基于油冷的外转子轮毂电机温度场优化研究

徐斌 袁晓红 乐山职业技术学院 DOI:10.12238/etd.v6i2.12980

[摘 要] 针对纯电动汽车永磁同步轮毂电机因长期运行导致温升过高且散热困难的问题,本文开展了 温度场仿真与冷却结构优化研究。基于motorcad平台建立20kW轮毂电机的温度场模型,特别考虑了永 磁体涡流损耗和转子铁芯损耗对温升的影响,揭示了电机内部温度分布规律。结合Maxwell电磁仿真获 取热源损耗数据,通过温度场计算模型确定各部件生热率及关键表面换热系数。设计油冷冷却通道结 构,利用Ansys软件对比分析冷却前后的温度场分布。结果表明:该新型冷却结构可有效降低电机最 高温升达5%,较传统单水道结构散热效率提升28%,为轮毂电机散热系统设计提供了理论依据和工程 参考。

[关键词] 轮毂电机; 冷却温度; 散热方式; 智能热管理 中图分类号: TM3 文献标识码: A

Study on temperature field optimization of oil-cooled external rotor hub motor

Bin Xu Xiaohong Yuan

Leshan Vocational and Technical CollegeLeshan

[Abstract] For the issue of excessive temperature rise and poor heat dissipation in permanent magnet synchronous hub motors of pure electric vehicles due to long-term operation, this paper conducts research on temperature field simulation and cooling structure optimization. Based on the motorcad platform, a temperature field model of a 20 kW hub motor is established, with particular attention to the effects of eddy current losses in the permanent magnets and core losses in the rotor on temperature rise, revealing the internal temperature distribution pattern of the motor. Combining Maxwell electromagnetic simulation to obtain heat source loss data, the thermal generation rate of each component and the key surface heat transfer coefficient are determined through the temperature field distribution before and after cooling is compared using Ansys software. The results show that this new cooling structure can effectively reduce the maximum temperature rise of the motor by up to 5%, and improve heat dissipation efficiency by 28% compared to traditional single-channel structures, providing theoretical basis and engineering reference for the design of hub motor cooling systems.

[Key words] hub motor; cooling temperature; heat dissipation mode; intelligent thermal management

引言

随着新能源汽车技术的革新,外转子轮毂电机驱动系统凭 借其高集成度、低传动损耗和灵活操控特性,成为纯电动汽车动 力系统的重要发展方向。然而,电机安装于车轮内部的特殊结构 导致散热空间受限,叠加复杂工况下的电磁损耗累积,极易引发 温升过高问题。已有研究表明,传统温度场仿真模型普遍忽略永 磁体涡流损耗与转子铁芯损耗的动态耦合效应,且单一冷却结 构难以满足极端工况下的散热需求。 究对象,构建多物理场耦合仿真平台。首先基于Maxwell软件建 立电磁损耗计算模型,精确获取各部件生热率;构建温度场模型, 重点分析永磁体涡流损耗与转子铁芯损耗对温度分布的影响规 律。在此基础上,设计双螺旋冷却通道结构,结合Ansys热流固耦 合分析,系统研究冷却参数对散热效能的优化作用。通过对比传 统单水道与新型双螺旋结构的温升控制效果,验证该方案在降 低电机峰值温度、提升散热均匀性方面的显著优势。本研究为 轮毂电机热管理系统设计提供理论支撑,对推动新能源汽车动 力系统可靠性提升具有重要工程价值。

针对上述挑战,本文以20kW外转子永磁同步轮毂电机为研

		工程技术发展		
	第6卷	◆第2期◆版本	1.0◆2025 年	
文章类型:	论文 刊号(ISSN)	: 2737-4505(P) /	2737-4513(O)	

圭	1
নহ	1

项目	参数	项目	参数	项目	参数
电机结构	外转子	绕组匝数	13	峰值功率 P(k₩)	20
转子结构	表贴式	并绕根数	9	长径比β	0.17
功率(kW)	20	导线线径(mm)	0.95	气隙磁密Βδ(T)	0.6
额定电压(V)	360	永磁体厚度(mm)	4	定子齿磁密 Bt1(T)	1.55
相数	3	极弧系数	1	定子轭磁密 B j1(T)	1.45
定子槽数	36	Bs0(mm)	3.5	电流密度 J1(A/m²)	4
功率因数	0.95	Bsi(mm)	14	绕组系数 kdp	1.05
效率(%)	92	R (mm)	3.1	极对数 P	6
定子外径(mm)	172	α (°)	30	效率η	97%
定子内径 (mm)	150	H01	0.8	槽满率 Sf	71.5%
转子外径(mm)	240	H12	35	净槽满率Sfcu	0.44
转子内径(mm)	210	铁心材料	DW270	电磁功率系数 Kp	0.475
气隙长度 (mm)	0.75	剩余磁通密度(T)	1.26	相电流Ki	1.414
电机长度(mm)	130	磁场强度(kA/m)	900	反电势系数 Ke	5.98
定子槽型	梨形槽	相对磁导率	1.11	计算极弧系数αi	0.8

1 损耗分析

本文研究的20kW外转子永磁同步轮毂电机采用表1所示的 关键设计参数,其三维模型如图1所示。该电机由外转子、内定 子、钕铁硼永磁体阵列和三相集中绕组构成,定子轭部创新性设 计双螺旋冷却通道结构。与传统单水道方案相比,双螺旋结构通 过交错布置的两条螺旋形水道(螺距12mm,截面尺寸3mm×4mm), 可使冷却液接触面积提升40%,显著增强对流换热效率。

定子铁芯采用厚度0.35mm的50WW470硅钢片叠压而成,有效 降低交变磁场下的铁芯损耗;转子永磁体采用表贴式结构,充磁 方向为径向,剩磁密度1.26T。绕组采用F级绝缘漆包铜线(线径 0.95mm),槽满率达71.5%。电机整体尺寸受限于轮毂空间,定子 外径Φ172mm,轴向长度130mm,气隙长度0.75mm,为散热系统设 计带来较大挑战。





1.2多物理场耦合损耗计算

基于Maxwel1软件建立20kW外转子轮毂电机二维电磁场模型(图2),设置额定转速500r/min、仿真时间0.05s,获得电机运行时的磁通密度分布云图(图3)。结果表明:气隙磁密峰值达0.6T,定子齿部磁密1.55T,轭部1.45T,永磁体表面磁通密度均匀度>92%。





1.3损耗构成分析

铁芯损耗 采用改进的Bertotti铁损分离模型:

$$P_{
m Fe} = k_h f B_m^2 + k_e \left(rac{dB}{dt}
ight)^2 + k_a \left(rac{dB}{dt}
ight)^{1.5}$$



从图中分析可得出, 横轴为时间(单位: ms), 覆盖 0-3ms; 纵轴为铁损耗(单位: W), 显示电机在20kW负载下的铁损耗 (CoreLoss)变化。曲线整体呈平稳波动状态, 铁损耗值集中在40 -60W区间, 平均值标注为49.8024mW。表明在20kW负载工况下, 电机铁损耗相对稳定, 未出现剧烈波动。

稳定的铁损耗数据为电机热分析提供了关键热源依据,说 明该负载下铁芯损耗处于可预测的稳态区间,有助于后续温度 场仿真中热源加载的准确性,也反映电机电磁设计在该工况下 的稳定性。

$$P_{ ext{Me}} = rac{\pi^2 \sigma B_m^2 f^2 L_a L_b^3}{12}$$

1.4永磁体涡流损耗采用改进的涡流损耗模型

Loss Plot 2 20kwload 40.00 ≥^{30.00} Curve Info avg 10 20.00 SolidLoss p1 : Trans 36 73 10.00 0.00 0.00 0.50 1.00 1.50 2.00 2 50 3.00 Time [ms

图5 负载涡流损耗

从图中看出横轴为时间(单位: ms,范围0-3.00ms),纵轴 为涡流损耗(单位: W),展示20kW负载下电机的涡流损耗 (SolidLoss)变化,平均涡流损耗为36.7366W。曲线呈周期性波 动,损耗值集中在30-40W区间,每段时间内先上升后下降,体现 电机运行时涡流损耗随时间的周期性变化。负载工况下磁场分 布动态特性合理。数据为电机热管理提供关键热源依据。平均 损耗值与波动特征可用于温度场仿真的热源加载,辅助评估电 机发热情况,优化冷却系统设计,保障电机在20kW负载下的运行 稳定性与散热效率。

1.5负载铜耗根据焦耳定律: $P_{\mathrm{Cu}} = 3I^2 R$



从图中可以看出,负载情况平均铜损耗为178.7101W。铜损

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

耗变化特征曲线近乎水平,铜损耗稳定在170-180W区间,无明显波动,说明20kW负载下,电机绕组铜损耗处于稳态,曲线稳定 表明该负载下绕组电流、电阻均无显著变化,电机电气运行的稳 定性,负载下的运行可靠性。

2 冷却效果分析

2.1温度分布对比



图7 整体温度分布图

外转子油冷轮毂电机分析结果,整体温度分布特征:图中展 示了外转子油冷轮毂电机截面的温度分布,不同区域通过颜色 及数值(如41.1℃、48.2℃、52.4℃、53.0℃等)标注温度。最 高温度为53.0℃,最低温度(如41.1℃),体现了油冷系统对电机 温度的调控作用,各部件温度差异反映了热损耗与冷却效果的 综合影响。

高温区域分析:温度为53.0℃左右的区域对应定子或绕组 部位。这与油冷轮毂电机"高温区域集中在定子和绕组"的特 性相符,表明这些部件因电磁损耗等产生较多热量,是电机运行 中的主要发热源。

低温区域分析:低温区域(如41.1℃)可能靠近油冷通道。冷 却介质(油)在此区域流动时,有效带走热量,降低局部温度,凸 显了油冷通过热交换实现散热的机制,验证了油冷对电机温度 的抑制作用。

外转子结构与冷却效果关联:外转子轮毂电机中,转子位于 外侧旋转,定子在内侧固定。图中温度分布反映了油冷系统的散 热路径——冷却油通过特定通道流动,与发热部件定子、绕组进 行热交换,高温区域热量被带走,传递至低温区域靠近冷却通道 处,最终实现电机整体温度的降低与均衡,体现了外转子结构下 油冷系统的散热有效性与热传递特性。

综上,该图直观呈现了外转子油冷轮毂电机截面的温度分布,既反映了电机内部热损耗的分布特点定子、绕组为主要发热源,又展示了油冷系统对温度的有效控制,为评估电机热性能与 冷却效果提供了直观依据。

3 冷却效果验证

通过有限元计算结果与实验数据对比发现,不同结构电机 的计算结果与实验结果吻合度较高,验证了有限元分析的正确 性。在对外转子轮毂电机进行温升实验时,通过在绕组端部设置 温度传感器,检测到在额定功率及额定转速下,电机温度在40分 钟达到热平衡状态,实验得到的最高温度为65摄氏度,而有限元 分析得到的最高温度为63摄氏度,误差仅为2摄氏度,在合理范 围内。同样,对于外转子轮毂电机的实验也得到了类似的结果, 进一步验证了水冷有限元分析的准确性。这表明有限元分析可 以有效地预测轮毂电机在水冷方式下的温度变化,为电机的设 计和优化提供了重要的参考依据。



这是一张外转子油冷轮毂电机的热瞬态(ThermalTransient) 分析图,横轴为时间(单位:秒),纵轴为温度(单位:摄氏度), 不同颜色和标记的曲线代表电机不同部件的温度变化,具体分 析如下:

初始阶段(0-1800秒): 各部件温度变化显著,部分曲线(如 黄色圆点曲线)温度快速上升,表明对应部件发热量大且散热尚 未达到平衡。

稳定阶段(1800秒后):多数曲线趋于平稳,说明电机发热与 散热达到热平衡,温度不再大幅波动,体现了油冷系统对温度的 有效调控。

部件温度特性:黄色圆点曲线:温度最高,初期上升迅速, 最终稳定在约63℃,代表发热量大的关键部件(如绕组),其高稳 定温度反映了该部件损耗大且散热相对较慢。黑色星号曲线:温 度上升较缓,稳定在中间区间(约55℃),可能对应定子等部件, 发热与散热能力介于高发热部件和散热优势部件之间。红色方 块曲线:初期有波动,后稳定在较低温度(约45℃),可能是散热 条件较好的部件(如靠近冷却通道的结构),受冷却影响明显。蓝 色方块曲线:温度最低且波动小(约40℃),表明该部件(如靠近 油冷源的区域)散热效率高,冷却效果显著。

冷却系统效果:所有曲线在1800秒后趋于平稳,说明油冷系 统使电机各部件温度逐渐可控,达到热平衡,有效抑制了温度持 续上升,确保电机在合理温度范围内运行,体现了油冷方式对轮 毂电机热管理的有效性。

综上,该图通过不同曲线的温度-时间变化,清晰展示了外转子油冷轮毂电机各部件的发热与散热特性,以及油冷系统对 电机热瞬态过程的调控作用,为评估电机热性能和冷却效果提 供了直观依据。

4 结语

第6卷◆第2期◆版本 1.0◆2025年 文章类型:论文|刊号(ISSN): 2737-4505(P)/2737-4513(O)

本文针对纯电动汽车外转子轮毂电机散热难题,开展了多物理场耦合仿真与冷却结构优化研究。研究以20kW外转子永磁同步轮毂电机为对象,基于Maxwell和Ansys平台建立电磁场与温度场耦合模型,重点分析了永磁体涡流损耗和转子铁芯损耗对温度分布的影响。通过创新性设计双螺旋油冷通道结构,结合热流固耦合分析,系统验证了新型冷却方案的散热效能。损耗特性:揭示了电机运行时铁芯损耗(平均49.8W)、永磁体涡流损耗(平均36.7W)及铜耗(平均178.7W)的动态分布规律,为温度场仿真提供精确热源数据。

冷却优化:设计双螺旋油冷通道,通过交错水道布局使冷却 液接触面积提升40%,电机最高温升降低5%,散热效率较传统单 水道提高28%。对比分析:对比风冷、水冷及油冷方式发现,油 冷可将电机最高温度稳定在84.6℃(定子)和81.2℃(绕组),显 著优于风冷(119℃)和水冷(79℃),且温度分布更均匀。

工程验证:实验与仿真结果吻合,验证了有限元模型的可靠性,为轮毂电机热管理系统设计提供理论支撑。

本文为外转子轮毂电机冷却系统设计提供了关键理论依据 和工程参考,对解决电动汽车电机散热难题、提升能效与安全性 具有重要价值。

[参考文献]

[1]李谕.基于混棚正实网络的轮毂电机驱动汽车动惯性悬 架优化设计与控制研究[D].江苏:江苏大学,2023.

[2]董羽飞.电动汽车永磁游标轮毂电机优化设计及温度场 分析[D].辽宁:辽宁工程技术大学,2022.

[3]王莉.电动轮汽车永磁同步轮毂电机优化设计及再生制 动策略分配[D].山东:山东科技大学,2020.

[4]李坊之.电动汽车用轴向磁通轮毂电机设计与优化[D]. 江苏:江苏大学,2020.

[5]胡一明,李哲.轮毂电机驱动电动汽车悬架构型设计与优 化[C].//2018中国汽车工程学会年会论文集.2018:952-956.

[6]霍龙飞.电动汽车用永磁同步轮毂电机设计优化及温度 场分析[D].河北:河北科技大学,2022.

作者简介:

徐斌(1985--),男,汉族,四川洪雅人,硕士,新能源汽车。

袁晓红(1988--),女,汉族,四川南充人,硕士,机械制造。