

燃料电池空压机电机转子结构研究

袁羲鑫^{1,2}, 王冰¹

[1. 上海交通大学 自动化系 系统控制与信息处理教育部重点实验室, 上海 200240;
2. 华润新能源科技(上海)有限公司, 上海 201706]

摘要: 针对燃料电池空压机高速电机转子易因高速失稳而损坏、因转子过重而导致空气轴承加速磨损的问题, 使用有限元法对不同转子结构的转子应力和临界转速进行了研究, 提出了一种轴向预紧固定磁钢的空心转子结构。以一台额定功率 35 kW, 峰值转速 100 000 r/min 的超高速永磁电机为例, 综合对比分析了不同转子结构在转子强度、临界转速、质量、转动惯量、装配工艺性以及可靠性等方面的优缺点。对比结果表明, 虽然新转子结构在转子强度上稍差于几种常见转子结构, 但在其他方面均具有优异的特性。最后, 根据新转子结构制作了空压机样机, 试验结果表明, 该样机可以在 100 000 r/min 转速下稳定运行, 验证了新转子结构设计的合理性。

关键词: 超高速永磁电机; 燃料电池空压机; 转子结构; 转子强度; 转子临界转速

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)04-0083-06

doi: 10.12177/emca.2021.214

Study on Rotor Structure for Fuel Cell Air Compressor Motor

YUAN Xixin^{1,2}, WANG Bing¹

[1. Department of Automation, Key Laboratory of System Control and Information Processing of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Sinobrook New Energy Technologies (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201706, China]

Abstract: Aiming at the problems that the high-speed motor rotor of fuel cell air compressor is easy to be damaged due to high-speed instability and the accelerated wear of air bearing due to rotor overload, the rotor stress and critical speed of different rotor structures are studied by using the finite element method, and a hollow rotor structure with axially preloaded and fixed magnetic steel is presented. Then, taking an ultra-high-speed permanent magnet motor with the rated power of 35 kW and the peak speed of 100 000 r/min as an example, the advantages and disadvantages of different rotor structures in strength, critical speed, mass, moment of inertia, assembly manufacturability and reliability are compared and analyzed comprehensively. The comparison results show that although the new rotor structure is slightly inferior in rotor strength in comparison with several common rotor structures, it has great advantages in other aspects. Finally, an air compressor prototype is manufactured according to the new rotor structure, and experimental results show that the prototype can run stably at the speed of 100 000 r/min, which verifies the rationality of the new rotor structure.

Key words: ultra-high-speed permanent magnet motor; fuel cell air compressor; rotor structure; rotor strength; rotor critical speed

收稿日期: 2021-12-27; 收到修改稿日期: 2022-03-02

作者简介: 袁羲鑫(1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为高速永磁电机。

0 引言

质子交换膜燃料电池(PEMFC),也被称为氢燃料电池,是一种将氢气和氧气通过电极反应直接转换为电能的装置^[1]。燃料电池空压机(FCAC)作为空气供应系统中最重要的零部件,其主要作用是将大气环境中的空气加压至燃料电池反应堆最佳操作压力,并提供需要的空气质量流量。由于燃料电池系统电极反应的特殊性以及作为汽车核心零部件的重要性,作为空气供给系统的空压机需要满足:无油、低功耗、高功率密度、低成本、低噪声、高可靠性以及动态性能好等特点^[2]。为满足这些要求,FCAC的主要技术路线为超高速永磁电机驱动的箔片式空气轴承支撑的离心式空压机^[3-5],如何设计高速电机转子结构成为燃料电池空压机高速电机设计的热点问题。

文献[6]使用有限元方法对环形磁钢和实心磁钢的转子结构进行了强度、电磁以及散热分析,研究表明在永磁体同等应力条件下,实心磁钢转子需要的护套厚度较小,有利于电机散热,电机转子温度也更低。文献[7]使用有限元法对比分析了4种转子结构在不同过盈量、永磁体内径、保护套材料以及运行工况下的电机转子强度,得出不同转子结构的优势、不足及适用工况。以上文献主要对比分析了不同转子结构的转子强度、电磁特性以及热特性,而未能从转子临界转速、转子永磁体用量、转子质量、转子转动惯量、电机功率密度以及运行可靠性等方面进行多维度的对比与分析。针对此问题,本文提出了一种轴向预紧固定磁钢的空心转子结构。其次,设计了5种外形基本尺寸相同的转子结构,包括4种传统转子结构(三段式实心永磁体转子结构^[8]、三段式空心永磁体转子结构^[7]、一体式实心轴空心永磁体转子结构^[9]、一体式涂胶固定的空心转子结构^[10-11])以及1种一体式轴向预紧固定永磁体的空心转子结构,综合对比分析了5种转子结构的强度、临界转速、质量、转动惯量、装配工艺性以及可靠性,进而得出不同转子结构的特点和适用情况。

1 5种转子结构

本文以一台额定功率35 kW,峰值转速100 000 r/min的超高速永磁电机为例,分别设计

出5种不同的转子结构,5种转子结构的尺寸和材料完全一致,其尺寸参数如表1所示,材料参数如表2所示。

表1 转子结构尺寸参数 mm

参数名称	参数值
转子外径	44
永磁体外径	34
永磁体轴向长度	80
转子轴向长度	263

表2 转子材料参数

参数名称	钕钴永磁体	钛合金
密度/(kg·m ⁻³)	8 300	4 440
弹性模量/GPa	190	119
泊松比	0.24	0.33
热膨胀系数/(10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	10	9.3
抗拉强度/MPa	40	1 030

5种转子结构示意图如图1所示,其特点分别如下所述。

(1) 结构A^[8]和B^[7]:保护套和叶轮轴通过

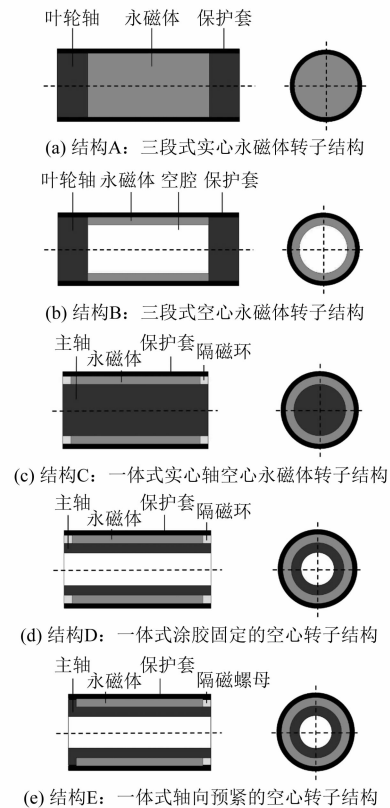


图1 转子结构示意图

过盈或者焊接的方式连接,其制作工艺复杂,焊接一致性差,而且焊接和过盈连接都会影响保护套对永磁体的保护效果。

(2) 结构 C^[9] 和 D^[10-11]: 永磁体和主轴涂胶连接,胶水耐高温性差,高温会严重影响胶水的可靠性。

(3) 结构 E^[12]: 永磁体和主轴通过螺母轴向预紧固定连接,螺母拆装方便,安装扭矩可精确控制,产品一致性好,而且机械防松螺母的可靠性好,不受温度变化而影响。

本文提出的是一种带轴向预紧固定永磁体的空心转子(结构 E),详细结构如图 2 所示。

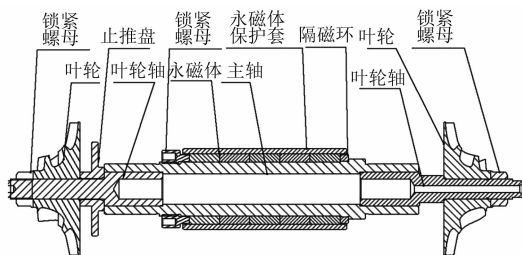


图 2 结构 E 转子详细结构图

2 不同转子结构性能分析

2.1 转子强度对比与分析

提出的转子结构 E 是一种带轴向预紧固定磁钢的空心转子结构。常规的解析式法忽略了轴向应变和轴向应力,也无法考虑轴向载荷以及轴向几何特征。转子结构 E 中锁紧螺母会通过拧紧力矩给永磁体提供大约 12 kN 的轴向预紧力,从而影响转子的应力分布。有限元法可以对不规则模型进行仿真计算^[13],因此本文主要使用有限元法对转子强度进行计算与分析。

2.1.1 转子应力极限工况分析

转子强度必须在所有工况下满足使用要求,研究分析 5 种转子结构在所有工况下的转子强度过于繁琐,对极限工况下的转子应力进行计算与对比更直接有效^[14]。当转子基本尺寸一定时,转子的应力主要受转速、磁钢护套之间过盈量以及运行温度的影响,而运行温度的变化会导致过盈量随之改变,进而影响转子强度。因此运行温度和过盈量这两个变量可以归为一个变量,即综合过盈量,通过计算不同综合过盈量和转速下的转子应力,进而得到转子的极限工况。

钛合金材料为塑性材料,可遵循第四强度理论,主要校核保护套的冯米塞斯应力。而钕钴永磁材料为脆性材料,主要破坏形式为受拉和受压破坏,因此可遵循第一强度理论,主要校核永磁体的最大拉应力和最大压应力。不同转速和综合过盈量工况下保护套和永磁体的极限应力情况如图 3 所示。由图 3 可以看出,保护套以最大冯米塞斯应力的极限工况为最高转速,最大综合过盈量时的工况;永磁体最大拉应力的极限工况为最高转速,最小综合过盈量时的工况;永磁体最大压应力的极限工况为静态下,最大综合过盈量时的工况。

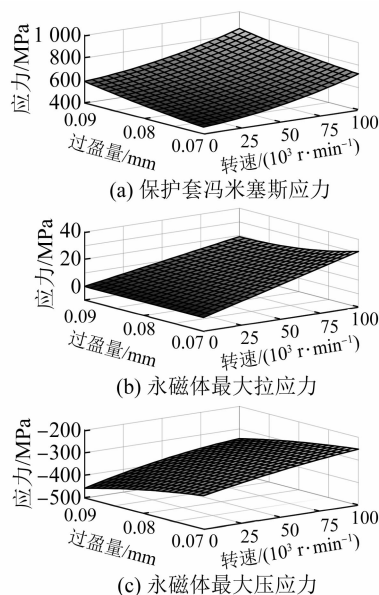


图 3 不同转速和综合过盈量下的转子极限应力

钛合金的膨胀系数略低于钕钴永磁体,高温会使保护套和永磁体之间产生额外的过盈量,转子应力的极限工况如表 3 所示。

表 3 转子极限工况

极限应力	转速/(r·min ⁻¹)	过盈量/mm	转子温度/℃
保护套冯米塞斯应力	100 000	0.088	150
永磁体最大拉应力	100 000	0.072	-40
永磁体最大压应力	0	0.088	150

2.1.2 极限工况转子应力对比分析

不同转子结构的转子极限应力对比如图 4 所示,由此可以看出结构 B 的保护套最大冯米塞斯应力最小,结构 C 的永磁体最大拉应力和最大压

应力最小,而结构 E 的永磁体应力较大。这是由于转子结构 E 有额外的轴向预紧力固定永磁体,其永磁体拉应力较大,但轴向预紧力与过盈量产生的径向预紧力相比差距很大,因此转子结构 E 的永磁体拉应力并没有大幅增加,不同结构其他应力的差距也很小,即轴向预紧力对转子强度的影响很小,可以忽略不计。

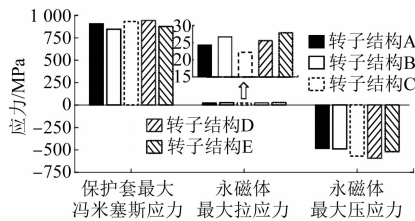


图 4 不同转子结构的转子应力对比

2.2 转子临界转速对比与分析

2.2.1 转子临界转速理论分析

转子动力学方程可描述为^[15]

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (1)$$

式中: m 为转子系统质量矩阵; c 为转子系统阻尼矩阵; k 为刚度矩阵; $F(t)$ 为激振矢量; $x(t)$ 为位移矢量。

转子系统的固有频率由转子结构本身决定,与外部载荷无关,而阻尼对转子固有频率和振幅的影响可以忽略不计,当无外载荷作用且忽略阻尼作用时,其转子动力学方程式(1)可简化为

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (2)$$

假设转子系统作简谐振动,则有

$$x(t) = A\sin(\omega t + \phi) \quad (3)$$

式中: A 为振型或特征矢量; ω 为角频率; ϕ 为相位初始角。

将式(3)代入式(2),整理可得:

$$kA\sin(\omega t + \phi) - \omega^2 mA\sin(\omega t + \phi) = 0 \quad (4)$$

式(4)在任意 t 时刻均成立,因此式(4)可简化为

$$(k - \omega^2 m)A = 0 \quad (5)$$

对于三自由度系统,式(5)可以矩阵的形式展开,得:

$$\begin{bmatrix} k - \omega_i^2 m & -k & 0 \\ -k & 2k - \omega_i^2 m & -k \\ 0 & -k & k - \omega_i^2 m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{1i} \\ A_{2i} \\ A_{3i} \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

因其有非零解,则 $\det(k - \omega^2 m) = 0$, 对其求解有 $\omega_1 = 0, \omega_2 = \pm\sqrt{\frac{k}{m}}, \omega_3 = \pm\sqrt{\frac{3k}{m}}$, 三个解对应系统前三阶固有频率。由此可以看出,转子质量越轻,转子刚度越大,转子固有频率就越高,临界转速就越大。新提出的空心转子结构 E, 转子质量必然比其他结构转子质量轻,而且有螺母进行轴向预紧,转子本体刚度也较其他结构高,因此在理论上,转子结构 E 的临界转速就会比其他转子结构的高。

2.2.1 转子临界转速对比

计算转子临界转速最常用的方法主要为当量直径法^[16]和有限元法^[15],当量直径法将转子简化成一根光轴,忽略转子内部零件之间产生的应力,也无法考虑转子上详细的几何特征,而有限元法则可以较好地考虑这些因素产生的影响,因此文章主要使用有限元法对转子的临界转速进行计算与分析。

由于转子临界转速受空气轴承支撑刚度的影响^[17],而空气轴承支撑刚度还随着转子转速的提高而提高,可以使用有限元法计算不同轴承刚度下的转子临界转速,并通过拟合获得轴承刚度-转子临界转速曲线,此曲线与空气轴承刚度曲线的交点即为临界转速,转子结构 E 的共振转速为 145 980 r/min,预留 30% 安全余量后,1 阶临界转速为 102 186 r/min。

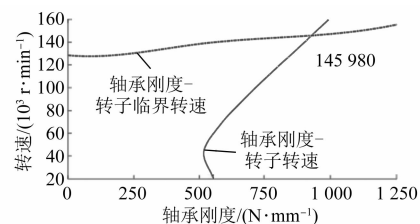


图 5 转子临界转速计算图

经有限元计算,不同转子结构的临界转速对比如图 6 所示,可以看出转子结构 E 的临界转速最高,轴向预紧螺母和空心转子结构确实可以大幅提高转子的临界转速,因此结构 E 在此方面优势较为明显。

2.3 转子质量和转动惯量对比与分析

较轻的转子质量有利于提高 FCAC 的功率密度、起停寿命以及耐振动寿命;较低的转子转动惯

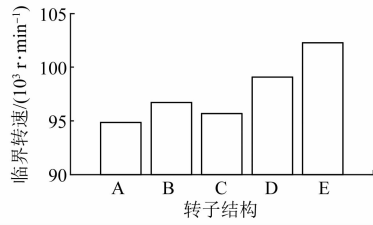


图6 不同转子结构的临界转速对比

量有利于提高 FCAC 的响应速度。不同转子结构的质量和转动惯量对比如图 7 所示,可以看出空心转子结构 D 和 E 的转子质量和转动惯量在 5 种结构中最小,结构 D 和 E 的空心结构带来的质量和转动惯量优势比较明显。

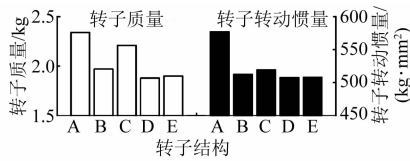


图7 不同转子结构的质量和转动惯量对比

2.4 转子结构综合对比分析

不同转子结构的质量和转动惯量对比除了对比转子强度、临界转速、质量和转动惯量外,还应对比转子的制造工艺性和可靠性。因此结合上述章节得到的对比结果,以转子极限应力越低,临界转速越高,质量越轻,转动惯量越低,制造工艺性越好,可靠性越好为原则,对这些转子结构的各个特点进行打分,进而得到不同转子结构的综合评分如表 4 所示,由此可以看出,转子结构 E 最优,随后依次为结构 B、D、A、C。

表 4 转子结构综合评分统计表

转子结构	转子评分				
	A	B	C	D	E
保护套强度	3	5	2	1	4
磁钢抗拉强度	4	2	5	3	1
磁钢抗压强度	5	5	2	1	3
临界转速	1	3	1	4	5
质量	1	4	2	5	5
转动惯量	1	4	2	5	5
制造工艺性	1	1	3	3	5
可靠性	3	3	1	1	5
合计	19	27	18	23	33

3 样机试制与试验验证

基于表 1 和表 2 所述设计参数,分别试制 D

和 E 转子结构的试验转子,转子实物如图 8 所示。

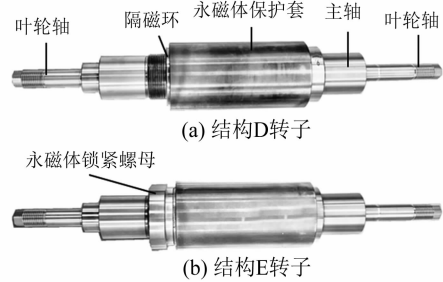


图8 结构 D、E 试验转子

3.1 转子模态敲击试验

在 FCAC 正式高速试验前,需要先进行转子模态敲击试验以测量高速电机转子的固有频率,进而推算转子的临界转速,以对 FCAC 能否稳定运行于高速工况有一个初步的判断。除此之外还可以通过实测与仿真数据的对比,对转子模态仿真模型进行校准。

转子模态敲击试验是转子在自由状态下,使用力锤敲击转子非配合面,对转子系统施加近似脉冲激励,使转子系统产生振动,通过加速度传感器采集振动信号,再经频谱分析得到转子系统的频响曲线。

敲击试验结果如图 9 所示,可以看出转子结构 D 和 E 的 1 阶固有频率分别为 2 402 Hz 和 2 506 Hz,预留 30% 安全区间,其自由状态下的 1 阶临界转速分别为 100 884 r/min 和 105 252 r/min,结构 E 的转子刚度确实比结构 D 要高一些。使用有限元法,转子结构 D 和 E 在自由状态下得到的 1 阶临界转速分别为 99 080 r/min 和 102 186 r/min,误差分别为 1.79% 和 2.9%,在工程要求范围内,验证了本文临界转速计算结果的准确性。

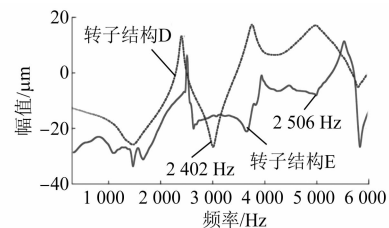


图9 转子模态敲击试验结果

3.2 空压机超速试验

FCAC 超速试验结果是判断其能否稳定运行

于高速工况的重要依据,还可以对转子强度仿真模型和转子模态仿真模型进行校准。

在 FCAC 超速试验中,FCAC 短时间(一般要求至少运行 1 min)运行于超速工况,并实时记录转子转速与轴心轨迹,通过对轴心轨迹的频谱分析判断转子高速运行的稳定性。使用结构 E 转子进行轴心轨迹试验的布置情况如图 10 所示,使用该试验台架可以通过背压阀调整电机负载,并通过电涡流位移传感器对转子端部进行检测。试验测得的轴心轨迹时频图如图 11 所示,可以看出转子轴心轨迹幅值未有次同步和同频幅值异常增大的现象,测试过程平稳,证实了本文转子强度和临界转速计算的准确性。



图 10 空压机超速试验布置图

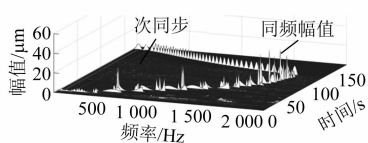


图 11 空压机轴心轨迹时频图

4 结 语

本文提出了一种轴向预紧固定永磁体的空心转子结构,并以一台额定功率 35 kW,峰值转速 100 000 r/min 的超高速永磁电机为例,研究对比分析了 5 种转子结构在转子强度、临界转速、质量、转动惯量、制造工艺性和运行可靠性方面的差异。对比结果表明,虽然新转子结构在转子强度上稍差于几种常见转子结构,但在其他方面均具有优异的特性。

制作了 2 种结构的试验转子,进行转子模态敲击试验和 FCAC 超速试验。转子模态敲击试验验证了本文临界转速计算结果较为准确;FCAC 超速试验结果表明,新结构转子可以在 100 000 r/min 转速下稳定运行,验证了新转子结构设计的合理性。

【参考文献】

- [1] BARBIR F. PEM fuel cells: theory and practice [M]. 2nd Edition. Salt Lake City: Academic Press, 2012: 15-17.
- [2] 郝冬,朱凯,张妍懿,等. 燃料电池电动汽车专用空压机技术简析[J]. 汽车零部件,2019(8): 96.
- [3] 鲍鹏龙,章道彪,许思传,等. 燃料电池车用空气压缩机发展现状及趋势[J]. 电源技术,2016,40(8): 1731.
- [4] 张毅. 燃料电池车用空气压缩机的发展现状及趋势分析[J]. 内燃机与配件,2019(2): 201.
- [5] QI L, GENG H, ZHANG J, et al. Design and research of a centrifugal compressor for automotive fuel cell systems [C] // 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2018: 1777.
- [6] 程鑫,曾国辉,杜光辉. 超高速永磁电机转子结构的研究[J]. 机电工程,2019,36(11): 1226.
- [7] 高起兴,王晓琳,丁强,等. 超高速微型永磁电机转子强度分析与结构设计[J]. 中国电机工程学报, 2021,41(8): 2856.
- [8] 陈鲍. 电动空压机: CN211116677U [P]. 2020-07-28.
- [9] 王芳永,刘全,蔡永君. 一种燃料电池发动机的单级增压直驱离心式空压机: CN11412151A [P]. 2020-07-14.
- [10] 张成义,陈运良,史进渊,等. 一种车载氢燃料电池专用直驱高速离心式空压机: CN210461110U [P]. 2020-05-05.
- [11] 张智明,章桐,王心坚,等. 燃料电池发动机的两级串联增压直驱离心式空压机: CN105889096B [P]. 2019-10-18.
- [12] 袁羲鑫,肖勇,张涛,等. 一种用于燃料电池空压机的空心轴转子结构及安装方法: CN113700657A [P]. 2021-11-26.
- [13] 王继强,王凤翔,鲍文博,等. 高速永磁电机转子设计与强度分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 140.
- [14] 沈建新,秦雪飞,尧磊,等. 高速永磁电机转子强度分析与护套设计[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2334.
- [15] 于天彪,王学智,关鹏,等. 超高速磨削机床主轴系统模态分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 183.
- [16] 张炳义,刘利军,冯桂宏. 兆瓦级超高速永磁电机轴刚性与模态分析[J]. 重型机械, 2017(6): 28.
- [17] 詹剑,张智明,张娟楠,等. 燃料电池车用超高速空压机临界转速分析与提高措施[J]. 中国计量大学学报, 2017, 28(2): 169.