

# 舱温控制系统模型及算法研究

江相乐, 杨政秋, 李续贺, 艾素霄, 李静洪

(成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

**摘要:** 数字式闭环控制在机载机电系统中应用广泛, 选取典型的舱温控制系统作为研究对象; 在 Matlab 中使用 Simulink 搭建系统模型, 采用针对纯滞后系统的 Smith 控制算法进行仿真研究, 并根据仿真模型建立系统原型平台, 平台包括模型仿真机、仿真目标机以及控制器软件、人机交互界面; 仿真结果与现场运行实验结果均表明 Smith 控制算法可以满足舱体温度系统控制要求, 同时通过对闭环数字控制技术的方法和流程进行摸索, 掌握了控制律软件设计与实现的快速原型技术, 便于后续项目的工程应用。

**关键词:** 舱温控制; Simulink; 系统模型; Smith 预估器

## Research about Algorithm and Model of Cabin Temperature Control System

Jiang Xiangle, Yang Zhengqiu, Li Xuhe, Ai Suxiao, Li Jinghong

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

**Abstract:** Digital loop control is widely used in airborne electromechanical system, and the typical cabin temperature control system is selected as the research object. A system model is built in Matlab by Simulink, in which simulation research of Smith control algorithm based on the pure lag system is carried out. A prototype platform which includes model simulator, simulation target machine, controller software and human computer interface is built according to the system model. The results of simulation and field test show that Smith control algorithm meets the requirement of cabin temperature control system. Also the research of method and flow about digital loop control, control software design and rapid prototyping technology are mastered, and this is helpful for the engineering application of the follow-up project.

**Keywords:** cabin temperature control system; Simulink; system model; Smith predictor

## 0 引言

随着飞机性能的不不断提升, 环境控制系统的引气及冲压空气的温度和压力将在大范围内变化<sup>[1]</sup>, 而舱体内的温度直接影响了座舱人员的舒适性以及相关电子设备的可靠性<sup>[2]</sup>, 所以对环境温度控制系统提出了更高的要求。同时数字式闭环控制在机载机电系统中应用广泛, 如前轮转弯控制、防滑刹车控制、蒸发制冷控制、液冷循环控制, 但目前机电工程项目中, 很多与物理机构相关的闭环控制功能直接整合在设备自带的控制器上, 缺乏独立于设备存在成熟且可继承的闭环控制技术。

选取典型的机载环控系统舱温控制作为研究对象, 搭建系统模型, 通过仿真研究算法, 实现控制律软件设计与实现。

## 1 系统结构及原理

舱温控制系统工作原理见图 1, 由冲压空气进气道捕捉冲压空气, 然后经回冷器预冷后, 进入冷却涡轮中膨胀降温, 涡轮出口的低温空气输入电子设备冷板冷却电子设备, 然后再通过回冷器冷边进入涡轮带动的压气机增压至适当值排出吊舱外<sup>[3]</sup>。

实际温度控制部分由微处理机、传感器、电动调节阀(电机和流量调节阀)组成。微处理机通过传感器采集当前

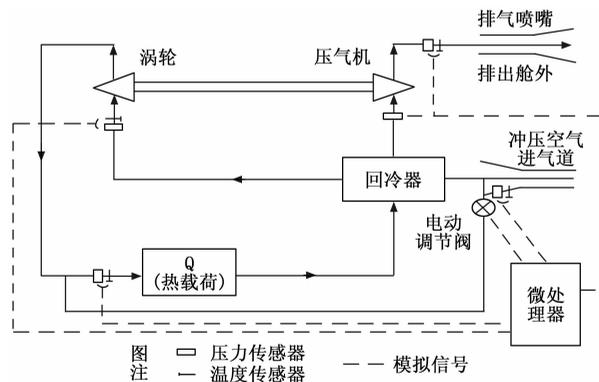


图 1 舱温控制系统工作原理图

温度信号, 通过比较舱体内温度的设定值, 得到温度差, 再根据温度控制算法, 计算得到控制回路输出电压, 调节电动调节阀的活门开度, 从而控制舱体温度。通过不断调节控制算法中的控制参数, 以使舱体温度保持在目标温度周期, 最终得到优化后的控制参数。

在该温控系统中实施闭环数字控制技术、开发控制软件, 并使用全数字仿真进行实验验证, 在满足系统响应时间以及控制精度要求的前提下, 完成了舱温控制系统设计。

## 2 系统设计

系统原型平台由四台上位机、两个台机柜及一个网络交换机组成, 见图 2。四台上位机分别用于开发调试嵌入式控制器软件、建立数学模型、仿真监控、人机交互程序开

收稿日期: 2018-04-25; 修回日期: 2018-05-31。

作者简介: 江相乐(1985-), 男, 四川成都人, 硕士生, 主要从事机载软件设计方向的研究。

发, 仿真目标机中的控制器为一台基于 PPC 硬件平台、vx-Works5.5 操作系统的嵌入式计算机, 模型仿真机用于运行模型。上位机与模型机位于同一个局域网, 通过网络协议按协议接口进行数据交换。

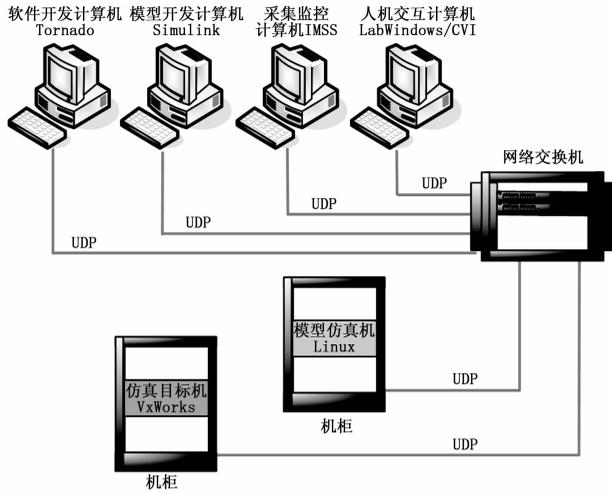


图 2 系统原型平台示意图

系统软件内容主要分为模型搭建、控制器软件设计及人机交互 3 个方面。系统总体仿真模型由环控系统机构物理模型和控制模型两大部分组成, 采用 Matlab 中的 Simulink<sup>[4]</sup> 模块进行搭建。控制器软件包含硬件抽象层和控制业务层, 采用 Tornado 工具、C 语言开发, 硬件抽象层主要实现与模型机、监控机建立 UDP 通讯、周期启动业务层控制任务及为业务层提供网络无关的模型及采集监控数据收发接口, 控制层主要实现闭环控制算法。人机交互界面由 NI 公司的 LabWindows/CVI<sup>[5]</sup> 开发, 实现下发控制参数及控制目标、上传温控参数并图形化显示的功能。

### 3 模型建立

根据舱温控制系统工作原理, 建立系统总体仿真模型, 由环控系统机构物理模型 (简称物理模型) 和控制模型两大部分组成, 见图 3。

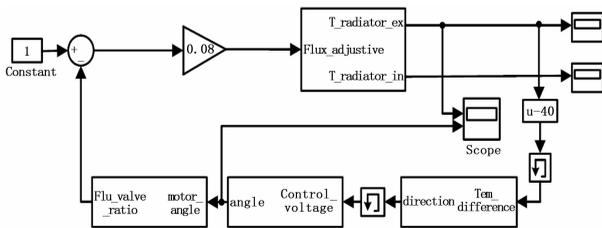


图 3 环控系统模型示意图

物理模型由回热器、涡轮、散热冷板、压气机、环境模块等组成, 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:

$$\sum_{i=1}^n M_i C_i \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^m P_i - \frac{(T - T_0) A_0}{R_{eq}} \quad (1)$$

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。

公式 (1) 经过拉式变换<sup>[6]</sup>, 可以得到舱体温度控制系统是一个二阶控制系统, 系统传递函数模型为:

$$G_T(S) = \frac{T(S)}{E(S)} = \frac{Bs}{(Ds + 1)(As + C)} + \frac{CT_0}{(As + C)} = \frac{(CT_0 D + B)s + CT_0}{ADs^2 + (CD + A)s + C} \quad (2)$$

式中,  $T_0$  是常数, 图 4 对应的温度响应函数示意图。

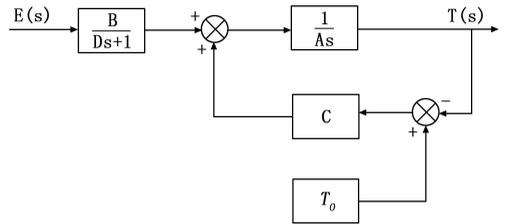


图 4 舱体温度响应函数示意图

控制模型包括流量调节阀的模型、电机模型、控制器模块, 输入期望温度与传感器采集的舱体实际温度, 输出不同占空比的 PWM 波, 通过控制步进电机工作功率调节流量调节阀的活门开度, 从而实现对舱体温度的闭环控制。

其中, 流量调节阀、电机的模型依次见图 5、图 6。

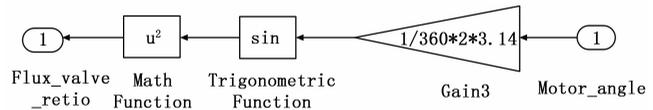


图 5 流量调节阀模型

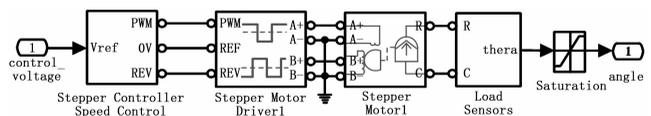


图 6 电机控制模型

### 4 控制器设计

航空领域环境控制算法有经典 PID 控制<sup>[7]</sup>、模糊控制<sup>[8]</sup>、复合控制<sup>[9]</sup>、专家控制<sup>[6]</sup>等。机载软件在满足控制要求的前提下, 优先采用计算简单的算法。本次设计温控系统控制器软件中控制业务层的舱体温度控制系统温控算法首先采用经典 PID 算法, 即比例-积分-微分控制, 该算法相对简单, 鲁棒性好, 适用于系统较复杂的航空航天控制系统<sup>[10]</sup>, 必要时再对算法进行改进。

当控制系统单纯使用比例环节时, 控制目标温度值  $y_0$  与系统当前温度值  $y$  满足公式 (3):

$$\begin{cases} y_0 - y = \Delta x \\ y = k_p \cdot \Delta x_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\Delta x$  是当前值与目标值的偏差,  $k_p$  是比例环节参数。当  $y = y_0 * k_p / (1 + k_p)$  时, 同时满足公式 (3), 所以系统会

达到稳定状态, 但与目标值之间存在稳态静差<sup>[11]</sup>。

此时需要增加积分环节, 用于消除静差, 只要实际值与目标值之间有偏差, 就不断累积偏差, 提高系统无差度, 但积分环节会引起系统的震荡, 所以必要时引入微分环节。微分环节反映偏差信号的变化趋势, 在偏差信号变化太大之前, 在系统中引入一个有效的早期修正信号, 从而加快系统的动作速度, 减小调节时间。

计算机控制是一种采样控制, 连续 PID 算法不能直接使用, 需要采用离散化算法, 常用的两种离散化算法分别是位置式 PID 控制算法和增量式 PID 控制算法。本次 PID 控制器输出控制步进电机, 选用增量式 PID 算法, 依据公式 (4) 进行算法设计。

$$\begin{cases} u(k) = k_p \cdot error(k) + k_i \cdot \sum_{j=0}^{k-1} error(j) + \\ \quad k_d \cdot (error(k) - error(k-1)) \\ u(k-1) = k_p \cdot error(k-1) + k_i \cdot \sum_{j=0}^{k-2} error(j) + \\ \quad k_d \cdot (error(k-1) - error(k-2)) \end{cases} \quad (4)$$

由 (4) 化简可得:

$$\Delta u(k) = k_p * (error(k) - error(k-1)) + k_i * error(k) + k_d * (error(k) + error(k-2) - error(k-1)) \quad (5)$$

式中,  $k_p$ 、 $k_d$ 、 $k_i$  分别是比例、积分、微分常数,  $error(k)$  表示第  $k$  次的偏差。

但由于舱温控制系统具有纯滞后的性质, 本次控制算法在原有 PID 算法上进行了改进, 采用 Smith 预估器<sup>[12-15]</sup>, 即在 PID 控制器上并接一个补偿环节。在算法上实现上体现为限制积分使用时机, 在重设目标温度时清除上次控制过程的积分数据, 有效避免控制震荡。

在软件设计时采用依赖倒置原则, 即以业务层为核心, 根据系统控制逻辑的需要, 抽象出一组与平台无关的接口交给下层 (硬件抽象层) 实现。这样, 应用层可以独立于硬件层进行演化, 便于工程化应用时跨平台迁移。

### 5 实验结果与分析

为便于调整控制参数, 在建立的数学模型基础上扩展 UDP 接收、发送模块及数据转换、显示等模块, 如图 7 所示, 上位机软件可通过网络协议传输, 将参数下发至模型, 模型能够响应外界控制指令, 同时向外界传输数据反馈控制结果, 进而开展数字仿真。

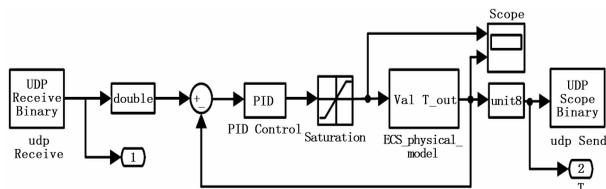


图 7 数字仿真模型总体图

#### 5.1 实验步骤和方法

第一步, 启动上位机软件;

第二步, 启动模型机, 编译并下载控制器软件至下位机模型;

第三步, 通过上位机软件向下位机模型发送指令, 包括控制参数及控制目标;

第四步, 通过上位机监控界面, 观察温度实际值与目标值, 微调控制参数。

#### 5.2 实验数据及曲线图

设置目标温度为 40℃, PID 参数为 0.1、0.2、0, 仿真结束时间为 Inf (无限时长), 仿真为固定步长, 步长为 20 ms, 最终仿真控制结果见图 8, 上图为温控效果图, 下图为流量阀开度调节图。由图可知, 在 45 s 内, 经过四次调节流量阀开度, 舱温稳定在 40℃。



图 8 仿真模型控制效果图

在采集监控软件界面采集实验数据, 实验结果见图 9, 满足舱温控制要求。

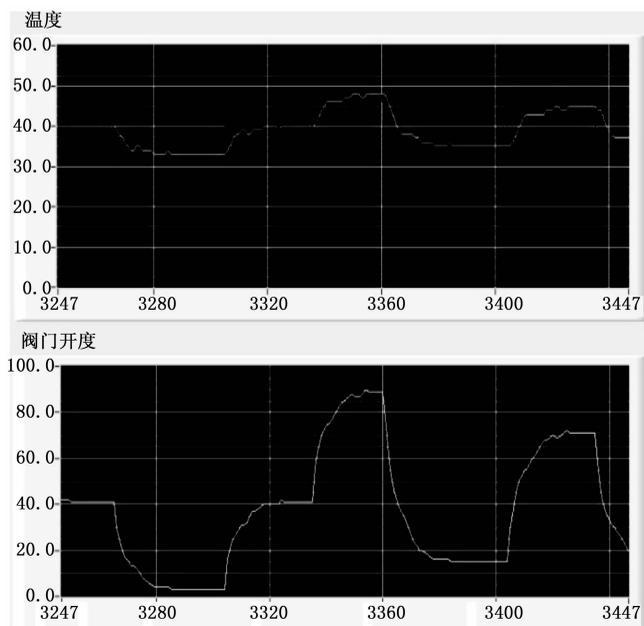


图 9 原型平台控制效果图