

基于虚拟仪器的航天器外热流系统设计

汪新舜^{1,2}, 吴星云¹, 沈 辉^{1,2}, 侍 尉², 陈延龙²

(1. 上海卫星装备研究所, 上海 200240;

2. 上海裕达实业有限公司, 上海 200240)

摘要: 传统的航天器外热流测控系统处理大数据能力差, 缺乏自整定 PID 控制策略和故障定位处理机制, 控制周期过长, 控制精度差及程序维护性差等; 为了解决上述问题, 开发了一种基于虚拟仪器的航天器真空热试验外热流系统, 使用了多线程低耦合的软件队列处理框架, 采用了自顶向下逐步细化的整体分层设计, 将各个功能独立模块化编写, 方便开发人员并行开发, 便捷的应对程控电源和温度采集设备更新带来的软件维护需求; 新增故障处理机制, 迅速定位并自动修复故障, 保证了试验长期运行的稳定性; 新增自整定 PID 算法, 解决了航天器热试验过程中存在的非线性、参数时变性和模型不确定性问题, 提高了控温精度, 减少试验准备时间; 软件同时具备试验数据管理和报表生成等功能, 温度误差范围为 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$, 具有较高工程应用价值。

关键词: 外热流; 软件框架; 自动故障修复; 自整定 PID

Design of External Heat Flux System for Spacecraft Based on Virtual Instrument

WANG Xinshun^{1,2}, WU Xingyun¹, SHEN Hui^{1,2}, SHI Wei², CHEN Yanlong²

(1. Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Yu Da Industrial Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: The traditional spacecraft external heat flow measurement and control system has abilities of poor process high-speed data, long control cycle, poor control accuracy and program maintainability, which lacks of the self-tuning PID control strategy and fault location mechanism. In order to solve the above problems, an external heat flow system for the spacecraft vacuum thermal test based on the virtual instrument is developed, which uses the queue-processing framework with multithreading and low-coupling software technique, the overall layered design is adopted with top-down refinement. Each functional model of the software program is independently written, it is convenient for developers to develop in parallel, which easily updates the software maintenance requirements of programmable power supply and temperature acquisition equipment. New fault handling mechanism is added, which locates and repairs faults quickly and automatically to ensure the stability of the long-term test operation; New self-tuning PID algorithm is added, which solves the problems of non-linearity, parameter time-varying and model uncertainty in spacecraft thermal test, improves the temperature control accuracy and reduces the test preparation time. The data management and report generation functions are also included. The temperature error range is $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$, which has high engineering application value.

Keywords: external heat flux; software framework; faults repair automatically; self-tuning PID

0 引言

为了模拟航天器在外太空环境中, 表面接收的动态外热流, 在地面环境模拟装备中实施真空热试验不可或缺。目前国内外主要采用的是红外热流模拟方法, 即采用程控直流电源给加热装置供电, 通过测温设备实时采集监测点温度, 使用控制策略智能调节电流来模拟空间外热流^[1-3]。对于飞行任务复杂、飞行周期长、航天器内部或者外部热流变化大且温控要求高的航天器, 必须在地面进行长时间连续真空外热流模拟试验验证功能。随着国外对军工单位的进口限制和国产仪器设备的迅速发展, 在原有的测控系统中集成国产设备驱动的需求越来越多, 不仅可以降低成本, 还可以推动国内仪器技术的应用发展创新。

真空外热流试验测控系统一般由真空容器、被测航天器组件、温度传感器、加热片或者加热灯阵、温度采集仪及程控可编程电源柜组成。测控系统软件功能包括: 温度采集设备的配置、程控直流电源的配置、控制策略列表的配置实施、试验数据的显示与存储、试验过程监控、报警设置以及故障定位反馈修复等。

目前的航天器外热流测控系统软件主要存在以下不足:

- 1) 程序框架耦合度较高, 并发性较差, 导致控制周期冗长, 控制效果一般;
- 2) 软件未及时更新国产设备驱动, 未模块化编程, 不同设备型号混合使用的兼容性一般;
- 3) 缺乏自整定 PID 模块, 不便于处理航天器热试验过

收稿日期: 2021-12-15; 修回日期: 2022-02-11。

作者简介: 汪新舜(1990-), 男, 江苏滨海人, 硕士, 工程师, 主要从事航天器地面设备测控系统方向的研究。

引用格式: 汪新舜, 吴星云, 沈 辉, 等. 基于虚拟仪器的航天器外热流系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 166-172, 180.

程中存在的非线性、参数时变性和模型不确定性问题；

4) 试验的温度采集配置、电源工况配置、数据查看和测控任务执行平台分散，导致程序的整体性较差，不利于试验人员操作；

5) 数据存储和交互方式落后，限制了数据存储的文件大小，不利于高速数据的处理；

6) 故障代码不够全面，难以精确定位故障位置，未对故障发生的信息进行记录存储，缺乏自动恢复机制。

为了解决以上问题，根据航天某院真空热试验任务要求，开发了一种基于虚拟仪器的航天器真空热试验测控系统。基于 LXI 总线集成了数字万用表、矩阵开关模块和国产程控可编程电源等，在 LabVIEW 平台下开发测控软件，对软件框架进行重新设计，功能模块化编程；使用 ActiveX 等控件整合平台，实现配置测控一体化；兼容国产和进口程控电源控制驱动；使用 TDMS 高速二进制文件存读数据；新增自整定 PID 控制算法和故障自动定位恢复机制，具有效率高、控制精度高和系统稳定性强等特点。

1 测试需求

航天器真空外热流测控系统的参数及要求如表 1 所示。

表 1 测控需求表

项目	指标要求
热电偶通道	180 路
温度量程	-200~400 ℃
温度采集精度	6 位半
电源控制通道	52 路
电源控制精度	±0.01 V/±0.01 A
电源功率	60~7.5 A(360 W) 32 V~5A(160 W) 6 V~3A(18 W)

测控系统主要任务包括热电偶温度采集与控制策略列表执行。热电偶温度采集时，需将热电偶测量端贴至被动元件表面，参考端插入电子冰瓶中，热电偶两端连接至矩阵开关板卡，板卡插入数字万用表，软件远程配置采集温度；控制策略列表执行时，电源输出端连接加热片，加热片贴在被动元件表面，编辑多个闭环开关开环控制工况和对应执行时间，形成工况列表，软件加载自动化切换控制模式，同时系统还具备试验数据存储显示和故障报警自动修复功能等。

2 系统硬件及原理设计

虚拟仪器技术是一种利用高性能模块化硬件，结合高效灵活的软件来实现各种测试、测量和自动化的应用技术，具有开发周期短、通用程度高和部署方便灵活等优势^[4-7]。

航天器真空外热流测控系统基于 LXI 工业总线开发，LXI 总线是一种功能接口标准，定义了基于以太网 802.3 标准的接口技术，确保

了仪器间的互通性，融合了其他仪器的高性能、体积小及高速吞吐率等特点，是新一代测控系统模块化框架平台标准^[8]。

系统硬件集成了真空容器、被测航天器部组件、温度传感器、加热片或者加热灯阵、温度采集仪及程控可编程电源柜等，通过继电器开关动作切换热控回路不同接入点至数字万用表 ADC 模块测量热电偶温度，程控电源柜根据控制策略输出功率。设计时，选用 KEITHLEY-2701 数字万用表，六位半（22 位）精度，500 通道/秒的扫描速率，搭载 KEITHLEY-7708 开关板卡，提供 40 个两极通道或 20 个四极通道的多选切换功能，可以配置为两组相互独立的多路复用器，支持热电偶、RTD 和热敏电阻温度传感器。当试验热电偶需配备多个通道时，可以将多台 KEITHLEY-2701 数字万用表通过 LXI 协议接入交换机进行组网；选择国产大华 DH1766-1 三通道和 DH1790-7 单通道输出精密型可编程直流电源，纹波有效值低于 1 mV，峰峰值低于 6 mV。DH1766-1 有 3 个通道，分别支持 32 V/3 A/96 W、32 V/3 A/96 W 和 6 V/3 A/18 W，DH1790-7 单通道，支持 160 V/7.5 A/360 W，集成了 14 台 DH1766-1 和 10 台 DH1790-7，共 52 个通道。

试验人员在搭建热电偶采集回路时，采用外部电子冰瓶产生的标准 0℃ 作为外部补偿，将板卡通道 CH1 到 CH40 的 H 端分别与 Y2-50ZJM 插头 1~40 芯相连，L 端短接后与插头 49~50 芯连接，通过罐体法兰盘连接至罐内热电偶铜导线，热电偶正负极短接成为测量点，紧贴至被测部件表面，插头的 49~50 芯铜导线与热电偶负极康铜丝通过 CX2-55M 通孔针座连接至罐外，短接成为参考点放进 0℃ 的电子冰瓶中。在搭建电源加热回路时，DH1790-1、DH1766-7 安装在程控电源柜中，电源末端连接负载导线正负极，通过转接航空插头和罐体法兰盘，连接至罐内加热装置。硬件连接如图 1 所示，实现了数字万用表、开关板

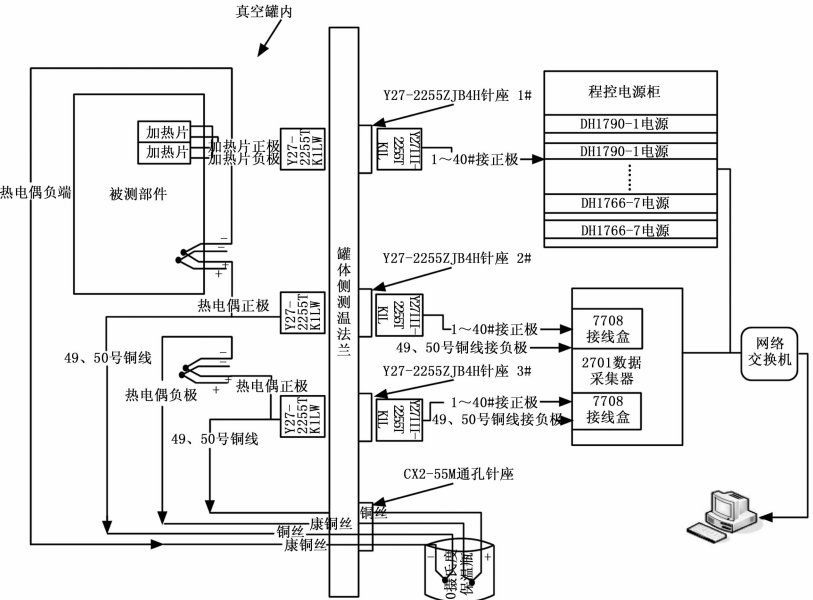


图 1 硬件连接示意图

卡、程控电源柜、真空罐体和待测回路之间的连接。

3 系统软件结构及功能

测控系统软件部分基于 LabVIEW 开发，它是美国国家仪器 (NI) 公司研制的程序开发环境。LabVIEW 被称为“G”语言，即图形化编程语言，其核心是“数据流”，通过数据在连线上的流动，完成程序流程的控制及功能的实现^[9-11]。

3.1 软件整体设计

真空外热流测控系统软件采用模块化编程，根据测控需求将软件分为试验登录、试验配置、试验准备、试验过程、试验数据分析及程序维护等模块，每个模块又分为若干个小的功能模块，这样设计既方便调试和修改，又可灵活配置使用于不同应用场景。试验登录包括用户权限管理及进入测控主界面显示功能；试验配置包括试验信息配置、温度存储路径配置、电压电流存储路径配置、报警信息存储路径配置、远程监控客户端配置、测温通道配置、控温通道配置、电源程控配置、加热回路配置及工况列表配置功能；试验准备包括测温电缆检查、加热电缆检查、加热片电阻检测、热响应试验及 PID 参数整定功能；试验过程包括加载测温配置表、采集显示温度数据、配置开启服务器、加载工况列表、执行控制策略、电压电流数据回读显示、过程数据监控报警、故障反馈恢复策略、工况列表动态修改、执行策略动态修改及 PID 参数动态修改功能；试验数据分析包括数据读取、数据拼接及生成报表功能；程序维护包括用户数据库维护、设备驱动库维护、试验数据库维护、控制策略维护及试验表单维护等如图 2 所示。

软件系统的运行模式如图 3 所示，试验配置人员、试验准备人员、试验值班人员、试验监控人员、试验故障备份人员及试验系统维护人员通过相同的接口使用不同权限进行登录，利用工业以太网将热电偶采集配置表、电源控制策略列表及系统故障备份信息等试验配置信息写入试验数据服务器中心和备用数据服务器中，试验服务器中心根据电源控制策略列表将数据包通过 LXI 通讯协议分发电源控制驱动和数采控制驱动，设备接收到指令开始试验。试验服务器中心发生故障，无法正常运行，启用服务器之间的连锁机制，备用服务器自动接管试验。同时配备了试验数据查看客户端，多个用户可以同时从服务器调取数据进行查看。

程序使用多线程编程，为了防止数据传递的丢失及线程耦合产生竞争关系，重新设计了程序框架，使用生产者消费者队列处理机制^[12]，如图 4 所示，在寄存器中开辟独立栈进行事件或数据的队列入栈操作，执行温度数据高速多通道实时采集、程控电源群 PID 控制、同时执行工况列表定时加载、数据存储解析以及记录等一系列事件。实现了事件线程之间的解耦合，确保了程序的稳定性。

3.2 继电器反馈式 PID 自整定

基于继电器反馈自整定方法是在多次测试实验基础上，逐步获得系统某一特性参数。程序不需要对系统有深入的了解，在实验过程中不断调节来实现某一特殊地可以观察



图 2 软件功能模块

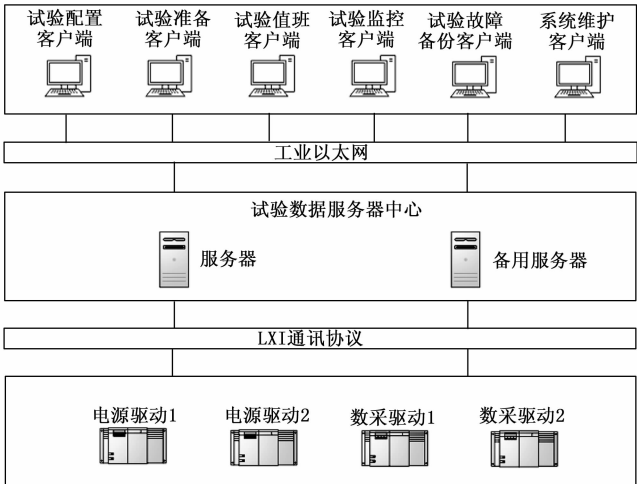


图 3 软件系统运行模式

的系统特性，微调试可以获得较准确的系统参数^[13-15]。在控制系统中，有两种状态：测试状态和控制状态。在测试状态下，由一个继电器环节来测试系统的振荡幅值和频率，获得系统的频域信息，构建相似的模型结构，采用选定的控制策略获得系统的控制参数；在控制状态下，使用上一个测试状态得到的控制参数运行系统。测试状态伴随着测试条件的变化而改变，反复循环获得最佳参数，基于继电器

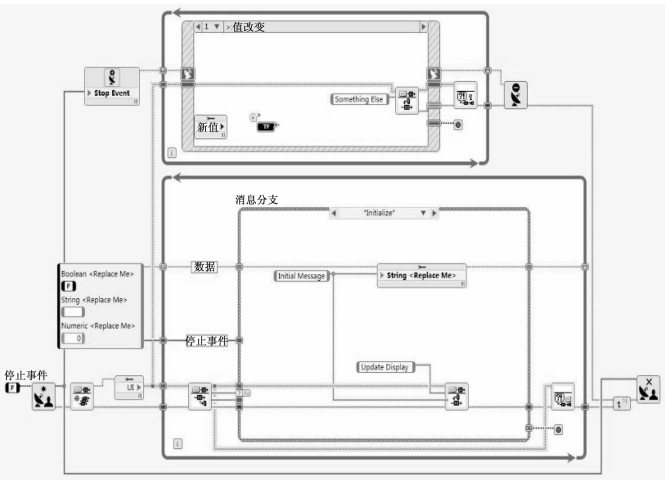


图 4 软件设计框架

反馈的自整定工作原理图如图 5 所示。

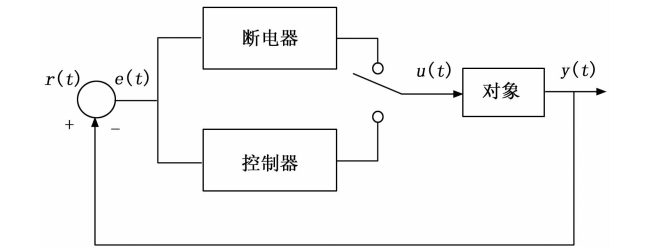


图 5 基于继电器反馈的 PID 自整定工作原理图

描述函数法是最常用的确定临界增益和临界频率的方法之一。该方法利用继电器非线性环节输入信号与输出信号之间的基波分量关系来近似分析的一种有效方法^[16]。标准继电的描述函数为：

$$N(a) = \frac{4d}{\pi a}$$

(1)

其中： d 为继电器环节的幅值， a 为振荡曲线的幅值。假设 $G(j\omega)$ 奈氏曲线与 $-1/N(a)$ 曲线在负实轴处相交，而对象的奈氏曲线与描述函数的负倒数曲线的交点称为临界点，定义对象的临界点频率为 ω_μ 如下：

$$\arg\{G(j\omega)\} = -\pi$$

(2)

因此我们可以估计振荡周期 T_μ 和临界增益 K_μ ：

$$T_\mu = \frac{2\pi}{\omega_\mu}$$

(3)

$$K_\mu = \frac{1}{|G(j\omega)|} = \frac{4d}{\pi a}$$

(4)

使用 Z-N 公式作为整定规则，Z-N 整定规则在控制工程实践中有着广泛的应用，对于 P、PI 和 PID 控制器的设定如表 2 所示。

表 2 Z-N 的 PID 参数整定公式

控制器	K_p	T_i	T_d
P	$K_\mu/2$		
PI	$K_\mu/2.2$	$T_\mu/1.2$	
PID	$K_\mu/1.7$	$T_\mu/2$	$T_\mu/8$

在测试状态的循环中，程序对采集到的被控过程量进行标度变换，与设定值进行比较，使用 Z-N 规则自整定，如果被控过程输出量小于设定值，则继电器导通状态输出的控制量电压幅值为 M ；反之，如果被控过程输出量小于设定值，则继电器导通状态输出的控制量电压幅值为 m 。将控制量转换为 PWM 波， M 的占空比为 100%， m 的占空比为 0%，使用模拟量输出进行自整定，由环振荡曲线计算出对象的振荡周期 T_μ 和临界增益 K_μ ，程序依据表格 2 的 Z-N 临界比例度整定公式计算出 PID 参数。在控制状态的循环中，使用整定出的控制参数进行闭环控制。多次反复以上循环，获得最终自整定参数，模块的前面板和程序框图如图 6 所示。

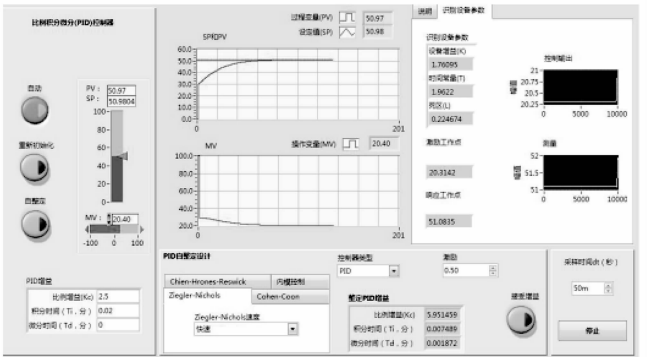


图 6 基于继电器反馈的自整定 PID 前面板和程序框图

基于继电器反馈的 PID 自整定控制器具备较好的鲁棒性，这种方法的优点在于，测试过程不需要任何信号发生设备，系统产生的振荡是非线性系统的内部特征；整定过程在闭环中进行，系统的抗干扰能力强，克服系统非线性对参数整定的影响，但是对于纯滞后的低阶系统，整定后的参数偏差较大^[17]，其缺点如下：

- 1) 对于纯滞后较大的系统，继电器整定后的系统幅值裕度不够，出现较大的振荡；
- 2) 对于小滞后或对象阶次较低的情况，临界频率太高，校正后的系统带宽过大；
- 3) 无法单独整定积分和微分时间。

在航天器外热流实验中，该方法不适合加热笼热传导式的 PID 自整定，适用于贴片式热传递 PID 自整定。

3.3 模糊规则 PID 自整定

模糊控制对数学模型的依赖性弱，不需要建立过程的精确数学模型，模糊 PID 控制是结合模糊规则与 PID 的一种控制方式，利用模糊逻辑并根据一定的模糊规则对 PID 的比例、积分和微分系数实施优化以达到理想的控制效果^[18]，模糊 PID 的控制原理图如图 7 所示。

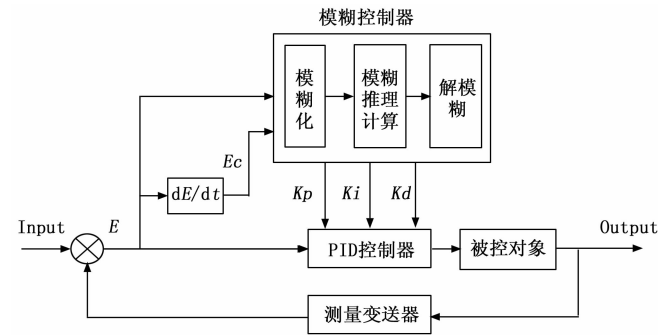


图 7 模糊 PID 控制原理图

模糊控制是两输入三输出的控制器，以误差 E 和误差变化率 E_c 为输入，以 PID 的参数修正值 ΔK_P 、 ΔK_I 和 ΔK_D 为输出。规定误差 E 和误差变化率 E_c 的实际变化范围即基本论域 $[E_{\min}, E_{\max}]$ 和 $[E_{c\min}, E_{c\max}]$ ，取量化因子 G_E ，将误差离散化为 N 档：

$$G_E = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{N} \quad (5)$$

误差所取的模糊集合为 $[-N, -N+1, \dots, 0, \dots, N-1, N]$ ，即 $e_i = E \cdot G_E$ 。同理对 E_c 进行模糊化处理。对于模糊控制输出的模糊集合，通过比例因子 G_u ，将实际输出映射至基本论域 $[-u, u]$ ，即 $u_i = U_i \cdot G_u$ 。采用的模糊论域为 $[NB$ (负大)、 NM (负中)、 NS (负小)、 ZO (零)、 PS (正小)、 PM (正中)、 PB (正大)]，7 个模糊语言变量。模糊言语值是通过隶属函数来描述的，工程上常采用三角隶属函数、S 型隶属函数、Z 型隶属函数和高斯隶属函数等作为隶属函数。使用 LabVIEW 提供的模糊系统设计器，设置三角隶属函数界面如图 8 所示。

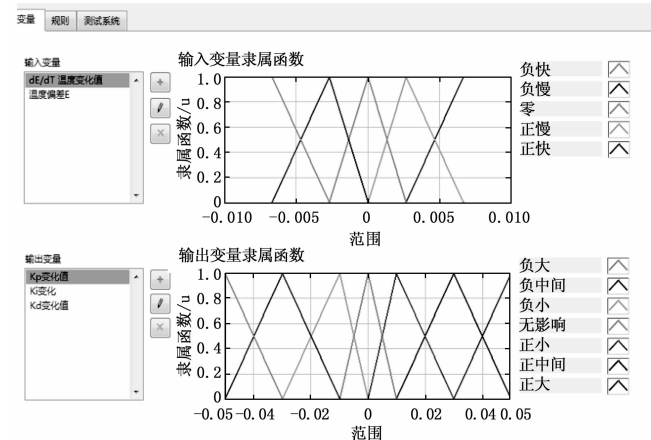


图 8 三角隶属函数设置界面

获得 E 和 E_c 的隶属度值后，建立针对模糊控制输出 ΔK_P 、 ΔK_I 和 ΔK_D 的量化模糊控制规则表，获得隶属值后，选择适当的解模糊算法进行运算，常用的解模糊方法有：最大隶属度法和加权平均法（重心法）等^[19]，使用重心法计算各输出的量化值，其公式如下：

$$U_0 = \frac{\sum_{i=0}^n M_i \times F_i}{\sum_{i=0}^n M_i} \quad (6)$$

其中： M 为隶属度， F 为模糊量化值，由于隶属函数的特性，在任意方向上的隶属度之和为 1，所以每一个对象的计算等同于矩阵计算，公式如下：

$$[M_{e1} \ M_{e2}] \begin{bmatrix} F_a & F_b \\ F_c & F_d \end{bmatrix} [M_{\alpha 1} \ M_{\alpha 2}]^T \quad (7)$$

结合量化系数 G_u 得到最终 K 值，公式如下：

$$K_n = K_{n-1} + \Delta K \times G_u \quad (8)$$

以温差和误差变化率作为二维输入， ΔK_P 、 ΔK_I 和 ΔK_D 的增量作为三维输出，根据温度控制精度要求，自定义基本论域，添加隶属函数，生成多条模糊规则，程序提供 5 种去模糊化方法：面积中心、改进面积中心、中心、最大值中心和最大值平均，用户根据需求自行选择。譬如取温度误差变化率为 $0.005\text{ }^\circ\text{C}$ ，温度误差为 $0.2\text{ }^\circ\text{C}$ ，通过上述操作，得到 ΔK_P 的增量为 $-0.000\ 702\ 895$ ，同理可以得到 ΔK_I 、 ΔK_D 的增量。使用模糊系统设计器生成以 fs 为后缀的二进制文件，作为模糊控制系统的模糊规则输入文件，对文件进行系统仿真测试，LabVIEW 加载文件进行 PID 参数自整定，仿真界面和程序框图如图 9 所示。

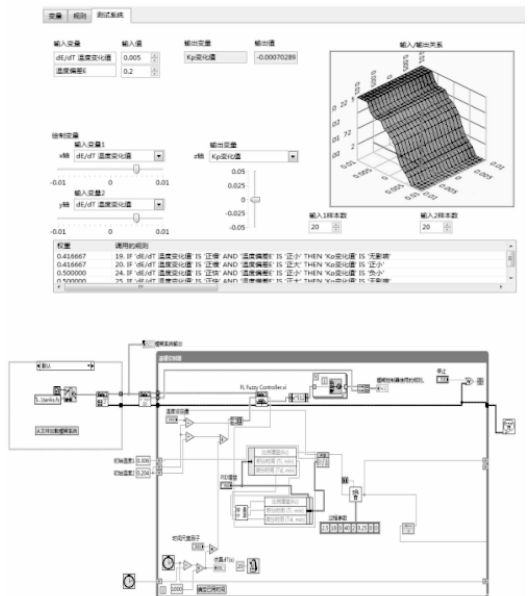


图 9 仿真界面及程序框图

3.4 故障自动修复机制

软件的工作及故障修复机制流程图如图 10 所示，硬件设备在试验的过程中，由于长时间运行出现故障，不及时

修复会对航天器部组件产生不可估计的损坏, 尤其是在高温工况加热阶段, 上位机失去对电源的控制, 会出现试验对象被烧毁的现象。新增的故障修复机制根据经常发生的故障类型编制, 故障类型分为仪器通讯失联和仪器元器件损坏两类, 仪器通讯失联, 假设是由仪器通讯模块稳定性造成的, 启用自动重连机制, 重连成功后继续试验; 假设仪器已损坏, 配备了可替换的硬件设备, 自动切换至备用设备继续试验, 保证了试验运行的安全性和连续性。

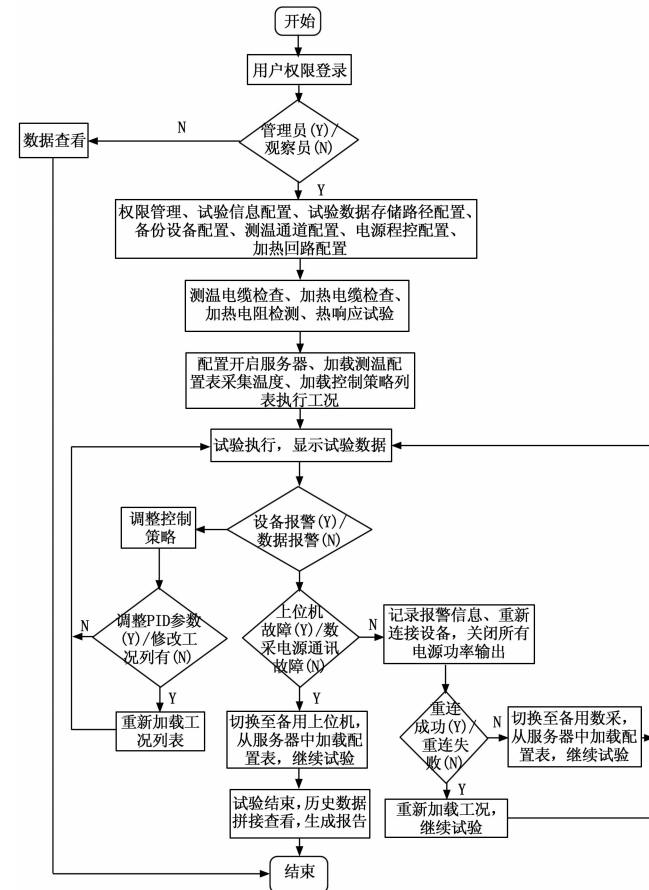


图 10 软件故障修复机制流程图

3.5 试验配置

试验系统的用户信息存储在服务器数据中心, 使用 SQL 语言访问进行增删改查, 在试验登录界面输入用户名和密码信息, 程序自动比对数据库, 提供系统最后登录时间、用户权限和登录次数等信息。用户权限分为管理员、操作员和观察员两种, 管理员拥有用户管理的权限, 即用户、密码及使用权限更改; 操作员可以使用试验程序, 无用户管理权限; 观察员只能登陆查看试验数据显示界面, 无用户管理权限, 无操作权限。

对于温度采集配置, 用户需输入待测温度点名称、传感器类型、上下限报警值和受控电源名称, 选择是否作为控制反馈点。对于电源控制配置, 需编辑执行工况和工况列表。在执行工况中, 写入电源个数、电源类型、控制方式、跟随电源、电源名称、电源地址、限定电流、设定电

流、设定温度、上限温度及下限温度, 其中电源类型包括国产大华 DH1790-7、DH1766-1 和安捷伦 N5750 等, 控制方式包括开环、开关、闭环和自整定控制。在工况列表中, 设定多个工况的执行时间, 形成列表, 加载至程序中, 实现长时间工况自动切换的效果。所有的配置文件均以 EXCEL 形式编辑存储。在存储文件配置界面中, 输入试验名称信息, 生成数据存储路径, 在数据存储文件夹中, 生成 3 个数据文件, 分别用来存储温度、电压电流和故障报警信息。

对于试验备用设备配置, 远程监控客户端在另外一台上位机上开启, 配置 IP 地址和端口号, 用来与试验控制上位机进行通讯, 试验控制上位机一旦出现异常, 丢失了与远程监控客户端的连接, 远程监控客户端从数据服务器中心获取加载试验配置信息, 切换为试验控制上位机, 接管试验; 配置备用的数据采集仪和程控电源的 IP 地址, 当原有的设备发生故障无法重连, 程序自动切换使用备用设备的 IP 地址进行试验。

3.6 试验工况

试验准备需要进行测温电缆的检查, 测温电缆一端连接热电偶或者 PT100, 另外一段通过真空法兰盘接到罐外, 使用万用表依次测量热电偶导通或者 PT100 阻值检查是否正常。加热电缆一端连接加热片或者红外灯笼, 另外一段通过真空法兰盘接到罐外, 使用万用表依次测量加热元器件的阻值检查是否正常。对于热系统设计比较复杂, 对控温速率及精度要求较高的航天组件, 可以使用自整定 PID 模块, 提供了阶跃开环, 阶跃闭环, 继电器及模糊规则 PID 自整定控制策略, 在试验开始前获得整定的 PID 参数。

正式的真空外热流试验开始前进行热响应试验, 使用单台电源加热回路测试模块, 根据试验配置表, 依次对程控电源做输入电流指令操作, 检测通讯是否正常, 通过加热反馈温度, 检测加热片性能是否正常。

在试验工况执行界面中, 向用户提供了电源控制界面、温度数据显示、电源实时曲线显示和故障报警信息 4 个选项卡。打开温度数据显示选项卡, 加载热电偶配置 EXCEL, 开始采集温度, 数据显示在曲线图中, 由于数据量庞大, 每一个小时分割存储, 可使用提供的回看软件进行拼接显示。打开电源控制界面, 加载工况列表, 程序自动比对时间开始试验, 电源控制界面如图 11 所示。在电源实时曲线显示界面中, 查看电源的电压电流实时输出曲线。用户可以在故障报警信息界面中, 查看上位机、电源、数采故障和温度上下限报警信息。在试验执行的过程中, 用户根据试验过程数据动态灵活地修改工况列表, 同时登录多个试验监控客户端从服务器中心调取浏览实时试验数据。

3.7 数据管理及软件维护

试验数据分为 EXCEL 配置文件和 TDMS 存储文件。TDMS 是一种二进制记录文件, 兼顾了高速易存储等优势, 其写入文件的速度可以达到 600 M/S, 广泛应用在测量测控行业^[20]。数据全部存储在服务器中心备份, 在试验过程

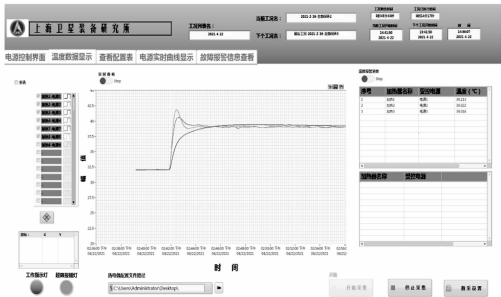


图 11 程序控制界面

中，用户可灵活地对配置文件进行修改，对存储文件读取查看。

试验数据文件夹中生成了温度、电源电压电流和报警记录数据，以试验信息命名，TDMS 格式保存，试验数据每一个小时分割存储，使用提供的历史数据拼接回看程序，如图 12 所示，加载数据文件夹，选择需要查看的数据，按照时间顺序依次添加至数据列表中，拼接显示在曲线图中。软件使用 ActiveX 控件调用 WORD，一键生成试验报告。ActiveX 是 Microsoft 对于一系列策略性面向对象程序技术和工具的称呼^[21]。在报告中包括工况执行，开关和闭环控制的精度分析等信息。试验人员依据报告判断试验流程执行情况，用户依据报告判断试验是否达到预计效果。

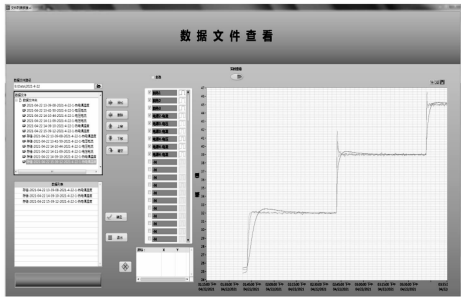


图 12 数据回看界面

软件维护包括用户数据库维护、试验数据库维护、试验表单维护、设备驱动库维护及控制策略维护。用户数据信息包括用户名、密码、权限、使用时间及使用次数等，存储在试验数据服务器中心，管理人员在试验前后，对用户信息进行增删改查；试验数据存储在数据服务器中心，试验结束后，由用户拷贝分析，试验管理人员及时整理存储空间，为下次试验做准备；不同的航天器真空外热流试验需要监测和控制的参数存在差异，用户提供需求，试验管理人员定制化维护编制试验表单。

设备驱动库采用模块化编程，模块采用数据流方式驱动，如图 13 所示，程控电源驱动程序块输入设备名称、IP 地址、设定电压、设定电流、限定电流及错误信息等参数，输出设备 IP、实时电压、实时电流及错误信息等参数。当程控电源品种增加或更新驱动时，软件维护人员只需要对程控电源驱动程序块进行修改。数采设备程序块输入设备名称、IP 地址、采集通道数、传感器类型、采集间隔及错

误信息等参数，输出设备 IP、实时温度及错误信息等参数。当数采设备品种增加或更新驱动时，软件维护人员只需要对数采设备程序块进行修改。设备驱动的模块化设计，提高了程序的易维护性和可扩展性

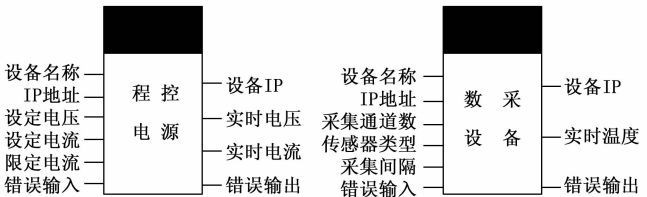


图 13 设备驱动程序块

控制策略分为开关控温和闭环控温两个功能部分，采用用模块化编程，如图 14 所示。开关电源控温程序块输入控制温度、上限温度、下限温度、设定温度、限定电流及错误信息等参数，输出实时电流、实时温度及错误输出等参数。开关控温旨在将温度控制设定的上下限区域内。闭环控温程序块输入控制温度、控制模式、PID 参数、设定电流及错误输入参数，输出实时电流、实时温度及错误输出等参数。控制模式支持阶跃开环，阶跃闭环，继电器，模糊规则自整定控制，支持标准 P，PI，PID 控制，闭环控温旨在将温度动态控制在设定恒定值，控温稳定误差不超过 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 。当控制策略需要增加或更新时，软件维护人员只需要对控制策略程序块进行修改，方便开发人员进行控制算法的维护和升级。

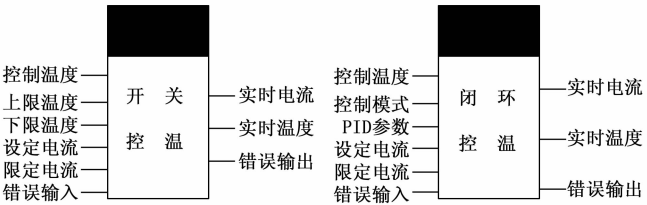


图 14 控制策略程序块

4 试验结果与分析

系统设计开发完成后，选取典型的温度阶梯控制工况进行试验，使用多台大华 DH1790 程控电源，分别控制加热片和加热灯阵的输出，使用 KEITHLEY-2701 数字万用表采集热电偶的温度，被控对象为航天器部组件。编写工况列表，程序根据设置时间，自动切换被控对象的温度为 32°C 、 39°C 、 45°C ，做温度阶梯试验，试验结果如图 15 所示，在温度转换的过程中，未开启任何制冷设备，温升较快，更能考验系统自整定 PID 参数的超调回调能力。

综上，试验总体温度超调量不超过 0.5°C ，动态稳定误差不超过 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 。试验结果表明，使用新的生产者—消费者程序框架，在控制周期中，多台电源采用不同类型的传热控温方式，温升速度、超调量和动态稳定误差等曲线参数几乎保持一致，验证了新的程序框架处理多线程多任务

(下转第 180 页)