

歼击机环境控制系统控制性能分析

姚洪伟, 王浚

(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083)

[摘要] 提出了针对环境控制系统特点的脉宽-模糊复合控制方案; 使用 Matlab 软件的 Fuzzy 工具箱和 Simulink 工具箱, 建立了脉宽调节、PID 控制、模糊控制和复合控制等 4 种控制模型, 其中模糊控制模型以混合后的温度与基准温度之间的偏差及其变化率为输入, 通过模糊推理得到控制信号; 输入温度阶跃信号对该 4 种控制模型的阶跃响应特性进行了计算和分析; 选取一组动态参数作为输入对复合控制模型的动态响应进行仿真计算, 结果表明, 复合控制系统有效解决了现有脉宽调节系统的温度波动问题。

[关键词] 飞机; 环境控制; 模糊控制; 仿真

[中图分类号] V119 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)06-0044-04

1 前言

歼击机环境控制系统 (environmental control system, ECS) 是机载系统的重要组成部分, 其作用是满足座舱和电子设备舱的供气、调温和调压要求, 保证飞机乘员与电子设备正常工作。现代歼击机航速高、机动性好, 环控系统工作条件更加多变和恶劣; 环控系统结构复杂, 涉及的变量多且变量之间存在耦合, 给系统的精确控制带来了一定的困难。现阶段国内环控系统主要采用 PID 控制与脉宽调节, 但在使用中暴露出调节时间长、易产生供气温度波动等问题, 难以满足要求。模糊控制系统采用语言型控制规则, 不需要建立精确数学模型, 特别适合于复杂系统的模型^[1]。鉴于环控系统部件多、边界条件复杂, 阀门等部件在长时间使用后很难准确定位, 需要控制系统具有较强的适应能力。模糊控制系统能够满足这些要求。

Matlab 是一种面向科学与工程计算的高级语言, 广泛应用于自动控制和工业设计等领域。笔者使用该软件的 Simulink 工具箱和 Fuzzy 工具箱建立脉宽调节、PID 控制、模糊控制、脉宽-模糊复合

控制等 4 种控制规律下的系统模型, 并对它们的动态特性进行分析和比较。

2 系统简介

环控系统分为 3 个温度控制通道: 预调温通道、防冰通道和供气调温通道, 气流依次经过 3 个通道, 逐级进行温度调节。通道内各控制环节构成反馈回路, 其结构如图 1 所示。在不同高度下各通道有不同的基准温度 T_0 (K); 控制系统使用反馈控制, 通过调整冷、热路流量, 控制混合温度稳定在基准温度 $\pm 4^\circ\text{C}$ 范围内。

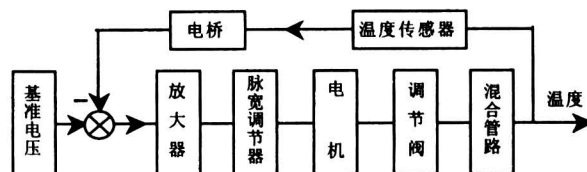


图 1 控制通道系统传递函数结构图

Fig.1 The structure of transfer functions of system in control passage

3 控制系统工作原理

3.1 PID 控制系统

在 PID 系统中需要设定 PID 系数 K_p, K_i, K_d , 它们作为输入量、积分项、微分项的加权系数, 调节输出的控制信号。

3.2 脉宽调节系统

系统中温度测量信号 T 与基准值 T_0 相比较得出温度偏差信号 $e = T - T_0(K)$ 。传感器将信号 e 反馈至脉宽调节器, 当 $|e| \geq 4^\circ\text{C}$ 时, 系统开始调节; 当 $|e| \geq 10^\circ\text{C}$ 时, 控制阀门连续转动; 当偏差值介于两者之间时, 阀门转速 $W(\text{r/min})$ 与温差呈线性关系, 如图 2 所示, 图中 $W_0(\text{r/min})$ 为阀门最高转速。该系统调节迅速, 但稳态精度不高。

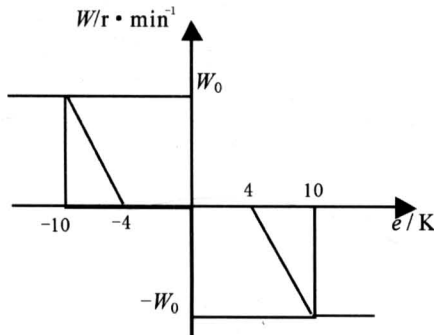


图 2 阀门转速与温差的关系

Fig.2 The relation between rate of valve and difference of temperature

3.3 模糊控制系统

模糊系统中采用二维建模, 即以温度偏差 e 及其变化率 $\dot{e} (K/s)$ 为系统输入, 经模糊化处理后按模糊控制规则得出模糊输出量 u , 经解模糊后控制阀门转角, 达到控制出口温度的目的。

3.4 复合控制

系统由预调温通道直接从飞机发动机引气, 引入的气流温度变化剧烈, 该通道只对温度进行初调, 因此出口温度的精度不高; 后两个通道则情况相反, 故考虑采用混合控制方案, 即预调温采用脉宽调节, 后两个调温通道采用模糊控制。

4 模糊控制系统设计

4.1 输入和输出

输入: e , 取值范围为 $[-6, 6]$, 对应实际论域为 $[-6, 6]$; $\dot{e} = de/d\tau$, (τ 为时间, s), 取值范围为

$[-10, 10]$, 对应实际论域为 $[-5, 5]$ 。

输出: u , 无量纲, 取值范围为 $[-8, 8]$, 对应实际论域为 $[-5, 5]$ 。

对 3 个信号的模糊集合都采用均匀量化, 隶属度函数均采用三角形函数。3 个信号的模糊子集都分为 7 级:

$\tilde{b} = \{\text{正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大}\} = \{\text{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB}\}$ 。

4.2 规则库

模糊控制规则是由以往的控制规律总结出的一组输入-输出对应关系。图 3 为 GUI 工具提供的模糊对应曲面图。

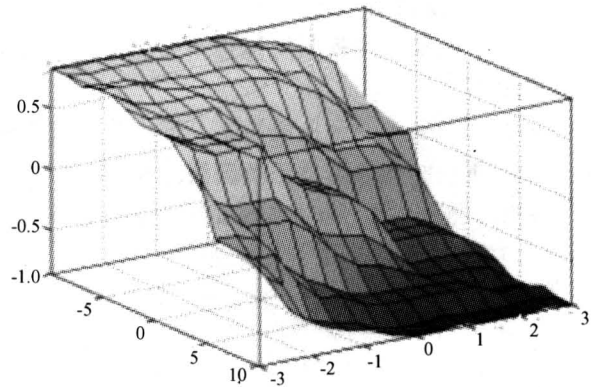


图 3 模糊关系对应曲面

Fig.3 The surface of relation between fuzzy variables

5 动态特性比较

笔者针对不同的温度阶跃输入和动态数据输入, 比较了不同控制系统的动态特性。

5.1 温度阶跃输入

输入状态点: 飞行高度为 1 000 m, $Ma = 0.2$; 500 s 时热路温度由 664 K 阶跃上升到 744 K; 冷路流量为 1 200 kg/h; 冷热路其他参数由高度和马赫数计算得出。该高度下座舱供气温度应稳定在 $302 \pm 4 \text{ K}$ 。各控制系统的仿真曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看出:

- 1) 脉宽调节调节速度快, 稳定时间短, 但控制精度较低, 只能将温度控制在误差范围内 (多为上限或下限)。
- 2) PID 控制连续, 稳态误差小, 但调节时间长。
- 3) 模糊控制调节迅速, 稳定时间短, 稳态精度高, 控制性能优于 PID 系统和脉宽调节系统。

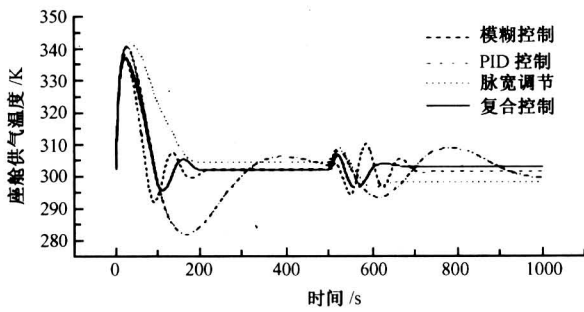


图4 各系统座舱供气温度

Fig.4 The temperatures of cabin inlet in different control systems

4) 复合控制系统超调量小, 稳态精度高, 同时其调节时间比模糊控制短, 在4个备选方案中控制性能最优。

脉宽调节属于一种范围控制, 可将被控量控制在一定范围内, 所以不适于精确温度控制, 而适用于控制输入变化大, 同时对输出量精度要求不高的

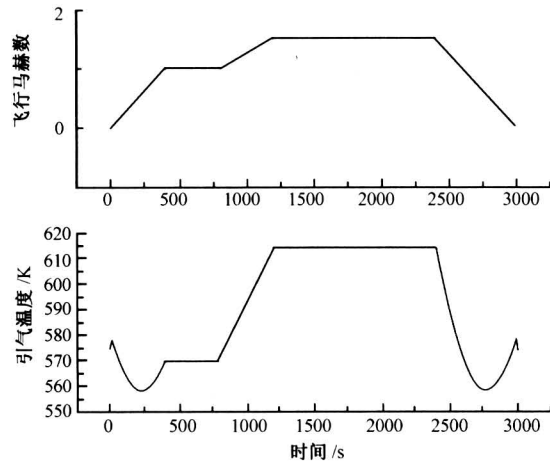
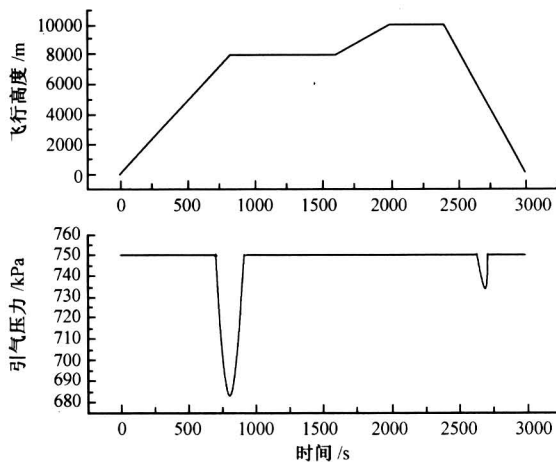


图5 系统动态输入参数

Fig.5 The dynamic input parameters of system

图6和图7分别为动态输入下2个系统供气流量和供气温度曲线。在500 s前系统计算值的波动是由设定初值引起的, 稳定后曲线变化才反映系统的性能。

从图6、图7可以看出, 脉宽调节系统在约500~3000 s时段内, 温度和流量有明显的波动。而整个过程的温度一直处于基准温度 ± 4 °C。这说明脉宽调节系统工作正常, 但控制精度不高, 被控量有明显波动。复合控制则相对平稳, 只是在跨越8000 m高度时, 由于基准温度发生阶跃变化, 使

系统和流量有所波动, 但很快恢复平稳。系统。PID系统使用范围广, 但PID系数对系统依赖性强, 一旦系统状态发生变化, 控制性能会受到很大影响。模糊控制是一种效果控制, 它避开了复杂的建模环节, 直接着眼于系统输入对输出的影响。模糊控制系统的输入可以包括偏差值及其对时间的一阶导数, 有的系统还包括二阶导数。当输入信号对输出产生不利影响(如导致温度偏离设定温度)时, 模糊控制器会输出控制量, 控制系统向相反方向变化; 当输入信号对输出影响不大时, 输出的控制量也会相应减小, 适用于工况变化较大的系统。从比较结果来看, 复合控制的性能最好。

5.2 动态数据输入

动态输入更接近于系统的实际工况, 因此, 有必要对其进行比较和分析。图5为输入的飞行高度、马赫数、环控系统引气温度和压力。在2500 s左右, 飞行高度由高到低跨越8000 m高度, 座舱基准温度相应地由277 K阶跃至302 K。这里主要比较了脉宽调节系统和复合控制系统的性能。

温度和流量有所波动, 但很快恢复平稳。

笔者分析, 由于脉宽是范围调节的, 在基准温度为 ± 4 °C时, 系统不输出控制信号, 一旦系统外部存在扰动, 就会引起温度在该范围内上下波动。在系统对温度进行调节的过程中, 系统各个阀门角度不断变化。由于涡轮处于两个阀门之间, 阀门角度变化造成涡轮前压和背压随之波动, 导致供气流量产生振荡; 这种流量振荡又会与温度的波动相耦合, 造成整个系统控制性能下降。

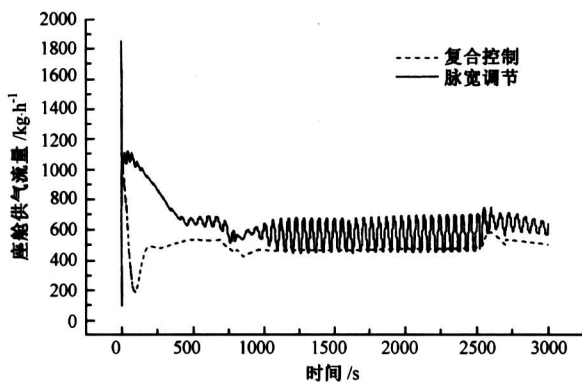


图6 座舱供气流量

Fig.6 The air flux of cabin inlet

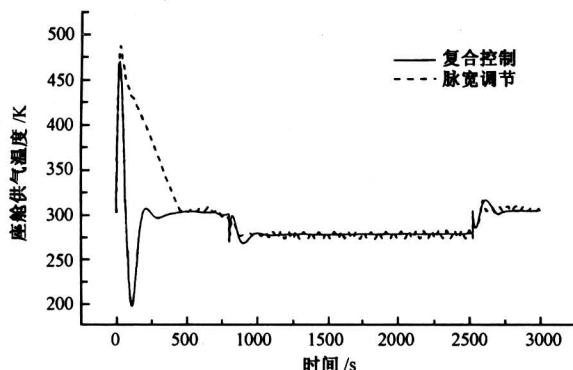


图7 座舱供气温度

Fig.7 The air temperature of cabin inlet

复合控制系统由于引入了模糊控制, 提高了系统对于温度信号变化的预测和处理能力, 有效抑制了温度信号的波动, 从根本上解决了温度波动的问题。

6 结论

通过仿真建模模拟了脉宽调节系统的工作情况, 找到了温度和流量信号产生波动的原因, 提出了采用复合控制的解决方案。该方案综合了脉宽调节系统和模糊控制系统的优点, 建模简单、反应迅速、控制精度高, 性能优于PID控制系统和脉宽调节系统; 该控制方案有效解决了现有脉宽系统供气温度和供气流量产生波动的问题, 适用于对歼击机环境控制系统进行控制。

参考文献

- [1] 吴介一. 提高模糊控制精度的研究[J]. 控制理论及应用, 1996, 13(2): 264~267
- [2] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [3] 张颖超, 郭妹梅. MATLAB及其在模糊控制系统仿真中的应用[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(增刊): 319~322
- [4] Fraisse G. Thermal control of discontinuously occupied building using a classical and a fuzzy logic approach[J]. Energy and Buildings, 1997, 26(3): 310~316

Analysis of Control Performance of ECS in Fighter Plane

Yao Hongwei, Wang Jun

(School of Aeronautics Science and Technology, Beihang University, Beijing 100083, China)

[Abstract] Based on the characteristics of the ECS, pulse width-fuzzy control concept was put forward. Four models, pulse width regulating, PID control, fuzzy control and combined control, were established with Fuzzy and Simulink tool boxes in MATLAB. The difference between the temperatures of mixed flow and the objective and its change rate were the input in the fuzzy system, and the output, the control signal, was obtained by fuzzy reasoning. Rank skipping response characteristics of the four control methods were computed and analyzed with temperature rank skipping signal. A group of dynamic parameters were selected as the input data, by which dynamic response of the combined control model was simulated. The result showed that combined control system could solve the problem of temperature fluctuation in existing pulse width regulating system efficiently.

[Key words] airplane; environmental control; fuzzy control; simulation