

用 ST72141 实现无刷直流电机的控制

万诚 意法半导体深圳代表处

摘要：意法半导体的 ST72141 是专门用在无刷直流电机（BLDC）控制的单片机。内部包含意法半导体自有的反电动势检测专利技术，专门用于电机控制的片内外设，大大减少了电机控制系统的成本，简化了电机控制系统的设计。

关键词：无刷直流电机（BLDC） 单片机 电机控制

引言：

1 概述

ST72141 是 ST 公司专门用于同步电机控制的一款单片机，特别适合 3 相无刷直流电机的控制。无刷直流电机可用于工业控制、汽车电子产品、电冰箱、空调、压缩机和风扇等产品。无刷直流电机的优点是效率高、工作噪声低、体积小、可*性好和寿命长。

ST72141 是 ST7 微控制器家族产品中的一员。它包括 A/D 转换和 SPI 接口，有专门用于无刷直流电机控制的片内外设，可选择带传感器模式和不带传感器模式。

ST7 片内的电机控制电路可看成是一个脉宽调制多路复用器。它有 6 路输出和 1 个用在无刷直流电机不带传感器控制时的反电动势零点检测电路。

ST72141 的电机控制外设有 4 个主要的部分：

- ◇ 去磁结束和反电动势零点的检测电路；
- ◇ 延迟管理电路；
- ◇ PWM 管理电路（需要 PWM 信号来驱动电机）；
- ◇ 通道管理电路。

ST72141 在无刷直流电机中的典型应用如图 1 所示。

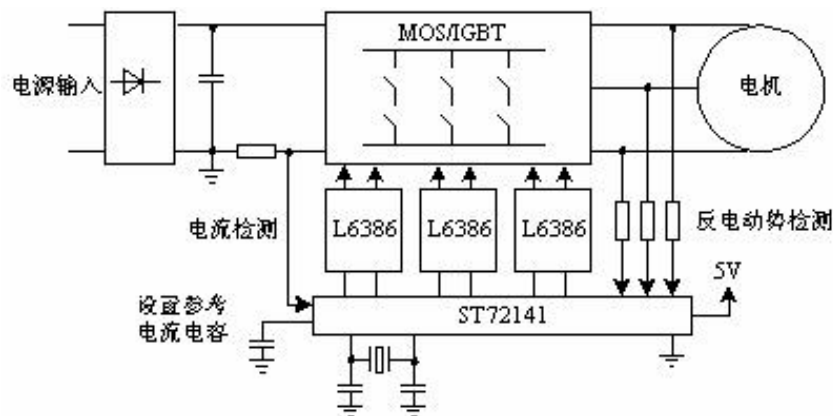


图1 ST72141 典型的应用结构示意图

2 无刷直流电机的基本原理

无刷直流电机包含 2 个同轴的磁性电枢：外部电枢，即固定的定子；内部电枢，即可

动的转子。定子是电机的引导部分；转子是电机的感应部分。无刷直流电机内部电枢的转子是一个永磁体。这个电枢由恒流源供电。定子可以有多相（这里以 3 相为例）。电机是同步电机。无刷永磁体直流电机是同步电机，定子的磁场旋转速度和转子的机械旋转速度相同。

反电动势是使用 ST72141 在不带传感器模式下驱动无刷直流电机的基础。反电动势和转子的转速、流过转子的磁通和相应绕组的转子数目成正比。

绕组产生的力矩大小与电流和磁通量成正比关系。

ST72141 提供 2 种控制方式：电压模式和电流模式。电流模式下可以直影幢壤 鹊讷兀坏缪鼓 J 较驴梢缘鹊谒侯麟 柚味 巨捍兄担 m 吹总鞞你兄担 ?br>

3 ST72141 用于无刷直流电机控制

图 2 为采用 6 个步长的电机控制原理图。

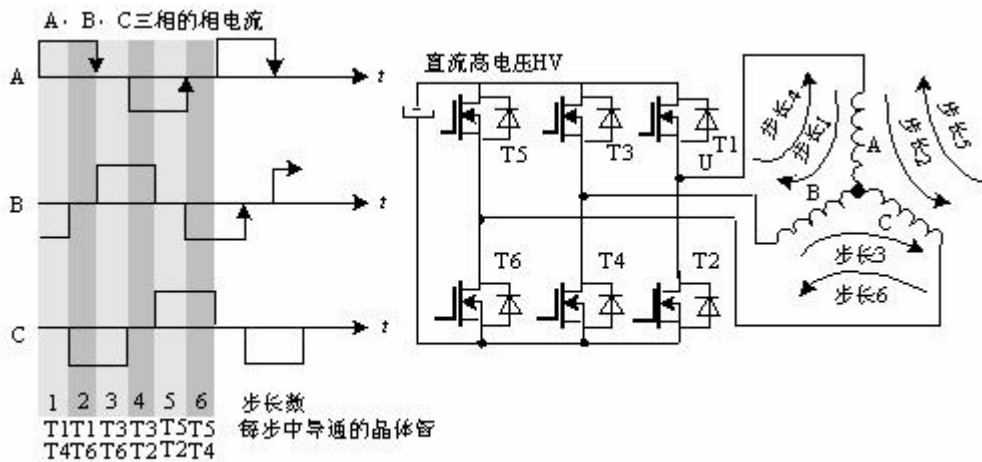


图 2 6 步长 120° 的驱动模式

ST72141 中的电机控制是基于标准的三个半桥 6 个步长控制原理。

T1、T3、T5 是电机 A、B 和 C 绕组相的上端晶体管。

T2、T4、T6 是电机 A、B 和 C 绕组相的下端晶体管。

在步长 1 时，相 A 为正向偏压，所以这个绕组中的电流是正向的；相 B 为反向偏压，所以这相绕组中的电流是负向的。这时 C 相绕组没有施加电源。

无刷模式下，使用 ST72141 控制电机，可以读取这个没有施加电源的相绕组反电动势（这里以绕组相 C 为开始的步长 1）。通过读取这个反电动势，可以确定转子的实际位置。

如图 3 所示，反电动势和相绕组的电流同方向时，效率最佳。

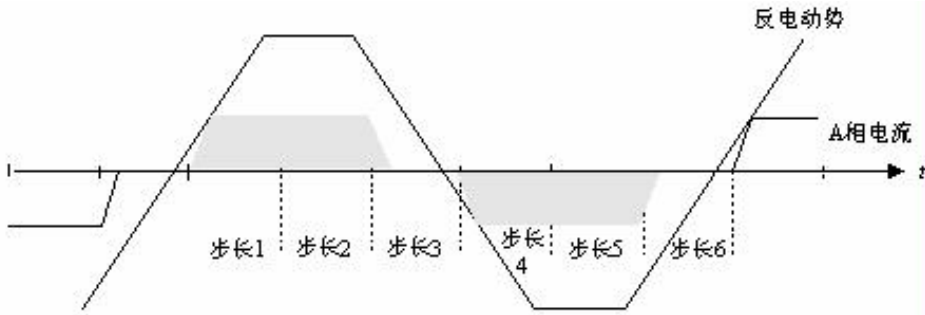


图3 一个相绕组中的反电动势和电流波形

ST72141 可以有 2 种不同的驱动模式：电压模式和电流模式。电流模式下，通过改变电机的参考电流而改变力矩的大小（因为力矩和电流成正比）。电流的控制是通过 PWM 来调整的。电压模式下，通过改变电机的参考电压来改变速度。这种模式不是直接控制电流，但设置了电流的最高限制，即力矩可达的最大值。电压的控制也是通过改变 PWM 周期来实现的。

电机速度的调整使用闭环实现。ST72141 内部有 2 个速度调整回路。第 1 个回路是自动换向时效率的调整回路。这个回路使得反电动势和相绕组的电流信号同方向。第 2 个回路是速度调整回路，可使电机维持在设定的速度。

ST72141 对电机控制基于 3 个事件的处理：反电动势过零点事件（Z 事件）、换向（C 事件）、向绕组去磁结束（D 事件），如图 4 所示。

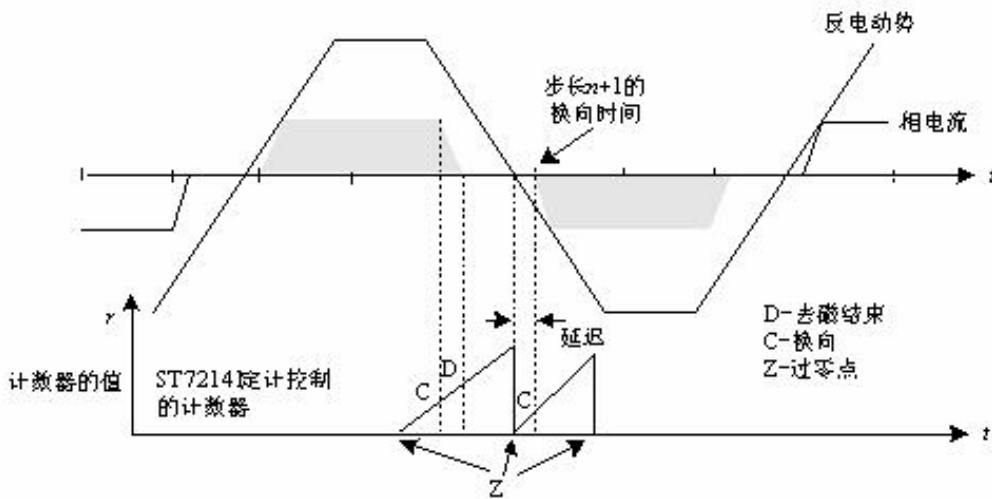


图4 事件时序示意图

去磁结束和反电动势过零点是物理事件，但是换向事件是通过 ST72141 计算得来的，也就是计算过零点事件和下一个换向之间的延迟时间。如果速度加快，过零点事件将更早发生，延迟必须减小以使反电动势和相绕组的电流同方向。

ST72141 的电机控制外设总是以相同的次序处理这 3 个事件：Z 事件在计算的延迟之后产生 C 事件，然后等待 D 事件。电机启动时，根据检测到一定的连续 Z 事件后进入自动换向模式。

ST72141 中，Z 事件（过零点）和 D 事件（去磁结束）的检测由相同的外设部分处理。

这些信号通过 ST72141 的 MC1A, MC1B 和 MC1C 三个引脚输入。过零点事件 (Z 事件) 检测的原理如图 5 所示。

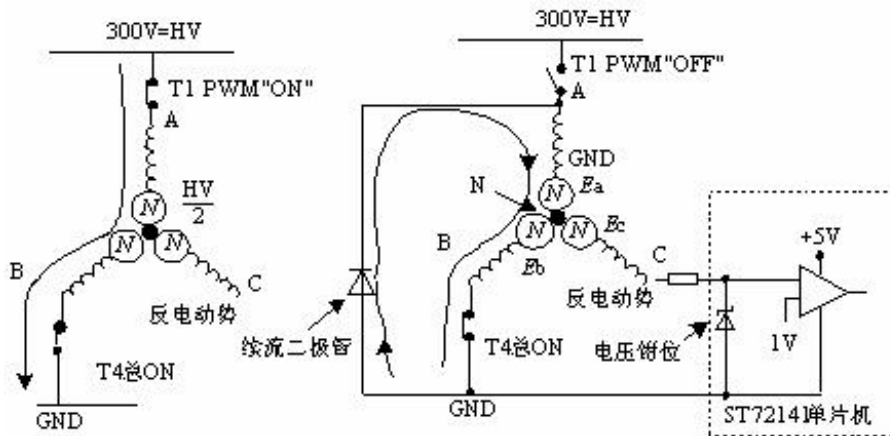


图5 过零点事件检测原理

图 5 所示为电机控制的两种状态。在图 5 左部, 绕组 C 已经去磁。在大约 $20\mu s$ 之后, 读取反电动势的窗口打开。在 T1 关闭时, 电流流经续流二极管, A 点为地。假设 A 相绕组的反电动势为 E_a , B 相绕组的反电动势为 E_b , C 相绕组的反电动势为 E_c 。当 E_c 过零点时, 有 $E_a = -E_b$, 这样 N 处为零电势。这就意味着可以不需要虚拟地就可以获得需要的反电动势的信息。反电动势过零点事件通过输出比较器获得, 无传感器模式时, 一定频率的 PWM 信号加在 T1 上。C 的电压被钳位二极管钳位在 $+5V/0.6V$ (而需要关注的是过零点)。这里的分析同样适应于电机绕组为三角型连接。

比较器的一个输入是 C 相绕组的电压信号, 另一个输入是一个阈值电压 (通过软件可选择 0.2 、 0.6 、 1.2 和 $2.5V$)。ST72141 等待 C 相绕组的反电动势到达选择的阈值电压。PWM 信号施加在 T1 上, 当 T1 关闭时, C 相绕组的电压为地。因此, ST72141 只需要读取反电动势就可以检测到到达这个阈值的时间点。

检测去磁结束事件的方法和过零点事件相同, 并使用相同的外设。电机控制按照固定的顺序处理这三个事件, Z 事件后经过一段延迟, 产生一个 C 事件, 然后等待一个 D 事件。

在换向之后, 开始相绕组加速去磁。为了避免过早地检测去磁结束事件, 换向之后有 $20\mu s$ 的滤波时间, 如图 6 所示。为了避免检测去磁结束事件太晚, 去磁结束的检测使用相同的比较器, 但是取样频率是 $800kHz$ 。

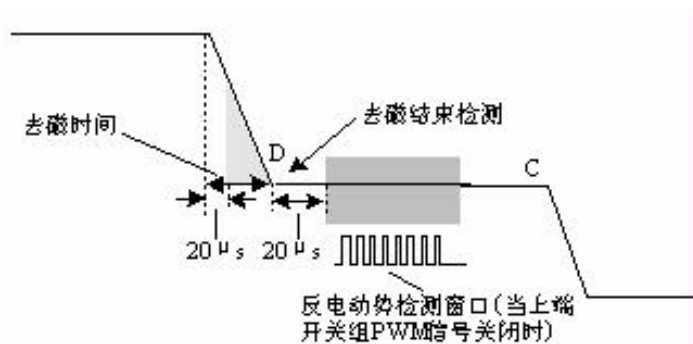


图6 去磁结束事件

无传感器模式下, 比较器的输出取样频率在过零点事件时是 PWM 信号, 在去磁结束事

件检测时是 800kHz。

4 电机的启动和控制举例

这里以 2 个极对数的电机的启动为例。电机启动后目标速度是 1400r/min。启动电机之前，必须预先固定位置。刚启动时，反电动势信号太弱，不能读取。读取反电动势信号前的过程中，电流必须提供 $>(\text{负载力矩} + \text{摩擦力矩} + \text{电机的惯性负载的力矩})$ 。故启动时，ST 72141 定时器 A 的 PWM 占空比在启动过程中必须高于一般运行下需要的值。

一定步长后，为了检测到过零点事件，需要一个特别的方法启动电机，称为同步（强制换向）模式，或者称为电机根据加速表加速的过程。

一定的步长之后，施加连续逐渐增加的步长时间和电流给电机，使电机加速，并可检测到一个过零点事件。电机加速过程中检测指定数量连续的 Z 事件之后，开始调整，使得电机高效率运行，即电机进入自动换向模式。如果在加速表取完后，电机还不能进入自动换向模式下，电机将停止。图 7 所示为闭环模式下电机的启动过程。

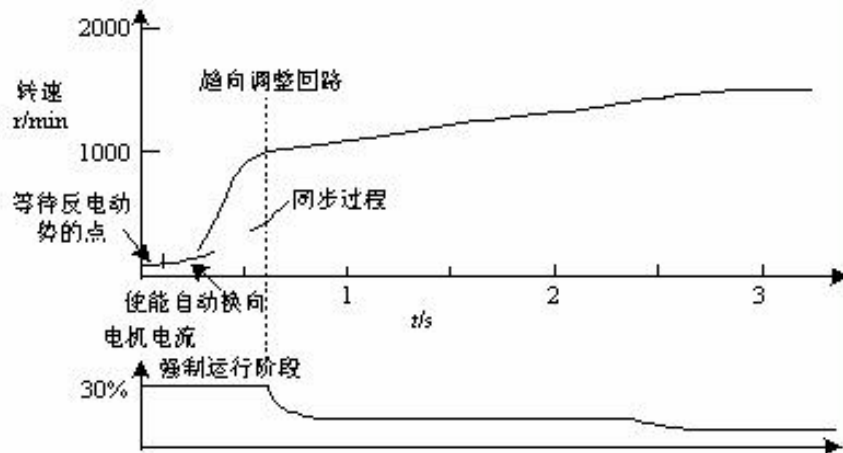


图 7 启动过程

开环模式下的启动过程也一样，只是电流或者电压在电机进入自动换向模式之后可以由用户改变。闭环模式下，电流或者电压的限值由用户强制施加且固定，直到电机进入速度调整。进入速度调整后，电流不再由用户控制（ST72141 自动调整）。闭环控制模式下，不论是哪种控制模式（电流或者电压），速度调整回路启动。电机在单片机的控制下，固定运行在速度表决定的速度上。