

一种转子系统及其控制方法和燃气轮机发电机组及其控制方法

相关申请的交叉引用

本申请主张在 2018 年 1 月 12 日在中国提交的中国专利申请号 No. 201810030888.1 的
5 优先权，其全部内容通过引用包含于此。

技术领域

本公开涉及转子技术领域，尤其涉及一种转子系统及其控制方法和燃气轮机发电机组
及其控制方法。

10

背景技术

燃气轮机主要包括压气机、燃烧室及透平三大部件。空气进入压气机后被压缩成高温
高压的空气，然后供给燃烧室与燃料混合燃烧，其产生的高温高压燃气在透平中膨胀做功。
转子高速转动时，转子会受到径向方向的力和轴向方向的力。为了限制转轴发生径向和轴
15 向上的移动，转子系统中需要安装径向轴承和推力轴承。传统的径向轴承和推力轴承均为
普通的接触式轴承，随着转子转速的提高，尤其是转子转速每分钟超过 40000 转时，普通
的接触式轴承由于存在较大的机械磨损，已不能满足工作转速的需求。

对于燃气轮机发电机组，通过燃气轮机转子的高速旋转带动发电机转子旋转进而发电。
现有技术中，通常采用联轴器将燃气轮机转子与发电机转子进行连接。联轴器的设置使得
20 推力轴承的设置位置受到限制，这是因为随着转子转速的提高，转子受到的轴向力也会进
一步提高，若将推力轴承设置于压气机和透平之间，会使得整个转子系统的重心偏向透平
侧，从而导致转子系统的稳定性差。如果将推力轴承设置于联轴器朝向发电机一侧，则转
子的轴向力全部作用到联轴器上，容易导致联轴器损坏。

可见，目前亟需提供一种新的转子系统，以解决现有燃气轮机发电机组存在的上述问
25 题。

发明内容

本公开提供一种转子系统及其控制方法和燃气轮机发电机组及其控制方法，以解决现
有燃气轮机发电机组存在的上述问题。

30 一方面，本公开提供一种转子系统，包括：转轴，所述转轴的轴体为一体结构，所述
转轴水平设置；依次设置于所述转轴上的电机、压气机和透平；以及，设置于所述转轴上
的推力轴承和至少两个径向轴承；其中，所述推力轴承设置于所述透平的靠近所述压气机
的一侧的预设位置上，所述预设位置为能够使所述转子系统的重心位于所述至少两个径向
轴承中相距最远的两个径向轴承之间的位置。

35 可选的，所述至少两个径向轴承包括第一径向轴承和第二径向轴承，所述第一径向轴
承设置于所述电机的远离所述压气机的一侧，所述第二径向轴承设置于所述压气机和所述
透平之间；其中，所述推力轴承设置于所述第一径向轴承与所述电机之间；或者，所述推
力轴承设置于所述第一径向轴承的远离所述电机的一侧；或者，所述推力轴承设置于所述
电机与所述压气机之间。

可选的，所述至少两个径向轴承还包括第三径向轴承，所述第三径向轴承设置于所述电机与所述压气机之间。

可选的，所述至少两个径向轴承还包括第四径向轴承，所述第四径向轴承设置于所述透平的远离所述压气机的一侧；其中，所述推力轴承设置于所述第一径向轴承与所述电机之间；或者，所述推力轴承设置于所述第一径向轴承的远离所述电机的一侧；或者，所述推力轴承设置于所述电机与所述压气机之间；或者，所述推力轴承设置于所述压气机与所述第二径向轴承之间。

可选的，所述第四径向轴承为气体动静压混合径向轴承。

可选的，所述透平上靠近所述第二径向轴承的一侧设置有隔热层。

10 可选的，所述电机为动压轴承电机，所述转轴的对应所述电机的轴承的部位设置有第一动压发生槽。

可选的，所述电机为启发一体式电机。

可选的，所述转子系统还包括锁紧装置，所述锁紧装置用于在所述转轴静态时锁紧所述转轴。

15 可选的，所述转轴的安裝轴承的部位涂覆有防磨涂层。

可选的，所述推力轴承为气磁混合推力轴承；所述至少两个径向轴承中的至少一个径向轴承为气磁混合径向轴承或者气体动静压混合径向轴承。

可选的，当所述第二径向轴承为气磁混合径向轴承时，所述第二径向轴承的磁性部件设置于所述第二径向轴承上的远离所述透平的区域。

20 可选的，所述气磁混合推力轴承为箔片式气磁混合推力轴承，所述箔片式气磁混合推力轴承包括：第一推力盘，所述第一推力盘固定连接于所述转轴上；以及，穿设于所述转轴上的第一定子和第二定子，所述第一定子和所述第二定子分别设置于所述第一推力盘的相对两侧；所述第一定子和所述第二定子中，每个定子包括第一磁轴承和第一箔片轴承，所述第一磁轴承上沿周向设置有多个第一磁性部件，所述第一箔片轴承设置有能够与所述多个第一磁性部件相互作用并在它们之间产生磁力的第二磁性部件；其中，所述第一箔片轴承设置于所述第一磁轴承与所述第一推力盘之间，并与所述第一推力盘之间具有第一间隙，且所述第一箔片轴承能够在所述第一磁性部件和所述第二磁性部件之间的磁力作用下在所述转轴的轴向方向上移动。

30 可选地，所述第一箔片轴承包括：与所述第一磁轴承座固定连接的第一箔片轴承座；以及设置于所述第一箔片轴承座上的第一箔片和第二箔片，所述第一箔片安装于所述第一箔片轴承座上，所述第二箔片叠设于所述第一箔片的靠近所述第一推力盘的一侧。

可选地，所述第二箔片为平箔片，所述第二磁性部件设置于第二箔片上，以使所述第二箔片能够在第一磁性部件和第二磁性部件的磁力作用下在转轴的轴向方向上移动；所述第一箔片为能够在所述第二箔片移动时发生弹性变形的弹性变形箔片。

35 可选的，所述气磁混合推力轴承为槽式气磁混合推力轴承，所述槽式气磁混合推力轴承包括：第二推力盘，所述第二推力盘固定连接于所述转轴上，所述第二推力盘上设置有第三磁性部件；以及，穿设于所述转轴上的第三定子和第四定子，所述第三定子和所述第四定子分别设置于所述第二推力盘的相对两侧；所述第三定子和所述第四定子中，每个定子包括第二磁轴承，所述第二磁轴承上沿周向设置有能够与所述第三磁性部件之间产生磁

力的多个第四磁性部件，所述第二磁轴承与所述第二推力盘之间具有第二间隙，且所述第二推力盘能够在所述第三磁性部件和所述多个第四磁性部件之间的磁力作用下在所述转轴的轴向方向上移动；其中，所述第二推力盘的面向所述第三定子和所述第四定子的端面，或，所述第三定子和所述第四定子的面向所述第二推力盘的端面上设置有第二动压发生槽。

- 5 可选的，所述第三定子和所述第四定子中，每个定子上还设置有第一静压进气节流孔，所述第一静压进气节流孔的一端与所述第二间隙相通，另一端连接外部气源，用于将外部气源输送至所述第二间隙内。

可选的，所述气磁混合径向轴承为箔片式气磁混合径向轴承，所述箔片式气磁混合径向轴承包括：套设于所述转轴上的第三磁轴承，所述第三磁轴承上沿周向设置有多第五
10 磁性部件；套设于所述转轴上，并位于所述第三磁轴承和所述转轴之间的第二箔片轴承，所述第二箔片轴承上设有能够与所述多个第五磁性部件之间产生磁力的第六磁性部件；其中，所述第二箔片轴承与所述转轴之间具有第三间隙，且所述第二箔片轴承能够在所述多个第五磁性部件和所述第六磁性部件的磁力作用下在所述转轴的径向方向上移动。

可选的，所述气磁混合径向轴承为槽式气磁混合径向轴承，所述槽式气磁混合径向轴
15 承包括：套设于所述转轴上的第四磁轴承，所述第四磁轴承上沿周向设置有多第七磁性部件；所述第四磁轴承朝向所述转轴的侧壁，或所述转轴朝向所述第四磁轴承的圆周面上设置有第三动压发生槽；其中，所述第四磁轴承与所述转轴之间具有第四间隙，且所述转轴能够在所述多个第七磁性部件的磁力作用下在所述转轴的径向方向上移动。

可选的，所述第四磁轴承上还设置有第二静压进气节流孔，所述第二静压进气节流孔
20 的一端与所述第四间隙相通，另一端连接外部气源，用于将外部气源输送至所述第四间隙内。

可选的，所述转子系统中，所述推力轴承和与所述推力轴承相邻的径向轴承集成一体，形成集成式轴承，所述集成式轴承包括：第三轴承壳，所述第三轴承壳为中空回转体，所述第三轴承壳设置有第一容纳腔和第二容纳腔；设置于所述第一容纳腔内的径向子轴承，
25 所述径向子轴承穿设于所述转轴上，所述径向子轴承与所述转轴之间具有第五间隙；以及，设置于所述第二容纳腔内的推力子轴承，所述推力子轴承包括第三推力盘，以及分别设置于所述推力盘两侧的第五定子和第六定子，所述推力盘固定连接于所述转轴上，所述第五定子和所述第六定子均穿设于所述转轴上；所述第五定子和所述第六定子中，每个定子与所述第三推力盘之间具有第六间隙。

30 可选的，所述径向子轴承包括套设于所述转轴上的第五磁轴承，所述第五磁轴承与所述转轴之间具有所述第五间隙，所述第五磁轴承上沿周向设置有多第八磁性部件；所述转轴能够在所述多个第八磁性部件的磁力作用下在所述转轴的径向方向上移动；所述第五定子和所述第六定子中，每个定子包括第六磁轴承，所述第六磁轴承上沿周向设置有多第九磁性部件；所述第三推力盘上设置有第十磁性部件，所述第三推力盘能够在所述多个
35 第九磁性部件和所述第十磁性部件之间的磁力作用下在所述转轴的轴向方向上移动。

可选的，所述第三轴承壳还设置有第三静压进气节流孔；其中，所述第三静压进气节流孔的一端连接外部气源，另一端经所述径向轴承与所述第五间隙相通，和/或，经所述第五定子和所述第六定子与所述第六间隙相通，用于将外部气源输送至所述第五间隙和/或第六间隙。

另一方面，本公开提供一种转子系统的控制方法，用于上述转子系统，所述方法包括：开启所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承，以使所述转轴移动至预设径向位置，使所述推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置；所述转轴的转速加速至工作转速之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；所述转子系统停机时，开启所述径向轴承中的静压轴承和所述推力轴承中的静压轴承；所述转轴的转速减速至零之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；其中，开启所述静压轴承包括：开启轴承中的磁轴承，和/或，向轴承中的静压进气节流孔输送气体；关闭所述静压轴承包括：关闭轴承中的磁轴承，和/或，停止向轴承中的静压进气节流孔输送气体。

另一方面，本公开提供另一种转子系统的控制方法，用于上述转子系统，所述方法包括：开启所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承，以使所述转轴移动至预设径向位置，使所述推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置；所述转轴的转速加速至第一预设值之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；所述转子系统加速至一阶临界速度或二阶临界速度时，开启所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；所述转子系统平稳度过所述一阶临界速度或所述二阶临界速度之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；所述转子系统减速至所述一阶临界速度或所述二阶临界速度时，开启所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；所述转子系统平稳度过所述一阶临界速度或所述二阶临界速度之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；所述转轴的转速减速至第二预设值时，开启所述径向轴承中的静压轴承和所述推力轴承中的静压轴承；所述转轴的转速减速至零之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；其中，开启所述静压轴承，包括：开启轴承中的磁轴承，和/或，向轴承中的静压进气节流孔输送气体；关闭所述静压轴承，包括：关闭轴承中的磁轴承，和/或，停止向轴承中的静压进气节流孔输送气体。

可选的，开启所述推力轴承中的静压轴承，以使所述推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置，包括：开启所述第一定子和所述第二定子中的第一磁轴承，控制所述第一推力盘在所述多个第一磁性部件的磁力作用下在所述转轴的轴向方向上移动，以使所述第一推力盘与所述第一定子中的第一箔片轴承之间的所述第一间隙等于所述第一推力盘与所述第二定子中的第一箔片轴承之间的所述第一间隙；所述方法还包括：当载荷负载在所述第一推力盘，所述第一推力盘在载荷负载的作用下在所述转轴的轴向方向上移动，所述第一推力盘与所述第一定子中的第一箔片轴承之间的所述第一间隙不等于所述第一推力盘与所述第二定子中的第一箔片轴承之间的所述第一间隙时，开启所述第一定子和所述第二定子中的第一磁轴承；当所述第一推力盘与所述第一定子中的第一箔片轴承之间的所述第一间隙等于所述第一推力盘与所述第二定子中的第一箔片轴承之间的所述第一间隙，关闭所述第一定子和所述第二定子中的第一磁轴承。

可选的，开启所述推力轴承中的静压轴承，以使所述推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置，包括：开启所述第三定子和所述第四定子中的第二磁轴承，控制所述第二推力盘在所述第三磁性部件与所述多个第四磁性部件之间的磁力作用下在所述转轴的轴向方向上移动，以使所述第二推力盘与所述第三定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙与所述第二推力盘与所述第四定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙的差值小于或等于预定值；所述方法还包括：当载荷负载在所述第二推力盘，所述第二推力盘在载荷负载的作用下在

所述转轴的轴向方向上移动，所述第二推力盘与所述第三定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙与所述第二推力盘与所述第四定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙的差值大于所述预定值时，开启所述第三定子或所述第四定子中的第二磁轴承；当所述第二推力盘与所述第三定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙与所述第二推力盘与所述第四定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙的差值小于或者等于所述预定值，关闭所述第三定子或所述第四定子中的第二磁轴承。

可选的，开启所述径向轴承中的静压轴承，以使所述转轴移动至预设径向位置，包括：开启所述第三磁轴承，控制所述转轴在所述多个第五磁性部件的磁力作用下在所述转轴的径向方向上移动，以使所述转轴移动至预设径向位置；所述方法还包括：当所述转轴与所述第二箔片轴承之间的第三间隙发生变化时，开启所述第三磁轴承，使间隙变小侧对应的第二箔片轴承在所述多个第五磁性部件与所述第六磁性部件之间的磁力作用下向靠近所述转轴的方向移动；所述转轴处于平衡径向位置之后，关闭所述第三磁轴承。

可选的，开启所述径向轴承中的静压轴承，以使所述转轴移动至预设径向位置，包括：开启所述第四磁轴承，控制所述转轴在所述多个第七磁性部件的磁力作用下在所述转轴的径向方向上移动，以使所述转轴移动至预设径向位置；所述方法还包括：当所述转轴与所述第四磁轴承之间的第四间隙发生变化时，开启所述第四磁轴承，使所述转轴在所述多个第七磁性部件的磁力作用下向远离间隙变小侧的方向移动；所述转轴处于平衡径向位置之后，关闭所述第四磁轴承。

可选的，开启所述径向轴承中的静压轴承，以使所述转轴移动至预设径向位置，包括：开启所述第四磁轴承；和/或，启动外部气源，通过所述第二静压进气节流孔向所述第四间隙处输送气体；控制所述转轴在所述多个第七磁性部件的磁力作用下，和/或所述气体的推动作用在所述转轴的径向方向上移动，以使所述转轴移动至预设径向位置。

另一方面，本公开提供一种燃气轮机发电机组，包括进气道、燃烧室和上述转子系统，所述进气道与所述压气机的进气口连通，所述压气机的出气口与所述燃烧室的进气口连通，所述燃烧室的出气口与所述透平的进气口连通。

可选地，所述进气道由电机的外壳和燃气轮机发电机组的外壳形成。

另一方面，本公开提供一种燃气轮机发电机组的控制方法，用于上述燃气轮机发电机组，所述方法包括：开启所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承，以使所述转轴移动至预设径向位置，使所述推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置；启动所述燃气轮机发电机组，空气经所述压气机压缩后进入所述燃烧室和所述燃烧室内的燃料混合燃烧；所述燃烧室排出的高温高压气体对所述透平的涡轮进行冲击，使所述涡轮旋转，所述涡轮通过所述转轴带动所述电机旋转发电；所述转轴的转速加速至工作转速之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；所述燃气轮机发电机组停机时，开启所述径向轴承中的静压轴承和所述推力轴承中的静压轴承；所述转轴的转速减速至零之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；其中，开启所述静压轴承包括：开启轴承中的磁轴承，和/或，向轴承中的静压进气节流孔输送气体；关闭所述静压轴承包括：关闭轴承中的磁轴承，和/或，停止向轴承中的静压进气节流孔输送气体。

本公开中，通过将转子系统中转轴的轴体设置为一体结构，解决了现有燃气轮机发电机组由于采用联轴器连接而导致推力轴承的安装位置受限的问题。本公开还通过对推力轴

承设置位置的调整，使整个转子系统的重心位于相距最远的两个径向轴承之间，从而区别于传统的悬臂式结构，使整个转子系统在高速旋转时能够保持结构稳定，满足燃气轮机高转速的要求。

5 附图说明

为了更清楚地说明本公开的实施例的技术方案，下面将对本公开的实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本公开的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动性的前提下，还可以根据这些附图获取其他的附图。

- 10 图 1 是实施例一提供的一种转子系统的结构示意图；
图 2 是实施例一提供的另一种转子系统的结构示意图；
图 3 是实施例一提供的另一种转子系统的结构示意图；
图 4 是与图 1 对应的在第二径向轴承上设置磁轴承的结构示意图；
图 5 是与图 2 对应的在第二径向轴承上设置磁轴承的结构示意图；
15 图 6 是与图 3 对应的在第二径向轴承上设置磁轴承的结构示意图；
图 7 是实施例二提供的一种转子系统的结构示意图；
图 8 是实施例二提供的另一种转子系统的结构示意图；
图 9 是实施例二提供的另一种转子系统的结构示意图；
图 10 是实施例二提供的另一种转子系统的结构示意图；
20 图 11 是与图 7 对应的在第二径向轴承上设置磁轴承的结构示意图；
图 12 是与图 8 对应的在第二径向轴承上设置磁轴承的结构示意图；
图 13 是与图 9 对应的在第二径向轴承上设置磁轴承的结构示意图；
图 14 是与图 10 对应的在第二径向轴承上设置磁轴承的结构示意图；
图 15 是实施例三提供的另一种转子系统的结构示意图；
25 图 16 是与图 15 对应的在第二径向轴承上设置磁轴承的结构示意图；
图 17 是实施例四提供的另一种转子系统的结构示意图；
图 18 是与图 17 对应的在第二径向轴承上设置磁轴承的结构示意图；
图 19 是实施例五提供的一种在转子系统中设置锁紧装置的结构示意图；
图 20 是实施例五提供的另一种在转子系统中设置锁紧装置的结构示意图；
30 图 21 是图 20 中 C-C 向的结构示意图；
图 22 是实施例六提供的在转轴上涂覆防磨涂层的结构示意图；
图 23 是实施例七提供的一种燃气轮机发电机组的结构示意图；
图 24 是实施例七提供的一种燃气轮机发电机组的控制方法的流程示意图；
图 25 是实施例七提供的另一种燃气轮机发电机组的控制方法的流程示意图；
35 图 26 是实施例八提供的一种转子系统的控制方法的流程示意图；
图 27 是实施例八提供的另一种转子系统的控制方法的流程示意图；
图 28 是实施例九提供的一种箔片式气磁混合推力轴承的剖视图；
图 29 是实施例九提供的箔片式气磁混合推力轴承中第一磁轴承的结构示意图；
图 30 是实施例九提供的箔片式气磁混合推力轴承中第一磁轴承座的结构示意图；

- 图 31 是实施例九提供的箔片式气磁混合推力轴承中第一箔片的结构示意图；
图 32 是实施例十提供的一种槽式气磁混合推力轴承的剖视图；
图 33 是实施例十提供的槽式气磁混合推力轴承中第二磁轴承的结构示意图；
图 34 是实施例十提供的槽式气磁混合推力轴承中第二磁轴承座的结构示意图；
5 图 35 是实施例十提供的槽式气磁混合推力轴承中在第二推力盘上设置第二动压发生槽的结构示意图之一；
图 36 是实施例十提供的槽式气磁混合推力轴承中在第二推力盘上设置第二动压发生槽的结构示意图之二；
图 37 是实施例十提供的槽式气磁混合推力轴承中在第一压环上设置第二动压发生槽
10 的结构示意图之一；
图 38 是实施例十提供的槽式气磁混合推力轴承中在第一压环上设置第二动压发生槽的结构示意图之二；
图 39 是实施例十一提供的一种槽式气磁混合径向轴承的半剖视图；
图 40 是实施例十一提供的另一种槽式气磁混合径向轴承的半剖视图；
15 图 41 是实施例十一提供的一种槽式气磁混合径向轴承的外部视图；
图 42 是实施例十一提供的槽式气磁混合径向轴承中第四磁轴承的结构示意图；
图 43 是实施例十一提供的槽式气磁混合径向轴承中第四磁轴承座的结构示意图；
图 44 是实施例十一提供的槽式气磁混合径向轴承中在第二轴承套上设置第三动压发生槽的结构示意图之一；
20 图 45 是实施例十一提供的槽式气磁混合径向轴承中在第二轴承套上设置第三动压发生槽的结构示意图之二；
图 46 是实施例十一提供的槽式气磁混合径向轴承中在转轴上设置第三动压发生槽的结构示意图；
图 47 至图 62 与图 1 至图 18 对应的使用集成式轴承的转子系统的结构示意图；
25 图 63 是实施例十二提供的一种集成式轴承的剖视图；
图 64 是图 63 中 A-A 向的剖视图；
图 65 是图 63 中 B-B 向的剖视图；
图 66 是实施例十二提供的集成式轴承中在第三轴承套上设置第五动压发生槽的结构示意图之一；
30 图 67 是实施例十二提供的集成式轴承中在第三轴承套上设置第五动压发生槽的结构示意图之二；
图 68 是实施例十二提供的集成式轴承中在转轴上设置第五动压发生槽的结构示意图；
图 69 是实施例十二提供的集成式轴承中在第三推力盘上设置第六动压发生槽的结构示意图之一；
35 图 70 是实施例十二提供的集成式轴承中在第三推力盘上设置第六动压发生槽的结构示意图之二。

具体实施方式

下面将结合本公开的实施例中的附图，对本公开的实施例中的技术方案进行清楚、完

整地描述，显然，所描述的实施例是本公开一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本公开中的实施例，本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获取的所有其他实施例，都属于本公开保护的范围。

本公开的实施例提供一种转子系统，包括：转轴，转轴的轴体为一体结构，转轴水平
5 设置；依次设置于转轴上的电机、压气机和透平；以及，设置于转轴上的推力轴承和至少两个径向轴承，推力轴承和至少两个径向轴承均为非接触式轴承；其中，推力轴承设置于透平的靠近压气机的一侧的预设位置上，预设位置为能够使转子系统的重心位于至少两个径向轴承中相距最远的两个径向轴承之间的位置。

本公开的实施例中，推力轴承为用于限制转轴在轴向方向上移动的轴承，径向轴承为
10 用于限制转轴在径向方向上移动的轴承。

随着转子转速的提高，普通的电磁轴承和空气轴承均已无法满足高转速转子的需要。因此，本公开的实施例中，为了适应转子高速转动的发展需求，推力轴承和径向轴承可以采用非接触式轴承。

本公开的实施例中，转轴的轴体为一体结构，可以理解为，转轴的轴体为一整根轴，
15 或者，转轴的轴体通过多个轴段刚性连接而成。由于转轴的轴体为一体结构，转轴上各处轴体的强度具有一致性，这使得推力轴承在转轴上的设置位置不受限制。

进一步的，为了使整个转子系统在高速旋转时也能保持结构稳定，整个转子系统的重心应位于上述至少两个径向轴承中相距最远的两个径向轴承之间。这样，整个转子系统形成纺锤体结构，区别于传统的悬臂式结构，本公开的实施例提高了整个转子系统的稳定性。
20 由于推力轴承在转轴的设置位置不受限制，因此，本公开的实施例中，可以根据上述至少两个径向轴承的径向轴承的设置数量、每个径向轴承的设置位置以及整个转子系统中各部件的质量（包括推力轴承自身的质量）等参数对推力轴承的设置位置进行灵活地调整，以使整个转子系统的重心位于相距最远的两个径向轴承之间之间，优选的，整个转子系统的重心位于压气机上。

本公开的实施例中，转轴水平设置，因此，可以理解地，本公开的实施例的转子系统为水平转子系统，其可以适用于需要使用水平转子系统的卧式机组，例如下文将要具体说明的卧式燃气轮机发电机组。

为使本公开的实施例的转子系统的整体技术方案更好地理解，下面结合各附图，对本公开的实施例提供的转子系统进行各实施例的具体说明。

30 实施例一

如图 1 至图 3 所示，转子系统包括：转轴 100，转轴 100 的轴体为一体结构，转轴 100 水平设置；依次设置于转轴 100 上的电机 200、压气机 300 和透平 400；以及，设置于转轴 100 上的推力轴承 500、第一径向轴承 600 和第二径向轴承 700，第一径向轴承 600 设置于电机 200 的远离压气机 300 的一侧，第二径向轴承 700 设置于压气机 300 和透平 400 之间。

35 推力轴承 500 设置于第一径向轴承 600 与电机 200 之间，如图 1 所示；或者，推力轴承 500 设置于第一径向轴承 600 的远离电机 200 的一侧，如图 2 所示；或者，推力轴承 500 设置于电机 200 与压气机 300 之间，如图 3 所示。

其中，当透平 400 的质量较大时，例如透平 400 的材质为金属材料，为了使整个转子系统的重心位于第一径向轴承 600 与第二径向轴承 700 之间，可以采用图 1 或图 2 所示的

实施方式。

而当透平 400 的质量较小时,例如透平 400 的材质为陶瓷材料或陶瓷纤维复合材料等,为了使整个转子系统的重心位于第一径向轴承 600 与第二径向轴承 700 之间,可以采用图 3 所示的实施方式。

5 需要说明的是,对于图 3 所示的实施方式,由于推力轴承 500 设置于电机 200 与压气机 300 之间,为了避免推力轴承 500 的推力盘挡住压气机 300 的进气口,图 3 所示的实施方式适用于推力盘直径较小的推力轴承 500。

目前,非接触式轴承一般包括电磁轴承和空气轴承。然而,电磁轴承在长期开启时存在能耗太大以及发热等问题;而空气轴承在表面线速度接近或者超过音速时,会产生激波,
10 从而导致轴承失稳,甚至产生撞轴等灾难性后果。

因此,考虑到燃气轮机或者燃气轮机发电机组高转速的发展需求,为了提高推力轴承和径向轴承的工作性能,本公开的实施例中,推力轴承 500 可以采用气磁混合推力轴承,第一径向轴承 600 可以采用气磁混合径向轴承或气体动静压混合径向轴承。

另外,第二径向轴承 700 由于靠近透平 400,考虑到磁轴承中的磁性部件无法耐受透
15 平 400 传来的高温,第二径向轴承 700 可以采用气体动静压混合径向轴承。

作为另一种实施方式,第二径向轴承 700 也可以采用气磁混合径向轴承,该方式下,第二径向轴承 700 的磁性部件设置于第二径向轴承 700 上的远离透平 400 的区域。也就是说,第二径向轴承 700 上的靠近透平 400 的区域不设置磁性部件。

为保护第二径向轴承 700 上的磁性部件,可以通过减少透平 400 辐射至第二径向轴承
20 700 上的热能的方式实现。具体的,透平 400 上靠近第二径向轴承 700 的一侧设置有隔热层(图中未示出)。这里,隔热层的材料可以是气凝胶或隔热性能良好的其它材料。

图 4 至图 6 分别示出了图 1 至图 3 中第二径向轴承 700 上的远离透平 400 的区域设置磁性部件的示意图。

本公开的实施例中,压气机 300 可以为离心压气机 300,透平 400 涡轮可以为离心式
25 涡轮;电机 200 可以为动压轴承电机,转轴 100 对应电机 200 的轴承的部位可以设置有第一动压发生槽 201。

进一步的,电机 200 还可以是启发一体式电机。

这样,在转子系统初始启动时刻,可以将电机 200 以启动模式开启,以使转子系统转动,当转子系统的转速提升至预设转速后,可以将电机 200 的工作模式切换到发电模式。

30 实施例二

如图 7 至图 10 所示,转子系统包括:转轴 100,转轴 100 的轴体为一体结构,转轴 100 水平设置;依次设置于转轴 100 上的电机 200、压气机 300 和透平 400;以及,设置于转轴 100 上的推力轴承 500、第一径向轴承 600、第二径向轴承 700 和第三径向轴承 800,第一
35 径向轴承 600 设置于电机 200 的远离压气机 300 的一侧,第二径向轴承 700 设置于压气机 300 和透平 400 之间,第三径向轴承 800 设置于电机 200 与压气机 300 之间。

推力轴承 500 设置于第一径向轴承 600 与电机 200 之间,如图 7 所示;或者,推力轴承 500 设置于第一径向轴承 600 的远离电机 200 的一侧,如图 8 所示;或者,推力轴承 500 设置于电机 200 与压气机 300 之间,如图 9 或图 10 所示。

由于增加了第三径向轴承 800,本公开的实施例中,推力轴承 500 设置于电机 200 与

压气机 300 之间时, 推力轴承 500 既可以设置于电机 200 与第三径向轴承 800 之间, 如图 9 所示; 推力轴承 500 又可以设置于第三径向轴承 800 与压气机 300 之间, 如图 10 所示。

相对于实施例一而言, 本公开的实施例在电机 200 与压气机 300 之间增加了第三径向轴承 800, 能够进一步提高整个转子系统的稳定性。

- 5 本公开的实施例中, 推力轴承 500 可以采用气磁混合推力轴承, 第一径向轴承 600 可以采用气磁混合径向轴承或气体动静压混合径向轴承; 第二径向轴承 700 由于靠近透平 400, 考虑到其中磁轴承所包含的磁性部件无法耐受透平 400 传来的高温, 第二径向轴承 700 可以采用气体动静压混合径向轴承。

- 10 作为另一种实施方式, 第二径向轴承 700 也可以采用气磁混合径向轴承, 该方式下, 第二径向轴承 700 的磁性部件设置于第二径向轴承 700 上的远离透平 400 的区域。也就是说, 第二径向轴承 700 上的靠近透平 400 的区域不设置磁性部件。

为保护第二径向轴承 700 上的磁性部件, 可以通过减少透平 400 辐射至第二径向轴承 700 上的热能的方式实现。具体的, 透平 400 上靠近第二径向轴承 700 的一侧设置有隔热层 (图中未示出)。这里, 隔热层可以是气凝胶或其它材料。

- 15 图 11 至图 14 分别示出了图 7 至图 10 中第二径向轴承 700 上的远离透平 400 的区域设置磁性部件的示意图。

其余均可参照实施例一中的相关说明, 并能达到相同的技术效果, 为避免重复, 本公开的实施例对此不作赘述。

实施例三

- 20 如图 15 所示, 转子系统包括: 转轴 100, 转轴 100 的轴体为一体结构, 转轴 100 水平设置; 依次设置于转轴 100 上的电机 200、压气机 300 和透平 400; 以及, 设置于转轴 100 上的推力轴承 500、第一径向轴承 600、第二径向轴承 700 和第四径向轴承 900, 第一径向轴承 600 设置于电机 200 的远离压气机 300 的一侧, 第二径向轴承 700 设置于压气机 300 和透平 400 之间, 第四径向轴承 900 设置于透平 400 的远离压气机 300 的一侧, 推力轴承 25 500 设置于压气机 300 与第二径向轴承 700 之间。

本公开的实施例可以适用于电机 200 质量过大的情况, 当电机 200 的质量过大时, 为保持转子系统的稳定性, 转子系统的两端均需要设置径向轴承 (即第一径向轴承 600 和第四径向轴承 900), 同时推力轴承 500 需要朝透平 400 的一侧移动。

- 30 考虑到透平 400 的温度较高, 当推力轴承 500 采用气磁混合推力轴承时, 由于磁轴承中的磁性部件无法耐受透平 400 传来的高温, 推力轴承 500 可以设置于压气机 300 与第二径向轴承 700 之间。相应的, 第二径向轴承 700 可以采用气体动静压混合径向轴承。

一般的, 透平 400 上靠近第四径向轴承 900 一侧的温度高于透平 400 上靠近第二径向轴承 700 一侧的温度, 因此, 第四径向轴承 900 优选采用气体动静压混合径向轴承。

- 35 作为另一种实施方式, 第二径向轴承 700 也可以采用气磁混合径向轴承, 该方式下, 第二径向轴承 700 的磁性部件设置于第二径向轴承 700 上的远离透平 400 的区域。也就是说, 第二径向轴承 700 上的靠近透平 400 的区域不设置磁性部件。

为保护第二径向轴承 700 上的磁性部件, 可以通过减少透平 400 辐射至第二径向轴承 700 上的热能的方式实现。具体的, 透平 400 上靠近第二径向轴承 700 的一侧设置有隔热层 (图中未示出)。这里, 隔热层可以是气凝胶或其它材料。

图 16 示出了图 15 中第二径向轴承 700 上的远离透平 400 的区域设置磁性部件的示意图。

需要说明的是，当电机 200 的质量并不太大时，推力轴承 500 可以设置于第一径向轴承 600 与电机 200 之间；或者，推力轴承 500 可以设置于第一径向轴承 600 的远离电机 200 的一侧；或者，推力轴承 500 可以设置于电机 200 与压气机 300 之间。由于容易理解，对此不作具体描述。

其余均可参照实施例一中的相关说明，并能达到相同的技术效果，为避免重复，本公开的实施例对此不作赘述。

实施例四

如图 17 所示，转子系统包括：转轴 100，转轴 100 的轴体为一体结构，转轴 100 水平设置；依次设置于转轴 100 上的电机 200、压气机 300 和透平 400；以及，设置于转轴 100 上的推力轴承 500、第一径向轴承 600、第二径向轴承 700、第三径向轴承 800 和第四径向轴承 900，第一径向轴承 600 设置于电机 200 的远离压气机 300 的一侧，第二径向轴承 700 设置于压气机 300 和透平 400 之间，第三径向轴承 800 设置于电机 200 与压气机 300 之间，第四径向轴承 900 设置于透平 400 的远离压气机 300 的一侧，推力轴承 500 设置于压气机 300 与第二径向轴承 700 之间。

本公开的实施例中，为进一步提高整个转子系统的稳定性，在实施例三的基础上，在电机 200 与压气机 300 之间增加第三径向轴承 800。

本公开的实施例中，推力轴承 500 可以采用气磁混合推力轴承，第二径向轴承 700 和第四径向轴承 900 均可以采用气体动静压混合径向轴承。

作为另一种实施方式，第二径向轴承 700 也可以采用气磁混合径向轴承，该方式下，第二径向轴承 700 的磁性部件设置于第二径向轴承 700 上的远离透平 400 的区域。也就是说，第二径向轴承 700 上的靠近透平 400 的区域不设置磁性部件。

为保护第二径向轴承 700 上的磁性部件，可以通过减少透平 400 辐射至第二径向轴承 700 上的热能的方式实现。具体的，透平 400 上靠近第二径向轴承 700 的一侧设置有隔热层（图中未示出）。这里，隔热层可以是气凝胶或其它材料。

图 18 示出了图 17 中第二径向轴承 700 上的远离透平 400 的区域设置磁性部件的示意图。

其余均可参照实施例三中的相关说明，并能达到相同的技术效果，为避免重复，本公开的实施例对此不作赘述。

实施例五

当本申请的转子系统用于移动设备上时，例如增程式电动汽车，在转子系统不工作的情况下，转轴与轴承直接接触。汽车在行驶过程中，由于颠簸或者振动引起转轴相对于轴承径向或者轴向的移动，使得转轴和轴承之间产生磨损，进而影响轴承的精度和寿命。

因此，为了解决上述问题，在本公开其它实施例的基础上，本公开的实施例的转子系统设置锁紧装置，该锁紧装置用于在转子系统不工作时，锁紧转轴。

本公开的实施例中，锁紧装置的结构形式及设置方式并不唯一，为便于理解，下面结合附图对两种实施方式进行具体描述。

一种实施方式下，如图 19 所示，锁紧装置 110 包括伸缩顶紧单元 111、连接杆 112 和

固定部件 113，连接杆 112 的一端连接固定部件 113，另一端连接伸缩顶紧单元 111，伸缩顶紧单元 111 正对转轴 100 的远离透平 400 的一端的端面，固定部件 113 的另一端固定连接到安装本申请的转子系统的壳体。

在转子系统停机时，锁紧装置 110 的伸缩顶紧单元 111 动作，并沿转轴 100 的轴向推动转轴 100，使得推力轴承 500 的定子与推力盘接触，从而将转轴 100 轴向固定，同时利用推力轴承 500 的定子与推力盘之间的摩擦力将转轴 100 径向固定。

进一步地，伸缩顶紧单元 111 设置有顶尖部（图中未示出），转轴 100 的远离透平 400 的一端的端面设置有顶尖孔（图中未示出）。在锁紧状态下，顶尖部顶入转轴 100 的顶尖孔，从而能够更好地将转轴 100 固定，防止在车辆的行驶过程中，造成对转轴 100 和轴承的磨损和损坏。

另一种实施方式下，如图 20 至图 21 所示，锁紧装置 120 也可以设置为卡套结构的锁紧装置。具体的，锁紧装置 120 包括伸缩单元 121 和卡套 122，卡套 122 连接到伸缩单元 121 的伸缩端。卡套 122 可以为半圆卡套，其半径等于或者稍微大于转轴 100 的半径，卡套 122 的轴线与转轴 100 的轴线平行设置，伸缩单元 121 安装到转轴 100 的大致轴向中间位置，并固定连接至安装本申请的转子系统的壳体。

在转子系统停机时，伸缩单元 121 伸出，使卡套 122 卡住转轴 100，并将转轴 100 推动到与径向轴承接触，从而将转轴 100 径向固定，同时利用径向轴承与转轴 100 的摩擦力将转轴 100 轴向固定。

进一步地，伸缩单元 121 可以选择活塞式气缸或者液压缸等可实现伸缩控制的部件。

在该实施方式下，锁紧装置 120 在转轴 100 上的设置位置可以不作限定，优选地，锁紧装置 120 设置于转子系统中的最远的两个径向轴承之间。

需要说明的是，图 19 与图 20 中的锁紧装置均基于图 1 示出的转子系统设置，对于在本公开其它实施例的转子系统中设置锁紧装置，在此不作一一描述。

本公开的实施例中，通过设置锁紧装置，在转子系统不工作时，锁紧装置能够锁紧转轴。这样，能够防止转轴相对于轴承径向或者轴向的移动，从而能够提高轴承的精度和寿命。

实施例六

当本申请的转子系统用于移动设备上时，例如增程式电动汽车，在转子系统不工作的情况下，转轴与轴承直接接触。汽车在行驶过程中，由于颠簸或者振动引起转轴相对于轴承径向或者轴向的移动，使得转轴和轴承之间产生磨损，进而影响轴承的精度和寿命。

因此，为了解决上述问题，在本公开其它实施例的基础上，本公开的实施例的转子系统，在转轴 100 的安装轴承的部位涂有防磨涂层 101，如图 22 所示。

在转轴 100 的安装轴承的部位涂有防磨涂层 101，可以有效防止转轴 100 和轴承的磨损。该防磨涂层 101 优先选用化学稳定性、耐腐蚀性、高润滑不粘性和良好的抗老化耐力的材料，例如聚四氟乙烯等。

上述实施例一至实施例六中的任一种转子系统均可以适用于卧式燃气轮机发电机组，尤其适用于卧式微燃气轮机发电机组，下面以转子系统应用于卧式燃气轮机发电机组为例进行具体地说明。

实施例七

如图 23 所示, 本公开的实施例提供一种燃气轮机发电机组, 包括外壳 310、进气道 320 和燃烧室 330 以及上述实施例一至实施例六中的任一种转子系统, 转子系统包括转轴 100、电机 200、压气机 300、透平 400 及设置于转轴 100 上的推力轴承和径向轴承(图中未示出)。其中, 进气道 320 与压气机 300 的进气口连通, 压气机 300 的出气口与燃烧室 330 的进气口连通, 燃烧室 330 的出气口与透平 400 的进气口连通。

其中, 压气机 300 可以为离心压气机 300, 透平 400 涡轮可以为离心式涡轮; 电机 200 的轴承可以为流体动压轴承, 转轴 100 对应电机 200 的轴承的部位可以设置有第一动压发生槽 201; 燃烧室 330 可以为环形燃烧室。

可选的, 进气道 320 由电机 200 的外壳和燃气轮机发电机组的外壳 310 形成。这样, 当空气由进气道 320 进入压气机 300 时, 空气流经电机 200 的外壳, 能够对电机 200 起到冷却作用。

可选的, 电机 200 为启发一体式电机。

下面就燃气轮机发电机组的工作过程进行具体说明。

如前所示, 转子系统中的推力轴承可以采用气磁混合推力轴承, 径向轴承可以采用气磁混合推力轴承或气体动静压混合径向轴承。为了便于描述, 我们将不需要转轴 100 转动就能起到润滑作用的轴承定义为静压轴承, 转轴 100 转动到一定速度时才能工作的轴承定义为动压轴承。依此逻辑, 气磁混合推力轴承中的磁轴承和气体静压轴承, 以及气体动静压混合径向轴承中的气体静压轴承均可以称为静压轴承; 而气磁混合推力轴承中的气体动压轴承, 以及气体动静压混合径向轴承中的气体动压轴承均可以称为动压轴承。

如图 24 所示, 本公开的实施例提供一种燃气轮机发电机组的控制方法, 包括:

S11、开启径向轴承和推力轴承中的静压轴承, 以使转轴移动至预设径向位置, 使推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置。

其中, 开启静压轴承包括: 开启轴承中的磁轴承, 和/或, 向轴承中的静压进气节流孔输送气体。

S12、启动燃气轮机发电机组, 空气经压气机压缩后进入燃烧室和燃烧室内的燃料混合燃烧; 燃烧室排出的高温高压气体对透平的涡轮进行冲击, 使涡轮旋转, 涡轮通过转轴带动电机旋转发电。

以下以电机为启发一体式电机为例, 对燃气轮机发电机组的启动过程进行具体描述。

燃气轮机控制器 (Electronic Control Unit, 简称 ECU) 接收到启动信号后, 对电机功率控制器 (Data Processing Center, 简称 DPC) 发送电机驱动模式指令; DPC 切换到电机驱动模式, DPC 将燃气轮机内置电池的直流电进行变频, 驱动电机工作, 电机带动燃气轮机提升转速。

待燃气轮机的转速提升至点火转速后, 打开燃料阀, 进入点火程序。空气由进气道进入压气机进行压缩后进入回热器并被来自涡轮排出的高温气体预热, 预热后的压缩空气进入燃烧室与燃料混合并燃烧, 燃烧室充分燃烧后的高温高压气体进入透平对涡轮进行冲击, 使透平涡轮旋转, 涡轮排气进入回热器对进入燃烧室前的冷压缩空气预加热后由尾气管排出, 由于透平与压气机和电机通过转轴连接, 透平涡轮旋转带动压气机一起旋转至自持速度。

燃气轮机到达自持转速后, DPC 挂起, 电机空转继续增加油门, 涡轮继续提升功率,

使转速提升至工作转速。ECU 对 DPC 发送发电机模式指令； DPC 切换到发电机模式，并将电机输出的交流电通过整流变压后输出用户所需电压电流。

其中，压气机为离心式压气机，该离心式压气机包括动叶和沿周向布置的静叶，静叶为扩压器。这样，空气由进气道进入压气机进行压缩的具体过程可以为：空气进入离心式
5 压气机的动叶被压缩后，进入沿周向布置的扩压器（即静叶）继续被压缩。

其中，透平涡轮为离心式涡轮，该离心式涡轮设置有动叶。燃烧室出口沿周向布置有静叶，该静叶为喷嘴。这样，燃烧室充分燃烧后的高温高压气体进入透平做功，使透平涡轮旋转的具体过程可以为：燃烧室充分燃烧后的高温高压气体通过在燃烧室出口沿周向布置的喷嘴（即静叶）进行膨胀加速后，对涡轮的动叶进行冲击，使涡轮旋转。

10 S13、转轴的转速加速至工作转速之后，关闭径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

其中，关闭静压轴承包括：关闭轴承中的磁轴承，和/或，停止向轴承中的静压进气节流孔输送气体。

S14、燃气轮机发电机组停机时，开启径向轴承中的静压轴承和推力轴承中的静压轴承。

S15、转轴的转速减速至零之后，关闭径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

15 在上述过程中，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承中的静压轴承一直开启至转轴的转速达到工作转速。

燃气轮机发电机组停机时，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承中的静压轴承一直开启至转轴的转速为零。

如图 25 所示，本公开的实施例提供另一种燃气轮机发电机组的控制方法，包括：

20 S21、开启径向轴承和推力轴承中的静压轴承，以使转轴移动至预设径向位置，使推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置。

其中，开启静压轴承包括：开启轴承中的磁轴承，和/或，向轴承中的静压进气节流孔输送气体。

25 S22、启动燃气轮机发电机组，空气经压气机压缩后进入燃烧室和燃烧室内的燃料混合燃烧；燃烧室排出的高温高压气体对透平的涡轮进行冲击，使涡轮旋转，涡轮通过转轴带动电机旋转发电。

S23、转轴的转速加速至第一预设值之后，关闭径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

其中，第一预设值可以是额定转速的 5%至 30%。

30 其中，关闭静压轴承，包括：关闭轴承中的磁轴承，和/或，停止向轴承中的静压进气节流孔输送气体。

S24、转子系统加速至一阶临界速度或二阶临界速度时，开启径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

S25、转子系统平稳度过一阶临界速度或二阶临界速度之后，关闭径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

35 S26、燃气轮机发电机组停机过程中，当转子系统减速至一阶临界速度或二阶临界速度时，开启径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

S27、转子系统平稳度过一阶临界速度或二阶临界速度之后，关闭径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

S28、转轴的转速减速至第二预设值时，开启径向轴承中的静压轴承和推力轴承中的静

压轴承。

其中，第二预设值可以等于第一预设值，也可以不等于第一预设值，第二预设值可以是额定转速的 5%至 30%。

S29、转轴的转速减速至零之后，关闭径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

- 5 在上述过程中，燃气轮机发电机组启动之前，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承的静压轴承开启。这样，转轴在径向轴承的静压轴承的作用下，被托起至预设径向位置；推力盘在推力轴承的静压轴承的作用下，被推动至预设轴向位置。

- 燃气轮机发电机组启动之后，转轴的转速逐渐增大，当转轴的转速达到第一预设值时，例如额定转速的 5%至 30%时，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承中的静压轴承停止工作。当转轴的转速达到一阶临界速度或二阶临界速度时，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承的静压轴承重新开启。在转轴的转速平稳度过一阶临界速度或二阶临界速度之后，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承中的静压轴承再次停止工作。

- 燃气轮机发电机组停机过程中，转轴的转速逐渐下降，当转轴的转速达到二阶临界速度或一阶临界速度时，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承的静压轴承再次开启。在转轴的转速平稳度过二阶临界速度或一阶临界速度之后，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承中的静压轴承再次停止工作。当转轴的转速下降至预定值时，例如额定转速的 5%至 30%时，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承的静压轴承再次开启直至转速降为零之后，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承中的静压轴承再次停止工作。

下面基于上述燃气轮机发电机组的控制方法，对转子系统的控制方法进行具体说明。

实施例八

如图 26 所示，本公开的实施例提供一种转子系统的控制方法，包括：

- S101、开启径向轴承和推力轴承中的静压轴承，以使转轴移动至预设径向位置，使推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置。

其中，开启静压轴承包括：开启轴承中的磁轴承，和/或，向轴承中的静压进气节流孔输送气体。

S102、转轴的转速加速至工作转速之后，关闭径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

- 其中，关闭静压轴承包括：关闭轴承中的磁轴承，和/或，停止向轴承中的静压进气节流孔输送气体。

S103、转子系统停机时，开启径向轴承中的静压轴承和推力轴承中的静压轴承。

S104、转轴的转速减速至零之后，关闭径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

- 在上述过程中，转子系统启动之前，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承的静压轴承开启。这样，转轴在径向轴承的静压轴承的作用下，被托起至预设径向位置；推力盘在推力轴承的静压轴承的作用下，被推动至预设轴向位置。径向轴承和推力轴承中的静压轴承一直开启至转轴的转速达到工作转速。

转子系统停机时，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承中的静压轴承一直开启至转轴的转速为零。

如图 27 所示，本公开的实施例提供另一种转子系统的控制方法，包括：

S201、开启径向轴承和推力轴承中的静压轴承，以使转轴移动至预设径向位置，使推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置。

其中，开启静压轴承，包括：开启轴承中的磁轴承，和/或，向轴承中的静压进气节流孔输送气体。

5 S202、转轴的转速加速至第一预设值之后，关闭径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

其中，第一预设值可以是额定转速的 5%至 30%。

其中，关闭静压轴承，包括：关闭轴承中的磁轴承，和/或，停止向轴承中的静压进气节流孔输送气体。

10 S203、转子系统加速至一阶临界速度或二阶临界速度时，开启径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

S204、转子系统平稳度过一阶临界速度或二阶临界速度之后，关闭径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

S205、转子系统减速至一阶临界速度或二阶临界速度时，开启径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

15 S206、转子系统平稳度过一阶临界速度或二阶临界速度之后，关闭径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

S207、转轴的转速减速至第二预设值时，开启径向轴承中的静压轴承和推力轴承中的静压轴承。

20 其中，第二预设值可以等于第一预设值，也可以不等于第一预设值，第二预设值可以是额定转速的 5%至 30%。

S208、转轴的转速减速至零之后，关闭径向轴承和推力轴承中的静压轴承。

在上述过程中，转子系统启动之前，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承的静压轴承开启。这样，转轴在径向轴承的静压轴承的作用下，被托起至预设径向位置；推力盘在推力轴承的静压轴承的作用下，被推动至预设轴向位置。

25 转子系统启动之后，转轴的转速逐渐增大，当转轴的转速达到第一预设值时，例如额定转速的 5%至 30%时，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承中的静压轴承停止工作。当转轴的转速达到一阶临界速度或二阶临界速度时，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承的静压轴承重新开启。在转轴的转速平稳度过一阶临界速度或二阶临界速度之后，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承中的静压轴承再次停止工作。

30 转子系统停机过程中，转轴的转速逐渐下降，当转轴的转速达到二阶临界速度或一阶临界速度时，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承的静压轴承再次开启。在转轴的转速平稳度过二阶临界速度或一阶临界速度之后，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承中的静压轴承再次停止工作。当转轴的转速下降至预定值时，例如额定转速的 5%至 30%时，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承的静压轴承再次开启直至
35 转速降为零之后，控制转子系统中的轴承，使径向轴承和推力轴承中的静压轴承再次停止工作。

结合上述内容，我们清楚地了解了本公开的实施例中提供的转子系统的整体结构，使用上述转子系统的燃气轮机发电机组的整体结构，燃气轮机发电机组的控制方法以及转子系统的控制方法。

需要说明的是，转子系统中的推力轴承和径向轴承可以采用多种结构形式。对于气磁混合推力轴承而言，可以包括箔片式气磁混合推力轴承或槽式气磁混合推力轴承；对于气磁混合径向轴承而言，可以包括箔片式气磁混合径向轴承或槽式气磁混合径向轴承。

下面结合附图分别对转子系统中的推力轴承和径向轴承的各种具体结构形式，以及各
5 推力轴承和各径向轴承在整个转子系统控制中的具体控制过程进行详细地说明。

实施例九

图 28 至图 31 为本公开的实施例提供的箔片式气磁混合推力轴承的结构示意图。

如图 28 至图 31 所示，箔片式气磁混合推力轴承 5100 包括：第一推力盘 5101，第一
10 推力盘 5101 固定连接于转轴 100 上；以及，穿设于转轴 100 上的第一定子 5102 和第二定
子 5103，第一定子 5102 和第二定子 5103 分别设置于第一推力盘 5101 的相对两侧；第一
定子 5102 和第二定子 5103 中，每个定子包括第一磁轴承 5104 和第一箔片轴承 5105，第
一磁轴承 5104 上沿周向设置有多个第一磁性部件，第一箔片轴承 5105 设置有能够与多个
第一磁性部件之间产生磁力的第二磁性部件；其中，第一箔片轴承 5105 设置于第一磁轴承
5104 与第一推力盘 5101 之间，并与第一推力盘 5101 之间具有第一间隙 5106，且第一箔片
15 轴承 5105 能够在第一磁性部件和第二磁性部件之间的磁力作用下在转轴 100 的轴向方向上
移动。

本公开的实施例中，通过在推力轴承 5100 中设置第一间隙 5106 和第一磁轴承 5104，
从而使该推力轴承 5100 形成气、磁混合推力轴承。

工作时，推力轴承 5100 中的气体轴承与第一磁轴承 5104 能够协同工作，在推力轴承
20 5100 处于稳定的工作状态时，依靠气体轴承实现支承；而在推力轴承 5100 处于非稳定的
工作状态时，依靠第一磁轴承 5104 及时对推力轴承 5100 进行控制和响应。

可见，本公开的实施例能够改善推力轴承，尤其在高速运转状态下的动态性能和稳定性，
抗受扰动能力强，进而提高了推力轴承的承载能力。本公开的实施例的推力轴承能够
满足高转速的转子系统，例如，燃气轮机或者燃气轮机发电联合机组等的需求。

25 本公开的实施例中，第一推力盘 5101、第一定子 5102 和第二定子 5103 的外径可以相
等，且第一定子 5102 和第二定子 5103 的结构可以完全相同。

当本公开的实施例的转子系统应用于燃气轮机或者燃气轮机发电联合机组时，第一定
子 5102 和第二定子 5103 可以通过连接件与燃气轮机的壳体连接。

30 可选的，多个第一磁性部件包括多个第一永磁体，多个第一永磁体在第一磁轴承 5104
上沿周向设置；或者，多个第一磁性部件包括多个第一电磁铁，多个第一电磁铁在第一磁
轴承 5104 上沿周向设置，多个第一电磁铁中的每个第一电磁铁包括设置于第一磁轴承 5104
上的第一磁芯 51041 及缠绕于第一磁芯上的第一线圈 51042。

本公开的实施例中，当箔片式气磁混合推力轴承 5100 仅需要磁性部件提供磁力而无需
磁控时，第一磁性部件优选第一永磁体；当箔片式气磁混合推力轴承 5100 同时需要磁力和
35 磁控时，第一磁性部件优选第一电磁铁。

当第一磁性部件为第一电磁铁时，往第一线圈 51042 通入电流，即可以使第一磁芯
51041 产生磁力。往第一线圈 51042 通入电流的大小不同，第一磁芯 51041 产生的磁力大
小也不同；往第一线圈 51042 通入电流的方向不同，第一磁芯 51041 的磁极也不同。

其中，由于硅钢片或矽钢片具有磁导率高、涡流损耗低等物理特性，本公开的优选实

施例中，第一磁芯 51041 由若干硅钢片或者矽钢片叠压而成。

可选的，第一磁轴承 5104 包括：第一磁轴承座 51043，第一磁轴承座 51043 与第一推力盘 5101 相对设置，第一磁轴承座 51043 上沿周向设置有多个第一容纳槽 51044，多个第一磁性部件设置于多个第一容纳槽 51044 内，且多个第一磁性部件的磁极朝向第一箔片轴承 5105 所在的一侧；第一端盖 51045，第一端盖 51045 设置于第一磁轴承座 51043 的远离第一箔片轴承 5105 的一侧，并与第一箔片轴承 5105 配合，将第一磁性部件固定于第一磁轴承座 51043 上。其中，由于硅钢片或矽钢片具有磁导率高、涡流损耗低等物理特性，本公开的优选实施例中，第一磁轴承座 51043 由若干硅钢片或者矽钢片叠压而成。第一容纳槽 51044 的数量可以为但不限于为六个或八个，沿第一磁轴承座 51043 的周向均匀设置。这样，能够使第一磁轴承座 51043 与第一箔片轴承 5105 之间的磁力更加均匀、稳定。需要说明的是，多个第一磁性部件还可以采用其他方式设置于第一磁轴承座 51043 上，对此不

进行限定。第一端盖 51045 的材料可以是非磁性材料，优选硬铝材料。

可选的，第一箔片轴承 5105 包括：与第一磁轴承座 51043 固定连接的第一箔片轴承座 51051；以及，设置于第一箔片轴承座 51051 上的第一箔片 51052 和第二箔片 51053，第一箔片 51052 安装于第一箔片轴承座 51051 上，第二箔片 51053 叠设于第一箔片 51052 的靠近第一推力盘 5101 的一侧；其中，第二箔片 51053 为平箔片，第二磁性部件设置于第二箔片 51053 上，以使第二箔片 51053 能够在第一磁性部件和第二磁性部件的磁力作用下在转轴 100 的轴向方向上移动；第一箔片 51052 为能够在第二箔片 51053 移动时发生弹性变形的弹性变形箔片。

其中，第一箔片轴承座 51051 的材料为非磁性材料，优选硬铝材料。第一箔片 51052 为弹性变形箔片，考虑到导磁材料的材质较硬且脆，不宜作为弹性变形箔片，因此，第一箔片 51052 优选不导磁的不锈钢带。

本公开的实施例中，通过将第二箔片 51053 设置为平箔片，便于控制第二箔片 51053 与第一推力盘 5101 之间的距离，或者说，便于控制第一间隙 5106 的大小。第一箔片 51052 采用能够弹性变形的箔片，一方面起到连接第二箔片 51053 和第一箔片轴承座 51051 的作用，另一方面可以实现第二箔片 51053 相对于第一箔片轴承座 51051 可沿转轴 100 的轴向移动的目的。

可选的，第一箔片 51052 为呈波浪状的弹性变形箔片，且第一箔片 51052 为不封闭的环形，其上设有一开口，开口的一端为固定端，固定端固定于第一箔片轴承座 51051 上，开口的另一端为活动端；

其中，第二箔片 51053 在转轴 100 的轴向方向上移动时，第一箔片 51052 上的波浪纹伸展或收缩，活动端沿环形的周向移动。

本公开的实施例中，通过将第一箔片 51052 设置为呈波浪状的弹性变形箔片，便于利用波浪纹的伸展或收缩特性，推动第二箔片 51053 在转轴 100 的轴向方向上移动。

需要说明的是，本公开的实施例中的第一箔片 51052 的形状并不局限于波浪状，其它能够产生弹性变形的形状均可以适用于本公开的实施例的第一箔片 51052。

可选的，第二磁性部件包括设置于第二箔片 51053 的靠近第一磁轴承 5104 的一侧表面上的第一磁性材料；

其中，第一磁性材料在第二箔片 51053 上呈条状分布，而形成多个条状磁性部，多个

条状磁性部呈辐射状或环状；

或者，第一磁性部件在第二箔片 51053 上呈点状分布。

其中，第二箔片 51053 的材料优选非导磁材料，在第二箔片 51053 的表面遮喷第一磁性材料后，可以用陶瓷涂层覆盖第一磁性材料。第二箔片 51053 可以通过使用 40% 的氧化锆、30% 的 α 氧化铝和 30% 的铝酸镁尖晶石的陶瓷纳米微粉烧结制成。

若第二箔片 51053 的表面完全覆盖第一磁性材料，则会大幅增加第一磁性材料与第一磁性部件之间产生的磁力，这样容易导致第二箔片 51053 发生变形。鉴于此，本公开的实施例中，通过在第二箔片 51053 的表面遮喷第一磁性材料，使第一磁性材料在第二箔片 51053 上呈条状分布或点状分布，可以将第一磁性材料与第一磁性部件之间产生的磁力控制在合理的范围，从而避免第二箔片 51053 因过大的磁力而发生变形。

可选的，箔片式气磁混合推力轴承 5100 还包括第一传感器 5107，第一传感器 5107 的传感器探头设置于第一间隙 5106 内。

本公开的实施例中，通过设置第一传感器 5107，能够实时检测第一间隙 5106 处的参数，例如第一间隙 5106 处的气膜压力等。这样，第一磁轴承 5104 可以根据第一传感器 5107 的检测结果对推力轴承 5100 进行主动控制，并能够使控制达到较高的精度。

可选的，第一传感器 5107 包括第一传感器盖 51071 和第一传感器探头 51072，第一传感器探头 51072 的第一端连接第一传感器盖 51071，第一传感器盖 51071 固定于第一磁轴承 5104 上，第一磁轴承 5104 和第一箔片轴承 5105 上设有用于供第一传感器探头 51072 穿过的通孔；第一传感器探头 51072 的第二端穿过第一磁轴承 5104 和第一箔片轴承 5105 上的通孔，并伸至第一间隙 5106，且第一传感器探头 51072 的第二端端部与第一箔片轴承 5105 的靠近第一推力盘 5101 的一侧平齐。

本公开的实施例中，通过上述第一传感器 5107 的结构形式和安装方式，能够使第一传感器 5107 更稳定地设置于第一磁轴承 5104 上。将第一传感器探头 51072 的第二端端部与第一箔片轴承 5105 的靠近第一推力盘 5101 的一侧平齐，一方面，能够避免第一传感器探头 51072 受到第一推力盘 5101 的碰触，从而有利于保护第一传感器探头 51072；另一方面，不会对第一间隙 5106 内的气膜产生影响，避免第一间隙 5106 内的气膜发生扰动。

可选的，第一传感器 5107 设置于相邻的两个第一磁性部件之间。

本公开的实施例中，每个定子上均应当设置至少一个第一传感器 5107，优选设置一个第一传感器 5107，该第一传感器 5107 优选设置在相邻两个第一磁性部件之间。

可选的，第一传感器 5107 为以下任意一种或多种的组合：

用于检测第一推力盘 5101 位置的位移传感器；

用于检测第一间隙 5106 处的气膜压力的压力传感器；

用于检测第一推力盘 5101 转速的速度传感器；

用于检测第一推力盘 5101 旋转加速度的加速度传感器。

下面以本公开的实施例的箔片式气磁混合推力轴承（其中，第一磁轴承中的第一磁性部件为电磁铁）参与转子系统的控制过程时的具体控制方法进行详细地说明。

本公开的实施例提供一种箔片式气磁混合推力轴承的控制方法，包括：

S511、开启第一定子和第二定子中的第一磁轴承，控制第一推力盘在多个第一磁性部件的磁力作用下在转轴的轴向方向上移动，以使第一推力盘与第一定子中的第一箔片轴承

之间的第一间隙等于第一推力盘与第二定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙。

S512、转轴的转速加速至工作转速之后，关闭第一定子和第二定子中的第一磁轴承。

S513、转子系统停机时，开启第一定子和第二定子中的第一磁轴承。

S514、转轴的转速减速至零之后，关闭第一定子和第二定子中的第一磁轴承。

- 5 在上述过程中，第一磁轴承开启后，第一推力盘在第一磁轴承的作用下到达第一定子和第二定子之间的预定位置，第一推力盘与第一定子和第二定子的端面均具有第一间隙。

随着转轴的转动，第一推力盘在受第一间隙中气流润滑的情况下相对第一定子和第二定子开始转动，以防止磨损。第一磁轴承开启的具体过程为：向第一线圈输入预定值的电流信号，第一推力盘在第一磁轴承的作用下到达第一定子和第二定子之间的预定位置。

- 10 随着转轴的转速越来越大，第一推力盘的转速也同步增大，当转轴的转速到达工作转速时，该推力轴承的气体动压轴承（第一推力盘与第一定子和第二定子之间设置第一间隙即形成该推力轴承的气体动压轴承）产生的气膜压力可以将第一推力盘稳定，届时可以关闭第一磁轴承。

- 15 在转子系统停机时，第一推力盘随着转轴减速而减速，为了使转轴在整个转子系统停机过程中保持稳定，在转子系统停机时即开启第一磁轴承，直到第一推力盘完全停下后即可关闭第一磁轴承。

本公开的实施例还提供另一种箔片式气磁混合推力轴承的控制方法，包括：

- 20 S521、开启第一定子和第二定子中的第一磁轴承，控制第一推力盘在多个第一磁性部件的磁力作用下在转轴的轴向方向上移动，以使第一推力盘与第一定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙等于第一推力盘与第二定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙。

S522、转轴的转速加速至第一预设值之后，关闭第一定子和第二定子中的第一磁轴承。

S523、转轴的转速减速至第二预设值时，开启第一定子和第二定子中的第一磁轴承。

S524、转轴的转速减速至零之后，关闭第一定子和第二定子中的第一磁轴承。

- 25 在上述过程中，第一磁轴承开启后，第一推力盘在第一磁轴承的作用下到达第一定子和第二定子之间的预定位置，第一推力盘与第一定子和第二定子的端面均具有第一间隙。

随着转轴的转动，第一推力盘在受第一间隙中气流润滑的情况下相对第一定子和第二定子开始转动，以防止磨损。第一磁轴承开启的具体过程为：向第一线圈输入预定值的电流信号，第一推力盘在第一磁轴承的作用下到达第一定子和第二定子之间的预定位置。

- 30 随着转轴的转速越来越大，第一推力盘的转速也同步增大，当转轴的转速到达第一预设值，例如额定转速的 5%至 30%时，该推力轴承的气体动压轴承（第一推力盘与第一定子和第二定子之间设置第一间隙即形成该箔片式气磁混合推力轴承的气体动压轴承）产生的气膜压力可以将第一推力盘稳定，届时可以关闭第一磁轴承。

- 35 在转子系统停机过程中，第一推力盘随着转轴减速而减速，当转轴的转速低于第二预设值，例如额定转速的 5%至 30%时，此时，推力轴承的气体动压轴承产生的气膜压力也随第一推力盘减速而减小，因此，需要开启第一磁轴承以使第一推力盘保持稳定，直到第一推力盘完全停下后即可关闭第一磁轴承。

可选的，上述方法还包括：当载荷负载在第一推力盘，第一推力盘在载荷负载的作用下在转轴的轴向方向上移动，第一推力盘与第一定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙不等于第一推力盘与第二定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙时，开启第一定子和第二定

子中的第一磁轴承；当第一推力盘与第一定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙等于第一推力盘与第二定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙，关闭第一定子和第二定子中的第一磁轴承。

当载荷负载在第一推力盘上，使第一推力盘与第一定子或第二定子的第一箔片轴承之间的第一间隙变小而接近该侧的第一箔片轴承时，第一传感器（这里的第一传感器优选压力传感器）获得气压增大的信号，此时第一磁轴承需要介入工作。第一磁轴承并不完全直接将磁力作用于第一推力盘上，使其向另一侧的第一箔片轴承移动，而是使用磁力将另一侧的第一箔片轴承朝远离第一推力盘的方向移动，使第一推力盘与另一侧的第一箔片轴承之间的第一间隙提高，从而提高第一间隙变小侧的压力，适应第一推力盘上负载的重量，自动重新分配两个第一间隙上的气流压力。当第一推力盘达到新的平衡位置时，第一磁轴承停止工作。

具体的，若第一推力盘与第一定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙小于第一推力盘与第二定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙，则控制第二定子中的第一箔片轴承在多个第一磁性部件与第二磁性部件之间的磁力作用下，朝远离第一推力盘的方向在转轴的轴向方向上移动。

若第一推力盘与第二定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙小于第一推力盘与第一定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙，则控制第一定子中的第一箔片轴承在多个第一磁性部件与第二磁性部件之间的磁力作用下，朝远离第一推力盘的方向在转轴的轴向方向上移动。

可选的，当载荷负载在第一推力盘，第一推力盘在载荷负载的作用下在转轴的轴向方向上移动，第一推力盘与第一定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙不等于第一推力盘与第二定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙时，开启第一定子和第二定子中的第一磁轴承，包括：

当载荷负载在第一推力盘，第一推力盘在载荷负载的作用下在转轴的轴向方向上移动，第一推力盘与第一定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙不等于第一推力盘与第二定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙时，控制第一定子和第二定子中的第一磁轴承以最大功率开启；或者，

当载荷负载在第一推力盘，第一推力盘在载荷负载的作用下在转轴的轴向方向上移动，第一推力盘与第一定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙不等于第一推力盘与第二定子中的第一箔片轴承之间的第一间隙时，控制第一定子和第二定子中的第一磁轴承按照预设频率以频闪的方式开启。

当有外部冲击扰动发生时，第一推力盘可能快速地接近某侧第一箔片轴承，则有可能导致该侧的第一间隙瞬间过小，使该侧第一间隙处的局部气体流速接近甚至达到音速，从而引发激波产生气锤自激现象。激波的产生会导致局部气体流动发生扰动和混乱，当流体速度在音速到亚音速之间变化时其压力呈阶梯式显著下降。这种情况下，需要该侧第一箔片轴承主动“避让”第一推力盘，从而使该侧的第一间隙增大以使气流速度尽可能维持在亚音速区间，以维护其正常的流体压力。具体的，需要同时控制第一定子和第二定子上的第一磁轴承，使第一磁轴承的磁极以相同的极性励磁，即第一间隙减小的一侧产生吸力，用于回吸该侧第一箔片轴承，第一间隙增大的一侧产生吸力，用于拉回第一推力盘。这样，

利用两侧磁力作用距离的差产生磁力差，以此拉动第一推力盘使第一推力盘与两侧第一箔片轴承之间的第一间隙恢复正常，从而使第一推力盘重新回到平衡状态。

在上述过程中，利用第一磁轴承方便实时控制的优点，主动平衡第一推力盘的不平衡质量或第一推力盘涡动等导致第一推力盘过度偏移的因素，使第一推力盘在转轴的轴向方向上固定在某一极小范围内。另外，在第一推力盘的加速过程中，可以准确定位产生激波的位置（即线速度超声速部位），并通过控制第一磁轴承的电流大小和方向等，使第一磁轴承产生相反的力来平衡激波作用。待激波平稳后，再次调整第一磁轴承的控制策略，以最节能的方式将第一推力盘固定在某一极小范围内。

综合上述，本公开的实施例具有如下有益效果：

10 其一，电磁轴承与气体轴承协同工作，改善了轴承在高速运转状态下的动态性能和稳定性，抗受扰动力强，进而提高了轴承的承载能力。同时，电磁轴承与气体轴承采用并联结构，简化了结构，集成度高，易加工、制造和操作，提高了轴承的综合性能。在转子系统启动或停机时，可以用电磁轴承使轴承的推力盘与定子轴承间隙内转动，提高了轴承的低速性能，延长了轴承的使用寿命，能够提高轴承及整个系统的安全性和可靠性。

15 其二，相对于传统的采用气体静压轴承和气体动压轴承结合的气体动静压混合推力轴承，本公开的实施例的箔片式气磁混合推力轴承具有响应速度快的优点。

其三，通过在箔片上设置磁性材料，通过电磁轴承的磁极的吸引能够使箔片适度变形，提高轴承中润滑气膜一侧的最高压力和防止润滑气流泄漏，提高推力盘抗受扰动偏心撞壁的能力，从而也提高了轴承的承载能力。

20 其四，采用成本较低的压力传感器采集气膜压力变化，通过简单的控制方法控制箔片的变形，可提供较高转子阻尼，从而提高转子稳定性。另外，由于控制方法简单，对轴承的加工精度要求不高。

实施例十

图 32 至图 38 为本公开的实施例提供的槽式气磁混合推力轴承的结构示意图。

25 如图 32 至图 38 所示，槽式气磁混合推力轴承 5200 包括：第二推力盘 5201，第二推力盘 5201 固定连接于转轴 100 上，第二推力盘 5201 上设置有第三磁性部件；以及，穿设于转轴 100 上的第三定子 5202 和第四定子 5203，第三定子 5202 和第四定子 5203 分别设置于第二推力盘 5201 的相对两侧；第三定子 5202 和第四定子 5203 中，每个定子包括第二磁轴承 5204，第二磁轴承 5204 上沿周向设置有能够与第三磁性部件之间产生磁力的多个第四磁性部件，第二磁轴承 5204 与第二推力盘 5201 之间具有第二间隙 5206，且第二推力盘 5201 能够在第三磁性部件和多个第四磁性部件之间的磁力作用下在转轴 100 的轴向方向上移动；其中，第二推力盘 5201 的面向第三定子 5202 和第四定子 5203 的端面，或，第三定子 5202 和第四定子 5203 的面向第二推力盘 5201 的端面上设置有第二动压发生槽 5205。

35 本公开的实施例中，通过在推力轴承 5200 中设置第二间隙 5206 和第二磁轴承 5204，从而使该推力轴承 5200 形成气、磁混合推力轴承。

工作时，推力轴承 5200 中的气体轴承与第二磁轴承 5204 能够协同工作，在推力轴承 5200 处于稳定的工作状态时，依靠气体轴承实现支承；而在推力轴承 5200 处于非稳定的工作状态时，依靠第二磁轴承 5204 及时对推力轴承 5200 进行控制和响应。

可见，本公开的实施例能够改善推力轴承，尤其在高速运转状态下的动态性能和稳定

性，抗受扰动能力强，进而提高了推力轴承的承载能力。本公开的实施例的推力轴承能够满足高转速的转子系统，例如，燃气轮机或者燃气轮机发电联合机组等的需求。

本公开的实施例中，第二推力盘 5201、第三定子 5202 和第四定子 5203 的外径可以相等，且第三定子 5202 和第四定子 5203 的结构可以完全相同。

- 5 当本公开的实施例的转子系统应用于燃气轮机时，第三定子 5202 和第四定子 5203 可以通过连接件与燃气轮机的壳体连接。

本公开的实施例中，当第二推力盘 5201 旋转时，存在于第二间隙 5206 的流动气体被压入第二动压发生槽 5205 内，从而产生压力，以实现第二推力盘 5201 沿轴向方向被非接触地保持。其中，第二动压发生槽 5205 产生压力的大小随第二动压发生槽 5205 的角度、槽宽、槽长、槽深、槽数以及平面度的不同而变化。此外，第二动压发生槽 5205 产生压力的大小也和第二推力盘 5201 的旋转速度以及第二间隙 5206 有关。可以根据实际工况对第二动压发生槽 5205 的参数进行设计。第二动压发生槽 5205 可以通过锻造、滚轧、刻蚀或冲压等方式形成于第三定子 5202 和第四定子 5203 上，或者，第二动压发生槽 5205 可以通过锻造、滚轧、刻蚀或冲压等方式形成于第二推力盘 5201 上。

- 15 可选的，多个第四磁性部件包括多个第二永磁体，多个第二永磁体在第二磁轴承 5204 上沿周向设置；或者，多个第四磁性部件包括多个第二电磁铁，多个第二电磁铁在第二磁轴承 5204 上沿周向设置，多个第二电磁铁中的每个第二电磁铁包括设置于第二磁轴承 5204 上的第二磁芯 52041 及缠绕于第二磁芯 52041 上的第二线圈 52042。

本公开的实施例中，当槽式气磁混合推力轴承 5200 仅需要磁性部件提供磁力而无需磁控时，第四磁性部件优选第二永磁体；当槽式气磁混合推力轴承 5200 同时需要磁力和磁控时，第四磁性部件优选第二电磁铁。

当第四磁性部件为第二电磁铁时，往第二线圈 52042 通入电流，即可以使第二磁芯 52041 产生磁力。往第二线圈 52042 通入电流的大小不同，第二磁芯 52041 产生的磁力大小也不同；往第二线圈 52042 通入电流的方向不同，第二磁芯 52041 的磁极也不同。

- 25 其中，由于硅钢片或矽钢片具有磁导率高、涡流损耗低等物理特性，本公开的优选实施例中，第二磁芯 52041 可以由若干硅钢片或者矽钢片叠压而成。

可选的，第二磁轴承 5204 包括：第二磁轴承座 52043，第二磁轴承座 52043 与第二推力盘 5201 相对设置，第二磁轴承座 52043 上沿周向设置有多个第二容纳槽 52044，多个第四磁性部件设置于多个第二容纳槽 52044 内，且多个第四磁性部件的磁极朝向第二推力盘 5201 所在的一侧；第二端盖 52045 和第一压环 52046，第二端盖 52045 设置于第二磁轴承座 52043 的远离第二推力盘 5201 的一侧，第一压环 52046 设置于第二磁轴承座 52043 的靠近第二推力盘 5201 的一侧，第二端盖 52045 与第一压环 52046 配合，将多个第四磁性部件固定于第二磁轴承座 52043 上。

- 35 其中，由于硅钢片或矽钢片具有磁导率高、涡流损耗低等物理特性，本公开的优选实施例中，第二磁轴承座 52043 可以由若干硅钢片或者矽钢片叠压而成。第二容纳槽 52044 的数量可以为但不限于为六个或八个，沿第二磁轴承座 52043 的周向均匀设置。这样，能够使第二磁轴承 5204 与第二推力盘 5201 之间的磁力更加均匀、稳定。需要说明的是，多个第四磁性部件还可以采用其他方式设置于第二磁轴承座 52043 上，对此不进行限定。第二端盖 52045 的材料可以为非磁性材料，优选硬铝材料。第一压环 52046 的材料可以为非

磁性材料，优选硬铝材料。

本公开的实施例中，可以在第一压环 52046 上设置第二动压发生槽 5205，为便于第二动压发生槽 5205 的加工，第一压环 52046 可以由不锈钢材料制成。

可选的，第三磁性部件包括设置于第二推力盘 5201 的面向第三定子 5202 和第四定子 5203 的端面上的第二磁性材料（图中未示出）；其中，第二磁性材料在第二推力盘 5201 上呈条状分布，而形成多个条状磁性部，多个条状磁性部呈辐射状或环状；或者，第二磁性部件在第二推力盘 5201 上呈点状分布。

本公开的实施例中，使第二磁性材料在第二推力盘 5201 上呈条状分布或点状分布，可以将第二磁性材料与第四磁性部件之间产生的磁力控制在合理的范围。

可选的，第二动压发生槽 5205 呈辐射状或同心圆状排布，这样，有利于使气膜更均匀地分布于第二间隙 5206 内。

可选的，第二动压发生槽 5205 包括第一螺旋槽 52051 和第二螺旋槽 52052，第一螺旋槽 52051 环绕于第二螺旋槽 52052 外，第一螺旋槽 52051 和第二螺旋槽 52052 的螺旋走向相反，第一螺旋槽 52051 的靠近第二螺旋槽 52052 的一端与第二螺旋槽 52052 的靠近第一螺旋槽 52051 的一端连接或断开。

其中，第一螺旋槽 52051 的靠近第二螺旋槽 52052 的一端至转轴 100 的轴心的距离等于第一螺旋槽 52051 的靠近第二螺旋槽 52052 的一端至第三定子 5202 或第四定子 5203 或第二推力盘 5201 的外周边缘的距离。或者，第二螺旋槽 52052 的靠近第一螺旋槽 52051 的一端至转轴 100 的轴心的距离等于第二螺旋槽 52052 的靠近第一螺旋槽 52051 的一端至第三定子 5202 或第四定子 5203 或第二推力盘 5201 的外周边缘的距离。

本公开的实施例中，通过采用上述第二动压发生槽 5205 的设置方式，能够在转轴 100 正向旋转或者反向旋转的情况下，第二推力盘 5201 都能以期望的方式非接触式地保持，从而使转轴 100 具有负载能力高及稳定性好的优点。

可选的，第三定子 5202 和第四定子 5203 中，每个定子上还设置有第一静压进气节流孔 5208，第一静压进气节流孔 5208 的一端与第二间隙 5206 相通，另一端连接外部气源，用于将外部气源输送至第二间隙 5206 内。

本公开的实施例中，通过设置上述第一静压进气节流孔 5208，可以形成气体静压轴承，从而该推力轴承 5200 可以构成气体动静压-磁混合推力轴承。其中，第一静压进气节流孔 5208 的流通直径可以根据气量需求等实际工况进行调节。

可选的，第三定子 5202 和第四定子 5203 中，每个定子上设置有多个第一静压进气节流孔 5208，且多个第一静压进气节流孔 5208 沿定子的周向间隔设置。

本公开的实施例中，多个第一静压进气节流孔 5208 沿定子的周向间隔设置，优选沿定子的周向均匀间隔设置。这样，有利于使第二间隙 5206 内的气膜压力更加均匀。

可选的，第三定子 5202 和第四定子 5203 中，第一静压进气节流孔 5208 至转轴 100 的轴心的距离大于或者等于第一静压进气节流孔 5208 至定子的外周边缘的距离。

本公开的实施例中，上述第一静压进气节流孔 5208 的设置方式可以使气体静压轴承更加稳定，如果静压进气节流孔过于靠近转轴 100 的轴心，则无法及时有效地使气膜布满整个第二推力盘 5201 的端面，使第二推力盘 5201 的旋转不够稳定。优选的，第一静压进气节流孔 5208 至转轴 100 的轴心的距离等于第一静压进气节流孔 5208 至定子的外周边缘的

距离。

可选的，槽式气磁混合推力轴承 5200 还包括第二传感器 5207，第二传感器 5207 的传感器探头设置于第二间隙 5206 内。

本公开的实施例中，通过设置第二传感器 5207，能够实时检测第二间隙 5206 处的参数，例如第二间隙 5206 处的气膜压力等。这样，第二磁轴承 5204 可以根据第二传感器 5207 的检测结果对推力轴承 5200 进行主动控制，并能够使控制达到较高的精度。

可选的，第二传感器 5207 包括第二传感器盖 52071 和第二传感器探头 52072，第二传感器探头 52072 的第一端连接第二传感器盖 52071，第二传感器盖 52071 固定于第二磁轴承 5204 上，第二磁轴承 5204 上设有用于供第二传感器探头 52072 穿过的通孔；第二传感器探头 52072 的第二端穿过第二磁轴承 5204 上的通孔，并伸至第二间隙 5206，且第二传感器探头 52072 的第二端端部与第二磁轴承 5204 的靠近第二推力盘 5201 的一侧平齐。

本公开的实施例中，通过上述第二传感器 5207 的结构形式和安装方式，能够使第二传感器 5207 更稳定地设置于第二磁轴承 5204 上。此外，将第二传感器探头 52072 的第二端端部与第二磁轴承 5204 的靠近第二推力盘 5201 的一侧平齐，一方面，能够避免第二传感器探头 52072 受到第二推力盘 5201 的碰触，从而有利于保护第二传感器探头 52072；另一方面，不会对第二间隙 5206 内的气膜产生影响，避免第二间隙 5206 内的气膜发生扰动。

可选的，第二传感器 5207 设置于相邻的两个第四磁性部件之间。

本公开的实施例中，每个定子上均应当设置至少一个第二传感器 5207，优选设置一个第二传感器 5207，该第二传感器 5207 优选设置在相邻两个第四磁性部件之间。

可选的，第二传感器 5207 为以下任意一种或多种的组合：

用于检测第二推力盘 5201 位置的位移传感器；

用于检测第二间隙 5206 处的气膜压力的压力传感器；

用于检测第二推力盘 5201 转速的速度传感器；

用于检测第二推力盘 5201 旋转加速度的加速度传感器。

下面以本公开的实施例的槽式气磁混合推力轴承（其中，第二磁轴承中的第四磁性部件为电磁铁）参与转子系统的控制过程时的具体控制方法进行详细地说明。

本公开的实施例提供一种槽式气磁混合推力轴承的控制方法，包括：

S531、开启第三定子和第四定子中的第二磁轴承，控制第二推力盘在第三磁性部件与多个第四磁性部件之间的磁力作用下在转轴的轴向方向上移动，以使第二推力盘与第三定子中的第二磁轴承之间的第二间隙与第二推力盘与第四定子中的第二磁轴承之间的第二间隙的差值小于或等于预定值。

S532、转轴的转速加速至工作转速之后，关闭第三定子和第四定子中的第二磁轴承。

S533、转子系统停机时，开启第三定子和第四定子中的第二磁轴承。

S534、转轴的转速减速至零之后，关闭第三定子和第四定子中的第二磁轴承。

在上述过程中，第二磁轴承开启后，第二推力盘在第二磁轴承的作用下到达第三定子和第四定子之间的预定位置，第二推力盘与第三定子和第四定子的端面均具有第二间隙。

随着转轴的转动，第二推力盘在受第二间隙中气流润滑的情况下相对第三定子和第四定子开始转动，以防止磨损。第二磁轴承开启的具体过程为：向第二线圈输入预定值的电流信号，第二推力盘在第二磁轴承的作用下到达第三定子和第四定子之间的预定位置。

随着转轴的转速越来越大，第二推力盘的转速也同步增大，当转轴的转速到达工作转速时，该推力轴承的气体动压轴承（第二推力盘与第三定子和第四定子之间设置第二间隙即形成该推力轴承的气体动压轴承）产生的气膜压力可以将第二推力盘稳定，届时可以关闭第二磁轴承。

- 5 在转子系统停机时，第二推力盘随着转轴减速而减速，为了使转轴在整个转子系统停机过程中保持稳定，在转子系统停机时即开启第二磁轴承，直到第二推力盘完全停下后即可关闭第二磁轴承。

本公开的实施例还提供另一种槽式气磁混合推力轴承的控制方法，包括：

- 10 S541、开启第三定子和第四定子中的第二磁轴承，控制第二推力盘在第三磁性部件与多个第四磁性部件之间的磁力作用下在转轴的轴向方向上移动，以使第二推力盘与第三定子中的第二磁轴承之间的第二间隙与第二推力盘与第四定子中的第二磁轴承之间的第二间隙的差值小于或等于预定值。

S542、转轴的转速加速至第一预设值之后，关闭第三定子和第四定子中的第二磁轴承。

S543、转轴的转速减速至第二预设值时，开启第三定子和第四定子中的第二磁轴承。

- 15 S544、转轴的转速减速至零之后，关闭第三定子和第四定子中的第二磁轴承。

- 在上述过程中，第二磁轴承开启后，第二推力盘在第二磁轴承的作用下到达第三定子和第四定子之间的预定位置，第二推力盘与第三定子和第四定子的端面均具有第二间隙。随着转轴的转动，第二推力盘在受第二间隙中气流润滑的情况下相对第三定子和第四定子开始转动，以防止磨损。第二磁轴承开启的具体过程为：向第二线圈输入预定值的电流信号，第二推力盘在第二磁轴承的作用下到达第三定子和第四定子之间的预定位置。
- 20

随着转轴的转速越来越大，第二推力盘的转速也同步增大，当转轴的转速到达第二预设值，例如额定转速的 5%至 30%时，该推力轴承的气体动压轴承（第二推力盘与第三定子和第四定子之间设置第二间隙即形成该槽式气磁混合推力轴承的气体动压轴承）产生的气膜压力可以将第二推力盘稳定，届时可以关闭第二磁轴承。

- 25 在转子系统停机过程中，第二推力盘随着转轴减速而减速，当转轴的转速低于第二预设值时，例如额定转速的 5%至 30%时，此时，推力轴承的气体动压轴承产生的气膜压力也随第二推力盘减速而减小，因此，需要开启第二磁轴承以使第二推力盘保持稳定，直到第二推力盘完全停下后即可关闭第二磁轴承。

可选的，上述方法还包括：

- 30 当载荷负载在第二推力盘，第二推力盘在载荷负载的作用下在转轴的轴向方向上移动，第二推力盘与第三定子中的第二磁轴承之间的第二间隙与第二推力盘与第四定子中的第二磁轴承之间的第二间隙的差值大于预定值时，开启第三定子或第四定子中的第二磁轴承；

- 当第二推力盘与第三定子中的第二磁轴承之间的第二间隙与第二推力盘与第四定子中的第二磁轴承之间的第二间隙的差值小于或者等于预定值，关闭第三定子或第四定子中的第二磁轴承。
- 35

当载荷负载在第二推力盘上，使第二推力盘与第三定子或第四定子的第二磁轴承之间的第二间隙变小而接近该侧的第二磁轴承时，第二传感器（这里的第二传感器优选压力传感器）获得气压增大的信号，此时第二磁轴承需要介入工作。第二磁轴承将磁力作用于第二推力盘上，使其向另一侧的第二磁轴承移动，当第二推力盘达到新的平衡位置之后，第

二磁轴承停止工作。

具体的，若第二推力盘与第三定子中的第二磁轴承之间的第二间隙小于第二推力盘与第四定子中的第二磁轴承之间的第二间隙，且第二推力盘与第三定子中的第二磁轴承之间的第二间隙与第二推力盘与第四定子中的第二磁轴承之间的第二间隙的差值大于预定值，

- 5 则控制第四定子中的第二磁轴承，使第二推力盘在第三磁性部件与多个第四磁性部件之间的磁力作用下，朝远离第四定子的方向在转轴的轴向方向上移动。

- 若第二推力盘与第四定子中的第二磁轴承之间的第二间隙小于第二推力盘与第三定子中的第二磁轴承之间的第二间隙，且第二推力盘与第三定子中的第二磁轴承之间的第二间隙与第二推力盘与第四定子中的第二磁轴承之间的第二间隙的差值大于预定值，则控制第三定子中的第二磁轴承，使第二推力盘在第三磁性部件与多个第四磁性部件之间的磁力作用下，朝远离第三定子的方向在转轴的轴向方向上移动。

- 可选的，当载荷负载在第二推力盘，第二推力盘在载荷负载的作用下在转轴的轴向方向上移动，第二推力盘与第三定子中的第二磁轴承之间的第二间隙与第二推力盘与第四定子中的第二磁轴承之间的第二间隙的差值大于预定值时，开启第三定子或第四定子中的第二磁轴承，包括：

当载荷负载在第二推力盘，第二推力盘在载荷负载的作用下在转轴的轴向方向上移动，第二推力盘与第三定子中的第二磁轴承之间的第二间隙与第二推力盘与第四定子中的第二磁轴承之间的第二间隙的差值大于预定值时，控制第三定子或第四定子中的第二磁轴承以最大功率开启；或者，

- 20 当载荷负载在第二推力盘，第二推力盘在载荷负载的作用下在转轴的轴向方向上移动，第二推力盘与第三定子中的第二磁轴承之间的第二间隙与第二推力盘与第四定子中的第二磁轴承之间的第二间隙的差值大于预定值时，控制第三定子或第四定子中的第二磁轴承按照预设频率以频闪的方式开启。

- 当有外部冲击扰动发生时，第二推力盘可能快速地接近某侧第二磁轴承，则有可能导致该侧的第二间隙瞬间过小，使该侧第二间隙处的局部气体流速接近甚至达到音速，从而引发激波产生气锤自激现象。激波的产生会导致局部气体流动发生扰动和混乱，当流体速度在音速到亚音速之间变化时其压力呈阶梯式显著下降。这种情况下，需要控制第三定子或第四定子中的第二磁轴承以最大功率开启，或者控制第三定子或第四定子中的第二磁轴承按照预设频率以频闪的方式轮流开启，以提供对扰动的阻尼作用，从而有效抑制外部扰动。当第二推力盘重新回到平衡状态之后，第二磁轴承停止工作。

- 需要说明的是，本公开的实施例中，对于同时设置有电磁轴承（第二磁轴承中的第四磁性部件为电磁铁即形成电磁轴承）和气体静压轴承（第三定子和第四定子上设置的第一静压进气节流孔即形成气体静压轴承）的情况下，电磁轴承和气体静压轴承可以相互备用，在其中一方故障、失效或者无法满足开启条件的情况下，另一方可作为备用轴承起到相同的作用。例如，在检测到电磁轴承故障的情况下，控制外部气源开启以替代电磁轴承执行相应的动作，从而提高轴承的安全性和可靠性。

本公开的实施例中，对于同时设置有电磁轴承和气体静压轴承的情况下，对于“开启推力轴承中的静压轴承，以使推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置”的步骤，可以包括如下实施方式：

开启第三定子和第四定子的第二磁轴承；和/或，启动外部气源，通过第一静压进气节流孔向第二间隙处输送气体；

控制第二推力盘在第三磁性部件与第四磁性部件之间的磁力作用下，和/或气体的推动作用在转轴的轴向方向上移动，以使第二推力盘与第三定子中的第二磁轴承之间的第二间隙与第二推力盘与第四定子中的第二磁轴承之间的第二间隙的差值小于或等于预定值。

在上述过程中，利用第二磁轴承方便实时控制的优点，主动平衡第二推力盘的不平衡质量或第二推力盘涡动等导致第二推力盘过度偏移的因素，使第二推力盘在转轴的轴向方向上固定在某一极小范围内。另外，在第二推力盘的加速过程中，可以准确定位产生激波的位置（即线速度超声速部位），并通过控制第二磁轴承的电流大小和方向等，使第二磁轴承产生相反的力来平衡激波作用。待激波平稳后，再次调整第二磁轴承的控制策略，以最节能的方式将第二推力盘固定在某一极小范围内。

综合上述，本公开的实施例具有如下有益效果：

其一，电磁轴承与气体轴承协同工作，改善了轴承在高速运转状态下的动态性能和稳定性，抗受扰动能力强，进而提高了轴承的承载能力。同时，电磁轴承与气体轴承采用并联结构，简化了结构，集成度高，易加工、制造和操作，提高了轴承的综合性能。在转子系统启动或停机时，可以用电磁轴承使轴承的推力盘与定子在第二间隙内转动，提高了轴承的低速性能，延长了轴承的使用寿命，能够提高轴承及整个系统的安全性和可靠性。

其二，相对于传统的采用气体静压轴承和气体动压轴承结合的气体动静压混合推力轴承，本公开的实施例的槽式气磁混合推力轴承具有响应速度快的优点。

其三，增加了气体静压轴承，形成槽式动静压-磁混合推力轴承，在同时设置有电磁轴承和气体静压轴承的情况下，轴承的承载力进一步加大，电磁轴承和气体静压轴承可以相互备用，在其中一方故障、失效或者无法满足开启条件的情况下，另一方可作为备用轴承起到相同的作用。例如，在检测到电磁轴承故障的情况，控制系统控制气体静压轴承开启以替代电磁轴承执行相应的动作，从而提高轴承的安全性和可靠性。

实施例十一

图 39 至图 46 为本公开的实施例提供的槽式气磁混合径向轴承的结构示意图。

如图 39 至图 46 所示，槽式气磁混合径向轴承 6200 包括：套设于转轴 100 上的第四磁轴承 6201，第四磁轴承 6201 上沿周向设置有多个第七磁性部件；第四磁轴承 6201 朝向转轴 100 的侧壁，或转轴 100 朝向第四磁轴承 6201 的圆周面上设置有第三动压发生槽 6202；其中，第四磁轴承 6201 与转轴 100 之间具有第四间隙 6203，且转轴 100 能够在多个第七磁性部件的磁力作用下在转轴 100 的径向方向上移动。

本公开的实施例中，通过在径向轴承 6200 中设置第四间隙 6203 和第四磁轴承 6201，从而使该径向轴承 6200 形成气、磁混合径向轴承。

工作时，径向轴承 6200 中的气体轴承与第四磁轴承 6201 能够协同工作，在径向轴承 6200 处于稳定的工作状态时，依靠气体轴承实现支承；而在径向轴承 6200 处于非稳定的工作状态时，依靠第四磁轴承 6201 及时对径向轴承 6200 进行控制和响应。

可见，本公开的实施例能够改善径向轴承，尤其在高速运转状态下的动态性能和稳定性，抗受扰动能力强，进而提高了径向轴承的承载能力。本公开的实施例的径向轴承能够满足高转速的转子系统，例如，燃气轮机或者燃气轮机发电联合机组等的需求。

本公开的实施例中，由于硅钢片或矽钢片具有磁导率高、涡流损耗低等物理特性，转轴 100 可以由若干硅钢片或者矽钢片叠压而成。

本公开的实施例中，当转轴 100 旋转时，存在于第四间隙 6203 的流动气体被压入第三动压发生槽 6202 内，从而产生压力，使转轴 100 上浮，以实现转轴 100 沿径向方向被非接触地保持。其中，第三动压发生槽 6202 产生压力的大小随第三动压发生槽 6202 的角度、槽宽、槽长、槽深、槽数以及平面度的不同而变化。此外，第三动压发生槽 6202 产生压力的大小也和转轴 100 的旋转速度以及第四间隙 6203 有关。可以根据实际工况对第三动压发生槽 6202 的参数进行设计。第三动压发生槽 6202 可以通过锻造、滚轧、刻蚀或冲压等方式形成于第四磁轴承 6201 或转轴上。

10 可选的，多个第七磁性部件包括多个第四永磁体，多个第四永磁体在第四磁轴承 6201 上沿周向设置；或者，多个第七磁性部件包括多个第四电磁铁，多个第四电磁铁在第四磁轴承 6201 上沿周向设置，多个第四电磁铁中的每个第四电磁铁包括设置于第四磁轴承 6201 上的第四磁芯 62011 及缠绕于第四磁芯 62011 上的第四线圈 62012。

本公开的实施例中，当槽式气磁混合径向轴承 6200 仅需要磁性部件提供磁力而无需磁
15 控时，第七磁性部件优选第四永磁体；当箔片式气磁混合推力轴承同时需要磁力和磁控时，第七磁性部件优选第四电磁铁。

当第七磁性部件为第四电磁铁时，往第四线圈 62012 通入电流，即可以使第四磁芯 62011 产生磁力。往第四线圈 62012 通入电流的大小不同，第四磁芯 62011 产生的磁力大小也不同；往第四线圈 62012 通入电流的方向不同，第四磁芯 62011 的磁极也不同。

20 其中，由于硅钢片或矽钢片具有磁导率高、涡流损耗低等物理特性，本公开的优选实施例中，第四磁芯 62011 可以由若干硅钢片或者矽钢片叠压而成。

可选的，第四磁轴承 6201 包括：第四磁轴承座 62013，第四磁轴承座 62013 套设于转轴 100 上，第四磁轴承座 62013 上沿周向设置有多个第四容纳槽 62014，多个第七磁性部件设置于多个第四容纳槽 62014 内，且多个第七磁性部件的磁极朝向转轴 100；套设于第四磁轴承座 62013 外的第二轴承壳 62015；套设于第四磁轴承座 62013 与转轴 100 之间的第二轴承套 62016；以及，分别设置于第二轴承壳 62015 两端的第五端盖 62017 和第六端盖 62018；其中，第二轴承套 62016、第五端盖 62017 及第六端盖 62018 配合，将多个第七磁性部件固定于第四磁轴承座 62013 上。

本公开的实施例中，通过设置第二轴承套 62016，能够封闭第四磁芯 62011 以及第四
30 线圈 62012 之间的间隙，从而在第二轴承套 62016 和转轴 100 之间形成稳定、均匀的气膜压力。另外，通过设置不同径向厚度的第二轴承套 62016 能够方便地调节和控制第四间隙 6203 的大小。

其中，第二轴承套 62016 与转轴 100 之间的第四间隙 6203 的宽度可以为 $5\ \mu\text{m}$ 至 $12\ \mu\text{m}$ ，优选 $8\ \mu\text{m}$ 至 $10\ \mu\text{m}$ 。

35 其中，由于硅钢片或矽钢片具有磁导率高、涡流损耗低等物理特性，本公开的优选实施例中，第四磁轴承座 62013 可以由若干硅钢片或者矽钢片叠压而成。第四容纳槽 62014 的数量可以为但不限于为六个或八个，沿第四磁轴承座 62013 的周向均匀设置。这样，能够使第四磁轴承 6201 与转轴 100 之间的磁力更加均匀、稳定。需要说明的是，多个第七磁性部件还可以采用其他方式设置于第四磁轴承座 62013 上，对此不进行限定。第五端盖

62017 和第六端盖 62018 的材料均可以是非磁性材料, 优选硬铝材料。第二轴承套 62016 的材料可以是非磁性材料, 优选硬铝材料。第二轴承壳 62015 的材料可以是非磁性材料, 优选硬铝材料。

5 优选的, 第五端盖 62017 和第六端盖 62018 均设置有外径与第二轴承壳 62015 的内径相同的凸台, 第五端盖 62017 和第六端盖 62018 的凸台用于从两端固定和压紧组成第四磁轴承座 62013 的硅钢片或者矽钢片。

本公开的实施例中, 可以在第二轴承套 62016 上设置第三动压发生槽 6202, 为便于第三动压发生槽 6202 的加工, 第二轴承套 62016 可以由不锈钢材料制成。具体地, 第三动压发生槽 6202 可以设置在转轴 100 上对应第二轴承套 62016 的圆周面的中间部分, 也可以设置
10 置为对称分布在中间部分的两侧、相互独立的两部分第三动压发生槽 6202; 第三动压发生槽 6202 还可以设置在第二轴承套 62016 内侧壁的中间部分, 也可以设置为对称分布在第二轴承套 62016 内侧壁两端、相互独立的两部分第三动压发生槽 6202。

可选的, 第三动压发生槽 6202 呈矩阵排布, 这样, 有利于使气膜更均匀地分布于第四间隙 6203 内。

15 可选的, 第三动压发生槽 6202 为连续或间隔设置的 V 形槽。

本公开的实施例中, 通过采用上述第三动压发生槽 6202 的设置方式, 能够在转轴 100 正向旋转或者反向旋转的情况下, 转轴都能以期望的方式非接触式地保持, 从而使转轴 100 具有负载能力高及稳定性好的优点。第三动压发生槽 6202 除了设置为 V 形槽, 还可以设置
20 为人字形槽或其它形状的槽。

20 可选的, 第四磁轴承 6201 上还设置有第二静压进气节流孔 6205, 第二静压进气节流孔 6205 的一端与第四间隙 6203 相通, 另一端连接外部气源, 用于将外部气源输送至第四间隙 6203 内。

本公开的实施例中, 通过设置上述第二静压进气节流孔 6205, 可以形成气体静压轴承, 从而该槽式气磁混合径向轴承 6200 可以构成槽式气体动静压-磁混合径向轴承。其中, 第
25 二静压进气节流孔 6205 的流通直径可以根据气量需求等实际工况进行调节。

可选的, 第二静压进气节流孔 6205 在第四磁轴承 6201 内分成至少两个支路连通至第四间隙 6203 内。

本公开的实施例中, 第二静压进气节流孔 6205 可以依次穿过第五端盖 62017 或第六端盖 62018、第四磁轴承 6201 以及第二轴承套 62016, 将外部气源与第四间隙 6203 连通。进
30 一步地, 第二静压进气节流孔 6205 可以分为两个或者更多个支路连通至第四间隙 6203, 使得第四间隙 6203 内的气膜压力更加均匀。进一步的, 第五端盖 62017 或第六端盖 62018 上可以设置有环形槽, 可在第四磁轴承 6201 与该环形槽对应的环形区域内设置多个第二静压进气节流孔 6205, 例如, 在每个第四磁芯 62011 中或每两个相邻的第四磁芯 62011 中设置一个第二静压进气节流孔 6205。其中, 第二静压进气节流孔 6205 以及支路的流通直径
35 可以根据气量需求等实际工况进行调节。

可选的, 槽式气磁混合径向轴承 6200 还包括沿第四磁轴承 6201 的周向间隔设置的多个第四传感器 6204, 其中每个第四传感器 6204 的传感器探头设置于第四间隙 6203 内。

本公开的实施例中, 通过设置第四传感器 6204, 能够实时检测第四间隙 6203 处的参数, 例如第四间隙 6203 处的气膜压力。这样, 第四磁轴承 6201 可以根据第四传感器 6204

的检测结果对径向轴承 6200 进行主动控制，并能够使控制达到较高的精度。

可选的，多个第四传感器 6204 中，每个第四传感器 6204 包括第四传感器盖 62041 和第四传感器探头 62042，第四传感器探头 62042 的第一端连接第四传感器盖 62041，第四传感器盖 62041 固定于第四磁轴承 6201 上，第四磁轴承 6201 上设有用于供第四传感器探头 62042 穿过的通孔；第四传感器探头 62042 的第二端穿过第四磁轴承 6201 上的通孔，并伸至第四间隙 6203，且第四传感器探头 62042 的第二端端部与第四磁轴承 6201 的靠近转轴 100 的一侧平齐。

本公开的实施例中，通过上述第四传感器 6204 的结构形式和安装方式，能够使第四传感器 6204 更稳定地设置于第四磁轴承 6201 上。此外，将第四传感器探头 62042 的第二端端部与第四磁轴承 6201 的靠近转轴 100 的一侧平齐，一方面，能够避免第四传感器探头 62042 受到转轴 100 的碰触，从而有利于保护第四传感器探头 62042；另一方面，不会对第四间隙 6203 内的气膜产生影响，避免第四间隙 6203 内的气膜发生扰动。

本公开的实施例中，第四传感器 6204 的数量可以与第七磁性部件的数量相同。第四传感器 6204 可以设置于相邻的两个第七磁性部件之间，也可以穿过第七磁性部件设置，本公开的实施例对此不作限定。每个第四传感器 6204 优选设置于第四磁轴承 6201 的中部。

可选的，多个第四传感器 6204 为以下任意一种或多种的组合：

- 用于检测转轴 100 位置的位移传感器；
- 用于检测第四间隙 6203 处的气膜压力的压力传感器；
- 用于检测转轴 100 转速的速度传感器；
- 用于检测转轴 100 旋转加速度的加速度传感器。

下面以本公开的实施例的槽式气磁混合径向轴承（其中，第四磁轴承中的第七磁性部件为电磁铁）参与转子系统的控制过程时的具体控制方法进行详细地说明。

本公开的实施例提供一种槽式气磁混合径向轴承的控制方法，包括：

S631、开启第四磁轴承，控制转轴在多个第七磁性部件的磁力作用下在转轴的径向方向上移动，推动转轴至预设径向位置。

S632、转轴的转速加速至工作转速之后，关闭第四磁轴承。

S633、转子系统停机时，开启第四磁轴承。

S634、转轴的转速减速至零之后，关闭第四磁轴承。

在上述过程中，第四磁轴承开启后，转轴在第四磁轴承的作用下托起并到达预设径向位置，第四磁轴承与转轴之间具有第四间隙。

随着转轴的转动，转轴在受第四间隙中气流润滑的情况下开始转动，以防止磨损。第四磁轴承开启的具体过程为：向第四线圈输入预定值的电流信号，转轴在第四磁轴承的作用下托起并到达预设径向位置。

随着转轴的转速越来越大，当转轴的转速到达工作转速时，该径向轴承的气体动压轴承（第四磁轴承与转轴之间设置第四间隙即形成该径向轴承的气体动压轴承）产生的气膜压力可以将转轴稳定，届时可以关闭第四磁轴承。

在转子系统停机时，转轴减速，为了使转轴在整个转子系统停机过程中保持稳定，在转子系统停机时即开启第四磁轴承，直到转轴完全停下后即可关闭第四磁轴承。

本公开的实施例还提供另一种槽式气磁混合径向轴承的控制方法，包括：

- S641、开启第四磁轴承，控制转轴在多个第七磁性部件的磁力作用下在转轴的径向方向上移动，推动转轴至预设径向位置。
- S642、转轴的转速加速至第一预设值之后，关闭第四磁轴承。
- S643、转轴的转速加速至一阶临界速度或二阶临界速度时，开启第四磁轴承。
- 5 具体的，当转轴与第四磁轴承之间的第四间隙处的气体流速达到一阶临界速度或二阶临界速度时，开启第四磁轴承，直至转轴恢复至平衡径向位置。
- 可选的，转轴的转速加速至一阶临界速度或二阶临界速度时，开启第四磁轴承，包括：
转轴的转速加速至一阶临界速度或二阶临界速度时，控制第四磁轴承以最大功率开启；
或者，
- 10 转轴的转速加速至一阶临界速度或二阶临界速度时，控制第四磁轴承按照预设频率以频闪的方式开启。
- S644、转子系统平稳度过一阶临界速度或二阶临界速度之后，关闭第四磁轴承。
- S645、转子系统停机过程中，当转子系统减速至一阶临界速度或二阶临界速度时，开启第四磁轴承。
- 15 具体的，当转轴与第四磁轴承之间的第四间隙处的气体流速减速至一阶临界速度或二阶临界速度时，开启第四磁轴承，直至转轴恢复至平衡径向位置。
- 可选的，转轴的转速减速至一阶临界速度或二阶临界速度时，开启第四磁轴承，包括：
转轴的转速减速至一阶临界速度或二阶临界速度时，控制第四磁轴承以最大功率开启；
或者，
- 20 转轴的转速减速至一阶临界速度或二阶临界速度时，控制第四磁轴承按照预设频率以频闪的方式开启。
- S646、转子系统平稳度过一阶临界速度或二阶临界速度之后，关闭第四磁轴承。
- S647、转轴的转速减速至第二预设值时，开启第四磁轴承。
- S648、转轴的转速减速至零之后，关闭第四磁轴承。
- 25 在上述过程中，第四磁轴承开启后，转轴在第四磁轴承的作用下托起并到达预设径向位置，第四磁轴承与转轴之间具有第四间隙。
- 随着转轴的转动，转轴在受第四间隙中气流润滑的情况下开始转动，以防止磨损。第四磁轴承开启的具体过程为：向第四线圈输入预定值的电流信号，转轴在第四磁轴承的作用下托起并到达预设径向位置。
- 30 随着转轴的转速越来越大，当转轴的转速到达第一预设值，例如额定转速的 5%至 30%时，该径向轴承的气体动压轴承（第四磁轴承与转轴之间设置第四间隙即形成该径向轴承的气体动压轴承）产生的气膜压力可以将转轴稳定，届时可以关闭第四磁轴承。
- 在转子系统停机过程中，转轴减速，当转轴的转速降至第二预设值，例如额定转速的 5%至 30%时，开启第四磁轴承，直到转轴完全停下后即可关闭第四磁轴承。
- 35 可选的，方法还包括：
- 当转轴与第四磁轴承之间的第四间隙发生变化时，开启第四磁轴承，使转轴在多个第七磁性部件的磁力作用下向远离间隙变小侧的方向移动；
转轴处于平衡径向位置之后，关闭第四磁轴承。
- 当载荷负载在转轴上，使转轴逐渐下降并接近下方的第四磁轴承时，第四传感器（这

里的第四传感器优选压力传感器)获得气压增大的信号,此时第四磁轴承需要介入工作。第四磁轴承将磁力作用于转轴上使其向上悬浮,当转轴达到新的平衡位置时,第四磁轴承停止工作。

当有外部冲击扰动发生时,转轴可能快速地接近第四磁轴承,则有可能导致转轴与第四磁轴承之间的间隙瞬间过小,使间隙减小处的局部气体流速接近甚至达到音速,从而引发激波产生气锤自激现象。激波的产生会导致局部气体流动发生扰动和混乱,当流体速度在音速到亚音速之间变化时其压力呈阶梯式显著下降。这种情况下,需要控制第四磁轴承的第七磁性部件以预设频率轮流开启,以提供对扰动的阻尼作用,从而有效抑制外部扰动。当转轴恢复至新的平衡径向位置之后,第四磁轴承停止工作。

需要说明的是,本公开的实施例中,对于同时设置有电磁轴承(第四磁轴承中的第七磁性部件为电磁铁即形成电磁轴承)和气体静压轴承(第四磁轴承上设置的第二静压进气节流孔即形成气体静压轴承)的情况下,电磁轴承和气体静压轴承可以相互备用,在其中一方故障、失效或者无法满足开启条件的情况下,另一方可作为备用轴承起到相同的作用。例如,在检测到电磁轴承故障的情况下,控制外部气源开启以替代电磁轴承执行相应的动作,从而提高轴承的安全性和可靠性。

本公开的实施例中,对于同时设置有电磁轴承和气体静压轴承的情况下,对于“开启径向轴承中的静压轴承,以使转轴移动至预设径向位置,”的步骤,可以包括如下实施方式:

开启第四磁轴承;和/或,启动外部气源,通过第二静压进气节流孔向第四间隙处输送气体;

控制转轴在多个第七磁性部件的磁力作用下,和/或气体的推动作用在转轴的径向方向上移动,以使转轴移动至预设径向位置。

在上述过程中,利用第四磁轴承方便实时控制的优点,主动平衡转轴的不平衡质量或转轴涡动等导致转轴过度偏移的因素,使转轴在径向方向上固定在某一极小范围内。另外,在转轴的加速过程中,可以准确定位产生激波的位置(即线速度超声速部位),并通过控制第四磁轴承的电流大小和方向等,使第四磁轴承产生相反的力来平衡激波作用。待激波平稳后,再次调整第四磁轴承的控制策略,以最节能的方式将转轴固定在某一极小范围内。

综合上述,本公开的实施例具有如下有益效果:

其一,电磁轴承与气体轴承协同工作,改善了轴承在高速运转状态下的动态性能和稳定性,抗受扰动能力强,进而提高了轴承的承载能力。同时,电磁轴承与气体轴承采用嵌套结构,简化了结构,集成度高,易加工、制造和操作,提高了轴承的综合性能。在转子系统启动或停机时,可以用电磁轴承使轴承的推力盘与定子在第一间隙内转动,提高了轴承的低速性能,延长了轴承的使用寿命,能够提高轴承及整个系统的安全性和可靠性。

其二,相对于传统的采用气体静压轴承和气体动压轴承结合的气体动静压混合推力轴承,本公开的实施例的槽式气磁混合径向轴承具有响应速度快的优点。

其三,增加了气体静压轴承,形成槽式动静压-磁混合推力轴承,在同时设置有电磁轴承和气体静压轴承的情况下,轴承的承载力进一步加大,电磁轴承和气体静压轴承可以相互备用,在其中一方故障、失效或者无法满足开启条件的情况下,另一方可作为备用轴承起到相同的作用。例如,在检测到电磁轴承故障的情况,控制系统控制气体静压轴承开启以替代电磁轴承执行相应的动作,从而提高轴承的安全性和可靠性。

实施例十二

转子系统中,推力轴承和与推力轴承相邻的径向轴承可以集成一体,形成集成式轴承。分别对应图 1 至图 18 所示的转子系统,图 47 至图 62 示出了将推力轴承和与推力轴承相邻的径向轴承集成形成集成式轴承 1000 的结构示意图。

5 图 63 至图 70 为本公开的实施例提供的集成式轴承的结构示意图。

如图 63 至图 70 所示,集成式轴承 1000 包括:第三轴承壳 1001,第三轴承壳 1001 为中空回转体,第三轴承壳 1001 设置有第一容纳腔和第二容纳腔;设置于第一容纳腔内的径向子轴承 1002,径向子轴承 1002 穿设于转轴 100 上,径向子轴承 1002 与转轴 100 之间具有第五间隙 1004;以及,设置于第二容纳腔内的推力子轴承 1003,推力子轴承 1003 包括
10 第三推力盘 10031,以及分别设置于第三推力盘 10031 两侧的第五定子 10032 和第六定子 10033,第三推力盘 10031 固定连接于转轴 100 上,第五定子 10032 和第六定子 10033 均穿设于转轴 100 上;第五定子 10032 和第六定子 10033 中,每个定子与第三推力盘 10031 之间具有第六间隙 1005。

本公开的实施例中,将径向子轴承 1002 和推力子轴承 1003 集成在一个轴承壳内,易于加工和安装,具有结构简化、集成度高的特点,在加工和安装时能够有效保证径向子轴承 1002 和推力子轴承 1003 的同轴度一致的要求。另外,由于径向子轴承 1002 中设置有第五间隙 1004,推力子轴承 1003 中设置有第六间隙 1005,使得本公开的轴承为非接触式轴承,能够满足转子高速转动的需求。
15

其中,第三轴承壳 1001 的材料可以是非磁性材料,优选硬铝材料。

20 其中,第五定子 10032 与第三轴承壳 1001 可以一体成型,第六定子 10033 与第三轴承壳 1001 可以是可拆卸连接。

当本公开的实施例的转子系统应用于燃气轮机或者燃气轮机发电联合机组时,第三轴承壳 1001 可以通过连接件与燃气轮机的壳体连接。

本公开的实施例中,径向子轴承 1002 和推力子轴承 1003 均可以包括磁轴承,其中,径向子轴承 1002 中设置磁轴承的结构形式如下:径向子轴承 1002 包括套设于转轴 100 上的第五磁轴承 10021,第五磁轴承 10021 可拆卸安装于第一容纳腔内,第五磁轴承 10021 上沿周向设置有多个第八磁性部件;其中,转轴 100 能够在多个第八磁性部件的磁力作用下在转轴 100 的径向方向上移动。
25

进一步的,第五磁轴承 10021 包括:第五磁轴承座,第五磁轴承座套设于转轴 100 上,第五磁轴承座上沿周向设置有多个第五容纳槽,多个第八磁性部件设置于多个第五容纳槽内,且多个第八磁性部件的磁极朝向转轴 100;以及,套设于第五磁轴承座与转轴 100 之间的第三轴承套 10022,第三轴承套 10022 与第五磁轴承座配合,将多个第八磁性部件固定于第五磁轴承座上。
30

上述径向子轴承 1002 中设置磁轴承的其它具体实施方式可以参见实施例十中的相关说明,并能够达到相同的有益效果,为避免重复,对此不作赘述。
35

本公开的实施例中,集成式轴承 1000 还可以包括第七端盖 1006,第七端盖 1006 设置于第三轴承壳 1001 的靠近第一容纳腔的端部,第七端盖 1006 与第五磁轴承座抵接,用于将径向子轴承 1002 固定于第一容纳腔内。

本公开的实施例中,径向子轴承 1002 和推力子轴承 1003 均可以包括磁轴承,其中,

推力子轴承 1003 中设置磁轴承的结构形式如下：

第五定子 10032 和第六定子 10033 中，每个定子包括第六磁轴承 10034，第六磁轴承 10034 上沿周向设置有多个第九磁性部件；

第三推力盘 10031 上设置有第十磁性部件，第三推力盘 10031 能够在多个第九磁性部件和第十磁性部件之间的磁力作用下在转轴 100 的轴向方向上移动。

进一步的，第六磁轴承 10034 包括：第六磁轴承座，第六磁轴承座与第三推力盘 10031 相对设置，第六磁轴承座上沿周向设置有多个第六容纳槽，多个第九磁性部件设置于多个第六容纳槽内，且多个第九磁性部件的磁极朝向第三推力盘 10031 所在的一侧；第二压环，第二压环设置于第六磁轴承座的靠近第三推力盘 10031 的一侧，第二压环与第六磁轴承座配合，将多个第九磁性部件固定于第六磁轴承座上。

上述推力子轴承 1003 中设置磁轴承的其它具体实施方式可以参见实施例十中的相关说明，并能够达到相同的有益效果，为避免重复，对此不作赘述。

本公开的实施例中，通过在集成式轴承 1000 中设置磁轴承，尤其是电磁轴承（其第五磁轴承 10021 中的第八磁性部件为电磁铁，第六磁轴承 10034 中的第九磁性部件为电磁铁），在转子系统启动或停机时，可以用电磁轴承使集成式轴承 1000 中的推力盘与定子以及转轴与轴承套在间隙内转动，提高了集成式轴承 1000 的低速性能，延长了集成式轴承 1000 的使用寿命，能够提高集成式轴承 1000 及整个转子系统的安全性和可靠性。

本公开的实施例中，第五定子 10032 可以与第三轴承壳 1001 一体成型，第六定子 10033 可以与第三轴承壳 1001 可拆卸连接。

本公开的实施例中，径向子轴承 1002 和推力子轴承 1003 均可以设置动压发生槽，其中，径向子轴承 1002 中设置动压发生槽的结构形式如下：

径向子轴承 1002 朝向转轴 100 的侧壁，或转轴 100 朝向径向子轴承 1002 的圆周面设置有第四动压发生槽 10023。

进一步的，第四动压发生槽 10023 呈矩阵排布。

进一步的，第四动压发生槽 10023 为连续或间隔设置的 V 形槽。

上述径向子轴承 1002 中设置动压发生槽的其它具体实施方式可以参见实施例十一中的相关说明，并能够达到相同的有益效果，为避免重复，对此不作赘述。

本公开的实施例中，径向子轴承 1002 和推力子轴承 1003 均可以设置动压发生槽，其中，推力子轴承 1003 中设置动压发生槽的结构形式如下：

第三推力盘 10031 的面向第五定子 10032 和第六定子 10033 的端面，或，第五定子 10032 和第六定子 10033 的面向第三推力盘 10031 的端面上设置有第五动压发生槽 10035。

进一步的，第五动压发生槽 10035 呈辐射状或同心圆状排布。

进一步的，第五动压发生槽 10035 包括第一螺旋槽和第二螺旋槽，第一螺旋槽环绕于第二螺旋槽外，第一螺旋槽和第二螺旋槽的螺旋走向相反，第一螺旋槽的靠近第二螺旋槽的一端与第二螺旋槽的靠近第一螺旋槽的一端连接或断开。

上述推力子轴承 1003 中设置动压发生槽的其它具体实施方式可以参见实施例十中的相关说明，并能够达到相同的有益效果，为避免重复，对此不作赘述。

本公开的实施例中，通过在集成式轴承 1000 中设置动压发生槽，从而使集成式轴承 1000 包括动压气体轴承。在同时设置有电磁轴承和动压气体轴承的情况下，改善了集成式

轴承 1000 在高速运转状态下的动态性能和稳定性,抗受扰动能力强,进而提高了轴承的承载能力。同时,电磁轴承与动压气体轴承采用嵌套并联结构,简化了结构,集成度高,易加工、制造和操作,提高了集成式轴承 1000 的综合性能。

本公开的实施例中,集成式轴承 1000 还可以设置静压进气节流孔,其结构形式如下:
5 第三轴承壳 1001 还设置有第三静压进气节流孔 1007;其中,第三静压进气节流孔 1007 的一端连接外部气源,另一端经径向子轴承 1002 与第五间隙 1004 相通,和/或,经第五定子 10032 和第六定子 10033 与第六间隙 1005 相通,用于将外部气源输送至第五间隙 1004 和/或第六间隙 1005。

本公开的实施例中,通过集成式轴承 1000 还可以设置静压进气节流孔,从而使集成式
10 轴承 1000 包括气体静压轴承。在同时设置有电磁轴承和气体静压轴承的情况下,能够使集成式轴承 1000 的承载力进一步加大。另外,电磁轴承和气体静压轴承可以相互备用,在其中一方故障、失效或者无法满足开启条件的情况下,另一方可作为备用轴承起到相同的作用。例如,在检测到电磁轴承故障的情况,通过控制气体静压轴承开启以替代电磁轴承执行相应的动作,从而提高集成式轴承 1000 的安全性和可靠性。

15 上述集成式轴承 1000 设置静压进气节流孔的其它具体实施方式可以参见实施例十和实施例十一中的相关说明,并能够达到相同的有益效果,为避免重复,对此不作赘述。

本公开的实施例中,径向子轴承 1002 和推力子轴承 1003 均可以设置传感器,其结构形式分别如下:

径向子轴承 1002 上设置有第五传感器(图中未示出),第五传感器的传感器探头设置
20 于第五间隙 1004 内。

这样,能够实时检测第五间隙 1004 处的参数,例如第五间隙 1004 处的气膜压力等。这样,第五磁轴承 10021 可以根据第五传感器的检测结果对径向子轴承 102 进行主动控制,并能够使控制达到较高的精度。

可选的,多个第五传感器中,每个第五传感器包括第一传感器盖和第五传感器探头,
25 第五传感器探头的第一端连接第五传感器盖,第五传感器盖固定于第五磁轴承 10021 上,第五磁轴承 10021 上设有用于供第五传感器探头穿过的通孔;第五传感器探头的第二端穿过第五磁轴承 10021 上的通孔,并伸至第五间隙 1004,且第五传感器探头的第二端端部与第五磁轴承 10021 的靠近转轴 100 的一侧平齐。

这样,能够使第五传感器更稳定地设置于第五磁轴承 10021 上。此外,将传感器探头的
30 的第二端端部与第五磁轴承 10021 的靠近转轴 100 的一侧平齐,一方面,能够避免传感器探头受到转轴 100 的碰触,从而有利于保护传感器探头;另一方面,不会对第五间隙 1004 内的气膜产生影响,避免第五间隙 1004 内的气膜发生扰动。

推力子轴承 1003 上设置有第六传感器(图中未示出),第六传感器的传感器探头设置
于第六间隙 1005 内。

35 这样,能够实时检测第六间隙 1005 处的参数,例如第六间隙 1005 处的气膜压力等。这样,第六磁轴承 10034 可以根据第六传感器的检测结果对推力子轴承 103 进行主动控制,并能够使控制达到较高的精度。

可选的,第六传感器包括第六传感器盖和第六传感器探头,第六传感器探头的第一端
连接第六传感器盖,第六传感器盖固定于第六磁轴承 10034 上,第六磁轴承 10034 上设有

用于供第六传感器探头穿过的通孔；第六传感器探头的第二端穿过第六磁轴承 10034 上的通孔，并伸至第六间隙 1005，且第六传感器探头的第二端端部与第六磁轴承 10034 的靠近第三推力盘 10031 的一侧平齐。

5 这样，能够使第六传感器更稳定地设置于第六磁轴承 10034 上。此外，将第六传感器探头的第二端端部与第六磁轴承 10034 的靠近第三推力盘 10031 的一侧平齐，一方面，能够避免第六传感器探头受到第三推力盘 10031 的碰触，从而有利于保护第六传感器探头；另一方面，不会对第六间隙 1005 内的气膜产生影响，避免第六间隙 1005 内的气膜发生扰动。

10 上述径向轴承和推力轴承中设置传感器的其它具体实施方式可以分别参见实施例十一和实施例十中的相关说明，并能够达到相同的有益效果，为避免重复，对此不作赘述。

需要说明的是，在实施例九至实施例十一中相关的技术方案，同样适用于本公开的实施例，并能达到相同的有益效果，为避免重复，对此不作赘述。

15 本公开的实施例中，集成式轴承（其中，第五磁轴承中的第八磁性部件为电磁铁，第六磁轴承中的第九磁性部件为电磁铁）参与转子系统的控制过程时的具体控制方法可以参见实施例十一和实施例十中的相关说明，并能够达到相同的有益效果，为避免重复，对此不作重复。

以上，仅为本公开的具体实施方式，但本公开的保护范围并不局限于此，任何熟悉本技术领域的技术人员在本公开揭露的技术范围内，可轻易想到变化或替换，都应涵盖在本公开的保护范围之内。因此，本公开的保护范围应以权利要求的保护范围为准。

权 利 要 求 书

- 1、一种转子系统，其中，包括：
转轴，所述转轴的轴体为一体结构，所述转轴水平设置；
5 依次设置于所述转轴上的电机、压气机和透平；
以及，设置于所述转轴上的推力轴承和至少两个径向轴承，所述推力轴承和所述至少两个径向轴承均为非接触式轴承；
其中，所述推力轴承设置于所述透平的靠近所述压气机的一侧的预设位置上，所述预设位置为能够使所述转子系统的重心位于所述至少两个径向轴承中相距最远的两个径向轴
10 承之间的位置。
- 2、根据权利要求1所述的转子系统，其中，
所述至少两个径向轴承包括第一径向轴承和第二径向轴承，所述第一径向轴承设置于所述电机的远离所述压气机的一侧，所述第二径向轴承设置于所述压气机和所述透平之间；
其中，
15 所述推力轴承设置于所述第一径向轴承与所述电机之间；
或者，所述推力轴承设置于所述第一径向轴承的远离所述电机的一侧；
或者，所述推力轴承设置于所述电机与所述压气机之间。
- 3、根据权利要求2所述的转子系统，其中，
所述至少两个径向轴承还包括第三径向轴承，所述第三径向轴承设置于所述电机与所
20 述压气机之间。
- 4、根据权利要求2或3所述的转子系统，其中，
所述至少两个径向轴承还包括第四径向轴承，所述第四径向轴承设置于所述透平的远
离所述压气机的一侧；其中，
所述推力轴承设置于所述第一径向轴承与所述电机之间；
25 或者，所述推力轴承设置于所述第一径向轴承的远离所述电机的一侧；
或者，所述推力轴承设置于所述电机与所述压气机之间；
或者，所述推力轴承设置于所述压气机与所述第二径向轴承之间。
- 5、根据权利要求4所述的转子系统，其中，
所述第四径向轴承为气体动静压混合径向轴承。
- 30 6、根据权利要求2所述的转子系统，其中，
所述透平上靠近所述第二径向轴承的一侧设置有隔热层。
- 7、根据权利要求1所述的转子系统，其中，所述电机为动压轴承电机，所述转轴的对应所述电机的轴承的部位设置有第一动压发生槽。
- 8、根据权利要求1所述的转子系统，其中，所述电机为启发一体式电机。
- 35 9、根据权利要求1所述的转子系统，其中，
所述转子系统还包括锁紧装置，所述锁紧装置用于在所述转轴静态时锁紧所述转轴。
- 10、根据权利要求1所述的转子系统，其中，
所述转轴的安裝轴承的部位涂覆有防磨涂层。

- 11、根据权利要求 2 所述的转子系统，其中，
所述推力轴承为气磁混合推力轴承；
所述至少两个径向轴承中的至少一个径向轴承为气磁混合径向轴承或者气体动静压混合径向轴承。
- 5 12、根据权利要求 11 所述的转子系统，其中，
当所述第二径向轴承为气磁混合径向轴承时，所述第二径向轴承的磁性部件设置于所述第二径向轴承上的远离所述透平的区域。
- 13、根据权利要求 11 所述的转子系统，其中，
所述气磁混合推力轴承为箔片式气磁混合推力轴承，所述箔片式气磁混合推力轴承包
10 括：
第一推力盘，所述第一推力盘固定连接于所述转轴上；
以及，穿设于所述转轴上的第一定子和第二定子，所述第一定子和所述第二定子分别设置于所述第一推力盘的相对两侧；
所述第一定子和所述第二定子中，每个定子包括第一磁轴承和第一箔片轴承，所述第
15 一磁轴承上沿周向设置有多个第一磁性部件，所述第一箔片轴承设置有能够与所述多个第一磁性部件相互作用并在它们之间产生磁力的第二磁性部件；
其中，所述第一箔片轴承设置于所述第一磁轴承与所述第一推力盘之间，并与所述第一推力盘之间具有第一间隙，且所述第一箔片轴承能够在所述第一磁性部件和所述第二磁性部件之间的磁力作用下在所述转轴的轴向方向上移动。
- 20 14、根据权利要求 13 所述的转子系统，其中，所述第一箔片轴承包括：
与所述第一磁轴承座固定连接的第一箔片轴承座；以及设置于所述第一箔片轴承座上的第一箔片和第二箔片，所述第一箔片安装于所述第一箔片轴承座上，所述第二箔片叠设于所述第一箔片的靠近所述第一推力盘的一侧。
- 25 15、根据权利要求 14 所述的转子系统，其中，所述第二箔片为平箔片，所述第二磁性部件设置于第二箔片上，以使所述第二箔片能够在第一磁性部件和第二磁性部件的磁力作用下在转轴的轴向方向上移动；所述第一箔片为能够在所述第二箔片移动时发生弹性变形的弹性变形箔片。
- 16、根据权利要求 11 所述的转子系统，其中，
所述气磁混合推力轴承为槽式气磁混合推力轴承，所述槽式气磁混合推力轴承包括：
30 第二推力盘，所述第二推力盘固定连接于所述转轴上，所述第二推力盘上设置有第三磁性部件；
以及，穿设于所述转轴上的第三定子和第四定子，所述第三定子和所述第四定子分别设置于所述第二推力盘的相对两侧；
所述第三定子和所述第四定子中，每个定子包括第二磁轴承，所述第二磁轴承上沿周
35 向设置有能够与所述第三磁性部件相互作用并在它们之间产生磁力的多个第四磁性部件，所述第二磁轴承与所述第二推力盘之间具有第二间隙，且所述第二推力盘能够在所述第三磁性部件和所述多个第四磁性部件之间的磁力作用下在所述转轴的轴向方向上移动；
其中，所述第二推力盘的面向所述第三定子和所述第四定子的端面，或，所述第三定

子和所述第四定子的面向所述第二推力盘的端面上设置有第二动压发生槽。

17、根据权利要求 16 所述的转子系统，其中，

所述第三定子和所述第四定子中，每个定子上还设置有第一静压进气节流孔，所述第一静压进气节流孔的一端与所述第二间隙相通，另一端连接外部气源，用于将外部气源输送至所述第二间隙内。

18、根据权利要求 11 所述的转子系统，其中，

所述气磁混合径向轴承为箔片式气磁混合径向轴承，所述箔片式气磁混合径向轴承包括：

套设于所述转轴上的第三磁轴承，所述第三磁轴承上沿周向设置有多个第五磁性部件；

套设于所述转轴上，并位于所述第三磁轴承和所述转轴之间的第二箔片轴承，所述第二箔片轴承上设有能够与所述多个第五磁性部件相互作用并在它们之间产生磁力的第六磁性部件；

其中，所述第二箔片轴承与所述转轴之间具有第三间隙，且所述第二箔片轴承能够在所述多个第五磁性部件和所述第六磁性部件的磁力作用下在所述转轴的径向方向上移动。

19、根据权利要求 11 所述的转子系统，其中，

所述气磁混合径向轴承为槽式气磁混合径向轴承，所述槽式气磁混合径向轴承包括：

套设于所述转轴上的第四磁轴承，所述第四磁轴承上沿周向设置有多个第七磁性部件；

所述第四磁轴承朝向所述转轴的侧壁，或所述转轴朝向所述第四磁轴承的圆周面上设置有第三动压发生槽；

其中，所述第四磁轴承与所述转轴之间具有第四间隙，且所述转轴能够在所述多个第七磁性部件的磁力作用下在所述转轴的径向方向上移动。

20、根据权利要求 19 所述的转子系统，其中，

所述第四磁轴承上还设置有第二静压进气节流孔，所述第二静压进气节流孔的一端与所述第四间隙相通，另一端连接外部气源，用于将外部气源输送至所述第四间隙内。

21、根据权利要求 1 所述的转子系统，其中，

所述转子系统中，所述推力轴承和与所述推力轴承相邻的径向轴承集成一体，形成集成式轴承，所述集成式轴承包括：

第三轴承壳，所述第三轴承壳为中空回转体，所述第三轴承壳设置有第一容纳腔和第二容纳腔；

设置于所述第一容纳腔内的径向子轴承，所述径向子轴承穿设于所述转轴上，所述径向子轴承与所述转轴之间具有第五间隙；

以及，设置于所述第二容纳腔内的推力子轴承，所述推力子轴承包括第三推力盘，以及分别设置于所述推力盘两侧的第五定子和第六定子，所述推力盘固定连接于所述转轴上，所述第五定子和所述第六定子均穿设于所述转轴上；所述第五定子和所述第六定子中，每个定子与所述第三推力盘之间具有第六间隙。

22、根据权利要求 21 所述的转子系统，其中，

所述径向子轴承包括套设于所述转轴上的第五磁轴承，所述第五磁轴承与所述转轴之间具有所述第五间隙，所述第五磁轴承上沿周向设置有多个第八磁性部件；所述转轴能够

在所述多个第八磁性部件的磁力作用下在所述转轴的径向方向上移动；

所述第五定子和所述第六定子中，每个定子包括第六磁轴承，所述第六磁轴承上沿周向设置有多个第九磁性部件；所述第三推力盘上设置有第十磁性部件，所述第三推力盘能够在所述多个第九磁性部件和所述第十磁性部件之间的磁力作用下在所述转轴的轴向方向上移动。

23、根据权利要求 21 所述的转子系统，其中，
所述第三轴承壳还设置有第三静压进气节流孔；
其中，所述第三静压进气节流孔的一端连接外部气源，另一端经所述径向轴承与所述第五间隙相通，和/或，经所述第五定子和所述第六定子与所述第六间隙相通，用于将外部气源输送至所述第五间隙和/或第六间隙。

24、一种转子系统的控制方法，用于如权利要求 11 至 23 中任一项所述的转子系统，其中，所述方法包括：

开启所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承，以使所述转轴移动至预设径向位置，使所述推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置；

所述转轴的转速加速至工作转速之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；

所述转子系统停机时，开启所述径向轴承中的静压轴承和所述推力轴承中的静压轴承；
所述转轴的转速减速至零之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；

其中，开启所述静压轴承包括：开启轴承中的磁轴承，和/或，向轴承中的静压进气节流孔输送气体；

关闭所述静压轴承包括：关闭轴承中的磁轴承，和/或，停止向轴承中的静压进气节流孔输送气体。

25、一种转子系统的控制方法，用于如权利要求 11 至 23 中任一项所述的转子系统，其中，所述方法包括：

开启所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承，以使所述转轴移动至预设径向位置，使所述推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置；

所述转轴的转速加速至第一预设值之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；

所述转子系统加速至一阶临界速度或二阶临界速度时，开启所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；

所述转子系统平稳度过所述一阶临界速度或所述二阶临界速度之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；

所述转子系统停机过程中，当所述转子系统减速至所述一阶临界速度或所述二阶临界速度时，开启所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；

所述转子系统平稳度过所述一阶临界速度或所述二阶临界速度之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；

所述转轴的转速减速至第二预设值时，开启所述径向轴承中的静压轴承和所述推力轴承中的静压轴承；

所述转轴的转速减速至零之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；

其中，开启所述静压轴承，包括：开启轴承中的磁轴承，和/或，向轴承中的静压进气节流孔输送气体；

5 关闭所述静压轴承，包括：关闭轴承中的磁轴承，和/或，停止向轴承中的静压进气节流孔输送气体。

26、根据权利要求 25 所述的方法，用于如权利要求 13 所述的转子系统，其中，

开启所述推力轴承中的静压轴承，以使所述推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置，包括：

10 开启所述第一定子和所述第二定子中的第一磁轴承，控制所述第一推力盘在所述多个第一磁性部件的磁力作用下在所述转轴的轴向方向上移动，以使所述第一推力盘与所述第一定子中的第一箔片轴承之间的所述第一间隙等于所述第一推力盘与所述第二定子中的第一箔片轴承之间的所述第一间隙；

所述方法还包括：

15 当载荷负载在所述第一推力盘，所述第一推力盘在载荷负载的作用下在所述转轴的轴向方向上移动，所述第一推力盘与所述第一定子中的第一箔片轴承之间的所述第一间隙不等于所述第一推力盘与所述第二定子中的第一箔片轴承之间的所述第一间隙时，开启所述第一定子和所述第二定子中的第一磁轴承；

20 当所述第一推力盘与所述第一定子中的第一箔片轴承之间的所述第一间隙等于所述第一推力盘与所述第二定子中的第一箔片轴承之间的所述第一间隙，关闭所述第一定子和所述第二定子中的第一磁轴承。

27、根据权利要求 25 所述的方法，用于如权利要求 16 所述的转子系统，其中，

开启所述推力轴承中的静压轴承，以使所述推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置，包括：

25 开启所述第三定子和所述第四定子中的第二磁轴承，控制所述第二推力盘在所述第三磁性部件与所述多个第四磁性部件之间的磁力作用下在所述转轴的轴向方向上移动，以使所述第二推力盘与所述第三定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙与所述第二推力盘与所述第四定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙的差值小于或等于预定值；

所述方法还包括：

30 当载荷负载在所述第二推力盘，所述第二推力盘在载荷负载的作用下在所述转轴的轴向方向上移动，所述第二推力盘与所述第三定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙与所述第二推力盘与所述第四定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙的差值大于所述预定值时，开启所述第三定子或所述第四定子中的第二磁轴承；

35 当所述第二推力盘与所述第三定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙与所述第二推力盘与所述第四定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙的差值小于或者等于所述预定值，关闭所述第三定子或所述第四定子中的第二磁轴承。

28、根据权利要求 25 所述的方法，用于如权利要求 17 所述的转子系统，其中，

开启所述推力轴承中的静压轴承，以使所述推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置，包括：

开启所述第三定子和所述第四定子的第二磁轴承；和/或，启动外部气源，通过所述第一静压进气节流孔向所述第二间隙处输送气体；

- 5 控制所述第二推力盘在所述第三磁性部件与所述第四磁性部件之间的磁力作用下，和/或所述气体的推动作用在所述转轴的轴向方向上移动，以使所述第二推力盘与所述第三定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙与所述第二推力盘与所述第四定子中的第二磁轴承之间的所述第二间隙的差值小于或等于所述预定值。

- 29、根据权利要求 25 所述的方法，用于如权利要求 19 所述的转子系统，其中，
开启所述径向轴承中的静压轴承，以使所述转轴移动至预设径向位置，包括：
开启所述第四磁轴承，控制所述转轴在所述多个第七磁性部件的磁力作用下在所述转
10 轴的径向方向上移动，以使所述转轴移动至预设径向位置；
所述方法还包括：

当所述转轴与所述第四磁轴承之间的第四间隙发生变化时，开启所述第四磁轴承，使
所述转轴在所述多个第七磁性部件的磁力作用下向远离间隙变小侧的方向移动；

- 所述转轴处于平衡径向位置之后，关闭所述第四磁轴承。
15 30、根据权利要求 25 所述的方法，用于如权利要求 20 所述的转子系统，其中，
开启所述径向轴承中的静压轴承，以使所述转轴移动至预设径向位置，包括：

开启所述第四磁轴承；和/或，启动外部气源，通过所述第二静压进气节流孔向所述第
四间隙处输送气体；

- 控制所述转轴在所述多个第七磁性部件的磁力作用下，和/或所述气体的推动作用在
20 所述转轴的径向方向上移动，以使所述转轴移动至预设径向位置。

31、一种燃气轮机发电机组，其中，包括进气道、燃烧室和权利要求 1 至 23 中任一
所述的转子系统，所述进气道与所述压气机的进气口连通，所述压气机的出气口与所述燃
烧室的进气口连通，所述燃烧室的出气口与所述透平的进气口连通。

- 32、根据权利要求 31 所述的燃气轮机发电机组，其中，所述进气道由电机的外壳和
25 燃气轮机发电机组的外壳形成。

33、一种燃气轮机发电机组的控制方法，用于如权利要求 31 或 32 所述的燃气轮机发
电机组，其中，所述方法包括：

- 开启所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承，以使所述转轴移动至预设径向位置，
使所述推力轴承的推力盘移动至预设轴向位置；
30

启动所述燃气轮机发电机组，空气经所述压气机压缩后进入所述燃烧室和所述燃烧室
内的燃料混合燃烧；所述燃烧室排出的高温高压气体对所述透平的涡轮进行冲击，使所述
涡轮旋转，所述涡轮通过所述转轴带动所述电机旋转发电；

- 所述转轴的转速加速至工作转速之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴
承；
35

所述燃气轮机发电机组停机时，开启所述径向轴承中的静压轴承和所述推力轴承中的
静压轴承；

所述转轴的转速减速至零之后，关闭所述径向轴承和所述推力轴承中的静压轴承；

其中，开启所述静压轴承包括：开启轴承中的磁轴承，和/或，向轴承中的静压进气节

流孔输送气体；

关闭所述静压轴承包括：关闭轴承中的磁轴承，和/或，停止向轴承中的静压进气节流孔输送气体。