

定子液冷电机内流场仿真分析

吴忠诚 孔德兵

贵州航天林泉电机有限公司, 贵州省贵阳市, 550008;

摘要: 随着新能源汽车、轨道交通等领域对电机功率密度要求的持续提升, 传统冷却方式已难以满足高负荷工况下的散热需求。定子液冷技术因冷却介质比热容大、换热效率高的优势, 成为解决电机热管理问题的核心方案。本文以定子液冷电机为研究对象, 系统梳理计算流体动力学(CFD)在电机内流场仿真中的应用现状, 重点分析定子液冷系统内流场分布特性及影响因素, 总结冷却系统优化的关键技术方向, 为定子液冷电机的研发与设计提供全面的理论参考。

关键词: 定子液冷电机; 内流场; CFD仿真; 流-热耦合

DOI: 10.64216/3104-9664.25.03.045

引言

在双碳目标推动下, 新能源装备向高效化、小型化发展, 电机功率密度突破传统限值。功率密度提升使单位体积发热量剧增, 若热量无法及时导出, 会引发电机故障, 影响可靠性与寿命。多数电机故障与过热相关, 高效热管理技术成高功率密度电机发展核心瓶颈。当前主流电机冷却方式有风冷、油冷和液冷。风冷结构简单、应用广泛, 但换热效率低; 油冷有润滑与冷却双重功能, 但密封结构复杂、介质粘度随温度波动大; 定子液冷换热效率高, 是高功率密度电机热管理首选。定子液冷电机散热性能取决于冷却流道流场分布, 流场问题会导致局部过热。传统经验设计难捕捉流场规律, 需多轮样机试验迭代, 延长研发周期、增加成本。基于CFD的内流场仿真技术能呈现流场细节、量化参数对散热性能的影响, 为冷却系统优化提供指导, 是现代电机设计核心技术。国内外学者围绕定子液冷电机流场仿真与优化开展研究, 形成丰富成果。国外研究机构在流场仿真建模精准性方面起步早, 如德国西门子采用多参考系(MRF)模型, 模拟转子旋转对流传热影响, 提出水道布局优化策略, 提升电机散热效率。

1 定子液冷电机内流场仿真理论与技术体系

1.1 仿真理论基础

定子液冷电机内流场仿真核心理论是流体力学与传热学, 涉及连续性、动量和能量三大控制方程。连续性方程基于质量守恒, 是流场仿真基本方程; 动量方程基于牛顿第二定律, 能捕捉速度分布特性; 能量方程基于能量守恒, 为流-热耦合仿真提供支撑。实际仿真中, 要根据电机冷却系统流动特性选湍流模型, 因定子冷却流道内多为湍流, 常用 $k-\epsilon$ 、 $k-\omega$ 及雷诺应力模型等。

$k-\epsilon$ 模型因计算稳定、适用广, 应用最广, 其中 Realizable- ϵ 模型能精准预测复杂流场特性, 适用于冷却流道复杂流动模拟。

1.2 仿真技术流程

定子液冷电机内流场仿真流程含几何建模、网格划分、物理模型设置、边界条件定义、求解计算及结果分析六个环节。几何建模要结合精度与效率需求简化电机结构, 保留关键部件, 忽略非关键细节; 网格划分影响精度, 要根据部件特性选网格, 关键区域设边界层网格。物理模型与边界条件设置要结合实际工况, 选好材料属性与物理参数, 设好边界条件。求解计算选合适求解器与算法, 调参数确保结果稳定可靠; 结果分析提取关键信息, 评估冷却系统散热性能。

1.3 主流仿真工具与应用特点

当前定子液冷电机内流场仿真主流工具包括 ANSYSFluent、STAR-CCM+、COMSOLMultiphysics 等。ANSYSFluent 因物理模型丰富、网格适应性强、求解高效, 在电机仿真领域应用最广, 其流-热耦合模块能精准模拟热交换过程。工作流: STAR-CCM+ 支持多种湍流模型与边界条件设置, 满足不同工况仿真需求; 以一体化仿真流程为优势, 可实现从几何建模到求解分析全流程自动化处理, 先进网格生成技术适用于复杂冷却流道网格划分, 提升仿真建模效率。COMSOLMultiphysics 作为多物理场仿真工具, 多场耦合仿真表现突出, 能实现流场、温度场、电磁场等多物理场协同仿真, 支撑电机内多物理场耦合机制研究。不同仿真工具各有优势, 需依研究需求与技术特点合理选择。随着仿真技术发展, 多种仿真工具联合应用成新趋势, 如用 SolidWorks 等建模, 导入 ANSYSMeshing 划

分网格,通过 ANSYSFluent 开展流-热耦合仿真,用 CFD-Post 进行结果可视化分析,形成多工具协同仿真流程,保证建模灵活性,提升仿真结果精度与可靠性。

2 定子液冷电机内流场分布影响因素分析

2.1 冷却介质特性的影响

冷却介质的物理特性直接影响定子液冷电机内流场的分布规律与散热性能,主要包括密度、粘度、比热容及导热系数等关键参数。密度与粘度的变化会直接影响流体的流动阻力,粘度较大的介质在流道内流动时易产生较大的压力损失,导致流场流速分布不均,形成局部低速死区;而密度较大的介质则更易在流道转弯处形成明显的离心效应,加剧流速梯度。

比热容与导热系数则决定了冷却介质的换热能力,高比热容介质能够吸收更多热量而温度升高较小,有助于维持流场温度的稳定性;高导热系数介质则能加快热量在介质内部的传递速度,提升换热效率。此外,冷却介质的粘温特性对动态工况下的流场分布影响显著,温度升高会导致介质粘度降低,流动阻力减小,流速分布更加均匀,这种特性在电机启停、负载突变等工况下表现得尤为突出。

当前定子液冷电机常用的冷却介质包括水、乙二醇水溶液及专用冷却液等。水具有比热容大、导热系数高、成本低的优势,但存在冰点高、易腐蚀的问题;乙二醇水溶液通过调整乙二醇含量可改变冰点与沸点,适用于低温环境,但换热性能较纯水略有下降;专用冷却液则通过添加防腐剂、抗泡剂等成分,在提升防腐性能的同时优化了粘温特性,不过成本相对较高。实际应用中需根据电机的运行环境与性能需求,合理选择冷却介质类型及配比。

2.2 冷却流道结构的影响

冷却流道结构是决定定子液冷电机内流场分布的核心因素,包括流道布局形式、截面形状、尺寸参数及进出口结构等多个方面。流道布局形式主要分为螺旋形、矩形、U形、蛇形等,不同布局形式对应的流场分布特性差异显著。螺旋形流道能够使冷却介质沿定子圆周方向均匀流动,流速分布稳定,换热均匀性好,但流道长度较长,压力损失相对较大;矩形流道结构简单、加工方便,但在拐角处易形成涡流,流场均匀性较差;U形与蛇形流道则适用于小型电机,不过存在流道末端流速衰减明显的问题。

流道截面形状对流传特性与压力损失影响显著,常见的截面形状包括圆形、方形、梯形及异形等。圆形截

面流道的流体流动阻力最小,流速分布最为均匀,能够有效降低压力损失;梯形截面流道则通过优化截面形态,在保证较小流动阻力的同时增大了换热面积,提升了换热效率;方形截面流道由于拐角处易产生流动分离,导致流场均匀性差,压力损失较大,不过其加工难度较低,在对性能要求不高的场景中仍有应用。

流道尺寸参数(如直径/截面积、螺距、长度等)则通过改变流动阻力与流量分配影响流场分布。流道截面积增大能够降低流动阻力,提升流速均匀性,但会导致流道数量减少,换热面积减小;螺距减小则使流道在定子轴向的分布更加密集,有助于提升轴向换热均匀性,但会增加流道转弯次数,增大压力损失。进出口结构的合理性同样至关重要,平滑过渡的进出口结构能够避免流速突变,减少涡流产生;而收缩或扩张式进出口则会导致局部流速异常,破坏流场均匀性。

2.3 运行参数的影响

电机运行参数主要包括冷却介质流速、电机负载及环境温度等,这些参数通过改变流动状态与热交换强度影响内流场分布。冷却介质流速是影响流场分布的直接因素,流速过低时,流体流动呈层流或过渡流状态,流场均匀性差,易形成低速死区,换热效率低;流速提升至湍流临界值后,流场混合效果增强,均匀性显著提升,换热效率大幅提高;当流速超过一定限值后,流动阻力急剧增大,压力损失显著增加,而流场均匀性与换热效率的提升则趋于平缓,因此存在最优流速区间,兼顾散热性能与能耗需求。

电机负载通过改变发热量影响流场温度分布,高负载工况下电机损耗增大,发热量增加,导致冷却介质温度升高,粘度降低,流动阻力减小,流速分布更加均匀;但过高的温度升高会使介质换热能力下降,甚至超过绝缘材料耐受极限。环境温度则通过影响电机外表面的散热条件间接影响流场分布,高温环境下电机外表面自然对流换热效果减弱,导致冷却介质出口温度升高,流场温度梯度增大;低温环境则有助于提升换热效率,维持流场温度稳定。

3 定子液冷系统优化技术路径

3.1 流道结构优化

流道结构优化是提升定子液冷系统性能的核心路径,需结合流场仿真结果,针对流场均匀性差、压力损失大等问题进行针对性改进。在流道布局优化方面,可采用螺旋形与局部直形结合的复合布局形式,在保证换热均匀性的同时缩短流道长度,降低压力损失;对于多

流道结构,可通过调整各流道的截面积与进出口位置,实现流量均匀分配,避免部分流道流速过高而部分流道流速过低的现象。

3.2 截面形状与尺寸优化

截面形状优化可采用梯形、倒梯形等异形截面替代传统的圆形或方形截面,通过增大换热面积与优化流动特性提升综合性能;在流道尺寸优化方面,可采用参数化设计方法,建立流道直径/截面积、螺距等参数与流场性能(流速均匀性、压力损失、换热效率)之间的关联模型,利用优化算法求解最优参数组合。此外,进出口结构优化同样重要,采用平滑过渡的喇叭口结构替代传统的直角过渡结构,能够有效避免流速突变,减少涡流产生,提升流场均匀性。

3.3 冷却介质与运行参数匹配优化

冷却介质与运行参数的匹配优化需根据电机的运行特性与环境条件,选择合适的介质类型及运行参数。在冷却介质选择方面,低温环境下优先选用高浓度乙二醇水溶液或专用低温冷却液,高温高湿环境下则需选用具有优异防腐性能的专用冷却液;通过调整介质配比,可优化其粘温特性,使在电机常用运行温度范围内保持较低的粘度,提升流场性能。

在运行参数优化方面,可采用变流速控制策略,根据电机负载变化动态调整冷却介质流速:低负载工况下采用较低流速,降低泵功消耗;高负载工况下提高流速,确保散热性能。此外,结合电机的热管理需求,建立冷却系统与电机运行状态之间的联动控制模型,实现流速、温度等参数的精准匹配,既保证散热效果,又降低能耗。

3.4 多场耦合与多目标优化方法应用

随着优化需求的不断提升,单一目标优化已难以满足工程实际需求,多目标优化方法逐渐成为研究热点。定子液冷系统的多目标优化通常以换热效率最大化、压力损失最小化、结构尺寸最小化为目标,结合遗传算法、粒子群优化算法、响应面法等智能优化算法,求解 Pareto 最优解集,为设计人员提供多样化的优化方案选择。

同时,多场耦合仿真技术的应用进一步提升了优化的精准性。通过建立流场、温度场、电磁场及结构场的耦合仿真模型,能够全面考虑各物理场之间的相互作用:电磁场产生的损耗为温度场提供热源,温度场的变化影响材料的电磁性能与流体的物理特性,流场的流动则改变温度场的分布,结构场则反映温度变化引起的热应力分布。多场耦合仿真能够更真实地模拟电机的实际运行

状态,为优化设计提供更可靠的依据。

此外,人工智能与机器学习技术在冷却系统优化中的应用逐渐兴起。通过大量仿真数据与实验数据训练神经网络模型,能够快速预测不同设计参数下的流场性能,大幅缩短优化周期;利用强化学习算法,可实现冷却系统运行参数的自适应优化,提升系统在动态工况下的响应速度与调节精度。

4 总结

当前定子液冷电机内流场仿真与优化研究进展显著,在理论、技术方法和工程应用方面成果较完善。理论上,基于流体力学与传热学控制方程,结合不同湍流模型,建立了流场仿真理论框架,流-热耦合仿真技术成熟,可精准捕捉流场与温度场分布特性。技术方法上,多种仿真工具协同提升建模与求解效率,网格划分与验证方法保证了仿真精度;参数化设计与智能优化算法结合实现冷却系统高效优化。工程应用中,经仿真优化的冷却系统在多领域高功率密度电机广泛应用,提升了电机散热性能与可靠性。

不过,现有研究存在不足:一是复杂动态工况精准建模能力待提升,流场瞬态响应特性与多物理场耦合机制不明;二是优化方法工程实用性需加强,与实际加工工艺、成本约束结合不紧密;三是仿真与实验结果误差控制有提升空间,极端工况下仿真模型预测精度待验证。

结合技术与工程需求,未来该研究将聚焦于瞬态多场耦合仿真技术深化:深入研究动态工况下多场瞬态耦合机制,建立考虑材料参数与边界条件动态变化的瞬态仿真模型,提升电机动态运行特性预测能力;开发高效瞬态求解算法,解决计算量大、耗时长问题,推动其在工程设计中广泛应用。

参考文献

- [1]李文辉.永磁同步电机温度场分析及冷却结构优化[D].昆明理工大学,2023.
- [2]苑学龙.电动汽车用轮毂电机设计及其温度场研究[D].山东科技大学[2025-12-02].
- [3]郝嘉欣,唐志国,李荟卿,等.电机液冷流道扰流片优化设计[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2016,39(4):5. DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2016.04.002.

作者简介:吴忠诚(1998.03-),男,汉,贵州省遵义市,助理工程师,硕士,研究方向:微特电机研发设计。