

基于 DSP 和 ML4428 无刷直流陀螺电机锁相稳速控制的研究

王京锋, 孙纯祥

(中国航天时代电子公司第十六研究所, 西安 710100)

摘要: 提出了一种新的基于数字信号处理器 (DSP) TMS320LF2407A 和专用驱动芯片 ML4428 的陀螺用无位置传感器无刷永磁直流电机 (BLDCM) 稳速控制系统。它采用芯片 ML4428 实现无刷直流电机速度控制系统中的反电势检测、换相和功率驱动, 并使用数字信号处理器 TMS320LF2407A 作为控制处理器, 实现了电机的起停控制、转速给定、转速检测。它还采用了锁相环技术和积分分离的 PID 控制算法, 大大提高了系统的控制性能和可靠性。

关键词: DSP; ML4428; 无刷直流电动机 (BLDCM); 锁相环 (PLL); 稳速控制

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

Phase-locked Loop Steady Speed Control of BLDCM in Gyro Based on DSP and ML4428

WANG Jing-feng, SUN Chun-xiang

(The 16th Institute, China Aerospace Times Electronics Corporation, Xi'an 710100, China)

Abstract: A phase-locked loop steady-speed control system is presented, in which the Brushless Permanent Magnet DC motors (BLDCM) are based on DSP and ML4428. The counter electromotive force detection and back-EMF commutation are realized by the chip ML4428. The starting and stopping of motor and the supply and detection of the speed are realized based on TMS320LF2407A. The PLL technology and the integral control algorithm are applied, so the control function and the reliability of the system are greatly increased.

Key words: DSP; ML4428; brushless DC motor; phase-locked loop; steady speed control

0 引言

锁相环技术也称作自动相位控制技术, 是一种能够实现跟踪输入信号相位的新技术, 在航天航空、通信、无线电、精密测量仪器等领域都有重要的应用。锁相环技术能够实现数字信号的同步, 因而近几年人们也将该技术应用于电机的速度控制系统中, 通常都是在有刷直流电机上应用, 由光电码盘提供与电机转速成正比的反馈信号。然而陀螺电机有自身的特殊性: 一方面由于其体积小, 不宜采用有位置传感器的无刷直流电机形式, 也不适合安装光电编码器来测速; 另一方面因其转动惯量大, 运行速度高, 不宜采用模拟—数字混合控制方法, 否则除了速度负反馈外, 还要加上电流正反馈和其它补偿电路才能使系统稳定。因此, 考虑到所设计出来的控制系统要具有线路简单、稳速精度高、运行可靠性好等特点, 本文选用的陀螺电机是转子采用稀土永磁做磁极, 定子电枢采用三相绕组形式, 按照三相三状态的无刷

收稿日期: 2005-05-16

作者简介: 王京锋 (1981—), 男, 航天二院硕士研究生, 主要从事惯性仪表技术和电机控制技术的研究工作。

直流电机控制方式工作。

陀螺用无刷直流电机是一种无位置传感器、无铁芯电枢的永磁同步电机。它采用反电势换相工作方式,以绕组反电势反映转子位置。其控制电路的设计是整个无刷直流电机设计中的关键部分。本文设计了一种基于 DSP 和锁相环技术的无位置传感器 BLDCM 稳速锁相控制方法,解决了反电势信号干扰、起动及过流、过压、欠压保护等问题。所用的无位置传感器无刷电动机专用芯片 ML4428 采用了新的反电势换相技术,能提供在起动和控制三相无刷直流电机时所要求的所有功能。通过实现表明:用该控制方法设计的控制系统,起动迅速,稳速精度高,可靠性好。

1 锁相环工作原理

锁相环包括鉴相器(PD)、环路滤波器(LF)和压控振荡器(VCO)三个部件。PD对输入信号 $u_i(t)$ 和反馈信号 $u_f(t)$ 的相位作比较运算处理;LF是一个线性低通滤波网络,用来滤除掉 $u_d(t)$ 中的高频成分和调整环路参数,它对环路的性能指标有重要影响;VCO是一个电压/频率变换装置,它的频率 $\omega_v(T)$ 随 $u_c(t)$ 变化,一般把它们表示成线性关系。锁相环系统是一个闭环自动控制系统,其结构图如图1所示。

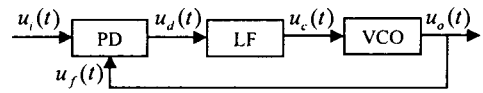
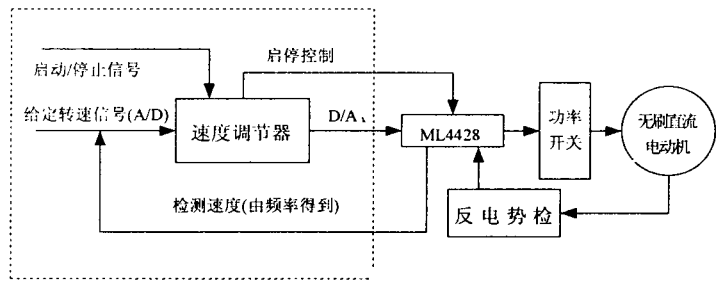


图1 锁相环工作原理结构图

2 锁相稳速控制系统原理

锁相环稳速控制系统包括微处理器 DSP 及控制环节、ML4428 驱动电路、反电势检测、功率开关电路、无刷直流电动机等。该控制系统框图如图2所示。

从图中可以看出,由电机电枢绕组检测出来的反电势经过 ML4428 后直接作为转速反馈信号,与 DSP 提供的给定转速参考信号一起跟踪对应的相位控制。系统一经锁定,电机的转速就跟随参考信号的频率,其稳速精度可达到与 DSP 提供频率一样的稳定精度。



DSP 闭环控制环节

图2 无位置传感器 BLDCM 锁相稳速控制系统框图

DSP 首先进行软件的初始化,定时器检测起停信号。当定时器接收到起动信号后,按照预定设计好的程序调制 PWM,使得 D/A 输出的电压信号不断增大,这样可以防止电机起动时出现的过流。同时还要通过继电器来控制给 ML4428 供电,这样便可完成无刷直流电机的起动。随后电机转速不断增大,当转速足够大时,ML4428 就会检测到反电势信号,这时 DSP 系统就会进入闭环控制环节。

DSP 通过 A/D 转换来给定转速的参考信号 n_{ref} ,并使该转速频率等于电机绕组反电势的额定工作频率;通过捕获 ML4428 管脚 VCO/TACH 可以获得频率正比于转速的方波信号,从而得到电机转子的实际转速 n_o ;再根据 n_{ref} 和 n_o 的差值 Δn 可以对电机进行速度控制,直至稳定,最终使电机稳速运行在额定条件下。当 DSP 收到停止信号时,DSP 通过继电器控制 ML4428 断电,来实现控制电机的停机。

3 锁相稳速控制系统的实现

3.1 驱动控制芯片 ML4428 的特点和主要功能

ML4428 是无位置传感器无刷直流电动机专用芯片, 为 28 脚的双列直插式结构, 按电路功能可分为六大模块: 1) 反电势采样器和 VCO 构成的反电势检测模块; 2) 启动和换流逻辑模块; 3) MOS 管功率驱动模块; 4) PWM 速度控制模块; 5) PWM 电流控制模块; 6) 电源故障检测模块。ML4428 在任何状态下场效应管都不会出现上下直接导通而击穿。由于 ML4428 只能直接驱动 12 V 电机, 所以要用它驱动较高电压的电机, 就必须给高端驱动 MOSFET 加入电平偏移电路。电源电压低于 80 V 时可采用 NPN 管电平偏移电路; 电源电压高于 80 V 时可采用专门的高端驱动器, 如 IR2130。采用上述措施后, ML4428 可驱动电源电压高达 600 V 的电机。

ML4428 可以独立进行电机的起停, 起动过程分为两个阶段: 1) Align 阶段。在这个过程中, 主要进行电机转子位置的复位校准, 它是让 A 相和 C 相流入电流, 而 B 相流出电流, 这样电机的转子在电磁力作用下逐渐转动。当磁极中心线与 B 相绕组的中心线相重合时, 复位校准完成, 管脚 Cat 就变为高电平。2) Ramp 阶段, 升速阶段。ML4428 给电机发出 6 个具有一定加速度的换相信号, 来驱动转子逐渐加速, 升速时间由电容 C_{rt} 大小决定, 加速度由电容 C_{rr} 的大小决定, 电机起动过程完成。

ML4428 管脚 VCO/TACH 可以提供频率正比于转速的方波信号, 为 DSP 实现转速检测提供了前提。通过调节管脚 8 (V_{set}) 的电压大小可以改变片内产生的 PWM 的占空比来进行调速, 这就为文章实现基于 DSP 的电机稳速控制提供了方便。另外 ML4428 还具有过流和欠压保护功能。

3.2 微处理器——TI 公司的 TMS320LF2407A

本系统采用 TI 公司的 TMS320LF2407A 作为微处理器, 它具有改进的哈佛总线结构、4 个流水线操作, 其执行速度达 40MIPS, 有两个事件管理模块, 片内有高达 32K 字的 FLASH 程序存储器, 16 通道 A/D 转换器等许多优点。采用 TMS320LF2407A 使得系统处理速度和数字信号处理功能远远强于用普通的单片机系统, 而且该芯片是 TI 公司为运动控制系统专门开发的, 所以对电机控制系统独树一帜。

3.3 低通滤波器(LF)

滤波器是锁相环中的一重要部件。本文所采用的滤波器是三阶的巴特沃斯低通滤波器, 通过滤去 PWM 输出的高频部分, 保留低频的直流部分, 即可得到对应的 D/A 输出。低通滤波器带宽决定了 D/A 输出的带宽范围。本文所采用滤波器的滤波电路图如图 3 所示, 运算放大器可选用运放 OP07, 其特点是温漂小、阻抗低、精度高。

经过 D/A 转换后的直流电压控制 ML4428 的管脚 V_{set} 电压的大小, 进而可以调制 ML4428 三路低压侧的驱动信号, 以便达到速度闭环的目的。

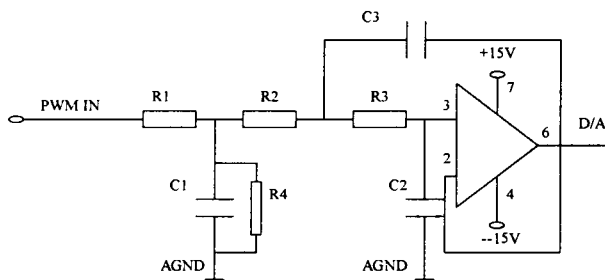


图 3 低通滤波器电路图

3.4 控制软件的实现

本文所设计的控制系统使用 ML4428 完成了反电势检测和换相, 为 DSP 节省了许多空间, 使 DSP 有足够的资源来快速完成较为复杂的控制算法, 提高系统的性能和可靠性。与增量式 PID 控制算法相比, 积分分离 PID 控制算法既保持了积分作用, 又减小了系统的超调量, 使控制性能进一步得到较大改善。

系统软件实现的流程图如图 4 所示, 图中 w 为一个速度误差阈值, $w > 0$ 。当 $|e(k)| > w$ 时, 速度偏差比较大, 这时采用 PD 控制可减小超调量, 使电机转速变化有较快的响应。当 $|e(k)| \leq w$ 时, 速度偏差较小, 可采用增量式 PID 控制。然后再结合积分分离的 PID 控制算法进一步改善控制系统的性能。

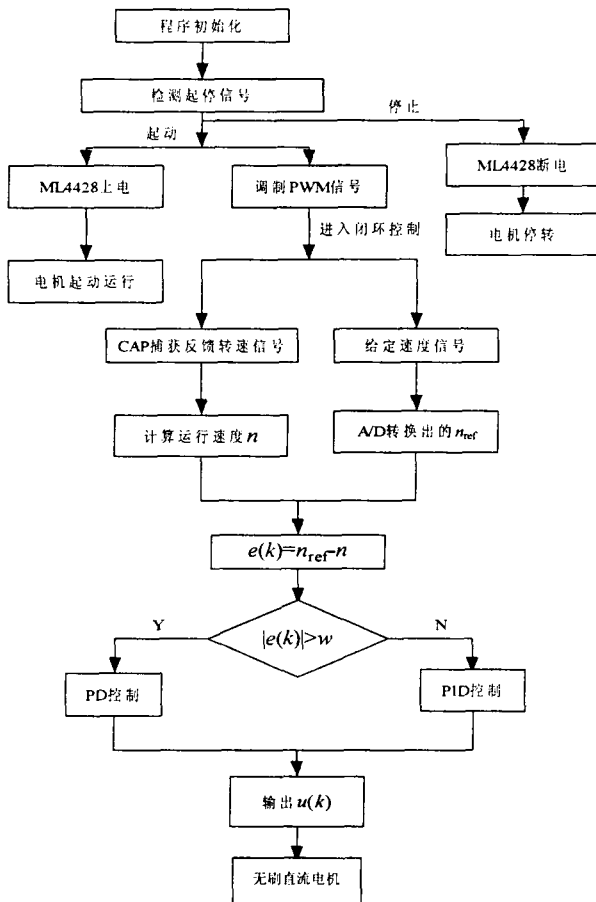


图4 控制系统软件流程图

ML4428 产生频率正比于转速的方波信号，是电机的换相信号。如图5所示的反电势波形图中，

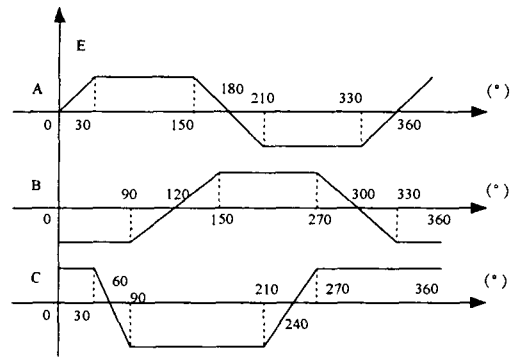


图5 三相绕组反电势波形示意图

三相绕组的反电势在 360° 电度角周期范围内有 6 个过零点。由于采用的是反电势检测法，在 360° 电度角周期内有 6 个反电势过零点就有 6 次换相，其中每相绕组导通时都有 2 个反电势过零点，2 次换相。那么推导出速度计算公式为：

$$n = \frac{60}{p \times N \times T} = \frac{60f}{p \times N} \quad \text{r/min} \quad (1)$$

式中， n 为电机转子转速； p 为电机的极对数； N 为 360° 电度角周期范围内总换相次数； T 为换相的周期； f 为换相的频率，也就是 ML4428 产生正比于转速的方波信号的频率。

DSP 通过捕获中断就可以得到 1 s 内捕获到的 ML4428 产生的方波信号的上升沿个数，实际上也就是换相的频率。知道了换相频率 f ，通过式(1)就可以计算出电机运行时的转速 n 。

由于 ML4428 是采用锁相环技术进行换相的，所以保证了换相时刻的准确性。而利用 DSP 的软件算法和高速运算能力，这既保证了转速测量的精度，同时还省去了光电编码器测速发电机等昂贵的测速设备。

4 结论

本文是通过利用 DSP 和 ML4428 的功能和资源及采用积分分离 PID 算法、锁相环(PLL)技术来控制无位置传感器 BLDCM 的一种新型控制方案。此方案基于 DSP 和 ML4428 的无位置传感器，BLDCM 稳速锁相控制系统性能好，精度高，可靠性强等特点，满足了实际控制系统的要求，实现了无刷直流电机的稳速锁相控制。此方案还设计了低通滤波器，推导了电机运行时转速测量公式，为研究其他控制算法提供了基础，对无位置传感器直流无刷电动机速度控制系统的研究有一定的参考及应用价值。

参考文献：

- [1] 谭建成. 无刷直流电机控制专用集成电路[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [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, 2001.
- [3] 季小尹, 张万红. 无刷直流陀螺电机的高精度恒速控制[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(6).
- [4] 马勇, 孙纯祥. ML4428 在无刷直流陀螺电机控制中的应用[J]. 导航与控制, 2004, (4).
- [5] 王义. 基于 DSP 和 CPLD 的锁相控制系统的一种设计方法[J]. 中小型电机, 2004, 31(2).