

航空电源系统用高速实心式永磁同步电机设计

陈鑫杰, 王慧贞*

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211106)

Design of High-Speed Solid Permanent Magnet Synchronous Motor for Aviation Power System

CHEN Xinjie, WANG Huizhen*

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 211106, China)

Abstract: In response to the growing demand for aviation power systems in multi-electric aircraft, a high-speed solid-core permanent magnet synchronous motor with a rated power of 75 kW and a rated speed of 65 000 r/min is designed in this paper. The type of high-speed motor operates at high speeds and has a high loss density, and its design is constrained by multiple physical fields. The motor performance, rotor strength, and cooling system are designed from three perspectives: electromagnetic field, mechanical field, and temperature field, through finite element simulation. And the accuracy and rationality of the design is verified by experimental results. The analysis results provide a reference for the motor products of the multi-electric aircraft power generation system.

Key words: solid rotor; electromagnetic field; temperature field; mechanical field

摘 要: 针对多电飞机航空电源系统日益增长的用电需求,设计了一台额定功率为 75 kW、额定转速为 65 000 r/min 的高速实心式永磁同步电机。此类高速电机运行速度快、损耗密度大,其设计受到多物理场的共同约束。通过有限元仿真,从电磁场、机械场和温度场三个角度对电机性能、转子强度和冷却系统进行了设计,并通过试验验证了设计的合理性。分析结果为多电飞机电源系统电机产品提供了参考依据。

关键词: 实心转子; 电磁场; 温度场; 机械场

0 引言

多电飞机是用电力系统取代部分二次能源系统的飞机,大多数机载设备和操纵系统均由电能驱动,可以实现飞机的电气化管理。这样能够有效提升飞机的可靠性,降低运行成本,减小飞机的体积、减轻飞机的质量。但同时用电需求的增加对航空电源系统的电源容量和质量都提出了更高的要求^[1-2]。永磁同步电机具备高功率密度、高效率、高转速运行能力以及快速动态响应等优点,因此可以将其作为发电机^[3]。

该类电机的高功率密度和高安全可靠性能均对电机设计提出了较高的要求。首先是功率密度,不同于常规电机,此类电机转速很高,受限于稀土永磁材料抗拉属性的不足与转子临界转速,转子外径与长度均无法设计过大。此外,永磁材料高温下易退磁,电机的额定输出电流也不允许过大,这就反过来限制了电机的功率密度。其次是温度场方面,高功率密度也带来了较大的损耗密度,散热系统的设计需要保证永磁体工作温度不会太高以保证其安全^[4-5]。特别是水冷散热系统的设计需要在对流换热系数与流动阻力之间达成平衡。然后是机械场方面,护套厚度的设计也要合理,过大的护套不仅提高了整个电机系统的质量,还额外需要更多的气隙空间以便安装;过小的护套设计又无法保证永磁体的安全。最后,过盈量的设计也同样需要兼顾对永磁体的保护,与自身的装配难度和材料的屈服强度矛盾。所以如何在兼顾电磁场、机械场与温度场的情况下完成此类电机设计是核心问题。

基金项目: 基于回热型微型涡轴发动机的起发一体式混合动力系统研究(TDP2100101)

Research on Integrated Start-up and Power Generation Hybrid Power System Based on Regenerative Micro Turbine Engine (TDP2100101)

本文依据一架小型无人飞机的发电需求,设计了一台 75 kW、65 000 r/min 的高速永磁同步电机,通过有限元仿真从电磁场、温度场和机械场三个角度对电机性能、转子强度和冷却系统进行了设计,完成了电机的整套设计流程。设计流程与分析结果可为高功率密度航空电源系统的电机设计提供参考依据。

1 实心圆柱式转子结构

如果永磁同步电机运行转速达到高速范畴,一般就采用表贴式转子结构加护套的组合替代应力点较多的内嵌式结构^[6-7]。相较于传统表贴式永磁同步电机的转子结构,图 1(a)的实心式结构改变了永磁体张贴在转轴上的装配方式。首先将永磁体与护套过盈装配,再把护套两边延伸出一段距离与转轴焊接,最后将转子整体固定在转轴上,如图 1(b)所示,其中四段加粗线条为延伸出的焊接层。这种设计不仅使得转子在相同尺寸下具有更大的磁场强度,还更利于把电机做小,使其承受的强度极限更大^[8]。

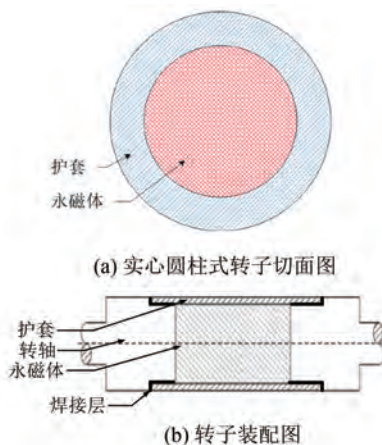


图 1 实心圆柱式转子结构

Fig. 1 Structure of solid cylindrical rotor

2 电磁设计

2.1 尺寸参数设计

电机主要尺寸和性能指标之间的关系为^[8]

$$\frac{D_{s1}^2 L n}{P} = \frac{6.1}{K_1 K_2 \alpha B_8 A} \quad (1)$$

式中: D_{s1} 为定子内径; L 为叠片长度; n 为额定转速; P 为额定功率; K_1 为气隙磁场波形系数; K_2 为电枢绕组系数; α 为计算永磁体极弧系数; B_8 为

陈鑫杰,等:航空电源系统用高速实心式永磁同步电机设计

气隙磁通密度; A 为电机线负荷。其中电机的性能指标在表 1 中给出。

高功率密度电机为获得足够的输出能力,一般要求电机转子不能太小。但区别于常规电机,高速电机的定子内径需要进行限制以防止大外径转子在高速旋转产生过大的离心力超过材料本身的许用应力^[9],材料许用应力与半径关系为

$$\rho r^2 \omega^2 \leq \frac{[\delta]}{C} \quad (2)$$

式中: ρ 为材料密度; r 为定子内半径; ω 为角速度; $[\delta]$ 为材料许用应力; C 为安全系数。

从电机损耗角度来看,裂比的选取对电机损耗的影响很大,如图 2 所示。裂比即定子内径 D_{s1} 与定子外径 D_{s2} 的比值,其过大或者过小都会使得电机总损耗值偏大^[10],这对电机的效率及散热均不利。

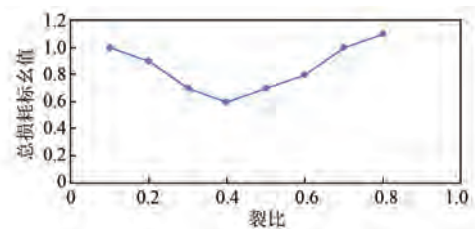


图 2 裂比与损耗的关系

Fig. 2 The relationship between ratio and loss

本文的设计流程是:先结合关系式(1)和(2)选取合适的气隙磁密和线负荷用来粗定电机的转子尺寸^[11],再根据总损耗关系,选取合适的裂比,确定定子的尺寸。然后考虑到过高的电频率容易产生过大的铁耗和涡流损耗,故此电机的极对数选择为 1^[12]。但低极对数带来了较大的振动噪声,通过针对性加厚定子轭部对先前粗定的转子尺寸进行微调^[13]。选择双层分布式绕组有利于提高电势正弦度,减少谐波含量^[14];选择小线径漆包线以减少集肤效应带来的交流损耗^[15-16]。综上所述得到电机的主要尺寸如表 2 所示。

表 1 电机性能指标

Tab. 1 Performance indicators of the motor

参数名称	参数值
额定功率/kW	75
额定转速/(r · min ⁻¹)	65 000
电流峰值/A	400
质量/kg	≤20

表 2 电机主要尺寸参数	
Tab. 2 Main dimensions of the motor	
参数名称	参数值
定子外径/mm	130
定子内径/mm	52
铁心长度/mm	195
气隙长度/mm	6
定子轭厚/mm	20
并绕股数/股	89
定子裂比	0.4
永磁体材料	钕钴

2.2 有限元验证

采用二维有限元法,利用 Maxwell 电磁仿真软件搭建了电机模型,并进行仿真分析以验证上述尺寸的电磁输出能力。图 3 分别从空载和负载两个角度对电机的性能进行分析,其中负载仿真条件的激励设置为 155 V 交流电压源模拟电机在 65 000 r/min 直流稳压系统下的运行工况。

从磁密云图 3(a)、(c)中可以看出,电机齿部磁密在 1.2 tesla 左右,齿尖处磁密在负载时可以达到 1.4~1.5 tesla。轭部磁密一般在 0.8 tesla 左右,局部磁密在 1.2 tesla。可以看出此电机针对性加厚了定子轭部,其磁密较低。该电机铁心材料选择特高频用 2 mm 武钢的硅钢片 20WTG1500,其磁饱和密度在 1.52 tesla 左右。为了保证高速电机的控制性能,这样偏低的磁密设计的是比较合理的。同时从图 3(b)中可以看出空载反电势波形正弦度很高,谐波含量仅为 1.8%。图 3(d)表明在航空电源稳压系统下,该电机转速在 65 000 r/min 时,通 225 A 的有效值电流,可产生 11 N·m 及以上的扭矩,保证了 75 kW 的输出功率。

3 机械场分析

高速运行时的转子不但要满足机械强度的标准,而且必须符合转子动力学的要求,防止因旋转至共振点导致剧烈的振动,出现扫膛等故障^[17-18]。

为了保护永磁体的安全,借助 Workbench 仿真软件中的 Static strucal 和 Modal 模块设计了该电机的护套、过盈量,并对电机的临界转速进行分析校验。

3.1 护套厚度与过盈量的设计

护套选用高温镍合金材料(GH4169),其理论

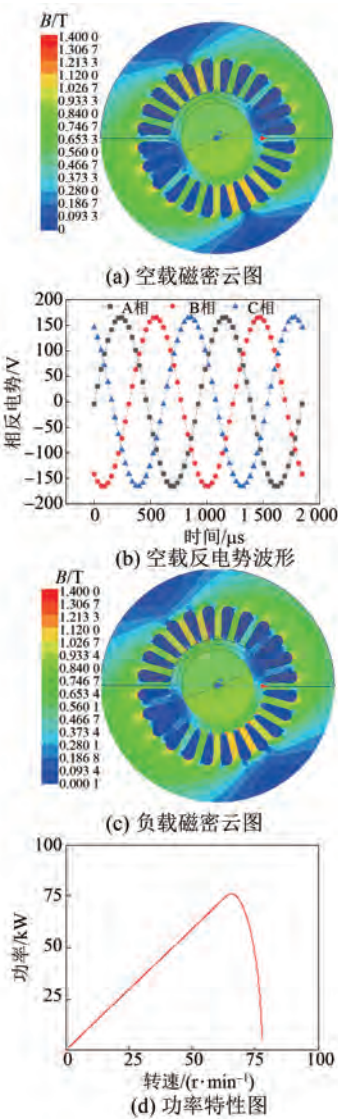


图 3 电磁特性图

Fig. 3 Electromagnetic characteristics diagram

屈服强度在 900 MPa 左右,相较于碳纤维,拥有更优秀的散热能力。图 4 是搭建的静力学仿真模型,施加 65 000 r/min 绕轴向的旋转载荷以模拟运行时的工况,从转子静力学角度进行分析。



图 4 转子三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model of the rotor

从图 5 可以看出增加护套厚度不仅可以减小永磁体所受的最大切向应力,还可以减少护套本

身所受的最大等效应力。而增加护套和永磁体装配时的过盈量,同样可以减小永磁体受到的离心力,但是会增大装配难度和护套所受等效应力。综合考量,最后选取 0.08 mm 的过盈量和 5 mm 合金护套,这使得永磁额定运行时体所受最大切向应力小于 0,即永磁体运行过程中承受压力,而且护套本身所受最大等效应力不超过 800 MPa,离该合金护套的理论屈服强度仍有一定裕量。

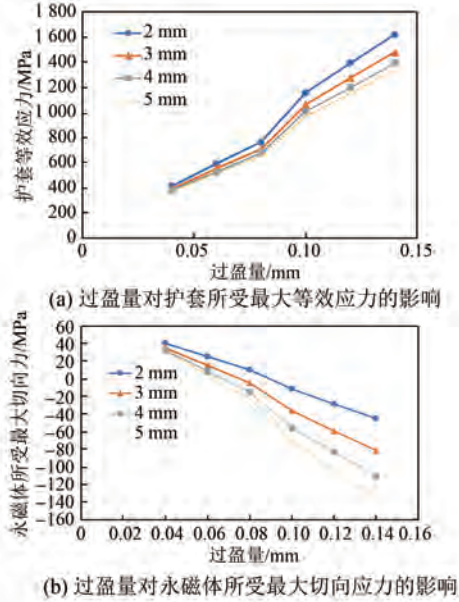


图5 过盈量对护套选取的影响

Fig. 5 The impact of interference fit on the selection of sheath

3.2 转子动力学分析

对高速电机转子进行动力学分析,如图 6 所示,通过在转轴左侧端面施加位移约束等效为实际转轴端约束,最后施加两个轴承约束在转轴两端的表面。电机轴承选择角接触轴承,轴承刚度为 10^5 N/m。

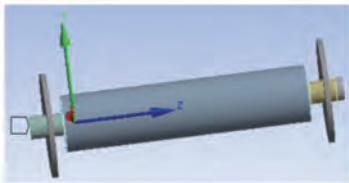


图6 轴承约束

Fig. 6 Bearing constraints

计算结果如图 7 所示,加入轴承约束后,转子系统的一阶临界转速为 77 746 r/min,而本电机额定转速为 65 000 r/min,留有 20% 的转速安全

裕量,这保证了电机以额定转速运行时不会因为过于靠近临界转速而产生过大的振动。

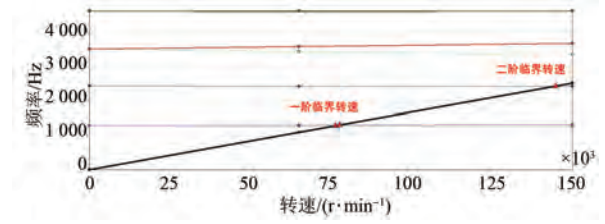


图7 坎贝尔图

Fig. 7 Campbell diagram

4 温度场分析

高功率密度的特点同样给电机带来了较大的损耗密度,从而引起电机温升升高,这可能导致永磁体不可逆退磁等风险^[19],所以散热系统的设计与电机温度分布分析是高功率密度电机设计的最后一环。

4.1 水道设计

电机采用定子机壳布置水道的水冷散热方式,形式为螺旋式水冷结构^[20-21]。水道散热系数和水道尺寸的关系:

$$h_e = N_u \times \frac{\alpha_o}{d_e} \quad (3)$$

式中: h_e 为对流换热系数; N_u 为努塞尔数; α_o 为水的导热系数; d_e 为水道特征尺寸。水道流动阻力为沿层阻力 h_f 和局部阻力 h_j 之和,两者与水道尺寸的关系分别为

$$h_f = \lambda_f \frac{L_e}{d_e} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

$$h_j = \left[0.131 + 0.663 \left(\frac{d_e}{D_{s2}/2} \right)^{3.5} \right] \cdot \frac{2v^2 \cdot n_1}{g} \quad (5)$$

式中: λ_f 为阻力系数; g 为重力加速度; n_1 为水道数量; D_{s2} 为定子外径。水道的特征尺寸 d_e 、水流速度 v 以及水道总长度 L_e 都可以由唯一的变量水道数量 n_1 、常数水流量 Q 和水道结构常数 b 等表示,可写为

$$\begin{cases} d_e = 2b(L - bn_1)/L \\ v = Qn_1/(bL - b^2n_1) \\ L_e = n_1\sqrt{(\pi D_{s2})^2 + (L/n_1)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: L 为电机叠片长度;水道结构常数 b 由水道整体所需的机械强度决定,可取机壳厚度的一半。

这样,电机散热系数、流动阻力均可用 n_1 这个唯一变量表示,而 n_1 在叠片长度 L 以及 n_1 确定的情况下,又可以由水道宽度 a 表示,这样就得到了对流换热系数、流动阻力与水道宽度的关系,如图 8 所示。

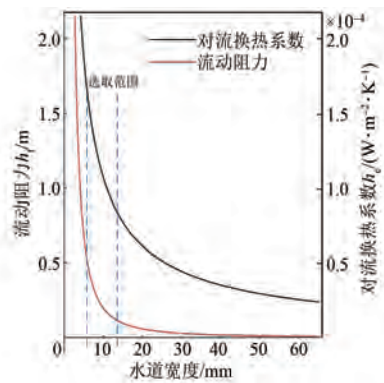


图 8 对流换热系数、流动阻力与水道宽度的关系

Fig. 8 The relationship between convective heat transfer coefficient, flow resistance, and width of waterway

由图 8 可知,保证相同水流量 Q 时,水道宽度 a 设计的过小会产生较大的流动阻力; a 过大又会导致对流换热系数不高。综上考量,选择蓝色区域的 a 最为合理,此时对流换热系数较高,同时沿层阻力也不大,故最终选取水道宽度 a 为 10 mm,具体的水道模型如图 9(b)所示。

4.2 仿真验证

借助 Ansys 中 Fluent 模块对电机温升进行了仿真分析。表 3 给出了温度场仿真主要材料的参数,图 9(a)为建立的电机温升仿真三维模型。

表 3 电机部分材料的热参数

Tab. 3 Thermal parameters of some motor materials		
材料	导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	比热容/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
钕钴	7.5	—
GH4169	14.7	435
绝缘	0.23	—
轴承钢	40	450

通过解析法和有限元法等方式估算电机实际运行时产生的各类损耗,作为 Fluent 仿真的热源。设置电机各部位材料的导热系数以及比热容,并将进水口温度设为 26 ℃、水流量设为 6 L/min,最终得到电机温度分布如图 10 所示。

从图 10(a)、(c)、(d)中可以看出因为采用周向螺旋形水冷方式,所以从入水口到出水口,定

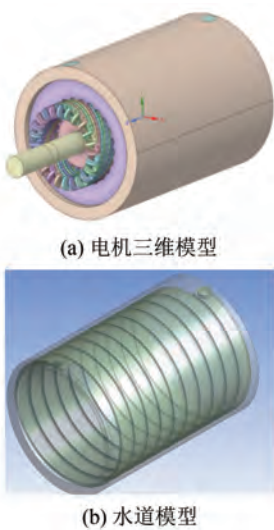


图 9 电机建模

Fig. 9 Motor modeling

子和转子轴向上的温度均呈现梯度差异现象,电机的最高温度出现在转子末端,为 86.2 ℃。其次是绕组端部的温度,达到 74 ℃左右,如图 10(b)所示。这样的稳态温度既不会使永磁体产生较大的剩磁性能损失和不可逆退磁,也不会烧毁绕组间的绝缘。

5 试验验证

为了验证所设计电机的合理性,制造了一台样机。其控制器是专门设计的高速电机控制器,控制主体为 DSP28379 和 CPLD,如图 11 所示。

图 12 和表 4 对电机部分数据进行了测试,该电机以 65 000 r/min 转速运行,空载时线电压幅值达到 270 V,满足航空电源系统设计要求,交/直轴电感和相电阻使用数字电桥设备测量,均与仿真值相差不大。额定转矩由扭矩传感仪器测量得到,额定运行时测量结果为 12.3 N·m 左右,符合设计要求。电机持续运行数小时,未出现较大振动与异响,验证了机械设计的合理性。电机长时间运行后绕组温度通过温度传感器测量得到,最高为 76 ℃。

6 结语

通过有限元仿真,从电磁场、机械场和温度场三个角度对电机性能、转子强度和冷却系统进行研究,设计了一款用于航空电源系统的高速圆柱式转子永磁同步电机,并且通过试验验证了其

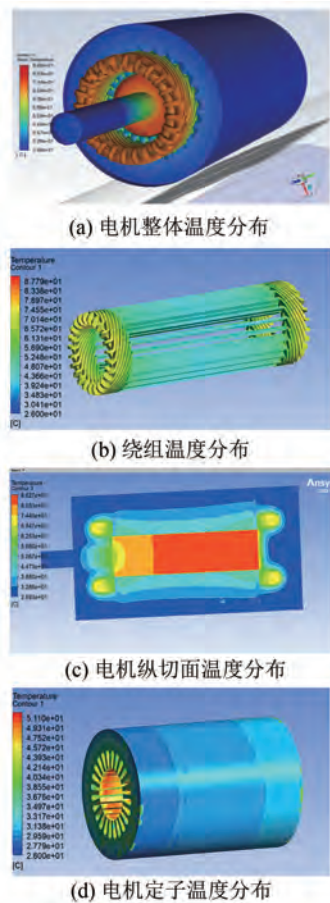


图 10 电机温度分布

Fig. 10 Motor temperature distribution

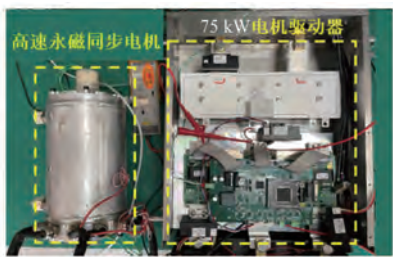


图 11 样机与试验平台

Fig. 11 Prototype and experimental platform

表 4 电机的试验数据与仿真数据对比

Tab.4 Comparison of experimental data and simulation data of the motor

测试参数名称	仿真数据	试验数据
交、直轴电感/ μH	12、12	12.7、13
空载反电势/V	270	270
额定转矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	11.3	12.3
绕组温度/ $^{\circ}\text{C}$	65~74	76

可行性。具体设计如下:

(1) 电机采用实心圆柱式转子结构增强磁场

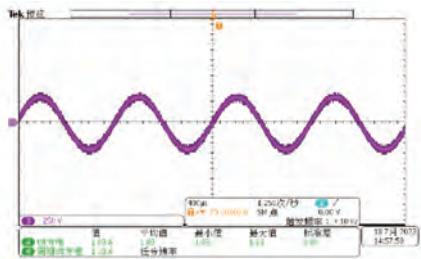


图 12 65 000 r/min 的空载线反电势波形

Fig. 12 No-load back electromotive force waveform at 65 000 r/min

强度、增大承受的强度极限;选择极低对数与合适的裂比减小损耗;加厚定子轭部减小振动噪声;细线径、多股并绕减小交流损耗,最终电机总质量为 20 kg,满足预期要求。

(2) 转子设计为细长型,保护套选用 5 mm 高温镍合金护套,采用 0.08 mm 过盈装配,可使得永磁体在转速 65 000 r/min 时所受的最大切向应力值为负,保护套受到的最大等效应力值不超过其屈服强度,且留有一定裕量。转子系统在使用高轴承刚度的约束下,离一阶临界转速有 20% 的裕量。

(3) 电机的损耗密度较大,散热需求较高,采用定子上布置螺旋式水道、绕轴 10 圈的水冷设计方案,仅需 6 L/min 的水流量即可保证全局长时间工作温度小于 90 $^{\circ}\text{C}$,保证了永磁体稳定运行。

参考文献

[1] 张越雷. 变速永磁同步发电系统关键技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
ZHANG Y L. Research on key technologies of variable speed permanent magnet synchronous generator [D]. Changsha: Hu ' nan University, 2016.
[2] 朱新宇. 多电机及其技术发展分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2007, 4: 17-22.
ZHU X Y. Analysis on the technological development of more electric aircraft [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2007, 4: 17-22
[3] 王永杰. 应用于 APU 启动/发电系统的永磁同步电机发电技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
WANG Y J. Research on power generation technologies of permanent magnet synchronous machines for integrated starter/generator system of

- auxiliary power units [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [4] GAO F, BOZHKO S, ASHER G, et al. Control design for PMM starter-generator operated in flux-weakening mode [C] // 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), 2013.
- [5] GAO F, ZHENG X C, BOZHKO S, et al. Modal analysis of a PMSG-based DC electrical power system in the more electric aircraft using eigenvalues sensitivity [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(1): 65-76.
- [6] 魏嘉麟. 实心圆柱式超高速永磁电机建模与极限设计[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(8): 27-36.
- WEI J L. Modeling and ultimate design of ultra-high-speed machine with solid cylindrical permanent magnet rotor [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(8): 27-36.
- [7] 董剑宁, 黄允凯, 金龙. 高速永磁电机设计与分析技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4640-4653.
- DONG J N, HUANG Y K, JIN L. Review on high speed permanent magnet machines including design and analysis technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4640-4653.
- [8] 程文杰, 曹广东, 邓志凯, 等. 超高速 PMSM 电磁性能解析解及转子设计[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(12): 104-115.
- CHENG W J, CAO G D, DENG Z K, et al. Analytical solution to electromagnetic performance of ultrahigh-speed permanent magnet synchronous machine and rotor design [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(12): 104-115.
- [9] 邵阳阳. 超高速永磁同步电机的设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- SHAO Y Y. Design of ultra-high speed permanent magnet synchronous motor [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [10] 张超. 基于裂比的非晶合金永磁电机设计技术[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(8): 48-53.
- ZHANG C. Design technology of amorphous alloy permanent magnet motor based on split ratio [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(8): 48-53.
- [11] 熊昱强. 真空干泵用爪极永磁电机设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(5): 48-53.
- XIONG Y Q. Design and analysis of claw pole permanent magnet motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(5): 48-53.
- [12] 黄孝键. 基于多物理场的高速永磁同步电机多目标优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- HUANG X J. Research on multi-objective optimization of high-speed permanent magnet synchronous machine base on multi-physics fields [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [13] 张洪涛. 永磁同步电机噪声分析及优化[J]. 防爆电机, 2023, 58(5): 20-25.
- ZHANG H T. Noise analysis and optimization of PMSM [J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2023, 58(5): 20-25.
- [14] 赵广泰. 高速永磁同步电机的设计与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- ZHAO G T. Design and analysis of a high speed permanent magnet synchronous machine [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [15] 许欣. 高速电机定子单槽绕组交流损耗近似解析建模及验证[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4307-4310.
- XU X. Approximate analytical modeling and verification of AC loss in stator single slot windings of high speed motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4307-4310.
- [16] 江善林. 高速永磁同步电机的损耗分析与温度场计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- JIANG S L. High speed permanent magnet synchronous motor loss analysis and temperature field calculation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [17] 赵建亭. 120 000 r/min 高速电机转子临界转速分析[C]. 第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会议论文集-S09 结构、强度和可靠性相关技术, 2019.
- ZHAO J T. Critical speed analysis of 120 000 r/min high-speed motor rotor [C] // Proceedings of the 40th Technical Exchange Meeting and the 4th Aerospace Power Joint Conference-S09 Structure, Strength and Reliability Related Technologies, 2019.
- [18] 李争. 多自由度永磁同步电机转子动力学特性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2269-2276.

- LI Z. Rotor dynamics characteristic analysis of multi-degrees-of-freedom permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2269-2276.
- [19] 王晗. 高速永磁电机损耗与温升的抑制研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- WANG H. Study on suppression of loss and temperature rise of high-speed permanent magnet motor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [20] 赵志文. 基于 CFD 的高速电机冷却结构设计与温度场分析[J]. 微特电机, 2023, 51(3): 25-30.
- ZHAO Z W. Cooling structure design and temperature field analysis of high-speed motor based on CFD [J]. Small & Special Electrical Machines, 2023, 51(3): 25-30.
- [21] 杨学威. 一体式水冷电机壳结构设计与优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- YANG X W. Design and optimization of integrated water cooling motor shell structure [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
-
- 收稿日期:2023-10-09
收到修改稿日期:2023-11-27
- 作者简介:
陈鑫杰(1999-),男,硕士研究生,研究方向为高速永磁同步电机本体设计, 1315347315@qq.com;
* 通信作者:王慧贞(1964-),女,学士,研究员,研究方向为电机设计与控制技术, wanghz@nuaa.edu.cn。

Design of High-Speed Solid Permanent Magnet Synchronous Motor for Aviation Power System

CHEN Xinjie, WANG Huizhen*

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 211106, China)

Key words: solid rotor; electromagnetic field; temperature field; mechanical field

More-electric aircrafts, which replace a portion of the secondary energy system with an electric power system and drive most onboard equipment and control systems with electricity, are developed to enable the electrification management of aircrafts. The increased demands for electricity impose higher requirements on the capacity and quality of the power supply of the aviation power system. Permanent magnet synchronous motors with many advantages such as high power density, high efficiency, high-speed operation capability, and fast dynamic response performance, are suitable for use as starter/generators for auxiliary power devices due to their short-term operation characteristics.

This paper presents the design of a high-speed permanent magnet synchronous motor (PMSM) with a rated power of 75 kW and a rated speed of 65 000 r/min, specifically tailored to the starting/generating needs of a small unmanned aircraft. The high power density and high safety reliability of such motors pose significant challenges to the design process.

Firstly, the power density is a critical factor. Unlike conventional motors, these motors operate at high speeds. Due to the limitations of the tensile properties of rare earth permanent magnetic materials and the critical speed of the rotor, the outer diameter and length of the rotor cannot be designed too large. Moreover, the demagnetization of permanent magnetic materials at high temperatures and the restriction on the output current of the motor at rated times indirectly limit the power density of the motor.

Secondly, in terms of the temperature field, the

high power density also results in a larger loss density. The design of the cooling system needs to ensure that the working temperature of the permanent magnet will not be too high to ensure its safety. In particular, the design of the water-cooled cooling system needs to strike a balance between the convective heat transfer coefficient and the flow resistance.

In the mechanical field, the design of the protective sleeve thickness must be reasonable. An overly thick sleeve not only increases the weight of the entire motor system, but also requires additional air gap space for installation. Conversely, a design with too thin a sleeve cannot ensure the safety of the permanent magnet. The design of the interference also needs to take into account the protection of the permanent magnet, the difficulty of assembly, and the yield strength of the material itself.

Therefore, how to complete the design of such motors while taking into account the electromagnetic field, mechanical field, and temperature field is a core issue.

The stator material of the motor is 20WTG1500 silicon steel sheet. The rotor has a slender structure with an outer diameter of 40 mm and a length of 195 mm, and the total weight is not exceed 20 kg.

During load operation, the magnetic flux density of each part is not exceed 1.5 T, and the designed magnetic circuit is linear, ensuring the precision of control. The sheath is made of a high-temperature nickel alloy material with a thickness of 5 mm, and the interference fit is 0.08 mm.

The cooling system is a spiral water cooling

design on the stator, with the waterway arranged in a spiral along the shaft, totaling 10 turns. This design ensures a high power density, while being very reliable in terms of mechanical strength, and the cooling effect is also very nice.

Finally, the accuracy and rationality of the design is verified by experimental results. And the analysis results provide a reference for the motor products of the multi-electric aircraft power generation system.

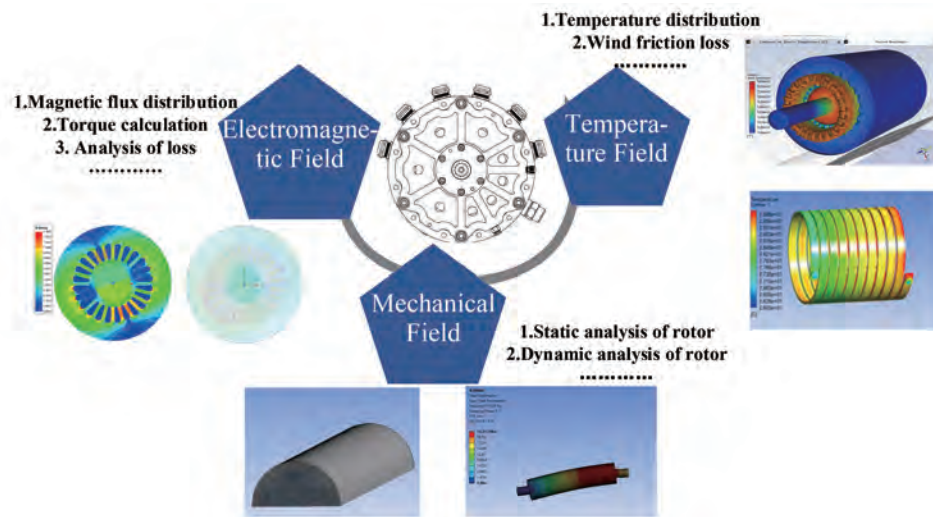


Fig. 1 The full process of motor design