环境模拟舱体的建模仿真及控制方法

李 可 庞丽萍 刘旺开 王 浚

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100083)

摘 要：环境试验时需要精确控制环境模拟舱体内的温度以满足军标要求，同时为了解决环境模拟舱体内加热过程中升温速率与控制精度之间的矛盾，在对其温度变化进行动态特性分析与建模的基础上，提出采用专家控制策略控制环境模拟舱内的温度，并对其控制效果进行了仿真研究. 仿真结果与现场运行调试结果均表明：专家控制方法具有无超调、响应速度快、稳态精度高、加温效率明显的优点，是可行和有效的；与试验数据相比，建立的传热模型和控制系统模型具有较高的准确性，符合实际情况. 这种建模仿真及控制方法为实际过程中研究控制规律提供了有力的参考和帮助，对研究类似问题具有深远意义.

关 键 词：环境舱；数学模型；仿真；温度控制；专家系统

中图分类号：TK 39

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)05-0535-04

System model simulation and control method used in environmental simulation chambers

Li Ke Pang Liping Liu Wangkai Wang Jun

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the dynamic state characters of the environmental simulation chamber, a lumped parameter model of temperature and a mathematical model of control system is established to accurately control the temperature of the environmental chamber to measure up to GJB, raise temperature rate and promote control precision. An expert control method is introduced into the design of the temperature control system which is simulated on the platform of MATLAB. By contrast the simulated result with the experimental data, the validation of the lumped parameter model has been proved and the expert control method has been showed with the advantage of no-overshoot, fast response, high precision and great efficiency. The presented methods for the simulation and the control system provide great references to the research on the control laws of other similar problem and show great significance to the relative research field.

Key words: environmental chamber; mathematical model; simulation; temperature control; expert system

在现代的地面环境模拟试验中，利用环境舱进行温度模拟实验是必不可少的手段. 环境模拟舱体温度变化由降温阶段、恒温阶段、升温阶段组成[1]. 国军标[2]中对环境舱体温度控制精度有一定的要求，特别是无自平衡能力的系统，要防止超调现象的发生. 然而研究结果及实验结果均表明，由于影响舱体内部温度的因素很复杂，且多数舱体体积很大，存在较大的惯性环节，利用经典 PID (Proportion Integration Differentiation，比例积分微分)的控制方法很难在满足升温速率的同时防止超调现象的发生，相应的温度控制难度较大.

为了解决上述控制难点，本文提出采用专家

收稿日期：2006-06-16

作者简介：李 可(1980—)，男，江苏徐州人，博士生，like@buaa.edu.cn.

PID温度控制策略.为了验证该控制策略的正确性,在对某基地环境模拟舱体内温度变化进行动态特性分析的基础上,利用MATLAB仿真平台,建立舱体温度变化的集总参数模型[3]及系统的控制模型,之后采用专家PID温度控制策略控制舱温变化.仿真研究表明:该专家PID控制器可以有效地抑制超调,提高升温速率,达到较高的温控精度,很好地解决了环境模拟舱体温度控制精度与升温速率之间的矛盾.

1 舱体温度控制系统模型

舱体内的温度变化与舱体自身的热源、温度水平及周围环境有着密切的关系.遵循能量守恒定理,可以建立下述集总参数模型描述舱体内温度变化规律:

$$\sum_{i=1}^{n} M_i C_i \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = \sum_{i=1}^{m} P_i - \frac{(T-T_0)A_0}{R_{\mathrm{eq}}} \tag{1}$$

式中,T,T_0,A_0,R_{eq}分别为舱内空气温度、舱外环境温度、舱体散热总面积和舱壁热阻;n和m分别为主要吸热环节的个数和主要放热环节的个数;M_i,C_i分别为吸热环节的质量和比热容;P_i为放热环节的放热量,假设放热设备所有的功转化为热量,因此P_i值可以取放热设备的功率.

对于电加热器为主要加热设备的环境模拟舱体,并考虑舱内被加热试件,则

$$\sum_{i=1}^{m} P_i = P_{\mathrm{f}} + P_{\mathrm{l}} + P_{\mathrm{d}} \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{n} M_i C_i = M_{\mathrm{nb}} C_{\mathrm{nb}} + M_{\mathrm{sj}} C_{\mathrm{sj}} + M_{\mathrm{kq}} C_{\mathrm{kq}} + M_{\mathrm{kb}} C_{\mathrm{kb}} \tag{3}$$

其中,P_{f},P_{i},P_{d}分别为舱内风机、照明灯和电加热器的功率;M_{nb},M_{sj},M_{kq},M_{kb}分别为舱体内壁质量、试件质量、舱内空气质量、孔板质量;C_{nb},C_{sj},C_{kq},C_{kb}则分别为对应的比热容.

因为主要吸热器件的质量和比热容可视为常量,用A来表示二者的乘积和,即

$$A = \sum_{i=1}^{n} M_i C_i \tag{4}$$

舱体采用聚胺脂良好的保温,舱内表面积与热阻的比值可用常数C表示,即

$$C = \frac{A_0}{R_{\mathrm{eq}}} \tag{5}$$

将式(1)进行拉氏变换,并由上述参数代替可得到舱体的控制系统模型:

$$AsT(s) = P(s) - T(s)C + T_0(s)C \tag{6}$$

将式(6)变换可得

$$(As + C)T(s) = P(s) + CT_0(s) \tag{7}$$

以$T(s)$作为温度响应函数的拉氏变换形式,且$T_0(s)$即T_0温度的拉氏变换为T_0/s可得

$$T(s) = \frac{P(s)}{As + C} + \frac{T_0 C}{s(As + C)} \tag{8}$$

放热设备主要以电加热器为主,可用惯性环节表示.所以$P(s)$部分的传递函数可用下式表示:

$$P(s) = \frac{B}{Ds + 1} \tag{9}$$

式中,B表示电加热器的总功率;D可以用电加热器热阻与热容的乘积来计算.

由于在温度控制系统中设定温度值为常数,故温度激励信号$E(s)$可以表示为

$$E(s) = \frac{1}{s} \tag{10}$$

故联立式(8)~式(10)可得舱体温度控制系统的传递函数模型为

$$G_{\mathrm{T}}(s) = \frac{T(s)}{E(s)} = \frac{Bs}{(Ds+1)(As+C)} + \frac{CT_0}{(As+C)} = \frac{(CT_0 D + B)s + CT_0}{ADs^2 + (CD + A)s + C} \tag{11}$$

由式(11)可以得到舱体温度控制系统是一个二阶控制系统,且T_0是常数,为了得到不同设定值(激励)和不同舱外温度(干扰)对舱体温度的仿真效果,由式(7)、式(9)可以得到$T(s)$温度响应如图1所示.

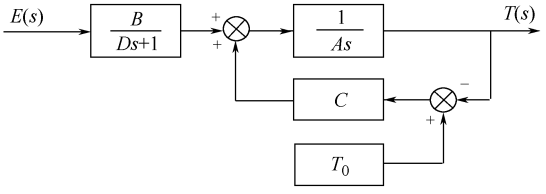


图1 舱体温度响应函数示意图

2 专家控制算法

计算机控制是一种采样控制,利用采样时刻的偏差值计算控制量.位置式PID控制算法的离散表达式为

$$u(k) = K_{\mathrm{p}} e(k) + K_{\mathrm{i}} \sum_{j=0}^{k} e(j)T + K_{\mathrm{d}} \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \tag{12}$$

式中,$u(k)$为控制器输出值;$e(k)$为离散化的当前采样时刻误差;$e(k-1)$则为上一时刻的误差值;K_{p},K_{i},K_{d}分别为比例、积分、微分系数;T为采样

周期.

专家控制算法是建立在经典 PID 控制算法[4]基础上的一种控制算法.它的实质是基于受控对象和控制规律的各种知识并以智能的方式利用这些知识来设计控制器[5].利用专家经验来设计 PID 参数便构成专家 PID 控制.

根据偏差及其变化,可设计专家 PID 控制器,本文提出的控制器可按以下 6 种情况进行设计:

1) 当$|e(k)|>M_1$时,说明误差的绝对值已经很大.不论误差的变化趋势如何,都应考虑控制器的输出按最大(或最小)输出,以达到迅速调整误差,使误差绝对值以最大速度减小的目的.M_1为设定的误差界限;

2) 当$e(k)\Delta e(k)\geqslant 0$时,说明误差在朝误差绝对值增大方向变化,或误差为常值,未发生变化.如果此时$|e(k)|>M_2$,说明误差也较大,可考虑由控制器实施较强的控制作用.如果$|e(k)|<M_2$,则说明尽管误差朝绝对值增大的方向变化,但误差绝对值本身并不很大可实施一般的控制作用.M_2为此处设定的误差界限;

3) 当$e(k)\Delta e(k)<0$,$\Delta e(k)\Delta e(k-1)>0$或者$e(k)=0$时,说明误差在减小或以达平衡,可保持输出不变;

4) 当$e(k)\Delta e(k)<0$,$\Delta e(k)\Delta e(k-1)<0$时,误差处于极值状态,如果$|e(k)|\geqslant M_2$,则采用较强的控制作用.反之则采用较弱的控制作用;

5) 当$|e(k)|<\varepsilon$,ε为任意小的正数.此时误差很小,考虑加入积分环节,减少稳态误差;

6) 当$e(k)=0$时,说明系统已经达到平衡状态,此时可考虑维持当前控制量不变.

由专家 PID 控制器构成的温度控制系统如图 2 所示.

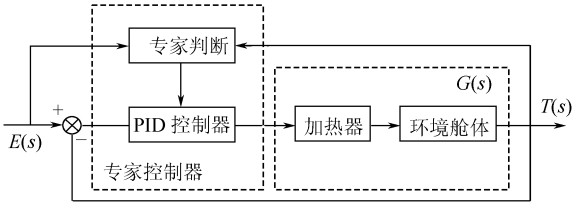


图 2　专家 PID 控制系统

3　仿真试验

仿真试验模型依据某环境室高温舱体的设计方案,在 MATLAB 的 SIMULINK 环境中依据图 2 所示原理搭建专家 PID 控制系统的仿真模型,其中高温舱体的内部子系统可按照图 1 原理结构搭建如图 3 所示,并按照高温舱体的设计指标计算出参数 A,B,C 和 D.专家 PID 控制器采用图 4 的结构.主要的专家控制算法编写在名为 MyExpert 的专家控制器模块所对应的 m 文件中.考虑到 DCS 集散测控系统[6]和舱体中的纯延迟加入延迟环节.

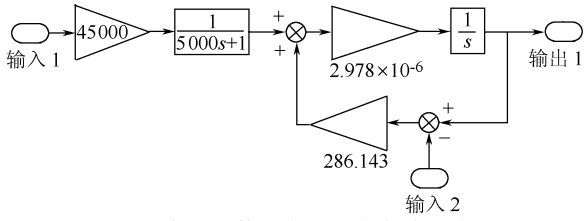
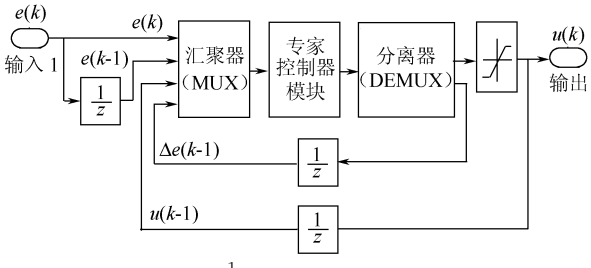


图 3　高温舱体子模块内部仿真示意图



注:$\frac{1}{z}$为单位延迟环节.

图 4　专家 PID 控制器内部示意图

按照升温要求从室温 T_0(18℃)加热到 E_0(70℃),采用无超调的专家 PID 控制算法.其仿真结果与经典自整定 PID 控制曲线比较如图 5 所示.比较图 5 的两条仿真曲线可以看出采用专家 PID 控制策略的控制效果比经典 PID 控制要好,可以有效的抑制超调并且提高升温速率.

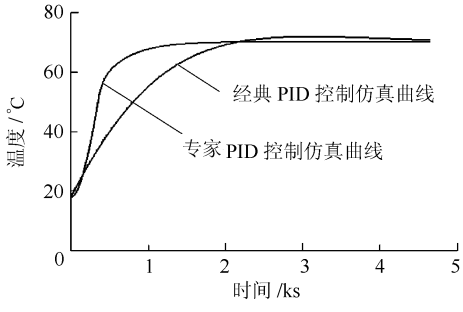


图 5　仿真曲线比较图

4　实验分析

将本文提出的专家 PID 控制策略应用于某环境室高温舱体实际控制方案中,获得与仿真研究相近的控制效果,如图 6 所示.由图 6 专家 PID 控制实测曲线和仿真曲线比较可看出:

1) 本文所建立的集总参数模型及拉氏变换后的控制模型具有良好的精度,能够正确反映舱

体实际情况；

2）在实际高温舱体的升温过程中采用专家PID控制算法取得了较好的控制效果，升温曲线如图6所示.

在调试过程中发现为了加快升温速率同时避免超调发生，可以利用专家判断在系统启动初时采用PD（Proportion Differentiation）控制，当温度接近设定值时采用PID控制以保证系统的控制精度.

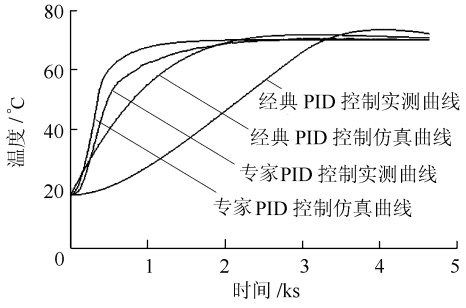


图6 高温舱实测曲线和仿真曲线比较图

5 结 论

环境舱体的温度控制具有较大的难度.针对高温环境模拟舱的控温特点，在对其温度变化进行动态特性分析与建模的基础上，提出采用专家PID控制方法.仿真分析与实际控制结果表明这种方法无超调，响应速度快，稳态精度高，加温效率明显.目前已运用在某环境室装备的低气压与温度冲击综合试验系统中，解决了高精度温度控制、舱体回温速率等问题，顺利通过了国军标[2]的检测规定，对于类似问题的处理具有借鉴意义.

参考文献（References）

[1] 王浚. 环境模拟技术[M]. 北京：国防工业出版社，1996：225－227
Wang Jun. Environment simulation technology[M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1996:225－227(in Chinese)

[2] GJB 150.3A-200x. 军用设备环境试验方法[S]. 国防科学技术工业委员会，1986
GJB 150.3A-200x. Environmental test methods for military equipments[S]. The Science and Technology Committee of National Defense, 1986(in Chinese)

[3] 李运泽，王浚. 卫星热平衡试验的温度预测与仿真模型[J]. 北京航空航天大学学报，2004，30(9)：882－884
Li Yunze, Wang Jun. Temperature prediction and simulation model of satellite's thermal balance test[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(9): 882－884(in Chinese)

[4] Ang K H, Chong G, Li Yun. PID control system analysis, design, and technology[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(4):559－563

[5] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真[M]. 北京：电子工业出版社，2005：94－102
Liu Jinkun. Advanced PID control and MATLAB simulation [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005:94－102 (in Chinese)

[6] 向运飞，刘旺开，沈为群. 双路热动力试验台集散控制系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制，2002，10(10)：653－655
Xiang Yunfei, Liu Wangkai, Shen Weiqun. Distributed control system design and application in double aero-thermodynamics test-unit[J]. Computer Measurement & Control, 2002, 10(10):653－655(in Chinese)

（责任编辑：赵海容）