

永磁同步电机控制策略综述

汪华章^{1,2}, 何涛¹, 刘鲲鹏¹, 郭睿智¹, 陈宁¹

(1. 西南民族大学电气工程学院, 四川 成都 610041; 2. 西南民族大学青藏高原研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)以高效率、高功率密度和优良的控制性能,在工业和民用领域获得了广泛应用.因对PMSM应用要求的不断提高,PMSM相关技术也在持续而快速地发展.详细介绍了PMSM的控制策略,涵盖了基本控制算法、闭环控制策略以及无位置传感器控制技术.简述PMSM控制策略的工作流程与在系统中发挥的作用,以及众多学者针对控制策略的各项不足进行的多样改进.通过对这些控制策略的深入分析,总结出PMSM控制领域的发展现状和当前所面临的挑战,并展望未来发展趋势与主要的研究热点.

关键词: 永磁同步电机; 矢量控制; 滑模控制; 模型预测控制; 无传感器控制; 高频信号注入法

中图分类号: TM341

文献标志码: A

文章编号: 2095-4271(2025)02-0177-16

Review of control strategy for permanent magnet synchronous motor

WANG Huazhang^{1,2}, HE Tao¹, LIU Kunpeng¹, GUO Ruizhi¹, CHEN Ning¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China;

2. Qinghai-Tibet Plateau Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motor (PMSM) has been widely used in industrial and civil applications due to its high efficiency, high power density and excellent control performance. Due to the increasing requirements of PMSM applications, its related technology is also developing continuously and rapidly. In this paper, the control strategies of PMSM were introduced in detail, covering the basic control algorithms, closed-loop control strategies, and position sensorless control techniques. Their workflow and role in the system were briefly described, as well as the various improvements made by many scholars to address their shortcomings. Through the in-depth analysis of these control strategies, the current development status and current challenges in the field of PMSM control were summarized, and the future development trends and major research hotspots were also anticipated.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; vector control; sliding mode control; model predictive control; sensorless control; high frequency injection method

随着全球能源需求的不断增长和环境保护意识的日益提高,电机作为能量转换的核心设备,其效率和性能的提升显得尤为重要.永磁同步电机因其出色的能效、较小的体积和重量,以及较高的功率密度,已经成为现代电气驱动系统中的首选^[1].然而,永磁同

步电机的高性能运行依赖于先进的控制策略,这对电机控制技术提出了更高的要求^[2].

在过去的几十年里,永磁同步电机控制策略的研究取得了显著进展,从传统的PID控制到现代的滑模控制,模型预测控制等,再到智能控制方法的应用,每

收稿日期: 2025-01-09

作者简介: 汪华章(1976-),男,湖北崇阳人,教授,博士,研究方向:智能控制与模式识别,电机驱动与控制. E-mail: wanghuazhang@swun.edu.cn

基金项目: 西南民族大学青藏高原研究科技创新团队(2024CXTD20)

一种控制策略都在一定程度上提高了电机的动态性能和稳态精度.然而,由于永磁同步电机系统的非线性、强耦合和参数不确定性等特点^[3],如何在各种工况下实现对电机的精确、快速、稳定控制,仍然是一个极具挑战性的课题.

随着技术的不断发展,PMSM 在驱动系统中的控制策略也经历了显著的演变.传统的控制方法如矢量控制(FOC)和直接转矩控制(DTC)在提升电机性能和精度方面发挥了重要作用,但随着对系统性能和能效要求的不断提升,现代控制技术如无位置传感器控制以及基于先进控制算法的自适应控制、模型预测控制等逐步成为研究热点.这些创新的控制策略不仅进一步提升了 PMSM 在复杂工况下的性能,还在电动助力转向、电动汽车和自动化生产线等领域中得到广泛应用.本文综述现有的永磁同步电机控制策略,探讨其发展历程、主要技术及其在实际应用中的优势和挑战,以期为未来的研究与应用提供参考.

1 永磁同步电机基本控制策略

目前,基本控制策略在 PMSM 驱动控制中仍占据重要地位.其中,矢量控制(FOC)通过坐标变换解耦电流分量,实现对转矩和磁链的独立控制,为高性能电机驱动提供了基础;恒压频比控制(VVVF)以其简单性和稳定性被广泛应用于中低性能需求场景;直接转矩控制(DTC)以其快速动态响应和对参数变化的鲁棒性受到关注,尤其在动态性能要求较高的场景中表现出显著优势.这些经典控制策略各有特点,构成了 PMSM 控制技术发展的基石,同时也为更先进控制算法的研究和应用提供了方向和启示.

1.1 矢量控制

矢量控制有着较好的动态特性和转矩响应能力,以及较好的控制精度和较宽的调速范围,在永磁同步电机控制的领域被广泛使用^[4].常用到的矢量控制有 $I_d=0$ 控制(如图 1 所示)、转矩电流比最大控制以及弱磁控制^[5].

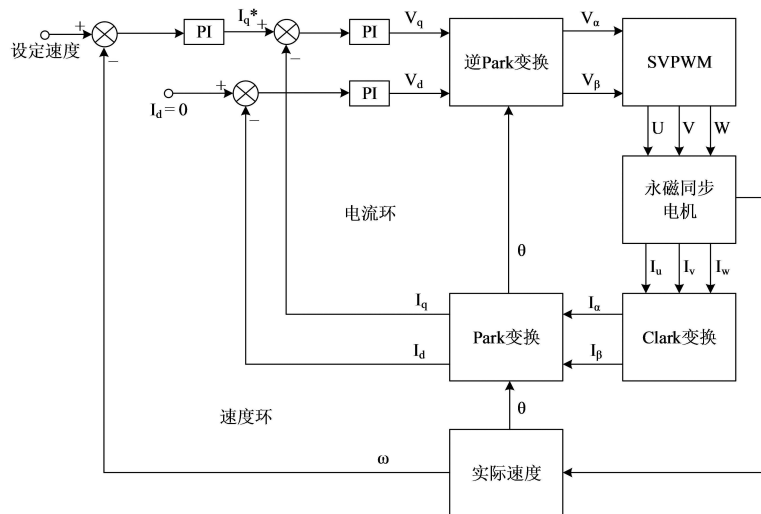


图 1 $I_d=0$ 控制的矢量控制流程图

Fig. 1 Vector control flow chart for $I_d=0$ control

在矢量控制中,整个控制系统要实现一个电流环的闭环控制.其中,计算并得到控制量的过程中,由于星形连接的绕组电路每次都会至少接通两相,无法对每一相的波形进行单独控制.这样直接控制波形也会使问题进一步复杂化,而且对 3 个非线性变化的量值直接进行运算,对于控制系统的要求很高.所以,对于这一耦合系统,首先需要进行 Clark 变换实现一个解耦的过程,将问题简化为二维直角坐标系两个轴上的幅值变化.而对于这个坐标轴上的幅值以正弦规律非

线性变化的坐标系系统,可以通过 Park 变换将其转变为线性的变化.Park 变换相当于新建立了一个随转子一同转动的二维坐标系,实现了一个参考系的变换,将其从观察定子转移到观察转子上,随电流矢量一同旋转,相对静止下即可得到线性的幅值变化.通过两步转换,完成了相电流信息的解耦与线性化,便可以计算其与输入的控制量之间的误差,并输入到 PID 控制器中,得到控制所需的值.

对于 PID 输出的控制量,又需要进行以下两步转

化为控制 MOS 管导通的 PWM 信号的占空比:首先进行逆 Park 变换,然后利用 SVPWM 算法,转化并输出控制信号.在 SVPWM 中对于输入的电压矢量,在一个 PWM 信号的周期内,即一个合成周期中,要经过以下步骤:通过输入的电压矢量进行扇区判定以选择合成要使用到哪些矢量,计算向量作用时间以配置一个扇区的周期中两相的占空比以此确定向量大小与方向即转矩大小与方向,确定切换时间点以确定在每一个扇区内两相的导通或截止时机等步骤后,即可输出精确的 6 路 PWM 信号,控制 6 只 MOS 管导通或截止,在逆变电路中产生三相正弦驱动电压,控制电机平稳运行.在每一个控制 MOS 管的 PWM 信号的开关周期内,SVPWM 会在 8 个向量中进行选择,并合成一次空间电压矢量,PWM 信号的周期越短,驱动电机旋转一周时合成空间电压矢量的次数越多,将每一个矢量的端点连线,会发现其越来越逼近圆形,也就是驱动转矩越来越平滑.

在一个 PWM 周期的合成过程中,可以通过在周期的起始与结尾加入上桥臂全部断开的状态,以及在中间加入下桥臂全部断开的状态,并以一个周期的中间为间隔,平均分配间隔前后的作用时间,组成 7 段式调制法.以实现每次只改变其中一个相的状态,减小了开关损耗.

矢量控制涉及的环节众多,针对每个单一环节的改进也都有不少学者进行着攻克.包括但不限于对传统 PID 环节的替代;使 SVPWM 环节更加高效化地改进;对有传感器或无传感器获取转子位置与速度信息时,针对其精度进行的改进等等.

同时,矢量控制计算量大,对处理器的要求也在日渐提升,其高效的运算与执行离不开相关硬件平台对其数据进行高性能的处理,不论是在直接提升传统算法的运算速度上,还是对于更加复杂的新算法的实现上.一个适合的硬件平台总会发挥更好的效果,所以,脱离传统的 MCU 平台,在 DSP 甚至 FPGA 平台上,充分利用这些新平台的优势,对矢量控制算法的更高效实现针对性的改进,也是未来的研究方向之一.

这些改进,使得矢量控制的控制效果与系统的稳定性都有了长足的进步,也使得其优势更为凸显,以至于广泛应用于机器人、航天航空等诸多高端应用领

域,并成为工业学术的焦点.

1.2 恒压频比控制

恒压频比控制策略(VVVF),也称为恒磁通控制,是一种基于电机转速的开环控制方法.在这种策略中,当电源频率发生变化时,逆变器输出的电压也随之调整,从而保持电机的磁通量在一个恒定的值^[6].这种方法的基本思想是通过电压和频率的比例关系来调节电机的转速,确保电机运行时磁通不会因转速变化而发生显著波动.

恒压频比控制的结构简单,适用于对电机控制精度要求不高的场合,特别是大范围调速系统.该方法无须复杂的控制系统,提供了一种成本较低的解决方案,广泛应用于对动态响应要求不严格的设备,如风机、水泵和空调等.通过恒压频比控制,电机能够平稳调速,保持较高的工作效率,同时避免转差功率消耗导致的效率损失.图 2 为恒压频比控制流程图,这种方法的优势在于简便性和较低的成本,适用于低端或精度要求不高的应用.

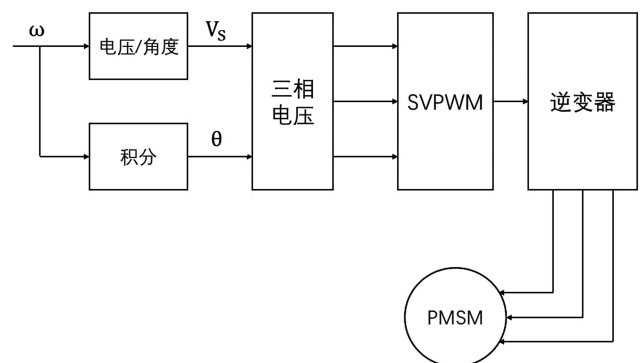


图 2 恒压频比控制流程图

Fig. 2 VVVF control flow chart

然而,该策略也存在明显的缺点,尤其是在电机的动态响应性能方面.由于该方法仅通过调整气隙磁通来控制电机的运转,无法实时精准地调节电机的转矩,容易导致转子振荡和失步等现象,从而无法满足高精度电机控制的需求.为了弥补这些不足,近年来提出了一些改进措施.一方面,通过引入闭环控制与反馈机制,可以实时监测电机的转速和负载变化,动态调整频率和电压比例关系,从而有效减少转矩波动,提升电机控制的精度和稳定性^[7].另一方面,结合智能控制算法,如模糊控制、自适应控制和神经网络控制等^[8],可以根据负载和环境变化自动优化电压与

频率的比值,并动态调整控制参数,从而提高系统在负载波动时的控制精度和响应速度,避免传统恒压频比控制在负载变化时出现的滞后和不精确问题.

1.3 直接转矩控制

20 世纪 80 年代,德国学者 M. Denpenbrock 和日本学者 I. TaKahasshi 发明了异步电机的直接转矩控制^[9].为了将直接转矩控制应用到同步电机上,在 20 世纪 90 年代澳大利亚新南威尔士大学和中国南京航空航天大学合作研发出了永磁同步电机 DTC 系统^[10],其特点是采用了定子磁链的幅值和电磁转矩双环控制.

直接转矩控制(DTC)技术是一项重要的高性能电机调速技术,广泛应用于电机调速系统和新能源技术,流程如图 3 所示.它的核心思想是以电机定子磁链和电磁转矩为被控对象,保持定子磁链幅值不变,定子磁链与转子永磁体磁链的夹角称为负载角,通过控制负载角从而控制电机的电磁转矩.与矢量控制相比,直接转矩控制直接作用于磁链和转矩,无须 PI 调节器,具有快速动态响应的特点,且不依赖于复杂的坐标变换和电流解耦控制,使系统结构更加简单、鲁棒性更强.

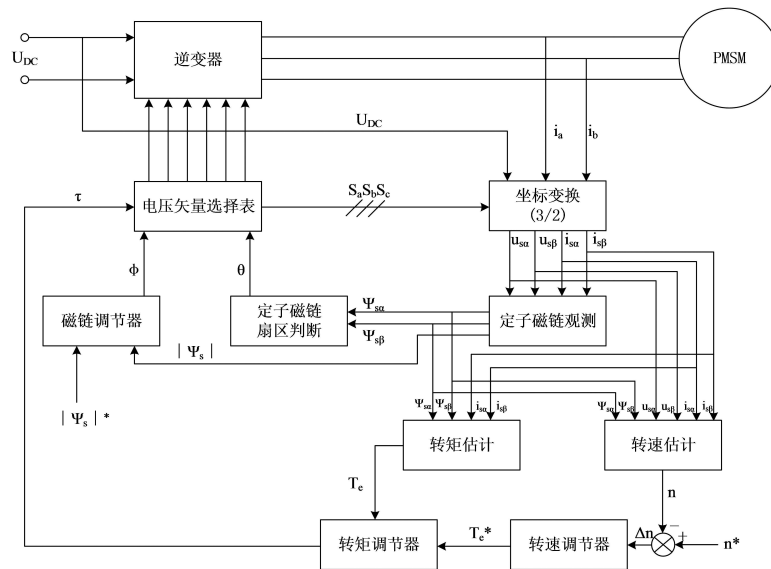


图 3 直接转矩控制流程图

Fig. 3 Direct torque control flow chart

直接转矩控制也存在一些缺点,系统在运行过程中具有转矩脉动和磁链脉动的问题,不仅会影响电机性能,还可能对整个系统造成不良影响.针对传统 DTC 的不足之处,研究如何降低转矩和磁链脉动是电机控制的研究热点.如可以利用模型预测控制(MPC)通过对电压矢量选择优化、扇区的改进以及对滞环控制器的改进,可以有效抑制转矩脉动,提高动态性能.结合各种观测器如滑模观测器、扩展卡尔曼滤波器来解决电机参数敏感的问题,提高磁链估算精度,降低参数敏感性.

2 闭环控制策略

在永磁同步电机控制领域,闭环控制策略的研究与应用一直备受关注,尤其是在提高系统响应速度、

减少抖振和增强鲁棒性方面.近年来,多种先进的控制理论和技术,如滑模控制、自适应控制、自抗扰控制、模型预测控制等,被广泛研究和应用于永磁同步电机的速度控制中.这些控制策略不仅有效提升了电机的动态性能,还显著提高了系统在复杂环境下的稳定性和适应性.接下来将综述这些控制策略的发展现状、原理及其在永磁同步电机控制中的应用.

2.1 滑模控制

滑模控制是由学者 Emelyanov 等人提出的,该控制策略以其卓越的鲁棒性而被广泛应用^[11].滑模控制的核心在于构建一个特定的滑模面,当系统偏离给定状态时,该滑模面能够引导系统返回至稳定状态.滑模控制的过程主要包括两个阶段:趋近模态和滑动模态.滑模面和切换控制策略的设计,确保了伺服系统

在有限时间内收敛,并能有效抵抗外界扰动和模型不确定性.对永磁同步电机而言,实施滑模控制无须详尽的数学模型,只需掌握电机的系统参数及其变化范围.滑模控制的应用,提升了永磁同步电机控制系统的快速响应能力,降低了其对参数扰动的敏感性,从而优化了系统的动态性能,增强了电机的跟踪能力和鲁棒性.

滑模控制在实际应用中存在一些待改进的问题,主要包括系统抖振和动态响应的矛盾问题.为了克服滑模控制中的系统抖振和响应问题,多种改进的滑模控制方法被应用于永磁同步电机调速系统.主要的研究方向如图 4 所示,包括趋近律的优化、滑模面的设计、复合滑模控制等.

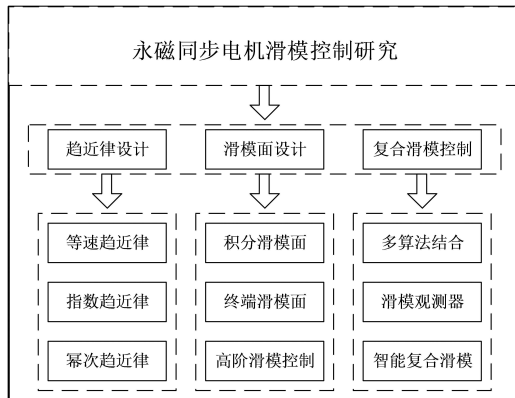


图 4 滑模控制研究方向

Fig. 4 Research direction of sliding mode control

滑模趋近律丰富了趋近模态阶段的设计方法,有效地解决了系统抖振与响应速度之间的矛盾问题.高为炳院士及其合作者在滑模控制理论领域做出了开创性贡献,首次提出了趋近律的概念,并提出了等速趋近律、指数趋近律、幂次趋近律等多种形式^[12].当前,众多研究聚焦于趋近律的优化与参数设计,目的在于进一步提升系统的控制性能.王汉卿等研究者^[13]针对滑模控制中响应速度与系统抖振的矛盾,创新性地引入了与系统状态相关的可变增益,提出了一种新型滑模到达定律.该定律能够实现对被控系统变化的快速响应,并在系统运行过程中有效减小抖振.另一方面,A. K. Junejo 等学者^[14]提出了自适应趋近律的快速终端滑模控制策略,将趋近律参数与系统状态变量相结合,使其随系统误差的变化而自适应调整.

在滑模控制领域的研究中,滑动模态一直是研究的核心,传统滑模控制在跟踪任意轨迹时,若受到外

部扰动,可能会导致系统存在稳态误差.为克服这一难题,各种滑模面被设计以及被应用于工程中.Z. Li 等人^[15]提出了一种自适应积分滑模的永磁同步电机鲁棒连续模型预测速度和电流控制方法,该方法直接从积分滑模面推导预测模型,从而解决了抖振问题并改善了系统的动态性能.针对稳态误差和抖振问题,高阶滑模控制提供了一种解决方案,实现了伺服系统的高性能跟踪^[16].但高阶滑模引入了更多的状态变量,增加了系统的复杂性和参数调节的难度.终端滑模控制是最早采用非线性滑模面的策略之一,具有在有限时间内收敛到稳态的优势,但其奇异值问题限制了应用.Mobayen S^[17]提出了非奇异终端滑模控制,保留了终端滑模控制的优点并解决了奇异值问题.Chen M 等人^[18]将快速非奇异终端滑模控制策略应用于 PMSM,取得了高精度的控制效果.

近年来,复合控制策略因其融合了多种控制方法的优点而备受关注.滑模控制也不例外,通过与其他控制算法的结合,其控制效果得到了显著提升.En Lu 等人^[19]提出了一种将鲁棒速度控制器与负载观测器相结合的抗扰控制方法.该方法的鲁棒速度控制器融合了复合非线性反馈和积分滑模控制,前者有助于提升系统的瞬态响应性能,而后者则增强了系统的稳健性.此外,通过采用滑模观测器来消除未知外部干扰的影响,并通过引入模糊控制来减轻颤振现象,最终将观测结果用于前馈补偿.Hou Q 等人^[20]则研究了一种结合干扰观测器的超扭曲滑模控制技术.单纯提高控制增益以增强 PMSM 系统的鲁棒性可能会导致不理想的动力学性能,因此他们首先引入了广义比例积分观测器来估计集总扰动.接着,他们将超扭曲滑模控制器与广义比例积分观测器的前馈补偿相结合,形成了一个复合控制器.这种方法使得复合控制器能够在使用更小的开关增益的情况下,实现更高的跟踪精度.

2.2 自适应控制

自适应控制最早由广义控制理论的奠基人之一 John R. Ragazzini 和 Karl J. Åström 等人在 20 世纪 50 年代提出.其本质是针对系统参数变化或不确定性,通过自动调整控制器的参数,使得控制系统能够在动态环境中保持期望的性能.

自适应控制的基本原理是在控制过程中,系统实

时估计自身的动态特性(如电机的负载变化、参数不确定性等),并根据估计的结果调整控制器的参数.这样,控制器能够适应系统的变化,确保系统在不同工况下依然能够保持稳定性和高效性.自适应控制主要包含两个部分:一是参数估计,即通过某种方法实时估计系统的动态参数;二是控制器更新,即根据估计结果调整控制律,确保系统性能不受扰动影响^[21].

通过这种方式,自适应控制能够应对复杂、变化的系统环境,尤其适用于那些具有参数不确定性或受到外部扰动的电机控制系统.如图 5 为自适应控制流程图.在实际应用中,模型参考自适应控制(MRAC)的目标是使得系统的输出能跟随一个理想的参考模型的输出,从而实现系统的精确控制.

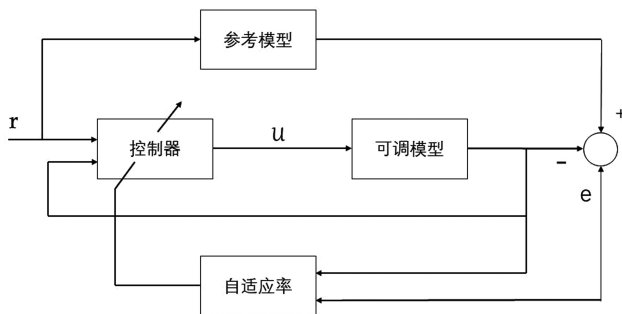


图 5 自适应控制结构框图

Fig. 5 Adaptive control block diagram

模糊自适应控制(Fuzzy Adaptive Control, FAC)是一种将模糊控制与自适应控制思想相结合的控制方法,旨在处理具有不确定性、非线性和动态变化的复杂系统.该方法基于 Zadeh 于 1965 年提出的模糊控制理论,随后通过自适应机制进行了扩展和改进.模糊自适应控制融合了模糊逻辑推理能力和自适应控制的实时调整特性,能够在面对系统模型不确定性或外部环境变化时,自动调整控制参数,从而保证控制系统的稳定性与鲁棒性^[22].在永磁同步电机(PMSM)的控制中,FAC 展现出独特的优势.模糊控制通过模糊规则处理电机系统中的非线性和不确定性,而自适应控制则能够实时调整控制器参数,以应对电机负载、转速波动等工况变化.通过模糊推理对电机系统输入进行处理,并结合自适应机制优化控制参数,FAC 能够在没有精确数学模型的情况下,保证电机系统的良好控制性能,尤其在高动态、电机驱动系统中表现尤为突出^[23].FAC 方法使得电机控制系统具备高度的

适应性和鲁棒性,能够在面对负载变化、环境扰动等多种复杂情形时,保持优异的控制效果^[24-25].因此,FAC 广泛应用于永磁同步电机的驱动系统以及其他具有时变特性和复杂动态行为的高性能控制领域.FAC 适合那些对精确模型要求不高,且系统特性可能随时间变化的情况,但其控制效果通常依赖于模糊规则的设计和参数调整的灵活性.

20 世纪 60 年代 Astrom 和 Wittenmark 等学者提出在 FAC 的基础上进行了进一步改进,引入了优化算法来增强控制性能.与 FAC 不同,自适应控制与优化算法(ACOA)不仅关注如何调整控制参数,还通过优化过程(如梯度下降法、遗传算法、粒子群优化等)进一步改善系统的整体性能,旨在应对系统动态特性、参数不确定性以及外部扰动,特别适用于复杂系统的实时控制.其核心思想是,通过自适应控制机制实时调整控制器的参数,以应对系统中的不确定性和扰动,同时引入优化算法,通过最小化某些性能指标(如控制误差、能耗、控制输入等)来进一步提高系统的控制效果^[26].与传统的自适应控制方法相比,自适应控制与优化算法的优势在于不仅在线调整控制器的参数,还引入了优化过程,进一步提升了系统的整体性能,尤其在多输入多输出(MIMO)系统和高复杂度系统中具有显著的效果^[27].在永磁同步电机(PMSM)控制中,自适应控制与优化算法的结合能够显著提高系统的精确性和鲁棒性.通过实时调整控制参数,适应电机负载变化、转速波动等不确定性因素,并通过优化算法进一步改善控制性能,尤其在高动态、高复杂度的电机控制应用中,能够实现更高的控制精度与效率.这使得该方法在电机驱动、飞行控制、机器人控制等领域得到了广泛应用,并能够在各种工作条件下提供精确、高效且具有鲁棒性的控制策略,满足对高性能和高适应性系统的需求.

自适应神经网络控制(Adaptive Neural Network Control, ANNC)最早由 Farzad K. Akhlaghi 等学者于 1990 年代提出.该方法结合了神经网络在非线逼近方面的优势与自适应控制在实时调整中的特点,旨在解决复杂系统中非线性、时变及不确定性较强的控制问题.其核心思想是利用神经网络模型逼近系统的动态行为,同时通过自适应控制机制实时调整神经网络的参数,以应对系统模型的不确定性和外部扰动^[28].

在永磁同步电机的控制中,ANNC 具有显著优势,尤其在高动态和非线性特性明显的电机控制应用中,能够有效提高控制系统的鲁棒性与适应性.传统电机控制方法通常依赖精确的数学模型,而 ANNC 通过神经网络在线学习电机系统的动态特性,不仅能应对电机负载变化、转速波动等实际工况中的不确定性,还能在没有精确系统模型的情况下,保持优异的控制性能.这使得 ANNC 成为一种非常适合于永磁同步电机驱动系统的控制方法,能够在面对复杂工况和外部扰动时,优化电机的运行稳定性和控制精度.

2.3 自抗扰控制

自抗扰控制是由我国研究员韩京清在 20 世纪 90 年代提出的一种新型控制算法^[29].它基于对传统 PID 控制原理的深入分析,针对 PID 控制的局限性,利用非线性设计理念创造了一些特殊功能的控制模块,以提升控制器的整体性能.该算法的核心在于,将简单的积分串联模型作为标准模型,将系统状态中与这一标准模型不符的部分视为总扰动^[30].通过采用扩张状态观测器来监测这些扰动,并将观测结果反馈至非线性状态误差反馈控制律中,以消除它们对系统的影响.这种方法使得即使是在充满扰动和不确定性的环境中,也能将系统简化为积分串联模型,从而简化了控制系统的设计过程.

自抗扰控制器由三个关键部分构成:跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和非线性状态误差反馈控制律(NLSEF)^[31],具体结构如图 6 所示.自抗扰控制因其对非线性系统的有效处理而在多个领域得到了广泛应用,特别是在非线性耦合的永磁同步电机控制系统中,其出色的控制效果得到了验证,研究人员也针对不同的应用场景对其进行相关研究,其主要研究方向如图 7 所示.

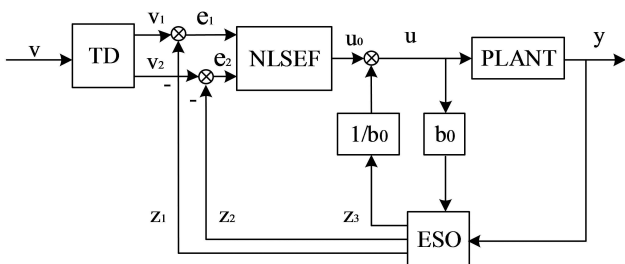


图 6 自抗扰控制结构框图

Fig. 6 Active disturbance rejection control block diagram

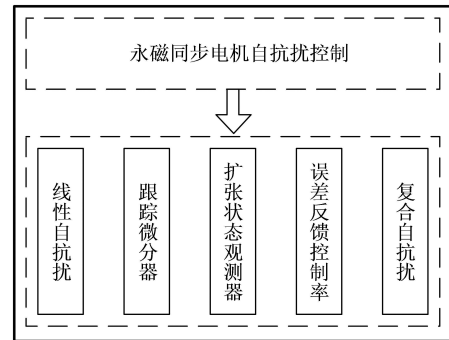


图 7 自抗扰控制研究方向

Fig. 7 Active disturbance rejection control research directions

在将非线性自抗扰控制应用于实际工程时,由于其结构复杂、理论分析困难以及参数众多,不利于工程实践.为此,高志强教授在韩京清研究员时间尺度概念的基础上,提出了频率尺度的理念,将自抗扰参数与频率联系起来,从而简化了自抗扰控制器的设计^[32].汪华章等人^[33]将线性自抗扰控制器引入永磁同步电机控制系统中,简化了参数设计的同时提高了电机的响应能力和抗扰动能力. Francesco Alonge 等^[34]将线性自抗扰控制应用于电机控制系统,利用两个线性扩张状态观测器来估计并补偿系统的内外扰动,有效抑制了各种不确定性和扰动.

跟踪微分器能对输入信号进行柔化处理,避免输入信号突变给系统带来的影响.匡萃璋、汪华章^[35]根据小误差“大增益,大误差小增益”的原理重新设计了跟踪微分器的 fal 函数,将给定信号进行平滑处理,克服了系统响应速度与超调之间的矛盾问题. P. Liu 等^[36]针对传统 fhan 函数的跟踪微分器在平衡跟踪和滤波能力上的局限性,提出了一种 fhan-DTOC-TD 跟踪微分器,显著提升了信号跟踪和噪声过滤的效果.张金辉等^[37]提出的可变增益 TD 具有噪声容忍性,并能根据跟踪误差动态调整增益,进一步提高了参考信号跟踪和导数提取的性能.

扩张状态观测器作为自抗扰控制的核心部分,通过合理设计,能够精确估计并补偿系统扰动.刘兆华等^[38]提出了一种基于二阶扩展状态观测器的新型电流传感器容错策略,用于永磁同步电机的无传感器控制和多参数辨识.在 A-C 两相电流传感器故障时,该方法仅依赖 B 相电流传感器即可估计 d-q 轴定子电流,实现了高性能的无传感器控制.结合两个模型参考自适应观测器与二阶扩展状态观测器并行工作,进

一步增强了系统的鲁棒性,实现了转子速度和位置的精确估计以及电感和永磁磁通的辨识。

非线性状态误差反馈控制率决定着自抗扰控制器的输出,程国扬等^[39]在近似时间最优控制的框架中嵌入了一种复合非线性误差反馈控制率,包含线性和非线性反馈两部分,分别实现了快速响应和抑制超调。盖江涛等^[40]提出了一种结合模型辨识补偿与自抗扰控制技术的新型无参数整定自抗扰控制策略。通过运用离散最速反馈控制 fhan 函数,他们解决了非线性状态误差反馈控制律的参数整定问题,从而简化了系统结构并提升了系统的动态响应能力。

为了进一步提高控制器的性能,复合自抗扰控制近年来也因其优异性能得到广泛应用,C. Dang 等^[41]提出了一种结合自适应趋近律的非奇异终端滑模控制方法,并引入扩张状态观测器,显著提高了系统状态向平衡点的收敛速度。该方法通过扩张状态观测器对总扰动进行估计与补偿,进一步优化了自适应滑模控制的性能。Wang Y 等^[42]创新性地发展了一种新型 ADRC 方法。为了减少控制参数数量和控制律的抖动,他们利用深度神经网络替代了传统的控制律,并将马尔可夫决策过程融入新型 ADRC 中。此外,他们还提出了一种基于双延迟深度确定性策略梯度算法的训练方法,以优化神经网络和模型性能。

2.4 模型预测控制

模型预测控制(MPC)是一种起源于 20 世纪 70 年代的计算机控制方法,现已广泛应用于各类控制系统中。MPC 的优势之一是对被控对象的模型要求较为宽松,只需系统具备一定的预测能力即可。其基本原理是在每个采样时刻 t 使用系统的预测模型和参考输入来预测未来一段时间内的输出状态,随后基于这些预测结果优化控制策略,在线求解出控制输入序列。然后,将序列中的第一个控制输入施加到系统中,并在下一时刻 $t+1$ 重新进行预测和优化^[43],重复此过程。尽管预测模型可以有所变化,模型预测控制的核心结构通常包括三个主要部分:基于模型的预测、滚动优化以及反馈修正,如图 8 为模型预测控制结构框图。首先,模型用来预测未来的输出状态,随后,通过不断优化得到期望的输出轨迹,最后利用反馈机制调整输出,使其尽可能接近期望值。

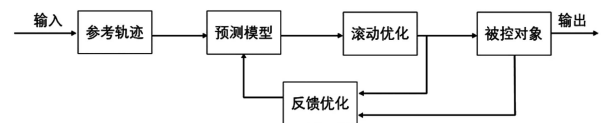


图 8 模型预测控制结构框图

Fig. 8 Model predictive control block diagram

模型预测控制的优点在于方便建立模型,鲁棒性和动态性能较好,可用于复杂的工业过程。但是控制的稳定性、抗干扰能力和模型的适应性以及在非线性区域的表现还可以进一步提高^[44]。

分布式模型预测控制(Distributed MPC)在 20 世纪 90 年代末到 21 世纪初由多个学者提出并逐步发展,主要应用于解决多智能体系统或大规模系统中的优化控制问题。在永磁同步电机(PMSM)控制领域,分布式 MPC 的引入为多个电机驱动系统的协同工作提供了有效的解决方案。其基本思想是将全局控制问题分解为多个局部控制问题,使得每个电机子系统能够基于本地状态和控制输入进行独立优化,从而避免了集中式控制中计算和通信带来的高复杂性^[45]。在永磁电机控制中,分布式 MPC 的工作原理是每个电机子系统根据自身的动态模型预测未来的状态,并根据局部优化问题计算控制输入。然后,通过网络进行信息交换和协调,确保在多电机系统中的全局性能最优化。例如,在多电机协作驱动或电力共享的电机系统中,分布式 MPC 通过协调各个电机的运行状态,实现了负载分配、电能优化等目标。其主要的改进之处在于,分布式优化算法使得多个电机子系统能够共享信息并协调决策,从而在保证全局性能的同时,降低了计算负担和通信压力,提升了系统的实时性和响应速度。这种方法特别适用于需要多个永磁同步电机协同工作的场景,例如电动车驱动系统、机器人控制系统以及多电机联合控制系统^[46]。分布式 MPC 在永磁同步电机控制领域的应用展现了其强大的优势,尤其在需要优化多个电机协同工作和增强系统鲁棒性的场景中。通过合理分配资源、优化控制策略,分布式 MPC 能够提高系统效率、减少能量消耗,并在复杂环境下增强电机系统的稳定性和可靠性。然而,分布式 MPC 在面对复杂约束和高效信息交换时,仍然可能面临计算负担过重和实时响应不足的问题,这一问题在一些高速动态控制应用中显得尤为突出。

为了解决分布式 MPC 在实时计算和约束处理方

面的不足,经济型模型预测控制(EMPC)作为一种新兴的优化方法被提出,旨在优化能源消耗、降低成本或提高其他经济指标,而不仅仅聚焦于系统的稳定性或轨迹跟踪性能。EMPC最早由瑞士学者于2002年提出,结合了模型预测控制的优化方法和经济优化理论,为多种工业控制应用提供了更加高效的解决方案^[47]。在永磁同步电机(PMSM)控制领域,EMPC的基本原理是在MPC框架内,将经济目标(如最小化能量消耗、降低运营成本、提高电机效率等)作为优化目标进行求解,从而实现电机系统在满足性能要求的同时达到经济效益最大化。这意味着,在每个采样时刻,EMPC不仅考虑电机的动态行为,还需要在优化过程中解决一个包含经济目标的优化问题,从而进一步提高电机系统的运行效率^[48]。相较于传统的MPC,EMPC的改进之处在于,它通过引入经济目标,进一步拓展了控制策略的应用范围,并使得控制过程能够动态优化资源分配和能效。此外,EMPC通过多参数二次规划(QP)算法对整个状态空间进行离线划分,并将最优控制策略存储于RAM或ROM中,在线时可以通过查表简化实时计算过程,提高了计算效率。这种方法不仅降低了实时计算负担,还能够灵活调整控制策略,以适应不同的经济目标和约束条件。然而,EMPC的实施依赖于高效的优化算法,并且在面对大规模或复杂系统时,仍然可能面临计算效率的挑战。

学习型模型预测控制(LB-MPC)作为一种新兴的技术因提高电机控制系统在复杂和不确定环境下的适应能力得到了越来越多的关注,其核心目的是通过学习机制提高控制系统在复杂、动态和不确定环境下的预测能力。旨在结合机器学习模型(如神经网络、深度学习、支持向量机等)与MPC控制框架,增强系统的自适应性和鲁棒性,尤其在面对无法精确建模或模型变化较大的情况时表现出优越性。其基本原理是通过机器学习技术优化电机的控制策略。在实际应用中,系统通过在运行过程中实时收集数据,并利用学习算法逐步调整控制策略,从而提高对动态变化和未知扰动的适应能力。这种方法能够使电机控制系统在缺乏准确数学模型的情况下,通过学习历史数据和实时反馈,不断优化控制决策,改善电机的性能和稳定性^[49]。与传统MPC相比,学习型MPC具有显著的优势,它不依赖于精确的数学模型,而是通过从实际数

据中学习有效的控制策略。这使得学习型MPC在应对复杂和不确定的环境时更加鲁棒,能够在电机系统的运行过程中动态调整控制策略,优化控制效果,降低计算负担^[50-51]。学习型MPC在永磁同步电机控制领域的应用广泛,尤其适用于复杂的电机驱动系统、智能电动汽车、机器人控制以及工业自动化等领域。通过引入机器学习算法,学习型MPC不仅能够优化电机的性能,还能够提升系统在复杂环境下的鲁棒性和适应性,确保电机系统在各种工况下的稳定运行。

3 无位置传感器控制

永磁同步电机的控制系统需要获取转子位置和转速信息以实现控制闭环。但是引入传感器也会带来以下问题:增加应用成本,高精度的传感器价格昂贵,且损坏后不易更换;传感器的接线降低了电机运行可靠性,且增加了电机的体积;在恶劣工况下传感器性能受影响,对电机的稳定运行和系统整体的鲁棒性不利;传感器需要有较高的安装精度,若有不同心等问题,会对电机性能造成影响,这个问题也可能突发于工作过程中,对电机的稳定运行极为不利。由于传统物理传感器存在上述不足,所以无传感器的电机控制方案研究应运而生,无传感器电机控制算法也已经成为研究热点。

根据检测的方法,无传感器控制可分为基于电机基波模型与基于电机凸极效应的方法^[52]。它们也分别对应了电机在不同转速速域下合适的应用方法,其中,在中高速时常用基于电机基波模型的方法,而在零低速时则常用基于电机凸极效应的方法。每种方法也各自有着更加细分的控制策略的实现。后文将以速域为分类基准,分别介绍在不同速域下适用且常用的无传感器控制策略。

3.1 零低速下的无传感器控制

在零低速时,永磁同步电机的反电动势幅值很小,使得利用反电动势估算转子位置的方法观测性能变差。众多学者便转而研究将高频信号注入到永磁同步电机中,以获取转子位置信息的方法。

高频信号注入法最早由美国Robert D. Lorenz教授等人提出^[53]。其工作的原理大致为:首先在电机的定子注入高频激励信号,以得到与转子相互作用下产生的高频响应电流,该高频电流信号包含了转子的

位置、转速信息,提取该高频电流信号并使用特定的解算算法(如锁相环 PLL)进行解调与分析计算,便可以得到转子位置与转速信息。

根据高频信号的类型,可将其分为高频正弦波信号注入、方波信号注入等;而根据信号的解调方式,又可分为旋转高频信号注入和脉振高频信号注入,其分别对应着对电流的相位、幅值的解调^[54]。

3.1.1 旋转高频信号注入

该方法通常在两相静止坐标系下完成高频电压信号注入与计算,其波形通常为正弦波。而注入的旋转高频信号所产生的负序高频电流分量,则带有与电机转子位置相关的信息^[55]。应设计多级滤波器,滤除信号采集时同时采集到的基频电流分量、正序高频电流分量,才可提取出需要的负序高频电流分量,并输入到锁相环等环节中提取出转子位置信息。

作为一种在零低速域下常用的转子位置估算方法,旋转高频信号注入有着以下优点:由于旋转高频信号在空间上形成了连续的旋转矢量,其便可以更全面地激励出电机绕组的凸极性,从而得到更好的响应信号为高精度的位置估算所用;同时,其主要依赖凸极性进行位置估算的特点,也能在负载变化等电机运行中动态范围变化的场景下进行估算,具有较好的鲁棒性;进一步地,因其连续旋转的高频信号在空间上保持一致,能够实时追踪转子位置的变化,使得其动态响应性能良好,在伺服控制等动态响应要求高的场景中有着较好的表现。

但是,为提取信号而使用相关滤波器时,造成的系统带宽与动态性能的降低,以及逆变器中器件的固有特性、死区时间等多种非线性因素的干扰导致的转子位置估计出现误差,这是需要关注的重点,也是学者们改进的方向之一。

文献[56]针对电流解调过程复杂、位置估计误差在不同速度下不定的问题,提出了一种基于估计位置反馈(EPF)的电流解调算法,并设计了一种新型解调信号,实现了转子位置误差信息直接构造,有效简化了电流解调过程。该方法消除了位置估计误差的转速敏感性,使其在快速的转速变化中也有着较好的估计性能。文献[57]提出了一种采用 NF 提取基频和高频信号,通过改进 SFF 提取含有转子位置信息电流的方法,有效解决了传统数字滤波器应用于旋转高频信号

注入时,难以对动态响应速度和滤波精度兼顾,以及占用 CPU 资源较多且可移植性差的问题。实验证明,其在转速、负载转矩突变的情况下对转速、角度估计准确性都有了一定的提升。文献[58]针对高频信号注入法中转子位置估计易受磁场交叉饱和效应等因素所影响,导致估计偏差的问题,提出了一种基于负载转矩特性追踪的在线补偿方法。该方法通过提取估计轴系高频响应电流幅值信息并结合解析几何实现位置偏差在线检测与补偿,无须离线测试或改变电机运行状态,具有算法简单、通用性好和鲁棒性强的特点。实验表明,该方法能有效将位置偏差抑制至接近 0°,额定负载条件下平均抑制率达 93.7%,并显著降低负载变化对信噪比的影响,验证了其参数变化的低敏感性和对复杂工况的适应性。

3.1.2 脉振高频信号注入

该方法由 Jung IK Ha 教授首次提出,并在表贴式永磁同步电机上实现了对应的无传感器控制^[59]。与旋转高频信号不同的是,该方法是在估计的同步旋转坐标系的 d 轴中施加高频正弦信号。通过让电机电感磁饱和,以显出饱和凸极效应,使得没有结构凸极性的表贴式永磁同步电机也适用于该方法获取转子位置信息。脉振高频信号注入法系统结构较为简单,受逆变器非线性因素影响较小^[60]。但是其动态性能较差、收敛时间较长、稳定范围较小^[61]。不同学者分别针对其滤波器或注入信号的形式进行改进,以弥补该法的不足。

文献[62]使用广义二阶积分器代替传统滤波器,替换了位置观测闭环的带通滤波器和低通滤波器,简化了参数整定过程,提升了位置估精度。同时避免了使用传统 LPF 导致的电流环延时的产生,及其对系统的响应速度的降低,还增加了系统带宽。将转速估计最大误差 36 r/min,降低至 15 r/min,最大位置误差从 -0.23 rad 降低至 -0.1 rad,具有一定的改进效果。文献[63]同样提出采用广义二阶积分器来代替传统控制方法所采用的低通滤波器来进行转子位置信息的提取,但引入并结合了自扰控制,以提升转子位置的估计精度。经过实验证明,相较于传统的脉振高频信号注入的转速估计误差 ± 5 r/min,其降低至 ± 2 r/min,有着更好的控制精度。文献[64]设计了一种基于旋转综合矢量的脉振高频电压注入法,注入的高频信

号是一个旋转综合矢量,其在估计 d 轴和估计 q 轴的分量幅值相等,相位相差 90 度,产生的零序电压具有对称性.实验证明,该法解决了传统方法中的六倍频干扰问题,也有效地解决了逆二倍频坐标算法中存在的转矩脉动谐波多、转速波动大的问题.

若将正弦信号换为方波信号,则可以更好地分离和提取高频信号,且注入的信号频率远高于旋转信号和脉振正弦信号^[65].图 9 是高频方波注入的基本流程要点.

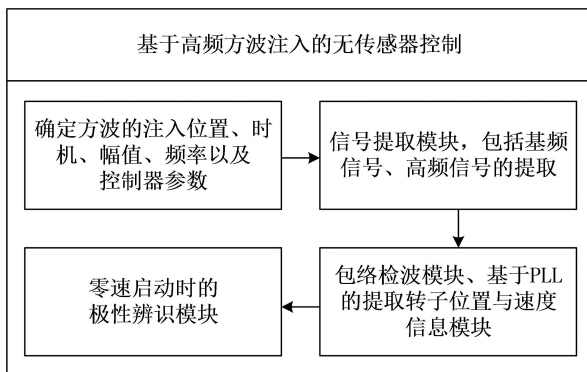


图 9 高频方波注入技术要点

Fig. 9 Key points of High-Frequency square wave injection technique

其注入信号频率最高可达开关频率等级,并可省去低通滤波器,有效提高系统带宽与动态性能,且产生的噪音较小.进一步地,有学者研究并实现了无滤波器的高频方波信号注入法,其向估计的 d 轴中注入高频方波信号,而定子轴系高频电流响应包络中含有位置信息,通过包络检测器提取电流信号后,可直接采用反正切函数进行计算,估计出转子位置信息,解耦位置误差信息则使用矢量叉乘的方法,避免其受电感参数变化的影响^[66].也有学者将视野进一步拓展至高频方波注入下逆变器的非线性对其的影响,并着手进行改进与实现.针对空载情况下载波周期的不同阶段对三相电流造成畸变的不同,提出了一种在自然坐标轴系下基波电流的提取与高频电流的修正策略,以抑制逆变器非线性引起的位置角度误差^[67].该方法显著改善了系统的估计与动态性能,且得益于注入的电压幅值的减小,其母线代电压的利用率也得到了提升.

3.1.3 转子初始位置检测

在零速启动时,由于上述基于凸极性进行转子位置估计的控制策略仅可以实现转子位置估计,会造成

当注入的高频信号的电压矢量出现在负向的观测转子 d 轴时,观测器依然收敛,导致无法实现对转子磁极极性进行检测^[66,68].若不进行转子初始位置的估计直接启动,会导致电机启动失败甚至损伤电机;而不进行磁极辨识直接启动可能造成电机反转.所以,进行转子初始位置的估计,尤其是转子磁极极性的辨识尤为重要.

文献[69]通过施加振幅相同但方向相反的低频的方波信号,获取并比较瞬态响应的电流峰值大小,以进行转子的极性辨别.并提出了一种基于注入变频方波电压的双锁相环结构转子位置估算的方案,该方案将锁相环输出的估算角度与相电流重构,并进行二次锁相以得到角度误差补偿.实验证明系统在不同负载的工况下启动时,都具有较好的转子位置估算效果,并且得益于估算流程的简化,电机启动时间也得到了相应的缩短.文献[70]提出了一种基于高频信号注入的非线性建模与拟合实现的初始位置估计方法,利用少数测试对非线性模型辨识,实现对转子位置的精确估计,使用短脉冲注入方法辨识转子磁极极性.该方案省去了复杂的滤波器和观测器设计,易于实现,并有着较快的收敛速度,且避免了相位偏移的问题.

3.2 中高速下的无传感器控制

永磁同步电机在中高速运行时,电机转速相对于零低速较高,其反电势、定子绕组电流等物理量的检测比较容易,所以根据电机的基波数学模型就可以估算转子位置信息.中高速下的控制策略主要包括:磁链估计法和各种基于观测器的算法以及人工智能算法^[71].

3.2.1 磁链估计法

电机在中高速运行阶段,永磁同步电机的定子反电动势幅值较大易于检测,电机定子电阻压降的误差可以忽略,这个特征使得基于定子电压方程来估计磁链更加可靠.在中高速运行时,电压和电流信号的波形更加清晰,信噪比更高,磁链估计精度更为准确.

磁链估计法是基于永磁同步电机的定子电压方程,通过测量电机的定子电压和电流,结合已知定子电阻和电感参数,进行积分得到磁链向量,然后对磁链向量中永磁体 α 轴和 β 轴的磁链分量进行反正切函数计算,得到转子位置信息.磁链估计法计算过程表达式如式(1)(2).该方法的核心是如何精确获取转

子磁链矢量,从而实现无位置传感器的转子位置估计和控制。

$$\psi_f = \psi_s - L_{\alpha\beta} I_s = \int (u_s - R_s I_s) dt - L_{\alpha\beta} I_s. \quad (1)$$

$$\theta_e = \arctan \frac{\psi_{f\alpha}}{\psi_{f\beta}}. \quad (2)$$

磁链估计法算法实现简单,适合资源有限的嵌入式系统;应用灵活性强,能够高效运行;容易与其它控制方法结合,磁链估计法可以与滑模观测器、扩展卡尔曼滤波器、锁相环等先进算法相结合,增强低速域性能和鲁棒性.磁链估计法也存在一定局限性,其算法对电机参数的依赖性较强,参数不准确可能导致估计误差;积分过程可能引入漂移。

针对传统磁链估计法中的纯积分器对定子电压的直流偏移和电阻温漂非常敏感,微小的直流分量将对积分器的输出产生很大偏移这一现象,有学者在原有的磁链估计法基础上将高通滤波器与纯积分器串联起来构成一阶惯性滤波器来克服积分漂移的问题,并通过加入锁相环(PLL)实现输出信号的自动跟踪,以此来抑制转矩脉动引起的位置估计误差,提升系统稳定性^[72].针对积分直流偏置的问题,郭云璿和马思源等人^[73]将两个相同的一阶高通滤波器串联组成二阶高通滤波器对定子磁链进行滤波,同时在锁相环算法中加入相位补偿来解决相位超前问题,优化后的策略对于辨识转子速度以及位置信息误差更小,提升了辨识精度,系统响应速度更快.Guoqiang W 和 Huilin Z^[74]针对永磁同步电机无传感器控制提出了一种改进的速度自适应磁链滑模观测器(FSMO),其特点是滑模增益参数可以在线调整,抑制了传统 FSMO 抖振的问题,推导了速度估计的自适应律,降低了转子速度估计的误差。

3.2.2 滑模观测器算法(SMO)

滑模控制是一种非线性的控制方法,滑模观测器算法是在变结构基础上得到发展的.其特点是受参数变化及外部扰动影响较小,具有很好的鲁棒性.滑模观测器无传感器控制的核心是通过采集定子电压、电流以及反电势来解算转子当前电角度和转速信息.其设计思路是将电机的定子电流、定子电压作为输入信号,将检测到的实际电流值与估计电流值的误差构建滑模切换面 $S(x)$,滑模切换面目的是设计一个能够

引导系统状态沿着预定轨迹收敛的面,当估计电流值与实际电流值之间的误差为零时,也就是电流观测信号跟踪上电流实际信号,对滑模面进行切换,使系统稳定在滑模面上.传统的切换函数包括符号函数、饱和函数、S形函数^[75].

滑模观测器算法工程上易于实现,结构较为简单,对外部扰动有很好的鲁棒性.但是观测器采用了非线性的滑模高增益系数和符号函数,导致了电机在控制过程中会发生抖振现象^[76].为此许多国内外学者针对此现象进行了研究与创新.杨永杰和刘旭东等学者^[77],设计了新型趋近律实现缩短系统到达滑模面所需要的时间,对开关函数进行了改进,替换传统的开关函数以此来减弱系统抖振问题.在动态滑模理论基础上 Karami-Mollae A 和 Tirandaz H^[78]提出了一种具有容错控制的控制策略,针对有不确定性外部因素影响的非线性系统,控制该系统时将积分器放置于被控系统输入信号之前,从而有效解决了输入信号的开关切换问题,继而削弱了系统控制信号抖振的问题.张立伟和李兴等人^[79]提出了一种新型滑模观测器,设计了一种分段指数型函数作为开关函数,改进型的滑模观测器估测的三相电流波形能够更快地向规律的正弦波靠近,且遇到负载转矩突然增大时,三相电流可以在短时间快速地回归正弦波,同时转速的误差没有明显变化,削弱了抖振现象,提升了控制系统稳定性.S. Liu 和 L. Liu 等人^[80]提出了一种固定时间收敛特性的高阶动态观测策略来设计 SMO,来克服系统收敛问题,固定时间收敛与有限时间收敛是不同的,固定时间稳定性的收敛时间的上界不依赖于初始条件,仅仅依赖于设计的参数。

3.2.3 扩展卡尔曼滤波器算法(EKF)

扩展卡尔曼滤波器(EKF)是在卡尔曼滤波基础上得到发展的,是一种用于非线性系统的滤波算法^[81].卡尔曼滤波适用于线性系统的最优滤波算法,但当系统为非线性时,EKF 将电机模型中的非线性项进行线性化,然后进行卡尔曼滤波.其核心原理是利用电机的非线性数学模型,在离散时间内结合定子电压、电流等测量数据,通过预测值和校正过程递归估算转子的位置和速度.EKF 考虑了随机噪声的影响,巧妙利用系统噪声和测量噪声的协方差矩阵代替噪声矢量进行计算,无须存储中间变量^[82].EKF 在永磁

同步电机无传感器控制系统的框图如图 10 所示。

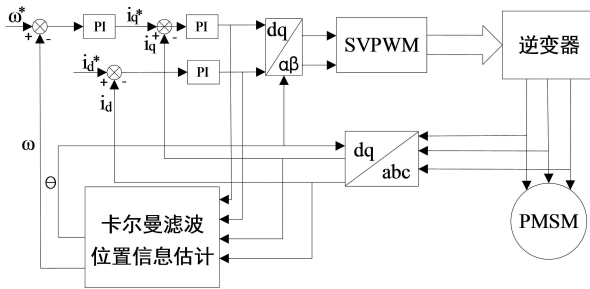


图 10 扩展卡尔曼滤波无感控制框图

Fig. 10 Extended Kalman filter sensorless control block diagram

EKF 具有自适应能力,能够有效抑制噪声,具有多参数估算能力.传统 EKF 算法中存在大量的数学矩阵,需要复杂地计算,因此如何提升计算效率成为国内外学者研究热点。

Shoukang Wang 和 Kai Liu^[83] 在无传感器系统中提出了一种自适应并行降阶的扩展卡尔曼滤波器,利用衰落因子在线更新噪声矩阵,解决了大量试凑得到的固定噪声矩阵难以适应变化的工作条件问题;通过对矩阵降阶,在一个采样时刻只需要承担一次三阶 EKF 运算,减少了计算时间,提高了算法适应性.Fengtao Gao 和 Zhonggang Yin 等人^[84] 提出了一种基于滞后补偿辅助自适应准衰落卡尔曼滤波器(LC-AQKF)的新型位置估计策略,推导出了准衰落因子,避免了一些苛刻的假设,并将其引入到预测误差协方差矩阵中,提升了系统计算效率,克服了自适应准衰落卡尔曼滤波器在高速下的相位滞后的问题,使转子估计精度大大提升.Quang NK 等人^[85] 提出了基于现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)的 EKF 算法实现了永磁同步电机无位置传感器控制,优化了迭代计算过程,大大降低了资源占用率。

3.2.4 人工智能算法

人工智能算法能够模仿人类的智能行为,通过学习和适应复杂的非线性系统可以自动捕捉系统的非线性动态特征.常见的算法有机器学习算法、神经网络算法、遗传算法等.将人工智能算法应用在永磁同步电机无传感器系统中解决传统基于模型方法中的难点和不足,提升控制系统的精度和鲁棒性.智能算法凭借独特的自适应学习机制以及对非线性系统有高精度的辨识性能受到了学者们的关注与发展。

邓豪^[86] 提出了一种混合 PSO-GSA 算法,通过将

粒子群算法(PSO)与万有引力算法(GSA)结合,使混合算法满足控制器参数的寻优能力,将 PSO-GSA 用于永磁同步电机滑模控制调速系统.ZINE W 和 MAKNI Z 等人^[87] 提出了一种新型 IPMSM 转子位置的观测器,通过神经网络算法将相电流和电压与转子位置相关联的数据集来构建观测器模型,减小了谐波的影响.由于传统 PI 调节器在参数调节上具有局限性,任建、王淑红等人^[88] 利用 BP 神经网络算法对基于 MRAS 的无感控制方法进行了改进,利用 BP 神经网络设计自适应律,通过算法学习修正输出值,最终 BP 神经网络输出的辨识速度即为电机真实转速^[89]。

人工智能算法可用于对控制器的改进,弥补单一算法在全局搜索和局部探索中的能力.在未来控制系统中人工智能算法用于估测电机转子位置、速度信息有良好的发展前景。

4 总结与展望

本文通过对永磁同步电机控制策略的全面综述,分析了各类控制方法的优势和局限性,并探讨了其在实际应用中的挑战.研究发现,尽管现有控制策略在理论和实践中取得了显著成果,但仍存在以下问题和挑战:

1) 控制算法的复杂性与计算负担.许多高精度和快速响应的控制策略需要大量的计算资源,尤其在高速动态和精密控制场合,可能导致计算延迟或控制性能不稳定。

2) 系统鲁棒性不足.面对电机参数变化和外部负载扰动等不确定性因素时,现有控制策略的鲁棒性还需加强.尤其在复杂工况下,控制系统可能出现性能下降,无法保证系统的长期稳定性和高效性。

3) 无位置传感器控制技术的精度和稳定性问题.尽管无位置传感器控制技术具有成本优势,但其在高速或大负载变化情况下的精度和稳定性仍存在不足,亟待突破,以满足更多应用场景的需求。

通过总结和归纳永磁同步电机不同控制策略的基本原理及其在不同工作状态下的控制性能,并进行深入分析.得出未来研究应着重于以下方向:

1) 开发高效算法,降低计算复杂性并提高实时性.研究如何减少控制算法的计算负担,提升实时性采用智能优化算法;研究硬件加速技术,扩展算法的

实现的硬件平台,更广泛地使用各种硬件平台对数据进行高性能的处理,例如发挥 DSP 对数字信号高处理运算能力,或者 FPGA 的并行处理能力,确保高精度控制下的快速响应.强化控制策略鲁棒性,适应不确定性和非线性因素;提高控制系统在参数变化、负载扰动等复杂工况下的鲁棒性,重点研究自适应控制和滑模控制等方法,确保系统稳定性和高效性.

2) 优化无位置传感器技术,提高精度与可靠性.通过改进电机参数估计与滤波算法,提高无位置传感器控制的精度和稳定性,研究传感器融合技术,扩展其在复杂环境中的应用.

综上所述,永磁同步电机控制策略的研究不仅对电机控制技术的发展具有重要意义,也对促进节能减排和工业自动化水平的提升具有深远影响.

参考文献

- [1] 罗润谦.新能源汽车用永磁同步电机的研究现状[J].兵器材料科学与工程,2023,46(5):154-158.
- [2] 崔弘,李艳东.永磁同步电机控制策略综述[J].防爆电机,2021,56(3):3-7.
- [3] KIM K H, YOUN M J. A nonlinear speed control for a PM synchronous motor using a simple disturbance estimation technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(3): 524-535.
- [4] LIU C, HU J H, SHANG J. Dual-vector predictive current control of open-end winding PMSM with zero-sequence current hysteresis control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 184-195.
- [5] 涂志文,蒋成明,涂群章,等.电动车用永磁同步电机无传感器控制技术综述[J].微电机,2022,55(6):99-105.
- [6] 李兵强,林辉,邢化玲.永磁同步电机功角检测方法[J].电机与控制学报,2013,17(12):27-32.
- [7] 张厚升,杜钦君,于兰兰,等.发电厂用恒压频比控制的变压变频调速系统研究[J].山东电力技术,2020,47(7):53-59.
- [8] 戴先中,刘国海,张兴华.恒压频比变频调速系统的神经网络逆控制[J].中国电机工程学报,2005,25(7):109-114.
- [9] FANG J X. Position sensorless control of brushless DC motor[J]. Advanced Materials Research, 2014, 915-916: 418-421.
- [10] 方正.电动汽车永磁同步电机直接转矩控制系统研究[D].长沙:湖南大学,2012.
- [11] UTKIN V. Variable structure systems with sliding modes[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1977, 22(2): 212-222.
- [12] 高为炳.变结构控制的理论及设计方法[M].北京:科学出版社,1996.
- [13] WANG H Q, JIAO T C, XING X N, et al. Speed regulation of PMSM systems based on a new sliding mode reaching law[J]. IEEE Access, 2024, 12: 24062-24070.
- [14] JUNEJO A K, XU W, MU C X, 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.
- [15] LI Z, WANG F X, KE D L, et al. Robust continuous model predictive speed and current control for PMSM with adaptive integral sliding-mode approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14398-14408.
- [16] ZHANG D L, KONG T C, DU R X. A class of second-order sliding mode controller for servo systems[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2012, 10(2): 268-272.
- [17] MOBAYEN S. Fast terminal sliding mode controller design for nonlinear second-order systems with time-varying uncertainties[J]. Complexity, 2015, 21(2): 239-244.
- [18] CHEN M, WU Q X, CUI R X. Terminal sliding mode tracking control for a class of SISO uncertain nonlinear systems[J]. ISA Transactions, 2013, 52(2): 198-206.
- [19] LU E, LI W, WANG S B, 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.
- [20] HOU Q K, DING S H. GPIO based super-twisting sliding mode control for PMSM[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(2): 747-751.
- [21] 鲁文其,胡育文,梁骄雁,等.永磁同步电机伺服系统抗扰动自适应控制[J].中国电机工程学报,2011,31(3):75-81.
- [22] LIU D J, HAN J J, CHEN G D, et al. Fuzzy self-tuning fractional order PD permanent magnet synchronous motor speed control based on torque compensation[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 2141.
- [23] LIU C W, WEN N, MA L M, et al. Application of an alternating current motor system based on fuzzy adaptive tracking control for nonlinear systems[J]. Informatica, 2024, 48(15): 1-12.
- [24] 罗鹏,赵红,张忠伍,等.基于滑模负载扰动观测器的 USV 永磁同步推进电机模糊自适应控制[J].电工技术,2024(15):33-37+40.
- [25] 王艳阳,胡海林,杨杰,等.永磁同步电机模糊自适应低开关频率模型预测电流控制[J].国外电子测量技术,2024,43(6):191-199.
- [26] GUO Q B, ZHANG C M, LI L Y, et al. Design and implementation of a loss optimization control for electric vehicle in-wheel permanent-magnet synchronous motor direct drive system[J]. Applied Energy, 2017, 204: 1317-1332.
- [27] GANGULI S, KUMAR A, KAUR G, et al. A global optimization technique for modeling and control of permanent magnet synchronous motor-drive[J]. Innovations in Information and Communication Technology Series, 2021: 74-81.
- [28] LI S H, WON H, FU X G, et al. Neural-network vector controller for permanent-magnet synchronous motor drives: Simulated and hardware-validated results[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50(7):

- 3218-3230.
- [29] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
- [30] 朱斌. 自抗扰控制入门[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.
- [31] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007(1): 24-31.
- [32] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498-1510.
- [33] 汪华章, 李明洋, 姜承忠. 线性 ADRC 在永磁同步电机 DTC 系统的应用研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2019, 45(5): 491-498.
- [34] ALONGE F, CIRRINCIONE M, D'IPPOLITO F, et al. Robust active disturbance rejection control of induction motor systems based on additional sliding-mode component[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5608-5621.
- [35] 匡萃璋, 汪华章. 一种非线性自抗扰控制的 PMSM 速度控制策略研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 35-40.
- [36] LIU P L, WANG T, CHAI Z Y, et al. A double-r than algorithm for tracking differentiator of active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6): 7494-7509.
- [37] ZHANG J H, CUI C F, GU S M, et al. Trajectory tracking control of pneumatic servo system: A variable gain ADRC approach[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(11): 6977-6986.
- [38] LIU Z H, NIE J, WEI H L, et al. Second-order ESO-based current sensor fault-tolerant strategy for sensorless control of PMSM with B-phase current[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(6): 5427-5438.
- [39] 程国扬, 曾佳福. 快速定位伺服系统的控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 52-56.
- [40] 盖江涛, 黄庆, 黄守道, 等. 基于模型补偿的永磁同步电机自抗扰控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(4): 581-588.
- [41] DANG C L, DOU M F, YAN S H, et al. An improved adaptive sliding mode speed control of PMSM drives with an extended state observer[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(4): 2349-2361.
- [42] WANG Y C, FANG S H, HU J X, et al. A novel active disturbance rejection control of PMSM based on deep reinforcement learning for more electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(2): 1461-1470.
- [43] 万勍琦, 汪波, 关文卿, 等. 改进虚拟空间矢量法的 PMSM 模型预测控制策略[J]. 电气传动, 2024, 54(12): 8-15.
- [44] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.
- [45] DROGE G, EGERSTEDT M. Distributed parameterized model predictive control of networked multi-agent systems[C]//2013 American Control Conference. Washington, DC: IEEE, 2013: 1332-1337.
- [46] CAMPONOGARA E, JIA D, KROGH B, et al. Distributed model predictive control[J]. IEEE Control Systems, 2002, 22(1): 44-52.
- [47] ANGEL D. Economic model predictive control[M]//Encyclopedia of Systems and Control. Cham: Springer International Publishing, 2021: 665-671.
- [48] TRAN T, LINGA K V, MACIEJOWSKI J M. Economic model predictive control - A review[C]//Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC). Sydney, Australia: International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), 2014: 1.
- [49] HEWING L, WABERSICH K P, MENNER M, et al. Learning-based model predictive control: Toward safe learning in control[J]. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 2020, 3: 269-296.
- [50] KABZAN J, HEWING L, LINIGER A, et al. Learning-based model predictive control for autonomous racing[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(4): 3363-3370.
- [51] 刘聪, 刘辉, 韩立金, 等. 基于学习型滑模预测控制的无人驾驶车辆非结构化环境轨迹跟踪及稳定性控制[J]. 机械工程学报, 2024, 60(10): 399-412.
- [52] 李佳伦, 宋桂英, 郭慧敏. 改进型自适应滑模观测器的 PMSM 无速度传感器[J]. 微电机, 2020, 53(1): 47-53.
- [53] CORLEY M J, LORENZ R D. Rotor position and velocity estimation for a salient-pole permanent magnet synchronous machine at standstill and high speeds[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(4): 784-789.
- [54] 李浩源, 张兴, 杨淑英, 等. 基于高频信号注入的永磁同步电机无传感器控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2653-2664.
- [55] 郝嘉睿. 基于旋转高频注入法的永磁同步电机低速无位置传感器控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [56] 麦志勤, 刘计龙, 肖飞, 等. 基于估计位置反馈电流解调算法的改进型高频旋转电压注入无位置传感器控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 870-881+891.
- [57] 何叶, 胡红明, 杨皓东, 等. 基于改进转子位置解调的旋转高频电压注入法[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2023, 47(2): 51-58.
- [58] 毕广东, 张国强, 王高林, 等. 高频信号注入永磁电机系统转子位置估计偏差在线补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7205-7213.
- [59] KANG J, KIM T, SHIN H, et al. Direct energy recovery system for membrane capacitive deionization[J]. Desalination, 2016, 398: 144-150.
- [60] RACA D, GARCIA P, REIGOSA D, et al. A comparative analysis of pulsating vs. rotating vector carrier signal injection-based sensorless control[C]//2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Austin, TX, USA: IEEE, 2008: 879-885.
- [61] TANG Q P, SHEN A W, LUO X, et al. PMSM sensorless control by injecting HF pulsating carrier signal into ABC frame[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3767-3776.

- [62] 周奇勋, 王一航, 史柯柯, 等. 基于广义二阶积分器的高频脉振电压注入 PMSM 无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(9): 179-188.
- [63] 吕德刚, 姜国威, 纪堂龙. 永磁同步电机低速域改进高频脉振注入控制[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(6): 32-40.
- [64] 王宇, 邢凯玲, 张成糕. 基于旋转综合矢量脉振高频电压注入的永磁通切换电机无位置传感器技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7224-7236.
- [65] 李扬. 脉振高频信号注入永磁同步电机无位置传感器控制策略电磁振动分析[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [66] 张国强. 内置式永磁同步电机无位置传感器控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [67] 徐奇伟, 熊德鑫, 陈杨明, 等. 基于新型高频纹波电流补偿方法的内置式永磁同步电机无传感器控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(3): 680-691.
- [68] 王高林, 杨荣峰, 于泳, 等. 内置式永磁同步电机转子初始位置估计方法[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(6): 56-60.
- [69] 徐萌, 王艳阳, 高洁, 等. 基于双锁相环的永磁同步电机转子初始位置估算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 49-57.
- [70] 姚培煜, 冯国栋, 吴轩, 等. 基于非线性建模与拟合的永磁同步电机转子初始位置精确估计方法[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(2): 142-151.
- [71] 李冉. 永磁同步电机无位置传感器运行控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [72] 麦志勤, 刘计龙, 肖飞, 等. 基于锁相环的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电力电子技术, 2017, 51(7): 97-99.
- [73] 郭云珺, 马思源, 余翔. 基于改进磁链估计法的 PMSM 无位置传感器控制[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(9): 192-195+199.
- [74] WANG G Q, ZHANG H L. A new speed adaptive estimation method based on an improved flux sliding-mode observer for the sensorless control of PMSM drives[J]. ISA Transactions, 2022, 128: 675-685.
- [75] 胡维昊, 王跃, 李明烜, 等. 基于 MRAS 的多相永磁直驱型风力发电系统无速度传感器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 118-124.
- [76] CHEN H M, RENN J C, SU J P. Sliding mode control with varying boundary layers for an electro-hydraulic position servo system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26(1): 117-123.
- [77] 杨永杰, 刘旭东. 基于改进滑模方法的永磁同步电机宽速范围无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(7): 7-13.
- [78] KARAMI-MOLLAEE A, TIRANDAZ H. Adaptive fuzzy fault tolerant control using dynamic sliding mode[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2018, 16(1): 360-367.
- [79] 张立伟, 李行, 宋佩佩, 等. 基于新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制系统[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 70-78.
- [80] LIU S Y, LIU L, LIN Q L, et al. Fixed-time high-order dynamic observation strategy for PMSM sensorless control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(12): 16442-16457.
- [81] 李洪凤, 徐浩博, 徐越. 扩展卡尔曼滤波参数辨识下永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(9): 19-30.
- [82] 李跃. 基于扩展卡尔曼滤波无位置传感器永磁同步电机控制系统研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- [83] WANG S K, LIU K. An adaptive speed estimation method based on a reduce-order extended Kalman filter for PMSM sensorless drives[C]// 2024 IEEE 2nd International Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT). Jilin, China: IEEE, 2024: 220-224.
- [84] GAO F T, YIN Z G, BAI C, et al. A lag compensation-enhanced adaptive quasi-fading Kalman filter for sensorless control of synchronous reluctance motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 15322-15337.
- [85] QUANG N K, HIEU N T, HA Q P. FPGA-based sensorless PMSM speed control using reduced-order extended Kalman filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6574-6582.
- [86] 邓豪. 基于人工智能算法的改进滑模 PMSM 控制系统研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [87] ZINE W, MAKNI Z, MONMASSON E, et al. Interests and limits of machine learning-based neural networks for rotor position estimation in EV traction drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(5): 1942-1951.
- [88] 任建, 王淑红, 黄济文, 等. 基于参数辨识的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(1): 8-15.
- [89] KECHICHE O B, ATTIA H S, SAMMOUD H, et al. Continuous HFSI techniques applied to rotor position estimation of IPMSM at standstill and low speed—a survey[C]// Eighth International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices. Sousse: IEEE, 2011: 1-10.

(责任编辑: 张阳, 殷锋, 付强, 和力新, 肖丽; 英文编辑: 周序林, 郑玉才)