

# 环境试验设备系统的一种温度改进控制方案研究

李 锋, 李 铮

(华南理工大学自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 针对典型环境试验设备的温度控制方法进行了研究, 给出了相应的改进控制方案。该方案结合模糊控制、模糊 PID 控制与实时辨识的 Smith 预估器为一体, 达到了良好的控制效果。

**关键词:** 环境试验设备; 模糊控制; 模糊 PID; 辨识; Smith 预估器

**中图分类号:** TP 273      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-5468 (2004) 02-05

## Study of Improving the Temperature Control Strategy for Environmental Test Equipment

LI Feng, LI Zheng

(College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** This paper presents the research on the temperature control of the typical environmental test equipment. The corresponding control strategy is presented. This strategy combines fuzzy controller, fuzzy PID controller and real-time identification based Smith controller. The results show that strategy is successful.

**Keywords:** Environmental test equipment; fuzzy control; fuzzy PID control; identification; Smith predictor

### 1 引言

环境试验设备是模拟人们所期望的某种自然环境而进行试验的一种装置, 主要用于测试各种特殊产品尤其是电子元器件在某种特定的环境下的特性, 或者用于产品质量检测。温度试验是实施最多的环境试验项目之一。在目前生产的普通试验箱中, 其使用的控制器会出现超调量大、过渡过程缓慢等现象, 控制效果不够理想, 对整台设备的质量有很大的影响, 因此有必要对环境试验设备作深入的分析并制定合理的控制策略, 以提高控制品质和整台设备的质量。

### 2 问题描述

某环境试验设备进行温度控制的主要方式是: 通过加热器的输出控制加热量, 通过冷冻机组的输出控制冷冻量。其中冷冻机组有若干个, 每个冷冻机组中也分为不同的几个回路, 各制冷回路的输出为各不同的制冷量且均为恒定值。

原控制方案为开环控制, 控制原理如图 1 所示。根据设备制冷系统中各回路冷量的大小及设备的升降温指标要求, 通过试验摸索出各回路冷量与设备升降温指标的配合关系, 再编制相应的 PLC 程序。在运行过程中根据当前设定的温度 (终

收稿日期: 2003-09-24

作者简介: 李锋 (1977-), 男, 山西定襄人, 华南理工大学自动化科学与工程学院硕士研究生, 研究方向是智能控制。

值)、升降温速率等条件由 PLC 直接选择冷冻机组以及制冷回路, 选择是否合理, 只能靠调试人员根据设备的实际运行情况进行判断。如果选择不够合理, 当输入条件不变时控制系统是不会自动调整的, 这就不得不由人工来调整 PLC 程序或系统参数。

这种方案存在以下几个问题: 1) 在指标或测试要求之外的点往往变成了冷量正确分配的盲点, 在这些点上设备无法实现正常的控制; 2) 当负载或工作情况发生变化时, 冷量配合合理与否也会造成设备是否失控; 3) 由于每台设备的要求不同, 各台设备的冷量控制 PLC 程序差异较大, 通用性差, 使得 PLC 程序的标准化工作非常困难。

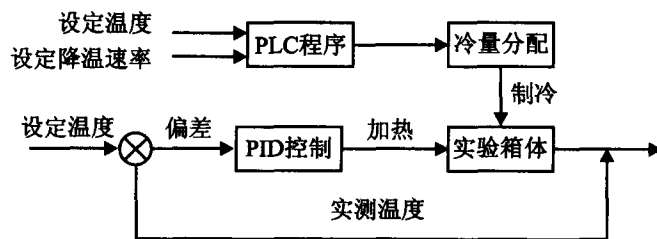


图 1 环境试验设备原控制方案

由于环境试验设备工作情况变化范围大、负载量不确定, 因此具有比较大的模型不确定度。而模糊控制是根据人工经验进行控制的一种方法, 不需要掌握精确的数学模型; 另外 PID 控制可以很好地控制过程的精度。本文将模糊控制与 PID 控制相结合, 实现了对温度的快速、精确控制。为了解决温度的纯滞后效应, 本方案还在受控对象中并联了 Smith 预估器, 它的参数通过在线辨识的方法实时更新, 有效地解决了 Smith 预估器需要模型精确的固有问题。改进后的控制方案在各种工作情况下进行了仿真及运行, 控制效果比原控制方案有了较大的改进, 基本上达到了设计要求。

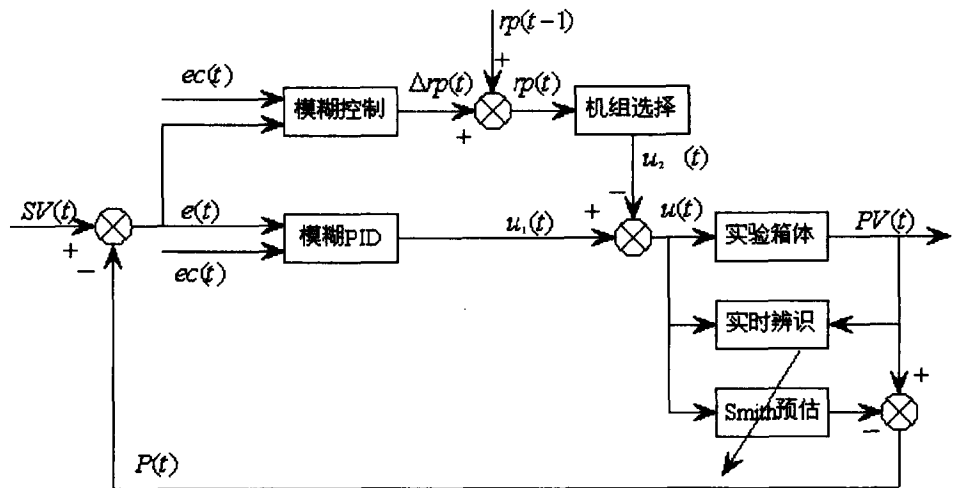


图 2 环境试验设备温度改进控制方案

### 3 温度改进控制方案

#### 3.1 热量控制

一般的环境试验设备系统是通过加热器来输出热量的, 加热器的热量输出最大功率根据配置的不同而有所差别。原控制方案中采用参数固定的 PID 控制, 不能适合不同工作情况的要求。为了扩大其适用范围, 热量的控制采用模糊整定 PID 参数控制算法。如图 2 所示, 设定温度  $SV(t)$  和系统实测温度  $PV(t)$  以及 Smith 预估的结果形成偏差  $e(t)$  以及偏差的变化率  $ec(t)=e(t)-e(t-1)$ , 再以  $e(t)$  和  $ec(t)$  作为模糊控制表的输入, 在线调整  $K_p$ 、 $K_i$  以及  $K_d$ , 以实现系统不同工作情况下所需输出的热量进行 PID 调节<sup>[1]</sup>。

PID 参数模糊调节: 设输入输出变量语言变量  $e$ ,  $ec$ ,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  的基本论域为:

$$e = \{-15, -14, -13, -12, -11, -10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15\}$$

$$ec = \{-10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$$

$$K_p = \{-10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$$

$$K_i = \{0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1\}$$

$$K_d = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$$

选取各语言变量的语言值, 在 Matlab 的模糊逻辑控制工具箱中按照高斯函数确定各模糊子集的隶属函数<sup>[4]</sup>, 并且根据经验建立模糊整定 PID 参数的控制规则表 (如表 1 所示)。

表 1 模糊整定 PID 参数控制规则表

$K_p/K_i/K_d$		$ec$						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
e	NB	NB/Z/Z	NB/Z/Z	NM/Z/PS	NS/Z/PS	PM/Z/PS	PB/Z/Z	PB/Z/Z
	NM	NB/PM/PS	NM/PM/PS	NS/PM/PM	Z/PM/PM	PS/PS/PM	PM/PS/PS	PB/Z/PS
	NS	NM/PB/PS	NS/PB/PM	Z/PB/PM	PS/PB/PM	PS/PM/PM	PS/PM/PM	PM/PS/PS
	Z	NS/PM/PM	Z/PM/PM	PB/PB/PB	PM/PB/PB	PS/PB/PB	Z/PM/PM	NS/PM/PM
	PS	PM/PS/PS	PS/PM/PM	PS/PM/PM	PS/PB/PM	Z/PB/PB	NS/PB/PM	NM/PB/PS
	PM	PB/Z/PS	PM/PS/PS	PS/PS/PM	Z/PM/PM	NS/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PM/PS
	PB	PB/Z/Z	PB/Z/Z	PM/Z/PS	NS/Z/PS	NM/Z/PS	NB/Z/Z	NB/Z/Z

根据以上的模糊规则，可以由程序根据  $e(t)$  和  $ec(t)$  实时计算出适当的  $K_p$ 、 $K_i$  以及  $K_d$ ，不断调整参数达到优化的 PID 控制。需要注意的是通过 PID 运算输出的加热量有可能超出加热器的功率范围，所以还需要在 PID 计算之后再对加热量进行限幅处理。

### 3.2 冷量控制

在环境试验设备中，冷量的输出主要是由不同的冷冻机组来提供的。每一个冷冻机组对应一个不同的档组，并且在每一个机组中都可有两个或两个以上回路，以提供不同冷量输出的档值（可参考表 3）。因此，冷量的输出只能是相应的各档值，为离散量，与加热的连续控制相比，则比较粗略。

冷量控制采用模糊调节冷量变化量  $\Delta rp(t)$  的方

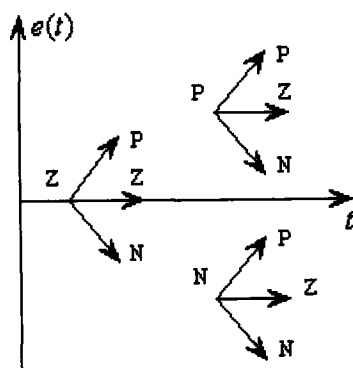


图 3  $e$  和  $ec$  与  $\Delta rp$  的关系原理图

式实现。 $e(t)$  和  $ec(t)$  与  $\Delta rp(t)$  的关系原理如图 4 所示，模糊调节的简化规律如表 2 所示。其中输入  $\Delta rp(t)$  的论域与热量计算时所选取的论域相同，输出的论域根据实践经验取为

$\Delta rp = \{-8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$   
根据模糊表所得的冷量变化量  $\Delta rp(t)$  可以计算得到当前所需要的冷量  $rp(t)$ ，如图 2 所示，计算公式为：

$$rp(t) = rp(t-1) + \Delta rp(t)$$

把计算得到的  $rp(t)$  作为选择冷冻机组以及制冷回路的标准。冷冻机组按照不同的功率分为不同

表 2  $e(t)$  和  $ec(t)$  与  $\Delta rp(t)$  的简化模糊规则表

$\Delta rp(t)$		$ec(t)$		
		N	Z	P
$e(t)$	N	++	+	0
	Z	+	0	-
	P	0	-	--

的几个机组，每个机组中又有不同的回路，可以输出不同的冷量值。实际中可以按表 3 进行冷冻机组和回路动作分配，同时实现用  $rp(t)$  的值控制电磁阀的通断时间。

表 3  $rp(t)$  值与机组分配表

$rp(t)$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
分	回路 1		回路 2		回路 1		回路 2		回路 1		回路 2
配	机组 1			机组 2			机组 3				

### 3.3 时滞控制

温度的控制具有典型的时滞效应。Smith 预估器能够非常好地解决大时滞系统的控制问题，但是需要受控对象的模型必须精确。由于对不同的环境试验设备其模型并不一定相同，有时还有比

较大的差异，这就要求 Smith 预估器能够适用于模型不精确的场合，因此在原有的基础上加入参数辨识的环节，能够辨识出受控对象的模型参数，并把辨识出的参数实时赋值到 Smith 预估器中，从而实现非精确大时滞对象模型的有效控制。

Smith 预估器<sup>[2]</sup>：原理见图 4。在未进行 Smith 预估补偿的情况下，系统闭环传递函数为：

$$\Phi(s) = \frac{G_c(s) G_0(s) e^{-\tau s}}{1 + G_c(s) G_0(s) e^{-\tau s}}$$

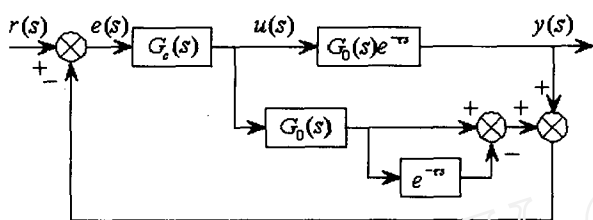


图 4 Smith 预估器原理图

在进行 Smith 预估补偿之后，由原理图可得补偿系统闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{G_c(s) G_0(s) e^{-\tau s}}{1 + G_c(s) G_0(s)}$$

故闭环系统特征方程式变为  $1 + G_c(s) G_0(s) = 0$ ，即从系统特征方程式中消除了纯滞后因素，因而可以消除过程纯滞后特性对系统稳定性的不利影响。

辨识算法<sup>[3]</sup>：采用具有指数遗忘因子的递推最小二乘法，考虑由结构参数  $n_a$ 、 $n_b$  和  $d$  已知的输入输出辨识模型

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k) + e(k) \quad (1)$$

其中， $A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_n q^{-n}$ ， $B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{n_b+d} q^{-n_b-d}$ ， $q^{-1}$  为后移算子，令

$$\varphi(k) = [-y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-n_a), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_b-d)]^T$$

$$\theta = [a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_{n_b+d}]^T$$

则可进行最小递推二乘辨识计算。

可以在实施控制设备之前先进行开环辨识，待一定时间，辨识误差减小之后，再转入闭环对设备进行控制，为了减小扰动等情况的影响，辨识环节在闭环控制过程中仍需进行，以对系统的参数进行不断的修正。

#### 4 仿真研究<sup>[4,5]</sup>

仿真对象采用实践经验所建立的环境试验设备普通试验箱的模型，其形式为

$$G(s) = \frac{0.01813(152s+1)e^{-19.4s}}{s(87s+1)} \quad (2)$$

依据环境试验设备的几种典型工作情况要求，设定输入曲线为：

$$SV(t) = \begin{cases} -\frac{1}{12}t, & 0 \leq t < 600s \\ -50, & 600s \leq t < 1200s \\ -100 + \frac{1}{24}t, & 1200s \leq t < 1800s \\ -25, & 1800s \leq t < 2400s \\ 0, & 2400s \leq t < 3000s \\ 20, & 3000s \leq t < 4000s \end{cases}$$

在 Matlab 中仿真系统跟踪输出曲线如图 5 所示，其中采样时间  $T_s = 1s$ 。负阶跃情况下温度下降比较慢的原因是因为冷冻机组的最大功率有所限制

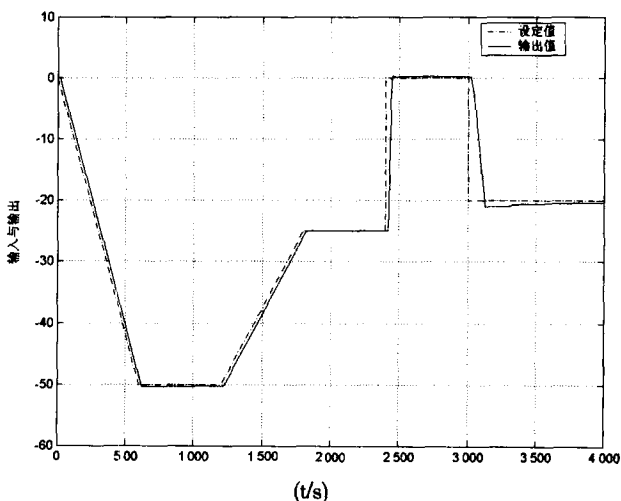


图 5 不同工作情况下系统跟踪曲线仿真图

导致的。另外，式(2)转换为式(1)后，受控对象真实参数为  $\theta = [-1.9886, 0.98857, 0, L, 0, 0.018977, -0.0062324, -0.012538]$ 。共有 25 项参数，其中省略的参数均为零。系统首先在进行充分的开环辨识后，辨识参数为  $\hat{\theta} = [-1.9885, 0.9885, 0, L, 0, 0.018977, -0.0062323, -0.012533]$ ，基本与真实值相同。仿真实验表明，这种控制方案对于环境试验设备的温度控制能够达到良好的效果。

## 5 结束语

本文针对实际情况, 主要对原有的温度控制算法进行了相应的改进: 热量控制采用模糊整定PID参数的控制策略; 冷量控制采用模糊选择冷量变化量的方法; 由于温度控制具有典型的纯滞后效应, 在受控对象中并联了Smith预估器, Smith预估器的参数通过在线辨识的方法实时更新, 解决了Smith预估器需要模型精确的固有问题。通过对各种工作条件下的仿真及运行结果表明, 改进后的控制方案能够达到设计要求, 实现对温度的精确控制。

## 参考文献:

- [1] 余永权, 曾碧. 单片机模糊逻辑控制 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995. 224-231.
- [2] 邵裕森, 巴筱云. 过程控制系统及仪表 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 207-211.
- [3] 方崇智, 肖德云. 过程辨识 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. 85-92.
- [4] 徐昕, 李涛, 伯晓晨. Matlab 工具箱应用指南: 控制工具箱 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [5] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

## 信息与动态

### 赛宝计量检测中心两项课题通过鉴定验收

2004年2月23~25日, 受信息产业部科技司委托, 部计量管理办公室在广州电子601计量站主持召开了《军用电子元件阻抗标准系列研究》项目技术鉴定会。

鉴定委员会由中国计量院以及信息产业部电子各所等多家单位的专家组成, 全面审查了电子601计量站提供的技术资料, 并组织测试组对有关测试数据进行了抽测。

鉴定委员会认为: 该系列元件阻抗标准整体技术指标和工艺水平基本达到国外同类产品的先进水平; 并在国内首次提供工作阻抗标准系列化产品; 已全面完成了课题任务书所提出的各项技术指标要求。会上一致通过了该项目的技术鉴定。

2004年2月27日, 部电子计量管理办公室在601计量站召开了部控计量科研课题《测量系统的分析及动态不确定度研究》的验收总结会。会上, 课题组作了课题总结报告, 并就测量系统量值特性分析及动态不确

定度等相关问题进行了答辩。

评审组认为: 动态不确定度是一个较新的研究领域, 用于测量系统量值特性的分析和可靠性分析, 是一种新的尝试与探索; 课题组在广泛收集资料与研究分析的基础上, 提出了用灰色模型制订测量系统的预防性与纠正性措施计划, 确定检定/校准周期的几条原则, 并用LCR阻抗标准测量系统实验来验证其可行性, 该研究具有创新性和应用前景; 课题组完成了计划任务书的要求, 同意通过验收。

信息产业部的有关领导: 王广顺、江滢、胡为京亲临到会, 并分别作了讲话。他们对这次的课题研究成果给予高度的评价, 并对赛宝计量检测中心在计量科研领域精益求精、勇于开拓的精神给予充分的肯定, 以及所取得的成就, 表示祝贺!

(赛宝计量检测中心供稿)