

航空发动机控制系统多学科仿真平台

罗茂春

(南京航空航天大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210016)

摘要: FWorks 是一个用于航空发动机控制系统分析、设计、集成和验证的综合平台,但是控制系统部件的仿真往往依赖于不同的仿真工具,因此在 FWorks 平台上集成这些不同仿真工具建立模型是一个极大的挑战。为此,通过在 FWorks 平台中集成 FMI 接口,在该平台上实现了多学科仿真软件模型联合仿真,极大地扩展了平台的仿真能力。

关键词: 航空发动机; 控制系统; 多学科联合仿真; FMI

中图分类号: V233.7; TP391.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2020)03-0094-04

Aircraft Engine Control System Simulation Platform

LUO Maochun

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: FWorks is a simulation platform for aircraft engine control system which is used for analysis, design, integration and verification of this system. However this simulation involves many disciplines. It is very hard to integrate these softwares into the simulation platform which is used to build this model. FMI integrated into the FWorks platform is used to co-simulate the multi-disciplinary models, thus greatly expanding the simulation capabilities of the platform.

Keywords: aircraft engine; control system; multi-domain co-simulation; FMI

0 引言

航空发动机控制系统是由机械、液压、电子与电气等部件组成的复杂系统。在控制系统设计与研发的过程中存在着大量的迭代过程,重复的设计、测试和硬件制造都会带来高昂的成本,而数字仿真可以大幅减少这种成本^[1]。在此前提下,南京航空航天大学开发了全权限数字控制系统仿真平台(FADEC works, FWorks)^[2],用于航空发动机控制系统的分析、设计、集成和验证。数字仿真带来的便捷性要求研究人员不断地提升数字仿真的能力,这种趋势也带来了更多的技术挑战。例如想要更精确地预测某种转子部件运行的效率和可操作性,就需要进行空气动力学、结构力学和热力热联合仿真,以综合不同学科对部件结构的影响。因此仿真软件面对的一个重要问题,就是如何解决多学科联合仿真问题。

在航空发动机领域,美国 NASA Glenn 研发中心研发的推进系统数字仿真平台(numerical propulsion system simulation, NPSS)从 3 个层面去解决多学科耦合问题^[3],第一是低耦合,即首先单独进行某个学科的仿真分析,然后手动地将该学科的影响数据导出,并用于下一个学科的仿真分析。该方法的关键在于建立共享的数据库和数据接口标准,在 NASA 的气动-结构耦合实验中,采用该方法可以将原来一周的实验周期缩短至几分钟^[3]。第二是过程耦合,即将不同的仿真代码进行连接,能够自动地同步

仿真,该方法的关键在于基于一定的协议来支持不同的仿真代码进行交互。第三是完全耦合,即只能通过基础层面进行联合仿真,这就需要依赖一个能够支持多学科仿真的统一建模语言。NPSS 全面地提出多学科联合仿真面临的问题和解决方案,但是其解决问题依赖的工具库往往无法公开获取。欧洲 VIVACE 项目开发的航空发动机仿真软件 PROOSIS^[4]也针对第二和第三层面的联合仿真提出了解决方案,对于第二层面问题,PROOSIS 集成了由欧洲发展信息计划(ITEA2)提出的 FMI 标准,基于该标准可以将所有支持 FMI 标准软件建立的模型集成到 PROOSIS 中。另外 PROOSIS 本身也是一种新的仿真环境,可以求解所有基于微分方程建立的模型,从而解决完全耦合的多学科仿真问题。

本文采取和 PROOSIS 同样的方法,在 FWorks 平台中集成 FMI 标准,使得 FWorks 能够集成由其他仿真软件建立的模型,从而进行多学科联合仿真。

1 FWorks 多学科联合仿真需求与设计

1.1 多学科联合仿真功能需求分析

航空发动机控制系统主要由传感器、控制器和执行机构组成,不同部件的建模往往依赖于不同的仿真软件,所以 FWorks 的多学科联合仿真功能主要是能够集成不同的仿真软件建立的模型。

1.2 FWorks 平台软件架构

FWorks 在集成 FMI 标准时,需要保证较好的便携性和扩展性,因此本文采用面向对象的方式来构造软件架构。部件的类结构图如图 1 所示,类的封装模式保持一致,以确保各模块可以以相似的接口来加载模型。所有模型的接口和函数都保持相同的命名方式,其中接口为各个模型的输入和输出数据,函数包含该模型的初始化函数和运行函数。

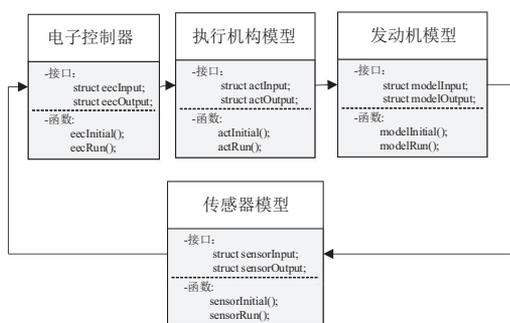


图 1 模型类结构图

对于每类模型内的子模型,采用继承父类的方式来定义模型,具体关系如图 2 所示。电子控制器类是控制律和电路模型的类的父类,燃油执行机构和其他执行机构的类均继承自执行机构父类,各类传感器类继承自传感器父类。

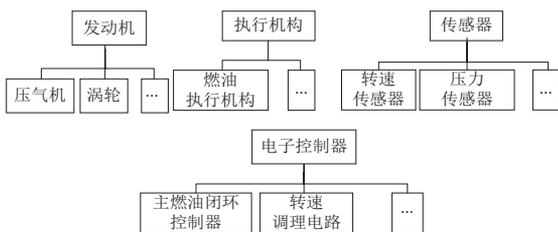


图 2 模型类关系图

1.3 FMI 在 FWorks 平台的集成

FMI^[5]定义了一种联合仿真的通用接口规范,基于该规范可以实现不同仿真工具建立的模型联合仿真。各仿真工具遵循统一的 FMI (functional mock-up interface) 标准,可以将其平台上的模型导出为可运行的仿真组件 FMU (functional mock-up unit),且 FMI 规定了两种不同的仿真模式,两种不同的模型主要差别在于生成的 FMU 是否包含模型求解器,其中包含模型求解器的模式是 Co-Simulation (CS)。FMI 标准制定了如何运行 FMU 的代码流程,并将运行 FMU 的程序称为主控程序。

本文通过在 FWorks 仿真平台中集成 FMU 主控程序,使得 FWorks 仿真平台具有多学科联合仿真的能力。集成方法为将主控程序按照 1.2 节中 FWorks 平台软件架构的封装规范进行封装。FMU 主控程序流程图及在 FWorks 中的封装如图 3 所示,其中初始化函数封装了 FMU 主控程序中解析 XML 文件和模型初始化的部分,XML 文件包含了模型的所有内部信息。运行函数封装了 FMU 设置输入、单步计算和获取输出 3 个部分,模型的持续计算依赖

于 FWorks 内部的计算流程。

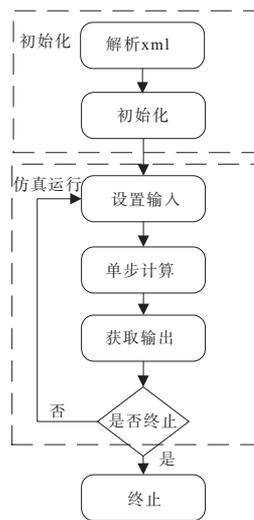


图 3 FMU 主控程序流程图

2 航空发动机控制系统部件建模

2.1 控制系统架构

航空发动机控制系统主要包括传感器、执行机构、电子控制器和发动机。本文研究对象为主燃油闭环控制和 LVDT 位移闭环控制,其结构如图 4 所示。从图中可以看到主燃油闭环控制和 LVDT 位移闭环控制组成了完整的转速闭环控制,主燃油闭环控制主要包括主燃油控制器、发动机和转速传感器。LVDT 闭环控制包括 LVDT 位移控制器、燃油执行机构和 LVDT 传感器。其中主燃油闭环控制器接受需求转速指令和传感器反馈的转速,通过控制燃油量来控制发动机转速。另一方面,要精确控制燃油量就要引入 LVDT 位移闭环控制,通过将燃油量转化为可测量的 LVDT 位移,LVDT 闭环控制器对 LVDT 位移进行闭环控制,从而达到精确控制燃油量的目的。

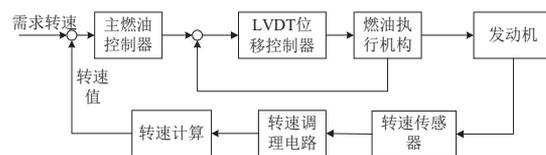


图 4 航空发动机控制系统结构图

2.2 控制系统部件建模

本文建立的控制系统部件即为 2.1 节中的主燃油闭环控制和 LVDT 闭环控制中的部件,主要包括发动机模型、转速传感器模型、调理电路模型、燃油执行机构模型和控制器。由于各部件自身特性的原因,研究中往往使用不同的仿真软件对各部件建模,本文使用 C 和 Simulink 混合建立发动机模型,使用 Simulink 建立转速传感器模型,使用 Modelica 建立转速调理电路模型,使用 AMESim 建立燃油执行机构模型,使用 Simulink 来设计闭环控制器。

本文建立的航空发动机模型为美国某公司于 20 世纪 60 年代设计制造的大涵道比双转子涡轮发动机 JT9D^[6], 其结构如图 5 所示。本文使用的模型为热力学部件级模型。通过对每一个部件进行热力学计算, 获取各个出口截面参数和发动机输出, 再利用各截面之前的平衡关系使得发动机模型计算收敛。建模时每个部件的热力学计算利用 C 完成, 再将其封装为 Simulink 的 S-Function, 这样既可以保证模型运行的效率, 也可以提高模型的复用率。

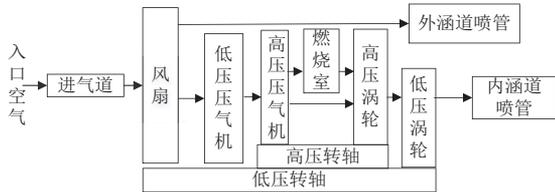


图 5 航空发动机结构图

航空发动机转速传感器一般选用磁电式转速传感器^[7], 该类传感器主要由永久磁铁、铁磁芯、感应线圈和音轮等组成。本文参考文献[8]使用 Simulink 建立转速传感器功能模型。

转速传感器调理电路模型^[8], 主要包括滤波、钳位、放大和比较模块, 其中滤波电路只允许低频信号通过, 钳位电路可以稳定输入信号的电压, 而放大和比较模块可以提升电路的抗干扰能力。本文使用 Modelica 来建立转速传感器调理电路模型, Modelica 的非因果建模特性, 可以按照电路原理图直接搭建模型, 而无需推导完整电路的输入、输出关系。

简化、通用燃油计量装置模型包含电液伺服阀、作动筒和 LVDT 位移传感器, 其中电液伺服阀接受 LVDT 闭环控制器的输出电流, 驱动作动筒运动, LVDT 位移传感器可以检测作动筒的位移量, 反馈给 LVDT 闭环控制器。本文使用 AMESim^[9] 建立燃油执行机构模型。AMESim 具有丰富的机械液压仿真库, 所需子部件模型可以直接从其模型库中获取, 可以快速地搭建出简化的燃油计量装置模型。

设计控制器时, 首先设计 LVDT 位移闭环控制器, 使用 PI 控制器来实现 LVDT 闭环控制, 再将 LVDT 闭环控制器、燃油执行机构和发动机看作一个非线性系统, 对其进行分段线性化, 在每一段线性模型内单独设计 PI 控制器, 最后利用高压转子转速对控制器增益进行调度。本文使用 Simulink 进行控制器设计。Simulink 具有丰富的线性化和控制工具箱, 非常便于进行控制器的设计。

3 FWorks 平台集成与应用

3.1 基于 FMI 的联合仿真

在 FWorks 平台中进行控制系统联合仿真, 需要首先将第 2 节中各软件建立的转速传感器和燃油执行机构模型分别生成 FMU。目前 Modelica 和 AMESim 均已支持 FMI2.0 标准, 能够导出 CS 模式的 FMU。而后将生成的 FMU 分别导入 FWorks 平台中, 即可调用运行 FMU。

对于以 Simulink 或 S-Function 建立的模型, 使用

Simulink 的 Code Generation 工具可以生成 C 代码, 再将其封装为符合 FWorks 软件架构中的封装规范的类, 即可在 FWorks 平台中运行。

3.2 仿真结果及分析

通过在 FWorks 平台上进行航空发动机控制系统多学科联合仿真, 可以得到仿真结果图 6-图 10, 其中图 6-图 9 分别为各部件的仿真对比图, 虚线为原仿真软件中的仿真结果, 实线为各部件在 FWorks 中的仿真结果, 二者相对误差 $< 10^{-8}$, 说明 FMU 和 Code Generation 生成的代码可以准确地代表原仿真软件中的模型, 且 FWorks 能够正确地运行各 FMU 和生成的代码。图 10 为控制系统闭环仿真结果对比图, 在 55 s 之前为起动状态, 280 s 之后为停车状态, 这两个状态均为开环运行, 不进行转速闭环控制。55 s 到 280 s 之前为慢车以上状态, 该状态即为转速闭环控制状态。可以看到在进行转速闭环控制时, Simulink 的仿真结果和 FWorks 基本一致, 二者相对误差 $< 10^{-5}$, 且均能较好地跟踪需求转速。

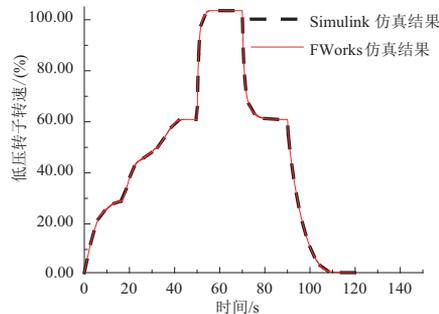


图 6 发动机模型低压转子转速仿真结果对比

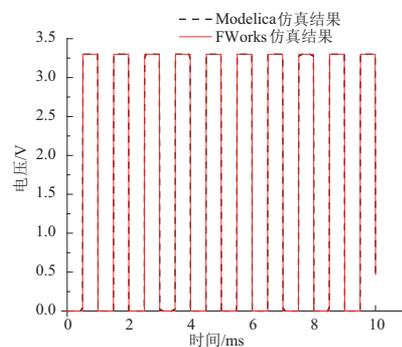


图 7 转速调理电路仿真结果对比

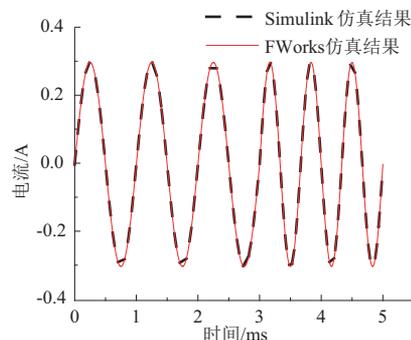


图 8 转速传感器仿真结果对比

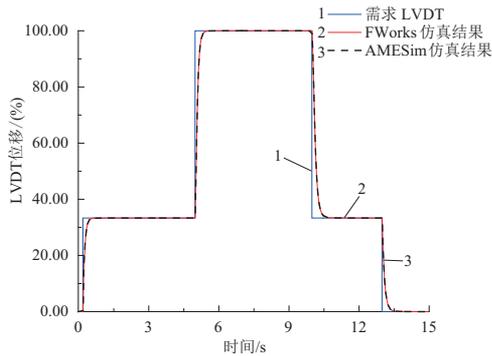


图9 燃油执行机构仿真结果对比

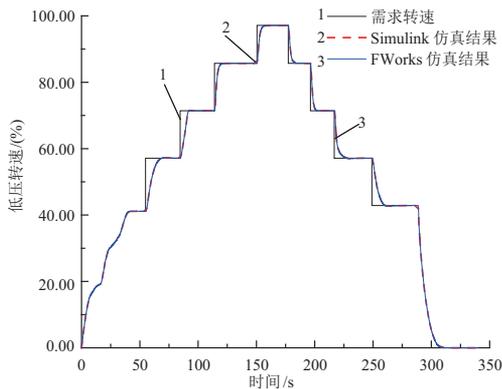


图10 控制系统闭环仿真结果对比图

4 结语

本文通过梳理文献,明确了多学科联合仿真的主要问题,提出了全权限数字仿真平台 FWorks 的改进方案,通过建立航空发动机控制系统多学科模型,并在 FWorks 平台基于 FMI 完成了多学科联合仿真,仿真结果表明:

- 1) FMU 的仿真结果与原仿真工具内的仿真结果一致,

二者相对误差 $<10^{-8}$,FMU 可以代表原仿真工具内的模型。

2) FWorks 成功集成 FMI 标准,并在 FWorks 平台上实现了控制系统多学科联合仿真。且 FWorks 仿真结果与 Simulink 仿真结果一致,二者相对误差 $<10^{-5}$ 。

参考文献:

[1] CLAUS R W, EVANS A L, LYLTE J K, et al. Numerical propulsion system simulation [J]. Computing Systems in Engineering, 1991, 2(4):357-364.

[2] CAO C, SHEN J, LUO M, et al. FWorks: An integrated digital simulation platform for FADEC systems [C]. Dalian: Chinese Control Conference, 2017.

[3] RAJIV Sampath, RONALD Plybon, CLAYTON Mevers, et al. High fidelity system simulation of aerospace vehicles using NPSS. [C]. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004.

[4] ARJUN Bala, VISHAL Sethi, ENRICO Lo Gatto, et al. PRO-OSIS—a collaborative venture for gas turbine performance simulation using an object oriented programming schema [C]. 18th ISABE Conference, ISABE-2007-1357, Beijing, China, 2007.

[5] BLOCHWITZ T, OTTER M, AKESSON J, et al. Functional mockup interface 2.0: The standard for tool independent exchange of simulation models [C]. Proceedings of the 9th International MODELICA Conference. Munich; Germany: Linköping University Electronic Press, 2012 (76):173-184.

[6] CHAPMAN J W, LAVELLE T M, MAY R, et al. Propulsion system simulation using the toolbox for the modeling and analysis of thermodynamic systems (T MATS) [C]. Cleveland, OH: 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2014.

[7] 顾宝龙,赵振平,何泳,等. 一种应用于航空发动机测试的小型磁电式转速传感器 [J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(4): 44-47.

[8] 王旭峰,郭迎清. 航空发动机转速传感器调理电路设计与仿真 [J]. 电子测量技术, 2007, 30(8): 150-152.

[9] 余玲,叶志锋. 航空发动机燃油计量装置的 AMESim 建模 [J]. 现代机械, 2014(5):26-29.

收稿日期:2019-03-01

(上接第 93 页)

可以发现,铝板/相变材料/液冷相结合的电池热管理系统对于电池的工作温度有着较好的控制。但是仿真和实验之间也会存在一定的偏差,在以后的学习中,可以增加实验部分的研究,以改善整个系统的整体效率。

参考文献:

[1] WALDMANN T, WILKA M, KASPER M, et al. Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries—A Post-Mortem study [J]. Journal of Power Sources, 2014, 262: 129-135.

[2] CHEN D, JIANG J, KIM G H, et al. Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 94:846-854.

[3] LIU R, CHEN J, XUN J, et al. Numerical investigation of thermal behaviors in lithium-ion battery stack discharge [J]. Applied Energy, 2014, 132:288-297.

[4] KARIMI G, LI X. Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles [J]. International Journal of Energy Research, 2013, 37(1):13-24.

[5] DUAN X, NATERER G F. Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(23):5176-5182.

[6] PAN, MINQIANG, YUJIAN Zhong. Experimental and numerical investigation of a thermal management system for a Li-ion battery pack using cutting copper fiber sintered skeleton/paraffin composite phase change materials [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126:531-543.

[7] YANG X H, TAN S C, LIU J. Thermal management of Li-ion battery with liquid metal [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 117:577-585.

收稿日期:2019-02-28