

涡喷发动机供油调节系统的故障仿真及分析^{*}

牛 军¹, 于达仁¹, 冯国泰¹, 何保成², 史新兴²

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 航天科工集团公司 31 所, 北京 100074)

摘 要: 供油调节系统的性能是影响发动机可靠性的重要因素。针对某弹用涡喷发动机, 在综合已经发生的各种故障基础上, 提出了发动机供油调节系统的故障模式集, 并通过发动机及其供油调节系统的联合仿真平台, 采用改变模型参数和结构的方法对三种典型故障进行了仿真分析和评估。结果表明: 供油调节系统故障对发动机正常工作有很大影响。所采用的仿真方法具有实际的工程运用价值。

关键词: 涡轮喷气发动机; 控制系统; 模式; 故障仿真; 故障分析

中图分类号: V223 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2003) 04-0361-03

Fault simulation and analysis of turbojet oil-supplied regulating system

NIU Jun¹, YU Da-ren¹, FENG Guo-tai¹, HE Bao-cheng², SHI Xin-xing²

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China;

2. The 31st Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract: The performance of oil-supplied regulation system greatly affects engine reliability. On the basis of analyzing various faults appeared for some missile turbojet, a fault mode set of engine oil-supplied regulation system was proposed. With a joint simulation flat of turbojet and its oil-supplied regulation system, three typical faults were simulated and evaluated with different model parameters and structure. The results indicate that oil-supplied regulation system faults have strong effect on turbojet's operation. The adopted method is practical in the actual engineering.

Key words: Turbojet engine; Regulating system; Mode; Fault simulation; Fault analysis

1 引 言

弹用涡喷发动机供油调节系统的故障对弹用涡喷发动机的性能和可靠性有很大的影响。供油调节系统的故障有: 运动部件的卡涩、部件之间的摩擦、部件特性的畸变、小孔部件的堵塞以及其它未建模动态等。这些故障有很大的突发性和随机性。对此, 传统反复试验定位和排除故障的方法不仅耗费大量的人力、物力, 而且成功率低。近年来, 仿真技术为发动机仿真提供了一种经济有效的手段^[1,2]。目前国内外对于火箭发动机的故障仿真和诊断已经取得了大量成果^[3,4]。在我国, 对于弹用涡喷发动机故障仿真和诊断方面的工作开展还远远不足。本文针对某型弹用涡喷发动机, 以大量试车数据为依据, 利用发动机及其供油调节系统的全工况联合仿真平台, 综合已经发

生的各种故障, 建立了供油调节系统的故障模式集, 并通过改变模型参数以及针对具体故障相应改变模型结构的方法, 对故障模式集中提出的典型故障进行了仿真分析。

2 发动机及其供油调节系统的联合模型

2.1 涡喷发动机全工况模型

发动机为单轴涡喷发动机, 原有的热力计算模型是一个零维稳态工况的 FORTRAN 计算程序。启动加速过程是发动机设计中很重要的问题。根据试车数据, 本文对这部分计算进行了编制。在启动加速过程中, 在准定常假设条件下, 流量守恒和各部件稳态特性仍然适用, 但需要考虑转子动量平衡方程:

$$M_T - M_k - M_f = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2002-07-25; 修订日期: 2002-11-04。

作者简介: 牛 军 (1975—), 男, 博士生, 研究领域为发动机仿真与故障诊断。

式中 M_T 为涡轮功, M_k 为压气机功, M_f 为摩擦功, J 为转子惯量, w 为发动机转子角速度。积分时采用 4 阶 Runge-Kutta 法。求解过程中, 稳态工况和启动加速过程均采用迭代方法, 各部件的特性均用部件的稳定特性。修改后的发动机计算程序由于缺乏低转速下 (15000r/min 以下) 部件特性试验数据, 因此不能保证其计算精度。为此, 本文采用神经网络方法对低转速 (0~15000r/min) 范围的发动机工作过程进行建模, 这项工作在文献[5]中有介绍。

2.2 供油调节系统数学模型

供油调节系统为气动液压式 (原理图见文献[6]图 2)。发动机启动加速段的工作过程亦见文献[6]。文献[7]利用机理分析与参数识别相结合的方法, 建立供油调节系统的数学模型。本文利用 MATLAB 提供的 SIMULINK 工具箱, 形成了该数学模型的仿真模块。根据 MATLAB 与 FORTRAN 程序的接口规则, 将发动机 FORTRAN 语言编写的发动机性能计算程序与供油调节系统的 MATLAB 仿真模块相结合形成一套联合数值仿真平台。该平台外部输入条件包括飞行马赫数、飞行高度、发动机进口滞止气压、进气道总压恢复系数、环境与标准状态温差和油泵进口压力。平台具有的功能包括: 发动机及其供油调节系统开环、闭环仿真, 发动机加速特性仿真、高度特性、速度特性与节流特性仿真等。

3 供油调节系统模式集

掌握故障模式是研究和实施故障检测、诊断的基础。本文在利用联合仿真平台对发动机进行了正常启动加速仿真的基础上, 参考已经在试车和飞行试验中出现过的故障, 提出弹用涡喷发动机供油调节系统的故障模式集。

(1) 阀门卡死故障

作为供油调节系统中的运动部件, 稳压阀和燃油调节阀都有可能发生卡死故障, 卡死故障一旦出现, 供油调节系统就无法正常工作。在以前试车试验中曾经出现过燃油调节阀脱出导向孔, 并卡死在导向孔外的故障, 因此, 这类故障是仿真的重点之一。

(2) 系统阻尼过小造成高频震荡

在历次试车的高速采样数据中, 发现油泵出口压力 p_{op} 和喷油嘴前的燃油压力 p_{ii} 存在高频脉动, 而且在燃油调节阀处于小开度时, 油压脉动呈发散趋势。推测这是由于系统中阻尼太小, 增益过高造成的。从系统的结构上分析, 为系统提供运动阻尼的部件有稳

压阀阻尼孔 G_2 , 燃油调节阀的膜片组合体, 通过仿真可得到部件参数和系统高频振动之间的关系。

(3) 小孔故障

在供油调节系统中存在 G_1 , G_2 和 G_3 3 个小孔, 在系统中有很重要的作用: G_1 孔提供系统阻尼, 增加油压的平稳性; G_2 孔是与蓄气器配合, 减少气路的压力脉动, 控制进入供油调节系统的气体压力和时间; G_3 孔负责向发动机提供初始燃油。从历次试车看, 小孔是故障的多发位置, 有必要在仿真中得到当小孔发生故障时对发动机和供油调节系统的影响。

4 故障仿真结果及分析

在提出供油调节系统的故障模式集的基础上, 利用联合仿真平台, 通过改变模型参数以及针对具体故障相应改变模型结构的方法, 对供油调节系统的几个典型故障进行仿真分析。

4.1 联合仿真平台的验证

为了验证联合仿真平台的可信度, 图 1 和图 2 给出了平台仿真结果与实测数据的全工况比较。图 1 中发动机转速 n 的最大相对误差 5.3%, 这个精度基本满足工程要求。图 2 中压气机出口总压 p_2 最大相对误差 9.3%。导致这个误差原因除与模型本身精度有关之外, 主要是由于发动机模型没有考虑试验中 p_2 传感器安放的位置, 而仿真输出的 p_2 为压气机出口截面的参数。如在实际应用中考考虑 p_2 传感器安放的位置, 发动机模型的仿真精度便可进一步提高。

4.2 膜片组合体芯杆卡死

燃油调节阀膜片组合体的作用是感受压力信号的变化, 膜片上方是 p_2' , 下方是压气机的入口压力 p_1 。在风车起动阶段, 由于 $p_2' < p_1$, 膜片将带动膜片芯杆向右方移动, 如果移动的距离比较大, 膜片芯杆就有可能脱出导向孔, 并卡死在导向孔外。在仿真时, 取燃油调节阀开度 $h_j = 0$, 便可表征这一故障。从图 3 上可以看到, 由于燃油调节阀卡死, 在全过程中仅仅依靠 G_3 孔向发动机提供燃油, 即 $Q_f = Q_{G_3}$ 。另外, 燃油流量 Q_f 曲线出现平台, 是由于 G_3 孔在处于大压差时存在气穴现象^[8]。出现气穴现象时, G_3 孔流量随孔前后的压差继续增大而基本保持恒定。从图 4 可看到由于燃油流量不足, 发动机转速也无法达到额定转速, 同时还可能导致燃烧室的燃烧状态向贫油边界靠近, 并最终导致发动机贫油熄火。

4.3 膜片组合体刚度过小

燃油调节阀膜片组合体刚度直接影响到供油调节系统的稳定性。当膜片组合体刚度过小时,在燃油调节阀初开时系统是不稳定的。正常膜片组合体刚度系数 $k_m = 1.0$ 。图5,6中显示了 $k_m = 0.7$ 时燃油调节阀开度 h_j 和油气比 f 的变化。从曲线中可看出, h_j 和 f 在燃油调节阀初开时都发生高频振荡。同时从仿真结果中还知道稳压阀开度 h_c , 油泵出口压力 p_{cp} , 喷油嘴前压力 p_{pi} 在燃油调节阀初开时也发生了高频振荡, 其中油压及流量振荡的幅值比较大, 这将造成在加速段初期燃烧室燃烧状况的不稳定。

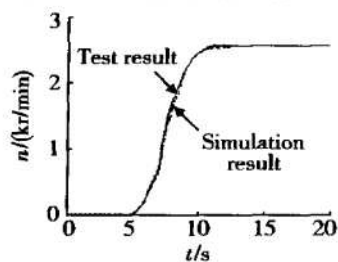


Fig. 1 Engine speed

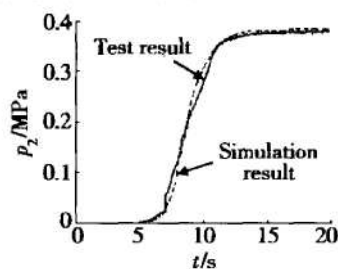
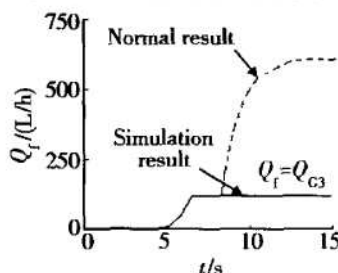
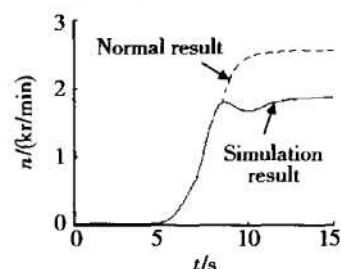
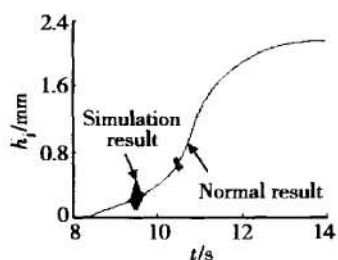
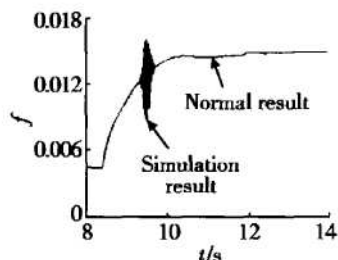
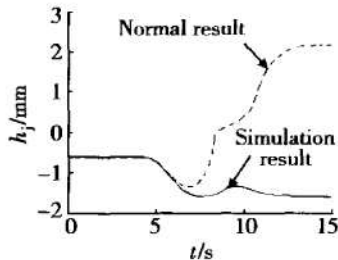
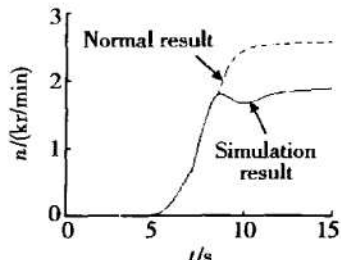


Fig. 2 Compressor outlet pressure

Fig. 3 Oil-supplied flux at $h_j = 0$ Fig. 4 Engine speed at $h_j = 0$ Fig. 5 Oil-regulating valve distance at $k_m = 0.7$ Fig. 6 Air-fuel ratio at $k_m = 0.7$ Fig. 7 Oil regulating valve distance at $R_{G2} = 0$ Fig. 8 Engine speed at $R_{G2} = 0$

5 结 论

为了更加真实地反映供油调节系统性能对发动机可靠性的影响, 本文利用弹用涡喷发动机及其供油调节系统的联合仿真平台。针对所提出的故障模式集, 利用该平台模拟了供油调节系统的故障工况, 并对三类典型故障进行了详细分析和评估。这对该型号导弹的研制具有指导意义。但由于低转速下发动机性能模拟得还不够充分, 要获得全面的涡喷发动机及其供油调节系统之间的相互影响, 尤其在启动加速工况, 还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] Fishbach L H. Computer simulation of engine systems[J]. AIAA-80-0051, 1980.

4.4 G₂ 孔堵塞

G_2 孔与蓄气器配合, 可以控制进入供油调节系统的气体压力和时间, 从而控制燃油调节阀打开的时间, 并由此控制进入发动机的燃油流量和油气比。 G_2 孔半径正常尺寸 $R_{G2} = 0.4\text{mm}$, 发生堵塞时取 $R_{G2} = 0$, 此时燃油调节阀膜片组合体将无法感受到来自于压气机出口的压力, 因此燃油调节阀将无法打开。从图7,8 可以看到, 燃油调节阀开度 h_j 始终小于零。此外供油调节系统油压、流量以及发动机转速等特性与膜片组合体卡死故障现象是基本一致的。

- [2] Lytle J, Follen G, Naiman C. 2001 numerical propulsion system simulation review[R]. NASA/TM-2002-211197.
- [3] 吴建军, 张育林, 陈启智. 液体火箭发动机实时故障仿真系统实现[J]. 推进技术, 1997, 18(1).
- [4] 王建波, 于达仁, 王广雄. 液体火箭发动机泄漏故障实时仿真[J]. 推进技术, 1999, 20(5).
- [5] 于达仁, 牛 军, 鲍 文, 等. 基于神经网络的弹用涡喷发动机全工况建模[A]. 北京: 21 世纪航空动力发展研讨会论文集[C]. 2000: 69~ 73.
- [6] 黄家骅, 冯国泰, 牛 军, 等. 涡轮效率改变对发动机加速特性的影响[J]. 推进技术, 2003, 24(4).
- [7] 阎志刚. 弹用涡喷发动机故障仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.
- [8] 于达仁, 阎志刚, 金朝铭, 等. 某涡喷发动机供油调节系统中的气穴现象[J]. 推进技术, 2000, 21(1).

(编辑: 梅 瑛)