

两轮机器人 FOC 电机低速平稳性改进与转矩脉动抑制

张军胜 梁潇文 张福龙 张林

陕西铁路工程职业技术学院，陕西省渭南市，714000；

摘要：两轮机器人凭借结构紧凑、运动灵活等突出优势，在服务、巡检、物流等多个领域的应用愈发广泛。磁场定向控制（FOC）作为高性能电机控制策略，已成为两轮机器人驱动系统的主流选择，但低速运行阶段面临的平稳性差、转矩脉动大等问题，严重制约了机器人运动精度与用户体验的提升。本文系统梳理了 FOC 电机在两轮机器人低速运行场景下转矩脉动的核心产生机理，全面总结了国内外相关抑制技术与改进策略的研究进展，深入分析了各类方法的优势与局限性，并对该领域未来的研究方向进行了展望，为后续两轮机器人 FOC 电机低速性能优化研究提供参考与借鉴。

关键词：两轮机器人；磁场定向控制；低速平稳性

DOI：10.64216/3080-1508.25.11.077

引言

在机器人技术飞速发展的背景下，两轮机器人因具备体积小巧、机动性强、对狭小空间适应性优异等特点，在家庭服务、商业巡检、工业物流等实际场景中的应用需求持续攀升。驱动电机作为两轮机器人的核心执行部件，其控制性能直接决定了机器人的运动平稳性、定位精度及动态响应能力。磁场定向控制（Field-Oriented Control, FOC）通过坐标变换实现了三相交流电机定子电流励磁分量与转矩分量的解耦控制，拥有转矩响应快、调速范围宽等显著优势，已被广泛应用于两轮机器人驱动电机控制领域。

在两轮机器人的实际运行过程中，启动、低速巡航、精准定位等低速工况极为常见。然而，FOC 电机在低速运行时易出现转矩脉动大、转速波动剧烈等问题，这些问题会直接导致机器人机身抖动、运行噪声增大，严重时还会影响机器人的姿态平衡，大幅降低其运动控制精度与用户体验。因此，针对两轮机器人 FOC 电机低速平稳性改进及转矩脉动抑制的研究，兼具重要的理论意义与工程应用价值，成为当前相关领域的研究热点之一。本文旨在对该领域的研究现状进行系统综述，梳理转矩脉动产生机理，总结现有改进策略，分析各类方法的不足，并展望未来研究趋势。

1 FOC 电机低速转矩脉动产生机理

磁场定向控制的核心逻辑是通过 Clark 变换与 Park 变换完成定子电流在不同坐标系间的转换，实现励磁分量与转矩分量的独立控制，进而达成转矩的线性调节。但在低速工况下，受多种因素影响，实际控制效果

与理想状态存在偏差，导致转矩脉动产生。结合两轮机器人的运行特性，以下对低速转矩脉动的主要产生机理进行详细梳理。

1.1 逆变器非线性特性

逆变器作为电机驱动系统中的核心功率变换单元，其固有的非线性特性是导致低速运行时转矩脉动的主要诱因之一。在实际运行过程中，为了避免逆变器同一桥臂上的上下功率管出现直通短路，必须在控制信号中插入死区时间。然而，死区时间的存在会造成实际输出的电压矢量偏离理想状态，产生一定的电压误差。在电机低速运转时，定子电流的幅值通常较小，此时由死区效应引起的电压偏差在整个输出电压中所占比例显著上升，从而在电流波形中引入大量低次谐波。除此之外，功率开关器件本身的非理想特性，如导通压降、关断拖尾及开关延迟等现象，会进一步恶化输出电压的准确性。这些因素不仅导致 d 轴与 q 轴电流之间出现耦合，还会造成电磁转矩的周期性波动。特别在低速轻载条件下，电流幅值较低，死区效应所导致的波形畸变更加显著，对输出转矩的平稳性产生尤为不利的影响。

1.2 转子位置检测误差

磁场定向控制（FOC）的性能高度依赖于准确的转子位置信息，任何位置检测误差都会直接影响 Park 变换及反 Park 变换中所使用的角度值的准确性，从而破坏 d 轴与 q 轴电流之间的解耦控制效果，最终引起转矩脉动。在两轮机器人等对成本和体积有严格限制的应用场合，通常采用无位置传感器控制策略或低精度编码器以降低系统成本与体积。在高速运行区域，因反电动势

较大，这类位置检测手段尚可满足基本控制需求；然而在低速条件下，由于反电动势幅值较低、信噪比差，无位置传感器控制中的观测器或估计算法容易受到噪声干扰，导致位置估计出现较大偏差。同时，低分辨率编码器会因量化误差带来额外的角度检测不准确问题。这些误差会使得定向坐标系偏离实际转子位置，造成电流控制中的 d-q 耦合，最终表现为转矩的脉动现象。

1.3 电机参数变化

FOC 控制策略通常在电机额定参数基础上进行设计，然而在实际运行中，电机的关键参数（如定子电阻、电感等）会随温升和负载条件的改变而发生显著变化。低速运行时，电机铜耗所占比例较高，定子电阻随温度上升明显增大，导致预先整定好的电流控制器参数与真实电机参数之间出现失配，进而影响电流环的动态响应性能与稳态精度。此外，电枢反应还会引起电感参数发生变化，特别是在大电流或磁路饱和状态下，这种变化更加显著。电感的变化会进一步加剧 d 轴与 q 轴间的耦合，造成电流跟踪误差，最终形成转矩波动。在低速条件下，由于控制系统带宽限制和较小的反电动势，参数变化对系统性能的影响被放大，成为限制转矩平稳性的关键因素之一。

1.4 控制算法缺陷

传统 FOC 架构普遍采用 PI 控制器实现对 d 轴和 q 轴电流的闭环调节，然而其控制参数通常为固定值，难以应对低速工况下电机参数时变、外部负载扰动等复杂动态过程。在负载突变或电机参数发生漂移时，固定增益的 PI 控制器容易出现调节速度慢、超调量大甚至持续振荡等问题，引起电流波动，进而带来转矩脉动。另一方面，在实际数字控制系统中，电流采样环节存在一定的延迟，控制器的离散化处理也会引入额外的相位滞后。这些延迟与离散化效应在高速情况下尚可被系统带宽所掩盖，但在低速运行时，由于电周期较长，这些非理想因素会被放大，显著降低电流控制的准确性与动态性能，从而加剧输出转矩的脉动幅度。

2 低速平稳性改进策略研究进展

针对两轮机器人 FOC 电机低速转矩脉动问题，国内外学者开展了大量研究工作，提出了多种改进策略，从转子位置检测、电流调节、谐波抑制等多个维度入手优化低速运行性能。以下对各类主流改进策略的研究现状进行详细总结与分析。

2.1 转子位置检测优化方法

转子位置检测精度的提升是改善 FOC 电机低速平稳性的关键环节，相关研究主要集中在传感器优化与观测器算法改进两个方向。在传感器优化方面，部分研究通过采用高精度编码器、霍尔传感器等器件提升位置检测精度，但此类方法会增加系统成本与体积，与两轮机器人小型化、低成本的设计需求存在冲突。因此，无位置传感器控制方式的优化成为研究重点。

滑模观测器因其结构简单、鲁棒性强等优势，在无位置传感器控制中应用广泛。传统滑模观测器采用固定增益设计，易出现高频抖振与位置估算误差较大的问题。为解决这一缺陷，学者们提出了多种改进方案：部分研究引入自适应增益调节机制，通过实时监测定子电流误差变化动态调整滑模增益，在保证观测器收敛速度的同时抑制高频抖振；另有研究通过优化低通滤波器结构，采用二阶或高阶低通滤波器替代传统一阶滤波器，在保留转子位置有效信息的基础上，有效滤除滑模抖振带来的高频噪声，提升位置估算精度。此外，扩展卡尔曼滤波、模型参考自适应等观测器算法也被应用于转子位置估算，在特定场景下展现出良好的性能，但部分算法存在计算复杂度高、实时性差等问题，难以满足两轮机器人实时控制需求。

2.2 电流控制算法优化

电流调节精度是影响 FOC 电机转矩平稳性的核心因素，针对传统 PI 控制器参数固定、适应性差的缺陷，学者们提出了多种参数自适应优化策略。基于模糊控制的参数自整定 PI 控制是其中的研究热点之一，该方法以电流偏差及偏差变化率为输入，通过预设的模糊规则库实时调整 PI 控制器的比例系数与积分系数，使电流控制器能够自适应电机参数变化与负载扰动，有效提升电流调节精度。

除模糊控制外，神经网络控制、模型预测控制等先进控制算法也被应用于 FOC 电机电流调节。神经网络控制具备强大的非线性映射能力，能够通过自主学习适应系统参数变化，但存在训练过程复杂、实时性有待提升等问题；模型预测控制通过建立系统预测模型，提前对控制效果进行预判并优化控制指令，展现出良好的动态响应性能，但计算量较大，对硬件处理能力要求较高。此外，部分研究通过优化电流环控制结构，引入前馈控制、反馈补偿等机制，减少电流采样延迟与离散化特性

带来的负面影响，进一步提升电流调节的稳定性。

2.3 电流谐波抑制技术

逆变器非线性特性引发的电流谐波是导致低速转矩脉动的重要原因，针对这一问题，学者们提出了多种谐波抑制技术。其中，基于逆变器非线性模型的电压补偿方法应用较为广泛，该方法通过建立死区时间、功率器件导通压降等非线性因素的数学模型，量化其对输出电压的影响，进而通过前馈补偿的方式消除电压输出误差。部分研究通过实验测量建立电压偏差查找表，根据实时检测的定子电流幅值与方向获取对应的补偿量，提升补偿精度。

重复控制、谐振控制等专门针对周期性扰动的控制算法也被用于电流谐波抑制。重复控制基于内模原理，能够对逆变器非线性导致的周期性电流谐波进行精准抑制，常与传统 PI 控制器并联使用，进一步提升电流波形质量；谐振控制通过在特定谐波频率处设置高增益，实现对特定次数谐波的针对性抑制，适用于谐波成分较为明确的场景。此外，优化逆变器调制策略、采用新型功率器件等硬件改进方式，也能在一定程度上减少电流谐波的产生，但受成本、技术成熟度等因素限制，应用范围相对较窄。

3 现有研究不足与未来展望

3.1 现有研究不足

尽管国内外学者针对两轮机器人FOC电机低速平稳性改进及转矩脉动抑制开展了大量研究，提出了多种技术方案，但现有研究仍存在诸多不足。首先，多数研究仅针对单一因素导致的转矩脉动进行抑制，未充分考虑两轮机器人运行过程中电机参数变化、负载扰动、逆变器非线性等多因素耦合的影响，导致实际应用中的优化效果有限。其次，部分先进控制算法虽能提升控制性能，但存在计算复杂度高、实时性差等问题，难以满足两轮机器人实时控制的需求，难以实现工程化应用。此外，现有研究多基于理想实验环境开展，未充分考虑实际应用中的电磁干扰、机械磨损等复杂工况，研究成果的实用性和可靠性有待进一步验证。最后，针对两轮机器人轻量化、低成本设计需求与控制精度提升之间的平衡问题，相关研究较为匮乏，限制了技术的推广应用。

3.2 未来研究展望

结合现有研究存在的不足与两轮机器人的发展需

求，未来该领域可从以下几个方向开展深入研究：一是多因素耦合下的综合优化策略研究，需充分考虑电机参数变化、负载扰动、逆变器非线性等多因素的耦合效应，设计融合多种控制机制的一体化改进策略，提升系统在复杂工况下的适应性。二是低复杂度高性能控制算法研究，通过算法简化、硬件加速等方式，降低先进控制算法的计算复杂度，提升实时性，推动其工程化应用。三是复杂工况下的实验验证与可靠性研究，搭建更贴近实际应用的实验平台，充分考虑电磁干扰、机械磨损等复杂因素，提升研究成果的实用性与可靠性。四是轻量化、低成本控制方案研究，开发适用于两轮机器人的低成本传感器、简化控制电路，在满足控制精度需求的前提下，降低系统成本与体积。五是智能化控制技术融合应用，将人工智能、机器学习等技术与传统控制算法相结合，实现控制参数的自主学习与自适应优化，进一步提升系统的智能化水平与控制性能。

4 结论

两轮机器人FOC电机低速平稳性与转矩脉动抑制是提升机器人运动精度与用户体验的关键环节。本文系统梳理了低速转矩脉动的主要产生机理，包括逆变器非线性特性、转子位置检测误差、电机参数变化及控制算法缺陷等；全面总结了现有改进策略，涵盖转子位置检测优化、电流控制算法改进及电流谐波抑制等多个方向；深入分析了各类研究方法的优势与局限性，并指出了现有研究存在的不足。未来需重点开展多因素耦合下的综合优化策略、低复杂度高性能算法、复杂工况下的可靠性验证等方面的研究，推动两轮机器人FOC电机低速控制技术的进一步发展与工程化应用。

参考文献

- [1] 周华伟, 陈铖, 向小龙, 等. 基于扰动观测器的五相永磁同步电机开路和短路容错矢量控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4782-4793.
- [2] 王向恩, 黄平林. 永磁同步电机FOC控制下相电流直流分量影响与抑制策略研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(2): 61-68.
- [3] 马广英等. "基于改进FOC控制算法的菱形五杆并联腿四足机器人".

作者简介：张军胜，男、陕西渭南人，硕士研究生，工程师，主要研究方向电气控制，机械设计。