

基于故障数据和假设检验的 失效率评估方法

郑勇乐*

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 民用飞机的特性(可靠性、安全性、维修性、测试性等)指标直接决定着飞机的安全性、可靠性、经济性水平,也直接影响着飞机的市场竞争力。基于故障数据的特性指标评估结论,可以有效评估供应商提供的零部件是否满足设计阶段提出的要求。研究了假设检验方法在民用飞机特性指标评估工作的应用,以主制造商和航空公司最为关注的可靠性指标失效率为例,提出了基于故障数据和假设检验失效率的评估方法,并结合某型飞机运营中设备的故障数据,利用提出的假设检验方法进行了样例分析。

关键词: 民用飞机;故障数据;失效率;假设检验;指标评估

中图分类号: V211

文献标识码: A

OSID:



0 引言

飞机作为一个复杂的产品,由成千上万个零部件组成,零部件的可靠性(平均故障间隔时间、签派可靠度和失效率等)、维修性(平均修复时间和维修工时等)、测试性(故障检测率、故障隔离率)等特性指标直接决定着民用飞机的安全性、可靠性、经济性水平,也直接影响着飞机的市场竞争力。其中失效率作为民用飞机系统、子系统和设备可靠性设计时最为关注的指标,也是航空公司目前最为关注的可靠性指标之一。

随着我国民机事业的稳步推进与广泛布局,越来越多的民机产品投入到我国民航事业中,国产民机产品的故障数据也越来越多,如何利用这些故障数据验证民机研制过程中系统、子系统、设备的设计指标成为主制造商和航空公司的关注点。

假设检验方法^[1-2]作为一种常用的根据样本推断总体的数理统计方法,是这一典型场景的最佳解

决方案。利用假设检验的方法评估实际运营场景下飞机零部件的失效率指标是否满足设计阶段提出的指标要求,能够有效提升评估的效率和置信度。

1 假设检验方法

1.1 假设检验要素

假设检验方法作为一种常用的根据样本推断总体的数理统计方法,其主要的要素包括:

1) 原假设,记为 H_0 。表示样本实施的现状,即这个假设被接受,数据能提供可信的证据表明它是错的。原假设通常代表“现状”或研究者希望验证的一些关于总体参数的论断。

2) 备择(研究)假设,记为 H_a 。这个假设被接受,当且仅当数据对事实的真相提供了可信的证据。备择假设通常是研究者希望取得证据来支持的总体参数的取证。

3) 检验统计量。它是一个样本统计量,由样本提供的信息计算得到,研究者用这个样本统计量

* 通信作者. E-mail: zhengyongle@comac.cc

引用格式: 郑勇乐. 基于故障数据和假设检验的失效率评估方法[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(4): 71-75. ZHENG Y L. Failure rate evaluation method based on fault data and hypothesis testing[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(4): 71-75(in Chinese).

在原假设和备择假设之间做出选择。

4) 拒绝域。它是检验统计量可能取证的一个集合,当检验统计量的值落入这个集合时,研究者会拒绝 H_0 而接受 H_a 。

1.2 假设检验方法

1.2.1 原假设的选择

原假设和备择(研究)假设构成了一个假设检验的基础。因此,必须首先依据评估对象提出原假设和备择(研究)假设。原假设通常表示现状,直到它被证明是错的;备择(研究)假设则是与原假设相矛盾的一个理论^[3]。

对于假设检验中原假设的提出,任永泰^[4]、李晓红^[5]、麦克拉夫^[6]、董光辉^[7]等人在不同领域开展了相关的研究。按照特性指标数值期望的方向:望大(即,数值越大越好)或望小(即,数值越小越好),可以将其分为望大型特性指标和望小型特性指标这两类。根据将评估对象的特性指标符合研制阶段提出的要求的假设选择作为原假设的原则,评估对象不同(望大型或望小型特性指标),则原假设和备择(研究)假设的表现形式也有所不同(备择(研究)假设包含“>”或“<”符号)。

备择假设有方向且包含“>”或“<”符号的检验称为单侧检验。当符号为“>”时,称为上侧检验;当符号为“<”时,称为下侧检验。

若待评估对象的总体均值为 μ , a 为供应商提供的评估的值,综上,对于望小型特性指标的原假设、备择假设分别为:

- 1) 原假设(H_0): $\mu \leq a$;
- 2) 备择假设(H_a): $\mu > a$ 。

上述假设检验方法可简称为上侧检验,反之,针对望大型特性指标的假设检验即为下侧检验。

1.2.2 检验统计量

在大样本的情况下(即样本数量 n 满足: $n \geq 30$),根据中心极限定理样本均值近似正态分布,因而可以采用 z 检验,检验统计量 z 的计算均如公式(1)所示:

$$z = \frac{\bar{x} - a}{\sigma / \sqrt{n}} \quad (1)$$

式中: \bar{x} 为样本均值; σ 为总体的标准差。

若选择检验的显著性水平 α 为 0.05,对于下侧检验的拒绝域为: $z < -1.645$;对于上侧统计检验的拒绝域为: $z > 1.645$ 。

常用显著性水平 α 的取值有 0.10、0.05、0.01^[8],其对应的拒绝域如表 1 所示。

表 1 常用显著性水平对应的拒绝域

| 显著性水平 | 下侧统计检验 | 上侧统计检验 |
|-------|------------|-----------|
| 0.10 | < -1.282 | > 1.282 |
| 0.05 | < -1.645 | > 1.645 |
| 0.01 | < -2.326 | > 2.326 |

1.3 数值计算

样本均值的计算方法如公式(2)所示:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

式中: x_i 为随机样本。

通常,特性指标 X 的总体标准差通常是未知的。对于大样本来说,样本标准差 s 可以近似替代总体标准差 σ ,其计算方法如公式(3)所示:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

综上,检验统计量的计算公式(1)可转化为公式(4):

$$z = \frac{\bar{x} - a}{s / \sqrt{n}} \quad (4)$$

1.4 假设检验结论

根据检验统计量的数值计算结果,若该数值落在拒绝域内,我们拒绝原假设并且得出结论:备择假设 H_a 是对的。在原假设 H_0 正确的情况下,假设检验过程导致结论不正确的概率只有 α ,这是一个小概率事件。

反之,若检验统计量 z 的数值计算结果没有落在拒绝域内,我们不拒绝原假设 H_0 ,这样我们保留关于哪个假设正确的判断,维持现状,直到有令人信服的证据表示原假设 H_0 是错误的。

2 失效率分析

2.1 数据清洗

失效率评估可以在失效模式、设备/航线可更换单元(line replaceable unit,简称 LRU)、系统等多个层级开展,其中以失效模式层级为最小颗粒度的失效率评估。对获取的航线运营、试验、试飞数据,并不能直观地从中识别引起故障的故障模式,甚至是故障设备,需要开展相关数据清洗工作,具体包括:

1) 对航线运营、试验、试飞过程中发生的事件,去除重复事件,梳理出其中与工程设计相关的故障事件;

2) 判断故障事件中的关联系统航线可更换单元,补充飞行时间和起落架次;

3) 对故障事件,分析其故障原因、对应LRU的故障失效模式,输出航线运营、试验、试飞中的失效模式清单。

2.2 失效模式分析

基于数据清洗得到实际失效模式清单后,结合理论失效模式库,可判断实际发生的失效模式与理论失效模式是否一致。若有不包含在理论失效模式库中的失效模式发生,则需开展相关分析工作,主要包括:

1) 更新理论失效模式:将实际失效模式清单中存在而理论失效模式库中未包含的失效模式添加到理论失效模式库;

2) 更新失效模式失效率和部件失效率:分析新添加到理论失效模式库的失效模式失效率,并更新到所涉及的部件失效模式失效率和部件失效率。

2.3 失效率计算

针对每一种失效模式(failure mode,简称FM),失效模式*i*记为 FM_i ,其平均失效模式间隔时间的计算方法如公式(5)所示:

$$T_{FB_i} = \frac{1}{N_i} \sum_{k=0}^{N_i} t_k \quad (5)$$

式中: T_{FB_i} 为失效模式*i*的平均失效模式间隔时间,单位为h; N_i 为统计时间内,失效模式*i*发生的次数; t_k 为第*k*次失效模式*i*发生后的累计工作时间,单位为h。

失效模式*i*的失效率的计算方法如公式(6)所示:

$$\lambda_{FM_i} = \frac{1}{T_{FB_i}} \quad (6)$$

式中: λ_{FM_i} 为失效模式*i*的失效率, $1 \times 10^{-6}/h$ 。

2.4 LRU失效率

LRU失效率,即对该LRU所有失效模式的失效率进行求和,计算方法如公式(7)所示:

$$\lambda_{LRU} = \sum_i \lambda_{FM_i} \quad (7)$$

式中: λ_{LRU} 为LRU失效率, $1 \times 10^{-6}/h$ 。

3 失效率的假设检验

3.1 提出假设

失效率属于典型的望小型特性指标,其失效率 λ (λ_{LRU} 或 λ_{FM})的假设检验应选择上侧检验,其原假设和备择假设分别为:

1) 原假设(H_0): $\lambda \leq \lambda_0$ (即失效率符合要求, λ_0 为供应商提供的理论值);

2) 备择/研究假设(H_a): $\lambda > \lambda_0$ (即失效率不符合要求)。

3.2 统计量和显著性水平

检验统计量 z 如公式(8)所示:

$$z = \frac{\bar{\lambda} - \lambda_0}{\sigma / \sqrt{n}} \quad (8)$$

式中: $\bar{\lambda}$ 为样本统计量,即样本($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n$)的均值。

通常失效率 λ 的标准差 σ 未知,检验统计量的计算如公式(9)所示:

$$z = \frac{\bar{\lambda} - \lambda_0}{\sigma / \sqrt{n}} \approx \frac{\bar{\lambda} - \lambda_0}{s / \sqrt{n}} \quad (9)$$

式中: s 为样本集($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n$)的标准差。其计算公式如公式(10)所示:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2} \quad (10)$$

上式带入公式(9)中,即可转化为:

$$z \approx \frac{n(\bar{\lambda} - \lambda_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}} \quad (11)$$

选择 $\alpha = 0.05$ 为检验的显著性水平,则拒绝域为: $z > 1.645$ 。

3.3 失效率假设检验结果

根据假设检验方法的结论,可以判定评估对象(设备、失效模式、LRU等)失效率的假设检验结果。

若检验统计量 z 的数值落在拒绝域内,则拒绝原假设 H_0 并且得出结论:备择假设 H_a 是对的,即失效率 λ 不符合要求。因此,有充分的证据表明该设备的失效率不符合设计阶段提出的要求,并据此要求供应商做出调整工作,如对该零部件进行可靠性增长,从而降低飞机失效率,提升飞机的可靠性水平。

反之,则不拒绝原假设,保留关于哪个假设正

确的判断,维持现状,即认为失效率满足飞机设计阶段提出的要求,直到有令人信服的证据表示原假设 H_0 是错误的。

4 算例分析

4.1 假设检验方法选择

以某相似机型的运营故障数据为例,开展设备级(结冰探测器)失效率的评估。结冰探测器失效率参考设计值($38.051 \times 10^{-6}/\text{FH}$),即取 $\lambda_0 = 38.051 \times 10^{-6}/\text{FH}$ 。

对该机型飞机结冰探测器历年故障数据进行数据清洗,得到该设备的故障情况如表 2 所示。

表 2 结冰探测器历年故障情况

| 时 间 | 月飞行时间 /FH | 发生次数 | 失效率 /($1 \times 10^{-6}/\text{FH}$) |
|-------------|-----------|------|---------------------------------------|
| 2012 年 1 月 | 77 516.48 | 3 | 38.70 |
| 2012 年 2 月 | 70 920.96 | 1 | — |
| 2012 年 3 月 | 69 121.12 | 2 | 28.93 |
| 2012 年 4 月 | 70 121.92 | 2 | 28.52 |
| 2012 年 5 月 | 78 069.12 | 2 | 25.62 |
| 2012 年 6 月 | 76 692.16 | 4 | 52.16 |
| 2012 年 7 月 | 77003.60 | 1 | — |
| 2012 年 8 月 | 78 923.36 | 3 | 38.01 |
| 2012 年 9 月 | 83 593.84 | 1 | — |
| 2012 年 10 月 | 84 762.40 | 2 | 23.60 |
| 2012 年 11 月 | 79 854.96 | 2 | 25.05 |
| 2012 年 12 月 | 78 437.20 | 3 | 38.25 |
| 2013 年 1 月 | 78 641.48 | 3 | 38.15 |
| 2013 年 2 月 | 72 045.96 | 1 | — |
| 2013 年 3 月 | 70 246.12 | 2 | 28.47 |
| 2013 年 4 月 | 71 246.92 | 1 | — |
| 2013 年 5 月 | 79 194.12 | 4 | 50.51 |
| 2013 年 6 月 | 77 817.16 | 2 | 25.70 |
| 2013 年 7 月 | 78 128.60 | 3 | 38.40 |
| 2013 年 8 月 | 80 048.36 | 2 | 24.98 |
| 2013 年 9 月 | 84 718.84 | 2 | 23.61 |
| 2013 年 10 月 | 85 887.40 | 2 | 23.29 |
| 2013 年 11 月 | 80 979.96 | 3 | 37.05 |

表2(续)

| 时 间 | 月飞行时间 /FH | 发生次数 | 失效率 /($1 \times 10^{-6}/\text{FH}$) |
|-------------|-----------|------|---------------------------------------|
| 2013 年 12 月 | 79 562.20 | 2 | 25.14 |
| 2014 年 1 月 | 78 404.48 | 2 | 25.51 |
| 2014 年 2 月 | 71 808.96 | 2 | 27.85 |
| 2014 年 3 月 | 70 009.12 | 2 | 28.57 |
| 2014 年 4 月 | 71 009.92 | 3 | 42.25 |
| 2014 年 5 月 | 78 957.12 | 3 | 38.00 |
| 2014 年 6 月 | 77 580.16 | 2 | 25.78 |
| 2014 年 7 月 | 77 891.60 | 3 | 38.52 |
| 2014 年 8 月 | 79 811.36 | 2 | 25.06 |
| 2014 年 9 月 | 84 481.84 | 3 | 35.51 |
| 2014 年 10 月 | 85 650.40 | 2 | 23.35 |
| 2014 年 11 月 | 80 742.96 | 3 | 37.15 |
| 2014 年 12 月 | 79 325.20 | 2 | 25.21 |

注:“—”表示该月数据不符合条件,不计算该月部件失效率。

4.2 假设检验结果

对结冰探测器失效率的假设检验,其原假设和备择假设为:

1) 原假设: $\lambda \leq 38.051 \times 10^{-6}/\text{FH}$ (即供应商提供的结冰探测器符合失效率指标要求);

2) 备择(研究)假设: $\lambda > 38.051 \times 10^{-6}/\text{FH}$ (即供应商提供的结冰探测器不符合失效率指标要求)。

选择检验的显著性水平 α 为 0.05,则检验统计量 z 的拒绝域为: $z > 1.645$ 。

依据公式(2)计算得到结冰探测器失效率的样本均值为 32.45;表 2 中该设备失效率的有效样本数为 31;依据公式(12)计算得检验统计量 z 为-0.56。

因此,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时,检验统计量 z 的数值结果(-0.56)没有落在拒绝域($z > 1.645$)内,我们不拒绝原假设 H_0 ,维持现状,直到有令人信服的证据表示原假设是错误的,即该型号飞机的结冰探测器的失效率是满足其指标在飞机研制阶段的设计要求。

但若我们仅从表 2 中各月计算得到的该设备失效率的样本值来看,大于该设备失效率设计值的观

测值有7个,小于设备失效率设计值的观测值有24个,直观上来看无法得出任何可信的结论。

5 结论

1) 基于航线运营、试飞、试验故障数据开展特性指标的评估,即为典型地根据样本来推断总体的场景,但简单地由样本统计量的结果来直接推断总体的水平总会带有误差;

2) 假设检验方法,作为一种根据样本推断总体水平的数理统计方法,可以在不同显著性水平上判断数据的显著性差异,得出科学的结论^[9-10];

3) 在民机特性指标评估领域,根据评估对象符合要求的假设选择作为原假设的原则,望小型特性指标,如失效率选择上侧检验,望大型指标选择下侧检验。

参考文献:

- [1] 卞为梅. 假设检验在质量体系认证中的应用[J]. 化工时刊, 2004, 18(4): 52-54.
[2] 周建男, 徐风珍. 假设检验方法在产品开发中的应用

[J]. 中国质量, 2006(7): 76-77.

- [3] 拉森, 法伯. 工商管理经典译丛: 基础统计学: 第4版 [M]. 刘超, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2014: 235-236.
[4] 任永泰. 关于假设检验中原假设的提出[J]. 大学数学, 2005, 21(5): 121-124.
[5] 李晓红. 假设检验中原假设的选取问题[J]. 平原大学学报, 2006, 23(6): 122-124.
[6] 麦克拉夫, 本森, 辛西奇. 商务与经济统计学: 第12版 [M]. 易丹辉, 李扬, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2015: 234-237.
[7] 董光辉, 赵柳入, 黄海波, 等. 假设检验在供应商变更中的应用[J]. 中国药事, 2017, 31(10): 1142-1146.
[8] 王创. 统计假设检验中显著性水平 α 的选择[D]. 兰州, 兰州商学院, 2013: 9-10.
[9] 李滢, 张惠卿, 时涛. 参数检验相关问题分析[J]. 泰山医学院学报, 2008, 29(2): 141-142.
[10] 安胜利. 假设检验应用中的常见问题及改进方法[J]. 南方医科大学学报, 2007, 27(3): 382-383, 389.

作者简介

郑勇乐 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 数据分析。E-mail: zhengyongle@comac.cc

Failure rate evaluation method based on fault data and hypothesis testing

ZHENG Yongle *

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Characteristic (reliability, safety, maintainability, testability, etc.) indicators of civil aircraft directly determine the level of safety, reliability and economy of the aircraft, and also directly affect the competitiveness of the aircraft in the market. The conclusion of the evaluation of characteristic indexes based on fault data can effectively assess whether the parts provided by suppliers meet the requirements put forward at the design stage. The application of the hypothesis testing method in the evaluation of civil aircraft characteristic indexes is investigated. Taking the failure rate of the reliability index, which is of most concern to the main manufacturers and airlines, as an example, an assessment method of the failure rate based on fault data and hypothesis testing is proposed, and a sample analysis is carried out using the proposed hypothesis testing method in combination with the fault data of the equipment in the operation of a certain type of aircraft.

Keywords: civil aircraft; fault data; failure rate; hypothesis testing; index evaluation

* Corresponding author. E-mail: zhengyongle@comac.cc