

文章编号: 1000-8055(2008)05-0784-04

航空发动机性能差异问题的故障部件快速检验方法

吴丁毅, 肖 洪, 廉筱纯

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 提出了一种航空发动机性能差异问题的故障部件快速检验方法. 该方法以部件特性曲线为基础, 可以快速检测出航空发动机各部件的自身特性变化而排除由于其它部件性能变化引起的工作线变动带来的影响, 从而快速判断出故障的部件. 该方法特别适用于仿制发动机与原型发动机性能变化原因的查找.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 部件特性; 故障检测; 特性

中图分类号: V231. 1

文献标识码: A

A simple fault diagnosis method for aeroengine performance

WU Ding-yi, XIAO Hong, LIAN Xiao-chun

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A simple fault diagnosis method for aeroengine's performance was developed. Based on component characteristics, this method could detect quickly the inherent change of aeroengine's components and judge the faulty components. Meanwhile, the fault influence of other component can be removed. This method is particularly suitable for finding out aeroengine performance changes between copying engine and typical engine.

Key words: aerospace propulsion system; component characteristics; fault diagnosis; performance

我国一部分航空发动机是以引进发动机为原型测仿改型而设计的, 某些时候会出现改型机与原型机性能存在差异. 或者在发动机某一批次生产过程中, 也会出现该批次发动机与标准发动机总体性能上存在差异. 如何检测发动机性能差异的原因, 快速查找出问题的部件是急需解决的问题. 文献[1]提出的故障诊断检测方法, 也可用于该目的, 但是由于检测过程过于繁琐, 在总体性能差异的初步检查中不便采用. 基于此目的, 本文提出了一种航空发动机总体性能差异问题的快速检测方法.

1 航空发动机总体性能差异原因分析

航空发动机总体性能差异的因素可分为如下

几种: 1) 发动机循环参数 (如: π_{KL} - 风扇/低压压气机增压比; π_{KH} - 高压压气机增压比; T_4^* - 涡轮前总温; B - 涵道比; T_{af}^* - 加力温度 (如果加力)); 2) 部件效率或损失系数 (如: σ - 进气系统总压恢复系数; η_{KL} , η_{KH} - 风扇和高压压气机效率; η , σ - 燃烧室燃烧效率和总压恢复系数; η_{TH} , η_{TL} - 高压涡轮和低压涡轮效率; σ_{II} , σ_m - 外涵道和混合室总压恢复系数; η_{af} , σ_{af} - 加力燃烧室燃烧效率和总压恢复系数; σ_s - 部件间连接通道的总压恢复系数等); 3) 工质物性 (c_p , k , R , 燃油低热值 H_u 等); 4) 其它. 如功率提取、引气和漏气等^[2].

发动机零部件的材料、尺寸、形状、表面光洁度和装配质量等主要通过 1), 2) 条的因素, 亦即

收稿日期: 2007-07-11; 修订日期: 2007-12-18

基金项目: 西北工业大学科技创新基金资助项目

作者简介: 吴丁毅 (1961 -), 男, 陕西西安人, 教授, 从事航空发动机总体性能研究.

通过部件的性能影响航空发动机总体性能^[3-4].

在发动机试车条件下,一般说某个部件性能的变化,不仅使部件的共同工作点在本部件的特性图上变化,而且也导致工作点在其它部件特性图上变化.因此要分析航空发动机总体性能差异的主导原因,必须判断某个部件性能的变化是由于自身部件出问题还是由于其他部件出问题导致的工作点变动引起的.

任一个部件性能的变化可能有如下几种原因:1)单纯由于该部件本身质量的问题,而其它部件的质量没有问题;2)其他部件的质量问题引起的,而该部件本身的质量没有问题;3)该部件本身的质量有问题,其它部件的质量也有问题^[5].

2 风扇/压气机性能检查

风扇/压气机性能由风扇/压气机特性曲线表示,如图 1、图 2 所示.

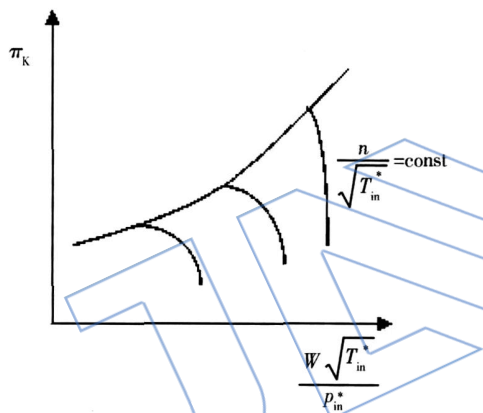


图 1 风扇/压气机压比特性示意图
Fig. 1 Map of fan/compressor pressure ratio

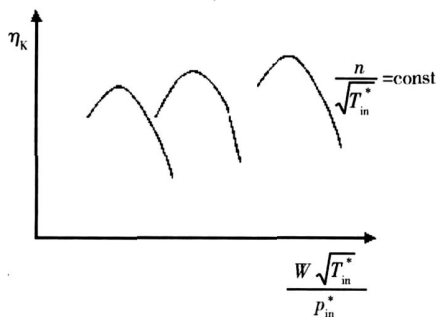


图 2 风扇/压气机效率特性示意图
Fig. 2 Map of fan/compressor efficiency

比较同一型号两个不同厂家生产的风扇/压气机部件性能或者比较某一批次发动机与标准发动机风扇/压气机部件性能,如果其在每一条 $\frac{n}{\sqrt{T_{in}}} = \text{const}$ 的特性线都重和或基本重和,则说

明该部件的性能质量是相同的或基本相同,否则性能质量有差别.

检查具体发动机的风扇/压气机性能时,以参考特性线为基础,因此需要寻找具体发动机在每一条 $\left(\frac{N_L}{\sqrt{T_1}}\right)_{\text{ENG}}$ 时的风扇/压气机性能参数.为此,将该发动机试车的数据绘制成如图 3 所示的曲线.(曲线中的压比、效率、换算流量可以通过测量值计算得出).由图 3 曲线可以找到具体需检查发动机在其换算转速为 $\left(\frac{N_L}{\sqrt{T_1}}\right)_{\text{ENG}}$ 时的参数

$$\frac{M_1 \sqrt{T_1}}{p_1}, \pi, \eta$$

把该三参数与参考特性线比较,如图 4 所示.

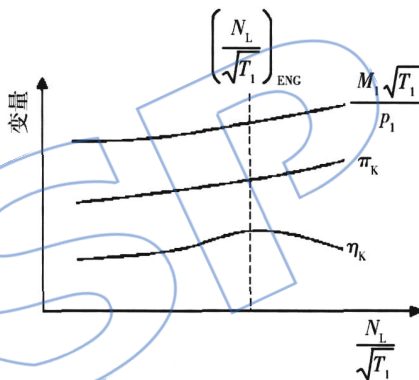


图 3 发动机试车获得的风扇/压气机参数关系曲线图
Fig. 3 Fan/compressor parameter from bench

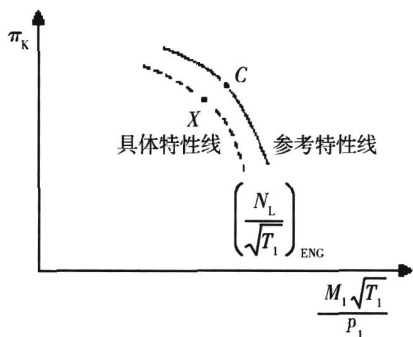


图 4 具体发动机风扇/压气机性能与参考特性线的比较
Fig. 4 Comparison of fan/compressor character

下面以风扇压比为例,说明压气机检测过程.

图 4 中, X 点代表具体发动机试车时由测量数据所得的风扇性能参数,因此风扇特性线必然通过 X 点,根据耦合系数的概念可以导出这条特性线,不妨称之为具体(风扇)特性线.

X 点在图 4 中的位置可能有如下几种情况:

① X 点与 C 点重合,这说明具体发动机风扇的性能与标准发动机平均风扇/压气机性能没有

差别,而且可影响该转子工作点的其它有关部件的性能一般也没有变化;

②X 点与 C 点不重合,但 X 点落在参考特性线上,如图 5 所示。

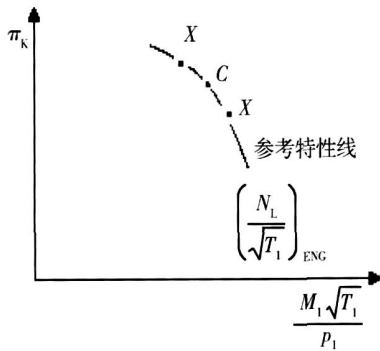


图 5 X 点在参考特性线上
Fig. 5 X is on the character line

这说明具体风扇/压气机特性线与参考特性线重合,即具体风扇/压气机的性能没有问题;但由于其它有关部件性能的变化导致转子工作点的变化,从而引起具体风扇/压气机参数的变化;

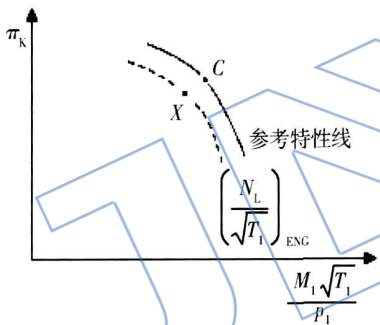


图 6 X 点与 C 点符合耦合关系
Fig. 6 X is on the work line

③X 点不在参考特性线上,但 X 点与 C 点符合耦合关系,如图 6 所示。

这说明具体风扇/压气机特性线与参考特性线不重合,即具体风扇/压气机的性能有问题;由于具体风扇/压气机特性线的变化导致转子工作点的变化;其它有关部件特性没有变化;

④X 点不在参考特性线上,且 X 点与 C 点不符合耦合关系,如图 7 所示。

这说明具体风扇/压气机特性线与参考特性线不重合,即具体风扇/压气机的性能有问题;同时其它有关部件性能也有问题;具体风扇/压气机性能参数的变化是由于 2 个原因引起的:一个是风扇/压气机本身的问题;另一个是其它有关部件的问题,如图 8 所示。

对于风扇/压气机效率特性检查,检查方法与

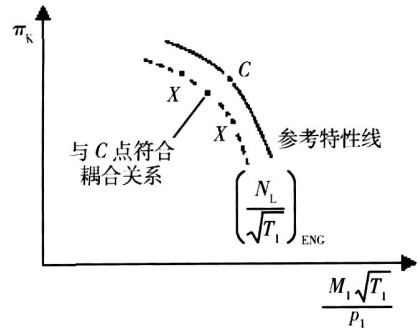


图 7 X 点不在参考特性线上且与 C 点不符合耦合关系
Fig. 7 X is not on the character line

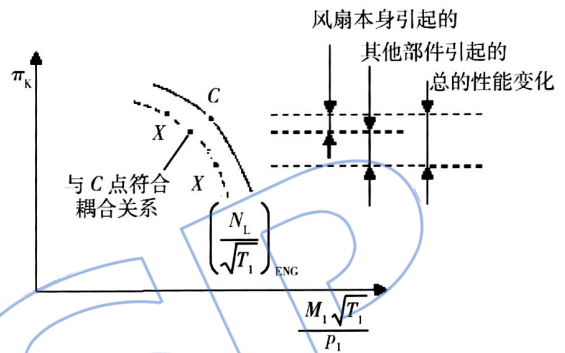


图 8 具体风扇/压气机性能变化的 2 个原因
Fig. 8 Reason of change of fan/compressor character

压比特性检查方法相同。在效率特性曲线上对应画出代表具体发动机试车时由测量数据所得的风扇/压气机效率性能参数 X 点,比较该点在特性曲线上的位置关系(情况和具体步骤和压比检查相同)检查风扇/压气机效率特性。

3 主燃烧室性能检查

航空发动机的燃烧室效率特性曲线如图 9 所示,不妨称之为基准特性线,作为比较检查试车发动机燃烧效率的基准。

图 9 中, η - 燃烧效率相关参数

$$\eta = \frac{p_3^{1.75} \cdot AD \cdot e^{T_3/300}}{M_3} \quad (1)$$

AD - 一个火焰筒的体积

p_3, T_3 - 分别为高压压气机出口总压、总温

M_3 - 进入燃烧室的空气质量流量

航空发动机燃烧室燃烧效率的比较步骤如下:

1) 根据发动机试车测量数据 p_3, T_3, M_f 及导出数据 M_3 可计算燃烧效率相关参数 η 和空气/燃油比值;

2) 根据 η 和空气/燃油比值,由图 9 查得基准燃烧效率;

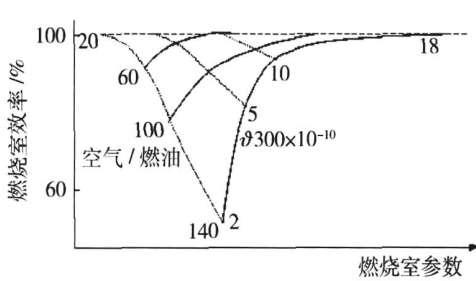


图 9 燃烧室效率特性曲线示意图

Fig. 9 Map of combustor characters

3) 计算具体发动机的燃烧效率

根据发动机试车数据比较燃烧效率的相对差异时,可以采用如下近似公式计算燃烧效率

$$\eta_b = \frac{M_3 (c_{p4} T_4 - c_{p3} T_3)}{M_f H_u} + \frac{c_{p4} T_4}{H_u} \quad (2)$$

式中 T_4 - 涡轮前总温,可由计算获得,例如对于本文的检查对象就有压气机法和涡轮法两种算法;

- M_3 - 进入燃烧室的空气质量流量;
- T_3 - 高压压气机出口总温;
- c_{p3} - 高压压气机出口空气定压比热容;
- c_{p4} - 燃烧室出口燃气定压比热容;
- H_u - 燃油低热值;
- η_b - 燃烧效率.

4) 把第 3) 步计算的具体发动机燃烧效率与基准燃烧效率比较,可得具体发动机燃烧效率与基准燃烧效率的差异,或者不同具体发动机燃烧效率之间的差异.

由(2)式可见,影响燃烧效率计算值准确性的主要因素是: T_4, M_3

4 涡轮效率检查

把高低压涡轮看成一个整体,根据效率定义

$$c_p T_4^* \left(1 - \frac{T_6^*}{T_4^*} \right) = c_p T_4^* \left(1 - \frac{1}{e_T} \right) \eta_T \quad (3)$$

一般情况下涡轮落压比保持不变,也就是说

$1 - \frac{T_6^*}{T_4^*}$ 可以反映整体涡轮的效率.

比较发动机与原型机 $1 - \frac{T_6^*}{T_4^*}$ 在相同换算转速下的值,基本可以判断出涡轮效率的变化.同时也可以根据该方法检测高压涡轮和低压涡轮的效率变化.

涡轮效率也可以通过另一种方法来检查,以高压涡轮效率为例:

根据高压涡轮功率平衡

$$c_p M_3 (T_3^* - T_{2.6}^*) = c_{p,g} M_4 T_4^* \left(1 - \frac{1}{e_{TH}} \right) \eta_{TH} \quad (4)$$

即

$$\eta_{TH} = \frac{c_p}{c_{p,g}} \frac{1}{1 - \frac{1}{e_{TH}}} \frac{T_3^* - T_{2.6}^*}{(1 + f) T_4^*} = \text{const} \frac{T_3^* - T_{2.6}^*}{(1 + f) T_4^*}$$

高压涡轮处于超临界状态落压比保持不变,故

$$\frac{T_3^* - T_{2.6}^*}{(1 + f) T_4^*}$$

可以反映出高压涡轮效率的变化.

如果 $T_{2.6}^*$ 没有测出,其值与 $T_{1.3}^*$ 接近,故用 $T_{1.3}^*$ 来代替,即

$$\frac{T_3^* - T_{1.3}^*}{(1 + f) T_4^*}$$

比较同一换算转速下的该值,可以检测涡轮效率的变化,判断涡轮部件有没有出故障.

5 结 论

本文提出了一种航空发动机性能差异问题的故障部件快速检验方法.该方法以部件特性曲线为基础,可以快速检测出航空发动机各部件的自身特性变化而排除由于其它部件性能变化引起的工作线变动带来的影响,从而快速判断出故障的部件.该方法特别适用于仿制发动机与原型发动机性能变化原因的查找.该方法成功运用于某型发动机的耗油率超标问题的检查.

参考文献:

- [1] 肖洪,薛倩,廉筱纯.基于部件特性未知的航空发动机故障诊断技术[J].航空动力学报,2005,20(5):746-751.
XIAO Hong, XUE Qian, LIAN Xiaochun. Fault diagnosis for aeroengine without components' performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5): 746-751.
- [2] 廉筱纯,吴虎.航空发动机原理[M].西安:西北工业大学出版社,2005.
- [3] 应勇.航空发动机故障监控系统设计与方法研究[D].西安:西北工业大学,2007.
YING Yong. Fault monitor design of aeroengine[D]. Xian: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [4] 徐一艳.航空发动机早期故障诊断方法研究[D].西安:西北工业大学,2006.
XU Yiyan. Fault diagnosis design of aeroengine[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [5] Urban L A. Parameter selection for multiple fault diagnostics of gas turbine engines[J]. Journal of Engineering for Power, April, 1975: 225-230.