

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202603003

新型发射方式中永磁同步电机控制方法综述

陈桂明, 许令亮*, 茶正忠, 王保成

(火箭军工程大学, 西安 710025)

摘要: 在军事科技快速发展背景下, 导弹新型发射方式对驱动系统性能提出了更高要求。永磁同步电机(permanent magnetic synchronous motor, PMSM)因其高功率密度、高效率及优异动态响应特性, 在新型发射系统中得到广泛应用, 其控制策略直接影响系统整体性能与可靠性。针对不同发射场景对电机控制性能的差异化需求, 从转速外环、电流内环、转速-电流一体化单环控制及无传感器控制4个层面, 对PMSM控制方法进行了系统综述。在转速外环控制方面, 对自抗扰控制、滑模变结构控制及预测控制等方法进行了分析, 这些方法在提升系统抗扰能力和动态响应方面具有显著优势; 在电流内环控制方面, 对滞环控制、反馈线性化控制、无模型及机器学习控制等方法进行了梳理, 不同方法在控制精度与实现复杂度之间呈现出不同权衡关系; 在转速-电流一体化控制方面, 分析了无源控制、模型预测控制及反步控制等方法在简化控制结构与提升动态性能方面的应用潜力; 在无传感器控制方面, 对基于基波数学模型和高频信号注入方法进行了对比分析, 揭示了其在不同转速区间的适用特性。最后, 对不同控制方法的优缺点及适用场景进行了梳理总结, 并探讨了PMSM控制技术的发展趋势。

关键词: 永磁同步电机; 转速控制; 电流控制; 一体化控制; 无传感器控制

中图分类号: V242

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2026)03-0037-19



听语音
与作者互动
聊科研

随着科学技术飞速发展与新军事变革加速演进, 战争形态快速演变, 未来作战中人员、装备、物资、信息、时间、空间、环境等不确定因素增多, 各要素频繁交互与流动, 已成为现代战争的重要特征, 推动现代战争逐步向信息化、无人化、体系化和智能化等方向发展。多域多源体系化战争下, 导弹发射平台面临全方位侦察探测和打击威胁, 传统单一导弹发射平台难以满足现代化战争中高效、灵活的实战化要求。因此, 需要发展电磁发射、无人发射等新型发射方式。电磁能等新能源和新动力发射技术, 具备无热烧蚀、发射温度低、模块化程度高、能量精准可控、全电无辐射且红外隐身效果好、结构设计简单等优点, 能够满足快速多波次打击、防侦察抗打击等能力要求, 推动导弹装备形成高效、多样和多形态发

展态势, 便于牢牢掌握战争主动权^[1-2]。导弹电磁发射作为一种新型发射方式, 驱动系统起着至关重要的作用, 电机作为驱动系统的核心, 将电磁能转化为机械能, 通过推力装置, 推动导弹武器装备发射。因此电机驱动控制性能直接影响电磁发射系统的功能, 甚至研发的成败。电机驱动系统的典型应用场景如图1所示。

然而, 新型发射方式在具备显著优势的同时, 也面临着一系列严峻挑战。从动力驱动层面来看, 新型发射方式对驱动系统的性能提出了极为严苛的要求。例如, 在快速响应发射过程中, 驱动系统需要在极短的时间内实现从静止到高速运转的加速, 同时还要保证加速过程的平稳性和精确性, 以避免对导弹内部精密仪器造成损坏; 在复杂环境下的机动发射中, 驱动系统要具备良好的环境

收稿日期: 2026-04-04

修回日期: 2026-05-11

录用日期: 2026-05-18

第一作者: 陈桂明(1966—), 男, 教授, 主要从事装备管理与应用研究。

*通信作者: 许令亮(1994—), 男, 讲师, 博士, 主要从事电机控制及体系效能评估研究。

引用格式: 陈桂明, 许令亮, 茶正忠, 等. 新型发射方式中永磁同步电机控制方法综述[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40(3): 37-55. CHEN Guiming, XU Lingliang, CHA Zhengzhong, et al. Review of control methods for permanent magnetic synchronous motors in new launching modes[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40(3): 37-55.

适应性,能够在高温、低温、强振动、强电磁干扰等恶劣条件下稳定可靠地运行;此外,为了满足导弹小型化、轻量化的发展趋势,驱动系统还需要具备高功率密度和高效能的特点,以在有限空间内提供足够的动力输出^[3-4]。

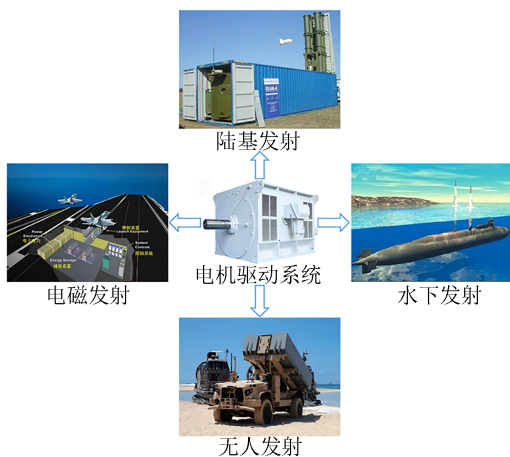


图 1 电机驱动系统的典型应用场景

Fig. 1 Typical application scenarios of the motor drive system

常用电机按照结构及工作原理可分为感应电机、直流电机与同步电机 3 类,表 1 综合对比了不同类型电机的主要性能与特点^[5]。其中,磁阻电机和永磁同步电机(permanent magnetic synchronous motor, PMSM)属于同步电机。

表 1 不同类型电机主要性能与特点比较^[5]

Table 1 Comparison of main performance and characteristics of different types of motors^[5]

性能	感应电机	直流电机	开关磁阻电机	永磁同步电机
成本	低	高	低	高
功率密度	一般	差	一般	高
效率	85%~95%	75%~89%	85%~93%	95%~97%
结构	简单	一般	一般	简单
尺寸及质量	大、重	小、轻	小、轻	小、轻
转矩特性	中	中	一般	优
综合性能	良	中	良	优

在众多可供选择的驱动电机类型中, PMSM 凭借其显著优势脱颖而出,成为导弹新型发射系统动力驱动环节的理想选择。PMSM 功率密度高,能够以较小体积和重量输出较大功率,对于满足导弹小型化、轻量化的设计要求至关重要。此外,其高效率特性可以有效降低能量损耗,提高能源利用率,延长导弹的续航能力;宽调速范围使得

电机能够在不同的工况下灵活调整转速,满足导弹发射过程中各种复杂的速度需求;良好的动态响应特性则保证了电机能够快速准确地响应控制指令,实现高速且精确地加速和减速,为导弹的快速发射和精确制导提供有力支持。

不同发射方式对驱动系统的性能需求存在显著差异:在电磁发射场景中,系统通常要求电机在极短时间内实现高加速度启动,对控制系统的快速响应能力和动态性能提出了极高要求;在机动平台发射或无人发射场景中,系统则更关注控制的鲁棒性与环境适应能力;在隐身及高可靠性发射任务中,无传感器控制技术则更具有应用价值。因此,所讨论的 PMSM 控制方法并非面向一般工业调速系统,而是围绕新型发射系统中驱动电机可能面临的高动态启动、短时大功率输出、强振动冲击、强电磁干扰、平台小型化以及弹载控制器算力受限等典型任务需求展开。后文对各类控制方法的分析,均以其在发射场景中的适用性和工程约束为主要评价依据。

由于 PMSM 在导弹新型发射系统中的关键作用,其控制性能的优劣直接决定了整个发射系统的性能表现、运行稳定性以及可靠性。高效、精确、鲁棒性强的电机控制系统能够确保电机在各种复杂工况下稳定运行,准确实现预期的运动控制目标,从而保障导弹新型发射方式的成功实施。反之,如果电机控制系统存在缺陷或性能不足,可能会导致电机运行不稳定、转速波动大、转矩输出不准确等问题,进而影响导弹的发射精度、飞行稳定性,甚至导致发射任务的失败。因此,对其控制方法的研究具有重要的理论意义和实际应用价值。为了更好地满足导弹新型发射方式对驱动系统的严苛要求,国内外学者通过不断探索和创新控制方法,有效提升了电机的控制精度、动态响应速度和鲁棒性。

在转速外环控制方面,自抗扰控制、滑模变结构控制与预测控制等先进控制策略得到了广泛应用。这些方法通过有效估计和补偿系统内部不确定性与外部干扰,显著增强了系统对复杂工况的适应能力,提升了动态响应速度与稳态精度。在电流内环控制方面,滞环控制、反馈线性化控制、无模型及机器学习控制等技术不断发展,在电流精准跟踪、谐波抑制以及非线性补偿等方面发挥了重要作用,有助于实现对电机电流的高精度控制,进而优化电机的电磁转矩输出特性。此外,为了进一步简化系统控制结构、提高控制效

率, 转速-电流一体化单环控制成为研究热点, 无源控制、模型预测控制及反步控制等方法的集成应用与协同优化策略, 取得了阶段性进展。在位置环方面, 无传感器控制方法日益发展, 其中, 基于基波数学模型控制与基于高频信号注入控制能够在不依赖物理位置传感器的情况下, 精确获取电机转子的位置与速度信息, 有效解决了传统传感器在导弹恶劣工作环境下的可靠性问题, 降低了系统成本与体积。

然而, 现有的控制方法在应用于导弹新型发射方式中的永磁同步电机时, 仍存在一些不足之处。例如, 部分控制方法在面对导弹发射过程中的极端工况和强干扰时, 鲁棒性有待进一步提高; 一些复杂的控制算法对硬件计算资源要求较高,

难以在弹载有限的硬件平台上实现实时控制; 此外, 不同控制方法之间的协同优化和集成应用还不够完善, 未能充分发挥各种控制方法的优势。因此, 仍需对PMSM控制方法进行深入研究, 探索更加适合导弹新型发射方式的先进控制策略。

针对上述问题, 本文在现有研究基础上, 从控制环节角度对PMSM控制方法进行分类, 将PMSM控制分为转速外环控制、电流内环控制、转速-电流一体化单环控制和无传感器控制(位置环控制), 如图2所示。分别对4种控制方法进行综述, 同时, 结合新型发射场景对控制性能的需求, 对不同控制方法的特点及适用场景进行对比分析, 并进一步总结PMSM控制策略的设计思路与发展趋势。

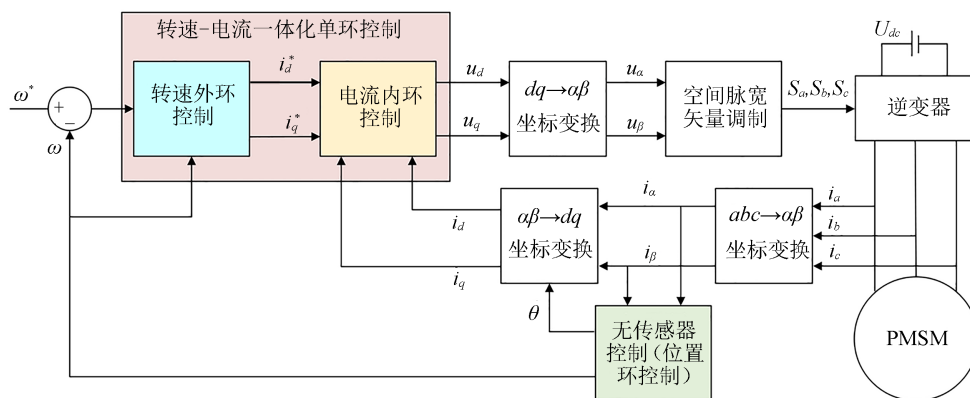


图2 PMSM控制系统

Fig. 2 PMSM control system

1 PMSM转速外环控制研究现状

在新型发射系统中, 转速外环控制直接决定电机的动态响应能力和速度调节性能。在电磁发射等高动态场景中, 电机需要在极短时间内完成快速加速, 这对转速控制的响应速度和抗扰能力提出了较高要求。但在复杂工况下, PMSM参数会发生变化, 导致原有模型与实际模型不匹配, 参数鲁棒性和控制性能降低。此外, PMSM在运行中会受到负载突变、谐波转矩和齿槽转矩等多种不确定性扰动的影响, 导致其抗干扰能力和跟踪精度下降。对于新型发射系统而言, 转速外环控制的重点不仅是获得一般意义上的转速跟踪性能, 而是要满足发射任务中短时间快速加速、负载突变抑制和复杂环境下稳定运行等要求。因此, 本章对自抗扰控制、滑模变结构控制和预测控制的分析, 重点关注其高动态发射、强扰动和参数不确定条件下的适用性。

1.1 自抗扰控制

自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)由韩京清于1998年提出, 沿袭了比例积分微分控制误差反馈的核心观点, 并结合了现代控制理论, 是一种不依赖被控对象精确模型的数字控制技术^[6]。ADRC主要包含跟踪微分器、扩张状态观测器(extended state observer, ESO)和非线性误差反馈控制器3个部分, 其结构如图3所示。跟踪微分器的作用是安排过渡信号, 解决超调和响应之间的矛盾, 避免初始误差较大以得到光滑曲线; ESO通过构造扩张状态量, 跟踪被控对象的未知和已知扰动, 并进行补偿; 非线性误差反馈控制器通过跟踪微分器给定的信号与ESO估计的状态信号之间的差值, 利用非线性组合方式, 得到控制量。该方法通过对系统总扰动的实时估计与补偿, 在一定程度上降低了对精确数学模型的依赖, 能够显著提升系统的抗扰能力与鲁棒性, 尤其适用于发射过程中存在参数不确

定性和外部扰动较强的应用场景。然而,其控制参数整定过程较为复杂,在高频动态响应要求较高的场合可能存在一定滞后。

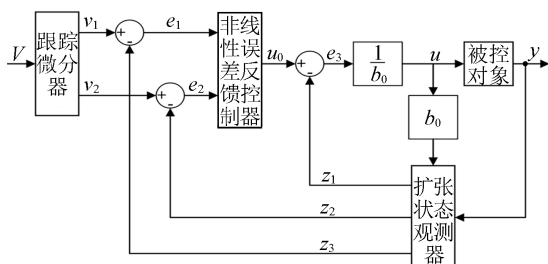


图3 自抗扰控制基本结构

Fig. 3 Basic structure of active disturbance rejection control

为增强PMSM在复杂工况下的抗扰与速度跟踪能力,谢浩然等^[6]提出基于级联线性-非线性自抗扰控制器的速度控制策略。构建了含负载扰动和参数失配的数学模型,设计了级联扩张状态观测器,融合了前级线性观测器确保大扰动下系统稳定、后级非线性观测器利用非线性机制提升扰动估计精度的优势;此外,还给出了基于劳斯判据的稳定性分析方法,并开展频域分析,通过仿真实验验证了所提策略在提升系统速度跟踪及抗扰动性能上的优越性。康劲松等^[7]采用线性自抗扰控制器取代传统转速外环比例积分控制器展开优化设计,有效提升了转速外环的控制精度,增强了抗负载扰动的能力,还解决了传统比例积分控制器超调与动态响应速度难以平衡的矛盾;鉴于传统线性自抗扰控制器存在非线性函数求解不易、参数整定繁琐的问题,又提出基于积分补偿的线性自抗扰控制器转速外环设计方法,有效解决了动态响应慢、抗扰性能差等难题。Jiang等^[8]聚焦于PMSM受时变总干扰影响的非线性系统跟踪控制难题,提出一种基于加性状态分解的级联线性自抗扰控制方法,借助加性状态分解技术,将原始系统等效拆解为标称的主系统和存在不确定性的次系统,主系统消除扰动精准跟踪,次系统抑制残余扰动。该方法的解耦控制器分量可独立调参,引入线性扩张状态观测器,经仿真和实验验证其对PMSM调速有效且优越。由于在基于ESO的ADRC框架里,抗干扰鲁棒性与测量噪声敏感性难以平衡,Cao等^[9]针对PMSM速度控制,提出新型变结构ADRC,采用含两级互联观测器的变结构ESO,避免直接使用含噪信号,通过附加扩展干扰微分提升干扰估计,全面研究该方法的稳定性与输出特性,通过仿真实验验证了所提方法

的有效性。以上方法在复杂工况下具有较强的适应能力,但其工程应用仍需在控制性能与实现复杂度之间进行权衡。

1.2 滑模变结构控制

20世纪50年代初,Emelyanov等首次提出滑模变结构控制,经Utkin等的不断扩展完善,现已发展成为非线性控制中自成体系的综合控制方法。滑模变结构控制是一种非线性方法,主要特点为结构的可变性与控制的不连续性。这类控制策略的系统结构可以根据系统当前状态动态变化,使得系统按照设定的滑动模态运行^[10-11],其收敛过程如图4所示。由于滑动模态的结构设计不涉及系统参数和扰动,因此具有较快的动态响应和较强的鲁棒性,特别适用于高动态发射场景。然而,该方法由于控制信号的不连续性,容易引入抖振现象,可能对系统稳定性和执行机构产生不利影响。

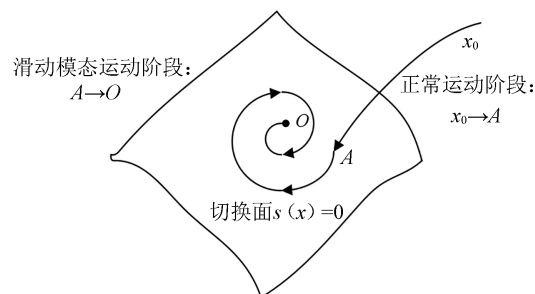


图4 滑模变结构系统收敛过程

Fig. 4 Convergence process of sliding mode variable structure system

为提高PMSM对参数变化和外部扰动的鲁棒性,解决传统滑模变结构中超调量大、响应速度慢以及抖振等问题,禹聪等^[10]提出模糊滑模速度控制方法,通过系统状态变量趋近滑模面的距离与滑模增益参数之间的关系,引入模糊逻辑,设置模糊规则,加快系统收敛速度,利用连续sigmoid函数替代不连续sgn函数,减小了系统抖振,系统状态切换更加平滑。于艳君等^[11]提出分数阶超螺旋滑模控制方法,针对PMSM的已知和未知扰动,构建广义超螺旋观测器,提高转速跟踪精度和扰动估计准确度,还将分数阶理论引入到终端滑模控制中以设计出有限时间内收敛的分数阶超螺旋滑模控制器。Junejo等^[12]提出基于终端滑模的PMSM转速控制方法,将新型自适应终端滑模趋近率引入到连续快速终端滑模控制中以跟踪速度变化。同时,设计了扩展滑模扰动观测器,估计并前馈补偿扰动误差,并利用Lyapunov函数证明了所提控制器的稳定性。Tang等^[13]提出改进的

位置速度集成滑模变结构控制器, 采用基于位置误差和饱和函数的变指数趋近律, 以及基于速度误差和轨迹规划的限速方法, 有效提高了定位响应, 减少了抖振, 且瞬态限速能力强。可以看出, 滑模变结构控制在提升系统动态性能方面具有明显优势, 但在实际应用中通常需要结合改进算法以减弱抖振问题。

1.3 预测控制

现实中的复杂工程系统通常具有非线性、强耦合性、不确定性和时变等特点, 导致其数学模型不精确、受扰动影响明显、控制性能降低, 难以满足实际需求。面对控制理论与实际应用不匹配问题, 20 世纪 70 年代初, 学者们从工业实际出发, 凝练和优化启发式控制算法, 逐步形成一种基于模型的先进控制方法, 即预测控制^[14], 其在转速外环的控制结构如图 5 所示。预测控制对数学模型精度要求不高, 能够根据系统历史状态信息和当前时刻状态信息, 利用反馈校正、滚动优化和参考轨迹等, 预测未来输出值。随着电力电子器件、微处理器等技术的快速发展, 预测控制被越来越广泛地应用于工业传动领域。在反馈校正阶段, 实际控制系统因不确定性、非线性、模型失配和外部扰动等原因, 基于模型的预测结果与实际结果之间会存在偏差, 因此, 需对模型预测结果进行修正。在滚动优化阶段, 预测控制通过某一性能指标, 利用滚动式有限时域优化策略, 反复进行在线优化, 直至达到相对于该时刻的局部性能优化指标。在参考轨迹阶段, 考虑控制系统的动态变化, 避免出现输入和输出的急剧变化, 通常要求过程输入沿着参考轨迹平稳趋近设定值。该方法能够在考虑系统约束条件的基础上实现优化控制, 在复杂工况下具有较高的控制

精度和动态性能。然而, 其计算复杂度较高, 对处理器性能和实时性要求较高。因此, 在工程应用中需综合考虑计算复杂度与控制性能之间的关系。

预测控制方法在电机系统中应用广泛, 显著提升了电机控制性能。然而, 电机参数失配等问题会严重影响预测控制系统的运行性能, 甚至导致系统不稳定。牛峰等^[14]以 PMSM 为研究对象, 鉴于传递函数和 Lyapunov 理论的局限, 提出基于状态方程的模型预测转速控制系统运行稳定性分析方法, 揭示了参数失配对稳定运行区域的影响规律及边界条件。研究表明电感与转动惯量影响显著, 并通过搭建的实验平台验证了结论, 为电机稳定运行及模型预测控制理论应用提供了支撑。为克服模型失配和外部扰动的影响, 降低系统稳态误差, Yang 等^[15]提出一种新型代价函数的模型预测直接转速控制方法, 分析了新型代价函数中 q 轴参考电流的作用, 并通过设计转速误差作为权重因子, 确定了不同工作条件下起主要作用的参考电流。针对传统有限控制集模型预测控制存在的稳态纹波大、总谐波失真高、计算复杂度高等问题, Yahia 等^[16]提出增强型模型预测直接转速控制, 采用双阶段成本函数结构, 第一成本函数通过预测控制转速误差来优化动态响应, 第二成本函数通过调整有功-零电压矢量的占空比来自适应地最小化转矩纹波和谐波失真, 无需手动调整权重。通过以上文献可以看出, 模型预测控制在高性能控制领域具有良好应用前景, 但其对模型精度和计算资源的依赖仍是限制其进一步推广的重要因素。为进一步分析不同转速外环控制方法的特点, 对自抗扰控制、滑模变结构控制及模型预测控制等方法的优缺点及适用场景进行了对比, 如表 2 所示。可以看出, 不同控制方法在动态性能、鲁棒

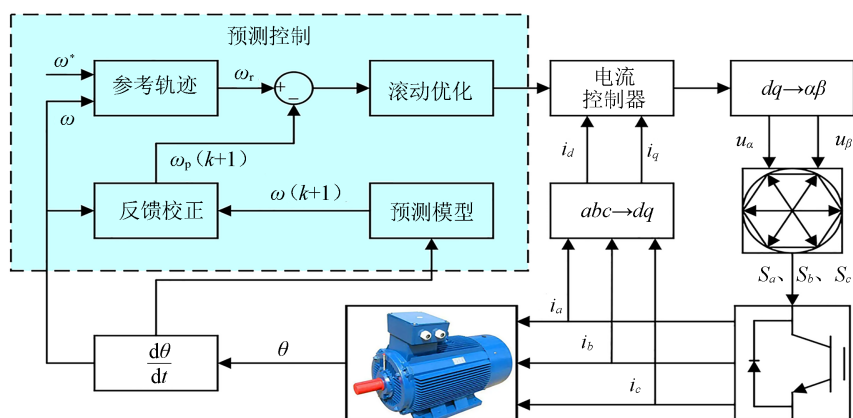


图 5 基于预测控制的转速外环控制结构

Fig. 5 Speed outer-loop control structure based on predictive control

较大, 可以减小开关频率和元件损耗, 但会降低跟踪精度和对谐波的补偿效果; 若设置的带宽较小, 可以提高电流跟踪精度和补偿效果, 但会增加开关频率, 加大元件损耗。该方法结构简单、动态响应速度快, 在对响应速度要求较高的场合具有一定优势。然而, 由于其开关频率不固定, 容易导致电流波动较大, 从而增加系统损耗并对电机运行产生一定影响, 因此, 其在高精度控制场景中的应用受到一定限制。

为了改善稳态电流性能并抑制零序电流, Chinaeke-Ogbuka 等^[17]提出一种基于简化滞环电流控制的鲁棒滑模控制方法, 设计了简化滞环电流控制方案用于外部电流控制, 以生成逆变器开关的门控信号, 利用滑模控制抑制系统转速误差的优点, 消除建模不确定性和干扰, 将系统转速误差归零。Dong 等^[18]提出改进的零序电流滞环控制空间矢量调制策略, 旨在提升现有策略的线性调制范围。通过重新选择每个扇区的候选电压矢量, 在扩展可行域内采用 3 个有效电压矢量, 保证零序电流滞环控制的同时, 其线性调制范围与中间六边形空间矢量调制相同。Zhang 等^[19]提出一种降低零序电流纹波的改进型零序电流滞环控制空间矢量调制方法, 在保持线性调制范围不变的前提下, 分析不同矢量选择下的零序电压输出特性, 通过融合两种矢量选择方法, 显著减少每个控制周期的零序电压输出, 从而有效抑制零序电流纹波, 无需参数整定, 可避免高基波调制比下的过调制, 且易于实现。通过以上文献可以看出, 滞环控制更适用于对动态响应要求较高但对电流波形质量要求相对较低的应用场景。

2.2 反馈线性化控制

反馈线性化控制是利用微分几何框架, 将状

态反馈引入到非线性控制系统, 使得闭环控制线性化, 若闭环系统仍为非线性, 则可以建立新坐标体系或者进行非奇异变换, 使得闭环系统线性化^[20]。通常, 反馈线性化是将状态方程线性化, 运用状态变换和反馈理论, 将非线性动力学系统转化为线性动力学系统。与泰勒级数展开、雅可比矩阵线性化等传统近线性化方法不同的是, 反馈线性化是通过精确的数学模型, 来实现输入-输出反馈和状态变换。通过反馈线性化控制将非线性控制系统转化为线性控制系统, 再利用数学方法进行分析和求解, 这个过程较为直观和简单, 如图 7 所示。该方法通过精确的数学建模实现系统的非线性解耦, 能够显著提升控制精度和动态性能。然而, 其性能高度依赖于系统模型的准确性, 当参数存在不确定性或外部扰动较大时, 控制效果可能受到影响, 因此, 其在复杂发射环境中的应用需结合鲁棒控制方法进行改进。

为了解决励磁电流、电枢电流和机械角速度之间的非线性强耦合、参数和负载扰动等干扰问题, 张康等^[20]提出了基于反馈线性化的自适应动态滑模控制, 通过坐标变换与状态反馈, 将电机仿射非线性模型解耦为独立的电流子系统和线速度子系统, 并在此基础上设计动态滑模控制器, 以降低对精确数学模型的依赖并增强系统鲁棒性。同时, 引入自适应控制律对不确定性扰动进行估计, 有效抑制滑模抖振。Lu 等^[21]提出了一种基于负载观测器的积分滑模复合非线性反馈控制方法, 将在改善瞬态响应性能方面有优势的复合非线性反馈控制和在改善系统鲁棒性方面有优势的积分滑模控制相结合, 通过使用滑模观测器来避免未知的外部干扰影响, 引入模糊控制来减少抖振, 结合负载观测器来补偿负载突变和大范围负载变

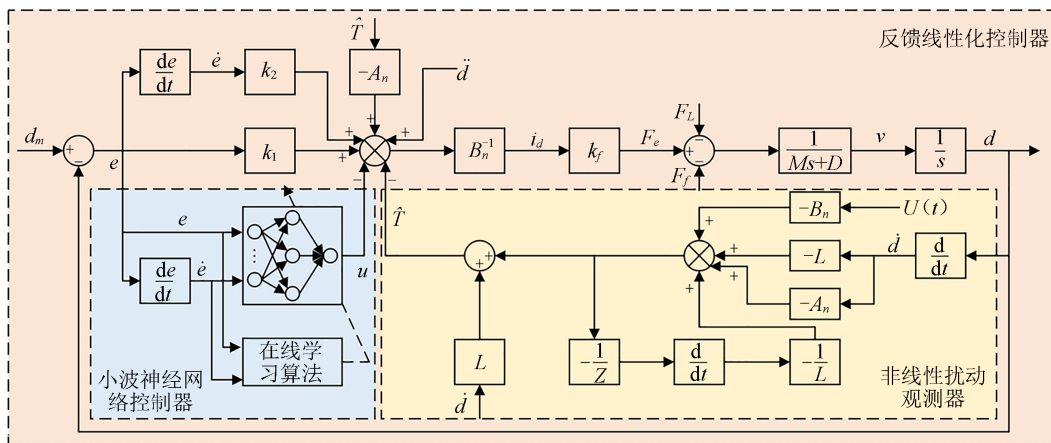


图 7 基于小波神经网络和非线性扰动观测器的反馈线性化控制结构

Fig. 7 Feedback linearization control structure based on wavelet neural network and nonlinear disturbance observer

化对控制系统的影响。Sitharthan 等^[22]提出了一种基于自适应神经网络的反馈线性化控制方法,以降低 PMSM 的转矩脉动和电流谐波;利用定子磁通位置和转矩产生开关脉冲,用于采用自适应神经网络控制策略的逆变器,修改脉宽调制,改变逆变器开关模式,在不同工况下,可以将 PMSM 的电枢电流控制在不同的阶数和相应的时间谐波。综上,反馈线性化控制适用于模型已知且运行工况相对稳定的场景,但在强扰动环境下需要进一步优化。

2.3 无模型及机器学习控制

近年来,随着数据驱动控制和人工智能技术的发展,无模型控制及机器学习控制逐渐成为 PMSM 控制领域的重要研究方向。传统控制方法通常依赖电机精确数学模型,而 PMSM 在新型发射系统中往往面临参数时变、负载突变、强扰动及运行环境复杂等问题,容易出现模型失配现象。

无模型控制方法不完全依赖电机电阻、电感、磁链等精确参数,而是通过输入输出数据、在线辨识或强化学习机制直接构建控制律,从而提高系统对参数变化和未知扰动的适应能力^[23]。从控制思想上看,无模型控制可分为基于数据驱动、无电机参数预测控制以及基于强化学习的无模型控制等类型。其中,数据驱动无模型控制主要利用系统运行数据建立输入输出映射关系,避免复杂建模过程;无电机参数预测控制则通过弱化或消除预测模型中对电机参数的依赖,提高模型预测控制在参数摄动条件下的鲁棒性;强化学习控制则通过智能体与电机系统之间的交互学习控制策略,能够在未知模型或模型不确定条件下实现控制性能优化。

机器学习方法在 PMSM 控制中的应用主要体现在参数辨识、扰动估计、控制器参数优化和控制策略选择等方面,其 PMSM 抗干扰智能控制结构如图 8 所示。

神经网络可用于逼近电机系统中的非线性项和未知扰动,模糊控制可改善复杂工况下控制器参数整定问题,遗传算法、粒子群算法等智能优化算法可用于控制参数寻优,支持向量机和 Q 学习等方法则可用于不同控制策略的分类、选择与在线优化。与传统控制方法相比,机器学习方法在处理非线性、强耦合和参数不确定问题时具有较大优势,但也存在训练样本依赖性强、稳定性证明困难、计算资源消耗大和工程可解释性不足等问题^[24]。为了提高动态响应速度,实现电流完全解耦,增强系统鲁棒性,Lu0 等^[25]提出了一种基于遗传算法的 PMSM 矢量控制方法,利用定子电流和电压来开发解耦 PMSM 驱动器,采用极点配置和遗传算法设计了 d 、 q 轴定子电流控制器和速度控制器。陈桂明等^[26]针对电机参数漂移及内外扰动导致控制性能下降的问题,提出了一种基于非线性扰动补偿的永磁同步电机超局部无模型电流预测控制方法。该方法不依赖电机参数,利用非线性扰动补偿准确估计总扰动并前馈补偿,配合限流控制,表现出了较优的鲁棒性,可实现快速动态响应,减小电流纹波与静差,抑制转速脉动与超调,确保电机平稳运行。Urquiza 等^[27]围绕 PMSM 先进控制策略,在 TI 微控制器开发套件、Boost 逆变器等硬件平台上,对磁场定向控制、电压下垂控制及可调度虚拟振荡器控制等算法进行了实验验证。为进一步提升控制性能,利用支持向量机与 Q 学习实现控制策略的优化选择,并采

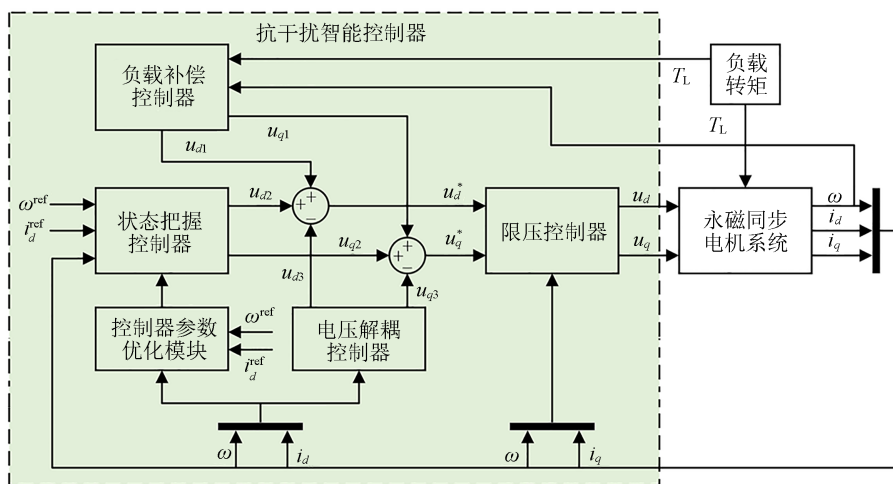


图 8 PMSM 抗干扰智能控制结构

Fig. 8 PMSM anti-interference intelligent control structure

用大语言模型LLAMA3进行动态策略调整。相较于传统方法, 基于人工智能的控制策略在系统效率、运行适应性及稳态精度方面均展现出显著优势。随着人工智能技术的发展, 基于数据驱动的控制方法在PMSM系统中的应用逐渐增多, 具有良好的发展前景。

为进一步分析不同电流内环控制方法的特点, 对滞环控制、反馈线性化控制、无模型及机器学习控制等方法的优缺点及适用场景等进行了对比,

如表3所示。可以看出, 不同控制方法在动态响应性能、控制精度及实现复杂度方面存在明显差异。其中, 滞环控制具有结构简单和响应速度快的优势, 但存在电流波动较大的问题; 反馈线性化控制能够实现系统解耦, 提高控制精度, 但对模型依赖较强; 无模型及机器学习控制具有较强的抗干扰能力, 但稳定性仍需提升。因此, 在新型发射系统中, 应根据具体应用需求, 在控制性能与实现复杂度之间进行权衡选择。

表 3 电流内环控制方法对比

Table 3 Comparison of current inner-loop control methods

控制方法	优点	缺点	适用场景
滞环控制	响应快、结构简单	开关频率不固定、电流波动大	高动态快速发射中对电流快速响应要求高、对电流纹波要求相对较低的工况
反馈线性化控制	精度高、解耦能力强	依赖模型、鲁棒性弱	高精度发射控制中模型参数相对明确、运行区间较稳定的工况
无模型控制	对参数变化适应性强、建模要求低	稳定性分析较复杂、对数据质量敏感	发射过程中电机参数变化明显、模型难以准确建立的复杂工况
机器学习控制	可提升控制器整定效率和工况适应性	依赖样本和计算资源、工程可解释性不足	多发射工况切换、控制参数在线优化及复杂非线性扰动工况

3 PMSM 转速-电流一体化单环控制研究现状

传统PMSM控制系统通常采用转速外环与电流内环构成的级联式双闭环结构, 转速外环控制和电流内环控制单独设计, 分别控制电机的转速和电流, 该结构虽然具有良好的稳态性能, 但在新型发射系统等高动态应用场景中, 由于控制环节较多, 容易引入响应滞后问题, 难以满足快速动态调节需求。为简化控制结构并提升系统动态响应性能, 解决级联双闭环控制的模型不适配、参数调整复杂等问题, 国内外学者利用多种控制方法设计转速-电流一体化控制结构, 如无源控制、模型预测控制和反步控制等。

3.1 无源控制

无源控制是一种非线性鲁棒控制方法, 1989年由法国学者R. Ortega提出, 其核心设计理念是使闭环系统无源。随着该理论的发展与扩充, 逐步应用于PMSM控制^[28-29]。无源控制从传统的信号处理控制转换到能量处理控制, 在描述系统能量输入-输出的前提下, 利用PMSM的闭环系统无源性特点, 建立基于能量成型的端口受控哈密顿数学模型。从能量法思想出发, 配置系统阻尼

能量耗散方程, 借助阻尼无功分量与系统稳定性无关的特点, 使得系统总能量函数快速趋近于期望储能函数, 系统状态渐进稳定于期望值。无源控制器的输出结构如图9所示。无源控制理论与系统全局稳定性和局部最优控制性能密切相关, 具有无奇异点、结构简单的特点, 能够动态处理系统稳定性, 是处理复杂多变、非线性和强耦合性系统的有效手段之一。PMSM数学模型的精确性直接影响着无源控制的性能, 但在实际工作过程中, PMSM的参数会因工作环境等因素发生变化, 导致模型失配; 同时, 系统易受到扰动, 导致无源控制具有一定的局限性。该方法具有较好的理论严谨性和稳定性分析基础, 然而, 其控制性能在很大程度上依赖于系统参数的准确性, 在存在参数扰动或外部干扰时, 控制效果可能下降, 因此, 其在复杂发射环境中的应用仍需进一步优化。

为了充分发挥无源控制的非奇异性和全局稳定优点, 解决因模型失配和扰动导致的控制性能下降的问题, Wang等^[28]提出了一种基于端口受控哈密顿系统和深度确定性策略梯度的PMSM电流约束控制方法, 将阻尼分配无源控制引入到端口受控哈密顿系统, 得到单环设计回路, 控制器结构简单、调整参数少, 但会导致电流过大。为此,

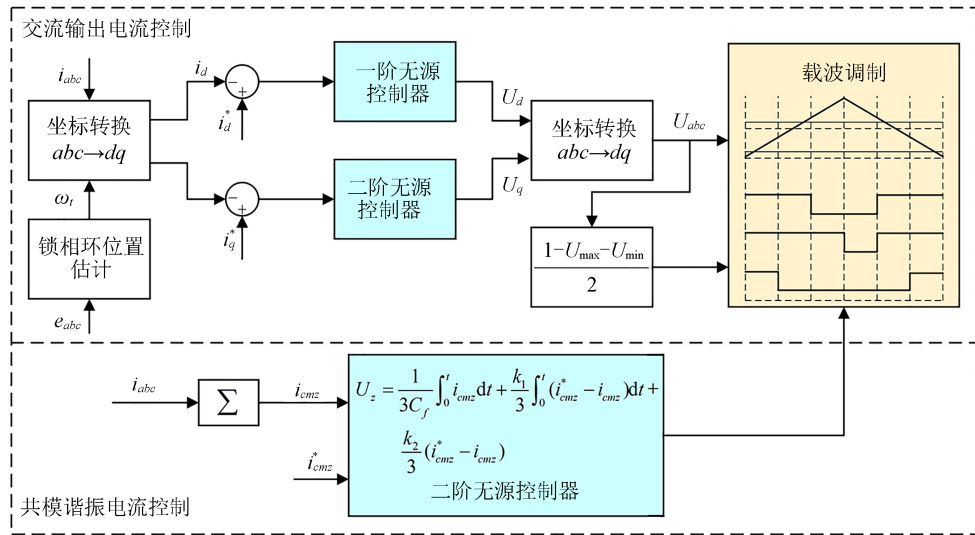


图 9 基于无源控制器的电流正弦化输出结构

Fig. 9 Passive controller-based current sinusoidal output structure

利用深度确定性策略梯度方法，强化学习控制模型，设置阻尼分配矩阵系数以约束过大的电流，并进行了仿真和实验验证。Xu 等^[29]提出了一种基于非线性观测器的互联与阻尼分配无源性控制方法，根据取决于系统状态向量的特殊函数，采用参数化闭环中的能量函数，满足能量创建步骤。将开环中的原始端口控制哈密顿量动力学与闭环中的期望哈密顿量动力学进行均衡，均衡过程中，根据闭环能量函数的参数获得偏微分方程的一组解，并利用 Lyapunov 理论研究了系统的稳定性。Larbaoui 等^[30]通过使用基于无源性控制和滑模控制方法来抑制 PMSM 转速-电流控制中的外部干扰，提高变速驱动性能，提出了基于无源性的 d 、 q 轴电流内环控制器，并利用 Lyapunov 稳定性准则验证了所提控制器的稳定性；同时，将指数趋近率引入到滑模控制方法，以提高系统的鲁棒性。通过以上文献可以看出，无源控制更适用于对系统稳定性要求较高且模型相对准确的应用场景。

3.2 模型预测控制

模型预测控制 (model predictive control, MPC) 作为预测控制方法中的一种，凭借其快速动态响应特性，能够处理多输入-多输出变量约束问题，得到了广泛应用^[31]。MPC 是一种基于控制对象模型的闭环优化控制策略，其通过控制对象的数学模型，离散化得到未来时刻系统状态，将系统当前时刻的测量值或者估计值与未来时刻的输入估计变化值或状态反馈值，纳入到模型预测控制优化求解中，使得代价函数最小。此时，获得最优的控制向量，在每个控制周期将最优控制向量作用于被控对象，使得系统状态沿着参考轨

迹，趋近于理想状态，并将反馈引入到控制策略中，其运行的基本原理如图 10 所示。MPC 通过对系统未来状态进行滚动优化，实现对控制变量的实时调整，在多约束条件下能够获得较优控制性能，特别适用于高动态、高精度控制场景。然而，该方法计算复杂度较高，对控制器实时计算能力要求较高，在实际发射系统中应用时需综合考虑硬件资源与控制性能。

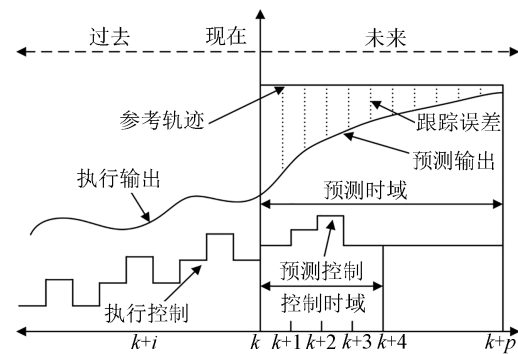


图 10 模型预测控制原理

Fig. 10 Principle of model predictive control

为了解决模型失配和扰动对控制性能的影响，简化控制模型结构，降低参数整定和计算工作量，Zhang 等^[31]提出了一种无电机参数模型以预测电流的控制方法，针对电机 d - q 轴预测模型的不同特性，去除模型中的电阻和磁链参数，设计了一个估计因子替代模型中的电感项，并通过控制率进行实时计算。利用所建立的不含任何电机参数的预测电流模型，可准确选择最优电压矢量以实现电机控制。Zhang 等^[32]又提出了基于特定谐波抑制的 PMSM 驱动模型以预测电流的控制方法，通过所提出的新型谐波预测模型和合成代价函数，对

特定次谐波电流进行预测与抑制, 以降低电流谐波的不利影响。该方法能够显著降低特定次谐波含量, 并减少系统的总谐波畸变率。Wu 等^[33]提出了一种用于模型预测控制的多目标代价函数权重系数设计方法, 以基波电流为基准, 实现了高次谐波与开关次数的统一量化。通过理论推导, 建立了高次谐波、开关频率与基波电流之间的数学关系, 从而降低了电流谐波与开关频率, 提升了模型预测控制的稳定性和动态性能。随着高性能处理器的发展, 模型预测控制在一体化控制结构中的应用前景日益广阔。

3.3 反步控制

反步控制是一种递归设计控制方法, 最初于 1991 年由 Kanellakopoulos 等应用到输出非线性控制系统中; 1994 年, Krstic 等将其应用于参数未知的线性系统中; 1995 年, Krstic 等对反步控制方法进行总结, 建立反步控制结构; 同年, Florchinger 等^[34]利用反步控制解决随机非线性系统问题。随着控制理论和计算机技术的发展, 反步控制逐步与神经网络、模糊控制和自适应控制等方法相结合, 形成完整的反步控制体系, 解决实际生产生活中复杂系统的控制问题。其基本原理是将复杂的高阶非线性系统分解成为低阶子系统, 并对低阶子系统进行 Lyapunov 函数和中间虚拟控制量的设计, 从高阶系统的内核出发, 逐步递归到整个系统, 集成设计满足控制要求的整体控制律, 并不断完善控制律, 实现全局控制性能最优或达到所需的跟踪精度。反步控制方法通过递归设计 Lyapunov 函数实现系统稳定性控制, 具有较好的理论基础和控制精度。然而, 其设计过程较为复

杂, 对系统模型依赖较强, 当存在不确定性或外部扰动时, 需要结合鲁棒控制方法进行改进, 该方法在 PMSM 双闭环系统的应用框架如图 11 所示。

针对低速 PMSM 在周期与非周期扰动下速度波动加剧问题, Wu 等^[34]提出一种反步自适应谐振控制策略, 分析了传统自适应谐振控制器对频率不确定周期性扰动的抑制能力, 针对低速往复运动中的非线性摩擦力矩, 引入基于 LuGre 摩擦模型的反步控制方法以抑制非周期扰动。通过设计双非线性观测器与自适应律, 实现对非线性摩擦力矩及负载力矩的实时估计, 并将估计值补偿至自适应谐振控制器中, 从而增强系统鲁棒性, 显著提升了控制策略的动态响应能力与稳态精度。Chaou 等^[35]提出了一种基于反步控制的 PMSM 非线性控制方法, 通过选择 d 、 q 轴电流的微分状态表达式作为子系统, 选择定子电流作为中间变量来控制转速, 并将中间变量视为虚拟命令, 根据中间变量计算确保 PMSM 转速控制和全局系统稳定性所需的电压命令。同时, 引入新型 Lyapunov 函数, 研究了不同控制参数的模型性能和鲁棒性。Hu 等^[36]提出一种动态预设性能模糊神经网络反步控制方法。通过设计新型有限时间非对称动态预设性能函数, 解决了传统预设性能函数在负载变化时出现的误差超限、控制奇异及系统失稳问题。为应对非线性时变参数与输入约束导致的模型精度下降和控制品质恶化问题, 结合速度函数、模糊神经网络与所提出的动态预设性能函数构建反步控制器, 确保系统暂态与稳态性能, 并通过仿真实验验证了所提控制方案的可行性。综合以上文献可以看出, 反步控制适用于对系统稳定性

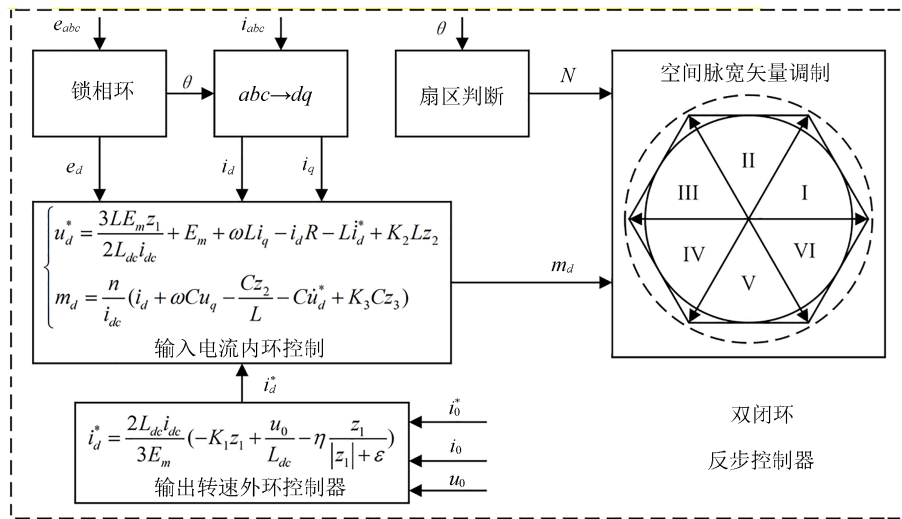


图 11 基于反步控制的 PMSM 双闭环系统结构

Fig. 11 Backstepping control-based PMSM dual closed-loop system

和控制精度要求较高的场景，但其工程实现复杂度较高。

为进一步分析不同转速-电流一体化控制方法的特点，对 3 种控制方法的优缺点及适用场景进行了对比，如表 4 所示。

表 4 转速-电流一体化单环控制方法对比
Table 4 Comparison of integrated single-loop control methods

控制方法	优点	缺点	适用场景
无源控制	稳定性强、理论严谨	依赖模型	对系统稳定性要求较高、模型参数相对明确的发射驱动工况
模型预测控制	性能优、可处理约束	计算量大	高动态快速发射、多约束快速响应工况
反步控制	稳定性好、精度高	设计复杂	高精度发射控制、转速-电流协同控制精度要求较高的工况

由表 4 可以看出，转速-电流一体化控制方法通过减少级联控制环节，可在一定程度上降低传统双闭环结构带来的响应滞后问题，在提升系统动态响应性能方面具有明显优势，尤其适用于新型发射系统等高动态应用场景。不同控制方法的侧重点存在差异：无源控制基于系统能量成型思想，具有稳定性强、理论严谨等优点，适用于对系统稳定性要求较高且模型参数相对明确的发射驱动工况，但其控制性能对模型精度依赖较强；模型预测控制能够处理多变量约束和滚动优化问题，在高动态快速发射及多约束快速响应工况中具有较好的应用潜力，但计算量较大；反步控制具有较好的稳定性分析基础和控制精度，适用于转速-电流协同控制精度要求较高的场景，但设计过程和工程实现相对复杂。在新型发射系统应用中，转速-电流一体化控制可作为传统双闭环结构的重要补充方案，但具体方法的选择仍需综合考虑模型精度、参数整定难度、稳定性需求和平台实时计算能力。

4 PMSM 无传感器控制研究现状

PMSM 高性能控制通常需要获取转子的位置和转速信息，但是传统机械式传感器的安装，会增加系统的尺寸、体积和重量等，严重限制电机小型化的发展。此外，有些传感器对工作环境要求严格，测量精度受环境影响较大，并且增加了电气元件连接数目，抗干扰性能降低。对于导弹

新型发射平台而言，位置传感器不仅会增加系统体积、质量和布线复杂度，还可能在强振动、强电磁干扰和温度剧烈变化等环境下影响可靠性。与传统基于位置传感器的控制方法相比，无传感器控制能够减少硬件成本并避免传感器在高温、高振动等恶劣环境下失效的问题。因此，主要从小型化、轻量化和恶劣环境适应性的角度对无传感器控制进行分析。此外，由于不同无传感器控制方法在不同转速区间的性能差异较大，有必要对其适用范围进行分析，主要包括基于基波数学模型和基于高频信号注入等无传感器控制方法。

4.1 基于基波数学模型控制

基于基波数学模型的无传感器控制通过检测三相绕组中的定子电流和反电动势，利用控制算法提取转子位置和转速信息。PMSM 在中高速运行时，检测的定子电流和反电动势准确度较高，因此，这类方法依赖于 PMSM 数学模型^[37]。目前常用的基于基波数学模型控制方法包括模型参考自适应控制和扩展卡尔曼滤波器控制。基于基波数学模型控制方法在中高速运行区间能够获得较好的位置估计精度，且实现相对简单，具有较好的工程应用基础。然而，在低速甚至零速工况下，由于反电动势信号较弱，其估计精度显著下降，限制了其在全速域控制中的应用，该方法在 PMSM 无传感器控制结构如图 12 所示。

Karboua 等^[37]提出一种融合模型参考自适应系统与趋近律伪滑模控制的混合控制策略，采用模型参考自适应系统作为鲁棒观测器，通过使受控系统逼近参考模型，有效应对参数不确定性并适应动态工况。同时，引入基于连续逼近方法的伪滑模控制，从根本上抑制传统滑模控制固有的抖振现象，产生平滑的控制信号以提升系统寿命并减小振荡。Niu 等^[38]提出基于分数阶模型参考自适应的 PMSM 系统高跟踪精度无传感器控制，通过设计新型分数阶模型参考自适应控制器用于自适应辨识，实现变速变载工况下全速范围内负载转矩的快速响应与高精度辨识，并通过选取合适的可调矩阵确保自适应律的收敛性。同时，提出一种改进型模型参考自适应观测器，有效抑制严重抖振并对转子位置误差进行补偿，从而增强系统稳定性。Yu 等^[39]提出一种基于广义比例积分观测器与卡尔曼滤波器的复合无传感器控制方案。通过设计广义比例积分观测器替代传统线性扩张状态观测器进行反电动势估计，有效提升了估计精度。针对正交锁相环中比例积分型环路滤波器抗

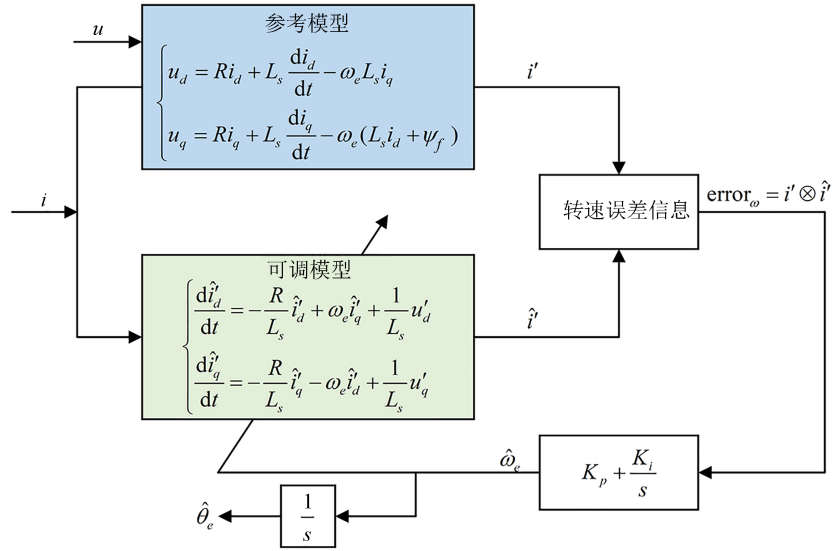


图 12 基于模型参考自适应控制的 PMSM 无传感器控制结构

Fig. 12 Sensorless control of PMSM based on model reference adaptive control structure

时变扰动能力弱的缺陷, 设计广义比例积分观测器辅助正交锁相环, 实现对转子位置、转速及集总扰动的同步估计, 显著增强了方案的扰动抑制能力与估计精度。此外, 为减弱测量噪声并降低观测器灵敏度, 进一步提出基于卡尔曼滤波器的广义比例积分观测器用于反电动势估计, 并通过仿真实验验证了所提方案的可行性与有效性。综合以上文献可以看出, 基于基波数学模型控制的方法更适用于中高速运行场景, 在低速区域通常需要结合其他方法进行补偿。

4.2 基于高频信号注入控制

当电机运行到低速或零速时, 位置信息往往难以提取, 导致无传感器控制精度降低甚至失效。为解决这一问题, 国内外学者提出了基于高频信号注入的 PMSM 无传感器控制^[40]方法, 其结构如图 13 所示。高频信号注入的基本原理是将高频电压或电流信号与基波信号叠加, 注入到三相绕组,

此时 PMSM 输出的高频矩阵模型含有转子位置信息, 再通过滤波器, 提取高频电压或电流信号, 进行数字信号处理, 估计转子位置。目前常用的高频信号注入方法包括旋转高频电压信号注入法和脉振高频电压信号注入法, 即通过在电机中注入高频信号并分析响应特性, 实现对转子位置信息的估计, 以便在低速甚至零速条件下仍能保持较高的估计精度。然而, 该方法会引入额外的损耗和电磁噪声, 同时控制算法相对复杂, 在实际应用中需要综合考虑系统效率与控制性能。

Ding 等^[40]提出一种基于方波注入的延时补偿算法, 通过分析系统延时, 重构静止坐标系下的高频响应电流, 并初步建立延时适应度函数。采用粒子群优化算法搜索最小适应度值以实现延时估算, 进而获得转子角频率与延时乘积的位置补偿角。对估计位置进行补偿后, 有效减小了位置估计误差, 缓解了估计位置滞后现象。进一步采

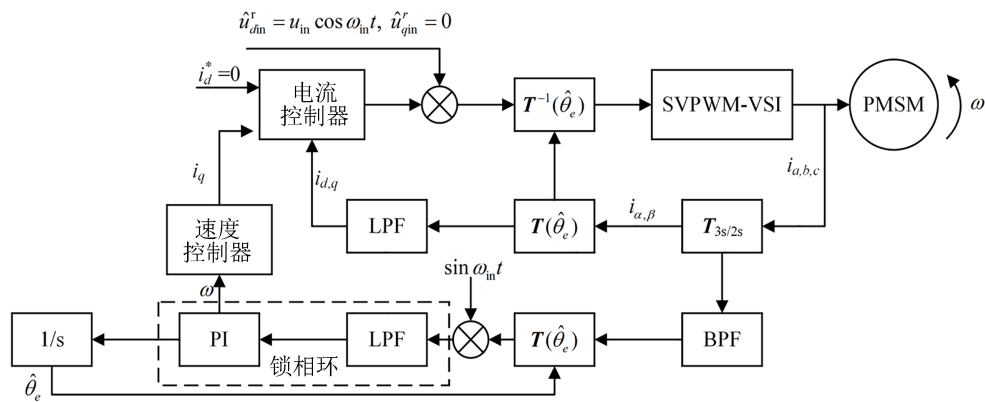


图 13 基于锁相环的高频信号注入的 PMSM 无传感器控制结构

Fig. 13 Sensorless control of PMSM with high-frequency signal injection based on phase-locked loop

用傅里叶分解法分析方波谐波对补偿算法的影响,优化适应度函数,提升了补偿精度。李欣等^[41]提出基于三参数陷波滤波器的脉振高频电压信号注入无传感器控制,采用三参数陷波滤波器替代低通滤波器,增强系统对注入高频交流分量的衰减能力,同时提升电流内环带宽与位置估计精度。进一步采用四阶广义积分器替代带通滤波器以提取包含位置信息的高频信号,有效降低滤波延迟对位置估计精度的影响,实现转子位置的精确跟踪并提升系统动态性能。Chen 等^[42]提出一种基于双外差法的旋转高频电压信号注入策略,以提升无传感器控制性能。与传统方法相比,该方法仍将高频电压信号注入静止坐标系,但转子位置通过估计同步旋转坐标系下的高频电流获取。采用双外差法同时利用高频电流的正序与负序分量进行转子位置估计,有效补偿了时间延迟引起的位置误差,提高了转子位置估计精度。综上,高频信号注入方法更适用于低速或零速运行场景,是实现全速域无传感器控制的重要补充手段。

为进一步分析不同无传感器控制方法的特点,对基于基波模型的方法与高频信号注入方法的优缺点及适用场景等进行了对比,如表 5 所示。

表 5 无传感器控制方法对比

Table 5 Comparison of sensorless control methods

控制方法	优点	缺点	适用场景
基波数学模型法	实现简单	低速精度差	中高速
高频信号注入法	低速精度高	噪声大、损耗高	低速/零速

由表 5 可以看出,不同方法在适用转速区间及控制性能方面存在明显差异。其中,基于基波数学模型方法依赖于数学模型,当 PMSM 在低速运行时,信噪比较低,难以提取有用信号,导致转子位置和转速信息检测精度不高。基于高频信号注入方法利用滤波器提取不同频率信号,会限制控制器带宽,不可避免地产生电流波动和转矩脉动,难以满足 PMSM 的高性能控制要求。因此,需要提出一种无传感器控制方法,能够较为准确地估计出电机参数,规避滤波器的使用,减少电流纹波和转矩脉动,提高控制模型鲁棒性和位置及转速的检测精度。

5 控制策略设计与发展趋势

随着新型发射系统向高动态、高精度及高可

靠性方向发展,PMSM 控制技术面临更加复杂的应用需求。本文从转速外环、电流内环、转速-电流一体化控制及无传感器控制等方面对现有控制方法进行系统综述,并结合不同发射场景对控制性能的需求,对各类控制策略进行分析与对比。

5.1 控制策略选型原则

在新型发射系统中,不同应用场景对 PMSM 控制性能的要求存在显著差异,因此,在控制策略设计过程中,应根据具体需求进行合理选择。

①在高动态发射场景中,系统对快速响应能力要求较高,应优先选用滑模控制或模型预测控制等具有较快动态响应特性的控制方法;②在强扰动或参数不确定性较大的复杂环境中,自抗扰控制和机器学习控制等方法凭借其较强的鲁棒性和自适应能力,更具应用优势;③在对控制精度要求较高的场景中,可采用预测控制反馈线性化控制或反步控制方法,以提升系统控制精度;④在无位置传感器应用需求下,应结合不同转速区间选择合适的无传感器控制方法,其中,基于基波模型的方法适用于中高速运行区间,而高频信号注入方法更适用于低速及零速工况,必要时可采用多方法融合策略实现全速域控制;⑤在小型化/轻量化平台中,应采用基波数学模型、无源控制等方法简化控制结构;⑥在复杂环境机动发射场景中,应采用自抗扰控制、滑模变结构控制等方法提升系统稳定性;⑦在弹载有限算力平台中,应采用滞环控制,无源控制等方法,以降低工程实现难度。

为进一步体现新型发射系统中 PMSM 控制方法选择的场景适应性,根据不同发射方式和典型工况条件,对 PMSM 控制需求、关键控制环节及可选控制方法进行归纳,结果如表 6 所示。可以看出,不同发射场景对转速响应、转矩控制、电流跟踪、位置估计和系统鲁棒性的要求存在明显差异。因此,PMSM 控制方法不能孤立选择,而应结合发射任务需求、电机运行区间、硬件资源和环境条件进行综合设计。

针对新型发射系统中 PMSM 控制的复杂需求,可从系统层面构建多层次控制策略。首先,在控制结构上,可根据动态性能需求选择传统双闭环结构或转速-电流一体化单环结构;其中,一体化控制在提升系统动态响应方面具有明显优势,适用于高性能应用场景。其次,在控制算法选择方面,应综合考虑系统动态性能、鲁棒性及实现复杂度等因素。例如,在高动态场景中可采用预

表 6 新型发射场景下PMSM控制需求与控制方法选择
Table 6 Control requirements and method selection for PMSM in new launch scenarios

场景或工况条件	控制需求	关键控制环节	可选控制方法	方法选择依据
高动态快速发射场景	短时间快速加速、转矩快速建立、转速快速跟踪、电流快速响应	转速外环、电流内环、转速-电流一体化控制	滑模变结构控制、预测控制/模型预测控制、滞环控制	滑模变结构控制具有响应速度快、鲁棒性强的特点,适用于高加速度启动;预测控制/模型预测控制可兼顾动态响应和约束优化;滞环控制结构简单、响应快,可用于对电流快速跟踪要求高且纹波要求相对不严的场合
强扰动/参数不确定场景	抑制负载突变、参数摄动、齿槽转矩及外部扰动,提高系统鲁棒性	转速外环、电流内环	自抗扰控制、滑模变结构控制、无模型控制、机器学习控制	自抗扰控制可通过扩张状态观测器估计并补偿总扰动;滑模变结构控制对参数变化和外部扰动不敏感;无模型控制可降低对电机精确参数的依赖;机器学习控制可用于复杂非线性扰动估计和控制参数优化
高精度发射控制场景	提高转速、电流及转矩控制精度,降低稳态误差和转矩波动	转速外环、电流内环、转速-电流一体化控制	反馈线性化控制、反步控制、模型预测控制	反馈线性化控制可实现非线性系统解耦,提高电流和转矩控制精度;反步控制具有较明确的稳定性设计过程,适用于转速-电流协同控制;模型预测控制可通过滚动优化提升多变量控制精度
低速/零速启动场景	低速或零速下可靠获取转子位置信息,保证无位置传感器启动能力	无传感器控制	高频信号注入法	低速和零速时反电动势信号较弱,基波数学模型法估计精度下降,高频信号注入法能够利用电机凸极效应提取转子位置信息,更适用于低速/零速工况,但需注意电磁噪声、附加损耗和转矩脉动问题
中高速稳定运行场景	保持较高位置/转速估计精度,降低计算负担,保证运行平稳性	无传感器控制	基波数学模型法	基波数学模型法在中高速区间反电动势信号明显,估计效果较好
小型化/轻量化平台	减少机械传感器、降低布线复杂度,提高系统可靠性和环境适应性	无传感器控制、转速-电流一体化控制	基波数学模型法、高频信号注入法、无源控制、反步控制	无传感器控制可减少位置传感器及其布线,提高系统集成度和可靠性;基波数学模型法适用于中高速,高频信号注入法适用于低速/零速;无源控制和反步控制可用于转速-电流一体化设计,在简化控制结构和提高稳定性方面具有应用价值
复杂环境机动发射场景	抗强振动、温度变化、负载扰动和电磁干扰,保持系统稳定运行	转速外环、电流内环、无传感器控制	自抗扰控制、滑模变结构控制、无模型控制、机器学习控制、基波数学模型法与高频信号注入法融合	自抗扰控制和滑模变结构控制适合强扰动和参数不确定工况;无模型及机器学习控制可提高复杂非线性条件下的适应能力;无传感器方法可降低传感器在恶劣环境下失效带来的风险,必要时可采用基波数学模型法与高频信号注入法互补实现全速域估计
弹载有限算力平台	实时性强、算法复杂度低、工程实现难度小	电流内环、无传感器控制、转速-电流一体化控制	滞环控制、基波数学模型法、无源控制	滞环控制结构简单、动态响应快,便于工程实现;基波数学模型法实现相对简单、计算量较小,适用于中高速无传感器运行;无源控制结构相对清晰,具有较好的稳定性分析基础

测控制或滑模控制，在强干扰环境中可引入自抗扰控制或智能控制方法进行补偿。此外，在无传感器控制设计中，应结合不同转速区间特性，采用基波模型与高频信号注入方法的融合策略，实现位置估计的平滑切换，从而提升系统在全速域范围内的控制性能。

5.2 关键技术发展趋势

面向新型发射系统的应用需求，PMSM控制技术的发展应重点围绕以下几个方面展开。

- 1) 面向高动态发射过程的一体化控制。新型发射任务通常要求驱动系统在短时间内完成快速响应，转速-电流一体化控制可减少级联控制环节带来的响应延迟，但需兼顾算法复杂度和实时实现能力。
- 2) 面向复杂发射环境的鲁棒与抗扰控制。发射平台可能面临强振动、负载突变、温度变化和电磁干扰等影响。因此，自抗扰控制、滑模控制及鲁棒观测器等方法仍是提升系统可靠性的重要

方向。

3) 面向小型化和高可靠平台的无传感器控制。针对传感器带来的体积、质量、布线和可靠性问题,应进一步发展适用于低速启动、中高速运行和全速域切换的复合无传感器控制方法。

4) 面向弹载有限算力平台的轻量化控制算法。模型预测控制、智能控制等方法虽然具有较好的性能潜力,但在发射平台中应用时必须考虑实时性、计算资源和工程可靠性。因此,需要发展模型简化、低计算量和易实现的控制策略。

5) 面向多工况发射任务的多方法融合控制。不同发射阶段和工况下的控制需求不同,未来,应结合高动态响应、强抗扰、低纹波和无传感器估计等需求,开展多控制方法协同设计,以提高 PMSM 驱动系统的综合适应能力。

综上所述,不同 PMSM 控制方法在动态性能、鲁棒性及实现复杂度等方面各具特点。在新型发射系统中,应结合具体应用需求,从控制结构、控制算法及无传感器策略等多个层面进行综合设计,以实现系统性能的最优匹配。未来,随着智能控制与多方法融合技术的发展,PMSM 控制系统应在复杂发射环境中展现出更强的适应性与可靠性。

参考文献

- [1] 贺卫东,刘焕兴,尹军茂. 导弹新型发射技术发展动态及重点发展方向研究[J]. 飞航导弹, 2021(6): 91-98, 121.
- [2] 马伟明,鲁军勇. 电磁发射技术的研究现状与挑战[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 3943-3959.
Ma Weiming, Lu Junyong. Research progress and challenges of electromagnetic launch technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 3943-3959.
- [3] 鲁军勇,柳应全. 电磁发射用直线电机及其控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(19): 5899-5913.
Lu Junyong, Liu Yingquan. Review on linear motor for electromagnetic launch and its control technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(19): 5899-5913.
- [4] 贾光勇,孙兆龙,黄垂兵,等. 电磁发射用永磁同步直线电机磁场解析及推力波动优化[J]. 兵工学报, 2024, 45(7): 2159-2170.
Jia Guangyong, Sun Zhaolong, Huang Chuibing, et al. Magnetic field analysis and thrust fluctuation optimization of permanent magnet synchronous linear motors for electromagnetic launch[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(7): 2159-2170.
- [5] 王俭朴,赵裔海,卢海涛,等. 轨道交通永磁同步电机关键技术研究综述[J]. 兰州交通大学学报, 2026, 45(1): 82-92.
Wang Jianpu, Zhao Yihai, Lu Haitao, et al. Review on key technologies for permanent magnet synchronous motors in rail transit[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2026, 45(1): 82-92.
- [6] 谢浩然,胡纯福,卢萌,等. 基于级联线性-非线性自抗扰控制器的永磁直线同步电机速度控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 6158-6169.
Xie Haoran, Hu Chunfu, Lu Meng, et al. Research on speed control strategy for permanent magnet linear synchronous motor based on cascade linear-nonlinear active disturbance rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6158-6169.
- [7] 康劲松,邹培锐,丁浩,等. 矿井提升机永磁同步电机转速环优化设计方法[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(12): 106-117.
Kang Jinsong, Zou Peirui, Ding Hao, et al. Optimized design method of speed loop for permanent magnet motor of mine hoist[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(12): 106-117.
- [8] Jiang Fuxi, Ye Jie, Wang Siqi, et al. Additive-state-decomposition-based cascaded linear ADRC for nonlinear uncertain systems with application to PMSM speed regulation[J]. ISA Transactions, 2025, 166: 474-487.
- [9] Cao Haiyang, Deng Yongting, Zuo Yuefei, et al. A variable structure ADRC for enhanced disturbance rejection and improved noise suppression of PMSM speed system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(5): 4481-4495.
- [10] 禹聪,康尔良. 永磁同步电机模糊滑模速度控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(7): 98-104.
Yu Cong, Kang Erliang. Design of fuzzy sliding mode speed controller for permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(7): 98-104.
- [11] 于艳君,崔明恺,柴凤. 双绕组永磁同步电机滑模变结构控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(22): 5799-5807.
Yu Yanjun, Cui Mingkai, Chai Feng. Sliding mode variable structure control of a dual-winding permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(22): 5799-5807.

- [12] Junejo A K, Xu Wei, Mu Chaoxu, et al. Adaptive speed control of PMSM drive system based a new sliding-mode reaching law[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(11): 12110-12121.
- [13] Tang Bo, Lu Wenqi, Yan Bo, et al. A novel position speed integrated sliding mode variable structure controller for position control of PMSM[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(12): 12621-12631.
- [14] 牛峰, 高禄辰, 胡艳芳, 等. 基于电机参数失配的模型预测转速控制系统运行稳定性研究[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(6): 55-63.
Niu Feng, Gao Luchen, Hu Yanfang, et al. Research on operation stability for model predictive speed controlsystem based on parameter mismatch for motors[J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(6): 55-63.
- [15] Yang Liguao, Li Hongmei, Huang Jiandong, et al. Model predictive direct speed control with novel cost function for SMPMSM drives[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(8): 9586-9595.
- [16] Yahia T, Ahmed A A, Ahmed M M, et al. Enhanced model predictive speed control of PMSMs based on duty ratio optimization with integrated load torque disturbance compensation[J]. *Machines*, 2025, 13(10): 891.
- [17] Chinaeke-Ogbuka I, Ajibo A, Odo K, et al. A robust high-speed sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on simplified hysteresis current comparison[J]. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2021, 12(1): 1-9.
- [18] Dong Zhiping, Song Zaixin, Wang Wusen, et al. Improved zero-sequence current hysteresis control-based space vector modulation for open-end winding PMSM drives with common DC bus[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(10): 10755-10760.
- [19] Zhang Yuhao, Yu Feng, Qiu Linhao. A novel zero-sequence current hysteresis control-based space vector modulation with reduced zero-sequence current ripple for six-phase PMSMs[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025, 11(6): 13661-13671.
- [20] 张康, 王丽梅. 基于反馈线性化的永磁直线同步电机自适应动态滑模控制[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(19): 4016-4024.
Zhang Kang, Wang Limei. Adaptive dynamic sliding mode control of permanent magnet linear synchronous motor based on feedback linearization[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(19): 4016-4024.
- [21] Lu En, Li Wei, Wang Shibo, et al. Disturbance rejection control for PMSM using integral sliding mode based composite nonlinear feedback control with load observer[J]. *ISA Transactions*, 2021, 116: 203-217.
- [22] Sitharthan R, Krishnamoorthy S, Sanjeevikumar P, et al. Torque ripple minimization of PMSM using an adaptive elman neural network-controlled feedback linearization-based direct torque control strategy[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, 31(1): 85-97.
- [23] Chen Guiming, Xu Lingliang. Ultra-local model-free speed prediction control based on high-order sliding mode compensation for PMSM drives[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2022, 14(7): 1-11.
- [24] Zhang Xiaoguang, Yu Xiang, Zhang Guofu. Adaptive model predictive current control for PMSM drives based on bayesian inference[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2025, 40(6): 8490-8502.
- [25] Luo Yunchang, Xie Songyi, Lin Chiahung, et al. Adaptive speed estimation with genetic algorithm for vector-controlled permanent magnet synchronous motor drive[J]. *Sensors and Materials*, 2022, 34(3): 1191.
- [26] 陈桂明, 许令亮. 基于非线性扰动补偿的超局部无模型永磁同步电机电流预测控制[J]. *兵工学报*, 2024, 45(4): 1129-1140.
Chen Guiming, Xu Lingliang. Ultra-local model-free current predictive control of permanent magnet synchronous motor based on nonlinear disturbance compensation[J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(4): 1129-1140.
- [27] Urquiza J, Pasmay P, Muñoz L, et al. Model-based and large language model meta artificial intelligence techniques for intelligent permanent magnet synchronous motor drive control[J]. *IFAC Journal of Systems and Control*, 2025, 34: 100341.
- [28] Wang Min, Wang Qi, Chu Bing, et al. Current-constrained control for PMSM based on port-controlled hamiltonion system and deep deterministic policy gradient[C]//*Proceedings of 2021 Chinese Intelligent Automation Conference*. Singapore: Springer, 2022: 398-405.
- [29] Xu Lingliang, Chen Guiming, Li Qiaoyang. Cas-

- caded speed and current model of PMSM with ultra-local model-free predictive control[J]. IET Electric Power Applications, 2021, 15(11): 1424-1437.
- [30] Larbaoui A, Chaouch D E, Belabbes B, et al. Application of passivity-based and sliding mode control of permanent magnet synchronous motor under controlled voltage[J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28(11/12): 1267-1278.
- [31] Zhang Xiaoguang, Cao Yuanhang. A simple motor-parameter-free model predictive current control for PMSM drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(4): 3292-3302.
- [32] Zhang Xiaoguang, Yuan Tianyu. Model predictive current control with specific harmonic suppression for PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(11): 11070-11080.
- [33] Wu Xuan, Wang Yuanlin, Wang Nanjiang, et al. Multiobjective cost function weighting factors design in model predictive control for PMSMs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2026, 73(3): 4484-4494.
- [34] Wu Shuo, Ren Wu, Tong Chengde, et al. Backstepping-adaptive resonant controller for low-speed PMSM operation considering periodic and aperiodic disturbances[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2026, 14(2): 2425-2437.
- [35] Chaou Y, Ziani S, Ben A H, et al. Nonlinear control of the permanent magnet synchronous motor PMSM using backstepping method[J]. Wseas Transactions on Systems and Control, 2022, 17(8): 56-61.
- [36] Hu Xuechun, Xia Yu, Lendek Z, et al. A novel dynamic prescribed performance fuzzy-neural backstepping control for PMSM under step load[J]. Neural Networks, 2025, 190: 107627.
- [37] Karboua D, Mebkhoua T, Benkaihou S, et al. Model reference adaptive system and pseudo-sliding mode control with exponential reaching law for sensorless-speed control of PMSM[J]. PLoS One, 2025, 20(5): e0321985.
- [38] Niu Hongjie, Liu Ling, Jin Dongsong, et al. High-tracking-precision sensorless control of PMSM system based on fractional order model reference adaptation[J]. Fractal and Fractional, 2023, 7(1): 21-35.
- [39] Yu Ke, Li Shihua, Zhu Wenwu, et al. Sensorless control scheme for PMSM drive via generalized proportional integral observers and Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(3): 4020-4033.
- [40] Ding Hongchang, Tang Xikai, Li Jinhong, et al. Time delay compensation strategy for PMSM sensorless control based on high-frequency square-wave signal injection[J]. Electrical Engineering, 2025, 107(9): 11949-11958.
- [41] 李欣, 罗晓宁. 基于三参数陷波器的脉振高频电压注入无位置传感器控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2025, 59(12): 2655-2666.
- Li Xin, Luo Xiaoning. Sensorless control based on a three-parameter notch filter for pulsating high-frequency voltage injection[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2025, 59(12): 2655-2666.
- [42] Chen Peng, Ma Ruiqing, Bai Hao, et al. Rotating high frequency voltage injection strategy considering time delay for PMSM based on dual heterodyne method[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2025, 40(2): 901-910.

Review of Control Methods for Permanent Magnetic Synchronous Motors in New Launching Modes

CHEN Guiming, XU Lingliang*, CHA Zhengzhong, WANG Baocheng

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: Against the backdrop of rapid advancements in military technology, new missile launch modes impose higher demands on drive system performance. Permanent magnetic synchronous motors (PMSMs) are widely employed in novel launch systems owing to their high power density, efficiency, and excellent dynamic response characteristics, with their control strategies directly influencing the overall

performance and reliability of the system. To address the differential requirements for motor control performance under various launch scenarios, this study provided a systematic review of PMSM control methods from four perspectives: speed outer-loop, current inner-loop, integrated single loop control speed-current, and sensorless control. In the realm of speed loop control, methods such as active disturbance rejection, sliding mode variable structure, and model predictive controls were analyzed, highlighting their significant advantages in enhancing disturbance rejection capability and dynamic response. For current inner-loop control, methods including hysteresis, feedback linearization, model-free, and machine learning-based controls were reviewed, revealing varying trade-offs between control accuracy and implementation complexity. In terms of integrated speed-current control, the application potential of passivity-based, model predictive, and backstepping controls in simplifying control structures and improving dynamic performance was discussed. For sensorless control, a comparative analysis of fundamental wave model-based and high-frequency signal injection methods was conducted, demonstrating their suitability across different speed ranges. Finally, the advantages, disadvantages, and applicable scenarios of different control methods were summarized, and future development trends in PMSM control technology were explored.

KEYWORDS: permanent magnetic synchronous motor; speed control; current control; integrated control; sensorless control

(编辑: 于福兴)