

〈制冷技术〉

一款基于 DSP 的线性斯特林制冷机驱动控制电路设计

唐天敏, 陈晓屏, 陈 军, 赵玉琼, 聂喜亮, 李飞艳
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 通过对斯特林制冷机驱动控制电路的设计计算和器件优选, 设计了一款以 DSP 为核心, 软硬件相结合, 可实现功率和频率连续可调的高精度控制电路。介绍了电路的设计思想、电路组成及功能, 以及实际电路的测试结果。电路具有较宽的功率和频率调节范围, 可满足现阶段大部分线性斯特林制冷机驱动控制的需求。

关键词: 线性斯特林制冷机; 控制器; 正弦脉宽; 数字信号处理器

中图分类号: TB651 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2014)02-0152-04

A DSP-based Driver and Control Circuit Design for the Linear Stirling Cooler

TANG Tian-min, CHEN Xiao-ping, CHEN Jun, ZHAO Yu-qiong, NIE Xi-liang, LI Fei-yan
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: By calculation and device optimization, a DSP as the core, hardware and software combination, a high-precision control circuit is designed, which achieves power and frequency continuously adjustable. Design, combination and functions of the circuit, as well as the actual test results, are described in this paper. With a wide range of power and frequency regulation, it can meet most of the linear stirling coolers' driving and control needs at the present stage.

Key words: linear stirling cooler, controller, SPWM, DSP

0 引言

线性斯特林制冷机由于采用压缩机与膨胀机分离的结构方式, 冷指远离了振动较大的压缩机端, 振动对红外探测器的影响减小, 并且其采用双活塞对置方式进行驱动, 使得压缩机动子的动量得到平衡, 结构简化, 噪声和振动也大幅减小, 从而提高了制冷机的可靠性^[1-3]。而随着大面阵红外焦平面探测器的发展, 红外热成像系统对大制冷量的线性斯特林制冷机需求增加, 这加速推动了大功率线性斯特林制冷机驱动控制电路的发展^[4]。

目前国内已有的线性斯特林制冷机驱动控制电路基本采用单片机进行控制, 存在程序编写较复杂, 响应适时性和计算处理能力不理想等特点^[5]。而 DSP 具有精度高、速度快、集成度高等特点, 且其强大的事件处理能力, 可通过较简单的程序就实现

SPWM 控制信号的输出且参数修改灵活方便; 基于软件就可实现的动态 PID 控制, 不仅提高了闭环控制的实时性和准确性, 且减小电路体积。

本文中基于 DSP 的线性斯特林制冷机驱动控制电路, 以 DSP 作为控制核心, 结合外围硬件电路, 可实现输出电压、驱动功率、工作频率和控温点等的在线动态调节。具有控制方式灵活的特点, 可通过修改程序或控制参数适用于不同工作频率和驱动功率的直线式斯特林制冷机。电路的最大输出功率超过 150 W, 不仅能驱动小功率线性斯特林制冷机, 也能够驱动较大功率的斯特林制冷机, 具有更宽的运用范围。

1 电路的硬件设计

本文中介绍的这款线性斯特林制冷机驱动控制器的功能即是通过控制模块、驱动模块和温度反馈

收稿日期: 2013-10-29; 修订日期: 2013-12-07.

作者简介: 唐天敏 (1982-), 女, 云南丽江人, 工程师, 2005 年获广西大学计算机与电子信息工程专业学士学位, 现在物理研究所光学工程专业攻读硕士学位。研究方向或研究领域是斯特林制冷机测试与控制。

等实现线性斯特林制冷机的驱动和温度控制。电路的工作原理是采用交流电机的变频调速原理，由 DSP 控制程序产生 SPWM 波，通过电压提升和功率转换后生成两路功率驱动波，交替的通过直线电机的两组对置线圈，在线圈中产生同频反相的电磁推力，带动制冷机做功^[6-7]。当制冷机到达预定温度前，制冷机可以最大功率全速运转，同时温度采集和处理电路实时将制冷机的温度信号送入 DSP，DSP 根据目前的工作阶段对控制信号进行动态调整，当制冷温度到达预置温度后，DSP 会进行动态 PID 调节^[8-9]，控制制冷机的运动状态以使温度稳定在预置温度点。

电路主要由电源电路、DSP 主控电路（图中用 DSP 芯片型号 TMS320F2812 指代）、功率变换电路、温度信号处理电路和接口电路等组成。

电路原理框图如图 1 所示。

除考虑电路功能设计外，还必须考虑电路的可靠性，抗干扰性，使用方便性，体积及电路的专用性和可移植性等。在功率设计方面，考虑到直流到交流的转换效率和直线电机的内阻损耗，通常为降额设计。若以电路转换效率 75%（通常为 70%~85%）^[10]来进行计算，若要求输出功率达到 150 W，则输入功率需达到 200 W，以 24 V 直流电源供电，理论上电流将达到 8.3 A 以上，但是实际电路存在芯片电源损耗和电路热损耗，以及受电子元器件功率限制，输出不可能达到期望值。所以只有通过提高电压，减小电流，以减小电路热损耗的办法实现大功率输出。实际应用中输出功率是根据直线电机的额定功率通过 DSP 程序进行输出控制的，改变调制制度即改变了输出电压的大小，也即改变了输出功率的大小。为了实现电路体积的小型化和应用的灵活性，电路设计中分离元件和集成芯片的结合使用，电子元器件全部采用 SMD 封装，以实现电路外部结构上的最优化设计；并通过增加内部电源模块，

实现单一电源供电，使得电路的使用更加方便；鲁棒设计和板上输出滤波技术使得电路更加可靠稳定，具有较强的抗干扰能力。

1.1 控制模块

本文中控制模块由 DSP 主控电路组成，是整个电路的核心部分。在电路的设计中采用基于 DSP（数字信号处理）的在线可编程技术，在硬件电路设计定型的基础上通过修改程序来满足不同的使用需求，兼顾实现电路的专用性和较好的可移植性。采用以 TI 公司的 TMS320F2812 芯片为核心的数字控制和变换驱动模式，控制方式灵活高效；利用 DSP 快速高效的处理能力，对制冷机的工作频率、驱动电压以及控温电压进行精确控制；DSP 接收制冷机的温度信号、环境温度信号及串口输入信号，产生 SPWM 控制信号和电源电路控制信号。采用串行接口可实现 DSP 芯片与计算机或系统平台的实时通讯，进行控制参数的读出和设置，极大方便了控制参数的输入和显示。DSP 技术的应用还可实现电路 DC 输入随 AC 输出实时变化以确保输出的稳定性。电路中精确 A/D 转换模块电路的设计，不仅可实现温度信号的监测，使得控温准确高效，也可实现其它输入输出信号的监测和控制，增加电路的可控性；采用 24 位的外围 A/D 转换器，实现温度信号的高精度采集和控制。

为保证 DSP 芯片的正常工作，至少需要给芯片提供 3.3 V 的 I/O 口驱动电压和 1.9 V 的内核电压，电路中选用两片 TPSXXX 产生 3.3 V 和 1.9 V 电压，并对两个电源上电顺序进行了控制。为得到稳定的时钟源，电路中采用了有源外部晶振。

1.2 电源电路

电路采用单一电源供电，为满足电路中各部分不同的电压需求，对输入电压进行多级变换，分别产生不同伏值的电压提供给各类集成 IC 使用。且对模拟地和数字地采用磁珠进行隔离，以减小干扰。

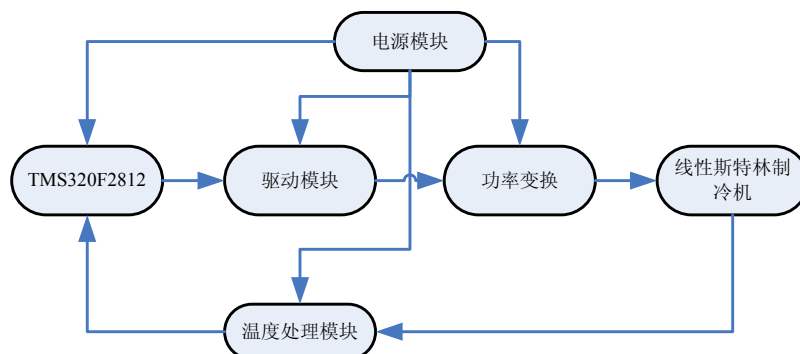


图 1 线性斯特林制冷机驱动控制原理框图

Fig.1 Block diagram of driver and control electronics for linear stirling cooler

且电源芯片的工作状态可根据 DSP 控制芯片发送的控制信号进行开启和关闭,按照所需的供电顺序进行上电工作。

1.3 驱动变换电路

从 DSP 送出的 SPWM 控制信号电压为 3.3 V,不能直接驱动功率 MOS 管,需经过驱动模块增强驱动能力。驱动芯片选用 IR 公司的全桥驱动芯片,芯片带有输出使能控制端 SD,当 SD 为低电平时,允许输出;当 SD 为高电平时,禁止输出。如图 2 所示,将 4 路 PWM 波作为输入信号控制 SD 的状态:若上下桥臂直通,则驱动芯片的输出被关断,避免电路出现大电流。

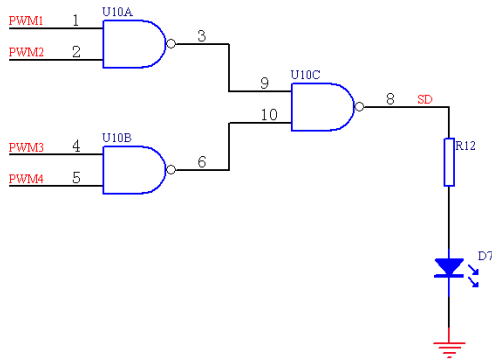


图 2 输出过流保护电路

Fig.2 Output overcurrent protection circuit

SPWM 控制信号通过驱动芯片提升负载驱动能力后控制 4 个 IGBT 管的导通或关断。经过 IGBT 的信号仍为正弦脉宽信号,需要经过滤波处理才能变为正弦信号。如图 3 所示,当 Q1 和 Q4 导通时,电流由电机线圈的 A 端流入, B 端流出;当 Q2 和 Q3 导通时,电流由电机线圈的 B 端流入, A 端流出,如此便形成了一个完整的信号控制。

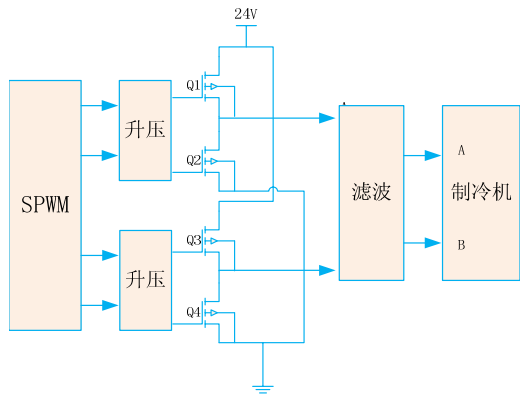


图 3 IGBT 电路 Fig.3 IGBT circuit

1.4 温度信号处理电路

温度信号处理电路的功能是实现制冷机冷端温度的采集,并将该电压信号转换为数字信号送入

DSP 与预置的温度信号进行比较, DSP 根据比较结果调整 SPWM 的输出,实现线性斯特林制冷机的温度闭环控制。为消除环境温度的影响,在电路中增加了一个环境温度传感器, DSP 将根据环境温度情况进行补偿控制。

由于 DSP 自带的 12 位 A/D 有效转换精度为 10 位,若参考电压为 2.5 V,则采样精度约为 2.5 mV,转化为温度 K 值超过 1 K,显然不足以满足高精度控制的需求。所以电路选用了一款 8 通道 24 位的 A/D 转换器,其有效的转换精度可达到 22 位,理论上可达到 0.1 K 以上的控制精度,但由于器件匹配,参考电压稳定性及测温二极管灵敏度等原因,本案中实际可达到的控温精度为 0.3 K 左右。图 4 为温度信号采样和转换电路。

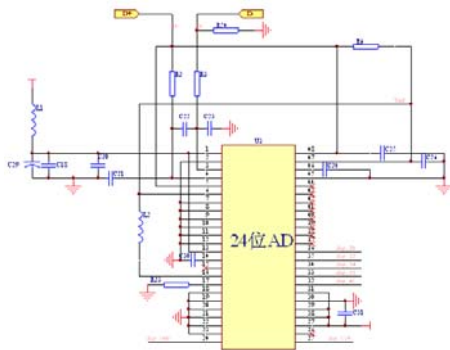


图 4 温度信号采样和转换电路

Fig.4 Temperature signal sampling and conversion circuits

2 软件设计

该电路的软件设计部分包括 SPWM 波的生成、动态 PID 设计和串口输入输出控制设计。SPWM 波用于控制逆变器,决定了制冷机的运转方式和运转速度,但具体需要生成什么样的 SPWM 波则由 PID 设计和串口输入参数联合作用进行控制。

SPWM 波的产生主要通过 DSP 的事件管理模块、通用定时器和 GPIO 模块。SPWM 波的生成是将 PWM1~PWM4 引脚设置为功能引脚,使能 DSP 事件管理器的比较单元,不断比较定时器 T1 与比较寄存器 CMPR1 和 CMPR2 中值,直至 T1 产生周期中断, DSP 输出两对相位相差 180°的 PWM 波,每对 PWM 波的幅值相同、极性相反。主程序设计中的载波比 N 和信号频率固定,则定时器周期寄存器 T1PR 值固定,生成 SPWM 正弦波的 CMPR1 的

值为 $\frac{T1PR}{2} \left[1 + M \sin\left(\frac{2k\pi}{N}\right) \right]$ (M 为调制度, $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$)。当 $T1CNT = T1PR$ 时中断,并改变

CMPR1 和 CMPR2 的值,这样便可输出 SPWM。如图 5 所示为 SPWM 控制信号程序流程。

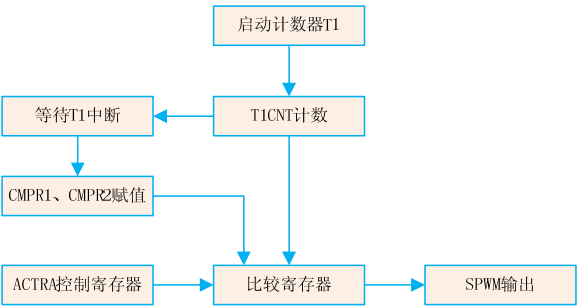


图 5 SPWM 控制信号程序流程

Fig.5 SPWM control signals program flow

在实际应用中,制冷机需要进行温度闭环控制,这就需要引入动态 PID 调节,根据输入参数和制冷机冷端实时温度进行 SPWM 信号的动态调节输出。PID 控制中积分的目的主要是消除静差和提高精度,但在电压变化幅度较大时,如启动、预控和结束时,瞬时输出偏差较大,造成 PID 运算的积分积累,从而引起较大的超调,导致系统的振荡。但在制冷机的闭环控制系统中,PID 控制主要对控温阶段进行动态调节,电压变化幅度较小,系统相对较稳定。控制偏差 $e(k)$ 为当前电机速率与目标速率之差,控制量为输出脉冲的占空比,即以 SPWM 方式控制电机速率。在控温以前电机保持全速运行,当将达到或达到控温点后进入 PID 控制子程序,DSP 将根据实时采样温度和预设温度进行偏差调整,使得采样温度和预设温度值尽量逼近,最终达到平衡。具体程序流程如图 6 所示。

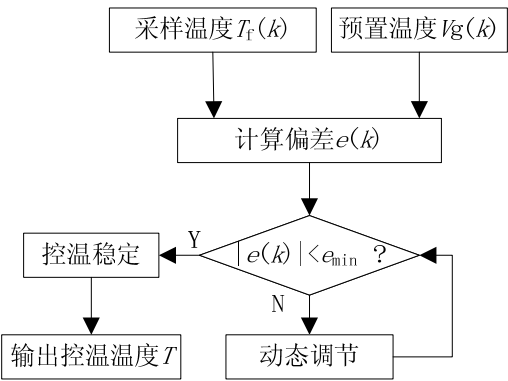


图 6 PID 调节程序流程

Fig.6 PID adjustment program flow

串口通讯利用 Matlab GUI 实现,利用 Matlab 内置函数建立串行通讯窗口,可直接与 DSP 的 SCI 进行通讯,实现输出功率、工作频率和制冷温度等参数的输入和输出,建立起良好的人机交互接口。

3 实验结果

3.1 输出频率可调

使用原来的驱动控制器,制冷机只能在固定的频率点工作。使用本案中基于 DSP 为核心的驱动控制电路,可实现 30~100 HZ 范围内的频率连续可调。

3.2 输出功率可调

本文中这款基于 DSP 的数字化驱动控制器另一个主要优点是驱动功率连续可调,可调范围为 60~150 W。在电路进行带负载测试时,在电路的输出端与制冷机输入端之间接入交流测试功率计,可测得电路的实际输出功率。当制冷机的最大驱动功率低于 60 W 时,采用 24 V 直流供电即可满足使用要求;当功率需求大于 60 W 时,采用 48 V 直流供电,可根据需要在 60~150 W 之间进行调节。当然若制冷机电机线圈的阻抗很小,允许通过的电流较大,及电机的转换效率较高,则在 24 V 的直流供电条件下也可获得大于 60 W 的驱动功率。

4 结论

本文重点阐述了一款基于 DSP 的微型线性斯特林制冷机驱动控制电路的研制和硬件设计。高速 DSP 芯片和高精度 A/D 转换器的选用,以及全表贴封装元件的使用,使得电路体积较小,控制灵活,精度高。利用 DSP 强大的运算和控制功能,控温精度可达到 0.3 K 以上,可以通过修改程序或计算机串口修改参数,方便的实现频率和功率的连续调节,频率可调范围为 30~100 HZ。高性能驱动芯片和大功率功率管的使用,使得驱动功率可在 60~150 W 之间进行调节。这款驱动控制电路灵活的控制方式和强大的驱动能力,使之可满足现阶段大部分线性斯特林制冷机驱动控制的需求。

参考文献:

[1] 温建国, 刘建东, 杜敬良, 等. 大功率线性斯特林制冷机驱动电路设计[J]. 激光与红外, 2011, 41(10): 1128-1130 .
[2] 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): 730-733.
[3] 郑新波, 潘鸣, 裴云天. 斯特林制冷机的电磁兼容性问题研究[J]. 红外技术, 2012, 34(2): 114-117.
[4] 孙中章, 陆永达, 张永清, 等. 1 W/80 K 双活塞对置直线驱动斯特林制冷机的研究[J]. 低温与特气, 2002, 20(1): 21-22.

(下转第 161 页)

表 4 焙烧炉窑停火温度与高温阶段的内腔温度
Table 4 Cease fire temperature and inner temperature at high temperature period of the bake furnace

	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
焙烧停火温度/℃	792	914	813	510	754	816	871	967
高温阶段/℃	923	921	807	740	782	805	872	919

参考文献：

[1] 欧阳德刚, 胡铁山, 罗安智. 等. 高辐射材料辐射机理的研究[J]. 钢铁研究, 2002, **30**(1):40-43.

[2] Kournyts'kyi T, Matysiak S, Terletskii R. Heat and Mass Transfer in Two-layer Elastic Composite Subjected to Thermal Infrared Radiation [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2003, **41**(17): 1951-1964.

[3] Scott R, Cherico S D. High-emissivity Coating Technology Improves Annealing Furnace Efficiency[J]. *Iron & Steel Technology*, 2007, **4**(5): 319-324.

[4] 蓝鹤隆. 高温红外辐射涂料应用中的若干问题研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.

[5] 任晓辉, 张旭东, 吴作贵, 等. 红外辐射材料的研究进展及应用[J]. 现代技术陶瓷, 2007, **28**(2):26-31.

[6] 石成利, 梁忠友. 红外辐射涂料的研究与应用现状及其发展趋势[J]. 中国陶瓷工业, 2005, **12**(4): 34-36.

[7] 冯胜山, 鲁晓勇, 许顺红, 等. 高温红外辐射节能涂料的研究现状与发展趋势[J]. 工业加热, 2007, **36**(1): 10-15.

[8] Benko I. High Infrared Emissivity Coating for Energy Conservation and Protection of Inner Surfaces in Furnaces [J]. *Global Energy Issues*, 2002, **17**(1-2): 60-61.

[9] Kleeb T, Olver J. High-emissivity coatings for energy savings in industrial furnaces[J]. *Industrial Heating*, 2007, **74**(6): 57-61.

[10] Sheil P C, Kleeb T R. High-emissivity coatings for improved performance of electric arc furnaces[J]. *Iron & Steel Technology*, 2006, **3**(2): 49-53.

[11] Pal D, Chakraborty A K, Sen S, et al. The synthesis, characterization and sintering of sol-gel derived ceramics for electronic applications [J]. *Journal of Materials Science*, 1996, **31**(15): 3995-4005.

[12] Petrovic R, Janackovic D, Zec S, et al. Phase-transformation kinetics in triphasic cordierite gel[J]. *Journal of Materials Research*, 2001, **16**(2): 451-458.

[13] Thomas P, Gouby I, Mercurio, et al. Synthesis and structural characterization of Cu⁺ and Cu^{II}-doped Cordierites[J]. *Materials Research Bulletin*, 1995, **30**(2): 141-148.

[14] Mohamed G M U I, Hideo T, Zenjiro N. Preparation of mullite cordierite composite powders by the Sol-gel method: its characteristics and sintering [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, **73**(3): 537-543.

[15] 鲍光辉. 磷酸盐胶粘涂层制备及结合性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.

[16] 王海燕, 孙加林, 肖鹏. TiO₂-ZnO 系尖晶石型红外辐射涂料的制备和研究[J]. 红外技术, 2012, **34**(11): 677-680.

(上接第 155 页)

[5] 胡耀斌, 奈明亮, 陈艾华. 直线驱动关键技术问题及其解决对策[J]. 机电工程, 2007, **24**(1): 38-70 .

[6] 程国呈. **PWM 变频调速技术**[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[7] 王晓明. **电动机的 DSP 控制**[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 104-105.

[8] 黄峰, 汪岳峰, 顾军, 等. 模糊参数自整定 PID 控制器的设计与仿真研究[J]. 光学精密工程, 2004, **12**(2): 235-238.

[9] 黄新栋. 制冷型红外探测器高精度制冷控温系统[J]. 红外技术, 2012, **34**(9): 547-550.

[10] 高玉萍, 唐伯雁, 李大寨, 译. **电源电路设计**[M]. 北京: 科学出版社, 2006.