

文章编号: 1000-8055(2009)12-2768-05

发动机试车气路故障诊断系统的设计与应用

朱大明, 朱之丽, 唐海龙

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 以发动机整机试验数据为研究对象, 建立了一套发动机试车气路故障诊断系统. 首先阐述了该系统的设计功能和总体流程逻辑; 使用故障模式法和调整模式法建立了气路部件故障诊断和优化调整模块; 然后以一个双轴分排涡扇发动机为例, 针对气路部件故障诊断和优化调整给出了考虑噪声的数值试验分析. 最后就该系统的发展进行了讨论.

关 键 词: 航空发动机; 试验; 故障诊断; 优化调整

中图分类号: V231

文献标识码: A

Design and application of engine test gas path fault diagnosis system

ZHU Daming, ZHU Zhili, TANG Hailong

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A gas path fault diagnosis system was established with the whole engine test data for the study. The system functions and the implementation flow chart were described. The fault diagnosis and optimal adjustment module was established using failure mode and adjustment model. And then taking a dual-shaft turbofan engine as an example, numerical experiments were conducted for noise and results analysis. Finally, the development of the system was discussed.

Key words: aero engine; testing; fault diagnosis; optimal adjustment

高效的试验数据诊断和分析可以进行科学调整决策、减少试验时间、加快研发速度、节约研发经费, 对于验证和修正部件及系统试验结果、确定发动机总体性能、验证发动机各个部件的匹配性能、考核发动机结构完整性和系统可靠性^[1] 等有帮助. 建立一套适合试车台架的发动机气路故障诊断分析系统, 有十分重要的意义.

1 系统的简要设计

试车气路故障诊断分析系统主要应用在发动机研制阶段的整机试验中, 包括地面试验、高空模拟试验和空中试验. 这种处于研制阶段的发动机台架试验, 其发动机匹配点易变化, 测取的参数易变化, 试验得到的多是多变的测量参数序列; 易于

出现大故障和多故障并发; 故障库存储数据的数量和质量差, 无从获得历史稳态数据和时间序列数据. 基于以上, 针对处于研制阶段试验发动机来说, 其气路故障诊断与分析方法应该适应测量参数无时间序列、测量参数和故障参数的种类变化、故障程度异常变大、多故障并发和无经验故障数据库等多种特殊情况.

本系统针对发动机试验性能数据进行诊断分析, 并最终实用于设计流程和工程实践中. 主要有三方面功能, 首先是基于设计要求的基本功能, 如测量数据有效性处理、传感器故障判定隔离和数据重构、气路部件性能故障诊断、可变几何部件优化调整等; 然后是为工程实践服务功能, 如各种结果的显示输出打印、故障库和履历库等; 除了上述

收稿日期: 2009 08 20; 修订日期: 2009 10 25

作者简介: 朱大明(1981-), 男, 黑龙江延寿人, 博士生, 主要从事发动机性能优化和故障诊断.

两方面以外,系统还有一些辅助功能,比如故障参数敏感性分析、故障诊断有效性评估等^[2].图 1 是系统的流程图.

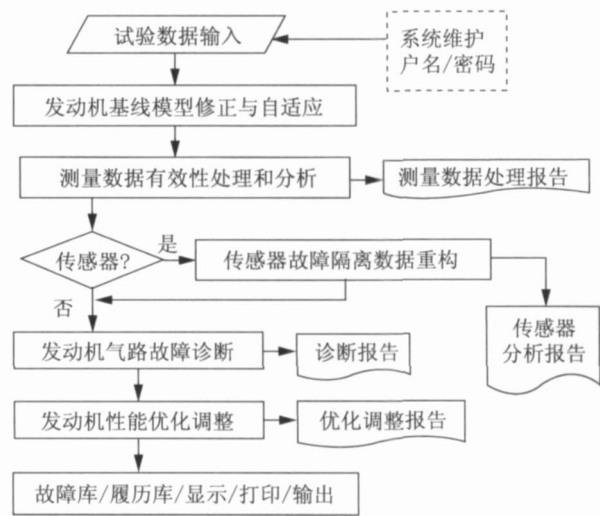


图 1 气路故障诊断分析系统流程图
Fig.1 Flow chart of gas path fault diagnosis analysis system

2 系统主要功能模块设计

由本系统设计可知,与气路故障诊断分析相关最重要的模块是气路故障诊断和优化调整分析,下面就分别简介这两个主要功能模块的设计.为了阐述方便,首先给出发动机数学模型: $Y=F(X+V+\gamma)$,其中 Y 是测量参数向量, X 是故障参数向量, V 是可调参数向量, γ 是调整向量, F 是发动机性能仿真函数.同时使用下标 a 表示实际测量, c 表示模拟计算, b 表示基线.

2.1 气路故障诊断模块设计

装机使用发动机测量参数种类稳定,可在飞行起落中间隔固定时间进行记录,形成数量大的时间序列参数.处于研制阶段的整机试验,由于调整串装,每次试车测取参数易变化,测量次数较少且不能形成时间序列.故障特点是易严重故障、并发故障、无经验数据.针对以上特性,系统在气路故障诊断模块采用了故障模式法进行设计.故障模式法诊断的流程是:首先根据得到的测量参数种类和与基线值之间的偏差,使用自适应模型通过试探计算得到待诊断故障参数的可能范围,然后通过发动机性能模型得到故障模式集合;按照试验要求拟定诊断顺序和精度;在故障模式集合中按照诊断顺序和精度得到全诊断结果集合,此

集合以单独的故障参数为表现形式,其中包括真实诊断结果和伪结果.然后针对此全集合按照预先设定的故障真实性原则进行再处理,处理的原则主要考虑故障的合理性,比如:故障程度太大(绝对值大于 5%)或者太小(绝对值小于 0.3%)的应重点比较,太小会干扰故障隔离;总压恢复或效率故障,一般应为衰退,而不能是增长;同一部件的两种故障参数,不能一个发生故障,而另一个数值无变化,如旋转部件的效率和流通能力不能一个故障而一个不变化;等等.处理之后的结果集合如满足约束要求则输出诊断结果,否则以此时集合对应的故障参数为基础再次进行诊断.本文给出的约束要求是:结果集合内的故障模式均为同一部件故障,取模拟测量参数向量与实际测量参数向量相对欧拉距离

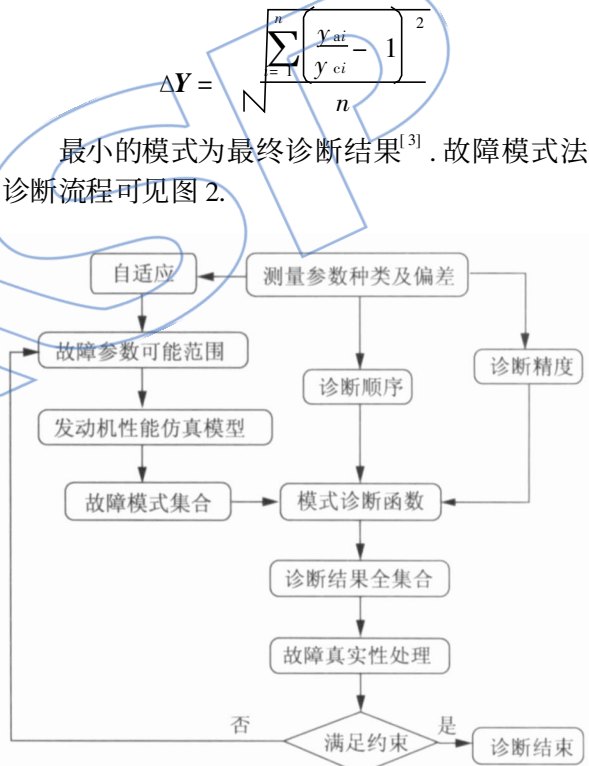


图 2 故障模式法诊断流程示意图
Fig.2 Flow chart of diagnosis with fault mode search

2.2 优化调整模块设计

在优化调整之前,系统已根据试车实际情况对性能模型进行自适应修正.试验优化调整是依据试验发动机性能,在满足约束条件的情况下,调整可变几何部件,使试车发动机性能达到预设的性能目标.如果约束条件是压缩部件喘振裕度 S 和燃烧室出口总温 T_4 ,使用考核性能参数的均方根误差来衡量是否达到优化目标的情况下,发动

机几何优化调整可以抽象为如下优化模型:

$$\begin{aligned} \min \Delta B &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K \left(\frac{b_{ci}}{b_{ai}} - 1 \right)^2}{K}} \\ \text{s. t. } &\left(\mathbf{B}, S, T_4 \right) = F(\mathbf{V}, \mathbf{y}) \\ &\mathbf{V}, \mathbf{y}, S, T_4 \in C \end{aligned} \quad (1)$$

这样,几何优化调整即转化为单目标多变量有约束非线性最优化问题. 本文采用调整模式法进行几何优化. 这种方法可以归属为有限穷举法的一种,具体的算法可以参考图3.

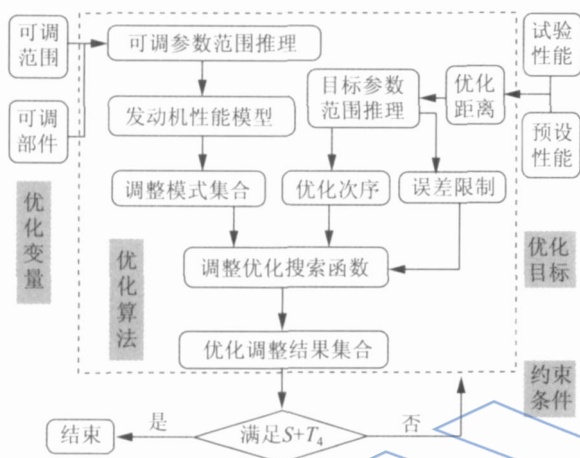


图3 调整模式搜索法优化示意图

Fig. 3 Flow chart of optimizing with adjustment mode search

3 系统实现和应用举例

3.1 系统实现

系统编程中兼顾运算效率、程序普适性、系统修正和扩展的难易程度,同时采用了面向过程和面向对象两种实现方法,系统使用过程中,若有新的诊断和优化方法,都易于添加,增强系统的扩展性.

3.2 系统应用举例

本文以一个双轴分排涡扇发动机为对象,应用诊断分析系统,对该发动机进行气路故障诊断和几何优化调整.

测量参数为发动机地面台架试车所取:推力,燃油流量,空气流量,低压转速,风扇、压气机、低压涡轮、外涵道出口总温总压.待诊断的故障:风扇、压气机、高低压涡轮的效率和流通能力,外涵道总压恢复系数和燃烧室效率.

分析使用的案例由性能模型模拟产生,并加入随机噪声.计量实践表明,对于等精度测量,随

机噪声落入 $(\mu \pm 3\sigma)$ 范围的概率为 99.73%^[4],所以每种测量参数对应的随机噪声即为 $R(\mu \pm 3\sigma)$, R 为 ± 1 之间均匀分布的一个随机数.

3.2.1 系统故障诊断分析

对于本发动机一共有6个部件共10种故障,每种故障预设4个故障程度,即衰退4.5%,3.5%,2.5%和1.5%,根据前面所述的故障部件化原则,对于4个拥有两个故障的部件(4个旋转叶轮机械部件),故障程度还进行组合.则一共有测试案例 $(4 \times 4^2 + 4 + 4)$ 共72个.故障诊断效果采用故障隔离程度和故障辨识程度来评估,本文使用误诊率 P 和样本误差 Q 来进行评价,它们的计算方法如下:

误诊率 正确隔离的样本数占总样本数的概率.

$$P = \frac{T - T_1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

样本误差 所有样本故障参数真实值与诊断值的误差.

$$Q = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^M (x_{ai} - x_{\alpha})^2 \quad (3)$$

上述两式中 T 为样本总数, T_1 为正确隔离样本数, M 为故障参数个数, x_{ai} 和 x_{α} 分别为真实故障和诊断结果显示的故障.诊断结果的 ΔY 见图4, Q 见图5;所有72个样本的误诊率为0.

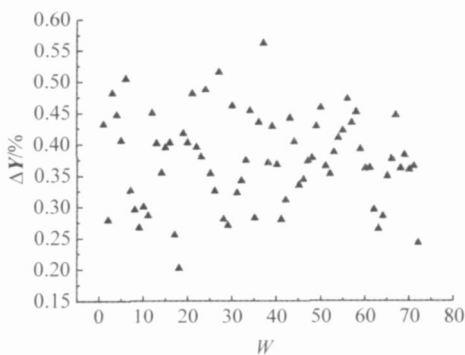


图4 诊断结果的 ΔY

Fig. 4 Diagnosis result ΔY

由图4和图5可见,96%样本的 ΔY 小于0.5%,所有样本 Q 都小于0.1%,诊断效果总体良好.辨识较差的几个点是低压转子上两个旋转部件的效率在故障程度较为接近时,引起的测量参数偏差非常相似所导致的.比如低压涡轮效率下降2.5%同时流通能力下降3.5%与风扇效率下降2%同时低压涡轮流通能力下降4%这两个故障在测量参数表现上就非常相似.表1给出了

这两种故障所对应的测量参数百分比误差.

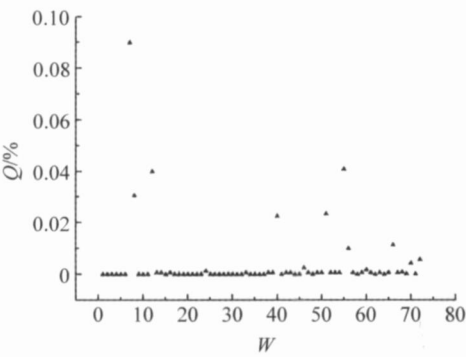


图 5 诊断结果的 Q
Fig.5 Diagnosis result Q

表 1 两种故障对应测量参数的百分比误差

Table 1 Percent error of measurement			
测量参数	相对误差/ %	测量参数	相对误差/ %
推力	0.051	风扇出口总温	0.366
燃油流量	0.103	压气机出口总温	0.352
空气流量	- 0.075	低压涡轮总温	0.188
低压转速	- 0.051	低压涡轮总压	0.168
风扇压比	- 0.165	外涵出口总温	0.366
压气机压比	- 0.149	外涵出口总压	- 0.172

由表 1 可以看出,两种故障对应的每个测量参数误差都在 0.4% 以内,都小于测量精度,所以较难分辨.对于这样的故障在辨识和隔离上还需要进行其他研究.

3.2.2 系统优化调整分析

依然以上述双轴分排涡扇发动机为例,选取

压气机和低压涡轮发生故障情况下进行几何优化调整.调整的目标是发动机性能达到基线设计值,即考察所有 Y_a 与 Y_b 的接近程度,也用相对欧拉距离 ΔB 来度量;调整部件为高低压涡轮导向器叶片(H 与 L)和内外涵喷管(I 与 O);约束条件是 $S \geq 11\%$, $T_4 \leq 1\,200\text{ K}$, $\Delta H \leq 5\%$, $\Delta L \leq 5\%$, $\Delta I \leq 10\%$ 和 $\Delta O \leq 10\%$;采用前述的优化方法.故障情况和优化调整结果参考表 2.一般来说,满足约束条件的调整方案都不唯一,表 2 同时把每种故障情况对应的调节方案中, ΔB 最小的两种调整方案列出来.在表 2 中 A, B 和 C 表示低压涡轮效率和流通能力同时下降 1%, 1.5% 和 2%; D, E 和 F 表示压气机效率和流通能力同时下降 1%, 1.5% 和 2%; N 表示 $\Delta B \leq 1\%$ 的调整方案个数.

由上表可见,故障程度变大则调整效果变差,当故障严重到某种程度时,只通过调整部件是不能使发动机完全达标的.事实上,调整部件通常只能消除部件之间不匹配带来的故障,其他故障只能部分减轻,而不能根本消除故障.所以当故障程度较为严重时,只能通过其他手段排除故障,从而达到调整目标或者试验目的.另外,调整效果接近的方案并不唯一,这就需要根据试车实际进一步进行选择,比如,有些部件虽然属于调整部件,但是调整的方法是重新制造,那么就尽量选择这些部件不调的方案;有些部件由于位置缘故调整较难,则应该尽量选择这些部件调整量少的方案.总之,在调整效果接近的情况下,应该综合考虑费用、时间和可行性等多方面因素.

表 2 调整效果最好的调整方案

故障情况	调整方案				$\Delta B/ \%$	N
	$\Delta H/ \%$	$\Delta L/ \%$	$\Delta I/ \%$	$\Delta O/ \%$		
A	- 1	- 1	1	- 1	0.283 9	32
	- 1	- 1	1	0	0.298 0	
B	1	- 1	1	0	0.431 7	34
	1	- 1	2	0	0.437 3	
C	- 1	- 2	2	- 1	0.344 0	24
	0	- 2	3	- 2	0.361 9	
D	1	0	1	1	0.474 5	20
	1	0	2	- 1	0.559 5	
E	- 2	- 1	3	- 2	0.875 9	5
	- 2	- 1	3	- 1	0.881 9	
F	- 1	- 1	3	- 1	1.021 5	0
	- 1	- 1	3	- 2	1.046 0	

4 结 论

一个实用的发动机试车气路故障诊断分析系统可以挖掘每次试车数据的潜在价值, 在大量的试车数据中寻找规律性和价值性的信息, 很大程度上提高发动机试验的效率, 对于发动机研制和发展各个阶段的试车大有裨益。

本文基于航空发动机地面台架试车的特点, 描述了一个发动机试车气路故障诊断分析系统的总体设计, 包括主要功能模块的设计方案, 并针对系统应用给出数值试验结果和分析。结果表明:

- 1) 气路部件故障隔离和辨识较为准确。
- 2) 发动机气路部件故障程度较为严重时, 无法只通过调整使发动机性能达标。
- 3) 故障程度较轻时, 本诊断分析系统可以给出符合精度的要求的多个调整方案。本系统已经

在两个型号发动机上进行的真实试验数据校核和使用, 数据分析效果良好。

参考文献:

- [1] 杜鹤龄. 航空发动机高空模拟[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] ZHU Daming, ZHU Zhili. Concept design of the data analysis system for engine ground test cell [R]. 2008 ISJPPE 3044.
- [3] 朱之丽, 孟凡涛. 模型辨识法诊断发动机故障的分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(5): 398-401.
ZHU Zhili, MENG Fantao. Aircraft engine fault diagnosis research using model identification based method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(5): 398-401. (in Chinese)
- [4] 张润楚. 试验设计与分析及参数优化[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003.