

# 摆线副结构永磁复合电机的设计与分析

朱方晨<sup>1a</sup>, 毕颖<sup>1b</sup>, 周燕飞<sup>1a</sup>, 周征西<sup>1a</sup>, 张朝刚<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 a. 机电学院; b. 自动化学院, 江苏 南京 211106; 2. 丰县初级中学, 江苏 徐州 221700)

**摘要:** 将摆线液压马达与永磁同步电机相结合, 设计一种定转子为摆线副结构的永磁复合电机, 给出了该电机的运行机理、电机各部分的设计方法, 确定了永磁体的布置方式; 对所设计电机进行有限元仿真, 对比径向、切向电磁力大小, 与同尺寸永磁同步电机输出转矩和功率进行对比。结果表明: 所设计的复合电机能够提高切向电磁力的比例, 增大电机的输出转矩, 提高输出功率。

**关键词:** 摆线副; 永磁电机; 切向电磁力; 高转矩

**中图分类号:** TM351 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2022)01-0192-03

## Design and Analysis of Permanent Magnet Compound Motor with Cycloid Pair Structure

ZHU Fangchen<sup>1a</sup>, BI Ying<sup>1b</sup>, ZHOU Yanfei<sup>1a</sup>, ZHOU Zhengxi<sup>1a</sup>, ZHANG Chaogang<sup>2</sup>

(1. a. College of Mechanical and Electrical Engineering; b. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. Fengxian High School, Xuzhou 221700, China)

**Abstract:** Combining cycloid hydraulic motor and permanent magnet synchronous motor, a permanent magnet composite motor with a cycloid pair structure for the stator and rotor was designed. The operating mechanism of the motor and the design method of each part of the motor were given, and the arrangement of permanent magnets were determined. The finite element simulation of the designed motor was conducted. The size of the radial and tangential electromagnetic force, and the output torque and power of the permanent magnet synchronous motor of the same size were compared. The results show that the designed composite motor can improve the proportion of tangential electromagnetic force and increase the output torque and power of motor.

**Keywords:** cycloid pair; permanent magnet motor; tangential electromagnetic force; high torque

## 0 引言

永磁电机因其效率高、噪声小、功率密度和转矩密度都比较大等特点, 近年来越来越广泛地应用于航空航天、新能源汽车、医疗器械等诸多领域。但是传统的永磁电机属于径向磁场电机, 电磁力的切向分量远小于径向分量, 而电机的转矩主要来源于切向电磁力, 径向电磁力只会影响电机的电磁振动状况<sup>[1]</sup>。摆线液压马达采用摆线副结构, 运动过程中所传递的力是沿着摆线齿公法线方向<sup>[2]</sup>, 而液压马达是采用液压驱动, 工作时需要额外的液压供油系统, 不仅使系统体积大、质量大, 也会造成工作环境的不清洁。因此, 结合二者的优点, 为更大程度地提高电磁力的切向分量, 将液压驱动改为电磁驱动, 本文提出了一种将摆线副结构与永磁电机相结合的复合电机结构。

1991年, 日本的林岩熊、岩月伸之等人提出一种摆线压电马达的新构型, 转子按照摆线副运动轨迹进行运动, 其输出转速可以达到超音速级别, 但是输出转矩很低, 仅仅是 $10^{-3}$  Nm级<sup>[3]</sup>。2008年, 丹麦学者 JOERGENSEN F T 等人提出一种相对于传统永磁齿轮, 转矩密度更高、传动比更大的摆线永磁齿轮<sup>[4]</sup>。2019年, 大连交通大学的葛研军等人将摆线永磁齿轮与永磁电机相结合, 研究出一种

可双端输出的摆线磁齿轮复合电机<sup>[5]</sup>。该复合电机充分发挥出摆线磁齿轮的优点, 可实现低速大转矩驱动, 但是这种电机是将永磁电机和摆线磁齿轮直接集成, 并没有改变电机内部磁场的切向分布。

本文将摆线液压马达的摆线副结构与永磁电机相结合, 转子为摆线轮结构, 定子为与摆线轮相对应的针齿结构。该结构复合电机采用行星传动, 不仅能够增大切向电磁力占比, 提高转矩密度、功率密度<sup>[6]</sup>, 而且能够通过电控制, 灵活地调节转速, 具有很好的制动性能。该复合电机体积较小、效率较高, 而且自身的定转子结构具有天然的8:1的减速比, 可以直接实现转子由公转到自转的减速功能。

## 1 运行机理

所设计的永磁复合电机结构如图1所示。定转子部分带有永磁体的转子与两侧支撑部分的转子采用销轴联接, 保持同步偏心运动; 定转子部分的定子与两侧支撑部分的定子以及传动部分的壳体也采用销轴联接, 且保持静止。

当定子线圈通电之后, 转子开始依据摆线轮运动规律进行偏心转动, 并通过销轴将运动传递到支撑部分的转子上。支撑转子内孔的内花键与连接轴一端的外花键部分

啮合,联接轴另一端的外花键与输出轴内花键部分啮合。因此支撑转子的运动就通过联接轴传递到输出轴,并且偏心转动也转换为非偏心转动。

图1中,左侧输出轴为主要力矩输出,右侧输出轴主要用来外接旋转变压器,测量转子的自转角位移,进而实现对定子线圈的通电控制。

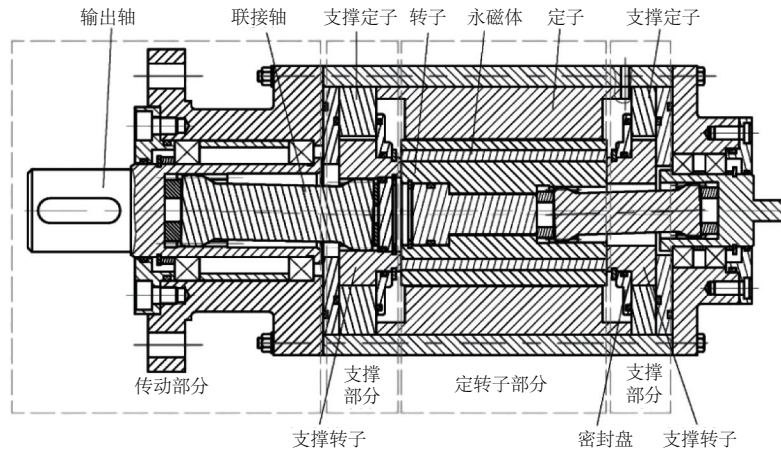


图1 摆线副结构永磁复合电机轴向剖面

## 2 结构设计

本文所提出的复合电机结构分为3个部分:定转子部分、支撑部分(含密封结构)、传动部分。

### 2.1 模型建立

与传统永磁电机不同,本电机定转子为摆线副结构,转子的运动遵循摆线副啮合规律,但为了使定子、转子不接触,将定子针齿直径缩小0.3 mm,即最小气隙为0.3 mm。本电机选择定子9齿,转子8齿,为8极9槽结构。转子中心绕着定子中心旋转,同时转子绕着自身中心自转,公转与自转角速度比为8:1。定子与转子中心保持固定偏心距,偏心距取3.2 mm。

摆线轮转子齿形方程式为<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} x_c &= [r_p - r_m \phi^{-1}(K_1, \varphi)] \cos(1-i^H) \varphi - \\ & [a - K_1 r_m \phi^{-1}(K_1, \varphi)] \cos i^H \varphi \\ y_c &= [r_p - r_m \phi^{-1}(K_1, \varphi)] \sin(1-i^H) \varphi + \\ & [a - K_1 r_m \phi^{-1}(K_1, \varphi)] \sin i^H \varphi \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\phi^{-1}(K_1, \varphi) = (1 + K_1^2 - 2K_1 \cos \varphi)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: $i^H$ 为摆线轮和针轮的相对传动比,可以得到 $i^H$ 为8:9; $K_1$ 为短幅系数;定子针齿半径 $r_m$ 为8.7 mm;定子针齿中心圆半径 $r_p$ 为42 mm;定转子中心偏心距 $a$ 为3.2 mm。

由于定转子部分定子和转子没有接触,为了使转子能够不因重力而下垂,本电机在转子两侧添加支撑转子,支撑转子与支撑定子完全啮合,并与带永磁体的转子采用销轴联接,从而起到支撑作用。

由于支撑转子和支撑定子密切啮合,在运动过程中会发生摩擦并产生热量,因此需要在啮合处放入适量润滑油,并用密封盘和O形圈将润滑油与定子线圈隔离。

### 2.2 永磁体布置方式选择

如图2所示,转子的永磁体采用内置式,并布置为一字形。在通用永磁电机中,永磁体布置方式分为内置式和表

贴式两种,内置式又分为一字形永磁体和V字形永磁体。

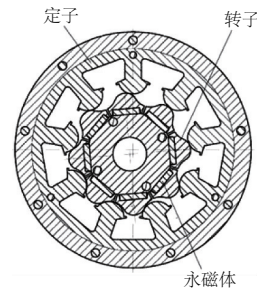


图2 定子、转子部分剖面图

若永磁体采用表贴式布置,其布置方案如图3所示。由于永磁体外轮廓生成函数比较复杂,磁性较高的烧结钕铁硼难以加工成该形状,只能采用磁性较低的黏结钕铁硼进行加工,但这样会大大降低电机的输出转矩。经过计算,当激励为1 000安匝,定子槽内的电流密度设为6 A/mm<sup>2</sup>时,其槽满率达到300%,定子槽无法容纳线圈。因此该方案不合理。

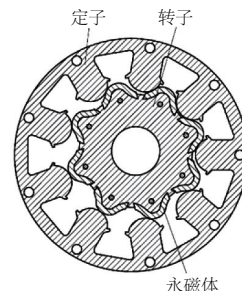


图3 表贴式永磁体的定子、转子方案

当永磁体采用内置式V字形布置时,其布置方案如图4所示。在定子和转子的径向、轴向尺寸相同,定子、转子最小气隙都为0.3 mm,单个定子所绕线圈数量均为100匝的情况下,比较V字形永磁体和一字形永磁体两种方

案电机的转矩-激励图,结果如图5所示。

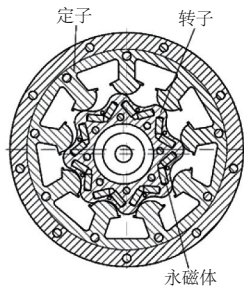


图4 V字形永磁体布置方案

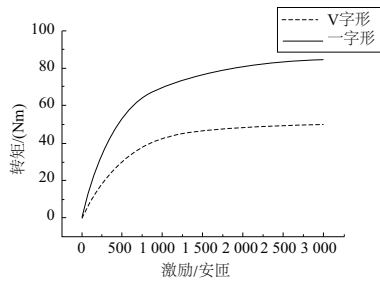


图5 V字形和一字形永磁体电机转矩对比图

从图5可以看出,永磁体一字形布置时电机的转矩约为永磁体V字形布置时电机转矩的两倍,并且经过仿真,得到表贴式永磁体和V字形内置永磁体二者转矩大致相同。因此最终选用永磁体一字形内置。

### 2.3 结构参数

根据建立定子部分摆线的齿形参数,可以得到电机的结构参数如表1所示。

表1 电机结构参数表

参数	数值
定子槽数	9
极对数	8
定子针齿中心圆直径/mm	84
定子针齿直径/mm	17.4
定子外圈直径/mm	120
转子齿根圆直径/mm	59.6
转子齿顶圆直径/mm	72.4
最小气隙/mm	0.3
永磁体宽度/mm	10
永磁体厚度/mm	5.5
永磁体剩磁/T	1.23
永磁体矫顽力/(kA/m)	890
永磁体长度/mm	100
定子轴向长度/mm	96
转子轴向长度/mm	100
绕组匝数	100
槽满率/%	55.8

## 3 电机内部电磁力分析

传统永磁电机中,电机内部切向气隙磁场远小于径向气隙磁场,导致径向电磁力远小于切向电磁力。而对于本文所设计的摆线电机,在maxwell中绘制电机的定转子剖面图,建立二维静态仿真模型,设置相关参数后,得到电机的径向电磁力密度和切向电磁力密度图,如图6和图7所示。横坐标为转子外表弧长,纵坐标为电磁力密度。从图中可以看出,在定子完全啮合的齿廓处,切向电磁力密度约为 $875\ 000\ \text{N/m}^2$ ,径向电磁力密度约为 $360\ 000\ \text{N/m}^2$ ,切向力密度大约为径向力密度的2.5倍,说明本电机确实增大了切向电磁力在电机电磁力中的比例,增大了输出转矩。

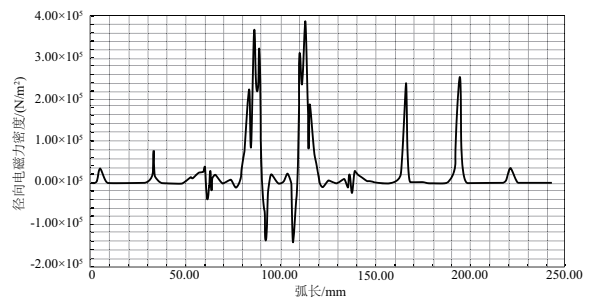


图6 径向电磁力密度图

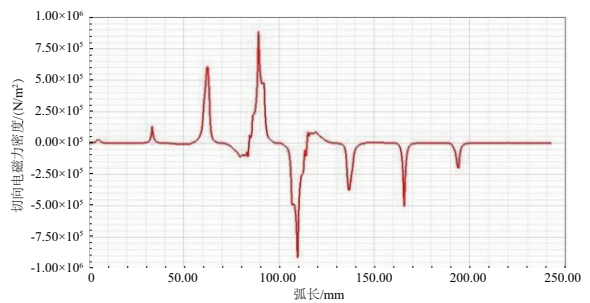


图7 切向电磁力密度图

## 4 转矩与功率分析

选取与摆线副结构复合永磁电机相同尺寸规格的表贴式永磁同步电机,在maxwell中建立二维电磁模型。该永磁同步电机与本文所设计电机均选取8极9槽结构,定子槽内线圈的匝数均设置为100匝,永磁体均选用N35H型钕铁硼,并对二者施加相同大小的激励,得到二者的转矩对比图,如图8所示。

从图8中可以看出,在2500安匝的激励之前,摆线副永磁复合电机所输出的转矩要高于表贴式永磁同步复合电机,此时输入电流为25A。在电流密度为 $6\ \text{A/mm}^2$ ,即输入电流为3.84A时,摆线副永磁复合电机相较于永磁同步电机转矩大大提高,此时永磁电机转矩为15.02Nm,而本文所设计的电机转矩为40.24Nm,为永磁电机的2.68倍。

(下转第224页)



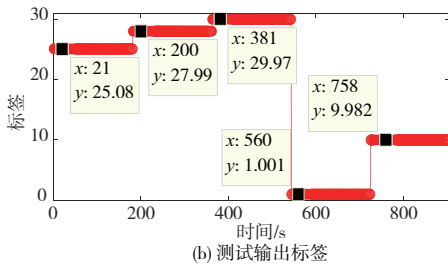


图5 网络测试输出标签

根据以上设计与实验测试,采用程序语言并将基于神经网络的智能预警诊断算法植入海洋石油机泵在线监测系统,开发出基于数学模型的海洋石油机泵智能诊断系统。通过实际应用测试,海洋石油机泵智能诊断系统能够实现对关键机泵的在线监测和及时智能预警诊断,达到设计要求。

### 4 结语

针对海洋石油机泵结构特点,应用监测技术,搭建出关键机泵在线监测系统,采用相对成熟的基于神经网络的

智能化预警诊断技术,设计智能预警诊断核心算法,与海洋石油设备在线监测系统融合,搭建基于在线监测和神经网络的海上石油关键机泵智能诊断系统。现场应用表明,海洋石油关键机泵的智能诊断系统能够实现有效的智能预警诊断。

#### 参考文献:

[1] 高金吉. 机泵群实时监测网络和故障诊断专家系统[J]. 中国工程科学, 2001, 3(9): 41-47, 85.

[2] 刘冰洁, 陈炳发, 丁力平. 基于卷积神经网络的微电机装配故障诊断研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3): 171-174, 189.

[3] 姜宁, 刘维福. 振动测试技术在旋转设备故障诊断中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(S1): 161-163.

[4] 赵凌燕. 滚动轴承-转子系统的非线性动力学研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.

[5] 杨兰柱, 刘文广. 改进的 CNN 网络在轴承故障诊断中的应用[J]. 机电工程技术, 2020, 49(8): 11-13.

[6] 吕楠, 姚平喜. 基于 BP 神经网络的滚动轴承故障诊断[J]. 煤矿机械, 2020, 41(8): 172-173.

收稿日期: 2021-11-09

(上接第 194 页)

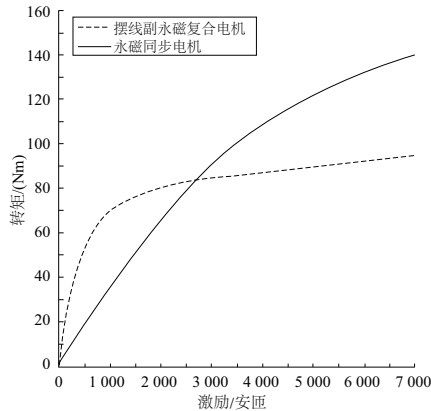


图8 摆线副永磁复合电机与永磁同步电机转矩对比

由于摆线轮运动为行星运动,转子的公转速度与自转速度之比为 8 : 1,在与同规格永磁同步电机进行比较时,摆线轮转子的公转速度与永磁同步电机的转子自转速度相同。因此摆线复合电机最终输出轴上的转速为永磁同步电机转速的 1/8;但是仿真得到的摆线轮转矩是转子中心绕定子中心公转所产生的转矩,由转子自转带动输出轴的转矩是摆线轮公转转矩的 8 倍。由于功率是由转矩和转速的乘积决定,因此最终摆线复合电机的输出功率和永磁同步电机的输出功率对比也如图 8 的趋势一样,在输入电流为 3.84 A 时,摆线复合电机的输出功率是表贴式永磁同步电机的 2.68 倍。

### 5 结语

本文所设计的新型摆线副结构永磁复合电机改变了传统电机定转子结构,转子绕着定子中心做行星运动,再通过两端为外花键的联接轴将偏心运动转换为同心运动输出到输出轴,从而将转子的动力传递出去。电机永磁体采用一字形内置式,经过仿真分析,电机切向电磁力密度最大值为径向电磁力密度最大值的 2.5 倍,增大了切向电磁力比例,从而提高电机的转矩和功率。由于定转子为摆线副结构,其自身也相当于一个减速器,因此电机可以在不外接减速器的情况下拥有 8 : 1 的减速比。

#### 参考文献:

[1] 王东刚. 永磁同步电机高频振动与噪声研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 23-24.

[2] 陈菲. 摆线液压马达啮合副应力分析及优化[D]. 太原: 太原科技大学, 2018: 31-33.

[3] HAYASHI I, IWATSUKI N, KAWAI M, et al. Development of piezoelectric cycloid motor [J]. IEE Colloquium on Robot Actuators, 1991(2): 1-3.

[4] JORGENSEN F T, ANDERSEN T O, RASMUSSEN P O. The cycloid permanent magnetic gear [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(6): 1659-1665.

[5] 葛研军, 张剑, 李佩聪, 等. 摆线磁齿轮复合电机设计与优化[J]. 微特电机, 2019, 47(4): 13-15, 20.

[6] 张建润, 伍健伟, 傅琪迪, 等. 高功率密度行星减速器设计的关键核心技术综述[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(4): 1-4.

[7] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

收稿日期: 2020-12-22