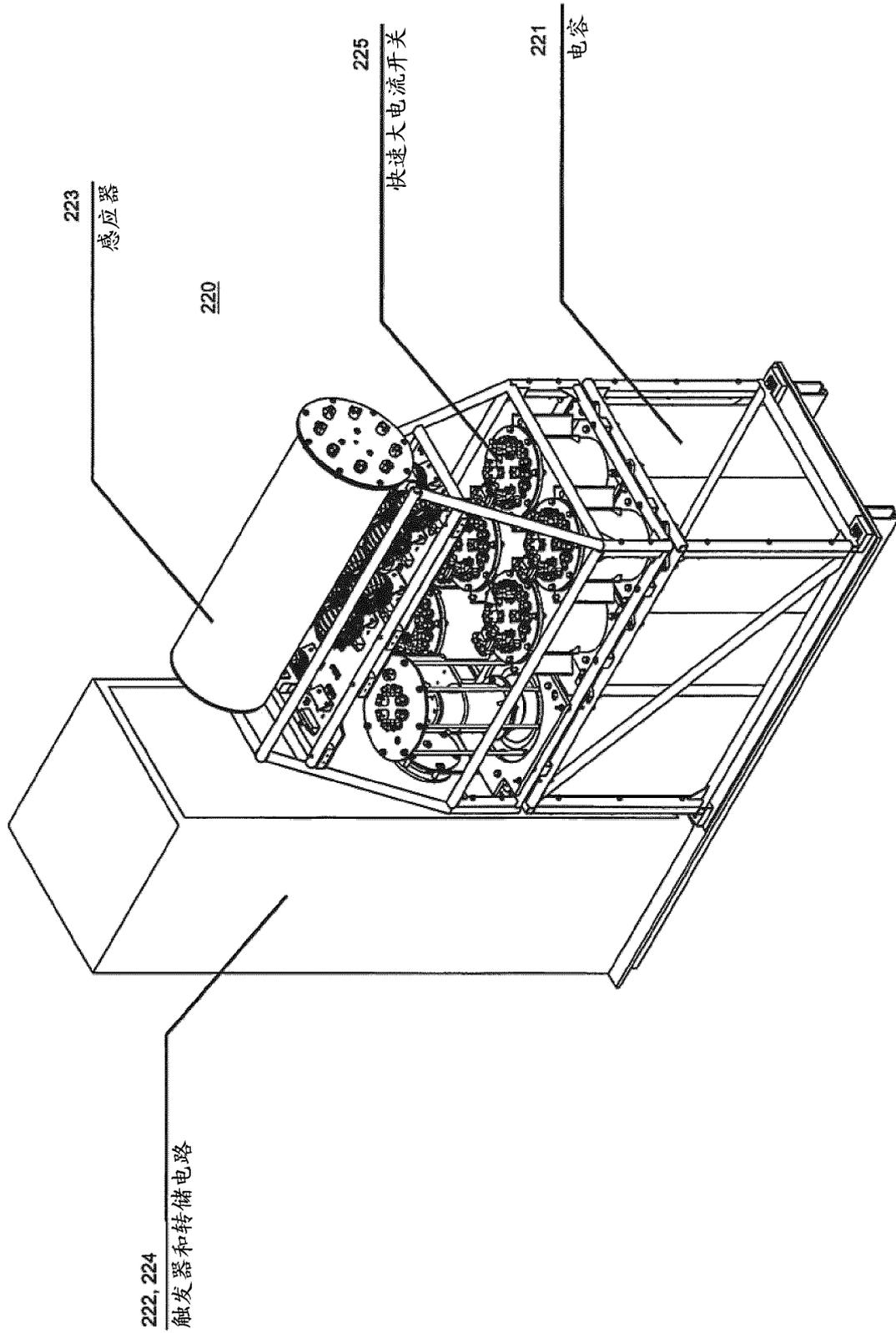


图 5

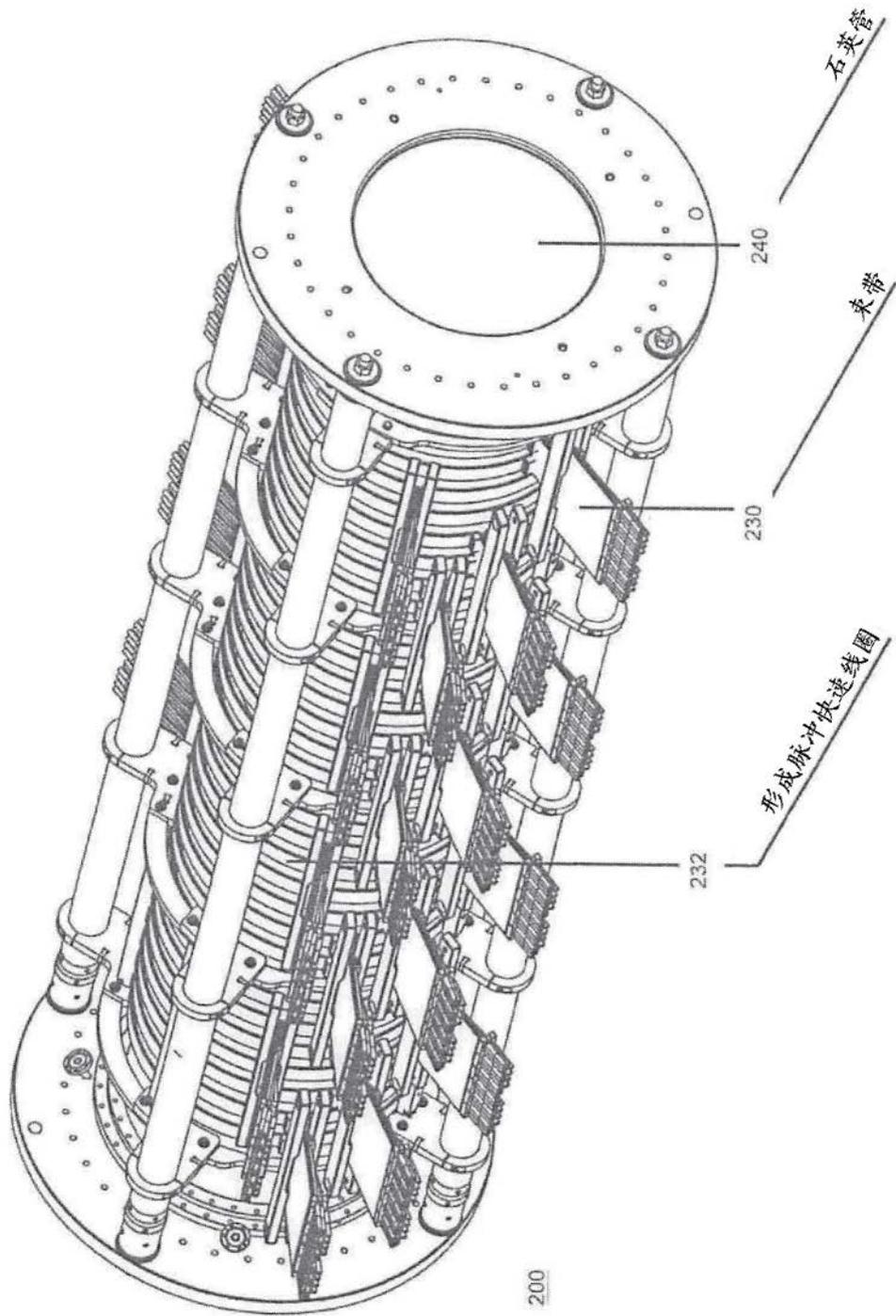


图 6

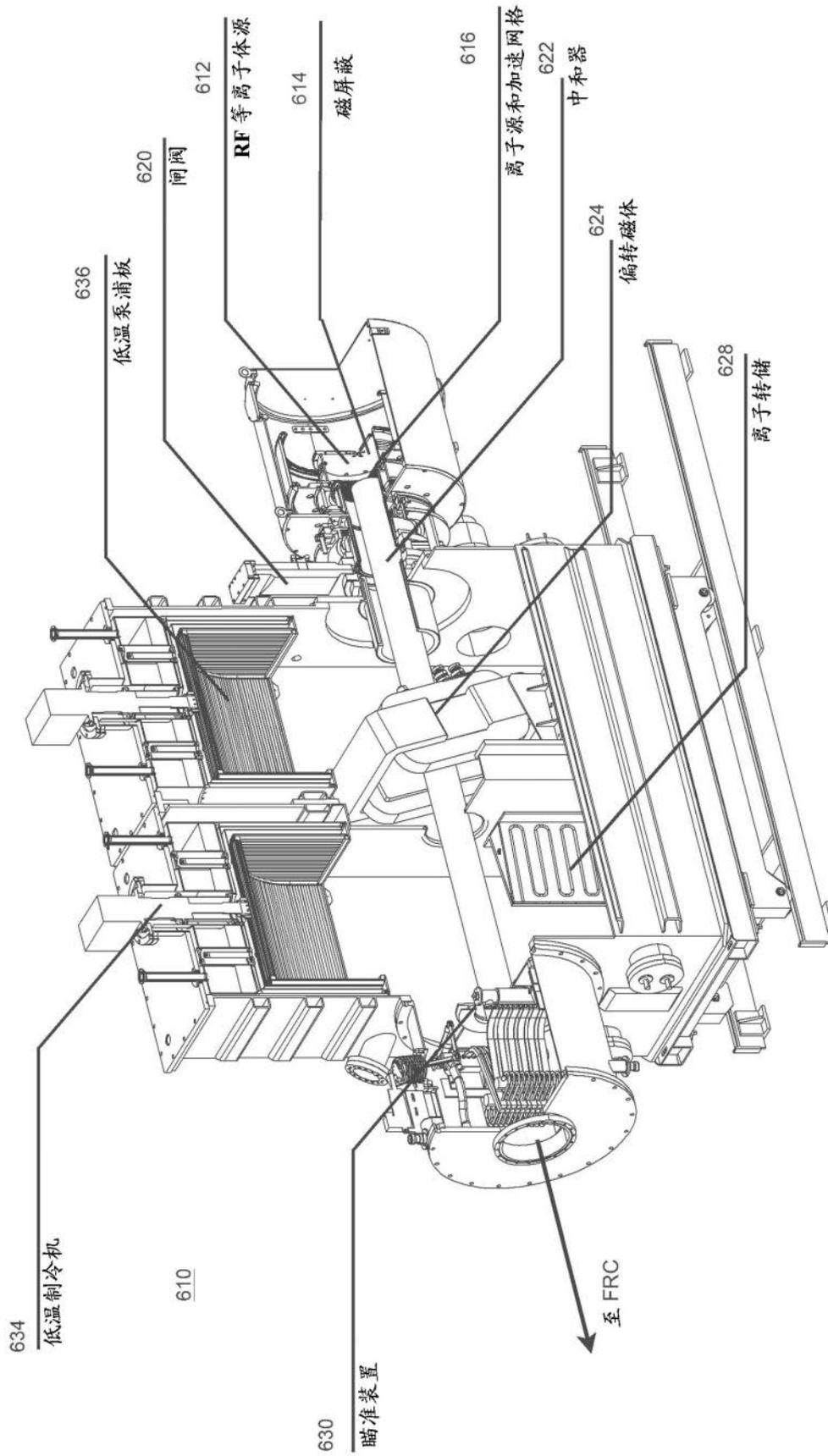


图 7

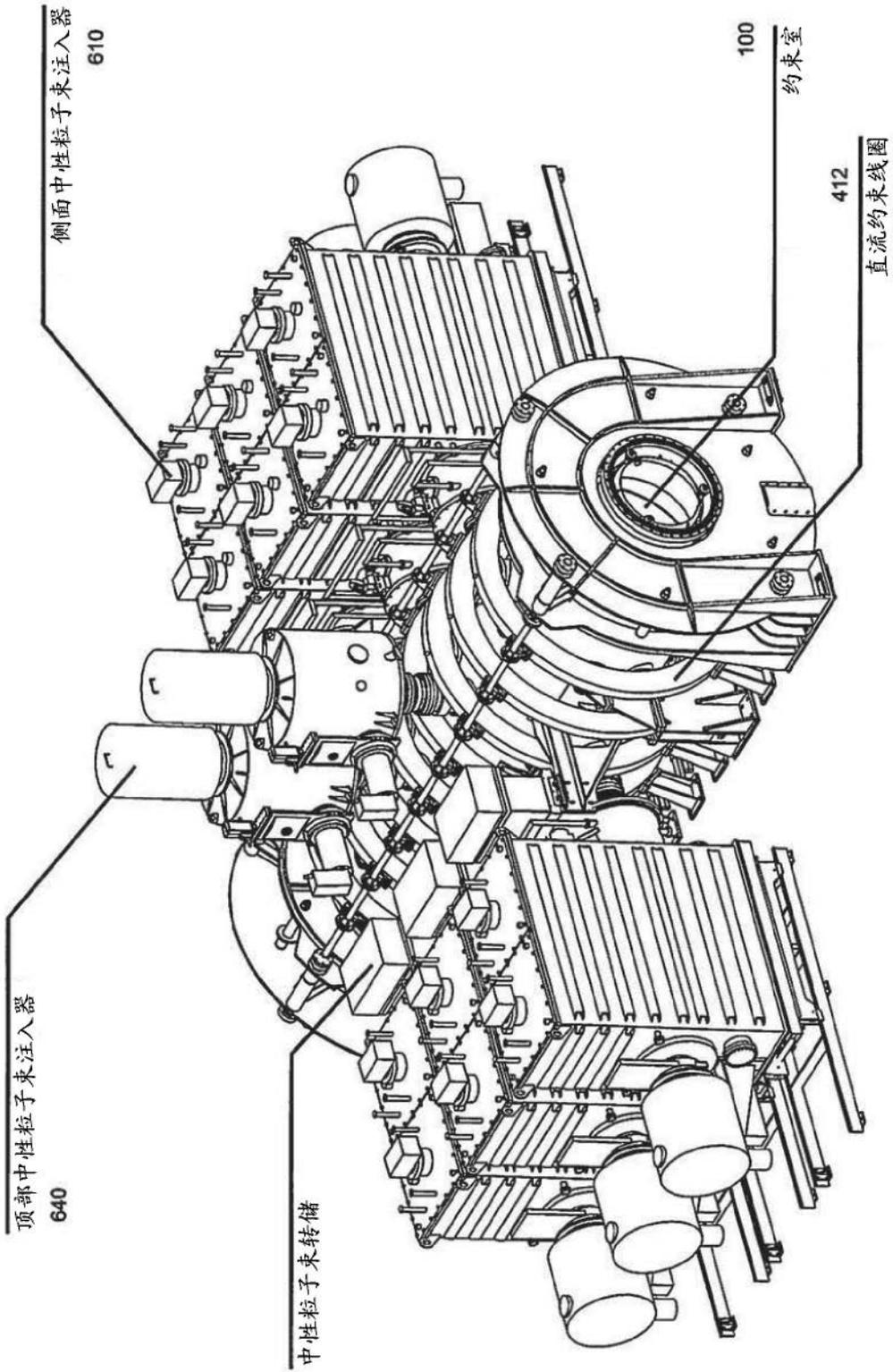


图 8

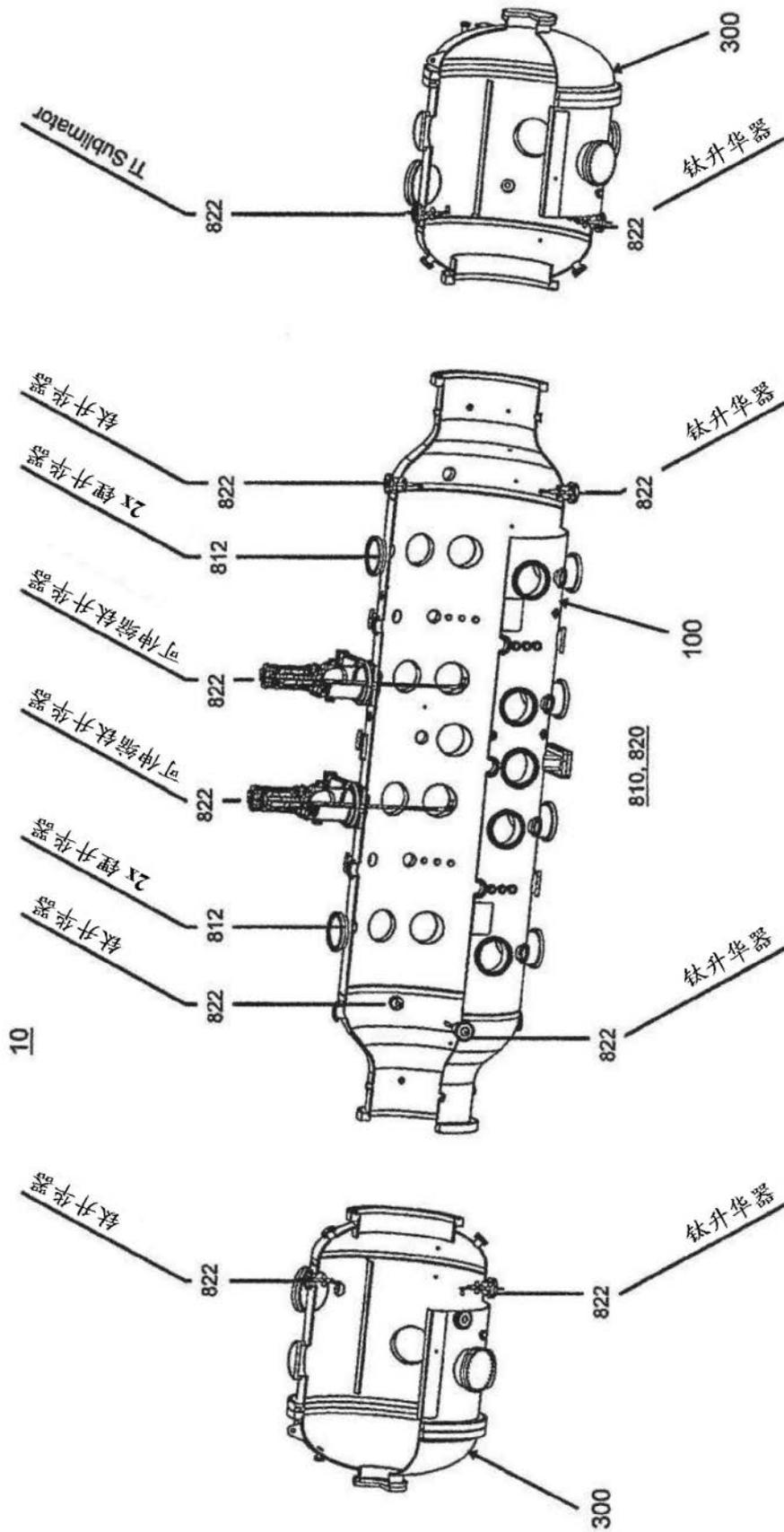


图 9

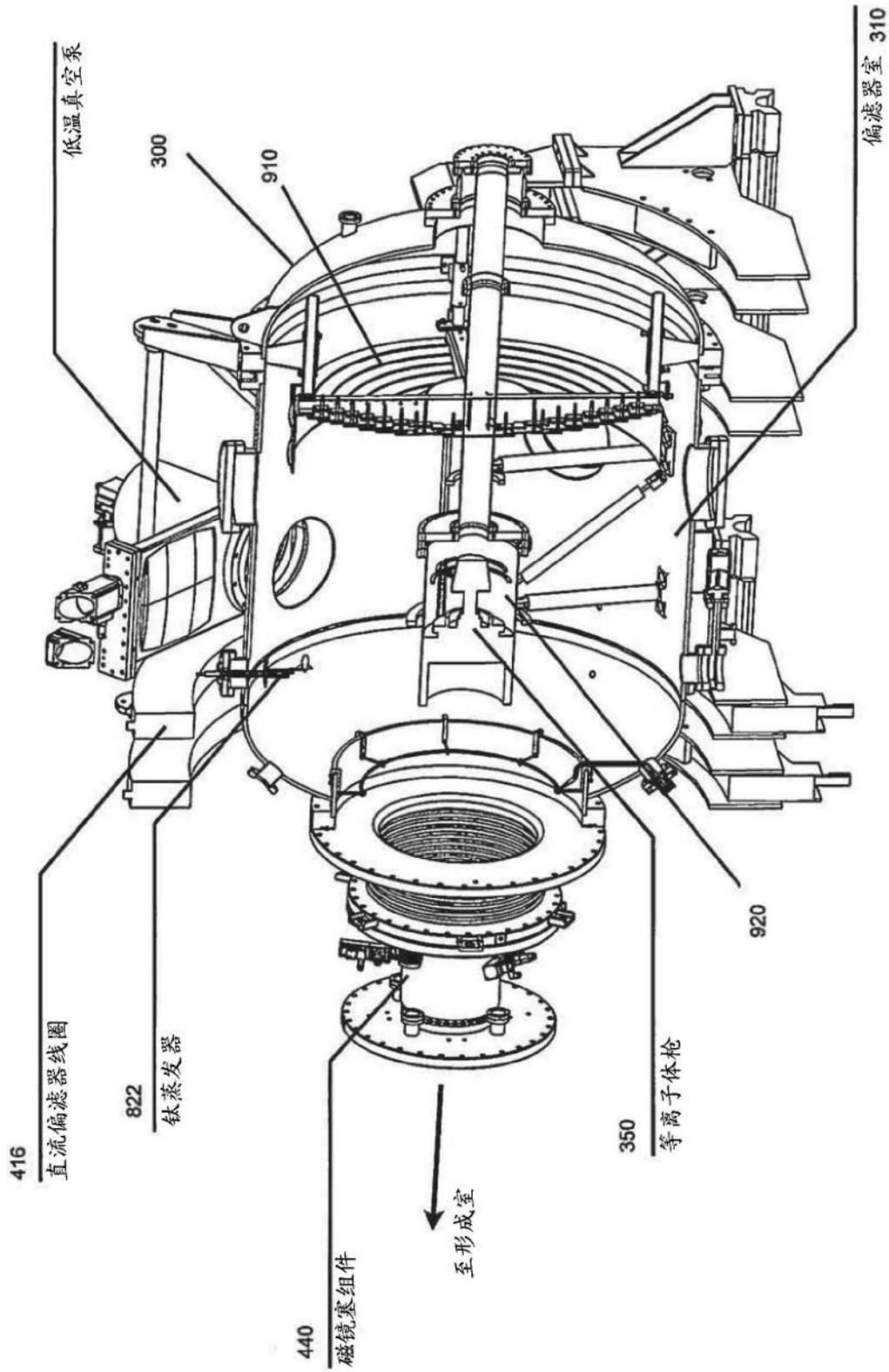


图 10

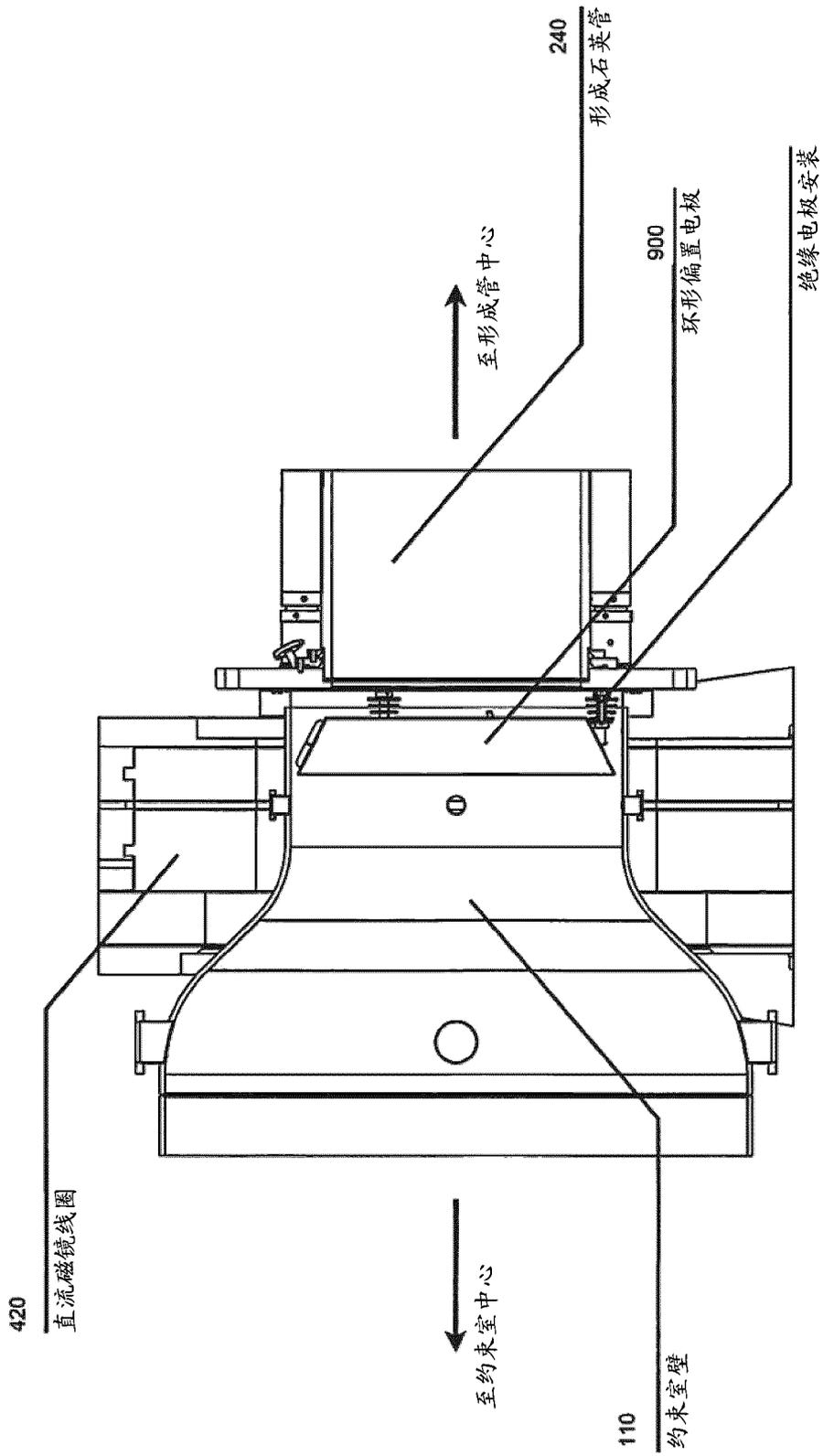


图 11

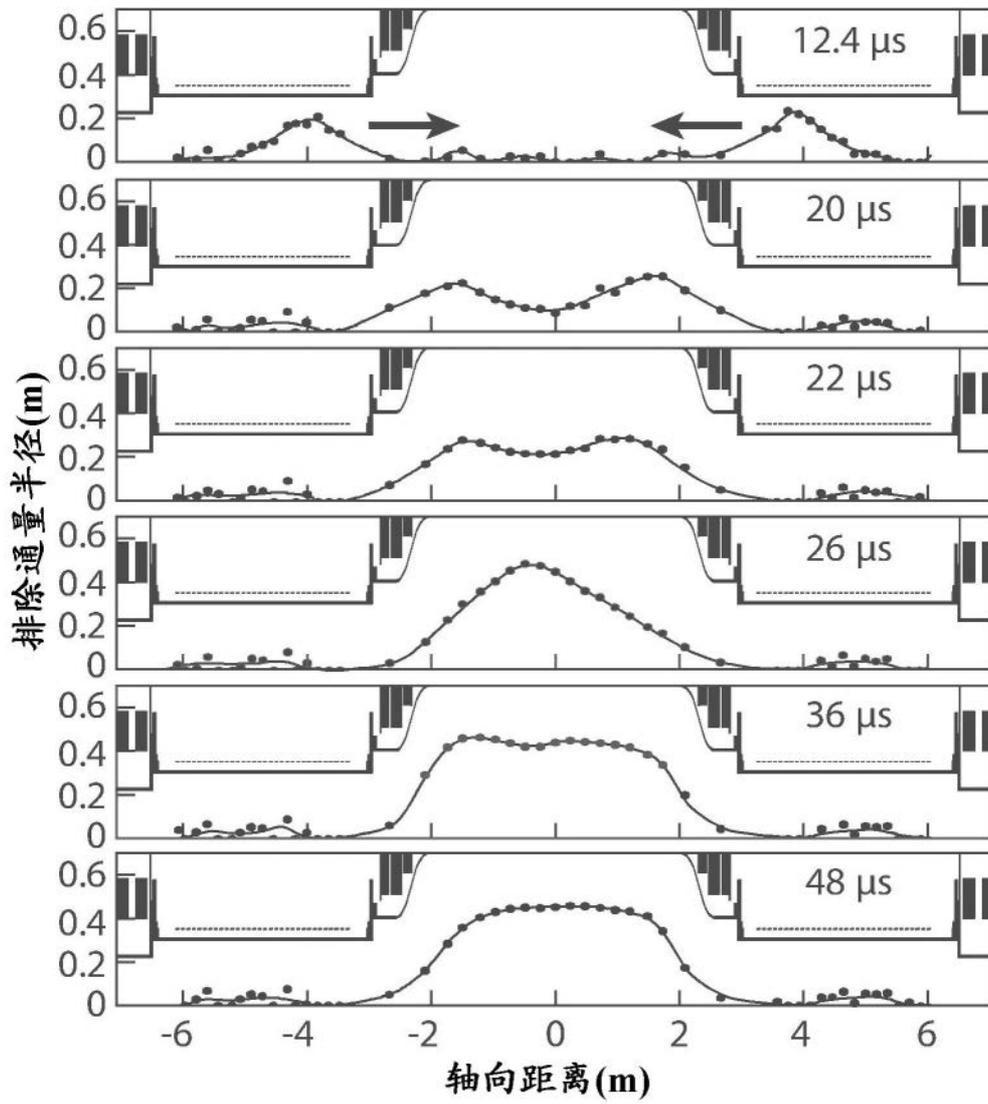


图 12

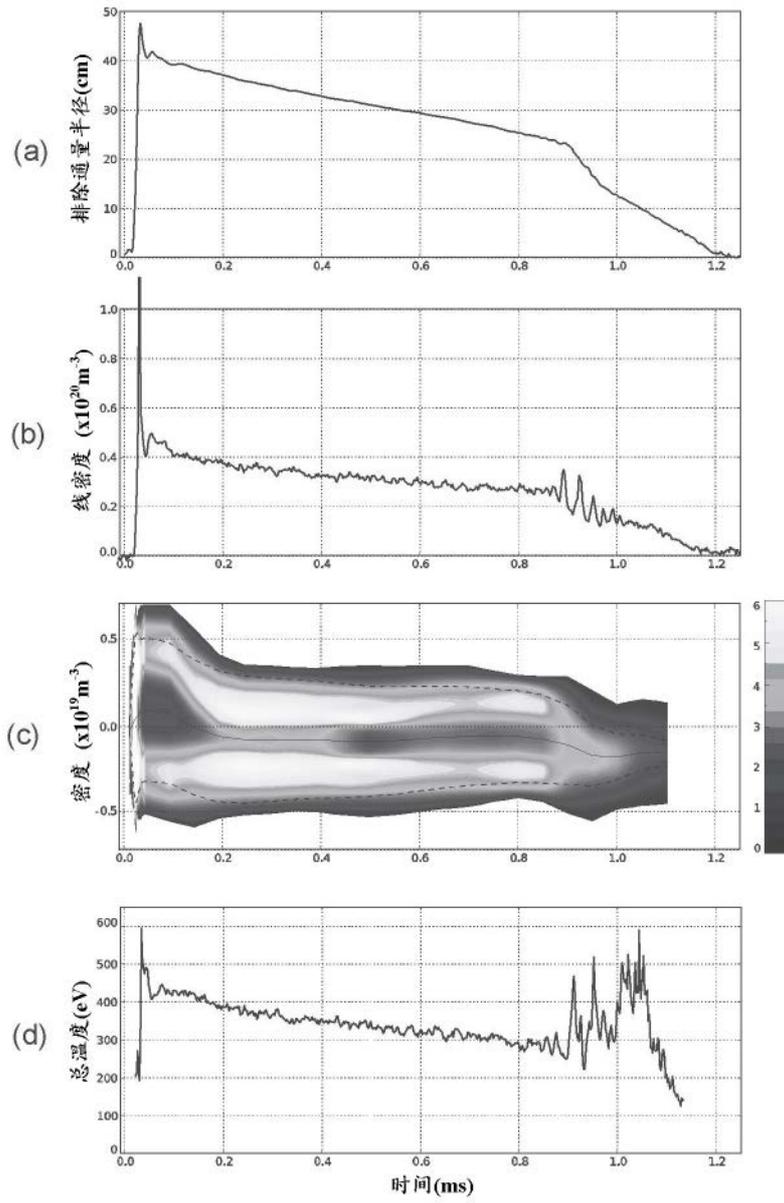


图 13

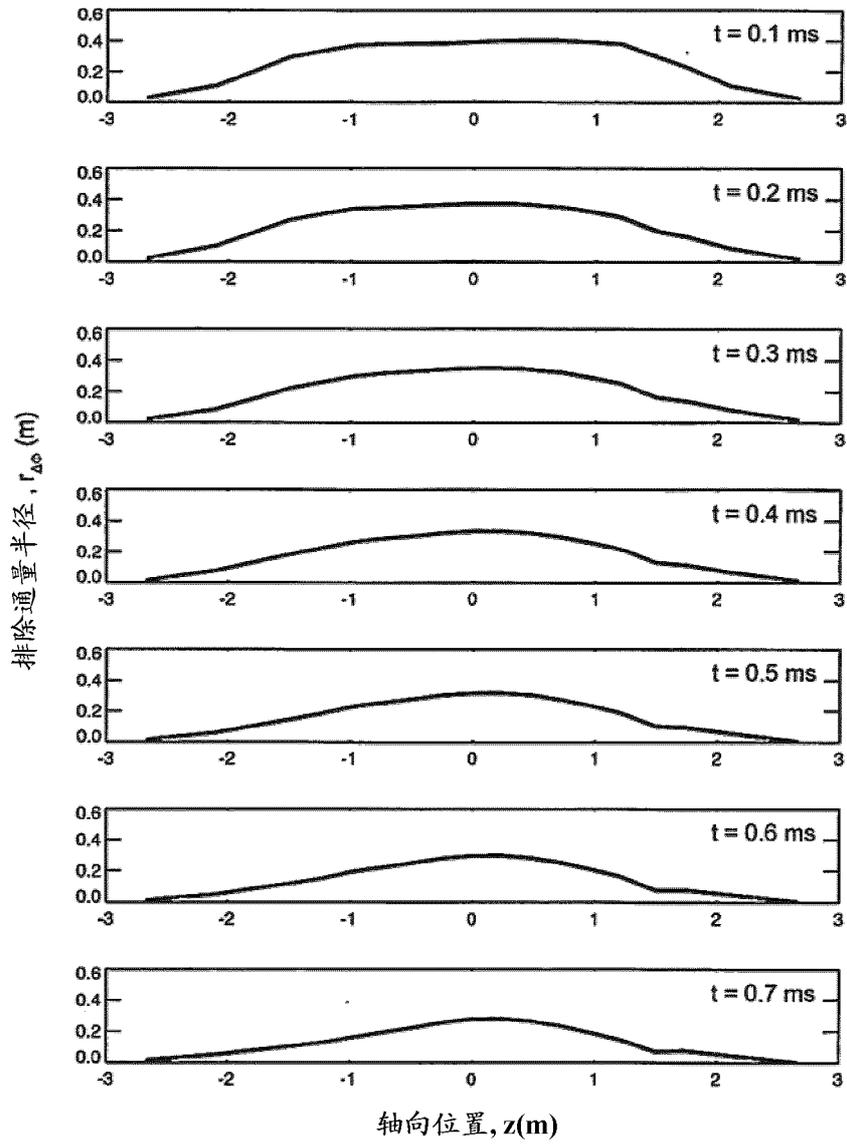


图 14

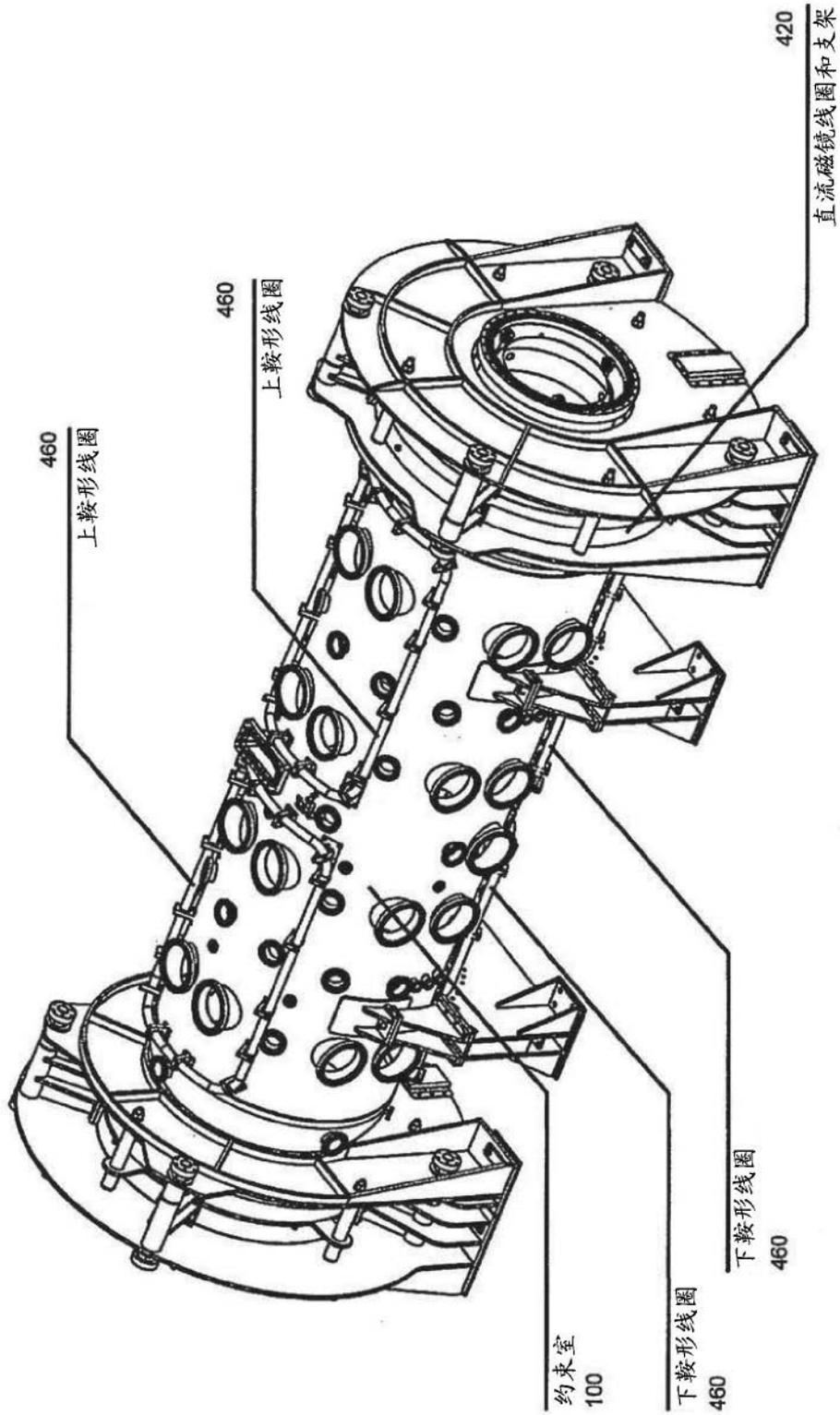


图 15

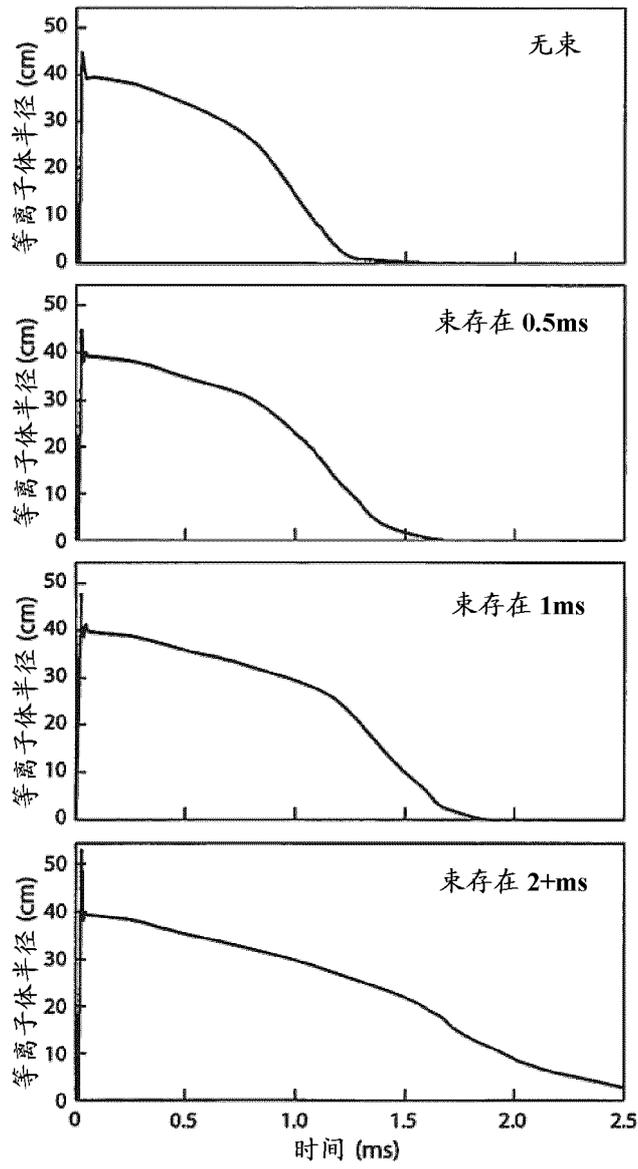


图 16

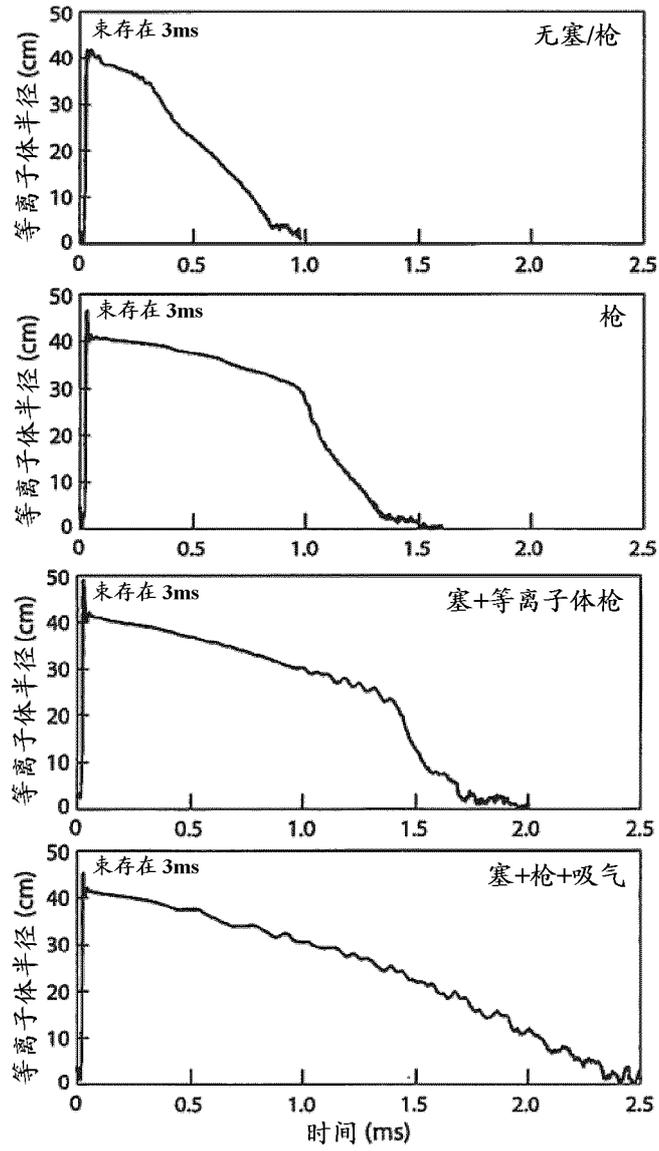


图 17

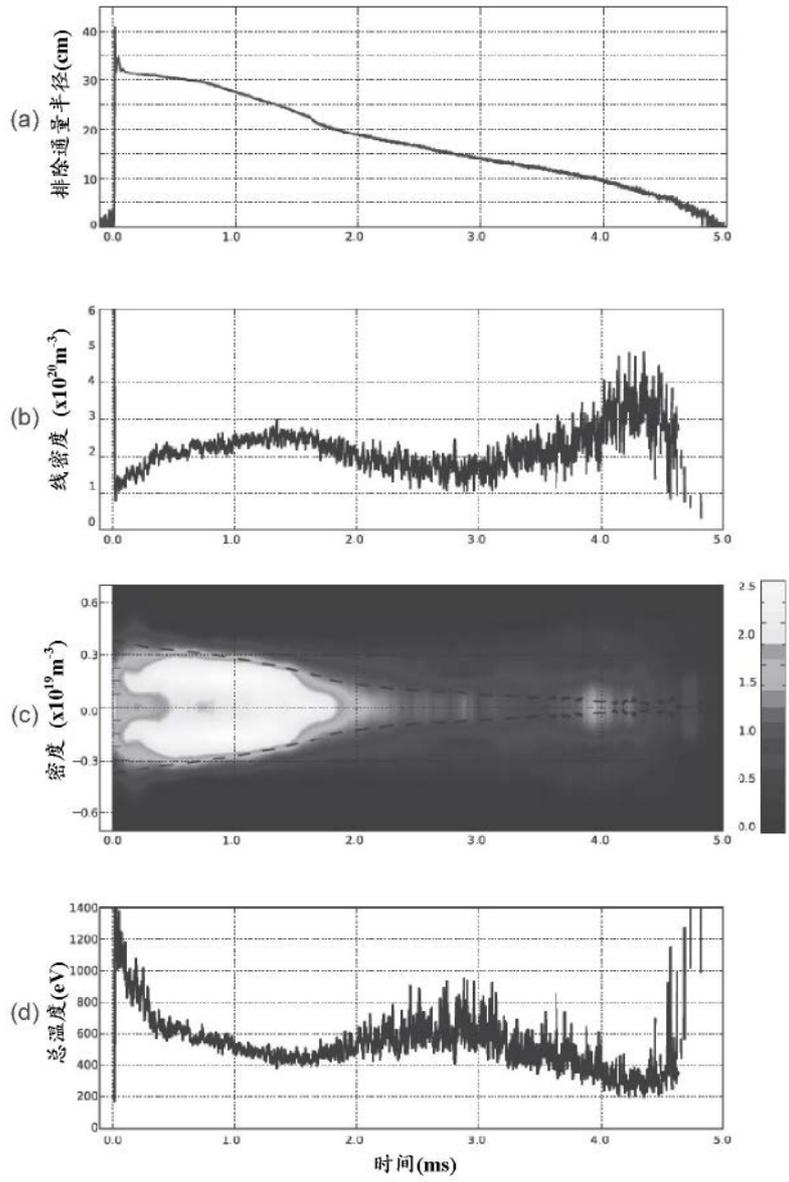


图 18

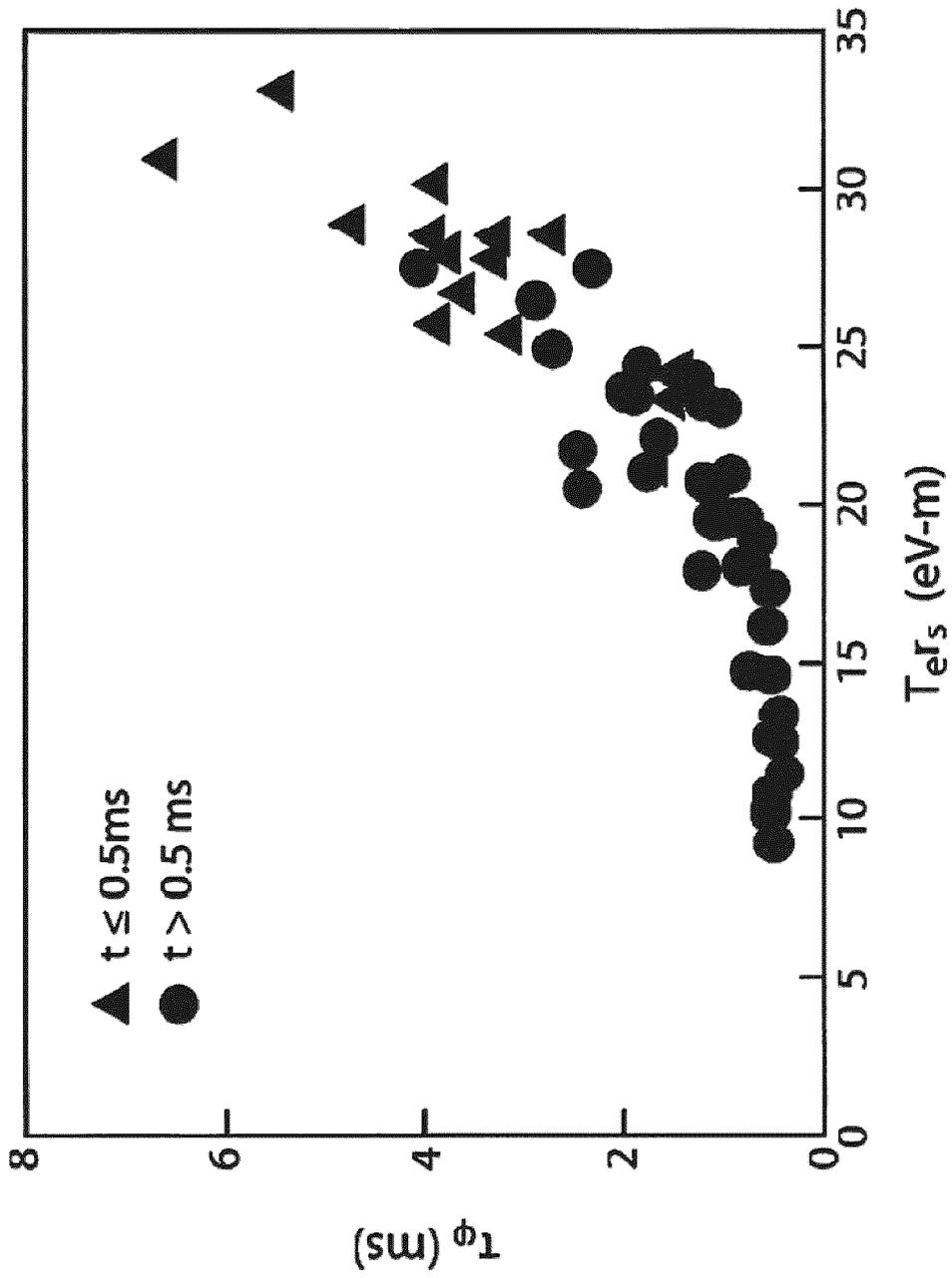


图 19

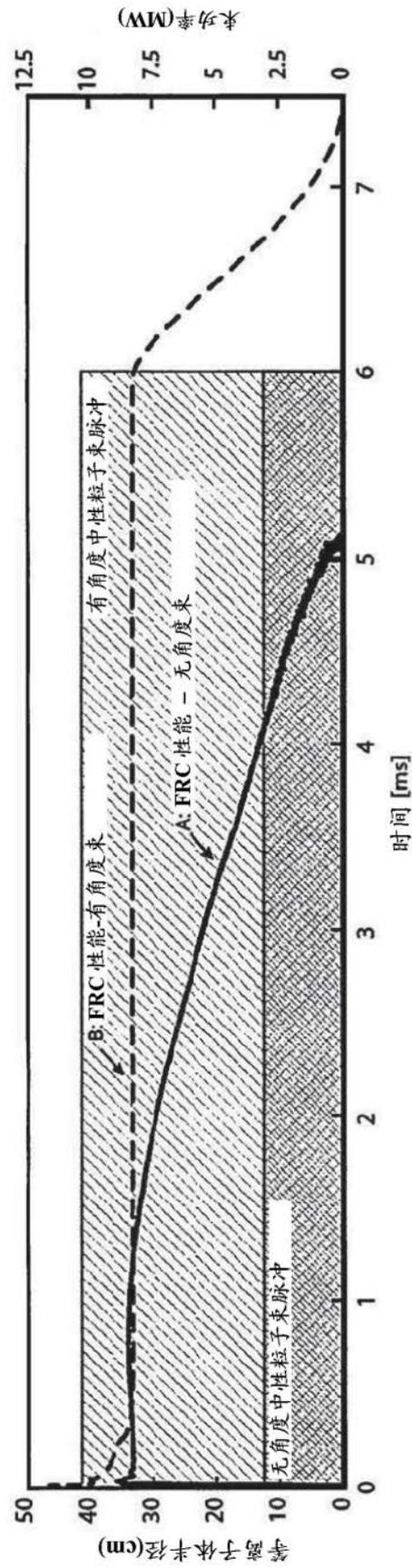


图 20

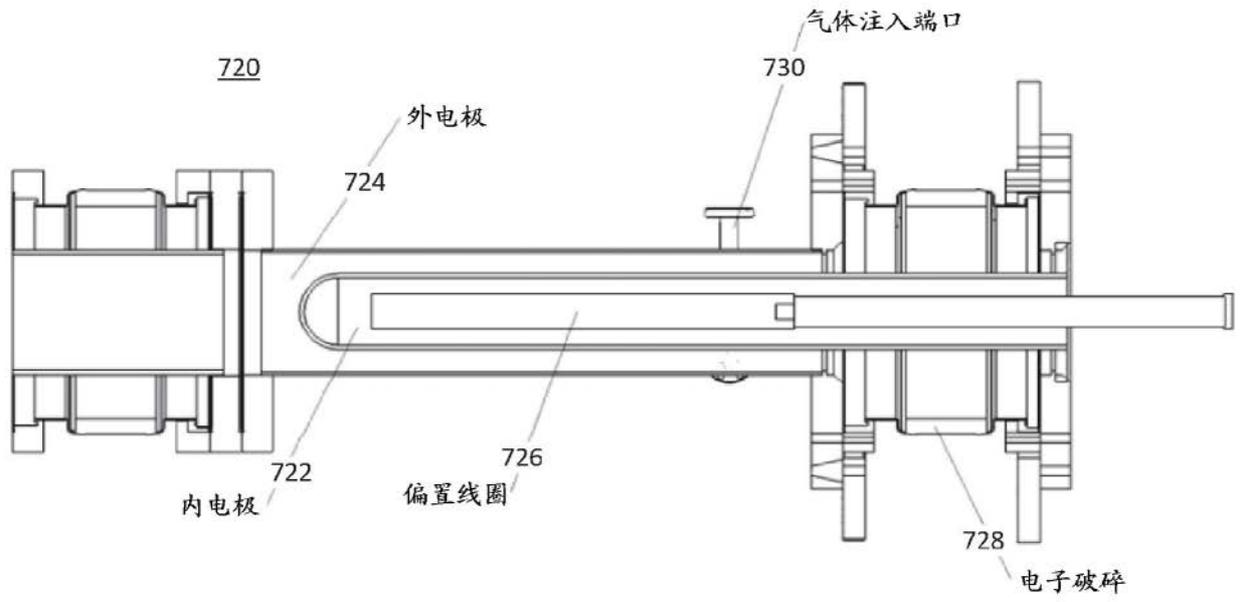


图 21A

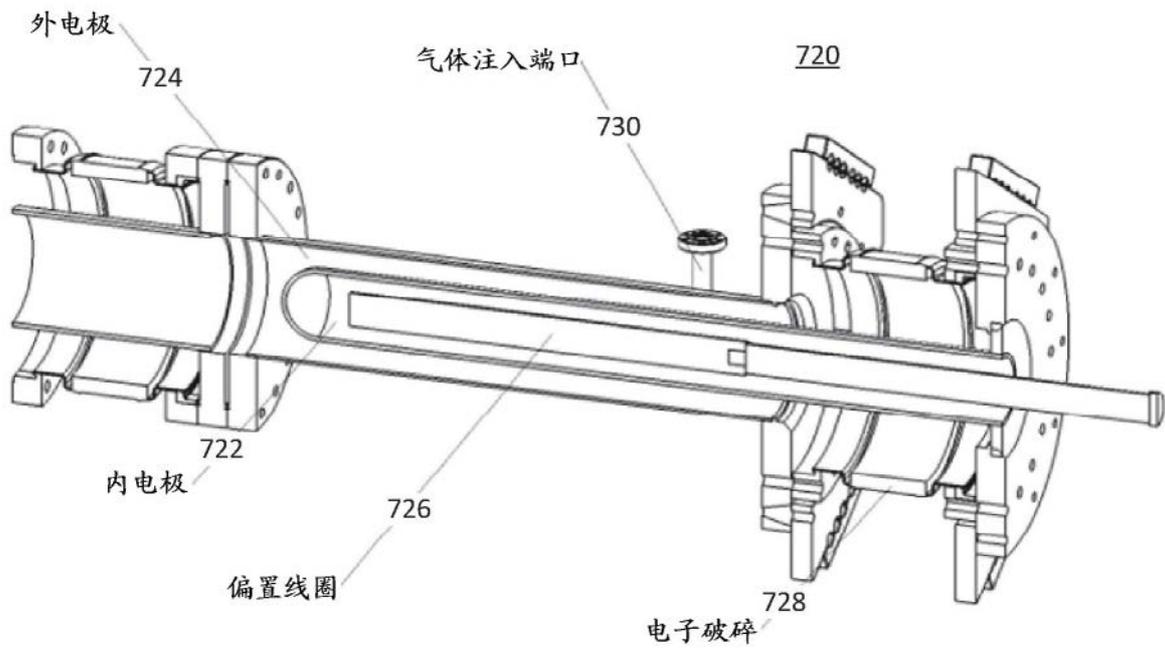


图 21B

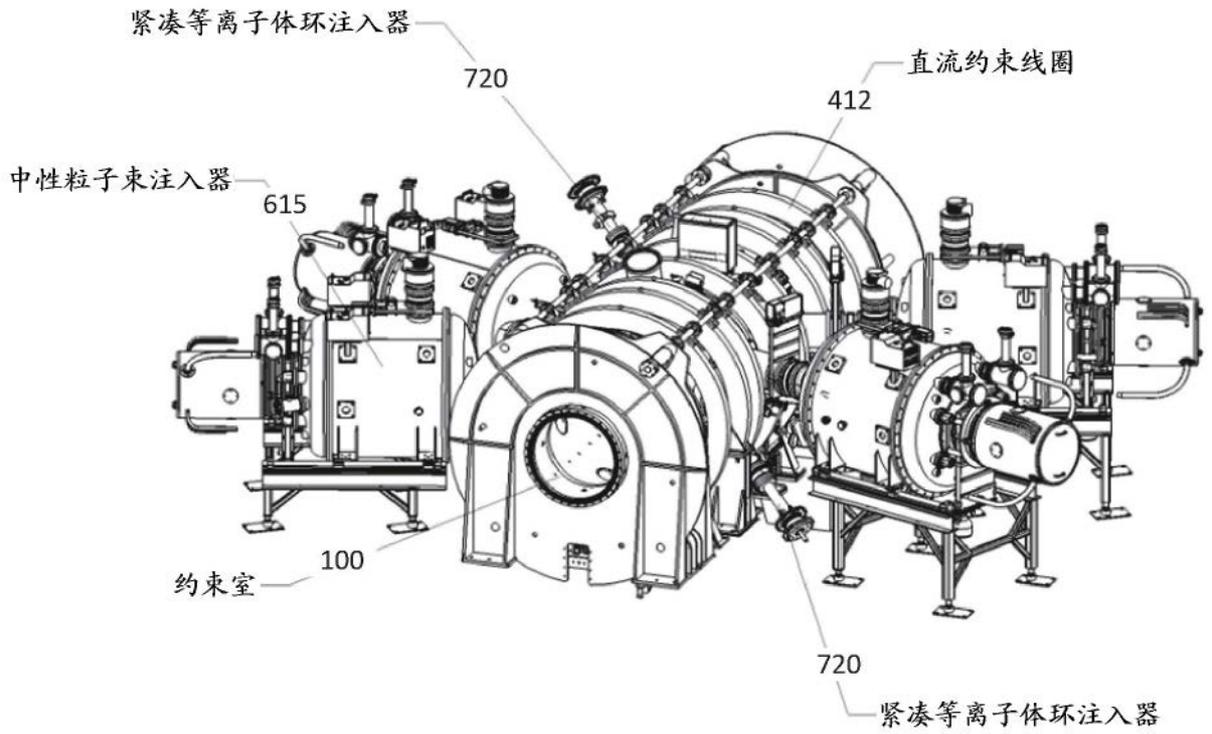


图 22A

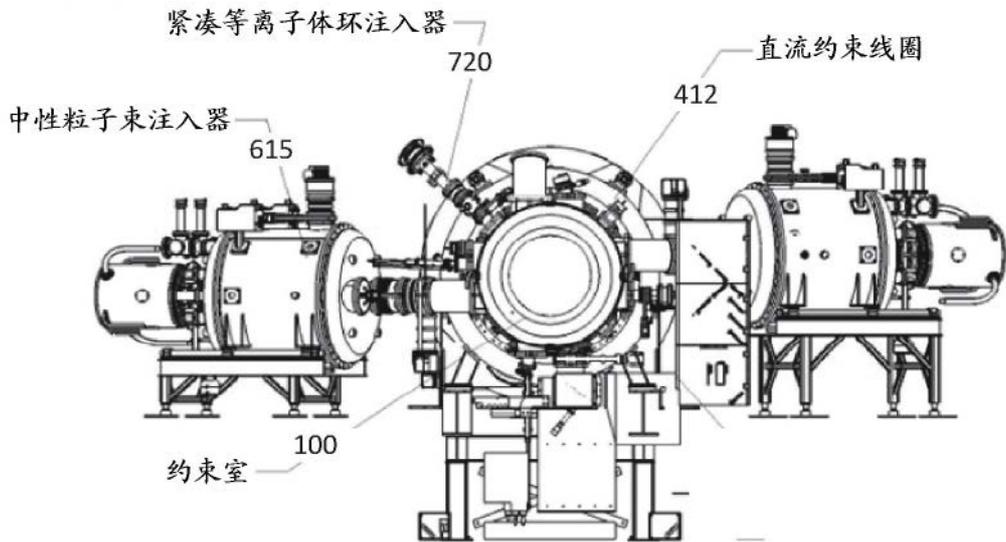


图 22B

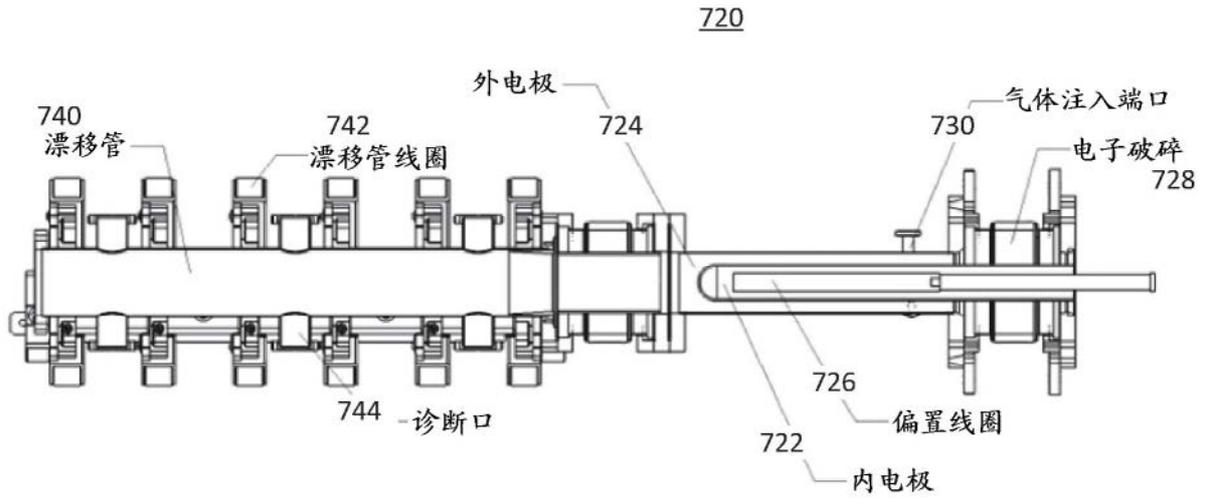


图 23A

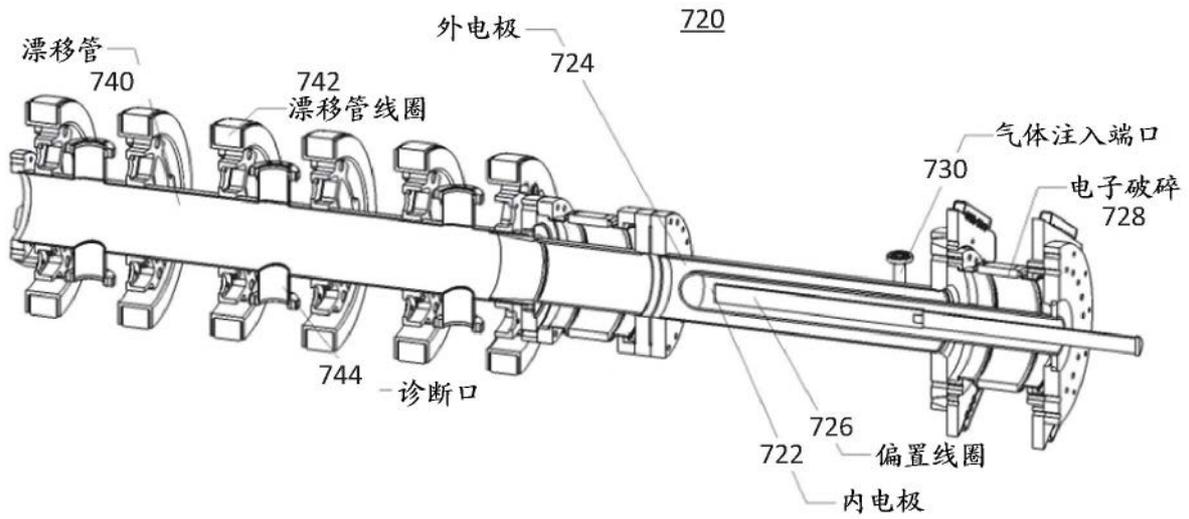


图 23B

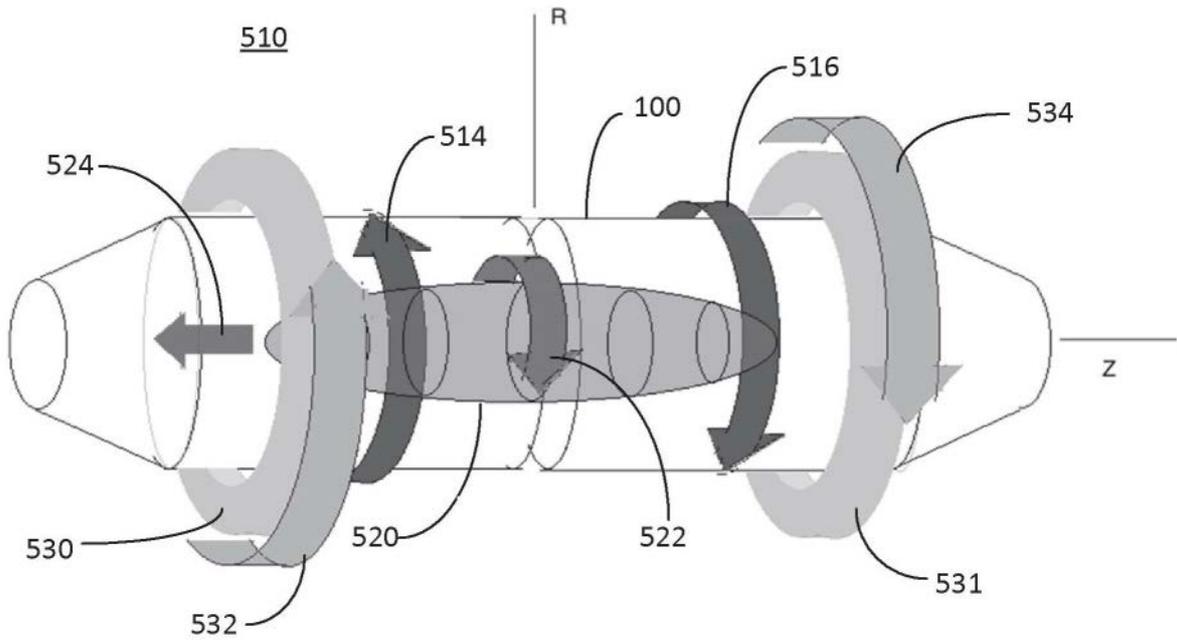


图 24

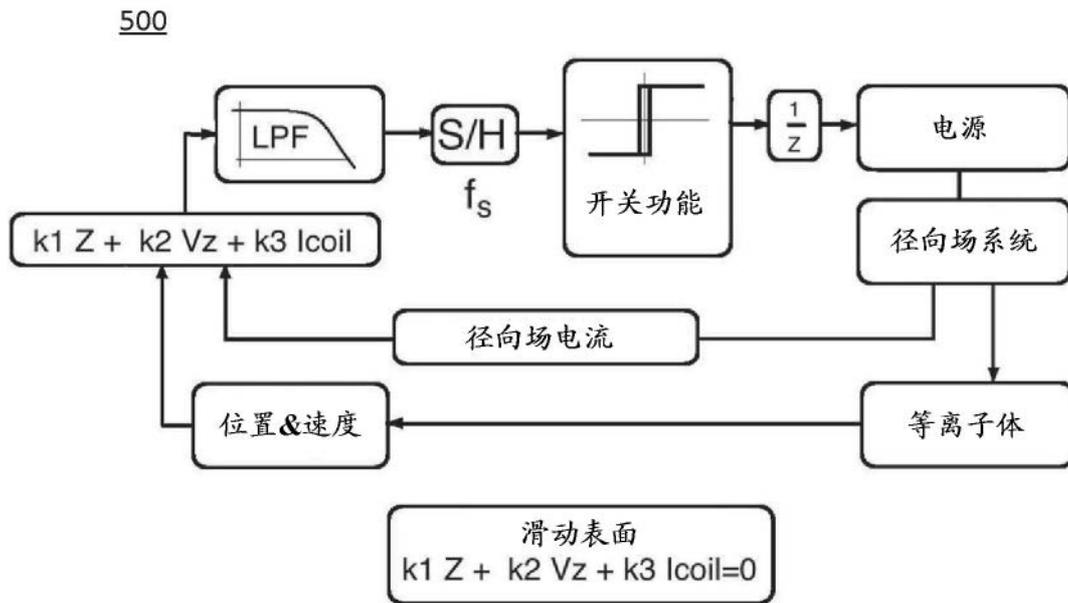


图 25

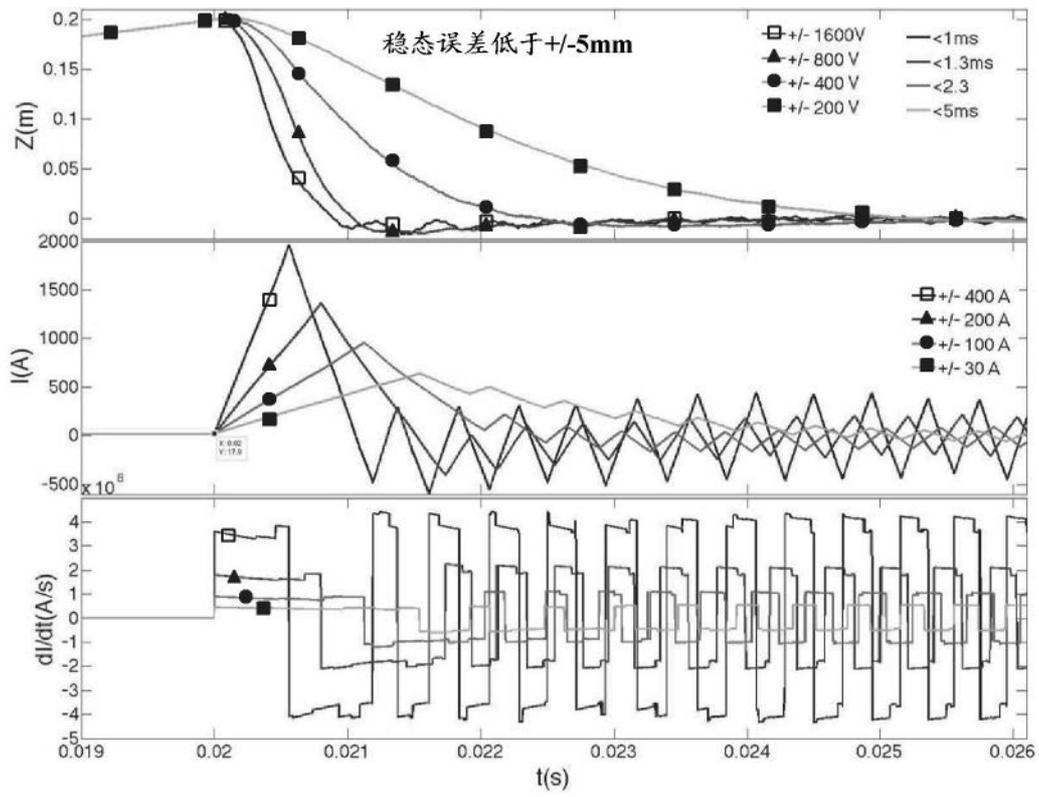


图 26

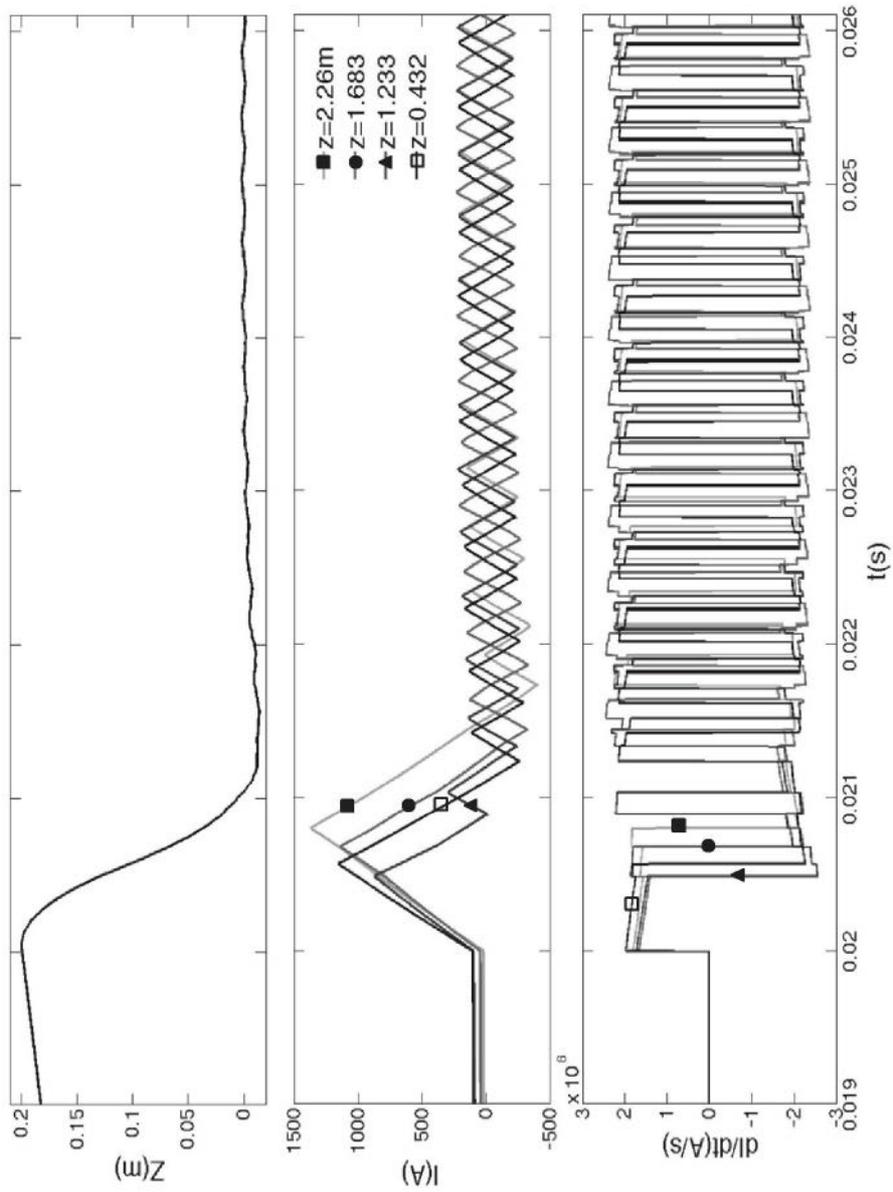


图 27