

## 航空发动机整机试验性能故障诊断系统设计研究

党伟 韩冰 申宇宸 张书扬 王伟平

中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110043

[摘要] 航空发动机具有鲜明的精密性、复杂性特征, 起初以活塞式发动机最为常见, 现经长时间的发展、进步, 生产制造体系进一步完善, 涡扇、涡轮螺旋桨式发动机等逐渐登上历史舞台, 在军事、民用等领域发挥着重要作用。文章聚焦航空发动机整机试验中存在的难点问题, 并以其试验特征为基础分析了故障诊断系统设计思路, 以模块为单位展开详细论述。

[关键词] 航空发动机; 整机试验; 故障诊断系统

DOI: 10.33142/ec.v4i12.4827

中图分类号: V23

文献标识码: A

### Design of Fault Diagnosis System for Aeroengine Test Performance

DANG Wei, HAN Bing, SHEN Yuchen, ZHANG Shuyang, WANG Weiping

AECC Shenyang Liming Aero Engine Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110043, China

**Abstract:** Aeroengines have distinct characteristics of precision and complexity. At first, piston engines were the most common. Now, after a long time of development and progress, the production and manufacturing system has been further improved. Turbofan and turboprop engines have gradually stepped on the historical stage and played an important role in military, civil and other fields. This paper focuses on the difficult problems existing in the whole aeroengine test, analyzes the design idea of fault diagnosis system based on its test characteristics, and discusses it in details in the unit of module.

**Keywords:** aeroengine; complete machine test; fault diagnosis system

#### 引言

当前伴随科技手段的完善, 航空发动机生产、制造系统已经日趋成熟, 各种新兴产品更是崭露头角, 不断开拓着新的发展方向。但由于航空发动机工作条件较为苛刻, 工作环境具有高转速、高温高压等特征, 因此无论何种发动机类型, 交付前必须通过整机试车, 并借助科学的故障诊断系统进行数据处理、分析, 如何设计、打造相关平台, 就成为了众多相关主体关注的焦点问题。

#### 1 航空发动机整机试验性能故障诊断系统设计的必要性

航空发动机精密性、科技性特征显著, 从研制、设计到出厂, 中间会经历较长的过程周期, 初期进行整机试验性能故障诊断, 可以较为完整地反映发动机运行状态, 使研制主体更加全面地把握各部件配合、协调情况, 为设计调整提供依据, 从而压缩试验时间, 加快科研成果的市场化进度。在常规试车阶段, 通过数据的记录、分析, 也能使生产方更加便捷地了解相关信息, 明确机械出厂气路性能, 以此为基础搭建数据库, 推动生产工艺的改进。在投产应用阶段, 借助该系统, 还可以进行模拟试验操作, 为使用者清晰呈现机械性能, 方便其科学决策运行、维护方案。尽管以往也有针对航空发动机的试验平台, 但无法兼顾各阶段需求特征, 以研制阶段为例, 为保证试验普适性, 航空发动机可能面临较为频繁的部件更换, 部件属性变更的同时, 匹配点也会发生变化, 这种情况下得到的参数总量尽管仍旧充足, 但缺乏时间轴向序列的概念。同时, 研制阶段面向的是新航空发动机产品, 数据、案例方面累积相对较少, 由于技术尚未成熟, 又容易出现并发故障, 无法借鉴性能衰退、执行失灵等传统故障经验, 因此必须进行全新的试验性能故障诊断系统设计, 综合考虑地面、高空模拟、空中试验等多种场景, 提升系统适用性。

#### 2 航空发动机整机试验性能故障诊断系统设计思路阐述

在航空发动机整机试验性能故障诊断系统的设计中, 首先应当考虑系统功能问题, 思路阐述时可从3个层面划分, 一是核心功能, 比如面向测量参数进行预处理的功能、故障点定位与类型判断功能, 故障隔离功能等; 二是基本功能, 比如数据库存储、可视化功能、输入输出功能等; 三是辅助功能, 主要采用回归分析、方差计算等方式, 对试验有效性、敏感性进行分析, 起到评估判断, 提供改进依据的效果。其次还要考虑核心部分的算法流程问题, 设计或试验数据输入后, 由系统自动对基线模型进行修整, 完成自适应操作; 接着对测量数据进行预处理, 保留有效数据, 该步骤支持处理报告输出; 判断传感器是否存在故障, 如果判断结果为“是”, 则对故障进行隔离, 同时重构上述数据, 完成后才能展开后续操作, 该步骤同样支持报告输出。如果判断结果为“否”, 则直接进入后续环节, 对发动机气路故

障进行诊断,在报告中对故障进行排序,并对性能发展趋势进行预测;在前述操作的基础上,最终得出性能优化方案,直接显示的同时,将整个记录过程纳入故障库以及发动机履历库中,方便后期调用查看。最后还应考虑兼容性问题,子系统尽管相互独立,但可以借助标准化接口建立连接,配合度要优良,以满足不同参数组织、不同规格产品的诊断需求。从外部因素来看,系统还要适应各种应用场景,串装、调试过程中,支持修整系数计算;研制、应用过程中,支持涡轮、涡喷等多元化发动机种类分析,以提升系统可用性,最大限度扩展系统覆盖范围。

### 3 航空发动机整机试验性能故障诊断系统设计模块分析

#### 3.1 发动机性能仿真模块

仿真模块能够完整描述航空发动机运行过程,是整个故障诊断系统的基础,描述的准确性直接关系到诊断系统是否有效。仿真模型可以满足非线性数据的分析,针对某个部件展开诊断的同时,还能够兼顾整体配合、协调程度,支持参数灵活调整,当试车过程中出现参数变化时,发动机模型自适应将发挥功效,及时完成修正。在该模块的研究中,首先明确自适应模块,引入发动机数学模型:

$$Y = F_{EPSM}(X + \alpha) + \beta \quad (1)$$

该式中,  $Y$  代表测量参数向量,为因变量,  $X$  代表故障参数向量,为自变量,  $\alpha$ 、 $\beta$  则是为修正函数偏差而引入的 2 个量,前者为故障偏差向量,后者为测量偏差向量。 $F_{EPSM}(X)$  即为仿真函数,自适应模型搭建中,可以将此作为基础进行反计算,即  $F_{EPSM}^{-1}(X)$ 。其次还应以发动机具体类型为基础,建立相关性较高的模型,比如在双轴分排涡扇发动机中,其性能与压比、效率、温度关系较大<sup>[1]</sup>,此时就可引入焓、熵函数,辅助完成模型搭建。如果系统设计是为研制阶段服务的,还应当进行针对性分析,设计可调节部件,发动机串调整、热端部件调整等具体场景中,参数偏差变化又各有不同,注意做好差异化分析。

#### 3.2 传感器故障隔离模块

由于航空发动机研制阶段存在一定特殊性,无法提供丰富的传感器故障经验库,因此排除对比鉴定的方式,采用自适应模型作为基础,结合模式识别技术进行偏差测量。该方式将所有传感器整合起来,假设共有  $n$  个个体,将之抽象化为  $n$  个测量参数并逐个对应,检测实践时,将待测对象排序为  $1, 2, 3 \dots i$ ,依次剔除后得到若干个序列,用这些序列进行估计,假设第  $i$  个传感器存在故障,那么不包含  $i$  的序列中,试验结果应当最接近估计值。

#### 3.3 气路故障诊断模块

气路故障诊断模块主要以数学模型为支撑,结合数理统计完成诊断。首先将发动机试车试验作为基础,得到测量参数值  $Y_a$ ,该数值为真实值;接着以设定好的模型为依托,运行得到测量参数值  $Y_c$ ,对 2 组数据进行回归分析,得到标准残差  $d_{a,c}$ ,若不在区间之内,则说明故障真实存在,直接输出故障参数;若在区间之内,则要以实际运行次数为对象,判断其是否大于设定好的迭代次数,如果判断结果为“是”,则直接输出报告,如果判定结果为“否”,则继续优化函数,计算出新的参数猜测值,返回首步进行操作,直到完成设定次数的检测。目标函数是该模块的核心所在,因此要在实践中,不断对其进行优化调整。

#### 3.4 优化调整模块

在前述仿真模块设计中,已经基于发动机基线性能搭建起了相关模型,进展到优化调整模块时,系统又获得了气路故障诊断结果,将两者整合起来,进行自适应修正,就可以得到优化模型函数。为减小偏差问题,还可以将几何部件调整过程抽象化,综合考量约束条件,即燃烧室出口总温度等,最终得到适用模型。需要注意的是,由于研制阶段存在机构调整、变更的问题,可调参数呈现离散状态,因此要明确算法对象,做好混合离散非线性函数<sup>[2]</sup>分析。

## 4 结论

综上所述,借助整机试验性能故障诊断系统,可以更好地满足航空发动机在不同阶段的诊断需求,提升研制、设计的合理性,加快试验成果的转化。相关主体应当从核心功能、基础功能以及辅助功能 3 个层面出发,对不同模块进行针对性设计,以数学模型为基础,综合考虑实际应用场景,通过不断优化全面提升系统适用性,最大限度发挥该系统价值功能。

### [参考文献]

[1] 蒋丽英,栗文龙,崔建国.基于 PCA 与 DBN 的航空发动机气路系统故障诊断[J].沈阳航空航天大学学报,2019(1):57-62.

[2] 吕升,郭迎清,孙浩.基于 GA-AANN 神经网络的 SDQ 算法的航空发动机传感器数据预处理[J].推进技术,2018(5):1142-1150.

作者简介:党伟(1988.7-)男,毕业院校:北京航空航天大学;现就职单位:中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司。