

电动尾桨电机热特性的仿真与散热设计研究

曹学睿*, 朱 晨

(中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333000)

Thermal Characteristics Simulation and Heat Dissipation Design of Electric Tail Rotor Motor

CAO Xuerui*, ZHU Chen

(China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333000, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the problem that the relatively high temperature rise caused by high power density affects the power of the motor, this paper takes the high-power-density electric tail rotor motor drive system as the research object and systematically carries out the optimization work on the performance of the motor's thermal characteristics and heat dissipation structure. The purpose is to improve the heat dissipation efficiency of the motor by modifying the topological structure of the motor's heat dissipation, and ultimately increase the power density of the motor. [Methods] This study presented a systematic integrated optimization design for system-level heat-dissipation fin coupling. Through computational fluid dynamics simulations of the airflow field surrounding the motor system, the spatial arrangement of heat-dissipation fins-key components of the system was optimized to enhance thermal management performance. Subsequently, nine different heat dissipation topological structures were designed and their efficiency was verified through simulation, resulting in the optimal fin topology. Finally, the accuracy of the research was confirmed by simulating the fluid and temperature fields using the finite element method. [Results] Simulation results demonstrated that when the heat-dissipating metal fins of the motor and the controller housing were arranged alternately at a 50-degree angle, turbulent flow was generated in the airflow field surrounding the housing, effectively enhancing the heat-dissipation performance. The multi-layer square-hole heat-dissipation topology not only offers favorable manufacturability and processability but also achieves high heat-dissipation efficiency. Compared with conventional heat-dissipation fin structures, this innovative design boosted heat-dissipation efficiency by 9.3%. [Conclusion] The systematic thermal management solution proposed in this paper can significantly improve the motor cooling efficiency, accumulating practical experience for the subsequent thermal

structure design of aviation motors.

Key words: electric tail rotor; thermal characteristic; heat-dissipation fin; multi-layer square-hole heat-dissipation topology

摘 要:【目的】本文针对高功率密度导致的电机温升过高问题,以高功率密度电动尾桨电机驱动系统为研究对象,系统开展了电机热特性和散热结构的性能优化研究。通过改进电机散热拓扑结构,旨在提升电机的散热效率,最终实现电机功率密度的提升。【方法】开展系统级散热翅片耦合一体化优化设计,通过对电机系统周围风场进行仿真计算,从而优化系统级散热翅片排布方式;设计 9 种不同散热拓扑结构并对散热效率进行仿真验证,得到最优的翅片拓扑结构。最后通过有限元法对流体场和温度场进行仿真计算,验证了研究工作的准确性。【结果】仿真结果表明,当电机与控制器壳体散热金属翅呈 50° 角度交错布置时,壳体周边风场产生紊流,增强散热效果;采用多层方孔型散热拓扑结构兼具生产加工可行性和高散热效率,与传统散热翅结构相比,其散热效率可提升 9.3%。【结论】本文所提系统散热方案可显著提升电机散热效率,为后续航空电机散热结构设计积累了实践经验。

关键词: 电动尾桨;热特性;散热翅片;多层方孔型散热拓扑结构

0 引言

低空经济作为国家战略性新兴产业,已被正式列入 2024 年政府工作报告,其发展对推动绿色航空转型具有重要意义。以电动垂直起降飞行器 eVTOL 为代表的电驱动飞行器,依托多电/全电动力系统,可显著降低碳排放与噪音污染,现已成为低空经济的关键载体^[1-5]。在这一技术浪潮中,电驱动系统作为飞行器的核心动力部件,其功率

密度、热管理能力和可靠性直接决定了飞行器的性能边界与安全性。

电动尾桨 (Electric Tail Rotor, ETR) 系统是直升机电动化的典型应用,其技术特征体现为高功率密度与紧凑型集成设计。然而,功率密度的提升也导致电机运行时温升急剧增加^[6-8]。例如,航空电机的功率密度为传统车用电机的 2 倍以上,若散热效率不足,不仅会引发电磁性能衰减、材料老化,还可能因局部过热导致系统故障,严重威胁飞行安全。

国际层面,欧盟“洁净天空”计划长期推动绿色航空技术研发,其中 ETR 是绿色旋翼机专题的核心方向。2020 年,贝尔公司发布的如图 1 所示的贝尔 429 改装验证机首次采用分布式电驱动抗扭矩系统,通过 4 个独立电机驱动涵道尾桨,实现了扭矩动态调节与故障冗余设计。这一案例凸显了 ETR 在效率提升和安全性方面的潜力,但也暴露了高功率电机在紧凑空间内的散热挑战:高度集成的电机与控制器需共享有限散热风场,导致热管理难度显著增加。



图 1 贝尔 429 ETR 直升机验证机

Fig. 1 Bell 429 ETR helicopter demonstrator

当前,电机温度场分析主要依赖热网格法^[9-11]、有限元法^[12-15]和有限体积法^[16-20]等数值方法。此外,仿真分析结合物理模型试验验证也是研究电机温度场的重要方法之一^[21-22]。宋益明等^[23]对比指出电动直驱尾桨虽效率更高,但温升速率远超传统机械结构;江浩等^[24]则证明合理控制永磁电机温度场可提升涵道尾桨功率密度。然而,现有研究多聚焦单一部件(如电机或控制器)的散热优化,缺乏对电机-控制器一体化系统的协同热设计,难以满足高集成系统的工程需求。

针对上述问题,本文以 80 kW 直升机 ETR 系统为研究对象,开展系统级散热结构优化研究,通过建立电机与控制器一体化有限元模型,量化两者散热路径的相互影响;设计多种机壳散热翅片拓

扑,通过热仿真分析其散热效率;结合涵道尾桨气流特性,优化散热风道与翅片布局的匹配性。本研究旨在为高功率电驱动系统提供可复用的散热设计范式,推动 ETR 技术在绿色航空中的应用落地。

1 尾桨电驱动系统一体化设计

1.1 尾桨驱动系统结构一体化设计

尾桨电驱动系统内电机和控制器通常采用一体化方式排布,电机和控制器共用一个外壳,提高了系统机械结构安装紧凑性,缩短了两个部件间的线束连接长度,保证电机与控制器共享直升机尾桨旋转产生的高速散热风场,提升了系统散热效率。本文所述尾桨电驱动系统如图 2 所示,其主要参数如表 1 所示。



图 2 直升机尾桨电驱动系统结构图

Fig. 2 Structural diagram of the electric drive system for the tail rotor of helicopter

表 1 系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of the system

参数名称	参数值
额定功率/kW	80
系统效率/%	94
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
功重比/(kW·kg ⁻¹)	3
电枢绕组材料	YQ240

1.2 电机系统散热齿排布设计研究

对电机和控制器机壳结构进行耦合设计,两部分散热齿条的位置排布会导致不同的散热效率。

根据空气散热特性,空气平稳流动变换为湍流时,散热效率会显著提升。因此,在一体化设计电机和控制器机壳时,需将电机和控制器的散热金翅条错开一定的角度,使得两者的端面出现气流紊乱现象进而提高机壳部分的散热效率。电机与控制器机壳角度误差示意图如图 3 所示,电机

和控制器机壳散热条未错开角度和错开角度的风场对比分析如图4、图5所示。

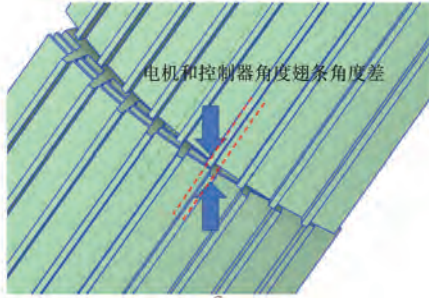


图3 电机和控制器机壳角度误差示意图

Fig. 3 The angular error diagram between the motor and the controller housing

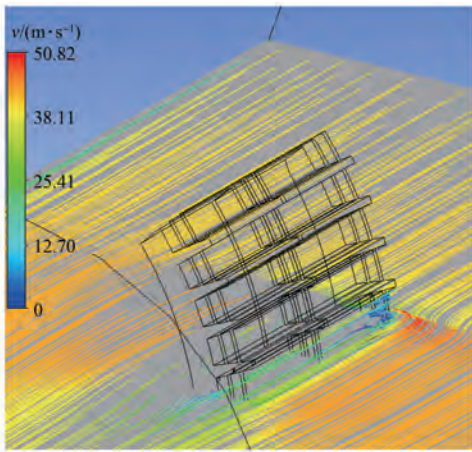


图4 电机和控制器机壳散热齿角度无偏差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of zero-angle deviation for heat dissipation fins on motor and controller housing

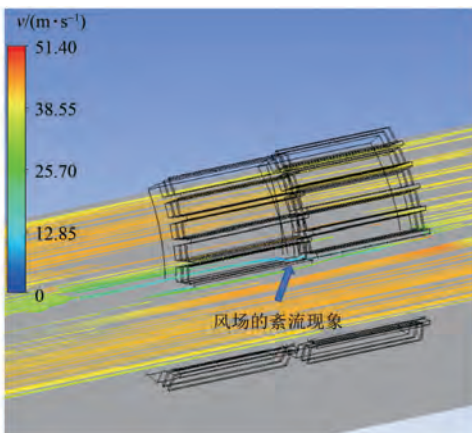


图5 电机和控制器机壳散热齿有角度偏差
风场紊流现象示意图

Fig. 5 Motor and controller housing cooling teeth
angle deviation & wind field turbulence diagram

由图5可知,当电机与控制器出现50%错位角度后,风场出现了风道畸变。流体学中流体的紊流会增加对流散热系数,进而提高了控制器侧机壳的散热效率。因此,将电机和控制器的散热金翅条错开50%的角度。

2 推进电机不同散热结构散热特性对比分析

ETR高功率密度电机散热性能的提升与散热结构的选择密切相关,传统散热翅片结构难以满足高功率密度电机的散热需求。为完成高功率密度电机散热结构优化设计,对比分析ETR高功率密度电机不同散热结构下的气流通道布局对散热性能的影响。利用solidworks软件建立不同散热结构的模型,确保模型尺寸和厚度基本一致,再将模型导入温度场仿真软件中进行仿真,热源设置为相同条件,散热风速设置为流体场计算得到的强制风冷风速,并采用相同精度的网格剖分以确保仿真计算的准确性。

2.1 模型建立的理论依据

电机定子硅钢片、电枢绕组和转子磁钢等部件均因损耗而生热,通过热传导由电机内部填充的散热介质到达电机外壳,再通过热对流和热辐射的方式传递到周围环境中。在这个散热过程中,热传导和热对流占主要部分。

使用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)仿真软件对电机模型进行仿真计算,在强迫风冷的冷却条件下,基于传热学基本原理,电机机壳通风道内流动的空气符合流体力学中的Navier-Stokes方程^[10],即:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_1 \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho_1 \left(\frac{\partial v_1}{\partial \tau} + u \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} + w \frac{\partial v_1}{\partial z} \right) &= F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_1}{\partial z^2} \right) \\ \rho_1 \left(\frac{\partial w}{\partial \tau} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v_1 \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: ρ_1 为流体密度; u, v_1, w 分别为 τ 时刻 (x, y, z) 处流体的速度分量; F_x, F_y, F_z 分别为单位体积流体所受外力在 x, y, z 方向上的分量; p 为流体压强; η 为流体的动力黏度。

在三维温度场中, 电机求解域内的温度计算需满足的导热微分方程及其边界条件^[25]为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{cases} T(x, y, z) |_{S_1} = T_{1a} \\ h(T - T_0) |_{S_2} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \end{cases} \quad (3)$$

式中: λ 为材料的导热系数; T 为电机温度; q 为热流密度; T_{1a} 为边界 S_1 上的给定温度; h 为 S_2 表面的对流换热系数; T_0 为 S_2 表面的周围环境温度; n 为 S_2 表面的法向向量。

2.2 工况选取及边界条件

本文设计了包括传统散热翅在内的 9 种散热拓扑结构, 分别为传统散热翅、波浪 I 型散热结构、凹凸型散热结构、波浪 II 型散热结构、斜型散热翅结构、流线型散热结构、方型散热结构、圆孔型散热结构和蜂窝型散热结构。在保持不同散热结构重量相同且边界条件也相同的情况下, 通过 CFD 仿真工具, 研究不同散热结构温度场分布情况。

根据试飞中直升机气动性能的工程经验, 可知直升机尾桨在 3 600 rpm 高速旋转过程中, 桨叶后部的垂直风力接近 40 m/s。通过对 40 m/s 风速下直升机尾桨后流场进行仿真, 可得电机壳体周边散热风场风速数据, 仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 40 m/s 的入场风速在经直升机尾桨扰动后, 尾桨后侧峰值风速可到 50 m/s。考虑安全余量和简化边界条件, 在流体域边界条件设置中, 将推进电机冷却风速设置为 40 m/s。

2.3 不同散热结构稳态温度仿真分析

采用有限元软件来完成散热拓扑结构设计的温度计算, 作出假设: 保持各个不同散热拓扑结构均采用和电机机壳相同的材料铝合金 7075; 冷却风速均设置为 40 m/s; 初始温度为 25 °C; 设置相同体积的流体域, 流体出口的横截面边界压力设置为 0; 网格剖分质量、数量尽可能保持一致, 以确保 CFD 模型计算的准确性。

将温度载荷设置为实际载荷的 1/4 进行热特性对比分析, 通过有限元软件完成建模, 完成 9 种

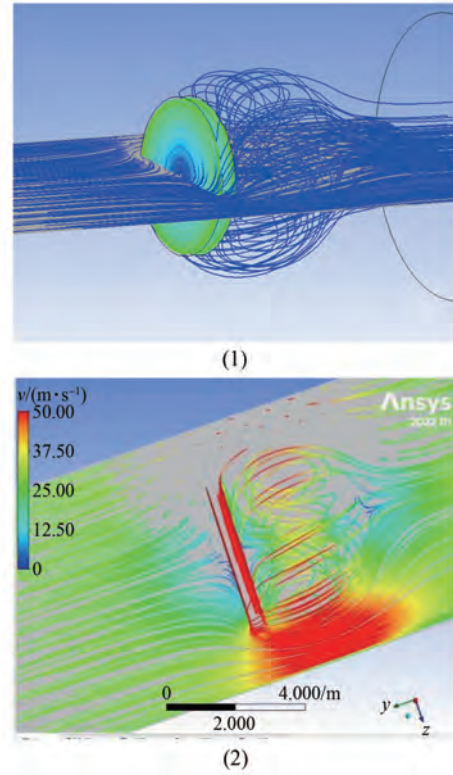


图 6 3 600 rpm 尾桨旋转的风场示意图

Fig. 6 Schematic of the 3 600 rpm tail rotor wind field

不同散热结构的温度场仿真计算。尽管不同散热结构的重量相同, 但因不同散热结构与空气的接触面积也不同, 从而影响其散热结果。不同散热拓扑结构的稳态温度计算结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 散热翅拓扑结构、凹凸型散热翅拓扑结构、斜型散热翅拓扑结构的 CFD 最高温度计算结果分别为 59.9 °C、58.8 °C 和 56.5 °C。相比于传统散热翅结构, 散热面积均略有提升, 散热效果稍有改善。

根据 CFD 分析结果, 流线型散热拓扑结构因横截面积缩小导致热阻增大, 最高温度达 60.5 °C, 散热效果弱于传统翅片结构。方型和圆孔型结构通过分层设计增加散热面积, 最高温度分别降至 54.8 °C 和 54.4 °C, 散热性能显著提升。波浪 I 型 (49.2 °C) 和波浪 II 型 (53.3 °C) 虽表现出更优的散热效果, 但加工难度和成本过高, 性价比不足, 故未采用。

综上所述, 在 1/4 实际载荷条件下, 方型散热拓扑结构在相同热源和冷却环境中表现最优。相比传统翅片结构 59.9 °C 的最高温度, 方型结构将机壳稳态最高温度降低至 54.8 °C, 降幅达 5.1 °C,

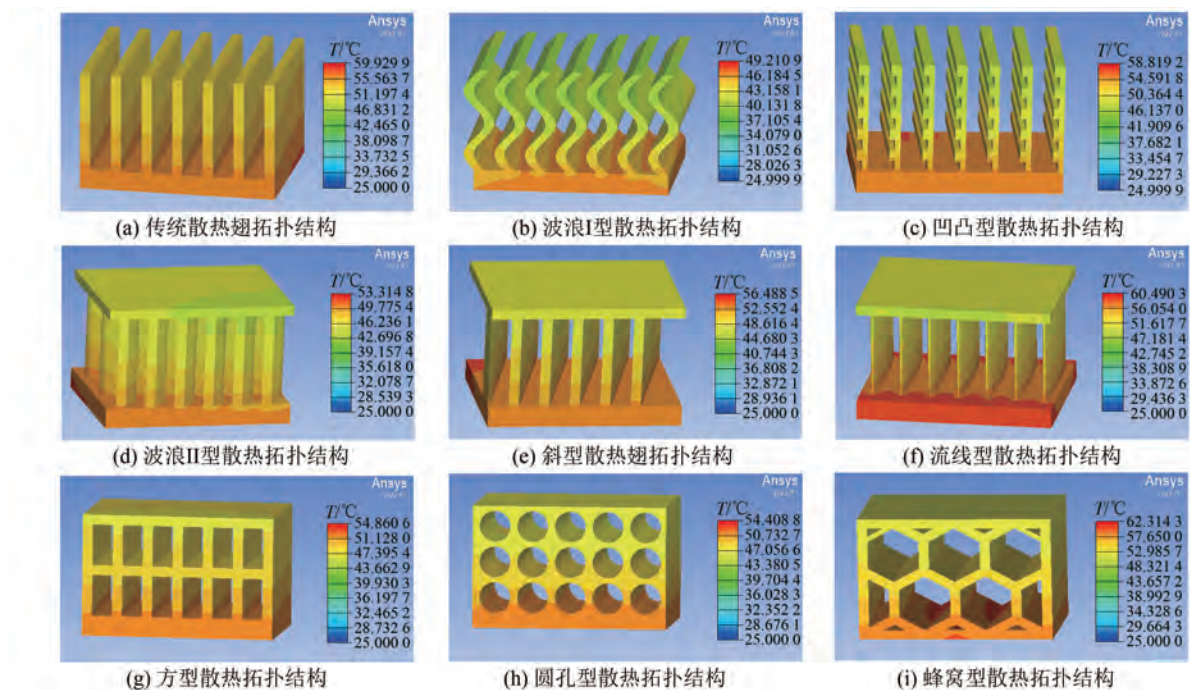


图7 不同散热拓扑结构的 CFD 稳态温度计算结果

Fig. 7 CFD steady-state temperature calculation results for different heat dissipation structure topologies

散热效率提升 9.3%。该方案在保证工艺可行性的同时,实现了显著的散热性能改进。

3 尾桨驱动系统热仿真校核

通过上述研究得到驱动系统的散热结构方案,即电机与控制器壳体散热金属翅错开 50% 角度,并采用方型多层孔的壳体散热拓扑结构。建立尾桨驱动电机系统的温度场有限元仿真模型,并验证给出的散热方案的可行性。一体化电机有限元模型如图 8 所示,电机系统网格划分如图 9 所示。

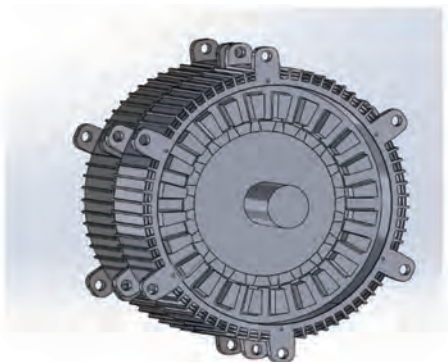


图8 一体化电机有限元模型

Fig. 8 Integrated motor finite element model

通过有限元计算,电机系统温度场分布如图 10 所示,电机控制器部分温度场分布如图 11 所示。

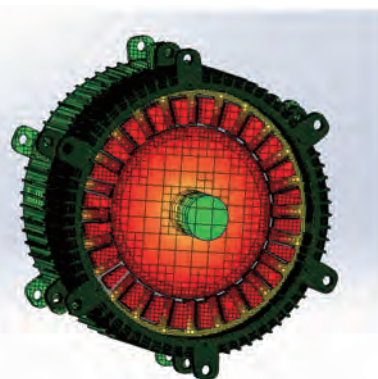


图9 电机系统网格划分

Fig. 9 Mesh generation of motor system

由图 10 可知,电机系统中温度最高点均匀分布在电机内部各绕组上,其最高温度为 195 °C。电机采用 YQ240 漆包线,温度未超过绕组上限值。由图 11 可知,电机控制器壳体部分与电机壳体部分的温度均接近 97 °C,驱动系统内温度分布均匀,温度设计合理。

4 结语

本文开展了电机和驱动控制器的一体化散热结构优化工作,将电机部分和控制器部分的散热金翅条错开 50% 角度,可使散热风场出现紊流现

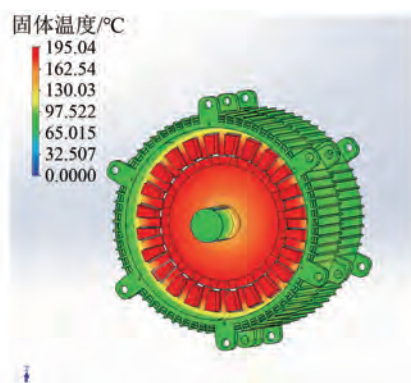


图 10 电机系统温度场分布图

Fig. 10 Distribution diagram of the temperature field of the motor system

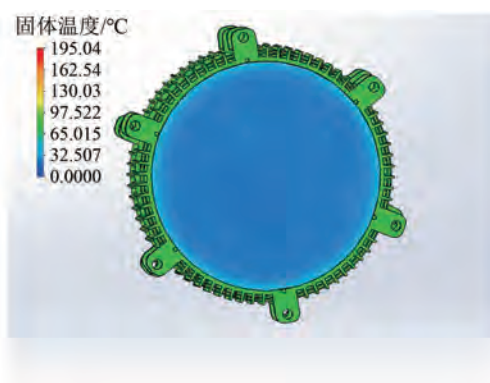


图 11 控制器温度场分布图

Fig. 11 The distribution situation of the temperature field of the controller

象,进一步提高散热效率。计算 9 种翅片拓扑结构的散热效率,通过仿真发现方型孔多层散热结构不仅具有较高的工艺可达性,还能够扩大电机机壳散热面积,提高散热效果达 9.3%,使得电机机壳等效热阻降低,进而提高了电机散热效率,提升了电机功率密度。最后,通过有限元对驱动系统开展热进行仿真校核,结果表明电机系统中绕组温度最高达 195 °C,最高温度可控,未超出设计阈值,温度设计合理。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

曹学睿进行了方案设计、内容总结、论文撰写

和仿真试验研究,朱晨参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summarization, paper writing, and simulation experimental research were conducted by Cao Xuerui. The manuscript was reviewed and revised by Zhu Chen. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 孔祥浩, 张卓然, 陆嘉伟, 等. 分布式电推进飞机电力系统研究综述[J]. 航空学报, 2018, 39(1): 46-62.
- KONG X H, ZHANG Z R, LU J W, et al. Review of electric power system of distributed electric propulsion aircraft [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2018, 39(1): 46-62.
- [2] 黄俊, 杨凤田. 新能源电动机发展与挑战[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 57-68.
- HUANG J, YANG F T. Development and challenges of electric aircraft with new energies [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 57-68.
- [3] 张卓然, 于立, 李进才, 等. 飞机电气化背景下的先进航空电机系统[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 622-634.
- ZHANG Z R, YU L, LI J C, et al. Key technologies of advanced aircraft electrical machine systems for aviation electrification [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 49(5): 622-634.
- [4] 邓景辉. 电动垂直起降飞行器的技术现状与发展[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 47-69.
- DENG J H. Technical status and development of electric vertical take-off and landing aircraft [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 47-69.
- [5] 张典, 梁培鑫. 电动飞机推进电机发展及关键技术综述[J]. 航空科学技术, 2024, 35(3): 1-10.
- ZHANG D, LIANG P X. Overview of the development and key technologies of electric aircraft propulsion motors [J]. Aeronautical Science and Technology, 2024, 35(3): 1-10.
- [6] 王利, 聂相虹, 苏学颖, 等. 电驱动变速器电机升温模型及误差分析[J]. 汽车工程学报, 2018, 8

- (1): 44-49+60.
- WANG L, NIE X H, SU X Y, et al. Thermal research and error analysis of e-motor in electric vehicle transmissions [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2018, 8(1): 44-49+60.
- [7] 卓亮, 赵飞, 马立丽, 等. 航空电机及控制器的温度场仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(7): 51-55.
- ZHOU L, ZHAO F, MA L L, et al. Temperature field simulation analysis of aircraft motor and controller [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(7): 51-55.
- [8] 李伟力, 赵志海, 侯云鹏. 大型同步发电机定子同相槽和异相槽的温度场计算[J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 1-6+92.
- LI W L, ZHAO Z H, HOU Y P. Calculation of stator temperature field of generator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(3): 1-6+92.
- [9] 范镇南, 韩力, 周光厚, 等. 大型贯流式水轮发电机阻尼绕组损耗与发热[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 468-475.
- FAN Z N, HAN L, ZHOU G H, et al. Losses and heat on damper winding in large tubular hydro-generator [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 468-475.
- [10] 徐金全, 林华鹏, 郭宏. 航空电推进电机多层波浪形拓扑及散热设计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(6): 1806-1818.
- XU J Q, LIN H P, GUO H. Multi-layer wave-shaped topology and thermal design method for aero-electric propulsion motors [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(6): 1806-1818.
- [11] 杜国华, 房建成, 刘西全, 等. 高速永磁无刷直流电机的热分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(8): 1101-1105+1128.
- DU G H, FANG J C, LIU X Q, et al. Thermal analysis of high speed permanent magnet brushless DC motor [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(8): 1101-1105+1128.
- [12] 靳廷船, 李伟力, 李守法. 感应电机定子温度场的数值计算[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(5): 492-497.
- JIN T C, LI W L, LI S F. Numerical calculation and analysis of stator thermal field in an induction machine [J]. Electric Machines and Control, 2006, 10(5): 492-497.
- [13] 王建乔, 赵强. 大功率九相变频异步电机通风系统热流耦合仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(7): 78-83.
- WANG J Q, ZHAO Q. Simulation analysis of heat flow coupling in the ventilation system of high-power nine-phase variable frequency asynchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(7): 78-83.
- [14] 张培一, 安辉, 胡玉勇, 等. 真空干泵用磁通切换永磁同步电机温度场仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(6): 59-65.
- ZHANG P Y, AN H, HU Y Y, et al. Temperature field simulation analysis of flux switching permanent magnet synchronous motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(6): 59-65.
- [15] 师蔚, 董毅杰, 张舟云. 考虑永磁体温度的全工作域下永磁电机参数模型分析[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(7): 105-114+124.
- SHI W, DONG Y J, ZHANG Z Y. Analysis of permanent magnet motor model considering permanent magnet temperature under full range operation [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(7): 105-114+124.
- [16] 丁树业, 孟繁东, 葛云中. 核主泵屏蔽电机温度场研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 149-155+1.
- DING S Y, MENG F D, GE Y Z. Temperature field investigation of canned primary pump motors in nuclear power stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(36): 149-155+1.
- [17] 刘阳, 余中军, 张贤彪. 大容量高速永磁电机热流场仿真及参数敏感性分析[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(3): 103-107.
- LIU Y, YU Z J, ZHANG X B. Analysis of thermal and flow fields for large-capacity high speed permanent magnet machine and parameters sensitivity analysis [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(3): 103-107.
- [18] 贾振宇, 曲兵妮, 宋建成, 等. 紧凑型高压异步电机三维流体场分析及温度场仿真计算[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 77-82.
- JIA Z Y, QU B N, SONG J C, et al. Three-

- dimensional flow field analysis and temperature field simulation calculation of compact high-voltage asynchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(6): 77-82.
- [19] 邓彬, 周杏军, 王长江, 等. 某内潜水式永磁电机三维流场与温度场仿真分析与优化[J]. *电机与控制应用*, 2022, 49(4): 60-65.
- DENG B, ZHOU X J, WANG C J, et al. Simulation analysis and optimization of three-dimensional flow and temperature fields of an internal submersible permanent magnet motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(4): 60-65.
- [20] 陈丽香, 刘栋, 张超, 等. 基于多物理场的超高速永磁电机冷却系统设计及分析[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(3): 113-123.
- CHEN L X, LIU D, ZHANG C, et al. Design and analysis of ultra-high speed permanent magnet motor cooling system based on multi-physical field [J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(3): 113-123.
- [21] 陈雷, 魏粲然, 陈登峰, 等. 电动汽车用三合一电驱动系统设计与验证[J]. *微特电机*, 2021, 49(3): 30-32+39.
- CHEN L, WEI C R, CHEN D F, et al. Design and verification of there-in-one driving system for electric vehicle [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2021, 49(3): 30-32+39.
- [22] 张琪, 鲁茜睿, 黄苏融, 等. 多领域协同仿真的高密度永磁电机温升计算[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(12): 1874-1881.
- ZHANG Q, LU X R, HUANG S R, et al. Temperature rise calculations of high density permanent magnet motors based on multi-domain co-simulation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(12): 1874-1881.
- [23] 宋益明, 胡柏安, 尹可, 等. 直升机尾桨电传动系统关键技术分析[J]. *航空动力*, 2020, (1): 24-26.
- SONG Y M, HU B A, YIN K, et al. Key technology analysis to electric transmission system of helicopter tail rotor [J]. *Aerospace Power*, 2020, (1): 24-26.
- [24] 江浩, 周瑾, 金超武, 等. 直升机涵道尾桨永磁同步电机设计与仿真[J]. *机械制造与自动化*, 2024, 53(5): 148-154.
- JIANG H, ZHOU J, JIN C W, et al. Design and simulation of helicopter culvert tail rotor permanent magnet synchronous motor [J]. *Machine Building & Automation*, 2024, 53(5): 148-154.
- [25] 杨培培. 永磁同步电机扁线绕组电磁热耦合问题分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- YANG P P. Research on the analysis method of electromagnetic-thermal coupling issue in flat wire windings of permanent magnet synchronous motor [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2024.

收稿日期:2025-03-08

收到修改稿日期:2025-06-05

作者简介:

曹学睿(1997-),男,硕士,工程师,研究方向为直升机电气系统设计及电驱动系统设计,821334719@qq.com;

*通信作者:曹学睿(1997-),男,硕士,工程师,研究方向为直升机电气系统设计及电驱动系统设计,821334719@qq.com。