

基于 AMESim 数字式座舱压力控制系统建模及优化

梁 鹏* 马 刚 李资浩 王 波

(新乡航空工业(集团)有限公司,新乡 453000)

摘要:当前,在航空环境监控系统中,座舱内的气压大多是通过数字式座舱控制系统来完成的。由于飞机的飞行包线变化,数字式座舱压力控制系统也在不断变化,这对飞机的座舱压力控制系统设计提出了新的要求。针对这一问题,以压力控制的快速响应、系统稳定性及控制律优化为研究对象,通过 AMESim 对某型飞机座舱压力控制系统进行建模,选择具有代表性的飞行包线进行仿真,获得系统稳定性和控制律优化。通过仿真验证,完成了原理性样机的开发,为达到对系统动态特性要求进行了地面上舱实验,并进行了控制律优化。

关键词:数字式座舱压力控制;建模;仿真;动态特性;控制律优化

中图分类号: TP273; N945. 12

文献标识码: A

OSID: 

0 引言

大型飞机的研制是一个国家工业水平的体现和综合国力的象征,为避免大飞机的研制受制于人,大型飞机环控系统的自主研发已被列为国家的战略规划。目前,随着国产大飞机的不断发展,我国相继推出了多种大型民用飞机,民用飞机与军用飞机相比,前者更注重飞机座舱的安全性与舒适性。

座舱压力控制系统作为九大关键系统之一,承担着为机上成员提供舒适气压环境的任务。数字式座舱压力控制系统具备控制精度高、动态响应快和自动化程度高等优点,成为现代飞机的主要应用与研究方向^[1]。然而不同型号的飞机,飞行包线不同,其运行场景也有较大的差异,例如灭火救援型飞机对比普通民航飞机还增加了水上降落、汲水、灭火、救援等特殊任务,不同任务下的飞行高度、升降速度、座舱供气量等要求差异较大,对应的座舱压力控制的难度要求更为严苛,在不同运行场景下还需保证座舱压力的跟随性与稳定性,保证飞机在

不同场景切换中出现振荡现象。

工程系统仿真高级建模环境(advanced modeling environment for performing simulations of engineering systems,简称 AMESim)原是 Imagine 公司研发的仿真平台,后被比利时 LMS 公司收购,一直发展成现在的 AMESim 软件产品,AMESim 支持复杂系统的建模和仿真,具有许多软件的接口,可实现两种至多种软件模型、信息、数据等的交换,利用各种软件自身的优势进行结合,提高仿真效率,目前已广泛应用于汽车、航空、航天、工业研发等领域^[2]。基于 AMESim 的系统建模及仿真技术,不必再通过真实环境搭建来验证系统的控制效果,缩短了系统验证周期。通过仿真能够在系统前期论证阶段验证产品算法的可行性,大大降低了试验验证的成本,为控制方案确定和控制律选择提供有力的支撑。

1 数字式座舱压力控制系统的工作原理

数字式座舱压力控制系统主要包括控制面板、

* 通信作者. E-mail: 895659262@qq.com

引用格式: 梁鹏,马刚,李资浩,等.基于 AMESim 数字式座舱压力控制系统建模及优化[J].民用飞机设计与研究,2024(2):

81-86. LIANG P, MA G, LI Z H, et al. Modeling and optimization of digital cabin pressure control system based on AMESim[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(2):81-86(in Chinese).

座舱压力控制器、压力传感器、驱动装置、排气活门和飞机座舱等^[3],其中座舱压力控制器是座舱压力控制系统的关键部件,是实现座舱压力控制系统控制精度的核心^[4]。座舱压力控制器采集飞机外界实时大气压力、座舱压力及飞机飞行状态等参数^[5],并将收集到的数据进行分析对比,按照预定的压力制度计算出当前座舱压力与预定目标压力

之间的差值,输出排气活门的目标角度给驱动装置,利用驱动装置输出排气活门电机驱动指令,控制排气活门打开或关闭。通过改变排气活门的开度来改变飞机座舱内空气的排气量^[6-7],进而达到改变座舱压力及压力变化率的目的,保障座舱内成员的气压安全。座舱压力控制系统的工作原理^[8]如图 1 所示。

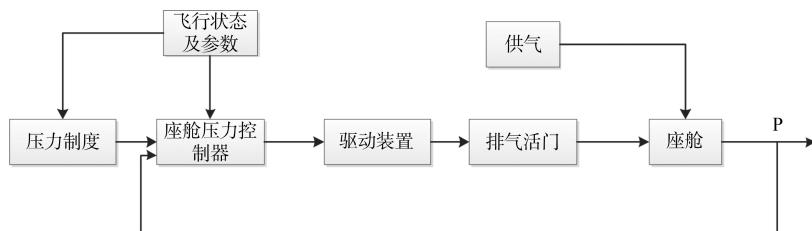


图 1 座舱压力控制系统工作原理

2 座舱压力控制系统建模

在AMESim 工具中对座舱压力控制系统进行模型搭建,主要建模内容包括座舱模型、压力传感器模型、排气活门模型、压力闭环模型等,在建模中对部件进行简化,以提高仿真效率。

1) 飞行剖面及环境边界建模

基于AMESim 航空航天库建立飞机飞行剖面,结合信号库提取飞行高度、飞行环境压力、环境温度作为飞行边界条件。

飞机在 0~100 s 时进行地面准备;在 100~943 s 时,飞机以 9.02 m/s 速度由地面垂直爬升至 7 600 m;在 943~1 943 s 时,飞机在 7 600 m 高度平飞;在 1 943~3 360 s 时,飞机以 5.37 m/s 速度垂直下降;在 3 360~3 460 s 时,飞机着陆至地面释压。

2) 排气活门模型

排气活门利用商业库自带的蝶阀模型直接构建,通过信号给定蝶板角度,通过蝶阀开度控制座舱压力变化如图 2 所示。排气活门流通面积计算采用:

$$\text{area} = \frac{\pi \cdot D_{\text{valve}}^2}{4} \cdot (1 - \cos \varphi)$$

最小流通面积为 0,最大流通面积为

$$\text{area}_{\max} = D_{\text{valve}} \cdot (1 - \cos \varphi) \cdot D_{\text{shaft}}$$

式中: D_{valve} 代表蝶阀直径; D_{shaft} 代表蝶板轴直径; φ 代表蝶板由全关位置至当前位置的角度。

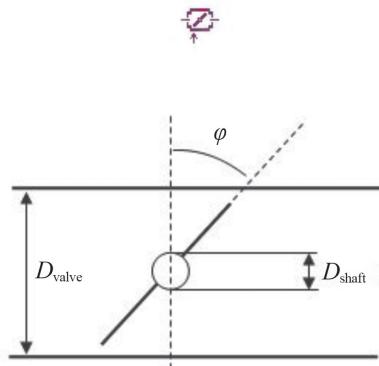


图 2 排气活门模型

3) 压力环模型

采集座舱的实时压力,并与目标压力做差,作为 PID (proportion integration differentiation) 调节的输入,PID 调节输出角度信号给蝶阀。同时监控座舱压力及环境压力,当环境压力高于座舱压力时,输出 0 关闭蝶阀。

4) 控制周期及最小步进角度建模

对 PID 输出的角度信号每隔 T s(座舱压力控制器的控制周期)采集一次作为角度信号给蝶阀,模拟座舱压力控制器控制周期为 T s 的真实情况。计算当前蝶阀角度信号及 T s 前蝶阀角度信号,当二者差大于 α (驱动活门最小角度)时输出当前角度信号,当二者差小于 α 时输出 T s 前的角度信号,实现蝶阀最小步进位 α 控制。

各部件模型搭建完成后,根据工作原理搭建座舱压力控制系统,并按照真实系统对模型的各个参数进行设置,如图 3 所示。

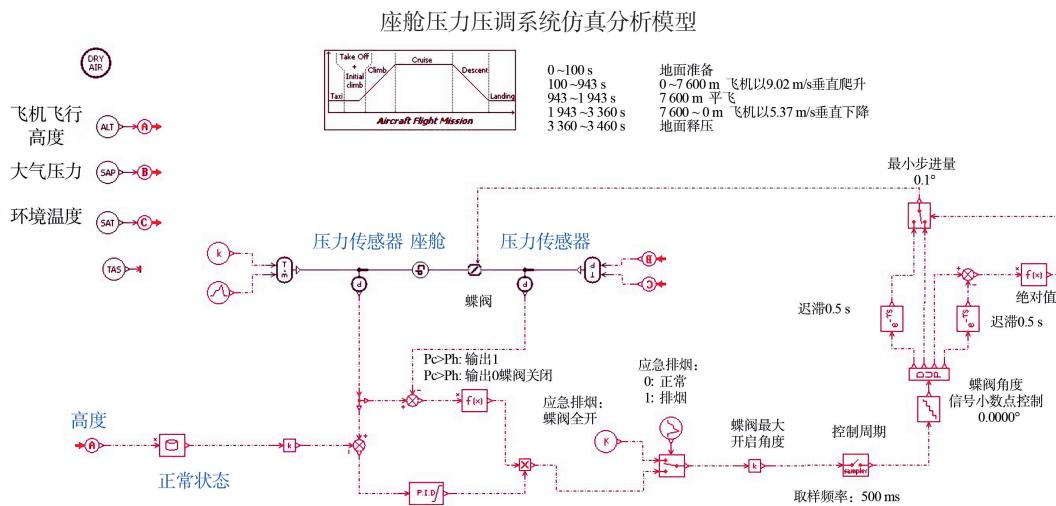


图3 座舱压力控制系统模型

3 座舱压力控制系统仿真

根据上述模型搭建和表1参数输入,通过系统仿真,获得座舱压力、座舱压力变化率和活门开度的仿真结果^[9]。

表1 系统仿真数据

供气量 /kg×h ⁻¹	爬升速率 /m×s ⁻¹	下降速率 /m×s ⁻¹	活门口径 /mm
3 000	9	5.5	R

1) 大气压力、座舱压力仿真曲线

图4为座舱压力控制系统模型,图中 t_1 至 t_5 分别对应飞机的起飞、爬升、巡航、下降和着陆5个阶段。 t_1 阶段飞机没有供气,座舱处于自由通风状态,座舱压力随大气压力逐渐减小,曲线重合。当 t_1 阶段结束,座舱开始供气时,座舱压力出现短暂增加之后再减小,随后座舱压力控制系统开始工作,座舱以恒定的压力变化率进行减压,如 t_2 阶段所示。当飞机进入巡航模式后,座舱压力在微小波动后趋于稳定,如 t_3 阶段所示。当飞机进入下降模式后,座舱以恒定的压力变化率进行增压,直到座舱停止供气,座舱压力迅速下降,与大气压力持平,随后保持大气压力,直至飞机降落,如 t_4 、 t_5 阶段。

2) 座舱压力变化率仿真曲线

图5为系统仿真座舱压力变化率示意图,图中 t_1 为起飞后至压力调节开始工作时; t_2 为巡航起始段; t_3 为下降起始段; t_4 为座舱停止供气时; t_5 为飞机着陆。在 t_1 阶段,座舱压力随大气压力一直减

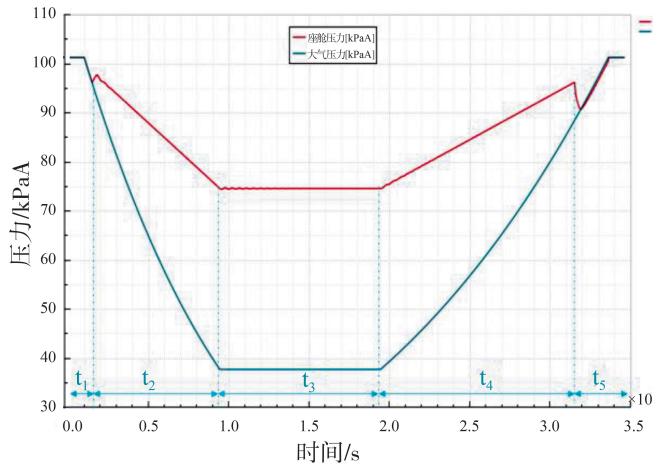


图4 座舱压力控制系统模型

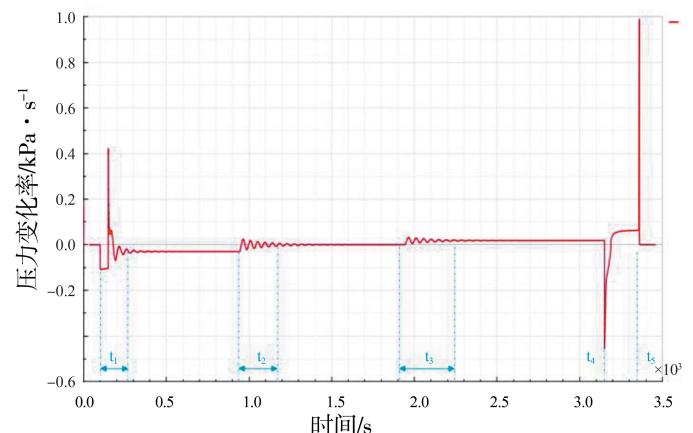


图5 系统仿真座舱压力变化率

小。当座舱开始供气时,压力变化率突然激增,出现一个增压尖峰,随后逐步下降。当压力调节系统开始工作时,控制座舱压力变化率逐步收敛,稳定

在正常值。当飞机进入巡航阶段时,压力变化率出现较小波动,由于巡航阶段压力稳定在巡航高度,座舱内压力变化率在小波动中逐步趋近于零,保持稳定,如 t_2 阶段所示。当飞机开始下降时,压力变化率开始增大,并且逐步稳定在正常值,如 t_3 阶段所示。在 t_4 时刻,座舱突然停止供气,座舱压力突然下降,出现一个降压尖峰,后随大气压力变化,座舱压力逐步增加,直到飞机着陆。

3) 排气活门仿真曲线

图 6 为系统仿真排气活门开度示意图,图中 t_1 为压力调节开始工作前; t_2 为压力调节正常工作时间段; t_3 为停止供气时间段; t_4 为飞机着陆。座舱压力控制系统中排气活门开度分为四个阶段,在起调前,处于全开位置,如 t_1 阶段所示。在调节过程中,一直处于 20°左右,如 t_2 阶段所示。当突然停止供气时,活门会突然全关,如 t_3 阶段所示。到地面后,活门会逐步打开,处于全开位置。

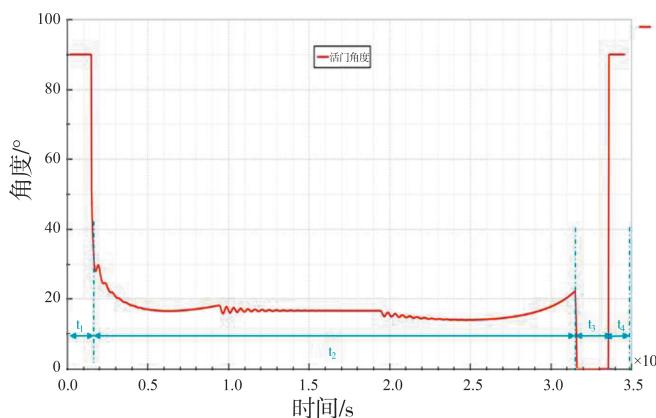


图 6 系统仿真排气活门开度

通过对系统架构基于 AMESim 建立的系统模型进行座舱压力控制、压力变化率及排气活门动作区间的仿真,初步验证了系统满足压力控制、压力变化率的控制需求。

4 试验验证及控制优化

根据某民机型号项目开发了原理样机,组成数字压调系统的各部件包含两个座舱压力控制器(互为备份)、一个排气活门、两个压力传感器(分别内置于两个座舱压力控制器中)、一个激励测试系统(用来模拟与数字压调系统的外部所有信号的交互)。原理样机实物如图 7 所示。

座舱压力控制器放置在模拟飞机座舱内,排



图 7 原理样机实物

气活门安装在模拟大气舱与座舱的连接处,自动模式下,座舱压力控制器接收激励测试系统发出的飞参数据,并根据排气活门反馈的状态信息自动控制活门开度,并将系统工作状态反馈至激励测试系统实时显示并绘制成曲线,验证了座舱压力控制系统算法的可行性^[10]。试验原理如图 8 所示。

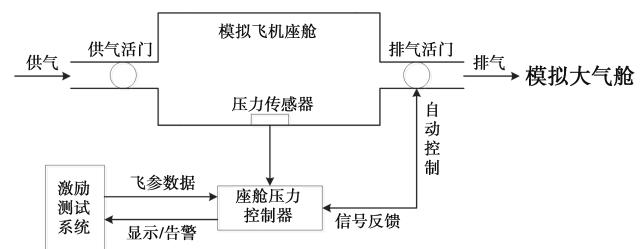


图 8 试验原理图

初步试验结果表明,该系统在起调阶段具有滞后特性,响应速度较慢。根据压力制度要求,需要先保持当前的座舱压力值不变,即保持起调时的座舱压力,由于起调时排气活门处于全开位置,随着飞行高度的增加,排气活门需要快速关闭才能保持当前的座舱压力,而目标压力与实际压力的差值在逐步增加,通过增加比例系数,排气活门开度与座舱压力有随机振荡情况的产生,且座舱高度变化率超过 152 SL m/min(海平面米/分钟),不满足性能指标要求,如图 9 所示。

通过优化算法,采用专家 PID 分段式调节方法,针对起调的特殊情况重新确定一套参数,能够

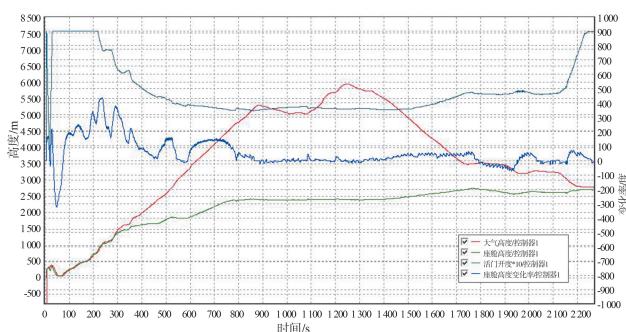


图9 模拟飞机爬升巡航下降飞行曲线

更好地确保座舱压力控制器驱动排气活门动作的稳定性和跟随性,不影响后面正常压力调节的控制效果。控制算法调整后,座舱压力起调时排气活门振荡现象消失,且供气稳定,后座舱高度变化率满足系统提出的性能指标要求。地面上舱试验结果如图10所示。

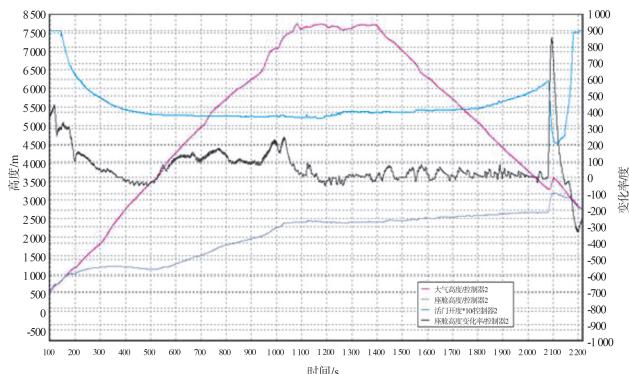


图10 模拟飞机爬升巡航下降飞行曲线

5 结论

采用AMESim多学科仿真工具搭建数字式座舱压力控制系统的数学模型,通过对其进行数值模拟,得到其特征曲线,采用专家PID算法实现闭环控制,经过仿真及上舱试验数据分析,系统在起调

过程中存在压力振荡情况,通过改进控制算法后,利用真实环境进行上舱试验验证,确认系统的控制性能得到了优化。

参考文献:

- [1] 付龙飞,田广来,梁波,等.飞机座舱压力控制系统实时建模与仿真[J].计算机仿真,2016,33(2):61-64,82.
- [2] 刘威.基于AMESim的振动筛动力学特性研究[D].贵阳:贵州师范大学,2017.
- [3] 刘超.大型飞机座舱压力数字控制的仿真技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2009.
- [4] 姚建国,祝小平.BTT无人机非线性控制系统设计[J].弹箭与制导学报,2007(5):17-20.
- [5] 郑新华.气动式座舱压力调节系统关键技术研究与优化设计[D].西安:西北工业大学,2016.
- [6] 邓韧,李著信,樊友洪.一类递归小波神经网络的稳定性研究[J].应用数学和力学,2007(4):428-432.
- [7] 胡军锋.泄漏量对座舱压力控制系统影响的研究[D].南京:南京航空航天大学,2007.
- [8] 关喜峰.飞机座舱压力专家模糊预控方法仿真研究[J].计算机应用与软件,2021,38(4):101-105,203.
- [9] 杨文强,郭涛,成杰.非正常情况下民机座舱压力控制系统性能分析[J].航空工程进展,2017,8(4):471-485.
- [10] 荆立雄,任晓琨,朱耀国,等.座舱压力控制系统测试浅谈[J].山西电子技术,2021(1):53-59.

作者简介

梁鹏 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机环控系统参数控制及低压电机驱动专业。E-mail:895659262@qq.com

马刚 男,硕士,工程师。主要研究方向:嵌入式软件开发。E-mail:949369368@qq.com

李资浩 男,硕士,工程师。主要研究方向:环控系统嵌入式软硬件开发。E-mail:lizh090@avic.com

王波 男,本科,工程师。主要研究方向:飞机环控系统参数控制专业。E-mail:wangbo_it@163.com

Modeling and optimization of digital cabin pressure control system based on AMESim

LIANG Peng^{*} MA Gang LI Zihao WANG Bo

(Xinxiang Aviation Industry (Group) Co. , Ltd. , Xinxiang 453000, China)

Abstract: Currently, in aviation environmental monitoring systems, the pressure inside the cabin is mostly controlled through digital cockpit control systems. Due to the changing flight envelope of the aircraft, the digital cockpit pressure control system is also constantly changing, which poses new requirements for the design of the aircraft's cockpit pressure control system. In response to this issue, this article focuses on the rapid response, system stability, and control rate optimization of pressure control. The cabin pressure control system of a certain aircraft is modeled using AMESim, and representative flight envelopes are selected for simulation to obtain system stability and control rate optimization. Through simulation verification, the development of the principle prototype was completed, and ground cabin experiments were conducted to meet the dynamic characteristics requirements of the system and optimize the control rate.

Keywords: digital cabin pressure control; modeling; simulation; dynamic characteristics; control rate optimization

* Corresponding author. E-mail: 895659262@qq.com