

文章编号: 1006-2971 (2005) 05-0020-04

# 基于直流变频技术的压缩机控制器设计

黄跃进<sup>1</sup>, 徐鸣<sup>1</sup>, 沈希<sup>1</sup>, 顾江萍<sup>1</sup>, 舒少仁<sup>2</sup>, 胡娟<sup>2</sup>, 陆海江<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学机电工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 加西贝拉压缩机有限公司, 浙江 嘉兴 314011)

**摘要:** 阐述直流无刷电机的工作原理及其控制器的原理, 分析了其中位置切换、位置检测、电机启动 3 个关键技术。

**关键词:** 制冷压缩机; 直流无刷电动机; 位置检测; 反电动势

**中图分类号:** TM33; TH45 **文献标识码:** A

## The Design of Compressor Controller Based on DC Frequency Conversion Technology

HUANG Yue-jin<sup>1</sup>, XU Ming<sup>1</sup>, SHEN Xi<sup>1</sup>, GU Jiang-ping<sup>1</sup>SHU Shao-ren<sup>2</sup>, HU Juan<sup>2</sup>, LU Hai-jiang<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical &amp; Electrical Engineering,

Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Jiaxipera Compressor Co. Ltd, Jiaxing 314011 China)

**Abstract:** This paper describes the work principle of brushless DC motor and the principle of its controller, and analyzes three key techniques, which are position switching, position detection and starting of electric motor.

**Key words:** refrigerator compressors; brushless DC motor; position detection; EMF

### 1 前言

随着电力电子技术和永磁材料的不断发展, MOSFET、IGBT 等大功率开关器件性能的提高和完善, 无刷直流电动机控制技术的逐步进入商业化阶段, 为直流无刷电动机用于变频冰箱压缩机系统打下了良好的基础。加之市场竞争对冰箱节能、低噪声提出的更高要求, 使得无刷直流电动机应用于冰箱压缩机成为一种趋势。

变频压缩机可分直流和交流变频技术两类, 两者均靠电动机内部形成的磁力线和线圈中的电流间作用产生的磁力运转, 但内部磁通的形成方式却不同。交流变频异步电机的内部磁通是由外部进入的电流形成的, 而电流流动必定会因电阻等产生损耗; 直流无刷电动机是由永久磁铁生成内部磁通, 不需要外部能量供给, 不会产生这一部分的损耗, 因此效率比交流电机高。此外, 由于直流变频压缩机不存在定子旋转磁场对转子的电磁感应作用, 克服了交流变频压缩机的电磁噪声, 也具有比交流变频压缩机噪声低特点。

理论和实验证明, 直流变频压缩机效率比交流

变频压缩机高 10% ~ 30%, 噪声低 5 ~ 10 dB (A)。但是, 直流变频压缩机的成本要高于交流变频压缩机, 控制的难度也高于后者。

本文重点介绍无刷直流电动机工作原理及其控制器的设计。

### 2 无刷直流电动机的工作原理

#### 2.1 无刷直流电动机的结构

直流变频压缩机电机的转子为永磁体。典型的永磁体结构有弧形、逆弧形、V 形、X 形等; 不同的排列, 磁力线的集中程度不一样, 它直接影响电动机的效率; 定子为漆包线绕制而成。图 1 为 4 级 3 相无刷直流电机的示意图, 其中定子线圈共 24 槽。磁极 (弧形) 对数为 2 对。

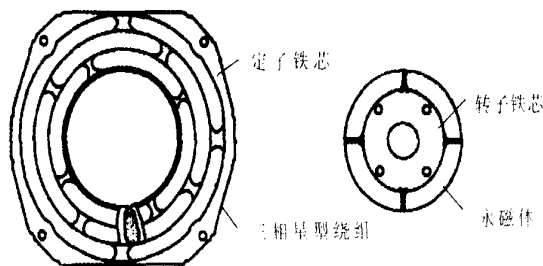


图 1 直流无刷电机示意图

收稿日期: 2005 - 05 - 13

### 2.2 无刷直流电动机的转动分析

无刷直流电动机的旋转是通过 6 个功率管的开和关来完成的。而功率管的开关是根据转子的旋转位置来切换定子绕组的通电电流, 始终保证转子 N 极对面的定子绕组导体内的电流流向为一个方向(都为进或都为出), 而 S 极对面的定子绕组导体内的电流流向为另一个方向。

如果转子位置如图 2 所示, 此外电流从 a 点流入, 从 c 点流出, 即 A、C 线圈中有电流, 流向为  $a \bar{a}$ 、 $\bar{c} c$ 。我们把电机分成左上 180 和右下 180 两半来看。左上 180 部分,  $a$ 、 $\bar{c}$  导体的磁场叠加后根据右手法则在定子转子间产生一个水平向左的方向磁场, 而  $\bar{a}$ 、 $c$  导体磁场叠加后产生一个垂直向上的磁场, 二者叠加的磁场方向  $a_1$  如图所示。这正好与转子磁场  $z_1$  相互垂直, 于是便会产生逆时针方向的电磁转矩, 推动转子向逆时针方向旋转。右下 180 的原理和左上 180 的原理一样。

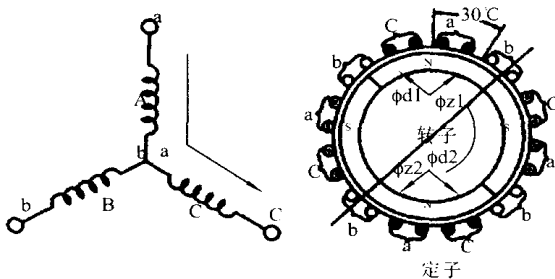


图 2 直流无刷电机转动分析示意图

当转子转过 30 后, 功率模块将会切换电流的方向, 使得 b 流入, c 流出。这样可以保证始终有较大电磁转矩推动电机转动。这样功率模块切换 12 次位置, 转子就能旋转一圈。

从上面的分析中可以看出, 由于右下 180 的原理和左上 180 的原理一样的, 因此前半圈和后半圈的 6 次位置切换过程是一样的。所以功率模块切换一次, 4 级无刷直流电机能转过 30 度, 而 2 级无刷直流电机可以转过 60 度。因此在同样的切换频率情况下, 理论上 2 级的直流电机的转速是 3 级无刷直流电机转速的 2 倍。此外, 由于四级无刷直流电机 30 度切换一次, 使得电磁转矩一直能保持在一个较高的值上 ( $T_m \sim \frac{\sqrt{3}}{2} T_m$ ); 而 2 级无刷直流电机 60 度切换一次, 使得电磁转矩在 ( $T_m \sim 0.5 T_m$ ) 之间变化, 显然 4 级无刷直流电机的效率

要高, 转动更平稳。

### 3 控制器的设计

#### 3.1 控制器的结构及原理

控制器采用了单片机控制, 本方案选择了高速 AVR 单片机 Atmega8 作为控制器的核心器件。Atmega8 是一款基于 AVR RISC、低功耗 CMOS 的 8 位单片机, 由于在一个时钟周期内执行一条指令, Atmega8 可以达到接近 1MIPS/MHz 的性能。Atmega8 具有以下特点: 8K 字节的在线编程/应用编程 (ISP/IAP) Flash 程序存储器, 512 字节 EEPROM, 1K 字节 SRAM, 23 个通用 I/O 口, 4 通道的 10 位 ADC, 2 通道 8 位 DAC, WDT 等功能。

控制器的原理如图 3 所示, 由于篇幅限制, 只对控制器的原理作一个大概的介绍。控制器的电源为 220 V 交流电, 通过内部的整流和滤波转化为 310 V 左右的直流电供给功率模块来控制电机; 同时, 310 V 直流电通过高频变压器产生一个 15 V 的开关电源和 5 V 的线性电源供给驱动模块和单片机工作。由于控制器对电源的要求比较高, 因此在电路里面设计了 3 级滤波器。控制器的工作原理是这样的: 上电后, 首先 MCU 对电压、电流、温度进行检测。当一切正常以后, MCU 检测外部的控制频率信号, 当检测到一个有效的频率信号时, MCU 就会输出信号控制驱动模块来控制 UVW 三相使得电机转过一定的角度。然后 MCU 通过位置检测判断转子的位置, 当转子转到某个位置时, MCU 就会输出信号来控制换相, 保证电机有一定的转矩。同时, MCU 随时检测电压、电流、温度来保证电机工作在一个安全稳定的状态, 一旦检测出有异常情况就立即使电机停止工作, 直到电压、电流、温度都恢复正常为止。

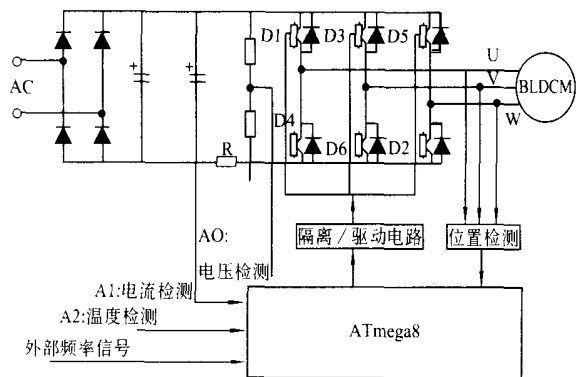


图 3 控制器原理图

### 3.2 控制器的关键技术

#### 3.2.1 位置切换

二级三相绕组无刷直流电机的绕组一般为星形连接，其控制方式多为三相全控电路方式，如图 3 所示。三相全控电路运行方式转矩脉动小，绕组利用率高，因此得到广泛应用。最常见的三相全控方式为两两导通方式（也称为 120° 导通方式），即在任意时刻，上下桥臂各有一个功率管导通。本方案采取两两导通的控制方式，每隔 1/6 周期（60 电角度）换相一次，每次只换相一个功率管，每个功率管导通 120 电角度，各功率管的导通顺序依次为 D6D1, D1D2, D2D3, D3D4, D4D5 .....，如图 4 所示。图中 A 部分为理论三相通电流波形，B 部分为实际三相通电流波形，C 部分为位置切换状况。

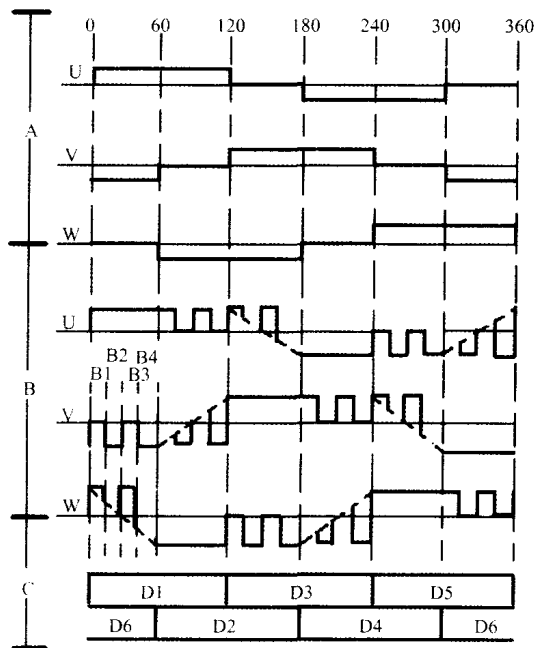


图 4 U V W 三相时序图

当转子在 0 度时，D1 和 D6 导通，电流从 U 相流入 V 相流出。实际当中为了控制电机的转速，一般采样等宽 PWM 脉冲调制方式，即 V 相为周期相同占空比相同的矩形波。在负载不变的情况下，占空比不变，即输入电机的相对电压不变，转速就不变。当需要调节转速时，只要改变 PWM 波的占空比，转速就会跟着变化。当转子转过 30 度角时，第 3 相（W 相）的反电势就会过零点，根据这一原理就可以判断转子的位置。然后再延时 30 度角度（30 度角度可以通过硬件实现或者软件实现），转到 60 度角度时功率管换成 D1D2 导通进入如图所示的第 2 个状态。这样按顺序依次导通，

电机就会转动起来。

#### 3.2.2 位置检测

位置检测的方法很多，本方案采用端电压检测法（反电动势过零检测法）来检测转子位置。对于一个无刷直流电动机驱动系统来说，在任何时候只有两相导通，而另外一相为关断相，处于关断相的绕组正好在关断期间反电动势过零。因此端电压的获得成为位置检测的关键，端电压信号 U 包括两部分，一是反电动势信号 E，一是中心点对地电压信号  $U_n$ ，因此  $U = U_n + E$ 。在理想情况下，3 相绕组阻抗相等，中心点对地电压为 1/2 的直流电源电压 VDD，该电压信号对反电势过零检测用处不大，是冗余的信号。如图 5 所示， $V_a (V_u)$ 、 $V_b (V_v)$ 、 $V_c (V_w)$  为 3 相的端电压；VDD 为直流电源电压； $P_a$ 、 $P_b$ 、 $P_c$  为转子的位置信号，即输入单片机的逻辑电平。本案采用了精度较高的大电阻分压，然后利用 LM339 运方构成比较器。这里比较器的正极电压  $V_x/100$ ，负极电压为  $VDD/200$ ，这样刚好可以去除冗余信号的影响。当反电动势过零时，就可以通过关断相对应 TTL 电平的转变来判断转子的位置。

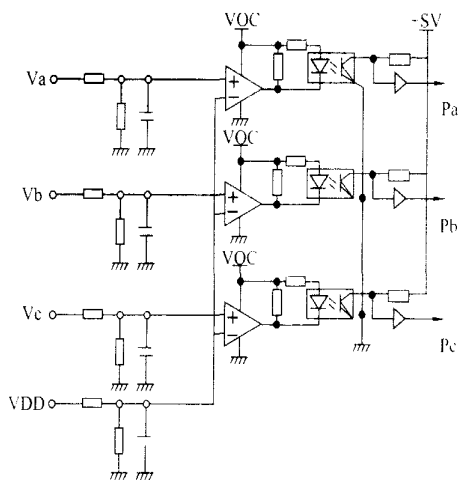


图 5 位置检测原理图

实际当中，由于输入的信号为脉冲波，所以并不是所有时刻都需要检测位置。如图 4B 所示，为了说明问题，图上只画了 2 个脉冲信号，虚线部分为反电势。当转子在 1 和 3 时，由于只有 U 相接 VDD，所以中心点对地的电压为 VDD，因此  $U_1, 3 = U_n + E = VDD + E > VDD/2$ 。所以在这些时刻不能检测到位置。当转子在 2 位时，U 相接 VDD，V 相接地，因此  $U_2 = U_n + E = VDD/2 + E$ 。同理  $U_4 = VDD/2 + E$ 。再根据反电动势的变化可

以得出,  $U_2 > V_{DD}/2$ ,  $U_4 < V_{DD}/2$ 。所以通过比较器的比较, 就可以得到转子的位置。

### 3.2.3 电机的启动

目前常用的无位置传感器控制多为反电动势控制, 由于无刷直流电机在静止的时候没有感应电动势, 因此这种控制方式无法实现自启动, 它的启动需要单独设计。目前电机启动的方式很多, 最为常见的是预定位置启动。它可分为 2 个步骤, 第一步为强迫预定位, 即在启动开始时给电机一个确定的通电状态, 电机定子合成磁势在空间上有一个确定的方向, 把转子磁极拖到与定子合成磁势轴线重合的位置, 实现预定位; 第二步为启动, 改变电机的通电状态, 使定子合成磁势转向下一个位置, 在电磁转矩的作用下拖动转子磁极向定子磁势轴线方向移动。在转子转动过程中产生反电动势, 在这个过程中同时对反电势过零信号检测和换相频率检测, 从而完成电机的启动。

采用这种方式启动, 其优点是: (1) 使绕组中具有一定大小的反电势信号; (2) 反电势信号的变化是固定的而非随机的, 保证电机有一个确定的转向, 实现电机的正确启动; (3) 无须设计专门的启动电路, 简化了硬件结构。

(上接第 34 页)

按精确气量法计算, 进气阀阀隙平均流速

$$C_{vs} = \frac{v_g V_t n z}{30 A_v N_f (1 - \epsilon)}$$

$$= \frac{0.764 \times 0.958 \times 1.61 \times 10^{-3} \times 300}{30 \times 0.6 \times 6.6 \times 10^{-4} \times 1 \times (1 - 1.075)}$$

$$= 45.24 \text{ m/s}$$

吸气阀阀隙平均马赫数

$$M_s^* = \frac{45.24}{\sqrt{1.33 \times 19.27 \times 318 \times 9.8}} = 0.160$$

排气阀阀隙平均流速

$$C_{vd} = \frac{x300 \times 0.764 \times 0.958 \times 1.61 \times 10^{-3} \times 386}{30 \times 1.2875 \times 0.6 \times 6.6 \times 10^{-4} \times 1 \times 2.54 \times 318}$$

$$= 34.70 \text{ m/s}$$

排气阀阀隙平均马赫数

$$M_d^* = \frac{34.70}{\sqrt{1.33 \times 19.27 \times 386 \times 9.8}} = 0.111$$

## 5 讨论

显然按精确气量法计算出的气阀阀隙流速  $C_v$

## 4 结论

实验结果显示, 使用无刷直流电动机驱动的变频冰箱压缩机比使用单相异步电动机驱动的冰箱压缩机效率提高 20% 左右, 在冰箱实际运行中, 由于低转速运行减少压缩机开停次数即减少了压缩机启动带来的功耗, 冰箱耗电量降低 25% 左右, 节能效果明显。在不久的将来, 由于在节能、效率及对电网的影响等方面的明显优势, 变频冰箱必将取代传统的冰箱, 成为市场的主流。

参考文献:

- [1] 马潮, 等. Atmega8 原理及应用手册 [M]. 清华大学出版社, 2003.
- [2] 肖凤明, 等. 变频空调器微电脑控制电路分析与速修技巧 [M]. 机械工业出版社, 2004.
- [3] 石日祥, 等. 变频冰箱压缩机的研制 [J]. 家电科技, 2003 (7): 58 - 62.
- [4] 周宏坤, 等. 浅谈直流变频空调器的工作原理 [J]. 电机电气技术, 2000 (1): 25 - 28.
- [5] 巫佩军. 基于 DSP 的无位置传感器 BLDCM 调速控制器的设计 [D]. 西北工业大学, 2003.
- [6] 杨沛骥. “反电势法”无位置传感器无刷直流电机控制系统研究和实现 [D]. 东南大学, 2003.
- [7] 袁澜. 无刷直流电动机变频调速系统 [D]. 河南科技大学, 2003.

和阀隙马赫数  $M$ , 避开了全行程容积法计算的固有缺陷, 揭示了相对余隙容积、压比、吸气温度  $T_s$ 、排气温度、压缩过程指数  $n$ 、膨胀过程指数  $m$  以及气密性系数对阀隙流速  $C_v$ , 对间隙马赫数  $M$  的影响, 能更精确地计算出阀隙流速  $C_v$  和阀隙马赫数  $M$ 。

在精确气量法的推导过程中, 假定气阀弹簧力的影响可以忽略不计。实际上弹簧力的强弱必然会影响到进排气过程的持续时间, 如较强弹簧力会使进、排气过程时间缩短, 同时也会使流经气阀的气量 (容积) 减少, 因此弹簧力对阀隙流速和对马赫数的影响可以略去不计。

通过对比计算结果的分析, 表明: 相对余隙容积越大, 压比越高, 精确气量法和全行程容积法计算出的间隙平均流速  $C_v$ 、阀隙平均马赫数  $M$  结果相差越大, 这是必然结果。

参考文献:

- [1] 林梅. 压缩机环状阀原理 [M]. 化学工业出版社, 1982.
- [2] 郁永章. 活塞式压缩机 [M]. 机械工业出版社, 1982.