

侧扫声呐永磁同步电机伺服系统 滑模变结构矢量控制

吴晏辰, 王英民

(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要:为了控制侧扫声呐距离海底的高度,设计了永磁同步电机(PMSM)伺服系统,给出了系统的总体结构及各部分的设计方案。采用了最大转矩电流比(MTPA)矢量控制方法,以提高系统的功率因数及动态性能,在此基础上,针对声呐伺服控制中动载带来的不利影响,提出了滑模变结构(SMVS)矢量控制方法,有效改善了系统的鲁棒性。详细阐述了MTPA以及SMVS矢量控制方法的机理,并对其有效性进行了验证。

关键词:侧扫声呐;伺服;永磁同步电机;矢量控制;最大转矩电流比;滑模变结构

中图分类号:TM301.2

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2018)02-0276-05

侧扫声呐已广泛应用于海底测绘、勘测、施工、障碍物和沉积物探测等^[1-2],依据换能器阵安装位置的不同,侧扫声呐可分为船载式和拖曳体装载式^[3]。在拖曳体装载式侧扫声呐测量过程中,要求在海水深度及海底地形变化的情况下,将声呐与海底间的距离控制在一定范围内。为了达到这一目的,伺服系统便成为了侧扫声呐测量中的必要设备,它可以通过收放侧扫铠装缆按需求调节声呐与海底间的距离^[4]。伺服系统可由液压部件或电机驱动^[5-6],但液压驱动存在无效能量转换、能源利用率较低、复杂度较高等缺陷,鉴于此,电驱动系统越来越多的被用于缆绳的收放控制^[7]。有多种电机可用于伺服驱动^[8-9],其中,永磁同步电机具有结构简单、控制灵活、体积小、重量轻、效率和功率因数高等突出优点,在伺服领域具有良好的应用前景^[10]。本文针对侧扫声呐高度控制应用,设计了一个永磁同步电机伺服系统,并对其控制技术进行了研究,在最大转矩电流比(MTPA)矢量控制方法基础之上,提出了滑模变结构(SMVS)矢量控制方法,效提高了系统的效率、动态性能以及鲁棒性。

1 PMSM 伺服系统

所设计的侧扫声呐用永磁同步电机伺服系统总体结构如图1所示,永磁同步电机与轮盘相连,通过控制电机转速及转动方向,实现盘绕在轮盘上的铠装缆的收放,进而达到调节声呐到海底距离的目的。

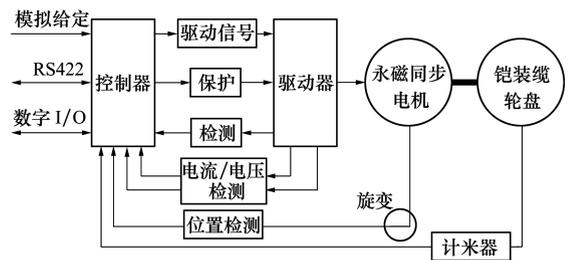


图1 侧扫声呐用PMSM伺服系统总体结构框图

永磁同步电机是依据功率、转速、效率等指标要求,通过场路耦合方法设计的,主要包括指标分析、总体结构分析、材料选取、铁芯尺寸计算、绕组设计、性能优化等。关键在于电磁负荷的选取、电气损耗的合理分配、气隙磁密核校以及绕组形式的确定。

图 2 给出了所设计准表贴式永磁同步电机的截面图,相比于内嵌式结构,它具有结构简单,电气时间常数小,加工周期短、费用低等优点,而相比于完全表贴式结构,它能够利用磁阻转矩,输出较高的转矩。

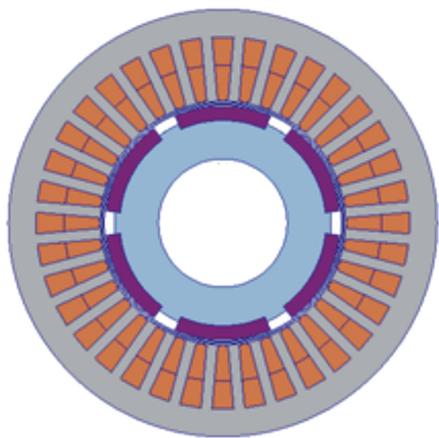


图 2 所设计准表贴式永磁同步电机截面图

永磁同步电机驱动器的功率主电路采用电压源型绝缘栅双极型晶体管(IGBT)三相全桥逆变器,其拓扑结构如图 3 所示。

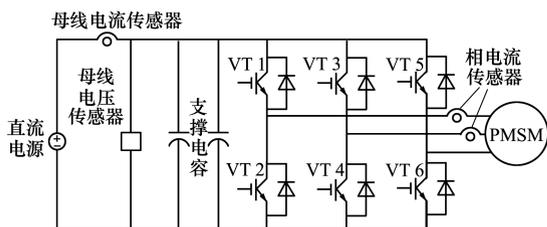


图 3 永磁同步电机驱动器主功率电路拓扑

IGBT 的驱动电路必须具备如下 2 个功能:

- 1) 实现控制电路与被驱动 IGBT 栅极间的电隔离;
- 2) 提供合适的栅极驱动脉冲。

此外,驱动电路的设计还需考虑灵活性、扩展性、性价比等因素。分立式驱动电路简单、成本低廉,但其集成度低,复杂度高,易受干扰且保护不够完善,而模块化驱动集成度高,抗干扰能力强且保护全面,故本文所设计系统采用了模块化的 IGBT 驱动。

为了控制关断浪涌电压和续流二极管回复浪涌电压并减小关断损耗,需要设计 IGBT 的缓冲电路。常用的缓冲电路主要分为 C 型、RC 型和 RCD 型,在

本文所设计系统中,由于输出电流较大,且受到驱动器体积限制,选择基于聚丙烯电容的 C 型吸收电路,它具有损耗低、高频特性好且体积较小等特点。

本文所设计永磁同步电机伺服系统的控制器主体由 DSP 和 CPLD 构成,其原理框图如图 4 所示。图中,母线电压、母线电流、电机温度等模拟信号经信号调理电路后,送至 DSP 的片内 A/D 进行模数转换,相电流经信号调理电路调理后,送至片外 A/D 转换芯片进行模数转换,而后送至 CPLD,再由 CPLD 传送到 DSP;本系统采用旋变解码芯片来检测电机转子位置,由解码芯片为旋转变压器提供激励信号,并对旋变反馈的位置和速度信号进行解码,数据送至 CPLD;电压、电流、温度、故障等信息由 DSP 通过 RS422 接口传送给上位机;故障报警等外部中断信号送给 DSP 外部中断扩展口,供 DSP 作相应的处理;增强型 PWM 模块通过矢量控制输出 PWM 波,经 CPLD 逻辑综合后送给功率驱动模块来控制功率桥。

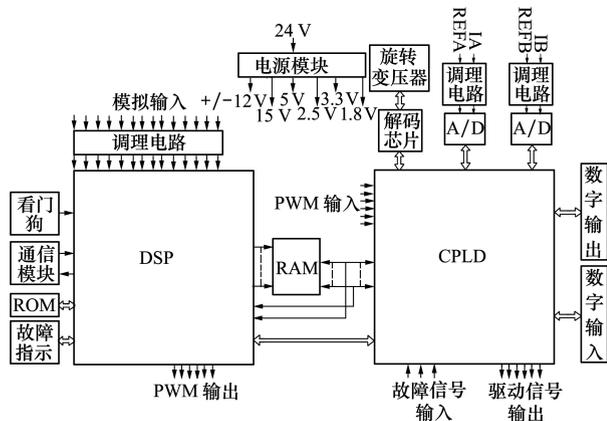


图 4 永磁同步电机控制器原理框图

除上述电机和硬件电路外,还针对声呐伺服控制的具体工况,计算了驱动器及控制器的损耗,并基于集中参数热网络方法,对散热系统进行了设计,最终采用了冷板配合强迫风冷的冷却方式。

2 MTPA 矢量控制

永磁同步电机驱动系统具有非线性、多变量和强耦合的特点,增加了控制难度,常见控制方法包括矢量控制、直接转矩控制等。矢量控制的基本思想源于对他励直流电机的模拟,其目的在于通过对交

直轴电流的控制,改善电机输出转矩的性能。图 5 为传统永磁同步电机矢量控制系统原理框图。

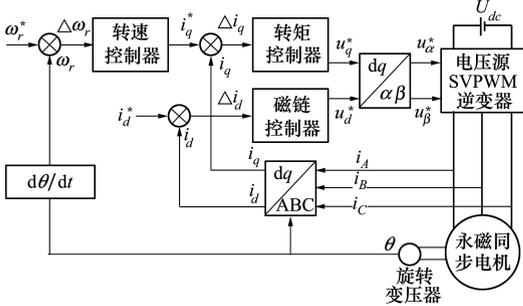


图 5 传统永磁同步电机矢量控制系统原理框图

图中,位置传感器的输出经处理后可得到电机转子位置信号 θ 和转速信号 ω_r 。转速信号 ω_r 与转速指令信号 ω_r^* 比较后的偏差作为速度控制器的输入,对电机转速进行调节,实现速度闭环控制,速度控制器的输出信号经过限幅处理后作为转矩控制器的指令信号 i_q^* 。电机相电流信号经坐标变换后可分别得到 d, q 轴电流的实际值 i_d 和 i_q ,磁链指令信号 i_d^* 和转矩指令信号分别同电机的 d, q 轴电流实际值 i_d 和 i_q 比较,得到的偏差信号 Δi_d 和 Δi_q 分别作为磁链控制器和转矩控制器的输入信号,对电机的 d, q 轴电流进行调节,实现电流闭环控制。电流环的输出经限幅后就是施加在定子绕组上电压矢量的 d, q 轴分量 u_d^* 和 u_q^* 。 u_d^* 和 u_q^* 经坐标变换后,得到 u_α^* 和 u_β^* 。依照空间矢量脉宽调制(SVPWM)方法,将 u_α^* 和 u_β^* 转换成相应的逆变器功率器件的开关信号,从而实现永磁同步电机的矢量控制。

本文所设计永磁同步电机的直轴电感 L_d 小于其交轴电感 L_q ,亦即具有一定的凸极率,为了充分利用由转子磁路结构不对称所产生的磁阻转矩,使转矩/电流达到最大,必须对直轴电流 i_d 进行控制。最大转矩/电流控制是一个条件极值问题。根据极值问题的数学理论可知,当电磁转矩 T_{em} 和 i_q 满足 $dT_{em}/di_q = 0$ 以及 $d^2T_{em}/di_q^2 < 0$ 时, T_{em} 存在最大值。由永磁同步电机电磁转矩计算公式进一步推导可知,当 T_{em} 达到最大值时有:

$$(L_d - L_q)i_d^2 + \psi_f i_d - (L_d - L_q)i_q^2 = 0 \quad (1)$$

式中, ψ_f 为永磁体磁链。

由(1)式可求得 i_d 的表达式:

$$i_d = \frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 4(L_d - L_q)^2 i_q^2}}{2(L_d - L_q)} \quad (2)$$

(2)式便是进行永磁同步电机最大转矩/电流控制时 i_d 参考值的计算依据。

3 SMVS 矢量控制

基于永磁同步电机的侧扫声呐伺服系统具有多变量、强耦合及参数时变等特点,存在较多的内、外部干扰。比如:拖曳体施加给电机的负载会随着作业工况发生变化,可视为外部干扰;电机运行时,定子绕组电阻值会随着温度发生变化,可视为内部参数扰动,这些干扰会在很大程度上影响系统的性能。鉴于此,有必要引入一种鲁棒控制方法。

滑模变结构(SMVS)控制本质上是一类特殊的非线性控制,其非线性表现为控制的不连续性。该控制策略的特点在于其控制“结构”并不固定,而是依据系统当前的状态,如偏差及其各阶导数等,有目的地不断变化,迫使系统按照预定的“滑动模态”轨迹运动。该控制方法与被控对象参数及扰动无关,具有快速响应、对参数变化及扰动不敏感、无需在线辨识、物理实现简单等优点。本文将滑模变结构控制与矢量控制相结合,以增加伺服系统运行的鲁棒性,提高其性能。

基于 SMVS 的基本理论,对图 5 中的转速控制器进行改进。令状态变量 $x_1 = \omega_r^* - \omega_r, x_2 = x_1'$,调节器的输出为 i_q^* ,忽略黏性摩擦后得到系统在相空间的数学模型为:

$$\begin{aligned} x_1' &= x_2 = -\omega_r' \\ x_2' &= -\omega_r' = -\frac{3}{2} \frac{P_n \psi_f}{J} i_q' \end{aligned} \quad (3)$$

式中, P_n 为极对数, J 为系统旋转部分的转动惯量。选取线性滑模面 s

$$s(x) = cx_1 + x_2 \quad (4)$$

式中, c 为常数。

采用比例切换控制:

$$u(t) = Ax_1 + Bx_2 \quad (5)$$

由可达性条件 $ss' < 0$ 可推导出(5)式中的系数 A, B 。为了削弱滑模控制的抖振,可以在转速控制器中加入积分环节,将由滑模变结构控制器输出的开关信号转换成平均转矩指令信号。

在上述分析基础之上,图 6 给出了本文所设计的侧扫声呐伺服用永磁同步电机矢量控制系统原理框图,相比于图 5 所示传统矢量控制系统,主要改进

在于:

1) 利用 MPTA 计算直轴电流参考值,提高系统功率因数及动态性能;

2) 利用 SMVS 计算交轴电流参考值,提高系统鲁棒性。

为了验证所提出控制方法的性能,对伺服系统进行了建模仿真,图 7 给出了 SMVS 矢量控制下侧扫声呐永磁同步电机伺服系统的仿真结果。

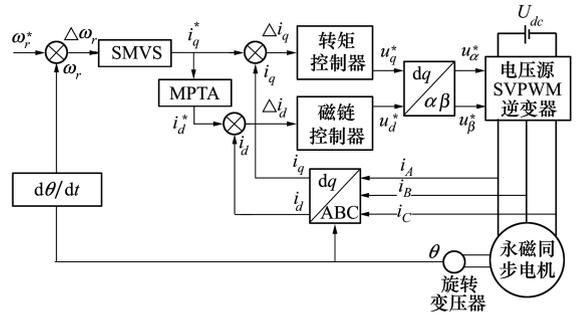


图 6 本文所设计的永磁同步电机矢量控制系统原理框图

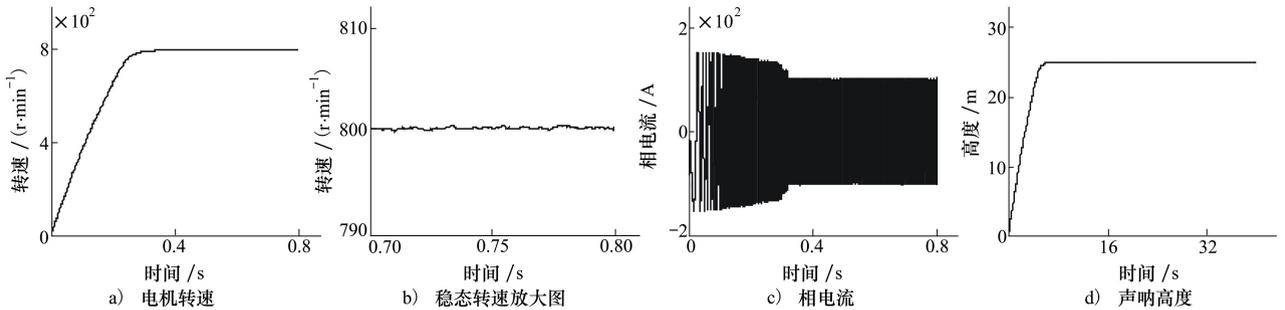


图 7 SMVS 矢量控制下侧扫声呐伺服系统仿真结果

由图可见,电机具有良好的动稳态性能,转速能够快速达到预设速度 800 r/min,而声呐与海底间的距离逐渐增加,最后很好地控制在所需的 25 m,整个过程无超调,且稳态误差很小。需要说明的是,由于电机转速在 0.3 s 即达到稳定,且波动非常小,所以声呐高度近似线性增加,直至 6 s 后达到所需值,电机停止运行。此外,仿真过程中,在负载转矩上叠加了一定幅值的随机扰动,以模拟声呐伺服控制的实际工况,良好的调速性能表明,系统具有很好的鲁棒性,从而验证了 SMVS 矢量控制方法的有效性。

控制,通过控制电机的旋转速度和转向,调节拖体距离海底的高度。设计了准表贴式永磁同步电机,给出了驱动器及控制器的拓扑及原理框图。对矢量控制方法进行了改进。采用最大转矩/电流控制策略,提高系统的功率因数及动态性能,在此基础上,利用滑模变结构控制技术改造转速环,以提高系统抗内外部扰动的能力。仿真结果表明,所设计侧扫声呐永磁同步电机伺服系统具有良好的动稳态性能和鲁棒性。

4 结 论

本文充分将永磁同步电机用于侧扫声呐的伺服

参考文献:

[1] 赵建虎,王晓,张红梅,等. 侧扫声呐图像分割的中性集合与量子粒子群算法[J]. 测绘学报, 2016,45(8): 935-942
Zhao Jianhu, Wang Xiao, Zhang Hongmei, et al. The Neutrosophic Set and Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization Algorithm of Side Scan Sonar Image Segmentation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(8): 935-942 (in Chinese)

[2] 沈蔚,章守宇,李勇攀,等. C3D 测深侧扫声呐系统在人工鱼礁建设中的应用[J]. 上海海洋大学学报, 2013,22(3): 404-409

- Shen Wei, Zhang Shouyu, Li Yongpan, et al. The Application of C3D Bathymetry Side Scan Sonar System in Artificial Reef Construction[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(3): 404-409 (in Chinese)
- [3] 李启虎,李淑秋,孙长瑜,等. 主被动拖线阵声呐中拖曳平台噪声和拖鱼噪声在浅海使用时的干扰特性[J]. 声学学报, 2007,32(1): 1-4
- Li Qihu, Li Shuqiu, Sun Changyu, et al. The Interference Characteristics of Platform and Towed Body Noise in Shallow Water for Active/Passive Towed Array Sonar[J]. Acta Acoustica, 2007, 32(1): 1-4 (in Chinese)
- [4] 韩孝辉,孙水文,靳程. 一种实用的侧扫声呐绞车的研制及应用[J]. 机电信息, 2015, 30: 44-45
- Han Xiaohui, Sun Shuiwen, Jin Cheng. The Development and Application of a Practical Side Scan Sonar Winch[J]. Mechanical and Electrical Information, 2015, 30: 44-45 (in Chinese)
- [5] 唐金元,王翠珍,于璐. 基于数字PID控制的吊放声呐液压绞车控制系统[J]. 青岛大学学报:工程技术版, 2008, 23(1): 40-45
- Tang Jinyuan, Wang Cuizhen, Yu Lu. Design of the Dipping Sonar's Hydraulic Winch Control System Based on the Digital PID Control[J]. Journal of Qingdao University:Engineering & Technology Edition, 2008, 23(1): 40-45 (in Chinese)
- [6] 徐国华,张军胜,向先波,等. 直流无刷电机驱动的水下电缆绞车系统[J]. 海洋工程, 2006,24(2): 123-129
- Xu Guohua, Zhang Junsheng, Xiang Xianbo, et al. Underwater Winch System Driven by Brushless DC Motor[J]. The Ocean Engineering, 2006,24(2): 123-129 (in Chinese)
- [7] Ji S W, Kim S J, Kim Y B. Experimental Approach for Mooring Winch Control System Design[C]//13th International Conference on Control, Automation and Systems, 2013: 1025-1028
- [8] 何凤有,谭国俊,崩松岩,等. 用于矿井绞车的开关磁阻电机控制方法研究[J]. 电力电子技术, 2003,37(5): 53-55
- He Fengyou, Tan Guojun, Kuai Songyan, et al. Research on the Control Method of Switched Reluctance Drive Motor Applied to The Mine Hoist System[J]. Power Electronics, 2003, 37(5): 53-55 (in Chinese)
- [9] Fatemi S M J R, Henao H, Capolino G A, et al. Influence of Hanging Load on Induction Machine Torque and Stator Current in Hoisting Winch System[C]//36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010: 2621-2627
- [10] 张国良. 稀土永磁同步电机对绞车驱动的应用与控制[J]. 电气传动, 2014,44(11): 59-60, 2014
- Zhang Guoliang. Application & Control of REPMSM as Drawworks Driver[J]. Electric Drive, 2014, 44(11): 59-60 (in Chinese)

Sliding Mode Variable Structure Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Machine Servo System for Side Scan Sonar

Wu Yanchen, Wang Yingmin

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To control the distance between the side scan sonar and the seabed, a permanent magnet synchronous machine(PMSM) servo system is designed, and the overall structure of the system and the design scheme of each part are presented. The maximum torque per ampere (MTPA) vector control method is adopted to enhance the power factor and dynamic performances of the system, and based on MTPA vector control method, according to the harmful effects of the dynamic load in the servo control of sonar, the sliding mode variable structure (SMVS) vector control method is proposed, and the robustness of the servo system is effectively improved. The mechanism of the MTPA and SMVS vector control method is demonstrated in detail, and their effectiveness is verified.

Keywords: side scan sonar; servo; permanent magnet synchronous machine; vector control; maximum torque per ampere; sliding mode variable structure