



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公告本

(11)證書號數：TW I559822 B

(45)公告日：中華民國 105 (2016) 年 11 月 21 日

(21)申請案號：100131046

(22)申請日：中華民國 100 (2011) 年 08 月 30 日

(51)Int. Cl. : **H05H13/00 (2006.01)**

(30)優先權：2011/07/07 美國 13/178,421
 2011/07/10 世界智慧財產權組織 PCT/US11/43483

(71)申請人：伊歐尼蒂克斯公司 (美國) IONETIX CORPORATION (US)
 美國

(72)發明人：安坦雅 提姆西 A ANTAYA, TIMOTHY A. (US)

(74)代理人：閻啟泰；林景郁

(56)參考文獻：

JP	2005-116328A	US	1948384
US	3925676	US	6683426B1
US	2007/0101742A1	US	2007/0171015A1
US	2009/0206967A1	US	2010/0148895A1

審查人員：林家正

申請專利範圍項數：23 項 圖式數：19 共 55 頁

(54)名稱

小型低溫超導之等時迴旋加速器

COMPACT, COLD, SUPERCONDUCTING ISOCHRONOUS CYCLOTRON

(57)摘要

一種小型低溫超導之等時迴旋加速器可以在一中央加速平面的相對兩側上包括至少兩個超導線圈。一磁軛圍繞該等線圈以及一射束室的一部分，離子在該射束室內被加速。一冷凍製冷機與該等超導線圈以及該磁軛均熱耦合。該超導等時迴旋加速器還包括多個扇形磁極尖端，該等磁極尖端提供了強聚焦；該等扇形磁極尖端可以具有一螺旋式構形並且可以由一稀土磁體形成。該等扇形磁極尖端還可以藉由一非磁性材料而與該軛的剩餘部分相分離。在其他實施方式中，該等扇形磁極尖端可以包括一超導材料。該等螺旋形磁極尖端還可以在該等扇形磁極尖端遠離該中央加速平面的一背側上包括多個切除部。

A compact, cold, superconducting isochronous cyclotron can include at least two superconducting coils on opposite sides of a median acceleration plane. A magnetic yoke surrounds the coils and a portion of a beam chamber in which ions are accelerated. A cryogenic refrigerator is thermally coupled both with the superconducting coils and with the magnetic yoke. The superconducting isochronous cyclotron also includes sector pole tips that provide strong focusing; the sector pole tips can have a spiral configuration and can be formed of a rare earth magnet. The sector pole tips can also be separated from the rest of the yoke by a non-magnetic material. In other embodiments, the sector pole tips can include a superconducting material. The spiral pole tips can also include cut-outs on a back side of the sector pole tips remote from the median acceleration plane.

指定代表圖：

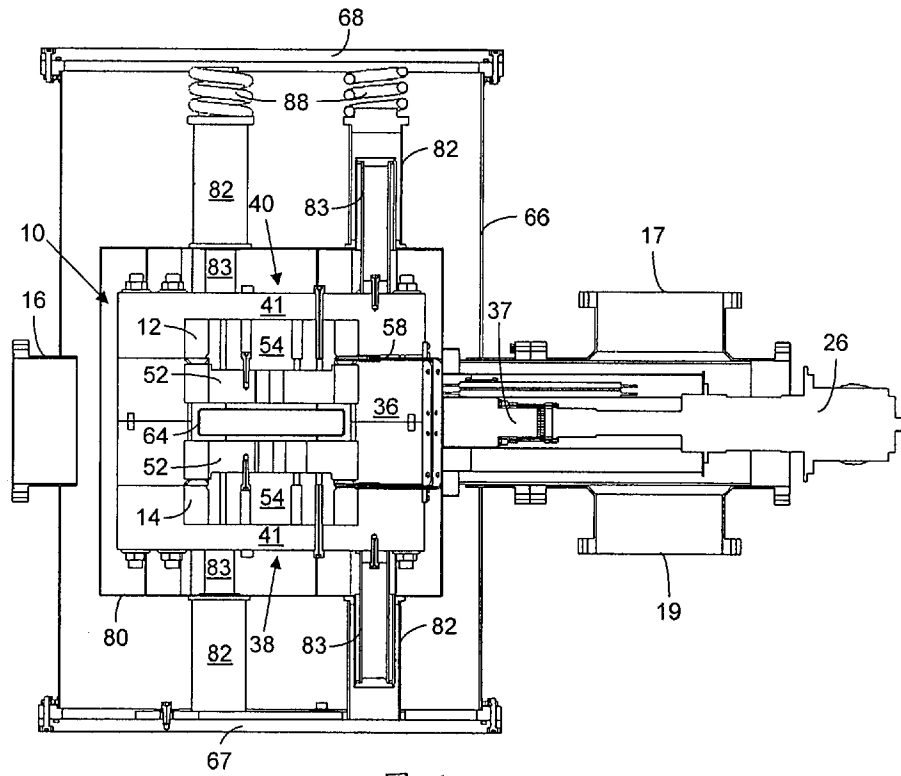


圖 1

符號簡單說明：

- 10 . . . 磁軛
- 12 . . . 超導磁線圈
- 14 . . . 超導磁線圈
- 16 . . . 中央軸線
- 17 . . . 引線埠
- 19 . . . 真空埠
- 26 . . . 低溫製冷機/
低溫冷卻器
- 36 . . . 回軛
- 37 . . . 熱連結物
- 38 . . . 磁極
- 40 . . . 磁極
- 41 . . . 磁極帽
- 52 . . . 磁極尖端
- 54 . . . 磁極基部
- 58 . . . 導電連結物/
導線連結物
- 64 . . . 射束室
- 66 . . . 恆冷器
- 67 . . . 恆冷器底板
- 68 . . . 恆冷器頂板
- 80 . . . 中間熱遮罩
物
- 82 . . . 隔離物
- 83 . . . 隔離物延伸
部分
- 88 . . . 受壓彈簧

發明專利說明書

(本說明書格式、順序，請勿任意更動，※記號部分請勿填寫)

※申請案號：100131046

※申請日：100.8.30

※IPC 分類：H05H 13/00 (2006.01)

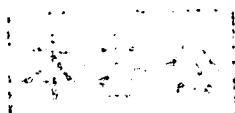
一、發明名稱：(中文/英文)

小型低溫超導之等時迴旋加速器

COMPACT, COLD, SUPERCONDUCTING ISOCHRONOUS
CYCLOTRON

二、中文發明摘要：

一種小型低溫超導之等時迴旋加速器可以在一中央加速平面的相對兩側上包括至少兩個超導線圈。一磁軛圍繞該等線圈以及一射束室的一部分，離子在該射束室內被加速。一冷凍製冷機與該等超導線圈以及該磁軛均熱耦合。該超導等時迴旋加速器還包括多個扇形磁極尖端，該等磁極尖端提供了強聚焦；該等扇形磁極尖端可以具有一螺旋式構形並且可以由一稀土磁體形成。該等扇形磁極尖端還可以藉由一非磁性材料而與該軛的剩餘部分相分離。在其他實施方式中，該等扇形磁極尖端可以包括一超導材料。該等螺旋形磁極尖端還可以在該等扇形磁極尖端遠離該中央加速平面的一背側上包括多個切除部。



三、英文發明摘要：

A compact, cold, superconducting isochronous cyclotron can include at least two superconducting coils on opposite sides of a median acceleration plane. A magnetic yoke surrounds the coils and a portion of a beam chamber in which ions are accelerated. A cryogenic refrigerator is thermally coupled both with the superconducting coils and with the magnetic yoke. The superconducting isochronous cyclotron also includes sector pole tips that provide strong focusing; the sector pole tips can have a spiral configuration and can be formed of a rare earth magnet. The sector pole tips can also be separated from the rest of the yoke by a non-magnetic material. In other embodiments, the sector pole tips can include a superconducting material. The spiral pole tips can also include cut-outs on a back side of the sector pole tips remote from the median acceleration plane.

四、指定代表圖：

(一)本案指定代表圖為：圖 1。

(二)本代表圖之元件符號簡單說明：

10	磁軌
12	超導磁線圈
14	超導磁線圈
16	中央軸線
17	引線埠
19	真空埠
26	低溫製冷機/低溫冷卻器
36	回軌
37	熱連結物
38	磁極
40	磁極
41	磁極帽
52	磁極尖端
54	磁極基部
58	導電連結物/導線連結物
64	射束室
66	恆冷器
67	恆冷器底板
68	恆冷器頂板
80	中間熱遮罩物
82	隔離物

83 隔離物延伸部分

88 受壓彈簧

五、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：

無

六、發明說明：

【發明所屬之技術領域】

本發明一般關於迴旋加速器，尤其是關於小型低溫超導之等時迴旋加速器。

【先前技術】

美國專利號 1,948,384 (發明人：Ernest O. Lawrence，專利公佈時間：1934) 揭露了一迴旋加速器，該迴旋加速器使用來自一對電極的電場脈衝以及一磁體結構在一向外的螺旋中加速離子（帶電粒子）。Lawrence 的加速器設計現在通常被稱為“經典的”迴旋加速器，其中該等電極提供了一固定的加速頻率，並且磁場隨著半徑的增大而減小，為維持在軌道中運行的離子的垂直相位穩定性提供了“弱聚焦”。

在現代迴旋加速器中，有一種類型其特徵係“等時的”，其中該等電極提供的加速頻率與經典迴旋加速器一樣是固定的，儘管磁場隨著半徑的增大而增大以對相對性做出補償；並且在離子加速過程中藉由一隨方位角地變化的磁場部件來施加一軸向恢復力，該磁場部件源自多個具有磁區週期性的、波狀外形的鐵磁極件。大多數等時迴旋加速器使用電阻性磁體(resistive magnet)技術並且在從 1 特斯拉到 3 特斯拉的磁場水準下運行。一些等時迴旋加速器使用超導磁鐵技術，其中超導線圈磁化多個暖鐵磁極，該等暖鐵磁極提供用於離子加速的導引和聚焦磁場。對質子

而言，該等超導等時迴旋加速器可以在低於 3 特斯拉的磁場水準下運行，並且當被設計為加速更重的離子時，可以在高達 3 至 5 特斯拉的水準下運行。本發明人於 20 世紀 80 年代早期在密西根州立大學從事第一個超導迴旋加速器計畫。

另一類迴旋加速器係同步迴旋加速器。與經典迴旋加速器或等時迴旋加速器不同，同步迴旋加速器內的加速頻率隨著離子向外螺旋運動而減小。同樣，與等時迴旋加速器不同，儘管與經典迴旋加速器類似，同步迴旋加速器內的磁場隨著半徑的增大而減小。與現有的超導等時迴旋加速器類似，同步迴旋加速器先前曾具有暖鐵磁極以及低溫超導線圈，但是在加速過程中係以一不同的、適用於更高場的方式來維持射束聚焦因此可在例如大約 9 特斯拉的磁場中運行。

【發明內容】

在此描述了一種小型低溫超導之等時迴旋加速器。用於其構造及使用的裝置和方法的不同實施方式可以包括以下描述的元件、特點及步驟中的一些或全部。

該小型低溫超導之等時迴旋加速器可以在一中央加速平面的相對兩側上包括至少兩個超導線圈。一磁軛圍繞該等線圈並且包括一射束室的一部分，離子在該射束室內被加速；並且該中央加速平面延伸通過該射束室。一低溫製冷機與該等超導線圈以及與該磁軛熱耦合；例如，該磁軛

可以與來自該低溫製冷機的一熱連結物以及與該等超導線圈處於熱接觸。該超導等時迴旋加速器還可以包括多個螺旋形磁極尖端，該等磁極尖端供應一基於磁區的、或者方位角而變化的磁場以提供強聚焦來維持加速離子的垂直穩定性；該等螺旋形磁極尖端可以由一稀土磁體形成並且可以從該軛的剩餘部分磁性地懸浮開（即，由非磁性成分分離開）。在其他實施方式中，該等磁極尖端可以包括一超導體。該等磁極尖端還可以在該等尖端遠離該中央加速平面的一背側上包括多個切除部以形成所產生的磁場的場形(profile)。

在等時迴旋加速器運行過程中，在一內半徑處將一離子導入該中央加速平面內。將來自一射頻電壓源的電流施加到一對電極板上用於在跨過該中央加速平面的一擴展的軌道內加速該離子，這對電極板安裝在該磁軛內部的中央加速平面的相對兩側上。該等超導線圈由該低溫製冷機冷卻到一不大於該等超導線圈的超導轉變溫度的溫度（例如，10 到 12K），並且該磁軛同樣被冷卻（例如，冷卻到 $\leq 50\text{K}$ ）。將一電壓供應給該等冷卻的超導線圈以便在該等超導線圈內產生一超導電流，該等超導線圈產生一磁場，該磁場在該中央加速平面內加速該離子；並且當該已加速的離子達到一外半徑時，將其從射束室中提取出來。

可以將整個磁鐵結構（包括線圈、磁極、返回路徑鐵軛、微調線圈、超導磁體、成形的鐵磁性磁極表面、以及邊緣場抵消線圈或材料）安裝到一個單一而簡單的熱學支

撐件上、安裝在一恆冷器內並且保持在該等超導線圈的運行溫度處或附近。因為軌與該等線圈之間沒有間隙，不需要為該等線圈使用一分離的機械支撐結構來減輕巨大的離心力，該等離心力典型地出現於現有的超導迴旋加速器內的高場處；而且，可以基本上減小或消除離心力。

可以使用磁軌的冷磁鐵材料來同時地使磁場成形並且從結構上支撐該等超導線圈，從而進一步降低複雜度並且增大等時迴旋加速器的內在安全性。而且，隨著所有磁體被包含在恆冷器之內，通過附加在恆冷器內的中間溫度遮罩物上的多個抵消磁場的超導線圈亦或抵消磁場的超導表面，可以在不會不利地影響加速磁場的情況下抵消外部邊緣磁場。

在此描述的該等等時迴旋加速器設計可以提供許多優於現有的超導等時迴旋加速器並優於現有的超導同步迴旋加速器的額外優點，它們已經比習知的等效物更小型並且更便宜。例如，磁體結構可以被簡化，因為不需要使用分離的支撐結構來維持磁路組成之間的力平衡，這可以降低總成本、提高總體安全性、並且降低對用於管理外部磁場的空間及主動保護系統的需要。此外，等時迴旋加速器可以在一低的相對論係數下運行並且可以產生一高磁場（例如，6 特斯拉或更高）。此外，該裝置不需要複雜的變頻加速系統，因為該等等時迴旋加速器的設計能夠以一固定加速頻率運行。因此，本揭露的等時迴旋加速器可以在多樣的狀況及更小的限制中使用。

【實施方式】

本發明的不同方面的以上及其他特點和優點將從以下在本發明的更廣義的範圍內對不同概念及具體實施方式的更具體說明中變得清楚。能夠以許多方式之一實施在以上介紹的並在以下更詳細討論的主題的不同方面，因為本主題不限於任何具體的實現方式。主要為解說的目的提供了具體實現方式及應用的多個實例。

除非在此另外地定義、使用或表徵，在此使用的術語（包括技術及科學術語）應被解釋為具有與它們在相關技術的背景下游被接受的含義一致的含義並且不應以一理想化或過分正式的含義來解釋，除非在此明確地那樣定義。例如，如果提及一具體的成分，那麼該成分可以是基本上（儘管不是完全）純淨的，因為可能出現實際的及不完美的現實狀況；例如，可能存在至少痕量的雜質（例如，按重量或體積計小於 1% 或 2%）可以被理解為是在本說明書的範圍內；同樣，如果提及了一具體的形狀，那麼該形狀旨在包括來自理想形狀的不完美的變體，例如，由於機械容差造成的。

儘管該等術語第一、第二、第三、等等可以在此用於描述不同的元件，但是該等元件不受該等術語的限制。該等術語可以簡單地用於將元件彼此區分。因此，在不背離該等示例性實施方式的傳授內容的情況下，以下討論的第一元件可以被稱為一第二元件。

空間關係術語，如“之上”、“上部”、“在……之下”、“之下”、“下部”、等等，可以為了易於描述而在此用於說明一個元件與另一個元件的關係，如在圖示中所展示的。應當理解的是，該等空間關係術語以及所展示的構形旨在包括除在此描述並在圖示中描繪的定向之外的、在使用或在運行中的裝置的不同定向。例如，如果將圖示中的裝置翻轉過來，那麼描述為在其他元件或特點“之下”或“在…之下”的元件將會被定向為在其他元件或特點“之上”。因此，示例性術語“之上”可以包含之上和之下的定向；並且該裝置可以是按其他方式定向的（例如，旋轉 90 度或處於其他定向）並且在此使用的該等空間關係描述符號也對應地得以解釋。

仍進一步，在本揭露中，當一個元件被稱為在另一個元件“上”、“連接到”另一個元件上或者“耦接到”另一個元件上，它可以直接在另一個元件“上”、“連接到”或“耦接到”另一個元件上或者可以存在中間元件，除非另外指明。

在此使用的術語係為了描述具體實施方式的目的並不在限制該等示例性實施方式。如在此所使用的，單數形式（如“一個”及“一種”及“一”）旨在同樣包括複數形式，除非上下文另外清楚地指明。此外，術語“包含”、“包含著”、“包括”以及“包括著”指明存在所述元件或步驟但並不排除存在或附加有一或多個其他的元件或步驟。

在圖 1 至圖 10 中從不同角度並藉由不同的截面示出了等時迴旋加速器的一實施方式。等時迴旋加速器包括一磁軌 10，該磁軌具有一對磁極 38 和 40，該等磁極各自包括一磁極帽 41、一磁極基部 54、以及複數個螺旋形磁極尖端 52 和一回軌 36，它們包含一射束室 64 的至少一部分，該射束室包含用於離子加速的中央加速平面的一區段。該等磁極 38 和 40 展現了跨過該中央加速平面的、近似的鏡像對稱並且在磁軌 10 的周長處由一回軌 36 接合。

如圖 1、圖 2 和圖 4 所示，等時迴旋加速器的軌 10 係由多個結構隔離物 82 支撐並定位，該等隔離物係由一具有不良導熱性的成分形成，如環氧樹脂-玻璃複合物、碳複合物或薄壁金屬（例如，不銹鋼）結構，其中在外部恆冷器 66 與中間熱遮罩物 80（例如，在 45 K）之間形成彎曲結構通路的隔離物延伸部分 83 用於限制它們之間的熱傳遞，因為隔離物 82 和隔離物延伸部分 83 在外部恆冷器 66（例如，由不銹鋼或低碳鋼形成並且在所包含的體積內提供一真空屏障）與熱遮罩物 80（例如，由銅或鋁形成）之間提供了結構支撐。一受壓彈簧 88 在壓縮狀態下保持了中間熱遮罩物 80 和包含在其中的等時迴旋加速器。

一對超導磁線圈 12 和 14（例如，可以產生磁場的線圈）對應地被包含在上部與下部磁極 38 和 40 內並與其及磁軌 10 的回軌 36 相接觸（即，未被恆冷器或自由空間完全分離），這樣使得軌 10 提供超導磁線圈 12 和 14 支撐並與超導磁線圈 12 和 14 熱接觸。因此，超導磁線圈 12 和 14 不

會受到外部離心力，並且沒有必要使用張力連接物來將超導磁線圈 12 和 14 保持在恆冷器 66 的中心處。在替代實施方式中，磁線圈 12 和 14 可以不與軛 10 處於直接熱接觸，其中低溫製冷機 26 可以分別冷卻磁線圈 12 和 14 以及軛 10（例如，線圈 12 和 14 可以在 4 K 與低溫製冷機的一第二級進行熱耦合，同時軛可以在 40 K 與低溫製冷機的一第一級進行熱耦合。）在其他實施方式中，這種熱耦合可以包括一放置在線圈 12 和 14 與軛 10 之間的熱屏障，從而允許將軛冷卻到 50 K 或更低，儘管在線圈 12 和 14 與軛 10 之間提供了一溫度差。在仍其他實施方式中，這種熱耦合可以包括與低溫製冷機 26 處於熱接觸並且還與軛 10 及線圈 12 和 14 相接觸的液態氮以便為每一者提供冷卻作用。

通過一根電流引線為超導線圈 12 和 14 提供電流，該電流引線係與一電壓源相耦接並且係透過恆冷器內的一引線埠 17 而被饋電以便為低溫導線連結物 58 提供電流，該低溫導線連結物與線圈 12 和 14 熱耦合。

磁線圈 12 和 14 包括超導體電纜或通道內電纜導體，其中單獨的電纜股具有 0.3 mm 至 1.2 mm 的直徑（例如，0.6 mm）並且將它們纏繞以提供例如在 4 百萬至 6 百萬的總安培-匝數之間的載流量。在每股具有 1,000 至 2,000 安培的超導載流量的通道內電纜導體的一實施方式中，在線圈內提供了 3,000 繞的電纜股以在線圈內提供一個 3 百萬至 6 百萬安培-匝數的容量。在另一實施方式中，一條單股電纜可以承載 100 至 400 安培並且提供大約一百萬安培-匝數。

總體而言，線圈可以被設計為具有在不超過承載超導電纜股的臨界載流量的情況下產生一所希望的磁場水準所需要的安培-匝數所需要的繞數。超導材料可以是一低溫超導體，如鈮鈦合金 (NbTi)、鈮錫合金 (Nb_3Sn)、或鈮鋁合金 (Nb_3Al)；在具體實施方式中，超導材料係類型 II 的超導體，特別是具有類型 A15 晶體結構的 Nb_3Sn 。還可以使用高溫超導體，如 $\text{Ba}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$ 、 $\text{Ba}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ 、 MgB_2 、或 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 。

該等線圈可以直接由超導體的電纜或通道內電纜導體形成。在鈮錫合金的情況下，還可以將未反應的鈮和錫 (3 : 1 莫耳比) 的股纏繞為電纜。然後，該等電纜可以被加熱到大約 650°C 的溫度用於使鈮和錫反應來形成 Nb_3Sn 。然後， Nb_3Sn 電纜被焊接到一 U 形銅通道內來形成複合導體。銅通道在淬火過程中提供機械支撐、熱穩定性；並且當超導材料係常態 (即，不是超導的) 時，為電流提供導電通路。然後，複合導體被包裹在玻璃纖維中並且然後被纏繞在一外部覆蓋物內。還可以將 (例如) 由不銹鋼形成的帶狀加熱器插入到複合導體的繞線層之間，以便當將磁體淬火時提供快速加熱並且還在淬火已經發生後在線圈的徑向截面上提供溫度平衡，從而將可能損壞線圈的熱應力及機械應力最小化。繞線後，施加一真空，並且用環氧樹脂填充繞線後的複合導體結構以便在最終的線圈結構內形成纖維/環氧樹脂複合填充物。所產生的、該已繞線的複合導體嵌入在其內的環氧樹脂-玻璃複合物提供電絕緣和機械剛度。在

美國專利號 7,696,847 B2 以及美國專利申請公開號 2010/0148895 A1 中進一步描述並展示了該等磁線圈的特點以及它們的構造。

在其他實施方式中，線圈 12 和 14 可以由單獨的股（小圓線）製成並且用環氧樹脂進行濕繞線然後固化，或者乾繞線並在繞線之後填充以形成一複合線圈。

每個線圈 12/14 係由環氧樹脂-玻璃複合物的一接地包覆（ground-wrap）的額外外層以及（例如）由銅或鋁形成的帶狀箔片的熱外包覆物所覆蓋，如在美國專利申請序號 12/951,968 中所描述的。該熱外包覆物與用於低溫冷卻的一低溫導電連結物 58 以及磁極帽 41、磁極基部 54 連同回軌 36 均處於熱接觸，儘管熱外包覆物與磁極帽和基部以及回軌 36 之間的接觸可能是或不是處於外包覆物的整個表面上（例如，可能僅在相鄰表面上的有限數目的接觸區域進行直接或間接的接觸）。對低溫導電連結物 58 與軌 10 係“熱接觸”的這種特性的描述係指，導電連結物 58 與軌之間或者存在直接接觸、或者通過一或更多導熱介入材料而存在實體接觸（例如，在運行溫度下具有大於 $0.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的熱導率），如具有適當的熱差收縮的導熱填充物材料，該材料可以被安裝在熱外包覆物與低溫導電連結物 58 之間並且與外包覆物齊平，以便在等時迴旋加速器的冷卻與升溫的情況下適應該等部件之間在熱膨脹上的差異。

低溫導電連結物 58 進而與低溫冷卻器熱連結物 37 熱耦合（在圖 1 及圖 4 至圖 8 中示出），該低溫冷卻器熱連

結物進而與低溫冷卻器 26 熱耦合（在圖 1 及圖 4 至圖 10 中示出）。因此，熱外包覆物在低溫冷卻器 26、軌 10 以及超導線圈 12 和 14 之間提供熱接觸。

最後，可以在熱外包覆物與低溫導電連結物 58 之間安裝一具有適當的熱差收縮的填充物材料並使該填充物材料與它們齊平，以便在磁體結構冷卻與升溫的情況下適應該等部件之間在熱膨脹上的差異。

超導磁線圈 12 和 14 在中央加速平面 18（見圖 14）的相對兩側上圍繞著射束室 64 的區域（離子在其中被加速），並且用於直接在中央加速平面 18 內產生極高的磁場。當藉由一施加的電壓而被啟動時，磁線圈 12 和 14 進一步將軌 10 磁化，這樣使得軌 10 同樣產生一磁場，可以將該磁場與由磁線圈 12 和 14 直接產生的磁場視為不同。

磁線圈 12 和 14 等距地在中央加速平面 18 之上和之下關於一中央軸線 16 基本上（方位角地）對稱地安排，離子在該平面內被加速。超導磁線圈 12 和 14 被分離開一充分的距離以允許在射束室 64 內至少一對 RF 加速電極板 49 以及一周圍的超絕緣層在它們之間延伸，在該射束室內可以維持一處於或近似室溫的溫度（例如，大約 10°C 至大約 30°C ）。每個線圈 12/14 包括導體材料的一條連續通路，該材料在所設計的運行溫度（一般在 4 至 40 K 的範圍內）下是超導的，但同樣可以在 2 K 以下運行，其中可獲得額外的超導性能及裕度。當迴旋加速器有待在更高溫度下運行時，可以使用如鈹鋁鈣銅氧化物（BSCCO）、鈹鋁銅氧化

物 (YBCO) 或 MgB_2 的超導體。

本揭露的、被設計為產生一個 12.5-MeV 束的小型低溫迴旋加速器可以具有一大約 10 cm 的內部線圈半徑以及一個 3.5 cm 寬 6 cm 高的截面 (在圖 1 和圖 2 的定向上)。線圈 12 和 14 還可以在中央加速平面的相對兩側上分離開 198 mm 的距離。藉由增大線圈的半徑及磁體結構的剩餘部分可以將等時迴旋加速器調整到更高電壓以將離子加速。對於一給定的磁體大小及場強度而言, 該裝置還可以被調整為用於比質子更重的離子, 一更重的離子 (例如, 氬或更重) 加速後的總能量將小於或等於一加速後質子的能量的一半, 這樣用於更重離子的這種磁體結構能夠提供的、隨著半徑增長的垂直聚焦和磁場的增長會更小。

借助於該等高磁場, 可以將磁體結構製作得特別小。在一實施方式中, 磁軌 10 的外半徑係從中央軸線 16 到磁線圈 12 和 14 的內部邊緣的半徑 r 的大約 2.4 倍, 同時磁軌 10 的高度 (平行於中央軸線而測量) 係半徑 r 的大約兩倍。

在中央加速平面 18 內, 磁線圈 12 和 14 以及軌 10 (包括回軌 36、磁極帽 41、磁極基部 54 (如果是由磁性材料形成)、以及扇形磁極尖端 52) 一起在用於離子導入的內半徑處產生一 (例如) 至少 6 特斯拉的合成磁場並且在更大半徑處產生更高的磁場。當將一電壓施加到超導磁線圈 12 和 14 上以起始並維持一流經超導磁線圈 12 和 14 的連續超導電流時, 磁線圈 12 和 14 可以在中央加速平面內產生大部分 (例如) 大於 3 特斯拉磁場。軌 10 被超導磁線圈 12

和 14 產生的磁場磁化並且可以替在用於離子加速的室內產生的磁場再貢獻高達 3 特斯拉或更高（當該等磁極尖端係由稀土鐵磁體形成時）。

兩個磁場分量（即，直接從線圈 12 和 14 產生的磁場分量以及由被磁化的磁軛 10 所產生的磁場分量兩者）都與中央加速平面 18 近似正交地通過中央加速平面 18，如圖 12 所示。然而，由完全磁化的軛 10 在該室內的中央加速平面 18 處（甚至在該等磁顫振磁極尖端處）產生的磁場係小於直接由磁線圈 12 和 14 在中央加速平面 18 處產生的磁場。軛 10 被配置為使磁場沿中央加速平面 18 成形，這樣隨著從中央軸線 16 到在射束室 64 內提取離子處的半徑的這種半徑增大而使得磁場增大，以便補償加速過程中的相對論粒子質量增益。

維持離子加速的電壓會一直提供，該電壓係通過電流引線 47 到一對半圓形、高壓電極板 49 處，這對電極板被定向為在射束室 64 內部與中央加速平面平行並且在其之上以及在其之下。軛 10 被配置為替射束室 64 以及電極裝置 48 提供足夠的空間，該電極裝置延伸通過真空饋送通道 62。該電極裝置係由一導電金屬形成的。在替代實施方式中，可以使用關於中央軸線 16 分隔開 180° 的兩個電極。使用兩電極裝置可以產生提供在軌道上運行的離子的更高的每圈增益以及離子軌道的最佳的定中心作用，從而減小振盪並產生更好的束品質。橫靠 RF 電流引線 47 的係一 RF 高壓饋送通道 42，該通道用於將該等 D 形物 49 激發以便在迴

旋加速器頻率處或迴旋加速器頻率的整數倍處具有一振盪電壓。

在運行過程中，超導磁線圈 12 和 14 可以被維持在一“乾燥”狀態（即，未浸入液體製冷劑中）；不然，可以由一或多個低溫製冷機 26（低溫冷卻器）將磁線圈 12 和 14 冷卻到超導體的臨界溫度之下的一溫度（例如，低於臨界溫度多到 5 K，或者在一些情況中，低於臨界溫度不到 1 K）。在其他實施方式中，該等線圈可以與一液體冷凍劑接觸用於從線圈 12 和 14 到低溫製冷機 26 的熱傳遞。當磁線圈 12 和 14 被冷卻到深冷溫度（例如，在 4 K 到 30 K 的範圍內，取決於成分）時，由於低溫冷卻器 26、磁線圈 12 和 14 以及軌 10 之間的熱接觸，軌 10 同樣被冷卻到近似相同的溫度。

低溫冷卻器 26 可以使用 Gifford-McMahon 製冷循環中的壓縮氦或者可以是設計有一更高溫的第一級 84 和一更低溫的第二級 86 的脈衝管低溫冷卻器（在圖 5 和圖 6 中示出）。低溫冷卻器 26 的更低溫的第二級 86 可以在約 4.5 K 處運行並且藉由熱連結物 37 及 58 被熱耦合，該等熱連結物包括多條低溫超導體電流引線（例如，由 NbTi 形成），該等引線包括與超導磁線圈 12 和 14 內的複合導體的相對兩端以及一電壓源相連接的多條金屬線以便驅動電流通過線圈 12 和 14。低溫冷卻器 26 可以將每個低溫導電連結物 58 以及線圈 12/14 冷卻到一溫度（例如，大約 4.5 K），在該溫度下，每個線圈內的導體係超導的。可替代地，當使

用一更高溫的超導體時，低溫冷卻器 26 的第二級 86 可以在（例如）4 至 30 K 處運行。

低溫冷卻器 26 的更溫熱的第一級 84 可以在例如 40 至 80 K 的溫度下運行並且可以與中間熱遮罩物 80 熱耦合，該熱遮罩物因此被冷卻到例如大約 40 至 80 K 以在磁體結構（包括軛 10 及包含在其中的其他部件）與恆冷器 66 之間提供一中間溫度屏障，恆冷器可以處於室溫（例如，大約 300 K）下。如圖 1、圖 2、圖 4 以及圖 8 至圖 10 所示，恆冷器 66 在圓柱形側壁的相對兩端處包括一恆冷器底板 67 以及一恆冷器頂板 68。恆冷器還包括一真空埠 19（在圖 1、圖 4 及圖 5 中示出），一真空泵可以與該真空埠 19 耦接以便在恆冷器 66 內部提供高真空並且由此限制恆冷器 66、中間熱遮罩物 80 以及磁體結構 10 之間的對流熱傳遞。恆冷器 66、熱遮罩物 80 以及軛 10 彼此間隔開一個量並且由多個絕緣隔離物 82 在結構上支撐，該量將對流熱傳遞最小化。

磁軛 10 提供了一條磁路，該磁路將超導線圈 12 和 14 產生的磁通量載送到射束室 64。通過磁軛 10 的磁路（特別是由磁區磁極尖端 52 提供的隨方位角地變化的磁場）還在射束室 64 內為離子的強聚焦提供了磁場成形。磁路還藉由在磁路的外部部分內包含大部分磁通量來增強射束室 64 部分內的磁場水準，離子在射束室內被加速。在一具體實施方式中，磁軛 10 由低碳鋼形成（除磁極尖端 52 之外，它可以由稀土磁體形成），並且磁軛 10 圍繞線圈 12 和 14 以及一內部的超絕緣層，該超絕緣層圍繞射束室 64 並且例如

由鍍鋁的 Mylar 聚酯薄膜（可以從 Dupont 獲得）以及紙性材料形成。純鐵可能太弱並且可能具有過低的彈性模量；因此，鐵可以摻雜有足夠量的碳以及其他元素以便在保持所希望的磁性水準的同時提供足夠的強度或者使其不那麼硬。在替代實施方式中，外軛可以由釧形成。

在小型低溫超導之等時迴旋加速器的具體實施方式中，如圖 10 所示，中央加速平面的相對兩側上的磁顫振磁極尖端 52 之間的距離可以是大約 56 mm，同時每個磁極基部 54 的高度（忽略突出部分 56）可以是大約 84 mm（其中，如在此所使用的，“高度”係針對該等圖的定向而垂直地測量的）。同時，每個磁極帽 41 的高度可以是大約 40 mm。射束室 64 可以具有 42 mm 的高度以及 230 mm 的寬度。線圈 12 和 14 各自可以具有大約 202 mm 的內部直徑、大約 230 mm 的外部直徑以及 60 mm 的高度。

在具體的實施方式中，磁極帽 41 和磁極基部 54 可以由鐵形成，而磁極尖端 52 可以由稀土金屬（如釷、釷或鐳）形成，這種稀土金屬可以提供特別強的磁力。當磁極尖端 52 係由一稀土磁體形成時，可以在中央加速平面內製成 9 特斯拉的場的磁體（相比下，例如，當磁極尖端係由鐵形成的時，為 6 至 8 特斯拉）。在具體的實施方式中，磁極基部 54 和/或磁極帽 41 也可以由一稀土磁體形成。在一些實施方式中，磁極基部 54 由一非磁性材料（例如，鋁）形成以便使磁極尖端 52 “懸浮”這樣使得磁極尖端 52 由非磁性材料與軛 10 的剩餘部分在空間上分離開，並且以便促進

磁極尖端 52 的磁飽和。所展示的實施方式在中央加速平面 18 的每一側上包括三個磁極尖端 52，儘管其他實施方式可以在中央加速平面 18 的每一側上包括例如四個或六個均勻間隔開的磁極尖端 52。

螺旋形磁極尖端 52 用作扇形磁體以便在磁場內提供方位角的變化，其中螺旋形狀增強了磁場的變化（即，“顫振”）。螺旋形磁極尖端 52 可以在與朝向中央加速平面 18 內部的、磁極尖端 52 的該等表面相對的外側上包括多個切除部（空腔）55，如圖 10 和圖 11 所示。該等切除部 55 允許磁場在更大半徑處增加以便獲得所希望的徑向磁場場形；即，從一切除部 55 到磁極尖端 52 的外半徑磁極尖端 52 的高度的增加越大（在 z 方向測量，與中央軸線平行），磁場隨半徑的增大就越大。磁極基部 54 與該等磁極尖端相接的表面（例如，由鋁形成）可以具有一互補性場形，這樣使得磁極基部 54 的內部表面的磁區朝向中央加速平面延伸以便在磁極尖端 52 中銑平該等切除部 55，如圖 10 所示。

如圖 11 所提供的磁顫振磁極尖端 52 的放大圖所示，磁極尖端 52 的三個主要梯級的高度係 25 mm、35 mm、以及 50 mm（在圖 11 中從左往右移動），而這三個梯級的徑向寬度（從最內側磁極尖端表面到最外側磁極尖端表面水平地測量的）係 74 mm、39 mm、以及 19 mm。

離子可以由定位在軌的中央軸線附近（即，略微偏離）的一內部離子源 50（在圖 3 和圖 7 中示出）產生或者可以通過一離子注入結構由一外部離子源提供。例如，內部離

子源 50 的一實例可以是一加熱的陰極，該陰極與一電壓源耦接並且在一氫氣源附近。加速器電極板 49 藉由一導電通路與一射頻電壓源相耦接，該電壓源產生一固定頻率振盪電場以在遠離射束室 64 內中央軸線的一向外擴展的軌道內加速從離子源 50 射出的離子。離子也在這個平均軌道周圍受到正交振盪。平均半徑周圍的該等小振盪被稱為電子加速器振盪 (betatron oscillation) 並且它們定義了加速離子的具體特徵。

可以藉由恆冷器 66 側面內的進入埠 22 將一軸向及徑向離子束探頭 20 連同一內部次級射束靶 24 通過軌 10 送入，如圖 7、圖 16 和圖 18 所示。該軸向及徑向離子束探頭 20 在等時迴旋加速器的診斷評估過程中測量電流對加速離子半徑的變化。在等時迴旋加速器的常態運行過程中，軸向及徑向離子束探頭 20 從中央軸線被縮回並且離開加速離子的路徑以便不妨礙離子加速。

進一步在圖 16 和圖 17 中展示了內部次級射束靶 24；並且它包括一可交換液體 (例如， H_2O)、固體 (例如， ^{11}B)、或氣體 ($^{14}N_2$) 靶 92，當一來自外部軌道 94 的質子在等時迴旋加速器內加速後擊中該靶時，該靶產生一次級離子 (例如， $^{13}NH_3$)；並且該次級離子通過管道 96 從射束室 64 中被移除，該管道從靶 92 延伸通過射束室進入埠 22。

在一替代實施方式中，在圖 18 和圖 19 中示出，用一周長磁體 (perimeter magnet) 89 (用於提供磁場的局部增強) 沿一條通路 93 將已加速離子從其外部軌道 94 中提取

出來，並且然後用四極磁體 90 將其聚焦並且通過射束室進入埠 22 內的通道 97 而將其引導出射束室 64。

射束室 64 以及 D 形物電極板 49 位於上述內部超絕緣層之內，該超絕緣層在放出熱量的電極裝置 48 與深冷冷卻的磁軛 10 之間提供熱絕緣。電極板 49 可以因此在比磁軛 10 以及超導線圈 12 和 14 的溫度高至少 40 K 的溫度下運行。如圖 3 所示，該等電極板 49 包含在射束室 64 之內的一外部電接地板 79（例如，以銅襯墊的形式）中，其中該等電極板 49 的邊緣與電接地板的邊緣之間的間隔 78（如圖 7 所示）用作一加速間隙。

加速系統射束室 64 以及 D 形物電極板 49 的大小可以被確定為（例如）在一固定加速電壓 V_0 （例如 10 至 80 kV）下產生一個 12.5-MeV 質子束（電荷 = 1，質量 = 1）。射束室 64 可以具有 42 mm 的高度以及 230 mm 的寬度。鐵磁性的鐵磁極 38 和 40 以及回軛 36 被設計為一分離結構以便有助於組裝及維護；並且軛具有為從中央軸線到線圈 12 和 14 內半徑的磁極半徑 r_p 的大約 2.4 倍或更小的一外半徑（例如，大約 24 cm，其中 r_p 係 10 cm）、以及大約 $2r_p$ 的總高度（例如，大約 20 cm，其中 r_p 係 10 cm）。

在運行中，在一實施方式中，可以通過導電連結物 58 內的電流引線將一電壓（例如，足夠在線圈內有 1,000 繞的實施方式的每一繞中產生至少 700 A 的電流，如以上所述）施加到每個線圈 12/14 上，以便當線圈處於 4.5 K 時，在中央加速平面 18 內的中央軸線附近的離子源處產生來自線圈

12 和 14 以及軌 10 的例如至少 6 特斯拉的組合磁場。在其他實施方式中，可以提供更多線圈繞數，並且可以減小電流。磁場包括來自完全磁化的鐵磁極 38 和 40（包括扇形磁極尖端 52）的例如至少 2 特斯拉的貢獻；磁場的剩餘部分（例如，至少大約 4 特斯拉）由線圈 12 和 14 產生。

因此，此軌 10 以及線圈 12 和 14 用於產生一足夠用於離子加速的磁場。例如，藉由將一電壓脈衝施加到一加熱的陰極上，離子脈衝可以由離子源產生以便致使電子從陰極排出到氫氣中；其中，當電子與氫分子相撞時放射出質子。儘管射束室 64 被排空到例如小於 10^{-3} 大氣壓的真空壓力，以一能夠維持低壓的量允許氫氣進入並對其進行調整，同時仍提供足夠量的氣體分子用於產生足夠量的質子。

在這個實施方式中，電壓源（例如，高頻振盪電路）跨過 RF 加速器電極裝置 48 的該等板 49 維持一例如 10 至 80 千伏的交替或振盪電勢差。由 RF 加速器電極板 49 產生的電場具有一固定頻率（例如，60 至 140 MHz），該固定頻率與有待在中央軸線處以 4 至 9 特斯拉場強加速的質子離子的迴旋加速器軌道頻率的固定頻率相匹配。由電極板 49 產生的電場產生一聚焦作用，該聚焦作用保持離子在該等板的內部區域的中央部分附近移動，並且由電極板 49 提供給離子的電場脈衝累積地增大了所發射出的和在軌道上運行的離子的速度。因為離子藉此在它們的軌道內被加速，離子在連續的旋轉中與電場中的振盪處於共振或同步而向外螺旋離開中央軸線。

確切的說，電極板 49 具有與在軌道上運行的離子的電荷極性相反的電荷，以便當離子離開電極裝置 48 時，藉由一異性電荷的吸引力將離子拉回到其朝向電極裝置 48 的弧形路徑內。電極裝置 48 配備有與離子的電荷的符號相同的電荷，以便當離子通過它的多個板之間時，藉由一同性電荷的排斥力將離子送回其軌道內；並且重複這個循環。在與其路徑成直角的強磁場的影響下，離子被引導到在電極板 49 之間通過的一條螺旋路徑內。隨著離子逐漸向外螺旋運動，離子的動量與其軌道半徑的增大成比例地增大，直到離子最終到達一外半徑 94，在該半徑處它可以被一磁偏轉器系統（例如，包括一周長磁體 89，如圖 18 和圖 19 所示）磁性地偏轉到一由四極磁體 90 所定義的收集器通道內，以便允許離子從磁場向外偏離並且朝向例如一外部靶從迴旋加速器中退出（以脈衝束的形式）。

等時迴旋加速器（包括在此描述的該等）在很多基礎方面與同步迴旋加速器不同。首先，等時迴旋加速器內的加速頻率係固定的，而同步迴旋加速器內的加速頻率隨著帶電粒子在一螺旋中從內半徑（它在此被導入）到外半徑（用於提取）向外加速而減小。第二，等時迴旋加速器內部的磁場隨著半徑的增大而增大以便將加速粒子內的相對論質量增益計入，而相比之下，同步迴旋加速器內的磁場隨著半徑的增大而減小。第三，等時迴旋加速器的加速平面內的磁場係非對稱的，因為磁場隨著扇形磁體而方位角地變化，而相比之下，同步迴旋加速器的加速平面內的磁

場係基本上圓形對稱的。

平均磁場 $B_z(r)$ 可以被定義為半徑 r 的函數，如 $B_z(r) \equiv \gamma(r)B_z(0)$ ，其中 $\gamma(r)$ 係粒子質量增益的相對論係數，其中加速度係半徑的函數，並且 $B_z(0)$ 係引入離子的內半徑處的平均磁場。換言之，隨著半徑的增大，磁場 $B_z(r)$ 與相對論係數 $\gamma(r)$ 的增大成比例地增大。可以按以下等式計算相對論係數 γ ：
$$\gamma = \frac{T+E_0}{E_0} = 1 + \frac{T}{E_0}$$
，其中 T 係離子的動能；並且 E_0 係離子的靜止質能並且等於 $m_0 c^2$ ，其中 m_0 係離子的靜止質量，並且 c 係光速。質子的靜止質能 E_0 係 938.27 MeV。

當用於產生 12.5 MeV 的質子時，在此描述的小型低溫超導之等時迴旋加速器可以在提取加速質子的外半徑處具有一相對論係數 $\gamma_{final} = 1 + 12.5 \text{ MeV} / 938.3 \text{ MeV} = 1.013$ 。借助於這樣一低的相對論係數 γ ，與先前的、具有例如一 1.27 的 γ_{final} 的等時迴旋加速器設計相比，相對性對離子的加速度的影響相對較小。然而，冷鐵等時迴旋加速器同樣適用於高的質子伽瑪值。

已加速的離子在等時磁場 B_z 內的垂直運動（與中央加速平面 18 正交，如圖 12 所示）不是內在穩定的， B_z 隨著半徑的增大而增大（即， $\frac{dB_z}{dr} > 0$ ），其磁場指數參數 n 可以表述為 $n = -\frac{r}{B} \left(\frac{dB}{dr} \right) < 0$ 並且其中 $B = \gamma B_0$ ，因此經典的和同步等時迴旋加速器的弱聚焦不適用。因此，在 z 方向上隨方位角地變化的磁力 F_z （即， B_z 隨著 θ 的函數而變化，對在此使用的坐標系統的解說性參考見圖 13）用於在複數個磁區內的 z 方向上提供一恢復力，以便將離子推回到中央加速平面 18

並且因此維持已加速離子的強聚焦。通過磁顫振磁極尖端 52 在等時迴旋加速器中提供了這種隨方位角地變化的恢復力，如圖 14 所示。

在圖 14 中提供了跨過角度 θ 的範圍的磁極場形的一種表示（即，如同將由在一軌道內的離子所穿越的磁極場形展開，以便產生圖在 z 和 θ 方向（在固定半徑處）的一圖的線性表示），它與沿著由等時迴旋加速器內部一軌道內已加速離子所穿越的軌道的場形幾乎相匹配。 z 方向上的相對高的磁場（用垂直箭頭表示）係在磁極尖端 52 之間產生的，並且 z 方向上的相對低的磁場係在凹谷 53 之間產生的，如圖 14 所示。

由磁顫振磁極尖端 52 所提供的磁性顫振 f 可以表述為如下：
$$f = \frac{1}{2} \frac{\Delta B}{\langle B \rangle}, \text{ 其中, } \Delta B = B_{\text{hill}} - B_{\text{valley}} \text{ 並且 } \langle B \rangle = \frac{1}{2\pi} \int B_z d\theta。$$

顫振磁場的均方根 F 可以表述為如下：

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

當磁極具有一螺旋邊緣角時，在以下方程中表述了使已加速離子回復到軸向穩定性的顫振磁場校正：
$$v_z^2 = n + F^2(1 + 2\tan^2 \zeta) > 0。$$
在此方程中， ν_z 係已加速離子在 z 方向的振盪頻率，並且 ζ 係螺旋形顫振磁極尖端 52 的螺旋邊緣的角度，如圖 6 所示。螺旋邊緣角 ζ 的正切可以表述為如下：

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

在其他實施方式中，扇形磁極尖端 52 可以具有一餅形（楔形），如圖 15 所示。該等磁極尖端 52 各自的周長係

處於超導體線圈的一環 72 的形式，該超導體線圈具有與一電壓源相耦接的輸入與輸出電流引線以便產生通過超導線圈環 72 的電流，該電流由此產生一高磁場。到達以及來自每個磁極尖端 52 的超導線圈環 72 的電流引線可以與電壓源串聯耦接。由超導體線圈圍繞的該等磁極尖端 52 的內部部分可以由例如鐵或一稀土磁體形成。

在等時迴旋加速器中，隨著已加速離子的質量的增大， B_z 隨半徑而增大，其中 $\gamma = m/m_0$ ，同時提供足夠的顫振使得 $v_z^2 > 0$ ，在這種情況中，

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

儘管由螺旋顫振尖端提供的強聚焦將正在加速的離子保持在中央加速平面 18 內或其附近的一穩定的軌道內，等時迴旋加速器內的離子加速係藉由將隨半徑增長的能量增益率與平均磁場的增長進行匹配而實現的。能量增益係被精確控制的，因為不存在相位穩定性。

為了表明不存在相位穩定性，當離子向外加速以便維持相位穩定的加速度時，旋轉週期內的變化率可以被表述為：

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

其中 α 係動量壓縮（隨著半徑的函數有多少動量變化）並且 p 係離子的動量。在這個方程中， $0 \leq \alpha \leq 1$ 並且 $\gamma \geq 1$ 。當 $B = \gamma B_0$ ，則 $\alpha = \gamma^2$ ，並且 $d\tau/\tau = 0$ ，因為

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

因為週期與動量之間沒有關係，所以不存在相位穩定性。在此，離子每圈的能量增益係由在中央加速平面內產生的磁場場形控制的；並且在等時迴旋加速器內將離子在其上加的圈（軌道）數將由等時迴旋加速器的設計所固定。操作員可以選擇離子電荷 q ；離子的靜止質量 m_0 ；角頻率 ν_0 ；以及離子的動能 T 。於是，等時迴旋加速器內每圈的每轉瞬時能量增益 ΔT_1 係固定的，其中

$$\Delta T_1 = gqV_e \sin \phi, \quad (6)$$

其中 g 係加速間隙的數目（例如，對於一 180° 的 D 形物， g 係 2）； q 係已加速離子的電荷； V_e 係電極電壓； $\phi = \omega t - \theta$ ，其中 ω 係離子的角速度， t 係時間， θ 係離子在迴旋加速器內的角座標。因此，當離子跨過加速間隙時， $\sin \phi$ 建立了正弦曲線電壓值。

在描述本發明的實施方式時，為了清晰的目的使用了特定的術語。為了描述的目的，特定的術語旨在至少包括以類似方式達到類似結果的技術上和功能上的等效物。另外，在一些實例中，其中本發明的一具體實施方式包括複數個系統元件或方法步驟，該等元件或步驟可以用一個單一的元件或步驟替換；同樣，一個單一的元件或步驟可以用用於相同目的的複數個元件或步驟替換。進一步地，當在此指定不同特性的參數用於本發明的實施方式時，可以將該等參數以 $1/100$ ， $1/50$ ， $1/20$ ， $1/10$ ， $1/5$ ， $1/3$ ， $1/2$ ， $3/4$ 等等向上或向下（或者由一係數 2、5、10 等等向上）調整、或者將其近似取整，除非另外指明。而且，儘管已

經結合其具體實施方式示出並描述了本發明，但是熟習該項技術者應當理解的是，可以在不背離本發明的範圍的情況下，做出形式及細節方面的不同替換和變更。仍進一步地，其他的方面、功能及優點同樣在本發明的範圍內；並且本發明的所有實施方式不需要實現所有優點或擁有上述的所有特徵。此外，結合一實施方式在此討論的步驟、元件及特點同樣可以結合其他實施方式使用。貫穿本檔所引用的參考內容（包括參考檔、期刊文章、專利、專利申請，等等）藉由引用以其整體結合在此；並且來自該等參考內容的適當的部件、步驟和特徵任選地可以被包括或不被包括在本發明的實施方式中。仍進一步，在背景技術部分指明的部件及步驟係本揭露的一部分，並且在本發明的範圍內可以結合在本揭露的其他地方描述的部件或步驟使用或替換它們。在方法請求向中，其中以具體的順序列舉了多個階段，具有或不具有為易於引用而添加的有序前序字元，該等階段不應被解釋為在時間上受限於它們所列舉的順序，除非另外指明或由術語和短語暗示。

【圖式簡單說明】

在附圖中，遍及全文不同的視圖，類似的參考符號指代相同或相似的部件。該等附圖沒有必要是成比例的，相反地，重點在於解釋以上所討論的具體原理。

圖 1 係一等時迴旋加速器及周圍結構的截面側視圖。

圖 2 係圖 1 的等時迴旋加速器的一放大的截面圖。

圖 3 係圖 1 的等時迴旋加速器內部的電極和射束室的一進一步放大的截面圖。

圖 4 係圖 1 的等時迴旋加速器的一側面截面透視圖。

圖 5 係圖 1 的等時迴旋加速器的一頂部截面透視圖。

圖 6 係圖 1 的等時迴旋加速器的一頂部截面圖，其示出了沒有電極組件的扇形磁極尖端。

圖 7 係圖 1 的等時迴旋加速器的一頂部截面圖，其示出了圖 6 所示的扇形磁極尖端之上的電極組件。

圖 8 係圖 1 的等時迴旋加速器的一頂部及側面的截面透視圖。

圖 9 係圖 1 的等時迴旋加速器的一有角度側面的截面透視圖。

圖 10 係一等時迴旋加速器的一截面側視圖。

圖 11 係圖 10 的截面 70 的一放大圖。

圖 12 係包含圖 1 的等時迴旋加速器的恆冷器的一外部透視圖。

圖 13 係用於等時迴旋加速器內部的離子軌道的軸向參考框架的一草圖。

圖 14 係由等時迴旋加速器內部的軌道上正在加速的離子“看到”的磁極磁區的一展開截面圖。

圖 15 係多個磁極尖端以及一磁極基部的一可替代實施方式的透視圖，其中該等磁極尖端係由多個超導線圈環包繞。

圖 16 係一具有內部次級射束靶的等時迴旋加速器的頂

部截面圖。

圖 17 係圖 16 的截面 98 的一放大圖。

圖 18 係一具有用於離子提取的四極磁體的等時迴旋加速器的頂部截面圖。

圖 19 係圖 18 的截面 99 的一放大圖。

【主要元件符號說明】

10	磁軌
12	超導磁線圈
14	超導磁線圈
16	中央軸線
17	引線埠
18	中央加速平面
19	真空埠
20	軸向及徑向離子束探頭
22	射束室進入埠
24	內部次級射束靶
26	低溫製冷機/低溫冷卻器
36	回軌
37	熱連結物
38	磁極
40	磁極
41	磁極帽
42	RF 高壓饋送通道

47	電 流 引 線
48	電 極 裝 置
49	電 極 板
50	離 子 源
52	磁 極 尖 端
53	凹 谷
54	磁 極 基 部
55	切 除 部
56	突 出 部 分
58	導 電 連 結 物 / 導 線 連 結 物
62	真 空 饋 送 通 道
64	射 束 室
66	恆 冷 器
67	恆 冷 器 底 板
68	恆 冷 器 頂 板
70	截 面
72	環
79	外 部 電 接 地 板
80	中 間 熱 遮 罩 物
82	隔 離 物
83	隔 離 物 延 伸 部 分
84	更 高 溫 的 第 一 級
86	更 低 溫 的 第 二 級
88	受 壓 彈 簧

89	周 長 磁 體
90	四 極 磁 體
92	靶
93	通 路
94	外 部 半 徑 / 外 部 軌 道
96	管 道
97	通 道
98	截 面
99	截 面

七、申請專利範圍：

1. 一種小型低溫超導之等時迴旋加速器，包括：

至少兩個超導線圈，它們係基本上相對於一中央軸線而對稱地安排，其中該等線圈係在一中央加速平面的相對兩側上；

一磁軛，該磁軛圍繞且支撐該等線圈並且包含一射束室的至少一部分，其中該中央加速平面延伸通過該射束室，其中該磁軛包括複數個扇形磁極尖端，該等磁極尖端在該中央加速平面的每一側上形成多個凸峰並且在該等凸峰之間形成多個凹谷，其中在該中央加速平面的相對兩側上的該等凸峰和該等凹谷係基本上跨於該中央加速平面而互相對稱，其中跨過該中央加速平面的該等凸峰係由一間隙徑向地分離開，該間隙比將跨過該中央加速平面的該等凹谷分離開的一間隙更窄，且其中該等超導線圈和該磁軛被配置以產生一隨方位角地變化的磁場，其中該磁場的平均值隨著距離該中央軸線的半徑的增大而增加；

一低溫製冷機，該製冷機與該等超導線圈以及該磁軛熱耦合；

至少一對加速電極，位於該射束室中且容納於其內，且該至少一對加速電極與該磁軛熱隔離；以及

一恆冷器，安裝在該磁軛外且容納該等線圈，且在磁軛內包含一熱隔離的體積，在該熱隔離的體積中，該等線圈和該磁軛可藉由該低溫製冷機來保持在深冷

溫度。

- 2.如申請專利範圍第 1 項所述之等時迴旋加速器，其中該磁軌在該中央加速平面的相對兩側上包括一對磁極，該等磁極各自包括一磁極基部並且該等扇形磁極尖端安裝在該磁極基部上。
- 3.如申請專利範圍第 1 項所述之等時迴旋加速器，其中該等超導線圈係與該磁軌實體接觸。
- 4.如申請專利範圍第 1 項所述之等時迴旋加速器，其中該等扇形磁極尖端各自具有一螺旋式構形。
- 5.如申請專利範圍第 4 項所述之等時迴旋加速器，其中該等扇形磁極尖端包括一稀土鐵磁性材料。
- 6.如申請專利範圍第 5 項所述之等時迴旋加速器，其中該磁軌進一步包括一非磁性材料，該非磁性材料將該等扇形磁極尖端與該磁軌的剩餘部分分離開。
- 7.如申請專利範圍第 6 項所述之等時迴旋加速器，其中該等扇形磁極尖端在該等扇形磁極尖端遠離該中央加速平面的一側上包括多個切除部，其中該等切除部被建構為隨著距離該等時迴旋加速器的中央軸線的半徑的增大而使磁場增益的量值增大。
- 8.如申請專利範圍第 1 項所述之等時迴旋加速器，其中該等扇形磁極尖端包括一材料，該材料在至少 4 K 的溫度下是超導的。
- 9.如申請專利範圍第 1 項所述之等時迴旋加速器，其中該等超導線圈包括一材料，該材料在至少 4 K 的溫度下

是超導的。

10. 如申請專利範圍第 1 項所述之等時迴旋加速器，其中該等時迴旋加速器被配置為產生一徑向增大的磁場，當該等超導線圈以及該磁軛被冷卻到不大於 50 K 的溫度並且電流在該等線圈的臨界電流容量下通過該等超導線圈時，該磁場在一用來將粒子導入該中央加速平面中的內半徑處為至少 6 特斯拉。
11. 如申請專利範圍第 10 項所述之等時迴旋加速器，其中該等時迴旋加速器被配置為產生一徑向增大的磁場，當該等超導線圈以及該磁軛被冷卻到一不大於 50 K 的溫度並且電流在該等線圈的臨界電流容量下通過該等超導線圈時，該磁場在一用於在該中央加速平面中將離子提取出來的外半徑處為至少 7 特斯拉。
12. 一種用於離子加速的方法，包括：
採用一等時迴旋加速器，該迴旋加速器包括：
 - a) 至少兩個超導線圈，它們係基本上相對於一中央軸線而對稱地安排，其中該等線圈係在一中央加速平面的相對兩側上；
 - b) 一磁軛，該磁軛圍繞且支撐該等線圈並且包含一射束室的至少一部分，其中該中央加速平面延伸通過該射束室，其中該磁軛包括複數個扇形磁極尖端，該等磁極尖端在該中央加速平面的每一側上形成多個凸峰並且在該等凸峰之間形成多個凹谷，其中在該中央加速平面的相對兩側上的該等凸峰和該

等凹谷係基本上跨於該中央加速平面而互相對稱，其中跨過該中央加速平面的該等凸峰被一間隙徑向地分離開，該間隙比將跨過該中央加速平面的該等凹谷分離開的一間隙更窄，且其中該等超導線圈和該磁軛被配置以產生一隨方位角地變化的磁場，其中該磁場的平均值隨著距離該中央軸線的半徑的增大而增加；

- c) 一低溫製冷機，該低溫製冷機與該等超導線圈以及該磁軛熱耦合；
- d) 至少一對加速電極，位於該射束室中，與一射頻電壓源相耦接並且安裝在該射束室內而容納於其內，且該至少一對加速電極與該磁軛熱隔離；以及
- e) 一恆冷器，安裝在該磁軛外且容納該等線圈，且在磁軛內包含一熱隔離的體積，在該熱隔離的體積中，該等線圈和該磁軛可藉由該低溫製冷機來保持在深冷溫度；

在一內半徑處將一離子導入該中央加速平面之內；

從該射頻電壓源向該電極提供電流以便在跨過該中央加速平面的一擴展軌道內以一固定頻率加速該離子；

用該低溫製冷機冷卻該等超導線圈以及該磁軛，其中該等超導線圈被冷卻到不大於它們的超導轉變溫度的一溫度；

將一電壓提供給該等冷卻的超導線圈以便在該等超

導線圈內產生一超導電流，該等超導線圈在該中央加速平面內產生來自該等超導線圈以及來自該磁軛的一徑向增大的磁場；並且

在一外半徑處從射束室提取該已加速的離子。

- 13.如申請專利範圍第 12 項所述之方法，其中該磁軛被冷卻到不大於 50 K 的溫度。
- 14.如申請專利範圍第 12 項所述之方法，其中在該中央加速平面內產生的磁場係隨半徑而從用於離子導入的內半徑增大到用於離子提取的外半徑。
- 15.如申請專利範圍第 14 項所述之方法，其中在該中央加速平面內產生的磁場在用於離子導入的內半徑處為至少 6 特斯拉。
- 16.如申請專利範圍第 12 項所述之方法，其中從用於離子導入的內半徑到用於離子提取的外半徑係以一固定頻率對該離子進行加速。
- 17.如申請專利範圍第 12 項所述之方法，其中該離子係一質子。
- 18.如申請專利範圍第 12 項所述之方法，其中在離子進行加速時，該射束室具有在大約 10°C 到大約 30°C 範圍內的一溫度。
- 19.一種小型低溫超導之等時迴旋加速器，包括：
至少兩個超導線圈，它們係基本上相對於一中央軸線而對稱地安排，其中該等線圈係在一中央加速平面的相對兩側上；

一磁軛，該磁軛圍繞且支撐該等線圈並且包含一射束室，其中該中央加速平面延伸通過該射束室，其中該磁軛包括複數個扇形尖端，該等扇形尖端與該磁軛的剩餘部分藉由非磁性材料分離開並且在該中央加速平面的每一側上形成多個凸峰並且在該等凸峰之間形成多個凹谷，其中在該中央加速平面的相對兩側上的該等凸峰和該等凹谷係基本上跨於該中央加速平面而互相對稱，其中跨過該中央加速平面的該等凸峰係由一間隙徑向地分離開，該間隙比將跨過該中央加速平面的該等凹谷分離開的一間隙更窄，且其中該等超導線圈和該磁軛被配置以產生一隨方位角地變化的磁場，其中該磁場的平均值隨著距離該中央軸線的半徑的增大而增加；

一低溫製冷機，該低溫製冷機與該等超導線圈以及該磁軛熱耦合；

至少一對加速電極，位於該射束室中且容納於其內，且該至少一對加速電極與該磁軛熱隔離；以及

一恆冷器，安裝在該磁軛外且容納該等線圈，且在磁軛內包含一熱隔離的體積，在該熱隔離的體積中，該等線圈和該磁軛可藉由該低溫製冷機來保持在深冷溫度。

20.如申請專利範圍第 19 項所述之等時迴旋加速器，其中

該等扇形尖端包括一稀土磁體。

21.如申請專利範圍第 19 項所述之等時迴旋加速器，其中

該等扇形尖端各自具有一螺旋式構形。

22.如申請專利範圍第 19 項所述之等時迴旋加速器，其中該等扇形尖端各自具有一遠離該中央加速平面的表面，該表面界定一切除部體積。

23.如申請專利範圍第 19 項所述之等時迴旋加速器，其中該等扇形尖端包括一材料，該材料在至少 4 K 的溫度下是超導的。

八、圖式：

(如次頁)

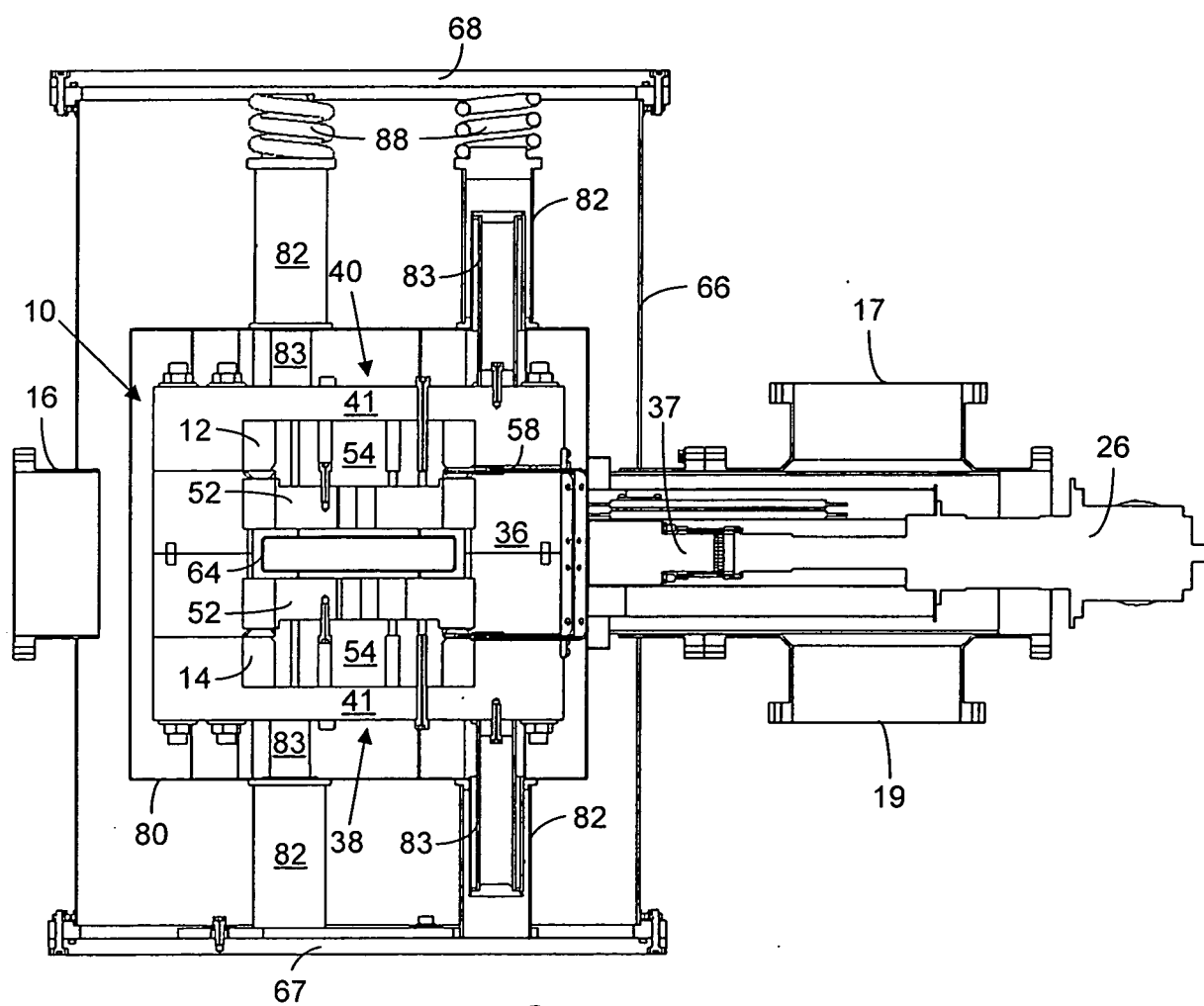


圖 1

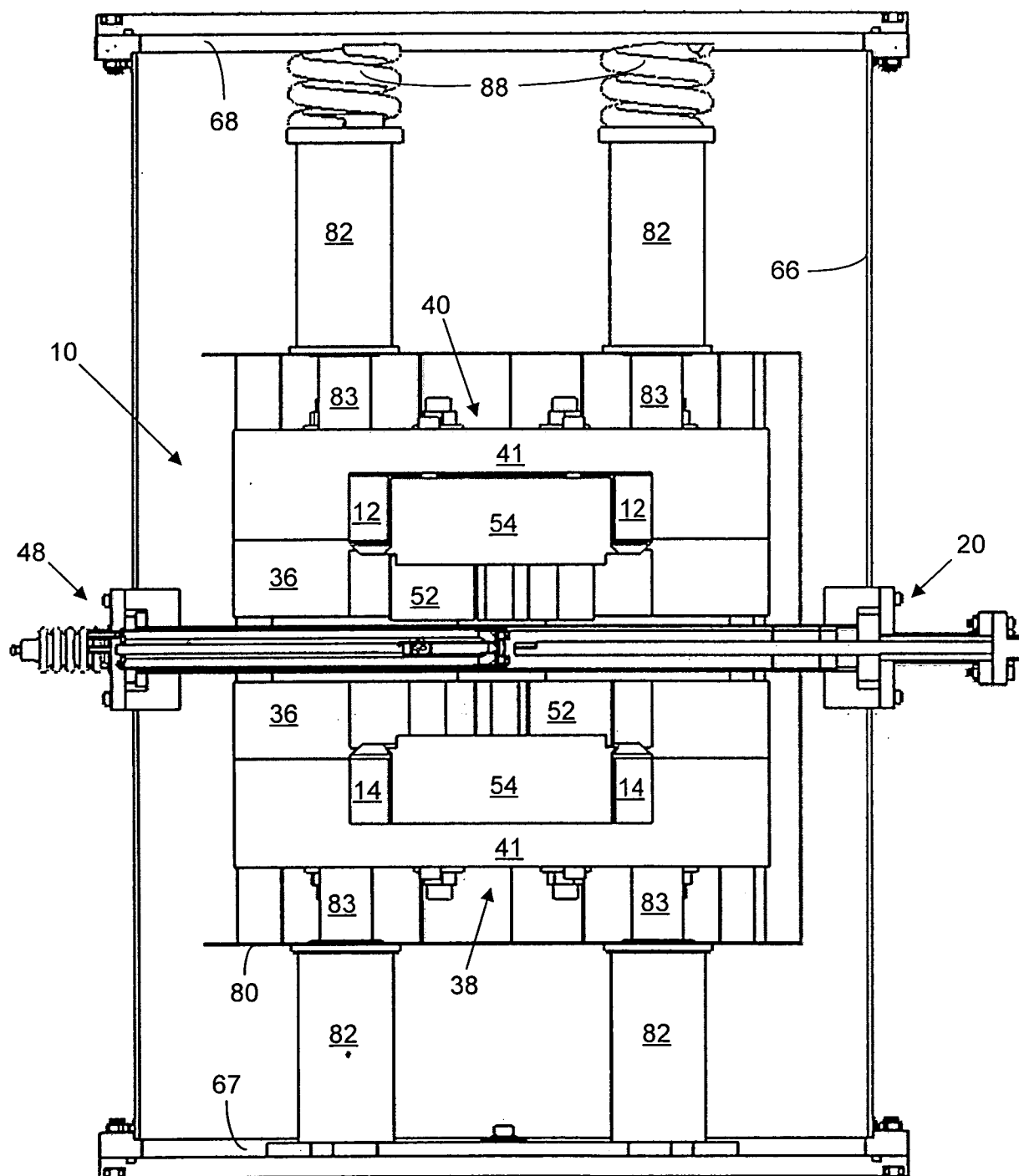


圖 2

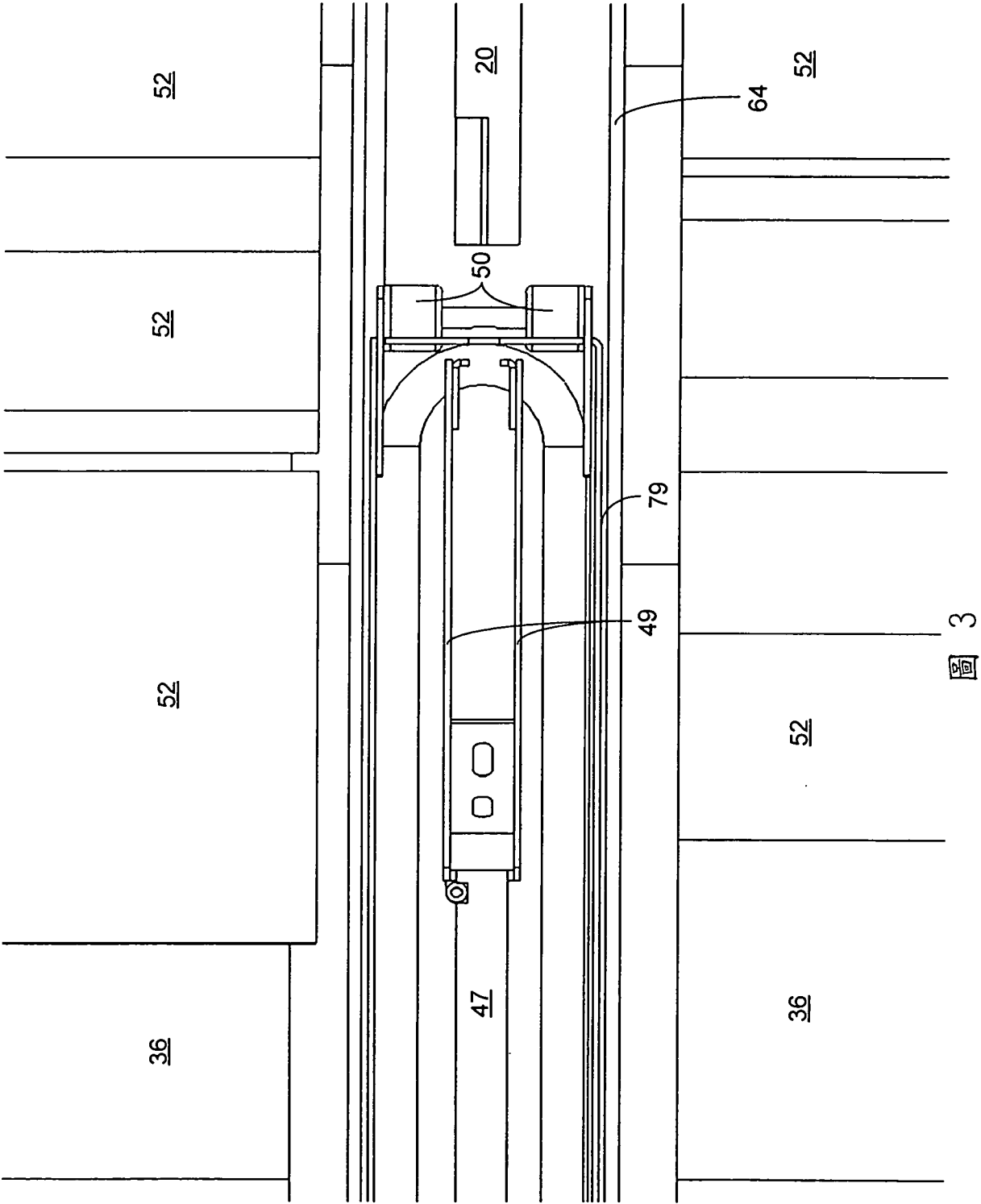


圖 3

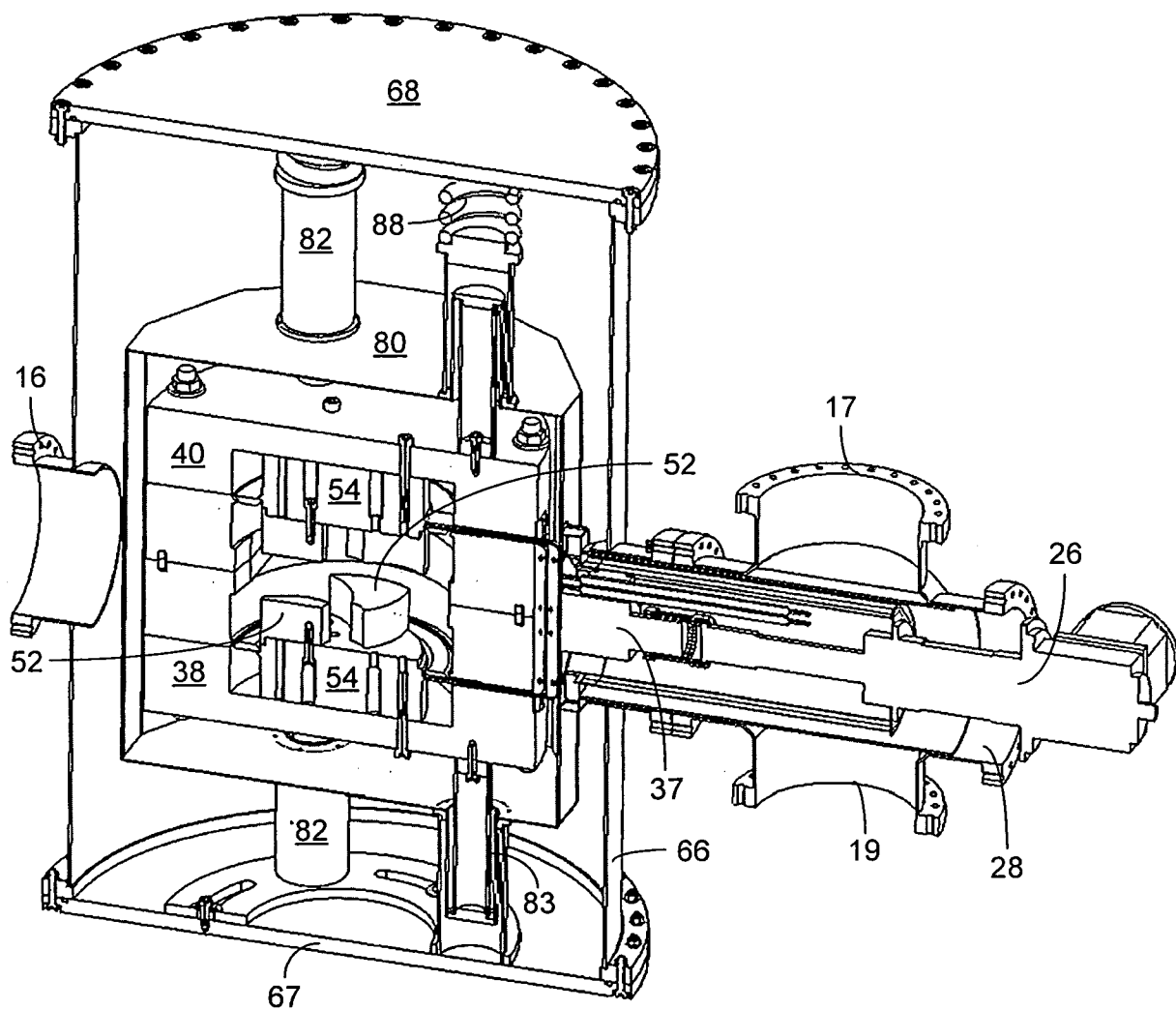


圖 4

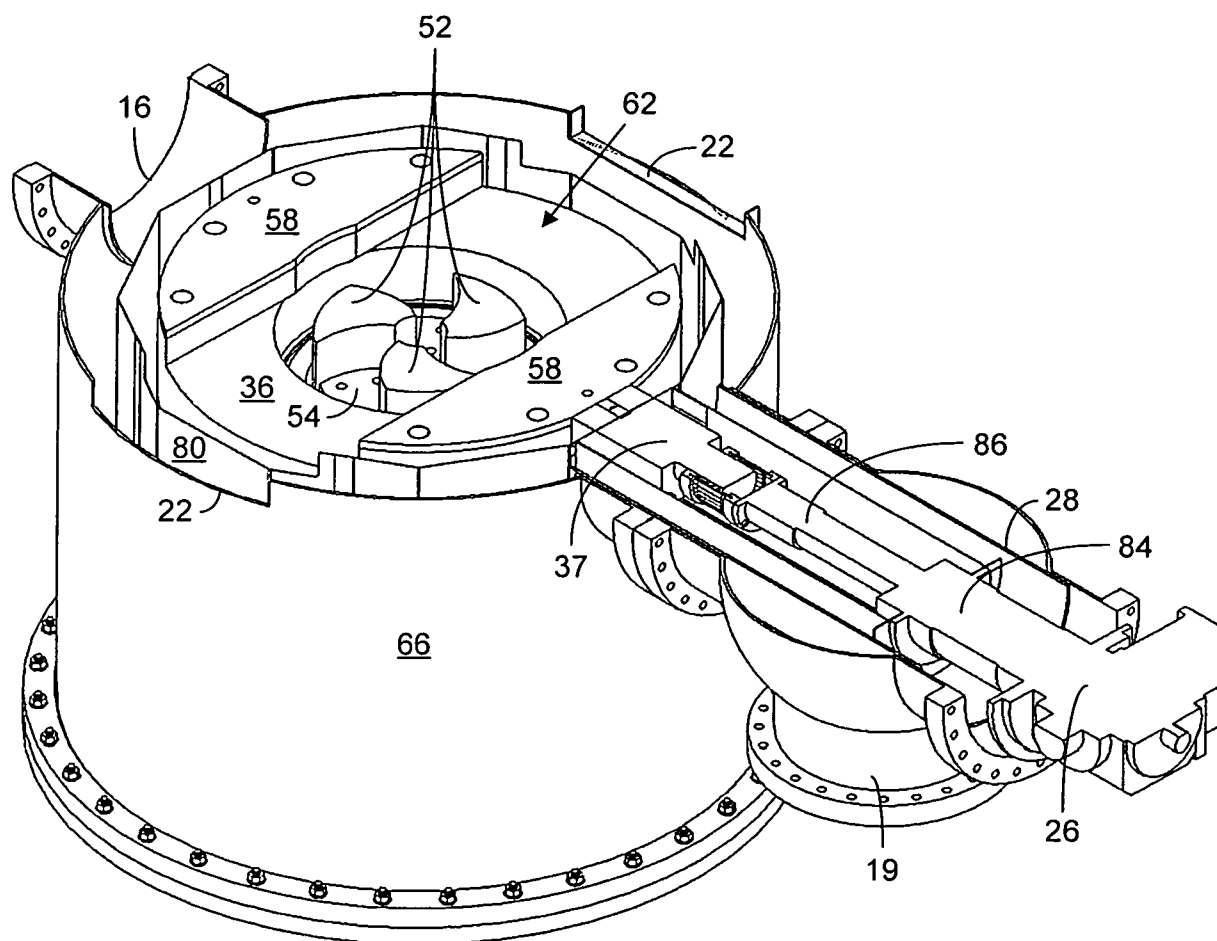


圖 5

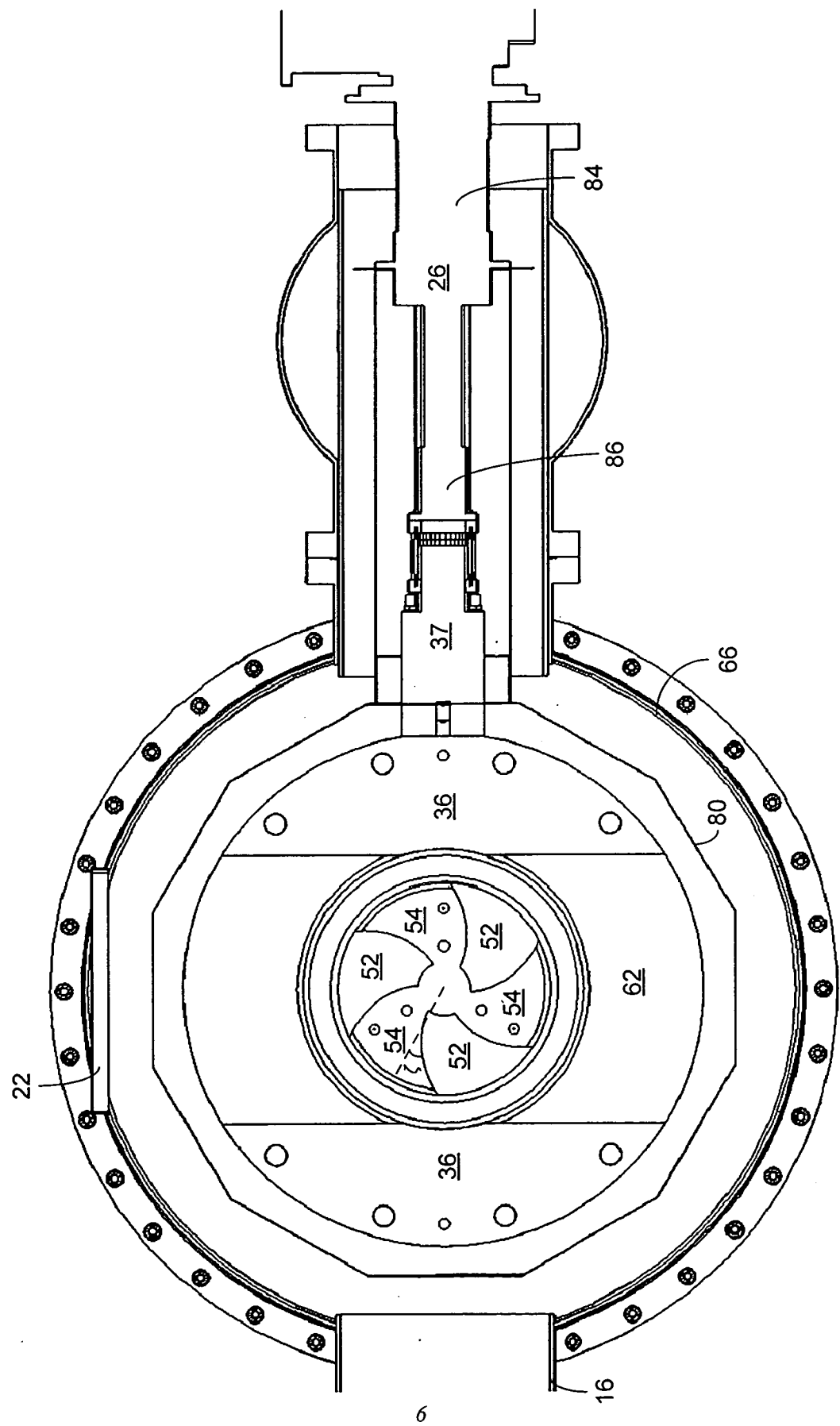


圖 6

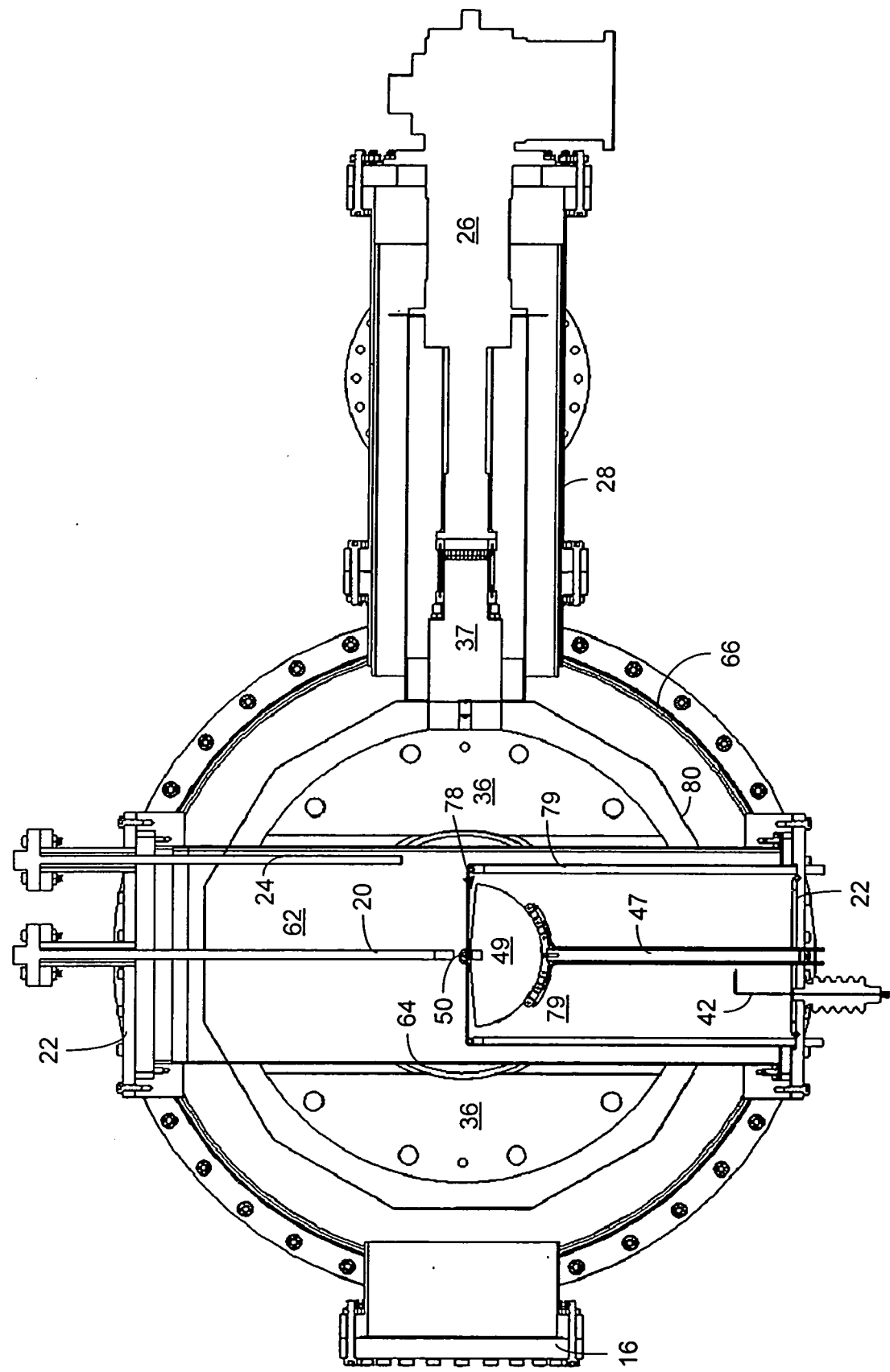


圖 7

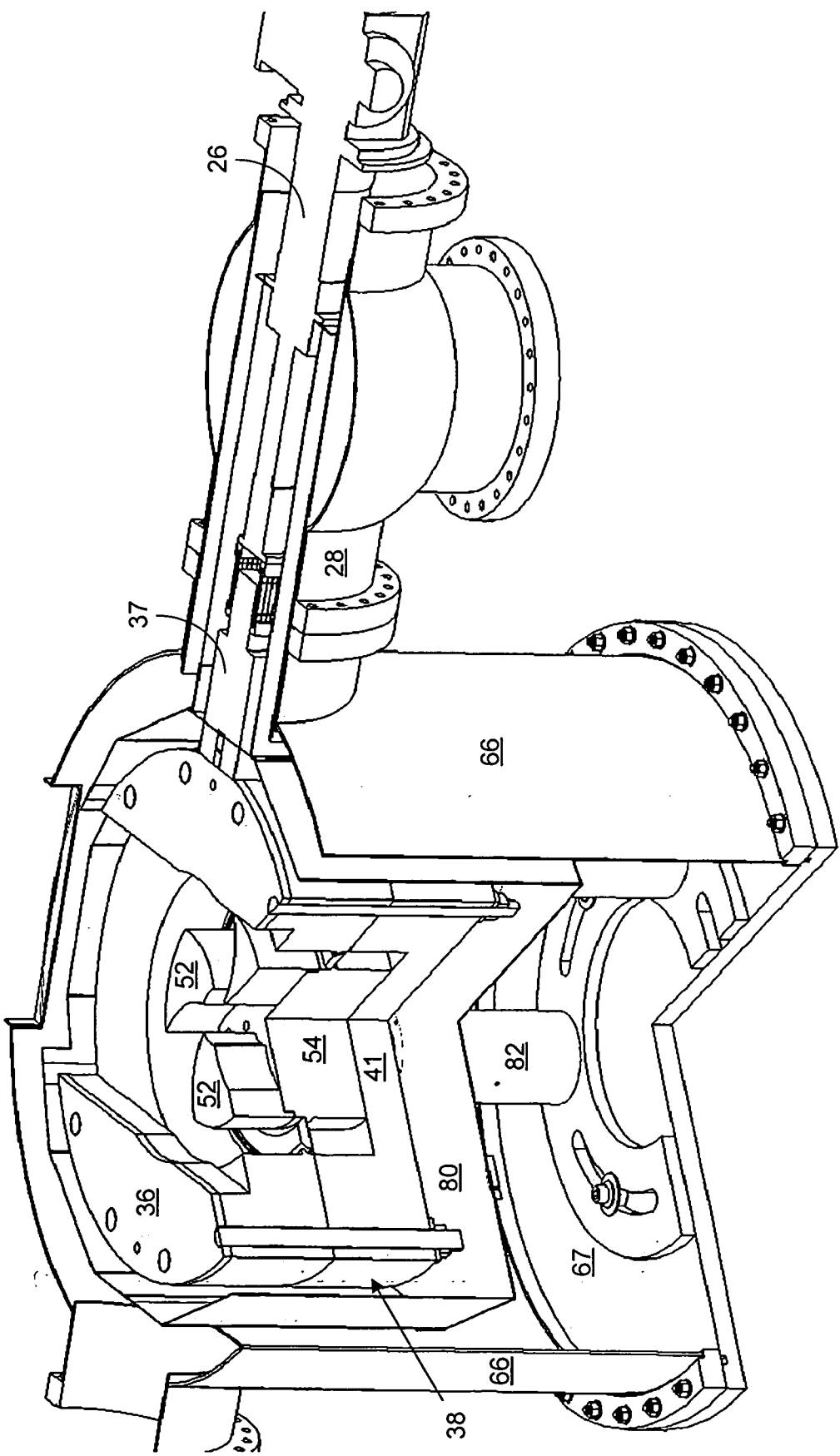


圖 8

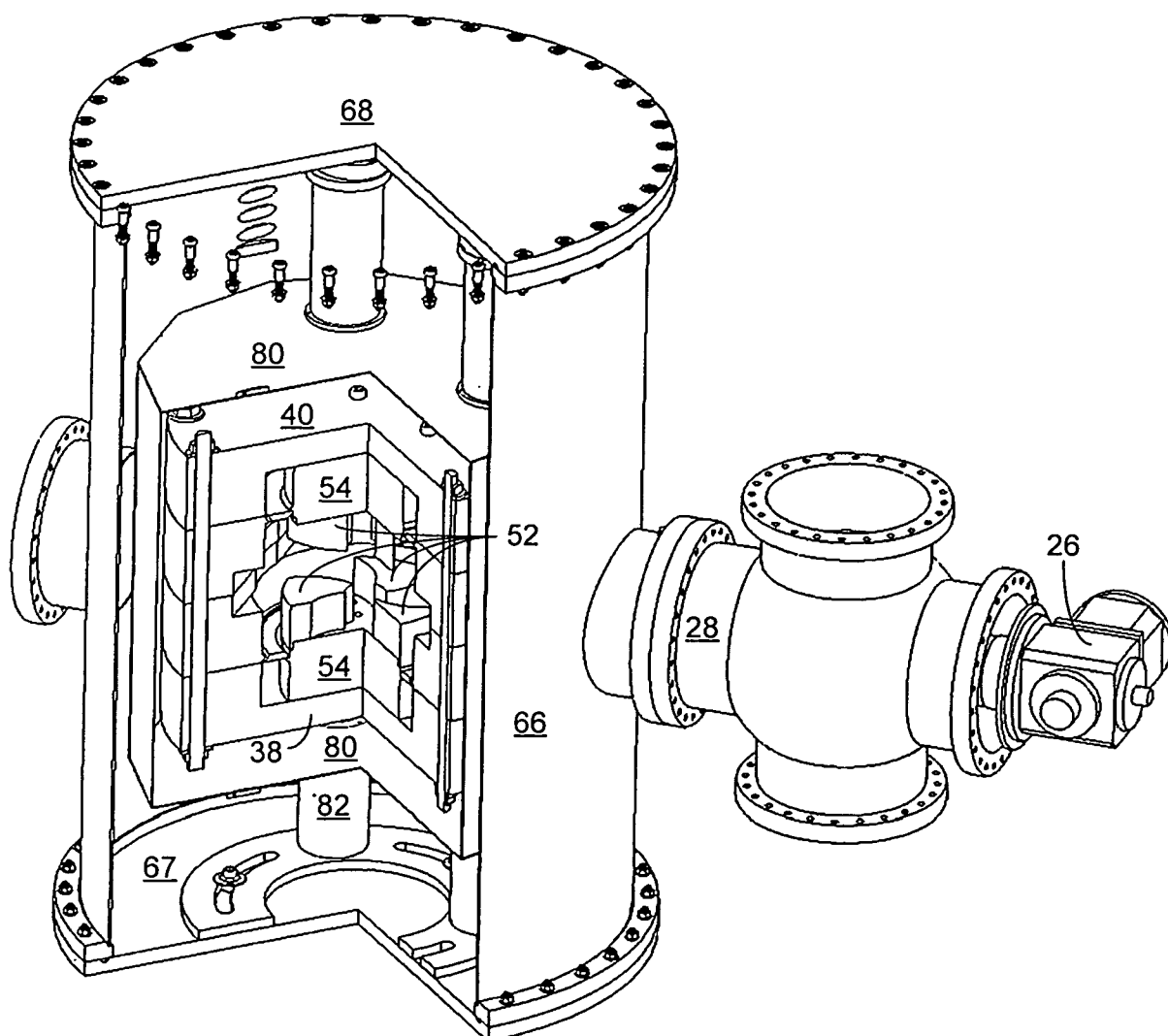
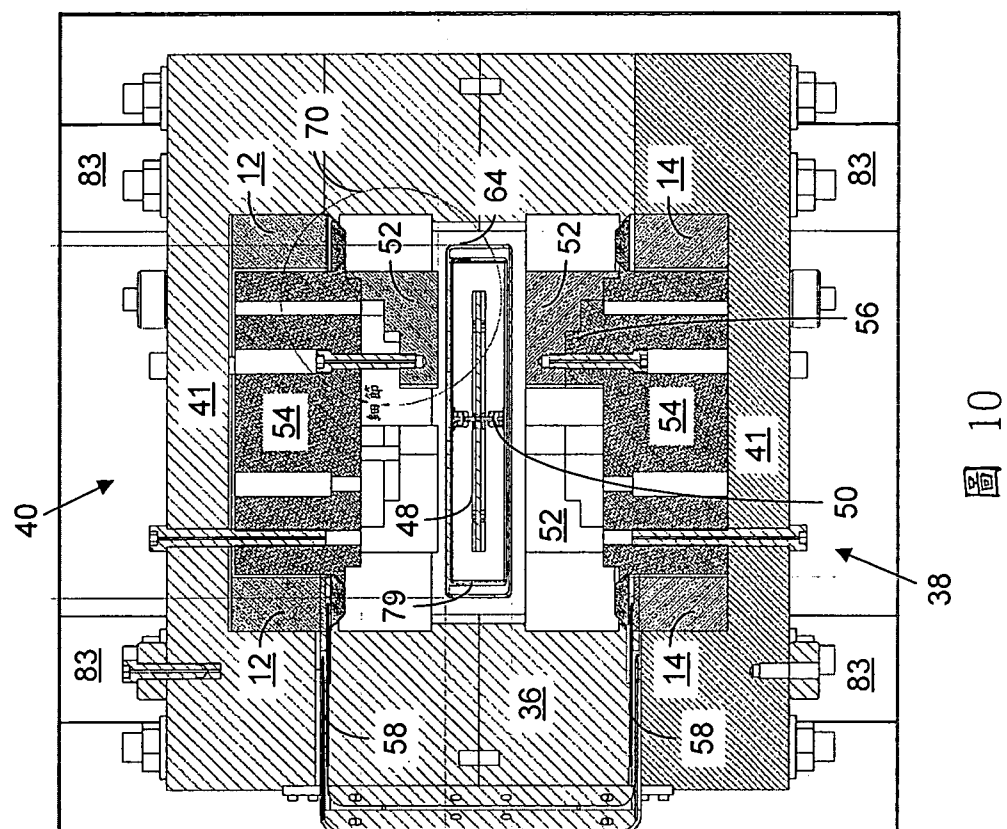
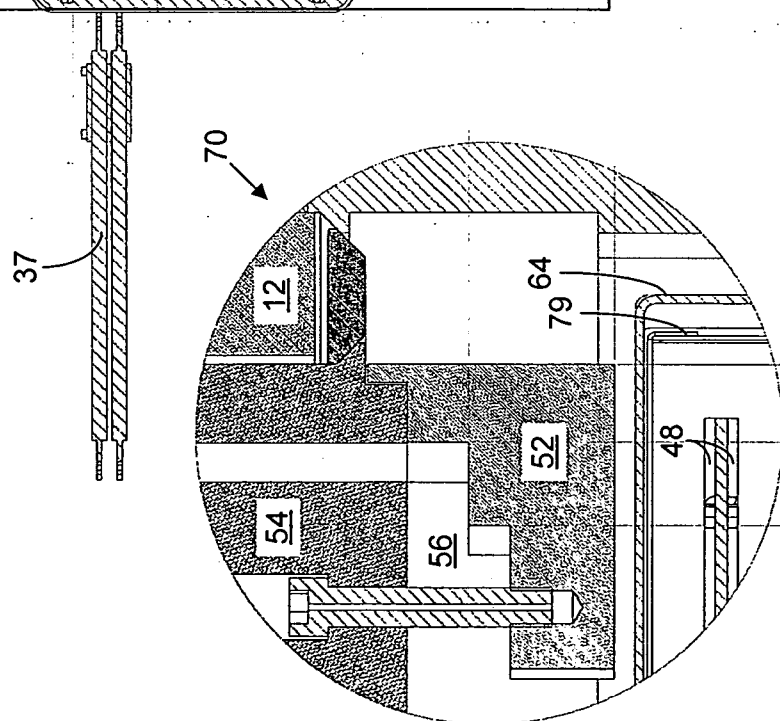


圖 9



10



二二

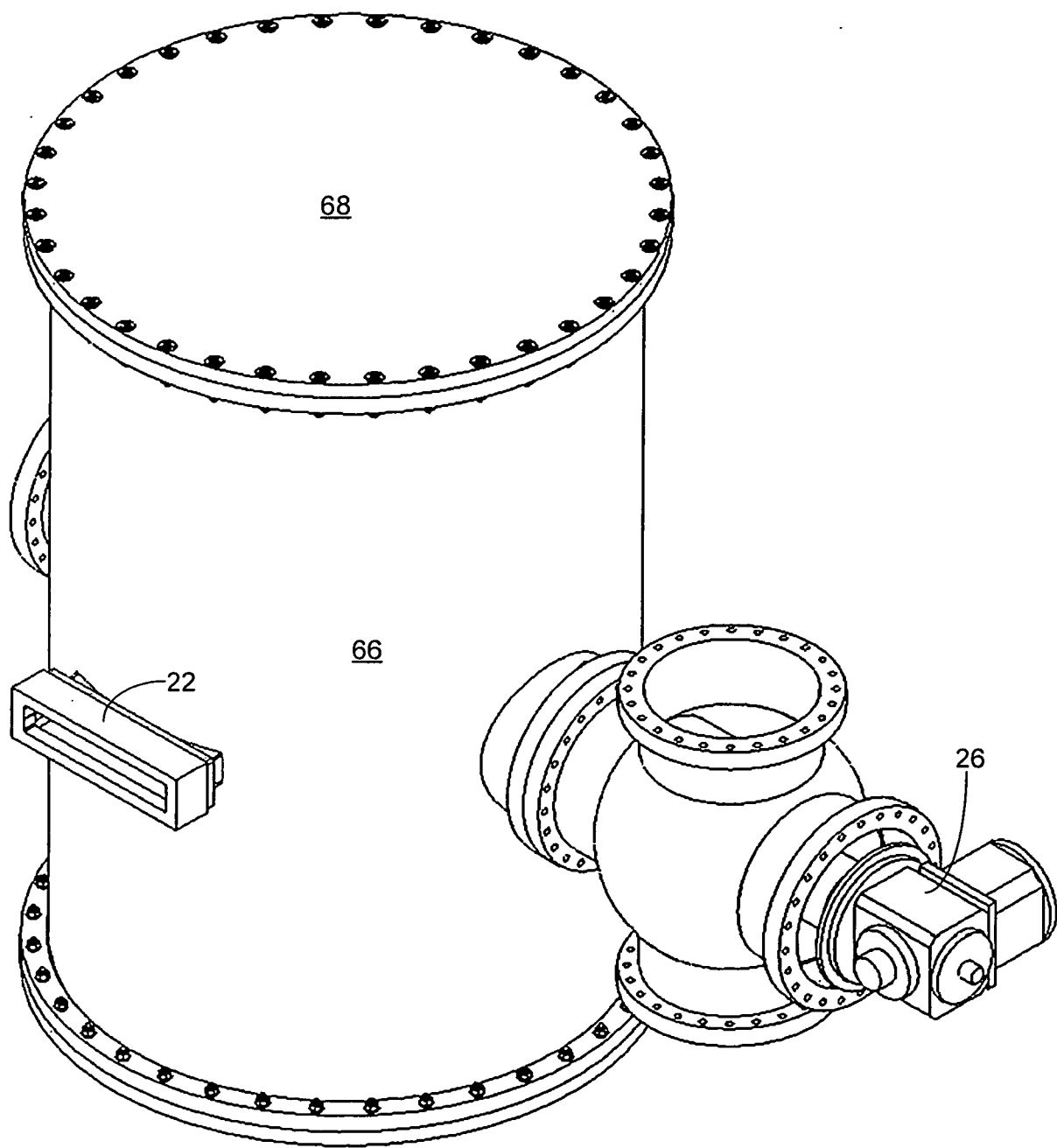


圖 12

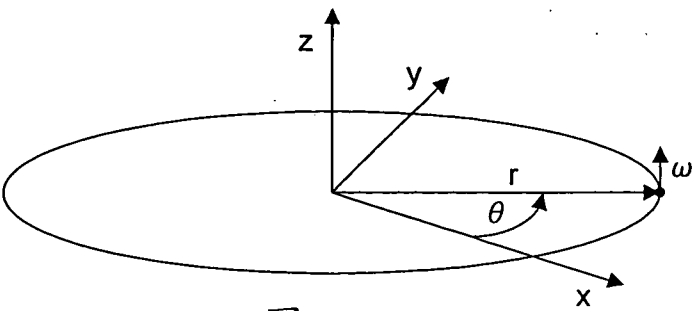


圖 13

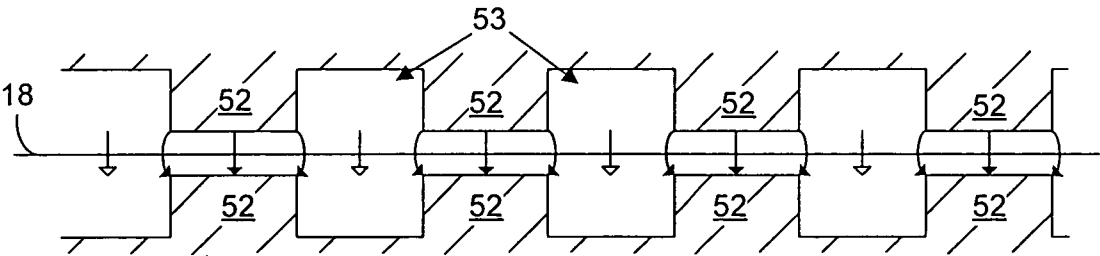


圖 14

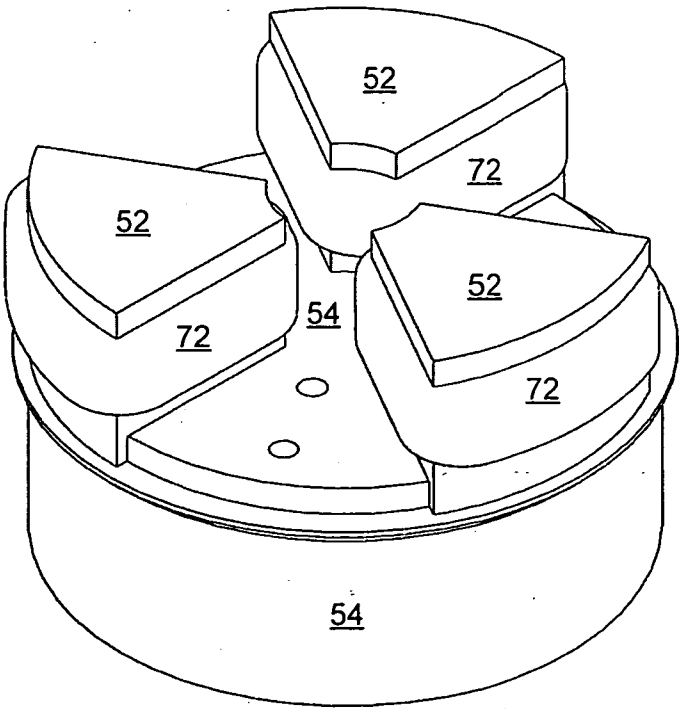


圖 15

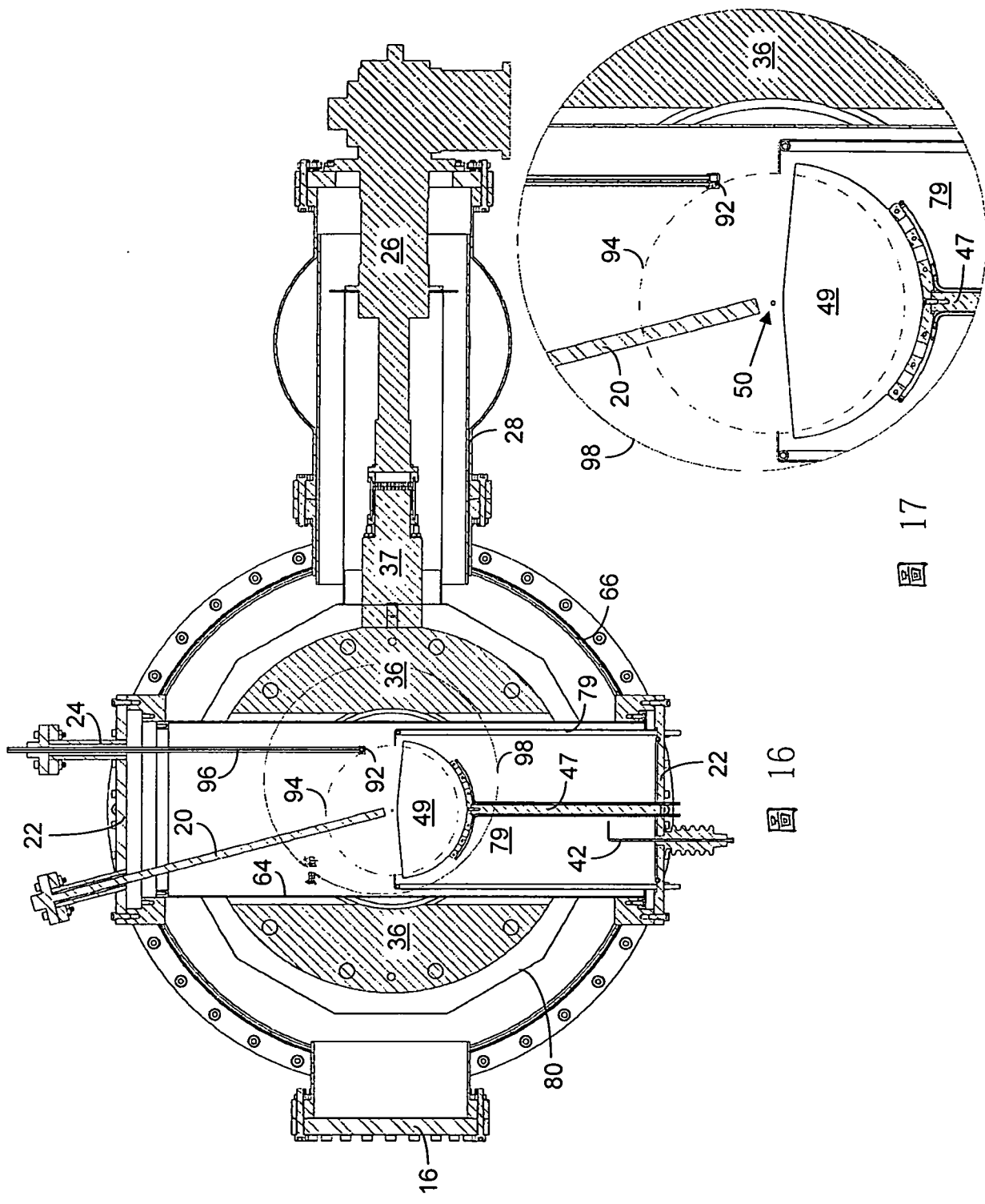


圖 17

圖 16

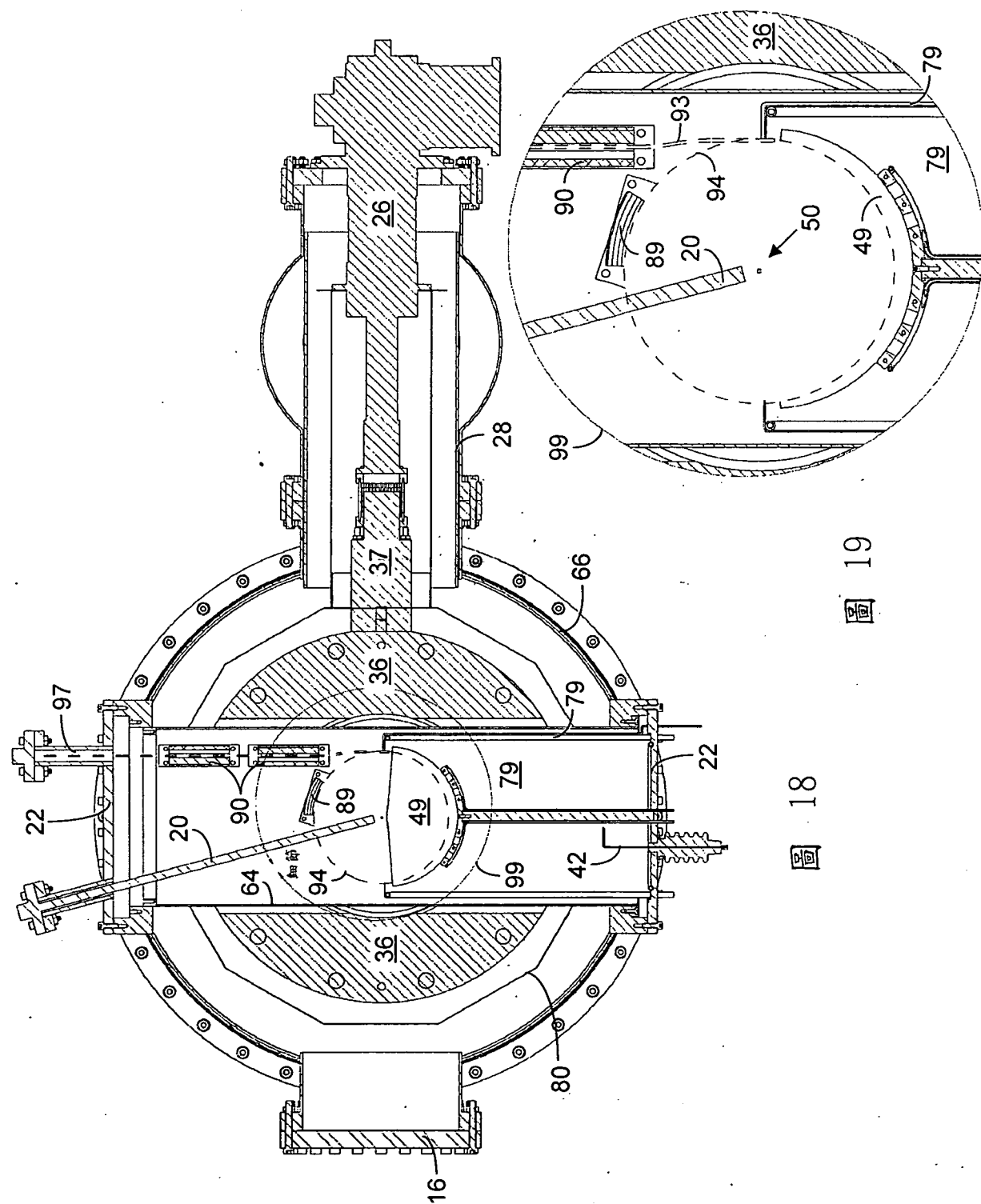


圖 19

圖 18