

无位置传感器无刷直流电动机 控制方法及其 DSP 实现

刘春侠¹, 宋万广²

(1. 防灾科技学院, 北京 065201; 2. 中海油服机电研究所, 北京 065201)

摘要: 介绍了无位置传感器无刷直流电动机系统的控制原理, 讨论了该系统控制的实现方法, 最后对基于数字信号处理器 (DSP) 芯片 TMS320LF2407A 的无位置传感器无刷直流电动机控制系统的软、硬件实现作了详细论述。

关键词: 无位置传感器; 无刷直流电机; 反电动势

中图分类号: TM301.2 TM33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2009)07-0023-04

The Sensorless BLDCM Control Technique and Its Realization Based on DSP

LIU Chun-xia¹, SONG Wan-guang²

(1. Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Beijing 065201, China;

2. COSL Mechanical & Electrical Research Institute, Beijing 065201, China)

Abstract: The control theory of sensorless BLDCM system is introduced, the realization of control system is discussed. At last, the realization of the Software and Hardware to the sensorless BLDCM based on the DSP chip-TMS320LF2407A is described.

Key words: sensorless brushless DC motor; back electromotive force

0 引言

无刷直流电动机 (BLDCM) 多采用光电编码器或霍尔元件等传感器精确检测磁位置, 以实现电机控制。这类传感器在实际应用中存在着以下问题: (1) 安装困难, 同心度要求严格; 另霍尔元件还必须保证其处于最佳位置; (2) 传感器的存在限制了电机的使用范围, 如高温环境下, 传感器成了电机系统的薄弱环节; (3) 高精度的传感器价格昂贵, 增加了系统成本; (4) 引线增多, 电机体积增大, 同时增加了加工工序。

上述问题引发人们积极研究如何在消除位置传感器的同时又能获取磁极位置等信息, 即研究无位置传感器无刷直流电机的控制方法。

1 反电动势控制技术

近年来推出的几种 BLDCM 无位置传感器控制方法中, 反电动势法是目前技术最成熟、实现最

简单、应用最广泛的转子位置检测方法。

其基本原理为: 在 BLDCM 稳态运行后, 其转子永久磁钢所产生的磁通要切割定子绕组而产生反电动势 E ($E = BL_r r$), E 的大小与转速及其气隙中的磁感应强度 B 成正比。当转子磁钢极性改变时, 反电动势波形的正负也随之改变。所以只要测出反电动势波形的过零点, 就可以确定转子的精确位置, 并以此来控制 BLDCM 的换相。

反电动势 E 可以采用数字测试法, 即用数字电路来完成测试。这种测试方法的关键是求出 BLDCM 反电动势的波形及其过零点。反电动势的波形取决于磁感应强度 B 在 BLDCM 气隙内的分布情况, 一般有正弦波和梯形波两种。本文以三相 BLDCM, 反电动势波形为梯形波为例来说明其工作原理。

某三相 BLDCM 定子三相绕组为星形联结, 并采用两两通电方式。与其对应的反电动势波形检测电路如图 1 所示。

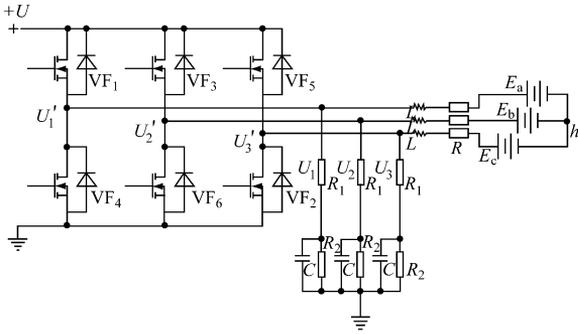


图 1 反电动势波形检测电路

其三相电压平衡方程式为：

$$\begin{cases} U_a = R I_a + L dI_a / dt + E_a + U_n \\ U_b = R I_b + L dI_b / dt + E_b + U_n \\ U_c = R I_c + L dI_c / dt + E_c + U_n \end{cases} \quad (1)$$

式中： $U_a、U_b、U_c$ ——A、B、C三相对地的相电压；

$I_a、I_b、I_c$ ——A、B、C三相绕组的相电流；

R ——各相绕组电阻；

L ——各相电感；

U_n ——中性点对地电压；

$E_a、E_b、E_c$ ——A、B、C三相反电动势，其波形如图 2 所示。

由于在两两通电方式中，始终有一相不通电，现假设 A 相不通电，即 $I_a = 0$ ，故有 $I_b = -I_c$ ，从图 2 可以看出，在 A 相反电动势波形过零点附近， $E_b = -E_c$ ，将式 (1) 中前两式相加，可得中性点电压为：

$$U_n = \frac{1}{2} (U_b + U_c)$$

由 $I_a = 0$ 可得：

$$E_a = U_a - U_n = U_a - \frac{1}{2} (U_b + U_c)$$

同理：

$$E_b = U_b - U_n = U_b - \frac{1}{2} (U_a + U_c)$$

$$E_c = U_c - U_n = U_c - \frac{1}{2} (U_a + U_b)$$

在两两通电方式中，每相绕组正反向通电 120° 为获得最大转矩，其绕组通电波形同反电动势波形的相对关系如图 2 所示。从图中可以看出，反电动势波形的过零点与换相点相差 30° 电角度。这样即可精确地确定转子的位置。

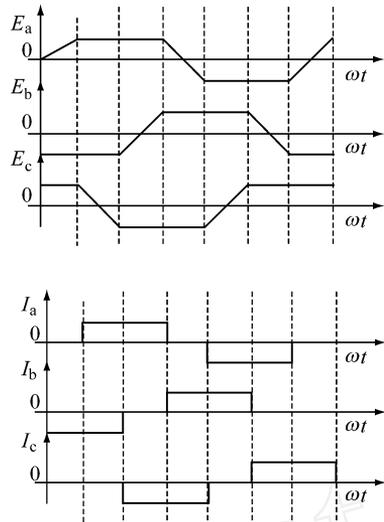


图 2 梯形波反电动势及绕组通电对应波形

2 基于 DSP 的 BLDCM 控制系统

相比于价格昂贵、功能单一的无刷直流电机专用控制芯片，新一代先进处理器数字信号处理器 (DSP) 芯片集高速处理能力和适用于电机控制、优化的外围电路于一体，不仅降低了控制系统的成本，扩充控制系统的功能，同时增加了控制系统的灵活性，为高性能传动控制提供可靠高效的信号处理与控制硬件。本文介绍的这种无位置传感器 BLDCM 控制系统中，采用 TMS320LF2407A DSP 芯片作为控制器。该芯片是 TMS320C2000 平台下的一种定点 DSP 芯片，其内部带有双事件管理器模块，可实现三相反相器控制、可编程的脉宽调制 (PWM) 死区控制等，并集成了前端采样 A/D 转换器和后端 PWM 输出硬件，在满足系统实时性要求的同时可以简化硬件电路设计，将 DSP 的高运算能力与面向电机的高效控制能力集于一体，在电机数字化控制方面优势明显。

3 控制系统硬件设计

本文介绍的无位置传感器 BLDCM 控制系统的硬件组成如图 3 所示。

本系统中 TMS320LF2407A 作为核心控制器，处理采集到的数据和发送控制命令，检测转子的位置，并根据转子的位置发出相应的控制字来改变 PWM 信号的当前值，从而改变直流电机驱动电路中功率管的导通顺序，实现对电动机转速和

转动方向的控制。

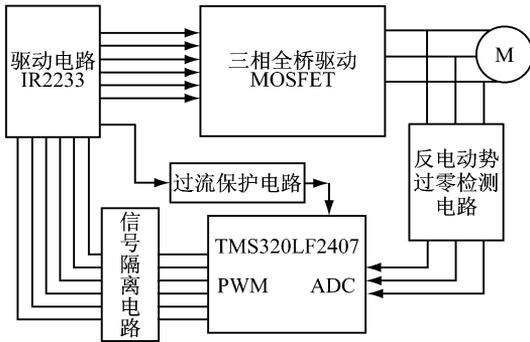


图 3 基于 DSP 的无位置传感器 BLDCM 的控制和驱动结构框图

3.1 反电动势过零检测电路

反电动势过零检测电路部分通过端电压法实现转子位置的检测,其电路部分参考图 1。把检测到的三相反电势过“零”信号,送到 TMS320LF2407A 的三个 ADC 通道,进而实现对电动机转速和转动方向的控制。

3.2 信号隔离电路

信号隔离电路主要是把控制电路和驱动电路之间的控制信号和驱动信号通过光电耦合器进行信号隔离,实现不同电压之间无干扰的信号传输。由于本系统中的 PWM 脉冲信号的输出频率比较高,这里采用 6N136 光电耦合器。将控制部分与由 R2135 构成的驱动电路隔离,这样可使控制电路的逻辑地与驱动电路的逻辑地相互独立,避免信号损失和失真。

3.3 驱动电路

驱动电路部分采用三相全控桥式的控制方式,功率管采用 MOSFET 管,并采用 R2135 作为全控桥的前置驱动电路。R2135 是一种高电压、高速度的功率 MOSFET 和 IGBT 驱动器,该芯片内部集成了互相独立的 3 组半桥驱动电路,可对上下桥臂提供死区时间,特别适合于三相电源变换应用。芯片输入信号与 5 V CMOS 或 LSTTL 输出兼容,因此可直接驱动。而且其内部集成了独立的运放,可通过外部桥臂电阻取样电流构成模拟反馈输入。

3.4 保护电路

系统保护电路主要保护 DSP 芯片免受高电压、过电流的冲击,同时也保护电机的驱动电路免

受损坏。上述信号隔离电路也属于保护电路的一部分,此外还包括驱动保护电路。系统的驱动电路保护主要由 R2135 驱动器来实现。R2135 具有故障电流自保护功能和欠电压保护功能,如遇电流过大,可关闭其六路驱动输出。R2135 芯片内部也有硬件保护电路。如果负载或驱动电路出现过电流或欠电压的情况,R2135 驱动器的 FAULT 引脚会输出控制信号,通常这个输出信号会接到 DSP 的 PDPNT 引脚上,该中断有效,关断 DSP 的所有 PWM 输出并置为高阻状态,实现整个控制电路的保护作用。

4 控制系统软件设计

本系统软件采用结构化程序设计,在 TI 专用集成开发环境 CCS 中由 C 语言编写完成。主要完成以下三个功能:(1) 实现无位置传感器 BLDCM 的起动;(2) 转子位置检测及换相控制;(3) 调速系统闭环控制。

4.1 设计思想

本系统软件部分设计思想主要是:把无位置传感器 BLDCM 的运行过程分为转子定位、开环起动、闭环控制三个模块来实现。

首先,电机转子定位。先将逆变器的某二相导通,给设定的二相电枢绕组通以短暂的电流,使转子磁极稳定在这二相绕组的合成磁场轴线上,以此作为转子磁极初始位置。

其次,逆变器触发相应 MOSFET 功率管导通,电机开环运转即进入外同步阶段。在此阶段,逐步升频、升压以增大转速和占空比。随着转速逐步升高,反电势逐渐增大,当到达预先设定的转速值时,开始通过通用定时器 1 中断检测不导通相的反电势过零点,若在规定的条件内连续两次检测到反电势过零点,程序将从外同步切换到位置闭环控制即自同步阶段,否则停机报错。

当电机处于自同步阶段时,改变电机换相模式,由强迫换相转为根据过零点时刻延迟 30 换相,当前转速由计算两次过零点时间间隔得出;由当前转速和给定速度得到速度差,进行 PD 计算,根据结果调节 PWM 占空比,实现速度闭环,驱动电机稳定工作。

4.2 无位置传感器 BLDCM 的起动

由于反电动势大小与电机转速成正比,在转

速很低时,很难利用反电动势来判断电机转子磁极的位置,只有当 BLDCM 被起动并有一定速度后,才能精确测定其反电动势的过零点。本系统软件中采用了最常用的同步电动机“三段式”起动方法,即转子定位、加速和同步切换三个阶段。无位置传感器 BLDCM 的起动流程如图 4 所示。

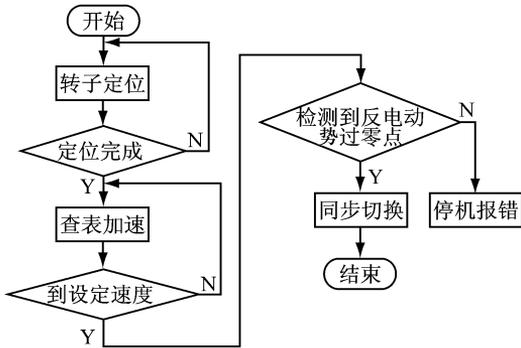


图 4 无位置传感器 BLDCM 的起动流程图

4.3 位置检测中断服务程序

位置检测中断主要负责反电势检测及过零点判断,进行转速计算,并设定位置闭环情况下的换相时间。该中断由 TMS320F2407 的事件管理器 A 的通用定时器 1 完成。通用定时器 1 具体流程如图 5 所示。

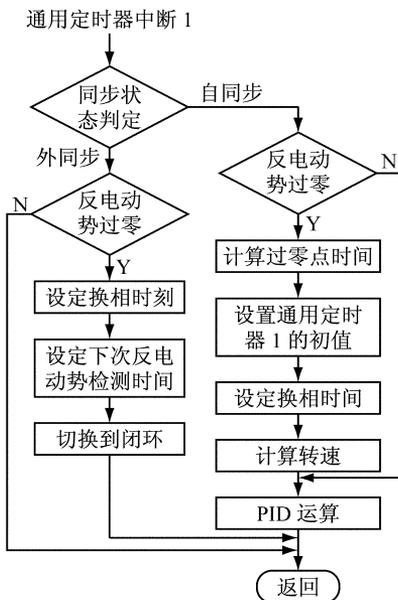


图 5 通用定时器 1 中断流程图

4.4 换相中断服务程序

换相中断主要完成电机换相逻辑的变化,该中断由事件管理器 A 的通用定时器 2 的中断完成。外同步阶段,由通用定时器 2 作为强迫换相控制定时器,利用通用定时器 2 的周期中断作为换相触发信号,设定换相时刻;自同步阶段,通用定时器 2 作为过零点间隔计时器,测量连续两次过零点的间隔时间,同时作 30° 延时换相控制定时器,而此时的换相触发信号由通用定时器 1 的比较匹配中断产生。程序流程见图 6。

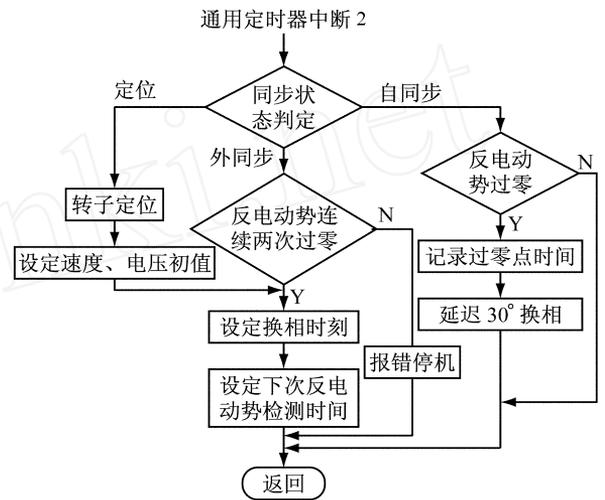


图 6 通用定时器 2 中断流程图

5 结 语

本文以 DSP 芯片 TMS320LF2407A 为核心设计了无位置传感器的 BLDCM 控制系统,详细介绍了该控制系统的主要软、硬件设计。经实际应用,该系统可以对 BLDCM 实现平滑起动和调速运行,系统运行达到了预期目标。

【参考文献】

- [1] 王晓明,王玲. 电动机的 DSP 控制 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2004
- [2] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006
- [3] 刘和平,邓力. DSP 原理及电机控制应用 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006
- [4] 杨柏松. 基于 DSP 的无位置传感器 BLDCM 调速系统的研究与实现 [D]. 茂名:茂名学院学报, 2005.

收稿日期: 2009-02-20