

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2019 年 1 月 31 日 (31.01.2019)



(10) 国际公布号
WO 2019/019243 A1

- (51) 国际专利分类号:
F16C 32/04 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2017/099222
- (22) 国际申请日: 2017 年 8 月 28 日 (28.08.2017)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201710623197.8 2017 年 7 月 27 日 (27.07.2017) CN
- (71) 申请人: 江苏大学 (JIANGSU UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。
- (72) 发明人: 张维煜 (ZHANG, Weiyu); 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 杨恒坤 (YANG, Hengkun); 中国江苏省镇江市

学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 朱焯秋 (ZHU, Huangqiu); 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。

(74) 代理人: 北京德崇智捷知识产权代理有限公司 (JW IP LAW FIRM); 中国北京市朝阳区酒仙桥路 14 号 A5 楼 7 层 701, Beijing 100015 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) **Title:** ALTERNATING-CURRENT AND DIRECT-CURRENT FIVE-DEGREE-OF-FREEDOM HYBRID MAGNETIC BEARING HAVING DUAL SPHERICAL SURFACES FOR VEHICLE-MOUNTED FLYWHEEL BATTERY

(54) 发明名称: 一种车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承

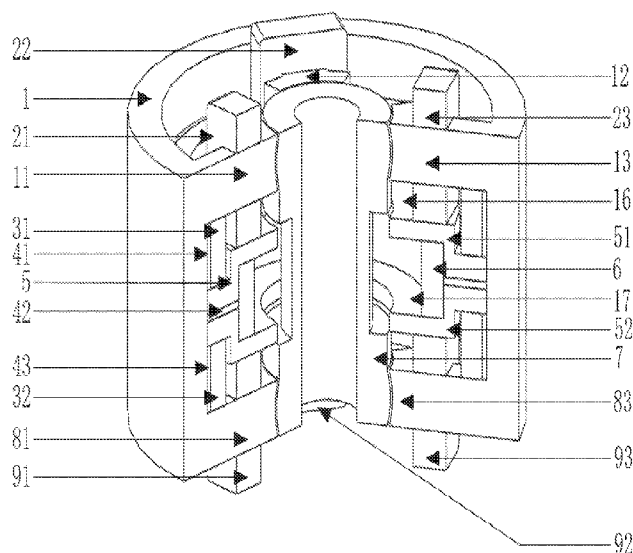


图 1

(57) **Abstract:** Provided is an alternating-current and direct-current five-degree-of-freedom hybrid magnetic bearing having dual spherical surfaces for a vehicle-mounted flywheel battery; a radial stator consists of upper and lower radial stators (1, 8) arranged coaxially and having integrally connected yokes; three radial stator poles (11, 12, 13, 81, 82, 83) are arranged along the circumferential direction of each of the upper end of the yoke of the upper radial stator (1) and the lower end of the yoke of the lower radial stator (8); the inner surface of each radial stator pole (11, 12, 13, 81, 82, 83) is a concave spherical surface (211, 811); the upper and lower ends of the intermediate cylinder (73) of a rotor (7) are an upper connection body (72) connected to an upper-end cylindrical body (71) and a lower connection body (75) connected to a lower-end cylindrical body (74), respectively; the side walls of the upper and lower cylindrical



WO 2019/019243 A1

SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

bodies (71, 75) are convex spherical surfaces (711, 751); each concave spherical surface (211, 811) correspondingly faces, at its top and bottom, a convex spherical surface (711, 751); an axial stator (5) is nested outside the intermediate cylinder (73); the upper side of an upper axial stator (51) and the lower side of the lower axial stator (52) are each equipped with annular permanent magnets (31, 32); the opposing faces of the upper and lower radial stators (1, 8) and the rotor (7) are spherical structures, eliminating a gyroscopic effect; when the rotor (7) of the magnetic bearing deflects or deviates, the electromagnetic force points to the spherical center of the rotor (7), thus reducing the disturbance torque generated on the rotor (7) by the stator magnetic poles.

(57) 摘要: 一种车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承, 径向定子由轭部连为一体的上、下部径向定子 (1、8) 同轴布置组成, 上部径向定子 (1) 轭部上端和下部径向定子 (8) 轭部下端各自沿圆周方向均匀布置三个径向定子极 (11、12、13、81、82、83), 每个径向定子极 (11、12、13、81、82、83) 内端表面均为凹球面 (211、811), 转子 (7) 的中间圆柱体 (73) 上下两端分别是连接上端柱体 (71) 的上连接体 (72) 和连接下端柱体 (75) 的下连接体 (74), 上、下端柱体 (71、75) 的侧壁均为凸球面 (711、751); 每个凹球面 (211、811) 上下对应地正对着凸球面 (711、751), 中间圆柱体 (73) 外嵌套轴向定子 (5), 上部轴向定子 (51) 上侧和下部轴向定子 (52) 的下侧各装有环形永磁体 (31、32); 上、下部径向定子 (1、8) 和转子 (7) 相对面都采用球面结构, 能够消除陀螺效应的产生, 当磁轴承的转子 (7) 发生偏转或偏移时, 电磁力会指向转子 (7) 球心, 降低定子磁极对转子 (7) 产生的干扰力矩。

一种车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承

技术领域

本发明涉及非机械接触磁悬浮轴承，特指一种交直流五自由度混合磁轴承，适用于电动汽车的车载飞轮电池的磁悬浮支承。

背景技术

目前，制约电动汽车发展的主要难题是车载动力电池的性能。车载飞轮电池是利用磁悬浮支承和飞轮的旋转惯量来实现能量存储的，其具有充电效率高、比功率大、质量小、无污染和寿命长等优势。现有飞轮电池通常是采用电磁-永磁混合型磁轴承作为飞轮转子的支承，实现径向和轴向五个自由度的悬浮。这种混合型磁轴承的定子是圆柱形结构，相应的转子也采用圆柱形。采用这种结构的磁轴承虽能保证飞轮电池的稳定悬浮运行，但当飞轮电池受到外界干扰时，不可避免会引起陀螺效应。由于车载飞轮电池装置在车辆启动、急停、转弯等动作时，都会引起飞轮轴在约束方向上受到很大的陀螺力矩，从而使飞轮轴或磁轴承受到很大的附加压力，因此现有的磁轴承结构很难避免陀螺效应的产生。另外，现有磁轴承在轴向控制的设计上，通常通过在转子上加装推力盘来实现，这样的设计不但加重了转子的质量而且在飞轮电池高速运转时也加大了旋转轴的摩擦和风阻损失；此外，推力盘会增加转子圆周线速度，限制了转子的最高转速。

发明内容

本发明的目的是为了解决现有飞轮电池用磁轴承存在的转子质量加重、易产生陀螺效应等问题，提出一种结构紧凑、体积小、质量轻且能抑制陀螺效应的车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承。

本发明一种车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承通过以下技术方案实现：转子外同轴套有轴向定子和径向定子，所述径向定子由轭部连为一体的上、下部径向定子同轴布置组成，上下轭部形成径向定子极腔，上部径向定子轭部上端和下部径向定子轭部下端各自沿圆周方向均匀布置三个径向定子极，每个径向定子极的内端表面均为凹球面，在每个径向定子极上绕有径向控制线圈；所述转子最中间是中间圆柱体，上下两端各是相同的上端柱体和下端柱体，中间圆柱体的上下两端分别是连接上端柱体的上连接体和连接下端柱体的下连接体，上、下端柱体的侧壁均为凸球面；上、下部径向定子极内端的每个凹球面上下对应地正对着上、下端柱体的凸球面，凹球面和凸球面之间有气隙，正对着的凹球面和凸球面的球心重合；所述中间圆柱体外固定嵌套轴向定子，轴向定子由结构相同且同轴布置的圆盘形的上、下部轴向定子组成，上、下部轴向定子

之间叠压圆盘形的隔磁铝环，上、下部轴向定子和隔磁铝环的内腔形成轴向定子腔，轴向定子腔内是紧贴其内壁的轴向控制线圈；上部轴向定子的上侧和下部轴向定子的下侧各装有一个紧密叠压在轴向定子和径向定子极之间的环形永磁体，上、下部环形永磁体的结构相同且均轴向充磁，充磁方向相反。

本发明与现有技术相比的有益效果在于：

1、本发明双球面混合磁轴承的定子和转子相对面都采用球面结构，可有效减少磁轴承的轴向尺寸，当磁轴承的转子发生偏转或偏移时，电磁力会指向转子球心，从而降低定子磁极对转子产生的干扰力矩，提高磁轴承的控制精度。定子和转子的球面结构还能够消除陀螺效应的产生，球面结构更有利于多维运动，更加有利于空间上进行定位和工作，另外，球面结构使得气隙磁场分布更加均匀和对称，便于对转子进行控制与分析。

2、本发明充分利用磁轴承的径向定子空间，将永磁体分别安装在上径向定子腔和下径向定子腔中，减小了磁轴承的轴向尺寸，极大限度抑制了转子的陀螺效应，并且结构进一步紧凑。

3、本发明在轴向控制方面采用了无推力盘的转子结构，降低了转子的质量，且减少了旋转轴的摩擦和风阻损失，更有利于转子的高速运行，提高了轴向的控制精度。

4、本发明的轴向线圈空间大，因此可实现轴向的大承载力。

5、本发明采用五自由度集成结构，集成度高，缩短了轴的长度，减小了飞轮电池的体积，节约了材料。

附图说明

图 1 为本发明的内部结构剖视图；

图 2 为本发明的俯视图；

图 3 为图 1 中径向定子的局部结构图；

图 4 为图 1 中转子的结构立体图；

图 5 为图 3 中径向定子和图 4 中转子的装配结构图；

图 6 为图 1 中轴向定子的立体结构图；

图 7 为图 6 中轴向定子和图 4 中转子的装配结构图；

图 8 为图 1 中径向定子、径向控制线圈、轴向定子以及环形永磁体的装配结构主视图；

图 9 为本发明静态被动悬浮的原理图；

图 10 为本发明径向二自由度平衡控制的原理图；

图 11 为本发明径向旋转二自由度平衡控制的原理图；

图 12 为本发明轴向单自由度平衡控制的原理图。

图中：1.上部径向定子；5.轴向定子；6.轴向控制线圈；7.转子；8.下部径向定子；11、12、13.上部径向定子极；16.径向定子极腔；17.轴向定子腔；21、22、23.上部径向控制线圈；31.上部环形永磁体；32.下部环形永磁体；41.上部隔磁铝环；42.隔磁铝环；43.下部隔磁铝环；51.上部轴向定子；52.下部轴向定子；53.大圆盘；54.中间圆环体；55.小圆盘；71.上端柱体；72.上连接体；73.中间圆柱体；74.下连接体；75.下端柱体；81、82、83.下部径向定子极；91、92、93.下部径向线圈；211.上凹球面；711.上凸球面；751.下凸球面；811.下凹球面。

具体实施方式

参见图 1 和图 2，本发明正中间是转子 7，在转子 7 外同轴套有轴向定子 5 和径向定子。

径向定子由上部径向定子 1 和下部径向定子 8 组成，上部径向定子 1 和下部径向定子 8 沿转子 7 的轴向上同轴布置。上部径向定子 1 和下部径向定子 8 的轭部沿转子 7 的轴向上同轴上下布置，并且上下轭部连为一体，上下轭部形成一个中空圆柱体，该中空圆柱体的内腔即是径向定子极腔 16。

上部径向定子 1 的上端面和转子 7 的上端面平齐，下部径向定子 8 的下端面和转子 7 的下端面平齐。

在径向定子极腔 16 内，上部径向定子 1 的轭部上端和下部径向定子 8 的轭部下端各自沿圆周方向均匀布置三个径向定子极，分别是三个上部径向定子极 11、12、13 和三个下部径向定子极 81、82、83，三个上部径向定子极 11、12、13 和三个下部径向定子极 81、82、83 的形状完全相同，上下投影重叠。三个上部径向定子极 11、12、13 的上端面和上部径向定子 1 的轭部上端面平齐，三个下部径向定子极 81、82、83 的下端面和下部径向定子 8 的轭部下端面平齐。在每个径向定子极上绕有径向控制线圈，分别是上部径向控制线圈 21、22、23 和下部径向线圈 91、92、93，6 个完全相同的径向控制线圈一一对应地绕制于上部径向定子极 11、12、13 和下部径向定子极 81、82、83。

三个上部径向定子极 11、12、13 和三个下部径向定子极 81、82、83 的内端都带有极靴，极靴表面为凹球面。如图 3 所示，仅以上部径向定子极 11 和下部径向定子极 81 为图例说明：上部径向定子极 11 的极靴表面加工为上凹球面 111，下部径向定子极 81 的极靴表面加工为下凹球面 811。

如图 4 所示, 转子 7 是在轴向上上下对称的结构, 最中间是一个中间圆柱体 73, 上下两端各是相同的中空的柱体, 分别是上端柱体 71 和下端柱体 75。在中间圆柱体 73 的上下两端分别是连接上端柱体 71 的上连接体 72 和连接下端柱体 75 的下连接体 74。上端柱体 71 和下端柱体 75 的侧壁为凸球面结构, 上端柱体 71 的侧壁是上凸球面 711, 下端柱体 75 的侧壁是下凸球面 751。整个转子 7 在轴向上外径由中间向两端逐渐增大, 中间圆柱体 73 的外径要小于上连接体 72 和下连接体 74 的外径, 上连接体 72 和下连接体 74 的外径与上端柱体 71 和下端柱体 75 的上下端面外径相等。

如图 1 所示, 三个上部径向定子极 11、12、13 和三个下部径向定子极 81、82、83 内端的每个凹球面上对应地在径向上正对着转子 7 的上端柱体 71 和下端柱体 75 的凸球面, 凹球面和凸球面之间保持 0.5mm 的径向气隙, 凹球面和凸球面在轴向上的厚度相等。当转子 7 处于平衡位置时, 转子 7 的上凸球面 711 和上部径向定子极 11、12、13 的凹球面的球心重合, 转子 7 的下凸球面 751 和下部径向定子极 81、82、83 的凹球面的球心重合。图 5 仅以上部径向定子极 11 和下部径向定子极 81 与转子 7 的布置结构为图例说明: 上部径向定子极 11 的上凹球面 211 与转子 7 的上凸球面 711 在径向上相配, 两者之间留有 0.5mm 径向间隙; 下部径向定子极 81 的下凹球面 811 与转子 7 的下凸球面 751 在径向上相配, 两者之间留有 0.5mm 径向间隙。

如图 1 所示, 在转子 7 的中间圆柱体 73 外, 位于径向定子极腔 16 内的中间固定嵌套圆盘形的轴向定子 5, 轴向定子 5 在轴向上位于上部径向控制线圈 21、22、23 和下部径向线圈 91、92、93 之间, 并且与径向控制线圈不接触。轴向定子 5 由上部轴向定子 51 和下部轴向定子 52 组成, 上部轴向定子 51 和下部轴向定子 52 的结构相同, 都是圆盘形, 沿中间圆柱体 73 的轴向上下同轴布置。在上部轴向定子 51 和下部轴向定子 52 之间固定叠压一个圆盘形的隔磁铝环 42, 上部轴向定子 51、下部轴向定子 52 和隔磁铝环 42 的外径均与径向定子极腔 16 的内径相同, 并且均固定连接在径向定子极腔 16 的内壁上。上部轴向定子 51、下部轴向定子 52 和隔磁铝环 42 的内腔形成轴向定子腔 17, 在轴向定子腔 17 内通过线圈架同轴固定一个轴向控制线圈 6, 轴向控制线圈 6 紧贴轴向定子腔 17 的内壁, 且同套在中间圆柱体 73 外, 与中间圆柱体 73 之间留有间隙。

如图 6 和图 1 所示, 轴向定子 5 的上部轴向定子 51 和下部轴向定子 52 各由一个大圆盘 53、一个中间圆环体 54 以及一个小圆盘 55 在轴向上依序连接组成。隔磁铝环 42 叠压在上下两个相同的大圆盘 53 之间, 隔磁铝环 42 的内外径与大圆盘 53 的内外径对应相等。大圆盘 53 端面经中间圆环体 54 连接小圆盘 55, 中间圆环体 54 的内径等于大圆

盘 53 的内径，中间圆环体 54 的外径等于小圆盘 55 的外径但远小于大圆盘 53 的外径，小圆盘 55 的内径小于大圆盘 53 的内径，如此，在小圆盘 55 的外壁和大圆盘 53 的外壁之间形成台阶，具有径向空隙。上部轴向定子 51 的小圆盘 55 的上端面距离上部径向定子极 11、12、13 的轴向距离与下部轴向定子 52 的小圆盘 55 的下端面距离下部径向定子极 81、82、83 的轴向距离相等。轴向控制线圈 6 紧贴在两个中间圆环体 54 和两个大圆盘 53 的内壁上，当轴向控制线圈 6 通电时，圆环体 54 内能产生轴向控制磁场。

如图 7 所示，当转子 7 处于平衡位置时，上部轴向定子 51 的小圆盘 55 的上端面与转子 7 的上连接体 72 的下端面在轴向上保持 0.5mm 的轴向气隙。上部轴向定子 51 的小圆盘 55 的内径与转子 7 的上连接体 72 的外径相等。同样，下部轴向定子 52 的小圆盘 55 的下端面与转子 7 的下连接体 74 的上端面在轴向上保持 0.5mm 的轴向气隙，下部轴向定子 52 的小圆盘 55 的内径与转子 7 的下连接体 74 的外径相等。

如图 8 和图 1 所示，在上部轴向定子 51 的大圆盘 53 的上侧以及下部轴向定子 52 的大圆盘 53 的下侧各安装一个环形永磁体，分别是上部环形永磁体 31 和下部环形永磁体 32，上部环形永磁体 31 和下部环形永磁体 32 的结构相同，均采用高性能稀土材料钕铁硼制成，均轴向充磁，上部环形永磁体 31 和下部环形永磁体 32 的充磁方向相反，永磁体的 S 极相面对面。环形永磁体紧密叠压在轴向定子 5 和径向定子极之间，上部环形永磁体 31 叠压在上部轴向定子 51 的大圆盘 53 和上部径向定子极 11、12、13 之间，下部环形永磁体 32 叠压在下部轴向定子 52 和下部径向定子极 81、82、83 之间。上部环形永磁体 31 和下部环形永磁体 32 的内径大于小圆盘 55 的外径，这样就保证环形永磁体与轴向定子 5 的中间圆环体 54 和小圆盘 55 之间留有一定的径向间隙，保证轴向定子 5 内的轴向磁路不受环形永磁体的影响。

在一个环形永磁体外套有一个隔磁铝环，隔磁铝环同时固定嵌套在环形永磁体的外壁和径向定子腔轴 16 的内壁上。上部环形永磁体 31 外套有上部隔磁铝环 41，下部环形永磁体 32 外套有下部隔磁铝环 43，上部隔磁铝环 41 和下部隔磁铝环 43 的结构完全相同，轴向高度与上部环形永磁体 31 和下部环形永磁体 32 相等。上部隔磁铝环 41 和下部隔磁铝环 43 先通过过盈配合分别紧密套在上部环形永磁体 31 和下部环形永磁体 32 的外壁上，再通过冷压焊的方式与径向定子腔轴 16 的内壁紧密连接。环形永磁体和隔磁铝环与上部径向控制线圈 21、22、23 和下部径向线圈 91、92、93 之间相互不接触、不干涉。

本发明工作时，能实现转子 7 的静态被动悬浮、径向二自由度平衡、径向扭转二自

由度平衡以及轴向单自由度平衡。在轴向控制方面，轴向控制线圈通以直流电与轴向定子组成电磁铁，通过改变控制直流电的大小和方向来改变轴向上转子受力大小与方向，从而实现对轴向一个自由度的控制。在径向控制方面，置于上下各一组三磁极径向球面定子上的径向控制线圈通以交流三相电，通过改变控制线圈电流大小，实现了径向上四个自由度的精准控制。具体如下：

静态被动悬浮的实现：参见图 9，上部环形永磁体 31 和下部环形永磁体 32 产生的偏置磁通如图 10 中的虚线及箭头所示，上部环形永磁体 31 产生的偏置磁通从上部环形永磁体 31 的 N 极开始经过上部径向定子极 11，再依次经过径向气隙、转子 7 的上凸球面 711、转子 7 的上连接体 72、轴向气隙、轴向定子 5 的上部轴向定子 51，最后回到上部永磁体 31 的 S 极。同样，下部环形永磁体 32 产生的偏置磁通从下部环形永磁体 32 的 N 极开始经过下部径向定子极 81，再依次经过径向气隙、转子 7 的下凸球面 751、转子 7 的下连接体 74、轴向气隙、轴向定子 5 的下部轴向定子 52，最后回到下部环形永磁体 32 的 S 极。当转子 7 处于中心平衡位置时，转子 7 的中心轴与磁轴承的轴向中心轴重合，在径向上，转子 7 的上端柱体 71 和下端柱体 75 的凸球面与上部径向定子极 11 和下部径向定子极 81 的凹球面之间的磁通完全相等，因此转子 7 在径向上受电磁力平衡，实现转子 7 径向稳定悬浮。轴向上，上部轴向定子 51 与转子 7 之间的轴向气隙磁通和下部轴向定子 52 与转子 7 之间的轴向气隙磁通完全相等，转子 7 在轴向上受到的电磁力平衡，因此，实现转子 7 轴向稳定悬浮。

径向二自由度平衡的实现：参见图 10，当转子 7 在径向二自由度 X、Y 受到干扰而偏离平衡位置时，对上部径向控制线圈 21、22、23 与下部径向控制线圈 91、92、93 通电，产生的单磁通指向与位置偏移相反的方向，产生相应的径向控制磁悬浮力，使转子 7 回到径向平衡位置。假设转子 7 在径向 Y 轴正方向上受到扰动而偏移平衡位置，上部径向控制线圈 21、22、23 与下部径向控制线圈 91、92、93 通电，产生的控制磁通如图 10 是粗实线及箭头所示，上部环形永磁体 31 和下部环形永磁体 32 产生的偏置磁通如图 10 中的虚线及箭头所示，经过上部径向定子极 11、13 以及下部径向定子极 81、83 中的偏置磁通和控制磁通方向相反，而总磁通减弱。上部径向定子极 22、下部径向定子极 82 中的偏置磁通和控制磁通方向相同，进而总磁通增强，使得径向在 Y 轴负方向上的单磁通加强，转子 7 受到 Y 负方向的磁拉力 F1、F2 而回到平衡位置。

径向扭转二自由度平衡的实现：参见图 11，当转子 7 在径向扭转二自由度 (θ_x, θ_y)

受到干扰而偏离平衡位置时，对上部径向控制线圈 21、22、23 与下部径向控制线圈 91、92、93 通电，其产生的单磁通指向与位置偏移相反的方向，产生扭矩，使转子 7 回到径向平衡位置。假设转子 7 受到扰动在 Y 正方向上发生扭转，扭转角度为 θ_x ，由上部径向控制线圈 21、22、23 通电后产生的控制磁通如图 11 中粗实线及箭头所示，上部环形永磁体 31 和下部环形永磁体 32 产生的偏置磁通如图 11 中的虚线及箭头所示，可以看出，上部径向定子极 21、23 中的偏置磁通和控制磁通方向相反，上部径向定子极 21、23 中的总磁通减弱，而上部径向定子极 22 中的转子偏置磁通和控制磁通方向相同，总磁通增强，转子 7 会受到 Y 负方向的磁拉力 F1。下部径向控制线圈 91、92、93 通电后，经过下部径向定子极 81、83 中的偏置磁通和控制磁通方向相同，经过下部径向定子极 81、83 中总磁通增强，而经过下部径向定子极 82 偏置磁通和控制磁通方向相反，进而总磁通减弱，转子 7 受到下部径向定子极 81、83 的磁拉力 F3、F4，其合成磁拉力 F2 指向 Y 正方向，因此转子 7 受到恢复扭转力矩使转子 7 回到平衡位置。

轴向单自由度主动控制的实现：参见图 12，轴向控制线圈 6 通以直流电，当转子 7 在轴向上出现位置偏移时，通过改变直流控制电流的大小与方向，通过改变上部轴向定子 51 与转子 7 之间的轴向气隙磁通和下部轴向定子 52 与转子 7 之间的轴向气隙磁通的大小，在轴向气隙处产生磁吸力使转子 7 回到轴向参考平衡位置。例如当转子 7 向上偏移时，通过轴向控制线圈 6 加载轴向控制电流产生的轴向控制磁通如图 12 中粗实线及箭头所示，上部环形永磁体 31 和下部环形永磁体 32 产生的偏置磁通如图 12 中虚线及箭头所示，可以看出经过上部轴向定子 51 与转子 7 之间的轴向气隙磁通方向相反，经过下部轴向定子 52 与转子 7 之间的轴向气隙磁通方向相同，上部轴向定子 51 与转子 7 之间的合成气隙磁通小于下部轴向定子 52 与转子 7 之间的合成气隙磁通。由此，转子 7 受到的合成电磁力 F_z 向下，将转子 7 拉回轴向平衡位置，因此，轴向上的一个自由度得到控制。

根据以上所述，便可以实现本发明。对本领域的技术人员在不背离本发明的精神和保护范围的情况下做出的其它的变化和修改，仍包括在本发明保护范围之内。

权 利 要 求 书

1、一种车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承，转子（7）外同轴套有轴向定子（5）和径向定子，其特征是：所述径向定子由轭部连为一体的上、下部径向定子（1、8）同轴布置组成，上下轭部形成径向定子极腔（16），上部径向定子（1）轭部上端和下部径向定子（8）轭部下端各自沿圆周方向均匀布置三个径向定子极，每个径向定子极的内端表面均为凹球面，在每个径向定子极上绕有径向控制线圈；所述转子（7）最中间是中间圆柱体（73），上下两端各是相同的上端柱体（71）和下端柱体（75），中间圆柱体（73）的上下两端分别是连接上端柱体（71）的上连接体（72）和连接下端柱体（75）的下连接体（74），上、下端柱体（71、75）的侧壁均为凸球面；上、下部径向定子极内端的每个凹球面上下对应地正对着上、下端柱体（71、75）的凸球面，凹球面和凸球面之间有气隙，正对着的凹球面和凸球面的球心重合；所述中间圆柱体（73）外固定嵌套轴向定子（5），轴向定子（5）由结构相同且同轴布置的圆盘形的上、下部轴向定子（51、52）组成，上、下部轴向定子（51、52）之间叠压圆盘形的隔磁铝环（42），上、下部轴向定子（51、52）和隔磁铝环（42）的内腔形成轴向定子腔（17），轴向定子腔（17）内是紧贴其内壁的轴向控制线圈（6）；上部轴向定子（51）的上侧和下部轴向定子（52）的下侧各装有一个紧密叠压在轴向定子（5）和径向定子极之间的环形永磁体，上、下部环形永磁体的结构相同且均轴向充磁，充磁方向相反。

2、根据权利要求 1 所述的一种车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承，其特征是：所述环形永磁体产生偏置磁通，控制转子（7）静态被动悬浮；所述轴向控制线圈通直流电，控制转子（7）轴向一个自由度；所述径向控制线圈通交流电，控制转子（7）径向四个自由度。

3、根据权利要求 1 所述的一种车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承，其特征是：上部轴向定子（51）、下部轴向定子（52）和隔磁铝环（42）的外径均与径向定子极腔（16）的内径相同且均固定连接在径向定子极腔（16）的内壁上。

4、根据权利要求 1 所述的一种车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承，其特征是：上、下部轴向定子（51、52）均各由一个大圆盘（53）、一个中间圆环体（54）以及一个小圆盘（55）在轴向上依序连接组成，隔磁铝环（42）叠压在上下两个相同的大圆盘（53）之间，隔磁铝环（42）的内外径与大圆盘（53）的内外径对应相等。

5、根据权利要求 4 所述的一种车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承，其特征是：中间圆环体（54）的内径等于大圆盘（53）的内径，中间圆环体（54）的外径

等于小圆盘（55）的外径但远小于大圆盘（53）的外径，小圆盘（55）的内径小于大圆盘（53）的内径。

6、根据权利要求 1 所述的一种车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承，其特征是：中间圆柱体（73）的外径小于上连接体（72）和下连接体（74）的外径，上连接体（72）和下连接体（74）的外径与上端柱体（71）和下端柱体（75）的上下端面外径相等。

7、根据权利要求 1 所述的一种车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承，其特征是：所述凹球面和所述凸球面在轴向上的厚度相等，三个上部径向定子极的上端面和上部径向定子（1）的轭部上端面平齐，三个下部径向定子极的下端面和下部径向定子（8）的轭部下端面平齐。

8、根据权利要求 1 所述的一种车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承，其特征是：上部径向定子（1）的上端面和转子（7）的上端面平齐，下部径向定子（8）的下端面和转子（7）的下端面平齐。

9、根据权利要求 1 所述的一种车载飞轮电池用交直流五自由度双球面混合磁轴承，其特征是：一个环形永磁体外套有一个隔磁铝环，隔磁铝环同时固定嵌套在环形永磁体的外壁和径向定子腔轴（16）的内壁上。

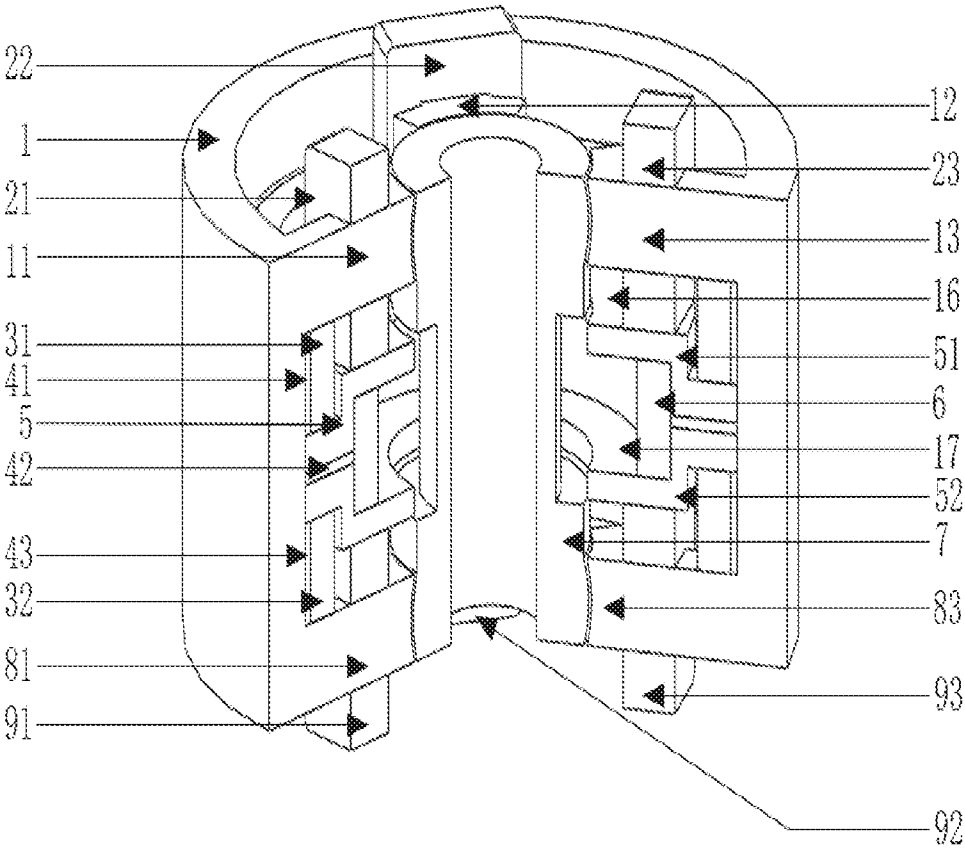


图 1

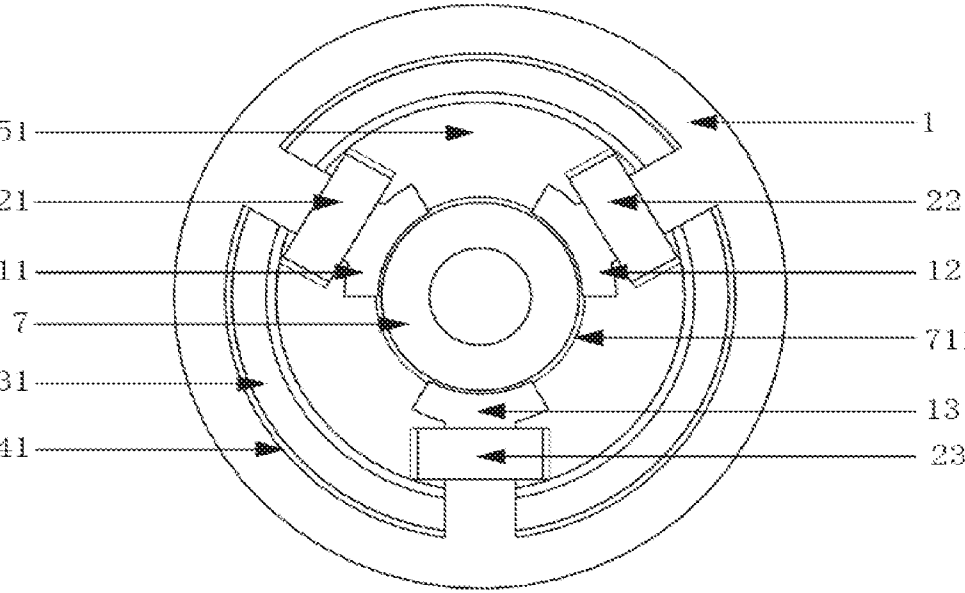


图 2

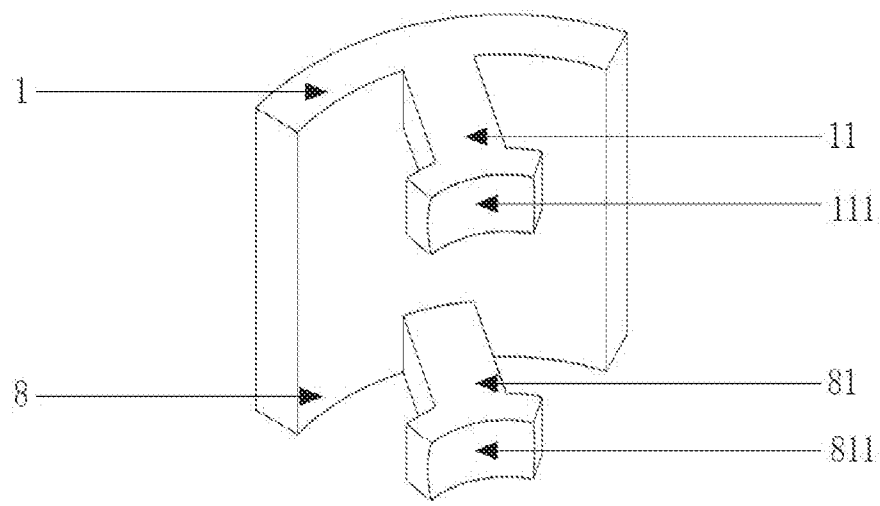


图 3

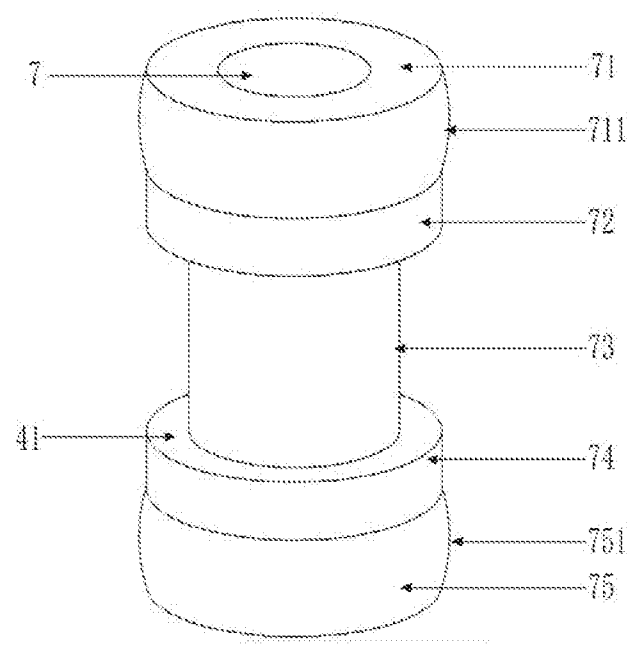


图 4

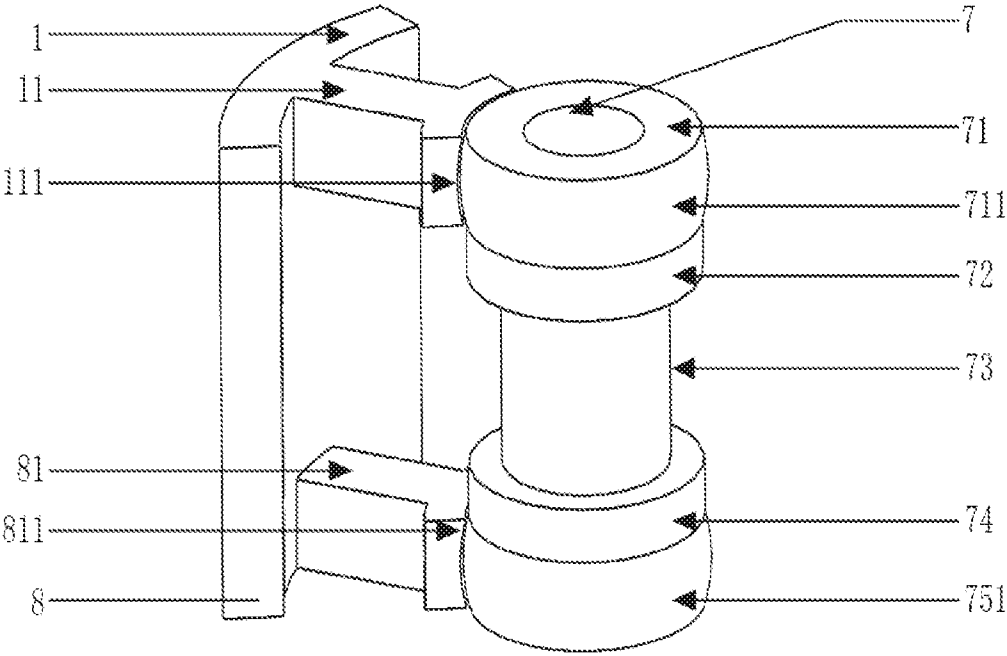


图 5

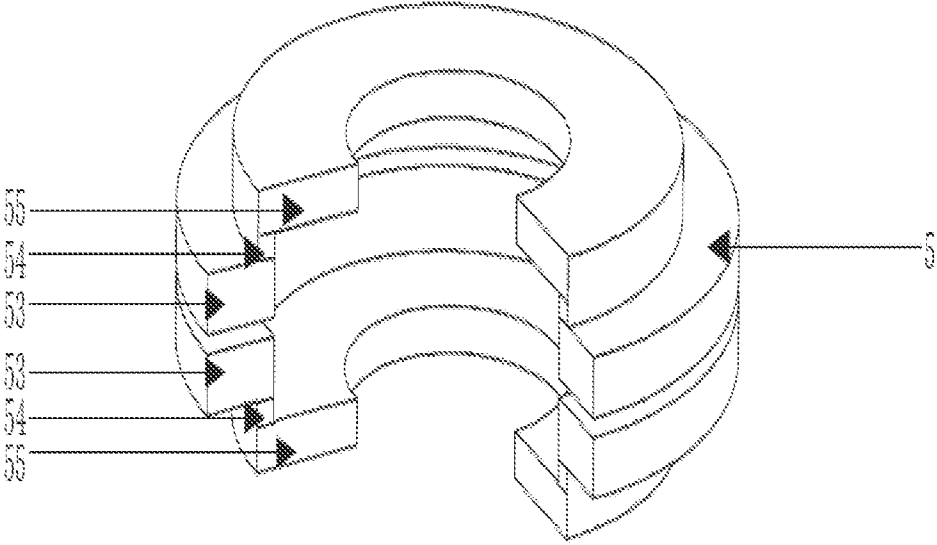


图 6

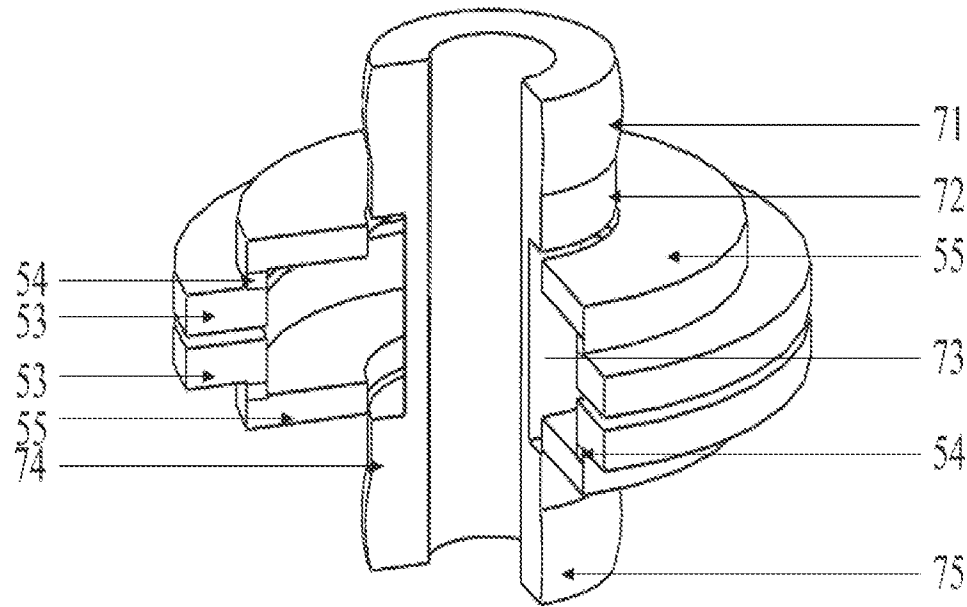


图 7

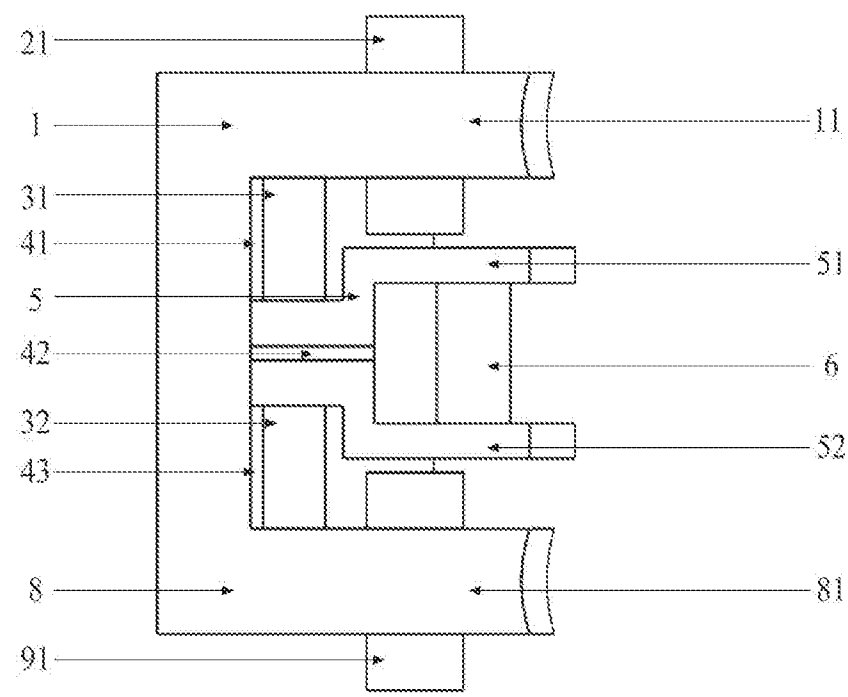


图 8

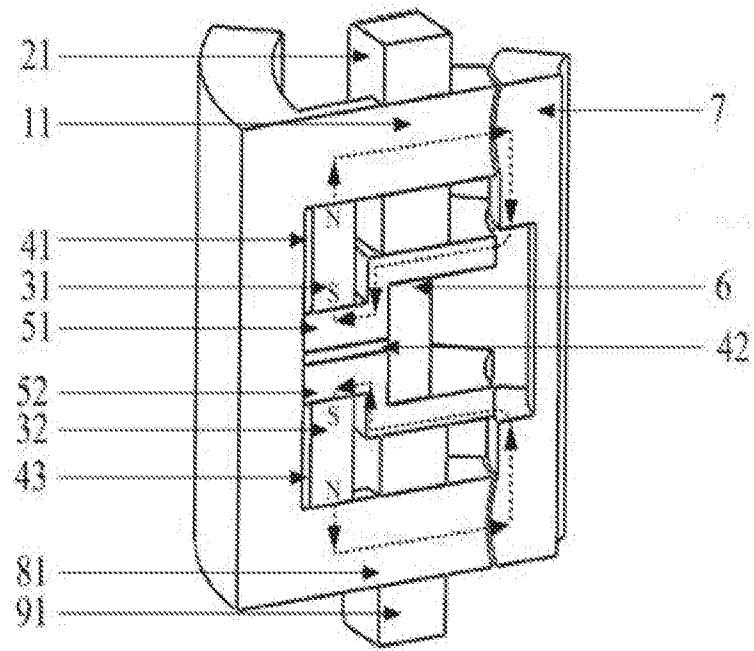


图 9

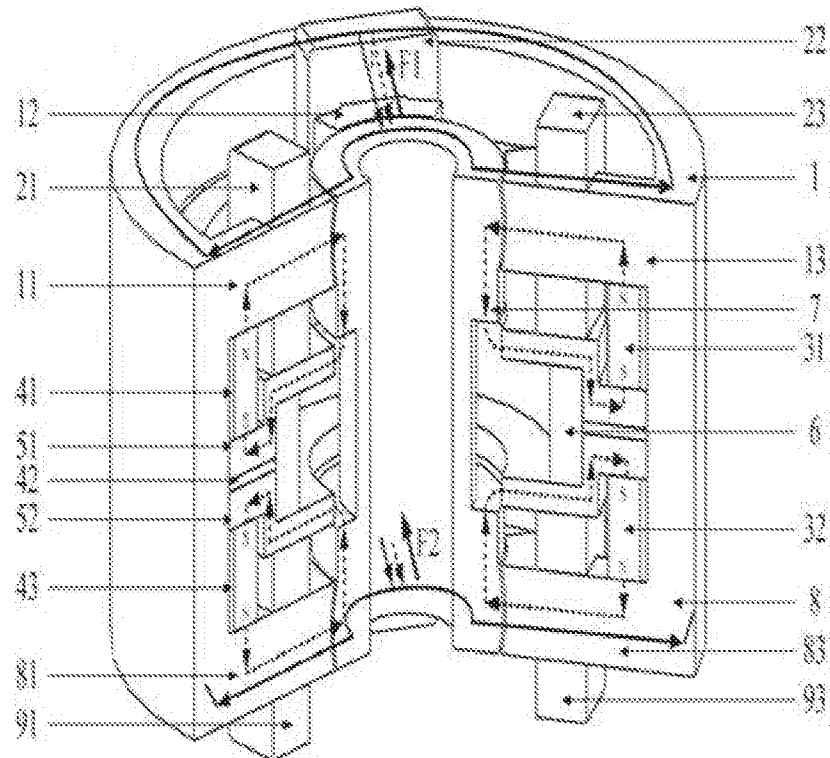


图 10

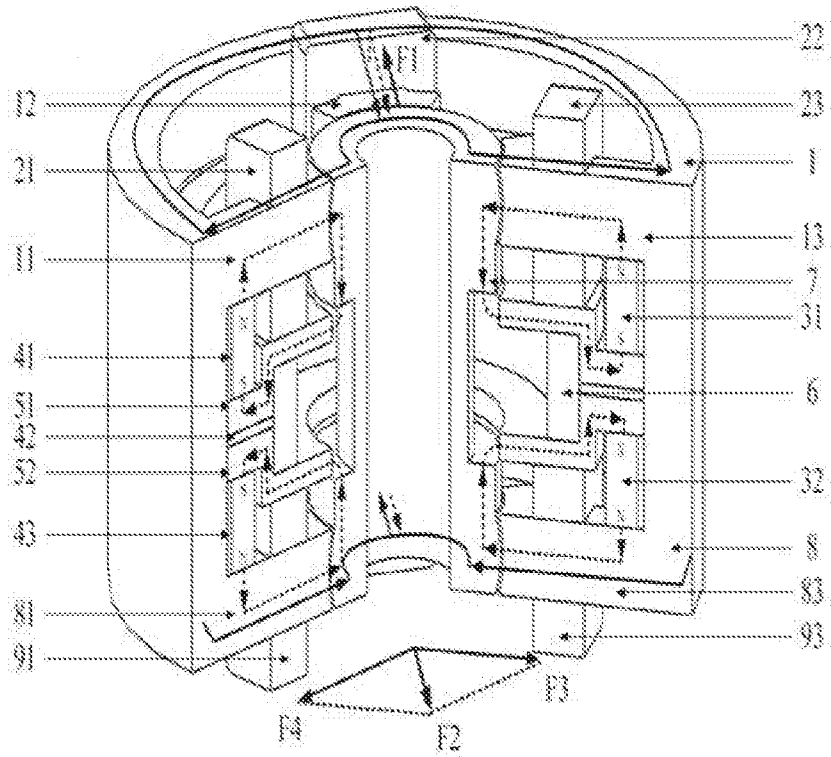


图 11

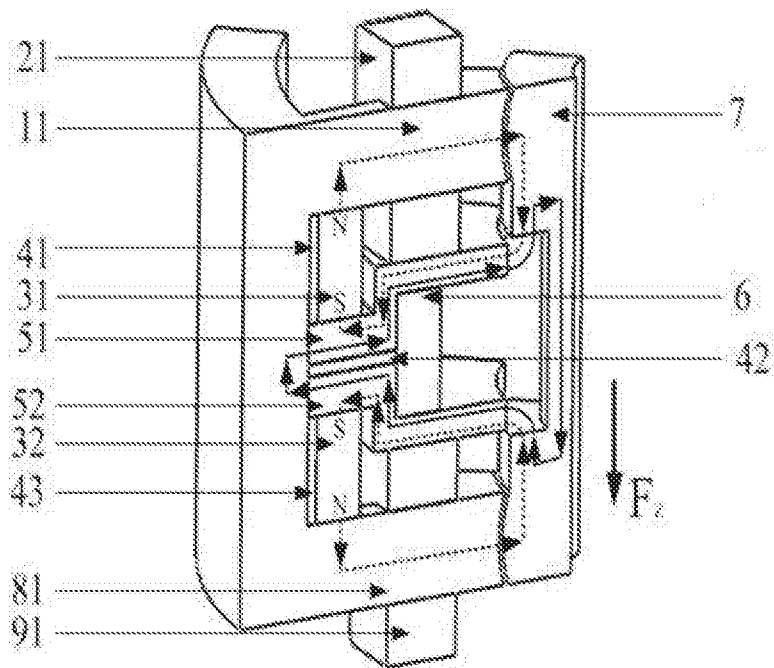


图 12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/099222

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

F16C 32/04 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

F16C 32/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI; EPODOC; CNPAT; CNKI: 磁轴承, 球, 混合, 自由度, 飞轮, 定子, 转子, 磁极, 永磁, 电池, 径向, 轭部; bearing, magnet, hybrid, sphere, freedom, flywheel, battery, permanent, stator, rotor, pole, yoke

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 105156475 A (UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY BEIJING), 16 December 2015 (16.12.2015), claims, description, paragraphs 10-23, and figures 1-5	1-9
A	CN 101074700 A (JIANGSU UNIVERSITY), 21 November 2007 (21.11.2007), entire document	1-9
A	CN 104389903 A (BEIJING INSTITUTE OF PETROCHEMICAL TECHNOLOGY et al.), 04 March 2015 (04.03.2015), entire document	1-9
A	CN 104533949 A (BEIJING INSTITUTE OF PETROCHEMICAL TECHNOLOGY), 22 April 2015 (22.04.2015), entire document	1-9
A	GB 2491825 A (TURNER, W.B.), 19 December 2012 (19.12.2012), entire document	1-9

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 16 March 2018	Date of mailing of the international search report 28 March 2018
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer ZHANG, Yunhui Telephone No. (86-10) 53961152

International application No.
PCT/CN2017/099222

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2009)

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/099222

A. 主题的分类

F16C 32/04(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

F16C32/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

WPI; EPODOC; CNPAT; CNKI; 磁轴承, 球, 混合, 自由度, 飞轮, 定子, 转子, 磁极, 永磁, 电池, 径向, 轭部;
bearing, magnet, hybrid, sphere, freedom, flywheel, battery, permanent, stator, rotor, pole, yoke

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 105156475 A (北京科技大学) 2015年 12月 16日 (2015 - 12 - 16) 权利要求书、说明书第10段至第23段、图1-5	1-9
A	CN 101074700 A (江苏大学) 2007年 11月 21日 (2007 - 11 - 21) 全文	1-9
A	CN 104389903 A (北京石油化工学院 等) 2015年 3月 4日 (2015 - 03 - 04) 全文	1-9
A	CN 104533949 A (北京石油化工学院) 2015年 4月 22日 (2015 - 04 - 22) 全文	1-9
A	GB 2491825 A (TURNER, W. B.) 2012年 12月 19日 (2012 - 12 - 19) 全文	1-9

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2018年 3月 16日

国际检索报告邮寄日期

2018年 3月 28日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

受权官员

张运慧

传真号 (86-10)62019451

电话号码 (86-10)53961152

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/099222

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	105156475	A	2015年 12月 16日	无			
CN	101074700	A	2007年 11月 21日	CN	100455832	C	2009年 1月 28日
CN	104389903	A	2015年 3月 4日	CN	104389903	B	2016年 11月 2日
CN	104533949	A	2015年 4月 22日	CN	104533949	B	2017年 2月 1日
GB	2491825	A	2012年 12月 19日	GB	201109723	D0	2011年 7月 27日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)