

永磁同步电机参数辨识研究综述^{*}

李红梅 陈 涛

(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘要: 永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)参数的实时准确获取,是实现 PMSM 高性能控制、可靠状态监控的重要前提和早期故障诊断的有效手段,为此,PMSM 参数辨识技术获得众多学者的广泛研究关注且取得了长足发展,呈现出大量的研究和应用成果。该文在对既有文献归纳梳理的基础上,首先分析 PMSM 参数变化的原因,总结 PMSM 单参数和多参数辨识的技术成果,再对 PMSM 辨识方法进行归纳和比较,最后,揭示 PMSM 参数辨识过程中亟需关注的研究问题并展望其未来的发展方向,旨在实现 PMSM 系统的高效可靠运行。

关键词: 永磁同步电机;参数辨识;PMSM 控制;早期故障诊断;可靠运行

中图分类号: TM351 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8060

Review of research on parameter identification of PMSM

Li Hongmei Chen Tao

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The real-time and accurate acquisition of permanent magnet synchronous motor (PMSM) parameter is an important prerequisite to realize high performance control and reliable condition monitoring. And it is the effective method to realize early fault diagnosis of PMSM, so the parameters identification technology of PMSM has achieved extensive attention from more and more researchers and has made considerable progress. Thus, many research results and technological achievements have been presented. Through combining the existing references, the reasons of PMSM parameters' change are first analyzed and the technological results of PMSM identification on the single parameter and multi-parameters are summarized. And then, the advantages of existing identification method are summarized and compared with each other. Finally, the urgent research questions are revealed to evoke research concern and the future research trends are forecasted in order to implement high efficient and reliable operation of PMSM system.

Keywords: PMSM; parameter identification; PMSM control; early fault diagnosis; reliable operation

1 引言

永磁同步电机(PMSM)具有结构简单、功率密度大、故障率低和运行效率高等技术优势,广泛应用于工业伺服驱动、新能源汽车以及新能源发电等领域^[1-3]。上述应用领域对系统控制精度及运行可靠性均有严格要求,而 PMSM 尤其是内嵌式永磁同步电机(IPMSM)由于自身结构及功率密度的限制,其

电磁参数在不同运行工况下将发生变化,严重影响控制器性能,降低系统运行质量甚至影响系统的运行稳定性。为了实现 PMSM 驱动系统的宽调速范围运行,该系统多采用转速外环和电流内环相结合的控制结构实现 PMSM 矢量控制,再将每安培电流最大转矩控制(MTPA)与弱磁控制相结合实现系统的高性能运行,但其电流调节器与转速调节器的设计多基于线性系统理论,势必导致系统控制性能对电

机参数变化敏感^[4]。如在 PMSM 的无位置传感器控制、解耦控制及自适应控制中,电机参数的变化将导致转速估计精度、解耦性能及自适应控制性能的下降,进而导致系统运行性能的降低^[5-6]。在新能源汽车应用领域,对于电驱动系统的安全可靠运行需求促使大量学者不断致力于 PMSM 的早期故障诊断,其中通过关键参数辨识实现 PMSM 故障的在线监控,成为早期故障诊断技术的重要实现手段之一^[7]。为此,基于 PMSM 参数的准确辨识,实现控制器参数的在线更新及 PMSM 系统早期故障的可靠监控,提高系统控制性能及运行可靠性具有重要的理论研究意义和工程应用价值。

为此,论文首先分析 PMSM 参数变化的影响因素,再对现有的电机参数辨识技术进行归纳、梳理和对比分析,总结出既有 PMSM 参数辨识技术的优缺点和适用领域,指出 PMSM 参数辨识技术亟需关注的研究问题及发展方向。

2 PMSM 数学模型及参数变化的影响因素

2.1 PMSM 数学模型

旋转 dq 坐标系下 PMSM 数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{u_d}{L_d} - \frac{R_s}{L_d}i_d + \frac{\omega_e L_q}{L_d}i_q \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{u_q}{L_q} - \frac{R_s}{L_q}i_q - \frac{\omega_e L_d}{L_q}i_d - \frac{\omega_e \psi_f}{L_q} \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e - T_L - D\omega_r}{J} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 和 i_q 分别表示定子 d 、 q 轴电压和电流; L_d 、 L_q 为定子 d 、 q 轴电感; R_s 、 ψ_f 、 ω_e 和 ω_r 分别表示定子电枢电阻、转子永磁体磁链、转子电气角速度和转子机械角速度; J 、 D 表示转动惯量和摩擦系数; T_e 、 T_L 为电磁转矩和负载转矩。

对于 PMSM 驱动系统,为避免机械参数变化对 PMSM 电磁参数辨识结果的影响,考虑到其电气时间常数远小于机械时间常数,对于控制周期为微秒级的数字控制系统来说,可以假定在一个控制周期内电机转速保持不变来实现电机电磁参数的准确辨识^[8-10],因此,PMSM 参数辨识方程可改写为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{u_d}{L_d} - \frac{R_s}{L_d}i_d + \frac{\omega_e L_q}{L_d}i_q \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{u_q}{L_q} - \frac{R_s}{L_q}i_q - \frac{\omega_e L_d}{L_q}i_d - \frac{\omega_e \psi_f}{L_q} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 PMSM 参数变化的影响因素

PMSM 变化的电磁参数为 R_s 、 L_d 、 L_q 以及 ψ_f 。其中,电机负载运行所伴随的温度变化是引起电机参数变化的重要原因之一,温度升高时,定子电阻 R_s 与温度之间将呈现出明显的非线性关系,其表达式为:

$$R(t) = R_0(1 + \alpha(t - t_0)) \quad (3)$$

式中: $R(t)$ 、 R_0 分别代表温度为 t 和 t_0 时的电阻值, α 则是和定子绕组材料有关的常值系数。

此外,铁磁材料的磁导率也将随温度变化呈现出非线性变化,导致永磁体磁链和定子电感的变化^[11]。在电动汽车等一些对电机功率密度要求较高的应用领域,电机温度变化范围较大,受其影响,电枢电阻将会出现高达 40% 的变化,而永磁体磁链根据永磁材料的不同将会出现高达 20% 的变化^[12]。

磁路饱和作为影响电机参数变化的另一关键因素逐渐获得研究关注,当定子铁磁材料承受较高的磁场作用时,铁磁材料的磁导率将发生非线性变化,导致定子电感及永磁体磁链的变化,如图 1 和 2 所示^[13]。

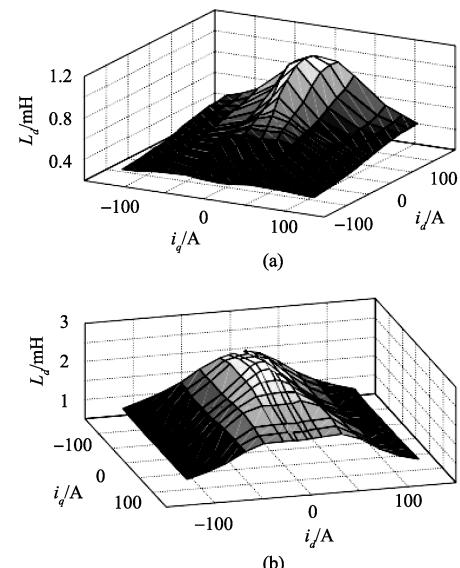


图 1 不同负载下的定子交轴和直轴电感

Fig. 1 dp axis stator inductance with different loads

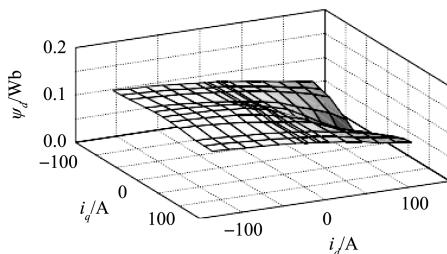


图 2 不同负载下的永磁体基波磁链

Fig. 2 Fundamental flux linkage of permanent magnet with different loads

鉴于基于线性系统理论设计的 PMSM 系统 PI 控制器难以应对温度变化和磁路饱和所引起的电机参数变化, 导致 PMSM 驱动系统性能下降, 甚至出现系统运行失稳等现象, 有效解决方案之一是在系统运行中通过电机参数的在线辨识实现控制器参数的自适应更新, 以确保 PMSM 系统在不同工况下的高效稳定运行。此外, 电机电磁参数的变化能够反映电机实际运行状态, 因此可基于电机参数的准确辨识实现电机状态监控及故障的早期诊断^[7,14,23-33]。为此, 在分析 PMSM 参数变化的影响因素后, 论文对 PMSM 参数辨识方法进行归纳、梳理和对比研究。

3 PMSM 参数辨识方法

参数辨识作为现代控制理论的技术分支, 伴随着对系统控制性能要求的提高经历着不断完善与发展的过程, 形成了不同的辨识方法。根据辨识过程的不同可以将其划分为离线辨识与在线辨识两种方法。

3.1 PMSM 参数离线辨识方法

PMSM 参数的离线辨识方法主要包括有限元分析及实验测定 2 种基本方法。有限元分析是较为常见的 PMSM 参数获取方法^[15-18], 但该方法计算负担重且费时, 多用于电机设计阶段。而传统的实验测定是在电机静止状态下, 以特定回路对电机施以直流激励^[19]或交流激励^[20], 通过记录电机状态响应来实现定子电阻和定子 d 、 q 轴电感的离线辨识, 但由于电机处于静止状态, 无法辨识出永磁体磁链。

另一种离线辨识方法是基于电机稳态电压方

程, 通过电压、电流及转速数据的采集与稳态计算实现电机参数的离线辨识。为了消除电压、电流谐波对辨识精度的影响, Rahman K M 等人^[21]采用快速傅里叶变换对获取的定子电压、电流信号进行基波提取, 并在假设电枢电阻及永磁体磁链恒定的前提下, 采用定子电压和电流的基波离线辨识出定子 d 、 q 轴电感。

电机参数的离线辨识方法虽然可以获得较准确的辨识结果, 但其辨识过程往往需要复杂的数据采集, 获得的数据多以表格形式存储, 供控制器以插补方式查询获取。该方法获取的数据无法准确反应电机实际运行时的不同运行工况, 且不易考虑温度变化对电机参数的影响。

3.2 PMSM 参数在线辨识方法

与电机参数离线辨识方法相比, 电机参数在线辨识方法不仅能够对电机运行状态进行实时监控, 且易于实现控制器参数的实时更新以实现自适应控制。为此, 国内外学者在这方面开展了大量的研究, 取得了丰硕的研究成果, 提出了大量的在线辨识方法, 如递推最小二乘法、模型参考自适应算法、卡尔曼滤波算法和人工智能算法等, 实现 PMSM 单参数辨识或多参数同时在线辨识。

3.2.1 PMSM 单参数辨识

对于矢量控制的 PMSM 系统, 其电感参数以 L_d 、 L_q 形式成对出现, 因此单参数辨识成果多集中在 R 或 ψ_f 辨识上, 其应用领域相对集中在 PMSM 的无位置传感器控制、故障检测及状态监控等方面。如基于定子电阻的辨识可提高无位置传感器控制中的位置估计精度^[22]或实现对电机定子温度的监控^[14,23-26]; 而通过对永磁体磁链的辨识则可以实现退磁故障的检测及转子温度的监控^[27-33]。

考虑到定子电阻的变化直接影响无位置传感器 PMSM 系统的位置估计精度, Nahid-Mobarakeh B 等人在假定 d 、 q 轴电感及永磁体磁链已知的条件下, 采用模型参考自适应算法对定子电阻进行在线辨识^[22], 遗憾的是辨识过程忽略了电机运行过程中 d 、 q 轴电感及永磁体磁链变化对定子电阻辨识精度的影响; 且该辨识方法基于电机动态电压方程, 而对于大功率电机来说, 受功率密度及效率的限制, 定子电阻一般较小, 中高速时其压降在整个电压方程中的权重较小且容易受定子电压和电流谐波扰动的影

响,这些因素均对上述定子电阻的辨识精度产生较大影响。针对该问题,文献[23-25]采用注入直流偏置电压的方法加以解决,其主要思路是在电机绕组中注入短时直流偏置电压,并根据响应电流来获得定子电阻信息,虽然该方法可以提高定子电阻的辨识精度,但将在电机中产生固定的电流矢量,引起转矩脉动,影响系统的控制精度和运行质量,且辨识精度还严重依赖于直流电压和电流分量的分离效果。为此,Popov N Z 及其团队摒弃了扰动电流注入思路,转而利用逆变器输出高频谐波电压以及由此产生的谐波电流获取定子高频输入阻抗,进而获取定子电阻^[26],该方案避免了扰动注入对系统运行的影响,且不需要辅助设备和复杂辨识算法,但为了获取高频阻抗,需要对定子电压、电流信号进行频谱分析,提取相应计算分量,其辨识精度依赖于电感参数,而且易受高频集肤效应的影响。

针对永磁体磁链的辨识,清华大学肖羲团队采用扩展卡尔曼滤波算法对永磁体磁链进行在线辨识^[27-29],但扩展卡尔曼滤波是一种时域递推算法,只能在时域内实现对 PMSM 参数的辨识。为此,文献[30]将其与小波变化相结合,提出了一种能够在时域和频域同时对永磁体磁链进行辨识的多尺度在线辨识算法。史宇超等人^[31-32]则进一步将永磁体磁链辨识扩展到 IPMSM 无速度传感器控制中,作者首先采用扩展卡尔曼滤波辨识永磁体磁链信息,并将辨识结果代入到采用模型参考自适应算法的位置估计中,最后利用位置估计结果更新扩展卡尔曼滤波算法中的转速状态,实现磁链与转速的联合估计,消除磁链波动对位置估计的影响,提高无位置传感器系统的控制精度。其辨识结构如图 3 所示。

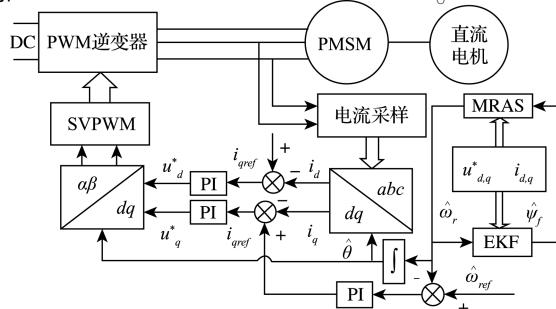


图 3 基于 EKF 的无传感器控制 IPMSM

Fig. 3 Block diagram of on-line flux identification for sensorless controlled IPMSM system based on EKF

文献[27-32]在永磁体磁链辨识过程中均假定其他参数固定不变,然而受磁路饱和及温度变化的影响,定子电阻及 d 、 q 轴电感均可能发生变化,影响永磁体磁链辨识精度,导致永磁体退磁故障的误诊断。为此,文献[33]将参数 R_s 、 L_d 和 L_q 变化对永磁体磁链估计精度的影响用诊断误差因子 μ 来表征,当 μ 较小时,认为 R_s 、 L_d 和 L_q 变化对永磁体磁链辨识精度的影响较小,基于最小二乘法获得的磁链辨识结果可以作为判断退磁故障以及故障程度的依据; μ 较大时,则认为永磁体磁链辨识精度受参数 R_s 、 L_d 和 L_q 变化的影响较大,采用辨识结果上限与设定阈值的比较结果作为判断永磁体退磁故障的依据。

PMSM 单参数辨识技术实现起来较为简单,但在辨识过程中通常认为其他参数恒定或通过查表获取,但是,电机实际运行工况变化而引起的其他参数变化将导致单参数辨识结果出现误差,为此, PMSM 多参数同时在线辨识技术应运而生而且逐渐发展。

3.2.2 PMSM 多参数同时辨识

基于模型的 PMSM 系统控制性能取决于电机参数的准确获取,为此,电机多参数同时在线辨识获得了广泛的研究关注^[5,34-41,44-53]。文献[5]和文献[34]针对 IPMSM 分别采用递推最小二乘法和加窗最小二乘法在假定永磁体磁链恒定的前提下同步辨识 R_s 、 L_d 和 L_q 3 个参数,并将辨识结果应用于无位置传感器控制的 PMSM 系统提高其位置估计精度。安群涛等则利用 d 轴和 q 轴电流、定子电压及其偏差,依据波波夫超稳理论,在推导辨识参数自适应率的基础上,建立了能同时辨识 R_s 、 L_d 、 L_q 及 ψ_f 的自适应参数辨识模型^[35]。然而,与单参数辨识不同,多参数同时在线辨识极易出现因系统工况变化而导致的辨识精度下降甚至辨识结果不收敛问题^[28-29,36,46-47]。如当负载转矩由空载变化到 1.8 N·m 时, R_s 的辨识结果从 0.3 Ω 变化到 1.1 Ω, L_q 则从 18 mH 变化到 14 mH^[5]; 基于同样的原因,文献[37]的实验结果中,定子电阻辨识结果为 6.3 Ω,与实际值 7.5 Ω 之间存在较大的辨识误差。

电机多参数同时辨识精度下降的根本原因在于 PMSM 参数辨识方程的欠秩。由式(2),当辨识参数个数超过电机参数辨识方程阶数时,由于辨识方程的欠秩导致辨识解的不唯一,在参数初值或系统运行工况改变时,辨识结果容易陷入局部最优而出现误收敛导致辨识精度下降。对于面装式永磁

同步电机(SPMMSM),当系统在 $i_d = 0$ 控制模式下运行时,此时电磁参数 R_s 和 ψ_f 只在 q 轴电压方程中出现,对二者同时辨识以实现定、转子温度的同时监控时^[11],同样会出现因辨识方程欠秩而导致的辨识结果不准确问题。为此,构建满秩的电机参数辨识方程,实现 PMSM 多参数同时在线辨识是一个迫切需要解决的关键技术问题。

通过假设部分电机参数恒定不变来减少辨识参数个数是实现满秩辨识的有效途径^[38-41,44]。为此,文献[38]在假定永磁体磁链及机械参数恒定已知的前提下,引入转速动态方程构建了同时辨识 SPMMSM 定子电阻 R_s 和电感 L_s 的满秩方程。在假设其他参数及机械参数恒定已知的前提下,Liu L 采用两个独立的模型参考自适应算法^[39],而 Rashed M 则采用了两个独立的扩展卡尔曼滤波算法^[40]实现了 SPMMSM 定子电阻和永磁体磁链的同时辨识。文献[41]则在 R_s 与 ψ_f 已知且假定其保持不变的前提下,采用模型参考自适应算法实现了 L_d 与 L_q 的同时辨识。鉴于系统实际运行工况及温度的变化,部分参数恒定不变的假设条件往往难以保证^[42-43]。所以,通过假定部分电机参数不变来实现满秩辨识,本质上并没有消除系统实际运行中参数变化对辨识精度的影响,导致上述满秩辨识方案出现误收敛^[46-47]。为此,文献[44]采用分步辨识方案实现满秩参数辨识,首先利用带遗忘因子的最小二乘法同时辨识出 IPMSM 定子电阻和永磁体磁链,再利用辨识结果实现定子 d 轴和 q 轴电感辨识;为了降低实时计算负担,作者将缓变参数 R_s 与 ψ_f 的辨识

过程分为若干阶段,降低每个控制周期内的计算量,提高系统运行的实时性,具体辨识流程如图 4 所示。由图 4 可知,虽然在辨识 d 轴和 q 轴电感中采用了实时的 R_s 与 ψ_f ,但 R_s 与 ψ_f 的辨识中并没有涉及 d 轴和 q 轴电感参数的变化,参数辨识精度仍然亟需提高。

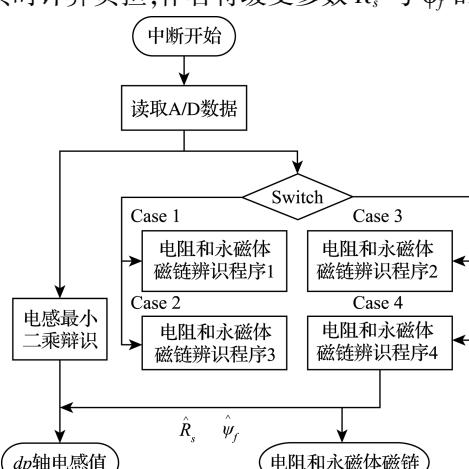
增加扰动信号获取新的辨识方程是实现电机参数满秩辨识的另一有效途径^[45-47]。文献[45]针对 SPMMSM 无位置传感器控制系统,在系统处于稳态、电感已知且保持不变的前提下,在 d 轴定子电流中注入短时交流扰动来实现 R_s 和 ψ_f 的满秩辨识,但该方法不能克服系统运行中电感参数变化对辨识精度的影响。为此,Liu K 等人^[46]对上述方案进行改进,首先在 $i_d = 0$ 控制方式下辨识出定子电感,然后通过在 d 轴中注入扰动电流建立同时辨识 R_s 和 ψ_f 的满秩辨识方程,再采用 adaline 神经网络进行参数求解。尽管该方法可以实现 R_s 和 ψ_f 的满秩辨识,但其忽略了注入电流所引起电机磁路变化导致的电感变化对辨识精度的影响。为此,文献[47]在恒转速、恒负载运行条件约束下推导出不含电感参数的 R_s 和 ψ_f 满秩辨识方程,并通过 Adaline 神经网络进行参数辨识,由于辨识方程中不含有电感参数,避免了文献[45-46]中电感参数变化对辨识精度的影响,但该方法采用批处理数据处理方式,需要对 $i_d = 0$ 和 $i_d > 0$ 两种控制方式下的电压、电流进行采样存储,且采用神经网络进行参数求解,过程相对复杂。

Underwood S J 等人基于 PMSM 4 个参数的不同时间尺度,将 R_s 、 ψ_f 、 L_d 、 L_q 分成快变参数和缓变参数,采用 2 个不同时间尺度的最小二乘算法进行在线辨识,再将辨识结果互相更新,基于电机参数的不同时间尺度实现电机多参数同时在线辨识^[48]。遗憾的是:为了保证算法收敛,仍然需要在 d 轴注入幅度及频率合理的扰动电流以确保慢时间尺度最小二乘算法的参数辨识精度。

通过增加扰动信号不仅能够解决 SPMMSM 在 $i_d = 0$ 控制下同时辨识 R_s 、 ψ_f 时的辨识方程欠秩问题,而且可以确保文献[48]中基于最小二乘算法辨识电机缓变参数的辨识精度,但扰动电流的注入势必产生转矩脉动,在系统实际运行中,尚需合理确定扰动电流的幅度和作用时间,以实现转矩脉动与辨识精度之间的合理折中。

图 4 分步辨识的 PMSM 多参数辨识框图

Fig. 4 Block diagram of step identification for PMSM with multi-parameters



近年来,有研究学者将 PMSM 参数辨识过程转化为非线性系统的动态寻优问题^[49],由于进化算法所具有的较强随机寻优能力^[50],其在 PMSM 参数辨识中的应用也逐渐引起学术界的研究关注^[49-53]。文献[49]和文献[51]采用微粒群算法,分别实现了 PMSM 系统中 R_s 、 T_L 及 R_s 、 ψ_f 、 L_d 和 L_q 的同时辨识,并获得了较高的辨识精度,但参数辨识中的收敛速度较慢。为此,章兢团队提出了基于免疫协同微粒群进化算法的 PMSM 多参数辨识方法^[52],其个体极值采用自适应小波学习算法以加快收敛速度,在实现对 R_s 、 ψ_f 、 L_d 、 L_q 高精度辨识的同时提高了算法的收敛速度,但由于众多算法的嵌套,使得该方法过于复杂,计算量较大。为降低计算量,文献[53]提出了免疫克隆微分算法用于辨识 PMSM 4 个电磁参数,在降低计算量的同时,兼顾了算法的辨识精度和动态收敛速度,具有更优的全局搜索能力。文献[54]则提出一种基于遗传算法的 IPMSM 参数辨识方法,该方法继承了遗传算法鲁棒性强的优点,同时获得了较高的辨识精度和收敛速度。

3.3 PMSM 参数在线辨识方法的技术特点

PMSM 参数在线辨识方法主要涵盖递推最小二乘法、模型参考自适应法、扩展卡尔曼滤波算法以及人工智能算法。最小二乘法目标函数简单,最小目标函数值为零,计算量适中,但优化过程中需计算目标函数对待辨识参数的导数且对测量噪声较为敏感。模型参考自适应算法基于稳定性分析,能保证待辨识参数的渐进收敛,但在多参数同时辨识时,满足稳定性要求的自适应律确定较为困难,需要大量的试凑与调整,且辨识结果易受测量噪声的影响。扩展卡尔曼滤波是卡尔曼滤波在非线性系统应用中的推广,能为非线性系统提供噪声环境下、最小方差意义上的状态估计^[55-56],但需将待辨识参数处理为状态量,特定系统下该过程可能较为复杂^[57]。人工智能算法具有较强的非线性系统处理能力以及较强的自寻优能力^[58],在 PMSM 参数辨识领域有着广阔的应用前景,但其算法的复杂性导致了巨大的计算负担,使得该类算法目前多局限于理论研究。

总之,既有 PMSM 参数在线辨识方法具有各自的技术优势和不足,适用于不同的工况和领域,但

鉴于 PMSM 驱动系统较强的非线性特性以及现场测量工况和运行工况的复杂性,PMSM 参数在线辨识技术仍存在亟需关注的研究问题。为此,需要对这些问题进行总结、凝练并展望该技术的未来发展方向,旨在推动 PMSM 参数辨识技术的不断发展和应用。

4 PMSM 多参数辨识亟需关注的研究问题及发展方向展望

为了实现 PMSM 多参数的在线同时辨识,定子 d 、 q 轴电压 u_d 、 u_q 和电流 i_d 、 i_q 以及转子电角速度 ω_r 的准确获取非常关键,对于 PMSM 驱动系统,其安装的高精度位置传感器可以确保转子位置及转速的获取精度,而电流采样中出现的增益误差与偏置误差可以基于软件进行校正或补偿。

由于驱动 PMSM 的逆变器多采用空间矢量脉宽调制(SVPWM),对电机端电压直接采样只能获得一系列脉冲量,所以在实际应用中通常采用逆变器输入端定子电压给定 u_d^* 、 u_q^* ^[9,27-29,31] 或对逆变器直流侧电压采样并根据开关函数计算来间接获得定子 d 、 q 轴电压^[35],但受功率器件开关延时、死区时间、导通压降以及高频寄生电容的影响,逆变器呈现出强烈的非线性特性,从而导致这两种方式获取的辨识用 d 、 q 轴电压与定子实际电压间存在偏差,直接影响 PMSM 电磁参数的辨识精度。针对该问题许多学者进行了长期不懈的研究,并已取得了若干研究成果^[59-63],但是无论是 SPMSM 还是 IPMSM,不依赖电机参数、系统运行工况及温度变化,准确获取定子电压 u_d 、 u_q ,确保 PMSM 参数辨识精度问题,仍然亟需获得研究关注并开展深入研究。

其次,对于 PMSM 驱动系统的多参数同时辨识,其辨识方程通常处于欠秩状态,导致辨识结果不唯一,在系统初值和运行工况改变时容易陷入局部最优。尽管前述大量研究成果试图通过减少辨识参数个数或增加辨识方程来解决,但均未从本质上加以解决,且通常需要注入一定幅值和作用时间的扰动电流增加辨识方程,影响系统的控制精度和运行性能。因此,无需注入扰动电流构建出 PMSM 多参数同时辨识的全秩辨识方程,实现多参数的同时在线准确辨识自然成为值得关注的研究方向。

另外,鉴于 PMSM 系统强烈的非线性和多参数

同时在线辨识的复杂性,以进化算法为代表的人工智能算法由于具有较强的非线性系统动态寻优能力,在 PMSM 参数辨识中逐渐凸显出应用前景,受到了越来越多研究学者的关注。但该类算法存在计算量巨大,数据处理负担过重的共性问题,如何降低算法的计算量,在 PMSM 系统实际运行中实现在线实时辨识,也是极具挑战的发展方向。

最后,尽管扩展卡尔曼滤波算法可以为非线性系统参数辨识提供噪声环境下、最小方差意义下的状态估计,但其仅采用一阶线性化近似,针对强非线性系统时其估计性能受限,且不适用于非高斯噪声条件和非高斯分布参数。因此,针对具有非高斯测量噪声干扰以及电机参数变化的非高斯随机分布特性的 PMSM 驱动系统,实现其多参数同时在线辨识自然成为又一个值得深入探究的发展方向。

5 结 论

受系统运行工况和环境温度变化的影响,PMSM 参数在实际不同工况运行时将产生较大变化,电机多参数在线准确辨识是基于模型的 PMSM 高性能控制、故障诊断和容错控制的重要前提。论文首先分析了引起 PMSM 参数变化的影响因素,然后对 PMSM 参数辨识方法的既有成果进行梳理,重点剖析了 PMSM 多参数同时辨识中由于辨识方程欠秩而导致的辨识参数非唯一解问题,并对既有解决方案进行了分类和总结,指出了目前 PMSM 参数辨识方法的优缺点,明确了 PMSM 参数辨识亟需关注的研究问题并展望了其发展方向,旨在通过 PMSM 多参数同时在线准确辨识技术的深入研究,并与基于模型设计的 PMSM 高性能控制、故障诊断与容错控制相结合,实现 PMSM 驱动系统安全可靠的高性能持续运行。

参考文献

- [1] 秦斌, 姜学想, 周浩, 等. 基于 SVM 的永磁直驱风电机系统滑模变桨距控制[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1525-1531.
- [2] QIN B, JIANG X X, ZHOU H, et al. SVM-based sliding mode control of pitch angle for direct driven PM wind turbine system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(7): 1525-1531.
- [3] CHEN L, SUN X D, JIANG H B, et al. High performance control of a permanent magnet synchronous motor for electric vehicle applications[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2014, 11(3): 706-710.
- [4] ZHU Y, CHENG M, HUA W, et al. Sensorless control strategy of electrical variable transmission machines for wind energy conversion systems[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2013, 49(7): 3383-3386.
- [5] WANG L, TIAN M, GAO Y. Fuzzy self-adapting PID control of PMSM servo system[C]. IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2007: 860-863.
- [6] ICHIKAWA S, TOMITA M, DOKI S, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motors using online parameter identification based on system identification theory[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 363-372.
- [7] ILIOUDIS V C, MARGARIS N I. Flux weakening method for sensorless PMSM control using torque decoupling technique[C]. 2010 1st Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives, 2010: 32-39.
- [8] 李红梅, 陈涛, 姚宏洋. 电动汽车 PMSM 退磁故障机理、诊断及其发展[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 276-284.
- [9] LI H M, CHEN T, YAO H Y. Mechanism, diagnosis and development of demagnetization fault for PMSM in electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 276-284.
- [10] HENWOOD N, MALAIZE J, PRALY L. A robust non-linear luenberger observer for the sensorless control of SM-PMSM: rotor position and magnets flux estimation [C]. 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012: 1625-1630.
- [11] BOLOGNANI S, OBOE R, ZIGLIOTTO M. Sensorless full-digital PMSM drive with EKF estimation of speed and rotor position[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(1): 184-191.
- [12] 张猛, 肖羲, 李永东. 基于扩展卡尔曼滤波器的永磁同步电机转速和磁链观测器[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 36-40.
- [13] ZHANG M, XIAO X, LI Y D. Speed and flux observer for permanent magnet synchronous motor based on EKF [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 36-40.
- [14] UNDERWOOD S J, HUSAIN I. Online parameter estimation and adaptive control of permanent-magnet synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2435-2443.
- [15] RAMAKRISHNAN R, ISLAM R, ISLAM M, et al. Re-

- al time estimation of parameters for controlling and monitoring permanent magnet synchronous motors [C]. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2009:1194-1199.
- [13] 李景灿, 廖勇. 考虑饱和及转子磁场谐波的永磁同步电机模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 30(3): 60-66.
- LI J C, LIAO Y. Model of permanent magnet synchronous motor considering saturation and rotor flux harmonics [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 30 (3) : 60-66.
- [14] 张忠英, 姜晓亮, 孙频东, 等. 基于EKF的永磁同步电机定子绕组和转子磁铁温升估计[J]. 南京师范大学学报:工程技术版,2011, 11(1): 45-50.
- ZHANG ZH Y, JIANG X L, SUN P D, et al. Estimation of temperature rises in stator winding and rotor magnet of PMSM drives based on EKF [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2011, 11(1): 45-50.
- [15] LEE S Y, KWARK S Y, JUNG S Y. analysis of inductance characteristic in interior permanent magnet synchronous motor considering inductance variation [C]. The 12th biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation. 2006: 145-148.
- [16] ALMANDOZ G, POZA J, RODRIGUEZ A R. Modeling of cross-magnetization effect in interior permanent magnet machines[C]. The 18th International Conference on Electrical Machines, 2008: 1-6.
- [17] LEE J Y, LEE S H. Determination of parameters considering magnetic nonlinearity in an interior permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1303-1306.
- [18] GEBREGERGIS A, ISLAM M, SEBASTIAN T, et al. Evaluation of inductance in a permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2011: 1171-1176.
- [19] WEISGERBER S. Estimation of permanent magnet motor parameter[C]. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1997: 29-34.
- [20] KHATOUNIAN F, MOREAU S, MONMASSON E, et al. Parameters estimation of the actuator used in haptic interfaces: Comparison of two identification methods [C]. International Symposium on Industrial Electronics, 2006: 211-216.
- [21] RAHMAN K M, HITI S. Identification of machine parameters of a synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2005, 41(2): 557-565.
- [22] NAHID-MOBARAKEH B, MEIBODY-TABAR F, SAR-GOS F M. Mechanical sensorless control of PMSM with online estimation of stator resistance [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(2): 457-471.
- [23] WILSON S D, STEWART P, TAYLOR B P. Methods of resistance estimation in permanent magnet synchronous motors for real-time thermal management [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 698-707.
- [24] LEE S B, HABETLER T G. An online stator winding resistance estimation technique for temperature monitoring of line-connected induction machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39 (3) : 685-694.
- [25] ZHANG P J, LU B, HABETLER T G. A remote and sensorless stator winding resistance estimation method for thermal protection of soft-starter-connected induction machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(10): 3611-3618.
- [26] POPOV N Z, VUKOSAVIC S N, LEVI E. Motor temperature monitoring based on impedance estimation at PWM frequencies [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(1): 215-223.
- [27] XIAO X, ZHANG M, LI Y D. On-line estimation of permanent magnet flux linkage ripple for PMSM based on Kalman filter[C]. 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, 2006: 1171-1175.
- [28] 肖曦, 张猛, 李永东. 永磁同步电机永磁体状况在线监测 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (24) : 43-47.
- XIAO X, ZHANG M, LI Y D. On-line estimation of permanent-magnet flux linkage ripple for PMSM [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(24): 43-47.
- [29] XIAO X, CHEN C M, ZHANG M. Dynamic permanent magnet flux estimation of permanent magnet synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(30): 1085-1088.
- [30] 文传博, 齐亮. 永磁同步电机磁链信息在线监测新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(2): 22-26.
- WEN CH B, QI L. On line detection method of magnet flux linkage for permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(2): 22-26.
- [31] 史宇超, 孙凯, 马鸿彦, 等. 内埋式永磁同步电机永磁磁链的在线辨识 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 48-53.

- SHI Y C, SUN K, MA H Y, et al. On-line identification of permanent magnet flux in IPMSM drive [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 48-53.
- [32] SHI Y C, SUN K, LI Y D. Online identification of permanent magnet flux based on Extended kalman filter for IPMSM drive with position sensorless control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(11): 4169-4178.
- [33] LEE J, JEON Y J, CHOI D C, et al. Demagnetization fault diagnosis method for PMSM of electric vehicle [J]. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013: 2709-2713.
- [34] WANG S. Windowed least square algorithm based PMSM parameters estimation [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013: 1-11.
- [35] 安群涛, 孙力, 赵克. 一种永磁同步电动机参数的自适应在线辨识方法 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 31-6.
- AN Q T, SUN L, ZHAO K. An adaptive on-line identification method for the parameters of permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(6): 31-6.
- [36] ZAKY M S. Stability analysis of speed and stator resistance estimators for sensorless induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 858-870.
- [37] MOUREAU S, KAHOUIS R, LOUIS J. Parameters estimation of permanent magnet synchronous machine without adding extra-signal as input excitation [C]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2004: 371-376.
- [38] LIU L, CARTES D A. Synchronisation based adaptive parameter identification for permanent magnet synchronous motors [J]. IET Control Theory and Application, 2007, 1(4): 1015-1022.
- [39] RASHED M, MACCONNELL P F A, Stronach A F, et al. Sensorless indirect-rotor-field-orientation speed control of a permanent-magnet synchronous motor with stator-resistance estimation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1664-1675.
- [40] ZHU Z Q, ZHU X, SUN P D. Estimation of winding resistance and PM flux-linkage in brushless AC machines by reduced-order extended kalman filter [J]. Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2007: 740-745.
- [41] UDDIN M N, CHY M M I. Online parameter-estimation-based speed control of PM AC motor drive in flux-weakening region [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(5): 1486-1494.
- [42] DU S, ZHAO S H, CHEN Y S. Inertia identification for speed control of PMSM servo motor [C]. International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011: 1181-1187.
- [43] 丁信忠, 张承瑞, 李虎修, 等. 永磁同步电机的转动惯量辨识机状态估计 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2012, 42(2): 70-77.
- DING X ZH, ZHANG CH R, LI H X, et al. Identification of inertia and state estimation for PMSM [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2014, 42(2): 70-77.
- [44] 杨立永, 张云龙, 陈智刚, 等. 基于参数辨识的 PMSM 电流环在线自适应控制方法 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 86-91.
- YANG L Y, ZHANG Y L, CHEN ZH G, et al. On-line adaptive control of PMSM current-loop based on parameter identification [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 86-91.
- [45] LEE K W, JUNG D H, HA I J. An online identification method for both stator resistance and back-EMF coefficient of PMSMs without rotational transducers [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(2): 507-510.
- [46] LIU K, ZHANG Q, CHEN J T. Online multiparameter estimation of nonsalient-pole PM synchronous machines with temperature variation tracking [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1776-1788.
- [47] LIU K, ZHU Z Q, STONE D A. Parameter estimation for condition monitoring of PMSM stator winding and rotor permanent magnets [J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2013, 60(12): 5902-5913.
- [48] UNDERWOOD S J, HUSAIN I. Online parameter estimation and adaptive control of permanent-magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2435-2443.
- [49] LIU L, LIU W X, CARTES D A. Permanent magnet synchronous motor parameter identification using particle swarm optimization [J]. International Journal of Computational Intelligence Research, 2008, 42(2): 211-218.
- [50] 张勇, 谭南林. 基于遗传算法的内燃机车优化操纵研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7): 604-609.
- ZHANG Y, TAN N L. Study on locomotive optimizing

- control based on genetic algorithm [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27 (7): 604-609.
- [51] XIAO X, XU Q S, TAO J, et al. An improved method of interior permanent magnet synchronous motor parameter identification based on particle swarm optimization [C]. 15th European Conference of Power Electronics and Applications, 2013: 1-9.
- [52] 刘朝华, 章兢, 李小华, 等. 免疫协同微粒群进化算法的永磁同步电机多参数辨识模型方法 [J]. *自动化学报*, 2012, 38(10): 1698-1708.
- LIU ZH H, ZHANG J, LI X H, et al. Immune Co-evolution particle swarm optimization for permanent magnet synchronous motor parameter identification [J]. *ACTA Automatica Sinica*, 2012, 38(10): 1698-1708.
- [53] LIN G H, ZHANG J, LIU Z H. Parameter identification of PMSM using immune clonal selection differential evolution algorithm [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014: 1-10.
- [54] 肖曦, 许青松, 王雅婷, 等. 基于遗传算法的内埋式永磁同步电机参数辨识方法 [J]. *电工技术学报*, 2014, 29(3): 21-26.
- XIAO X, XU Q S, WANG Y T, et al. Parameter identification of interior permanent magnet synchronous motors based on genetic algorithm [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(3): 21-26.
- [55] 王笑笑, 杨志家, 王英男, 等. 双卡尔曼滤波算法在锂电池 SOC 估算中的应用 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(8): 1732-1738.
- WANG X X, YANG Z J, WANG Y N, et al. Application of dual extended kalman filtering algorithm in the state-of-charge estimation of lithium-ion battery [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(8): 1732-1738.
- [56] 何波, 李荣冰, 刘建业, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的风速估计算法研究 [J]. *电子测量技术*, 2014 (6): 34-37.
- HE B, LI R B, LIU J Y, et al. Estimation algorithm for airborne wind based on extended kalman filter [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, (6): 34-37.
- [57] 蔡挺, 刘明雍, 黄博. 基于中心微分 kalman 滤波的重力/惯性组合导航 [J]. *国外电子测量技术*, 2013, 32(1): 22-24.
- CAI T, LIU M Y, HUANG B. The gravity/inertial navigation based on center differential kalman filtering [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2013, 32(1): 22-24.
- [58] 雷华军, 秦开宇. 基于改进量子进化算法的测试优化选择 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34 (4): 838-844.
- LEI H J, QIN K Y. Optimal test selection based on improved quantum-inspired evolutionary algorithm [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2013, 34(4): 838-844.
- [59] KIM H W, KIM H S, YOUN M J, et al. Online observation and compensation of voltage distortion in PWM VSI for PMSM [J]. *IEEE Proceedings Electric Power Applications*, 2004, 151(5): 534-542.
- [60] KIM H W, YOUN M J, CHO K Y, et al. Nonlinearity estimation and compensation of PWM VSI for PMSM under resistance and flux linkage uncertainty [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2006, 14(4): 589-601.
- [61] LIU K, ZHU Z Q, ZHANG Q, et al. Influence of inverter nonlinearity on parameter estimation in permanent magnet synchronous machines [C]. 19th International Conference on Electrical Machines, 2010: 1-5.
- [62] QIN H T, LIU K, ZHANG Q, et al. Online estimating voltage source inverter nonlinearity for PMSM by adaline neural network [C]. 5th International Conference on Bio-inspired Computing, 2010: 727-733.
- [63] KIM K H. Improved estimation scheme for disturbance due to dead time and inverter nonlinearity in inverter-fed PMSM drive [J]. *Electronics Letters*, 2013, 49 (15): 955-957.

作者简介

李红梅, 1969 年出生, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源汽车、电机控制和非线性动态。

E-mail: lhmyy01@sina.com

Li Hongmei was born in 1969, Ph. D. And she is currently a professor in Hefei University of Technology. Her main research interests include new energy vehicles, motor control and nonlinear dynamic.

陈涛, 1981 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为信号处理与 PMSM 故障诊断。

E-mail: jzitchentao@126.com

Chen Tao was born in 1981. And he is currently a Ph. D. candidate in Hefei University of Technology. His main research interests include signal processing and fault diagnosis of PMSM.