

基于模拟负载的制冷机控制器测试系统设计

黄仁豪, 胡正南, 芦智恒, 崔兆文, 刘肖飞

中国兵器工业第214所, 江苏 苏州

收稿日期: 2025年8月12日; 录用日期: 2025年9月5日; 发布日期: 2025年9月15日

摘要

针对传统旋转式制冷机控制器测试中斯特林制冷机负载成本高昂、测试效率低等问题, 本文提出一种基于模拟负载的制冷机控制器闭环测试方法。通过模拟负载装置替代斯特林制冷机, 构建制冷机控制器的测试系统, 模拟斯特林制冷机的电机动态性能, 完成制冷机控制器的闭环控温测试。模拟负载采用单片机生成霍尔信号至制冷机控制器, 控制器输出电机驱动信号至模拟负载, 通过模拟负载中的模数转换器实时采集电机驱动信号占空比及频率, 结合数模转换器模拟制冷机二极管两端电压, 形成测试系统的闭环验证。实验表明, 本文所提出的基于模拟负载的控制器测试方法有效地满足了控制器的测试需求, 降低了控制器的测试成本, 实现了系统的快速闭环验证, 为制冷机控制器的测试与验证提供了一种可靠、经济的解决方案。

关键词

斯特林制冷机, 旋转电机, 电子负载, 脉宽调制

Design of Test System for Refrigerator Controller Based on Simulated Load

Renhao Huang, Zhengnan Hu, Zhiheng Lu, Zhaowen Cui, Xiaofei Liu

The 214th Institute of China Ordnance Industry, Suzhou Jiangsu

Received: Aug. 12th, 2025; accepted: Sep. 5th, 2025; published: Sep. 15th, 2025

Abstract

Aiming at the problems of high load cost and low test efficiency of stirling refrigerator in the traditional test of rotary refrigerator controller, a closed-loop test method of refrigerator controller based on simulated load is proposed in this paper. The test system of refrigerator controller is constructed by simulating the load device instead of stirling refrigerator, simulating the dynamic performance of stirling refrigerator motor, and completing the closed-loop temperature control test of

refrigerator controller. The analog load uses a single chip microcomputer to generate hall signal to the refrigerator controller, and the controller outputs the motor driving signal to the analog load. The duty ratio and frequency of the motor driving signal are collected in real time through the analog-to-digital converter in the analog load, and the voltage across the diode of the refrigerator is simulated by combining the digital-to-analog converter to form a closed-loop verification of the test system. Experiments show that the controller testing method based on simulated load proposed in this paper effectively meets the testing requirements of the controller, reduces the testing cost of the controller, realizes the fast closed-loop verification of the system, and provides a reliable and economical solution for the testing and verification of the refrigerator controller.

Keywords

Stirling Refrigerator, Rotating Electric Machine, Electronic Load, Pulse Width Modulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来红外技术、低温制冷技术、电力电子技术、半导体技术等科学技术的发展迅速, 各式各样的红外探测器广泛地应用于农业病虫害监测、海洋与地质学研究、航空航天工业、医学、军事等方面[1]。然而随着红外探测器的长时间工作, 芯片发热会导致灵敏度下降、噪声增加、稳定性变差且加速元件老化, 从而缩短使用寿命甚至引发设备故障。因此, 为保障红外探测器的稳定工作, 给红外探测器提供一个相对稳定的低温环境是必不可少的[2]。目前应用于红外探测器方面的低温制冷技术主要有斯特林制冷机、脉管制冷机、液氮/液氦制冷等技术。其中斯特林制冷机凭借其具有的环境适应性强、性能效率优异、可靠性高等优点, 逐渐在军事、航天、机载红外系统制冷方式中占据主导地位, 成为红外探测系统中的重要组成部分[3][4]。然而要实现斯特林制冷机为红外系统提供稳定的工作环境温度, 则需要自主研发配套斯特林制冷机的控制器, 通过控制器调节制冷机中的电机稳速运行从而实现制冷机冷头高精度的温度控制。因此, 随着斯特林制冷机的技术发展与应用推广, 国内外例如日本 Twinbird 公司、美国 Sunpower 公司、德国 AIM 公司、以色列 IST 公司, 以及中国电子科技集团、华中科技大学、苏州华冷科技有限公司等高校与企业机构也逐渐加大对斯特林制冷机驱动控制系统的研究与设计[5][6]。例如, 中电十六所提出一种制冷机控制器整体式的系统设计方法, 微型的控制器电路采用自适应控制曲线整定技术, 具有更高的可靠性与工作效率[7]。西安微电子技术研究所基于高速数字信号处理(DSP)芯片与温度补偿算法设计了一种高精度制冷机温度控制技术[8]。浙江大学提出了一种快速启动制冷机的驱动控制器设计方法, 通过梯形波驱动方式提升了制冷机约 25 W 的输入功率[9]。

目前, 对于制冷机驱动控制器的研发与测试依然着重于温度控制精度、电能转换效率等技术指标, 仍是基于斯特林制冷机为对象进行控制电路的优化设计。然而由于斯特林制冷机工艺技术复杂, 价格普遍相对高昂, 这不仅增大了制冷机控制器的研发难度, 也提高了批次性控制器生产测试的成本与时间, 以至于目前对制冷机控制器的研究还处于起步阶段[10]。

因此, 本文提出了一种基于模拟负载的制冷机控制器闭环测试方法, 通过模拟负载装置替代旋转式斯特林制冷机的电机负载完成控制器的闭环控温测试, 有效地弥补了传统制冷机控制器测试中斯特林制冷机负载成本高昂、测试效率低等不足。首先, 模拟负载装置采用单片机生成三路霍尔信号至制冷机控

制器, 控制器输出 PWM 及三相电机驱动信号。其次, 通过负载装置中的模数转换器(ADC)实时采集电机驱动信号 PWM 占空比与频率; 最后, 结合占空比的测量数据利用数模转换器(DAC)算法模拟制冷机二极管两端电压, 控制器检测电压并调整电机驱动信号, 形成测试系统闭环反馈, 从而实现稳定控温。实验表明, 本文所提出的模拟制冷机负载装置构建的制冷机控制器测试系统, 能够准确模拟斯特林制冷机的电机动态性能, 有效地降低了控制器的测试成本, 加快了系统闭环温度控制验证。

2. 系统原理与方案设计

制冷机控制器系统包括电源转换单元、信号处理单元、电机驱动单元等, 其工作原理是通过信号处理单元对制冷机测温二极管进行电压检测, 采集实时二极管电压与设定控温电压进行对比, 当电压小于设定电压, 通过输出 PWM 控制电机驱动单元输出电机驱动信号, 增大制冷机电机转速, 使得制冷机冷头温度快速下降, 并实时检测电机中的霍尔传感器的信息, 调整 PWM 的占空比控制电机转速, 当达到控温电压, 控制电机稳速运转制冷, 达到调控制冷机温度的目的。

本文提出的基于模拟负载的制冷机控制器测试系统整体的结构如图 1 所示, 包括有计算机、直流稳压电源、制冷机控制器和模拟负载装置组成的整体闭环测试系统。

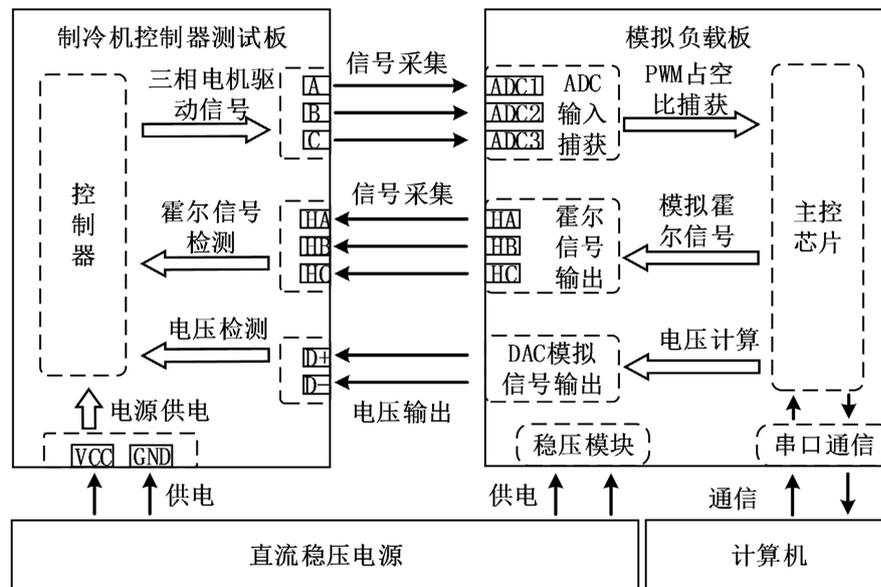


Figure 1. Overall block diagram of test system

图 1. 测试系统总体框图

基于模拟负载的制冷机控制器测试方法是通过模拟负载模拟制冷机电机的霍尔信号输出功能、测温二极管两端电压的 DAC 输出功能、三路 ADC 通道采样功能、并增加 PWM 输入捕获和串口通信等功能, 从而实现利用模拟负载代替制冷机电机进行控制器的闭环控温功能的测试。单片机霍尔信号输出功能负责输出三路霍尔信号 HA、HB、HC 到制冷机控制器; 控制器接收后产生 PWM 信号, 并输出三相电机驱动信号到模拟负载, ADC 输入捕获功能负责对电机驱动控制信号进行记录, 采集三路 AD 信号 PWM 占空比和频率, 并在上位机实时输出占空比测量数据; DAC 的输出电压功能负责模拟二极管电压输出, 通过 DAC 输出算法对输入捕获的做功参数进行计算处理, 实时输出电压反馈至制冷机控制器, 形成控温电压的闭环控制。本文使用模拟负载模拟制冷机的电机性能, 替代制冷机电机进行控制器的控温功能闭环测试, 不仅降低了测试成本, 也提高了测试效率。

3. 关键技术与实现

3.1. 霍尔信号发生模块

为精确模拟斯特林制冷机霍尔传感器的三相时序信号，本文使用 STM32F4 系列芯片作为模拟负载板的主控芯片，如图 2 所示为单片机接口原理图。该芯片的选型基于其关键性能与系统的实时性要求，首先，168 MHz 主频的 Cortex-M4 内核及硬件 FPU 保障了信号更新的高速与实时性；其次，内置的高级定时器可直接生成三路相位互差、占空比可变的同步 PWM 波形，从硬件层面保障了霍尔信号的时序精度与稳定性。通过霍尔信号的输出端电路接收单片机的 GPIO 模拟的高低电平变化的数字信号，进而通过光耦 TLP2309 器件输出至外部端口，从而实现通过单片机来实时输出三路霍尔信号。其中，光耦 TLP2309 的 10 Mbps 的高传输速率保障了霍尔信号波形在隔离后无失真，且 2500 Vrms 的最小隔离电压在单片机系统与外部制冷机控制器之间建立了安全的电气屏障，保障了核心控制器的稳定与安全。如图 3 所示为霍尔信号 HA 的输出，通过电路 HA_O 接收单片机的 GPIO 的数字信号后，经过光耦输出至外部端口 HA_OUT。

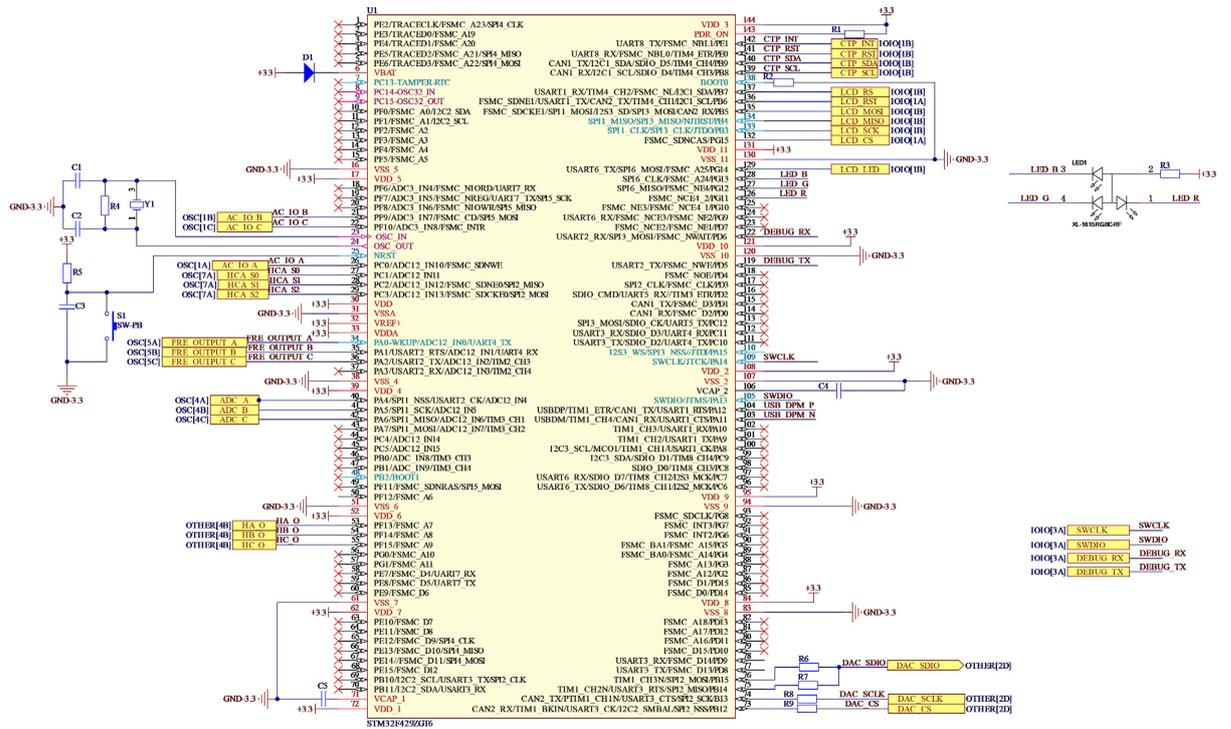


Figure 2. Schematic diagram of single chip microcomputer interface
图 2. 单片机接口原理图

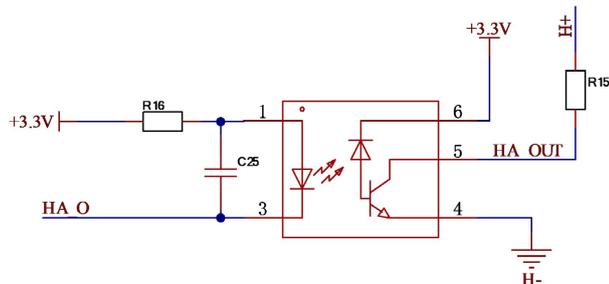


Figure 3. Hall signal output module
图 3. 霍尔信号输出模块

通过单片机 GPIO 模拟的高低电平变化的数字信号可以输出模拟三路霍尔信号，其信号输出逻辑流程图如图 4 所示。根据制冷机电机霍尔输出信号的六种状态，单片机需要输出三路霍尔信号的六种电平状态，并满足三路信号相位差 120 度。当定时器开始计数，单片机 GPIO 每经过时间 t 就转换一种电平状态 I (初始赋值 $i = 0$)，这里的 t 时刻根据电机霍尔信号测定定义为 1 ms，当 t 未达到 1 ms，GPIO 将保持原有电平状态。单片机 GPIO 电平状态从第 1 种状态变化至第 6 状态后，又会返回第 1 种状态，从而实现循环输出三路模拟的数字霍尔信号 HA、HB、HC，模拟电机的换向逻辑输出至制冷器控制器。

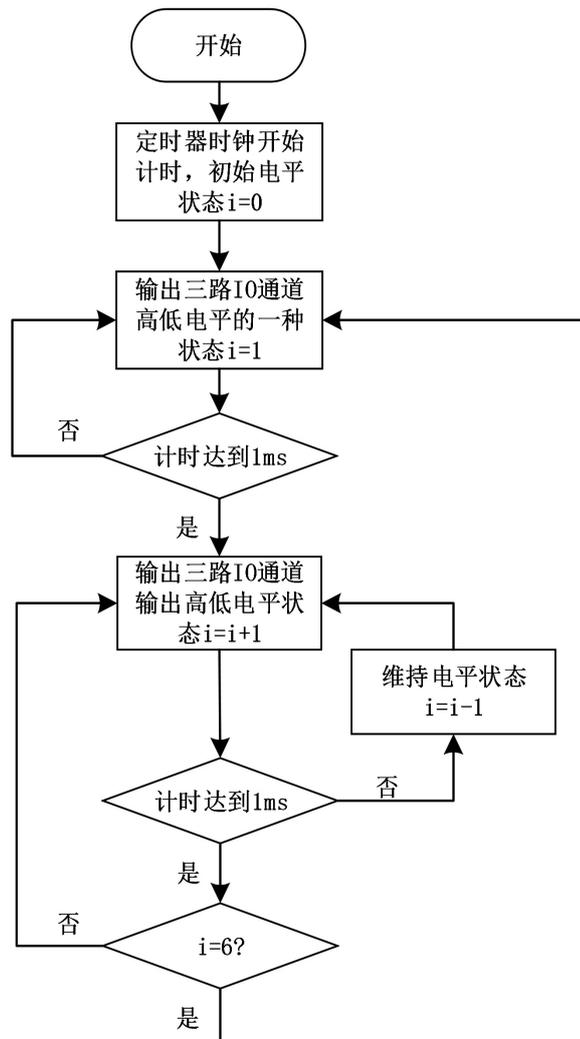


Figure 4. Flow chart of analog and digital Hall signal output
图 4. 模拟数字霍尔信号输出流程图

3.2. ADC 信号采集模块

传统测试中，控制器通常通过检测电机输入的霍尔信号，判断三相电机转子位置与速度信息，进而输出三相电机驱动信号，实现电机的换相控制。因此，为获得制冷机控制器输出的三相电机驱动信号，本文在模拟负载电路板中添加了 ADC 输入捕获功能，ADC 信号采集通道原理图如图 5 所示。通过输入捕获采集三相电机驱动信号 A、B、C，并输入至单片机中计算信号 PWM 占空比和频率，从而为后续 DAC 信号输出提供数据基础。如图 5 所示 A 通道模数采集与输入捕获电路，其 ADC 前端设计通过精确的参数计算

确保安全性与信号完整性。首先，当 AC_IO_A 输出低电平时，启动 AD 处理单元开始采样，从而通过 INPUT_A 端开始接收输入信号，信号经过电阻分压网络处理后得到电压信号。由于信号需要进一步调理，为确保不超过器件量程，利用 1N4148WS 二极管 D4、D5 正向压降约 0.7 V 的特性，组成的钳位电路将信号严格限制在 -3.3 V 至 +3.3 V 范围内。1N4148WS 凭借 4 ns 的超快反向恢复时间，为电路提供纳秒级过压钳位保护，确保应对输入信号快速边沿与瞬态干扰时的可靠性。其次，通过使用运放 TP2604-SR 设计三级电路将信号进行转换，TP2604-SR 以 3.5 μ Vpp 的低噪声、 $\pm 250 \mu$ V 的低失调电压及 110 dB 高共模抑制比的性能优势，保障了微弱信号放大过程中的高精度与高信噪比，满足系统精确采集与稳定性的要求。第一级运算放大电路的作用为对输入信号进行电压跟随，实现信号的缓冲和隔离；第二级增益放大电路通过模拟开关控制放大倍数，提高信号强度；第三级差分放大电路对放大后的信号进行偏置处理，将偏置后的电压信号输出至单片机的 ADC_A 端口并同时接入同相施密特触发器进行转换，当输入信号高于 V_T+ 时，触发器输出高电平，当输入信号低于 V_T- 时，触发器输出低电平。最后，将输入信号转换所得的电平信号输出至单片机的 FRE_OUTPUT_A 端口，对信号的 PWM 占空比、频率等参数进行计算处理。

模数采集与输入捕获的程序设计流程图如图 6 所示，如上述工作原理所述，ADC 采集模块通过信号

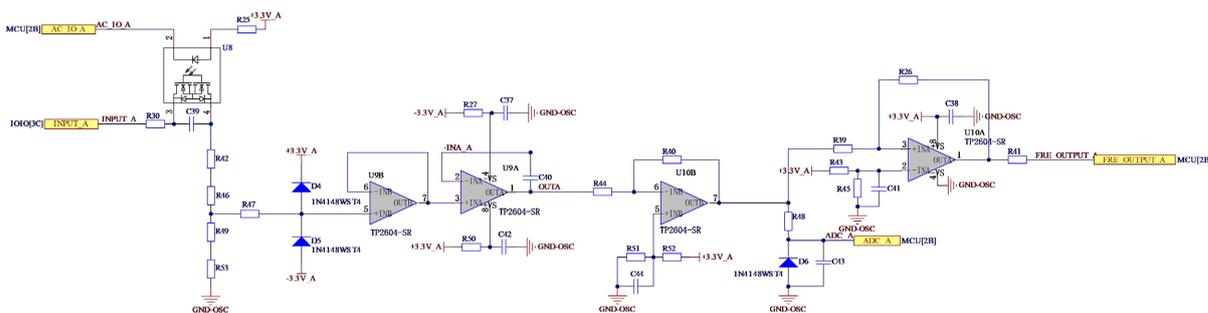


Figure 5. A schematic diagram of channel analog-digital acquisition and input capture
图 5. A 通道模数采集与输入捕获原理图

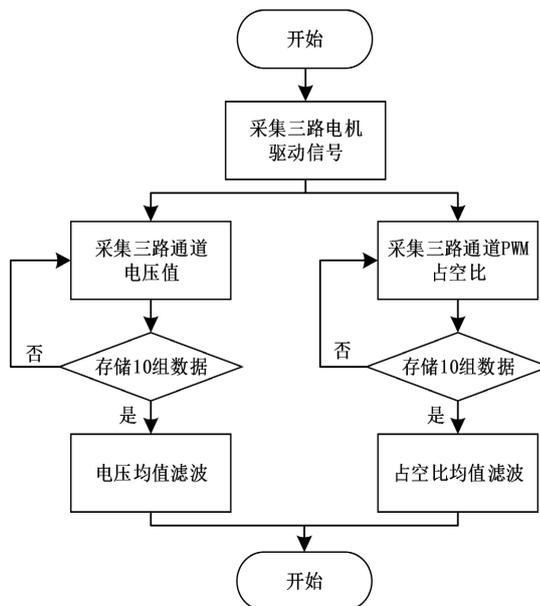


Figure 6. Flow chart of analog-to-digital acquisition and input capture
图 6. 模数采集与输入捕获流程图

采集通道上的多级运放电路实现信号的电压跟随与增益放大功能。进而通过单片机对处理后的电压信号利用内部的 AD 模拟输入通道进行数据采集, 分别对运放输出的三路通道电压值与触发器采集的三路通道电平信号的 PWM 占空比进行数据采集与计算。为保障数据采集与处理的实时性与可靠性, 采用基于直接存储器访问(DMA)的 ADC 数据搬运模式。配置 DMA 在 ADC 转换完成后自动将数据搬运至指定的内存缓冲区, 降低了数据采集的 CPU 开销与中断延迟, 确保了高频采样下的数据流连续性。当 DMA 搬运完成 10 组数据后, 置位一个标志位, 均值滤波、电压计算等则在主循环中查询该标志后执行。单片机单路 AD 通道每存储 10 组数据即进行均值滤波处理, 从而有效降低随机噪声干扰; 若不足 10 组数据则继续采集, 此设计在数据平滑度与系统实时响应之间取得了良好平衡。

3.3. DAC 信号输出模块

斯特林制冷机驱动控制器设计时除了需要考虑电机的霍尔信号输入与控制器驱动信号输出, 还要实时测量制冷机测温二极管的电压。通过控制器检测二极管的电压大小, 与设定控温电压进行比较, 从而判断是否需要增大制冷机的输出制冷量。因此, 模拟负载板还需要设置 DAC 输出模块, 模拟测温二极管两端电压输出至控制器, 通过控制器对当前电压进行检测并计算, 进而调整电机驱动信号 PWM 的占空比, 从而实现制冷机电机转速的闭环控制。DAC 信号输出模块的原理图如图 7 所示, 选用 DAC1220 芯片作为核心转换器件, 该芯片提供 20 位高分辨率与 ± 4 LSB 的高线性度, 确保了输出模拟电压的精确性与平滑性, DAC1220 芯片通过 DAC_SCLK、DAC_SDIO、DAC_CS 等串行外设接口(SPI)实现与微控制器的可靠通信。设计选用 REF192GSZ 电压基准芯片与 S7D2.500000A20F30T 高稳晶振, 为核心 DAC 提供高精度参考与时序。REF192GSZ 凭借 $\pm 0.04\%$ 的初始精度与 3 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 的超低温漂, 为系统确立了全温度范围内稳定可靠的电压基准。S7D2.500000A20F30T 晶振以 ± 20 ppm 的高频率稳定度确保了 DAC 内部调制与转换时序的精确, 能有效抑制时钟抖动带来的失真。DAC 信号输出模块将单片机中对上述三路驱动信号电压、PWM 占空比、频率等参数的计算结果进行电压转换后, 通过 DAC_OUT 端口输出至控制器。

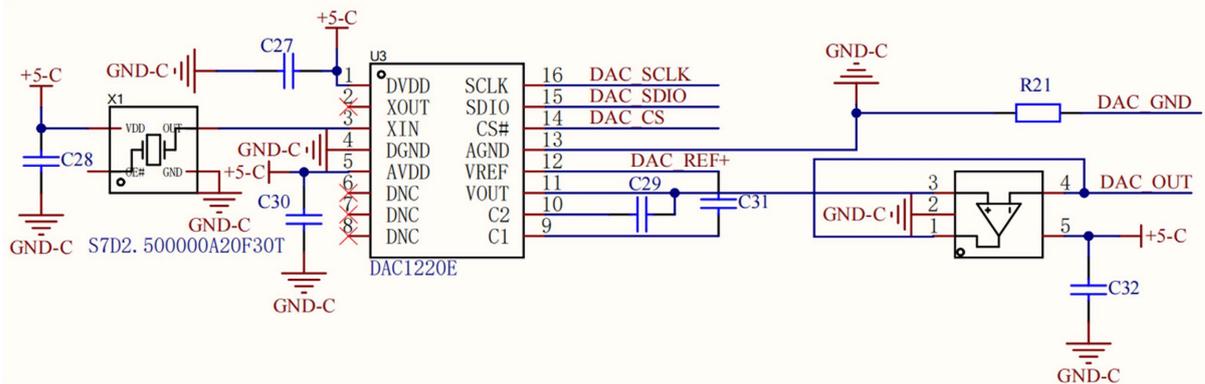


Figure 7. DAC signal output schematic diagram
图 7. DAC 信号输出原理图

DAC 信号输出模块模拟测温二极管电压的程序设计流程图如图 8 所示, 首先, 对高精度的 DAC 进行初始化, 给定 DAC 的初始电压; 其次, 通过实际控制器测量数据设计 DAC 输出增量公式如式(1)所示:

$$DAC_{this} = DAC_{last} + k \times duty - b \quad (1)$$

其中, DAC_{this} 表示本次的 DAC 值, DAC_{last} 表示上次的 DAC 值, $duty$ 表示上述采集的三相驱动信号 PWM 的占空比, k 和 b 是由斯特林制冷机测试的控温数据计算所得参数。

由上述介绍可知，输出电压相关参数是通过实际测试数据的电压增量曲线以及 ADC 采集的三相驱动信号计算所得。当控制器系统测试开始，DAC 输出由初始值开始全速增长，在临近控温电压时，模拟负载芯片调节电机驱动信号占空比，模拟电机进入稳速状态，控制 DAC 输出电压在设定范围内波动，实现模拟制冷机控温效果。

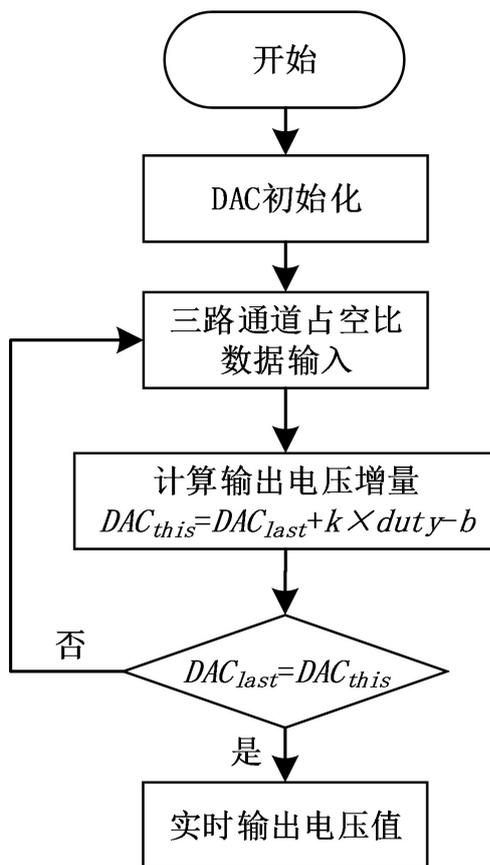


Figure 8. Analog output diode voltage flow chart
图 8. 模拟输出二极管电压流程图

4. 系统测试与验证

基于上述的系统方案设计与关键技术研究，本文搭建了基于模拟负载的制冷机驱动控制器测试系统实验平台，主要包括模拟负载板、制冷机驱动控制器、控制器测试板、功率电阻等部分，除此之外还有电源、万用表、示波器等设备。基于上述实验平台，本文对系统的三个关键模块进行功能性验证，进而对控制器控温功能进行闭环测试。首先，对单片机输出的霍尔信号进行测试。如图 9 所示为单片机输出的三路霍尔信号 HA、HB、HC，由图可见，通过利用单片机的 IO 口输出高低电平，可以得到三路周期频率一致，互相相位差 120 度的三路霍尔信号，实现模拟电机霍尔传感器的状态信息。其次，对模拟负载板 ADC 采集与输入捕获功能进行测试。如图 10 所示为 ADC 采集的控制器输出的三路电机驱动信号，由图可见，控制器通过检测霍尔信号与二极管两端温度，生成三路电机驱动信号控制电机全速或稳速运行。最后，对 DAC 信号输出模块进行测试。如图 11 所示为 DAC 模拟二极管两端电压输出，初始设定电压为 1 V，随着单片机对控制器输出驱动信号的占空比检测，DAC 电压输出将会逐渐增大至控温点。

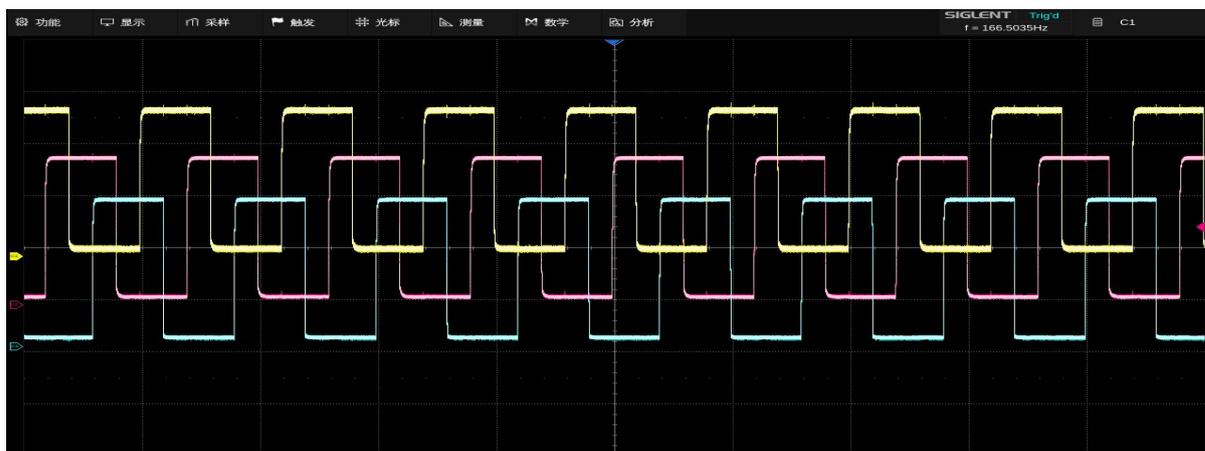


Figure 9. Three-way Hall signal
图 9. 三路霍尔信号

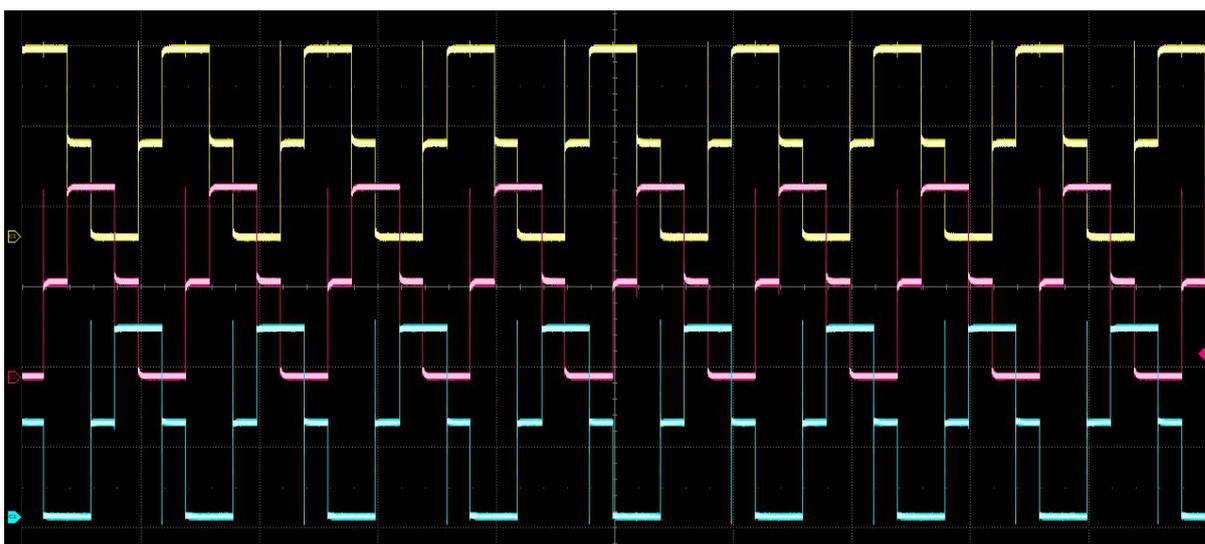


Figure 10. Three-way drive signal acquisition
图 10. 三路驱动信号采集



Figure 11. DAC voltage signal output
图 11. DAC 电压信号输出

基于上述三个关键技术的研究与实现，下面进一步地测试制冷机控制器与模拟负载板的闭环控温功

能,如图 12 所示为基于模拟负载的制冷机驱动控制器的控温功能测试。由图 9~11 可见,当启动模拟负载测试板与制冷机控制器测试板,模拟负载测试板会输出测温二极管模拟电压以及模拟电机霍尔信号,制冷机控制器通过对电压与霍尔信号的检测与判断,将输出全速电机驱动信号至模拟负载板的 ADC 采集通道,通过模拟负载板进行 PWM 占空比的检测与 DAC 电压计算,增大 DAC 输出至控温电压附近。由图 12 可知,当设定控温电压为 1.052 V 时,DAC 输出电压将会在控温电压点附近波动,有效地满足了控制器的控温功能测试。



Figure 12. Test system temperature control voltage
图 12. 测试系统控温电压

5. 结论

本文基于模拟斯特林制冷机电机的电子负载实现制冷机控制器的闭环控温测试,利用 STM32 单片机模拟霍尔传感器的三路数字霍尔信号的输出,利用 AD 通道电压采集和输入捕获功能实时采集三路电机驱动信号的电压值和 PWM 占空比,利用高精度 DAC 通过实时输出 DAC 公式模拟输出测温二极管两端电压到制冷机控制器,从而实现对制冷机控制器模块控温功能的闭环测试。该方法所采用的模拟负载板与功率电阻价格低廉,能有效地代替价格较高的制冷机满足控制器的闭环控温功能测试,不仅极大地降低了控制器的测试成本,还能弥补制冷机控温启动时间过长的不足,进一步提高控制器的测试效率。

参考文献

- [1] 粟宇路,李泽民,王鑫,等. 高动态范围红外成像技术研究进展及发展趋势[J]. 激光与红外, 2025, 55(1): 10-17.
- [2] 黄晖,陈晓屏,李娟,等. 微型斯特林制冷机技术研究[J]. 红外与激光工程, 2006(S5): 133-142.
- [3] 张文君,黄振宇,何锦,等. 小型轻量化高频线性斯特林制冷机的研制[J]. 低温与超导, 2025, 53(4): 102-108.
- [4] 赵文丽,李昊岚,孙皓,等. HOT 器件用旋转式斯特林制冷机研究进展[J]. 红外技术, 2023, 45(2): 195-201.
- [5] 马晓芳,吉耀辉,张宁,等. 一种基于 PID 控制算法的斯特林制冷机驱动控制电路设计[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(4): 31-33.
- [6] 习中立,张晓青,聂喜亮,等. 斯特林制冷机恒压驱动电源输出电流稳定性研究[J]. 真空与低温, 2022, 28(3): 291-295.
- [7] 胥春茜,周皖生,李多. 一种微型整体式斯特林制冷机驱动控制器的设计[C]//第八届全国低温工程大会暨中国航天低温专业信息网 2007 年度学术交流会论文集. 合肥:中国电子科技集团公司第十六研究所, 2007: 332-338.
- [8] 罗勋,郑东飞,刘伊伦,等. 一种高精度温度控制斯特林制冷器控制系统设计[J]. 机械工程与自动化, 2024(6): 185-187, 190.
- [9] 张文博,孙大明,王建中,等. 小型线性斯特林制冷机驱动控制方法研究[J]. 低温工程, 2024(4): 77-85.
- [10] 谭广颖. 高功率因数斯特林制冷机驱动控制系统设计[D]: [硕士学位论文]. 南京:东南大学, 2018.