

# 基于 DSP 的无刷直流电机控制系统研究

敖银辉

(广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510090)

**摘要:** 介绍一种数字信号处理器(DSP)控制的无刷直流电机控制系统. 利用 TMS320LF2407 的运动控制接口形成单片 DSP 控制的电机系统. 使用霍尔元件检测转子磁极位置, 形成电子换相逻辑. 通过数字 PI 速度和电流控制器控制电机速度. 最后给出了实验结果和结论.

**关键词:** 无刷直流电机; 数字信号处理器; 换相逻辑

中图分类号: TP723

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2004)04-0005-04

无刷直流电动机作为一种新型的无级变速电动机, 不仅具有交流电机的体积小、重量轻、惯量小等特点, 而且拥有直流电动机优良的调速性能, 但又没有机械换向器的缺点, 因此得到了广泛的应用. 无论在数控机床、机器人等制造加工领域, 还是家用电器如洗衣机、电脑硬盘等场合都日益受到重视<sup>[1]</sup>. 以往的无刷直流电机多由单片机附加许多种接口设备构成. 不仅复杂, 而且速度也受到限制, 难于实现从位置环到速度、电流环的全数字控制, 也不方便扩展. 而应用数字信号处理器(DSP)实现的电机伺服系统却可以只用一片 DSP 就可以替代单片机和各种接口, 且由于 DSP 芯片的快速运算能力, 可以实现更复杂、更智能化的算法<sup>[2]</sup>; 可以通过高速网络接口进行系统升级和扩展; 可以实现位置、速度和电流环的全数字化控制.

本文介绍使用 TI 公司的 TMS320LF2407 DSP 为控制器, 组成无刷直流电机的伺服控制系统. 首先介绍了无刷直流电机的原理, 然后给出了控制系统的框图, 说明软硬件设计方法, 最后给出了实验结论.

## 1 无刷直流电机的工作原理

无刷直流电动机的本体基本上是一个永磁同步电动机, 定子三相绕组通过交流方波, 转子为永磁体. 励磁由转子的永磁体提供, 定子的三相绕组中的交流电产生旋转磁场. 电枢磁势和转子磁势共同作用产生电磁转矩. 仿照直流电机特性, 如果两个磁场始终垂直, 则产生的电磁转矩为最大<sup>[3]</sup>. 由于转子是转动的, 其磁场方向也是旋转的, 因此必须通过控制三相定子的通电顺序来改变定子磁场使其与转子磁场基本垂直(即转矩角为  $90^\circ$ ). 实际上, 定子换相逻辑使其转矩角的平均值为  $90^\circ$ . 首先应知道目前转子的位置, 再根据换相要求确定三相定子的通电顺序, 这也就是无刷直流电动机需要转子位置传感器的原因. 本实验中转子磁极位置由敷贴在定子铁心表面的霍尔元件来检测.

电机采用 Y 型连接, 三对桥式逆变电路驱动(图 1), 工作在两相导通三相六状态方式. 三个霍尔元件给出  $60^\circ$  电角度位置信息, 即它们互差  $120^\circ$ , 脉冲宽度为  $180^\circ$ . 三个霍尔元件的组合在一个周期可给出 6 个状态(另两个状态一般不出现), 即每  $60^\circ$  就变换一个不同的状态. 根据传感

收稿日期: 2003-06-25

作者简介: 敖银辉(1973-), 男, 助教. 主要研究方向为机电控制与自动化.

器状态信息, 结合换相逻辑控制输出连接到三相定子的 PWM 逆变器模块的 6 个功率晶体管导通或截止, 就可以满足转矩角要求, 使转子持续获得稳定电磁转矩。由于任一时刻只有两相导通, 其电流大小相等, 方向相反, 因此可以认为其效果等同于直流电流。整体上,

定子电流为方波, 只要按照转子的磁极位置进行适时的换相, 就可以保持这种直流驱动的特性, 又因为换向是通过电子电路或软件而不是电刷完成, 故称其为无刷直流电动机。

定子三相换相顺序(正转)与霍尔传感器的逻辑输出之间的关系可由表 1 得到。

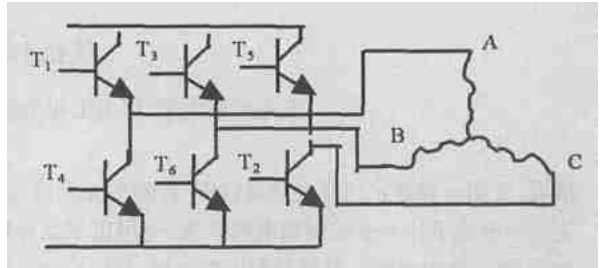


图 1 逆变器与定子绕组接线

## 2 无刷直流电机实验控制系统构成

TI 公司的 TMS320LF2407 是专门面向运动控制应用的数字信号处理器, 其上包含了电机控制应用所需要的各个主要功能模块。它不仅具有 16 bit 定点处理器内核, 更重要的是它将许多电机控制常用的接口集成到一个 DSP 控制器上。如拥有两个

事件管理器, 其中有定时器和 PWM 发生器能驱动两台电机, 编码器检测电路能直接与电机的编码器连接; 标准的 CAN 现场总线可与外界高速通讯; 同步与异步串行端口 SPI 和 SCI 可与多种标准串行设备通信; 通用双向 I/O 通道及 AD 转换接口直接采集现场数据; 这些使得用 DSP 实现的电机控制系统简单化、模块化。系统硬件基本上包括一个以 TMS320LF2407 为处理核心的 DSP 板, 一个配套的功率驱动板和 PM50 电动机。各部分主要功能为

1) DSP 板: 这是实现电机控制的核心部分。本系统程序主要利用了 DSP 的如下功能块:

(1) SCI 接口用于同主 PC 机通讯。

(2) AD 转换接口用于测量电机的相电流  $i_a$ 、 $i_b$ 。

(3) PWM 发生器用于产生需要的 PWM 信号以驱动功率模块上的 PWM 逆变器。

(4) 使用通用定时器 Timer 1 产生电流和速度控制的周期。

(5) 使用 QEP 单元和 Timer2 连接编码器信号的输出。编码器安装在电机转子上, 用于测量电机的位置, 并经过微分得到电机速度。

(6) 使用通用并联 GPIO 接口获得 3 个霍尔元件的状态。

2) 功率模块

功率模块是连接 DSP 板和电动机的中间模块。主要功能是接受 DSP 发出的 PWM 控制信号, 采集电机的反馈信号, 并送回给 DSP 的相关接口。因此其上主要有 PWM 逆变器(见图 1)、电机电源接口、定子电流检测、编码器接口等。

定子电流检测是通过在逆变器的下桥臂上串接电阻进行的。将定子电流以 0.395 V/A 的增益转换成对应的电压量后, 送入 DSP 的 AD 接口。此处只需检测 A、B 两相电流, C 相电流可通过

表 1 传感器信号与换相逻辑

	0°	60°	120°	180°	240°	300°	360°
A 相	+	+	0	-	-	0	0
B 相	-	0	+	+	0	-	0
C 相	0	-	-	0	+	+	0
传感器 1	1	1	0	0	0	0	1
传感器 2	0	1	1	1	0	0	0
传感器 3	0	0	0	1	1	1	1
十进制数	1	3	2	6	4	5	7

$i_a + i_b + i_c = 0$  求得. 这种电流检测方法比较简单, 但要求软件上必须保证在输出 PWM 逆变器的命令时, 同时检测 PWM 逆变器下桥臂的电流, 以保证电流检测的正确性.

存储在 DSP 中的程序协调各部分的功能. 主程序采用循环方式不断调用数据记录模块、与主机串行通讯的监视模块等. 在主程序执行过程中, 不断有 T1 中断发生, 在中断服务程序中处理电流读取、换算, 编码器读取、速度换算等. 更重要的是要完成电流控制和速度控制环的计算. 图 2 是根据控制原理在程序中实现的系统运行框图. 通过 ADC04 和 ADC05 端口读入两相电流后, 结合由 GPIO 口获得的霍尔元件所表示的转子磁极位置信息, 根据表 1 计算等效的直流电流  $i_q$ , 而指令  $i_q$  由速度控制器的输出给出. 电流控制器和速度控制器采用的都是 PI 控制, 无刷直流电机像直流电动机一样只需要一个电流调节器, 而不是正弦波永磁同步电动机那样需要两个电流调节器. 由软件完成的电压换相模块实现对施加于逆变器的相电压参考值的计算. 实际上 DSP 控制器接受三相参考电压, 由 6 个全比较 PWM 输出逆变器模块所需要的方波脉冲. 在一个给定位置, 只有两相导通, 只需控制逆变器的四个晶体管. 由图 2 中可看出, 系统存在两个闭环, 实际控制时, 外环速度控制的周期为 1 ms, 而内环电流控制的周期为 0.1 ms. 这是因为内环的电流变化速度快, 较短的控制周期可使转矩波动减小.

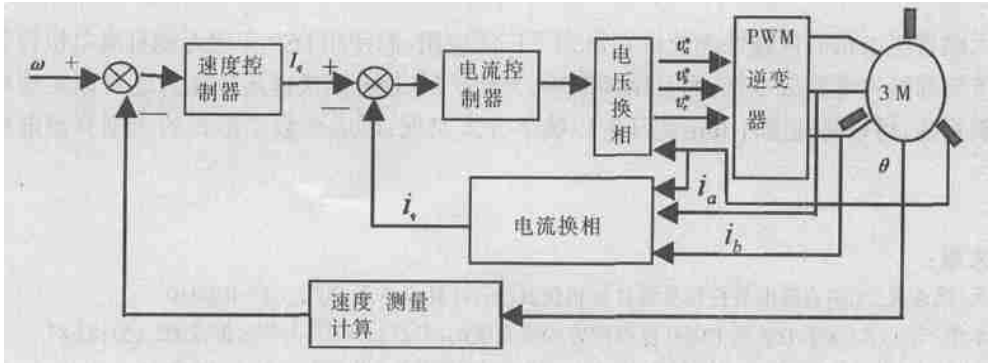


图 2 无刷直流电机控制方案

### 3 实验结果

实验装置由永磁同步电机、功率模块、DSP 板、PC 机组成. 伺服电机带 500 线的编码器用于提供电机位置, 本系统将其微分后得到速度信息. 电机的基本参数为: 相电阻: 5.25  $\Omega$ , 相电感: 0.46 mH, 反电势常数: 2.62 mV/(r/min), 额定电压: 19.1 V, 额定电流: 1.16 A, 转子转动惯量  $9 \times 10^{-7}$  kg·m<sup>2</sup>. 图 3 是速度跟踪效果, 图 4(a) 是 A 相电流的波形, 图 4(b) 是根据 A、B 相电流计算出的等效  $I_q$  电流波形.

图 3 显示了实际速度可以很好的跟踪指令速度, 而且在正反运行中都表现出较小的跟踪误差. 图 4 的电流波形说明 DSP 控制系统用数字方式实

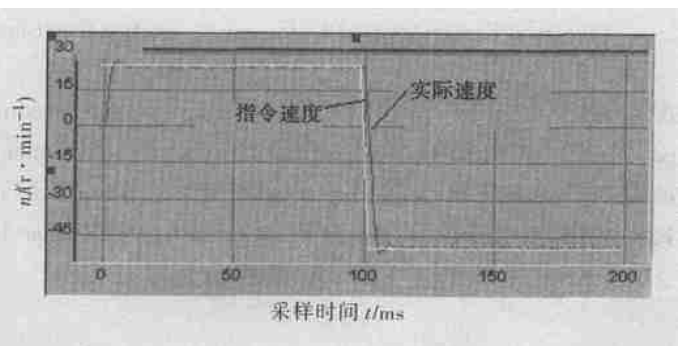
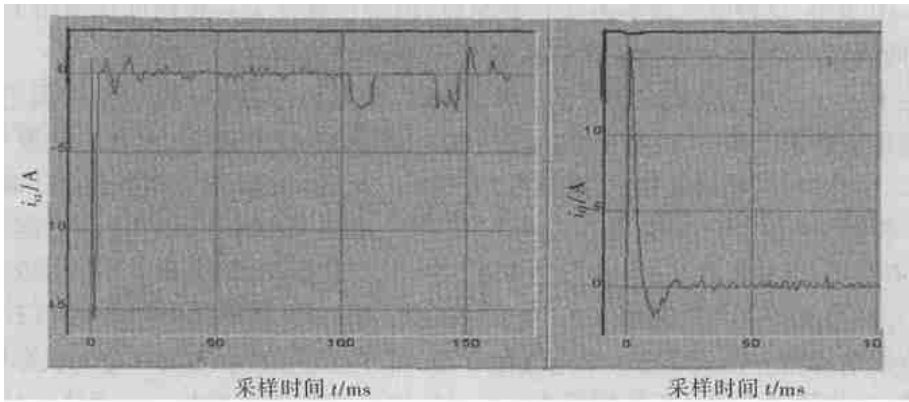


图 3 速度控制效果图



(a) A 相电流波形图

(b)  $i_d$  电流波形图

图 4 电流控制效果图

现了定子电流的瞬态和稳态控制

## 4 结论

无刷直流电机的优越性能使得它得到了广泛应用,而使用 DSP 实现无刷直流电机控制则不仅比传统的模拟电路成本低,而且结构简单,方便扩展. DSP 的快速运算能力还可以实现更复杂的控制算法,可以将速度环和电流环都以数字方式实现,形成全数字形式的无刷直流电机控制系统.

### 参考文献:

- [1] 邓兵,潘俊民. 无刷直流电机控制系统计算机仿真[J]. 计算机仿真, 2002, (5): 104-110.
- [2] 朱孝勇,李正明. 基于 DSP 的 PMSM 模糊位置伺服系统的研究[J]. 江苏大学学报, 2002, (5): 83-87.
- [3] 张崇巍,李汉强,陈伯时. 运动控制系统[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2002. 174-178.

## Study on Control of Brushless DC Motor Based on Digital Signal Processor

AO Yi-rui

(Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

**Abstract:** A brushless DC (BLDC) motor control system based on Digital Signal Processor (DSP) is presented. The TMS320LF2407 produced by TI with advanced motion interface is used. The PI speed and current controller are used to control the speed of BLDC. The results of experiment and conclusion are also given.

**Key words:** brushless DC motor (BLDC); DSP; phase change logic