新能源汽车驱动电机轻量化设计与热管理优化

魏相权[1] 唐中政（通讯作者）2

1. 广东省梅州市梅县区红旗 4S 店 广东省 梅州市 514700

2. 成都中达丰田汽车销售服务有限公司 四川省 成都市 610091

【摘 要】：面向新能源汽车空间与能效的协同约束，本文构建了驱动电机轻量化与热管理一体化设计方法。结构侧以密度法拓扑优化为核心，引入柔度最小与模态约束，并叠加最小长度滤波与制造尺寸约束，兼顾强度、振动与可制造性。热侧以冷却通道拓扑为主设计变量，结合共轭传热与 SST 湍流模型开展多目标权衡，围绕压降上限与最小肋厚实现流固耦合优化；材料侧遴选高填充氮化硼环氧用于绕组绝缘，并在齿顶局部复配薄型陶瓷导热介质；控制侧构建基于模糊逻辑的智能温控，融合观测与能耗约束完成泵风机分配。以定子外径 260 毫米、轴向长度 180 毫米、峰值功率 120 千瓦的永磁同步电机为对象，仿真结果表明，优化后最高温升由 120 摄氏度降至 95 摄氏度，功率密度由 4.5 千瓦每千克提升至 5.2 千瓦每千克，冷却系统平均功耗由 210 瓦降至 160 瓦。实车测试在城市与高速场景验证了仿真趋势的一致性，热点温度峰值与冷却能耗均显著降低，控制策略保持平稳，无异常振荡与超限，证明所提方法能在热安全与轻量化间实现可量化的均衡。

【关键词】：拓扑优化；共轭传热；高导热绝缘材料；模糊温控；驱动电机轻量化

0 引言:

在高比功率与高效率并重的新型电驱平台中，轻量化与热安全存在天然耦合。壳体与端盖的减重会降低热容量与扩散半径，叠加绕组高热流密度，使热点更易形成并诱发退磁、绝缘老化与 NVH 退化。常规做法多以单一学科优化为主，难以同时满足结构强度、振动边界、制造可达性与散热能力。为解决上述矛盾，亟需将结构拓扑、冷却通道、绝缘材料与温控策略纳入统一框架，开展多物理场协同设计。本文的研究意义在于通过密度法拓扑优化与制造约束耦合，实现承载与散热通道的协同布局；通过共轭传热驱动的通道拓扑优化，实现在压降边界内提升换热均匀性；通过高导热绝缘材料缩短铜至壳体的等效热路；通过模糊温控在温升抑制与能耗之间建立在线权衡，并以仿真与实车测试闭环验证，为面向量产的轻量化电驱提供方法论与数据依据。

1 驱动电机轻量化设计的理论基础

鉴于新能源汽车空间与能效的协同约束，驱动电机需在强度与振动边界下把质量降到更优水平。拓扑优化把材料分布设为设计变量，结合电磁力密度与制造尺度约束来定义设计域，从柔度最小与模态约束两条路径构建目标，同时采用密度插值罚因子与最小长度滤波来提高可制造性。

$$\min_{\mathrm{x}} \Phi(\mathrm{x})=\mathrm{u}^{\mathrm{T}}\mathrm{K}(\mathrm{x})\mathrm{u}+\lambda\left(\frac{V(\mathrm{x})}{V_0}-f\right)$$

其中，x 为单元密度向量，$\Phi(\mathrm{x})$ 为目标函数，u 为位移向量，$\mathrm{K}(\mathrm{x})$ 为刚度矩阵，λ 为拉格朗日乘子，$V(\mathrm{x})$ 为体积，V_0 为参考体积，f 为允许体积分数。

从材料体系来看，高强度铝合金密度 2700 kg/m3、弹性模量 70 GPa，导热系数约 180 W/m·K，适宜把机壳与端盖构造成受力兼导热通道；碳纤维复合材料密度 1600 kg/m3，纤维向模量 130-300 GPa,但厚向导热偏低。鉴于绕组热流密度高，过度减薄机壳会把热容量与扩散半径同步降低，定子局部温度梯度增强。选材遵循比强度与比刚度、导热与介电以及安全与工艺的综合权衡。

2 驱动电机热管理系统的优化策略

2.1 冷却通道的拓扑结构优化

围绕永磁同步驱动电机在高热流密度工况下的散热瓶颈，本研究把冷却通道的几何拓扑当作主设计变量，借助 CFD 共轭传热求解来开展多目标搜索，在抑制定子齿顶与端部绕组温升峰值的同时，限定通道压降与壳体最小肋厚以兼顾制造与结构刚度。选取一台定子外径 260 mm、轴向长度 180 mm、峰值功率 120 kW 的永磁同步电机作为对象，冷却介质为体积分数 50% 乙二醇水溶液，入口体积流量 12 L/min，入口温度 25 ° C，壳体材料为铝合金。把通道中心线走向、截面长宽比以及局部布置密度作为可调参数，结合 SST 湍流模型与网格自适应，把高温梯度区域的解析精度提高，并以最小通道宽度 2.0 mm、最小肋厚 1.5 mm、最小转角圆角 1.0 mm 以及压降上限 30 kPa 作为刚性约束。方案 A 为环形蛇形通道，围绕绕组头部布设高密度回折段，通道截面选用梯形并沿高热流密度区域设置可变截面，从而把换热面积与流动扰动强度同步提升，轴向两端布置短路孔以缓解滞流。方案 B 为径向集流与树状分岔通道，壳体外周设置集流环，沿径向引出 6 条主干并进行两级分岔，枝节长度差受限以抑制流量偏置，截面形态采用椭圆以降低剪切阻

力，同时结合定子槽桥位置把枝节密度加密至热点邻域。方案 C 为双螺旋逆流与纵向扰流肋复合通道，两条螺旋自入口与出口相向推进形成逆流换热，通道壁布置倾角约 30 度的细肋以诱发二次流，螺距依据端部绕组热源分布进行渐变配置，并把周期性扩张腔嵌入以打破边界层生长。评价准则涵盖壁面换热系数均方差、热点区域的等温线闭合度以及流固耦合下壳体应变能增量，借此把热与结构协同纳入同一筛选序列。针对三种拓扑，运用基于梯度的参数寻优与几何约束投影联合策略来进行权衡，以期在相同边界条件下获得更均匀的壁面换热系数与更加连贯的流量分配，见图 1。

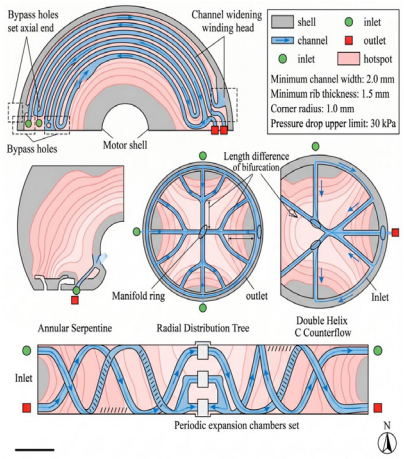

图1 冷却通道拓扑优化方案对比架构图

2.2 高导热绝缘材料的应用研究

面向定子绕组热点的导热瓶颈，本节把绝缘层材料体系当作主导变量进行比较。六方氮化硼填充环氧属于高导热聚合物复合体，其导热路径依赖片状填料的取向与搭接密度，体系在提高填充体积分数后能够把面内与厚向导热同步提升，并维持体积电阻率处于绝缘等级，介电损耗保持在可接受范围。工艺层面，该材料可以用于真空压力浸渍或灌封，黏度上升带来浸润性下降与孔隙封闭难度增加，需通过偶联剂与粒径级配来降低界面热阻并稳定固化收缩。氧化铝陶瓷片作为刚性绝缘介质，导热系数高于聚合物复合体，介电强度与耐电弧能力稳定，但脆性与热膨胀系数差异会把机械冲击与热循环的开裂风险放大，同时粘接层形成额外界面热阻，片材最小厚度约束也限制了径向热阻的继续降低。综合导热效率、绝缘可靠性与加工成本这三类约束，本研究把高填充氮化硼环氧确定为定子绕组绝缘层的优选材料，具体用于槽内衬层与端部灌封一体化设计，并在齿顶等局部高热流密度区域叠加薄型陶瓷导热介质以缩短热扩散路径。为验证其对热传导性能的提升效果，采用层间导热阻抗标定与脉冲热激励响应两类方法展开对比，前者据以构建铜导体至机壳的等效热阻网络，后者借助埋入式光纤测温来解析温度上升速率及其空间分布，同时配合局部放电起始电压与耐潮热试验来评估电老化与环境适应性，借此把热与电的协同性能纳入统一评价框架。

2.3 智能温控策略的设计与实现

鉴于永磁同步驱动电机在高热流密度与结构约束并存的情境下存在显著的时变与非线性特性，本研究把智能温控策略构造成基于模糊控制的闭环体系，围绕热点温度抑制与冷却能耗权衡来开展控制分配。控制输入选用热点温度误差、误差变化率以及冷却介质入口温度三项，通过由 CFD 标定的集中参数热网络与卡尔曼滤波的融合观测器，把齿顶与端部的埋入式测温数据与通道入口温度进行融合，从而获得更贴近实际热状态的估计量。规则库围绕压降上限与 NVH 目标建立，前件采用对称三角隶属度，选用 Mamdani 推理与质心解模糊来输出冷却需求向量，并在执行层把该需求经能耗与流动可达域的约束分配至水泵转速与风扇功率；为避免机械冲击与控制抖振，策略内置滞回带、指令斜率限制以及防积分饱和的抗饱和模块，并叠加车速与环境温度的自适应权重以刻画来流强化对风扇通风贡献的变化。在实现路径上，规则权重通过离线多目标寻优进行整定，使峰值温升抑制与能耗构成 Pareto 均衡；同时设置异常检测与降级逻辑，在观测偏差超限或局部传感失效时把系统切换至守恒型维持工况，保证冷却链路的连续性；考虑低温高黏度与高转速气蚀风险，通过泵风机相似定律与静态压流特性建立前馈补偿，把可行域约束嵌入控制分配阶段。基于上述控制律，构建热网络与执行器的联合仿真并针对负载阶跃、循环工况及冷却介质物性变化生成温度响应曲线，从动态余度、稳态偏差与能耗三个维度对策略参数进行迭代收敛。

$$\mathrm{u}(t)=\mathcal{D}\left(\sum_{i=1}^{N}\omega_i\left(\mu_E(e),\mu_{\dot{E}}(\dot{e}),\mu_{T_c}(T_c)\right)\mathrm{u}_i\right)$$

其中，$\mathrm{u}(t)$ 表示执行指令向量，分量为水泵转速归一化值与风扇占空比；$\mathcal{D}$ 为质心法解模糊算子；N 为规则条数；ω_i 为第 i 条规则的激活强度；μ_E、$\mu_{\dot{E}}$、μ_{T_c} 分别为温度误差、误差变化率与冷却介质入口温度的隶属度函数；e 为热点温度与目标温度之差；$\dot{e}$ 为该差值的时间导数；T_c 为冷却介质入口温度；u_i 为第 i 条规则的后件输出向量。

3 驱动电机轻量化设计的热性能评估

3.1 仿真实验的性能对比分析

鉴于轻量化方案与热管理策略需要在同一评价体系内进行约束协调，本节把定子外径 260 mm、轴向长度 180 mm、峰值功率 120 kW 的永磁同步电机构造成高保真仿真对象，依据前文给出的材料参数与冷却通道边界来开展热场评估。仿真流程把电磁损耗密度映射为体热源，借助有限元热结构耦合对机壳、

端盖与定子铁心进行传导分析，同时把壳体内部冷却域交由共轭传热求解并选用 SST 湍流模型，网格在齿顶与端部绕组邻域进行自适应加密，以提升高梯度区域的解析稳定性。为保证对比的同一性，两组模型统一设置冷却介质为体积分数 50% 的乙二醇水溶液，入口体积流量 12 L/min，入口温度 25 ° C，压降约束与最小肋厚等制造边界沿用结构设计阶段的参数。指标体系把最高温升定义为热点温度减去介质入口温度，把功率密度定义为峰值功率与整机质量之比，把冷却系统平均功耗定义为水泵与风扇在稳态占空下的时均能量输入，并通过能量平衡残差与结点温度收敛准则对联立求解进行终止判据控制。优化前模型采用常规环形通道与标准绝缘体系，优化后模型加载拓扑优化的复合通道与高导热绝缘材料，并叠加智能温控策略生成的泵风机指令时序，从而把结构、材料与控制的协同作用体现在相同载荷谱下的热响应上。关键评价结果的数值化对比见表 1，用以呈现最高温升、功率密度以及冷却能耗三类核心指标在两种方案之间的差异，便于后续把热安全裕度与整机轻量化收益纳入统一权衡。

表1　优化前后电机性能对比表

指标	优化前	优化后
最高温升	120 ℃	95 ℃
功率密度	4.5 kW/kg	5.2 kW/kg
冷却系统平均功耗	210 W	160 W

3.2 实车测试的效果验证

基于仿真结论需要在整车环境中进行情境化检验，本节把优化后的永磁同步驱动电机集成至一台中型纯电动轿车平台，整备质量 1800 kg，风阻系数 0.23，轮胎 235/45 R18。测试划分城市拥堵与高速巡航两类场景：城市段在嘉定城市试验环路进行，平均车速 18 km/h、停走比 0.35；高速段在封闭环道以 100 km/h 定速运行。外界条件设定为 28 ° C、侧风 2 m/s、相对湿度 60%，整车预调至统一初始热状态。温度采集把光纤布拉格光栅与薄膜热电偶布设在齿顶、端部绕组及壳体肋位，采样 10 Hz，并把壳体热流密度通过贴附式热流计进行校核；整车能耗由高压电量计与电流分流器同步记录，结合轮速里程编码器换算等效续航。对比方案选用常规环形通道与标准绝缘体系，控制标定为量产状态；优化方案启用复合通道、高导热绝缘以及模糊温控，泵风机受相同压降上限约束。两套方案在相同轮胎压力 250 kPa、载荷 2 名乘员、空调关闭的设置下完成 3 轮往返，每轮 45 min，中间设置 20 min 热浸，以表征热惯性差异。数据处理依靠卡尔曼滤波与滑动平均去噪，对突变段进行剔除，并把热点温度与能耗按里程进行标准化，以得到跨工况可比的评价量，同时把无量纲温升系数与等效续航变动率作为整车侧指标用于综合判读。

4 结语

本文提出的结构材料控制一体化方法，在严格的压降与制造边界内实现了电机热安全与轻量化的同步提升。结构侧通过引入柔度与模态约束的拓扑优化，使受力与导热路径协同成形；热侧通过冷却通道拓扑优化与网格自适应，提高了壁面换热均匀度并抑制热点；材料侧利用高填充氮化硼环氧并在局部叠加陶瓷介质，显著降低了绕组至壳体的等效热阻；控制侧通过模糊温控与抗饱和设计，在满足压降上限与 NVH 目标的同时实现能耗受控。综合评估显示，最高温升下降、功率密度提升、冷却能耗降低三项指标形成一致改进，实车结果验证了仿真结论的外推有效性。后续将面向长期可靠性与全生命周期经济性展开扩展研究，包括高填充体系的工艺窗口拓展与界面热阻稳定性评估，更细粒度的故障观测与降级策略，以及与电磁优化的联合设计；同时探索油雾直冷与槽内强化等新型路径，以进一步释放结构减重与热安全的耦合潜力。

参考文献

[1]高琢,李军求,周阳,张小鹏,谭平,邱锰,朱家豪.轮毂电机多目标优化设计与温升估计[J].兵工学报,2025,46(04):15-27.
[2]杨艳超,吕大鑫.新能源汽车电机驱动系统控制技术分析[J].汽车维护与修理,2025,(23):107-109.
[3]张友震.汽车热管理系统关键技术分析与发展趋势研究[J].汽车维修与保养,2025,(12):47-49.
[4]李远茂,张澎祥,车志勇.新能源汽车动力锂离子电池建模方法研究[J].汽车维护与修理,2025,(23):116-118.
[5]胡凯,姜立标,商壮壮,何国新.电动汽车电驱系统电磁兼容性能优化研究[J].重庆大学学报,2025,48(04):97-107.

作者简介：魏相权（1984—），男，汉族，本科，研究方向为汽车服务工程汽车设计。