

基于容积卡尔曼滤波的永磁电机控制方法研究

隋玉霞¹ 王昊¹ 朱炳龙²

1. 沈阳工业大学, 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870

2. 沈阳工业大学, 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870

摘要: 随着智能制造与自动化技术的快速发展, 永磁同步电机 (PMSM) 因其高效能和高精度的特点, 在现代驱动系统中得到了广泛应用。为进一步提升永磁电机控制系统的动态性能与稳定性, 论文提出了一种基于容积卡尔曼滤波 (Volumetric Kalman Filter, VKF) 的电机控制方法。该方法通过引入容积卡尔曼滤波器, 充分考虑了电机系统中状态估计的非线性特性, 以及测量噪声和过程噪声的不确定性, 从而优化了电机的估计精度与控制性能。最后进行了仿真实验, 结果显示, 论文方法能够有效减小稳态误差并提高系统的抗干扰能力, 控制相对的速度。进一步的噪声模型分析验证了该方法在不同噪声条件下的鲁棒性与适应性, 展现了其在实际应用中的广阔前景。

关键词: 容积卡尔曼滤波; 永磁同步电机; 状态估计; 控制优化; 非线性系统

1 引言

永磁同步电机 (PMSM) 因其出色的效率、高功率密度以及卓越的动态响应性能, 已经在自动化、机器人技术、电动汽车等领域得到了广泛应用^[1]。随着控制技术和硬件性能的不断发展, 提升永磁电机在不同工况下的精度、鲁棒性以及响应速度, 已经成为当前研究的热点问题之一。然而, 电机系统本身具有高度的非线性特性以及外部环境的复杂扰动, 这使得传统的控制方法在面对这些挑战时常常显得力不从心, 特别是在精确状态估计和动态响应优化方面, 仍存在较大瓶颈^[2]。

在电机控制过程中, 状态估计是实现精确控制的关键环节。永磁同步电机的运行状态受到多种因素的影响, 如测量噪声、过程噪声和系统的非线性特性等。传统的卡尔曼滤波 (KF) 方法, 虽然在许多线性系统中表现出了较好的效果, 但在面对电机系统中的非线性动态和噪声干扰时, 往往无法提供准确的状态估计^[3]。扩展卡尔曼滤波 (EKF) 作为一种针对非线性系统的经典滤波方法, 在一些应用中取得了不错的效果, 但在面对较强非线性或噪声较大的

环境下, EKF 往往出现估计误差大、收敛性差等问题。因此, 如何克服扩展卡尔曼滤波的局限性, 并提出一种更为高效、鲁棒的状态估计方法, 成为电机控制领域亟待解决的技术难题^[4]。

近年来, 容积卡尔曼滤波 (VKF) 作为一种改进型的卡尔曼滤波方法, 因其在处理非线性系统的状态估计时具有显著优势, 逐渐成为学术界和工业界的研究热点^[5]。与传统的卡尔曼滤波方法相比, VKF 通过空间分布的方式, 更加精确地近似非线性系统的状态演化。它通过优化状态空间的容积 (volume) 来更好地描述系统的状态空间分布, 从而提高对系统动态过程的捕捉能力, 尤其在噪声较大或系统高度非线性的情况下, 表现出了更强的鲁棒性和精度^[6]。

基于这一背景, 本文提出了一种基于容积卡尔曼滤波的永磁电机控制方法, 旨在提升永磁电机在复杂工况下的状态估计精度和整体控制性能。通过引入 VKF 方法, 本研究克服了传统卡尔曼滤波和扩展卡尔曼滤波在电机控制中的局限性, 尤其是在面对电机的高度非线性

性和外部扰动时,能更好地保证状态估计的准确性。具体而言,本文基于永磁电机的动态特性和非线性问题,设计了一种全新的状态估计与控制优化策略,充分利用 VKF 的优势,以实现更加精准、稳定的电机控制^[7]。

具体来说,本文的贡献在于以下几个方面:

1. 提出一种基于容积卡尔曼滤波的永磁电机控制方法,有效地克服了传统卡尔曼滤波和扩展卡尔曼滤波在面对非线性和噪声问题时的局限性。通过优化滤波器的状态空间容积,使其能够更准确地捕捉电机系统中的状态演化。

2. 设计了新的控制策略,在永磁电机的状态估计基础上,提出了一种新的控制优化方案。该方案能够根据电机的动态特性和非线性特征,实时调整控制参数,从而有效提高电机的响应速度、精度和鲁棒性。

3. 通过仿真与实验验证了方法的有效性,结果表明,基于容积卡尔曼滤波的控制方法在复杂工况下的性能显著优于传统控制方法,尤

其是在处理噪声干扰和系统非线性时,表现出更高的稳定性和精度。

综上所述,本研究不仅为永磁同步电机控制提供了一种新的状态估计和优化方法,也为进一步提高电机控制系统的精度、鲁棒性和动态响应性能提供了新的思路和技术支持。

2 研究模型

2.1 永磁同步电机的数学模型

永磁同步电机(PMSM)的数学模型是电机控制系统设计与分析的基础,通常通过电压方程、运动方程以及电机的电磁特性来描述其动态行为。为了准确反映电机的运行状态和控制性能,这些数学模型不仅考虑了电机的物理特性,还需要描述电机的电气和机械子系统之间的相互作用。假设电机为三相永磁同步电机,其主要的数学模型通常包括以下几个部分:

2.1.1 电机电压方程

永磁同步电机的三相电压方程在 d-q 坐标系下可以表示为:

$$\begin{aligned} v_d &= Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + e_d \\ v_q &= Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d + e_q \end{aligned} \quad (1)$$

其中, v_d, v_q 分别为 d 和 q 轴的电压分量, i_d, i_q 分别为 d 和 q 轴的电流分量。R 为电阻, L 为电感, e_d, e_q 为电动势分量, ω 为电机的角速度。

2.1.2 电机运动方程

电机的运动方程用于描述转子在电磁力

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L - B\omega \quad (2)$$

J 为电机转子的惯量, T_e 为电磁转矩, T_L 为负载转矩, B 为摩擦系数, ω 为电机的角

速度。电磁转矩 T_e 可由电流分量和永磁体的磁场产生的电动势计算得到:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_m i_q + (L - L_f) i_d i_q) \quad (3)$$

其中, P 为电机的机对数, ψ_m 为永磁体

的磁链。

2.2 容积卡尔曼滤波模型

为了实现对电机状态的精确估计,本文提

出采用容积卡尔曼滤波（VKF）方法来处理系统的状态估计问题。与传统的卡尔曼滤波方法相比，VKF 在处理非线性系统和高噪声环境下的状态估计时展现出更强的鲁棒性和更高的精度。具体而言，VKF 通过引入容积的概念，优化了状态空间的分布，使其能够更有效地捕

捉系统的动态演化，尤其在面对复杂的非线性动态和测量噪声时，能够提供更准确的估计结果。

2.2.1 状态变量定义

假设电机的状态变量为电流和转速，定义状态向量为：

$$x = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2.2 状态方程

根据电机的电压方程和运动方程，状态方

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u) + w(t) \quad (5)$$

其中， x 为电机的状态向量， u 为控制输入， $w(t)$ 为过程噪声， $f(x, u)$ 为电机状态随时间变化的非线性函数。

程可表示为：

电机的观测方程描述了测量过程。假设电机的电流和转速是通过传感器进行测量的，观测方程可以写作：

2.2.3 观测方程

$$z = h(x) + v(t) \quad (6)$$

其中， z 为观测向量， $h(x)$ 为状态变量的观测函数， $v(t)$ 为观测噪声。

2.3 控制优化模型

为了进一步提升永磁同步电机（PMSM）的控制性能，本文在基于容积卡尔曼滤波（VKF）进行状态估计的基础上，设计了一种优化的控制策略。该策略通过实时反馈电机的电流和转速，并根据预设的参考轨迹动态调整电压输入，从而精确控制电机的动态响应和稳态精度。这一优化控制策略不仅提高了电机在负载变化、外部扰动和系统不确定性下的鲁棒性，还保证了电机在复杂工况下能够保持高效且稳定的运行。在实现这一目标的过程中，本文综合了多种经典控制方法，如比例-积分-微分（PID）控制、滑模控制（SMC）和鲁棒控制等，旨在根据不同的应用需求，优化控制效果。

常用的控制方法各有优缺点。PID 控制因其结构简单、实现方便而广泛应用，适用于线

性系统，并能提供有效的控制。然而，在处理非线性系统和强扰动时，PID 控制的性能可能受到一定限制。滑模控制作为一种强鲁棒性的非线性控制方法，尤其适用于应对具有不确定性和外部扰动的系统，它通过设计滑模面来确保系统在达到稳态之前具有较强的鲁棒性，尽管可能会产生“抖振”现象。鲁棒控制则通过设计适应不确定性和扰动的控制器，确保系统稳定性和抗干扰能力，在电机控制中，尤其适用于要求高可靠性的场合。本文通过将这些控制方法与 VKF 状态估计结合，提升了系统的控制精度和鲁棒性，确保电机在动态响应和稳态精度方面都能达到最佳性能。

优化后的控制策略的关键在于通过 VKF 的精准状态估计，实时获取电机的动态信息（如转速、电流等），并基于这些反馈信号调整控制输入。VKF 通过引入容积概念，优化了状态空间分布，使得系统在线性和噪声环境下仍能够提供更为准确的估计。相比于传统的

卡尔曼滤波和扩展卡尔曼滤波, VKF 在应对电机系统的非线性特性和高噪声环境时表现出了更强的鲁棒性, 避免了因线性化处理导致的估计误差。通过这种精确的状态估计, 控制器能够更好地应对负载变化、外部扰动以及电机参数的波动, 保证了电机在各种工况下的高效稳定运行。此外, 优化后的控制策略还能够在动态响应速度和稳态精度之间取得良好的平衡, 既能确保电机在负载变化或启动时快速稳定响应, 又能在稳态运行时保持较低的误差, 从而显著提升电机的控制性能。

3 实验结果

图 1 和图 2 展示了在电机设定目标速度为

1000 r/min 的匀速运行状态下, 通过仿真得到的结果。图 1 和图 2 分别呈现了使用容积卡尔曼滤波 (VKF) 算法进行状态估计时, 估计速度与实际电机速度之间的对比以及误差分析。

图 1 展示了使用 VKF 算法估计的电机速度曲线。可以看到, 估计速度曲线紧密跟随目标设定速度, 并与实际电机速度高度一致。这表明, VKF 算法能够精确地估计电机的运行状态, 并有效捕捉电机动态变化。尤其在电机速度维持在 1000 r/min 的匀速运行时, 估计速度与实际速度之间的误差非常小, 证明了 VKF 算法在电机状态估计中的高效性和准确性。

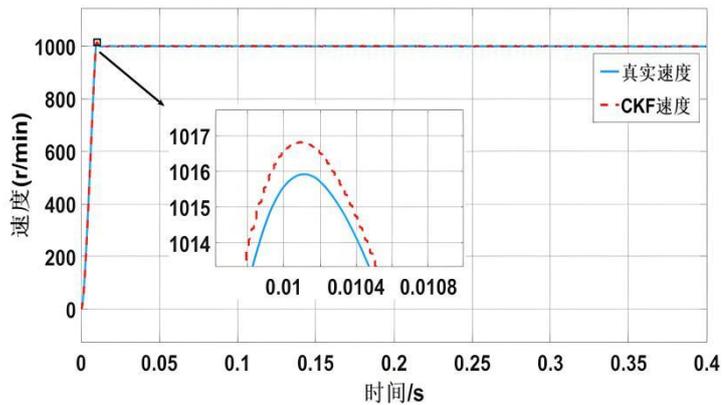


图 1 速读仿真结果

图 2 展示了估计速度与实际电机速度之间的误差曲线。可以看到, 误差曲线波动较小且稳定, 表明容积卡尔曼滤波 (CKF) 算法在匀速运行工况下具有较高的估计精度。具体而言, 误差在整个过程中保持在一个较小的范围内, 未出现显著波动或突变, 这表明 CKF 算法能够有效抑制系统噪声和外部扰动, 提供可靠的状态估计。

这些结果充分表明, 基于 CKF 的状态估计方法能够在匀速运行条件下精确地跟踪电机的实际速度, 且估计误差极小。无论是在短期还是长期的稳态运行中, CKF 算法都能够保持较高的准确性, 确保系统的平稳运行。这一特点为电机控制系统后续的优化控制提供了可靠的基础, 因为准确的状态估计是实现精确控制的前提。

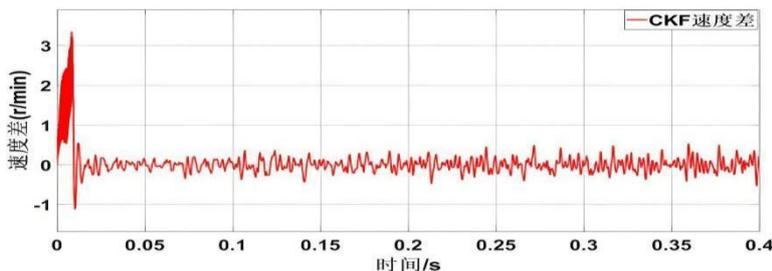


图 2 速度差仿真结果

4 结语

本文提出了一种基于容积卡尔曼滤波（VKF）的永磁同步电机控制方法，旨在提升电机控制系统在复杂工况下的精度与鲁棒性。通过引入 VKF，充分考虑了电机系统的非线性特性和噪声环境，有效克服了传统卡尔曼滤波方法在复杂工况下的局限性，显著提高了电机状态估计的精度。VKF 能够在强噪声和高度非线性的系统中提供更加准确的状态估计，为精确控制电机提供了可靠基础。在此基础上，

结合状态反馈控制策略与优化算法，本文提出的控制方法能够实现永磁同步电机的高精度控制，尤其在强干扰和高噪声环境下展现出卓越的鲁棒性和适应性。通过实时精确的电机状态估计，控制系统能够快速响应负载变化、外部扰动及系统参数不确定性，确保电机始终保持高效、稳定的运行。总的来说，基于 VKF 的控制方法不仅有效解决了传统控制方法的局限性，而且在实际应用中表现出了优异的性能，为电机控制领域提供了一种更加可靠和高效的解决方案。

参考文献

- [1] 王迪. 基于容积卡尔曼滤波 PMSM 无位置传感器控制[J]. 控制工程, 2019, 26(4): 777-782.
- [2] 唐荣芳, 陈海强. 一种内置式永磁同步电机控制方法的设计与实现[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(6): 136-140.
- [3] 孙兆龙, 钱翰宁, 刘振田, 等. 基于 ARM+FPGA 的永磁无刷直流电机控制智能方法[J]. 海军工程大学学报, 2023, 35(1): 93-98+105.
- [4] 杨川, 张利国. 基于多率采样的永磁同步电机控制方法设计[J]. 电子测试, 2022, (3): 119-120+118.
- [5] 周露, 刘刚, A.Houari, 等. 一种改进的永磁电机无差拍预测控制方法[J]. 微电机, 2017, 50(9): 70-74.
- [6] 徐晓艳. 基于可编程控制器的永磁同步电机控制方法[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(02): 71-75+96.
- [7] 赵浩楠, 张国强, 鲁鹏, 等. 基于自抗扰方法的永磁同步电机控制研究[J]. 机电信息, 2022, (13): 9-11.