

永磁同步电机高精度转速控制方法综述^①

刘京航^{1,2}, 王志成^{2,3}, 王 朔^{1,2}, 王昱忠^{1,2}, 杜少华^{2,3}

¹(中国科学院大学, 北京 100049)

²(中国科学院 沈阳计算技术研究所 高档数控国家工程研究中心, 沈阳 110168)

³(沈阳高精数控技术有限公司, 沈阳 110168)

摘 要: 电机转速精度是伺服系统的重要性能指标, 传统 PI 控制已不能满足伺服系统的高精度要求. 将先进控制策略应用于永磁同步电机是伺服系统发展的趋势. 本文介绍了永磁同步电机的精确测速方法和先进控制策略在电机转速系统中的应用, 分析了各种方法的优缺点和适用范围, 综述了最新的研究成果和有待解决的问题并对将来的研究方向进行了展望.

关键词: 永磁同步电机; 高精度; 转速控制; 测速方法; 先进控制策略

引用格式: 刘京航, 王志成, 王朔, 王昱忠, 杜少华. 永磁同步电机高精度转速控制方法综述. 计算机系统应用, 2017, 26(12): 32-36. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6129.html>

Review of High Precision Speed Control Methods for Permanent Magnet Synchronous Motor

LIU Jing-Hang^{1,2}, WANG Zhi-Cheng^{2,3}, WANG Shuo^{1,2}, WANG Yu-Zhong^{1,2}, DU Shao-Hua^{2,3}

¹(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

²(National Engineering Research Center for High-End CNC, Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168, China)

³(Shenyang Golding NC Tech. Co. Ltd., Shenyang 110168, China)

Abstract: The motor speed accuracy is an important performance index of the servo system. The traditional PI control cannot meet the high precision requirements of servo system. The application of advanced control strategy to permanent magnet synchronous motor is the development trend of servo system. This paper introduces the application of the precision velocity measurement method and the advanced control strategy of the permanent magnet synchronous motor in the motor speed system, analyzes the advantages and disadvantages and the scope of the various methods, summarizes the latest research results and the problems to be solved, and the future The research direction is forecasted.

Key words: PMSM; high accuracy; speed control; speed method; advanced control strategy

永磁同步电机 (Permanent magnet synchronous motor, PMSM) 在电机控制理论和电力电子技术的发展下得以迅速的推广. PMSM 具有低损耗、高效率、输出转矩大和过载能力强等优点. 但永磁同步电机的控制系统较为复杂且难于调控, 使其对控制策略有着更高的要求. 传统的 PI 控制对系统的准确模型依赖性较大且控制性能一般, 对负载扰动较为敏感, 已不能满

足永磁同步电机的高性能需求^[1].

近年来, 许多先进的控制策略被提出, 如预测函数控制、自抗扰控制和模糊控制等. 这些智能控制方法都在一定程度上实现了调速系统的高性能控制^[2]. 但每种策略都有其特定的缺点和局限性, 如何改进这些控制策略以达到更高性能的控制要求, 是时下研究的重点方向. 本文首先介绍了永磁同步电机的精确测速方

① 基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项 (2014ZX04014021)

收稿时间: 2017-03-21; 修改时间: 2017-04-13; 采用时间: 2017-04-24

法,然后基于 PMSM 的高精度转速控制领域内最新的研究成果,阐述了先进的控制策略在永磁同步电机控制系统中的应用,分析了每种方法的优缺点并对高精度转速控制方法的发展做了总结和展望.

1 精确测速方法

在 PMSM 矢量调速系统中,转速反馈量的测量精度对伺服系统的性能有很大的影响.基于增量式光电编码器的测速方法主要有 3 种:测频法 M 法,测周期法 T 法和测频测周法 M/T 法.

M 法的原理(如图 1)是在一定时间 T 内,高速时采样时间内的脉冲数多,测速误差较小.当进行高速测量时,M 法测速的优势很明显,当转速降低时则误差随之增大.

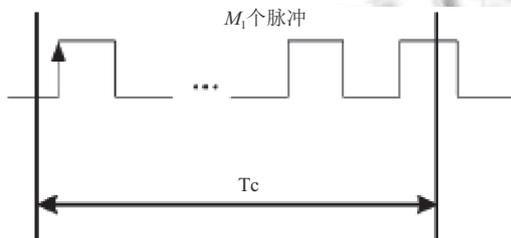


图 1 M 法测速原理

T 法的原理(如图 2)是在一个输出脉冲周期内,用一个计数器对已知频率为 f_0 的高频时钟脉冲进行计数,由此来计算转速. T 法在测量较低的速度时能够获得较高的分辨率.

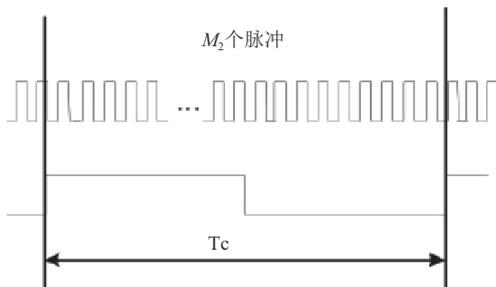


图 2 T 法测速原理

M/T 法的原理(如图 3)是将 M 法和 T 法结合起来,既检测 T_c 时间内旋转编码器输出的脉冲个数 M_1 ,又检测同一时间间隔的高频时钟脉冲个数 M_2 ,用于计算转速. M/T 法的相对误差与转速 n 无关,可以适用于各种转速下的测量.但是 M/T 法的实现较为复杂.

三种测速方法都有其优缺点和适用范围.对于测频法 M 法来说,当电机转速很高时,一定时间 T 内采

样的脉冲数就多,在计算速度时使得测速的误差减小.但当转速较低时, M 法测速的误差会增大.因此测频法适用于高转速的电机.对于测周期法 T 法,它是以一个输出周期为基准,通过测量编码器 2 个相邻脉冲之间的时间间隔来计算转速^[3].与 M 法测速相反,在低转速时, T 法测速能够获得较高的精度.随着电机转速的增高, T 法测速的误差也增大.因此 T 法测速适用于低转速阶段,但当电机转速过低时,可能会导致测速响应时间过长,无法达到实时控制的效果. M/T 法结合了 M 法和 T 法的优点,使得它既适用于高转速阶段又适用于低转速阶段,可以在较宽的范围内得到精确的测速^[4].但 M/T 法无论从软件设计还是硬件配置,实现都比较复杂,而且低转速实时性差的问题也没有解决.依照实际情况选择合适的方法对实现电机的精确测速十分重要.

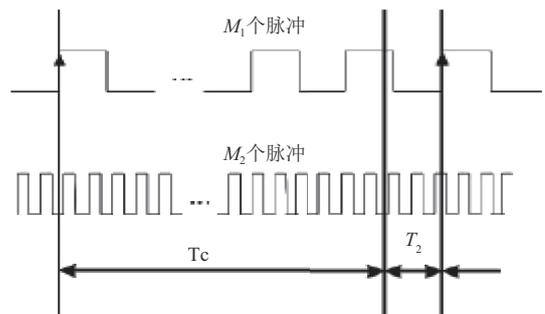


图 3 M/T 法测速原理

2 先进控制策略

现代控制理论的发展为先进控制技术奠定了应用理论的基础.近些年来,控制理论策略有着很好的发展.一些先进的控制策略(如预测函数控制、自抗扰控制、模糊控制、卡尔曼滤波器、神经网络、滑模控制)正在逐步引入永磁同步电机的实际应用中.先进控制策略能够处理不确定性问题,摆脱了对控制模型的依赖,为推动伺服系统向数字化、智能化方向发展做出了卓越的贡献.

2.1 预测函数控制

预测函数控制(PFC)是预测控制方法的一种,具有稳态精度高,跟踪性能好等特点^[5].但当 PFC 应用到电机转速控制系统时,外部负载扰动会影响它的跟踪性能,进而影响系统的稳态精度.

针对 PFC 的不足,许多学者对其做了改进.邓永停等在预测函数控制的基础上添加了扰动观测器,构成

了一个双环控制器^[6]. 负载扰动由扰动观测器进行估计, 并对控制量进行实时修正, 减少了外部扰动的影响.

周磊等基于状态空间模型, 在 PFC 的基础上添加了模糊控制器^[7]. 通过对模糊控制器的参数在线自调整, 并将其与预测函数控制得到的控制量共同控制被控对象. 这种方法根据控制系统的速度偏差和偏差变化率, 利用放大倍数对模糊控制器的参数进行在线修改, 控制精度高, 结果可靠有效, 使系统具有较好的稳定性和鲁棒性.

Huixian Liu 等设计了使用预测函数控制和扩展状态观测器的速度控制系统^[8]. 它使用简化的模型来预测 PMSM 的未来 q 轴电流, 引入扩展状态观测器 (ESO) 来估计集总干扰. 并且基于对 PFC 速度控制器的估计干扰增加前馈补偿项目, 使系统具有快速的瞬态响应和良好的扰动抑制能力.

上述文献分别通过给预测函数控制添加扰动观测器、在线调整扰动参数和增加干扰补偿等方法, 以不同的方式增强了 PFC 的抗干扰能力. 它们的共同点是利用预测函数控制本身的优点, 在此基础上添加对负载扰动的处理, 使系统受到转动惯量、负载转矩突变及摩擦力等扰动影响时, 能够保证 PFC 的跟踪性能, 从而实现调速系统的高性能控制.

2.2 自抗扰控制

自抗扰控制器 (ADRC) 是韩京清研究员提出的一种新型非线性控制器, 它利用误差反馈控制律的思想来消除参考信号与实际信号之间的误差. 自抗扰控制通过实时估计并补偿系统内外扰动, 具有结构简单, 实用性强, 鲁棒性好等优点^[9].

在实际应用中 ADRC 的可调参数较多, 算法的计算量也很大, 很多专家对此做了新的改进. 朱儒等在传统 ADRC 的基础上设计了改进的一阶自抗扰控制器^[10], 它为标准自抗扰控制器的系统参考量设计了一个过渡过程. 这种方法能够使系统跟踪误差和参数估计全局一致收敛, 使其快速逼近真实值, 用以消除其系统稳定性的影响.

黄庆等提出了一种基于滑模变结构的自抗扰控制方法^[11], 将滑模控制引入到速度及电流自抗扰控制器的设计中, 通过对控制器中非线性状态误差反馈的参数自整定改进, 使控制器保持了原自抗扰控制器特点又使可调参数在切换时平滑过渡, 减小了系统的误差.

Chen Qiang 等设计了一种具有锁相环 (PLL) 的自

抗扰控制器^[12]. 它的扩展状态观测器用于估计反电动势, 并基于三角函数设计 PLL 以提取转子速度信号. 由于反电动势中存在高频噪声信号的估计过程, 此设计使用锁相环 (PLL) 方法而不是直接计算提取转子速度, 使输出值可以很好跟踪到输入值, 提高了转速控制的稳态精度.

自抗扰控制通过非线性函数实现, 参数较多不易调节, 容易造成转矩脉动和调速系统的不稳定. 上述文献分别通过安排过渡过程、自整定改进参数、添加锁相环等方法, 提高了自抗扰控制的性能. 这些方法的核心都是对自抗扰控制的可调参数做修整. 此外还可以从减少待整定参数的个数, 对系统参数进行良好估计等方面对自抗扰控制做进一步的改进和提高.

2.3 模糊控制

模糊控制能够对系统参数进行良好估计并根据外部信息进行智能判断, 是一种灵活的非线性控制策略. 由于控制算法规则简单, 又能够严格客观的反应受控过程中输出变量的动态特性, 因此这种结构的模糊控制器被广泛使用.

张云红等设计了一种模糊自适应 PI 调节控制器^[13], 它的核心是具有智能计算的模糊控制器. 这种模糊自适应 PI 控制器结合了模糊控制和 PI 控制的优点, 它能根据外部变化不断调节 PI 控制器的比例增益和积分增益. 不足之处在于只考虑了外部环境的变化, 并未考虑系统本身参数的变化.

方一鸣等设计了一种基于反推的自适应模糊控制器^[14]. 这种控制器采用自适应算法估计负载扰动、粘性摩擦系数和转动惯量, 利用自适应算法和模糊逻辑系统的万能逼近作用来处理系统的不确定性和参数摄动问题^[2]. 这种控制方法能够更好地跟踪转速给定值, 使系统具有良好的动态性能和很强的鲁棒性.

模糊控制具有良好的适应性和灵活性, 具备较高的鲁棒性以抵抗参数扰动. 然而由于算法计算量较大, 模型较复杂, 使得模糊控制在实际控制系统中的应用受到限制, 如何在保证效果的同时简化算法复杂度, 提高效率仍有待进一步的研究.

2.4 卡尔曼滤波器

卡尔曼滤波 (KF) 是利用线性系统状态方程, 通过系统输入输出观测数据, 对系统状态进行最优估计. KF 是一种现代滤波方法. 改进的卡尔曼滤波器在伺服驱动系统中有着重要的作用^[15], 其优越的特性引起了

大量学者的研究兴趣。

王爽等提出了一种采用卡尔曼滤波器的改进预测函数控制方法^[16]。这种方法在伺服系统的数学模型的基础上,构建了卡尔曼滤波器模型。通过卡尔曼滤波器观测出转子位置、转速信息和负载转矩。预测函数控制器用于接收观测的转矩与转速信息。这个过程在一定程度上消除了扰动影响,解决了控制系统的转矩脉动大的缺陷。

尹忠刚等设计了一种抗差扩展卡尔曼滤波控制器^[17]。粗差对扩展卡尔曼滤波器的估算精度有一定的影响,在应用于感应电机转速估计时,抗差扩展卡尔曼滤波器能够取得良好的估计精度。这种控制器有着优于 EKF 的抗粗差性能,有利于削弱粗差对转速估计结果的影响。不足之处是抗差扩展卡尔曼滤波器的算法计算量较大。要将其运用到实际系统中需要考虑计算量过大的问题,对它算法的简化与降阶仍有待于进一步研究。

2.5 神经网络

神经网络是一种新型非线性系统。它的特殊之处是能够模拟人脑神经网络的结构和功能,可以映射任意复杂的非线性关系。神经网络的优势在于能够像人脑那样并行处理数据并进行自学习,此外它还具有分布存储信息的功能。BP 神经网络是应用最广泛的一种人工神经网络,它是一种多层前向网络,对非线性可微分函数进行权值训练。

Tummala SK 等提出了一种基于神经网络的滑模控制器^[18]。这种方法利用滑模控制和径向基函数神经网络 (RBFNN) 来实现鲁棒性。所提出的神经网络滑模控制规律可以避免计算感应电动机中不确定性的限制,并且对这些不确定性是鲁棒的。与传统的 SMC 不同, RBFNN 控制器取代滑模控制器的输出以消除不希望的抖动。通过使用新的控制方法可以有效地减少所提出的滑动模式表面周围的振动。

Zolfaghari M 等设计了一种新型自适应神经模糊控制器^[19]。此控制器是具有基于人工神经网络结构的自调整缩放因子的模糊逻辑控制器。它有两个输入变量和一个控制输出变量。基于模糊逻辑控制规则,然后描述 Narchitecture 以自调节控制器的输出缩放因子。这种方法确保了快速和准确的动态响应,具有优秀的稳态性能。

神经网络的非线性拟合能力很强。其学习规则简单,便于计算机实现。但神经网络的体系结构通用性差,

无法应对数据不充分的情况,如何优化仍需进一步研究。

2.6 滑模控制

做为变结构控制的一种,滑模控制 (SMC) 的系统结构在运行中不断进行变化。这样的控制方式使得系统的状态沿着设定的状态轨迹做小幅度的上下运动,即所谓的“滑动模式”。当系统参数变化时,滑模变结构控制的适应性较强,其系统的状态与系统的干扰以及参数摄动无关。但是滑模控制本质上存在高频抖振现象,针对这一情况,一些学者对其做了改进。

陈振等设计了一种基于积分时变滑模控制系统^[20]。这种方法在滑模面的设计中引入误差信号的积分项和时变项,在保证系统全局稳定的前提下提高了滑模面的收敛速度,同时避免了控制量中对加速度信号的要求,有效的减少了系统的鲁棒性并增强了系统的抗干扰能力。

杨代利等提出了基于模糊时变的滑模结构控制器^[21]。这种控制器采用模糊推理的方法来确定切换增益,它根据滑模控制原理能够更有效和合理的得到切换增益的准确值。当转速变化时,切换增益估计值能及时得到调整,以保证合适的切换增益,补偿控制环节,使得转速快速准确到达稳态。

Zou Q 等设计了一种自适应模糊 PI 滑动模式控制器 (AFPISM) ^[22]。这种方法研究了具有比例加积分等效控制动作的自适应滑模控制器,其中简单的自适应算法用于广义软切换参数。它使用模糊逻辑技术来动态地控制 SMC 等效控制动作的参数设置。在该方法中,控制动作可被平滑化进而减少颤动现象。

由于控制的不连续性,使得滑模变结构控制系统存在“抖振”问题。上述文献通过对传统滑模控制的改进,从不同方面消除了 SMC 的高频抖振现象。但在负载转矩突变及控制系统参数变化的情况下仍然存在抖振的问题。如何从根本上解决系统抖振仍然是一个值得研究的问题。

3 研究趋势与展望

先进控制策略为伺服系统的发展开辟了新的道路,相比传统的 PI 控制,先进的控制方法在性能方面都有明显的提升,但每种方法也都有自己的不足和局限性。先进的控制方法在伺服系统上的应用并未十分成熟^[23]。在实际应用中,不仅需要考虑控制算法的时间复杂度,

反馈实时性等,永磁同步电机也要受到外部环境变化、系统自身参数变化、电机运行温度和磁饱和度等多方面的影响,因此在传统控制策略的基础上进行创新以满足伺服系统的工作要求是高精度转速控制方法面临的重大挑战.如何将先进的智能控制策略与永磁同步电机进行完美的融合将是未来伺服系统发展的大方向.

4 总结

先进的智能控制算法是提高永磁同步电机转速精度的有效途径之一,对伺服控制系统的发展有着重大的意义.本文介绍了永磁同步电机的精确测速方法和预测函数控制、自抗扰控制等先进的智能控制方法.先进控制策略相比PI控制有着明显的优势但也都存在固有的缺陷和局限性.针对此问题,许多专家学者对这些智能控制方法做出了改进,以提高电机转速的控制精度.目前智能控制策略在永磁同步电机伺服系统中的应用还并不十分成熟,如何对智能控制方法进行改进和整合仍然需要进一步的探索和研究.近年来,国内外有许多专家学者在高精度转速控制领域内做着积极的探索和研究,该领域依然有着巨大的发展潜力.相信不断会有新的控制策略提出,以推动工业科技的进步和发展.

参考文献

- 1 Dursun M. The analysis of different techniques for speed control of permanent magnet synchronous motor. *Tehnicki Vjesnik*, 2015, 22(4): 947–952. [doi: 10.17559/TV-20140912141639]
- 2 Chang YC, Chen CH, Zhu ZC, *et al.* Speed control of the surface-mounted permanent-magnet synchronous motor based on Takagi-Sugeno fuzzy models. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2016, 31(9): 6504–6510. [doi: 10.1109/TPEL.2015.2504392]
- 3 周昂扬, 张志安, 吴勇. 一种 M/T 混合测速法的研究与实现. *兵工自动化*, 2017, 36(1): 50–54.
- 4 闫丹, 吴庆广. 电动机测速及显示分析. *防爆电机*, 2016, 51(1): 38–39, 45.
- 5 Lin CK, Yu JT, Lai YS, *et al.* Simplified model-free predictive current control for interior permanent magnet synchronous motors. *Electronics Letters*, 2016, 52(1): 49–50. [doi: 10.1049/el.2015.2372]
- 6 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于预测函数控制和扰动观测器的永磁同步电机速度控制. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1598–1605.
- 7 周磊, 黄家才, 林健, 等. 基于模糊预测函数的直线伺服系统的速度控制. *机械设计与制造*, 2013, (4): 195–198.
- 8 Liu HX, Li SH. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2012, 59(2): 1171–1183. [doi: 10.1109/TIE.2011.2162217]
- 9 Ning S, Zheng SH, Wang XZ. The active disturbance rejection control with feed-forward compensation for hydraulic pump controlled motor speed system. *Fifth International Conference on Intelligent Control and Information Proc. Dalian, China*. 2015.
- 10 朱儒, 刘鲲鹏, 崔恒彬, 等. 自抗扰控制技术在永磁同步电动机速度控制中的应用. *微特电机*, 2014, 42(5): 60–62.
- 11 黄庆, 黄守道, 冯垚径, 等. 基于变结构自抗扰的永磁电动机速度控制系统. *电工技术学报*, 2015, 30(20): 31–39. [doi: 10.3969/j.issn.1000-6753.2015.20.004]
- 12 Chen Q, Dong F, Tao L, *et al.* Sensorless speed control of permanent magnet synchronous motor system based on active disturbance rejection control. *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. Yinchuan, China. 2016.
- 13 张云红, 曾成碧, 吴传来, 等. 模糊控制在永磁同步电机调速系统中的应用. *微电机*, 2012, 45(7): 69–73.
- 14 方一鸣, 任少冲, 王志杰, 等. 永磁同步电动机转速自适应模糊 Backstepping 控制. *电机与控制学报*, 2011, 15(6): 97–102.
- 15 Gopinath GR, Das Shyama P. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor using square-root cubature Kalman filter. *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*. Hefei, China. 2016.
- 16 王爽, 朱文举, 黄苏融, 等. 采用卡尔曼滤波器的 PMSM 改进预测函数控制. *电机与控制学报*, 2015, 19(7): 88–94.
- 17 尹忠刚, 赵昌, 钟彦儒, 等. 采用抗差扩展卡尔曼滤波器的感应电机转速估计方法. *中国电机工程学报*, 2012, 32(18): 152–159.
- 18 Tummala SK. Artificial neural networks based speed control of permanent magnet synchronous motor. *International Conference on Soft Computing, Intelligent Systems & Applications*. Bangalore, India. 2016.
- 19 Zolfaghari M, Taher SA, Munuz DV. Neural network-based sensorless direct power control of permanent magnet synchronous motor. *Ain Shams Engineering Journal*, 2016, 7(2): 729–740. [doi: 10.1016/j.asej.2016.01.002]
- 20 陈振, 耿洁, 刘向东. 基于积分时变滑模控制的永磁同步电机调速系统. *电工技术学报*, 2011, (6): 56–61.
- 21 杨代利, 张宏立, 刘璨. 基于模糊时变滑模控制的 PMSM 转速控制. *计算机仿真*, 2014, 31(7): 351–354, 365.
- 22 邹权, 钱林方, 蒋清山. 永磁同步电机伺服系统的自适应模糊滑模控制. *控制理论与应用*, 2015, 32(6): 817–822.
- 23 黄乙晋, 陈钊. 先进控制理论在同步发电机调速控制系统中的应用. *四川电力技术*, 2015, (3): 90–94.