

永磁同步电机矢量控制中转速辨识方法优化

张镜照

武汉船用电力推进装置研究所, 湖北 武汉 430064

DOI:10.61369/EPTSM.2025010027

摘要 : 在永磁同步电机矢量控制系统中, 转速辨识的精准度对系统性能起着决定性作用。传统转速辨识方法在面对复杂工况时, 暴露出诸多缺陷。本文聚焦于永磁同步电机矢量控制, 深入剖析现有转速辨识方法的不足, 创新性地提出一系列优化策略, 为提升永磁同步电机在各类应用场景中的性能提供了有力支撑。

关键词 : 永磁同步电机; 矢量控制; 转速辨识; 优化策略

Optimization of Speed Identification Method in Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor

Zhang Jingzhao

Wuhan Institute of Marine Electric Propulsion Equipment, Wuhan, Hubei 430064

Abstract : In the vector control system of permanent magnet synchronous motors, the accuracy of rotational speed identification plays a decisive role in the system performance. The traditional speed identification methods expose many flaws when facing complex working conditions. This paper focuses on the vector control of permanent magnet synchronous motors, deeply analyzes the deficiencies of the existing speed identification methods, and innovatively proposes a series of optimization strategies, providing strong support for improving the performance of permanent magnet synchronous motors in various application scenarios.

Keywords : permanent magnet synchronous motor; vector control; speed identification; optimization strategy

引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 凭借其在高功率密度、高效率、良好调速性能等方面的优势, 在工业生产、轨道交通、电动汽车、船舶、航空航天等领域得到了极为广泛的应用。矢量控制技术作为 PMSM 的核心控制策略, 通过巧妙地将定子电流解耦为励磁电流和转矩电流, 实现了对电机转矩和转速的精准控制^[1]。在这一过程中, 转速作为关键反馈量, 其辨识的准确性直接关乎矢量控制系统性能的优劣。在实际运行过程中, PMSM 往往面临着负载突变、参数波动、外部干扰等复杂且恶劣的工况。在电动汽车行驶过程中, 频繁的加减速、不同路况带来的负载变化, 都会对电机转速产生显著影响。

传统的转速辨识方法, 如基于传感器的测速方式, 虽然精度高, 但存在安装复杂, 成本高, 可靠性有限等弊端, 难以满足实际应用的需求。而无传感器转速辨识方法, 虽然避免了传感器带来的问题, 但是在面对复杂工况时, 容易造成转速辨识不准确, 鲁棒性差等问题, 导致电机运行不稳定, 甚至影响整个系统的正常工作。因此, 深入研究和优化永磁同步电机矢量控制中的转速辨识方法, 具有十分重要的理论意义和工程实用价值。

一、永磁同步电机矢量控制原理

(一) 永磁同步电机数学模型

永磁同步电机的数学模型是了解其运行特性和对其进行有效控制的依据。在建立模型时, 通常采用一些合理的假设, 以简化分析过程, 而且大多数实际应用场景中这些假设是成立的^[2]。这里假设电机的三相绕组完全对称, 也就是三相绕组的电阻, 电感

等参数是完全相同的, 在空间位置上彼此相差 120° 度角度, 使得电机运行平稳;忽略磁路饱和的影响, 即认为磁导率是常数, 这样可以使磁链与电流之间呈线性关系, 易于进行数学推导;同时不考虑电机中的涡流和磁滞损耗, 因为在有些情况下, 它们相对较小。

(二) 矢量控制基本原理

矢量控制技术诞生, 使交流电机的控制出现了革命性的突

作者简介: 张镜照 (1979.08-), 男, 汉族, 福建省龙岩市人, 本科, 高级工程师, 工作领域: 电气工程, 自动化领域的工程应用。

破，其核心思想是借鉴直流电机的控制思想，将交流电机的定子电流进行解耦。具体而言，对电机进行高效控制通过两次关键的坐标变换，即 Clark 变换和 Park 变换实现。Clark 变换将三相静止坐标系下的电流、电压等物理量，准确地转换到两相静止坐标系下，即 α β 坐标系下。在这个过程中，电机的物理本质没有发生改变，但通过变换使得后续分析和处理更加简单明了。随后，通过 Park 变换将两相静止坐标系下的物理量进一步转换到两相旋转坐标系 (dq 坐标系) 下。在 dq 坐标系中定子电流被解耦成相互独立的励磁电流、转矩电流。把复杂的交流电机控制问题，转化为类似于直流电机的控制问题，减少了控制的难度^[3]。

(三) 矢量控制中的转速

在永磁同步电机矢量控制系统中，转速是整个系统稳定运行与性能表现的核心，是矢量控制系统的重要反馈量，它的重要性体现在各个关键环节。在速度环控制中，转速反馈信息是系统的“眼睛”，实时监测电机的实际运行速度。速度环控制器通过对设定转速与反馈实际转速的细致对比，敏感地感知到两者的偏差^[4]。然后根据这个偏差快速而准确地调整输出，从而对给定电流环进行合理的修正。这个过程就相当于一名熟练的驾驶员，他按照车速表的显示，不断地对油门或者刹车进行调整，使得车辆保持稳定行驶。如果对转速的识别不准确，这样势必会使速度环控制出现偏差，使电机的转速无法稳定在设定值附近，出现转速波动过大的情况，严重影响系统的稳定性^[5]。

二、现有转速辨识方法分析

(一) 基于传感器的转速辨识方法

1. 光电编码器测速原理与特点

光电编码器是一种常用于测量转速的基于传感器的装置，主要由码盘、发光元件、光敏元件、信号处理电路等组成。码盘一般是一个圆盘，其上散布着均匀的透光和不透光条纹，并且与电机同步旋转。光电编码器工作原理是采用光学与电子技术紧密结合的方式，当电机转动时，带动码盘也随着转动，从发光元件发出的光线通过码盘纹路照射到光敏元件上^[6]，让光敏元件根据接收到的光线强弱变化产生相应的电信号，并经过信号处理电路放大、计数等处理后，精确地计算出电机的转速。光电编码器具有诸多显著的优点。另外，光电编码器输出的数字信号便于与数字控制系统接口，便于数据处理和数据传输。但光电编码器也有具有局限性，一是安装过程较复杂，应准确地对准电机的转轴，码盘与电机轴要同心，否则影响测速精度；二是结构比较复杂，包含光学和精密机械部件，成本较高；三是恶劣环境下工作精度受限，在一些工作环境极差的场所，如高温、高湿度、强电磁干扰等，光电编码器的可靠性也会受到严重影响，光学元件会受到灰尘、水汽的污染，引起测量误差增大甚至无法正常工作^[7]。

2. 旋转变压器测速原理与特点

另一类常用的转速测量传感器为旋转变压器，它是基于电磁感应现象的。它主要由定子和转子两部分组成，定子和转子上分别绕有不同绕组。定子绕组通入交流励磁信号时，气隙中产生交

变磁场，由于转子与电机转轴相连并同步转动，转子绕组在交变磁场中感应电动势。旋转变压器的精度较光电编码器略低，通常应用于对转速精度要求不特别苛刻，但对可靠性和抗干扰能力要求较高的应用场合不适合，如船舶推进电机的转速测量，矿山机械设备的电机控制等^[8]。

(二) 无传感器转速辨识法

1. 参考自适应方法的模型

模型参考自适应方法是经典的无传感器转速辨识方法，其基本原理借鉴了自适应控制的思想。在 MRAS 系统中，精心建立了两个重要模型：参考模型和可调模型。参考模型是根据电机的数学模型和已知的控制输入精确建立，它代表了电机在理想状态下的运行特性，犹如一个精准的“标准模板”。参考模型和可调模型相对应，可调模型的参数由自适应机制不断对系统运行情况进行修正。自适应律就相当于智能的“调节器”，它依据这个误差信号，按照一定的算法对可调模型的参数进行实时调整，使可调模型的输出能逐步逼近参考模型的输出。在此过程中，转速作为可调模型的一个重要参数，也随着参数的调整而不断更新，从而实现对电机转速的精确定位^[9]。

2. 滑模观测器方法

另一个比较常用的无传感器转速辨识技术是滑模观测器 (Sliding Mode Observer, SMO) 方法，它独特的控制策略使得它在电机转速辨识中占据重要的地位。滑模观测器方法是采用一个观测器以一定的滑模面为观察物体的状态，来对电机的状态进行估计。在滑模观测器中，根据电机的数学模型和控制目标，精心设计滑模面。滑模面就像预先设定好的一个“轨道”，观测器的状态会在这个“轨道”上滑动。合理选择滑模控制律，使观测器对电机的电流、电压等可测量信号进行实时监测和处理。当观测器的状态在滑模面上滑动时，观测器的输出可以准确地反映电机的实际状态，包括转速^[10]。

在实际系统中，不连续切换项由于惯性、采样延迟等非理想因素的存在，会使观测器的输出在滑模面附近产生高频振荡，这就是抖振。抖振不仅影响转速辨识的精度，导致转速估计值出现波动，还可能引起电机的转矩脉动，降低电机的运行效率和稳定性，甚至对电机和相关设备造成机械损伤，限制了滑模观测器方法在一些对稳定性和精度要求极高的应用场景中的应用。

3. 卡尔曼滤波方法

卡尔曼滤波 Kalman Filter, KF 方法是一种强大的状态估计技术，在永磁同步电机无传感器转速辨识中也有着广泛的应用。它基于系统的状态空间模型，通过对系统输入和输出数据的最优估计，可以有效地过滤噪声的干扰，从而准确估计电机转速等状态变量。卡尔曼滤波方法的基本原理是把电机系统视为一个动态的线性系统，用状态空间方程描述其运行状态。在该框架下，卡尔曼滤波通过不断地预测和更新两个步骤来达到对系统状态的最优估计。在预测阶段，根据上一时刻的状态估计值以及系统的动态模型对当前时刻的状态进行预测。在更新阶段利用当前时刻的测量值与预测值之间的差异，修正预测值，从而获得当前时刻最优状态估计值。卡尔曼滤波在转速辨识过程中，电机的转速被作

为系统的一个状态变量，通过对电机的电流，电压等测量信号进行处理，不断地更新转速的估计值。

卡尔曼滤波方法具有优良的滤波性能，能够很好地防止噪声对转速识别的影响，在噪声环境较复杂的情况下依然能够给出较为精确的转速估计值。它对系统的动态变化有着较好的跟踪能力，能迅速适应电机转速的突变。但卡尔曼滤波方法对电机模型的精度要求较高，需要准确地知道电机的参数和噪声特性。实际应用中，电机参数往往会随着运行条件的变化而发生改变，噪声特性也很难精确获得，这可能使得卡尔曼滤波的性能下降，转速辨识误差增大。而且卡尔曼滤波的计算过程较为复杂，需要进行大量矩阵运算，对控制器的计算能力提出了较高的要求，增加了系统的硬件成本和计算负担。

三、转速辨识方法优化策略

（一）基于智能算法的优化

神经网络作为一种强大的智能算法，在永磁同步电机转速辨识中具有很大的潜力。神经网络具有很高的非线性映射能力，可以在大量数据学习的基础上建立复杂的输入输出关系模型。

在转速辨识中，其工作原理是用电机的电流，电压，温度等多种可测量信号作为输入，通过神经网络内部复杂的神经元连接和权重调整，对这些输入信号进行深层次的特征提取和模式识别，输出准确的转速估计值。网络结构要精心设计，构建快速识别的神经网络模型。常见的结构有多层感知器 (Multi-layer Perceptron, MLP) 和径向基函数网络 (RBF) 等。多层感知器 (MLP) 作为深度学习领域的基础架构，在电机控制系统中展现出卓越的非线性映射能力。其拓扑结构由输入层、多个隐藏层和输出层构成：输入层作为系统的数据接口，负责接收电机运行过程中的多维度测量信号，包括但不限于电流、电压、温度、转速反馈等物理量，这些原始数据构成了输入向量 $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ；隐藏层作为核心计算单元，通过激活函数（如 ReLU、Sigmoid）构建复杂的非线性变换，每一层神经元通过权重矩阵 W 和偏置向

量 b 实现对输入的加权求和与非线性激活，即 $h=f(Wx+b)$ ，这种层级叠加机制使模型能够自动提取信号中的高阶特征，动态适应电机负载变化、电磁干扰等复杂工况；输出层则将处理后的特征映射为控制指令，例如通过全连接层输出目标转速、转向控制量等控制参数，经数模转换后驱动功率器件，实现对电机转矩、转速等运行状态的精确调控。

（二）多方法融合优化

模型参考自适应方法和滑模观测器方法在永磁同步电机转速辨识中各有优缺点，二者融合可以取长补短，提高转速辨识性能。在融合方案中，利用模型参考自适应方法对电机参数变化的适应性，构建参考模型和可调模型，实时跟踪电机参数的变化；利用滑模观测器对系统不确定性和干扰的强鲁棒性，设计滑模面和控制律，对电机转速进行快速准确的估计。具体实现时，以模型参考自适应方法得到的参数估计值作为滑模观测器的部分参数输入，从而使滑模观测器能够更好地适应电机参数变化。滑模观测器产生的转速估计值又反馈给模型参考自适应系统，帮助其进行参数的调整。这样相互协作，有效抑制了模型参考自适应方法在低速时的识别误差和滑模观测器的抖振现象，在不同工况下都能达到较为精确的转速识别。

四、结论

本文对永磁同步电机矢量控制中的转速辨识方法进行了深入的研究，分析了现有的基于传感器和无传感器转速辨识方法的原理，特点和存在的问题。针对这些问题，提出了基于智能算法，多方法融合的优化策略。在复杂工况下，如负载突变，参数波动，外部干扰等情况下，仍然能实现高精度的转速辨识，大大提高了永磁同步电机矢量控制系统的稳定性、鲁棒性以及动态性能。这些优化策略，为永磁同步电机在工业生产、轨道交通、电动汽车、船舶、航空航天等领域的广泛应用提供了更可靠的技术支持，具有重要的理论意义和工程实用价值。

参考文献

- [1] 张楠. 驱动用永磁同步电机参数辨识与优化控制研究 [D]. 江苏: 南京理工大学, 2020.
- [2] 谭会生, 申彦垒. 永磁同步电机矢量控制的 FPGA 设计与实现 [J]. 科技视界, 2017, (10): 57+44.
- [3] 蒋家强, 曹建福. 永磁同步电机矢量控制及其仿真研究 [J]. 电气开关, 2011, 49(04): 51-53.
- [4] 张旭忠. 电动汽车轮毂电机驱动制动系统模糊控制优化 [J]. 工程机械文摘, 2024, (04): 12-14.
- [5] 王朝庆, 李鸿高. 基于参数自适应永磁同步电机电流控制 [J]. 微电机, 2023, 56(10): 55-58+82.
- [6] 吴金岑. 基于矢量控制方法的永磁同步交流伺服电机控制系统研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(04): 12-14+17.
- [7] 王莉娜, 朱鸿悦, 杨宗军. 永磁同步电动机调速系统 PI 控制器参数整定方法 [J]. 电工技术学报, 2014, (5).
- [8] 李伟. 永磁同步电机参数辨识及其控制系统研究 [D]. 江苏: 江苏科技大学, 2020.
- [9] 王成豪. 永磁同步电机控制方法研究 [D]. 四川: 西南科技大学, 2023.
- [10] 张翀. 基于参数辨识的永磁同步电机矢量控制研究 [D]. 内蒙古: 内蒙古科技大学, 2021.