

大功率线性斯特林制冷机驱动电路设计

温建国, 刘建东, 杜敬良, 高山
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:随着大面元、长线列红外器件更多应用于军事、航空等领域,对大功率线性制冷机的需求越来越大,使得大功率驱动电路的研制、开发与性能指标的提高变得更加急迫。本文重点介绍了采用FPGA为主控芯片,针对于大功率线性斯特林制冷机所设计的高控温精度驱动电路的功能与特点。经验证,采用此电路的控温精度达到 ± 0.1 K以内,且具有较强的稳定性。

关键词:探测器;线性斯特林制冷机;驱动电路;控温精度;FPGA;SPWM

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.10.014

High-power linear Stirling cooler development and drive circuit design

WEN Jian-guo, LIU Jian-dong, DU Jing-liang, GAO Shan
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The large area staring, long linear, infrared devices are used more and more in military, aviation and other fields, so it makes a growing demand for high-power linear Stirling cooler and its driver circuit. The paper introduces the use of FPGA as the main chip for high-power linear Stirling cooler drive circuit with high precision temperature control function. The experiment results indicate that this circuit can improve the temperature control precision to ± 0.1 K. And the drive circuit also possesses high stability.

Key words: infrared devices; linear Stirling cooler; drive circuit; temperature control precision; FPGA; SPWM

1 引言

斯特林制冷机自19世纪研制成功以来,因其制冷效率高,成为红外热成像设备不可或缺的一个重要组成部分。分置式斯特林制冷机由于采用压缩机与冷头部分用细管连接的方式减小了震动对红外探测器的影响,并且其采用双活塞对置式直线驱动方式,这使压缩机的动子的动量得到了平衡,既简化了结构又大幅度减小了振动和噪音^[1],使机器的可靠性得到了很大的提高。更符合现代红外热成像系统对制冷机的振动、噪声等性能的要求。而随着红外技术的飞速发展,高分辨率、大视场、大面元焦平面红外探测器件和超长线列扫描型探测器件越来越多地应用于红外成像系统,对大冷量的线性分置式斯特林制冷机需求大增,加速推动大功率线性斯特林制冷机驱动控制电路的发展。现阶段,红外系统对线性斯特林制冷机的驱动控制电路的驱动能力、噪

声控制、控温精度等指标要求越来越高,从而使得大功率驱动控制电路的研制和性能的提高变得非常急迫。

本文介绍了以FPGA为主控芯片,结合大功率MOSFET器件研制的大功率线性斯特林制冷机驱动电路,电路中加入了对环境温度和电压进行补偿的模块,经试验验证,该驱动的控温精度达到了 ± 0.1 K,且具有较好的长期工作稳定性。

2 大功率线性驱动电路工作原理

由于现阶段大面元、长线列红外成像系统对大功率线性斯特林制冷机驱动电路的驱动能力、控温精度、电磁干扰、效率等要求越来越高。因此我们采用了以FPGA为核心的数字控制正弦逆变驱动模

作者简介:温建国(1970-),男,主要从事电路硬件设计及开发研制各类斯特林制冷机驱动电路。E-mail: dashu1970@yahoo.cn

收稿日期:2011-03-28

式,提高驱动效率;利用 FPGA 的强大处理能力及内部资源加入大量算法结合外部温度反馈电路达到更高的控温精度;采用特殊的接口处理和相应的电路设计来消除电磁干扰对红外探测系统的影响;选用高效的 POWER_MOSFET 桥结合相应设计的整形滤波电路达到输出大功率的驱动能力。

大功率驱动电路的工作原理主要是采用正弦逆变驱动模式,加电工作后由 FPGA 产生 SPWM^[2] 波,通过驱动与变换电路生成两路互补 SPWM 控制信号控制 POWER_MOSFET 桥进行功率输出。经整形滤波电路后输出正弦波,驱动线性斯特林制冷机全速工作。斯特林制冷机制冷到设定控温点时,温度信号处理电路会对温度传感器检测到的温度信号电压值进行判别,同时将结果送至 FPGA,结合外部温度反馈电路的测量值,经 FPGA 内部算法处理后,调节输出的 SPWM 波控制驱动电路的功率输出值,从而达到高精度控温的目的。大功率线性制冷机驱动电路原理如图 1 所示。

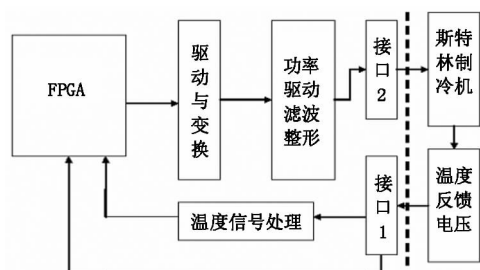


图1 大功率线性制冷机驱动电路原理框图

3 电路分析

大功率线性斯特林制冷机驱动电路主要划分成接口电路、FPGA 算法及波形的数字处理电路、输出驱动电路、温度信号处理电路四个部分。

3.1 接口电路

由于驱动电路采用了大功率 MOSFET 桥驱动模式,容易产生由 POWER_MOS 开关所引起的高频干扰。为了消除高频干扰对电路的影响,接口处理电路部分采用了双接口的模式,将输入与输出两部分隔离开。同时相对 EMI/EMC 的问题,接口电路也进行了特殊的屏蔽和滤波等设计。接口 1 主要实现了 FPGA 程序的下载,在线调试,温度反馈,电源接入。接口 2 实现了正弦波驱动输出功能,由于输出功率大,采用数线并出的结构形式,保证在正常使用情况下不会损坏接插件。

3.2 FPGA 算法及波形处理功能电路

随着红外系统对于制冷驱动电路的控温精度要求更加严格,为达到高控温精度,本电路采用以 FP-

GA 为核心组成 FPGA 算法及波形处理功能电路,同时辅以精确地控温算法和外部温度反馈电路,来达到驱动电路高控温精度的目的。

FPGA 算法及波形处理功能电路采用的是性价比较高的 ALTERA 公司 Cyclone II 芯片作为主控芯片,它具有 8 千多个逻辑单元,大于 15 万 bits 的 RAM,2 个 PLLS,可用 I/O 达到 85 个^[3]。电路的算法原理主要是采用 SPWM 技术中的表格法^[4],表格法的实现方法简便易行,修改参数方便。

FPGA 算法原理如图 2 所示。外部时钟通过分频及时钟产生模块为驱动电路提供同步时钟。在 FPGA 内部 ROM 内存有按正弦波规律变化的原始数据表,FPGA 调用内部 ROM 表数据,通过分频计数器产生占空比按正弦规律变化的脉冲波。ROM 表中原始数据计算公式如下:

$$Y = B + K \cdot \sin\left(\frac{\Pi}{L}\right) \quad (1)$$

其中, B 为脉冲 50% 占空比处数据; K 代表正弦波的幅度, K 越大则输出正弦波的幅度越大; L 代表一个正弦波周期内脉冲数据的个数, L 越大,波形失真度越小,产生的正弦波精度越高。假设时钟频率为 f ,则正弦波周期计算公式为:

$$T = L/f \quad (2)$$

通过调整公式(1)、公式(2)中参数即可实现对正弦波的幅度、频率、占空比进行精确控制和调整。设计中,我们用的时钟频率为 100 kHz,同时将 L 的值设定为 2000 (即一个正弦波周期由 2000 个脉冲数据调制而成),得到的是一个周期为 20 ms 的正弦波。

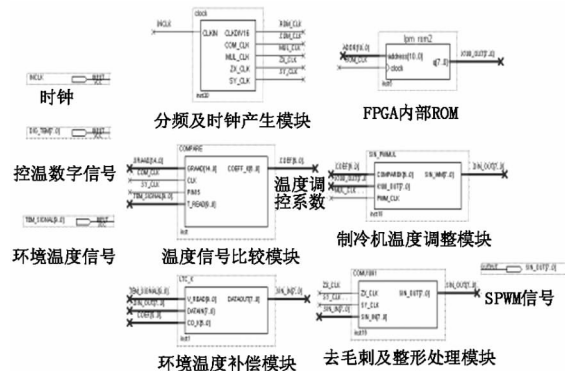


图2 FPGA 算法原理框图

控温时,从温度信号处理电路得到的数据经过温度信号比较模块的处理,得到温度调整系数,经制冷机温度调整模块对从 ROM 中取出的原始数据进行调整,以对制冷机进行控温。控温公式如下:

$$Y_1 = B + \frac{(Y - B)(D_{T2} - D_{T1})}{N} \quad (3)$$

其中, Y_1 为调整后的数据; D_{T2} 为设定的控温点数据; D_{T1} 为实际工作温度点数据; N 代表调整控温精度。同时, 通过外部温度反馈电路对 AD 采集到的环境温度信号进行处理, 得到一个环境温度调整系数, 将此调整系数与 Y_1 相乘后, 经去毛刺与整形处理模块处理得到调控后的 SPWM 信号。经过内部的驱动与变换生成两路互补 SPWM 控制信号控制功率 MOS 桥进行功率输出。

采用 FPGA 形式做驱动电路的主控芯片使得复杂的算法更易实现, 硬件功能更加强大, 参数的调试更加方便, 实现波形的精度更高。

3.3 功率驱动及滤波整形电路

为了满足大功率线性分置式斯特林制冷机工作时所需驱动能力要求, 驱动电路采用了功率 MOSFET 组建的 H 桥斩波电路^[5]形式。功率 MOSFET 选取 IRF 公司生产的 N 型 POWER_MOSFET, V_{ds} 电压达 60 V, I_D 电流输出 $I_{Dmax} = 57$ A, 导通电阻仅为 $R_{DS} = 0.028 \Omega$, 高 V_{ds} 和大 I_D 可以保证功率管在安全范围内工作; 低的导通电阻提高了功率管的效率降低功率管的发热状况; 宽的操作温度范围 $-55 \sim 175^\circ\text{C}$, 同时 TO247AC 封装提供了更加良好的散热形式。功率 MOS 开关时间波形如图 3 所示。

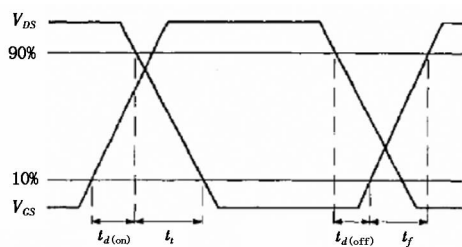


图3 功率 MOS 开关时间波形图

Fig.3 switch in a time waveforms

同时, 滤波整形电路为满足大功率、大电流输出, 输出滤波电容采用高电压、无极性、高精度电容。滤波电感则在保证电感参数和滤波性能不变的前提下采用了大线径漆包线绕制, 以保证大电流输出。

电流与线径的关系估算公式如式(4)所示:

$$\phi \approx \sqrt{I/\lambda} \times K \quad (4)$$

式中, ϕ 为线径; λ 为电流密度; I 为通过电流最大值; K 为估算系数。

电感、电容、功率 MOS 桥组成了最终的大功率驱动输出电路, 驱动电路原理如图 4 所示。

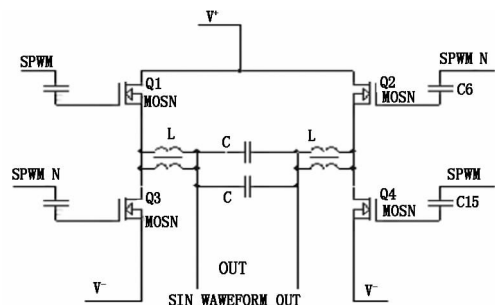


图4 驱动电路原理

3.4 温度信号处理电路

温度信号处理电路主要功能是将制冷机冷头内温度传感器所采集到的反馈电压与通过温度信号处理电路内部生成的三角波进行比较后, 生成脉宽随温度变化的方波并反馈至 FPGA, 经 FPGA 处理后达到制冷温度的反馈和控温的目的。为了消除 POWER_MOSFET 开关工作时带来的干扰问题, 保持采样灵敏度与准确性。采用光电器件将温度信号处理和温度反馈电压等易受干扰的电路模块与其他数字部分电路完全隔离。

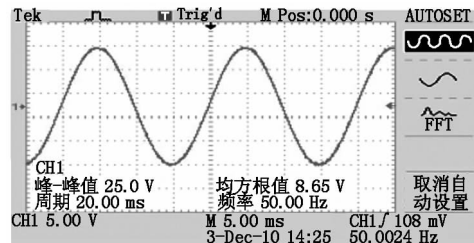
4 结果分析

4.1 输出频率

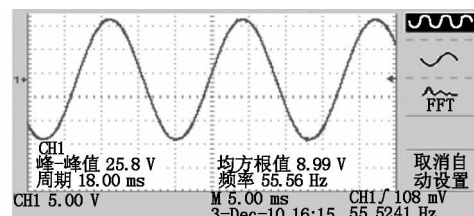
使用其他驱动器时, 只能产生固定功率和对频率做小范围调整(频率调整范围在 $1 \sim 2$ Hz 或固定频率输出)的驱动输出形式。

使用本文介绍的以 FPGA 为核心的驱动电路时, 不但可以做到大幅度调整输出频率, 还可以根据实际需要调整输出功率达到调整控温时间的目的。从而满足不同类别大功率线性制冷机的特殊要求。

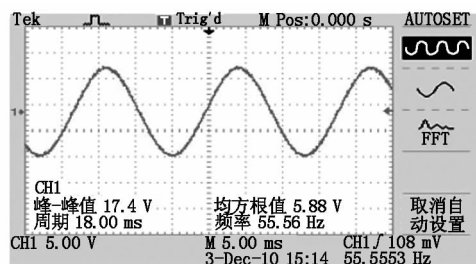
实际应用中几类典型工作模式波形的输出如下各图如图 5 所示。



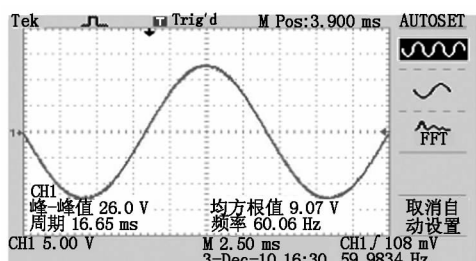
(a) 50 Hz 不限幅输出



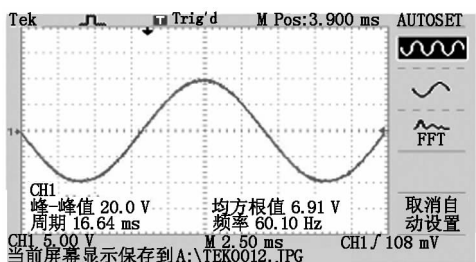
(b) 55 Hz 不限幅输出



(c) 55 Hz 限幅 17 V 输出



(d) 60 Hz 不限幅输出



(e) 60 Hz 限幅 20 V 输出

图5 几类典型工作模式波形

4.2 控温精度

本驱动电路利用 FPGA 丰富资源,采用精确控温算法和外部温度反馈电路相结合,相较以前制冷机驱动电路产品的控温精度有了大幅度提高。实际测试中长时间工作的控温精度曲线(时长 60 min)如图 6 所示。温度波动范围 1.0622 ~ 1.0624 V,最大差值为 0.2 mV ($< \pm 0.1$ K)。

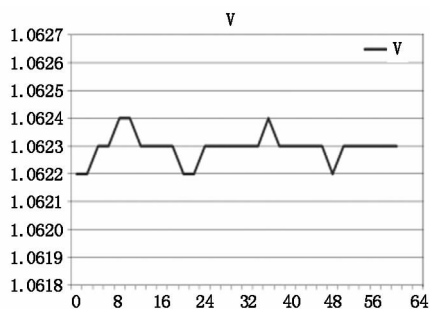


图6 制冷机控温曲线

5 结论

本文重点阐述了大功率线性斯特林制冷机驱动电路研制和设计。通过设计计算和优选器件,加大了整体驱动电路的驱动能力,驱动输出功率可以达到 ≥ 100 W。利用 FPGA 的丰富资源,同时加入了精确的控温算法,解决了过去驱动电路设计复杂,控温精度不高,可靠性差等缺点,控温最大差值仅为 0.2 mV。并加入了数字滤波模块算法,防范了数字脉冲尖峰的干扰,敏感电路也通过光电器件完全隔离。提高了电机功效,运转平稳性。由于可以灵活调整输出电压幅度和频率从而使这款驱动电路的使用更加灵活,可以满足现阶段大部分种类的线性斯特林制冷机的要求。

参考文献:

- [1] Zheng Wenpeng, Lu Ying, Zhang Zhou, et al. Linear motor for stirling cryocooler of structure and characteristics analysis [C]. Proceedings: 2009 Fourteenth Small Motor Technology Conference Proceedings: 100 - 105. (in Chinese)
郑文鹏, 陆英, 张洲, 等. 斯特林制冷机直线电机结构及特点分析 [C]. 2009 年十四届小电机技术研讨会论文集: 100 - 105.
- [2] Li Zicheng. Research for forming SPWM based on 87C196MC journal [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(12): 10 - 12. (in Chinese)
李自成. 基于 87C196MC 形成 SPWM 波的研究 [J]. 高电压技术, 2004, 30(12): 10 - 12.
- [3] CycloneII Device handbook, Volume 1. Altera Corporation. CII5V1 - 2.0 Chapter 1: 1 - 3.
- [4] Meng Qingbo, Qu Surong. SPWM control method journal [J]. Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, 2007, 19(4): 14 - 15. (in Chinese)
孟庆波, 曲素荣. SPWM 控制方法浅析 [J]. 郑州铁路职业技术学院学报, 2007, 19(4): 14 - 15.
- [5] Yu Shike, Wang Zhiqiang, Li Hongjian. Power MOSFET in small power application of motor speed Journal [J]. Small & Special Machines, 2004, 3: 46 - 47. (in Chinese)
余世科, 王志强, 李洪剑. 功率 MOSFET 在中小功率电机调速中的应用 [J]. 微特电机, 2004, 3: 46 - 47.