

# Cool-Tech™变频技术在无霜冰箱上的应用 (一)

## Application of Cool-Tech™ frequency conversion technology on frost free refrigerator

戴良伟 张斌

DAI Liangwei ZHANG Bin

杭州士腾科技有限公司 浙江杭州 310030

Hangzhou System Technology Co.,Ltd. Hangzhou 310030

### 摘要

分析对比了正弦波FOC驱动与传统方波驱动的工作原理及优缺点。从软件算法及硬件损耗两个角度,提出了一种全新的Cool-Tech™变频驱动技术。通过试验验证,基于Cool-Tech™变频驱动技术的变频器板匹配协同,能够实现不更换其他部件的情况下,提高压缩机运行COP值,提高了转速稳定度,降低无霜冰箱整机耗电量。

### 关键词

Cool-Tech™;变频压缩机;转矩补偿;功耗;无霜冰箱

### Abstract

The working principle, advantages and disadvantages of sine wave FOC driving and traditional square wave driving are analyzed and compared. A new Cool-Tech™ inverter technology is proposed from two aspects of software algorithm and hardware loss. Through the experimental verification, Inverter board based on Cool-Tech™ frequency conversion technology can improve the COP value and speed stability of inverter compressor, reduce the power consumption of frost-free refrigerator without changing any other components.

### Keywords

Cool-Tech™; Inverter compressor; Torque compensation; Power consumption; Frost-free refrigerator

## 1 引言

近两年,随着冰箱品牌的大力推广和国家新版能效标准的实施,变频技术已经从冰箱的一个卖点成为冰箱行业的主要趋势,并开始冰箱市场中占据主导地位。同时,在消费升级的大潮下,冰箱的产品结构发生了明显的变化,主要表现为风冷无霜、大容量、变频、高效节能产品持续快速增长。

GB 12021.2-2015《家用电冰箱耗电量限定值及能效等级》强制性能效国家标准(以下简称2015版能效标准)已于2016年10月1日正式实施。相比于2008版能效标准,在2015版能效标准中,一台无霜冰箱如需达到一级能效等级,产品耗电量需下降30%~40%左右。

实验表明,目前在大容积的无霜冰箱上,采用COP值为1.8~1.9的定频压缩机只能实现整机的二级能耗。而采用变频技术时,COP值为1.6~1.7的变频压缩机就能实现整机的二级能耗,COP值为1.8~1.9的变频压缩机即可以实现新标准下的一级能耗。因此,变频控制技术是目前最直接、最有

效的能耗提升方式。

变频冰箱压缩机一般采用直流无刷电机,减小了常规交流异步电机造成的励磁损失,同时也有效降低了噪音。变频冰箱压缩机的转速可以在1200RPM~4500RPM之间变化,转速的可调性大大提高了冰箱的制冷效率。制冷量的协同调节,使得冰箱所产生的制冷量可以与冰箱所需的负载很好地进行匹配,避免多余的能量消耗。当冰箱内温度较高时,压缩机可以运行于高速状态,从而实现快速降温。当冰箱内的温度接近设定温度时,压缩机可以运行于低速状态,减小冰箱内部的温度波动,避免压缩机的频繁启停。变频技术不仅可以起到节能的作用,而且可以延长压缩机的使用寿命。<sup>[1]</sup>

## 2 传统变频控制技术

目前在变频冰箱领域普遍采用的变频技术有正弦波FOC驱动和方波驱动。为了更好的应用两种控制技术,需要结合实际系统应用的要求,从算法层面分析两者的差异。

正弦波FOC驱动算法是在永磁同步电机的数学模型基础上,通过采集流过电机线UVW的三相电流,并结合坐标变换、观测器运算、PI调节以及SVPWM调制技术,产生电机运行所需的三相电压信号。正弦波FOC驱动算法的关键在于估算出准确的转子角度,将定子电流分解为励磁电流和转矩电流,达到系统最优控制效率。<sup>[2]</sup>

方波驱动算法是通过专用硬件电路并结合软件解析算法来实时采集电机三相绕组中的反电动势。根据定子三相绕组的反电动势过零点进行六步换相处理,产生电机运行所需的三相电压信号。

从软件的算法层面来看,正弦波驱动算法为了达到理想的控制性能,必须建立起准确的电机数学模型。在永磁同步电机数学模型的建立过程中,往往会假设转子永磁磁场在气隙空间为正弦分布、定子的电阻电感参数保持不变、不计

铁心涡流与磁滞等损耗。但是在目前的冰箱应用领域中,变频电机的反电动势波形一般介于正弦波与梯形波之间,这样就会在基于反电势为正弦波的算法模型中引入计算误差,降低设计系统的控制精度和运行效率。众所周知,每一款永磁同步电机都有其特定的电机参数。对于不同的永磁同步电机,其电机的相电阻 $R_s$ 、D轴电感 $L_d$ 、Q轴电感 $L_q$ 、反电动势系数 $K_e$ 、极对数均会有所不同。正弦波FOC驱动算法正是利用上述电机参数计算出转子永磁体的实际角度,控制过程对电机参数十分敏感。所以在采用正弦波FOC驱动时,任一款压缩机必须配合对应的软件程序才能将效率做到最优。正因为如此,在研发新款变频电机以及多款变频压缩机量产过程中,正弦波FOC驱动存在匹配繁琐,变频板管理困难的问题。

传统方波驱动算法由于采用硬件电路获得电机三相绕组的反电动势过零点,在计算过程中并未用到电机的各项参数。因此方波驱动算法针对不同的压缩机具备较好的兼容性,也就是说当变频压缩机的电机极对数保持一致,电机的相电阻、相电感和反电势系数发生变化时,方波控制算法能够进行自动匹配,使得电机一直运行于最大效率点。虽然传统方波算法的兼容性优势非常明显,但是由于其采用的是三相六步换向方式,在每次换向时刻均会产生转矩脉动。电机的电磁转矩脉动会影响电机运行的平稳性,降低电机的运行效率。目前变频压缩机基本都是往复式压缩机,采用曲柄连杆作为运行机构。在一个机械周期的运动过程中,压缩机会经历吸气、压缩、排气、膨胀的过程,系统负载处于不断变化的过程。尤其是在低速1200RPM阶段时,这种负载的不均衡现象更加明显。传统方波驱动算法应用于这种工况条件时,往往都会出现压缩机振动过大的问题。<sup>[3]</sup>

### 3 Cool-Tech™变频控制技术

变频压缩机为了实现越来越高的COP值,除了改进压缩机结构、采用高效电机外,还需要考虑变频板本身的功耗。在硬件电路中,变频板的功耗主要由电源电路功耗和开关电路功耗两部分组成。压缩机待机时功耗主要为电源电路功耗,而当压缩机运行时则大部分的损耗都来自于开关电路。为了降低变频板的损耗,可以通过降低开关管的PWM调制频率以及每个PWM周内产生动作的开关管数量。从硬件的驱动层面来看,正弦波FOC驱动算法为了实现定子电流的解耦,必须采用SVPWM调制技术。SVPWM调制是利用六个基本矢量来合成实际系统控制所需的电压矢量。

表1 正弦波FOC驱动、传统方波驱动和Cool-Tech™技术对比

对比内容	正弦波FOC驱动	传统方波驱动	Cool-Tech™技术
压缩机兼容性	差	好	好
噪音振动	好	一般	好
背压启动能力	好	差	好
驱动效率	一般	好	好
版本管理	难	容易	容易

因此在每个PWM周期内,六个功率管都会进行一次开通一次关断。相比较而言,基于Cool-Tech™技术的变频控制采用了改进型三相六步换向,在每个PWM周期内只需要有一个开关管进行开关动作,从而大大降低变频板的损耗。

基于Cool-Tech™技术的变频控制,结合了冰箱系统的实际工况条件,综合生产管理过程中的便利性,从芯片设计、变频板算法、压缩机及冰箱整机控制策略方面进行深度的优化改进。

在芯片设计层面上,为了实现转矩补偿功能,MCU必须拥有高速的ADC模块来完成对永磁电机转子位置的实时监测。SY8848是针对Cool-Tech™技术专门研发的高性能MCU,除具备上述高速的ADC功能外,其工作电流仅为7mA,大大降低了变频板的待机功耗。在Cool-Tech™技术中,其电路中的开关管采用小环二代工艺,有效降低开关管的 $R_{dson}$ ,降低米勒电容,增大软度因子,配合驱动电阻的选择达到系统最优的效率。

Cool-Tech™技术在变频板的软件算法上保持了传统方波驱动算法的兼容性好、损耗低的优点,并采用新型斩波方式抑制换相转矩的脉动。为了抑制压缩机低速运行时的振动和高速运行时的噪音,Cool-Tech™技术增加了转矩补偿算法。转矩补偿算法是在获取转子实时角度的基础上,通过电流前馈环节来弥补压缩机负载不均衡的特征。

为了更好地发挥Cool-Tech™技术的高效优势,在进行压缩机设计时,高COP值所对应的转速点可以做一些适应性的优化。同时冰箱整机对压缩机的化霜、转速控制策略也需做部分的调整改进。

### 4 Cool-Tech™技术实际应用效果

首先我们将基于Cool-Tech™技术的变频板用于驱动两款参数不同的永磁同步电机,测试其在各个转速段下的转速稳定性。电机1参数: $L_d=50\text{mH}$ 、 $L_q=88\text{mH}$ 、 $R_s=3.7\Omega$ 、 $K_e=27.5\text{Vrms/Krpm/P}$ 。电机2参数: $L_d=7.5\text{mH}$ 、 $L_q=71\text{mH}$ 、 $R_s=9.1\Omega$ 、 $K_e=21.5\text{Vrms/Krpm/P}$ 。试验证明Cool-Tech™技术在应用于不同参数的电机上时,1200RPM-4500RPM(下转51页)

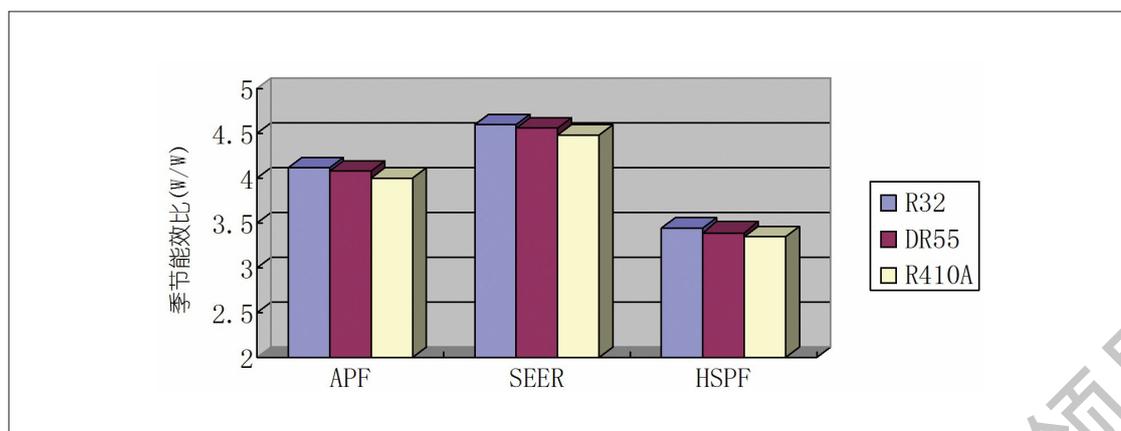


图2  
三种冷媒的季节  
能效对比

#### 4.3.4 低温制热能力对比

低温制热能力测试结果如表4所示, 对比R410A: 灌注量为1100克时, DR55需要升频约10Hz才能达到相近的能力; 灌注量为1250克时, DR55需要升频约6Hz才能达到相近的能力。对比R32: 灌注量为1100克时, DR55需要升频约14Hz才能达到相近的能力; 灌注量为1250克时, DR55需要升频约8Hz才能达到相近的能力。

#### 4.3.5 APF、SEER、HSPF对比

对比R410A冷媒: DR55的季节能效比略高, APF高0.070, SEER高0.084, HSPF高0.052; 对比R32冷媒: DR55的季节能效比略低, APF低0.045, SEER低0.035, HSPF低0.053。

对比R410A冷媒: 相同配置、能力, DR55额定测试点的频率降低约3Hz, 低温制热需提高约6Hz, 极限能力较差; 实测额定制冷能效比略高约0.15, 中间制冷、额定制热基本相当, 中间制热略低0.12左右, APF、SEER、HSPF略高0.05~0.08; 高压比R410A略低不到1公斤; 灌注量比R410A少150克。

对比R32冷媒: 相同配置、能力, DR55额定测试点的频率需提高3~5Hz, 低温制热频率需提高约8Hz, 极限能力较差; 额定能效比R32低0.15左右, 中间制冷高0.1, 中间制热基本相当, APF、SEER、HSPF略低0.05左右; 高压与R32基本相当(因DR55需要升频), 灌注量比R32多150克。

从以上数据来看, DR55混合制冷剂所表现出的特性最适用于制冷剂的直接切换, 无论是从压缩机或空调系统的角度而言都可最大程度地减少切换成本和产品的复杂性以及加快研发的进度。同时通过其他途径了解到, 从能效, 冷量, 运行范围以及油兼容性多方面综合来看其性能亦表现良好。可以预计不久的将来, DR55一定会成为空调等产品的主

导型冷媒。

## 5 结语

根据理论分析以及实测结果, 新冷媒DR55在成本、性能等方面都有一定的优势, 但是需要进一步改善提高单位容积冷媒的能力和极限能力。通过不断的尝试相信新冷媒DR55一定会有不错的表现, 应用在空调系统中。

#### 参考文献

- [1] 董天禄. 制冷剂的最新进展[J]. 制冷技术, 2010.
- [2] 刘卫华, 等. 制冷空调新技术及进展. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 肖学智, 周晓芳, 徐浩阳, 等. 低GWP 制冷剂研究现状综述[J]. 制冷技术, 2014.
- [4] GB/T 7725-2004 房间空气调节器[S].

(上接45页)的转速精度均在5RPM之内。

然后我们在量热仪上, 针对同一台变频压缩机, 将采用Cool-Tech™技术的变频板与原有的正弦波变频板进行COP对比测试, 试验证明采用Cool-Tech™技术的变频板拥有更高的COP值。

最后我们选取一台580升智能冰箱, 将采用Cool-Tech™技术的变频板与原有的正弦波变频板进行整机耗电量对比测试, 试验证明采用Cool-Tech™技术的变频板对整机耗电量的降低有明显的作。

## 5 结论

本文结合家用风冷无霜普及和2015版新能耗标准实施的大背景下, 提出一种Cool-Tech™变频技术来改善整机的节能效果, 并对压缩机噪音及寿命有正面改善效果。

#### 参考文献

- [1] 王维, 王瑞, 秦宗民. 采用变频压缩机的无霜冰箱系统性能研究[J]. 制冷学报, 2013(12):90-95.
- [2] 谢宝昌, 任承德. 电机的DSP控制技术及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [3] 夏长亮. 无刷直流电机控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2009.