

无人机无刷电机散热系统设计与性能分析

刘国荣

江西玖发专用车有限公司 江西 赣州 341400

【摘要】：无人机无刷电机在高转速、高功率密度运行状态下易产生明显热积聚，电机温升直接影响输出效率、绝缘寿命及飞行可靠性。围绕无刷电机热量产生与传递特性，设计由壳体导热、散热结构及气流冷却组成的散热系统，并对温度场、气流场及不同工况下散热性能进行分析。结果表明，合理优化散热路径与气流组织能够降低电机峰值温度，改善温度分布均匀性，为无人机无刷电机高效稳定运行提供设计依据。

【关键词】：无人机；无刷电机；散热系统；温度场；热管理

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.069

引言

无人机向高载荷、长航时和高功率密度方向发展，无刷电机承担动力输出任务，其运行过程中绕组铜耗、铁芯损耗及机械损耗会持续转化为热量。受机体空间、重量及通风条件限制，热量积聚易引起效率下降、绝缘材料老化甚至电机失效。研究无刷电机散热结构、传热路径及气流组织，分析不同工况下温度分布与散热性能，对提升动力系统稳定性、可靠性及使用寿命具有重要意义。

1 无人机无刷电机热特性与散热需求

1.1 无刷电机主要热源及产热规律

无人机无刷电机运行中的热量主要来源于绕组铜耗、铁芯损耗、永磁体涡流损耗以及轴承和转子旋转产生的机械损耗。定子绕组通电后，电流通过线圈电阻形成焦耳热，其发热量与电流平方及绕组电阻成正比，高负载状态下电流快速增大，铜耗往往成为温升的重要来源。铁芯在交变磁场作用下会产生磁滞损耗与涡流损耗，电机转速提高后，磁场变化频率同步上升，铁耗随之增加。永磁体内部还可能因空间谐波和高频电磁变化形成附加涡流热。轴承摩擦、风阻及转子机械运动产生的损耗虽然占比较低，但在持续高速运行条件下仍会形成稳定热源。

1.2 电机内部热量传递路径

无刷电机内部热量传递涉及固体导热、界面传热与空气对流。目前多数无人机采用外转子结构，其热量传递路径具有自身特点。定子绕组热量经绝缘层、槽楔及铁芯向外部的转子壳体传导，但绝缘材料导热系数较低，易形成较大热阻，使绕组内部温度明显高于壳体表面。铁芯热量沿径向传导至定子外圆后，需穿过气隙传递至旋转的转子壳体，再通过壳体外表面与流动空气对流换热^[1]。外转子结构将永磁体布置于旋转壳体内部，壳体兼具磁路与散热功能，转子与永磁体产生的热量在离心力作用下于壳体内壁形成热对流，并通过壳体直接向外散发。轴承部位热量则经转轴、端盖和轴承座向外扩散。

1.3 飞行工况对电机温升的影响

无人机在悬停、爬升、巡航、加速及大载荷飞行等工况下，

电机转矩、电流和转速存在明显变化，对温升水平形成不同影响。悬停状态需要电机持续输出较大推力，绕组电流维持在较高区间，铜耗较为突出，机体附近气流速度相对有限，热量不易快速排出。爬升和急加速阶段要求电机短时间提高转矩与功率，峰值电流会使绕组发热迅速增加，容易出现瞬态温升。高速巡航时转速较高，虽然外部气流增强有利于对流散热，但铁芯损耗、风阻损耗及永磁体附加损耗也会随转速提高而增加。载荷质量、桨叶尺寸、环境温度、飞行高度和空气密度同样会改变散热条件，高温环境会降低电机与空气之间的温差，高海拔区域空气密度下降后对流换热能力减弱，使相同功率条件下的热积聚更加明显。

2 无刷电机散热系统的主要制约因素

2.1 高功率运行下局部热量积聚

高功率运行状态下，无刷电机单位时间内的能量损耗明显增加，局部区域容易出现热量生成速度高于散出速度的情况。绕组槽内、定子齿根、端部线圈及转子邻近区域受结构封闭程度、材料导热性能和热流密度差异影响，温度分布通常并不均匀。当电机持续处于大转矩输出状态时，局部热点会逐步形成，并通过温度升高进一步增大绕组电阻，使损耗继续增加。若热点长期处于较高温度区间，绝缘材料热老化速度会明显加快，永磁体也可能出现磁性能衰减。局部热量积聚还会造成不同部件之间形成较大的温度梯度，使热应力集中于连接界面和材料交界区域，影响电机结构稳定性与连续运行能力。

2.2 有限安装空间下散热结构受限

无人机动力系统对质量、尺寸和布局均有严格要求，无刷电机散热设计不能依靠单纯增大散热体积来提高换热能力。机臂、机架、桨叶、电调和电池等部件在有限空间内高度集成，使电机外壳周围可利用的散热区域受到压缩^[2]。散热翅片若设计过长或过密，会增加结构重量和空气阻力，还可能与桨叶气流、安装支架产生干涉；壳体厚度过大虽可提高导热能力，却会增加整机负载并降低续航性能。部分小型无人机电机内部缺少布置独立风道或主动冷却装置的空间，散热方式更多依赖外

壳与环境空气之间的自然或强迫对流。

2.3 复杂气流条件下冷却效率不足

无人机电机周围气流具有明显的非稳定性和方向变化特征,桨叶旋转形成的下洗气流、机体运动产生的来流以及局部涡流会共同作用于电机表面。不同飞行姿态下,气流速度和流向持续改变,导致壳体各区域的对流换热系数存在较大差异。部分散热表面能够获得较强气流冲刷,而背风区域、支架遮挡区域以及结构凹槽内部容易形成低速区甚至回流区,使热量难以及时带走。散热翅片方向若与主要气流方向不匹配,还可能形成气流分离,削弱有效换热面积。多旋翼无人机各旋翼之间还存在气流相互干扰,邻近电机受到的冷却条件并不完全一致,进而造成不同电机温升差异扩大,对散热系统的适应性提出更高要求。

3 无刷电机散热系统优化设计方法

3.1 电机壳体导热路径优化

电机壳体导热路径优化应围绕降低热阻、缩短热量传递距离和改善局部温度集中展开。壳体可选用导热性能较高且质量较轻的铝合金材料,并减小定子铁芯与壳体之间的接触间隙,提高热量由内部热源向外表面的传递效率。转子外圆与机壳配合区域可采用非过渡装配、导热填充材料或薄层导热介质,减少空气间隙造成的界面热阻。壳体厚度设计需要兼顾结构强度和热扩散能力,在高温流密度区域适当增加有效导热截面,使热量沿径向和轴向同时扩散。端盖与壳体连接位置也应形成连续传热通道,可扩大接触面积、优化连接结构和提高界面贴合精度,使绕组端部及轴承附近热量能够快速传导至外部散热表面,避免热量集中在单一局部区域。

3.2 散热翅片结构参数优化

散热翅片结构设计需要结合外转子电机外径、允许质量和周围流场条件,对翅片高度、厚度、间距、数量及排列方向进行匹配。外转子电机分为两类翅片布置形式:一类布置在旋转转子外壳外表面,随转子一同旋转获得相对气流;另一类布置在中心静止的定子固定端,依靠飞行来流与桨叶下洗气流实现换热。翅片高度增加能够扩大换热面积,但过高会提高结构质量并增大气流阻力,因此应控制在能够形成稳定边界层的范围内^[3]。翅片间距过小容易造成相邻边界层相互干扰,使空气难以进入沟槽深处;间距过大又会降低单位壳体面积上的有效换热面积。翅片厚度应满足热量能够从根部均匀传递至末端,避免材料使用过多。针对无人机外转子电机圆柱形转子外壳,可采用沿轴向布置的直肋结构,使桨叶下洗气流顺畅通过翅片通道;在局部流向变化较大的位置,可适当设置短翅片或分段式结构,减小气流分离。

3.3 冷却气流组织方式优化

冷却气流组织应充分利用旋翼下洗气流,调整电机安装位

置与导流结构,使冷空气沿外转子壳体表面连续扫过。无人机主流外转子无刷电机有三类典型风道方案:敞开式结构、外转子壳体开设风孔、定子固定端布置散热片。敞开式结构内部无遮挡,旋翼下洗气流直接冲刷绕组端部,结构简单但防尘能力弱,主要用于小型微型电机;外转子壁开设风孔,依靠转子旋转离心效应驱动内部空气流动,把定子绕组、铁芯热量向外甩出,该结构防水密封一般,主要用于对环境要求不高的场合;定子固定端布置散热片,定子产生的热量传导至静止固定端的散热翅片,依靠来流空气带走热量,该结构防水密封好,主要用于植保等恶劣环境。为提高气流交换效率,可在转子端部增设风扇结构,利用旋转离心力主动驱动外部冷空气进入内部,强化对流换热。内部风道设计应结合风扇旋向,在定子支架或端盖开设通风孔,形成由进气口经绕组端部、气隙至出气口的完整流路,避免局部死区。进口气口面积需匹配,防止压降过大或热风滞留,导流壁面应减少突变与转弯,确保气流速度分布均匀。三类风道结构形式如图1(a)~(c)所示。



(a)敞开式结构(b)定子固定端布置散热片(c)外转子壁开设风孔

图1 外转子电机三种冷却风道结构

4 优化散热系统的性能验证

4.1 不同结构方案温度场对比

不同散热结构方案的温度场对比可从峰值温度、平均温度、温度梯度及高温区域分布范围等指标展开。基础壳体方案在持续负载条件下,热量主要集中于定子绕组附近和壳体局部区域,温度分布不均,热点区域较为明显。采用导热路径优化后,热量能够更快传递至壳体外表面,内部温差有所减小;增加合理尺寸的散热翅片后,外表面对流换热面积扩大,壳体高温区域进一步收缩。若同时配合导流结构,可使冷却空气更均匀地覆盖散热表面,降低局部滞流造成的热量堆积。对比温度云图可发现,优化方案不仅能够降低最高温度,还能使热量由集中分布转变为较均匀扩散,为判断结构改进效果提供直观依据。

4.2 典型运行工况散热性能分析

典型运行工况下的散热性能需要结合悬停、持续巡航、快速爬升和高负载输出等状态进行比较。悬停阶段电机长时间保持较高转矩,热量持续累积,更能反映散热系统在稳定高负荷条件下的控温能力;巡航工况中转速较为稳定,外部气流条件相对连续,可用于评价壳体与散热翅片的持续换热水平;快速爬升时功率需求短时间增加,温升速率会明显上升,可检验结

构对瞬态热冲击的响应能力^[4]。高负载运行还需关注峰值温度出现时间、温升斜率和稳定温度平台。若优化方案在多种工况下均能降低温升速率,并缩小最高温度与稳定温度之间的波动范围,说明其对不同飞行状态具有较好的适应性。

4.3 优化方案综合性能评价

优化方案的综合性能评价不能仅依据温度降低幅度,还应同时考虑散热效率、结构质量、空气阻力、加工难度和安装适配性。可将最高温度下降值、平均温度下降值以及达到热稳定状态所需时间作为热性能指标,并结合壳体增重比例、翅片材料用量和结构尺寸变化判断轻量化水平。对于无人机应用而言,散热部件质量过大可能增加整机能耗,结构过于复杂还会提高加工和装配成本,因此需要在热性能与工程可实施性之间保持平衡。若导热路径、翅片参数和气流组织经过协同优化后,在较小质量增量条件下获得明显降温效果,未显著增加外部阻力和安装空间,则该方案在散热能力、结构效率和应用适应性方面具有更高的综合性能。

5 无人机无刷电机热管理改进方向

5.1 轻量化散热结构协同设计

轻量化散热结构需要在传热效率、结构强度与整机质量之间形成协调关系,避免单纯依靠增加金属材料用量提升散热能力。壳体可采用高导热铝合金、镁合金或局部复合导热材料,通过拓扑优化调整材料分布,使高热流区域保持足够导热截面,低热负荷区域适当减薄。散热翅片可采用变厚度、渐变高度或中空结构,减少无效质量,保证表面换热面积。电机端盖、安装座与机臂等原有结构也可参与传热,使部分承力构件兼具散热功能,减少独立散热部件数量。结构连接处应控制接触热阻,并兼顾振动载荷与装配精度,使轻量化处理不会削弱热传递连续性,从而降低散热系统对无人机载荷和续航性能的附加影响。

5.2 多工况热管理参数动态匹配

无人机飞行任务中电机负载变化频繁,固定散热参数难以

适应不同功率水平和环境条件,因此热管理参数需要根据运行状态进行动态匹配。可利用绕组温度、壳体温度、电流、转速和环境温度等参数建立热状态判断关系,并根据温升速率调整冷却气流强度或电机运行限值。悬停与重载爬升阶段可提高散热通道有效流量,使高热负荷区域获得更强换热能力;低负载巡航阶段则可降低主动冷却需求,减少附加能耗^[5]。高温或低空气密度环境下,应适当提高温度预警裕度和热保护响应速度,防止散热能力下降后出现过热。设置不同工况对应的温度阈值、功率限制和冷却参数,可使散热能力与实际热负荷保持匹配。

5.3 散热系统与动力系统集成优化

散热系统与动力系统集成设计应将电机、电调、螺旋桨、机臂和供电系统纳入统一热设计范围,减少各部件独立布置造成的空间浪费与热干扰。电机与电调位置可根据热源分布进行合理分隔,避免多个高发热部件集中在封闭区域形成热叠加。机臂内部可兼作气流通道或导热通道,使电机产生的部分热量通过结构件向低温区域扩散。螺旋桨下洗气流还可同时服务于电机和电调冷却,调整部件位置和风道截面提高气流利用率。动力控制策略也可结合温度信息修正电机输出,在接近热安全边界时限制短时过载功率,使热设计与功率控制形成联动,从结构布局、气流利用和控制策略三个层面提高动力系统整体热稳定性。

6 结语

无人机无刷电机散热性能直接关系动力系统持续输出与运行稳定性。针对高功率运行中的热量积聚、安装空间受限及复杂气流影响,可通过优化壳体导热路径、散热翅片参数和冷却气流组织改善温度分布。结合轻量化结构、多工况动态热管理及动力系统集成设计,有助于降低峰值温度与热应力,提升电机散热效率、功率利用率和长期运行可靠性,为无人机动力系统热设计提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 姚国风.基于数字孪生的电机多物理场仿真研究[D].安徽理工大学,2025.
- [2] 刘重洋,李文,虞翔宇,等.基于涵道换热器的燃料电池热管理系统仿真研究[J].南京航空航天大学学报(自然科学版),2025,57(5):965-975.
- [3] 范贤稳.无刷直流电机转速闭环控制器设计[D].合肥工业大学,2021.
- [4] 来雨辰,段嘉兴,邓君毅.飞机电动静液作动器热力学建模与分析[J].机电工程技术,2020,49(5):29-31+88.
- [5] 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.