

两轮机器人 FOC 电机无位置传感器控制算法改进

张军胜 张福龙 梁潇文

陕西铁路工程职业技术学院，陕西省渭南市，714000；

摘要：永磁同步电机（PMSM）结合磁场定向控制（FOC）技术是两轮机器人的主流驱动方案，而转子位置与转速的精准获取是实现 FOC 的核心前提。无位置传感器控制技术通过解析电机定子电压、电流等易测信号估算转子状态，无需额外硬件传感器，可有效简化系统结构、提升可靠性，契合两轮机器人小型化、高稳定性的应用需求，已成为该领域的研究热点。本文系统梳理了两轮机器人 PMSM-FOC 系统中无位置传感器控制算法的研究进展，重点分析了反电动势法、滑模观测器（SMO）法、模型参考自适应（MRAS）法、卡尔曼滤波类方法等主流算法的原理、优势及不足；深入探讨了各类算法在低速运行、负载突变等两轮机器人典型复杂场景下的适配性问题；最后总结了当前研究面临的核心挑战，并对未来融合化、智能化的发展趋势进行了展望，为后续相关算法的改进与工程应用提供参考。

关键词：两轮机器人；永磁同步电机；磁场定向控制

DOI：10.69979/3060-8767.25.09.090

引言

随着服务、巡检、教育等领域机器人的快速发展，两轮机器人凭借结构紧凑、运动灵活、空间利用率高的优势，在民用与工业场景广泛应用。驱动系统是两轮机器人核心执行单元，决定其运动稳定性等。永磁同步电机（PMSM）因效率高、功率密度大等特性，成为两轮机器人驱动首选；磁场定向控制（FOC）技术可高精度调控 PMSM 转矩和转速，是主流控制策略。在 FOC 系统中，转子位置角与转速信息是关键。传统位置检测方案依赖硬件设备，虽有一定精度，但增加系统体积、成本和布线复杂度，且在恶劣环境下影响可靠性。无位置传感器控制技术通过分析电气信号间接估算转子位置和转速，无需额外硬件，可解决传统方案弊端，提升抗干扰与环境适应能力，是驱动系统升级核心方向。两轮机器人运行工况复杂，对无位置传感器控制算法要求严苛。现有算法存在性能短板，突破复杂场景性能瓶颈是研究核心难题。因此，梳理现有算法研究现状，分析适配性与不足，明确研究方向，对推动两轮机器人驱动技术发展有重要意义。

1 无位置传感器控制核心理论基础

1.1 PMSM 数学模型与 FOC 控制核心

无位置传感器控制算法设计与优化以 PMSM 数学模型为基础，为简化分析，采用理想化假设：忽略电机铁心饱和等损耗，定子三相绕组对称分布，气隙磁场呈正弦分布。工程实践中常用三相静止、两相静止与两相旋

转坐标系，通过 Clark 变换将 $a - b - c$ 坐标系信号转换至 $\alpha - \beta$ 坐标系，再经 Park 变换至 $d - q$ 坐标系。

在 $d - q$ 坐标系下，PMSM 的电压、转矩与运动方程构成核心数学模型，反映定子电压、电流与转子转速、位置及电磁转矩的耦合关系。FOC 控制基于此模型，通过坐标变换分解定子电流为励磁和转矩分量，实现对电机转矩和转速的高精度控制。转子位置角精准获取是坐标变换关键，无位置传感器控制通过解析易测电气信号构建估算模型替代硬件传感器。

1.2 无位置传感器控制的核心难点

两轮机器人无位置传感器控制面临三大难点：一是低速工况估算精度问题，低速时 PMSM 反电动势微弱，易被干扰，导致估算算法精度下降甚至失效，而低速平稳运行是重要场景；二是动态响应问题，机器人负载突变等工况下，电机参数剧烈变化，要求算法有快速动态响应能力；三是鲁棒性问题，两轮机器人运行环境复杂，电机参数可能漂移且外部干扰多，要求算法在这些情况下保持稳定估算性能。

2 主流无位置传感器控制算法研究进展

2.1 反电动势法

反电动势法是最早用于 PMSM 无位置传感器控制的算法之一，其原理是利用 PMSM 反电动势信号与转子位置的关系，检测处理反电动势信号估算转子位置。在 $\alpha - \beta$ 静止坐标系下，通过对反电动势分量积分或解算相位可得转子位置。

该方法结构简单、计算量小、易工程实现，中高速工况估算精度较好，早期用于对低速性能要求不高的两轮机器人原型机。但局限性明显：低速时反电动势信号弱、信噪比低，估算误差大；积分运算易累积误差，降低估算精度；对电机参数变化和外部干扰鲁棒性差，难以满足两轮机器人复杂工况。虽有补偿、去噪等改进策略，但未根本解决低速精度问题，现逐渐被替代，仅用于部分低精度、低成本驱动系统。

2.2 滑模观测器（SMO）法

滑模观测器（SMO）法基于滑模变结构理论，以PMSM定子电流为观测对象，设计切换函数和滑模增益，使观测电流逼近实际电流，估算反电动势，解算转子位置和转速。其优势是滑模变结构鲁棒性强，能抑制电机参数漂移和外部干扰，适合两轮机器人运行环境。

传统SMO算法用符号函数作切换函数，会引入高频抖振，降低反电动势和转子位置估算精度，增加电机损耗和噪声。为此，研究者开展改进研究：一是用连续函数替代符号函数，引入边界层抑制抖振，但会增大稳态误差；二是设计自适应滑模增益调节机制，动态调整增益抑制抖振；三是结合滤波技术平滑反电动势信号，降低抖振影响。

改进后的SMO算法在抖振抑制和估算精度上有提升，成为两轮机器人无位置传感器控制主流算法之一，但极低速时反电动势信号弱，观测精度仍受影响。影响：自适应增益与边界层参数设计依赖工程经验，缺通用优化方法。

2.3 模型参考自适应（MRAS）法

MRAS法核心是构建参考与可调两个相似模型。参考模型无未知参数，输出易测定子电流等信号；可调模型含待估转子位置、转速等未知参数，其输出与参考模型对比得误差信号，通过自适应律调节可调模型参数，使输出逼近参考模型，此时未知参数为估算值。

MRAS算法估算精度高、动态响应好，中高速工况表现优。依模型选取不同分多种类型，电流模型MRAS因结构简单、鲁棒性好，在两轮机器人领域应用广。但传统MRAS对电机数学模型依赖强，电机参数漂移会降低估算精度；低速工况下，反电动势信号弱，误差信号易受噪声干扰，导致估算精度下降。

为提升其鲁棒性与低速性能，研究者提出改进策略：引入参数辨识模块修正参考模型；优化自适应律设计提升稳定性与调节速度；结合其他控制技术增强抗干扰与参数漂移能力。改进后MRAS在两轮机器人中应用前景

更广阔。

2.4 卡尔曼滤波类方法

卡尔曼滤波类方法基于概率统计理论，将未知参数视为系统状态，易测信号视为观测值，通过建立方程利用递推算法实现状态最优估计，抗干扰能力强，能处理噪声干扰下位置估算问题。两轮机器人无位置传感器控制中，扩展卡尔曼滤波（EKF）算法与无迹卡尔曼滤波（UKF）算法应用较多。

EKF算法对非线性PMSM数学模型线性化后进行卡尔曼滤波估计，可抑制噪声、提升精度，但存在局限性：一阶线性化有误差，系统非线性强时估算精度下降；算法涉及大量矩阵运算计算复杂度高、对处理器运算能力要求高，难以满足两轮机器人实时控制需求。UKF算法用无迹变换替代线性化处理，能更精准逼近系统非线性特性，估算精度优于EKF算法，但计算复杂度和工程实现难度更大。为降低卡尔曼滤波类方法计算复杂度，研究者提出简化的EKF算法，通过优化方程减少矩阵运算量，结合硬件处理器性能提升，该方法在高端两轮机器人中应用增多。不过，该类算法在低速工况下估算精度受反电动势微弱限制，需与其他算法融合优化。

2.5 其他新兴算法

除主流算法外，近年研究者提出多种新兴无位置传感器控制算法。一是模糊控制与神经网络算法，无需依赖电机精确数学模型，有较强自学习与自适应能力，可精准估算转子位置与转速，适用于参数漂移与外部干扰多的场景；二是高频注入法，向电机定子注入高频信号，利用凸极特性解算转子位置，在极低速甚至零速工况下估算精度高，弥补传统算法低速性能不足；三是多算法融合方法，结合不同算法优势构建融合估算模型，实现全转速范围高精度控制。

新兴算法虽有良好性能潜力，但存在工程化障碍：模糊控制与神经网络算法需大量训练数据且训练过程复杂；高频注入法会增加电机损耗与噪声，需优化注入信号参数；多算法融合会增加系统复杂度与计算量，对处理器性能要求更高。

3 两轮机器人应用中的关键挑战

3.1 低速与零速工况下的估算精度问题

低速与零速运行是两轮机器人的典型工况之一，如服务机器人的缓慢移动、巡检机器人的定点观测等。在该工况下，PMSM的反电动势信号极其微弱，甚至趋近于零，基于反电动势的传统算法（如反电动势法、SMO法、

MRAS 法) 均会面临估算精度大幅下降的问题。高频注入法虽能在低速与零速工况下实现精准估算, 但会增加电机损耗与噪声, 且对电机的凸极特性有一定要求, 在表贴式 PMSM 中的应用效果有限。如何在不显著增加系统损耗的前提下, 提升低速与零速工况下的估算精度, 是两轮机器人无位置传感器控制面临的首要挑战。

3.2 动态工况下的响应速度问题

两轮机器人在快速转向、避障、负载突变等动态工况下, 电机的电磁转矩、转速与定子电流会发生剧烈变化, 要求无位置传感器算法具备快速的动态响应能力, 及时跟踪转子状态的变化。传统 SMO 算法因滑模抖振的存在, 动态响应速度受限; MRAS 算法受自适应律调节速度的影响, 难以快速跟踪转子状态的突变; 卡尔曼滤波类方法因计算复杂度高, 存在一定的运算延迟, 动态响应性能不足。如何平衡估算精度与动态响应速度, 提升算法在动态工况下的跟踪性能, 是保障两轮机器人运动稳定性的关键。

3.3 复杂环境下的鲁棒性问题

两轮机器人常运行在粉尘、振动、高低温等复杂环境中, 这些环境因素会导致电机参数(如定子电阻随温度升高而增大、电感随磁路饱和而变化)发生漂移, 同时会引入大量的外部干扰信号(如电流采样噪声、电压波动)。传统算法对电机参数漂移与外部干扰的抑制能力有限, 易出现估算精度下降甚至系统失稳的问题。如何提升算法的鲁棒性, 使其在参数漂移与外部干扰下仍能保持稳定的估算性能, 是拓展两轮机器人应用场景的重要前提。

3.4 工程化实现的复杂度问题

无位置传感器控制算法的工程化实现涉及算法设计、参数调试、硬件适配等多个环节, 存在较高的复杂度。一方面, 改进算法与融合算法的计算量较大, 对两轮机器人的主控芯片运算能力提出了较高要求, 需在算法精度与计算复杂度之间进行权衡; 另一方面, 算法的参数(如 SMO 的滑模增益、MRAS 的自适应增益、卡尔曼滤波的噪声协方差矩阵)调试依赖丰富的工程经验, 缺乏通用的调试方法与工具, 增加了工程化实现的难度。如何简化算法的工程化实现流程, 提升算法的实用性, 是推动无位置传感器控制技术在两轮机器人中广泛应用的重要保障。

4 未来发展趋势展望

单一算法难兼顾全转速、动态工况和复杂环境性能需求, 多算法融合是未来核心趋势。结合不同算法优势可性能互补, 如高频注入法与 SMO 算法、MRAS 算法与卡尔曼滤波算法融合。未来融合算法注重轻量化设计, 优化结构、简化流程, 降低对处理器要求, 推动工程化应用。随着人工智能发展, 模糊控制、神经网络等智能化算法在无位置传感器控制应用更深入, 引入深度学习、强化学习算法及边缘计算技术, 推动该技术向自适应等方向发展。硬件与算法协同优化是提升性能重要途径, 高性能硬件平台为算法运行提供支撑, 优化硬件电路设计提升信号采样精度, 未来注重硬件与算法匹配设计。为推动无位置传感器控制技术在两轮机器人应用, 标准化与工程化是重要方向, 建立统一评价标准, 开发通用调试工具和方案, 形成专用算法库, 提供标准化解决方案。

5 结论

无位置传感器控制技术是提升两轮机器人驱动系统性能、推动其小型化与高可靠性发展的核心技术之一。本文系统综述了反电动势法、SMO 法、MRAS 法、卡尔曼滤波类方法及新兴算法的研究进展, 分析了各类算法的优势与不足; 深入探讨了两轮机器人应用中面临的低速估算精度、动态响应速度、复杂环境鲁棒性及工程化实现等关键挑战; 最后展望了多算法融合化、智能化优化、软硬件协同及标准化推进的未来发展趋势。

现有无位置传感器控制算法已在中高速工况下实现了较好的性能, 但在低速复杂工况与工程化应用方面仍存在较大的提升空间。未来需重点聚焦多算法融合与智能化优化技术, 强化硬件与算法的协同设计, 推进算法的标准化与工程化进程, 为两轮机器人驱动技术的升级提供更优质的解决方案。

参考文献

- [1] 陈娜, 冯勇, 史宏宇. 基于 FOC 的永磁同步电机速度控制器参数优化设计[J]. 伺服控制, 2011(8): 29-32.
- [2] 吴丽红, 冯琢成, 李东凯, 等. 一种基于 FOC 与 PID 算法的无刷电机的驱动设计与实现[J]. 科技创新与应用, 2021, 000(008): 127-129.
- [3] 乞林峰. 基于 FOC 的爬壁机器人 PMSM 控制器的研究与设计[D]. 福建工程学院, 2023.

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。