

基于模糊树模型的永磁同步电机 直接转矩控制研究

陆 畅, 梁骅旗

(陕西铁路工程职业技术学院 铁道装备制造学院, 陕西 渭南 714000)

摘要: 永磁同步电机因其高效率和高动态性能广泛应用于工业控制, 但传统直接转矩控制方法易引发转矩脉动和磁链波动, 尤其在低速运行时表现不足; 因此, 研究将模糊树模型应用于永磁同步电机的直接转矩控制中, 通过引入基于模糊逻辑和决策树融合的智能控制方法, 自适应调整开关决策规则, 优化电压矢量选择, 提高系统的动态响应能力和稳态控制精度; 实验表明, 模糊树模型显著降低了转矩脉动 (误差减少 40%)、磁链波动 (降至原 65%) 及能量损耗 (功率损耗减少 44%), 同时提升动态响应 (响应时间缩短 25%) 和效率 (提升 8%), 能量损耗大幅减少; 研究结果表明, 所提出的基于模糊树模型直接转矩控制方法为优化永磁同步电机的性能提供了一种高效可靠的解决方案, 在高功率场景中表现尤为突出; 研究的创新性在于采用模糊树代替传统开关表, 通过自适应规则调整, 显著改善了控制性能。

关键词: 模糊树; 永磁同步电机; 直接转矩控制; 机器学习; 传感器

Research on PMSM Direct Torque Control Based on Fuzzy Tree Model

LU Chang, LIANG Huaqi

(Department of Railway Equipment Manufacturing, Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are widely applied in industrial control due to their high efficiency and dynamic performance. However, traditional direct torque control methods are prone to torque ripple and magnetic flux fluctuation, especially during low-speed operation where performance is insufficient. Therefore, Adopt a fuzzy tree model in the direct torque control of PMSMs, introduce an intelligent control method based on fuzzy logic and decision tree fusion to adaptively adjust the switch decision rules, optimize the voltage vector selection, and improve the dynamic response capability and steady-state control accuracy of the system. Experimental results show that the fuzzy tree model reduces the torque ripple error by 40%, the magnetic flux fluctuation is reduced to 65%, and the power energy loss is reduced by 44%, while improving dynamic response and efficiency, the response time is reduced by 25% and the efficiency is increased by 8%, significantly reducing the energy loss. The research results indicate that the proposed direct torque control method based on fuzzy tree model provides an efficient and reliable solution for optimizing the performance of PMSMs, especially in high-power scenarios. The innovation of the research lies in using fuzzy trees instead of traditional switch tables, significantly improving control performance through adaptive rule adjustment.

Keywords: fuzzy tree; PMSM; direct torque control; machine learning; sensor

0 引言

永磁同步电机 (PMSM, permanent magnet synchronous motor) 因其高效率、高功率密度和优异的动态性能, 在工业自动化、新能源汽车、家电以及航空航天等领域得到了广泛应用。作为一种同步电机, PMSM

通过转子内嵌的永磁体提供磁场, 实现了无需额外励磁的运行模式, 不仅简化了结构, 还显著提高了系统的运行效率和可靠性^[1]。近年来, 随着工业生产对高效节能技术需求的不断增长, PMSM 在复杂工况中的高精度控制需求也在逐步增加。然而, 要充分发挥 PMSM 的性能, 控制方法的优化显得尤为重要。直接转矩控制

收稿日期: 2025-02-13; 修回日期: 2025-03-24。

基金项目: 陕西省渭南市市级科技项目 (ZDYFJCYY-138)。

作者简介: 陆 畅 (1989-), 女, 硕士, 讲师。

引用格式: 陆 畅, 梁骅旗. 基于模糊树模型的永磁同步电机直接转矩控制研究 [J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(8): 160-168, 187.

(DTC, direct torque control) 是 PMSM 控制领域的核心技术之一, 其以直接调节电机转矩和磁链为目标, 无需传统矢量控制中的电流环调节, 从而简化了控制结构并实现了快速动态响应^[2-3]。尽管传统 DTC 方法在结构上较为简洁, 能够实现快速动态响应, 但在低速运行时存在较为严重的局限性。首先, DTC 采用滞环控制器进行转矩和磁链调节, 由于滞环带宽的固定性, 在低速状态下, 电压矢量的选取受到较大限制, 导致转矩脉动加剧, 使电机运行不稳定。其次, 由于磁链估算依赖于电压模型, 在低速运行时, 定子电阻的影响占比提高, 磁链估算误差增大, 导致磁链控制精度下降。此外, 开关表的固定性限制了逆变器的最优开关状态选择, 使得 DTC 在复杂负载变化和扰动环境下难以维持理想的运行状态。这些问题不仅影响了 PMSM 在低速工况下的稳定运行, 还导致整体能量利用效率下降。

PMSM 凭借其高功率密度、较高的能量效率和良好的动态响应特性, 广泛应用于工业自动化、电动汽车、机器人等领域。随着复杂工况下高精度控制需求的增加, DTC 作为核心技术, 以其快速动态响应和简化的控制结构受到关注。文献 [4] 为了解决磁场增强型内置式永磁电机在弱磁升速时的转矩脉动、电流畸变振荡及响应速度慢等问题, 提出了一种基于磁链分区的全速域模型预测直接转矩控制策略。研究表明, 该策略能有效构建磁链和转矩预测模型, 实现磁链补偿, 解决速度切换时的震荡问题, 为该类电机在电驱动中的应用提供了有效技术方案。文献 [5] 为了解决双电机主从控制下的转矩动、稳态均衡问题, 提出了一种双电机主从结构模型预测直接转矩控制优化策略。研究表明, 该策略通过引入误差反馈闭环预测和设定主从转矩统一化及转矩差限制项, 能显著抑制转矩脉动, 减小动态转矩差, 实现转矩均衡, 提升系统整体动态性能。文献 [6] 为了抑制双三相电机缺一相故障时的谐波电流, 提出了一种双三相电机缺一相运行时虚拟矢量的间接修正方法, 并构建了容错直接转矩控制策略。研究表明, 该方法能使虚拟矢量幅值最大化, 且定子磁链分区和开关表选取规则与正常运行一致, 易于实现, 实验验证了其正确性和可行性。文献 [7] 为了减小常规直接转矩控制中转矩和磁链控制的偏差, 提出了一种基于空间矢量脉宽调制和双比例谐振控制器的永磁同步电机直接转矩控制策略。研究表明, 该方案能有效减小磁链和转矩脉动, 提高鲁棒性和动态响应特性, 并通过实验验证了其可行性和有效性, 具备工程应用价值。文献 [8] 为了解决五相永磁同步电机传统直接转矩控制中存在的相电流畸变、高共模电压、转矩和磁链脉动大以及无法实现相开路故障无扰运行的问题, 提出了一种基于自然容错开关表的 DTC 策略。研究结

果表明, 该策略能有效抑制转矩脉动, 降低三次谐波电流, 减小转矩和磁链脉动, 抑制共模电压, 实验验证了其可行性。文献 [9] 为了解决传统直接转矩控制策略转矩脉动大、调速平稳性差和调速范围窄的问题, 提出了一种基于自抗扰的开关磁阻电机无磁链直接转矩控制。研究表明, 该方法通过无磁链闭环控制和重构电压矢量, 结合线性自抗扰控制器, 提升了动态响应性能, 进一步抑制了转矩脉动, 降低了电流峰值, 提高了转矩电流比。文献 [10] 为了消除矩阵变换器电机系统直接转矩控制中的共模电压, 提出了一种采用主从开关表的控制策略。该策略使用 6 个旋转矢量分组驱动电机, 并分别建立主、从开关表。研究表明, 该方法有效抑制了共模电压, 同时满足了控制系统动、静态性能的基本要求, 实验结果验证了其可行性。文献 [11] 为了应对 PMSM 的高度非线性、多变量、强耦合及易受干扰的特性, 同时考虑混沌振荡、性能约束、状态约束、输入约束和系统随机噪声, 提出了一种神经自适应规定性能控制器。研究表明, 该控制器能确保系统安全、快速响应、降低误差, 并有效摆脱混沌振荡, 展现出优越性能。文献 [12] 为了提高感应电机的控制精度和鲁棒性, 减少磁通和转矩脉动, 提出了一种基于决策树的新型直接转矩控制方法, 该方法采用有效训练的人工神经网络。研究表明, 所提出的策略通过先进控制器和新型决策树取代传统组件, 仿真和实时验证均显示出了显著的改进效果。

综上所述, 目前已有大量研究通过改进控制策略和智能算法提升永磁同步电机的直接转矩控制性能, 并取得了显著进展。然而, 在应对低速运行的转矩脉动、磁链波动以及能量损耗等问题时, 仍存在一定局限性, 传统 DTC 采用滞环控制器对转矩和磁链进行调节, 由于滞环带宽固定, 在低速运行时电压矢量选择受到限制, 导致转矩脉动加剧, 影响电机运行平稳性。磁链估算依赖电压模型, 在低速状态下定子电阻的影响占比提高, 使磁链估算误差增大, 从而降低磁链控制精度, 导致电机磁链波动严重。传统 DTC 基于固定开关表控制逆变器的开关状态, 无法根据电机运行状态动态调整, 难以适应复杂负载变化, 导致在扰动环境下难以维持稳定运行。针对上述问题, 本文提出了一种基于模糊树 (FT, fuzzy-tree) 模型的 DTC 优化方法。模糊树模型结合了模糊逻辑和决策树的优势, 在传统 DTC 的基础上, 通过自适应调整开关状态, 提高电压矢量的选择灵活性。相较于固定开关表的 DTC 方法, 模糊树能够根据电机的实时状态, 动态优化转矩和磁链控制策略, 减少滞环控制器带宽固定性带来的误差, 提高低速运行时的稳定性。此外, 模糊树模型能够增强系统对负载扰动的适应能力, 使得电机在复

杂运行环境下依然能保持较低的转矩脉动和磁链波动,同时减少能量损耗,提高整体运行效率。研究旨在减少转矩脉动和磁链波动,提高控制精度和动态性能,为高效电机控制提供一种新思路。

1 PMSM-DTC 方法

1.1 PMSM 原理

PMSM 是一种同步电机,其转子内嵌有永磁体,通过永磁体提供磁场,而无需额外的励磁装置。转子的转速与定子产生的旋转磁场的频率严格同步,即没有转差。PMSM 由 3 部分构成,分别是定子、转子和控制系统。定子通常由三相绕组组成,通电后产生旋转磁场。转子内嵌永磁体,产生固定磁场。控制系统通过变频器调节电机的频率和电流,实现精准控制。PMSM 主要分为 3 类,分别是表贴式,嵌入式和内置式,研究选择表贴式 PMSM 作为研究对象。

表贴式 PMSM 将永磁体直接贴附在转子表面,具有较多优势。其结构简洁,磁路设计简单,避免了复杂的转子加工,使得制造成本较低,同时转子轻巧,降低了惯性,提高了动态响应性能。由于永磁体紧贴转子表面,能够充分利用表面磁场,电机具有较高的功率密度,并且可以有效减少磁阻损耗,提升电机的运行效率,尤其适合长时间高效运行。表贴式结构带来了优异的运行稳定性,转子对称性好,磁场波动小,能够显著降低振动和噪音,确保平稳运行^[13-14]。表贴式 PMSM 的转子没有显著的铁损和磁阻转矩分量,电磁转矩主要来自永磁体和定子绕组,使得其控制系统相对简单,易于实现高精度的矢量控制。

1.2 DTC 方法

1.2.1 DTC 的核心思想与系统结构

为实现 PMSM 的精确控制,研究采用 DTC 对 PMSM 进行控制。DTC 的核心思想是直接控制电机的转矩和磁链,无需传统的电流调节环节,简化了控制结构并提高了动态性能。该方法通过实时估算转矩和磁链,利用开关状态来调整逆变器的输出,从而精确调节转矩和磁场。其结构如图 1 所示。

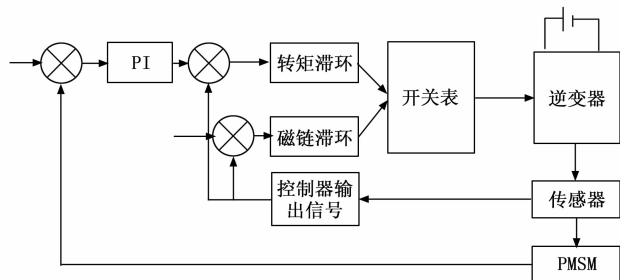


图 1 DTC 系统结构图

由图 1 可知,DTC 系统的传统结构核心由速度控制器、转矩控制环、磁链控制环、开关表和逆变器组成。系统通过速度控制器,根据目标转速与实际转速之间的误差,生成参考电磁转矩信号。转矩控制环接收该参考信号,并与实际转矩进行比较,得到转矩误差信号。磁链控制环则通过对比目标磁链和实时磁链,生成磁链误差信号。这些误差信号会传递到开关表,用于确定合适的逆变器开关状态,从而调整电机的电压输出,实现对磁链和转矩的闭环控制^[15]。

1.2.2 滞环控制器与磁链估计

在实际运行过程中,通过传感器采集电机的定子电流和电压信号,结合电机的状态计算实际磁链和转矩,这些反馈信号用于转矩和磁链控制环的误差计算,以保证系统的稳定性和精确性。整个 DTC 系统反应迅速、结构简洁。逆变器负责将控制信号转化为实际作用于电机的驱动信号,而传感器负责实时监测电机运行状态,确保控制系统能够及时调整。在滞环控制部分,其表达如式 (1) 所示:

$$\tau(k) = \begin{cases} 1, & T_e^* - T_e > \Delta T_e \\ \tau(k), & |T_e^* - T_e| \leq \Delta T_e \\ 0, & T_e^* - T_e < -\Delta T_e \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\tau(k)$ 为滞环控制器的输出值。当 $T_e^* - T_e > \Delta T_e$ 时,输出 $\tau(k) = 1$,表示实际转矩低于参考转矩的容差范围,需要增加转矩。此时,控制器会选择合适的逆变器开关状态,使电机的转矩增大。当 $|T_e^* - T_e| \leq \Delta T_e$ 时,输出 $\tau(k)$ 不变,表示实际转矩已处于参考转矩的容差范围内,无需调整转矩。此状态下,系统保持当前开关状态,不进行额外调节。当 $T_e^* - T_e < -\Delta T_e$ 时,输出 $\tau(k) = 0$,表示实际转矩高于参考转矩的容差范围,需要减少转矩。此时,控制器会选择合适的逆变器开关状态,使电机的转矩减小。本文通过模糊树模型动态调整其误差阈值,以优化磁链调节的灵敏度。磁链滞环控制器的输出信号如式 (2) 所示:

$$\varphi(k) = \begin{cases} 1, & |\psi_s^*| - |\psi_s| > \Delta\psi_s \\ \varphi(k), & |\psi_s^*| - |\psi_s| \leq \Delta\psi_s \\ 0, & |\psi_s^*| - |\psi_s| < -\Delta\psi_s \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\varphi(k)$ 为磁链滞环控制器的输出信号,其决定了磁链调节的方向。当 $|\psi_s^*| - |\psi_s| > \Delta\psi_s$ 时,输出 $\varphi(k) = 1$,说明实际磁链的值与参考磁链的差值超过了允许的误差范围,需要通过调整空间电压矢量来增加磁链幅值,使其回到合理范围。当 $|\psi_s^*| - |\psi_s| \leq \Delta\psi_s$ 时,输出 $\varphi(k)$ 保持不变,表明实际磁链已经在参考磁链的误差范围内,系统无需进行额外调整,维持当前状态即可^[16]。当 $|\psi_s^*| - |\psi_s| < -\Delta\psi_s$ 时,输出 $\varphi(k) = 0$,表示实际磁链的值偏高,超出了允许范围,需要通过调整空间电压矢量来降低磁链幅值。在磁链估计部分,其磁

链方程的矢量形式表达式如式 (3) 所示:

$$\psi_s = \int (u_s - R_s i_s) dt \tag{3}$$

式中, u_s 表示定子电压, i_s 表示定子电流, R_s 是定子绕组的电阻值, 表示电机内部的定子电阻。若忽略定子电阻的影响, 磁链方程的矢量形式表达式如式 (4) 所示:

$$\psi_s = \int u_s dt \tag{4}$$

由式 (4) 可知, 磁链仅由定子电压的积分决定。

1.2.3 PI 速度调节器

在传统 DTC 系统中, 使用 PI 环节对速度进行控制, 其结构如图 2 所示。

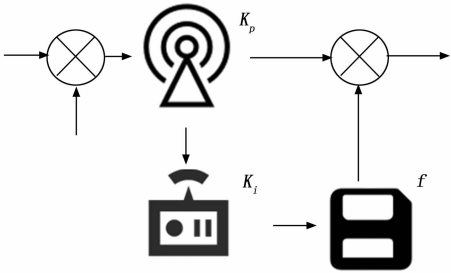


图 2 PI 调节器结构图

由图 2 可知, PI 速度调节器结构主要由比例控制器和积分控制器组成, 用于调节电机的转矩指令以实现目标速度。通过模糊树模型实时调整比例系数和积分系数以提升动态响应性能。系统通过比较目标转速与实际转速, 得到速度误差信号。该误差信号被传递到比例控制器和积分控制器分别处理。比例控制器根据误差的瞬时值生成响应信号, 用于快速调整电机速度, 确保动态响应速度较快。积分控制器对误差进行累积计算, 用于消除由于负载变化或其他扰动引起的长期稳态误差, 保证系统的稳定性和控制精度。两部分输出信号相加后, 生成电机的转矩参考信号, 用于后续转矩控制环路, 从而调整电机的实际转矩以修正速度偏差。PI 调节器的设计中, 比例部分主要用于提高响应速度, 而积分部分用于消除残留的速度误差, 两者协同作用能够实现良好的动态性能和稳态精度。

2 基于模糊树模型的 PMSM-DTC 方法

2.1 模糊树模型

传统 DTC 通过滞环控制器和开关表实现转矩和磁链的快速调整, 但其主要缺陷在于转矩和磁链波动较大, 尤其在低速运行时, 容易引发转矩脉动和动态性能下降。因此本文提出了一种基于 FT 模型的 PMSM-DTC 方法, 该方法在传统 DTC 基础上引入模糊树智能控制策略, 以提高系统的动态性能和控制精度。FT 模型是一种结合了模糊逻辑与决策树算法的分类模型。它的基本思想是在构建决策树的过程中引入模糊集的概

念, 允许决策规则和数据特征之间的模糊关系, 而不是传统决策树中的精确分类界限。这样可以更好地处理不确定性和模糊性, 提高模型的灵活性和鲁棒性^[17]。决策树是通过一系列决策规则将数据集划分为不同类别的树状结构。每个节点表示一个属性测试, 分支表示测试结果, 叶节点表示分类结果。决策树的目标是通过逐步选择能够最大程度上减少数据集混乱度的特征, 来生成分类模型。模糊逻辑则是处理模糊、不确定或不精确数据的数学工具。它允许用模糊集和模糊规则来表示信息, 在决策过程中不会局限于“是”或“否”的严格分类, 而是允许一定的模糊性和过渡。模糊树模型将决策树的每个节点分裂点从传统的“精确划分”转变为“模糊划分”。每个属性的取值在某个范围内通过隶属度函数来表示, 而非单一的区间。比如, 传统决策树可能会检查某个属性是否大于某个特定值, 而模糊树模型可能会检查该属性与某个特定值的隶属度, 然后通过隶属度来决定如何分裂树。

2.2 模糊树模型的设计与训练

在 PMSM-DTC 中, 模糊树模型代替了传统的开关表, 根据实时运行状态选择最优的空间电压矢量, 以实现转矩和磁链的精确控制。FT 模型是一种结合模糊逻辑与决策树的智能控制和推理模型。它通过模糊逻辑处理不确定性和非线性问题, 同时利用决策树的层次化结构实现高效的决策过程。模糊树的核心在于每个节点的决策过程, 该过程依赖于输入变量的模糊隶属度计算。常见的隶属度函数包括三角函数、高斯函数和梯形函数。为了在 DTC 控制中获得最佳响应效果, 研究采用高斯隶属度函数。选择高斯函数的原因在于其平滑性较好, 能够避免硬划分带来的不连续性, 同时在低速运行状态下对转矩和磁链的变化更加敏感, 提高控制精度。在优化过程中, 高斯函数的中心和标准差通过实验调整, 以确保电压矢量选择能够准确反映电机运行状态。模糊树的深度和宽度决定了控制决策的复杂度与精度。树的深度过大可能导致计算量增加, 影响实时性; 深度过小则可能导致分类能力不足。树的宽度影响输入变量的模糊划分程度, 直接决定了控制规则的灵活性。若树的宽度过大, 会导致模糊划分过细, 增加计算成本, 若树的宽度过小, 则可能导致分类能力不足。其对二维输入空间进行模糊划分, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 上方为模糊树的决策结构, 下方为输入变量空间在不同层次上的划分。模糊树模型通过分层递进的方式, 将输入空间划分为多个区域, 每个区域对应不同的模糊规则, 从而实现对复杂系统的高效控制和决策。标号为 1 的根节点表示输入空间的整体, 未进行任何划分, 所有输入变量的值都在这一空间内。随着决策树的深入, 根节点通过规则将输入空间分割成若干子

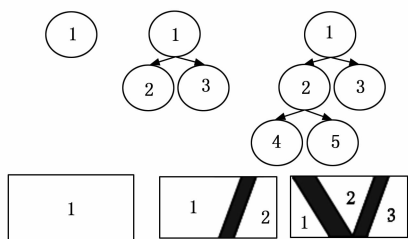


图 3 模糊划分的示意图

区域。在第一层，节点 1 划分出两个区域，分别由子节点 2 和 3 管理。在第二层，节点 2 和 3 分别对其管理的子区域再次细分。节点 2 划分出的空间再由子节点 4 和 5 进行更细粒度的处理，通过分层递进的方式，逐步对输入变量进行模糊化和区域划分，使复杂的输入输出关系得以简单明了地建模^[18-19]。

FT 模型结构被定义为一棵二叉树，对于模糊树非根节点，在二叉结构的模糊树中，每个非叶子节点根据输入数据计算隶属度，并将数据软划分到左右子树，而叶子节点存储最终的分类标签或回归值。FT 模型的参数需要根据二叉树结构逐层进行训练，其训练流程如图 4 所示。

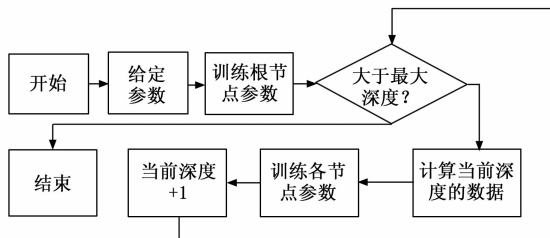


图 4 FT 训练流程

由图 4 可知，输入训练样本、二叉树结构和模糊树的宽度参数，并初始化树的深度为 1，开始从根节点进行训练。对于根节点，需要优化其线性参数，该参数决定了根节点划分输入数据空间，从而为后续节点的训练提供基础。判断当前树的深度是否已经达到最大设定深度。如果已达到，则训练结束；如果未达到，则继续训练当前深度的所有节点。每个节点在训练时需要基于其父节点的数据分布权重，确保子节点继承和优化父节点分配的样本信息。通过这种方式，当前深度的所有节点都能有效学习并调整其参数，使其能够准确地处理输入数据。完成当前深度的所有节点训练后，增加树的深度，进入下一层节点的训练。新一层节点的训练基于上一层的结果，继续细化数据划分并优化参数。这一过程不断重复，逐层向下训练，直到达到最大深度时结束。隶属度的计算依赖于该节点的两个直接子节点，定义节点的隶属度函数表达式如式 (5) 所示：

$$\mu_i(X) = \mu_{F(i)}(X) \hat{\mu}_i(X) \quad (5)$$

式中， $\mu_{F(i)}(X)$ 为当前节点的子节点的主隶属度， $\hat{\mu}_i(X)$ 为当前节点的子节点的辅助隶属度，通过将左右子节点的隶属度相乘，得到当前节点对输入数据的综合隶属度^[20]。子节点的辅助隶属度函数的表达式如式 (6) 所示：

$$\hat{\mu}_i(X) = \frac{1}{1 + \exp[-\alpha(C_{F(i)} \cdot X - \theta_{F(i)})]} \quad (6)$$

式中， X 为输入变量， $C_{F(i)}$ 为节点的线性参数， $\theta_{F(i)}$ 为节点的偏移参数，控制激活阈值， α 为模糊树的宽度系数^[21]。偏移参数的表达式如式 (7) 所示：

$$\theta_{F(i)} = \frac{\sum_{i=1}^M \mu_{F(i)}(X', X'_i)}{\sum_{i=1}^M \mu_{F(i)}(X'_i)} \quad (7)$$

式中， X'_i 为第 i 组训练样本， M 为训练样本的数量， $\mu_{F(i)}$ 为节点隶属度。模糊树模型最终的输出如式 (8) 所示：

$$\hat{y} = \sum_{i \in T} \mu_i(X) C_i(X) \quad (8)$$

式中， T 为叶节点的集合， $C_i(X)$ 为每个叶节点对应的输出值， $\mu_i(X)$ 为叶节点的隶属度^[22-23]。综上所述，模糊树模型的训练流程包括输入数据预处理、树的初始化、节点优化及训练终止条件。首先，对数据进行归一化、异常值剔除和特征选择，提高训练稳定性。然后，初始化模糊树结构，设定最大深度，采用高斯隶属度函数，初始参数在 $[-1, 1]$ 范围内随机分布，并基于 10% 初始训练集生成初始模糊规则。训练时，非叶子节点计算输入数据的隶属度，并依据梯度下降法优化参数，使分类边界更加合理。损失函数采用均方误差，通过学习率进行参数更新。若节点样本分布失衡，则动态调整划分阈值，连续多轮训练误差收敛时停止优化。训练终止条件包括达到最大深度、损失变化低于 10^{-3} 或叶节点样本占比低于 3%。该优化策略保证了模糊树 DTC 在复杂工况下的适应性和控制精度，提高转矩控制稳定性并减少计算负担。

2.3 基于模糊树的 DTC 系统设计

模糊树模型结合模糊逻辑和决策树的优点，能够通过多层次的输入空间划分和模糊推理实现智能化决策。其层次化结构能够有效处理多变量输入，并动态选择最优的空间电压矢量^[24-25]。相比传统的固定开关表控制，模糊树模型能够自适应调整决策规则，从而显著降低转矩和磁链波动。本文提出的模型结构如图 5 所示。

由图 5 可知，本文设计的基于模糊树的 DTC 系统结构首先接收外部输入信号，经过 PI 控制器进行误差补偿，生成控制指令。随后，信号进入转矩带环和磁链带环，以分别调整电机的转矩和磁链，以确保电机的稳定运行。这些控制信号被传递至模糊树，该模块利用模

并计算能量损耗减少率,以验证模糊树对电机能效的优化效果。最后,针对不同实验环境参数,计算转矩脉动减少率、磁链波动减少率、能量损耗减少率、响应时间减少率和效率提升率,从多个维度量化模糊树 DTC 的整体性能提升情况。实验采用 10 kHz 高精度采样,并结合功率分析仪记录系统能耗。实验流程包括初始化实验环境、执行 PMSM 运行、记录关键指标、分析误差和能耗变化趋势、计算系统优化率等环节。通过数据分析验证,模糊树 DTC 能够通过智能化控制策略优化电机性能,提高系统的鲁棒性和动态响应能力,降低能量损耗并提升电机效率,特别是在高功率和高负载条件下表现更优。

3.3 实验结果与分析

对比不同控制方法的实验结果,如表 2 所示。

表 2 不同 DTC 方法的性能对比 %

控制方法	转矩脉动 减少率	磁链波动 减少率	能量损耗 减少率	响应时间 减少率	效率提 升率
传统 DTC	—	—	—	—	—
SVPWM-DTC	18.4	15.7	22.3	12.8	5.1
Fuzzy-DTC	27.9	22.6	30.5	16.4	6.7
DRL-DTC	39.8	31.2	43.2	20.5	7.9
模糊树 DTC	45.3	35.2	50.8	25.7	9.4

由表 2 可知,传统 DTC 方法在低速运行时存在较高的转矩脉动和磁链波动,而 SVPWM-DTC 通过优化电压矢量选择,降低了开关损耗,但转矩脉动仍然较高。Fuzzy-DTC 在自适应调整滞环带宽后,进一步改善了磁链波动,但能量损耗优化有限。相比之下,DRL-DTC 在强化学习的优化下,能够更好地自适应负载变化,提高了转矩控制的精度。然而,本文提出的模糊树 DTC 通过智能决策机制,有效降低了转矩脉动(减少 45.3%)、磁链波动(减少 35.2%),并在能量损耗(减少 50.8%)和效率提升(提升 9.4%)方面表现最优。对各个不同实验环境的 PMSM 进行分析,结果如图 6 所示。

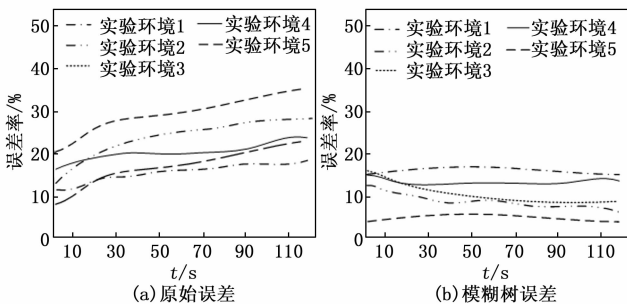


图 6 各个不同 PMSM 应用模糊树模型前后的误差分析

如图 6 (a) 所示,5 种不同类型实验环境参数在直接转矩控制 DTC 过程中,未使用模糊树模型时的误差

变化趋势。图 6 (b) 表示在相同条件下,采用模糊树模型优化后的误差变化趋势。由图 6 (a) 可知,所有类型的实验环境参数在运行开始阶段误差快速上升,之后逐渐趋于稳定。其中,实验环境参数 5 的误差稳定在约 0.35 左右,而实验环境参数 1 的误差稳定在约 0.15 左右。随着时间的推移,误差逐渐趋于稳定,但整体误差水平较高。出现这种情况的主要原因是传统 DTC 方法在低速或复杂负载条件下,控制策略较为简单,无法充分适应不同实验环境参数类型的动态需求,导致误差波动较大,特别是高功率或高转矩的电机误差更为明显。由图 6 (b) 可知,所有实验环境参数类型的误差显著降低,且在约 50 秒后趋于稳定。实验环境参数 1 的误差由原来的 0.2 降低到约 0.1,而实验环境参数 5 的误差从 0.04 降低到约 0.02。模糊树模型通过动态调整控制策略和自适应优化,实现了更精确的转矩控制,显著减少了不同类型电机在运行过程中的误差。这是由于模糊树模型能够实时根据输入变量进行智能决策,通过多层次的输入空间划分和优化,增强了系统的适应性和鲁棒性。实验结果表明,本文提出的基于模糊树模型的永磁同步电机直接转矩控制方法有着较为出色的性能。对各个实验环境参数的能量损失进行分析,结果如图 7 所示。

图 7 (a) 表示在第一次应用模糊树模型的情况下,不同实验环境参数在 5 种损失类型下的损失功率分布情况。图 7 (b) 表示第二次应用模糊树模型后,不同实验环境参数在相同损失类型下的损失功率分布。由图 7 (a) 可知,所有实验环境参数下的损失总体较高,尤其是高功率环境下,实验环境参数 2 在损失类型 1 中损失最大,接近 4 500 W,而实验环境参数 1 在同类损失中约为 2 000 W。对于损失类型 5,所有实验环境参数的损失普遍较低,但高功率环境的损失仍然高于低功率环境。不同损失类型之间,实验环境参数 2 和实验环境参数 3 在损失类型 3 和 4 中的分布较为均衡,损失功率约为 2 500~3 000 W。这种现象的主要原因是控制策略未能动态适应不同类型 PMSM 的运行特性,导致能量损耗在不同环节中较为显著。由图 7 (b) 可知,所有实验环境参数的损失均有显著降低。在实验环境参数 5 中,其在损失类型 1 中的损失从 4 500 W 降至约 2 500 W,降低了约 44%。在损失类型 5 中,所有实验环境参数下的损失基本降至 1 000 W 以下,显著低于未应用模型的情况。实验环境参数 1 的损失在所有类型中降低最为明显,在损失类型 1 从约 2 000 W 降至不足 1 000 W。这表明模糊树模型能够动态优化控制策略,减少高频切换和不必要的能量损耗。本文提出的模糊树模型通过智能化的输入空间划分和自适应规则选择,有效减少了转矩脉动、磁链损失以及电流和电压的能量消耗。对模型的

综合性能进行分析, 结果如表 3 所示。

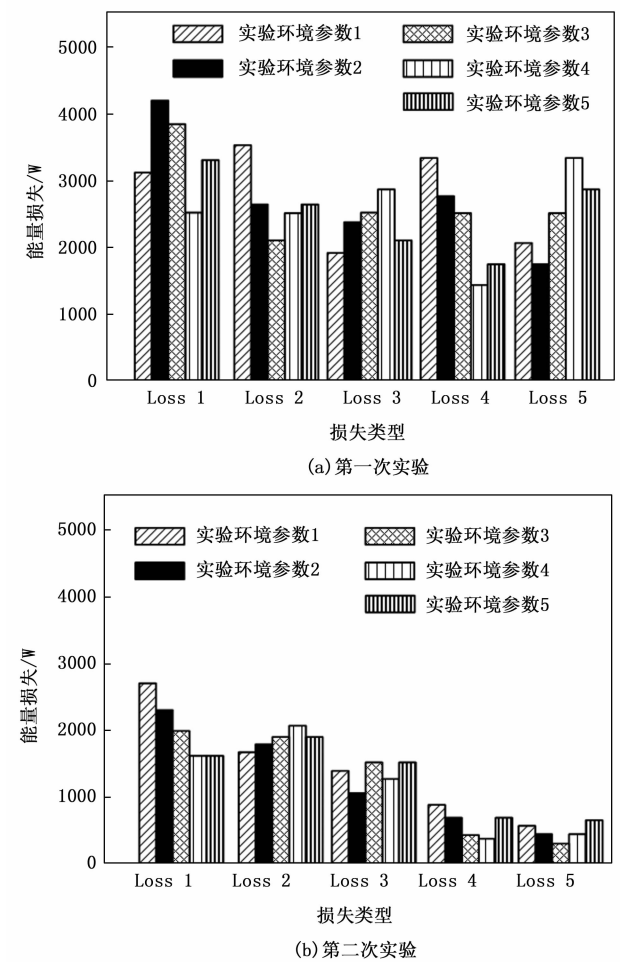


图 7 应用模糊树模型前后的能量损失分析

表 3 模型综合性能分析 %

实验环境参数	1	2	3	4	5
指标					
转矩脉动减少率	30.5	35.2	37.8	40.6	45.3
磁链波动减少率	25.8	28.4	30.1	33.7	35.2
能量损耗减少率	40.2	42.7	45.0	47.5	50.8
响应时间减少率	15.3	18.1	20.4	22.1	25.7
效率提升率	5.1	6.5	7.3	8.1	9.4

由表 3 可知, 随着实验环境参数的复杂度逐步增加, 模型在各项性能指标上的改进幅度逐步提高。转矩脉动减少率在实验环境参数 1 中为 30.5%, 而在实验环境参数 5 中达到了 45.3%, 显示模糊树模型对高功率电机的优化效果更为显著。同样, 磁链波动减少率从 25.8% 提高到 35.2%, 说明模型能够有效降低磁链波动对电机运行稳定性的影响。能量损耗减少率在所有类型中均表现出显著改进, 从实验环境参数 1 的 40.2% 提升至实验环境参数 5 的 50.8%, 表明模糊树模型在优化能量使用效率方面表现卓越。响应时间减少率显示

实验环境参数 1 减少 15.3%, 而 PMSM 5 减少 25.7%, 这意味着模型对转矩和磁链的动态响应更快速, 特别是在高复杂度电机中体现出更强的动态性能优化。效率提升率方面, 从实验环境参数 1 的 5.1% 逐步增加到实验环境参数 5 的 9.4%, 说明模糊树模型优化后的电机运行效率显著提高, 尤其在高功率场景下效果尤为突出。实验结果表明, 本文提出的模糊树模型能够通过智能化决策和自适应控制显著提升 PMSM 的综合性能, 为不同功率和复杂度的电机提供广泛适用性和高效能解决方案。对各个模型在实际不同荷载的情况下进行分析, 结果如表 4 所示。

表 4 模型在不同荷载情况下的性能分析 %

荷载情况	控制方法	转矩脉动减少率	磁链波动减少率	能量损耗减少率	响应时间减少率	效率提升率
低荷载	SVPWM-DTC	18	15.3	21.9	12.4	4.7
	Fuzzy-DTC	27.5	22.2	30.1	16	6.3
	DRL-DTC	39.4	30.8	42.8	20.1	7.5
	模糊树 DTC	44.9	34.8	50.4	25.3	9.0
中荷载	SVPWM-DTC	17.8	15.1	21.7	12.2	4.5
	Fuzzy-DTC	27.3	22	29.9	15.8	6.1
	DRL-DTC	39.2	30.6	42.6	19.9	7.3
	模糊树 DTC	44.7	34.6	50.2	25.1	8.8
高荷载	SVPWM-DTC	17.2	14.5	21.1	11.6	3.9
	Fuzzy-DTC	26.7	21.4	29.3	15.2	5.5
	DRL-DTC	38.6	30.1	42.1	19.3	6.7
	模糊树 DTC	44.1	34.0	49.6	24.5	8.2

由表 4 可知, 随着荷载的增加, 各种控制方法的性能改善幅度呈现一定的下降趋势。在低荷载条件下, 模糊树 DTC 方法的转矩脉动减少率达到 44.9%, 磁链波动减少率为 34.8%, 能量损耗减少率为 50.4%, 响应时间减少率为 25.3%, 效率提升率为 9.0%, 表现出了最优性能。而在高荷载条件下, 模糊树 DTC 的各项指标也依然保持较高水平, 转矩脉动减少率为 44.1%, 能量损耗减少率为 49.6%, 效率提升率为 8.2%, 但这些数值相比低荷载条件有所下降。不同控制方法之间的比较显示, 模糊树 DTC 方法在各个荷载条件下均优于 SVPWM-DTC、Fuzzy-DTC 和 DRL-DTC 方法, 尤其在低荷载条件下, 模糊树 DTC 方法的性能提升最为显著。实验结果表明, 随着荷载的增加, 所有控制方法的各项性能指标均有所下降, 但模糊树 DTC 依然保持较为出色的效果, 尤其在能量损耗和效率方面的表现突出。

3.4 讨论

实验结果表明, 模糊树 DTC 控制策略在转矩脉动、磁链波动、能量损耗、响应时间和效率等多个方面均表现出显著优化效果, 验证了其在 PMSM 控制中的有效性。具体而言, 转矩脉动减少率最高达 45.3%, 有效抑制了电机运行过程中的波动, 提高了系统稳定性; 磁

链波动减少率最高达 35.2%，说明模糊树优化策略能够更精细地调节磁链，提高磁链控制精度；能量损耗减少率达 50.8%，证明模糊树在优化能量利用、减少高频开关损耗方面的优越性。然而，模糊树模型也存在一定的局限性。首先，由于引入了复杂的隶属度计算和模糊决策规则，系统计算量相较于传统 DTC 显著增加，在高实时性应用场景需要更强的硬件支持。其次，模糊树的参数优化依赖数据分布，如果训练数据不足或覆盖面不全，会导致某些工作状态下的优化效果不稳定。此外，由于模糊树 DTC 依赖大量历史数据进行调整，在突变负载环境下，其适应速度可能略低于基于深度强化学习的 DTC 优化策略。

综上所述，模糊树 DTC 控制策略在动态响应、能量优化和系统稳定性方面表现优异，特别适用于多功率等级和高负载变动的 PMSM 控制场景，但在计算复杂度和实时性方面仍需进一步优化，以提升在高动态环境中的适用性。未来研究可进一步结合自适应在线优化和轻量级计算架构，以降低计算成本，提高控制实时性，使模糊树 DTC 适用于更广泛的工业应用场景。

4 结束语

针对传统直接转矩控制方法在低速运行中易引发转矩脉动、磁链波动和能量损耗等问题，本文提出了一种基于 FT 的 PMSM-DTC 优化方法。研究表明，模糊树 DTC 能够通过自适应优化控制规则，有效提升系统的动态性能，并降低能量损耗。在实验环境中，该方法实现了转矩脉动减少最高达 45.3%、磁链波动减少最高达 35.2%、能量损耗减少最高达 50.8%，并提高了系统的控制精度和响应速度。与传统 DTC 不同，模糊树 DTC 采用多层次输入空间划分和自适应规则调整机制，使系统能够更灵活地适应不同负载工况，提高了电机控制的鲁棒性和稳定性。

尽管模糊树 DTC 在提升 PMSM 性能方面展现出良好效果，但其计算复杂度和实时性仍有进一步优化空间，未来研究可从以下几个方向展开。针对模糊树 DTC 计算量较大的问题，可引入剪枝策略或特征选择优化，减少计算节点，提高计算效率。此外，结合轻量级模糊逻辑规则提取，进一步提升系统的实时性。未来可将模糊树 DTC 部署到边缘计算平台，结合 FPGA、DSP 或嵌入式 AI 芯片，提升计算速度，实现更高效的实时控制，以适应高速电机和复杂工业应用。

参考文献：

[1] ZHANG Y, LI S, LUO C Y Z. Output current harmonic analysis and suppression method for PMSM drive system with modular multilevel converter [J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17 (13): 3289–3297.

- [2] RUIBIN H, HONGFANG C, BAILIN L, et al. A speed loop control method of a laser tracing measurement control system [J]. Measurement Science & Technology, 2023, 34 (10): 1–14.
- [3] ZHANG M, JIANG J. A boost converter-based CSI-fed PMSM drives with common-mode voltage suppression for low-input voltage application [J]. Electrical Engineering, 2024, 106 (5): 6097–6111.
- [4] 朱孝勇, 薛高鸣, 徐磊. 磁链分区的磁场增强型永磁电机全速域模型预测直接转矩控制 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44 (11): 4480–4489.
- [5] 肖雄, 白秉堃, 张勇军, 等. 一种减小双电机转矩差的主从结构模型预测直接转矩控制优化控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (15): 6086–6098.
- [6] 周长攀, 刘海峰, 景国秀, 等. 双三相永磁同步电机缺相容错运行虚拟矢量间接修正方法及其在直接转矩控制中应用 [J]. 电工技术学报, 2023, 38 (2): 461–464.
- [7] 徐培嘉, 张杨. 基于比例谐振的永磁同步电机直接转矩控制 [J]. 电力电子技术, 2024, 58 (5): 26–30.
- [8] 黄朝志, 曹晓刚, 孙燕文, 等. 开关磁阻电机自抗扰无磁链直接转矩控制 [J]. 探测与控制学报, 2024, 46 (2): 138–148.
- [9] 周华伟, 陈铨, 赵宇恒, 等. 基于自然容错开关表的五相永磁同步电机直接转矩控制 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44 (4): 1618–1628.
- [10] 邓惟滔, 奚菲若, 钟琪, 等. 采用主从开关表的矩阵变换器电机系统直接转矩控制策略 [J]. 电机与控制学报, 2023, 27 (10): 151–159.
- [11] SONG Y K, TUO Y Y, LI J Y. A neural adaptive prescribed performance controller for the chaotic PMSM stochastic system [J]. Nonlinear Dynamics, 2023, 111 (16): 15055–15073.
- [12] AISSA O, REFFAS A, KRAMA A, et al. Advanced direct torque control based on neural tree controllers for induction motor drives [J]. ISA Transactions, 2024, 148 (4): 104–116.
- [13] 冯光权, 董涵, 冯浩文. 基于 FOPID+ADRC 的永磁同步电机低速控制 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (5): 146–152.
- [14] BOUYAHIA O, BETIN F, YAZIDI A. Fault-tolerant fuzzy logic control of a 6-phase axial flux permanent-magnet synchronous generator [J]. Energies, 2022, 15 (4): 14–27.
- [15] JIANG C, LIU H, WHEELER P. An optimized modulation for five-phase open-end winding PMSM with sliding clamped strategy [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70 (9): 8819–8829.

(下转第 187 页)