

基于 CLTC 工况的车用永磁同步电机 MTPA 控制

朱铭志, 王玉彬*

[中国石油大学(华东) 石大山能新能源学院, 山东 青岛 266580]

MTPA Control of Permanent Magnet Synchronous Motor for Vehicles Based on CLTC Driving Cycle

ZHU Mingzhi, WANG Yubin*

[College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China]

Abstract: [Objective] To enhance the operational efficiency and dynamic performance of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) employed in electric vehicle drive systems under complex operating conditions, this paper presents an improved search-based maximum torque per ampere (IS-MTPA) control strategy under the China light-duty vehicle test cycle (CLTC) driving cycle. The proposed strategy is developed to address the critical drawbacks of conventional MTPA control schemes, including heavy parameter dependence, degraded steady-state efficiency caused by parameter deviations, and unsatisfactory dynamic response inherent in conventional search-based methods. [Methods] Firstly, based on the CLTC driving cycle, the K-Means clustering algorithm was employed to cluster 913 operating points under driving mode, so as to extract six representative operating points. Subsequently, the lumped parameters of the MTPA solution corresponding to the representative operating points were taken as the initial search values, and the lumped parameters were adjusted online to compensate for motor parameter variations, thus achieving fast and efficient optimization. Finally, the proposed IS-MTPA-CLTC control strategy was verified through both simulations and experiments. [Results] Both simulation and experimental results demonstrated that, compared with the conventional MTPA control strategy, the proposed IS-MTPA-CLTC control strategy could achieve superior current

allocation under typical vehicle operating conditions, with an average reduction of 28.6% in copper loss, thus effectively reducing motor energy loss. In comparison with the lumped parameter search-based MTPA control strategy, the proposed IS-MTPA-CLTC control strategy could significantly accelerate the self-optimization process of the search method under sudden load change conditions. The convergence time of d -axis and q -axis currents was shortened by 70%, which effectively improved the dynamic tracking performance and enhanced the dynamic response performance of the system. [Conclusion] The proposed IS-MTPA-CLTC control strategy can balance the requirements of high steady-state efficiency and rapid dynamic optimization, which is well-suited for IPMSM drive control in the actual operating scenarios of electric vehicles. Moreover, it demonstrates considerable potential for practical engineering applications.

Key words: electric vehicle; interior permanent magnet synchronous motor; maximum torque per ampere; China light-duty vehicle test cycle; K-Means clustering algorithm; lumped parameter search

摘要: [目的]为提升电动汽车驱动系统中内置式永磁同步电机(IPMSM)在复杂工况下的运行效率与动态性能,针对传统最大转矩电流比(MTPA)控制策略参数依赖性强、稳态效率易受参数偏差影响及搜索法动态响应不足的问题,本文提出了一种中国轻型车测试循环(CLTC)工况下基于改进搜索法的最大转矩电流比(IS-MTPA)控制策略。【方法】首先,基于CLTC工况,采用K-Means聚类算法对驱动模式下的913个工况点进行聚类,从而提取6个典型工况点。其次,将典型工况点对应的MTPA集总参数作为搜索初值,并在线调整集总参数以补偿电机参数变化,实现快速、高效寻优。最后,通过仿真和试验对所

基金项目:国家自然科学基金(52477070);山东省自然科学基金(ZR2025MS782)

National Natural Science Foundation of China (52477070);
Natural Science Foundation of Shandong Province, China
(ZR2025MS782)

提 IS-MTPA-CLTC 控制策略进行验证。【结果】仿真与试验结果表明,相较于传统 MTPA 控制策略,所提 IS-MTPA-CLTC 控制策略在典型车用工况下可取得更优的电流分配,铜耗平均降低 28.6%,有效减少了电机能量损失;相较于集总参数搜索法 MTPA 控制策略,所提 IS-MTPA-CLTC 控制策略在负载突变工况下可显著加快搜索法自寻优过程, d 、 q 轴电流收敛时间缩短 70%,有效改善了动态跟踪性能,增强了系统的动态响应性能。【结论】所提 IS-MTPA-CLTC 控制策略能够兼顾稳态高效与动态快速寻优需求,适用于电动汽车真实运行场景下的 IPMSM 驱动控制,具有良好的工程应用潜力。

关键词: 电动汽车;内置式永磁同步电机;最大转矩电流比;中国轻型车测试循环;K-Means 聚类算法;集总参数搜索

0 引言

随着新能源汽车行业的发展,纯电动汽车的市场保有量迅速增长。然而,由续航里程限制引起的里程焦虑仍阻碍着其进一步普及^[1]。因此,为了最大限度地延长电动汽车的行驶里程,其核心耗能设备—电机驱动系统,应具有更高的效率。相比传统测试标准—新欧洲行驶循环(New European Driving Cycle, NEDC),中国轻型车测试循环(China Light-duty vehicle Test Cycle, CLTC)工况更能反映我国道路交通状况和驾驶特征^[2],因此基于 CLTC 工况优化电机控制策略具有重要工程意义^[3-4]。

内置式永磁同步电机(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)因功率密度高、动态响应特性好和效率高等优点被广泛应用于电动汽车驱动系统^[5-8]。为了充分利用 IPMSM 的磁阻转矩,一般采用最大转矩电流比(Maximum Torque Per Ampere, MTPA)控制,在相同转矩需求下,尽可能减少定子电流,从而降低铜耗,提高整体效率^[9-10]。

国内外学者针对 MTPA 控制算法展开了系统性研究工作,总结出四种主要策略:查表法、解析公式法、信号注入法以及搜索法。查表法凭借预先存储好的映射关系来获得最优电流参考值,此方法具有很强的工程应用价值,但对内存资源的需求较大且普适性较差^[11-12]。解析公式法依据电机数学模型推导目标电流指令,其动态响应性

能较优,但该方法的有效性受电机参数标定精度的影响显著^[13-15]。信号注入法通过对被控系统施加高频扰动激励,并从转矩反馈信号中提取关键信息,用以修正矢量控制角度,从而实现系统理想运行状态,该方法不依赖于电机参数,但计算复杂度较高,且对计算与存储资源的需求较大^[16-19]。搜索法通过自寻优机制追踪 MTPA 工作点,实现方式较为简单,且对电机参数变化具有良好的鲁棒性与普适性^[20-21]。此外,尽管搜索法的收敛速度相对较慢,但在系统鲁棒性与适应性的提升方面,仍然展现出重要的研究价值和应用前景。针对上述不足,文献[22]根据电流梯度动态调整电流角搜索步长,提出了变步长搜索法,以加快系统收敛速度。文献[23-24]采用离线拟合方式建立电流矢量角与定子电流幅值之间的关系表达式,在此基础上进行搜索,提升了算法搜索效率,但增加了计算负担。文献[25]在解析公式法的基础上,对电机集总参数实施变步长搜索策略,提高了电机在变负载工况下的动态性能,但其集总参数初始值单一,高负载转矩下的搜索速度较慢,不适用于车用永磁同步电机这种负载频繁变化的场景。

针对上述问题,本文提出了一种基于 CLTC 工况的改进搜索(Improved Search, IS)法最大转矩电流比(IS-MTPA-CLTC)控制策略。首先,基于 CLTC 工况,采用 K-Means 聚类算法对驱动模式下的 913 个工况点进行聚类,提取 6 个具有代表性的典型工况点,以反映电动汽车的主要运行特征,同时降低算法计算复杂度与存储需求。其次,在集总参数搜索法基础上,将典型工况点对应的 MTPA 集总参数 Δ 作为搜索初值,并在线修正 Δ ,以补偿电机电感与磁链变化引起的控制偏差,提升 MTPA 搜索过程的收敛速度与控制鲁棒性。最后,通过仿真和试验对所提策略进行验证。结果表明,所提策略能够有效降低定子电流、提升运行效率,并在负载突变工况下展现出更高的动态响应性能,验证了该方法在车用永磁同步电机复杂工况下的工程应用潜力。

1 MTPA 控制策略

1.1 IPMSM 数学模型

IPMSM 是一个强耦合、多变量且非线性的动态系统。为简化分析,通常忽略磁滞损耗与涡流

损耗,建立理想化电机模型。在稳态运行条件下,IPMSM 电压方程与电磁转矩方程分别为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 和 L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电压、电流和电感; R_s 为定子电阻; ψ_f 为永磁体磁链; p 为极对数; ω_e 为电角速度; T_e 为电磁转矩。

1.2 MTPA 控制策略

MTPA 控制是矢量控制中最常用的方法,即在铜耗最小的条件下达到最大转矩。MTPA 数学关系可以描述为

$$\begin{cases} \min R_s (i_d^2 + i_q^2) \\ \text{s. t. } T_e = 1.5p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H(i_d, i_q, \lambda) &= i_d^2 + i_q^2 + \\ \lambda \{ T_e - 1.5p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $H()$ 为所构造的拉格朗日函数; λ 为拉格朗日算子。

对式(4)求偏导可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial i_d} = 2i_d - \lambda \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_q = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial i_q} = 2i_q - \lambda \frac{3}{2} p [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial \lambda} = T_e - \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = 0 \end{cases} \quad (5)$$

化简整理式(5)后,得到 i_d 为

$$i_d = \frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 4(L_d - L_q)^2 i_q^2}}{2(L_d - L_q)} \quad (6)$$

由于 $i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$, 式(6)亦可转换为式(7)和式(8)两种形式:

$$i_d = \frac{\psi_f}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\psi_f^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^2} \quad (7)$$

$$i_d = \frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_d - L_q)^2 i_s^2}}{4(L_d - L_q)} \quad (8)$$

传统 MTPA 控制系统结构如图 1 所示。图中, n^* 为转速给定值; i_d^* 、 i_q^* 分别为 d 、 q 轴电流给定值; T_e^* 为电磁转矩给定值。当前普遍采用的查表法和曲线拟合法均依赖于固定电感参数来确定

MTPA 的目标电流,但实际运行中电机参数具有动态时变特性,尤其在工况频繁变化时,查表法和曲线拟合法难以保证理想的控制精度。若要绘制完整的 MTPA 曲线,则会带来极大的计算与存储需求。

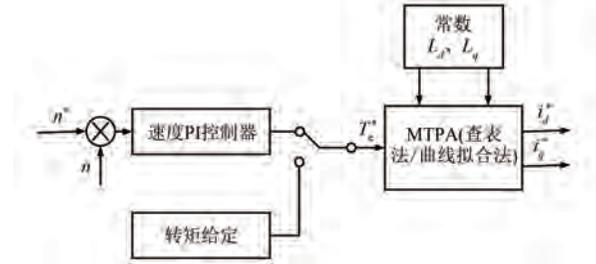


图 1 传统 MTPA 控制算法框图

Fig. 1 Block diagram of the conventional MTPA control algorithm

2 集总参数搜索法控制策略

2.1 梯度下降搜索法 MTPA 控制策略

梯度下降搜索法对于电机模型参数的精度要求相对较低。针对 IPMSM MTPA 控制,搜索的变量可以设置为 i_d 或电流超前角 γ 。由于不涉及复杂的数学建模,因此搜索法具有很强的参数鲁棒性,且算法简单,便于微处理器的编程实现。

T_e 保持不变时, i_s 与 i_d 具有一定的关联性,如图 2 所示。

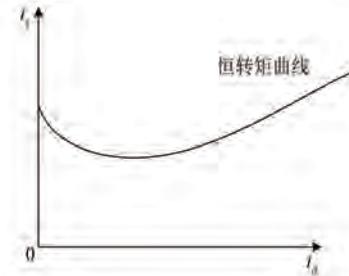


图 2 i_s 随 i_d 变化趋势

Fig. 2 Variation trend of i_s with i_d

由图 2 可知,在恒定负载转矩的条件下,存在唯一的 i_d ,使得 IPMSM 运行在 MTPA 工作点。在当前电流分配位置,满足式(9):

$$\frac{\partial |i_s|}{\partial i_d} = 0 \quad (9)$$

基于 i_d 搜索的 MTPA 控制原理如图 3 所示。以 MTPA 工作点 i_{MTPA} 为分界线,电机运行状态处于分界线左边区域时,定子电流变化率梯度 ∇i_s 为负值;电机运行状态处于分界线右边区域时,

∇i_s 为正值;电机工作在 i_{dMTPA} 时, $\nabla i_s = 0$ 。

当 i_d 指令偏离 MPTC 状态理想值时, i_s 显然大于最优状态下的最小电流值。梯度下降搜索法通过向 i_d 指令施加阶跃扰动, 实现对电流指令的扫描。在扫描过程中, 实时比较相邻两次采样的 i_s , 并将 i_s 最小值对应的 i_d 指令作为当前负载工况下的最优指令值。

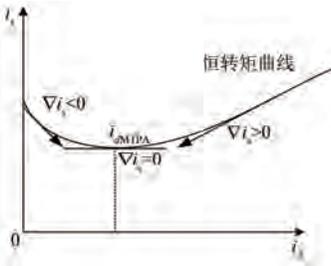


图 3 基于 i_d 搜索的 MTPA 控制原理图

Fig. 3 Principle diagram of the i_d search-based MTPA control

梯度下降搜索法的主要缺点在于其动态性能较弱, 由于脱离了精确电机模型的约束, 系统在转矩突变时难以快速响应。具体表现为 i_d 仅能依据上一时刻的初始值逐步调整, 导致转矩变化越剧烈, 电流跟踪的暂态响应性能下降越显著。

2.2 集总参数搜索法 MTPA 控制策略

本文采用了一种集总参数搜索法最大转矩电流比 (Lumped Parameter search Method-based MTPA, LPM-MTPA) 控制。引入集总参数 Λ 修正 MTPA 控制中的 i_d 参考指令, 通过对 Λ 的搜索优化来抵消电机参数变化对电流控制精度的影响。由于该方法结合了解析公式, 其 i_d 参考指令的更新速度相比传统梯度下降搜索法更快, 从而改善了系统的动态响应性能。

为了综合表征 L_d 、 L_q 及 ψ_f 的变化, 引入集总参数 Λ 对电机参数变化带来的控制偏差进行修正, 式(7)等价于式(10):

$$i_d = \frac{\Lambda}{100} \times \frac{\psi_f}{(L_q - L_d)} - \sqrt{\left(\frac{\Lambda}{100} \times \frac{\psi_f}{(L_q - L_d)} \right)^2 + i_q^2} \quad (10)$$

当 $\Lambda = 50$ 时, i_d 对应于理论上的最优电流工作点。然而在实际运行中, 由于电机参数标定误差及其非线性时变特性的影响, Λ 势必会偏离该标称值, 如式(11)所示:

$$\frac{\Lambda}{100} \times \frac{\psi_f}{(L_q - L_d)} = \frac{\hat{\Lambda}}{100} \times \frac{\hat{\psi}_f}{(\hat{L}_q - \hat{L}_d)} \quad (11)$$

式中: ψ_f 、 L_d 和 L_q 为电机参数的标称值或者测量值; $\hat{\psi}_f$ 、 \hat{L}_d 和 \hat{L}_q 为电机参数的实际值, 此时 $\hat{\Lambda} = 50$ 。

在不同的工况下, ψ_f 、 L_d 和 L_q 偏离实际的 $\hat{\psi}_f$ 、 \hat{L}_d 和 \hat{L}_q , 因此需要不断地对 Λ 进行调节, 最终调节到 Λ_{MTPA} , 才能使式(11)恒成立。该方法通过单一参数 Λ 巧妙地统一表征了三个关键电机参数变化所引起的电流控制偏差, 仅通过调节 Λ 即可实现偏差补偿, 无需对 ψ_f 、 L_d 和 L_q 进行单独辨识或插值查表, 简化了系统结构与计算负担。

集总参数在线搜索的算法流程如图 4 所示, 基于集总参数搜索的 MTPA 控制算法原理图如图 5 所示。图中, u_d^* 、 u_q^* 分别为 d 、 q 轴电压给定值。通过搜索算法对集总参数 Λ 进行实时调节, 从而使电流分配逐渐收敛至实际的 MTPA 工作点。

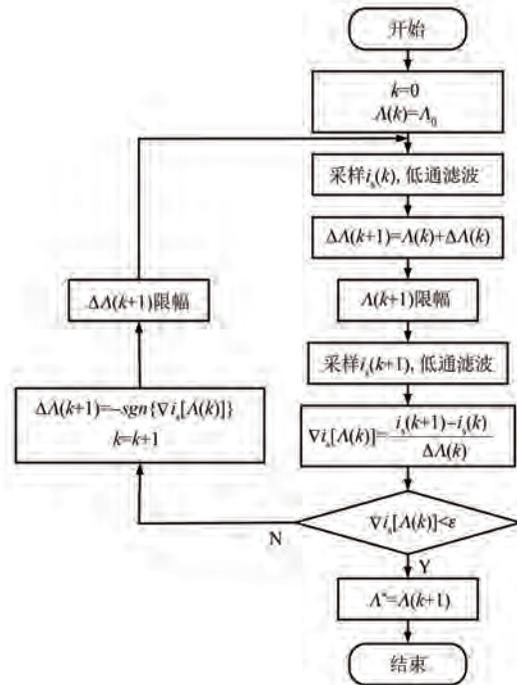


图 4 集总参数在线搜索的算法流程

Fig. 4 Algorithm flowchart of online search for the lumped parameter

3 基于 CLTC 工况的车用 IPMSM MTPA 控制

3.1 CLTC 工况点计算

CLTC 工况于 2019 年发布, 先后由 70 多个

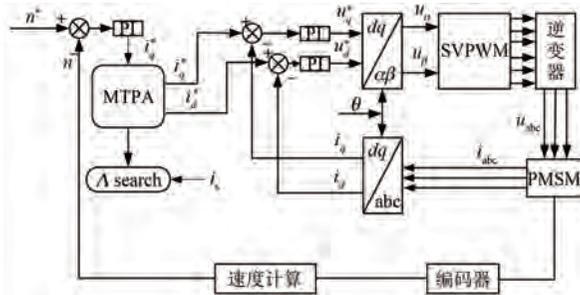


图5 基于集总参数搜索的MTPA控制原理图

Fig. 5 Schematic diagram of MTPA control based on lumped parameter search

课题团队、1 000 余名科研人员参与其中,在 41 个代表性城市建立了 5 500 辆车的数据采集车队,收集了 4 400 万公里的运动特征、动力特征和环境特征数据,能够较为准确地反映我国道路交通状况及用户驾驶习惯^[26]。因此基于 CLTC 工况对电动汽车电机控制策略进行优化具有实际意义。

中国轻型汽车行驶(乘用车)(China Light-duty vehicle Test Cycle for Passenger cars, CLTC-P)工况曲线如图 6 所示。

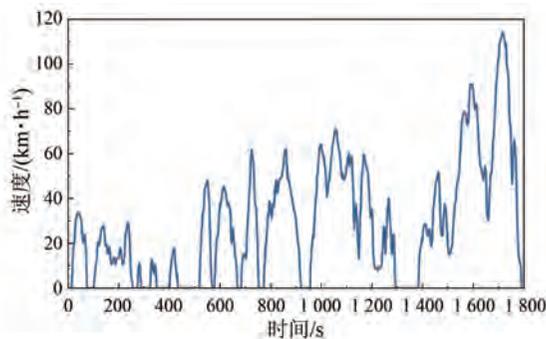


图6 CLTC-P 工况曲线

Fig. 6 CLTC-P driving cycle curve

本文选用的电动汽车采用分布式驱动,参数如表 1 所示。相较集中式驱动,分布式驱动具有转矩分配灵活、传动链路短以及机械损耗低等优势。

根据文献[27],作用在电动汽车轮胎上的牵引力 F 的表达式为

$$F = ma + \frac{1}{2}\rho C_d A_f v_{\text{drive cycle}}^2 + C_r mg \cos \alpha + mg \sin \alpha \quad (12)$$

式中: m 为整车质量; ρ 为空气密度; C_d 为空气阻力系数; A_f 为迎风面积; C_r 为滚动阻力系数; a 为

电动汽车加速度; $v_{\text{drive cycle}}$ 为循环工况车速; α 为道路坡度。

表 1 电动汽车参数

Tab. 1 Parameters of the electric vehicle

参数名称	参数值
空气密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.2
空气阻力系数 C_d	0.28
迎风面积 A_f/m^2	2
滚动阻力系数 C_r	0.009
车轮半径 $r_{\text{wheel}}/\text{m}$	0.28
整车质量 m/kg	1 000
传动比 R_{GB}	1

将 F 和 $v_{\text{drive cycle}}$ 转换为电机的转矩 T_{motor} 和转速 n_{motor} ,如式(13)和式(14)所示:

$$T_{\text{motor}} = \frac{F \cdot r_{\text{wheel}}}{R_{\text{GB}}} \quad (13)$$

$$n_{\text{motor}} = v_{\text{drive cycle}} R_{\text{GB}} \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{wheel}}} \quad (14)$$

式中: r_{wheel} 为车轮半径; R_{GB} 为传动比。

基于 CLTC-P 工况及整车参数,通过式(12)~式(14)将电动汽车行驶状态映射至电机运行状态。图 7 展示了基于 CLTC-P 工况的电机运行工况点分布。数据采样间隔为 1 s,共获取 1 800 个工况点,完整反映了车辆行驶状态与电机工况之间的实时对应关系。

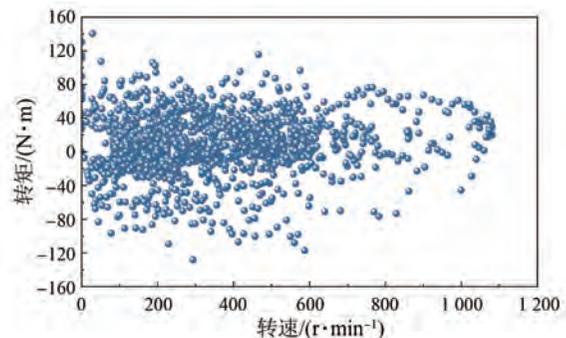


图7 基于 CLTC-P 工况的电机运行工况点

Fig. 7 Motor operating points based on the CLTC-P driving cycle

传统燃油车在怠速、减速与滑行等工况下,发动机仍持续运转并消耗燃料。而电动汽车的运行模式可根据电驱动系统工作状态分为驱动模式、制动模式及静止模式三类。驱动模式下,电机输出正转矩驱动车辆,转速与转矩均为正;制动模式

下,电机进行能量回收,转速为正,转矩为负;静止模式下,电机无转矩输出,系统处于零转速、零转矩状态。

鉴于本文聚焦于改进永磁同步电机的控制策略,且在制动与静止模式下电机不处于主动驱动状态,不涉及实际能量输出过程,因此在后续控制优化过程中将不予考虑这两类工况。驱动模式下 913 个工况点的分布情况如图 8 所示。

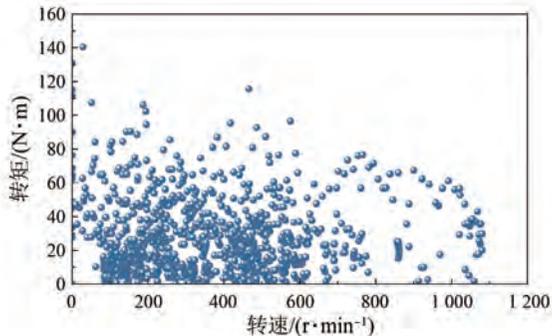


图 8 驱动模式下的电机运行工况点
Fig. 8 Motor operating points under driving mode

3.2 工况点聚类分析

为提高效率,本文参考文献[28]选择 K-Means 聚类算法对电机运行工况点进行聚类分析。K-Means 聚类算法计算效率高、实现简单,适合处理大规模工况数据;同时,CLTC 工况点在转速-转矩空间中分布较为集中,满足 K-Means 的聚类假设,能够获得稳定且具有代表性的聚类结果。

K-Means 是一种基于划分的聚类算法,通过迭代将样本划分为预设的 k 个簇。首先选取 k 个初始聚类中心,计算样本到各中心的欧氏距离并完成簇分配,然后以各簇样本均值更新聚类中心。不断迭代上述过程,直至聚类中心收敛。空间中数据对象与聚类中心间的欧氏距离 d 为

$$d(x, C_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_j - C_{ij})^2} \quad (15)$$

式中: x 为数据对象; C_i 为第 i 个聚类中心; m 为数据对象的维度; x_j 、 C_{ij} 分别为 x 和 C_i 的第 j 个属性值。

将 CLTC 工况下 913 个驱动模式工况点作为聚类原始数据。聚类数目 k 的选取是影响聚类效

果的关键因素。为评价聚类质量,采用整体数据集的误差平方和 (Sum of Squared Error, SSE) 作为评价指标,其定义为

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} |d(x, C_i)|^2 \quad (16)$$

图 9 展示了 SSE 与 k 值的关系。一般情况下, k 值越大, SSE 越小,聚类结果越精细,但模型复杂度也随之增加。通常可选用肘点对应的 k 值作为聚类数目。从图 9 中可以看出,理想 k 值为 6。

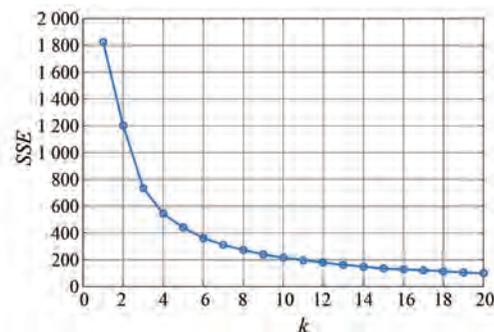


图 9 驱动模式下 SSE 与 k 值的关系
Fig. 9 Relationship between SSE and k value under driving mode

按照确定的 k 值对 913 个驱动模式工况点进行 K-Means 聚类计算,算法流程如图 10 所示。

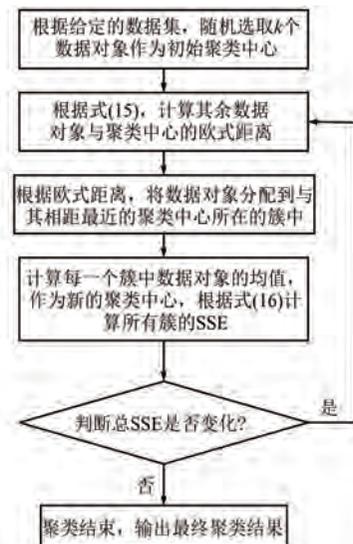


图 10 K-Means 算法流程

Fig. 10 Flowchart of the K-Means algorithm

基于 K-Means 算法得到电机在 CLTC-P 工况下处于驱动模式的 6 个典型工况点,如表 2 和图 11 所示。

表 2 驱动模式下的典型工况点

Tab.2 Typical operating points under driving mode

簇	典型工况点(转速, 转矩)/ [(r·min ⁻¹), (N·m)]	权重/s
1	(610, 59)	72
2	(180, 12)	254
3	(225, 41)	171
4	(896, 26)	73
5	(488, 18)	279
6	(175, 78)	64

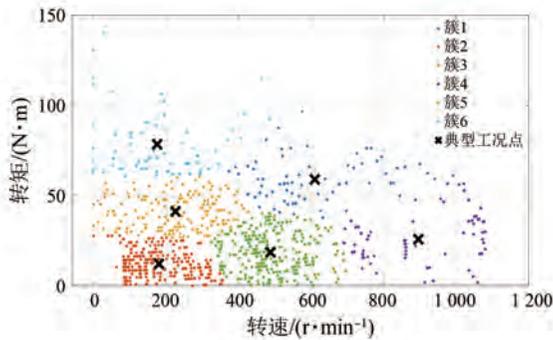


图 11 工况点聚类结果

Fig.11 Clustering results of operating points

3.3 基于典型工况点初值设定的搜索法 MTPA 优化

当电机运行至某一具体工况点时,首先根据转速与转矩判断其所属的聚类簇。由于聚类结果能够反映电机在 CLTC 工况下的运行特征,每个簇的典型工况点可视为该类工况的代表,因此本文将该典型工况点的 Λ_{MTPA} 值作为集总参数搜索法的初始值,基于 CLTC 工况的 MTPA 控制原理如图 12 所示。

与集总参数搜索法相比,该方法显著缩短了初始参数与实际 MTPA 工作点之间的距离,搜索过程中所需的迭代次数大幅减少,收敛速度明显加快,能够有效改善复杂工况下的动态寻优性能。

4 仿真分析和试验验证

4.1 仿真分析

4.1.1 仿真条件设置

基于 IPMSM 的数学模型,建立其在三相自然坐标系下的电压方程、转矩方程、磁链方程及运动方程。针对 IPMSM 运行过程中因铁磁材料饱和效应导致的电感参数随负载变化而波动的问题,

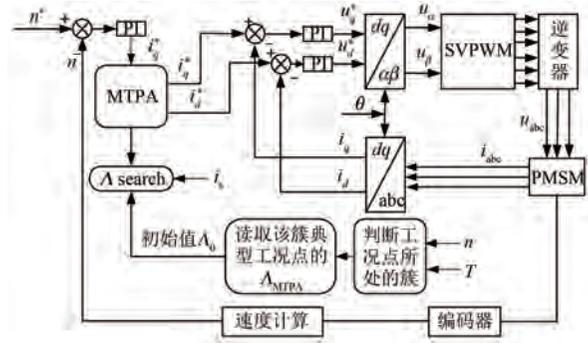


图 12 基于 CLTC 工况的 MTPA 控制原理图

Fig.12 Schematic diagram of MPPT control

based on CLTC driving cycle

利用有限元软件计算不同负载电流下的电感参数,并在 Simulink 中结合查表模块构建了基于有限元计算数据的 IPMSM 本体模型。在此基础上,分别搭建了 LPM-MTPA、IS-MTPA-CLTC 及传统 MTPA 控制策略的 Simulink 仿真模型,并进行对比分析。IPMSM 的关键参数如表 3 所示。

表 3 IPMSM 主要参数

Tab.3 Main parameters of IPMSM

参数名称	参数值
极对数 p	5
定子电阻 R_s/Ω	1
定子 d 轴电感 L_d/mH	30
定子 q 轴电感 L_q/mH	20
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.38
额定转矩 $T/(\text{N}\cdot\text{m})$	80
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.020 2

4.1.2 仿真分析

为验证所提 IS-MTPA-CLTC 控制策略在实际车辆循环工况下的适用性,本文基于 CLTC 工况聚类结果,选取除极端工况外的 5 个典型工况点,分别代表电动汽车的起步、巡航以及加速超车等不同运行状态。仿真设定电机转速为 500 r/min。按照 CLTC 工况下的典型负载变化规律设计负载突变过程:0~1 s,电机处于空载静止状态;1 s 时突加 41 N·m 负载,对应低速起步工况;2 s 时突减 29 N·m 负载至 12 N·m,对应低速巡航工况;3 s 时突加 6 N·m 负载至 18 N·m,对应中速巡航工况;4 s 时再突加 41 N·m 负载至 59 N·m,对应加速超车工况;5 s 时突减 33 N·m 负载至 26 N·m,对应高速巡航工况。

在 MTPA 控制中,最优电流分配仅由目标电磁转矩决定,而与电机转速无关。其优化目标是使给定转矩下的定子电流幅值最小,因此 MTPA 控制本质上是一个以转矩为约束条件的电磁优化问题。电机转速的变化仅是电磁转矩与负载转矩平衡的结果,不影响 MTPA 最优点的确定。因此,在 MTPA 控制中通常只改变负载而保持目标转速恒定。在本次仿真中,为便于对比不同控制策略的动态性能与稳态效率,电机转速保持恒定,仅通过改变负载转矩模拟车辆在不同驱动需求下的运行状态。

MTPA、LPM-MTPA 和 IS-MTPA-CLTC 三种控制策略下的 i_d 、 i_q 及 i_s 波形如图 13 所示。

由图 13 可知,不同工况条件下三种控制策略的运行性能存在显著差异。在低速起步、加速超车等高负载工况下,IS-MTPA-CLTC 控制策略展现出更优的转矩输出能力。在相同负载转矩条件下,该策略所需的 i_s 显著低于传统 MTPA 控制策略,说明其能够在相同电流极限条件下提供更大的电磁转矩输出,从而满足车辆在高负载运行场景下的动力需求。

在巡航工况下,IS-MTPA-CLTC 控制策略能始终维持电机运行于最优 i_d 、 i_q 分配状态,使 i_s 显著低于传统 MTPA 控制策略。由于输出相同转矩所需电流更小,铜耗显著降低,从而提升了系统的能效水平,更加适合车辆在长时间巡航时的节能需求。

在工况突变过程中,由于采用了基于典型工况点的集总参数初始值更新与快速搜索算法,IS-MTPA-CLTC 控制策略能够在工况变化后迅速调整 i_d 、 i_q 分配,实现 MTPA 点的快速重新定位。与 LPM-MTPA 控制策略相比,IS-MTPA-CLTC 控制策略的收敛速度更快,体现出其优良的动态性能。

综上所述,IS-MTPA-CLTC 控制策略在高负载下具有更大的电磁转矩极限以及更强的转矩响应能力;在中低负载下具有更高的运行效率;在工况突变时表现出更快的动态响应性能。仿真结果验证了 IS-MTPA-CLTC 控制策略在车用永磁同步电机驱动系统中的综合优势。

4.2 试验验证

搭建以 dSPACE1104 实时仿真平台为控制核心的试验平台对所提控制策略进行试验验证,如图 14 所示。试验平台主要包括:

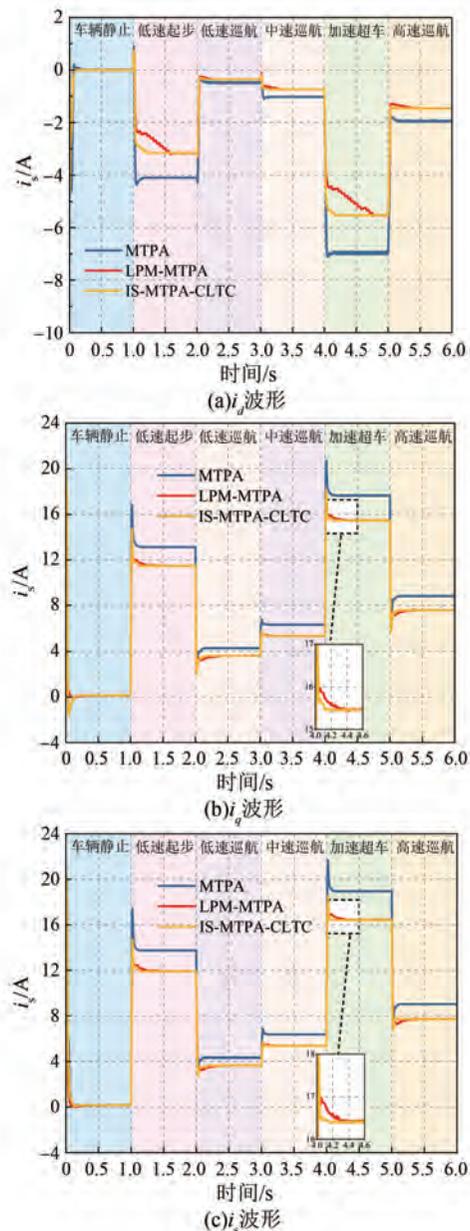


图 13 典型工况切换下的电流仿真波形

Fig. 13 Simulated current waveforms under typical operating condition switching

dSPACE1104 控制系统、驱动板、示波器、直流电压源、IPMSM、张力控制器、磁粉制动器以及转矩传感器 DYN-200。控制算法通过 dSPACE1104 控制系统来实现,通过调节张力控制器为电机提供负载转矩,利用转矩传感器可实时读取电机的转矩和转速,外部光电编码器用于检测实际转速及转子位置。

在效率对比试验中,将电机转速设定为 500 r/min,根据 CLTC 工况聚类得到的典型运行

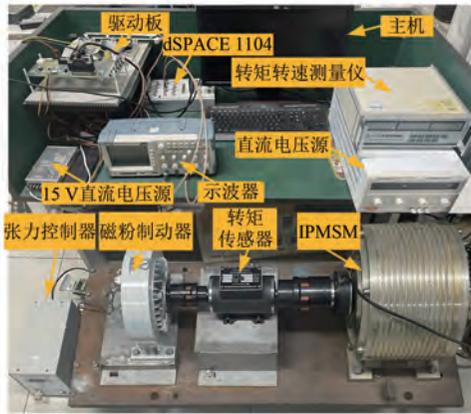


图 14 试验平台

Fig. 14 Experimental platform

工况设置负载转矩,对传统 MTPA 与 IS-MTPA-CLTC 两种控制策略进行测试。在相同转速和负载条件下, i_s 可用于表征电机能量利用效率, i_d 、 i_q 绝对值越小表示电机运行效率越高。因此,通过对比两种策略下 i_d 、 i_q 的大小评估效率差异。典型工况切换下的 i_d 、 i_q 波形如图 15 所示。

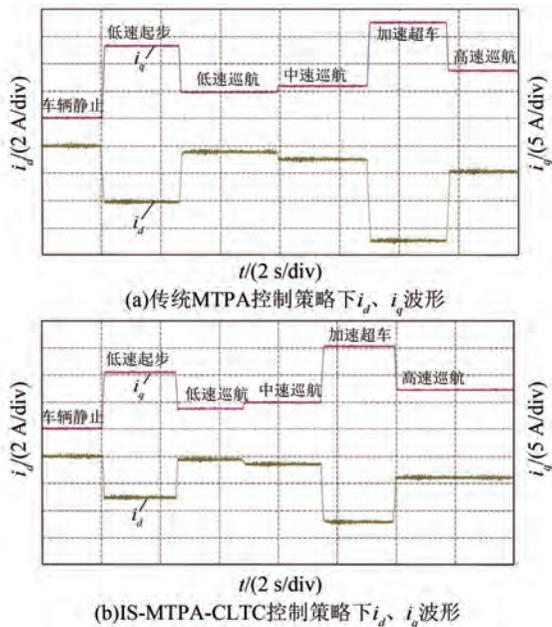


图 15 典型工况切换下的电流试验波形

Fig. 15 Experimental current waveforms under typical operating condition switching

由图 15 可知,所提 IS-MTPA-CLTC 控制策略在各典型工况下均具备更优的电流分配与能效表现。相比传统 MTPA, IS-MTPA-CLTC 控制策略下, i_d 、 i_q 绝对值显著降低,提高了磁阻转矩的利用效率,有效减少了铜耗,体现出高效的运行

特性。

为进一步定量分析传统 MTPA 与 IS-MTPA-CLTC 控制策略在典型工况下的稳态性能表现,分别提取 6 类典型运行状态下的稳态电流值进行对比,如表 4~表 6 所示。

表 4 两种控制策略下 i_d 对比Tab. 4 Comparison of i_d under two control strategies

工况	i_d/A	
	传统 MTPA	IS-MTPA-CLTC
车辆静止	0.006	0.005
低速起步	-4.09	-3.55
低速巡航	-0.49	-0.26
中速巡航	-1.03	-0.63
加速超车	-6.91	-4.74
高速巡航	-1.95	-0.72

表 5 两种控制策略下 i_q 对比Tab. 5 Comparison of i_q under two control strategies

工况	i_q/A	
	传统 MTPA	IS-MTPA-CLTC
车辆静止	0.15	0.14
低速起步	13.12	11.47
低速巡航	4.93	3.95
中速巡航	6.31	5.30
加速超车	17.65	15.47
高速巡航	8.82	7.56

表 6 两种控制策略下 i_s 对比Tab. 6 Comparison of i_s under two control strategies

工况	i_s/A	
	传统 MTPA	IS-MTPA-CLTC
车辆静止	0.15	0.14
低速起步	13.74	12.01
低速巡航	4.95	3.96
中速巡航	6.39	5.34
加速超车	18.95	16.18
高速巡航	9.03	7.59

由表 6 可知,在低速起步、低速巡航、中速巡航、加速超车及高速巡航典型车用工况下, IS-MTPA-CLTC 控制策略的 i_s 均小于传统 MTPA 控制策略。由于铜耗 $P_{Cu} \propto i_s^2$, 相较于 MTPA 控制, 在 IS-MTPA-CLTC 控制下各工况对应的定子铜

耗分别降低 23.9%、36.1%、27.2%、26.8% 和 28.8%, 平均降幅达 28.6%。结果表明所提策略在车辆主要工况区间可有效降低铜耗, 提升电机运行效率。

为了进一步验证所提控制策略在复杂工况下的动态性能, 设计了两组典型工况突变响应测试。第一组试验模拟车辆的起步过程, 通过负载突变实现从静止状态向低速起步工况的切换。第二组试验模拟车辆中速巡航后加速超车场景, 实现中速巡航工况向加速超车工况的切换。两组工况切换具有显著的负载突变特征, 可用于验证 IS-MTPA-CLTC 策略相较于 LPM-MTPA 策略在快速寻优与动态性能提升方面的有效性。相应的 i_d 、 i_q 动态响应分别如图 16、图 17 所示。

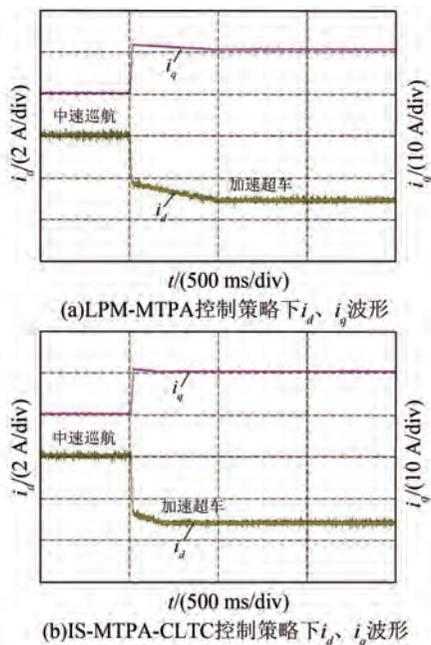


图 16 静止向低速起步工况切换时的 i_d 、 i_q 响应曲线

Fig. 16 Response curves of i_d and i_q during switching from standstill to low-speed starting condition

由图 16 与图 17 可知, 在起步与加速超车等负载突变工况下, LPM-MTPA 控制策略需要 500~600 ms 才能完成寻优并恢复稳态, 而 IS-MTPA-CLTC 控制策略仅需 150~200 ms 即可完成寻优并恢复稳态, 收敛速度提升 70%。试验结果表明, 所提 IS-MTPA-CLTC 策略在电动汽车复杂工况切换下具备更快的寻优速度与更强的动态响应能力, 能够显著提升永磁同步电机驱动系统的动态性能。

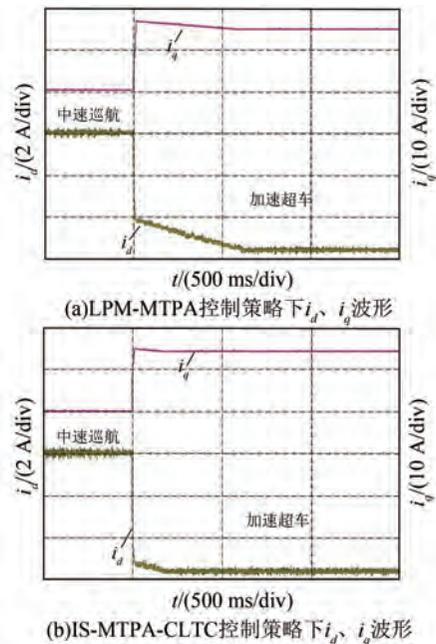


图 17 中速巡航工况向加速超车工况的切换时的 i_d 、 i_q 响应曲线

Fig. 17 Response curves of i_d and i_q during switching from medium-speed cruising condition to accelerated overtaking condition

5 结语

本文围绕 IPMSM 在复杂车用工况下的高效运行与快速响应展开研究。结合工况聚类、集总参数修正以及快速在线寻优等方法, 提出了一种 IS-MTPA-CLTC 控制策略, 并通过仿真与试验验证其有效性, 主要结论如下。

(1) 基于 CLTC 工况提取的典型工况点能够有效代表车辆的主要行驶状态。将典型工况点对应的集总参数作为搜索初值, 可减少控制器计算量与存储需求。

(2) 相较于传统 MTPA 控制策略, 所提 IS-MTPA-CLTC 控制策略在典型车用工况中均能取得更优的电流分配。定子铜耗平均降幅达 28.6%, 能够有效减少电机能量损失, 有利于提升电动汽车的续航表现。

(3) 在工况突变测试中, IS-MTPA-CLTC 控制策略在可显著加快搜索法自寻优过程, 相较于 LPM-MTPA 控制策略, d 、 q 轴电流收敛时间缩短 70%。IS-MTPA-CLTC 控制策略在负载突变场景中具有更强的动态响应能力, 更适用于电动汽车

频繁变载的运行需求。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

朱铭志进行了方案设计、试验研究、内容总结与论文撰写,王玉彬、朱铭志参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, experimental study, content summary, and paper writing were carried out by Zhu Mingzhi. The manuscript was reviewed and revised by Wang Yubin and Zhu Mingzhi. All authors have read and approved the final version of manuscript for submission.

参考文献

- [1] 於锋,殷琪皓,佟明昊,等. 电动汽车用多相电驱重构型车载充电系统关键技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5281-5297.
Yu F, Yin Q H, Tong M H, et al. Review of key technologies of multi-phase machine-based electric-drive-reconstructed onboard chargers for electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5281-5297.
- [2] 刘志超,郑天雷,柳邵辉,等. 插电式混合动力乘用车能耗和续航里程评价方法研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(2): 161-170.
Liu Z C, Zheng T L, Liu S H, et al. Research on energy consumption and driving range evaluation method of plug-in hybrid electric passenger car [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(2): 161-170.
- [3] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 中国汽车行驶工况第1部分:轻型汽车; GB/T 38146.1-2019[S]. 北京:中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. China automotive test cycle—Part 1: Light-duty vehicles; GB/T 38146.1-2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

- [4] 刘志超,郑天雷,龚慧明,等. 基于中国工况的纯电动乘用车续航里程评价方法研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(5): 705-712.
Liu Z C, Zheng T L, Gong H M, et al. Research on evaluation method of driving range of battery electric passenger vehicle based on China automotive test cycle [J]. Automotive Engineering, 2021, 43(5): 705-712.
- [5] 王玉彬,孙建鑫. 分数槽集中绕组嵌入式永磁同步电机设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 70-76.
Wang Y B, Sun J X. Design of interior permanent magnet synchronous machines with fractional-slot concentrated windings [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 70-76.
- [6] 李耀华,王自臣,何雨颀,等. 基于超螺旋滑模控制的永磁同步电机磁场定向控制研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(5): 527-539.
Li Y H, Wang Z C, He Y X, et al. Field-oriented control of permanent magnet synchronous motor based on super-twisting sliding mode control [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(5): 527-539.
- [7] 时隋翔,刘瀚文,王玉彬. 基于EKF的IPMSM无位置传感器控制估计误差补偿方法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(8): 20-29.
Shi S X, Liu H W, Wang Y B. Estimation error compensation method for sensorless control of interior permanent magnet synchronous motors based on extended Kalman filter [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(8): 20-29.
- [8] 赵希栋,王玉彬. 气隙偏心分数槽嵌入式永磁同步电机的电磁振动分析[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(7): 732-742.
Zhao X D, Wang Y B. Electromagnetic vibration analysis of fractional-slot interior permanent magnet synchronous motor with air-gap eccentricity [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(7): 732-742.
- [9] 王玉彬,刘瀚文. 改进虚拟方波信号注入的内置式永磁同步电机最大转矩电流比控制策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(20): 6474-6486.
Wang Y B, Liu H W. Research on improved virtual square wave signal injection MTPA control of interior permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025,

- 40(20): 6474-6486.
- [10] 徐龙, 李培鹤, 罗欣, 等. 一种改进的内置式永磁同步电机弱磁控制策略[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(3): 231-240.
Xu L, Li P H, Luo X, et al. An improved flux-weakening control strategy for interior permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(3): 231-240.
- [11] 付兴贺, 陈锐, 董婷, 等. 考虑参数不确定的永磁同步电机 MTPA 控制综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 796-808.
Fu X H, Chen R, Dong T, et al. Review of MTPA control of permanent magnet synchronous motor considering parameter uncertainties [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 796-808.
- [12] 崔涛, 赵彦凯. 永磁同步电机线性分段最大转矩电流比近似控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(11): 30-36.
Cui T, Zhao Y K. Piecewise linear maximum torque per ampere approximate control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(11): 30-36.
- [13] 毛亮亮, 王旭东. 一种新颖的分段式优化最大转矩电流比算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1404-1412.
Mao L L, Wang X D. Research on a novel segmented optimum maximum torque per ampere algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1404-1412.
- [14] 孟兵兵, 于春来, 郭昊昊, 等. 一种改进的内置式永磁同步电机最大转矩电流比控制方法[J]. 微电机, 2021, 54(12): 71-76.
Meng B B, Yu C L, Guo H H, et al. Maximum torque per ampere control for IPMSM based on improved formula and signal injection [J]. Micromotors, 2021, 54(12): 71-76.
- [15] 王劭中, 俞国新, 常云雪, 等. 光储直柔背景下直流空调电机控制策略研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 60-69.
Wang S Z, Yu G X, Chang Y X, et al. Research on control strategy of DC air conditioning motor in the PEDF system [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(4): 60-69.
- [16] Wang J, Huang X, Yu D, et al. An accurate virtual signal injection control of MTPA for an IPMSM with fast dynamic response [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7916-7926.
- [17] 邱建琪, 宋攀, 史涔激. 基于改进多虚拟信号注入的永磁同步电机 MTPA 控制[J]. 微电机, 2022, 55(10): 48-53.
Qiu J Q, Song P, Shi C W. Permanent magnet synchronous motor MTPA control based on improved multiple virtual signal injection [J]. Micromotors, 2022, 55(10): 48-53.
- [18] 蒋婷婷, 徐亮, 赵文祥. 基于实际信号注入的直流偏置型混合励磁电机 MTPA 控制[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(23): 9416-9424+10028.
Jiang T T, Xu L, Zhao W X. MTPA control of a DC-biased hybrid excitation motor based on actual signal injection [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(23): 9416-9424+10028.
- [19] 吴润秋, 徐磊, 朱孝勇, 等. 基于多变运行工况的漏磁可控型永磁电机变参数最大转矩电流比控制[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(5): 1935-1946.
Wu R Q, Xu L, Zhu X Y, et al. Variable-parameter maximum torque per ampere control of flux leakage controllable permanent magnet motor considering multiple operating conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(5): 1935-1946.
- [20] Antonello R, Carraro M, Zigliotto M. Towards the automatic tuning of MTPA algorithms for IPM motor drives [C]//International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, 2012: 1121-1127.
- [21] 许观达, 肖飞, 连传强, 等. 考虑 VSI 非线性影响的内置式永磁同步电机无电流传感器 MTPA 控制策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(10): 3131-3142.
Xu G D, Xiao F, Lian C Q, et al. Current sensorless MTPA operation of interior permanent magnet synchronous motor drives considering VSI nonlinearity [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(10): 313-3142.
- [22] 杨宇健, 赵世伟, 杨向宇. 基于梯度下降搜索法的 IPMSM 最大转矩电流比控制[J]. 微特电机, 2022, 50(7): 34-39.
Yang Y J, Zhao S W, Yang X Y. IPMSM maximum torque per ampere control based on gradient descent search method [J]. Small & Special Electrical Machines, 2022, 50(7): 34-39.
- [23] 廖勇, 伍泽东, 刘刃. 车用永磁同步电机的改进 MTPA 控制策略研究[J]. 电机与控制学报,

- 2012, 16(1): 12-17.
- Liao Y, Wu Z D, Liu R. Improved maximum torque per ampere control strategy study for PMSM used in electric vehicles [J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 16(1): 12-17.
- [24] 李军, 何资, 林嘉义. 基于黄金分割搜索法的 IPMSM 最大转矩电流比控制[J]. *微电机*, 2014, 47(9): 32-36.
- Li J, He Z, Lin J Y. Maximum torque per ampere control for IPMSM based on golden section search method [J]. *Micromotors*, 2014, 47(9): 32-36.
- [25] 沈启迪. 基于改进搜索法的永磁同步电机最大转矩电流比控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- Shen Q D. Research on maximum torque per ampere control of PMSM based on improved search method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [26] 王永广, 付江涛, 李鹏飞, 等. WLTC 和 CLTC 循环测试工况对比分析[J]. *中国汽车*, 2020(11): 14-21.
- Wang Y G, Fu J T, Li P F, et al. Comparative analysis of WLTC and CLTC [J]. *China Auto*, 2020 (11): 14-21.
- [27] Rabiei A, Thiringer T, Alatalo M, et al. Improved maximum-torque-per-ampere algorithm accounting for core saturation, cross-coupling effect, and temperature for a PMSM intended for vehicular applications [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2016, 2(2): 150-159.
- [28] 李吉安, 姚建明, 吴旭陵. 基于发动机稳态工况的整车 WLTC 循环油耗研究[J]. *内燃机工程*, 2016, 37(6): 235-240.
- Li J A, Yao J M, Wu X L. Research on vehicle WLTC fuel consumption based on engine steady working conditions [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2016, 37(6): 235-240.

收稿日期:2025-12-02

收到修改稿日期:2026-01-05

作者简介:

朱铭志(2001—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机高效能控制,zmzhxx@163.com;

* 通信作者:王玉彬(1974—),男,博士,教授,研究方向为特种电机设计及其控制,wangyubin@upc.edu.cn。