

[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 02120007.6

[45] 授权公告日 2007 年 8 月 1 日

[11] 授权公告号 CN 1330080C

[22] 申请日 2002.5.15 [21] 申请号 02120007.6

[30] 优先权

[32] 2001. 5. 15 [33] US [31] 09/854932

[73] 专利权人 通用电气公司

地址 美国纽约州

[72] 发明人 Y·王 J·P·亚历山大

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

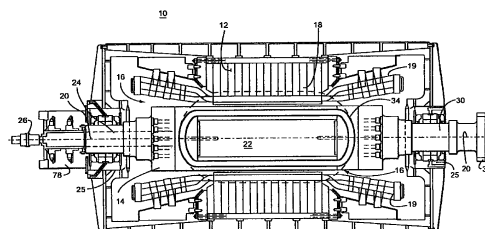
权利要求书 3 页 说明书 12 页 附图 5 页

[54] 发明名称

一种具有转子和多个超导励磁线圈绕组的超导同步电机

[57] 摘要

公开了一种同步电机的转子，其包括具有转子轴线的转子铁芯和一对安装在转子铁芯上的超导线圈绕组，各所述线圈绕组处于与转子轴平行且偏离的各个平面上。



1. 一种用于同步电机(10)的转子, 其包括:
具有转子轴线(20)的转子铁芯(22);
一对安装在所述转子铁芯上的超导线圈绕组(34,100), 各所述线圈绕组处于与所述转子轴线平行且偏离的各个平面上; 和
拉杆, 所述拉杆在所述一对超导线圈绕组之间延伸并与所述一对超导线圈绕组相连, 从而形成了一个拉杆和超导线圈绕组的组件, 所述组件通过间隙与所述转子铁芯分隔开。
2. 根据权利要求1所述的转子, 其特征在于, 所述一对超导线圈绕组(34)均为跑道形。
3. 根据权利要求1所述的转子, 其特征在于, 各所述超导线圈绕组(34,100)均具有一对平行于所述转子轴线(20)的相对的侧部(40)和一对与所述转子铁芯(22)的端部相邻的端部(42)。
4. 根据权利要求1所述的转子, 其特征在于, 所述转子铁芯(22)具有沿所述转子铁芯纵向延伸的凹槽表面(44), 各所述凹槽表面可容纳相应一个的所述线圈绕组(34,100)。
5. 根据权利要求1所述的转子, 其特征在于, 所述一对超导线圈绕组(34,100)均包括围绕它延伸的高温超导导线。
6. 根据权利要求1所述的转子, 其特征在于, 所述拉杆穿过所述转子铁芯中的孔道(52)而延伸。
7. 根据权利要求1所述的转子, 其特征在于, 所述拉杆正交于各所述线圈绕组的各个平面。
8. 根据权利要求1所述的转子, 其特征在于, 所述转子铁芯(22)为铁制的芯体。
9. 根据权利要求1所述的转子, 特征在于, 所述转子铁芯(22)包括将所述一对线圈绕组隔开的隆起(50)。
10. 根据权利要求1所述的转子, 其特征在于, 所述转子还包括

横跨和连接各所述线圈绕组(34)的相对侧部的第一拉杆(62), 以及横跨和连接两个所述线圈绕组(34)的第二拉杆(72)。

11. 根据权利要求 1 所述的转子, 其特征在于, 所述一对线圈绕组(34,100)位于所述转子轴线的相对侧, 各所述线圈绕组所在的平面和所述转子轴线等距离地隔开。

12. 根据权利要求 1 所述的转子, 其特征在于, 各所述线圈绕组(34,100)所在的平面相互平行, 所述转子轴线位于所述平面之间。

13. 根据权利要求 1 所述的转子, 其特征在于, 各所述线圈绕组均为鞍形线圈(100)。

14. 根据权利要求 13 所述的转子, 其特征在于, 所述转子还包括支撑所述鞍形线圈的侧部的鞍形线圈罩(144)。

15. 一种同步电机(10)的转子(14), 其包括:

具有转子轴线的转子铁芯(22), 以及沿所述转子铁芯纵向延伸的凹槽表面(44);

安装在所述转子铁芯上的第一和第二超导线圈绕组(34,100), 各所述线圈绕组处于与所述转子轴线平行并偏离的各个平面上;

多个第一拉杆(62), 其横跨并连接各所述线圈绕组的相对侧部;
和

多个第二拉杆(72), 其横跨并连接各所述线圈绕组。

16. 根据权利要求 15 所述的转子, 其特征在于, 所述转子还包括多个通道罩(70), 各所述通道罩支撑所述第一和第二线圈绕组的侧部的一部分, 并与一个所述第一拉杆的一端和一个所述第二拉杆的端部相连接。

17. 根据权利要求 16 所述的转子, 其特征在于, 所述通道罩(70)形成覆盖了整个所述侧部的外罩。

18. 根据权利要求 16 所述的转子, 其特征在于, 各所述第一和第二拉杆穿过所述转子铁芯中的相应孔道(52)。

19. 根据权利要求 15 所述的转子, 其特征在于, 所述第一和第二

线圈绕组均为鞍形线圈(100)。

20. 根据权利要求 19 所述的转子, 其特征在于, 所述转子还包括支撑所述鞍形线圈的侧部的鞍形线圈罩(144)。

一种具有转子和多个超导励磁线圈绕组的超导同步电机

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，更具体地涉及一种用于同步电机转子中的超导励磁绕组的支撑结构。

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。超导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。这种超导转子具有使用液氮来冷却的超导线圈，用过的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。

高温超导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。这种超导

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超导线圈。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超导线圈绕组。然而，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。

所需要的是一种用于电机的超导励磁绕组组件，它没有已知超导转子的空气芯和液体冷却的超导励磁绕组组件的缺点。

另外，高温超导(HTS)线圈对较高弯曲应变和拉伸应变敏感，从而会发生性能降低。这些线圈必须承受使线圈绕组产生应力和应变的巨大离心力。电机的正常运转包括几年期间的数千次启动和停机循环，使转子产生了低周疲劳载荷。此外，高温超导转子绕组必须能承受在环境温度下转子平衡期间 25%的超速运转，以及在运转过程中的低温下的偶尔超速。与正常运转状态相比，这些超速状态显著地增加了施加在绕组上的离心力载荷。

当用作电机的转子励磁绕组的高温超导线圈承受离心力载荷、扭矩传递和瞬时故障状态时，它们也承受冷却和正常运转时的应力和应变。为了承受力、应力、应变和循环载荷，高温超导线圈必须适当地支撑于转子中。这些在转子中固定线圈的支撑系统和结构应确保线圈能承受由转子旋转所引起的巨大离心力。而且，这些支撑系统和结构应保护高温超导线圈，并确保线圈不产生破裂、疲劳或其他破坏。

开发高温超导线圈的支撑系统在使超导线圈适应于转子方面面临艰巨的挑战。在美国专利 No.5548168、No.5532663、No.5672921、No.5777420、No.6169353 和 No.6066906 中公开了先前提出的用于转子的高温超导线圈支撑系统的示例。然而，这些线圈支撑系统存在许多问题，例如成本昂贵、结构复杂且需要过多的零件。对同步电机的转子和高温超导线圈的线圈支撑系统的需求是长期存在的。此

需求是能以低成本和易于制造的零件制成的高温超导线圈的支撑系统。

发明内容

转子具有位于同步电机的转子铁芯上的一对高温超导线圈。类似地，本发明还公开了用于将此对高温超导线圈安装在转子上的支撑结构。转子可以用于原始设计成包括了高温超导线圈的同步电机的转子。或者，高温超导转子可代替现有的电机如传统发电机中的铜线圈转子。这里描述的转子及其高温超导线圈可用于发电机中，但高温超导线圈转子也适用于在其它同步电机中使用。

设计用于两极励磁绕组的双跑道形高温超导线圈有几个优点，包括线圈设计及线圈支撑设计的简单性。另外，双线圈设计的线圈绕组量基本上是单线圈转子的两倍。因此，双线圈设计的发电容量要大得多（当线圈结合于发电机的转子中时）。

在第一实施例中，本发明为同步电机的转子，其包括：(i)具有转子轴线的转子铁芯；(ii)安装在转子铁芯上的一对超导线圈绕组，各所述线圈绕组位于与转子轴线平行且偏离的各个平面上；(iii)拉杆，其在一对超导线圈绕组之间延伸并与之相连，从而形成了一个拉杆和超导线圈绕组的组件，该组件通过间隙与转子铁芯分隔开。

在另一个实施例中，本发明为同步电机的转子，其包括：(i)具有转子轴线的转子铁芯，和沿转子铁芯纵向延伸的凹槽表面；(ii)安装在转子铁芯上的第一和第二超导线圈绕组，各所述线圈绕组位于与转子轴线平行且偏离的各个平面上；(iii)横跨并连接了各所述线圈绕组的相对侧部的多个第一拉杆；和(iv)横跨并连接了两个线圈绕组的多个第二拉杆。

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 是定子内的超导转子的示意性侧视图；

图 2 是适用于图 1 所示超导转子的跑道形高温超导线圈的示意性透视图；

图 3 是带有两个跑道形高温超导线圈的示例性超导转子的示意性透视图（不带线圈支撑系统）；

图 4 是带有两个跑道形高温超导线圈的示例性超导转子的示意性透视图（带线圈支撑系统）；

图 5 是带有两个鞍形线圈的示例性超导转子的示意性透视图（不带线圈支撑系统）；

图 6 是用于容纳两个鞍形线圈的线圈罩的示意图。

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（图中虚线所示）包括围绕在定子的圆柱形转子腔 16 上的励磁绕组线圈。转子安装在定子的转子腔内。当转子在定子内转动时，转子和转子线圈所产生的磁场 18 穿过定子延伸，在定子线圈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、跑道形的高温超导线圈（见图 3）。超导线圈也可为鞍形，或者是可适应特定转子设计的其它形状。这里所公开的线圈支撑系统也可适用于不同于跑道形的线圈外形。

转子包括一对端部轴 24,30，其可支持转子铁芯 22，由轴承支撑并能与外部设备相连。集电器侧的端部轴 24 包括集电环 78，其可为

线圈绕组 34 的线圈 36 上的连接 79 提供外部的电连接。另外，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超导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高温超导线圈提供冷却流体的旋转部分。驱动侧的端部轴 30 包括与驱动涡轮机相连的动力连接器 32。

图 2 显示了一个示例性跑道形高温超导励磁线圈绕组 34。转子的超导励磁绕组线圈 34 包括高温超导线圈 36。各高温超导线圈包括高温超导体，例如层叠在固体的环氧树脂浸渍的绕组组成物中的 BSCCO ($\text{Bi}_x\text{Sr}_x\text{Ca}_x\text{Cu}_x\text{O}_x$) 导线。例如，可在固体的环氧树脂浸渍的线圈中层叠并捆扎多个 $\text{B}_2\text{S}_2\text{C}_2\text{C}_3\text{O}$ 导线。

高温超导导线是脆性的且容易损坏。高温超导线圈通常由高温超导条带缠绕而成，并在一个精确的线圈样式中进行环氧树脂浸渍以获得精密的尺寸公差。条带以螺旋方式缠绕，形成了跑道形超导线圈 36。导线缠绕成跑道形绕组，跑道形绕组包括冷却管路，其粘结在一个或多个线圈外表面上，通过热传导来提供冷却。在鞍形线圈的实施例中，条带设置成相对于转子径向地分布。

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。高温超导线圈绕组围绕着此跑道形是连续的。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。

在线圈绕组 34 内具有低温冷却流体的流体通道 38。这些通道可以围绕超导线圈 36 的外边缘延伸。通道可提供低温冷却流体，以通过热传导式从那些线圈中带走热量。冷却流体在超导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 39,41 与超导线圈上的冷却通道 38 相连，并且与冷却剂传送连接器 26 相连。

各个跑道形高温超导线圈绕组 34 具有平行于转子轴线 20 的通常直的侧部 40 和正交于转子轴线的端部 42。由于线圈的侧部是离转子轴线最远的线圈部分，因此其承受最大的离心应力。因此，线圈侧部由支撑系统（见图 3 和图 4）所支撑，此支撑系统紧固线圈的侧部并抵消作用在线圈侧部的离心力。

图 3 是带有两个跑道形高温超导线圈绕组 34 的转子铁芯 22 的示意图。端部轴 24 和 30 从转子铁芯的相对的端部上延伸出。转子铁芯可以是具有所需磁性能如较高的导磁率的铁锻件。转子铁芯可具有两个磁极，其中磁极位于转子铁芯的相对的端部。转子铁芯与线圈绕组电磁地相互作用，以激励围绕转子和定子的电磁场。

转子铁芯和端部轴可从单个铁轴上通过如锻造的方法整体地形成。或者，转子铁芯和端部轴可以由装配在一起的分离的部件组成（转子铁芯甚至可以为多片式铁芯）。铁芯锻件可以制成三件以方便转子装配。然而，在这里所给出的示例中，转子铁芯与端部轴形成一体，铁芯和轴在沿着转子的整个长度上是连续的。或者，转子铁芯可以由沿轴纵向的多个部分构成。

转子铁芯 22 通常具有圆柱形的形状，以适于在定子 12 中旋转。为了容纳线圈绕组，转子铁芯具有凹槽表面 44，例如平的或三角形的区域或狭槽，其位于圆柱铁芯的曲面上并沿转子铁芯纵向地延伸的。线圈绕组 34 安装在转子上靠近于这些凹槽区域的位置。线圈通常沿凹槽区域的外表面纵向地延伸。转子铁芯上的这些凹槽表面 44 用于容纳线圈绕组，因此，凹槽的形状设计成与线圈绕组相符合。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置成能容纳这些形状的绕组。

转子铁芯上的凹槽表面 44 容纳线圈绕组，使得线圈绕组的外表面基本上延伸到由转子旋转所形成的包络面。转子铁芯的外曲面 46 在旋转时形成圆柱形的包络面。转子的此旋转包络面具有与定子中的转子腔 16（见图 1）基本相同的直径。

由于转子不要求通风冷却，转子包络面和定子腔之间的间隙为一个相对较小的空隙，其根据需要只用于对定子进行强制通风冷却。希望能减小转子和定子之间的间隙，以增强转子线圈绕组和定子绕组之间的电磁耦合。而且，转子线圈绕组的位置最好使其可延伸到由转子所形成的包络面，这样，转子线圈绕组和定子间仅通过转子和定子之间的间隙隔开。

在双高温超导线圈绕组设置中，转子铁芯 22 具有两对用于双线圈的凹槽表面 44。这四个凹槽表面绕转子铁芯的圆周对称地设置，以在旋转时提供平衡。各凹槽表面 44 在转子铁芯中形成了一个在转子铁芯的长度上延伸的容积 48，其通常具有直角三角形的横截面。此直角三角形横截面的斜边为转子铁芯的圆弧表面 46。各容积 48 容纳两个高温超导线圈绕组 34 中之一的一个侧部 40。温热的铁芯 22 具有一组可让拉杆从转子中通过的通道开口 52。

沿转子的相对的侧面延伸了一对转子铁芯隆起(ridge)50。这对隆起在转子上径向向外延伸到由转子旋转所形成的包络面上。各铁芯隆起位于两个线圈 34 和安装线圈的凹槽表面 44 之间。隆起与转子铁芯形成一体，且与转子铁芯的其他部分一样由相同的磁导材料形成。隆起根据需要设计成能增强转子绕磁极轴线的弯曲刚度，以便将转子的旋转振动减小一半。

铁芯转子中的高温超导线圈的主要载荷来自于转子旋转时的离心加速度。需要有效的线圈结构支撑来抵消离心力。承受最大离心加速度的线圈侧部 40 特别需要线圈支撑。为了支撑线圈的侧部，在线圈间跨接了拉杆（见图 4），其可夹持住线圈的相对侧部。拉杆也可在一对线圈间延伸，以在两个线圈之间提供支撑。拉杆穿过转子铁芯上的孔道 52，如开口，使得拉杆可横跨在同一线圈的侧部之间，或横跨在相邻线圈之间。

孔道 52 通常为转子上具有直的轴线的圆柱形通道。孔道的直径大于拉杆的直径，足以避免转子与拉杆接触，因此可避免转子和拉

杆之间的热传导。除了靠近转子的凹槽表面的端部外，孔道的直径基本保持恒定。在端部，孔道扩大为较大的直径，以容纳拉杆的圆柱套管（见图4）。

孔道 52 是穿过转子铁芯的开口，即孔，并为拉杆提供了通道。孔道一般具有圆形的直径和穿过转子的直的轴线。孔道的轴线通常位于与孔道相关的跑道形线圈所定义的平面上。另外，孔道的轴线正交于与穿过孔道的拉杆相连的线圈侧部。此外，转子孔道的直径比拉杆大很多，足以使拉杆不与转子接触。避免拉杆和转子间的接触可使从转子铁芯通过拉杆传导到冷却的超导线圈绕组的热量最小。

孔道 52 可以正交于线圈的侧部 40。对于那些横跨同一线圈的相对侧面的拉杆来说，对应的孔道与线圈处于同一平面。对于那些在两个线圈间延伸的拉杆来说，对应的孔道正交于两个线圈的平面，并穿过转子铁芯的隆起 50。孔道的数量和位置取决于高温超导线圈的位置和支撑线圈侧面所需的线圈罩（见图4）的数量。

如图4所示，各对线圈绕组 34 的端部 42 与转子铁芯的相对端部相邻。拼合夹板 54（图4）固定住线圈的端部。拼合夹板包括一对可夹住线圈端部的平板。拼合夹板由非磁性材料如铬镍铁合金 X718 制成。可以用相同或相似的非磁性材料来制作拉杆和支撑系统的其它部分。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，其不能用作承载结构。

线圈绕组各端的拼合夹板 54 包括一对相对的可夹住线圈端部 42 的夹板 56。夹板 56 的表面包括沟槽 58 以容纳线圈绕组的端部。拼合夹板可以由套环（未示出）支撑，或者是由将拼合夹板固定在转子铁芯上并使夹板能支撑高温超导线圈的端部的其它结构件来支撑。

在线圈端部 42 上设有与线圈相连的电的及冷却流体的连接器 39

(图 3 和图 4 仅示出电连接器)。与线圈相连的电连接器位于最接近具有集电器(未示出)的端部轴的端部,用于对转子上的旋转线圈供电。冷却流体接头位于各线圈绕组的相对的端部,以便低温冷却流体能流到线圈中,并将热量从在线圈和冷却系统间循环的冷却流中带走。

跑道形的高温超导线圈 34 的侧部 40 通过一系列穿过转子铁芯主体中的孔道 52 的拉杆 62 支撑。拉杆为非磁性的直杆,其在线圈的相对的侧部之间延伸,或者在两个线圈的侧部之间延伸。拉杆可以由高强度的非磁性合金如铬镍铁合金 X718 制成。在拉杆的各端均具有带有可夹持线圈绕组的通道罩 64 的连接器。通道罩和拉杆能调节施加在线圈绕组侧部的张力。

线圈绕组支撑并固定转子上的线圈绕组,并能克服由转子旋转及电机运转所产生的离心力和振动而支撑绕组。线圈绕组的支撑构件包括穿过转子并在杆端部夹住线圈绕组的拉杆。当拉杆基本径向地延伸到线圈绕组时,拉杆可相对于离心力非常好地支撑线圈。各拉杆是沿其长度方向上连续的轴,且位于跑道形线圈平面上。拉杆的纵向连续性为线圈提供了横向刚性,为转子提供了动力学上的优点。

而且,侧面刚度使线圈支撑构件与线圈形成一体,因此线圈与其支撑构件可以在转子总装前进行装配。转子和转子支撑构件的预装配可减少生产周期,提高线圈支撑的质量,并减小线圈装配偏差。跑道形线圈由横跨线圈长边的一组张紧件支撑。拉杆线圈支撑构件预装到线圈中。

高温超导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高温超导线圈。转子在运转中变热。由于线圈将处于超低温的状态,因此应避免热量传导到线圈中。拉杆穿过转子中的开口如孔道,但不与转子接触。这种不接触避免了从转子到拉

杆和线圈的热传导。

为了减少来自线圈的热量泄漏，线圈的支撑构件应最小，以减少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，支撑结构与冷却的超导绕组热绝缘。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超导线圈的冷却低温下。在冷支撑构件中，超导线圈的大部分机械载荷由处于或接近处于超导线圈的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超导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。

单个支撑件包括拉杆 62、通道罩 64 和连接罩与拉杆端部的销钉 66。各通道罩 64 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。通道罩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。

通道罩 64 整体地在高温超导线圈 34 的各侧部 40 的长度上延伸。通道罩可防止线圈侧部由于离心力的作用而产生过量的挠曲和弯曲。线圈支撑构件无法限制线圈在燃气轮机起动和停机操作中的热膨胀和收缩。特别地，热膨胀导致侧部的长度增加或减少，因此，侧部可相对于支持系统纵向地滑动。

离心力载荷从线圈结构到支撑杆的传递是通过与线圈外表面和侧面直线部分相配合的 U 形罩完成的，此 U 形罩通过销钉 66 与拉杆的大直径端部 68 连接在一起。此 U 形罩由在低温下具有韧性的轻的高强度材料制成。通道罩的典型材料为非磁性的铝、铬镍铁合金或钛合金。U 形罩的形状可进行优化以减轻重量。

穿过 U 形罩和拉杆的销钉 66 可以为中空的，以减轻重量。锁定

螺母或锁定销与销钉的端部螺纹连接，从而紧固 U 形罩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 68，此端部 68 的端面被机加工成两个平面 70，以便与 U 形罩和线圈宽度相配。当拉杆、线圈和罩连在一起时，拉杆的平端部 70 靠在高温超导线圈的内表面上。这种结构减小了容纳销钉的拉杆孔区域内的应力集中。

在相邻线圈间延伸的拉杆 72 也与 U 形通道罩 64 相连接。这些拉杆提供了一个在两个线圈间相互支撑的框架。拉杆 72 插入在各通道罩的侧部的母接头 76 中。可用锁定销 74 将拉杆 72 固定到通道罩的侧面。

当高温超导线圈绕组 34 安装在转子铁芯 22 上时，可以装配由拉杆 72、通道罩 64 和拼合夹板 54 组成的线圈支撑系统。实际上，线圈支撑系统主要是将高温超导线圈绕组连接到转子铁芯上的装置。拉杆和通道罩的框架提供了一个很好的隆起框架，以支撑线圈绕组和将线圈绕组相对于转子铁芯固定在适当位置。

线圈绕组 34 可通过围绕转子铁芯的导电圆柱来屏蔽定子感应磁通。另外，线圈绕组可以位于真空中，以将绕组与来自转子的热量相隔离。真空可由围绕转子铁芯的圆柱形真空容器形成。

图 5 为安装在转子 20 上的两个鞍形线圈 100 的示意图。各鞍形线圈与图 2 所示的跑道形绕组具有相似的结构，其中各线圈由缠绕的超导线圈 36 形成，并具有可将线圈保持在低温下的冷却通道 38。鞍形线圈具有安装在转子铁芯的纵向槽 102 上的长侧部 140。槽 102 沿转子铁芯 22 的长度方向延伸，其分别位于转子铁芯的相对侧面。鞍形线圈具有与转子铁芯的端部 56 相邻的端部 154。因此，各鞍形线圈穿过铁芯上的一对狭槽并围绕着铁芯端部而缠绕。护罩 90 覆盖住线圈并为线圈提供了真空，护罩是可导电的，以防止定子的磁场渗透到敏感的线圈中。

图 6 为双鞍形线圈 100 的线圈罩 144 的示意图。除了鞍形罩 144

装配在一对绕组上之外，线圈罩与跑道形线圈绕组的罩 44 相似。鞍形罩具有一对支脚 150，各支脚带有能容纳销钉 180 的开口 152。销钉将罩和穿过铁芯中的孔道的拉杆 142 相连。拉杆的端面 186 为平面，形成了面对转子铁芯的鞍形线圈侧部的支撑表面。

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，本发明覆盖了电机主体及具有与平表面相邻的侧部的线圈绕组。

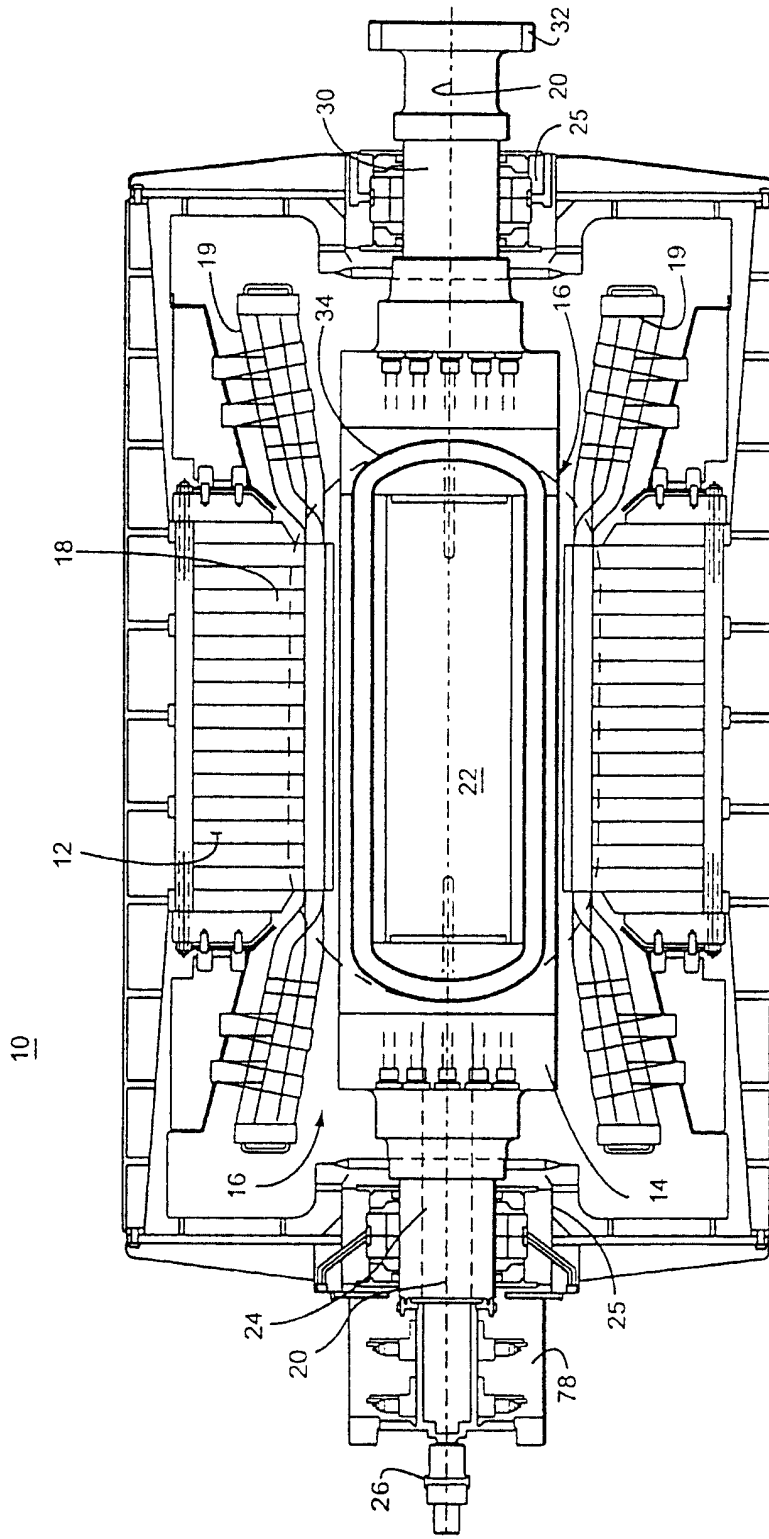


图 1

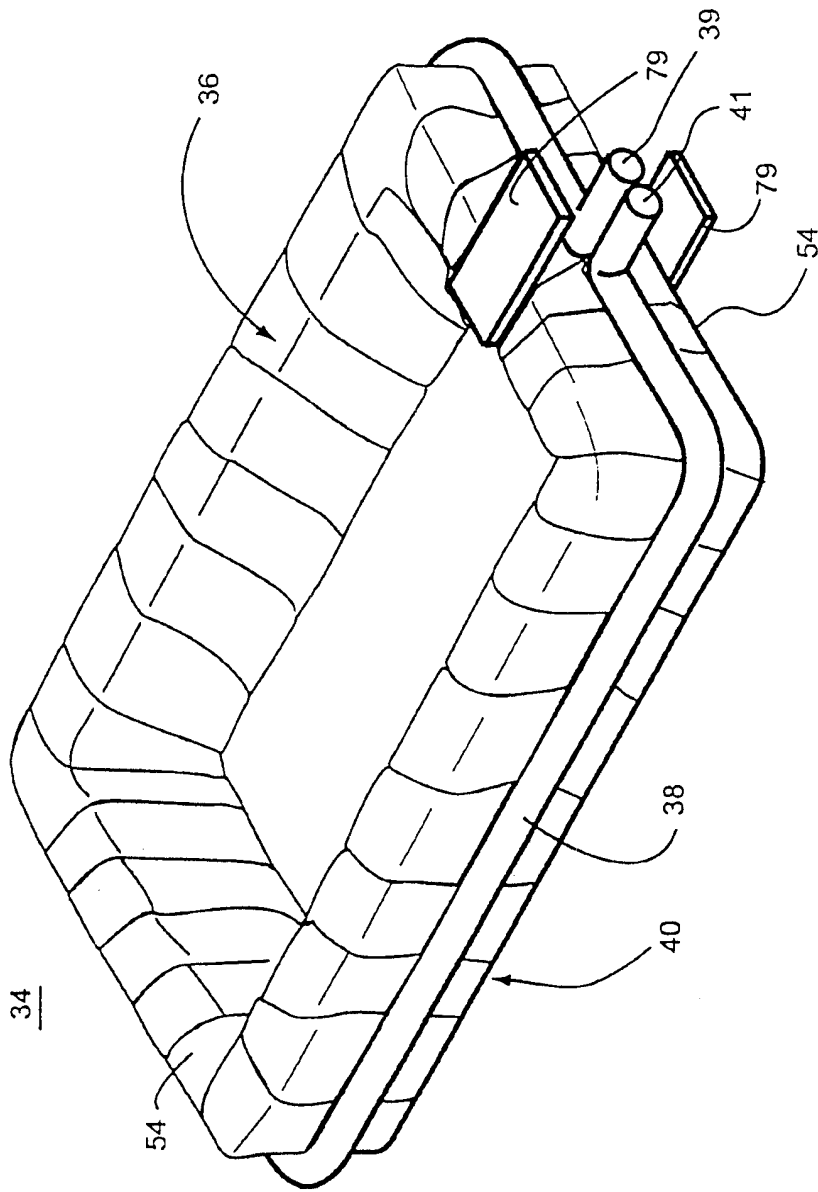


图 2

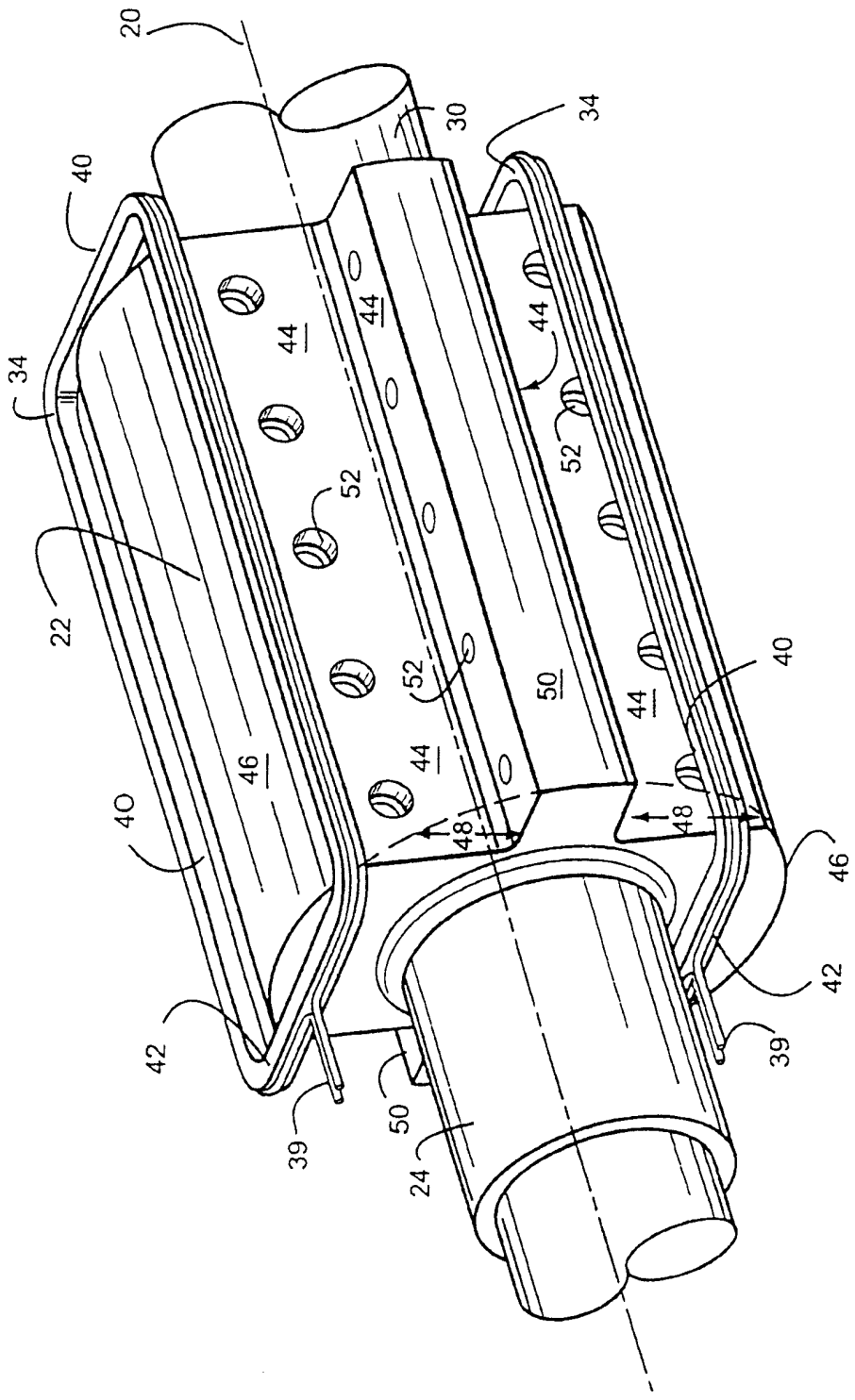


图 3

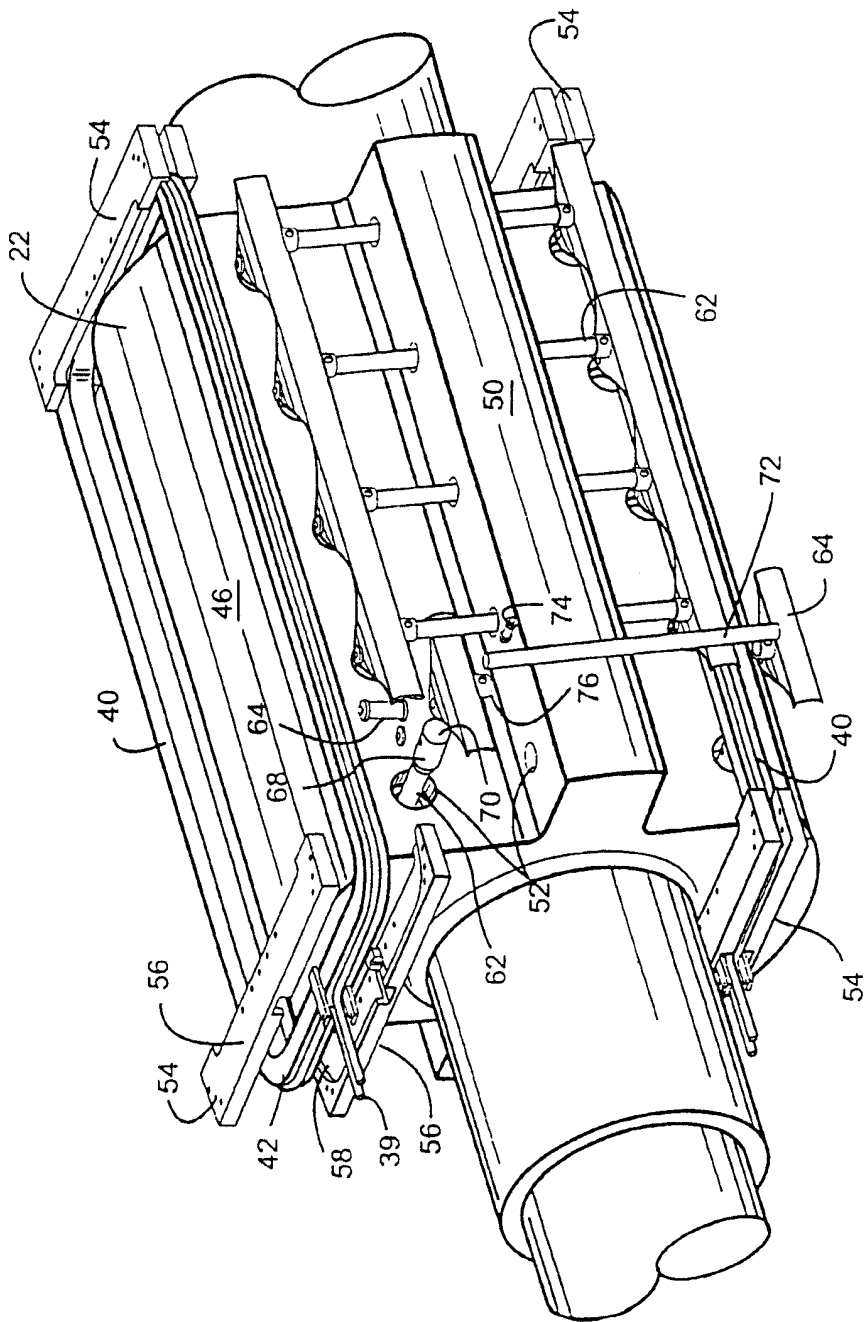


图 4

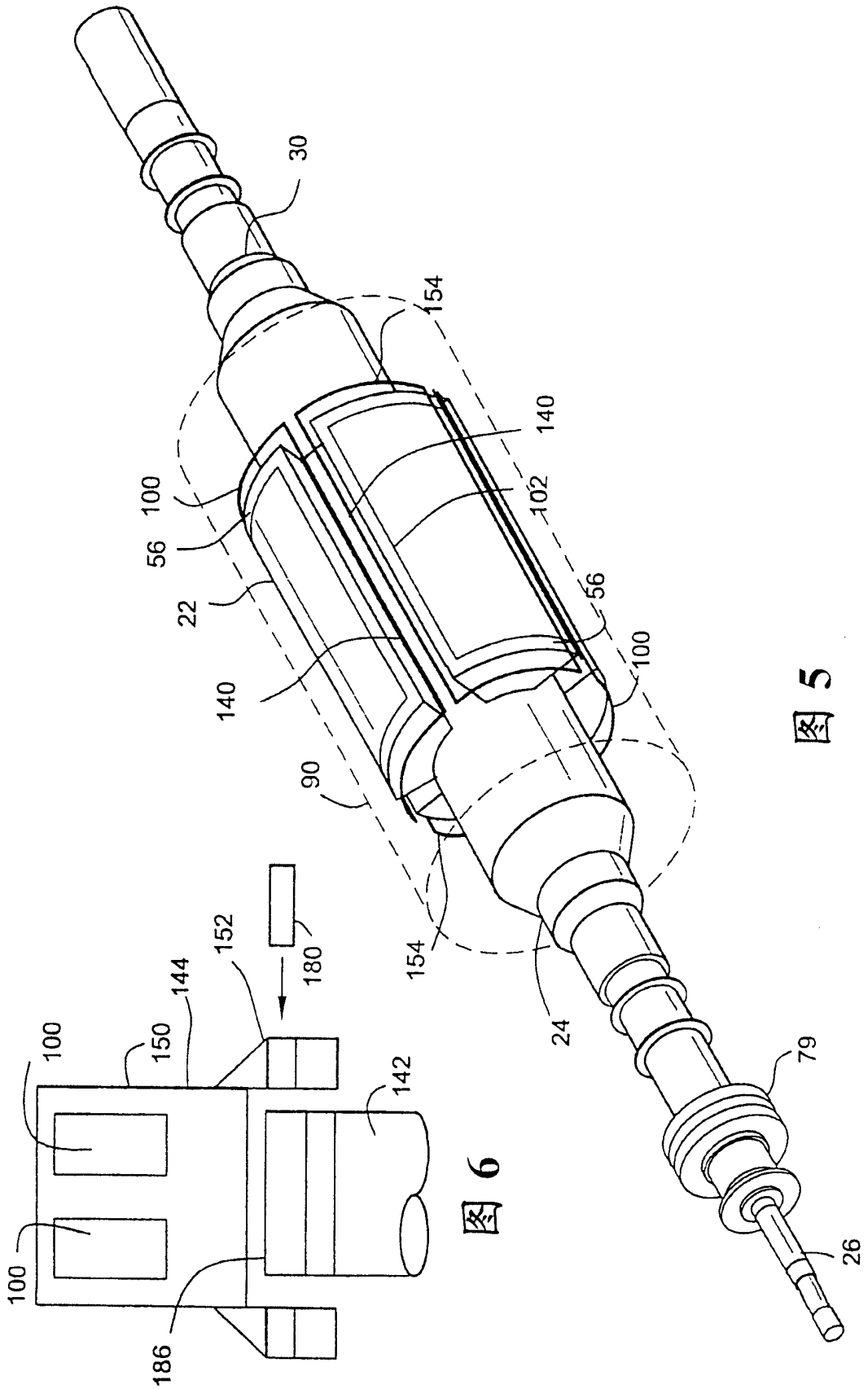


图 5

图 6