电动汽车电机系统效率提升方法

钟华　刘志强

（一汽旗新动力（长春）科技有限公司，长春 130013）

【欢迎引用】钟华，刘志强．电动汽车电机系统效率提升方法[J]．汽车文摘，2026(7)：13-17.

【Cite this paper】ZHONG H, LIU Z Q. Methods for Improving the Efficiency of Electric Vehicle Motor Systems[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(7): 13-17.

【摘要】针对电动汽车实际运行工况复杂多变，传统电机系统依赖单一标准工况标定导致全工况效率偏低的技术问题，提出一种融合实时工况感知、多参数协同调控与热管理联动的自适应优化方法。该方法通过采集电机转速、扭矩、冷却液温度/流量等多维运行数据，构建转速-扭矩-热状态三维特征空间并动态分区，基于分区特性协同优化功率器件驱动参数（栅极电阻、驱动电压）、脉冲宽度调制开关（PWM）的开关频率及冷却系统运行策略。相较于传统最恶劣工况固定冗余设计，所提方法在满足系统安全可靠性的前提下，通过“软硬协同+热电联动”实现全工况损耗精准控制。试验结果表明，所提出方法使电机系统CLTC综合工况效率提升0.34~0.67百分点，有效降低整车百公里电耗，显著延长续驶里程。

关键词：能耗优化；电机系统效率；驱动参数优化；开关频率调节；热管理协同

中图分类号：U463.23+2　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20260019

Methods for Improving the Efficiency of Electric Vehicle Motor Systems

Zhong Hua, Liu Zhiqiang

（FAW Qixin New Power (Changchun) Technology Co., Ltd., 130013）

【Abstract】In response to the complex and variable real-world operating conditions of electric vehicles and the technical prololems of traditional motor systems relying on calibration based on single standard operating conditions leading to low efficiency across the entire operating range, this paper proposes an adaptive optimization method integrating real-time operating condition perception, multi-parameter collaborative control, and thermal management linkage. This method collects multi-dimensional operational data such as motor speed, torque, coolant temperature/flow rate, constructs a three-dimensional feature space (speed-torque-thermal state) with dynamic partitioning, and collaboratively optimizes power device driving parameters (gate resistance, driving voltage), Pulse Width Modulation Switch (PWM) switching frequency, and cooling system operation strategy based on partition characteristics. Compared to the traditional fixed redundancy design for the most severe operating conditions, the proposed method achieves precise loss control across the entire operating range through “hardware-software collaboration+thermal-electric coupling” while satisfying system safety and reliability requirements. Bench test verification shows that this method improves the motor system’s CLTC comprehensive cycle efficiency by approximately 0.34~0.67 percentage points, effectively reducing the vehicle’s electricity consumption per 100 km and significantly extending its driving range.

Key words: Energy consumption optimization, Motor system efficiency, Drive parameter optimization, Switching frequency regulation, Thermal management synergy

0　引言

电动汽车续驶里程与百公里电耗是衡量其市场接受度的核心指标，而驱动电机系统作为能量转换的核心部件，其综合运行效率直接影响整车能耗水平。当前行业主要采用全球统一轻型车辆测试循环工况（Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle，WLTC）、中国轻型汽车行驶工况（China Light-duty Vehicle Test Cycle，CLTC）等标准工况进行电机系统标定优化，但实际道路工况受驾驶习惯、交通环境、地形条件等因素影响，呈现出高度动态性与随机性，与标准工况存在显著差异[1]。传统电机控

制系统基于静态效率MAP图，采用查表法优化，仅能适配特定工况，缺乏对实时负荷率、热状态等动态因素的响应能力。

现有电机系统效率提升技术主要为2类：(1)设计阶段采用SiC/GaN宽禁带器件、优化电机铁芯结构等新材料、新工艺，降低本体固有损耗[2-3]；(2)控制阶段通过算法优化提升运行效率[4]，后者多聚焦于软件控制策略改进，未能实现硬件驱动参数与实时工况的动态匹配。传统控制器为保障极端工况可靠性，采用固定高冗余驱动参数与高开关频率设计，在占比超60%的中低负荷工况下会产生大量无效损耗，导致系统平均效率降低。为此，本文突破固定参数标定局限，提出“工况感知-动态分区-多参数协同-热安全约束”的闭环优化策略，通过在线识别实时工况点，同步调节硬件驱动参数与软件控制参数，联动优化冷却系统功耗，实现电机系统全工况谱系下的效率提升，为提升电动汽车续驶里程提供工程化解决方案。

1 电机系统损耗机理分析

1.1 永磁同步电机损耗构成

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor，PMSM)的总损耗主要包括定子绕组铜损、定转子铁损、机械损耗及杂散损耗[5]，可控损耗(铜损+铁损)占比超80%。

其中，铜损由定子绕组电阻发热产生，与电流的平方成正比，受绕组温度、电流幅值影响显著。铁损主要由磁通损耗与涡流损耗组成，主要与电机铁芯的结构参数、磁通密度和电压频率有关。机械损耗与杂散损耗占比低，优化空间有限，因此电机本体效率提升的研究主要围绕降低电机铜损和铁损。

1.2 功率器件损耗机制

电机控制器中IGBT/SiC MOSFET的损耗直接影响系统效率，主要分为3类：导通损耗、开关损耗、反向恢复损耗[6-7]。

其中，导通损耗由器件导通电阻或饱和压降引起，与输出电流大小正相关，随结温升高而增大。开关损耗包括开通损耗(电压与电流交叠区域能量损失)与关断损耗(电流拖尾与电压上升重叠损失)，与开关频率正相关，受驱动能力、寄生参数影响显著[8-9]。反向恢复损耗由体二极管或续流二极管反向恢复电流与电压交叠产生，在硬开关拓扑中尤为突出。

损耗影响因素可归纳为器件参数(导通电阻/饱和压降、栅极电荷、输出电容、反向恢复电荷等)、工作条件(开关频率、负载电流、母线电压、结温等)及电路设计(驱动电路强度、寄生参数等)，为多参数协同优化提供理论依据。

2 自适应优化控制策略

本文提出的自适应优化控制策略核心是构建转速-扭矩-热状态三维特征空间，动态分区后实现驱动参数、开关频率、冷却策略的协同优化，整体框架如图1所示。

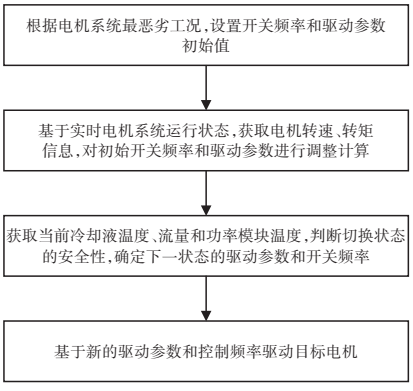


图1 电机系统效率提升方法整体框架

2.1 工况感知与动态分区

2.1.1 感知参数选取

系统通过高精度传感器实时采集以下核心参数：

(1)主控制参数：母线电压U、电机转速n、电机扭矩T。

(2)安全约束参数：功率模块温度T_j、冷却液入口温度T_c、冷却液流量Q_c。

如图1所示，通过“工况初始参数设定→运行状态动态调整→热安全校验→执行驱动”的闭环流程，实现电驱逆变器开关频率与驱动参数的自适应优化，在保障系统安全的前提下提升性能与效率，自适应控制流程如下：

a. 初始参数设定。根据电机系统的最恶劣工况，对逆变器的开关频率和驱动参数进行初始赋值，确保在极限工况下也有安全的基准配置。

b. 基于运行状态的动态调整。基于电机系统的实时运行状态，获取电机转速、电机转矩信息，对初始设定的开关频率和驱动参数进行调整计算，匹配当前工况下的动力输出需求。

c. 热与冷却系统安全校验。获取当前的冷却液温度、冷却液流量、功率模块温度，评估切换参数后的安全性，确认无过热风险后，确定下一状态最终使用的驱动参数和开关频率。

d. 执行驱动控制。基于校验后的新驱动参数和控制频率，驱动目标电机运行，实现性能与安全的动态平衡。

2.1.2　分区规则设计

以转速–扭矩为核心维度划分4类典型工况区域。

（1）区域Ⅰ（低速低扭矩）：城市拥堵、低速巡航等高频率工况。

（2）区域Ⅱ（低速高扭矩）：起步、爬坡等瞬态工况，出现概率较低。

（3）区域Ⅲ（高速低扭矩）：高速巡航工况。

（4）区域Ⅳ（高速高扭矩）：高速超车等瞬态高负荷工况。

冷却液温度与流量作为分区切换的安全约束与辅助优化变量。在切换分区前，系统校验当前T_c和Q_c是否满足目标分区的安全阈值，防止因模式切换引起功率模块结温剧烈波动。

2.2　多参数协同优化规则

基于损耗机理分析，制定差异化优化策略，在保证所有工况（尤其是极端工况）安全可靠的前提下，降低高频工况损耗，具体规则如表1所示。

表1　不同工况分区的多参数优化策略

工况分区	开关频率	驱动参数	冷却策略	优化目标与说明
区域Ⅰ：低速低扭矩	降低	减小	降低流量，允许温度适度升高	降低开关损耗与驱动损耗；降低水泵功耗，利用系统热容，提升综合能效
区域Ⅱ：低速高扭矩	降低	增大	提高流量，降低温度	保证大电流下开关可靠性，强化散热
区域Ⅲ：高速低扭矩	提高	减小	降低流量，允许温度适度升高	保证高速下控制精度与电流波形质量，同时优化驱动与冷却损耗
区域Ⅳ：高速高扭矩	提高	增大	提高流量，降低温度	满足高频控制与高功率输出下的可靠性与散热需求

2.3　安全约束与切换逻辑

2.3.1　分层安全校验机制

（1）驱动参数调节逻辑：以最恶劣工况下的最大参数为初始值。调节前，依次校验功率模块结温、冷却液状态（温度与流量），最后结合电机扭矩判断，在满足安全阈值的前提下调小驱动参数，以加快开关速度、降低开关损耗。

（2）开关频率调节逻辑：以最高频率为初始值。调节前，首先判断是否为堵转特殊工况，随后依据电机转速和扭矩进行阈值判断，在保证高速区域控制需求的前提下，于中低速低负荷区域降低频率以削减开关损耗。

（3）冷却系统优先机制：若监测到冷却液温度异常偏高或流量异常偏低，系统将优先调整冷却系统至目标状态，待热状态稳定后再执行电控参数的切换，避免在不良散热条件下进行参数优化。

2.3.2　并行独立调节设计

驱动参数与开关频率的调节通道在硬件上相互独立，软件上可并行处理（图2），实现对系统损耗更快速、更精细的协同优化。

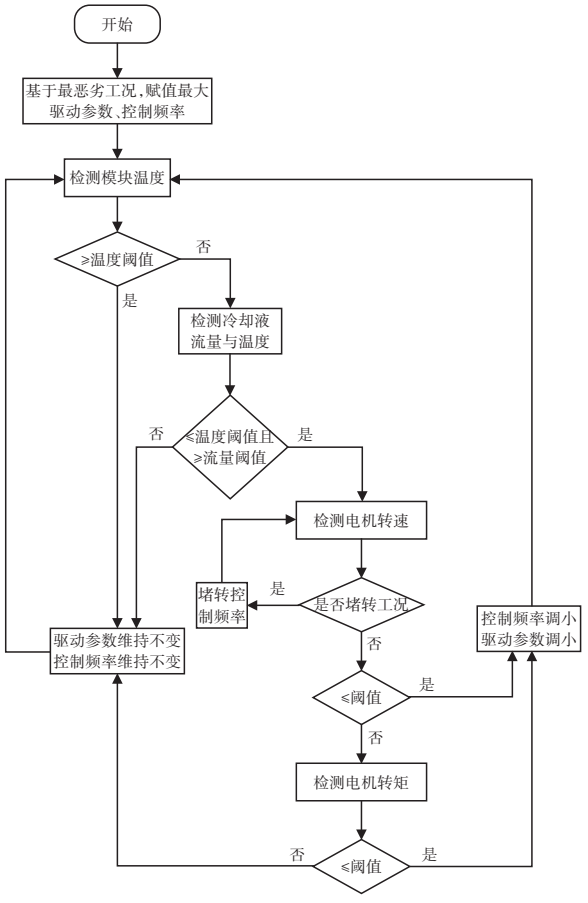


图2　驱动参数与开关频率并行调节示意

3　试验分析与讨论

3.1　试验平台与测试工况

试验对象为某量产纯电动轿车车型1和车型2，搭载同一款永磁同步电机系统。测试工况为CLTC中国标准工况。测试设备包括电机台架、功率分析仪、冷却液循环测试系统等。

3.2　工况分布特性分析

车辆搭载永磁同步电机系统在CLTC工况下运

行时，尽管车辆行驶的车速时序曲线保持一致，但电机系统实际运行的转速-转矩工况分布并非固定不变。一方面，不同车型所匹配的减速器速比存在差异，会改变电机转速与车轮转速的对应关系及转矩传递比例；另一方面，整车整备质量、风阻系数、轮胎滚动阻力系数等参数，从源头决定了车辆行驶所需的驱动转矩大小。此外，轮胎滚动半径、传动系统效率、制动能量回收策略、整车控制逻辑、附件功耗、电池功率特性及环境条件等因素，也会共同影响电机系统的实际负载与工作区间。因此，同一款电机系统适配不同车型时，即使均基于CLTC循环，其对应的转速-转矩工况点及权重分布也存在明显差异。

试验中依据各车型实际工况数据（图3、图4）进行权重统计与工况合成，分别提取驱动工况与发电工况各10个核心工况，并以气泡图直观呈现，气泡大小代表对应工况的权重占比，分别对应某量产纯电动轿车车型1和车型2的工况占比情况，如图5和图6所示。

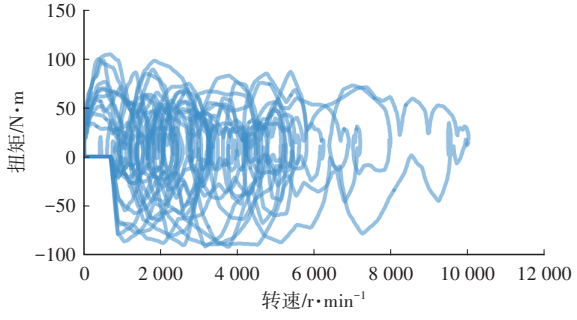


图3　搭载车型1的电机系统运行工况分布情况

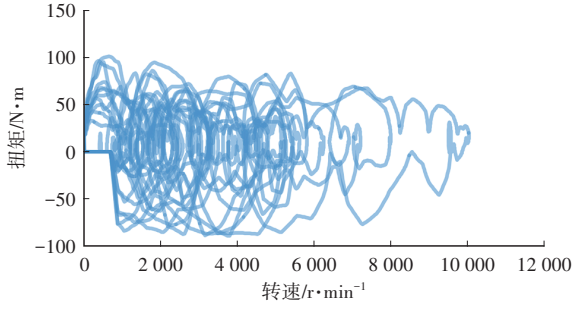


图4　搭载车型2的电机系统运行工况分布情况

从分布规律来看，不同车型的电机系统工况虽存在差异，但低速、低扭矩区域（区域Ⅰ）的权重占比普遍较高。由此可见，重点提升电机在低速、低转矩区域的运行效率，对降低整车CLTC平均电耗、提升续驶里程具有重要意义。

3.3　效率提升效果验证

通过应用本自适应优化方法，在台架测试中对比了固定参数策略与自适应策略下的系统损耗。结果表明，系统CLTC综合效率平均提升0.34~0.67百分点（表2）。这主要得益于在区域Ⅰ和区域Ⅲ中，开关频率与驱动参数的降低有效减少了开关损耗，同时水泵功耗的下降带来了额外的节能收益。在瞬态的高扭矩工况（区域Ⅱ、Ⅳ），系统能自动切换至保守参数集，确保其可靠性。

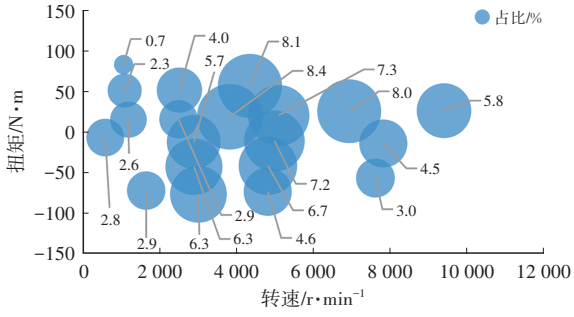


图5　搭载车型1的电机系统运行工况占比情况

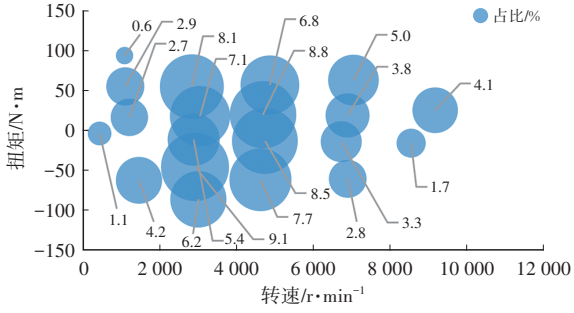


图6　搭载车型2的电机系统运行工况占比情况

表2　不同车型效率提升对比

CLTC循环测试工况	传统固定参数效率/%	优化策略效率/%	效率提升/百分点
车型1	87.20	87.54	0.34
车型2	88.70	89.37	0.67

某电机总成应用至车型1的CLTC系统综合效率提升情况如图7所示。结果表明，CLTC系统综合效率平均提升约0.34百分点。

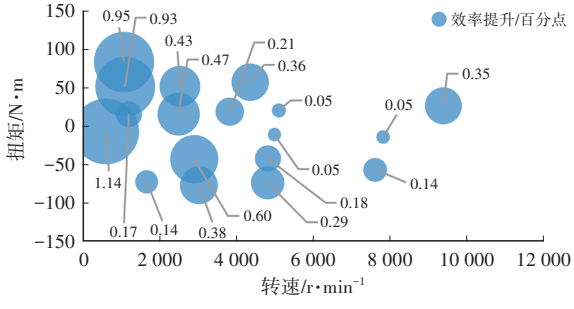


图7　车型1效率提升情况

某电机总成应用至车型2的CLTC系统综合效率提升情况如图8所示。结果表明，CLTC系统综合效率平均提升约0.67百分点。

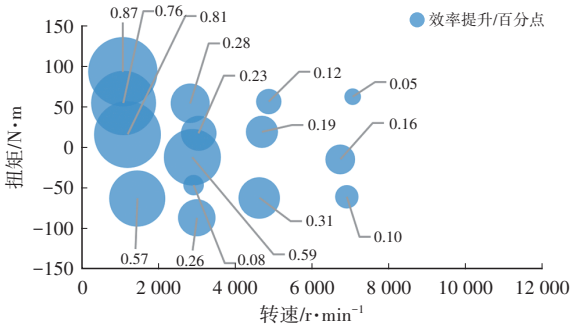


图8　车型2效率提升情况

4　结论与展望

本文提出一种面向电动汽车电机系统的自适应效率优化方法。该方法通过构建转速-转矩-热状态三维特征空间，并制定分区差异化优化策略，实现对开关损耗、驱动损耗及辅助系统功耗的协同抑制。系统可根据实时工况与热状态信息自适应调节，无需依赖预设的固定驾驶循环；同时突破传统纯软件算法优化的局限，实现功率器件硬件驱动级的“软硬协同”精细化调控。试验结果表明，本方法在电机高频运行的中低负荷工况下效率提升效果显著，可有效降低整车电耗并提高续驶里程。

未来，将进一步研究如何构建更精细的工况分区模型（如引入加速度、母线电压等参数），进一步提升极端动态行驶工况下的自适应调控精度，拓展该策略在GaN等新一代功率器件控制器中的应用，进一步挖掘电机系统效率提升潜力。

参　考　文　献

[1] 伍庆龙, 杨明, 王燕. 电动汽车驱动电机工作特性及效率测试研究[J]. 汽车文摘, 2020(7): 48-51.

[2] 寇宝泉, 赵晓坤, 张浩泉, 等. 永磁同步电机电磁结构及磁场调节技术的综述分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7126-7141.

[3] 郑洁, 王学梅, 张波, 等. SiC MOSFETs与Si IGBTs的性能对比研究[J]. 电力技术学报, 2015, 49(12): 23-25.

[4] 黄秀成, 祖国强, 王敷玟. 基于空间矢量脉冲宽度调制优化算法的集成电驱效率提升[J]. 汽车实用技术, 2022(12): 97-103.

[5] 张承慧, 崔纳新, 李珂, 等. 电动汽车感应电机驱动系统效率优化控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(5): 773-778.

[6] 梁光菊. IGBT谐振开关状态下的损耗研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[7] 王振民, 董飞, 薛家祥, 等. IGBT模块开关过程损耗仿真研究[J]. 焊接技术, 2006, 35(6): 40-42.

[8] 曹新阳, 邱立. IGBT开关损耗及其特性研究[J]. 通信电源技术, 2018, 35(3): 34-37.

[9] 张琪, 唐忠. SVPWM逆变器的开关频率和调制电压幅值对输出电压谐波的影响[J]. 华东电力, 2014, 42(8): 1589-1594.

（责任编辑　**明慧**）