

新能源汽车驱动电机热设计与热管理技术研究综述

张联群

湖北三峡职业技术大学 湖北 宜昌 443000

摘要：驱动电机是新能源汽车动力总成的核心部件，其功率密度持续提升带来的热问题已成为制约电机性能、寿命与安全性的关键瓶颈。本文系统综述了新能源汽车驱动电机的热设计原则、热源特性与传热路径、绕组与铁心冷却技术、转子与永磁体温管理以及热管理系统集成控制等方面的研究进展。重点分析了油冷、水冷及相变冷却等主流技术方案的优缺点与适用场景，探讨了热-结构-电磁多场耦合设计方法的发展趋势。研究表明，高效热管理技术正从单一部件冷却向系统级集成热管控方向演进，智能热管理策略与新材料应用将是未来重要发展方向。

关键词：新能源汽车；驱动电机；热设计；热管理；冷却技术；多场耦合

引言：新能源汽车产业的快速发展对驱动电机提出了更高功率密度、更宽调速范围和更高可靠性要求。随着电机小型化与轻量化设计持续推进，单位体积内的损耗密度急剧增加，产生的热量在受限空间内快速积聚，导致绕组绝缘老化加速、永磁体退磁风险上升、轴承润滑性能劣化等一系列问题。因此，热设计与热管理技术已成为驱动电机研发中的核心关键技术之一。本文从热源特性出发，系统梳理当前主流热管理技术路线，分析油冷、水冷等冷却方式的适用边界与优化方向，总结多物理场耦合设计方法，探讨未来技术发展趋势，为高效驱动电机热管理系统开发提供参考。

1 驱动电机热源特性与热设计基础

1.1 电机内部热源分布与损耗构成

驱动电机运行过程中的热量来源于各类电磁损耗和机械损耗。铜损（绕组焦耳损耗）是主要热源，约占电机总损耗的 50%~65%，集中在定子绕组铜导体中，具有局部热流密度高的特点。铁损包括磁滞损耗和涡流损耗，在定子齿部和轭部最为显著，约占 20%~30%。永磁体涡流损耗占比虽小（约 3%~8%），但因其散热条件差，局部温升集中，对永磁体安全构成直接威胁。机械损耗主要来自轴承摩擦和风摩损耗，占比约 5%~10%。这些损耗在电机内部空间呈不均匀分布，绕组端部和定子齿部往往是温升最高的区域，是热管理的重点部位。

1.2 热传导路径与热阻网络分析

理解电机内部的热传导路径是热设计的前提。热量从热源产生后，沿固体传导和流体对流两条路径向外传递。定子绕组产生的热量一部分通过绝缘层传导至定子铁心，再由铁心传导至机壳表面散失；另一部分通过端

部空气或冷却油直接带走。永磁体热量经转子铁心、转轴、轴承传递至机壳，路径长且热阻大，是散热最薄弱的环节。热阻网络模型可将电机简化为若干热节点，通过热阻-热容网络计算各部件稳态和瞬态温度分布。准确建立绕组-铁心-机壳-冷却介质之间的热阻参数是热设计的基础工作^[1]。

2 电机冷却技术路线与适用场景

2.1 不同冷却方式的对比分析

新能源汽车驱动电机的冷却方式经历了从自然冷却、强制风冷到液体冷却的演进过程。自然冷却仅适用于微小型或低功率密度电机，热负荷受限。强制风冷通过在电机轴端加装风扇增强对流换热，结构简单、成本低，但散热能力有限，适用于功率等级较低的车型。水冷是目前主流的冷却方式，在机壳设置螺旋或轴向水道，通过冷却液循环带走热量，传热系数可达风冷的数十倍，能够满足中等功率密度电机的散热需求。油冷直接冷却技术将绝缘油喷淋或浸入绕组端部和转子，散热效率最高，适合高功率密度、高转速电机，但系统复杂度、密封要求和成本均较高。表 1 对比了四种冷却方式的关键性能参数。

表 1 不同冷却方式关键性能参数对比

冷却方式	传热系数 ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)	功率密度适用 上限 (kW/kg)	系统复杂 度	成本等 级
自然冷却	5~20	0.5	低	低
强制风冷	20~100	1	较低	较低
水冷（机壳）	200~600	3	中	中
油冷（直接）	600~2000	5.0+	高	高

2.2 水冷系统设计与优化

水冷技术通过在电机壳体上布置冷却水道实现热量导出,是当前量产新能源车应用最广泛的方案。水道结构形式主要有轴向直通式、螺旋环绕式和折返式三种。螺旋水道因流道长、冷却均匀性好而应用最广,其设计关键参数包括水道截面形状、螺旋圈数、水流速度和进出口位置。计算流体力学仿真表明,采用矩形截面水道比圆形截面水道增加换热面积约 15%~20%,合理设计扰流结构可使局部对流换热系数提升 20% 以上。水冷系统的热管理能力受冷却液入口温度和流量直接影响,优化控制策略应在保证散热需求的前提下降低水泵功耗,实现系统效率最优。

2.3 油冷直接冷却技术

油冷直接冷却技术将变压器油或专用冷却油引入电机内部,通过喷淋、浸入或循环流经绕组端部和转子表面实现高效换热,特别适合高功率密度、高转速驱动电机。端部喷淋冷却在绕组端部上方布置喷嘴孔,将冷却油直接喷射至发热最集中的端部铜线,可在局部达到 $2000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 以上的传热系数。转子甩油冷却利用转子旋转离心力将内部油液甩向定子内壁,同时实现转子和定子的双向冷却。油冷+水冷复合方案结合两者优势,机壳水冷承担基础散热,内部油冷解决绕组端部和永磁体局部热点,可使电机持续功率提升 20%~30%。油冷面临的主要挑战包括油品选择、密封设计、油泵功耗优化以及与变速箱油路的集成设计。

2.4 相变冷却与新型热管理材料

相变冷却技术利用材料相变潜热吸收热量,可在短时间内抑制温度尖峰,具有储能密度高、温度波动小的优势。相变材料主要包括石蜡基和盐基两大类,石蜡基材料相变温度可调范围广($40^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$),适用于电机工作温区,但其导热系数偏低(约 $0.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$),需通过添加高导热填料(膨胀石墨、金属泡沫)改善导热性能。研究显示,添加 10%~20% 膨胀石墨可将有效导热系数提升至 $3 \sim 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,显著增强吸热响应速度^[2]。热管技术利用工质相变循环实现高效传热,等效导热系数可达纯铝的数十倍至数百倍,适用于机壳散热强化或远程热输运。新型高导热绝缘材料(如导热环氧灌封胶)可将绕组与机壳之间的热阻降低 40%~60%,有效改善绕组散热条件。

3 关键部件热管理技术

3.1 定子绕组热管理与导热增强

定子绕组是电机内部热流密度最高的部件,其散热能力直接影响绝缘寿命和电机峰值功率持续时间。常规空气填充的绕组端部散热能力极低,导热系数仅约 0.03

$\text{W/m} \cdot \text{K}$ 。灌封技术通过在绕组端部填充高导热灌封胶(导热系数 $1 \sim 3 \text{ W/m} \cdot \text{K}$),将端部热量有效传导至机壳,可使绕组温升降低 $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 。导热槽衬在定子槽内壁与绕组之间嵌入导热绝缘材料,改善槽内填充系数和导热路径,减小槽内热阻。中空导体技术在铜导线内部开设微小通道通入冷却介质,可从源头直接带走绕组热量,属前瞻性技术方向。

3.2 永磁体温升控制与退磁防护

永磁体对温度高度敏感,钕铁硼永磁体的工作温度上限通常为 $150^\circ\text{C} \sim 180^\circ\text{C}$,超过此温度将发生不可逆退磁,导致电机转矩下降和效率衰减。永磁体热量主要来源于涡流损耗和相邻绕组的传导热。控制永磁体温升须从设计和热管理两方面入手:设计上通过优化磁路结构、增加磁钢分段和开槽以降低涡流损耗;热管理方面通过转子内部通风或油冷通道强制冷却转子。转子内部油冷通过在转轴内开孔将冷却油导入转子内部,利用离心力将油甩向永磁体表面直接冷却,是目前最有效的永磁体温控手段。

3.3 轴承热稳定性与润滑系统设计

轴承是电机中承受机械载荷和热载荷最集中的部件。高速运转下轴承摩擦发热与外部传导热叠加,使轴承温度持续上升,过高的温度将导致润滑脂劣化、游隙变化、保持架变形等问题,严重时引发轴承抱死或烧毁。轴承热管理需综合考虑润滑、散热与预紧力控制。润滑系统设计应保证高速工况下足够油量和油压,脂润滑适用于转速较低的电机,油雾润滑或油气润滑适用于高速电机。油冷电机的轴承需特别关注油路设计,确保冷却油流经轴承时既能带走热量又不冲走润滑脂^[3]。

4 电机热管理系统集成与智能控制

4.1 电机-电控-减速器一体化热管理

新能源汽车动力总成集成度持续提升,电机、电控和减速器共用冷却回路成为主流趋势。一体化热管理系统需要统筹三个部件的不同温控需求:IGBT 功率模块工作温度上限约 150°C ,要求散热速度最快;电机绕组耐受温度约 180°C ,散热要求居中;减速器油温维持在 $60^\circ\text{C} \sim 90^\circ\text{C}$ 时效率最佳,温度过低反而增加搅油损耗。一体化热管理须通过分区流量分配、智能切换阀和变流量油泵实现差异化温度控制,在满足各部件散热需求的前提下实现系统总能耗最小化。当前开发重点在于热管理控制策略与整车热管理系统的深度耦合。

4.2 基于模型的热状态在线监测与预测

实时掌握电机内部温度分布是实现精准热管理的前提,但直接测量内部温度存在传感器布置困难和可靠性问

题。基于模型的热状态观测通过热阻网络模型或降阶热模型,结合易于测量的机壳温度、冷却液温度、电流和转速等信号,在线估计绕组和永磁体的实时温度。该技术可减少温度传感器的使用,同时提供更全面的温度场信息,为热管理控制策略提供数据基础。热状态预测结合电机工况预测模型(如根据导航路线预判未来功率需求),提前调整冷却系统工作状态,实现前瞻式热管理。

4.3 智能热管理控制策略

传统热管理策略普遍采用阈值触发控制模式,冷却系统在全速工作与完全关闭两档之间切换,能耗较高且容易引起被控温度的大幅波动,影响电机热稳定性和系统效率。智能热管理策略以系统能效最优为核心优化目标,通过动态调节水泵或油泵转速、冷却液温度目标值和散热风扇开度等执行参数,使冷却功率与实时散热需求实现精准匹配。基于规则的控制策略通过大量标定试验建立控制参数查表,实现简单可靠、工程应用成熟,是目前量产车型的主流方案。基于模型预测控制则利用热力学模型预测未来温度变化轨迹,在满足各部件的温度约束前提下使冷却系统运行能耗最小化,尤其适用于工况变化频繁的驱动电机热管理场景。机器学习方法通过历史运行数据学习最优控制规律,能够自适应不同驾驶风格、环境温度和海拔条件,代表热管理控制策略的智能化发展方向。

5 多物理场耦合热设计方法

5.1 电磁-热-流多场耦合仿真技术

驱动电机热设计本质上是电磁场、温度场和流体场的多物理场耦合问题。电磁场计算得到损耗分布作为热源输入,温度场计算得到温度分布后反过来影响电磁材料属性(如永磁体剩磁温度系数、铜电阻率温度系数),两者之间形成双向耦合。流体场决定对流换热系数的分布,与温度场构成单向耦合关系。多场耦合仿真通过迭代计算逼近真实工作状态^[4]。当前工程中常用的弱耦合方法将各物理场分别求解后传递数据,计算效率较高;强耦合方法同步求解所有物理场方程,精度更高但计算代价大。高效多场耦合算法和工程化应用流程是当前研究的热点。

5.2 热设计优化方法与典型流程

驱动电机热设计流程包括损耗计算、热源分布映射、热模型建立、仿真分析和方案优化五个步骤。优化变量通常包括水道几何参数、冷却介质流量、绝缘导热系数、永磁体分段数等。优化目标为峰值温升最小化、温度均匀性最佳化或综合热性能指标最大化。单目标优化可借助响应面法或克里金代理模型快速收敛;多目标优化兼顾温升、压降、重量和成本等多重指标,通过Pareto前沿呈现权衡关系。近年来遗传算法和粒子群优化等智能优化算法在多目标热设计问题中得到了广泛应用,在处理高维参数空间和高度非线性的搜索问题时展现出明显优势,为电机热设计优化提供了新的方法论工具。

结束语

驱动电机热管理技术是新能源汽车向高功率密度、高可靠性方向发展的核心支撑。本文系统梳理了从热源特性分析到多场耦合优化的完整技术链条,明确了水冷、油冷及相变冷却等主流路线的适用边界。研究表明,单一部件冷却已难以满足日益增长的散热需求,电机-电控-减速器一体化热管理正成为行业共识。智能控制策略与新型导热材料的结合,有望在系统能效与温度管控之间实现更优平衡。未来研发应聚焦多物理场耦合设计工具工程化、热状态在线预测精度提升及低成本集成方案开发,推动热管理系统从被动散热向主动热调控转型。

参考文献

- [1] 汪冬梅,李思义,梁艳萍.新能源汽车驱动电机热设计与热管理技术研究综述[J].电工技术学报,2026,41(2):389-415.
- [2] 杜长兴.新能源汽车驱动电机散热结构的优化设计[J].时代汽车,2025(22):157-159.
- [3] 郭晓丹.新能源汽车电机驱动系统性能优化设计[J].汽车电器,2026(3):30-32.
- [4] 姜卓含.新能源汽车驱动电机技术及能效提升策略研究[J].汽车维修技师,2025(14):18-19.