

基于 AMESim 和 MATLAB 的燃油调节器 可视化联合仿真

杨元桢, 郭迎清, 毛皓天

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129)

摘要:针对某型弹用发动机燃油液压机械系统搭建的高保真模型存在的结构复杂,并导致其交互性、可扩展性差且难以演示的问题,采用活性能量指数的方法分析简化其 AMESim 模型,同时基于 MATLAB/GUI 设计了燃油调节器仿真界面,实现了燃油调节器可视化虚拟仿真平台的构建。结果表明:该可视化界面友好、操作简便,能够直观反映燃油调节器的调节功能,为辅助用户设计和分析提供了良好的交互性和可扩展性。

关键词: AMESim; 燃油调节器; 联合仿真; 活性指数; MATLAB/GUI; 弹用发动机

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.03.005

Visualization Co-simulation of Fuel Regulator Based on AMESim and MATLAB

YANG Yuan-zhen, GUO Ying-qing, MAO Hao-tian

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: In view of the high-fidelity model complex structure of fuel hydraulic mechanical system of a certain missile engine, which led to its poor interactivity and expansibility and difficulty to demonstrate, the method of active energy index was used to analyze and simplify its AMESim model. At the same time, the simulation interface of fuel regulator was designed based on MATLAB/GUI, and the visualization virtual simulation platform of fuel regulator was built. The results show that the visualization interface is friendly and easy to operate. It can directly reflect the regulating function of the fuel regulator, and provide good interactivity and expansibility for assisting the design and analysis of the users.

Key words: AMESim; fuel regulator; co-simulation; activity index; MATLAB/GUI; missile engine

0 引言

某型弹用涡扇发动机燃油控制系统包括燃油调节器和被控对象发动机,调节器根据控制指令并结合当前飞行条件与发动机状态给燃烧室供应燃油,并通过燃油流量控制转速或压比来达到调节发动机推力的目的^[1-2]。一般的燃油调节器多为机械液压式,根据其结构建立的 AMESim 模型复杂,如需对调节器的某种工作状态进行仿真,就要设定许多参数,这样使其操作难度加大,且繁多的底层模型又难以对外演示。为了提高 AMESim 模型的使用效率及其交互性、可扩

展性和展示性,有必要在设计阶段建立燃油调节器的人机交互仿真界面。

针对发动机液压系统模型的可视化问题,目前公开的研究成果较少。付久长等^[3]提出将 AMESim 建立的液压数据模型导入 LabVIEW 中,实现对液压缸驱动系统的可视化仿真。郭迎清等^[4]最早使用 VB 软件和 ActiveX 技术,针对某型涡扇发动机机械液压主燃油控制系统进行仿真平台的构建。本文提出直接在燃油调节器联合仿真软件的架构上,进行可视化仿真平台的开发。

使用 MATLAB/GUI 软件设计的界面交互性好,

收稿日期: 2018-06-07

作者简介: 杨元桢(1994),男,在读硕士研究生,研究方向为航空发动机控制系统建模仿真;E-mail: yzyang@mail.nwpu.edu.cn。

引用格式: 杨元桢,郭迎清,毛皓天. 基于 AMESim 和 MATLAB 的燃油调节器可视化联合仿真[J]. 航空发动机, 2019, 45(3): 26-30. YANG Yuanzhen, GUO Yingqing, MAO Haotian. Visualization co-simulation of fuel regulator based on AMESim and MATLAB[J]. Aeroengine, 2019, 45(3): 26-30.

而且还可以应用该模型进一步分析。本文针对某型弹用涡扇发动机燃油调节器,采用 AMESim 对液压机械系统建模并应用活性能量指数的方法简化,使用 MATLAB/Simulink 对控制算法模块建模,同时由于要在 GUI 界面中实现对输入参数的调度以及仿真结果的图形显示,因此将调节器的输入输出也整合进 Simulink 中,在联合仿真的基础上实现可视化界面设计。

1 燃油调节器模型

燃油调节器联合仿真模型如图 1 所示。3 维凸轮、转速、温度输入和燃油流量输出模块通过 AME2SLCoSim 接口导入 Simulink,机械液压部分则使用 AMESim 软件的标准液压库、液阻库、液压元件设计库和机械库来搭建。

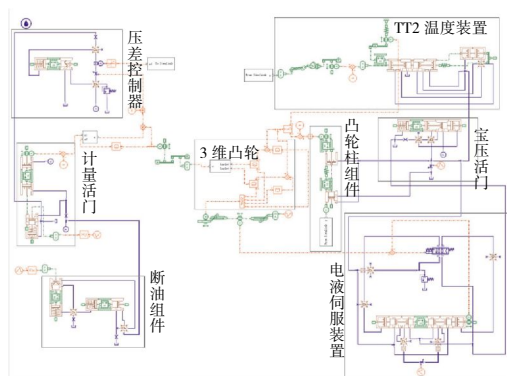


图 1 燃油调节器联合仿真模型

伺服阀或手柄的位置与要调节到的稳定转速^[4]一一对应,实际转速 n 和发动机进口温度 T_1^* 的变化通过凸轮柱组件、温度传感器综合作用于 3 维凸轮,3 维凸轮输出半径决定了计量活门的型孔开度。同时压差活门控制计量活门型孔前、后压差恒定,保证计量燃油量与活门型孔开度成线性关系。这些组件之间通过这样的相互配合,使得该调节器根据当前飞行条件与发动机状态给燃烧室供应燃油^[5-6]。

2 模型简化

该燃油调节器联合仿真模型较为复杂,再加上该调节器 GUI 界面控件较多,底层代码量较大,以至于基于该模型所建立的可视化界面响应十分缓慢。为此,本文采取基于能量活性的模型简化方法。该方法能够迅速得出系统运行时各子元件能量变化情况,找出其中最不活跃的元件的子模型,通过对这些模型修

改,大大降低由于搭建 GUI 界面导致的底层模型仿真时间陡增的问题。

2.1 模型简化机理

AMESim 中的活性指数工具是基于系统子模型中能量转换的强大分析工具,能够自动进行活性指数计算。通过活性指数计算可以确定系统中能量最活跃和最惰性的元件,从而删除或修改模型中具有“低活性”的元素来简化复杂的模型^[7]。1 个子模型的能量活性 A_i 可以被定义为功率绝对值对时间的积分

$$A_i(\tau) = \int_0^{\tau} |P(t)| dt \quad (1)$$

式中: P 为该元件的功率; t 为模型设定仿真时间。

通过计算模型中每个子模型的能量活性,便可得到其活性指数。第 i 个子模型的活性指数 A_{li} (Activity Index) 被定义为:子模型的活性与整个系统模型活性总和的比。表达式为

$$A_{li} = \frac{A_i}{\sum_{\text{system}} A_i} \quad (2)$$

2.2 简化方法

简化模型首先需要确定阈值,活性指数高于阈值的子模型不修改;反之,低于阈值的子模型则被列为修改对象。现采取活性指数计算并结合频域特性分析的方法,来确定简化该燃油调节器模型所需参考的阈值。弹用发动机机械液压控制系统的固有频率一般在 40 Hz 以内,而通过 AMESim 活性指数计算工具分析可知,模型中存在着一些具有高频特性的子模型,有些固有频率甚至高于 1000 Hz。在 AMESim 中,具有高频特性的子模型,其活性指数都在 0.01% 以下,因此在该阈值以下的子模型均被列为可修改对象。

可修改对象的分类和化简方法需要大量的判断确定。可化简对象被分为 3 类:第 1 类是在对液压系统建模时,为了消除仿真产生的代数环而额外引入的压力计算单元;第 2 类是带有弹簧腔的滑阀结构;第 3 类是功率虽小但在物理模型中实际存在的物理单元。对于第 1 类情况的子模型,由于 AMESim 的编程逻辑导致在结构上无法删除,但该腔体子模型的体积参数值设得非常小,可以通过增加容腔体积的办法降低其固有频率。对于第 2 类的弹簧腔,其活性低的原因是质量块移动很小,所允许的最大位移也很小,说明在滑阀中弹簧力几乎是 1 个常值,因此采用相匹配

的恒值力源来替换弹簧。而对于第 3 类的低活性元件,该模型中的压力限制阀的活性指数低是由于在当前设定的仿真环境下该元件未工作,因此不能简单考虑将其替换或删除,而应当保留。

2.3 仿真对比

对修改后的模型进行步长为 1 ms 的欧拉定步长积分器求解。设计油门杆角度在发动机的慢车、巡航、加力状态(分别对应 2.5、7.5、12.5 s)进行 1% 的阶跃跳变。简化前、后的 2 种模型仿真燃油流量响应如图 2 所示,总仿真时间如图 3 所示。

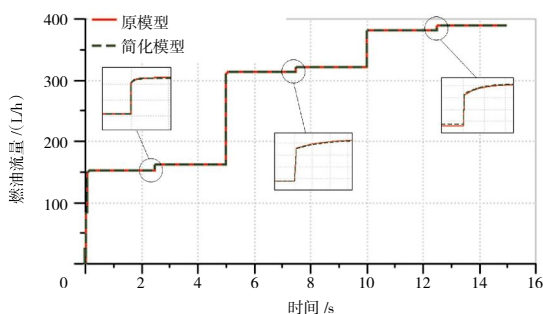


图 2 2 种模型精度对比

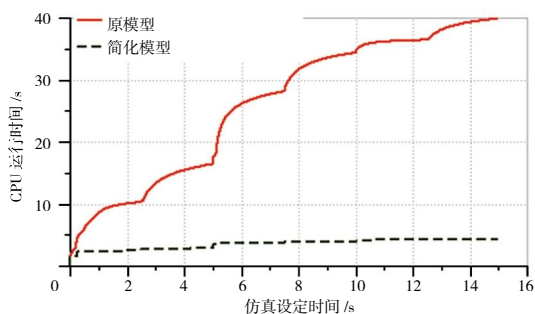


图 3 简化前、后模型 CPU 运行时间对比

原高保真模型采用变步长积分器求解的仿真燃油流量(图 2 实线)与简化模型采用定步长积分器求解的仿真燃油流量(图 2 虚线)对比可见:2 种模型在稳态点的误差小于 1%。在保证精度的前提下,对 2 种模型采用步长为 1 ms 定步长积分器在 15 s 的仿真时间计算,可见原模型的 CPU 运行时间为 39.87 s,而简化模型的仅为 4.71 s。

3 调节器 GUI 仿真界面设计及分析

3.1 调节器 GUI 仿真界面设计

为了进行可视化界面设计,本文选择将 AMESim 模型导入 Simulink 进行联合仿真。在简化后的燃油调节器联合仿真模型基础上,通过 Matlab 命令窗口中输入 guide 打开 GUI 的快速开发环境 GUIDE,在燃油

调节器界面中添加各种控件并编制回调程序,实现对底层模型的输入参数设定、仿真运行,最终将仿真结果在可视化界面中显示^[8-11],如图 4 所示。

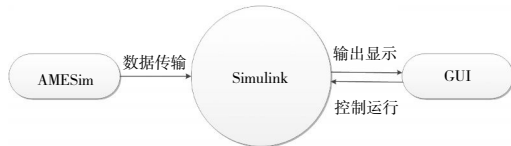


图 4 软件结构框架

3.2 仿真验证

设置仿真时长为 10 s,采样时间间隔为 0.01 s。

(1) 利用已建立的 GUI 仿真界面进行模型的仿真演示,启动界面如图 5 所示。



图 5 启动界面

以 3 维凸轮为计算核心装置的燃油调节器,控制着整个飞行装置在稳态、过渡态稳定工作。在稳定工作状态下,发动机的控制规律为 $m_f = f_1(n, T^*) \rightarrow n = \text{const}$;在过渡态(加减速)下,该系统的控制规律为 $m_f / P_2 = f_2(n)$ 。

因此在设计 GUI 界面时,要分别设计稳态控制和过渡态控制 2 个子界面。利用启动界面(图 5)对这 2 个子界面进行调用,通过点击按钮进入下 1 级子界面。

(2) 点击启动界面的稳态控制按钮,即可进入燃油调节器稳态控制子界面,如图 6 所示。该界面主要划分为右侧的参数设定区及左侧的图像、数值显示区。在编辑框内输入油门杆角度,即可绘制出当下稳态设计点的输出燃油流量响应曲线,又能实时显示出燃油调节器的关键参数:3 维凸轮半径、计量窗口开度和计量窗口前、后压差。当外界条件变化或存在人为干扰时,调节器根据调节规律来保持转速恒定,如图 7 所示。

从上述仿真结果可见,外界条件不变,当油门杆角度推至 65° 时,燃油调节器供给发动机燃烧室的燃

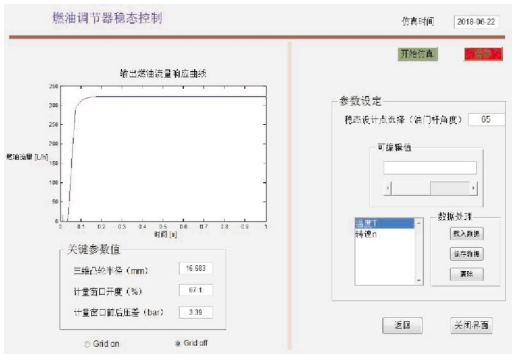


图 6 调节器稳态控制界面

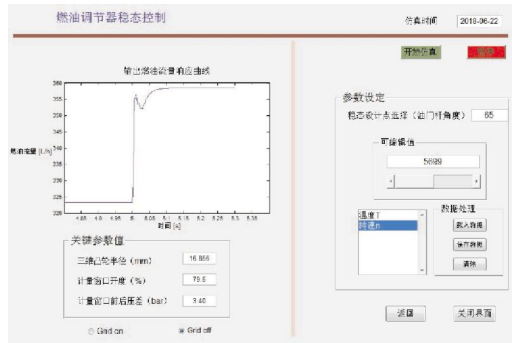


图 7 调节器阶跃响应

油流量稳定在 322 L/h。从图 7 中可见,通过滑块或可编辑文本框键入 T_i (发动机进口温度)或发动机转子转速来仿真。当外界参数小范围变化使得被控对象偏离当前稳态点时,此为调节器输出燃油流量的变化过程。

在如图 7 所示的可视化界面中,系统变量输出界面实时显示燃油流量变化曲线以及燃油调节器的关键参数值。以转速 n 变化为例:当发动机转速由均衡转速 6338 r/min 降至 5699 r/min 时,飞重离心力减小,3 维凸轮输出半径增大,燃油调节器的供油量增加,从而调节发动机转速回复^[12-13]。从图 7 中还可见,燃油调节器在经历 0.1 s 的波动后稳定在新的输出燃油流量值。

(3) 燃油调节器过渡态控制子界面的整体布局(如图 8 所示)与稳态控制子界面的相类似,通过列表框选择加速或减速过程,再在可编辑文本框中键入油门杆角度(PLA)的移动范围,即可仿真发动机从一种工作状态迅速过渡到另一种工作状态下的燃油调节器的油气比特性^[14],同时通过该子界面显示出模型底层的关键参数值。

在发动机过渡态下,燃油调节器的作用是在快速推动油门杆时,通过设定的油气比控制规律来控制发动机,使发动机在加、减速的过程中不喘振不超温,且

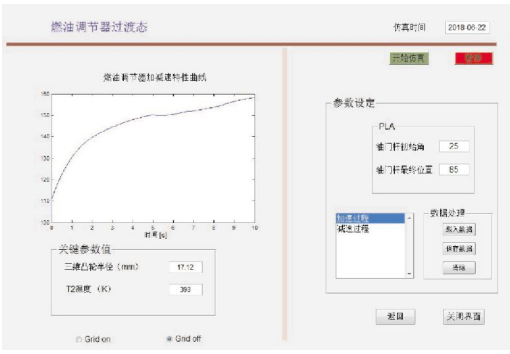


图 8 调节器过渡态控制界面

调节时间短^[15]。

通过联合仿真,MATLAB/GUI 直接读取 AMESim 模型产生的数据文件,使燃油调节器的控制过程可视化,同时绘制出仿真的直观信息,从而可以更加快速地进行 AMESim 模型参数设置以及建模验证,提高系统仿真和分析的效率。

4 结束语

针对 AMESim 模型的可视化问题,本文提出基于联合仿真架构的 MATLAB/GUI 设计思路,并对弹用发动机燃油调节器进行实例分析。结果表明:基于 AMESim 和 MATLAB 的可视化联合仿真,在利用 AMESim 对液压系统进行分析时,可以通过可视化界面观察整个燃油调节器的稳态、过渡态调节过程,为设计和分析提供支持;所设计的可视化界面友好,操作简单,在进行特定状态仿真时,不需要在 AMESim 软件下进行繁杂的输入参数设定,大大提高了 AMESim 模型的使用率。

参考文献:

[1] 张绍基. 航空发动机控制系统的研发与展望 [J]. 航空动力学报, 2004, 19(4): 375-382.
ZHANG Shaoji. A review of aeroengine control system [J]. Journal of Aerospace, 2004, 19(4): 375-382. (in Chinese)
[2] Link C. J., Sanjay G. Propulsion control technology development in the United States—a historical perspective[R]. NASA-TM-2005-213978.
[3] 付久长, 米双山, 丁俊杰. 基于 AMESim 和 LabVIEW 的液压系统可视化仿真技术实现[J]. 液压与气动, 2011(10): 89-91.
FU Jiuchang, MI Shuangshan, DING Junjie. Realization of hydraulic system visual simulation based on AMESim and LabVIEW [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2011(10): 89-91. (in Chinese)
[4] 吴文斐, 郭迎清, 李睿, 等. 涡扇发动机液压机械主控系统建模与仿真分析[J]. 航空发动机, 2011, 37(1): 16-19.
WU Wenfei, GUO Yingqing, LI Rui, et al. Modeling and simulation

- analysis of hydro-mechanical main control system for turbofan engine [J]. Aeroengine, 2011, 37(1): 16-19. (in Chinese)
- [5] Rabbath C A, Bensoudane E. Real-time modeling and simulation of a gas-turbine engine control system[R]. AIAA-2001-4246.
- [6] 余玲, 叶志锋, 王彬. 航空发动机燃油计量装置特性仿真与试验研究[J]. 航空发动机, 2015, 41(2): 85-88.
YU Ling, YE Zhifeng, WANG Bin. Simulation and experimental study of characteristics for aeroengine fuel metering device [J]. Aeroengine, 2015, 41(2): 85-88. (in Chinese)
- [7] 王骥超, 郭迎清. 基于 AMESim 模型的实时化简[J]. 航空计算技术, 2012, 42(4): 72-76.
WANG Jichao, GUO Yingqing. Model reduction based on AMESim for realtime simulation [J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(4): 72-76. (in Chinese)
- [8] 张龙, 訾斌, 钱森. 基于 AMESim 和 MATLAB/GUI 的汽车起重机起升机构可视化联合仿真与分析[J]. 液压与气动, 2013(5): 97-101.
ZHANG Long, ZI Bin, QIAN Sen. Visualization co-simulation and analysis of hoisting mechanism for truck crane based on AMESim and MATLAB/GUI [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2013(5): 97-101. (in Chinese)
- [9] 江玲玲, 张俊俊. 基于 AMESim 与 Matlab/Simulink 联合仿真技术的接口与应用研究[J]. 机床与液压, 2008, 36(1): 148-149.
JIANG Lingling, ZHANG Junjun. Interface and application research united simulation technique based on AMESim and Matlab/Simulink [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(1): 148-149. (in Chinese)
- [10] 任重, 谭秋林, 蔡婷, 等. 基于 MATLAB 的内燃机曲柄连杆机构动力学 GUI 设计[J]. 机械传动, 2014, 38(8): 92-95.
REN Zhong, TAN Qiulin, CAI Ting, et al. Design of dynamics GUI of the internal combustion engine crank based on MATLAB [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(8): 92-95. (in Chinese)
- [11] 万守鹏, 石钢, 程道来, 等. MATLAB 飞机舱音语音增强、时频分析和 GUI 设计[J]. 软件, 2014, 35(4): 1-5.
WAN Shoupeng, SHI Gang, CHENG Daolai, et al. Voice enhancement, time-frequency analysis and GUI design of airplane cockpit voice in MATLAB[J]. Software, 2014, 35(4): 1-5. (in Chinese)
- [12] Jaw L C, Mattingly J D. Aircraft engine controls: design, system analysis, and health monitoring[M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009: 86-91.
- [13] Visser W P J, Broomhead M J. A generic object-oriented gas turbine simulation environment[R]. NLR-TP-2000-267.
- [14] 韩文俊, 李家瑞, 王军, 等. 基于实时模型的涡扇发动机加速供油规律设计方法[J]. 航空发动机, 2015, 41(2): 1-5.
HAN Wenjun, LI Jiarui, WANG Jun, et al. Design method of fuel supply law for turbofan engine acceleration based on a real-time model[J]. Aeroengine, 2015, 41(2): 1-5. (in Chinese)
- [15] 任新宇, 王建礼, 赵小龙. 基于 AMESim 的涡扇发动机控制系统综合仿真[J]. 航空动力学报, 2010, 25(12): 2816-2820.
REN Xinyu, WANG Jianli, ZHAO Xiaolong. Simulation of turbofan engine main fuel control system based on AMESim [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(12): 2816-2820. (in Chinese)

(编辑: 贺红井)