

# 模糊 PID 控制原理在高低温环境模拟系统的应用

邓丁奇<sup>1</sup>, 张继华<sup>2</sup>, 高飞<sup>3</sup>, 刘旺开<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191; 2. 中国人民解放军 63853 部队, 吉林 白城 137001

3. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 高低温模拟系统主要用于大型空间可展开天线及其他大型机构、结构的高低温极限环境下的展开功能性试验、机械性能测试及其他相关试验; 系统要求测控的范围较广、精度较高且不会超调; 空气的状态具有非线性以及时变的特点, 并且控制参数间存在着复杂耦合现象; 针对上述难点, 设计分布式测控系统, 提出了智能 PID 测控方案; 采用模糊控制的原理, 离线建立 PID 模糊控制数据库, 使系统能够根据控制目标值选择最优 PID 参数值; 使系统能够在具体工况以及干扰条件下达到良好的控制效果; 在实际应用的过程中完全满足了指控的要求, 同时解决了传统 PID 的部分控制难点, 对于类似的复杂系统也有着一定的借鉴意义。

**关键词:** 分布式测控系统; 模糊控制; PID 整定

## Fuzzy-PID Control Theory for High/Low Temperature Environmental Simulation System

Deng Dingqi<sup>1</sup>, Zhang Jihua<sup>2</sup>, Gao Fei<sup>3</sup>, Liu Wangkai<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. No. 63853 Unit of PLA, Baicheng 137001, China;

3. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Aircraft High/Low Temperature Environmental Simulation System is mainly used for the test of the giant spacial deploying antenna and the functional deploying test of some large-scale structures at extreme high/low temperatures, and some other relevant tests. This project requests controlling the parameters of the system in a large range with high accuracy and no overshoot. The air condition is non-linear and time-varying. And between parameters, there is a complicated coupling. In view of these difficulties, this paper wants to design a distributed measurement and control system, which proposed the improved intelligent PID control method. By establishing the PID gains database offline, the system based on fuzzy logic, can choose a optimized PID initial gains according to all the setting values. This system has a good self-adaptability. In practical application the system has met the specifications requirements well, and also achieved excellent controlling effect at the same time, which is of significance to the similar complex system.

**Keywords:** distributed measurement and control system; fuzzy control; PID tuning

## 0 引言

为满足航天天线在不同温度条件下展开机构的运行状态研究, 拟设计该高低温环境模拟系统。通过制冷系统和加温系统来获得相应的高低温环境状态。具体技术指标包括: 温度范围  $-100 \sim +130$  °C; 温度波动度  $\leq 4$  °C; 温度偏差  $\leq 2.5$  °C, 要求精度范围内不能出现超调, 以免将试验件损坏。

作为试验台的核心测控系统必须满足以上的控制要求, 因此其设计成为了整个项目的难点。PID 控制是现今过程控制当中使用最为广泛的一种方法。由于在实验中, 空气的状态具有多参数以及非线性和时变性的特点, 建立精确的数学模型具有一定的难度, 应用常规的 PID 控制器并不能达到试验需求的理想控制效果。现如今智能控制理论的发展较为迅速, 其为复杂动态的不确定系统控制提供了一种新的途径<sup>[1]</sup>。本文将采用模糊 PID 控制技术, 进行 PID 的智能整定并设计模糊 PID 控

制策略, 从而解决上述出现的项目中的难点。

## 1 高低温环境模拟系统综合试验台测控系统设计

### 1.1 测控系统结构设计

如图 1, 高低温环境模拟系统综合试验台采用了现场级及以下位控制级和上位管理级的分布式测控系统。其以工业控制计算机作为核心, 集成了单元组合仪器和微处理器的各种优点, 对试验系统进行了集中管理以及分散控制<sup>[2]</sup>。

现场级采集的信号通过压力变送器、流量计和温度传感器等变送成的  $4 \sim 20$  mA 标准信号, 传送到下位控制级 PID 调节控制仪表, 仪表显示现场的测量信号, 并且把计算出来得到的控制输出量转换成标准信号发送到现场的执行机构, 如阀门定位器或者调功器, 从而完成对现场的各种状态量如流量、压力以及温度等的调节和控制。同时处于下位控制级的 PID 调节仪表, 通过 RS-485 通信总线控制网络来进行与上位工业控制计算机的通信。上位计算机主要完成对环境控制部分试验工况的管理监视以及试验数据记录、报表生成和曲线绘制等操作<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2014-06-17; 修回日期: 2014-07-14;

作者简介: 邓丁奇(1987-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事计算机测量与控制方向的研究。

刘旺开(1953-), 男, 湖南茶陵人, 教授, 主要从事计算机测量控制、环境模拟方向的研究。

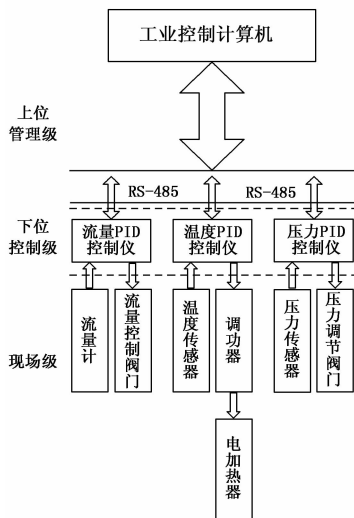


图 1 高低温环境模拟试验台测控系统结构图

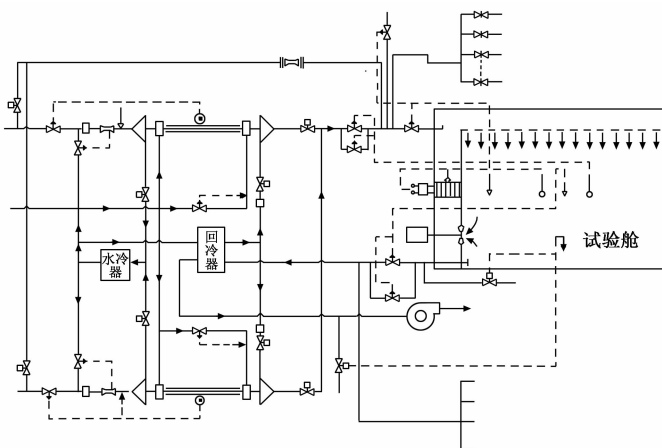


图 2 高低温环境模拟试验台测控系平台设备流程图

### 1.2 测控系统控制方案设计

采集和控制模块为本系统的核心，系统采用了线程技术，主要用于完成数据采集、控制算法的解算以及时钟同步等任务。

以温度控制为例，相关技术指标要求在  $-100 \sim +130 \text{ }^\circ\text{C}$ ，精度  $\pm 1\%$  内不得超调。常规的 PID 方法只能在系统某个局部的工作点获得比较好的控制效果，但是如果在要求控制范围当中采用单一 PID 参数，就很难满足系统在所有工作点稳定工作而且不能够超调的需求。因此作者将采用分段 PID 方法，将上述的范围分为多段，并且整定出各段的 PID 参数。在线试验时，将根据目标值来选取相应段 PID 值来进行控制即可。然而常规整定的 PID 参数方法有如一步法、两步法或者试凑法等虽然理论上可以保证系统的控制稳定，但是需要相当繁琐的人工操作。同时，难以保证控制能够不超调或者充分满足其它附加的控制要求。

采用 PID 控制以及模糊控制相结合的方法，通过人们调整 PID 参数的经验，来实现 PID 参数的在线调整模糊 PID 控制。由于常规的 PID 调节不具有在线自整定参数这一功能，因此并不能满足在不同的工况下系统对于参数自整定的要求。自整定模糊-PID 控制器是以偏差  $E$  以及偏差变化率  $EC$  作为输入，可以满足在不同的时刻偏差  $E$  和偏差的变化率  $EC$  对于

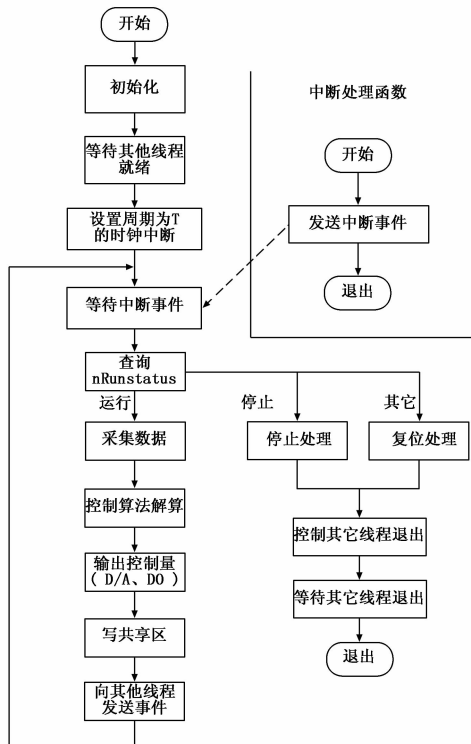


图 3 数据采集与控制线程处理流程

PID 参数的自整定要求。利用模糊理论对 PID 参数进行在线校正，构成了自整定模糊-PID 控制器。

## 2 PID 参数模糊整定规则

### 2.1 模糊变量及模糊子集的确定

#### 2.1.1 定义各模糊变量的模糊子集

模糊控制的设计思想是找到误差  $E$  以及误差变化  $EC$  与 PID 的 3 个参数之间的模糊关系，在运行的过程当中，通过对  $E$  和  $EC$  的检测反馈，在线对 PID 的 3 个参数进行修改。据此，设计一个两输入三输出的模糊控制器。输入语言变量为  $E$  和  $EC$ ，输出语言变量为  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ，其为 PID 参数的增量。误差的大小量化为 9 个等级，比如论域  $X = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ ，误差变化的大小也量化为 9 个等级， $XX = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ ，控制量的大小量化为 9 个等级， $Y = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ 。

#### 2.1.2 对模糊语言变量确定隶属函数

本文采用正太分布函数来确定隶属函数：

$$e^{-\frac{(x-a)^2}{\sigma}}$$

由于  $\sigma$  越大，隶属函数的曲线越平缓，控制特性也比较平缓，系统稳定性好。而  $\sigma$  隶属函数的曲线形状较尖，其分辨率较高，控制灵敏度也较高。

因此在选择模糊变量的模糊集的隶属函数的时候，在误差较大的区域采用低分辨率的模糊集，而在误差较小的区域采用较高分辨率的模糊集，当误差接近于零时选用高分辨率的模糊集。

### 2.2 制定模糊控制规则表

1) 当  $|E|$  较大的时候，为了使系统的响应具有较好快速跟踪的性能，并且能够避免因开始时偏差的瞬间变大，而引

起微分过分饱和的现象, 使得控制作用会超出许可的范围, 应取较大的  $K_p$  以及较小的  $K_d$ , 同时为了避免系统响应时出现较大的超调, 也需要对积分作用进行限制, 通常取  $K_i=0$ 。

2) 当  $|E|$  为中等时, 为了使系统具有较小的超调量, 应取较小的  $K_p$ , 合适的  $K_i$  和  $K_d$ , 从而保证系统的响应速度, 其中  $K_d$  取值对系统响应速度的影响比较大。

3) 当  $|E|$  取值较小时, 为了使系统具有比较好的稳态性能, 应使用较大的  $K_p$  和  $K_i$ , 同时为了避免系统在设定值的附近出现震荡现象, 并且考虑到系统的抗干扰性能。当  $|EC|$  取值较小时,  $K_d$  值可以取大一些, 通常情况下取为中等大小, 当  $|EC|$  取值较大时,  $K_d$  值应取小一些<sup>[4]</sup>。综合以上情况, 制定的模糊规则表 1~3 所示。

表 1  $K_p$  的模糊控制规则表

| $K_p \backslash EC$ | NL | NS | ZE | PS | PL |
|---------------------|----|----|----|----|----|
| $E$                 |    |    |    |    |    |
| NL                  | PL | PL | PS | PS | ZE |
| NS                  | PL | PS | PS | ZE | NS |
| ZE                  | PS | PS | ZE | NS | NL |
| PS                  | PS | ZE | NS | NL | NL |
| PL                  | ZE | NS | NL | NL | NL |

表 2  $K_i$  的模糊控制规则表

| $K_i \backslash EC$ | NL | NS | ZE | PS | PL |
|---------------------|----|----|----|----|----|
| $E$                 |    |    |    |    |    |
| NL                  | NL | NL | NS | NS | ZE |
| NS                  | NL | NS | NS | ZE | PS |
| ZE                  | NS | NS | ZE | PS | PL |
| PS                  | NS | ZE | PS | PL | PL |
| PL                  | ZE | PS | PL | PL | PL |

表 3  $K_d$  的模糊控制规则表

| $K_d \backslash EC$ | NL | NS | ZE | PS | PL |
|---------------------|----|----|----|----|----|
| $E$                 |    |    |    |    |    |
| NL                  | PS | NS | NL | NL | PS |
| NS                  | PS | NS | NS | NS | ZE |
| ZE                  | ZE | ZE | NS | NS | ZE |
| PS                  | ZE | ZE | ZE | ZE | ZE |
| PL                  | PL | PS | PS | PS | PL |

### 2.3 PID 参数精确化计算

本文所采用的是极大极小推理法以及重心法来进行解模糊化。对于所有的输入语言变量的量化值的各种组合由模糊逻辑进行推理, 输出语言变量的量化值是通过离线计算而得到的, 从而成模糊控制表。在线试验的时候, 上位计算机需要根据某一时刻的采样值将  $e$  和  $ec$  进行模糊量化, 之后通过查询模糊控制表即可以直接得出输出的量化值, 然后再乘以其相应的量化因子便得到了 PID 参数的增量。最后再通过以下的 3 个算式得到 PID 参数值:

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p$$

$$K_i = K_{i0} + \Delta K_i$$

$$K_d = K_{d0} + \Delta K_d$$

其中:  $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ 、 $K_{d0}$  是通过遗传算法<sup>[5]</sup>所得到的 PID 的初始值。 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  是通过模糊逻辑算法得到的 PID 增量。通过上面的算式, 将遗传算法的离线整定同模糊自适应方法的在线整定相互结合起来, 得到的  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  实时赋值给 PID 调节仪表以便进行下一个时刻的控制。因为建立模糊控制表的行为是离线进行的, 所以模糊控制算法仅仅是简单的查表工作, 运算速度快, 从而提高了系统响应速度同时又保证了实时性要求。

模糊 PID 控制流程图如图 4 所示。

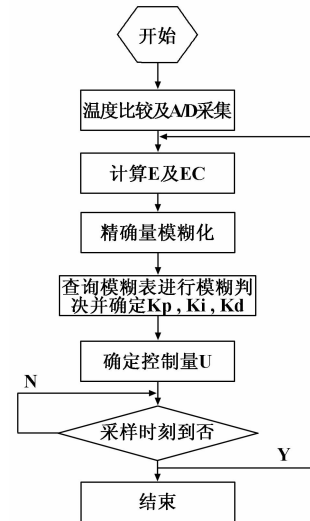


图 4 模糊 PID 控制程序流程图

### 3 试验结果

将本文所设计的上述测控系统及其控制方案应用到低高温模拟综合试验台中来验证试验。在温度目标值 20 °C, 利用传统的 PID 控制方式进行控制, 得到图 5 曲线 (第二张图为局部放大曲线):

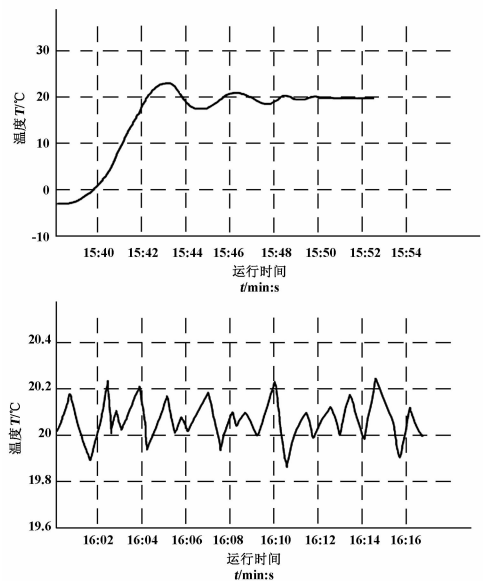


图 5 单一 PID 参数控制曲线

面积于用水量的变化趋势。

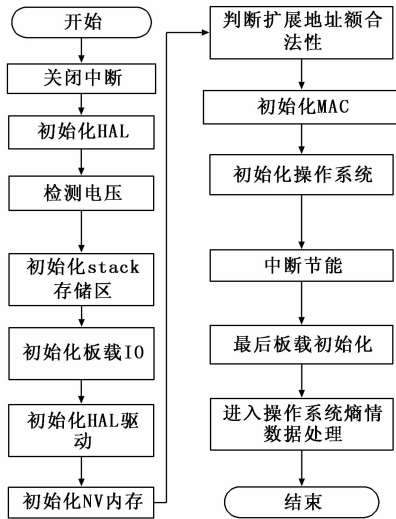


图 8 系统耗水量的变化趋势

由图 8 可见, 随着灌溉面积的增加, 传统的灌溉系统由于采集得到的信息很容易受到干扰, 且灌溉时较少考虑土壤墒情, 因此灌溉用水量很难形成一个规律, 造成用水量较为浪费, 本文提出的系统能够较好的根据土壤墒情信息进行灌溉水量的供应, 节水精准效果明显, 综合分析上图, 在达到作物需求的情况下, 供水量减少了将近 35%, 本文系统的土壤墒情检测误

(上接第 279 页)

图 6 是采用模糊 PID 控制的控制曲线 (第二张图为局部放大曲线)。

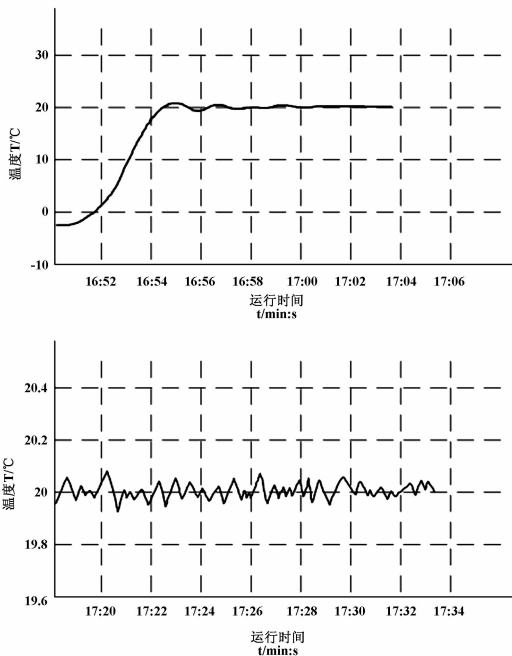


图 6 模糊 PID 控制曲线

差率基本能够保持在 5% 以内, 这符合农田灌溉的要求。

### 5 结束语

本文在目前灌溉领域中电子鼻数据采集信息量少, 不能根据土壤墒情进行水量控制, 成本较高的基础上, 设计并实现了考虑土壤墒情的农田精准灌溉系统, 系统测试表明, 该精确灌溉系统性能稳定, 土壤数据测试的准确率较高, 农田节水精准效果明显, 本文系统的土壤墒情检测误差率基本能够保持在 5% 以内, 耗水量降低了 35%, 具有很强的实用价值。

#### 参考文献:

[1] 包长春, 石瑞珍. 基于 Zigbee 技术的农业设施测控系统的设计 [J]. 云南水力发电, 2006, 22 (4): 13-16.

[2] 章军富. 基于 Zigbee 无线传感器网络的精准灌溉控制系统 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.

[3] 张 兵, 袁寿其, 成 立. 节水灌溉自动化技术的发展趋势 [J]. 排灌机械, 2003, 21 (2): 37-41.

[4] 姜文峰, 郑文刚, 王彦文. 城市绿地白动化节水灌溉系统的研究 [J]. 节水灌溉, 2005, 7 (11): 12-13.

[5] 李 巍, 吴 聪, 基于聚类优化的无监督入侵检测在高校网络中的应用 [J]. 科技通报, 2013 (6): 95-97.

[6] 管金凤. 基于 GPS 技术的土壤水分无线传感器网络研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2009.

[7] 杨 婷; 汪小昆. 基于 CC2430 的无线传感网络自动滴灌系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010 (6): 66-69.

比较两图可以看出, 常规的 PID 控制不能完全满足系统要求, 具有一定的超调量; 而模糊 PID 控制能够满足控制要求, 不但没有超调量, 控制的精度更高, 而且采用模糊 PID 控制方式进行调控时, 系统到达稳定状态所用的时间较短。

### 4 结论

本文所设计的高低温环境模拟系统综合试验台的测控系统尝试着将智能控制技术应用到传统的工业过程控制当中。模糊 PID 控制有效的解决了大范围内多段整定 PID, 所需要的时间代价大的问题, 同时又避免了单一 PID 参数存在的无自适应性而且控制效果很容易会受到具体工况影响的缺点。

实际的应用表明, 本测控系统在要求范围内的各个工作位置都具有良好的控制精度而且不会出现超调现象, 满足了各个技术指标的要求, 并且通过了相关专家验收。其对于其它的非线性、时变以及强耦合系统的控制有着一定的借鉴意义。

#### 参考文献:

[1] 向运飞, 刘旺开, 沈为群. 双路热动力试验台集散控制系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2002, 10 (10): 653-655

[2] 王常力, 廖道文集散控制系统的设计与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993

[3] 尹禄高. 某环境模拟系统测控平台的研究与开发 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2009.

[4] 曾光奇, 胡均安, 刘春玲. 模糊控制理论与工程应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006

[5] 章 菲, 杨庆生, 模糊 PID 控制在直流调速器中的应用 [A]. 北京力学第 18 届学术年会论文集 [C]. 2012.