

基于双核 CPU 的永磁电机转子角度检测研究

宋君健, 高宏洋, 黄凯, 马志军

(中车大连电力牵引研发中心有限公司, 辽宁 大连 116052)

摘要: 永磁电机转子角度对其控制具有重要影响, 目前永磁牵引电机广泛采用旋转变压器进行转子角度和速度信息的检测。基于 TMS320F28377D 双核 CPU 结合 AD2S1210 解码芯片构成转子位置检测系统, 并采用角度分段补偿对其误差进行校正, 从而为永磁电机控制算法提供了准确的转子角度信息。通过半实物仿真平台对不同转子频率下解码芯片输出的转子角度信息进行了验证。该检测方法具有精度高、抗干扰能力强的特点, 满足牵引系统高可靠性和稳定性的要求, 具有一定的工程意义。仿真和试验结果表明了该方法的可行性和有效性。

关键词: 永磁电机; TMS320F28377D; AD2S1210; 旋转变压器

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)05-0043-05

doi: 10.12177/emca.2022.019

Research on Rotor Angle Detection of Permanent Magnet Motor Based on TMS320F28377D

SONG Junjian, GAO Hongyang, HUANG Kai, MA Zhijun

(CRRC Dalian R&D Co., Ltd., Dalian 116052, China)

Abstract: The rotor angle of permanent magnet motor has an important influence on the control of the motor. At present, the resolver is widely used in the permanent magnet traction motor to detect the rotor angle and speed information. Based on the TMS320F28377D dual-core CPU combined with AD2S1210 decoding chip, a rotor position detection system is formed. Angle segment compensation is used for error correction. Thus, the accurate rotor angle information is provided for the permanent magnet motor control algorithm. The rotor angle information output by the decoding chip under different rotor frequencies is verified by the hardware-in-the-loop simulation platform. The detection method has the characteristics of high precision and strong anti-interference ability. It can meet the requirements of high reliability and stability of the traction system. The results of the simulation and experiments show the feasibility and effectiveness of the angle detection method proposed.

Key words: permanent magnet motor; TMS320F28377D; AD2S1210; resolver

0 引言

永磁电机因其功率密度高、运行可靠等优点在牵引系统中得到了广泛应用, 而转子角度位置检测是电机控制的关键环节, 对系统的稳定性具有重要的影响。永磁电机通常采用矢量控制方式, 该控制策略需要通过坐标变换将电机三相交流电转换成两相直流电, 从而实现类似

直流电机的控制效果。坐标变换需要用到转子位置角度, 如果角度检测不准或精度不够会对电机控制效果产生严重影响。目前永磁牵引电机常用的是位置传感器, 包括编码器和旋转变压器, 其中旋转变压器可靠性高并且抗振、抗干扰能力强, 在永磁牵引电机中大量应用。旋转变压器需要外界输入一个激励信号, 其输出是两路正余弦模拟信号, 为了实现数字信号处理

收稿日期: 2022-02-25; 收到修改稿日期: 2022-04-27

作者简介: 宋君健(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力电子与电力传动。

器(DSP)对角度信息的采集,通过解码芯片将模拟信号转换成数字信号,从而获得转子角度位置实现永磁电机控制^[1]。

传统的电机控制芯片以单核为主,内部资源受限,控制算法与逻辑保护、脉冲调制等无法实现分离。目前常用的 DSP+现场可编程门阵列(FPGA)架构虽通过 FPGA 实现了脉冲调制算法,但系统硬件成本也随之增加,同时二者采用数据端口进行通信降低了系统可靠性。本文采用 TMS320F28377D 双核 CPU,控制算法在 CPU1 中执行,转子角度检测、调制算法等在 CPU2 中执行,二者直接通过内部信息共享区(IPC)实现数据交互,提升了控制性能。

文献[1]基于 AD2S1210 对永磁电机转子位置和速度的检测方法进行了介绍,但没有对其检测误差进行分析和补偿。文献[2]对角度位置补偿种类进行了介绍,但没有给出具体的实现方法。本文基于 AD2S1210 旋变解码芯片对永磁电机的转子角度位置进行检测,通过 TMS320F28377D 的 SPI 模块实现与解码芯片间的数据交互,并采用角度分段补偿对其误差进行校正,通过半实物仿真和试验对检测的转子角度信息进行了验证。

1 旋转变压器工作原理

旋转变压器可以将永磁电机的转子角度转换为电信号,并通过解码芯片转换为数字量供 DSP 使用。旋转变压器包括三个绕组,分别是励磁绕组、正弦绕组和余弦绕组,如图 1 所示。

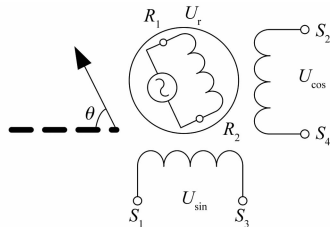


图 1 旋转变压器原理图

励磁绕组作为输入绕组接收解码芯片输出的频率可调的励磁信号,正余弦绕组作为输出绕组输出与转子角度有一定关系的正余弦电压信号,供解码芯片解码出对应的数字信号^[2-3]。

励磁电压和正余弦电压表达式如下:

$$\begin{cases} U_r = E \sin \omega t \\ U_{\sin} = U_r \sin \theta \\ U_{\cos} = U_r \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_r 、 $U_{\sin}$ 、 $U_{\cos}$ 分别为励磁电压、正弦电压和余弦电压; E 为励磁电压的幅值; ω 为励磁电压角频率; θ 为转子位置角。

电机正常运行时,旋转变压器根据励磁信号反馈两路正余弦交流信号,经过特定的解码芯片对其进行解码,实现旋转信号/数字信号转换,通过数字量即可表征转子角度 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的变化,为数字信号处理及电机控制算法实现提供了保证。

2 解码原理

2.1 特性描述

本文采用 AD2S1210 对旋变信号进行解码,解码芯片自身集成频率可调正弦波发生器,具有模数转换功能,其输出为二进制数据,可通过串口进行读取,实现了旋转变压器与 DSP 间的数据交互。该解码芯片具有以下特性:

- (1) 数据分辨率可调,用户根据需要有 10/12/14/16 位分辨率选择;
- (2) 差分输入,抗干扰能力强;
- (3) 励磁频率 2~20 kHz 可编程;
- (4) 串行/并行 10~16 位数据接口;
- (5) 兼容 SPI 接口标准。

2.2 解码原理

AD2S1210 芯片为了实现对转子位置角 θ 的跟踪,自身会产生一个估算角度 ϕ , ϕ 的反馈值用来与 θ 相比较,解码芯片对估算角度 ϕ 不断进行调整。为了表征角度差,对式(1)作如下处理:

$$\begin{cases} U_{\sin} \cos \phi = U_r \sin \theta \cos \phi \\ U_{\cos} \sin \phi = U_r \cos \theta \sin \phi \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)的两式作差可得:

$$e = U_r \sin \theta \cos \phi - U_r \cos \theta \sin \phi = U_r \sin(\theta - \phi) \quad (3)$$

当 θ 与 ϕ 接近时两个角度的差值趋向零,此时 $\sin(\theta - \phi) \approx \theta - \phi$,直至 $\phi = \theta$ 时完成解码^[4-5]。

2.3 解码配置

AD2S1210 解码后的二进制数据通过并口或串口通信方式与 DSP 进行数据交互,解码数据包括位置和速度信息,通过软件配置工作模式即可对所需数据进行提取。具体配置如表 1 所示。

表 1 工作模式设置

A0	A1	结果
0	0	普通模式-位置输出
0	1	普通模式-速度输出
1	0	预留
1	1	配置模式

其中配置模式可对芯片寄存器进行读写操作,本文通过配置模式将励磁频率设置为 6 kHz,并将分辨率设置为 12 位,其中励磁频率寄存器(地址为 0x91)值计算公式如下:

$$Z = \frac{f \times 2^{15}}{f_{clk}} \tag{4}$$

式中: f 为要设定的励磁频率; f_{clk} 为解码芯片的时钟频率,本文采用 8.192 MHz 的晶振频率作为时钟频率。

AD2S1210 与 DSP 间采用 SPI 串行通信,根据芯片工作时序对在普通模式下的位置和速度数据进行串行方式读取^[6]。

3 系统设计

3.1 硬件电路

AD2S1210 解码芯片具有丰富的可编程数字接口,采样分辨率及模式选择均可以通过输入/输出接口对相应的引脚进行配置。解码芯片的模拟量接口包括励磁输出和正余弦输入两部分。其电路原理如图 2 所示。

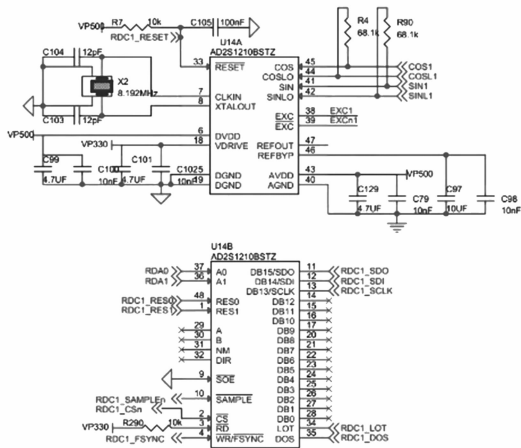


图 2 AD2S1210 电路原理图

图 2 中, EXC 和 EXC1 为励磁差分信号,电压峰峰值为 3.6 V,与旋转变压器间需经过一个推挽

输出实现对其供电。永磁牵引电机工作环境复杂,正余弦输入信号容易被干扰且存在噪声,因此采用差分信号的形式并通过共模滤波处理,保证解码芯片的输入信号无干扰以获得准确的角度位置信息^[7]。

3.2 数据交互

AD2S1210 解码芯片的输出为二进制数据,本文主控芯片采用 TMS320F28377D,具有丰富的数字接口。数据交互方案如图 3 所示。

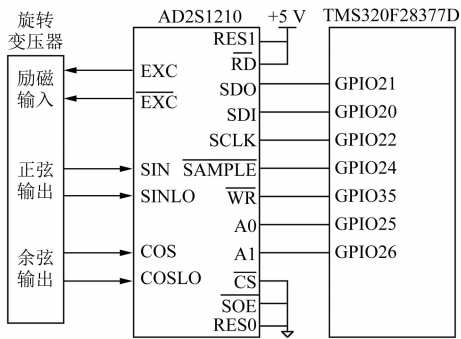


图 3 数据交互方案图

AD2S1210 的工作电压为 5 V,主控芯片的工作电压为 3.3 V,进行数据交互时需对其电平进行转换才能正常工作。本文采用串行通信,因此 SOE 引脚接地,在此模式下 CS 引脚接地且 RD 引脚接高电平解码芯片可正常工作。RES0 = 0 且 RES1 = 1 时为 12 位分辨率。根据解码芯片时序对其驱动进行配置,通过 A0、A1 引脚的配置即可读取当前位置和速度信息^[8]。

3.3 软件实现方法

采用 TMS320F28377D 双核 CPU,其中 CPU1 核实现模拟量采样、控制算法及保护逻辑,CPU2 核实现转子角度检测及速度计算、脉冲调制,双核间通过 IPC 实现数据交互,如图 4 所示。两核以寻址方式读取彼此在共享区存储的数据,从而优化了 CPU 资源,同时解决了传统控制方式需要外接通信接口实现数据交互的问题。

3.4 转子角度误差校准

转子角度误差与旋转变压器安装精度、制造工艺以及所处的电磁环境等因素有关,误差分布相对固定。该误差会导致控制系统电流波动,因此需要对控制器采集到的转子角度位置进行校准,从而提升控制系统输出精度,保证系统全速度

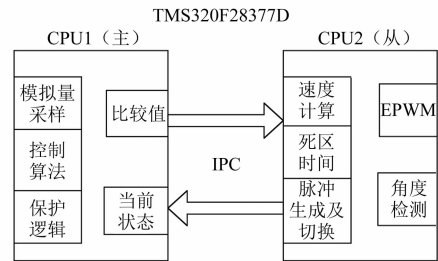


图4 TMS320F28377D 软件控制框图

范围稳定运行。

本文解码芯片采用 12 位分辨率,数据记录长度为 2 000 个点,因此旋变采样值在 0~4 095 之间周期性变化。控制器采集到的解码芯片输出的旋变采样值波形如图 5 所示。

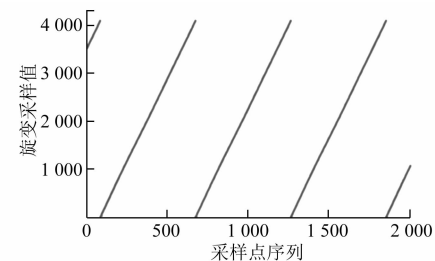


图5 旋变采样值波形

对于理想的旋转变压器,在一个周期内的所有采样点均落在同一条直线上。旋变实际的采样值与理想情况下的采样值的差值即为旋变误差,如图 6 所示。

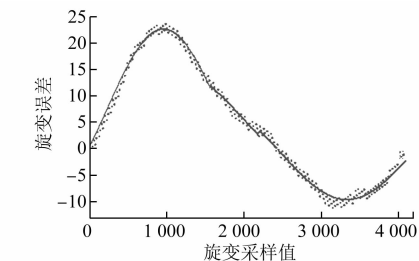


图6 转子角度误差分布图

当旋转变压器自身存在图 6 所示的位置误差时,采样结果会分布在理想直线的两侧。由于位置角度变化的周期性,可以取采样结果的 0(对应 0°)和 4 095(对应 360°)两个点为起止参照点,并以此构建理想直线,进而可以得到采样值与理想值波形间的误差分布。

将误差数据导入数据分析软件,通过软件自带的数学工具对数据进行分析拟合,得到误差分布曲线表达式如下:

$$\begin{cases} f_{\text{err}} = a\sin\left(\frac{2b\pi}{4\,095}x + c\right) + d, \\ x \in (0,1\,560], a = 15.2, b = 2, \\ \quad c = 5.8, d = 7.5; \\ x \in (1\,560,2\,200], a = 11.6, b = 0.9, \\ \quad c = 0.3, d = 4.6; \\ x \in (2\,200,4\,095], a = 8.3, b = 1.25, \\ \quad c = 4.6, d = -1.6 \end{cases} \quad (5)$$

式中: x 为转子位置角度采样点; a 、 b 、 c 、 d 分别为拟合曲线系数。

将式(5)作为补偿项对采集到的转子位置角度进行反向补偿,以此抵消采集结果中叠加的误差,可以得到误差校准后的电机位置角度。

4 仿真和试验结果

为了验证本文提出的转子角度检测方案的可行性,进行了仿真和试验。系统所用电机参数如表 2 所示。旋变型号为 132XU9732A。

表2 系统采用电机的参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	130
额定电压/V	450
额定电流/A	183
电机极对数	4
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 800

4.1 仿真结果

通过半实物仿真平台模拟旋转变压器,根据 AD2S1210 解码芯片输出的 6 kHz 励磁信号与转子实际角度的正余弦乘积得到解码芯片所需的正余弦输入信号,其中转子角度可通过模型对电机频率进行修改得到。1 500 r/min 励磁信号及正余弦信号波形如图 7 所示。

图 7 中,励磁为 6 kHz 正弦信号,旋转变压器输出信号是包络为 100 Hz 的正余弦信号。为了验证主控芯片采集到的角度正确性,通过芯片内部 RAM 对采样数据进行记录,记录长度为 2 000,角度/电流采样值如图 8 所示。

通过数据分析可以发现,角度采样值在 0~

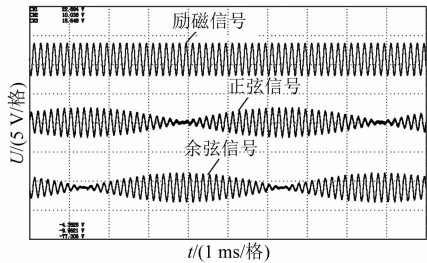


图7 旋转变压器信号波形

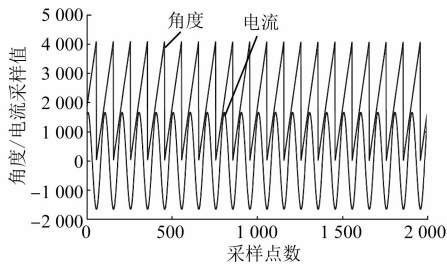


图8 角度/电流采样值波形

4 095 间周期性递增,无毛刺和数据跳变现象,转子位置 0° 角对应电机 U 相电流相位 $-\pi/2$,电流相位与转子角度相对应,验证了角度采样的正确性。

4.2 试验结果

针对上述转子角度检测方法的分析和仿真结果,依托某有轨电车项目,搭建试验平台,对此方法进行验证,如图 9 所示,其中 TCU 为系统的控制单元,包括信号采集板、数字输入/输出板和 CPU 板,本文采用的 TMS320F28377D 及 AD2S1210 芯片均在 CPU 板。



图9 电机控制试验台

为了验证转子角度误差对系统的影响,电机在 3 000 r/min 时分别对未进行转子位置角度校准和进行校准后的电流波形进行分析,如图 10、图 11 所示。

从波形对比可以发现,采用转子角度位置补偿校准消除了转子位置采集过程中所叠加的误差,电机电流无波动。本文提出的转子角度检测

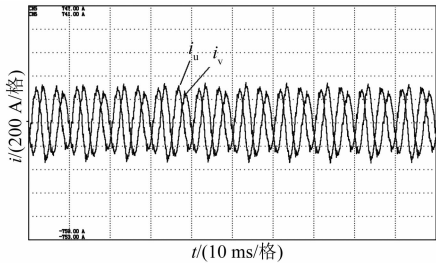


图10 未校准 U、V 相电流波形

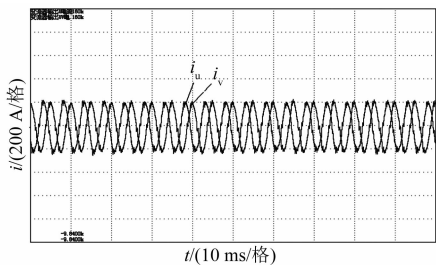


图11 校准后 U、V 相电流波形

方法可以较好地实现永磁同步电机矢量控制,电机转矩控制平稳,验证了方法的可行性。

5 结 语

本文提出的转子角度检测方法可有效对永磁同步电机转子位置信息进行采集并对其误差进行校准,实现方法简单且精度高。介绍了旋转变压器的工作原理、AD2S1210 芯片的解码配置以及数据交互实现方式,然后对系统进行了详细的设计,最后通过半实物仿真和试验对所提的转子角度检测方法进行了功能验证。仿真和试验结果验证了该方法的正确性和有效性,可显著提高系统的可靠性和稳定性,满足永磁电机高精度位置检测要求。

【参考文献】

[1] 李兵,胡亮灯. 基于旋转变压器的 PMSM 位置和速度检测方法[J]. 微特电机,2019,47(3): 40.
[2] 艾胜,任强,程思为,等. 一种大功率永磁电机旋转变压器位置补偿方法[J]. 电力电子技术,2018,52(2): 13.
[3] 莫会成,闵琳. 现代高性能永磁交流伺服系统综述——传感装置与技术篇[J]. 电工技术学报,2015,30(6): 10.

(下转第 68 页)

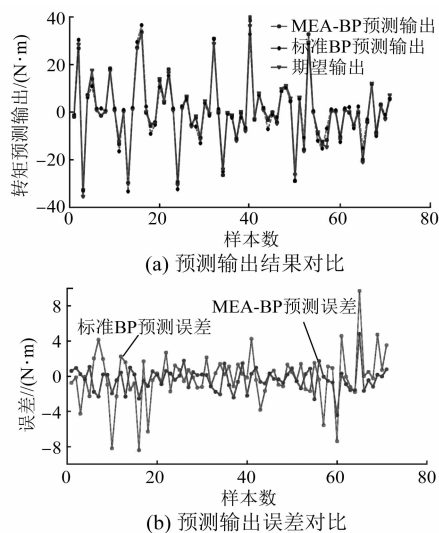


图 10 转矩数据预测结果对比

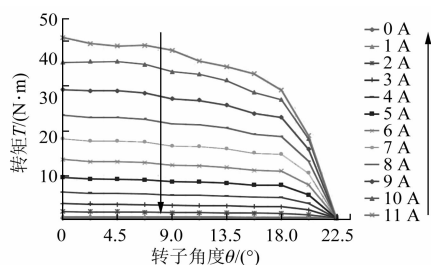


图 11 MEA-BP 模型预测转矩数据对比

行建模。通过 MEA 算法对标准 BP 神经网络的不足进行了改进,并将优化后的模型应用在 SRM

建模中。对磁链和转矩数据进行了训练,由此建立了磁链模型和转矩模型。通过多方面的数据图表对比,验证了该建模方法的精度比标准 BP 神经网络建模方法有了很大的提高,且通过额外预测数据验证了该模型具有较强的泛化能力。

【参考文献】

- [1] 薛惟栋,曲兵妮. 抑制开关磁阻电机振动的结构设计研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(11): 39.
- [2] 张敏杰,高强,蔡旭. 基于改进磁密计算的开关磁阻电机径向力解析建模[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(11): 56.
- [3] 徐杰,陈璞,赵婷,等. 新能源汽车的开关磁阻电机神经网络预测控制[J]. 电力电子技术, 2019, 53(4): 40.
- [4] 孙利宏,赵永生,李存贺,等. 基于预处理 BP 神经网络的开关磁阻电机建模[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(3): 64.
- [5] 高宇,戴跃洪,宋林. 基于 BP 神经网络的开关磁阻电机建模[J]. 电力电子技术, 2017, 51(2): 72.
- [6] 吴红星,孙青杰,黄玉平,等. 开关磁阻电机非线性建模方法综述[J]. 微电机, 2014, 47(5): 83.
- [7] 饶哲宇,王进华. 基于 BP 神经网络的开关磁阻电机建模及仿真[J]. 电气开关, 2019, 57(1): 37.
- [8] 孙承意,谢克明,程明琦. 基于思维进化机器学习的框架及新进展[J]. 太原理工大学学报, 1999, 30(5): 453.

(上接第 47 页)

- [4] SARMA S, AGRAWAL V K, UDUPA S. Software-based resolver-to-digital conversion using a DSP[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(1): 371.
- [5] BLASKO V, KAURA V, NIEWIADOMSKI W, et al. Sampling of discontinuous voltage and current signals in electrical drives: a system approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(5): 1123.
- [6] HOLTZ J, QUAN J, PONTT J, et al. Design of fast

and robust current regulators for high-power drives based on complex state variables[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(5): 1388.

- [7] HOLTZ J, OIKONOMOU N. Fast dynamic control of medium voltage drives operating at very low switching frequency: an overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 1005.
- [8] 梁家威,钟汉如. 基于 AD2S1210 的转子位置转速检测方法研究[J]. 微电机, 2013, 46(5): 48.