

# 基于增量式PID算法和逆变调功的外层空间温度环境模拟系统设计

代海林 袁伟峰 贺云 张丽丽 张涛

(北京卫星环境工程研究所, 北京, 100094)

**摘要:** 针对外层空间温度环境模拟系统需承受高剂量辐照的要求, 建立了空间温度和辐照环境模拟系统的结构模型, 选用制冷机组和加热组件实现了系统加热和制冷, 结合防冻液循环与气体循环的方式实现了环境模拟温箱温度远程控制和防辐照设计。将温控过程分为制冷、加热和保温3个阶段, 并采用增量式PID控制算法、逆变调功方法和模糊控制方法进行控制, 温控效果良好。试验结果表明, 环境模拟温箱实际温变曲线与设定的温变曲线拟合良好, 达到了主要技术指标, 可以满足空间温度环境模拟系统的要求。

**关键词:** 逆变; PID; 外层空间; 环境模拟系统

**中图分类号:** TP206<sup>+</sup>.1 **文献标志码:** A

## Design of Temperature Environment Simulation System for Outer Space Based on PID Control Method and Inverter Power Adjusting Technology

Dai Hailin, Yuan Weifeng, He Yun, Zhang Lili, Zhang Tao

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing, 100094, China)

**Abstract:** Considering the request of high dose radiation born by the temperature environment simulation system for outer space, the structure model of the space temperature and radiation environment simulating system is built. Refrigerating unit and heating components are used to heat and refrigerate the antifreeze. The remote temperature control and anti-radiation design of the system are achieved through the circulation of antifreeze and gas. Temperature control process is divided into three stages, including refrigerating stage, heating stage and heat insulating stage. Increment PID control method, inverter power adjusting technology and fuzzy control method are adopted in the temperature control of environment simulation system, and the excellent control effect is achieved. Experimental results show that the actual temperature control curve is in accordance with the given one, and can satisfy the request of the space temperature environment simulation system.

**Key words:** inverter; PID; outer space; environmental simulation system

## 引言

为了确保航天飞行器中各种关键仪器和设备安全可靠地工作, 往往需要建立外层空间环境模拟系

统进行性能测试和可靠性试验<sup>[1]</sup>。外层空间指的是地球大气层及其他天体之外的虚空区域,温度变化剧烈,还有辐射、电磁场等。由于空间辐照中的中子和质子通过形成原子位移效应,使半导体产生永久性损伤而失效,从而大大增加了空间环境辐照场、温度场和电磁场等多物理场耦合环境模拟的难度。目前,国内外大都是单独进行高能辐照、温度场或者电磁场环境模拟,很少见两个或多个物理场耦合环境的模拟<sup>[2-5]</sup>。

本文在考虑辐照的前提下,建立了外层空间温度和辐照环境模拟系统的结构模型,选用制冷机组和加热组件对系统进行加热和制冷,结合防冻液循环与气体循环的方式实现了环境模拟温箱温度的远程控制 and 防辐照设计。在温箱温度控制方面,将整个温度控制过程分为制冷、加热和保温3个阶段并分别进行控制,温控效果良好,可以满足空间温度环境模拟的要求。

## 1 空间温度环境模拟系统组成

根据待测试设备的需要,确定了温度环境模拟的技术指标:(1)温度环境模拟温箱可承受辐照总剂量 $\geq 50$  krad;(2)温箱温度范围 $-20\sim 60$  °C;(3)温度控制精度 $\pm 1$  °C;(4)变温速率 $3\sim 15$  °C/h;(5)温变误差优于 $3$  °C/h。

由于所模拟的空间温度环境系统需要接受高剂量辐照( $\geq 50$  krad,由专门的辐照场所提供),因此系统结构必须进行防辐照设计。基于此,建立了外层空间温度、辐照环境模拟系统的结构模型,即仅将温度环境模拟温箱放置在辐照场中,其余设备尽量远离辐照区域,通过防冻液循环与气体循环的方式实现环境模拟温箱温度的远程控制<sup>[6]</sup>。同时,对辐照敏感的设备进行抗辐照设计。空间温度环境模拟系统的组成如图1所示。

由图1可见空间温度环境模拟系统主要由辐照源、温度环境模拟温箱、气液两相换热温箱、制冷/加热温箱、中央控制单元、温度采集模块、防冻液循环泵及管路,以及气体循环风机及管路等组成。其中,温度环境模拟温箱放在辐照场内正对辐照源,中央控制单元放在辐照场外面,制冷/加热温箱放在辐照场内距离辐照源较远的迷宫(指的是具有多个直角拐弯的通道,辐照剂量每经过一个直角拐角衰减 $99\%$ <sup>[7]</sup>)出口,气液两相换热温箱放在环境模拟温箱附近。制冷/加热温箱与气液两相换热温箱之间采用循环泵和 $10$  m长的管路进行防冻液的循环,气液两相换热温箱和环境模拟温箱之间采用循环风机和 $2.5$  m长的管路进行冷热气体的循环,与气体相比,防冻液具有大比热容、流速稳定且可采用细管传输,可有效减小远距离传输的热损耗。试验结果表明,采用防冻液远距离传输与气体短距离传输相结合的传输方式,大大减小了工质传输过程中的温度变化,提高了环境模拟温箱的温度可控性。

在制冷/加热温箱中,安装有制冷机组和加热装置,分别对温箱中的防冻液进行制冷和加热。其中,制冷机组的冷凝器安装在温箱的上半部分,加热棒布置在温箱的底部,二者都浸泡在防冻液中。

系统采用环境模拟温箱进气口的温度反馈信号 $T_i$ 来闭环调节制冷/加热温箱中防冻液的温度。首先,温度采样电路通过传感器PT1000采集环境模拟温箱进气口的温度信号 $T_i$ 并经RS-485总线反馈至中央控制单元的工控机进行温箱的温度显示;同时温箱温度反馈信号与设定的温度信号一起再通过

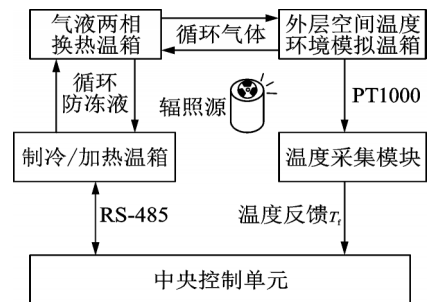


图1 空间温度环境模拟系统的组成

Fig.1 Composition of the space temperature environment simulation system

RS-485总线发送给制冷/加热温箱的温度控制电路,进行加热装置输出功率的调节和制冷机组的启/停控制,实现防冻液温度的控制。温度受控的防冻液再经循环管路传输至气液两相换热温箱,通过换热器转换成温度可控的冷热气体,该气体再通过气体循环管路传输至环境模拟温箱,从而实现环境模拟温箱温度的远距离精确控制。

## 2 冷热负荷计算及主要设备选择

选择汽车防冻液作为制冷/加热温箱与气液两相换热温箱之间的液体传输介质,主要是基于以下原因<sup>[8]</sup>:

(1)汽车防冻液的工作温度范围一般在 $-40\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,满足环境模拟温箱 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化要求,而不会出现低温凝固或高温沸腾的现象;

(2)防冻液具有较大的比热容,与加热/制冷空气相比,可以降低温度的超调量,有利于提高模拟温箱的温度控制精度;

(3)防冻液具有大比热容、流速稳定且可采用细管传输,可以减小远距离传输的热损耗。

### 2.1 负荷计算

防冻液按照 $50\text{ kg}$ 计算,则当温变速度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 时,防冻液需要输入/输出的热量为

$$Q = cm\Delta T \quad (1)$$

式中 $c=3.48\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,则 $Q=2.61\times 10^6\text{ J}$ 。需要的制冷/加热的功率为

$$P = 3600Q/\eta \quad (2)$$

式中 $\eta$ 为效率,按 $0.6$ 估算。主要考虑散热损失和传输损失,则 $P=1.21\text{ kW}$ 。

因此,根据上述计算结果,采用 $1.6\text{ kW}$ 的制冷机组和加热装置可以满足温变速率为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的温控要求。

### 2.2 制冷装置

由于模拟温箱的最低温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,因此考虑传输损耗和制冷速度的要求,防冻液的最低制冷温度应低于 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,常规R22制冷剂的蒸发温度难以满足要求。因此,制冷剂采用RA404,制冷压缩机选择丹佛斯SC10CL冷柜压缩机,防冻液的最低温度可达 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

考虑到温度变化速率范围为 $3\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ,温变范围比较宽;同时,低温的制冷机组很难找到变频机组,因此采用2个 $800\text{ W}$ 的定频冷柜制冷机组制冷<sup>[9-11]</sup>。这样,根据温变速率大小,可以灵活开启一个机组或者两个机组同时开启,从而减小系统温度控制的超调量,提高控制精度。

### 2.3 加热装置

加热装置采用电阻加热和先进的逆变调功技术,其工作原理框图如图2所示。

在图2中,加热器采用电阻丝加热,电阻丝封装在不锈钢管内。加热电路采用Buck主电路,主要由IGBT功率开关管T1、快恢复二极管D1构成<sup>[12-13]</sup>。全桥整流电路将输入的AC220V交流电进行整流,然后通过Buck斩波电路中IGBT功率开关管的导通和关断实现加热功率的调节。

Buck电路中IGBT功率开关管的PWM控制脉冲的频

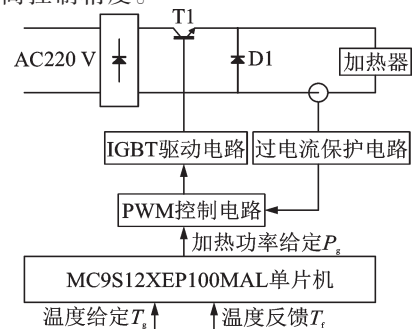


图2 加热装置工作原理图

Fig.2 Schematic diagram of heating equipment

率为 18 kHz 左右,改变 IGBT 开关管的占空比就可以调节加热功率,从而实现加热温度的精度控制。

### 2.4 温度传感器

温度传感器采用 PT1000 铂电阻,其温度和电阻值拟合曲线如图 3 所示。

从图 3 可以看出,PT1000 温度传感器具有良好的线性度,约 4 Ω/℃,具有较高的分辨率,可以满足温箱温度控制的需要。

### 2.5 温度采样电路

温度采样电路如图 4 所示。在图 4 中,由 LM4040A 产生 4.1 V 电压基准,PT1+ 和 PT1- 连接至 PT1000 热敏电阻,阻值用  $R_p$  表示; $R_3, R_4$  的阻值为 1 kΩ,  $R_5$  的阻值为 900 Ω,对应 -25.5℃。PT1000 热敏电阻反馈的电压信号(PT1+)与 -25.5℃ 时的标准电阻分压值(1.942 V)进行差动运算放大,得到温度信号  $T_n$ 。其中,运算放大器采用 LM258 单电源运放,差动放大倍数为 10 倍。

可计算温度信号  $T_n$  为

$$T_n = 4.1 \times \left( \frac{R_p}{R_p + 1000} - \frac{900}{1900} \right) \times 10 \quad (3)$$

当温度为 -20℃ 时,对应的输出电压为 0.24 V;当

温度为 0℃ 时,对应的输出电压为 1.08 V;当温度为 60℃ 时,对应的输出电压为 3 V。

## 3 温度控制方法

由于环境模拟温箱的温度控制在加热阶段需要采用加热棒进行升温,而在降温阶段则是靠制冷机组进行制冷,保温阶段为了维持恒定的温度则时而需要加热,时而需要制冷,因此在实施温度控制时,需对加热阶段、制冷阶段和保温阶段分别给予控制。

### 3.1 温度控制原理

外层空间环境模拟温箱的温度设定值是通过中央控制单元的工控机预先设定温变曲线、循环次数,然后通过 RS-485 通讯网络下载到制冷/加热温箱的 MC9S12XEP100MAL 单片机进行控制。温度控制的目的是使实际的温度能够按此预设的温变曲线和循环次数进行变化。

温度控制系统工作原理如图 5 所示。在图 5 中,温度控制系统的控制器对应 MC9S12XEP100MAL 飞思卡尔单片机,执行器对应制冷机组和加热装置,测量变送对应 PT1000 温度传感器,被控对象对应外层空间温度环境模拟温箱,被控量为模拟温箱进气口的温度。由于该温度控制系统具有较大的惯性,控制周期设置为 10 s。

### 3.2 加热阶段

加热阶段的判断: $\Delta T_{vg} > 0$ ,  $\Delta T_{vg}$  为设定的温变速度。

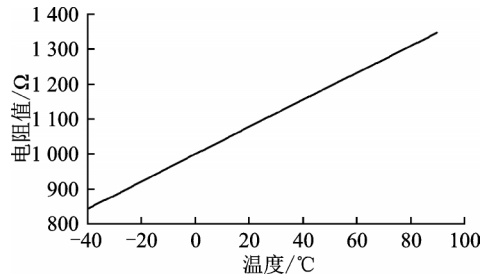


图 3 PT1000 温度和电阻值拟合直线  
Fig.3 Temperature and resistance fitting line of PT1000

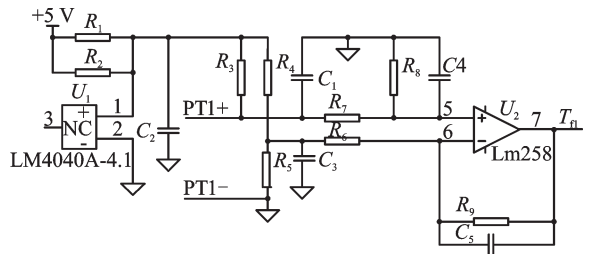


图 4 温度采样电路  
Fig.4 Temperature sampling circuit

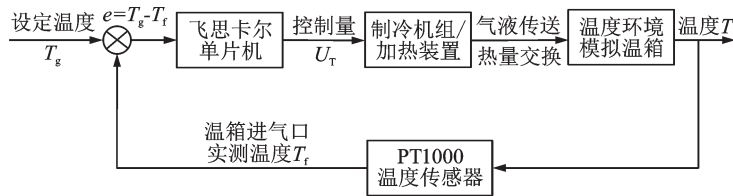


图5 温度控制系统工作原理

Fig.5 Schematic diagram of temperature control system

由于加热控制采用逆变调功技术,可以实现加热功率的连续调节,因此采用增量式PID控制算法进行加热阶段的温升控制<sup>[14-16]</sup>。

一般地,增量PID形式为

$$\Delta u(k) = K_P \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (4)$$

式中: $e(k)$ 为当前时刻的温度误差; $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ ;  $K_P$ 为比例常数,能迅速反映误差,从而减小稳态误差,但 $K_P$ 的增大会引起系统的不稳定; $K_I$ 为积分常数,可以消除稳态误差,但积分作用太强会使系统超调加大和引起系统振荡; $K_D$ 为微分常数,可以减小超调,克服振荡,加快系统的动态响应速度。

根据数字PID控制器的增量输出 $\Delta u(k)$ ,可以得到输出控制量 $u(k)$ 为

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (5)$$

由于文中温控系统的热传递过程比较复杂,系统参数随着温度改变而不断变化,不易得出精确的系统模型。为了提高系统的控制精度,加强控制的鲁棒性,加热阶段采用模糊PID进行控制。

模糊PID是以温差 $e$ 和温差变化率 $e_c$ 作为模糊控制器的输入,以PID参数 $K_P, K_I, K_D$ 作为模糊控制器的输出,利用模糊控制规则对PID参数进行在线调整,通过输出的控制量,驱动执行机构以减小偏差,直到把温度控制在允许范围内。模糊PID的控制框图如图6所示。

将温差 $e$ 和温差变化率 $e_c$ 模糊化后,得到模糊变量 $E$ 和 $E_c$ 。设 $E, E_c, K_P, K_I, K_D$ 的模糊子集均为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。这5个变量的论域均为 $[-6, 6]$ ,量化因子 $K_e = 0.83, K_{ec} = 0.5$ ,各输入输出服从三角形隶属函数分布,函数分布曲线如图7所示。

根据实际操作经验,建立了 $K_P, K_I, K_D$ 的模糊规则,规则控制表如表1所示。表1中 $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ 的输出比例因子均为1。由规则控制表可以得到实际的控制参数为

$$\begin{cases} K_P = \Delta K_P + K_{P0} \\ K_I = \Delta K_I + K_{I0} \\ K_D = \Delta K_D + K_{D0} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $K_{P0}, K_{I0}, K_{D0}$ 为参数初始值。将 $K_P, K_I, K_D$ 三个参数代入增量式PID算法的式(4,5)中,即可得到输出控制量 $u(k)$ 。输出控制量 $u(k)$ 经单片机电路的D/A转换电路变换成模拟量 $U_g$ ,然后传输至SG2525A,调节PWM脉冲的宽度,进而改变IGBT的导通时间,实现加热功率的快速调节,从而实现温

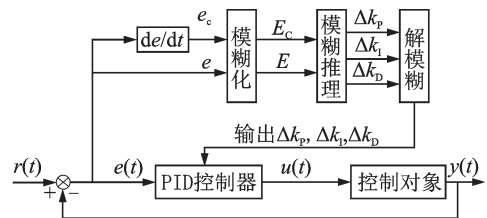


图6 模糊PID控制框图

Fig.6 Fuzzy PID control block diagram

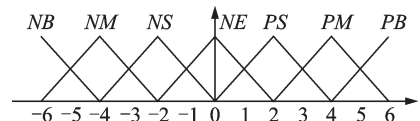


图7 隶属函数曲线

Fig.7 Membership function curve

表1  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的规则控制表

Tab. 1 Rule control table for  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$

$\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB							
NM		0/10/0				5/0/0	
NS							
$e_c$	ZO	1.1/0/0		0/0/0		0.9/0/0	
PS							
PM		5/0/0				0/10/0	
PB							

度控制。

### 3.3 制冷阶段

制冷阶段的判断: $\Delta T_{vg} < 0$ 。将两台制冷压缩机分为3个档位:0档(无压机启动)、1档(1个压机启动)和2档(2个压机启动),首次启动制冷时默认为1档。因此制冷控制主要包括加档、减档和保持3种控制模式。各种控制模式切换的模糊判据如表2所示。其中, $\Delta T_{vf}$ 为实际的温度变化速度。

表2 制冷阶段控制模式切换的模糊判据

Tab. 2 Fuzzy criterion of control mode changing in the cooling stage

序号	$\Delta T_{vf} - \Delta T_{vg}$	$T_f - T_g / ^\circ\text{C}$	控制模式
1	+	+	加档
2	+	$\geq -0.4$	保持
		$< -0.4$	减档
3	-	$\leq 0.4$	保持
		$> 0.4$	加档
4	-	-	减档

### 3.4 保温阶段

保温阶段的判断: $\Delta T_{vg} = 0$ 。由于 $\Delta T_{vg} = 0$ ,因此保温控制应尽量使 $|\Delta T_{vf}|$ 趋近于0。如果 $\Delta T_{vf} > 0$ ,且 $T_g > T_f - 0.4$ ,则切换至制冷控制模式;如果 $\Delta T_{vf} < 0$ ,且 $T_g < T_f - 0.4$ ,则切换至加热控制模式;否则,保持当前控制模式。保温阶段的制冷控制模式和加热控制模式与加热阶段、制冷阶段的控制方法基本相同。

## 4 试验结果分析

在空间温度环境模拟系统联调成功后,进行了加热、制冷和保温,以及 $3^\circ\text{C}/\text{h}$ 和 $15^\circ\text{C}/\text{h}$ 温度变化试验,试验的结果如图8—12所示。

由图8可以看出,在加热阶段,由模糊PID控制的环境模拟温箱的实际温度反馈值与设定的温度曲线拟合得非常好,温度控制精度达到了 $0.1^\circ\text{C}$ ,而传统PID方式的控制效果则不是很理想,表明所采用模糊PID控制算法和逆变调功方法具有优良的控温效果。

由图9可以看出,由于制冷机组的档位较少,不能实施精细的制冷量控制,因此环境模拟温箱的实际温度反馈值与设定的温度曲线存在一定误差,但是温度误差均在允许范围 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内,小于 $\pm 1^\circ\text{C}$ ,可以满足系统的温度控制要求。

由图10可以看出,在高温 $60^\circ\text{C}$ 保温时,主要为加热控制模式,保温初始阶段温度超调量小(低于 $0.2^\circ\text{C}$ ),且保温过程温度恒定,控温精度高,效果较好;在低温 $-20^\circ\text{C}$ 保温时,主要为制冷控制模式,温

度波动较大,实际的温度反馈值在-20℃附近波动,但其最大的温度误差为0.7℃,温度误差均在允许范围内。

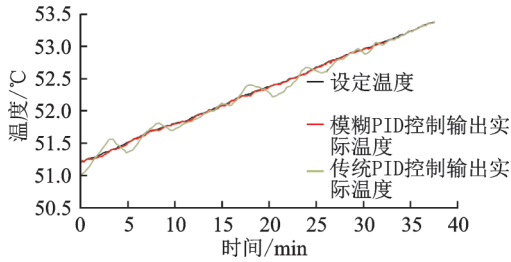


图8 加热阶段温变曲线

Fig.8 Temperature variation curve of heating stage

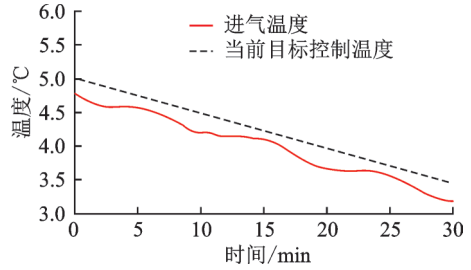
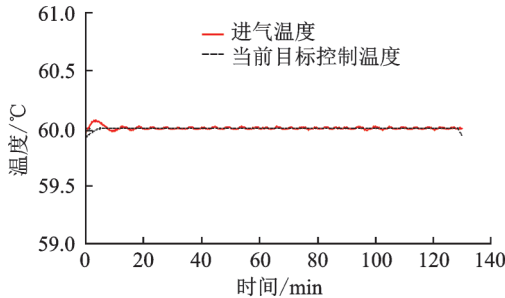
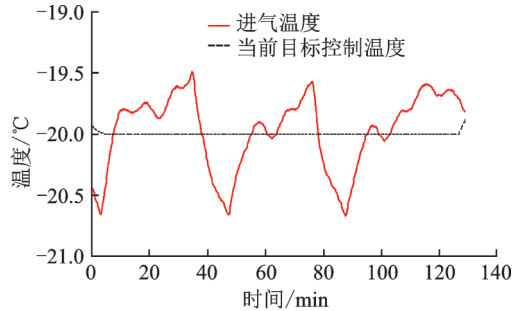


图9 制冷阶段温变曲线

Fig.9 Temperature variation curve of cooling stage



(a) 60℃保温曲线  
(a) Heat preservation curve of 60℃



(b) -20℃保温曲线  
(b) Heat preservation curve of -20℃

图10 保温阶段温度曲线

Fig.10 Temperature variation curve of heat preservation stage

由图11和图12可以看出,在温度变化速度分别为3℃/h和15℃/h的一个循环周期内,环境模拟温箱的温度反馈值和设定的温变曲线拟合良好,达到了-20~60℃温度变化范围、±1℃温度控制精度、3~15℃/h变温速率等主要技术指标,满足空间温度环境模拟系统的使用要求。

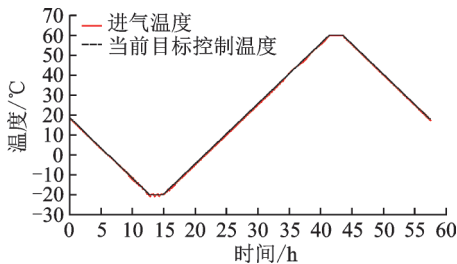


图11 3℃/h温变曲线

Fig.11 Temperature variation curve at speed of 3℃/h

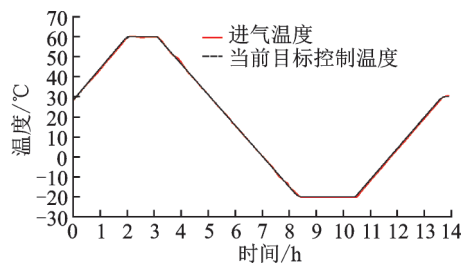


图12 15℃/h温变曲线

Fig.12 Temperature variation curve at speed of 15℃/h

### 5 结束语

(1) 建立了外层空间温度、辐照环境模拟系统的结构模型,结合防冻液循环与气体循环的方式实现

了环境模拟温箱温度远程控制和防辐照设计。

(2) 将温控过程分为加热、制冷和保温3个阶段,并分别进行控制。加热阶段采用增量式PID控制算法和逆变调功方法进行控制,制冷阶段根据温变速率和温度误差进行模糊控制,而保温阶段则采取加热和制冷联合控制的方法,温控效果良好。

(3) 环境模拟温箱的温变曲线和设定的温变曲线拟合良好,能够达到 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围、 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度控制精度、 $3\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 变温速率等主要技术指标,满足空间温度环境模拟系统的使用要求。

#### 参考文献:

- [1] 童靖宇.我国空间环境试验的现状与发展建议[J].航天器环境工程,2008,25(3): 237-241.  
Tong Jingyu. A review on spacecraft environment experiments in China and some proposals[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(3): 237-241.
- [2] 李可,庞丽萍,刘旺开,等.环境模拟舱体的建模仿真及控制方法[J].北京航空航天大学学报,2007,33(5): 535-538.  
Li Ke, Pang Liping, Liu Wangkai, et al. System model simulation and control method used in environmental simulation chambers [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(5): 535-538.
- [3] 齐燕文.空间磁环境模拟技术[J].航天器环境工程,2005,22(1): 19-23.  
Qi Yanwen. Space magnetic environment simulation technology[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(1): 19-23.
- [4] 杨春信,韩海鹰,张丽娜. KM6空间环境模拟设备运动模拟器内腔温度控制设计方案[J].中国空间科学技术,2005(1): 15-22.  
Yang Chunxin, Han Haiying, Zhang Lina. Two design schemes of temperature control for motion simulator in space environmental simulator[J]. Chinese Science and Technology, 2005(1): 15-22.
- [5] 张林华.多环境参数人工模拟技术研究[D].西安:西安建筑科技大学,2005.  
Zhang Linhua. Study on technologies of artificial simulation of multiple environment parameters[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.
- [6] 孙培杰,张良俊,吴静怡,等.对接机构综合实验台温度环境模拟分系统温场优化[J].上海航天,2010(4): 43-48.  
Sun Peijie, Zhang Liangjun, Wu Jingyi, et al. Temperature field optimization of cryogenic environment simulation system for spacecraft docking test bench[J]. Aerospace Shanghai, 2010(4): 43-48.
- [7] 李文茜,李君利,李鹏宇,等.迷宫屏蔽剂量计算方法的比较研究[J].辐射防护,2009,29(1): 1-7.  
Li Wenqian, Li Junli, Li Pengyu, et al. A comparison of the calculation methods of the maze shielding dose[J]. Radiation Protection, 2009, 29(1): 1-7.
- [8] 周晓光.汽车防冻液的研究与发展[J].吉林师范大学学报,2013(1): 60-64.  
Zhou Xiaoguang. Research and development of automotive antifreeze[J]. Journal of Jilin Normal University, 2013(1): 60-64.
- [9] 张文博.阀门密封材料低温特性试验研究[D].成都:西南石油大学,2012.  
Zhang Wenbo. Experimental study on the valve sealing material low-temperature characteristics[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [10] 沈希.制冷压缩机制冷量测控系统的若干理论问题与实践[D].杭州:浙江大学,2006.  
Shen Xi. Theory and application of the testing and controlling system for refrigerating capacity of refrigerant compressors[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [11] Lunden J, Vanhanen V, Myllymaki T, et al. Temperature control efficacy of retail refrigeration equipment[J]. Food Control, 2014(45): 109-114.
- [12] 刘庆鹏.基于线性反馈控制Buck变换器的研究[D].大庆:东北石油大学,2012.  
Liu Qingpeng. Research on Buck converter based on linear feedback control[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2012.
- [13] Sira-Ramirez H, Juarez A L, Cortes-Romero J. Robust input-output sliding mode control of the buck converter[J]. Control



Engineering Practice, 2013, 21 (5): 671-678.

- [14] 王晓员. 基于模糊自适应PID的温度控制系统[J]. 成都大学学报, 2011, 30(4): 361-363.  
Wang Xiaoyuan. Temperature control system based on fuzzy self-adapting PID[J]. Journal of Chengdu University, 2011, 30(4): 361-363.
- [15] 宋丽芳, 张永立, 杨妆, 等. 基于预测的模糊自整定PID温度控制系统[J]. 科学技术与工程, 2006, 14(6): 2142-2147.  
Song Lifang, Zhang Yongli, Yang Zhuang, et al. Temperature control system of fuzzy self-tuning PID based on prediction[J]. Science Technology and Engineering, 2006, 14(6): 2142-2147.
- [16] Sanjoy D, Chandra S L, Nidul S. Automatic generation control using two degree of freedom fractional order PID controller[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 1(11): 120-129.

#### 作者简介:



代海林(1986-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 航天器总装技术, E-mail: hailind@sina.com。



袁伟峰(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 航天器AIT技术, E-mail: bh-dhl88@163.com。



贺云(1987-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 航天器总装技术, E-mail: 570489672@qq.com。



张丽丽(1986-), 女, 本科, 技师, 研究方向: 航天器总装, E-mail: 374456848@qq.com。



张涛(1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 航天器总装检验, E-mail: 875985190@qq.com。

(编辑: 夏道家)