(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 102664567 B
(45)授权公告日 2015.02.25

(21)申请号 201210147464.6

(22)申请日 2012.05.11

(73)专利权人 北京航空航天大学
地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72)发明人 汤继强 张永斌 房建成 孙津济 王春娥

(74)专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责任公司 11251
代理人 成金玉

(51)Int.Cl.
H02N 15/00(2006.01)
H02K 7/02(2006.01)

(56)对比文件
CN 1467901 A,2004.01.14,
CN 101540517 A,2009.09.23,
US 2003141773 A1,2003.07.31,
CN 2597738 Y,2004.01.07,
邓自刚、王家素、王素玉等．高温超导飞轮储能技术发展现状．《电工技术学报》.2008,第23卷(第12期),第1-10页．
汤继强,刘刚,房建成.Superconducting Energy Storage Flywheel.《Journal of Shanghai Jiaotong University(Science)》.2010,(第1期),76-83.

审查员 范励超

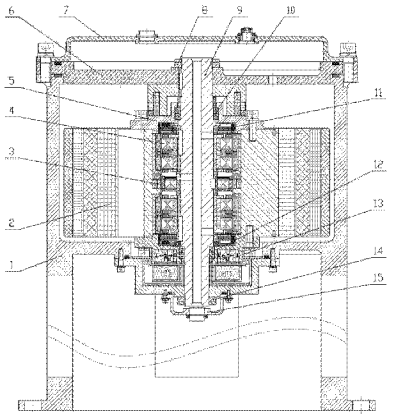
权利要求书1页 说明书5页 附图5页

(54)发明名称

一种高储能密度超导磁悬浮储能飞轮

(57)摘要

一种高储能密度超导磁悬浮储能飞轮,可以作为电力系统、交通工具以及航空航天系统的储能设备,其主要由底座、密封盖、定子轴安装架、主轴、轴向磁轴承、径向磁轴承、电机、轮体组件、超导磁轴承组成。主轴通过定子轴安装架固定于底座内腔中心,自上而下装有轴向磁轴承、径向磁轴承、电机、径向磁轴承、超导磁轴承;轮体组件位于主轴中心,通过轴向、径向磁轴承与主轴相连。本发明各个组件布局合理、紧凑,利用超导磁轴承和普通磁轴承共同作用实现了飞轮轮体的无接触悬浮,并且利用碳纤维轮体的高速旋转实现了高密度储能。



CN 102664567 B

1. 一种高储能密度超导磁悬浮储能飞轮，由静止部分和转动部分组成，其特征在于：静止部分包括：安装座 (1)、主轴 (9)、定子轴安装架 (6)、上轴向磁轴承 (5) 定子、上保护轴承 (10)、轴向 / 径向一体化位移传感器 (11)、径向磁轴承 (4) 定子、电机 (3) 定子、超导磁轴承 (13) 定子、下保护轴承 (12)、锁紧螺母 (8)、小端锁紧螺母 (14)、上端密封盖 (7) 和下端密封盖 (15)；转动部分包括轮体组件 (2)、上轴向磁轴承 (5) 转子、径向磁轴承 (4) 转子、电机 (3) 转子和超导磁轴承 (13) 转子；电机 (3) 位于超导磁悬浮储能飞轮的中间位置，其转子安装在轮体组件 (2) 的内腔中，其定子安装在主轴 (9) 上，两个径向磁轴承 (4) 位于电机 (3) 的轴向两端，其定子与主轴 (9) 连接在一起，其转子与轮体组件 (2) 的内腔连接在一起，在两个径向磁轴承 (4) 的轴向外侧各有一个固定在主轴 (9) 上的轴向 / 径向一体化位移传感器 (11)，轴向 / 径向一体化位移传感器 (11) 具有 4 个正交放置的径向探头和 2 个轴向探头组成，轴向探头完成轮体组件的轴向平动位移的检测，径向探头完成轮体组件 (2) 的两个径向平动位移和两个扭转角度的检测；在上轴向 / 径向一体化位移传感器 (11) 的轴向上侧是上保护轴承 (10)，在下轴向 / 径向一体化位移传感器 (11) 的轴向下侧是下保护轴承 (12)；在上保护轴承的上侧是轴向磁轴承 (5)，轴向磁轴承 (5) 定子安装在主轴 (9) 上，轴向磁轴承 (5) 转子固定于轮体组件 (2) 的轴向上侧，与上保护轴承 (10) 形成 0.10mm-0.15mm 的轴向保护间隙；超导磁轴承 (13) 位于下保护轴承 (12) 的轴向下侧与下保护轴承 (12) 之间形成 0.10mm-0.15mm 的保护间隙，超导磁轴承 (13) 的转子固定于轮体组件 (2) 的轴向下侧，定子部分与安装座 (1) 的下侧相连，超导磁轴承 (13) 转子的激励永磁体组合采用 5 个磁钢组成的 HALBACH 结构，磁场径向分布均匀；主轴 (9) 上端通过锁紧螺母 (8) 固定于定子轴安装架 (6) 上，定子轴安 装架 (6) 与安装座 (1) 相连，定子轴安装架 (6) 上端是上端密封盖 (7)，主轴 (9) 下端通过下端锁紧螺母 (14) 与超导磁轴承 (13) 的定子相连，下端密封盖 (15) 通过锁紧螺钉固定于超导磁轴承 (13) 定子部分的轴向下侧，起到密封作用。

2. 根据权利要求 1 所述的一种高储能密度超导磁悬浮储能飞轮，其特征在于：所述的主轴 (9) 不含有机械轴承支撑，径向磁轴承 (4)、轴向磁轴承 (5) 和超导磁轴承 (13) 为主轴起到径向和轴向支承定位作用。

3. 根据权利要求 1 所述的一种高储能密度超导磁悬浮储能飞轮，其特征在于：所述的轮体组件 (2) 采用的是高弹性合金 3J33 和 4 个碳纤维环组成的复合体，4 个碳纤维环之间通过过盈配合，提供足够大的径向压力。

一种高储能密度超导磁悬浮储能飞轮

技术领域

[0001] 本发明为一种高储能密度超导磁悬浮储能飞轮，利用飞轮转动的动能储存能量，利用电机实现电能和机械能之间的转换，可广泛应用于风力发电、太阳能发电、汽车供能、不间断电源、卫星储能、大功率机车、电磁炮、鱼雷等众多方面，具有巨大的研究价值和市场潜力。

背景技术

[0002] 能源问题是21世纪人类面临的巨大挑战，日益严重的能源紧缺已成为制约我国经济和稳定发展的重要因素。开发新能源，发展高效、环保的分布式储能和节能技术成为能源领域最为重要的研究课题。飞轮作为重要的新型机械式储能方式，它将能量或者是动能存储在高速旋转的飞轮轮体中，实现电能到机械能再到电能的转换。它由高速旋转的轮体、支撑轮体的轴承、高速发电/电动互逆式电机以及控制系统组成。储能密度是储能飞轮重要的技术指标，提高转速是实现高储能密度的最有效手段。高储能密度超导磁悬浮储能飞轮系统具有无能耗、本质自稳定的特性，成为国际上储能飞轮的重要发展趋势。开展新型高效率、低功耗高温超导磁悬浮储能飞轮的研究和应用，对解决我国能源问题有重要的现实意义。

[0003] 目前，机械轴承式储能飞轮已有比较广泛的应用，然而，由于摩擦发热大、飞轮寿命短、储能密度小等问题，使其大范围应用受到一定限制。随着磁悬浮轴承技术的发展和成熟，使这些问题迎刃而解。利用磁悬浮轴承技术可以使轮体处于悬浮无摩擦状态，这样可以允许飞轮的最高转速提高十倍甚至更多，大大提高了飞轮的储能密度，不仅寿命长，而且损耗也减小很多。

[0004] 现有磁悬浮储能飞轮技术，也存在许多不足之处。普通磁悬浮储能飞轮（专利号：200610011579.7）采用主动磁轴承、被动磁轴承或永磁偏置混合磁轴承，控制电流仍较大、发热量也大。目前的超导磁悬浮储能飞轮，为了使超导体中产生激励磁场，需另外增加机械升降机构，以使激励永磁体在超导体组合中产生激励磁场，这使得超导磁悬浮储能飞轮的结构变得复杂。

发明内容

[0005] 本发明的技术解决问题是：克服现有机械轴承飞轮和普通磁悬浮储能飞轮的不足，提供一种自稳定、转速高、储能密度大、体积小、重量轻、便于控制、寿命长的一种高储能密度超导磁悬浮储能飞轮。

[0006] 本发明的技术解决方案为：一种高储能密度超导磁悬浮储能飞轮，由静止部分和转动部分组成，静止部分包括：安装座、主轴、定子轴安装架、上轴向磁轴承定子、上保护轴承、轴向/径向一体化位移传感器、径向磁轴承定子、电机定子、超导磁轴承定子、下保护轴承、锁紧螺母、小端锁紧螺母、上端密封盖和下端密封盖；转动部分包括轮体组件、上轴向磁轴承转子、径向磁轴承转子、电机转子和超导磁轴承转子；电机位于超导磁悬浮储能飞轮的

中间位置，其转子安装在轮体组件的内腔中，其定子安装在主轴上，两个径向磁轴承位于电机的轴向两端，其定子与主轴连接在一起，其转子与轮体组件的内腔连接在一起，在两个径向磁轴承的轴向外侧各有一个固定在主轴上的轴向 / 径向一体化位移传感器，在两个轴向 / 径向一体化位移传感器的轴向两侧是上保护轴承和下保护轴承，在上保护轴承的上侧是轴向磁轴承，轴向磁轴承定子安装在主轴上，轴向磁轴承转子固定于轮体组件的轴向上侧，超导磁轴承位于下保护轴承的轴向下侧，超导磁轴承的转子固定于轮体组件的轴向下侧，定子部分与安装座的下侧相连，主轴上端通过锁紧螺母固定于定子轴安装架上，定子轴安装架与安装座相连，定子轴安装架上端是上端密封盖，主轴下端通过下端锁紧螺母与超导磁轴承的定子相连，下端密封盖通过锁紧螺钉固定于超导磁轴承定子部分的轴向下侧，起到密封作用。

[0007] 所述的径向磁轴承和轴向磁轴承均是采用永磁偏置和电磁控制的非接触主动磁悬浮轴承。所述的主轴不再含有机械轴承支撑，径向磁轴承、轴向磁轴承和超导磁轴承为主轴起到径向和轴向支承定位作用。所述的超导磁轴承转子的激励永磁体组合采用 5 个磁钢组成的 HALBACH 结构，磁场径向分布均匀并且轴向磁场梯度大，超导磁轴承自稳定性好。所述的轮体组件采用的是高弹性合金 3J33 和 4 个碳纤维环组成的复合体，4 个碳纤维环之间通过过盈配合，提供足够大的径向压力。所述的轴向磁轴承转子的内部与上保护轴承、超导磁轴承转子的内部与下保护轴承之间都形成 0.10mm-0.15mm 的径向和轴向保护间隙。所述的轴向 / 径向一体化位移传感器具有 4 个正交放置的径向探头和 2 个轴向探头组成，轴向探头完成轮体组件的轴向平动位移的检测，径向探头完成轮体组件的两个径向平动位移的检测。

[0008] 本发明的原理是：通过超导磁轴承和径向磁轴承共同作用，实现轮体组件的径向位移控制；通过超导磁轴承和轴向磁轴承的共同作用，实现轮体组件的轴向位移控制；超导磁轴承的作用为维持轮体组件径向和轴向位移的自稳定，径向磁轴承的作用是辅助超导磁轴承完成轮体组件的径向位移控制，轴向磁轴承的作用是辅助超导磁轴承完成轮体组件的轴向位移控制。

[0009] 超导磁轴承采用场冷的工作方式，先通过控制上轴向磁轴承使超导磁轴承转子部分向上移动偏离超导磁轴承的工作位置，然后低温系统向杜瓦组件中注入液氮，当超导体组合达到超导态之后，通过改变上轴向磁轴承的电流，使超导磁轴承转子下降，回到工作位置(平衡位置)。

[0010] 超导磁悬浮轴承的作用是维持轮体组件的轴向和径向自稳定性，当其转子的激励永磁体靠近超导体磁轴承定子时，会使超导磁轴承产生钉扎力，维持轮体组件的轴向悬浮状态，并且能够自动调节钉扎力的大小和方向，使其维持在平衡位置：当轮体组件有沿轴向向上移动的运动趋势时，钉扎力表现为吸引力，使轮体组件无法偏离平衡位置；当轮体组件有沿轴向向下移动的运动趋势时，钉扎力表现为斥力，使轮体组件维持在平衡位置；当系统的扰动超出超导磁轴承自稳定控制范围时，控制系统通过改变上轴向磁轴承定子线圈电流的大小，完成轮体组件的轴向位移控制。超导磁轴承在径向也会产生径向回复力，维持轮体组件在径向的自稳定性：当轮体组件有沿某一方向径向偏移的运动趋势时，超导磁轴承会产生反方向的切向回复力，使轮体组件维持在平衡位置；当径向扰动超过超导磁轴承自稳定控制范围时，控制系统会通过改变径向磁轴承定子线圈电流的大小，实现轮体组件的径

向位移控制。在轮体组件采用了 4 个比强度很高的碳纤维环，碳纤维环之间采用过盈配合，使碳纤维环不仅具有较大的周向力，并且径向压力也较大，从而允许轮体组件达到更高的转速，储能密度更高；通过对电机施加控制电流来控制飞轮轮体组件转速，实现能量的存储与释放。

[0011] 本发明与现有技术相比的优点在于：

[0012] （1）与机械飞轮相比，本发明采用的是磁悬浮结构，没有机械摩擦，损耗小，能量利用率高。

[0013] （2）与磁悬浮储能飞轮相比，分发明的轮体组件采用了 4 个比强度更高的碳纤维环，每个碳纤维环之间采用过盈配合，保证了碳纤维环之间有足够大的径向力，可以承受更高的转速，储能密度更高。

[0014] （3）在超导磁轴承的定子达到超导态之前，轴向磁轴承需要先提供较大的吸力，使超导磁轴承的激励永磁体远离超导磁轴承的定子，在定子达到超导态之后，再减小轴向磁轴承的控制电流，使转子下降，在超导磁轴承的定子中激励产生磁场，从而产生钉扎力，以使系统具有自稳定性。本发明中不再需要其它机械结构完成此功能。

[0015] （4）超导磁轴承的等效阻尼系数约为普通磁轴承的千分之一，可以降低使系统的损耗大大降低，提高系统能量利用率；

[0016] （5）本发明的超导磁轴承的激励永磁体采用 HALBACH 结构，磁场径向分布均匀保证切向力均匀；轴向磁场梯度大，可以提供更大的轴向力；并且漏磁小，不会对其他磁轴承和轴向 / 径向一体化传感器部件产生影响。

附图说明

[0017] 图 1 为本发明的整体结构图；

[0018] 图 2 为本发明的径向磁轴承结构图；

[0019] 图 3 为本发明的轴向磁轴承结构图；

[0020] 图 4 为本发明的超导磁轴承结构图；

[0021] 图 5 为本发明的轮体组件结构图；

[0022] 图 6 为本发明的电机结构图；

[0023] 图 7 为本发明的轴向 / 径向一体化位移传感器结构图。

具体实施方式

[0024] 图 1 为本发明的整体结构图。一种高储能密度超导磁悬浮储能飞轮，由静止部分和转动部分组成，静止部分包括：安装座 1、主轴 9、定子轴安装架 6、上轴向磁轴承 5 定子、上保护轴承 10、轴向 / 径向一体化位移传感器 11、径向磁轴承 4 定子、电机 3 定子、超导磁轴承 13 定子、下保护轴承 12、锁紧螺母 8、小端锁紧螺母 14、上端密封盖 7 和下端密封盖 15；转动部分包括轮体组件 2、上轴向磁轴承 5 转子、径向磁轴承 4 转子、电机 3 转子和超导磁轴承 13 转子；电机 3 位于超导磁悬浮储能飞轮的中间位置，其转子安装在轮体组件 2 的内腔中，其定子安装在主轴 9 上，两个径向磁轴承 4 位于电机 3 的轴向两端，其定子与主轴 9 连接在一起，其转子与轮体组件 2 的内腔连接在一起，在两个径向磁轴承 4 的轴向外侧各有一个固定在主轴 9 上的轴向 / 径向一体化位移传感器 11，在两个轴向 / 径向一体化位移传感

器 11 的轴向两侧是上保护轴承 10 和下保护轴承 12，在上保护轴承的上侧是轴向磁轴承 5，轴向磁轴承 5 定子安装在主轴 9 上，轴向磁轴承 5 转子固定于轮体组件 2 的轴向上侧，超导磁轴承 13 位于下保护轴承 12 的轴向下侧，超导磁轴承 13 的转子固定于轮体组件 2 的轴向下侧，定子部分与安装座 1 的下侧相连，主轴 9 上端通过锁紧螺母 8 固定于定子轴安装架 6 上，定子轴安装架 6 与安装座 1 相连，定子轴安装架 6 上端是上端密封盖 7，主轴 9 下端通过下端锁紧螺母 14 与超导磁轴承 13 的定子相连，下端密封盖 15 通过锁紧螺钉固定于超导磁轴承 13 定子部分的轴向下侧，起到密封作用。

[0025] 图 2 为本发明的径向磁轴承 4 的结构图，分为转子部分和定子部分，转子部分与轮体组件 2 相连，定子部分与主轴 9 相连。转子部分包括：径向磁轴承转子安装套 401、径向磁轴承转子导磁环 402、径向磁轴承转子隔磁套 403、径向磁轴承转子叠层 404、径向磁轴承转子螺纹环 405；定子部分包括：径向磁轴承定子安装套 406、线圈绕组 407、径向磁轴承定子叠层 408、径向磁轴承定子导磁环 409、径向磁轴承定子磁钢 410、径向磁轴承定子隔套 411、径向磁轴承定子螺纹环 412。定子安装套 406 位于径向磁轴承的中心，径向外侧是两个定子导磁环 409 和一个磁钢 410，定子导磁环 409 和磁钢 410 的外侧是一个定子隔套 411 和两个定子叠层 408，定子叠层上绕有线圈绕组 407，导磁环 402 和定子叠层 408 等由定子螺纹环 412 固定于定子安装套 406 上；径向磁轴承 4 转子最外侧是转子安装套 401，转子安装套 401 内侧是转子导磁环 402，转子导磁环内侧是转子隔磁套 403 和转子叠层 404，转子导磁环 402、转子叠层 403 等组件由转子螺纹环固定于转子安装套上。径向磁轴承 4 的定子与转子之间形成 0.29mm-0.31mm 的工作间隙。当给径向磁轴承定子线圈绕组 407 通电流时，可以在径向磁轴承定子与转子之间的工作间隙中产生感应磁场，控制转子在径向方向的移动。

[0026] 图 3 为本发明的轴向磁轴承 5 的结构图，包括定子和转子两部分，定子部分通过键等组件固定于主轴 9 上，转子部分通过螺栓组件与轮体组件 2 相连接。轴向磁轴承转子 51 由电工纯铁制成；轴向磁轴承定子包括：轴向磁轴承定子磁环 52、轴向磁轴承定子磁钢 53、轴向磁轴承线圈绕组 54、轴向磁轴承定子座 55。轴向磁轴承定子座 55 的环形内腔中装有线圈绕组 54 和定子磁钢 53，定子磁钢 53 由定子磁环 52 固定于定子安装座 55 上。定子磁环 52 和定子安装套 55 之间形成 0.6mm 的第二气隙；轴向磁轴承 5 的定子和转子之间形成 0.25mm-0.75mm 的工作间隙。通过控制定子线圈绕组 54 中电流大小，可以控制轴向磁轴承 5 定子和转子之间工作间隙中电磁力的大小，从而控制转子的轴向移动。

[0027] 图 4 为本发明的超导磁轴承 13 的结构图，下端为超导磁轴承定子，上端为激励永磁体转子。超导磁轴承 13 的定子固定于安装座上，包括杜瓦安装架 131、杜瓦体 132、超导块固定架 133、超导块组合 134、压盖 135；激励永磁体转子与轮体组件 2 相连接，包括激励永磁体安装架 136、激励永磁体组合 137、屏蔽环 138 和永磁体挡圈 139。杜瓦安装架 131 主要是起到支撑作用，杜瓦体安装架 131 的内腔中是杜瓦体 132，杜瓦体 132 内部装有超导体安装架 133，杜瓦体安装架 133 中固定有超导体组合 134，超导体组合 134 由压盖 135 固定；超导磁轴承 13 转子位于定子的上方，与定子形成 0.25-0.75mm 的工作间隙，激励永磁体安装架 136 为主要的支撑部件，激励永磁体组合 137 由永磁体挡圈 139 固定于激励永磁体安装架 136 的环形内腔中。超导块组合 134 采用了 5 个环形磁钢，充磁方式为：中间磁钢向上充磁，外侧磁钢向外充磁，径向内侧磁钢向内充磁，径向最外侧和最内侧的磁钢向下充磁。超导磁轴承 13 定子中杜瓦体 132 和超导块固定架 133 之间充满液氮，为超导块组合提供低温

环境。图中外接设备为液氮测量装置和注入装置。

[0028] 图 5 为本发明的轮体组件 2 的结构图，包括：辐射状转子 21、碳纤维内环 22、碳纤维中环 23、碳纤维次外环 24 和碳纤维最外环 25。本发明中轮体组件 2 外圈采用的是碳纤维环，比强度是高强度钢的 2.8 倍，储能密度也是高强度钢的 2.8 倍，实现了高密度储能。单个碳纤维环采用分层缠绕的结构，周向力很大，但是径向压应力较小，碳纤维环之间采用过盈配合，保证了碳纤维环之间有足够大的径向压应力，保证了转子结构的稳定性。

[0029] 图 6 为本发明的电机 3 结构图，主要由转子叠层 31、转子磁钢 32、定子绕组 33、电机定子骨架 34、定子叠层 35 和环氧树脂 36 组成。其中电机定子骨架 34、定子绕组 33 和定子叠层 35 为静止部分，其余为转动部分，电机 3 的定子绕组 33 由环氧树脂 36 灌封固定于定子骨架 34 上。电机 3 不再含有机械轴承，径向磁轴承 4、轴向磁轴承 5 同时为电机 3 起到径向和轴向支撑定位作用。电机单边间隙为 0.396mm-0.404mm。

[0030] 图 7 为本发明的轴向 / 径向一体化位移传感器 11 结构图，由传感器底座 111、轴向位移传感器探头 112、径向位移传感器探头 113 和传感器封盖 114 组成。四个径向位移传感器探头 113 均布在传感器底座 111 的外圆周上，分别沿 +X、-X、+Y、-Y 方向分布，两个轴向位移传感器探头 112 位于传感器座内的端面上，分别沿 45° 和 225° 方向分布；径向位移传感器探头 113 和径向探测体之间形成径向探测间隙，轴向位移传感器探头 112 与轴向探测体之间形成轴向探测间隙，径向探测间隙为 0.25mm-1.25mm，轴向探测间隙为 0.5mm-1.5mm。

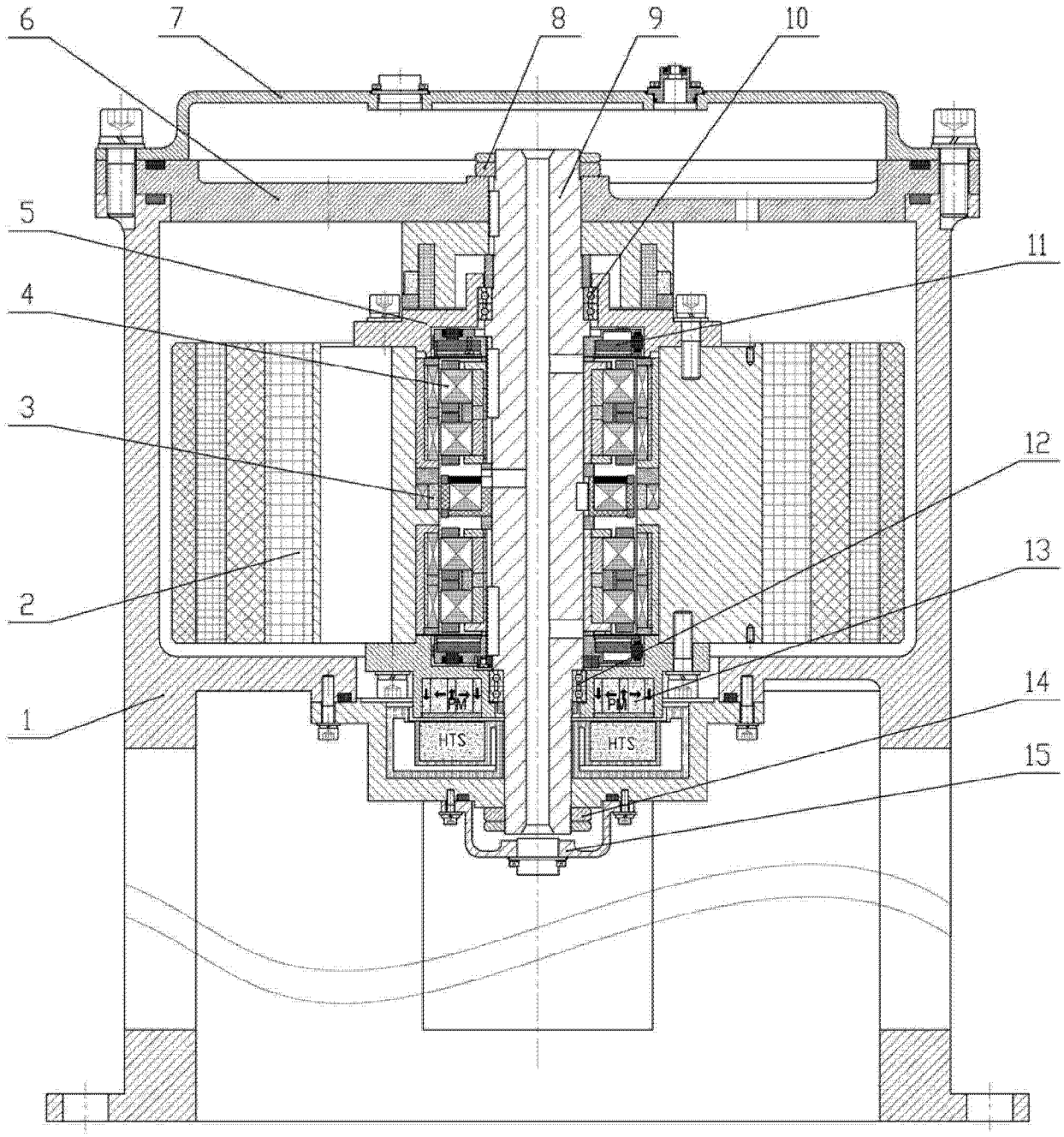


图 1

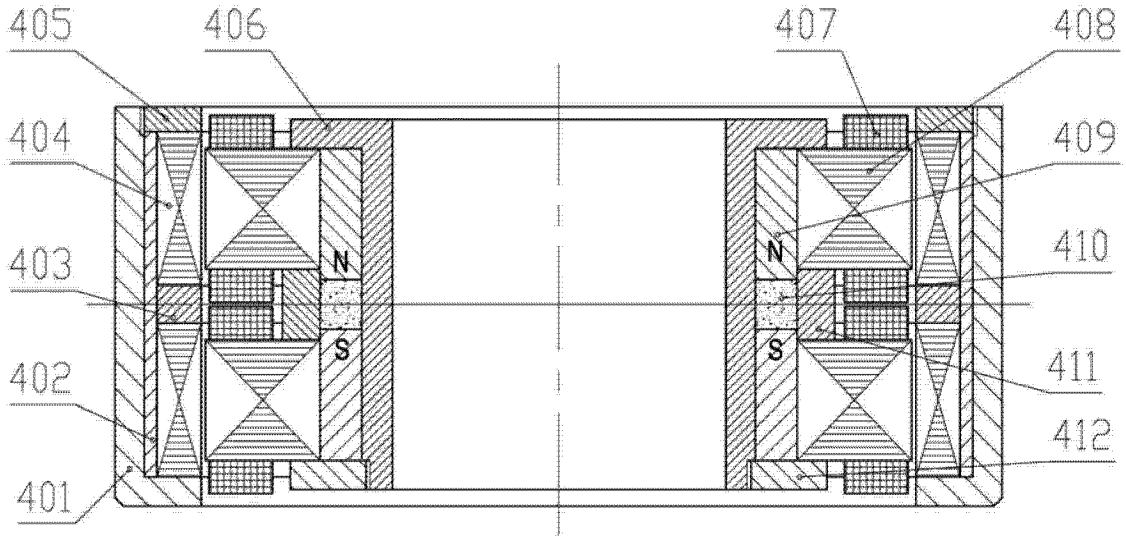

405
406
407
408
404
409
403
410
402
411
401
412
N
S
N
S

图 2

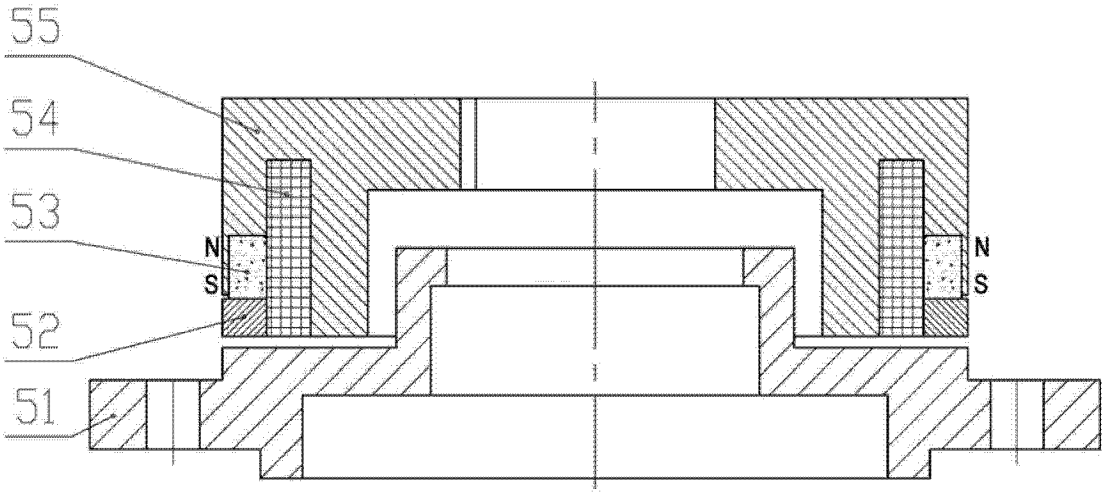

55
54
53
52
51
N
S
N
S

图 3

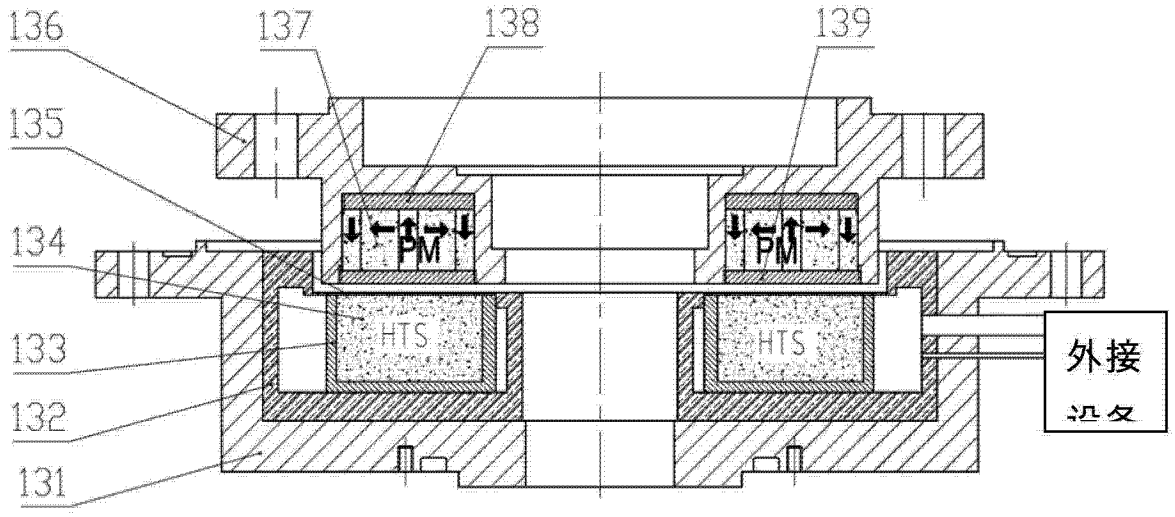


图 4

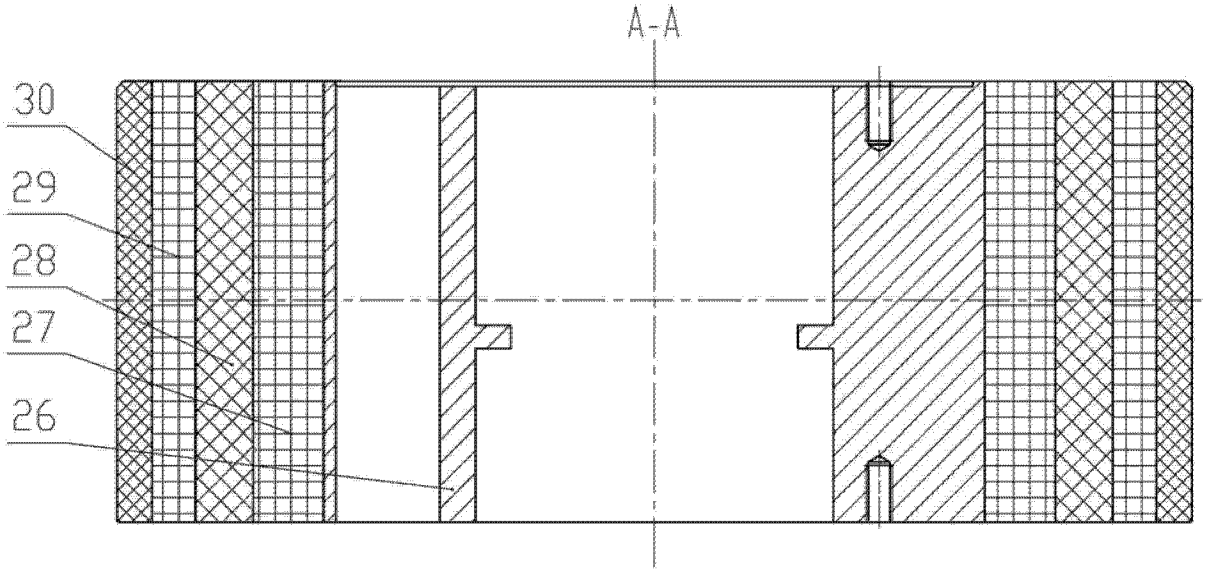


图 5a

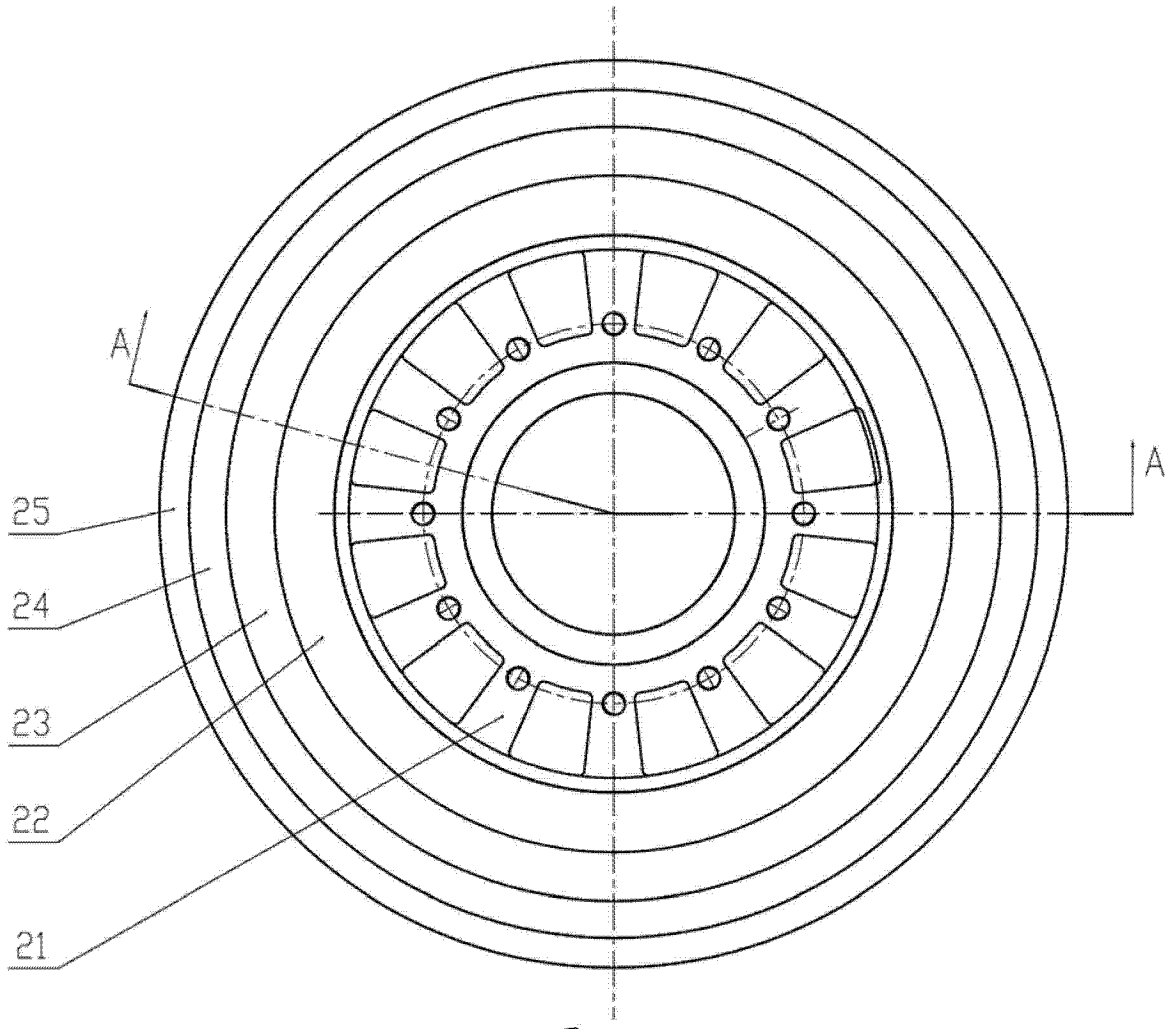


图 5b

图 5

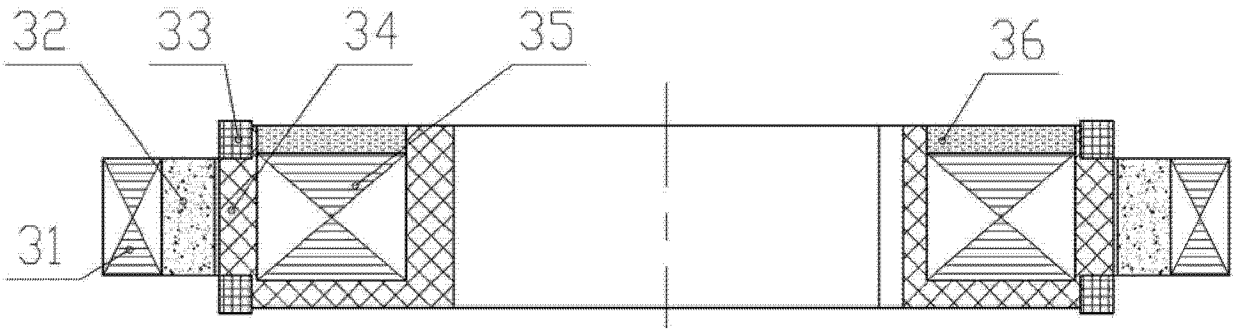


图 6

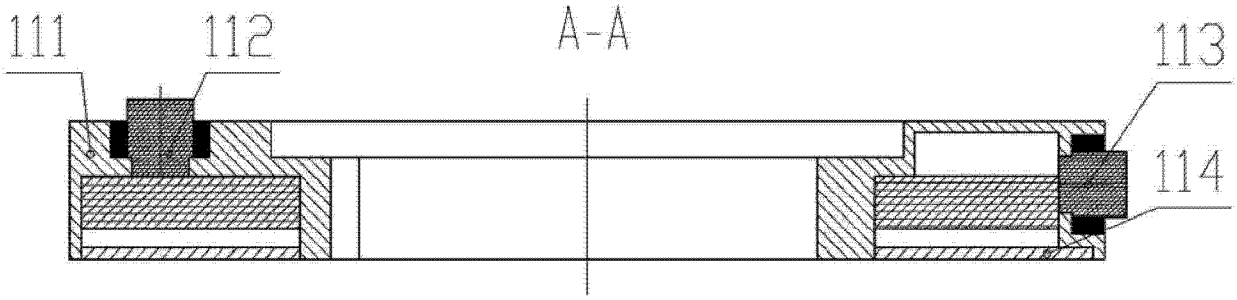


图 7a

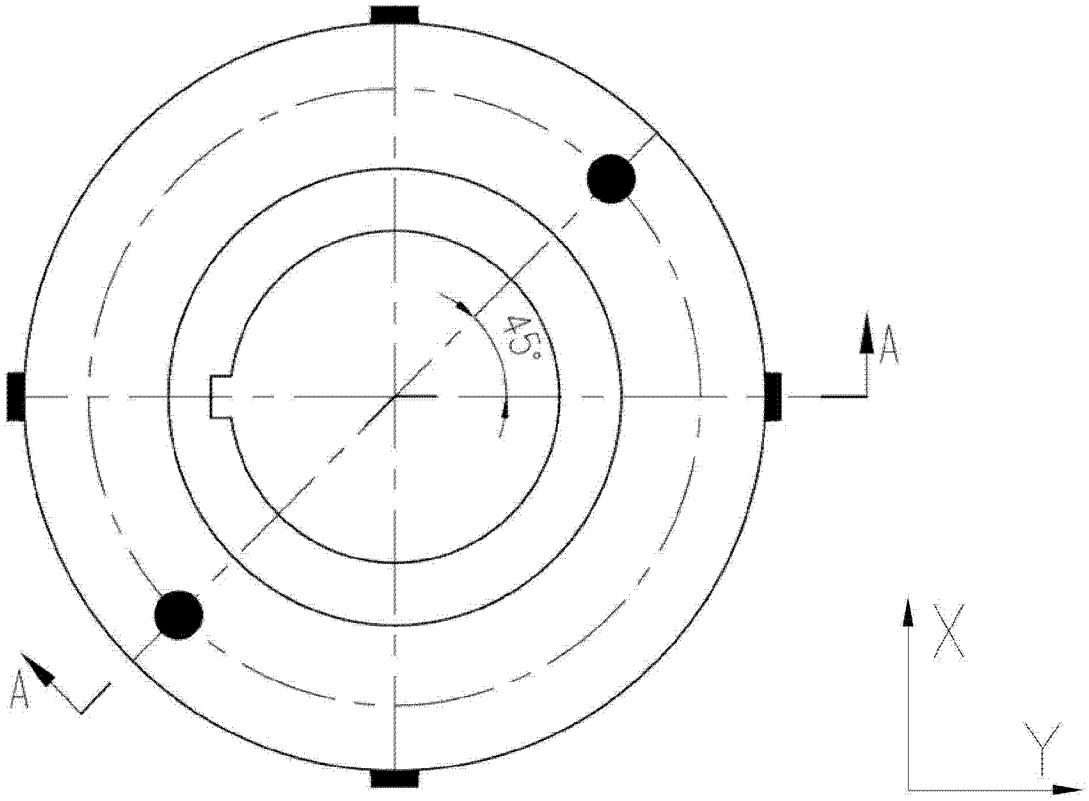


图 7b

图 7