

文章编号: 1000-8055 (2001) 01-0087-06

# 某型航空发动机故障发生的量化分析与思考

毛景立, 李 鸣

(西安市 140 信箱 102 分箱, 西安 710089)

**摘要:** 在对某型发动机故障统计的基础上, 进行故障发生的量化分析研究, 探讨出故障发生频次与发动机样本、工作时间段、故障性质的变化关系。同时, 对重复性故障及重大故障进行了专题分析, 就维修性与可靠性指标进行了确定与评估。最后, 在使用维护、改进设计、生产装配等方面提出了建议。

**关键词:** 航空发动机; 故障; 量化分析; 可靠性

**中图分类号:** O 213. 2

**文献标识码:** A

## 1 引言

80 年代末对引进的某型库存发动机开始装机使用, 此后每年根据生产任务陆续出库, 库中存放时间达 10~20 年之久。那么, 这些发动机的使用情况如何呢? 为此, 本文进行了故障发生的量化分析研究。

考虑到统计数据的全面与准确, 随机抽取某用户使用的 26 台发动机作为研究样本。其中 1 号和 10 号样本在使用中分别因为声音异常、燃油管断裂而提前更换, 换为 3 号样本、12 号样本。

根据发动机的故障统计资料, 界定以 $\times$ 年 $\times$ 月 $\times$ 日为研究时间节点, 取装机日期至该节点之间的时间为研究时间段。

对研究样本在整个研究时间段内所发生的故障进行统计, 进而进行量化分析, 探讨故障发生频次(概率)与发动机研究样本、发动机工作时间段、故障发生性质的变化关系; 进行可靠性、维修性指标确定与评估; 就该型发动机在今后的改进设计、生产装配、使用维护中应吸取的经验和注意事项, 提出一些见解。

## 2 发动机故障统计与分析

### 2.1 发动机故障的统计

根据研究对象和界定时间段, 沿着飞机的转场路线, 分别在甲、乙、丙三地的质量控制部门查阅了故

障的发生时间、现象、原因、性质、排除措施和所用时间等, 共收集故障 58 条。其中, 甲地 4 条、乙地 12 条、丙地 42 条。最后整理编制了“某型发动机故障统计表”(限于篇幅在此未列出)。

### 2.2 故障发生的量化分析研究

以 26 台发动机为样本, 统计出每个样本发生故障的次数和在研究节点的累计使用时间。如果把某台发动机的发生故障的次数除以该台发动机在研究节点的累计使用时间定义为“故时比率”, 单位为“次/100 小时”; 那么, 故时比率则能很好地反映出该台发动机的故障发生频次。发动机样本故障次数、节点累计使用时间、故时比率统计详见表 1。由表 1 可以看出, 故障次数在 4 次(含)以上的发动机研究样本号码依次是 2, 1, 9, 8, 10; 但是, 评定研究样本故障发生频次的指标不是故障次数, 而应是故时比率。故时比率较大(出现故障频次较高)的研究样本号码依次是 3, 12, 2, 9, 10, 20, 1, 15, 8, 19, 11 等等。

由表 1 作出图 1, 那么图 1 表明: 发动机研究样本工作在 0~150 小时占 38%, 工作在 150~300 小时占 54%, 工作在 300~450 小时占 8%。

根据 2.1 节提到的“某型发动机故障统计表”中 58 条故障的发生时间, 可绘制出“第  $N$  次故障发生时其所对应发动机累计使用时间统计曲线”, 见图 2。

如果把发动机使用时间划分成 5 段: 0~50,

收稿日期: 2000-03-03; 修订日期: 2000-07-12

作者简介: 毛景立 (1970-), 男, 海军装备部某部军事代表, 工程师, 硕士

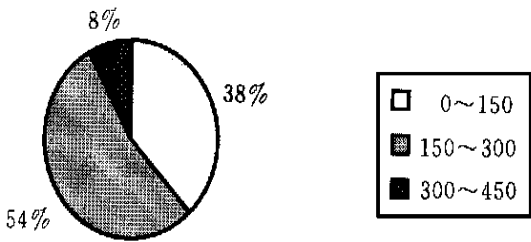


图 1 按累计使用时间分段的样本比率

50~ 150, 150~ 250, 250~ 350, 350~ 450 小时; 那么根据图 2 可以看出每个“分时间段”内所发生的故障次数, 根据表 1 可以算出发动机样本曾经在该时间段工作过的台数。

如果在所研究的“分时间段”内, 把发生故障的次数与发动机研究样本的台数的比值定义为“故台比率”(单位为次/台), 那么, 故台比率则能很好地反映出该“分时间段”内发生故障的频次。据此计算出的各“分时间段”的故台比率见表 2。由表 2 看出, 发动机在 350~ 450 小时内, 发

表 1 发动机样本故障次数、节点累计使用时间、故时比率统计表

| 发动机样本号         | 1    | 2    | 3    | 4   | 5     | 6     | 7    | 8     | 9    | 10   | 11    | 12   | 13   |
|----------------|------|------|------|-----|-------|-------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| 故障次数 (次)       | 9    | 11   | 2    | 0   | 1     | 1     | 2    | 4     | 6    | 4    | 2     | 2    | 2    |
| 节点累计使用时间 (h)   | 434  | 434  | 21.3 | 293 | 273.4 | 293.5 | 295  | 257.1 | 241  | 163  | 184.4 | 45.6 | 229  |
| 故时比率 (次/100 h) | 2.07 | 2.53 | 9.39 | 0   | 0.37  | 0.34  | 0.68 | 1.56  | 2.49 | 2.45 | 1.08  | 4.39 | 0.87 |

| 发动机样本号         | 14    | 15    | 16    | 17    | 18  | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 故障次数 (次)       | 1     | 3     | 0     | 0     | 0   | 2     | 3     | 1     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0  |
| 节点累计使用时间 (h)   | 227.3 | 157.1 | 156.6 | 134.4 | 144 | 154.5 | 141.5 | 106.9 | 102.2 | 100.1 | 104.7 | 247.1 | 23 |
| 故时比率 (次/100 h) | 0.44  | 1.91  | 0     | 0     | 0   | 1.29  | 2.12  | 0.93  | 0     | 0     | 0.95  | 0     | 0  |

表 2 故障数、样本数、故台比率与时间段关系统计表

| 分时间段 (h)   | 0~ 50 | 50~ 150 | 150~ 250 | 250~ 350 | 350~ 450 |
|------------|-------|---------|----------|----------|----------|
| 故障发生数 (次)  | 13    | 13      | 22       | 4        | 6        |
| 研究样本数 (台)  | 26    | 22      | 15       | 7        | 2        |
| 故台比率 (次/台) | 0.5   | 0.59    | 1.47     | 0.57     | 3        |

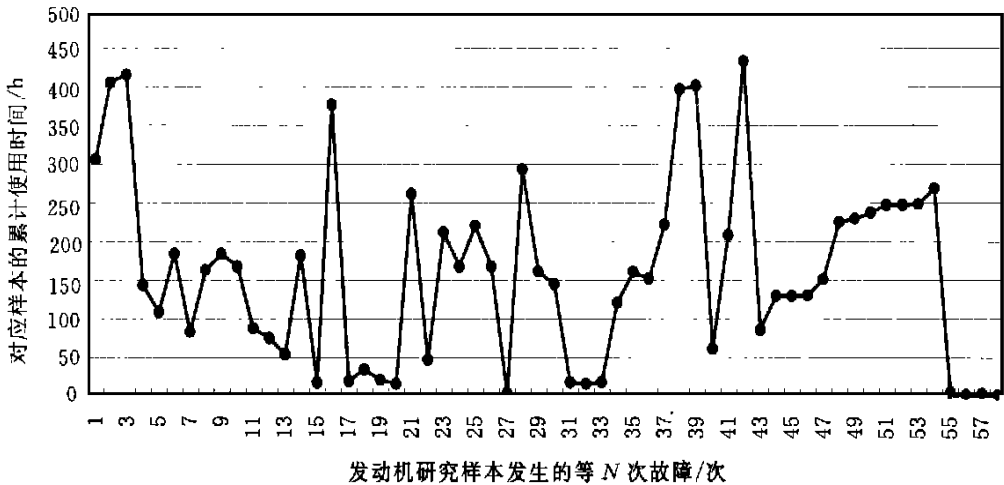


图 2 第 N 次故障发生时其所对应发动机累计使用时间统计曲线

表 3 故障发生频次与故障类别统计表

| 故障类别         |     | 部件故障 |         | 安装不到位 |         | 错 装 |         | 锈 蚀 |         | 胶 圈 |         |
|--------------|-----|------|---------|-------|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|
| 指标<br>参数     |     | 次数   | 比率/ (%) | 次数    | 比率/ (%) | 次数  | 比率/ (%) | 次数  | 比率/ (%) | 次数  | 比率/ (%) |
|              | 重复性 | 23   | 74.2    | 3     | 75      | 0   | 0       | 0   | 0       | 2   | 100     |
|              | 偶发生 | 8    | 25.8    | 1     | 25      | 4   | 100     | 2   | 100     | 0   | 0       |
|              | 小 计 | 31   | 100     | 4     | 100     | 4   | 100     | 2   | 100     | 2   | 100     |
| 占故障总数比率/ (%) |     | 53.4 |         | 6.9   |         | 6.9 |         | 3.4 |         | 3.4 |         |

| 故障类别         |     | 外 伤 |         | 整机 (性能) |         | 裂 纹  |         | 其 它 |         | 合 计 |         |
|--------------|-----|-----|---------|---------|---------|------|---------|-----|---------|-----|---------|
| 指标<br>参数     |     | 次数  | 比率/ (%) | 次数      | 比率/ (%) | 次数   | 比率/ (%) | 次数  | 比率/ (%) | 次数  | 比率/ (%) |
|              | 重复性 | 2   | 0       | 0       | 0       | 7    | 87.5    | 0   | 0       | 37  | 63.8    |
|              | 偶发生 | 0   | 100     | 1       | 100     | 1    | 12.5    | 4   | 100     | 21  | 36.2    |
|              | 小 计 | 2   | 100     | 1       | 100     | 8    | 100     | 4   | 100     | 58  | 100     |
| 占故障总数比率/ (%) |     | 3.4 |         | 1.7     |         | 13.8 |         | 6.9 |         | 100 |         |

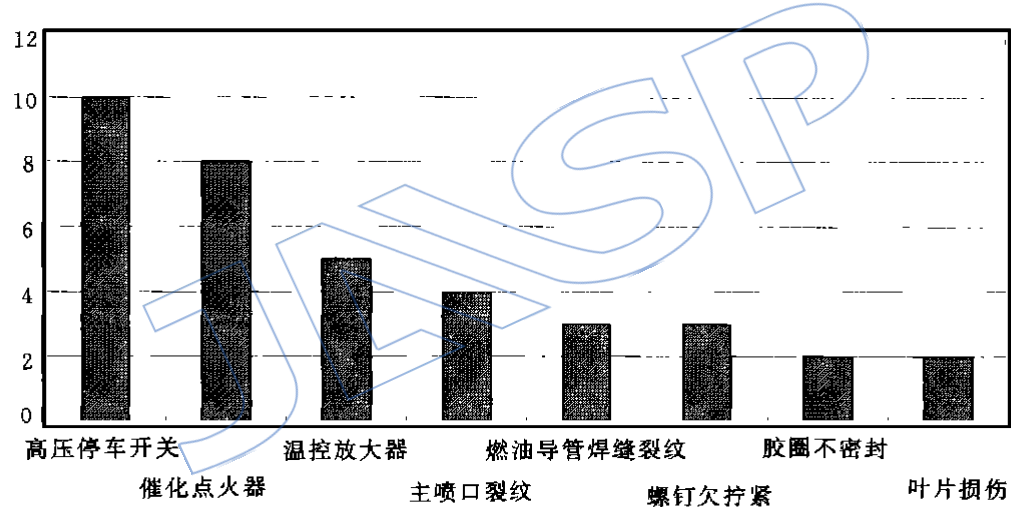


图 3 重复性故障发生次数统计图

生故障的概率 (频次) 最高, 故台比率达到 3 次/台; 在 150~ 250 小时内的故障概率较高, 故台比率约达 1.47 次/台; 其它时间段的故台比率较低。再结合图 2 可进一步分析得知故障多发生在发动机使用时间的 400 小时左右、200 小时定检前后。

研究 2 1 节提到的“某型发动机故障统计表”, 研究故障发生的原因及性质, 可将故障分为以下几类: 部件故障、安装不到位、错装、锈蚀、外伤、整机、裂纹、胶圈老化等。按照故障发生的频次, 可分为重复性故障和偶发性故障。于是可作“故障发生频次与故障类别统计表”, 见表 3。由表 3 看出, 属于“部件故障”类的故障多达 31 条占全部故障总数的 53.4%, 其次是裂纹、安装不到位和错装, 四者累计占全部故障总数的

81%。因此应对上述 4 类故障进行研究, 并以部件故障类为重点。

重复性故障占全部故障总数的 63.8%。其中, “部件故障”类的 23 条分别是高压停车开关 10 条、催化点火器 8 条、温控放大器 5 条; “裂纹”类的 7 条分别是主喷口亚弧焊处裂纹 4 条、燃油导管焊缝裂纹 3 条; “安装不到位”类的 3 条是螺钉该拧紧的没有拧紧; “胶圈”类的 2 条是密封性差; “外伤”类的 2 条是压气机叶片有损伤。据此可以作出图 3。

由图 3 看出, 重复性故障主要集中在高压停车开关、催化点火器、温控放大器、主喷口裂纹、燃油导管焊缝裂纹、螺钉欠拧紧, 合计约占重复性故障总数的 91.2% (占全部故障总数的

58.2%)。因此,应该对这些故障作出专题分析,见2.3节。其余8.8%的重复性故障是指由于胶圈密封性差而造成渗漏油,由于铆钉脱落或沙尘而造成压气机叶片损伤等。

偶发性故障占全部故障总数的36.2%。主要表现为加力接不通、引射管支座裂纹、发动机声音异常、燃油油滤脏、滑油开关接触不良、使用螺杆型号不对、未装铝垫片、微动开关故障、压比调节器故障等。

表 4 高压停车开关关闭扭矩的试验数值统计表

| 试验油温 $T / (^{\circ}\text{C})$      | 60    |       |       |       |       | 65    |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 持续时间 $t / \text{s}$                | 30    | 60    | 90    | 180   | 210   | 150   |
| 关闭扭矩 / $(\text{N} \cdot \text{m})$ | 0.265 | 0.530 | 1.060 | 1.648 | 1.727 | 3.237 |

设计要求: 关闭扭矩 $\leq 0.450 \text{ N} \cdot \text{m}$

方向拉压,才能关断高压停车开关,迫使发动机停止运转。当发动机完全停下后再活动油门手柄,运动阻力越来越小,直至可以恢复正常。

从发动机操纵系统构造组成可知,油门手柄从慢车拉向停车,主要控制的运动件是高压停车开关。将多次发生收油门不能正常停车的发动机上的高压停车开关拆下,返厂分解检查发现:在高压停车开关的滑阀上粘附有一层薄薄的棕褐色污垢,分析得知其主要成分是煤油里的杂质及铁容器锈蚀物。设计标准要求高压停车开关滑阀和衬套的配合间隙为 $0.0025 \sim 0.0051 \text{ mm}$ ,由于使用中粘附了棕褐色的物质,使配合间隙大大减小。另外,试验室的试验报告(表4)揭示了高压停车开关运动阻力与环境温度的关系。

由此可见停车开关在油温较高的条件下是容易卡滞的。这说明导致“停不了车”的原因:一是停车开关滑阀上粘附污物,二是油温较高。实际测量飞机着陆滑回停机坪后,停车开关处的温度为 $60^{\circ}\text{C}$ ,具备卡滞的条件。

由于停车开关运动阻力增大,当收油门关车时,油门手柄操纵力超出设计值,故而引起钢索发生弹性变形,虽然油门手柄到了停车位置,但停车开关并不能关闭,所以发动机仍工作在慢车状态。该故障只会在地面发生,不会影响飞机安全。

催化点火器,属于进口件,部分是国内返修件。其主要故障是催化床裂纹与烧化,其中催化床裂纹原因是工作环境恶劣,即高温、高频振动;催化床烧化原因是处于高温区( $2300 \sim 2400^{\circ}\text{C}$ )。

2.3 重复性故障的专题分析

高压停车开关属于进口件,返修厂是国内某附件厂,飞机上新更换的都是返修件。

故障现象:飞机着陆滑回到起飞线以后,飞行员收油门关车,油门手柄收到停车卡后,发动机没有熄火,转速仍在50%左右。这时若提起油门手柄重新关车,感到油门十分紧涩,好似被卡住,用力推油门手柄也推不动。机务人员只好从发动机舱处用手握住60框处的摇臂,使劲向停车

温控放大器故障率高的主要原因是库中存放时间太长。

裂纹类故障主要是主喷口亚弧焊处裂纹、燃油导管焊缝裂纹。前者属于焊接材料和焊接工艺问题,外场一般采用补焊的办法来解决。后者是由于焊点本身有缺陷,又加上高频动应力破坏,最终导致裂纹,见2.4节的专题分析。

螺钉欠拧紧故障,主要表现为加力燃油泵进口导管固定螺钉拧紧力不够,造成松动。原因是操作位置蹩脚、没有定量要求,操作人员不能有效控制。

2.4 重大故障的专题分析

某日飞行中,发现某架飞机冒白烟。地面检查发现是19号样本上的高压燃油泵至附面层补油电磁阀的补油管 $\Phi R26134A$ 断裂,断口在连接高压燃油泵的管接头附近的焊缝处,管子已基本断开仅局部相连。更换该管需要脱发动机,工作量大,飞行中有燃油泄露,因此属于重大故障。

将故障件分解下来检查发现断口呈疲劳断口特征,发动机此时累计工作71小时14分。该油管系国产件,原件号为EU60118A。罗·罗公司1983年向国内某发动机厂发来通报,油管EU60118A一年内就发生了六起断裂故障,原因系高频疲劳断裂。罗·罗公司向发动机厂发出设计更改,将管壁加厚,增加了1个固定油管的卡箍,局部改变管子走向,更改后的管子号为 $\Phi R26134A$ 。当时因为引进合同已经失效,故贯彻更改的管子 $\Phi R26134A$ 由国内某发动机厂生产。

油管仅工作 71 小时 14 分就发生疲劳破坏, 这是比较罕见和不应该发生的。为此, 详细做了断口金相分析, 从照片上可以清晰看到一个未焊合的三角区域。在高频振动应力作用下, 裂纹由该区边沿起裂并发展至破坏。该故障系油管焊缝处存在缺陷而引起的故障。

3 可靠性、维修性指标确定

就航空发动机的可靠性、维修性参数, 美国在文献 [1] 中的规定是空中停车率、提前换发率、

关键件综合平均故障间隔飞行小时、每飞行小时直接维修工时、空中功率损失率、外场可换件更换率; 我国在文献 [2] 中的规定是平均故障间隔时间、平均推力下降间隔时间、平均停车间隔时间。

参照国内外航空发动机参数选取的实际做法, 结合所研究发动机的用户使用经验, 考虑参数与其成熟期目标值的变化关系<sup>[3]</sup>。本文在基本可靠性方面选择平均故障间隔时间、提前换发率; 在任务可靠性方面选择空中停车率; 在维修性方

表 5 国内外军用发动机可靠性与维修性参数与指标

| 发动机<br>型 号 | 基 本 可 靠 性        |                  |                     |                     | 任务可靠性               | 维 修 性               |
|------------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|            | 平均故障<br>间隔时间 (h) | 平均维修<br>间隔时间 (h) | 提前换发率<br>(次/1000 h) | 返厂修理率<br>(次/1000 h) | 空中停车率<br>(次/1000 h) | 每飞行小时直<br>接维修工时 (h) |
| 所研究发动机     | 103              |                  | 0.75                |                     | 0                   | 2.1                 |
| M 88       | 350              |                  | 3                   |                     | 0.5                 |                     |
| EJ 200     | 120              | 175              | 0.8                 |                     | 0.08                | 0.5                 |
| F 404      |                  |                  |                     | 1.6                 | 0.1                 | 1.2                 |
| 国产某型       | 105              |                  | 0.4                 | 0.2                 |                     | 2.0                 |

面选择每飞行小时直接维修工时。

根据 2 1 中“某型发动机故障统计表”, 计算出所研究样本的评定指标, 参阅文献 [3] 并与国内外同类别的发动机做出大致比较, 见表 5。

4 思考与建议

4 1 该发动机在外场使用维护中的注意事项

粘附在高压停车开关上的物质主要是煤油里的杂质及铁容器锈蚀物。因此, 维护人员要特别重视保持飞机燃油的清洁工作。在目前情况下, 可采取的应急处理办法是: 当发动机在地面停不了车时, 可推油门杆将高压转速增大到 90%, 运转 30 s 左右以后拉油门到停车位置使发动机停车; 或由地勤人员拉飞机 60 框处的飞机油门操纵系统拉杆使发动机停车, 事后再更换停车开关。

加力燃油泵进口导管固定螺钉多次发现因拧紧力不够而造成松动, 发动机 A 3 引气卡箍因光杆部分搭接量较小而脱开等等。因此, 要经常检查这些部位, 及时消除隐患。

故障多发生在累计使用 200 小时和 400 小时前后, 因此做好这两个时间的定检等工作尤为重要。根据统计, 100 小时左右出现故障概率很小; 而例行的 100 小时定检, 不但工作烦琐, 而且经常因无谓的拆装而造成人为故障, 因此建议有关部门研究取消 100 小时定检。

根据美军资料统计, 装备的全寿命周期内, 论证与设计费占 3%, 制造费占 23%, 使用费占 50%, 维修费占 12%, 改造费占 10%, 退役费占 2%。然而, 越是前面的阶段, 对全寿命的影响越大。其中, 论证和预研阶段影响 85%, 研制阶段影响 10%, 生产阶段影响 4%, 而到使用阶段只能影响 1%。由此可见, 做好装备论证、研制阶段的工作, 提高其可靠性、维修性和保障性, 避免“先天不足”是至关重要的。为不断克服设计缺陷, 用户单位应视之为己任, 积极主动地收集、分析并提出书面改进建议, 自觉与总设计师系统联手, 从源头抓起, 确保装备优生。

经常发生故障的部件有高压停车开关、催化点火器、温控放大器, 三者约占故障总数的 40%, 因此, 用户航材库应有的放矢地备有足够的备件, 确保故障件的更换供应。这是提高发动机样本完好率的一个重要途径。

据统计, 与裂纹有关的故障占故障总数的 35% 以上。因此, 有必要积极研制一些外场使用方便的便携式无损探伤仪, 对燃油导管、主喷口亚弧焊处、催化床等处做到视情检查, 以消除隐患。

4 2 该发动机在国产化设计中应解决的问题

发动机气动噪音问题是航空界研究的一个弱区。1 号样本曾因声音沉闷, 而技术人员又不能给

出合理的解释, 于是空勤拒绝飞行。接着, 辗转几千里, 回厂做综合检查、试车台检测, 又到试飞院试验飞行。前后历时 3 个月, 耗资五百万, 结果检测参数一切正常。希望加强气动声音与性能的关系研究, 对异常声音能给出明确的解释, 避免盲目换发, 做到有的放矢。

对高压停车开关的齿轮轴进行改进性设计, 改变齿轮轴的所用材料, 使转动开关齿轮轴的扭矩随温度升降呈“惰性”变化, 这是解决高压停车开关故障的根本所在。对于关键重要紧固件, 尽可能使用定力扳手, 防止拧紧力不够。采用新的抗高温、抗高频震动的材料, 彻底解决催化床裂纹和烧蚀、主喷口亚弧焊处裂纹、燃油导管焊缝裂纹等问题。

发动机联轴器是由国内某厂家按照国外图纸自行生产的; 图纸上只写明齿套的齿型制造标准是英制某标准, 但在全国范围内找不到该标准, 因此其具体内涵不得而知。没有标准就无法正确生产产品, 无法精确制造检验量具。该件配合间隙小, 每次安装都特别困难。采取从多个试件中选配的办法安装, 严重影响生产周期, 有时常达 6 个月之久。这不符合图纸安装要求, 影响发动机油门的连动跟随性和部件的互换性。因此, 建议设计部门在该发动机机进行国产化设计时, 采用国际公用标准, 将该齿重新消化、设计, 为后续大批量国产该型发动机的生产安装提供良好的互换性。

#### 4.3 该发动机在国产化生产装配中应采取的措施

该发动机是国外原装发动机, 飞机与发动机的组合装配是国内生产质量控制的关键和重点。装配中发现仅发动机输入轴就存在“花键外露量

长短不一、连接脱开力检测不合要求、摇臂安装角测量不严格”等诸多问题。追根求源, 是由于现行使用的《工艺规程》本身的缺陷和弊端而造成工艺与操作脱节、设计与操作脱节。实行《AO (Assembly Order) 装配指令》, 能做到从根本上有效指导工人操作, 及时贯彻设计更改, 形成设计—工艺—操作的闭环控制。进而使飞机发动机总体装配质量得到根本性变革。

## 5 结束语

由于客观条件限制, 致使所取研究样本有限。这样, 所做的故障分析研究必然存在不足之处。但是文中所采取的研究方法是可行的, 所做的工作是有一定超前意义的。在全寿命周期内, 发动机故障发生的规律性及其可靠性、维修性均在不断增长, 并一直延续到成熟期。据统计, 一般在服役后机群累计飞行  $10^5 \sim 10^6$  小时可达到成熟期<sup>[3]</sup>。因此, 如果能沿着文中的路子走下去, 再用 2~3 年的时间获取足够的故障信息, 那么, 就必然会得出更加客观的规律性研究成果, 进而对该发动机的国产化设计、生产质量监控、外场使用维护等方面起到倍加有效地、富有预见性和针对性地作用。

## 参考文献

- [1] 国家军用标准 GJB 241-87. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范 [S]. 国防科工委军标出版发行部, 1988
- [2] 美国军用标准 MIL-E-87231. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机军用规范 [S]. 北京: 航空航天工业部 301 所, 1989
- [3] 张宝成等. 航空发动机可靠性和经济性 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998 (4).

(责任编辑 杨再荣)

## Approaches on Trouble Quantitative Analysis of a Given Engine

MAO Jing-li, LI Ming

(Xi'an 140-102, Xi'an 710089, China)

**Abstract** Based on the statistics of the troubles that happened in a given engine including their times, the appearances, the reasons, the characters, as well as the measure and the time for eliminating, quantitative analyses of the troubles have been made, and the variable relationships of the trouble-frequency with engine sample, engine operation time section and properties of the trouble have been found out. The monographic analysis has been focussed on the repeated failure and major failure. The reliability and maintainability index of the given engine have been evaluated. Finally, precautions during field maintenance are discussed, some suggestions are presented for its modification and production.

**Key words:** aviation engine; failure; quantitative analysis; reliability; maintenance; developing opinion