

1-4-2019

## Fault Co-simulation of Fuel Regulator in a Certain Type of Turbofan Engine

Wei Xiang

*1. Aircraft Engineering, Naval Aeronautics and Astronautics University, Yantai 264001, China; ;*

Benwei Li

*1. Aircraft Engineering, Naval Aeronautics and Astronautics University, Yantai 264001, China; ;*

Xinyi Yang

*1. Aircraft Engineering, Naval Aeronautics and Astronautics University, Yantai 264001, China; ;*

Xingbo Wang

*2. 96235th Unit of PLA, Qingdao 266000, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Fault Co-simulation of Fuel Regulator in a Certain Type of Turbofan Engine

### Abstract

**Abstract:** *A co-simulation method for fuel regulator fault diagnosis in a certain type of turbofan engine is performed, which consists of AMEsim Model of main fuel control system and Simulink Model of aero-engine. The AMEsim Model of main fuel system and Simulink Model of aero-engine are built and their accuracy is validated by experiments and the engine's operating data, respectively. The co-simulation model based on the main fuel control system and the aero-engine is proposed through the interface of AMEsim and Simulink software. The typical faults and obviation methods are simulated by the co-simulation model. The research shows that the problem of fuel regulator fault diagnosis can turn into pattern recognition of feature parameters in aero-engine field. The method provides not only troubleshooting solutions and fault diagnosis for fuel regulator system, but also supports theory and sample for establishing standards of engine's condition based maintenance.*

### Keywords

aero-engine, fuel regulator, fault diagnosis, co-simulation

### Recommended Citation

Wei Xiang, Li Benwei, Yang Xinyi, Wang Xingbo. Fault Co-simulation of Fuel Regulator in a Certain Type of Turbofan Engine[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(10): 3923-3932.

## 某型涡扇发动机燃调故障联合仿真

韦祥<sup>1</sup>, 李本威<sup>1</sup>, 杨欣毅<sup>1</sup>, 王星博<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院飞行器工程系, 山东 烟台 264001; 2. 96235 部队, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 针对某型航空发动机燃油调节器系统故障诊断的问题, 提出一种主燃油控制系统 AMESim 模型和发动机动态 Simulink 模型联合仿真的方法。建立了主燃油系统 AMESim 模型和发动机动态 Simulink 模型, 并通过试验和发动机实测参数验证了模型的有效性; 通过 AMESim 软件和 Simulink 平台的接口, 建立了联合仿真模型; 通过联合仿真模型对燃油调节器典型故障和排故措施进行了仿真。研究表明, 联合仿真的方法可以将燃油调节器故障诊断转化为发动机监控参数模式识别的问题, 该方法不仅为燃油调节器的故障诊断提供了途径, 为故障排除提供了定量的解决方案, 也为发动机视情维修提供依据。

**关键词:** 航空发动机; 燃油调节器; 故障诊断; 联合仿真

中图分类号: V235

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 10-3923-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201810039

## Fault Co-simulation of Fuel Regulator in a Certain Type of Turbofan Engine

Wei Xiang<sup>1</sup>, Li Benwei<sup>1</sup>, Yang Xinyi<sup>1</sup>, Wang Xingbo<sup>2</sup>

(1. Aircraft Engineering, Naval Aeronautics and Astronautics University, Yantai 264001, China;

2. 96235th Unit of PLA, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** A co-simulation method for fuel regulator fault diagnosis in a certain type of turbofan engine is performed, which consists of AMESim Model of main fuel control system and Simulink Model of aero-engine. The AMESim Model of main fuel system and Simulink Model of aero-engine are built and their accuracy is validated by experiments and the engine's operating data, respectively. The co-simulation model based on the main fuel control system and the aero-engine is proposed through the interface of AMESim and Simulink software. The typical faults and obviation methods are simulated by the co-simulation model. The research shows that the problem of fuel regulator fault diagnosis can turn into pattern recognition of feature parameters in aero-engine field. The method provides not only troubleshooting solutions and fault diagnosis for fuel regulator system, but also supports theory and sample for establishing standards of engine's condition based maintenance.

**Keywords:** aero-engine; fuel regulator; fault diagnosis; co-simulation

## 引言

作为飞机的“心脏”, 航空发动机的健康状况

对飞行安全具有重要影响, 目前众多研究者对其性能衰退评估和故障诊断进行了深入而广泛地研究。

然而, 由于航空发动机结构和工作原理的复杂性, 国内尚缺乏具有工程应用价值的航空发动机健康管理系统(PHM), 对发动机健康状态评估和故障诊断大多还依靠技术人员的主观经验, 降低了排故的效率和整机可靠性。其次, 针对 PHM 的研究主要集中于气路部件, 对附件的研究严重不足。作为



收稿日期: 2016-09-08 修回日期: 2016-12-19;  
作者简介: 韦祥(1990-), 男, 山西原平, 博士生, 研究方向为航空发动机状态监控与故障诊断; 李本威(1962-), 男, 山东威海, 博士, 教授, 研究方向为航空发动机状态监控与健康管; 杨欣毅(1978-), 男, 辽宁葫芦岛, 博士, 讲师, 研究方向为航空发动机状态监控。

<http://www.china-simulation.com>

• 3923 •

直接参与发动机常规控制和调节的燃油调节器(以下简称燃调),其性能衰退极大地影响着整机燃油供给的稳定性和精确性,导致发动机性能衰退及相关监测参数异常。某型发动机主燃油调节系统由于使用强度高,工作环境恶劣,其零部件难以避免地出现腐蚀、磨损、老化等导致的性能退化现象。通过故障统计汇总,该发动机由主燃油控制系统工作不稳定或故障导致发动机异常工作的比例高达30.27%。因此,有必要对主燃油调节系统和发动机进行联合仿真,对故障模式进行深入研究,并为维修提供决策。

目前对于燃调的研究主要包括两个方面,一方面是基于MATLAB和Simulink等平台的燃调控制模型建模<sup>[1-4]</sup>,另一方面是基于AMESim等建模软件对系统进行部件级建模<sup>[5-9]</sup>。文献[1]通过在Simulink平台上建立涡轴发动机燃调的简易数学模型,并结合该型涡轴发动机的数学模型进行了动态联合仿真,获得了影响该型调节器性能的关键结构参数。文献[2]主要分析了发动机燃油调节器的工作原理,建立系统稳态和加减速控制数学模型,并在此基础上对其高空适应性进行分析。文献[3]建立了某涡扇发动机气动热力学模型主燃油泵调节器的实验室工作环境。该半实物仿真试验系统能有效地对该型发动机燃油进行静态和动态控制。文献[4]给出某型涡轴发动机及直升机旋翼、燃油调节器的数学模型,对该型发动机燃油调节系统进行了全数字仿真研究,揭示了该型燃油调节器的基本控制规律。

Simulink等传统仿真软件,元件间进行的是单一数值或数组的单向传递,适用于控制系统。然而,燃调系统不但有数值传递,还有功率传递,则意味着需要在元件间进行双向传递信息<sup>[5]</sup>。AMESim作为一种面向对象的仿真软件允许在两个元件间的一条连接中双向传递信息,是基于物理意义下地建模<sup>[6]</sup>,使建模过程接近人的自然思维方式而得到广泛地应用。文献[7-8]建立了火箭冲压发动机、涡轴发动机燃调的AMESim仿真模型,研究其动态特性,为结构和控制参数的选取和优化提供参考。文

献[9]以AMESim为平台建立了完整的发动机及调节器系统综合仿真平台,分析各子系统之间的复杂集成和耦合关系,优化系统性能。

基于上述,目前对于燃调系统的研究主要是优化结构或控制参数,改进设计以提高系统性能,对燃调系统故障诊断的研究较为缺乏。其次,由于发动机PHM系统缺乏针对燃调系统的状态监控和故障诊断模块,而其故障或衰退会由发动机监测参数反映出来。因此,本文提出一种以燃调为核心的主燃油系统AMESim模型和发动机气路Simulink模型联合仿真的方法,集成AMESim直观的优点和Simulink对复杂控制的精确性与快速响应特性,联合仿真燃调系统不同故障对发动机性能参数的影响,解决实际故障难以复现、故障模式和样本不足的问题,为燃调与发动机的故障诊断和维修决策提供支持。

## 1 主燃油系统与发动机联合仿真模型

### 1.1 基于AMESim主燃油控制系统建模

某型涡扇发动机主燃油系统的功用是提供发动机起动、加速、减速以及所有状态下稳定工作所需的燃油。系统由低压燃油泵、燃油冷却的滑油散热器、燃油冷却的P3空气散热器、低压燃油滤、高压燃油泵、燃油流量调节器、低压轴转速控制器、高压燃油停车开关、燃油流量传感器和喷嘴等组成。

由飞机油箱来的燃油进入低压燃油泵,经油泵增压后进入燃油冷却的滑油散热器,在散热器中分为两路,一路经过速度清除油滤过滤后到加力燃油系统,另一路由速度清除油滤流到(不过滤)燃油冷却的P<sub>3</sub>空气散热器,再经低压燃油滤到高压燃油泵,增压后输送到燃油流量调节器,调节器调节发动机的燃油流量,并把燃油分别供给主油路和副油路。供往副油路的燃油直接通过高压燃油停车开关,到副油路总管,经副喷嘴喷入燃烧室。通向主油路的燃油经低压轴转速控制器,停车开关和流量计传感器进入主燃油总管,通过主喷嘴喷入燃烧

室。燃调和低压轴转速控制器感受发动机的油门杆角度(PLA)、高压压气机进出口压力  $P_2$ 、 $P_3$ 、压气机出口和燃气涡轮后温度  $T_3$ 、 $T_6$ ，进而对燃油量进行控制。其原理如图 1 所示。

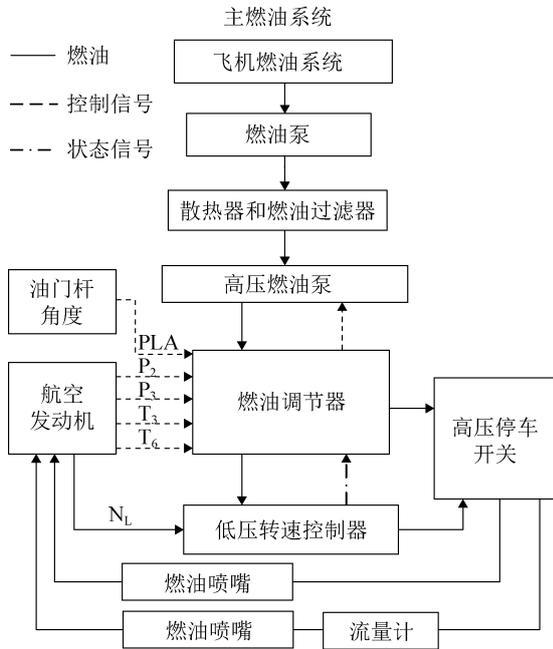


图 1 主燃油控制系统  
Fig. 1 Main fuel control system

从上述分析可知，发动机主燃油系统主要部件为高压燃油泵、燃油调节器和低压轴转速控制器。为与发动机进行一体化仿真，文中建立了上述三个主要部件的 AMESim 模型。其中，燃油流量调节器由高压转子转速控制器、膜盒组件、空气分压器、压差控制器、 $P_3$  限制器、附面层控制再调活门、温度控制器和齿轮传动系统等组成。限于篇幅，以燃油调节器的高压转子转速控制器建模过程为例进行说明。

转速控制器的作用是根据油门杆位置，确定燃油的有效流通面积，保证发动机所需的转速。其调节原理如下：

油门杆角度与需调节的稳定转速相对应。当发动机稳定工作时，高压燃油泵随动活塞处于保证该工作状态所需燃油流量的位置，油门杆通过转速凸轮、调节杠杆、温度补偿器及弹簧，以弹簧预紧力的形式作用在调节器套筒左端；同时在供油量  $Q_T$

下的高压转子转速( $n_H$ )通过离心飞重所产生的轴向力也作用于调节器套筒右端，二力平衡，变计量油孔开度一定，供油量不变，发动机维持在某一恒定转速。当外界条件变化导致发动机转速波动时，离心飞重产生的轴向力随之变化，破坏了两个力的平衡状态。调节器套筒逐渐移动，变计量油孔有效面积变化导致前后压差变化，影响高压泵随动活塞两端压差。当变计量油孔前后的压差使随动活塞受力平衡时，达到新平衡所需的燃油量，调节过程结束，发动机转速达到与油门杆位置相对应的转速。转速控制原理如图 2。

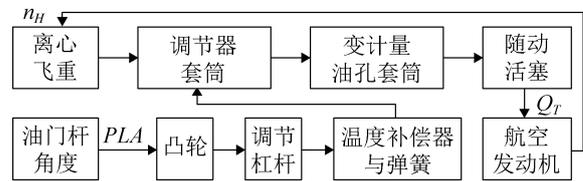


图 2 转速控制原理图  
Fig. 2 Speed control schematic

根据转速控制原理，建立转速控制器的数学模型。

调节器套筒结构如图 3 所示，对于调节器套筒，忽略离心块重力和摩擦力的影响，设离心力合力的作用点就是离心飞重的质心，离心块的力臂  $a$  和摆动臂  $b$  互相垂直，当离心飞重张角  $\gamma=0$  时，OA 处于水平位置，输出位移  $y=0$ ，离心飞重质心 A 到转轴的距离为  $R$ 。离心飞重旋转产生的离心力的轴向换算力为

$$F_{z,a} = n \frac{a}{b} F_z = n \frac{a}{b} m \left( R + \frac{a}{b} y \right) \left( \frac{\pi n_H}{30 k_{r1}} \right)^2 \quad (1)$$

式中： $n$  为离心飞重的个数； $k_{r1}$  为燃油流量调节器传动齿轮传动比。

作用在调节器套筒上的轴向力  $F_{u,a} = \frac{c}{d} F_u$ 。 $F_u$  为油门杆弹簧给定力。

当转速控制器处于平衡状态时，作用在调节器套筒上的飞重轴向换算力和油门杆弹簧产生的轴向力处于平衡，即  $F_{u,a} = F_{z,a}$ 。

当发动机转速发生变化时，变计量油孔套筒处于动态平衡，即  $F_{u,a} - F_{z,a} + F_h = F_{in}$ ， $F_h$  为油液阻

尼力,  $F_{in}$  为套筒运动惯性力。

其中, 惯性力的大小等于调节器套筒质量  $m_t$  和运动加速度之积, 方向和运动方向相反, 即:

$$F_{in} = m_t \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (2)$$

油液阻尼力的大小和运动速度成正比, 方向和运动方向相反, 即:

$$F_h = -B \frac{dy}{dt} \quad (3)$$

式中:  $B$  为粘性阻尼系数。

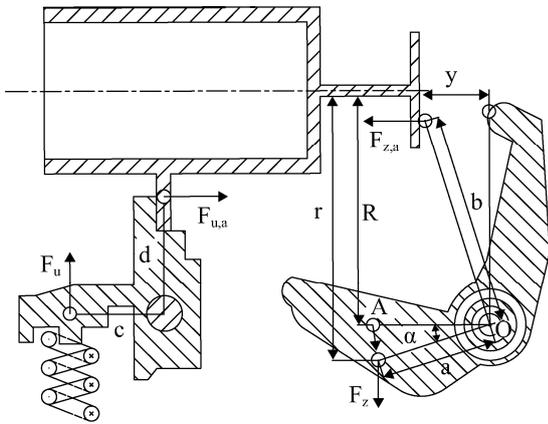


图3 转速控制调节套筒原理图

Fig. 3 Speed control adjustment sleeve schematic

得到调节器套筒的动态方程为:

$$-F_{z,a} + F_{u,a} - B \frac{dy}{dt} = m_t \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (4)$$

在理论分析的基础上, 利用 AMESim 仿真软件辅助建立了转速控制器的仿真模型如图4所示。

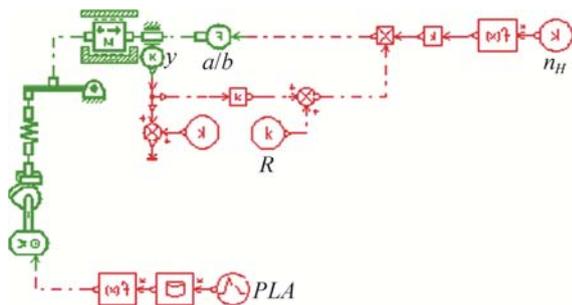


图4 转速控制器的 AMESim 模型

Fig. 4 AMESim model of the speed controller

## 1.2 发动机动态模型建模

本文按部件法, 在稳态气路部件建模的基础上

加入时间项, 采用变比热<sup>[10-11]</sup>计算建立了某涡扇发动机的数学动态模型。稳态模型假设发动机在工作过程中满足流量和功率平衡, 动态模型中, 由于转速和供油量是时间的函数, 因而稳态模型中的功率不再平衡, 导致模型中共同工作方程求解发生了改变。本文在建模过程中, 假设在动态过程中仍满足流量平衡的准平衡假设, 用稳态部件特性来代替动态过程的部件特性, 所用部件数学模型与稳态模型中相同<sup>[12]</sup>, 并忽略容积效应和热效应。

发动机在工作过程中, 部件都必须时刻满足动态共同工作方程。供油量  $W_f$  是已知控制量, 供油量的变化是动态过程的驱动力。取风扇工作点位置参数  $\beta_{cL}$ , 低压转速  $n_L$ , 压气机工作点位置参数  $\beta_{cH}$ , 高压转速  $n_H$ , 高压涡轮单位焓降  $dh_{TH}^*$ , 低压涡轮单位焓降  $dh_{TL}^*$  为独立变量。基于流量平衡假设的动态仿真方法与稳态求解方法类似, 共同工作方程由流量平衡、压力平衡和两个转子动力学方程组成<sup>[13]</sup>。其中, 替代稳态模型中功率平衡的 2 个动力学方程为:

(1) 低压轴功率平衡

$$\left( N_{TL} - \frac{N_{cL}}{\eta_{mL}} - \left( \frac{\pi}{30} \right)^2 J_L n_L \frac{dn_L}{dt} \right) / N_{TL} N_{TL} = 0 \quad (5)$$

式中,  $J_L$ ——低压转子的转动惯性矩。

(2) 高压轴功率平衡

$$\left( N_{TH} - \frac{N_{cH}}{\eta_{mH}} - \left( \frac{\pi}{30} \right)^2 J_H n_H \frac{dn_H}{dt} \right) / N_{TH} N_{TH} = 0 \quad (6)$$

式中:  $J_H$  为高压转子的转动惯性矩。其余高压涡轮进口流量平衡、低压涡轮进口流量平衡、混合室进口内/外涵道静压平衡、尾喷口面积平衡方程可参见文献[14]。6 个平衡方程构成了隐式非线性方程组, 本文选取 6 个独立变量, 给定初始值, 利用龙格-库塔方法对方程组进行迭代求解。本文利用 MATLAB 建立了 M 文件的发动机部件模型, 部件模型通过修改模板文件, 放入适合状态的子函数中构建 Simulink 模块。

### 1.3 发动机与主燃油系统一体化仿真模型

采用与转速控制器同样的建模方式, 并按照主燃油系统各部件连接关系, 建立了发动机主燃油系统 AMESim 模型。由于发动机和变计量油孔开度对实时控制的要求比较高, 故采用 Simulink 建模的方式建立其仿真模型。通过 AMESim 和 Simulink 接口建立主燃油系统和发动机联合仿真模型, 如图 5 所示。图中蓝色模块为高压燃油泵柱塞和随动活塞模型、低压转速控制器、作为燃油调节器组件的转速控制器、空气分压器和膜盒组件、压差控制器和传动机构的 AMESim 模型。黄色模块为变计量油孔开度和发动机动态模型的 Simulink 模型。变计量油孔开度模型输入为凸轮转角 CTA, 变计量

油孔的移动距离 PLUX 和高压转速  $n_H$ , 输出为流通面积。发动机模型输入为燃油量, 输出为  $n_H$ 、 $n_L$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 。

## 2 模型可靠性验证

### 2.1 主燃油系统模型试验验证

实验对于发动机燃油控制系统的性能和仿真研究具有重要作用, 利用实验结果可以验证仿真模型的精度, 检查并修正仿真特性和参数。针对本文建立的主燃油仿真模型, 通过试验对低压转速控制系统、高压燃油泵和燃油调节器进行验证。低压轴转速控制器实验台如图 6 所示, 主燃油流量调节器和高压燃油泵组成的主实验系统如图 7 所示。

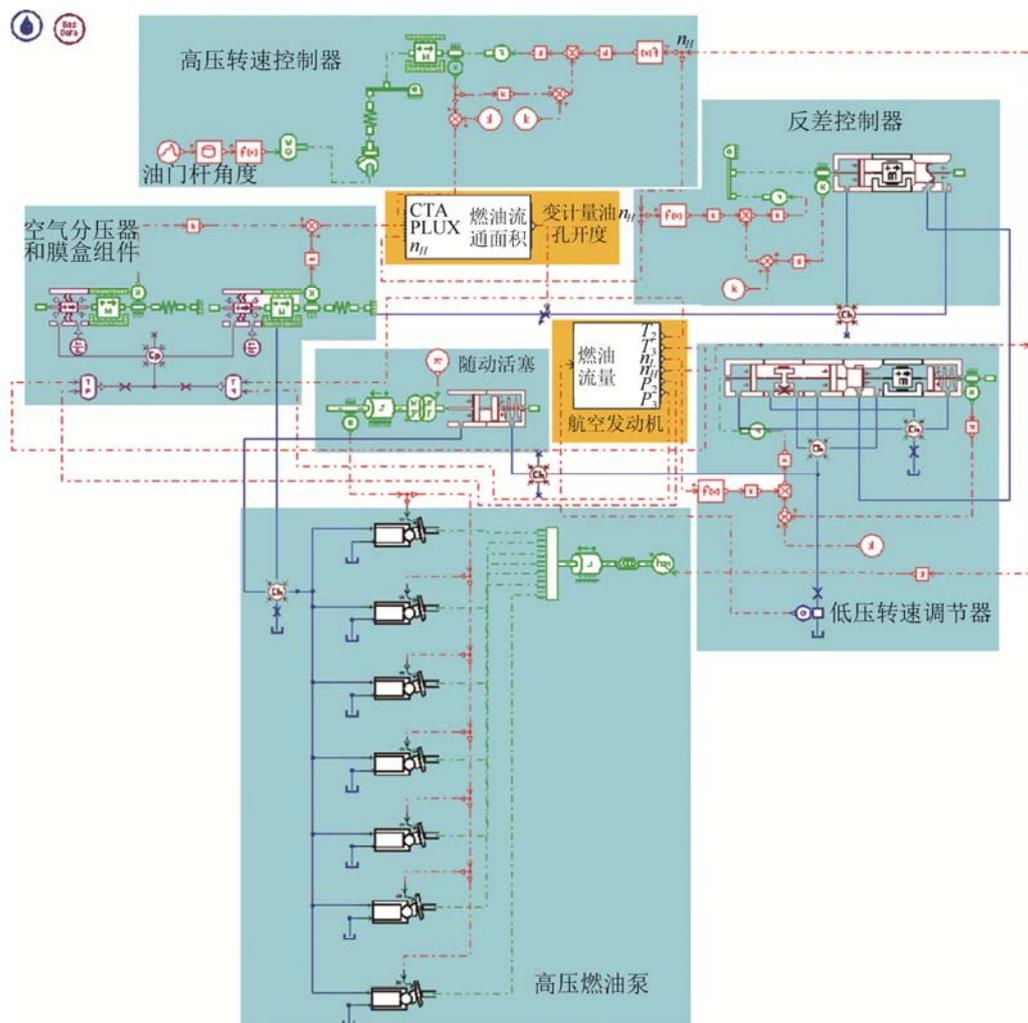


图 5 主燃油控制系统的 AMESim 模型

Fig. 5 AMESim model of the main fuel control system



图6 低压转速控制器实验系统

Fig. 6 Low-voltage speed controller experimental system

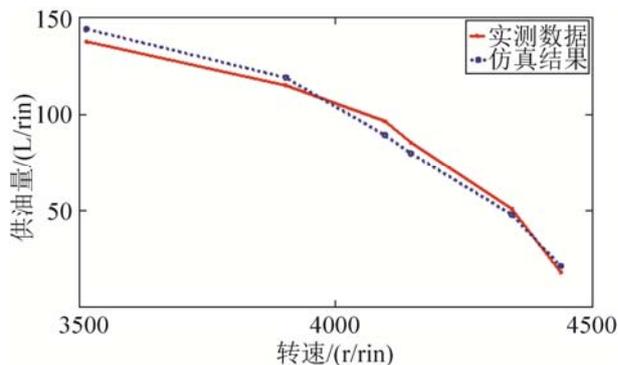


图7 主燃油控制实验系统

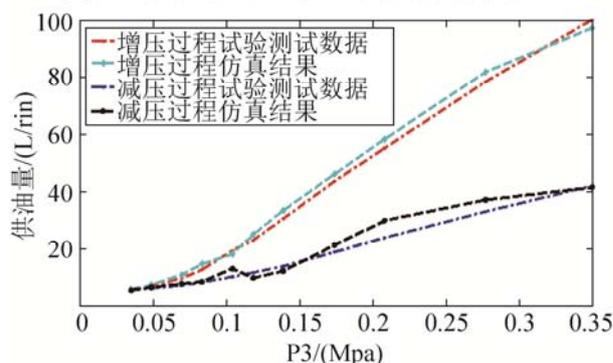
Fig. 7 Main fuel control experimental system

图6所示系统由燃油泵、低压轴转速控制器、电机和喷嘴等组成。试验过程中泵进口压力0.517-0.552MPa(表压);燃油采用RP-1(GB438-64)。保持控制器压降为0.303MPa,低压转速变化范围为3500r/min-4450r/min,记录控制器流量。反复进行实验5次,记录流量数据的平均值。图7所示实验台主要由主实验系统、供气系统、供油系统及信号采集和控制系统组成。主实验系统由主燃油流量调节器和高压燃油泵组成。实验过程中,首先对燃调同步角、高空慢车流量按照发动机对应状态进行校准,其次在未分压状态下进行调节器加减压实验:设置油门杆角度60°,燃油流量调节器转速3500r/min(当低压转速 $n_L$ 达到限制转速时,控制器转速为3500r/min),P2通大气。

实验结果和仿真结果对比如图8所示。从图8(a)中可以看出,当转速增大至限制值时,供油量随转速增加而降低,这是由于转速增加时,飞重轴向力使计量活门右移,关小进油孔,使燃油流过低压轴控制器的压差增大,高压泵随动活塞两端压差增大,使高压燃油泵供油量减少,从而控制低压轴转速,使其不超过限制值。



(a) 低压轴转速控制器实验数据与仿真数据对比



(b) 主试验系统试验数据与仿真数据对比

图8 未分压状态下实验与仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of experimental and simulation results under uncompressed state

从图8(b)中可以看出,供油量随P3增加而增大,这是由于在发动机工作时,如果P3增加,则P3/P2、P3/P3分压也增加,膜盒被压缩,杠杆顺时针转动,变计量油孔套筒左移,变计量油孔有效面积开大,在压差控制器控制的压差不变的情况下,使油泵的供油量增加。通过分析,仿真与试验均与燃油调节器的工作原理吻合。

对模拟值与实测值分析时,常用距离测度、相似测度、均值方差等参数作为模型精度的指标。本文利用均方根误差<sup>[15]</sup>(RMSE)、相关系数(Cor)和模型效率系数<sup>[16]</sup>(NSC)对燃油系统的AMESim模型进行评价,具体计算结果见表1。

表1 模型准确性评价  
Tab. 1 Model accuracy evaluation

	NSC	RMSE	Cor
低压转速控制器	0.994 4	0.022 4	0.998 1
主燃油系统减压过程	0.949 5	0.025 7	0.984 0
主燃油系统增压过程	0.982 7	0.038 6	0.992 3

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{sim,i})^2}{n}} \quad (7)$$

$$Cor = \frac{Cov(X_{obs}, X_{sim})}{\sqrt{D(X_{obs})}\sqrt{D(X_{sim})}} \quad (8)$$

NSC 是用来评价模型模拟的精度, 直观的体现实测值和模拟值拟合程度的好坏, 其表达式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (9)$$

$Q_{obs,i}$  测量值;  $Q_{sim,i}$  模拟值;  $\bar{Q}_{obs}$  测量值均值。

从表 1 可以看出, 转速控制器、主试验系统仿真结果与试验结果的 NSC 和 Cor 两项数据均接近于 1, RMSE 接近于 0, 说明仿真结果与试验吻合, 从而验证模型的有效性。

### 2.2 发动机动态模型验证

为验证发动机模型的准确性, 以某次地面试车的供油量曲线作为动态模型的输入。通过模型计算  $n_L$ 、 $n_H$ 、 $T_6$  的动态历程, 并与该次试车实测参数进行比较, 对比结果如图 9 所示, 对模型精度的定量分析结果见表 2。

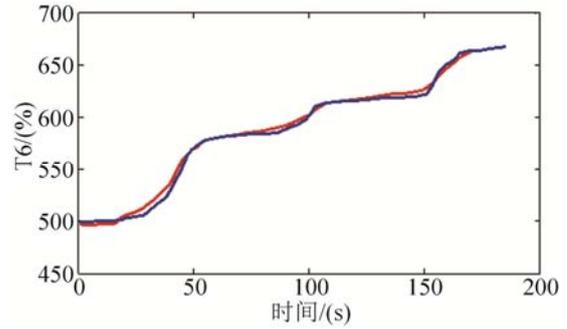
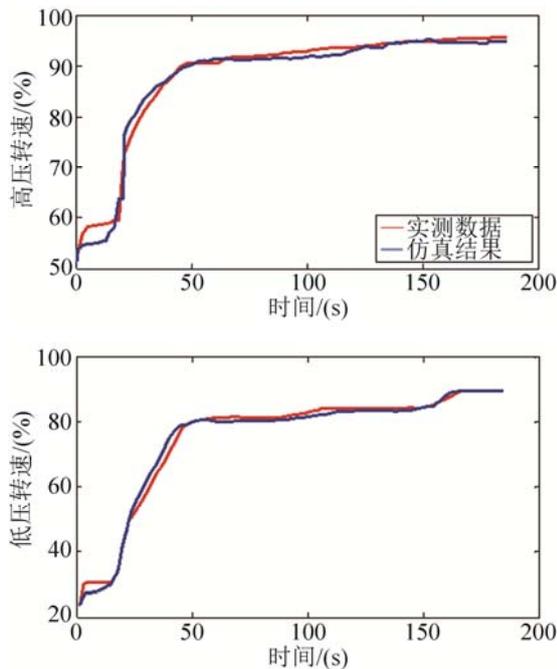


图 9 模型与实测参数对比曲线

Fig. 9 Comparison curve between model and measured parameters

表 2 动态仿真模型与实测参数对比结果

Tab. 2 Dynamic simulation model and measured parameters comparison results

	NSC	RMSE	Cor
$n_L$	0.994 8	0.016 6	0.991 8
$n_H$	0.981 6	0.016 9	0.982 3
$T_6$	0.994 4	0.005 6	0.988 8

从图 9 中可以看出, 模型计算结果与发动机台架试车数据极为接近。表 2 数据中可以看出, 仿真曲线的 NSC 和 Cor 值均接近于 1,  $n_L$  的 RMSE 为 1.66%,  $n_H$  的 RMSE 为 1.69%,  $T_6$  的 RMSE 为 0.56%, 满足工程应用的精度, 从而证明了模型能够有效地仿真航空发动机动态过程。

### 3 燃调典型故障仿真分析及排故

某型发动机主燃油控制系统的部件主要分为气动、液压和机械三大类, 是个精密而复杂的系统。经统计, 由燃调导致的发动机性能衰退或故障表现有最大转速低, 排气温度低、降转、转速摆动、超温或超转。造成上述现象的原因有燃调凸轮连杆长度偏短、燃调转速控制器性能衰减, 油门控制弹簧刚度下降、燃油流量调节器内转速控制器故障、燃调再调活塞有锈蚀, 使活门工作不灵活或者因作动电机故障、燃调内作动筒相关绕组异常或内部传动系统卡滞。限于篇幅, 本文以燃调凸轮连杆磨损故障为例对燃调的故障模式进行分析。

### 3.1 凸轮连杆磨损故障分析

飞行员在操作油门杆时, 凸轮转动, 通过传动杠杆对控制弹簧进行加载, 从而调节供油量。当凸轮箱到燃油流量调节器之间凸轮或与之接触的连杆由于磨损或冲击出现定位偏差时, 由凸轮外廓几何结构传递给控制弹簧型变量发生改变, 继而影响控制弹簧的载荷。当发动机处于最大状态时, 此时控制弹簧载荷不足导致供油量偏小, 发动机性能无法匹配当前需求。

由此, 本文利用主燃油系统的 AMESim 模型与发动机动态模型进行联合仿真, 对该故障影响发动机性能的情况进行研究。在进气道前进气温度  $T_1=17.92\text{ }^\circ\text{C}$ , 大气压力  $P_0=0.09657\text{ MPa}$ , 进气湿度  $Q=69.9\%$ , 当凸轮连杆磨损  $3.16\text{ mm}$  条件下按

照某次动态试车历程进行仿真, 仿真结果如图 10 所示。从图中可以看出, 该故障状态下, 动态过程中各项指标走势与正常状态相同, 但取值偏低。由图 10(a)可知, 凸轮角度为  $71.7^\circ$  时, 发动机达到最大状态。由此故障引发的主燃油实际供油量比额定供油量减少了  $229\text{ kg/h}$ 。从图 10(b)~图 10(e)可得,  $n_L$  降低  $3.2\%$ 、 $n_H$  降低  $2.5\%$ 、 $T_6$  降低  $26.4^\circ\text{C}$ , 净推力  $FN$  下降  $4.6\%$ 。该数据说明凸轮箱处在最大状态时, 燃油流量调节器实际没有到达最大状态, 燃油流量偏小, 最终导致发动机推力不足, 与理论分析一致。从推力衰退曲线来看, 其趋势与燃油供油量基本一致, 从而可以得出燃调衰退对发动机性能会产生直接影响, 应重点监控。

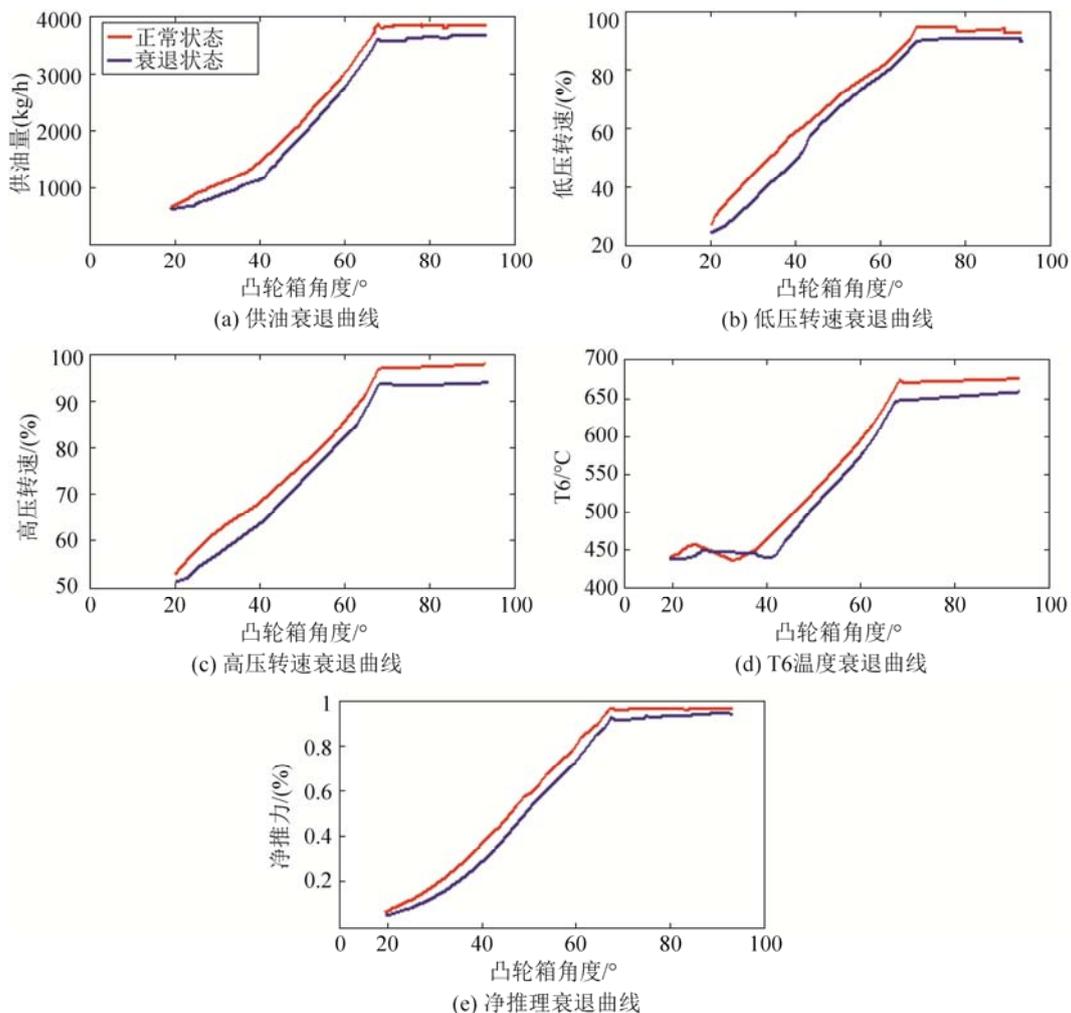


图 10 发动机性能衰退曲线  
Fig. 10 Engine performance decline

<http://www.china-simulation.com>

当磨损量为 1.05 mm、3.16 mm、5.26 mm 时, 凸轮箱的特性曲线、供油量、高低压转速、 $T_6$  的定量衰退结果见表 3。在发动机监控参数中, ( $-2\% n_L$ ,  $-1\% n_H$ ,  $-17\text{ }^\circ\text{C}$ )可作为连杆磨损 1.05 mm 的特征向量。同理, 通过仿真获得了不同磨损状态的特征向量, 为发动机故障诊断的样本空间提供了样本。

表 3 凸轮连杆磨损故障定量分析

Tab. 3 Quantitative analysis of cam link wear failure

凸轮连杆 磨损	燃油流量	$n_L$	$n_H$	$T_6$	FN
-1.05 mm	-156 kg/h	$-2\% n_L$	$-1\% n_H$	$-17\text{ }^\circ\text{C}$	-2.1%
-3.16 mm	-229 kg/h	$-3.2\% n_L$	$-2.5\% n_H$	$-27\text{ }^\circ\text{C}$	-4.6%
-5.26 mm	-387 kg/h	$-4.7\% n_L$	$-2.5\% n_H$	$-40\text{ }^\circ\text{C}$	-5.3%

通过建模, 还可以计算出发动机净推力变化, 磨损量为 1.05 mm 时导致供油量下降 156 kg/h, 净推力下降 2.1%; 磨损量为 5.26 mm 时导致供油量下降 233 kg/h, 净推力下降 5.3%。对比可知, 凸轮连杆磨损量越大, 供油量不足导致的发动机性能衰退越严重。磨损量为 5.26 mm 时, 发动机已经可以判定进入故障状态。该模型可以为发动机性能衰退进行定量评估。

### 3.2 凸轮连杆磨损故障排除仿真

对于该故障的排除, 通过调节最大转速止动钉, 增大燃调凸轮在最大状态时的角度, 从而改变该状态下的燃油流量。经仿真, 最大转速止动钉的调整对最大军用状态时的燃油流量及发动机性能的影响如表 4 所示, 止动钉拧  $90^\circ$  ( $1/4$  圈)时, 供油量增加 90 kg/h, 高低压转速和  $T_6$  有不同程度的回升, 净推力增加 1.3%; 止动钉拧  $360^\circ$  (1 圈)时, 供油量增加 370 kg/h,  $n_L$  恢复 4.6%  $n_L$ ,  $n_H$  恢复 2.4%,  $T_6$  增加  $-38\text{ }^\circ\text{C}$ , 净推力恢复 5.1%, 解决了凸轮连杆磨损 5.26 mm 的故障状态。

表 4 最大转速止动钉调节定量分析

Tab. 4 Quantitative analysis of maximum speed stop nail adjustment

最大转速 止动钉 调整角度	燃油流量	$n_L$	$n_H$	$T_6$	FN
$90^\circ$	+90 kg/h	+1.2% $n_L$	+0.6% $n_H$	+10 $^\circ\text{C}$	+1.3%
$180^\circ$	+200 kg/h	+2.6% $n_L$	+1.3% $n_H$	+22 $^\circ\text{C}$	+3.9%
$360^\circ$	+370 kg/h	+4.6% $n_L$	+2.4% $n_H$	+38 $^\circ\text{C}$	+5.1%

## 4 结论

本文通过 AMEsim 和 Simulink 软件对某型航空发动机主燃油和发动机进行了联合仿真, 以凸轮连杆磨损为例, 对燃调的典型故障进行了仿真, 并提出排故方案, 研究结论如下:

(1) 通过主燃油系统和发动机气路模型的联合仿真, 将燃调故障诊断转化为发动机参数特征向量的辨识问题, 为燃调的故障诊断提供途径;

(2) 通过仿真, 为故障排除提供了定量的解决方案, 对推力衰退程度的评估也可作为发动机视情维修的判据。

由于燃调是个复杂的系统, 其故障模式有多种, 文中只对某一常见磨损衰退现象进行了定量分析, 建立完备的故障知识库是后续应研究的方向。

### 参考文献:

- [1] 冯海峰, 樊丁. 某型航空涡轴发动机燃油调节器建模与仿真 [J]. 计算机仿真, 2014, 12(24): 45-48.  
Feng Haifeng, Fan Ding. Modeling and simulation of x turboshaft aeroengine controller [J]. Computer Simulation, 2014, 12(24): 45-48
- [2] 苏三买. 某型涡扇发动机燃油调节器改进及高空适应性分析 [J]. 航空动力学报, 2007, 10(22): 1760-1764.  
SU San-mai. Analysis of modification and high-altitude adaptability for fuel flow regulator of a turbofan engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 10(22): 1760-1764.
- [3] 蔡开龙, 谢寿生, 胡金海, 等. 涡扇发动机燃油综合控制半实物仿真试验系统 [J]. 推进技术, 2007, 4(28): 422-427.  
Cai Kailong, Xie Shousheng, Hu Jinhai, et al. Semi-physical simulation experiment system of fuel

- integration control system for turbofan engine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 4(28): 422-427.
- [4] 丁琳, 王道波, 李猛, 等. 直升机涡轴发动机燃油调节系统建模与仿真 [J]. 航空兵器, 2011, 8(4): 30-34.  
Ding Lin, Wang Dao bo, Li Meng, et al. Modeling and simulation of fuel conditioning system for turbo-shaft engine of helicopter [J]. Aero Weaponry, 2011, 8(4): 30-34.
- [5] 李吉. X6发动机燃油调节器建模与仿真研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.  
Li ji. Modeling and simulation of x6 engine fuel regulator [D]. Xi'an, China: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [6] 任新宇, 郭迎清, 姚华廷. 基于AMESim的航空发动机防喘调节器性能仿真研究 [J]. 航空动力学报, 2004, 4(19): 572-576.  
Ren Xinyu, Guo Yingqing, Yao Huating. Simulation of aeroengine anti-surge regulator performance based on AMESim [J]. Journal of Aeronautical Power, 2004, 4(19): 572-576.
- [7] 尤裕荣, 赵双龙, 吴宝元. 基于AMESIM的冲压发动机燃油调节器动态特性仿真 [J]. 火箭推进, 2010, 4(36): 12-15.  
You Yurong, Zhao Shuanglong, Wu baoyuan. A simulation on dynamic characteristics of ramjet fuel regulator based on AMESIM [J]. Journal of rocket propulsion, 2010, 4(36): 12-15
- [8] 傅强. 基于 AMESim 的某型涡轴发动机燃油调节器建模仿真 [J]. 机械设计与制造, 2013, 4(4): 252-255.  
Fu qiang. A turboshaft engine adjuster modeling simulation based on the AMESim [J]. Machinery design and manufacture, 2013, 4(4): 252-255.
- [9] 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, 12(25): 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, 12(25): 2816-2820.
- [10] 刘占生, 曹智选, 沈勇, 等. 某型涡轴发动机气路故障数值仿真 [J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(5): 844-850.  
Liu Zhansheng, Cao Zhixuan, Shen yong, et al. Numeric simulation of gas-path fault for a turboshaft [J]. Journal of vibration, measurement and diagnosis, 2014, 34(5): 844-850.
- [11] 朱行健, 王雪瑜. 燃气轮机工作原理及性能 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.  
Zhu Xingjian, Wang Xueyu. Gas turbine working principle and performance [M]. Beijing, China: Science Press, 1992.
- [12] 童万军, 唐世建. 基于流量法的齿轮传动涡扇发动机动态建模 [J]. 航空动力学报, 2011, 26(2): 1377-1383.  
Tong Wanjun, Tang Shijian. Geared turbofan engine transient modeling research based on CMF method [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(2): 1377-1383.
- [13] 田超. 航空涡桨发动机建模与控制的仿真研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.  
Tian Chao. Simulation study on modeling and control of aviation turbopropellers [D]. Nanjing, China: Nanjing university of aeronautics and astronautics.
- [14] 杨欣毅, 沈伟, 王永华, 等. 涡扇发动机气路部件衰退对转速差影响研究 [J]. 推进技术, 2014, 5(35): 610-617.  
Yang Xinyi, Shen Wei, Wang Yonghua, et al. Study on negative effects on rotational speeds difference caused by turbine fan engine gas path components performance deteriorations [J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 5(35): 610-617.
- [15] Guang Binhuang, Qin Yuzhu, Chee-Kheong Siew. Extreme learning machine: Theory and applications [J]. Science Direct, Neurocomputing, 2006, 70(1): 489-501.
- [16] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual model [J]. J. Hydrol, 1970, 10(3): 282-290.