

弹用涡喷发动机性能监视与诊断系统软件研制^{*}

肖波平

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

摘 要: 介绍了发动机性能监视与诊断系统的功能, 并讲述了软件系统总体设计方案, 给出了软件系统流程图, 论述了气路参数分析法在某弹用涡喷发动机故障诊断中的具体运用, 通过数值试验表明了诊断方法的有效性。

关键词: 涡轮喷气发动机; 状态监视; 故障诊断; 软件开发

中图分类号: V235.11, TB114.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2001) 02-0111-03

Performance monitoring and diagnosis system for missile turbojet engine

XIAO Bo ping

(Dept. of Project System Engineering, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The function of engine performance monitoring and diagnosis system (EPMDS) were introduced. The design ideas of the software system was described. The flowchart diagram of the system was given. It focused on practical application of gas path parameter analysis method (GPPAM) in the missile turbojet engine's faulty diagnosis. The diagnosis method was proved to be effective by numerical experiments.

Key words: Turbojet engine, Condition monitoring, Faulty diagnosis; Software development

1 引 言

弹用涡喷发动机的特点是: 一次性使用, 体积小, 结构简单, 成本低, 推重比高, 寿命短, 储存期内维护简单, 工作条件和工作环境恶劣。这就要求发动机有更高的可靠性, 而且状态监视和故障诊断只能用于发动机的研制和生产过程及储存中的维护检验, 而不是发动机的使用过程。

监视与诊断系统主要是监视发动机的性能状态, 诊断发动机的性能故障, 应用于发动机的全过程质量控制与可靠性增长试验。主要功能包括: (1) 通过采集发动机的启动过程的转速 n , 喷嘴环前油压 p_{11} , 压气机出口压力 p_{12} 和尾喷管排气温度 t_{14} , 监视发动机的启动特性和发动机的启动程序, 为发动机启动过程出现的冷悬挂、热悬挂、爆燃、点火转速偏高等现象提供分析依据; (2) 通过采集发动机的稳态参数, 如转速 n , 推力 F , 压气机进口温度 t_{11} , 压气机出口温度 t_{12} 和出口压力 p_{12} , 燃油流量

q_{mf} 及大气压力 p_{amb} 等, 计算出发动机在各个工作状态下的性能参数折合值, 从而反映出发动机的性能水平; (3) 通过采集发动机的监控参数, 如泄荷腔压力 p_{eq} (< 0.08 MPa), 滑油压力 p_{eop} (≥ 0.15 MPa), 排气温度 t_{14} (< 870 °C), 振动 G (< 10 g RMS), 转速 n/n^* (≤ 29.5 kr/min) 和滑油温度 t_{eop} (< 200 °C), 监视发动机的工作状态, 防止发动机因控制参数超限而损坏部件甚至全机失效; (4) 通过气路参数分析法计算发动机装订状态故障参数的偏差值, 并按时间顺序放在数据库中, 从而监视发动机性能水平及变化趋势, 诊断发动机的故障^[1]。

2 软件系统总体设计

2.1 功能及流程图^[2]

这套程序应用于弹用涡喷发动机地面试车, 程序由数据录入、发动机试验、故障分析、数据及曲线打印、数据及曲线显示和退出等 6 部分组成。

数据录入部分包括发动机型号、发动机编号、试

^{*} 收稿日期: 2000-07-21; 修订日期: 2000-09-20。

作者简介: 肖波平 (1968—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究领域为可靠性工程。

验次数和大气环境压力的录入,以及手记参数 Δp (进气道总、静压差)、 n (发动机转速)、 G (振动) 的录入; 发动机试验部分包括采集系统零点的采集与显示、发动机启动过程的采集与显示、发动机稳态的采集与显示、发动机监视参数的采集与显示、发动机稳态数据换算值的显示; 故障分析部分采用气路参数分析法计算发动机装订状态故障参数的偏差值,并将其显示在窗体上; 数据及曲线的显示和打印两部分包括原始数据、性能数据、启动过程曲线、性能曲线、特性曲线、故障参数变化趋势表的显示和打印。

2.2 试车种类选择

发动机的地面试车包括结构试车和性能试车。结构试车时使用工艺喷管,而性能试车时使用飞行喷管。结构试车是为了对发动机的结构进行磨合,检验发动机结构的匹配性和工作的可靠性。性能试车包括: 空气流量标定、推力装订、性能试验和长时间寿命试车,前三项试验是发动机出厂前的试车。长时间寿命试车是发动机的可靠性增长试验,目的是发现发动机设计和装配中的薄弱环节,改进结构设计、加工工艺和装配方法,以确定和延长发动机的寿命。

2.3 发动机性能参数的测试

测试包括: 发动机启动过程的测试、发动机稳态的测试、发动机监控参数的测试。启动过程的测试是为了给发动机启动特性的研究提供依据; 稳态的测试可以确定发动机的性能水平,通过与标准发动机性能参数值的比较,找出被试发动机的差距,经过结构调整或部件更换,使发动机的各部件达到良好的性能匹配,从而满足发动机的设计要求; 监控参数的测试可以保证发动机在允许的温度、压力和振动范围内进行试车,不至于引起部件的失效或整机的失效。

2.4 故障分析

故障分析采用航空发动机常用的气路参数分析法,该方法研究发动机在某一工作状态下性能变化的趋势。其原理是: 气路部件的故障可以用部件特征参数(如效率、流通能力、总压恢复系数等)和通道几何面积来表征,这些部件特性参数和气动热力参数由气动热力关系建立相互联系,而气动热力参数是可以测量的。所以,有了气动热力参数的测量值,部件特性参数的偏差值就可以通过计算得到。气路参数分析法正是利用部件特性参数和气动热力参数之间相互依赖关系,在建立被诊断发动机数学模型的基础上,对发动机的故障进行诊断^[3]。

假设涡喷发动机的非线性性能数学模型为 $Y =$

$f(X)$, Y 为测量参数,是因变量; X 为故障参数,是自变量。要得到发动机的小偏差系数表,就要分别计算 m 个故障参数变化后, n 个测量参数的变化偏差,即逐一考虑单个故障参数变化,计算每个测量参数相应的变化偏差,这样宜采用单因数试验法求出这些系数^[4]。采用单因数试验法进行非线性模型计算的模式,即输入 $x_k (k = 1, \dots, m)$, 求得 $y_j (j = 1, \dots, n)$ 。详细计算步骤如下:

(1) 求某一工作状态下发动机参数的名义值 $x_{10}, x_{20}, \dots, x_{m0}$, 并代入模型, 求出 $y_{10}, y_{20}, \dots, y_{n0}$ 。

(2) 将第一个自变量变化为 $x_{10} + \Delta x_1$, 即 $\delta x_1 = \Delta x_1 / x_{10}$, 其它自变量不变, 即自变量为 $x_{10} + \Delta x_1, x_{20}, x_{30}, \dots, x_{m0}$, 求出 $y_1, y_2, \dots, y_n$; 然后分别计算 $\Delta y_1 = (y_1 - y_{10}), \Delta y_2 = (y_2 - y_{20}), \dots, \Delta y_n = (y_n - y_{n0})$ 。

$\delta y_1 = \Delta y_1 / y_{10}, \delta y_2 = \Delta y_2 / y_{20}, \dots, \delta y_n = \Delta y_n / y_{n0}$ 。
再求偏导数 $\delta y_1 / \delta x_1, \delta y_2 / \delta x_1, \dots, \delta y_n / \delta x_1$ 。

(3) 将第二个自变量变化为 $x_{20} + \Delta x_2$, 即 $\delta x_2 = \Delta x_2 / x_{20}$, 其它自变量不变, 即自变量为 $x_{10}, x_{20} + \Delta x_2, x_{30}, \dots, x_{m0}$, 求出 $y_1, y_2, \dots, y_n$; 求对 x_2 的偏导数 $\delta y_1 / \delta x_2, \delta y_2 / \delta x_2, \dots, \delta y_n / \delta x_2$;

4) 依次改变 $\Delta x_3, \dots, \Delta x_m$, 求出偏导数形成小偏差方程组, 该方程组为线性方程组, 其形式如下

$$\begin{vmatrix} \delta y_1 \\ \delta y_2 \\ \vdots \\ \delta y_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\delta y_1}{\delta x_1} & \frac{\delta y_1}{\delta x_2} & \cdots & \frac{\delta y_1}{\delta x_m} \\ \frac{\delta y_2}{\delta x_1} & \frac{\delta y_2}{\delta x_2} & \cdots & \frac{\delta y_2}{\delta x_m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\delta y_n}{\delta x_1} & \frac{\delta y_n}{\delta x_2} & \cdots & \frac{\delta y_n}{\delta x_m} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \vdots \\ \delta x_m \end{vmatrix} \quad (1)$$

$$\text{即} \quad \delta Y = C \cdot \delta X \quad (2)$$

其中 δY 为测量参数偏差向量组; δX 为故障参数偏差向量组; C 为相关系数矩阵, 亦称小偏差系数表。公式(2)即为气路参数分析法的数学模型。

由于某弹用涡喷发动机是简单的单转子发动机, 本文选择测量参数数目等于故障参数数目即 $m = n$ 这一特殊情况对发动机进行故障诊断。故障参数有: 压气机效率 η_c 、压气机流通能力 Q_1 、涡轮效率 η_t 、涡轮导向器面积 A_4 和燃烧室总压恢复系数 π_b , 测量参数有: 压气机出口压力 p_{t2} 、压气机出口温度 t_{t2} 、排气温度 t_{t4} 、推力 F 和油耗 q_{mf} , 确定了故障参数和测量参数, 只要给出发动机的工作状态就可以通过发动机性能计算程序计算出该状态下的小偏差系数表。

故障诊断是根据测量参数求出的部件特性参数偏差值进行的, 利用相关系数矩阵 C 求逆, 即可得到发动机的故障诊断模型^[5]:

$$\delta X = C^{-1} \cdot \delta Y \tag{3}$$

发动机在某个工作状态下的小偏差系数表 C , 采用试验方法求解时, 发动机工作状态的小量变化不好控制, 实现起来比较困难, 宜采用计算方法求解。计算方法一般有两种, 即单因素试验法和多因素实验法。单因素试验法只考虑单个故障参数对测量参数的影响, 而多因素试验法考虑了故障参数之间的相互影响。多因素试验法能够更真实地反映发动机故障的实际状况, 但实现起来比较繁琐。气路参数分析法用于发动机可靠性增长试验, 其工作状态稳定, 有利于诊断结果的真实性和准确性。

小偏差系数表 C 得到后, 其逆矩阵 C^{-1} 即可求得。将发动机测量参数的偏差值代入公式 (3), 发动机性能参数的偏差值就可以通过计算得到。把每次性能参数偏差值按时间顺序存入数据库中, 通过分析各个性能参数偏差值的变化趋势, 对发动机的故障作出判断。

3 考核与应用

3.1 数值试验

本文给出 5 组代表不同故障模式的故障参数偏差值数据, 分别由 5 组发动机测量参数经过分析计算得到。这 5 组特性参数分别对应压气机流通能力故障、压气机效率故障、涡轮导向器面积故障、涡轮效率故障和燃烧室总压恢复能力故障。

从表 1 可以看出, 用气路参数分析法计算得到的故障参数偏差值的变化趋势, 基本上反映了测量参数所代表的发动机部件的故障, 说明气路参数分析法可以用于弹用涡喷发动机的状态监视与故障诊断。

3.2 发动机地面台架试验

弹用涡喷发动机可靠性增长试验时间和循环次数的依据是发动机试验大纲, 每做完一个循环, 都要进行发动机的外观和后轴承的检查。所以, 在进行故障诊断时, 每完成一个循环都要重新计算发动机的初始值, 从而提高状态监视与故障诊断的精度。

Table 1 Faulty of compressor ventilative ability

No.	δQ_1	$\delta \eta_k$	δA_4	$\delta \eta_T$	$\delta \pi_b$
1	0.005 0	0.000 3	0.000 7	0.000 7	- 0.000 5
2	0.010 0	0.000 7	- 0.001 2	- 0.002 3	0.001 0
3	0.015 1	0.000 2	- 0.000 2	- 0.000 5	0.000 2
4	0.020 6	- 0.000 1	- 0.003 1	- 0.004 4	0.002 8
5	0.024 9	- 0.000 5	- 0.002 5	- 0.003 2	0.002 2
6	0.029 7	- 0.000 7	- 0.004 5	- 0.005 8	0.004 0
7	0.033 9	- 0.001 4	- 0.004 8	- 0.005 7	0.004 2

表 2 为某台涡喷发动机可靠性增长试验的测量参数计算得到的特性参数偏差值表。可以看出, 这台发动机的故障参数偏差值没有明显增大或减小的变化趋势。但是, 有时出现相邻两个数值的差别较大, 这是由于发动机的工作状态不太稳定造成的。

弹用涡喷发动机可靠性增长试验做得比较少, 而且出现的故障也少。所以, 故障模式数据库有待进一步充实和归纳, 以用于气路参数分析法对弹用涡喷发动机故障的诊断。

Table 2 Trend data of faulty parameter bias

Date	δQ_1	$\delta \eta_k$	δA_4	$\delta \eta_T$	$\delta \pi_b$
120 4	- 0.034 0	- 0.020 7	0.139 1	0.203 6	- 0.094 3
120 4	- 0.048 5	- 0.038 3	0.218 6	0.330 4	- 0.162 9
120 4	- 0.042 4	- 0.022 3	0.117 9	0.171 9	- 0.072 6
120 4	- 0.055 9	- 0.025 4	0.275 3	0.397 0	- 0.199 3

参考文献:

[1] 唐耿林. 航空发动机性能监视参数选择的研究[J]. 推进技术, 1998, 19(2).
[2] 肖波平. 弹用涡喷发动机状态监视与故障诊断技术研究[D]. 北京航空航天大学, 1998.
[3] 张 津, 李其汉. 航空发动机状态监视与故障诊断[R]. 北京航空航天大学, 1993.
[4] 栾 军. 试验设计的技术与方法[M]. 上海: 交通大学出版社, 1986.
[5] 陈大光. 航空发动机状态监视与故障诊断[J], 国际航空, 1987(7).

(编辑: 王居信)