

DSP 平台矢量控制分析及性能评价^①

刘 辉^{1,2}, 王志成^{2,3}, 魏朋涛^{1,2}, 尹震宇^{2,3}

¹(中国科学院研究生院, 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: 针对矢量控制策略的实时性要求, 对 DSP 平台下矢量控制策略的性能进行分析和评价, 弥补当前伺服控制系统中该评价工作的空白. 分析了矢量控制策略核心模块以及能实现该策略的主流 DSP 平台的软硬件特性, 为 DSP 平台矢量控制分析和性能评价奠定基础. 通过以 CPU 负载率为性能指标的评估实验, 分析了特定状态下矢量控制策略的适用情况, 评估结果对 DSP 平台下矢量控制策略的选择具有一定参考价值.

关键词: 矢量控制; DSP; CPU 负载率; 性能评价; 永磁同步电机

Analysis and Performance Evaluation of Vector Control Based on DSP

LIU Hui^{1,2}, WANG Zhi-Cheng^{2,3}, WEI Peng-Tao^{1,2}, YIN Zhen-Yu^{2,3}

¹(Graduate School 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: To make up for the blank of evaluation of vector control on DSP in servo control system, the performance analysis and evaluation are given based on the real-time requirements of vector control. The key modules of servo control and the properties of software and hardware in DSP are discussed, which lays the foundation of the work of evaluation. The CPU load is chosen as the performance index and the applicability of vector control is analyzed on specified conditions. Results of evaluation may have some reference value for the selection of vector control on DSP.

Key words: vector control; DSP; CPU load; performance evaluation; PMSM

矢量控制是交流伺服系统中使用比较广泛的控制方法, 其基本原理是通过模型转换, 实现定子电流磁场分量与转矩分量的解耦, 可以获得和直流电机控制相媲美的性能^[1]. 数字信号处理器(DSP)的快速发展使同步电机矢量控制策略的实现成为可能. 将 DSP 技术运用到电机控制后, 硬件和软件便可以灵活的结合, 为伺服系统对先进控制理论和复杂控制算法的实现提供了有力的支持^[2]. 尽管 DSP 平台下矢量控制技术使用如此广泛, 但对该平台上矢量控制的性能评估工作却是领域内的空白. 开发人员并不十分清楚软硬件平台需要满足哪些特性, 才能使矢量控制策略具有良好的稳定性与实时性, 硬件平台性能过高会导致开发成

本增加, 性能过低则有可能达不到理想的控制效果. 针对特定要求选择合适的软硬件平台对工程实践和研究工作显得尤为重要. 本文选择 TMS320F28335 为硬件平台核心, DSP/BIOS 为实时操作系统, 旨在评估矢量控制策略在该 DSP 平台上的性能, 评估指标为 CPU 负载率. 经过量化分析的评估结果对开发人员在 DSP 平台上矢量控制策略的选择具有一定参考意义.

1 矢量控制技术分析

矢量控制技术具有成熟的理论基础和广泛的应用实践, 本节并未对其原理和实现作详细介绍, 而是在该控制策略结构的基础上重点分析其核心模块^[3].

① 基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX04009-031)

收稿时间: 2015-03-19; 收到修改稿时间: 2015-04-26

1.1 矢量控制系统结构

永磁同步电机矢量控制系统框图如图 1 所示, 由速度环和电流环构成了控制系统的外环和内环。

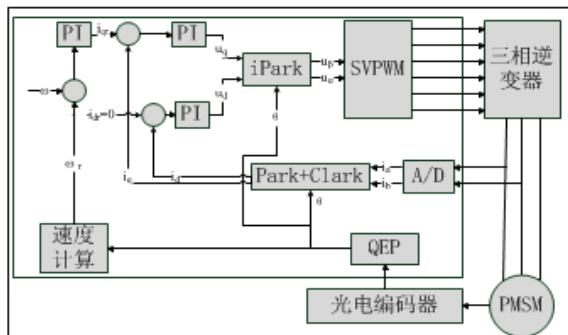


图 1 矢量控制系统结构图

1.2 核心模块分析

电流环可以改造内环控制对象的传递函数, 提高系统的快速性; 能及时抑制电流环内部的干扰; 既可限制最大电流, 又使得系统有足够大的加速转矩。此环核心是要快速响应电流变化, 这一过程需要专门的软硬件支持。硬件模块主要包括 A/D 变换模块、正交编码脉冲(QEP)模块等; 软件为矢量控制策略的计算部分, 主要包括坐标变化、PI 调节器、空间向量脉宽调制(SVPWM)等模块。

速度环通过检测 QEP 模块的输出信号来进行负反馈调节, 它的环内输出为电流环的输入。速度环的主要组成是速度计算模块和速度 PI 调节器模块, 后者作用是保证系统良好的跟踪性和抗干扰性^[4]。

矢量控制策略的双环串级控制在顺序上是从内到外的, 调节上首先是电流环, 其次是速度环^[5]。因为速度的变化比电流的变化要慢得多, 所以没有必要在每个电流的采样周期内计算电机转速。本次评估实验设定速度环控制周期为电流环控制周期的 2 倍, 而电流环的控制频率与载波频率是一致的, 即系统每隔 2 个载波周期检测一次速度, 这样能保证速度的检测具有比较高的精度。

若要在 DSP 平台上实现矢量控制技术, 该平台除了具有必要的硬件模块以外, 还要能在控制时间要求的范围内实现控制策略的软件计算部分。

2 DSP平台分析

针对上一节对矢量控制技术的分析, 需要选择合

适的软硬件平台才能满足实时控制的要求。根据当前 TI 公司的主流软硬件平台, 采用的硬件平台是沈阳计算所高精数控研发的 GTS100-AOA 伺服驱动器, 以 TMS320F28335 作为核心芯片, 以实时操作系统 DSP/BIOS 作为软件平台设计控制程序。

2.1 硬件平台分析

硬件平台核心是 TMS320F28335, 硬件系统主要模块的结构图如图 2 所示。

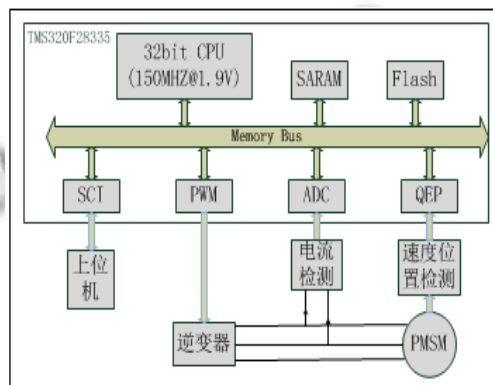


图 2 控制系统硬件结构图

TMS320F28335 是 TI 公司推出的具有浮点单元(FPU)的 DSP 处理器, 其频率高达 150MHz, 指令周期为 6.67ns。在低于 16KHz 的载波频率下, 完全能够满足矢量控制计算模块的实时性要求。

F28335 器件总线结构为哈佛总线, 能够在一个单周期内取一个指令、存取一个数据值。它包含 256K×16bit 的嵌入式闪存存储器, 可用于开发及对现场软件升级时的简单再编程。此外, 还包含单一访问存储器(SARAM), 其各个区块能被独立访问可减少 CPU 管线延迟。此硬件平台的总线结构以及存储方式缩短了计算的额外开销, 能及时地处理输入输出数据, 满足矢量控制的实时性要求。

硬件平台还包括以下控制外设及串口外设^[6]:

1) PWM 控制外设。F28335 器件包含高达 6 个 PWM 模块, 而矢量控制策略的 SVPWM 模块需要 6 路的 PWM 输出, 所以使用该硬件平台不需要使用通用定时器来产生 PWM 波, 这样不仅方便了设计工作, 也大幅提高了 PWM 输出速率。此外, PWM 寄存器由 DMA 支持, 大大减少了处理该外设的开销。

2) QEP 控制外设。F28335 器件包括 2 个正交编码器模块(QEP1, QEP2)。矢量控制策略的坐标变换和速度

计算模块均以 QEP 外设的输出作为输入, 此 QEP 外设能完成这一工作, 并且具备比较高的精度和实时性。

3) ADC 控制外设. F28335 器件中的 ADC 接口建立在一个快速, 12 位、单端、16 通道 ADC 模块上, 此模块在 25MHz ADC 时钟上的转换率高达 80ns, 能满足矢量控制策略电流环控制的高实时性要求. 它还包含两个用于同步采样的采样保持单元, 分别保持图 1 中 A/D 模块采集的两相电流. 此外, ADC 寄存器被 DMA 支持, 可以减少处理该外设的开销。

4) SCI 串口外设. 串行通信接口(SCI)是一个两线制异步串行端口. 该外设主要用于和上位机通信, 包括程序烧写和在线调试. 通过 SCI, 还可以使用集成开发环境 CCS(Code Composer Studio)分析 DSP 平台的 CPU 负载率。

2.2 软件平台分析

根据要实现的控制策略以及所选取的硬件平台, 本次评估选择实时操作系统 DSP/BIOS 为软件平台. DSP/BIOS 是一个可拓展的实时操作系统, 它提供抢占式多线程服务、硬件层抽象、实时分析工具等^[7]. 图 3 为 DSP/BIOS 和控制系统的结构层次关系。

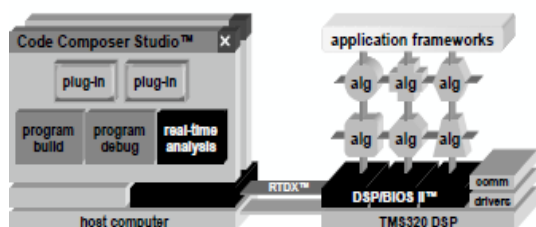


图 3 DSP/BIOS 的结构层次

用 DSP/BIOS 实时地管理系统资源有如下优点^[8]:

1) 针对 TMS320 DSP 平台已完全优化, 能非常好的支撑上节介绍的硬件平台;

2) 只需要非常小的 MIPS 以及内存池, 可以更好地满足矢量控制的实时性要求;

3) 良好的鲁棒性, 已经过现场测试和工业证明, 保证控制系统具有良好稳定性;

4) DSP/BIOS 与 CCS 相整合, 不需要执行期间授权的费用, 为控制程序的编写、调试和分析工作提供了较好的支持。

此外, 在 DSP/BIOS 平台下的系统配置大大简化了传统配置的繁琐过程. 传统配置方法需要为中断向量表、全局设置、外设配置、链接文件、内存映射等

模块编写特定代码段, 这样不仅需要学习更多操作系统细节、编写冗长的代码, 也使得调试工作变得非常困难. 而 BIOS 使用可视化配置工具来完成这些模块, 开发者可集中精力在控制策略的实现上。

评估平台的控制系统采用软件中断方式(SWI)调用矢量控制各个模块, 其详细设计过程参考文献^[8-10]. 控制系统的应用程序中, 不同调度频率的控制模块设计成不同的 SWI 对象. 通过调用不同 SWI 对象以完成对电流环和速度环的控制调节。

3 性能评价

对算法的性能分析一般从其时间复杂性和空间复杂性两个方面来考虑. 鉴于矢量控制算法是在特定 DSP 平台上实现的, 可以认为硬件平台的 CPU 负载率能间接体现算法的时间复杂度. 此外, 硬件平台存储器包括内部 RAM、内部 FLASH 以及外部 RAM, 存储空间足够运行控制程序, 但是不同存储器存取周期以及总线位宽的差异会导致每条指令的执行时间有所不同, 从而造成 CPU 负载率的不同. 所以综合考虑时间和空间复杂性, 选择使用 CPU 负载率作为 DSP 平台矢量控制策略的性能评价指标。

本节实验分为两部分, 第一部分是在内部 RAM 运行程序, 评估不同载波频率下各控制模块对 CPU 的使用率情况; 第二部分是在不同的存储器中(内部 RAM、内部 FLASH)运行程序, 评估不同载波频率下运行控制算法的 CPU 负载率。

3.1 不同载波频率下各控制模块对 CPU 的占用率

可以从 CCS 实时分析工具得到不同载波频率下 CPU 负载率, 如图 4 所示. 空载表示不启动任何控制模块线程的情况, 但是会执行 PWM 中断服务程序. 线程调度表示在 PWM 中断服务中启动模块线程, 但并不提交任何控制算法模块. 速度环控制包含有速度 PI 调节模块以及速度计算模块. 折线图纵坐标为 CPU 负载率, 横坐标各模块是向右累加的。

从图 4 可以看出, 在同一载波频率时, CPU 负载率随着模块增加而增加, 前者增加的幅度与相应模块处理复杂性相关; 不同载波频率下, 各模块的 CPU 负载率随着载波频率的增加而增加, 这是因为载波频率的增加会造成各模块处理频率的增加。

空载时不同载波频率下 CPU 负载率并不一致, 虽然没有调用控制模块的线程, 但是空载时依然要执行

PWM 中断服务程序, 载波频率越高, 调用 PWM 中断服务越频繁, 造成空载时各载波频率下的 CPU 占用比率的不一致。

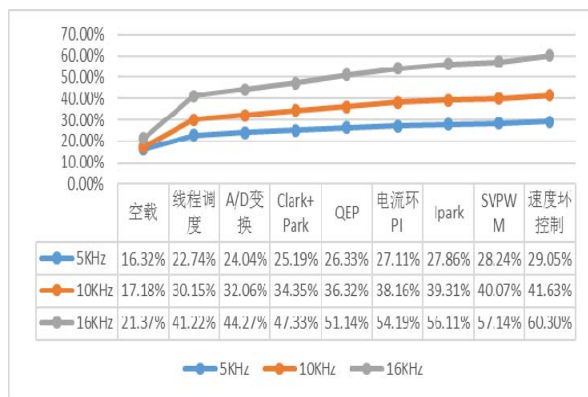


图4 同载波频率下 CPU 负载率

载波频率越高, 控制系统实时性越高, 逆变器开关变换越频繁。载波频率可根据电机功率来选择, 例如大功率电机(30KW 左右), 电流太大以至逆变器开关的变换不能太过频繁, 所以载波频率设定为 5KHz 比较合适。上图可知, 不同载波频率的 CPU 负载率最高不超过 70%, 所以此平台能适应不同功率的电机, 并具有比较好的稳定性和实时性。

3.2 不同存储器中运行控制算法的 CPU 负载率

图 5 为不同载波频率下, 在不同存储器中运行完整控制算法的 CPU 负载率性能图。存储器主要包括内部 RAM、内部 FLASH 以及外部 RAM。外部 RAM 地址总线 and 数据总线的位宽为 16bit, 使得每次取指令或数据需要至少两次的 CPU 指令周期, 而且外部 RAM 的读取周期相对较长。经测试, 在 1KHz 载波频率下, 空载时 CPU 负载率就已达到 94%, 所以外部 RAM 并不适合运行完整的控制程序, 但是可以运行实时性要求并不高的任务以提高整体性能。

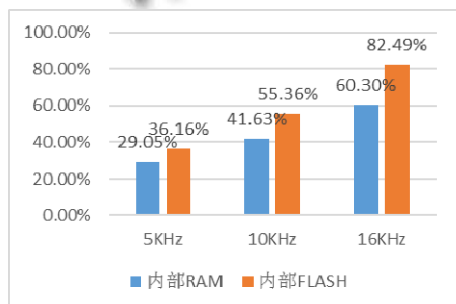


图5 不同存储器中运行控制算法的 CPU 负载率

图 5 中可以看到, 在载波频率为 16KHz 时并不适合在 FLASH 中运行程序。针对实时性要求一般的大中型功率电机可以在内部 FLASH 中运行基于矢量控制策略的实时控制系统; 而对于实时性能要求非常高的小功率电机, 则只能在内部 RAM 中运行。

4 结语

实验不仅给出了不同载波频率下各控制模块的 CPU 负载率, 也展示了不同存储器中运行控制程序的 CPU 负载率数据。通过对实验数据的分析与评价, 在特定功率的同步电机控制系统中, 开发人员对硬件平台以及矢量控制算法的选择会有比较明确的参考标准。该成果已经成功指导沈阳计算所高精数控伺服控制的改进工作, 针对 1.5KW 到 15KW 永磁同步电机, 完成了硬件平台和控制程序的设计, 并具有比较好的控制性能。

参考文献

- 1 陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统. 第 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- 2 王春民, 孙淑琴, 安海忠, 周游. 基于 DSP 永磁同步电动机矢量控制系统的设计. 吉林大学学报(信息科学版), 2008, 26(4): 343-346.
- 3 杨张利, 王远干, 游晓容. 利用 DSP 实现变频器的矢量控制和 SVPWM 技术. 电子工程师, 2007, 33(10): 5-8.
- 4 肖卫文, 熊芝耀, 李世春, 程绪长. 基于变参数 PI 的永磁同步电动机矢量控制系统. 电力电子技术, 2009, 43(4): 32-33.
- 5 汤新舟. 永磁同步电机的矢量控制系统[硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- 6 SPRS439, TMS320F28335, TMS320F28334, TMS320F28332 Digital Control Systems(DCS) Data Manual, Texas Instrument Inc. 2007.
- 7 SPRU423I, TMS320 DSP/BIOS v5.42 User's Guide. Texas Instrument Inc. 2012.
- 8 金春莲, 黄迅. 实时操作系统 DSP/BIOS 在 DSP 开发中的应用. 电子产品世界, 2002(9): 63-65.
- 9 王志成, 林许, 刘伟军. 基于组件技术的可重构伺服驱动软件设计. 组合机床与自动化加工技术, 2013(10): 58-61.
- 10 SPRU625L, TMS320C28x DSP/BIOS 5.x Application Programming Interface(API) Reference Guide. Texas Instrument Inc. 2012.