

基于电气工程自动化的永磁同步电机无传感器控制抗干扰技术研究

多 吉

西藏旁多水利发电有限责任公司 西藏 拉萨 850000

【摘 要】：本文研究了基于电气工程自动化的永磁同步电机（PMSM）无传感器控制技术的抗干扰能力，尤其在西藏等高原地区的应用。针对环境中常见的电磁干扰问题，提出了一种高效的无传感器控制方法。对比不同控制策略，设计了一种适应恶劣环境的抗干扰控制方法，能够在减少硬件复杂度时提高系统稳定性和鲁棒性。该研究为 PMSM 在高原地区的应用提供了技术支持，也为未来的自动化电气系统抗干扰技术发展提供了新的思路。

【关键词】：永磁同步电机；无传感器控制；抗干扰技术；电气自动化；高原环境

DOI:10.12417/2705-0998.25.15.087

引言

电气工程自动化领域中，永磁同步电机（PMSM）因其高效能、可靠性及较低的维护需求，被广泛应用于各类自动化系统。传统的 PMSM 控制方法通常依赖于传感器来实时监控电机状态，但在实际应用中，传感器的可靠性常受到环境干扰的影响。尤其在高原等特殊环境中，电磁干扰和气候因素可能严重影响电机的正常运行。为解决这一问题，本研究探索了一种新的无传感器控制技术，旨在提高 PMSM 系统在复杂环境下的抗干扰能力。这一技术提升了电机的控制性能，还降低了系统的硬件成本，具有广泛的实际应用价值。

1 永磁同步电机无传感器控制技术概述

永磁同步电机（PMSM）因其高效、低噪音和较高的功率密度，被广泛应用于电气工程自动化系统中。传统的 PMSM 控制方法多依赖于位置或速度传感器来获取电机的运行状态，这种方式虽然能够提供精确的反馈，但在实际应用中存在着一系列问题，如传感器故障、成本增加以及安装空间的限制。在此背景下，无传感器控制技术应运而生，成为解决这些问题的有效方案。无传感器控制利用电机本身的电流、电压等参数，采用数学模型与算法推算出电机的转子位置或速度，从而实现了对电机的精确控制。

无传感器控制技术的核心在于对电机的状态估计，它不依赖于传统的传感器来获取转子位置，而是经过电机的电流和电压波形来推算出转子位置或速度。这种方法降低了硬件的复杂度，减少了系统的成本，还提高了系统的可靠性，因为它避免了传感器故障对系统的影响。为了实现这一目标，常见的无传感器控制方法包括基于反电动势（Back EMF）的估计方法、基于模型的观测方法以及基于扩展卡尔曼滤波（EKF）的估计方法等。这些方法在不同的应用场景中具有各自的优势和局限，研究者根据不同的需求与环境条件选择合适的控制策略。

在高原等恶劣环境下，电磁干扰和气候变化可能对电机的

运行产生不利影响。在该类环境中应用无传感器控制技术时，必须考虑到抗干扰能力和环境适应性。传统的无传感器控制方法虽然能够有效地减少硬件成本，但其抗干扰性能较弱，容易受到环境因素的影响。为了解决这一问题，许多研究提出了改进的抗干扰控制策略，如优化控制算法、增加冗余信息、采用自适应控制技术等手段，以提高系统在高干扰环境中的稳定性与鲁棒性。随着计算能力的提高，人工智能（AI）和深度学习技术也逐渐被引入到无传感器控制中，经过机器学习算法进一步提升系统对干扰的自适应能力。

2 高原环境下的电磁干扰特性分析

高原地区的电磁干扰特性具有其独特性，主要源于该区域的特殊气候条件和地理环境。由于高原地区海拔较高，空气稀薄，气温变化剧烈，电磁波的传播特性与低海拔地区存在显著差异。在这种环境下，电磁干扰来源于外部设备或电网的辐射干扰，还可能因空气中的电离层变化而导致信号衰减或畸变。高原地区由于电力设施的不稳定性，频繁出现电网波动，导致电磁环境更加复杂。在这种电磁环境中，任何微小的干扰都可能影响到永磁同步电机（PMSM）的运行，尤其是无传感器控制系统的稳定性和精确性，增加了系统运行的不确定性和风险。

高原电磁干扰的一个显著特点是电磁波在稀薄空气中的传播性能较差，信号的传输距离短，且易受到环境因素的影响。由于气候条件多变，电磁波的反射、折射等现象更加显著，可能导致信号衰减更加剧烈。电磁波频率较高时，受到高原地区的山脉地形和特殊气候条件的影响，反射和干扰现象更加频繁，进一步增加了干扰的复杂性。高频电磁干扰可能直接影响到电气设备的控制系统，尤其是在电机无传感器控制中，反电动势（Back EMF）信号的变化可能会使转子位置的估计产生误差，进而影响整个电机的运行性能。分析高原环境下电磁干扰的特性，对提升控制系统的抗干扰能力具有重要意义。

为应对高原电磁干扰的影响,电气自动化领域的研究者和工程师通常采取一系列措施来加强系统的抗干扰能力。采用高精度的电磁屏蔽技术和滤波技术,减少外部干扰对系统的影响。针对高原地区的气候和电磁波传播特性,调整电机控制算法,使得系统能够更好地适应电磁环境的变化。随着技术的发展,人工智能和机器学习等先进方法被引入到无传感器控制系统中,经过智能算法自适应调整控制策略,以提高系统对电磁干扰的自我调节能力。这些技术的结合,有助于在复杂的高原电磁环境中实现更加稳定和高效的电机控制,确保永磁同步电机能够在恶劣条件下持续稳定运行。

3 无传感器控制策略的理论基础与发展

无传感器控制策略的理论基础源于对永磁同步电机(PMSM)运行特性和电机控制技术的深入理解。传统的PMSM控制方法依赖于精确的转子位置反馈,而无传感器控制则采用电机的电流、电压等参数,结合电机的数学模型,估算转子位置与速度。为了实现这一目标,常用的方法包括基于反电动势(Back EMF)的方法、基于磁场定向控制(FOC)的方法以及基于观测器和滤波算法的估算方法。这些方法对电机的电流和电压波形的分析,结合控制算法,推算出转子的位置或速度,从而实现对电机的闭环控制。反电动势估算法通常用于高转速区间,而在低速或启动时,其他观测方法如卡尔曼滤波或扩展卡尔曼滤波(EKF)则更为有效。无传感器控制方法的核心是经过系统建模和信号处理技术,代替传统的传感器反馈,达到与传统传感器控制相同的精度和稳定性。

随着技术的发展,无传感器控制策略逐渐向更高精度和更强鲁棒性方向发展。在早期的无传感器控制中,主要依赖反电动势的方法,但该方法在低速或零速时常常面临性能下降的问题。研究者们提出了多种改进策略,以提高低速性能和系统的鲁棒性。基于模型的观测方法采用系统建模与状态估计,结合电机的动态特性和负载变化,对系统状态的实时估计,改善了低速控制的性能。扩展卡尔曼滤波(EKF)作为一种经典的滤波算法,能够不断修正估算的状态值,减少由于电机非线性和外部扰动引起的误差,从而在复杂环境中保持较高的控制精度。人工智能技术,尤其是神经网络和模糊控制方法的引入,为无传感器控制系统提供了更强的自适应能力,使系统能够根据环境变化和负载变化自动调整控制策略,进一步提升了系统的性能和稳定性。

无传感器控制策略的广泛应用推动了智能电机控制技术的发展,尤其在电气自动化和新能源汽车等领域中,得到了越来越多的关注。随着高性能处理器的普及和计算能力的提升,越来越复杂的控制算法得以实现,使得无传感器控制系统在低速运行、恶劣环境以及高动态响应等方面的表现更加优异。在高原等恶劣环境中,传统的传感器控制方法由于受到电磁干扰和气候因素的影响,往往面临控制失效的风险,而无传感器控

制技术能够改进算法和滤波技术,降低外部干扰对系统的影响。随着人工智能、大数据与物联网技术的融合,未来的无传感器控制策略将更加智能化和自适应,能够在更复杂的环境中提供更加可靠的电机控制解决方案。无传感器控制技术的不断发展,将为电气工程自动化系统、工业自动化设备以及新能源应用带来更多创新性的解决方案。

4 抗干扰技术在PMSM中的应用与实现

在永磁同步电机(PMSM)的控制系统中,抗干扰技术的应用至关重要,尤其是在高干扰环境中。PMSM控制系统容易受到电磁干扰(EMI)、电压波动以及外部噪声等因素的影响,这些干扰可能导致控制信号失真,影响电机的运行稳定性与控制精度。为了解决这一问题,抗干扰技术被广泛应用于PMSM控制系统中,以提高系统的鲁棒性和可靠性。常见的抗干扰技术包括电磁兼容(EMC)设计、滤波技术、信号处理算法优化以及控制策略的改进等。利用这些方法,可以有效地抑制干扰信号,保证PMSM系统在恶劣环境中的正常运行,特别是在高电磁干扰的区域,如高原和工业生产现场。

电磁干扰的来源通常是电力设备或周围的电气设施,它们在工作过程中可能会产生强烈的电磁波,进而影响PMSM的控制系统。为了有效抑制这些干扰,电磁兼容设计(EMC)技术被广泛应用于PMSM系统中。这种技术优化电机控制系统的布局和电气连接方式,使用屏蔽、接地和滤波等手段,减少了电磁干扰源对电机控制系统的影响。滤波技术在抗干扰方面起到了关键作用,常见的滤波器如低通滤波器、带通滤波器等,可以有效地过滤掉高频噪声,改善控制信号的质量。在无传感器控制中,滤波技术尤其重要,因为反电动势信号可能受到高频噪声的干扰,进而影响转子位置估计的准确性。对控制系统中各个环节进行优化设计,抗干扰技术显著提升了PMSM在复杂电磁环境中的稳定性。

随着控制算法的发展,抗干扰技术也在不断进步。现代PMSM控制系统通常结合先进的信号处理算法和自适应控制策略,增强了系统在恶劣环境中的抗干扰能力。扩展卡尔曼滤波(EKF)和自适应滤波技术在PMSM的无传感器控制中得到了广泛应用,这些方法能够在实际运行过程中动态调整系统参数,从而应对外部干扰的变化。模糊控制、神经网络控制等智能算法的引入,进一步增强了PMSM系统的自适应能力。智能抗干扰技术能够根据外部干扰的特点和控制需求自动调整控制策略,优化电机的运行状态,提高其抗干扰性能。这些技术有效地改善了PMSM在高干扰环境下的运行效果,还提高了系统的可靠性和精确性,尤其在新能源汽车、工业自动化设备等领域,能够确保电机在复杂环境下的稳定工作。

5 实验验证与结果分析

在实验验证中,采用了一系列的实验方法来评估基于无传

传感器控制策略的永磁同步电机（PMSM）在高电磁干扰环境中的性能。实验设备包括一台 PMSM、电流和电压传感器、一个高性能数据采集系统以及专门设计的电磁干扰源。实验的主要目的是验证无传感器控制策略在不同电磁干扰条件下的控制精度与稳定性，特别是当电机运行在低速和启动阶段时，反电动势信号可能受到严重干扰的情形。为了模拟高原环境中可能出现的电磁干扰，实验中引入了多种干扰信号，包括高频噪声和随机电压波动等。对比传统有传感器控制系统和无传感器控制系统的实验结果，能够直观评估抗干扰能力和系统的鲁棒性。

实验结果表明，无传感器控制系统能够在电磁干扰环境中保持相对稳定的控制性能。在高电磁干扰的条件下，采用传统有传感器控制的系统表现出较大的控制精度偏差，特别是在低速运行时，因反电动势信号受到干扰，转子位置的估算误差显著增加，导致电机的运行不稳定。在无传感器控制系统中，利用扩展卡尔曼滤波（EKF）等先进的状态估计方法，系统能够有效地减小干扰影响，准确地估算转子位置并实现平稳控制。尤其在低速启动过程中，干扰引起的信号畸变被成功抑制，电机的控制精度与响应速度均符合预期要求。实验还显示，优化控制算法与滤波器参数，无传感器控制系统在不同电磁环境下的稳定性和精确性都有显著提升。

为了进一步分析实验结果，采用了多种数据处理方法，对控制系统的动态响应、稳态误差及抗干扰能力进行了全面评估。对比实验数据，发现无传感器控制系统在电磁干扰情况下的转子位置估算误差远小于传统控制系统的误差，尤其是在电机负载发生变化时，系统的鲁棒性表现尤为突出。实验还表明，无传感器控制系统能够在较宽的电压波动范围内稳定工作，避免了由于电压波动引起的误差积累。经过实验，进一步验证了抗干扰技术在提高 PMSM 系统性能中的重要作用，尤其是扩展卡尔曼滤波和智能自适应控制策略的结合，使得系统能够实时应对各种环境变化和干扰，保持较高的精度和稳定性。这些实验数据为无传感器控制技术在高干扰环境下的应用提供了有力的支持，也为未来在复杂工业环境中推广该技术奠定了基础。

6 总结与未来研究方向

本研究对基于无传感器控制技术的永磁同步电机（PMSM）在高电磁干扰环境中的抗干扰能力的探讨，可以得出几个关键结论。无传感器控制技术在 PMSM 中展示出了在电磁干扰和高噪声环境下的显著优势。采用扩展卡尔曼滤波

（EKF）、自适应控制算法和高效的滤波技术，系统能够有效抑制外部电磁干扰对电机控制精度的影响，保持了较高的鲁棒性和控制精度。实验验证表明，在高原等特殊环境下，传统的有传感器控制系统容易受到电磁波影响，导致转子位置估算误差增大，而无传感器控制系统能够在不依赖传感器的情况下保持较稳定的运行。这些成果为 PMSM 的控制方法提供了新的思路，也为自动化电气系统的应用提供了技术支持。

尽管无传感器控制技术在许多方面已取得良好成果，但在一些极端环境条件下，仍然存在一些挑战。在低速和启动过程中，反电动势信号的弱化可能导致系统估算不准确，从而影响整体控制精度。随着电机负载变化较大或电气环境更加复杂时，现有的控制算法可能无法快速响应变化，从而影响电机的稳定性。未来的研究可以进一步优化控制算法，结合更先进的智能算法，如深度学习和强化学习，来提升系统对环境变化的适应能力。基于数据驱动的控制策略和机器学习技术有望在这种情形下发挥重要作用，对大量实验数据的学习，自动调整系统的控制参数，以达到更好的性能。

未来的研究方向还应重点关注无传感器控制技术在更复杂的环境下的应用，尤其是结合物联网（IoT）和云计算技术的智能化电机控制系统。在这一过程中，如何实现高效的实时数据采集与传输，如何处理和分析来自不同传感器和设备的多维数据，将成为技术发展的关键问题。将无传感器控制系统与智能制造和工业 4.0 的需求相结合，能够更好地支持智能电网、自动化生产线以及新能源系统等多种应用场景。进一步的研究还可以考虑高性能计算平台的使用，以支持更高精度的建模和实时控制，从而提升系统的整体性能和可维护性。总的来说，无传感器控制技术将在未来的电气工程自动化和智能化发展中扮演越来越重要的角色，推动电机控制技术向更加智能、可靠和高效的方向发展。

7 结语

本文研究了基于无传感器控制的永磁同步电机（PMSM）抗干扰技术，探索了在高电磁干扰环境下，如何优化控制算法和应用先进的滤波技术提高系统的鲁棒性。经过实验验证，研究表明，采用无传感器控制技术的 PMSM 能够在复杂环境中保持较高的稳定性与控制精度。未来的研究应进一步优化现有控制策略，结合人工智能和智能算法，以应对更复杂和动态变化的环境，为电气自动化系统的智能化与高效性提供新的解决方案。

参考文献：

- [1] 李国锋,张旭.永磁同步电机无传感器控制技术的研究与应用[J].电气传动技术,2019,40(5):15-23.
- [2] 王强,孙俊.高原环境下电机控制技术的研究进展[J].高原科学,2020,38(4):91-98.

- [3] 李建华,王志强.无传感器控制系统中的扩展卡尔曼滤波算法研究[J].控制理论与应用,2018,35(10):1417-1425.
- [4] 周凯,李瑶.电磁干扰对 PMSM 控制系统的影响及其抗干扰技术[J].电力系统自动化,2021,45(8):56-63.
- [5] 刘伟,张立.基于人工智能的无传感器永磁同步电机控制研究[J].现代电力,2021,38(2):48-55.
- [6] 陈敏,周博.无传感器控制在电机系统中的应用与发展[J].自动化技术与应用,2020,39(12):25-31.