

飞行模拟机辅助动力装置仿真研究

王立文, 王 浩

(中国民航大学地面特种设备科研基地, 天津 300300)

摘 要: 研究飞行模拟机辅助动力装置(APU)的数学模型对飞行模拟机的研制具有重要意义。通过分析辅助动力装置的工作流程, 用面向过程的方法对 APU 进行建模, 得到 APU 地面启动和空中启动的性能曲线。实验结果证明, 该模型达到飞行模拟器的使用要求。

关键词: 系统仿真; 飞行模拟机; 辅助动力装置

Auxiliary Power Unit Simulation Research on Flight Simulator

WANG Li-wen, WANG Hao

(Ground Special Equipment Research and Develop Base, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300)

【Abstract】 Study of Auxiliary Power Unit(APU) of flight simulator is very important for development of flight simulator. By analyzing the work processes of APU, APU is modeled using process-oriented, AUP performance curve of ground start and air start is gotten. Experimental results show that the model reaches the requirements of flight simulator application.

【Key words】 system simulation; flight simulator; Auxiliary Power Unit(APU)

1 概述

飞行模拟机是一个复杂的人在回路仿真系统, 它不仅用于对飞行员进行训练, 也可用于对飞机飞行性能和操纵品质等进行分析研究。辅助动力系统(Auxiliary Power Unit, APU)的作用是在地面和空中给各系统提供电源和气源, 并与起动发电机一起为飞机发动机启动提供电力, 是民用客机飞行动力系统的重要组成部分^[1]。为了保证飞行模拟机数学模型的完整性, 提高仿真的逼真度, 在笔者所在实验室已研制成功的飞行仿真实验系统的基础上, 本文将针对其发动机系统模型中的 APU 部分进行研究。

通过查阅大量文献资料可知, 针对飞行模拟机 APU 部分模型的研究比较少^[2], 大多是针对其使用和维护, 并使用简化模型或忽略此部分, 这样会影响飞行模拟机的真实感。因此, 本文采用 C 语言针对发动机系统的 APU 部分建立模型, 并进行实验验证。

2 APU 模型的建立

2.1 功能实现要求

模拟 APU 的地面启动和空中启动过程以及相关控件的逻辑关系, 当 APU 启动成功后, 建立 APU 启动成功标志, 供其他系统使用, 并实现简单的故障仿真。模拟 APU 在启动及运转过程中转速、温度和燃油消耗率的变化情况。

2.2 APU 工作流程

APU 是一种小型燃气涡轮发动机, 其本质上是一个自备式动力源, 运转时只需要具备所需的燃油和电源, 其启动、加速、运转将在其控制系统的自动控制下进行^[3]。

APU 启动控制系统主要由发动机电子控制装置(ECU)及其控制的活门、开关组成。在启动过程中, 当存在故障时(ECU 超流故障、高滑油温度故障、低滑油压力故障), APU 将自动切断燃油电磁开关使 APU 停车。当 APU 启动成功后, APU 为直流启动发电机提供轴功率的输出。APU 在此工作模式下

通过 ECU 控制燃油流量并保持转速不变。同时, APU 还可以向飞机空调系统提供引气。供气量的大小由载荷控制活门(LCV)控制。

(1)飞行员在启动 APU 时, 操作顺序如下^[4-5]:

1)打开防火开关打开飞机右燃油泵。

2)将 APU 控制板上的风门开关置于打开位置, 风门指示灯亮。

3)将 APU 主开关置于接通位置, 飞机为 ECU 供电, 低滑油压力灯亮。

4)将 APU 主开关置于启动位置, 开关自动弹回接通位置, 启动指示灯亮, 转速表和温度表开始有所指示。

5)在 10%转速时, APU 运转加速, 达到一定转速时, 低滑油压力灯熄灭。

6)在 50%转速时, ECU 自动切断启动发电机, 启动指示灯熄灭, APU 依靠自身燃气能量继续加速。

7)转速达到 94%时, 驾驶舱内的准备加载指示灯亮, 载荷控制活门(LCV)作好工作准备, 此时可以打开发电机或引气开关, 启动成功。

(2)飞行员在 APU 停车时, 操作顺序如下^[4-5]:

1)拨动停车开关到“停车”位置, APU 模拟一个超速信号, 转速表瞬时指示到 110%, ECU 使 APU 停车, 准备加载指示灯熄灭。

2)将主开关置于停车位置, 飞机切断 ECU 电源。

基金项目:中国民航局科技基金资助项目“全任务飞行模拟机”(MHR 0703)

作者简介:王立文(1963—), 男, 教授、博士、博士生导师, 主研方向: 飞行模拟机, 机场设备自动化; 王 浩, 硕士研究生

收稿日期:2009-12-10 **E-mail:** lwwang@cauc.edu.cn

3)关闭右三燃油泵和 APU 防火开关。

4)关闭风门开关, 风门指示灯熄灭。

2.3 数据计算公式

表 1 是 APU 模型中常用的变量^[6]。

表 1 主要变量表

变量名称	含义
APUT	APU 温度(℃)
APUN	APU 转速(r/min)
APUFL	APU 燃油消耗率(lb/hr)
ATEMP	环境温度(℃)
APUS	APU 启动成功标志
APUML	APU 故障指示标志
APUBLEED	APU 引气指示标志

(1)APU 温度计算公式

APU 启动成功(APUS 为 1):

$$APUT = \begin{cases} APUT + (665 - APUT) \times 1 / 60 & \text{引气状态} \\ APUT + (420 - APUT) \times 1 / 60 & \text{非引气状态} \end{cases}$$

APU 启动失败(APUS 为 0):

$$APUT = \begin{cases} ATEMP & APUN < 2 \\ 4.5 \times APUN & APUN \geq 2, APUN \leq 90 \\ 405 + 1.5 \times (100 - APUN) & APUN > 90 \end{cases}$$

(2)APU 转速计算公式

APU 无故障且启动成功(APUML 为 0 且 APUS 为 1):

$$APUN = APUN + (100 - APUN) \times 1 / 60$$

APU 无故障未启动成功(APUML 为 0 且 APUS 为 1):

$$APUN = \begin{cases} APUN + 0.3 & APUN < 80 \\ APUN + 14.5 / (5 \times 60) & APUN \geq 80, APUN < 94.5 \\ APUN + 5.5 / (5 \times 60) & APUN \geq 94.5, APUN < 100 \\ 100 & APUN \geq 100 \end{cases}$$

APU 故障(APUML 为 1): $APUN = 0$

(3)APU 燃油消耗率计算公式

APU 启动成功(APUS 为 1):

$$APUFL = \begin{cases} APUFL + (135 - APUFL) \times 1 / 60 & \text{引气状态} \\ APUFL + (120 - APUFL) \times 1 / 60 & \text{非引气状态} \end{cases}$$

APU 启动失败(APUS 为 0):

$$APUFL = \begin{cases} 0 & APUN < 10 \\ APUFL + (55 - APUFL) \times 1 / 60 & APUN \geq 10, APUN \leq 20 \\ APUFL + (120 - APUFL) \times 1 / 60 & APUN > 20 \end{cases}$$

3 APU 模型仿真

(1)软件实现

如图 1 所示, APU 系统模型包括 2 个部分: APU 逻辑功能模块和 APU 性能参数计算模块。APU 逻辑功能模块是 APU 模型的核心, 主要控制各种开关量信号, 发送 APU 工作状态标志, 实现 APU 工作流程的仿真。APU 性能计算模块负责 APU 基本性能参数的计算, 将计算结果传送到接口系统, 再由此模块将数据输出到对应的虚拟仪表中, 实现模拟座舱中相关仪表显示功能。

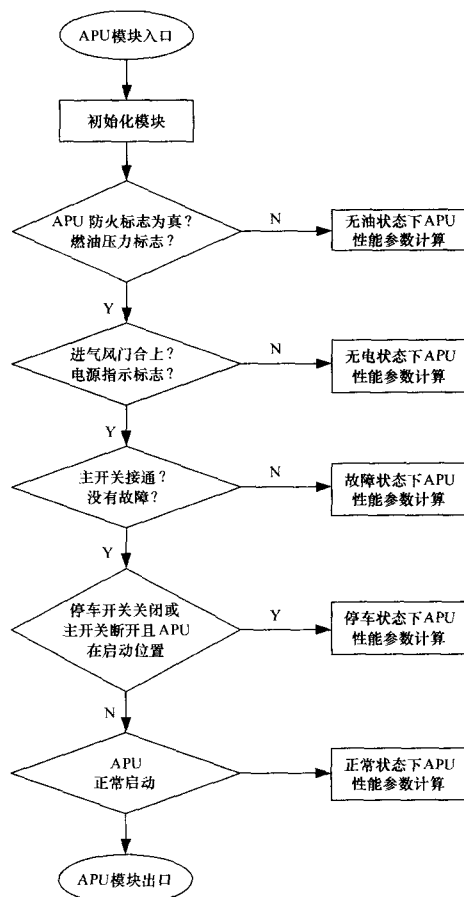


图 1 软件功能

(2)实验平台

此模型的实验平台是由基地研制的飞行仿真实验系统, 由以下部分组成: 模拟座舱结构, 计算机系统, 接口系统, 视景系统, 教员台系统, 六自由度运动系统和操纵负荷系统, 相互关系如图 2 所示。

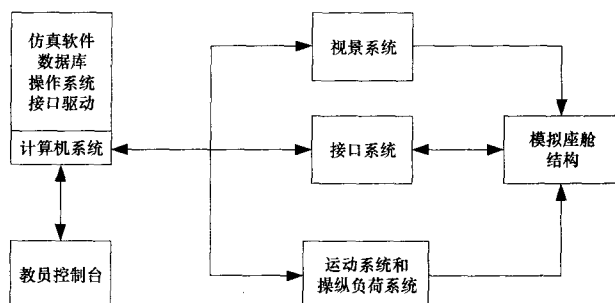


图 2 飞行模拟机实验系统组成

模拟座舱体现真实飞机座舱的内部结构和布局, 包括所有需要仿真的飞机设备、仪表、控制台和座舱操纵机构, 以提供真实的训练环境。计算机系统是模拟机的计算核心, 包括主控计算机、教员台计算机、视景图像生成器、操纵计算机和音响计算机等, 此外, 还包括必要的外部设备, 用以提供整个模拟机必要的仿真计算和控制。接口系统将计算机系统和模拟座舱联系起来, 它将计算机送出的控制信息由 TTL 电平转换成离散量或模拟量以驱动座舱设备, 或者将来自模拟座舱设备的离散量或模拟量变换成 TTL 电平信号送给计算机以实现计算机系统对座舱的控制。教员控制台提供教

员在训练中干预模拟机设备及飞行参数的手段,并可设置故障和特殊情况,训练飞行员的应变能力。视景系统为飞行员提供飞行训练时的真实世界的座舱外景象。作为动感模拟的六自由度运动系统和操纵负荷系统的主要功能是在飞行、地面滑行过程中,为飞行员提供与真实飞机相同的运动和操纵感觉。

4 实验与结果分析

4.1 实验数据获取

飞行模拟机在投入使用之前必须经过 ATG(Approval Test Guide)试验,以确保飞行模拟机与真实飞机性能的逼真程度。以下测试数据是将已建立的模型接入飞行仿真实验系统所获得,并将获取的测试数据与理论数据相对照^[7]。

(1)地面启动(Ground Start)

地面启动的初始条件如表 2 所示。

表 2 地面启动的初始条件

Mach Number	Pressure Altitude/ft	Height Over Ground/ft
0.02	2 366	9.1

此项测试是为了模拟正常情况下地面起飞的 APU 性能。把以上数据当作初始条件导入所建模型中,使用 ATG 软件检验此模型性能并保存模型输出的数据,结果如图 3 所示。本项目测试的源数据取自 Boeing D611A008, Rev A。

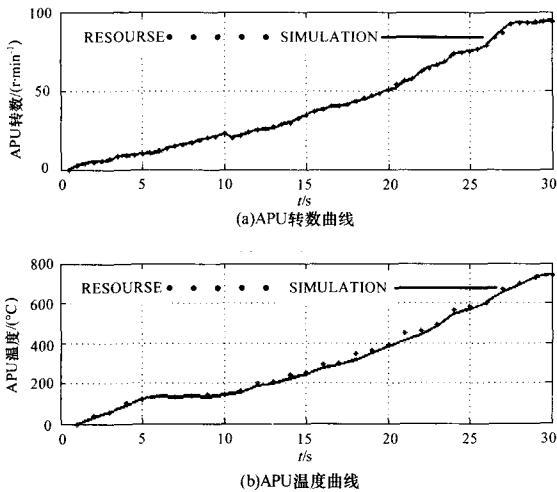


图 3 地面启动后 30 s 仿真曲线

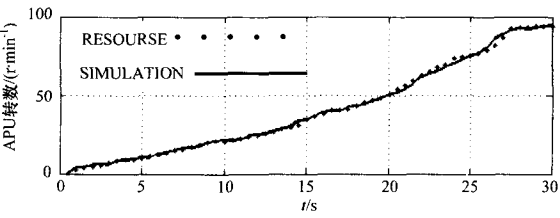
(2)空中启动(Air Start)

空中启动的初始条件如表 3 所示。

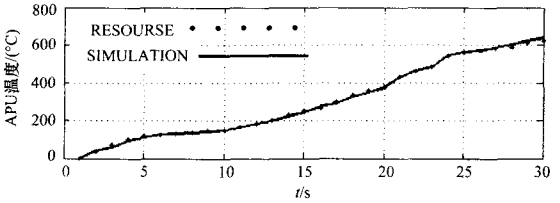
表 3 空中启动的初始条件

Mach Number	Pressure Altitude/ft	Height Over Ground/ft
0.512	10 620.6	10 217.8

此项测试是为了模拟故障情况下空中启动的 APU 性能。把以上数据当作初始条件导入所建模型中,使用 ATG 软件检验此模型性能并保存模型输出的数据,结果如图 4 所示。本项目测试的源数据取自 Boeing D611A008, Rev A。



(a)APU转速曲线



(b)APU温度曲线

图 4 空中启动后 30 s 仿真曲线

4.2 实验结果分析

在地面启动测试中, APU 的转速可以跟踪源数据的转速,但是 APU 的温度与源数据的温度有比较大的差距。原因是 APU 的温度是一个非线性特性较强的参数,为了保证计算速率,只能在计算公式中使用分段线性化的方法来实现。

在空中启动测试中, APU 的温度与源数据的温度接近,而 APU 的转速与源数据的转速有所出入,原因是由于是在空中启动的条件下,环境温度、高度和 Mach 都有明显的变化,但在实验条件下,只能进行一定程度上的修正。

综上所述,尽管在源数据与实验数据之间存在一定的误差,但是,从仿真结果来看,符合飞行模拟机的基本使用要求,可在应用中使用此模型。

5 结束语

本文通过分析 APU 的工作流程,使用 C 语言针对 APU 进行建模,联合虚拟仪表系统和模拟座舱结构,逼真地模拟了 APU 的启动逻辑和性能。通过把 APU 模型嵌入自行研制的飞行仿真实验系统中进行调试,得到了 APU 地面启动和空中启动的性能曲线,结果表明,本文方法建立的 APU 模型完全能满足飞行模拟机仿真的需要。

参考文献

- [1] 赵廷渝. 航空燃气涡轮动力装置[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2004.
- [2] Dalton J S. An Integrated Approach to Conversion, Verification, Validation and Integrity of AFRL Generic Engine Model and Simulation[C]//Proc. of the 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Sacramento, California, USA: [s. n.], 2006.
- [3] MA60 飞行模拟机发动机分系统方案[Z]. 北京蓝天航空科技有限公司, 2001.
- [4] Boeing 737 Flight Manual, REVISION#22[Z]. Boeing Co., 2002.
- [5] Boeing 737 Maintenance Manual, REVISION#32[Z]. Boeing Co., 2002.
- [6] 骆广琦. 航空燃气涡轮发动机数值仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [7] Boeing 737-300 Flight Training Device CFM56-3-B2 Engine Acceptance Test Guide Data[Z]. Hainan Airlines Co., Ltd., 2007.

编辑 索书志