

〈制冷技术〉

## 基于 FOC 及 PMSM 的斯特林制冷机控制系统

李飞艳, 陈晓屏, 陈 军, 黄 伟, 赵玉琼, 唐天敏

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 现有旋转式斯特林制冷机控制器使用的是基于 PID 控制的无刷直流电机, 存在控温波动较大、可靠性较低等问题。基于磁场定向控制的永磁同步电机控制性能卓越、运行平稳、损耗低, 将其作为提高斯特林制冷机性能的有效途径。根据这一方案进行硬件及软件设计, 并给出实际电路测试结果。实验表明基于 FOC 及 PMSM 的斯特林制冷机控制系统可以作为提高斯特林制冷机性能的措施和途径。

**关键词:** 旋转式斯特林制冷机; 磁场定向控制; 永磁同步电机; 主控芯片

中图分类号: TB651

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2014)03-0229-05

## Control System of Stirling Cryocooler Based on FOC and PMSM

LI Fei-yan, CHEN Xiao-pin, CHEN Jun, HUANG Wei, ZHAO Yu-qiong, TANG Tian-min

(*Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China*)

**Abstract:** Today's rotary Stirling cryocooler controller is based on the PID control of brushless DC motor, which has issues such as control temperature fluctuation, lower reliability and so on. Permanent Magnet Synchronous Motor under Field Oriented Control has excellent control performance, smooth operation and low energy consumption. It is an effective way to improve Stirling cryocooler performance. Hardware and software are designed for this program. And practical circuit test results are given. Experiments show control systems based on FOC and PMSM can improve Stirling cryocooler performance.

**Key words:** rotary Stirling cryocooler, field oriented control, permanent magnet synchronous motor, main control chip

### 0 引言

近年来, 斯特林制冷机在军事和空间技术领域得到了极大的发展。斯特林制冷机具有高效率、快速制冷、小尺寸、重量轻、低功耗和高可靠性的优点, 因此被广泛地应用于红外探测器和高温超导领域<sup>[1]</sup>。随着斯特林制冷机的广泛应用, 对其驱动控制器的要求也越来越高。

目前, 旋转式斯特林制冷机(以下简称制冷机)控制器使用的是基于比例、积分、微分(Proportion、Integral、Derivation, PID)控制的无刷直流电机(Brushless Direct Current Motor, BLDC)。控制方式简单, 精度不高, 易受外界环境因素影响。BLDC 电机不带换向器, 通过转子磁体生成旋转磁通, 用霍尔传

感器确定转子的位置, 采用电子方式给电机换相。对其控制是以一个六步的控制过程来驱动定子, 而这个控制过程会使生成的转矩产生振荡。所以, 现在使用的控制器在环境恶劣的情况下, 存在控温波动较大、可靠性较低的问题。

近 20 年来, 随着电机控制理论、磁性材料和电力电子技术快速发展, 永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)的控制技术及性能也得到不断的提升。PMSM 具有体积小, 损耗低, 效率高等优点。磁场定向控制算法(Field Oriented Control, FOC)是当前交流电机的高性能的控制策略。采用 FOC 算法的 PMSM 控制性能卓越、运行平稳(转矩脉动小)、损耗低, 在很多高性能、高精度伺服系统和其他一些领域已得到推广及使用<sup>[2]</sup>。本文将基于

FOC 及 PMSM 的斯特林制冷机控制系统作为提高制冷机性能的有效措施和途径。

1 系统控制原理

1.1 系统控制原理

基于 FOC 及 PMSM 的斯特林制冷机控制系统的核心为转速控制，采用 FOC 算法。算法的主要思想是通过坐标变换（Clarke 变换及逆变换，Park 变换及逆变换）将用作制冷机驱动部件的 PMSM 解耦简化成磁链和转矩联合控制。坐标变换后，PMSM 的定子电流被分解成励磁电流分量和转矩电流分量，分别产生磁场和产生转矩，可单独控制。当定子励磁电流使得转子磁通保持恒定时，转子的转矩将正比于转矩电流。此时将交流电机模拟成直流电机，可获得与直流电机一样良好的动态调速特性<sup>[3]</sup>。系统使用采样电阻采集 3 相定子电流信号、编码器采集位置与速度信号来控制电机转速。同时，冷指顶端的温度传感器向控制板反馈温度信号，监控制冷机冷指温度。冷指未达到设定温度时，制冷机全速运行；当达到后，控制板自动调节驱动信号使制冷机运行在一个较低的频率保持冷指温度稳定，从而实现制冷机控制系统温度闭环控制的目标。具体实现步骤如图 1 所示。

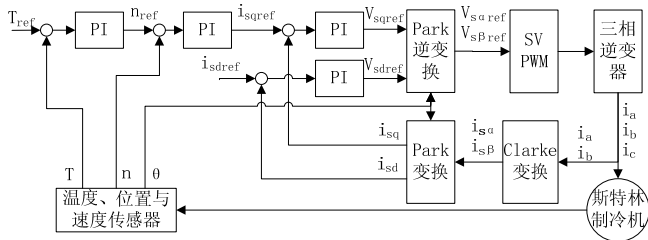


图 1 系统控制原理框图

Fig.1 Control principle diagram of system

1.1.1 Clarke 变换

将三相坐标系( $i_a, i_b, i_c$ )变换成二相( $\alpha, \beta$ )坐标系，即为 Clarke 变换。其变换关系如图 2 及公式(1)<sup>[4]</sup>：

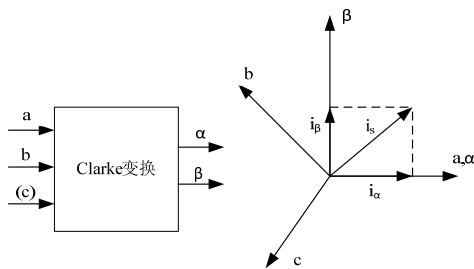


图 2 Clarke 变换

Fig.2 Clarke transform

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{1}$$

1.1.2 Park 变换

将静止的二相坐标系( $\alpha, \beta$ )变换成旋转坐标系( $d, q$ )，即为 Park 变换。这是基于 FOC 控制系统中最核心的部分。其变换关系如图 3 及公式(2)所示<sup>[4]</sup>：

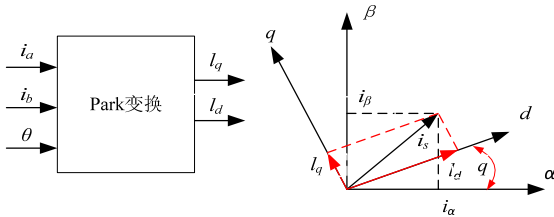


图 3 Park 变换

Fig.3 Park transform

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{2}$$

1.2 设计依据及技术指标

为了保证符合使用要求并保证质量，基于 FOC 及 PMSM 的斯特林制冷机控制系统的开发研制有必要根据需求认真论证指标，确定要求，统筹规范。根据斯特林制冷机使用系统及使用环境，提出以下技术指标：

- 输入电压：18 V~32 V（额定电压为 24 V）
- 二极管偏流：500  $\mu$ A  $\pm$  10  $\mu$ A
- 最大输出功率：60 W
- 控温精度： $\pm$ 1 K（环境温度： $-40^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$ ）

2 系统结构

2.1 硬件结构

完整的基于 FOC 及 PMSM 的斯特林制冷机控制系统由控制板及功率驱动板构成。控制板包括主控模块，信号检测模块，通信接口等组成，功率驱动板包括功率驱动电路（智能功率模块，Intelligent Power Module, IPM）、开关电路等组成。系统结构及信号流向如图 4 所示。其中，功率驱动电路主要用来给 PMSM 提供交变电压驱动制冷机运行；开关电路为电源，为功率桥供电及给 IC 提供工作电压。制冷机的运行实时参数如冷指温度、电机相电压电流以及转子的速度和位置等信号被检测电路采样，再进行 A/D 转换和系数调整之后和参考输入一同送入控制模块形成一个闭环。外部指令从串行通信接口送入主控模

块。主控芯片的内核进行 Clarke/Park 变换及逆变换，将转子参量转换为磁场的模型，给出磁场的方向角 $\theta$ ，进行比例/积分/微分、产生空间矢量脉宽调制（Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM）等运算。主控模块产生脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）信号经功率驱动电路产生三相交变电压供给电机。主控芯片中有一个“死区”控制器，它可以用来防止功率桥中上下两组开关在产生 SVPWM 进行切换时存在同时导通状态，避免大电流造成破坏<sup>[2]</sup>。

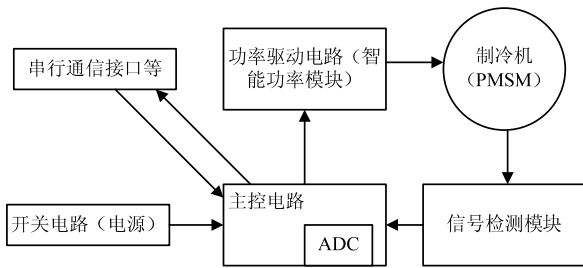


图4 基于 FOC 和 PMSM 斯特林制冷机控制系统结构

Fig.4 Layout of Stirling cryocooler control system based on FOC and PMSM

### 2.1.1 主控电路

制冷机运行过程中，信号检测电路检测 PMSM 定子相电流、转子转速、制冷机冷指温度，估算制冷机当前的状态；实现对制冷机运行频率、冷指温度双闭环调速；实时控制制冷机带热负载条件下运行良好，都要求主控芯片具有较高的数据运算能力和对各模块较强的协调控制能力。这里选用 ST 公司的 STM32F103ZET6 作为主控芯片。它是 32 位微控制器，采用 ARM 公司高性能的“Cortex-M3”内核，512 K 字节闪存，最高工作频率 72 MHz，低功耗，集成度高，具有较强的计算能力及丰富的片上外设，所以足以满足控制任务需要。电机控制配套软件库 V3.0 包含电机矢量控制函数库、永磁同步电机 FOC 及弱磁控制算法，使制冷机控制系统设计大大简化<sup>[3]</sup>。

### 2.1.2 功率驱动电路

功率驱动电路主要负责将 PWM 信号放大后驱动功率 MOS 管工作。这里选用智能功率模块 FSAM20SH60A 作为功率驱动电路核心。FSAM20SH60A 集成了高速低功耗的绝缘栅双极型晶

体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）模块、优选门级驱动和过 / 欠电压电流、温度检测等保护电路，简化了控制系统功率驱动单元的设计，提高了控制系统的可靠性<sup>[3]</sup>。

功率驱动电路分为两部分。首先是 PWM 信号处理部分，如图 5 所示。主控电路通过相应的算法输出 6 路 PWM 信号 TIM1\_CH1、TIM1\_CH1N、TIM1\_CH2、TIM1\_CH2N、TIM1\_CH3、TIM1\_CH3N，经光耦 TLP2630 隔离放大处理后输出信号 PWM-UH、PWM-UL、PWM-VH、PWM-VL、PWM-WH、PWM-WL。然后是 IPM 功率驱动部分，如图 6 所示。PWM 输入 IPM 控制其内部逆变桥的导通与关断，输出三相功率信号 M-U、M-V、M-W 控制 PMSM 平稳旋转从而驱动制冷机平稳运行。

### 2.1.3 开关电路

开关电路为系统各部分提供工作电源。外部输入 24 V 恒压源，经过多级转换分别输出工作电压：15 V（模拟部分）、5 V（TTL）、3.3 V（主控芯片），原理框图如图 7 所示。

从恒压源过来的 24 V 电压，首先经过功率管 IN5817 和稳压管 LM7815 将电压稳到 15 V，再经 LM7805 转换成 5 V 电压，最后经过 AMS1117-3.3V 得到主控芯片使用的 3.3 V 电源。模拟地和数字地分开，各个分系统的地在电源供电处相接到一点入地。

### 2.2 软件结构

软件是斯特林制冷机控制系统的指挥部，可以通过编程满足不同的工作要求和性能要求。本系统要求包括实现各环境温度下（包括恶劣环境）制冷机正常启动，运行平稳，温度控制准确稳定和参数可编程。开启制冷机时，采用缓启动的方式。制冷机工作过程中，如发生意外导致运行参数异常，可重置运行参数，恢复制冷机平稳运行状态。PWM 波和方向控制信号由主控芯片生成，通过串行通信传送制冷机的运行参数（如制冷机运行转速，冷指温度和电机相电流等），在主程序中对这些参数重新进行计算变换，实现对制冷机的运行频率、相位等参数的调控<sup>[2]</sup>。运行参数的采集在 A/D 转换子程序中完成。

控制系统的主程序流程如图 8 所示<sup>[4]</sup>。

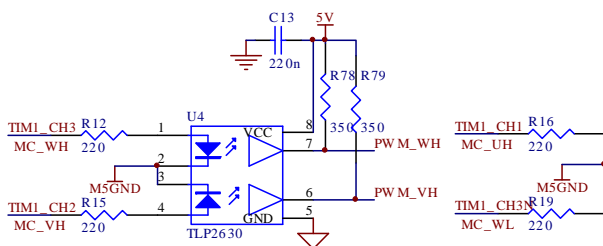


图5 PWM 信号处理部分

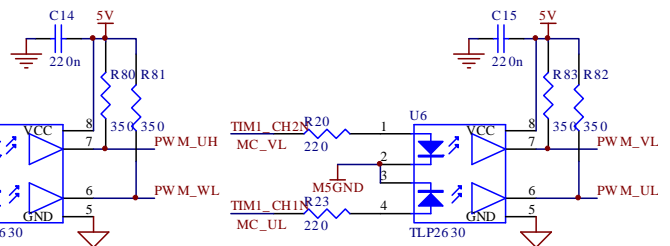


Fig.5 PWM signal processing

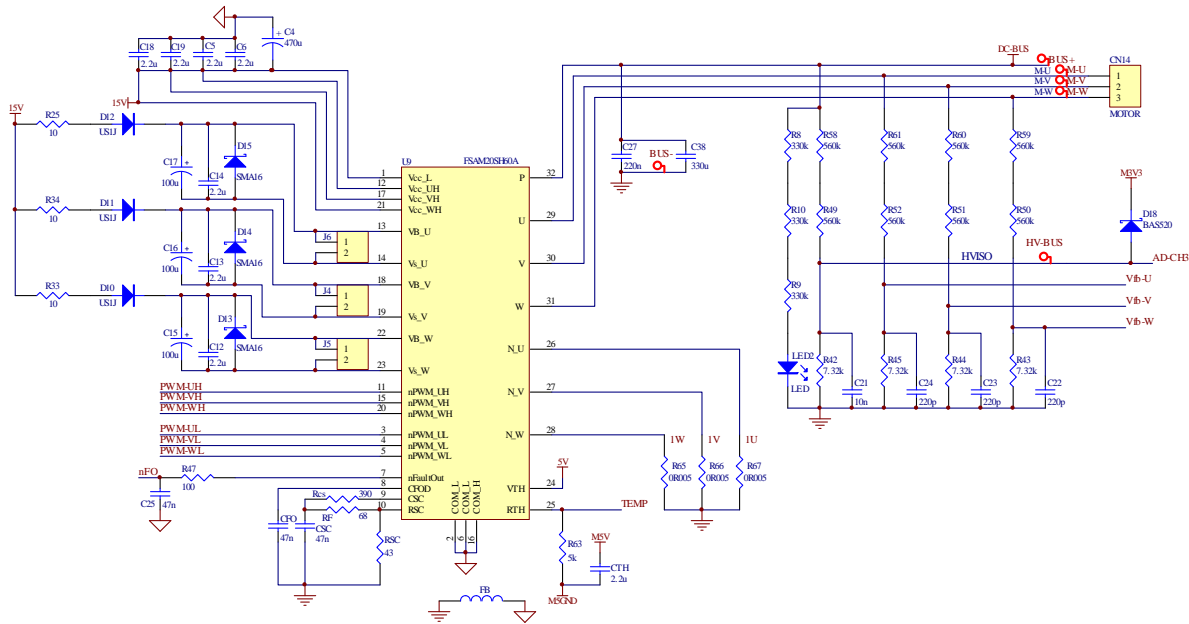


图 6 IPM 功率驱动部分 Fig.6 IPM power drive

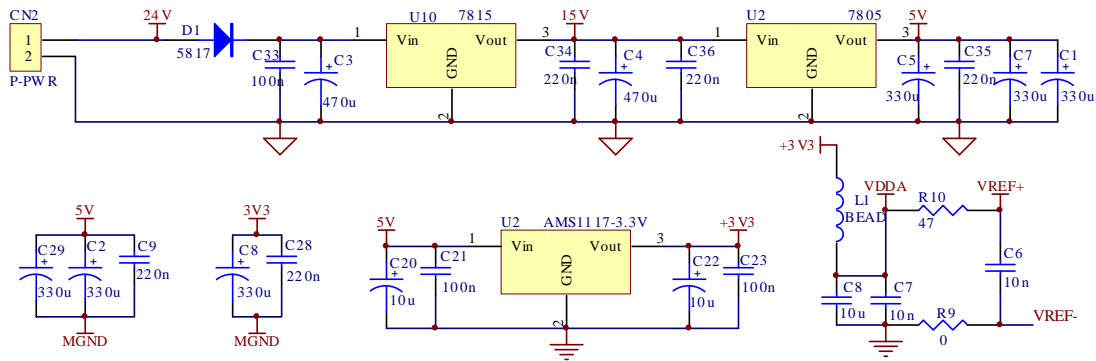


图 7 开关输入电路（电源） Fig.7 Switch input circuit (power)

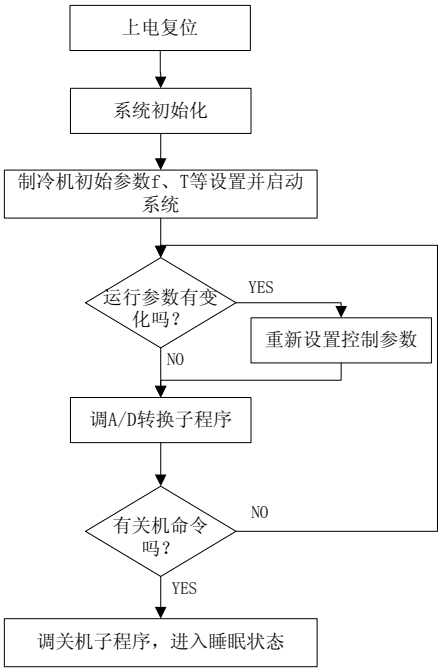


图 8 系统的主程序流程 Fig.8 Main program diagram of system

3 实验结果

3.1 实际达到的性能

使用本系统驱动某型号旋转式斯特林制冷机。将系统电路板连接好，采用恒压源输出直流 24 V。个人计算机作为上位机通过串口仿真器与控制板相连，在软件 IAR Embedded Workbench 环境下编译调试程序并下载到主控芯片 STM32-F103ZET6 中。设定 PWM 输出为 14 kHz，占空比为 50%，经调试，PI 调节参数最终取值  $K_p=5$ ， $K_i=700$ 。基于 FOC 及 PMSM 的斯特林制冷机控制系统实际达到的性能指标如表 1 所示。

3.2 系统输出驱动信号波形

在给定转速为 3200 r/min、制冷机运转电流为 0.9 A 的情况下用示波器观察控制系统的输出。图 9 为系统主控芯片 PWM 输出接口测得的没有经过滤波的调制波形。图 10 为 IPM 输出给 PMSM 的相电压的波形，在稳态状态下为马鞍形波形。图 11 为 RC 低通滤波以后在稳态状态下相电流的波形，波形接近正弦波。



表1    实际达到的性能  
Table1  The actual performance achieved

项目名称	技术指标	实测测试值及说明
输入电压	18V~32V	实际输入电压18V~32V，制冷机均能正常工作。
二极管偏流	500μA±10μA	启动斯特林制冷机，二极管偏流为508μA；随着制冷机的运行，偏流数值缓慢降低；至制冷机控温时，二极管偏流稳定在498.4μA~498.5μA。
输出功率	0~60W	符合指标
控温精度	±1K	实际控温精度：±1K
环境温度	-40℃~+70℃	电路设计时选用元器件工作温度为-40℃~+125℃或-55℃~+125℃；加工工艺符合军品要求；环境试验采取低温-40±2℃，常温23℃±2℃及高温+70±2℃；上述条件下，电路及制冷机均能正常工作。

从输出的测试波形上可以看出：本文所设计的基于 FOC 及 PMSM 的斯特林制冷机控制系统输出的驱动波形为连续的正弦波，在矢量控制方式下，转矩电流分量与转子磁场方向始终正交，转矩脉动很小，制冷机运行平稳。

3.3 系统损耗

制冷机使用现有无刷直流电机及其驱动控制器驱动，启动电流 0.85 A，最大电流 1.4 A；使用本系统驱动控制，启动电流 0.83 A，最大电流 1.23 A。排除装配因素等可能影响制冷机性能的因素，可以看出本控制系统损耗较低。

4 总结

基于 FOC 及 PMSM 的斯特林制冷机控制系统通过获得制冷机电机相电流及转子磁场的实时方向经过坐标变换和比例积分微分环节实现电机的转速控制；通过获得制冷机冷指温度与设定温度参考值进行比较处理计算输出 PWM 信号实现制冷机的闭环控制。实验表明基于 FOC 及 PMSM 的斯特林制冷机控制系统控制性能优良,可以作为提高制冷机性能的有效措施和途径。

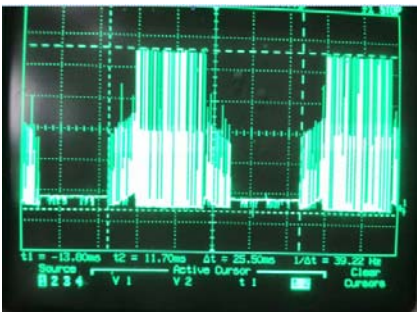


图 10 电机相电压波形

Fig.10 Phase voltage waveform of motor

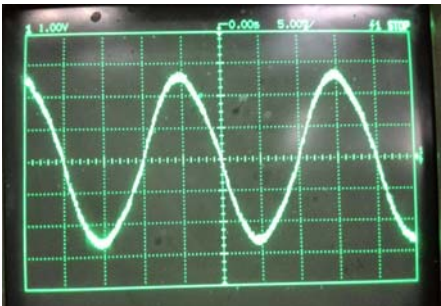


图 11 电机相电流波形

Fig.11 Phase current waveform of motor

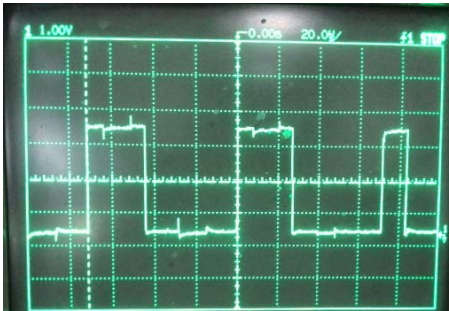


图 9 PWM 调制波形

Fig.9 PWM modulation waveform

参考文献：

[1] 胡白楠, 陈晓屏, 夏明. 微型斯特林制冷机的进展[J]. 红外技术, 2006, 28(12): 1-2.

[2] 欧阳磊. 基于 FOC 的交流电机控制系统研究与开发[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.

[3] 武玉婷, 张娜. 基于 STM32 的交流永磁同步电机驱动器设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2011: 2-3.

[4] Jorge Zambada. PMSM 电机的无传感器磁场定向控制[DB]. 2007. <http://wenku.baidu.com/view/97f0221a964bcf84b9d57bc5.html>.