

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
H02K 55/02 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 02120014.9

[45] 授权公告日 2007 年 9 月 19 日

[11] 授权公告号 CN 100338859C

[22] 申请日 2002.5.15 [21] 申请号 02120014.9

[30] 优先权

[32] 2001. 5. 15 [33] US [31] 09/854931

[73] 专利权人 通用电气公司

地址 美国纽约州

[72] 发明人 E·T·拉斯卡里斯

J·P·亚历山大 R·A·阿克曼

[56] 参考文献

US3991587 1976.11.16

审查员 项晓娟

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
代理人 章社杲

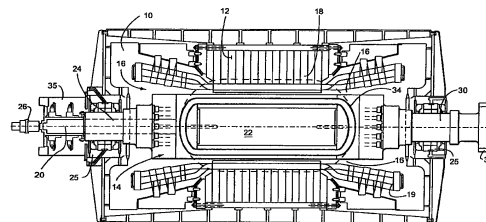
权利要求书 3 页 说明书 12 页 附图 6 页

[54] 发明名称

位于同步电机的转子和低温冷却流体源之间的冷却流体连接器

[57] 摘要

公开了一种冷却流体连接器(26)，其用于提供冷却流体给同步电机的具有超导绕组的转子和低温冷却流体源。流体连接器包括位于转子中并与转子轴线同轴的输入冷却管(156)和输出冷却管(166)。输入冷却管具有可接收来自低温冷却流体源(190)的输入冷却流体(157)的输入端口。输出冷却管具有可将冷却流体(164)从转子送回到流体源的输出端口。连接器的输入端口和输出端口由固定的运动间隙密封装置(162)隔开。



1. 一种位于同步电机(10)的转子(14)和低温冷却流体源(190)之间的冷却流体连接器(26), 其包括:

位于所述转子中并与所述转子的轴线(20)同轴的可旋转的输入管(156)和可旋转的输出管(166);

所述输入管(156)具有可接收来自所述低温冷却流体源(190)的输入冷却流体的输入端口;

所述输出管具有可将所述冷却流体从所述转子送回到所述冷却流体源中的输出端口; 和

将所述输入端口和所述输出端口隔开的固定的相对运动间隙密封装置(162),

其中, 所述连接器还包括与所述转子轴线偏离并与所述输出管相连的第一柔性管(170), 以及相邻于所述第一柔性管并与所述输入管相连的第二柔性管(160), 其中所述第二柔性管与所述转子轴线同轴。

2. 根据权利要求1所述的冷却流体连接器, 其特征在于, 所述连接器还包括磁流体密封装置(176)。

3. 根据权利要求2所述的冷却流体连接器, 其特征在于, 所述连接器还包括位于所述输入管和所述输出管之间的真空夹套(172)。

4. 根据权利要求1所述的冷却流体连接器, 其特征在于, 所述连接器还包括延伸到所述输入管内的插入管(154), 所述插入管与所述低温冷却流体源(190)相连。

5. 根据权利要求1所述的冷却流体连接器, 其特征在于, 所述冷却流体为氦气。

6. 根据权利要求1所述的冷却流体连接器, 其特征在于, 所述连接器还包括位于所述输入管和所述输出管之间的真空夹套(172)。

7. 根据权利要求1所述的冷却流体连接器, 其特征在于, 所述连接器还包括围绕所述输出管并与其同轴的固定管(152)。

8. 根据权利要求7所述的冷却流体连接器,其特征在于,所述连接器还包括位于所述输出管和所述固定管之间的真空夹套(172)。

9. 根据权利要求7所述的冷却流体连接器,其特征在于,所述连接器还包括支撑所述固定管的轴承(178)。

10. 根据权利要求7所述的冷却流体连接器,其特征在于,所述连接器还包括支撑所述固定管(152)的轴承、在所述固定管中支撑所述输出管的磁流体密封装置(176),以及在所述输出管中支撑所述输入管的可旋转的相对运动间隙密封装置。

11. 一种位于同步电机(10)的转子(14)和低温冷却流体源(190)之间的冷却流体连接器(26),其包括:

位于所述转子中并与所述转子的轴线同轴的可旋转的输入管(156)和可旋转的输出管(166);

所述输入管(156)可接收来自所述低温冷却流体源的输入冷却流体;

所述输出管可将所述冷却流体从所述转子送回到所述冷却流体源中;和

在所述输出管中支撑所述输入管的可旋转的相对运动间隙密封装置,

其中,所述连接器还包括与所述转子轴线偏离并与所述输出管相连的第一柔性管(170),以及相邻于所述第一柔性管并与所述输入管相连的第二柔性管(160),其中所述第二柔性管与所述转子轴线同轴。

12. 一种位于同步电机(10)的转子(14)和低温冷却流体源(190)之间的冷却流体连接器(26),其包括:

位于所述转子中并与所述转子的轴线同轴的可旋转的输入管(156)和可旋转的输出管(166);

所述输入管可接收来自所述低温冷却流体源的输入冷却流体;

所述输出管可将所述冷却流体从所述转子送回到所述冷却流体源中;

在所述输出管中支撑所述输入管的可旋转且无接触的相对运动间隙密封装置;

围绕所述输出管的第三管, 所述第三管由轴承(178)所支撑, 和在所述第三管中支撑所述输出管的磁流体密封装置,

其中, 所述连接器还包括与所述转子轴线偏离并与所述输出管相连的第一柔性管(170), 以及相邻于所述第一柔性管并与所述输入管相连的第二柔性管(160), 其中所述第二柔性管与所述转子轴线同轴。

13. 根据权利要求 12 所述的冷却流体连接器, 其特征在于, 所述连接器还包括位于所述输入管和所述输出管之间的真空夹套。

14. 根据权利要求 12 所述的冷却流体连接器, 其特征在于, 所述连接器还包括延伸到所述输入管内的插入管, 所述插入管与所述低温冷却流体源相连。

15. 根据权利要求 12 所述的冷却流体连接器, 其特征在于, 所述冷却流体为氦气。

16. 根据权利要求 12 所述的冷却流体连接器, 其特征在于, 所述连接器还包括位于所述第三管和所述输出管之间的真空夹套。

17. 根据权利要求 12 所述的冷却流体连接器, 其特征在于, 所述第三管是固定的。

位于同步电机的转子和低温冷却流体 源之间的冷却流体连接器

技术领域

本发明大体上涉及一种同步旋转电机中的超导线圈，更具体地涉及一种位于低温流体源和电机转子之间的低温气体连接器。

背景技术

具有励磁线圈绕组的同步电机包括但不限于旋转发电机，旋转电动机和直线电动机。这些电机通常包括电磁耦合在一起的定子和转子。转子可以包括多极转子铁芯和安装在转子铁芯上的线圈绕组。转子铁芯可以包括可导磁的固体材料，如铁芯转子。

在同步电机的转子上通常采用传统的铜绕组。然而，铜绕组的电阻（虽然其传统的测量值较低）足以产生大量的转子热量，并降低了电机的功率效率。近来，已开发出了用于转子的超导(SC)线圈绕组。SC绕组实际上不具有电阻，是非常优良的转子线圈绕组。

铁芯的转子在气隙磁场强度约为 2 特斯拉时饱和。已知的超导转子采用在转子中没有铁芯的空气芯设计，以使气隙磁场强度达到 3 特斯拉或更高，这就增加了电机的功率密度，并导致其重量和尺寸显著减小。然而，空气芯的超导转子需要大量的超导线，这就增加了所需的线圈数量、线圈支撑构件的复杂性以及成本。

高温 SC 励磁线圈绕组由脆性超导材料制成，其必须被冷却到临界温度如 27K 或临界温度以下，以获得并保持超导性。这种 SC 绕组可由高温超导材料，如 BSCCO 基($\text{Bi}_x\text{Sr}_x\text{Ca}_x\text{Cu}_x\text{O}_x$)的导体制成。

超导线圈由液氮冷却。经过了转子的线圈绕组后，来自绕组的热氮回复为室温的气态氮。使用液氮进行低温冷却要求连续地再液化已回复的室温的气态氮。这种再液化存在相当大的可靠性方面的

问题，并需要大量的辅助电源。

现有冷却技术包括通过低温冷却机经固体导电路径来冷却环氧树脂浸渍的 SC 线圈。或者，转子中的冷却管可将液态和/或气态冷却剂传送给浸入在液态和/或气态冷却剂流中的多孔 SC 线圈绕组。浸入式冷却要求整个励磁绕组和转子结构处于低温温度下。结果是，由于铁在低温下的脆性，它不能用于转子磁路中。

需要一种冷却流体连接器将固定的低温制冷单元连接到转子及其 SC 线圈上。此连接器必须在固定源和转子的旋转端轴之间传送输入和输出的冷却流体。在连接低温冷却系统和转子及其它旋转部件的传送连接器中通常使用接触密封装置。接触密封装置增加了摩擦损失，降低了低温制冷机的能力，并且由于密封磨损而限制了连接器的寿命和可靠性。在传送冷却流体到转子时也使用相对运动间隙的密封装置。然而，相对运动间隙的密封装置具有较高的传热损失。可使用延长的相对运动间隙的热绝缘长度来减少低温气体的传热损失，并提高低温制冷机的能力。然而，这些长的热绝缘长度导致悬伸管较长，使其过度地振动并与发电机转子发生摩擦接触。因此，对与转子相连的更好的低温气体连接器的需求是长期存在的。

有关用于 HTS 线圈的低温气体冷却系统的传热损失最好应最小，以节省制冷机的动力。固定低温气体源和同步电机转子之间的连接器是低温气体泄漏的潜在源。为了使连接器处的气体泄漏最小，希望输入和返回的气流之间的泄漏最小，并且在低温气体和周围环境温度部件之间提供充分的热绝缘。另外，传送连接器的使用寿命和高可靠性应与同步电机的预期寿命和可靠性相当。

发明内容

已开发了一种冷却气体连接器，其用于连接低温气体（或冷却流体）供应源和同步电机的转子轴。冷却的低温气体（或其他流体）从固定的低温制冷机通过固定的插入管(bayonet)传送到随具有 HTS

线圈绕组的转子一起旋转的管中。采用与转子的集电器端部相连的低温气体传送接头，可以实现冷却气体的传送。由围绕插入管的间隙密封所形成的相对运动间隙限制了输入冷却气体到低压返回气体的泄漏，在旋转返回管的长度上的相对运动间隙提供了返回低温气体的热绝缘。

根据本发明的第一方面，提供了一种位于同步电机的转子和低温冷却流体源之间的冷却流体连接器，其包括：位于转子中并与转子轴线同轴的可旋转的输入管和可旋转的输出管，其中输入管具有可接收来自低温冷却流体源的输入冷却流体的输入端口，而输出管具有可将冷却流体从转子送回到冷却流体源中的输出端口；以及将输入端口和输出端口隔开的固定的相对运动间隙密封装置。其中，该连接器还包括与转子轴线偏离并与输出管相连的第一柔性管，以及相邻于第一柔性管并与输入管相连的第二柔性管，其中第二柔性管与转子轴线同轴。

根据本发明的第二方面，提供了一种位于同步电机的转子和低温冷却流体源之间的冷却流体连接器，其包括：位于转子中并与转子轴线同轴的可旋转的输入管和可旋转的输出管，其中输入管可接收来自低温冷却流体源的输入冷却流体，而输出管可将冷却流体从转子送回到冷却流体源中；以及在输出管中支撑输入管的可旋转的相对运动间隙密封装置。其中，连接器还包括与转子轴线偏离并与输出管相连的第一柔性管，以及相邻于第一柔性管并与输入管相连的第二柔性管，其中第二柔性管与转子轴线同轴。

根据本发明的第三方面，提供了一种位于同步电机的转子和低温冷却流体源之间的冷却流体连接器，其包括：位于转子中并与转子轴线同轴的可旋转的输入管和可旋转的输出管，其中输入管可接收来自低温冷却流体源的输入流体，而输出管可将冷却流体从转子送回到冷却流体源中；在输出管中支撑输入管的可旋转且无接触的相对运动间隙密封装置；围绕着输出管并由轴承支撑的第三管；以

及在第三管中支撑输出管的磁流体密封装置。其中，连接器还包括与转子轴线偏离并与输出管相连的第一柔性管，以及相邻于第一柔性管并与输入管相连的第二柔性管，其中第二柔性管与转子轴线同轴。

附图说明

下面将通过附图并结合说明书的内容来介绍本发明的实施例。

图 1 是具有超导转子和定子的同步电机的示意性侧视图；

图 2 是具有冷却气体通道的跑道形 SC 线圈的示意图；

图 3 是具有跑道形 SC 线圈绕组的转子的局部剖开的示意图；

图 4 和 5 是具有跑道形 SC 线圈绕组和端部轴的转子的剖面图；

图 6,7 和图 8 显示了转子集电器侧的端部轴的剖面图。

图 9 是冷却剂传送连接器组件的剖面示意图。

在图中各标号的含义如下：

10: 同步电机；12: 定子；14: 转子；16: 定子中的转子腔；18: 磁场；19: 定子线圈；20: 转子轴线；22: 转子铁芯；24: 转子端部轴（集电器侧）；26: 冷却剂传送连接器；30: 转子的相对端部轴；32: 涡轮机连接器；34: 跑道形 SC 励磁绕组线圈；35: 换向器/集电器；36: 高温超导（HTS）线圈；37: 连接 SC 线圈的电触头；38: 冷却通道；39: 绕组上的冷却通道的输入端口；40: 绕组侧部；41: 绕组的冷却输出端口；42: 拉杆；44: 通道罩；46: 穿过转子铁芯的孔道；48: 转子铁芯的凹槽表面；52: 拉杆套管（绝缘管）；54: 跑道形线圈绕组的端部；56: 转子端部；58: 拼合夹板；60: 夹板；62: 转子铁芯的轴环；64: 轴环上的狭槽；66: 轴环侧壁；68: 薄壁管；76: 导管；150: 旋转连接器部件；152: 固定件；154: 插入管；156: 环形的可旋转的输入管；157: 流向箭头；158: 插入管端部；160: 输入柔性管；162: 固定的相对运动间隙密封装置；164: 热气流；166: 环形的可旋转的输出管；168: 套管；169: 圆盘；170:

输出柔性管；172：真空夹套；174：薄壁管；176：磁流体密封装置；177：气流；178：连接器轴承；180：油喷嘴；182：放油管；184：迷宫式密封装置；186：圆柱形罩壳；188：防护罩；190：固定的低温冷冻机；196：圆柱形密封套；198：O型密封圈。

具体实施方式

图 1 显示了具有定子 12 和转子 14 的示例性同步发电机 10。定子包括安装在定子的圆柱形真空腔 16 内的励磁绕组线圈 34。转子安装在定子的圆柱形真空腔内。当转子在定子内转动时，转子和转子线圈所产生的磁场 18（图中虚线所示）穿过定子延伸，在定子线圈 19 的绕组中产生了电流。此电流由发电机作为电能输出。

转子 14 具有通常沿轴向延伸的轴线 20 和通常为实心的转子铁芯 22。实心的铁芯 22 具有较高的导磁性，通常由铁磁材料如铁制成。在低功率密度的超导电机中，可用转子的铁芯来减少磁动势(MMF)，从而减少所用的导线。例如，转子铁芯可在气隙磁场强度约为 2 特斯拉时磁饱和。

转子 14 支撑了一对通常沿轴向延伸的、跑道形的高温超导(HTS)线圈 34。超导线圈也可鞍形，或者是可适应特定 HTS 转子设计的其它形状。这里所公开的冷却连接器也可适用于与安装在实心转子上的跑道形线圈不同的其它线圈绕组及转子结构。

转子包括一对端部轴 24,30，其可支持铁芯 22 并由轴承 25 支撑。集电器侧的端部轴 24 包括可与旋转 SC 线圈绕组电连接的集电环 35。集电器侧的端部轴具有冷却剂传送连接器 26，其与用于冷却转子中的 SC 线圈绕组的低温冷却流体源相连。冷却剂传送连接器 26 包括与低温冷却流体源相连的固定部分以及为 HTS 线圈提供冷却流体的旋转部分。驱动侧的端部轴 30 可由动力涡轮机通过驱动连接器 32 来驱动。

图 2 显示了一个示例性的 HTS 跑道形 SC 励磁线圈绕组 34。转

子的 SC 励磁绕组 34 包括高温超导线圈 36。各 HTS 线圈包括高温超导体，例如层叠在固体的经环氧树脂浸渍的绕组组成物条带中的 BSCCO ($\text{Bi}_x\text{Sr}_x\text{Ca}_x\text{Cu}_x\text{O}_x$) 导体。例如，可在固体的环氧树脂浸渍的线圈中层叠、粘结并缠绕一系列 BSCCO 2223 导线。

SC 线圈为典型的经环氧浸渍的层绕 SC 条带。SC 条带缠绕成精密的线圈形状以获得精密的尺寸公差。条带以螺旋方式缠绕，形成一个跑道形 SC 线圈 36。

跑道形线圈的尺寸取决于转子铁芯的尺寸。通常来说，各跑道形线圈包围了转子铁芯的磁极，并与转子轴线平行。线圈绕组围绕此跑道形是连续的。SC 线圈围绕着转子铁芯和在铁芯的磁极之间形成了无电阻的电流路径。线圈具有将线圈与集电器 35 电连接的电触头 37。

在线圈绕组 34 内具有低温冷却流体的流体通道 38。这些通道可以围绕 SC 线圈 36 的外边缘延伸。通道可为线圈提供低温冷却流体，以从线圈中带走热量。冷却流体，如氦，可在 SC 线圈绕组中保持为促进包括线圈中的电阻消失在内的超导状态所需的低温，如 27K。冷却通道具有位于转子铁芯一端的输入端口 39 和输出端口 41。这些端口与 SC 线圈上的冷却通道 38 相连，并且在与端部轴 24 相对的端部处与冷却剂传送连接器 26 相连。

图 3 显示了转子铁芯 22 和高温超导线圈的线圈支撑系统的分解图。此支撑系统包括与线圈罩 44 相连的拉杆 42。此线圈罩固定并支撑转子中线圈绕组 34 的侧部 40。虽然图中只示出了一个拉杆和通道罩，但线圈支持系统通常包括多个拉杆，各拉杆的两端均具有线圈支撑罩。拉杆和通道罩可防止在转子运转的过程中损坏线圈绕组，相对离心力和其他力而支撑线圈绕组，并为线圈绕组提供了防护罩。

HTS 线圈和结构支撑部件处于低温下。相反，转子铁芯处于周围的“高”温下。线圈支撑构件是热传导的潜在源，它可使热量从转子铁芯传到 HTS 线圈。转子在操作中变热。由于线圈将处于超低

温状态，因此应避免热量传导到线圈中。拉杆穿过转子中的孔道 46，但不与转子接触。这种不接触减小了从转子到拉杆和线圈的热传导。

为了减少线圈的热传导，线圈的支撑构件应最小，以减小从热源如转子铁芯经支撑构件的热传导。通常有两类用于超导线圈的支撑构件：(i) “温” 支撑构件和(ii) “冷” 支撑构件。在温支撑构件中，支撑结构与冷却的 SC 绕组热绝缘。通过温支撑构件，超导(SC)线圈的大部分机械载荷由横跨从冷到热的部件的构件所支撑。

在冷支撑系统中，支撑系统处于或接近处于 SC 线圈的冷却低温下。在冷支撑构件中，SC 线圈的大部分机械载荷由处于或接近处于低温下的构件所支撑。这里公开的示例性冷支撑系统是冷支撑构件，其中拉杆和将拉杆与 SC 线圈相连的罩保持在低温或接近于此低温的温度下。由于支撑件是冷的，因此这些构件例如通过穿过转子铁芯的无接触孔道与转子的其他“热” 部件热绝缘。绝缘管 52 将拉杆 42 与转子铁芯中的孔道壁分离。这些绝缘管插入到各孔道 42 的端部。拉杆穿过管的中心。绝缘管 52 将拉杆置于孔道的中心，并防止热量从热的转子铁芯传导到冷的拉杆。

单个支撑件包括拉杆 42（其可能为在一端部带有一对螺栓的杆）、通道罩 44 和连接通道罩与拉杆端部的销钉 80。各通道罩 44 为 U 形托架，其带有与拉杆相连的支脚和用于容纳线圈绕组 34 的沟槽。U 形罩可使支撑系统与线圈精密且方便地进行装配。沿线圈绕组的侧部可从头到尾地设置一组沟槽架。线圈罩 44 将作用在线圈上的力例如离心力整体地分布在各线圈的基本整个侧部 40 上。

销钉 80 穿过通道罩和拉杆上的开口。销可以为中空的，以减轻重量。锁定螺母 84 与销钉的端部螺纹连接，从而紧固罩 44 以防止罩的侧部在载荷下脱开。销钉可由高强度的铬镍铁合金或钛合金制成。拉杆制成具有大直径端部 82，此端部的端面被机加工成两个平面 86，以便与 U 形罩和线圈宽度相配。当拉杆、线圈和线圈罩装配在一起时，拉杆的平端部 86 靠在 HTS 线圈的内表面上。这种线圈支

撑组件减小了拉杆中容纳销钉的孔处的应力集中。

转子铁芯 22 通常由磁性材料如铁制成，而转子侧端部轴通常由非磁性材料如不锈钢制成。端部轴 24,30 可由不锈钢制成。转子铁芯和端部轴是通常为可通过螺纹连接或焊接装配并牢固地连接在一起的分开的零件。

转子铁芯 22 通常具有圆柱形的形状，以适于在定子 12 的转子腔 16 中旋转。为了容纳线圈绕组 34，转子铁芯具有凹槽表面 48，例如平的或三角形的区域或狭槽。这些表面 48 位于圆柱铁芯的曲面上并沿转子铁芯纵向地延伸。线圈绕组 34 安装在转子上邻近于凹槽区域 48 的位置。线圈通常沿凹槽区域的外表面纵向地延伸，并围绕转子铁芯的端部。转子铁芯的凹槽表面 48 可容纳线圈绕组。凹槽区域的形状应与线圈绕组相符合。例如，如果线圈绕组为鞍形或其它形状，转子铁芯上的凹槽应设成能容纳这些形状的绕组。

线圈绕组 34 的端部 54 与转子铁芯的相对端部 56 相邻。拼合夹板 58 固定住转子中线圈的各个端部。各线圈端部 54 处的拼合夹板包括一对可夹住线圈 34 的相对的平板 60。拼合夹板的表面包括可容纳线圈绕组的沟槽和连接绕组的接头 112,124。

拼合夹板 58 可由非磁性材料如铝或铬镍铁合金制成。可以用相同或相似的非磁性材料来制作拉杆、线圈罩和线圈支撑系统的其它部分。线圈支撑系统最好为非磁性的以便在低温下保持韧性，这是因为铁磁材料在低于居里转变温度的温度下变脆，不能用作承载结构。

各端部轴的轴环 62 包围拼合夹板 58，但不与之相接触。虽然图 3 中仅示出了一个轴环，但在转子芯 22 的两端均连接了轴环 62。轴环是非磁性材料如不锈钢的厚圆盘，此非磁性材料与制成转子轴的材料相同或相似。

轴环具有正交于转子轴线的狭槽 64，此狭槽较宽，足以容纳且不接触拼合夹板 58。开槽轴环的热的一侧壁 66 与冷的拼合夹板相隔离，

使得它们互不接触。

图 4 和图 5 是转子的剖视图, 其中图 5 显示了围绕转子铁芯的线圈绕组的平面图, 图 4 显示了正交于图 5 的视图。图 6,7 和 8 是集电器侧的端部轴 24 的放大剖视图。特别是这些图显示了穿过转子的集电器侧的端部轴 24 的导管 76。导管 76 为冷却管和连接 SC 绕组的电触头提供了通道。导管 76 从轴环 62 穿过端部轴 24 延伸到冷却剂传送连接器 26 处的相对的端部轴。图 6 和 7 显示了邻近转子铁芯 22 和端部轴 24 的导管 76。图 8 显示了连接线圈绕组 34 的冷却输入端口 39 和输出端口 41 的放大视图。

线圈绕组 34 的电接头 37 与电线相连, 电线沿端部轴 24 的长度朝向集电环 35 延伸。电线穿过轴中的导管 76, 且被支撑在薄壁管 174 内。

线圈的冷却输入端口 39 和输出端口 41 连接到沿端部轴长度延伸的环形的可旋转的输入管 156 和环形的可旋转的输出管 166 上。输入管 156 延伸到与转子轴线同轴的输入端口 39。输出端口 41 与转子轴线偏离, 并通过传送连接器与输出管 166 相连接。输出管 166 与输入管 156 同轴, 并位于输入管 156 之外。

图 9 显示了示例性的传送连接器 26, 其具有旋转轴件 150 和围绕此轴件的固定件 152。传送连接器将转子端部轴 24 与用于冷却转子中的 SC 线圈绕组的低温冷却流体的固定的供应源相连。

冷却低温气体从固定的低温制冷机 190 (示意性示出) 通过固定插入管 154 连接到随端部轴 24 一起旋转的输入管 156 中。右向箭头 157 显示了输入冷却气体穿过连接器并沿转子轴线 20 朝向 HTS 线圈流动。插入管与转子轴线 20 同轴。插入管的端部 158 提供了与输入管 156 的无接触密封。插入管的另一端连接到与低温制冷机相连接的输入柔性管 160, 并提供输入冷却氦气的供应源。由围绕插入管形成间隙密封的可旋转的相对运动间隙密封装置限制了输入冷却气体向低压返回气体的泄漏。

热的冷却气体（由图中左向箭头 164 示出）在输入管 156 和输出管 166 之间形成的环状通路中流动，环状通路与输入管同轴。热的冷却气体穿过 HTS 线圈绕组并从那些绕组中带走热量。

热的冷却气体离开输出管 166，并在间隙密封装置和围绕此间隙密封装置的固定的圆柱形套管 168 之间流过。套管的端部圆盘 169 具与转子轴线偏离且与输出柔性管 170 相连的输出端口，用于将热的低温气体从转子传递到低温制冷机 190。热的冷却气体进入到与低温制冷机相连的柔性管 170 中。柔性管 170 与转子轴线 20 偏离。

所有输入管 156 和输出管 166 均被真空夹套 172 套住，以减小传给气体的热量。返回气流 164 通过带有小的相对运动间隙（在薄壁管 174 和输出管 166 之间）的一段薄壁管 174 而与周围环境温度热绝缘，以使对流传热最小。施加给薄壁管 174 和圆柱形罩壳 186 之间的间隙的真空提供了进一步的热绝缘。

在管 174 的端部处的磁流体密封装置 176 提供了加压气体系统的无接触的可靠密封。由外部供应源提供的气流 177 起缓冲作用，可以隔离轴承 178 的油与磁性密封装置的磁流体，因此轴承油不能与磁流体接触。

传送连接器 26 由可限制悬伸管的振动和径向跳动的精密轴承 178 支撑在转子轴上，以防止在相对运动间隙处密封装置的摩擦。油喷嘴 180 可为轴承提供润滑。放油管 182 可允许排出用过和过量的轴承油。迷宫式密封装置 184 可防止油从轴承中泄漏。

圆柱形罩壳 186 包围了传送连接器 26 的插入管末端和柔性管 160,170。罩壳连接到与低温制冷机 190 相连的柔性圆柱形波纹管 188 上。罩壳 186 内保持真空，以在环境温度、柔性管和传送连接器之间提供热绝缘。

在圆柱形密封管 196 中装入了磁流体密封装置 176，其用 O 型密封圈 198 相对于连接器 26 的非旋转部件密封，以防止返回气体的泄漏。

输入管 156 和输出管 166 通过真空夹套 172 相互热绝缘。通过固定的相对运动间隙密封装置 162(以及被真空夹套套着的输入管 156 的双层壁), 输入管 156 与流出的气体保持隔离。类似地, 双层壁的外层旋转管(输出管 166)也被真空夹套 172 套住, 并位于薄壁管 174 的内部。这些输入管 156 和输出管 166 从连接器延伸到 HTS 线圈绕组的输入端口 39 和输出端口 41。

为在连接器 26 的旋转和固定部件之间提供气流密封, 将无接触的间隙密封和磁场流体密封结合精密轴承和带有狭小相对运动间隙的短悬伸管一起使用。传送连接器 26 的这些特性防止了摩擦生热。由于摩擦或振动, 在接触密封系统中会产生这种摩擦热。无接触密封系统的其它优点为连接器寿命长、气体密封的可靠性高, 以及气体连接器中的热量损失低。

在运转中, 传送连接器 26 的插入管 154 经柔性管 160 与低温冷却流体源相连。类似地, 输出管 166 和气体密封的套管 168 与输出柔性管 170 相连。低温密封罩壳 186 连接到传送连接器 26 的圆柱形套管上。在罩壳 186 内和输入/输出管的真空夹套 172 内形成了真空。

冷却气体通常为惰性气体, 如氦、氖或氢。HTS 超导体的适宜温度通常低于 30K, 最好在 27K 左右。冷却剂流在温度 27K 左右的温度下从低温制冷机中排出。冷却流体(箭头 157)从柔性管 160 通过插入管 154 和输入管 156 流到转子和 HTS 线圈绕组 34 中。

冷却低温流体经过转子中的通道进入 HTS 线圈 36 的冷却通道 38 中。冷却气体将热从 HTS 线圈带走, 保持线圈在足够低的温度以达到线圈的超导特性。冷却管道具有输入端口 39 和输出端口 41, 其位于转子铁芯的与冷却流体连接器 26 相连的端部。

应减小低温气体的传热损失以节省制冷动力, 并保持 SC 线圈所需的操作低温。通过使冷却流体的泄漏最小和使低温冷却流体的热传导最小来使热量损失最小。

固定的相对运动间隙密封装置 162 围绕插入管 154 形成间隙密

封，其限制了输入低温气体（箭头 157）到低压的流出返回气体（箭头 164）的泄漏。冷却流体的泄漏会将不希望有的热量传送给冷却系统。因此，应减少冷却流体的泄漏以提高热绝缘和低温冷却系统 26 的总冷却效率。

除了冷却流体的泄漏外，无效传热的第二个来源是转子中周围部件的热传导。在低温冷却气体和周围环境温度部件之间应提供足够的热绝缘，以使传给低温气体的热量最小。例如，可用真空夹套 172 套住输入管 156 和输出管 166，以确保高的热绝缘。容易理解，也可以在固定件 152 与输出管 166 之间设置真空夹套。

而且，返回气流 164（箭头 164）通过薄壁管 174 和带有小的相对运动间隙（在薄壁管 174 和输出管 166 之间）的输出管 166 而与周围环境温度热绝缘，以使对流传热最小。这些相对运动间隙的热绝缘长度如管之间的真空夹套间隙减小了低温流体的传热，并提高了低温制冷机的能力（通过减少热损失）。长的热绝缘长度会导致长悬伸管发生过度振动，并可能发生摩擦接触。

传送连接器 26 的支撑系统设计成可减小与管道振动相关的问题。连接器 26 由精密轴承 178 支撑在转子轴上，精密轴承可限制悬伸管的振动和径向跳动。

虽然在上文中结合目前被认为是最实用和优选的实施例来介绍了此发明，但是可以理解，此发明并不限于所公开的实施例。相反，本发明覆盖了在所附权利要求的精神实质内的所有实施例。

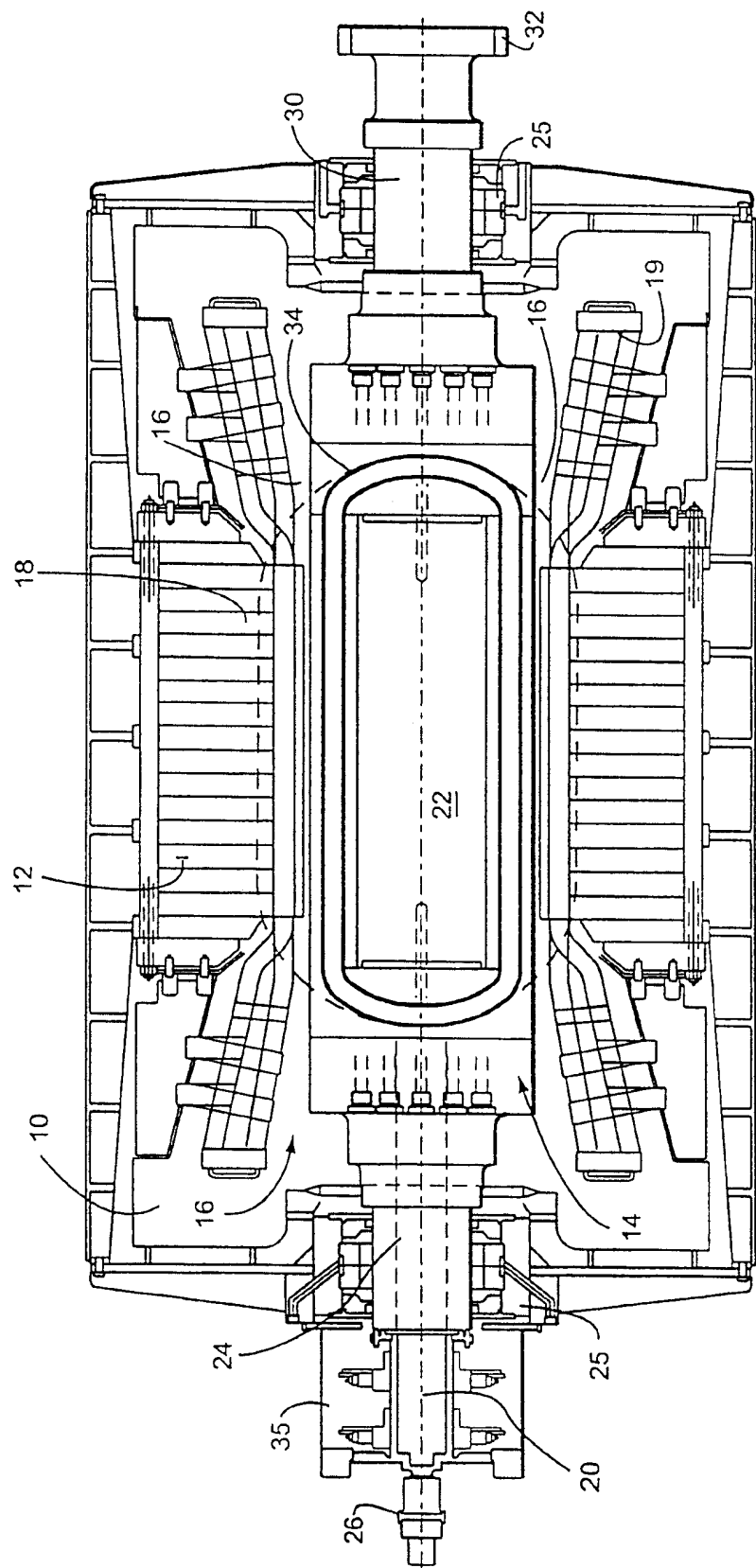


图 1

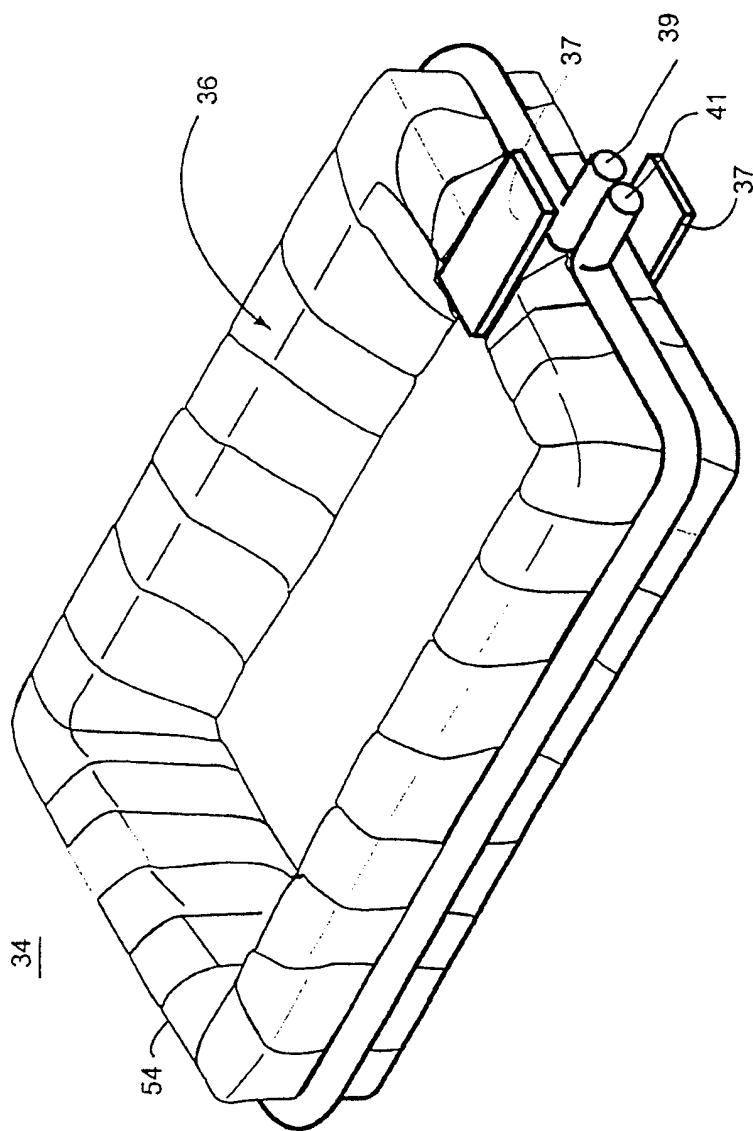


图 2

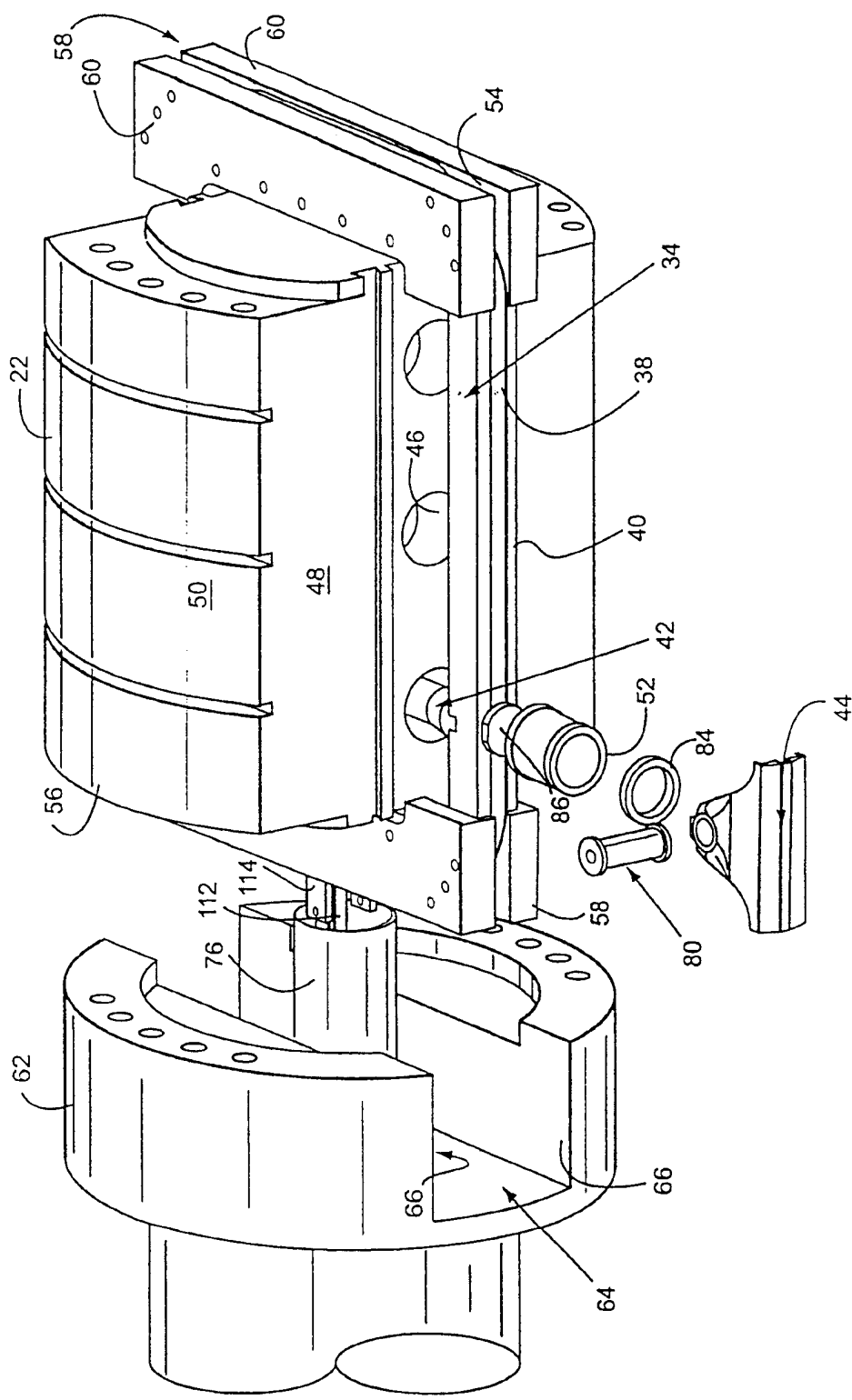


图 3

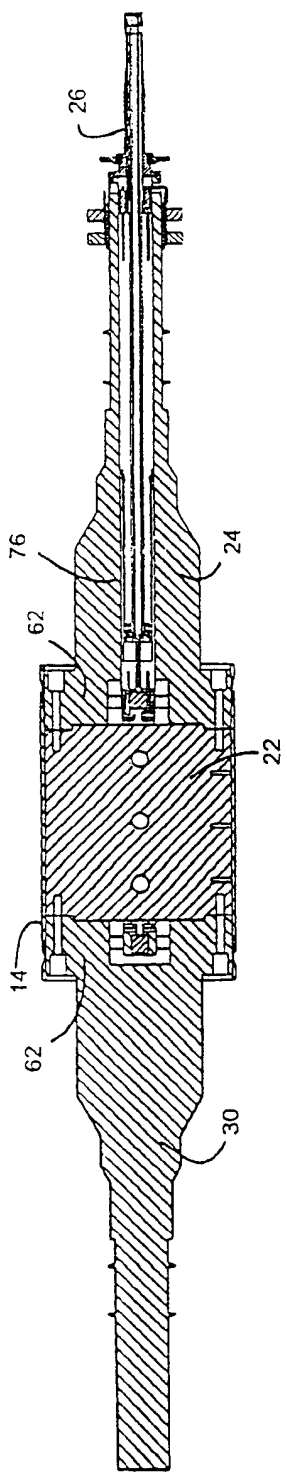


图 4

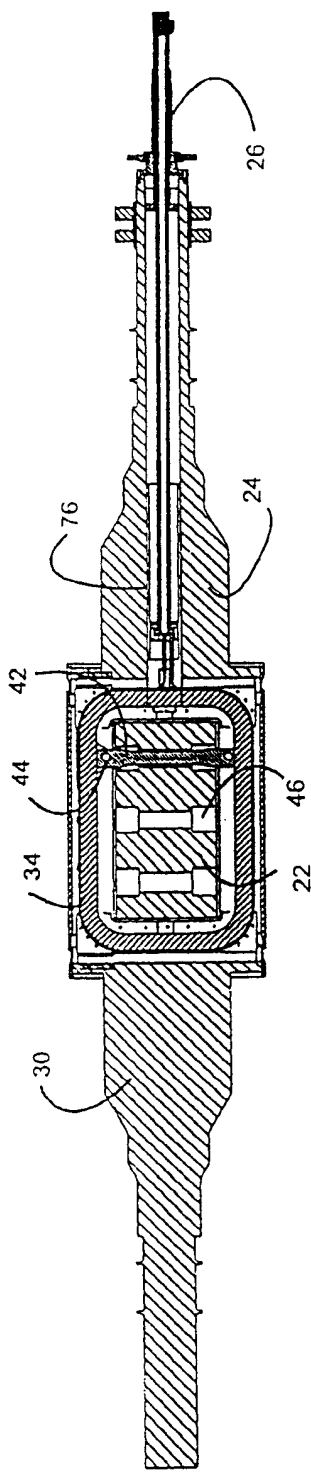
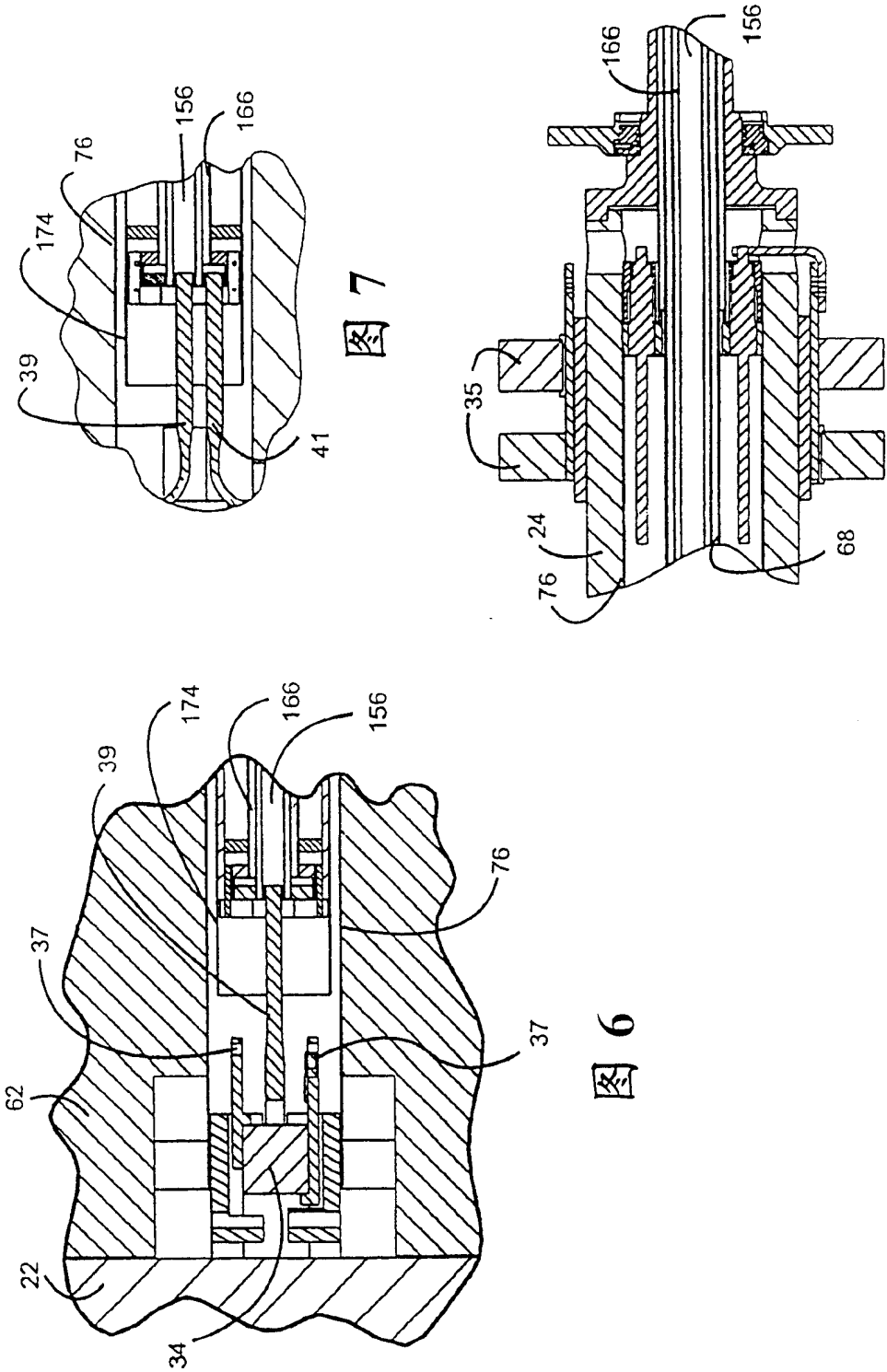


图 5



26

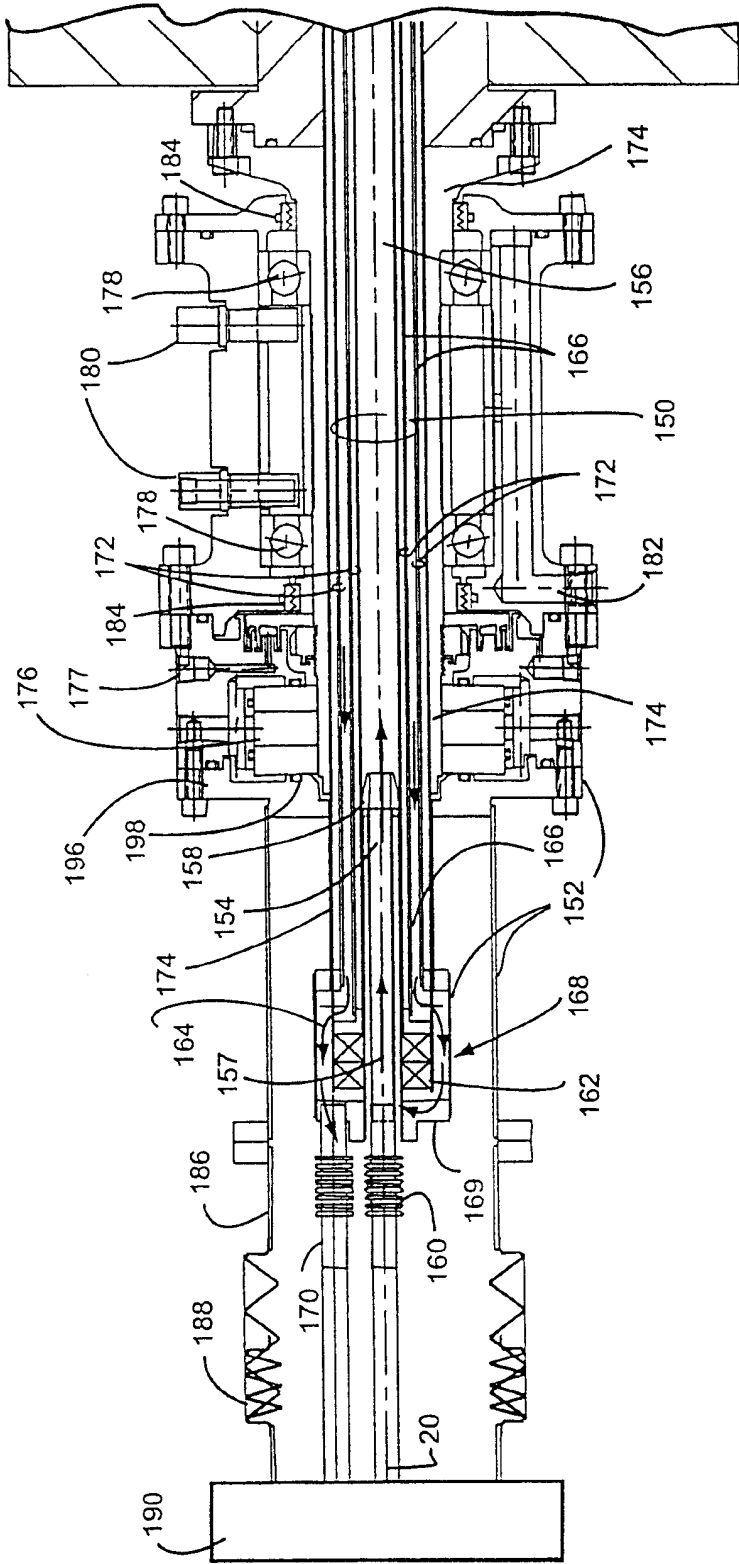


图 9