

134-139

第4卷第5期  
1996年10月光学 精密工程  
OPTICS AND PRECISION ENGINEERINGVol. 4, No. 5  
October, 1996

# 航天用双驱动对置式斯特林制冷机 驱动控制系统研究

汪 谊 龚惠兴

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海200083)

V444

TB65

**摘要** 介绍了作者研制的航天用双驱动、对置式斯特林制冷机的驱动控制系统。由于该制冷机由两台压缩机和两台膨胀机两两对置而成, 为达到最佳制冷性能和最大减振目的, 必须同时对两台压缩机活塞和两台膨胀机活塞的运动行程、位置、相位、频率以及对置相位进行实时驱动控制。本系统采用闭环反馈控制, 利用单片微处理器作为主控制器, 通过 A/D, D/A 实现对制冷机的稳定、可靠控制。该系统能适应航天工作环境是其主要特点之一, 还给出了系统的性能和实验结果。

**关键词:** 制冷机; 航天斯特林制冷机; 闭环反馈控制; 对置

## 1 引言

近年来, 红外探测器技术得到决速的发展。应用于空间观测的红外、远红外光导型探测器从单元器件, 发展到多元、线列, 一直到多元焦平面列阵, 这对提供其低温工作环境的制冷机提出了更高的要求。我们所研制的航天观测仪器用双驱动、对置式斯特林制冷机, 不同于其它机械制冷机或致冷器, 具有长寿命、高可靠性、振动小以及制冷量大而体积小、重量轻等特点。正是由于这些特点, 导致其工作参数复杂, 因而驱动控制部件也变得较为复杂, 再加上对置减振, 驱动部件就更为复杂。因此, 必须对其驱动控制系统进行深入的研究。考虑到该制冷机将应用于航天工作环境, 还必须研究驱动控制的有效性、实用性和航天应用的可靠性。

## 2 系统设计

双驱动、对置式斯特林制冷机(如图1所示)由两台结构完全相同的压缩机和两台膨胀机组成, 两两对置而成, 即为对置式。膨胀机与压缩机用一导气管相连, 两者分开放置, 分别加以驱动控制, 即为双驱动式。两台膨胀机冷头由冷链和真空冷箱相连, 探测器放置在冷箱内。两台压缩机无相连关系, 完全隔离。压缩机与膨胀机运动部件结构基本相同, 均是采用动圈式

收稿日期: 1996年8月5日

直线电机作为压缩和膨胀的驱动部件。通过向直线电机输入一定的驱动控制信号,从而驱动压缩和膨胀活塞模拟斯特林逆循环产生压缩和膨胀运动,这样就使冷头降温,热平衡后能一直保持低温状态。对置是为消除振动对应用系统的影响,使两台压缩机之间和两台膨胀机之间运动相差为零,运动动量抵消,振动消减,减小振动对探测器带来的噪声。压缩机和膨胀机分开放置,分别驱动可以灵活地对制冷机的压缩和膨胀活塞各自的工作参数进行控制调节,从而使制冷机工作温度可靠、达到最佳的制冷效果。

## 2.1 系统设计目的和任务

本系统主要是针对航天观测仪器的工程样机研制而进行的,因此设计目的十分明确,那就是研制出双驱动、对置式斯特林制冷机驱动控制系统的模样机,并达到一定的性能指标,从而为进一步地改进设计,提高性能,研制出能完全满足航天应用的初样作准备。

系统设计任务主要有以下几方面:

1. 系统能够对双驱动、对置式斯特林制冷机的各工作参数实现有效地驱动控制,从而使制冷机能稳定可靠地工作起来,工作参数有:

- ①频率 ( $f$ ): 两台压缩机和两台膨胀机的运动频率。
- ②行程 ( $Z$ ): 两台压缩机和两台膨胀机各自的运动行程。
- ③位置 ( $P$ ): 两台压缩机和两台膨胀机运动的中间位置,即平衡位置。
- ④相差 ( $\Delta\varphi$ ): 相差有压缩机与膨胀机之间的两对运行相差,以保证制冷机的斯特林逆循环运动,使之保持最佳相差,达到最佳制冷性能,相差还包括压缩机与压缩机之间的对置相差。

上述四个参数的变化均对制冷机的制冷温度产生不同的影响,因此系统必须对这四个参数进行有效、可靠的调节控制。

2. 双驱动、对置式斯特林制冷机大约需要60 W左右的驱动功率。其中两台压缩机各30 W,两台膨胀机各1 W。系统应满足制冷机的功耗要求。

3. 系统效率约70% (不算电源转换效率)。

4. 系统应具有较高的对置精度,即对置运动相位差小于 $2^\circ$ ,行程位移差小于0.1 mm。从而保证较小的工作振动,使探测器能稳定、可靠地工作。

5. 系统应初步满足航天应用的特殊要求。如抗发射自锁、抗干扰、遥测和遥控等功能。

## 2.2 控制原理

由于斯特林制冷机的压缩机与膨胀机分开放置,压缩机活塞压缩气体产生气动力,气动力作用于膨胀机活塞,同时又反作用于压缩机活塞,气动力直接影响到压缩机与膨胀机的压缩和膨胀运动,而气动力大小、相位与制冷机结构、工质气压大小、温度等许多内部和外部因素有关,且随时间变化,很难确定其大小和相位。因此不适宜采用对输入固定,且不适应扰动的开环控制,只能采用闭环反馈控制。

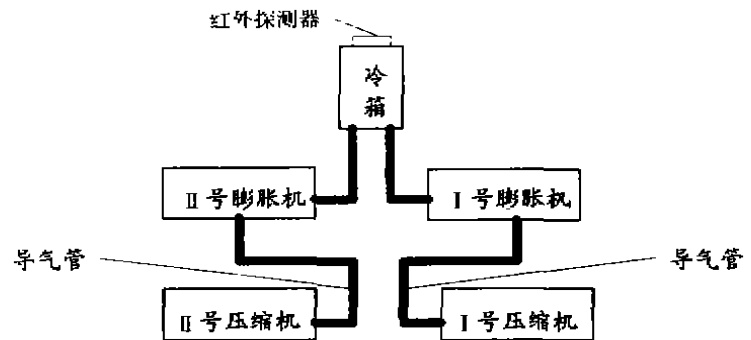


图1 双驱动、对置式斯特林制冷机结构示意图

Fig.1 Scheme of doubly motorized, balanced Stirling cryocooler

如图2所示为系统的闭环控制系统。其中  $S$  表示驱动控制信号,  $F(Z_{c1}, Z_{c2}, \dots, \Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3)$  表示反馈调节函数,  $(Z_{c1}, Z_{c2}, \dots, \Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3)$  为调节参数。

为了获取这些调节参数,系统采用了四个位移传感器,直接测量四个活塞的运动情况,控制器采用单片微处理器,通过实时反馈获取这四个活塞运动情况,进行分析计算得到这些调节参数的当前状况,然后根据一定的算法改变输入  $S$ ,从而实现稳定,可靠的实时反馈控制。

### 2.3 系统硬件设计

系统硬件设计主要由三大功能模块构成,其总体框图如图3所示。

#### (1) 主控电路模块

主控电路模块是系统控制的核心单元模块,其主要功能是:以80C31单片微处理器为主控制器,通过A/D获取反馈信号,通过D/A产生驱动控制信号。

通过改变驱动控制信号的频率即可达到改变活塞的运动频率;改变驱动控制信号的输入功率即可达到改变活塞的运动行程;通过改变叠加到驱动控制信号一个直流偏置大小来改变活塞的运动位置;通过改变压缩机和膨胀机的驱动控制信号的电气相位来改变活塞的运行相位和对置相位,从而实现对制冷机的有效驱动控制。

#### (2) 传感器模块

传感器模块的设计是反馈控制系统的关键环节。其功能是实时获取系统工作状态,提供控制器进行控制判断的主要根据。系统所采用的位移传感器经过精心的设计和精确地标定,从而保证系统控制的实时性、较高的控制精度和可靠性。

#### (3) 功率放大模块

功率放大模块是根据驱动控制信号的波形,对其进行功率放大,从而能驱动直线电机进行压缩和膨胀运动,保证制冷机所需的功率输入和功耗要求。

#### (4) 航天应用的特殊要求

航天观测仪器就必须考虑到航天应用所需满足的特殊要求。在硬件设计时,主要考虑了以下几方面:

1. 自锁控制。在发射时对制冷机活塞加一自锁,使之在发射时不至于因振动损坏制冷机。
2. 低功耗要求。在满足制冷量的前提下,尽可能地降低功率损耗。系统主要从降低制冷机输入功率、提高功率放大器的功放效率、提高电源转换效率等方面着手,优化设计达到低功耗要求。

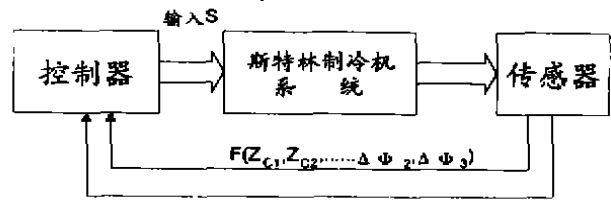


图2 闭环控制系统

Fig. 2 Servo control system

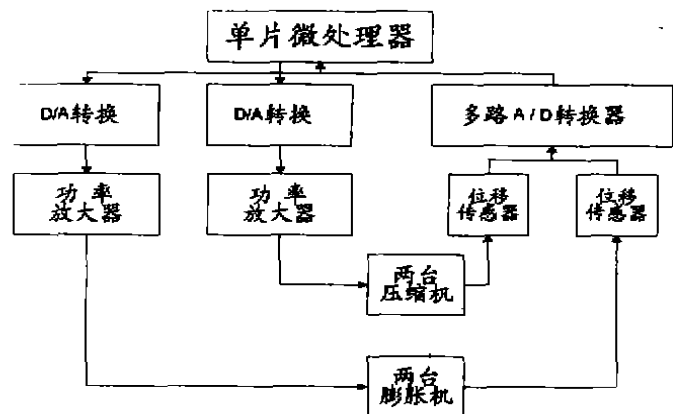


图3 系统总体框图

Fig. 3 System main diagram

3. 高可靠性和长寿命要求。系统主要从CPU“走飞”WATCHDOG电路、电源电压波动处理电路、抗干扰隔离电路等方面着手提高系统可靠性。

4. 遥测、遥控功能。增加遥测、遥控功能接口，提高系统的可靠性和可控制性。

#### 2.4 系统软件设计

系统软件采用结构化程序设计方法，将功能分成各模块，结构清晰明了。对置、分置式斯特林制冷机中，影响制冷机控制复杂性的关键因素是气动力。气动力的大小和相位同制冷机的结构、参数、装配情况以及运行状态等诸多因素有关，难以预测，并且每台机器的情况也不一样，而且制冷机在从启动到冷头温度稳定的过程中也发生变化。因此实现对斯特林制冷机的有效控制，必须对气动力加以分析处理，同时考虑到系统航天应用所需的软件可靠性要求，系统软件设计时主要分成以下几个模块，如图4所示为控制软件主流程。

(1) 气动力正常处理模块。

(2) 气动力偏大处理模块。

(3) 气动力过大处理模块。

(4) 主调度模块。其功能是根据制冷机气动力情况在以上三个模块中进行调度。

(5) 行程、相位、位置测量模块。其功能是测量由位移传感器来的活塞运动位移信号，经计算得到各调节控制参数值，即获取反馈值。

(6) 控制判断模块。其功能是根据反馈值，利用合适的算法进行控制判断，输出控制调节信号。

(7) 通讯与自检模块。其功能是定时输入、输出制冷机控制参数和运行状态，以及定时检测制冷机工作状态并对相应状态作出处理，从而实现对制冷机进行灵活、可靠的控制。

通过上述几个模块协同工作，充分考虑到软件设计可靠性，就实现了对斯特林冷机的有效、可靠控制。

### 3 系统性能及实验结果

根据上述软、硬件设计原理，完成了一套对置、分置式斯特林制冷机模样机控制系统，如图5所示，并建立起一整套测试装置对其进行测试。

测试装置中，控制系统的驱动输出电流、电压由长城59L1-V型1.5级交流、电压表测量，驱动输出波形和位移传感器波形由HP54503A数字储存式示波器测量，同时还可测出信号频率，信号电压最大、最小值、信号之间相差。这样通过此示波器可知位移传感器输出电压幅度，从而可知工作行程、工作位置，由膨胀机与压缩机位移信号相位差，可知驱动控制所达的相位差。如图5所示为示波器打印输出。制冷机制冷温度由铂(Pt)温度传感器通过FLUKE8520A数字万用表测量。整个测量系统由计算机自动收集数据。

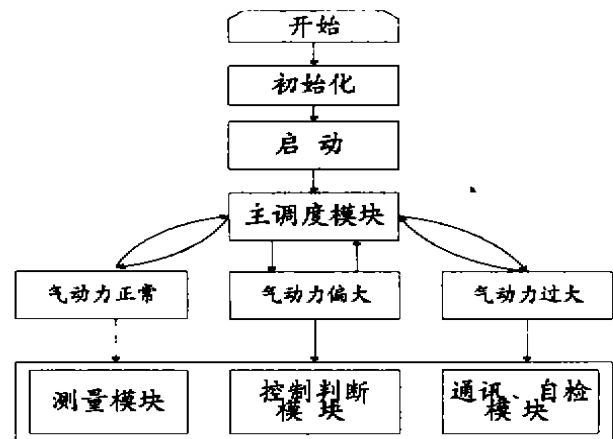


图4 主流程图

Fig. 4 Main flow chart

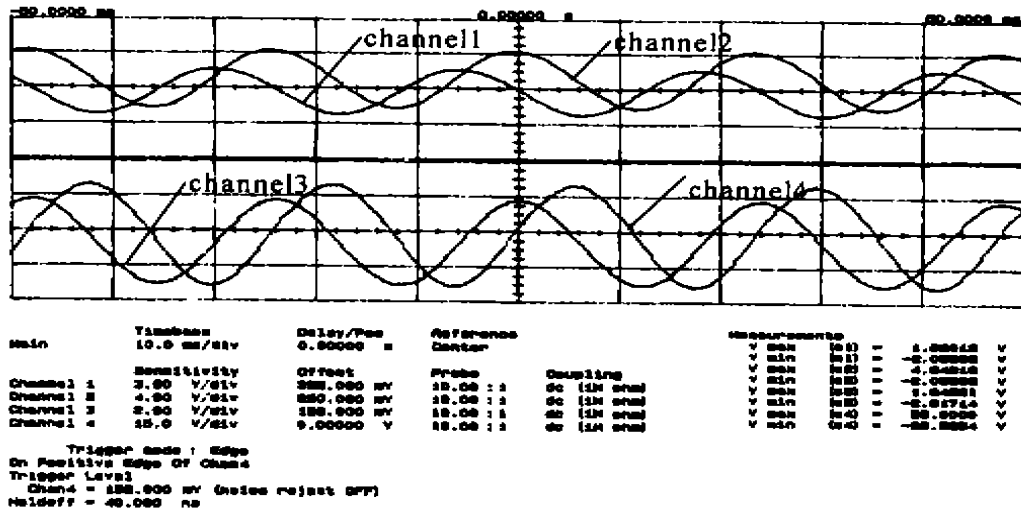


图5 双驱动、对置式斯特林制冷机控制仪及 HP54503A 数据测量显示结果  
(channel 1, 2为位移信号, channel 3, 4为驱动信号)

Fig. 5 HP50503A measuring result of doubly motorized, balanced Stirling cryocooler controller

根据此测试装置,对控制系统和制冷机工作状态进行测试,并对结果进行分析,对置、分置式驱动控制仪所达到的具体指标有:

①对置相差(压缩机与压缩机):  $\Delta\Phi < 2^\circ$

在此相差下,振动比不对置时有着明显的改善。

②运行相差(膨胀机与压缩机):  $\Delta\Phi = 70^\circ \pm 1^\circ$

③频率:  $f = 40\text{Hz} \pm 1\text{Hz}$

④行程(可调)。压缩机  $Z_C$ : 5~10 mm, 膨胀机  $Z_D$ : 1~4 mm  
偏差  $Z_C$ :  $\pm 0.1$  mm,  $Z_D$ :  $\pm 0.1$  mm

⑤输入功率: 单台压缩机  $P_C = 30$  W  $P_D = 0.6$  W

总功率:  $P_T = (P_C + P_D) \times 2 = 61.2$  W

## 4 结 论

在系统中应用了微处理器数字控制技术,对制冷机各工作参数实现闭环反馈控制,控制稳定可靠,并具有较高的控制精度,特别具有较好的对置效果,有效地降低了振动。软、硬件设计功能模块化,结构合理,成功地实现了对对置、分置式斯特林制冷机的驱动控制,达到了制冷温度,运行正常,可靠性较好,为此制冷机应用于航天提供了良好的保障。

## Research on Drive and Control System of Doubly Motorized Balanced Stirling Cryocooler for Space-borne Applications

Wang Yi, Gong Huixing

(Shanghai Institute of Technical Physics, the Chinese Academy of Science, Shanghai 200083)

### Abstract

Doubly Motorized, Balanced Stirling Cryocooler, which is adopted by space applications, consists of two compressors and two displacers which face against another. In order to cool down and reduce the vibration, the cryocooler must be controlled effectively over its compressor and displacer pistons' drive stroke, position, phase, frequency and balanced phase. In this paper, the working theory and design details of drive and control system have been presented. The system is a servo control system. It adopts a single-chip microcontroller as its main controller, realizes the steady, reliable control over the Stirling Cryocooler by A/D, D/A converters. The paper also introduces the qualities of the system and experiment results.

**Key words:** Cryocooler, Space-borne Stirling Cryocooler, Servo control, Balance

汪 谊 男, 1972年4月出生, 1989. 9~1993. 7就读于浙江大学光电与科学仪器系, 光学仪器专业, 在学期间曾从事过光信息的计算机处理, 模式识别, 图象处理等领域的科研工作, 1993. 9~1996. 3就读于中国科学院上海技术物理研究所, 物理电子学与光电子学专业研究生, 硕士期间独立研制成功了航天用双驱动、分置式斯特林制冷机驱动控制系统。