

# 基于历史数据的民机电子设备可靠性预计

杨 丽\*

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

**摘 要:** 针对传统相似分析法难以准确地定量评估目标产品和相似产品间可靠性水平的差异程度及可信度较低的问题, 综合考虑产品的相似水平和样本量提出两种新的民机电子设备可靠性预计方法。一种是基于区间层次分析法 (analytic hierarchy process, 简称 AHP) 确定可靠性修正因子, 将模糊信息定量化, 提高预计结果的精确性。另一种是基于手册或故障物理 (physics of failure, 简称 PoF) 模型确定可靠性修正因子, 引入设备重要度等级和置信度的关联性概念, 实现了小样本量分级分类开展产品可靠性预计, 提高了相似产品法的精确度和可信度。

**关键词:** 可靠性预计; 民机电子设备; 相似分析法; 修正因子; 置信度

中图分类号: V243

文献标志码: A



## 0 引言

民用飞机设备失效率数据是飞机安全性可靠性工作的基础数据, 对系统级、飞机级安全性可靠性工作都有着重要影响, 因此, 确保民机设备失效率数据的可信性至关重要。目前, 常用的电子设备失效率预计方法包括手册/标准、历史数据、可靠性试验和可靠性模型等。其中历史数据的成本最小且可信性最高, 但是由于历史设备和目标设备可能存在差异, 因此在采用历史数据预计失效率时需开展相似性分析。

产品相似性分析是基于与目标产品相似的历史产品的可靠性数据来评估目标产品的可靠性。因为目标产品是在历史产品的基础上继承发展的, 要求将目标产品和历史产品间的相似性正确地评价出来<sup>[1]</sup>。但实际工作中, 民机电子设备可靠性水平的影响因素较为复杂, 目标设备与历史设备之间的可靠性差异水平难以被定量评估。而当前阶段在其他工程领域, 文献[2]和文献[3]提出的层次分析法 (analytic hierarchy process, 简称 AHP) 可以很好地解决上述难题。

基于以上分析, 本文引入 AHP 方法, 来定量评估相似设备和目标设备之间的可靠性差异程度, 以确定可靠性修正因子, 此方法可以有效提高预计结果的准确性。但是该方法对历史数据样本量有一定要求。因此, 在此基础上创新, 提出另一种基于手册或故障物理 (physics of failure, 简称 PoF) 相似产品可靠性预计方法, 此方法是将手册或模型与历史数据结合进行设备可靠性预计, 具体是在使用历史数据的基础上, 借助手册或模型预计元器件失效率来确定修正因子, 以实现小样本量产品失效率预计。该方法不仅弥补了 AHP 法样本量要求高的缺陷, 同时保证了预计指标的精确度和可信度。

## 1 基于历史数据的可靠性预计流程

根据产品的相似水平和样本量, 本文采用两种方法确定可靠性修正因子, 一种使用 AHP, 另一种是基于手册或 PoF 模型, 上述两种方法的预计流程如图 1 所示, 具体包括以下步骤。

1) 开展产品相似性定性分析和样本量评估, 主要内容如下:

\* 通信作者. E-mail: yangli3@comac.cc

引用格式: 杨丽. 基于历史数据的民机电子设备可靠性预计[J]. 民用飞机设计与研究, 2023(4): 107-112. YANG L. Reliability prediction for civil aircraft electronic equipment based on historical data[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(4): 107-112 (in Chinese).

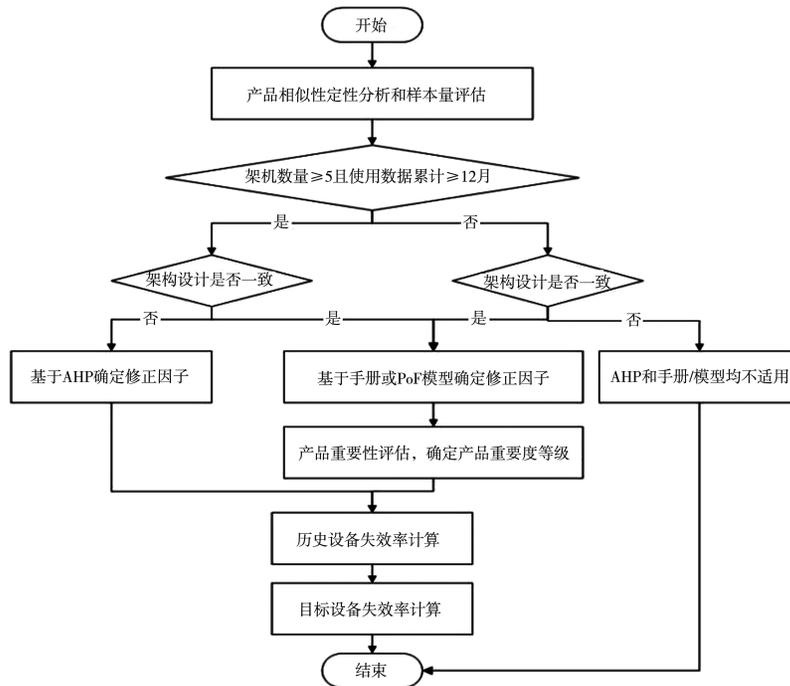


图 1 基于历史数据的可靠性预计流程

a) 样本量评估是指对历史数据量的评估, 数据量分为满足架机数量大于等于 5 架机, 且使用数据量统计可累计 12 个月(需能反映出季节和环境因素的影响)的情况和不满足的情况。

b) 产品相似性定性分析是指架构设计相似性分析:包括设备工作原理是否一致、设备可靠性框图是否一致、选用元器件种类和数量是否一致。

c) 两种方法的选用说明详见表 1。针对 AHP 和手册/PoF 模型方法均适用的情况, 由于手册/PoF 模型方法精确度更高且计算过程更加简便, 因此使用该方法的优先级高于 AHP。

表 1 AHP 和手册/PoF 模型方法选用说明

样本量评估结果	架构设计相似性分析结果	方法选用结果
满足要求	设备工作原理、可靠性框图和选用元器件种类和数量均一致	AHP 和手册/PoF 模型均适用
满足要求	设备工作原理、可靠性框图和选用元器件种类和数量有不一致的情况存在	AHP
不满足要求	设备工作原理、可靠性框图和选用元器件种类和数量均一致	手册/PoF 模型

表1(续)

样本量评估结果	架构设计相似性分析结果	方法选用结果
不满足要求	设备工作原理、可靠性框图和选用元器件种类和数量有不一致的情况存在	AHP 和手册/PoF 模型均不适用(该情况, 本文不做讨论)

2) 确定修正因子, 一个是采用 AHP 确定修正因子, 一个是采用手册或 PoF 模型确定。其中采用手册/PoF 模型法, 需进行产品重要性评估, 明确设备重要度等级。

3) 基于历史数据开展历史产品失效率计算。

4) 依据历史设备失效率和修正因子, 计算目标设备失效率。

## 2 基于 AHP-相似产品的可靠性预计

### 2.1 建立产品相似程度评价模型

民用飞机产品相似性分析需综合评估产品功能和架构设计相似程度、设计要求相似程度、制造的相似程度和使用环境的相似程度等, 但在实际工作中发现, 上述影响因素的差异程度很难准确评定, 需进行量化才具有工程可操作性。因此可利用 AHP 建立产品相似程度评价模型, 将上述影响因素

进行量化,以求解修正因子。

该层次模型包含三层,依次为目标层、准则层和指标层<sup>[4]</sup>。其中第二层准则层一般包含功能和架构、设计要求、制造装配以及环境适应性,建立模

型时可根据具体产品进行删减和补充,建立对应的影响因素集,而指标层是准则层每个因素下的若干个子因素。图2是依据上述方法建立的某电子设备的可靠性修正因子评价模型。

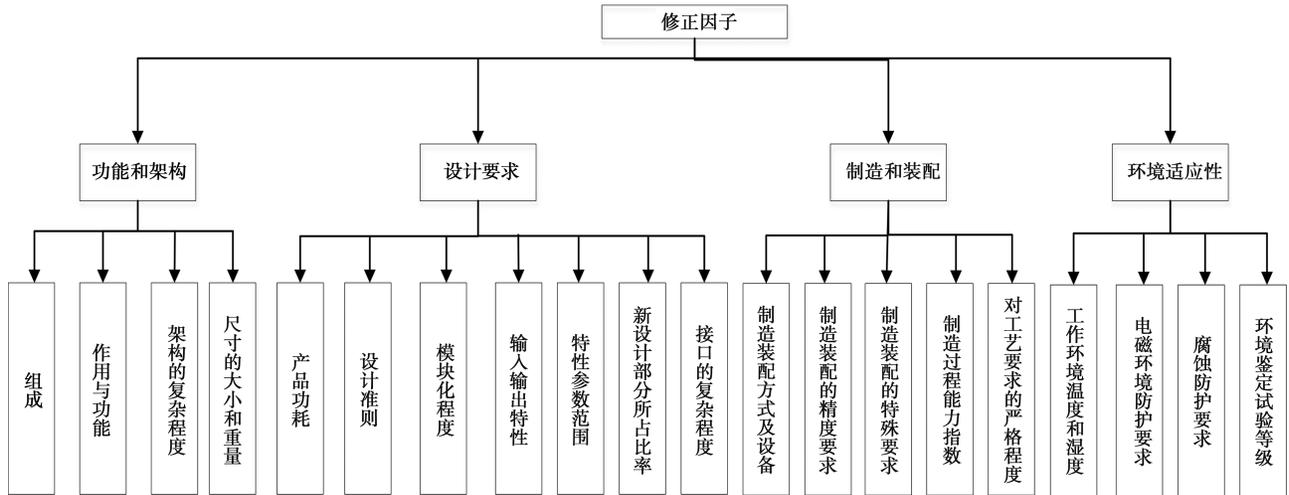


图2 某电子设备可靠性修正因子评价模型

### 2.2 确定准则层各个类因素的权重

确定各个类因素的权重,即在修正因子综合评价过程中,考虑各个类因素对目标的影响大小,并以此赋予不同权重。可采用专家打分法给出综合评价结果。根据专家意见,按照1~9标度<sup>[5]</sup>(详见表2)以区间数 $\tilde{a}_{mn} = [a_{mn}^-, a_{mn}^+]$ 对相对重要度赋值,构建各个类因素对目标的比较判断矩阵<sup>[4]</sup>,如公式(1)所示。

$$\tilde{A} = (\tilde{a}_{mn})_{4 \times 4} = [A^-, A^+] \quad (1)$$

式中: $\tilde{a}_{mn} = [a_{mn}^-, a_{mn}^+]$ 表示第 $m$ 个类因素与第 $n$ 个类因素相对于目标的重要性的比值,取值范围为 $[1 \sim 9]$ 或其相应的倒数;其中 $1 \leq m \leq 4, 1 \leq n \leq 4$ ;  $A^- = (a_{mn}^-)_{4 \times 4}, A^+ = (a_{mn}^+)_{4 \times 4}$ 。

本文根据徐玖平等人<sup>[6]</sup>提出的方法计算各个类因素权重向量,其中 $A^-、A^+$ 的权重向量记为 $x^-、x^+$ ,则 $A$ 的区间数权重向量为:

$$\tilde{z} = (\tilde{z}_m)_{1 \times 4} = [\alpha x^-, \beta x^+] \quad (2)$$

$$\text{式中: } \alpha = \left[ \frac{4}{\sum_{n=1}^4 \frac{1}{\sum_{m=1}^4 a_{mn}^+}} \right]^{\frac{1}{2}}, \beta = \left[ \frac{4}{\sum_{n=1}^4 \frac{1}{\sum_{m=1}^4 a_{mn}^-}} \right]^{\frac{1}{2}}。 \text{—}$$

一般情况下, $0 < \alpha < 1 < \beta$ 时,该区间判断矩阵一致性较好,即可采用<sup>[4]</sup>。

表2 重要性标度值定义表

标度	含 义
1	两个元素相比,同样重要
3	两个元素相比,前者稍微重要
5	两个元素相比,前者明显重要于后者
7	两个元素相比,前者强烈重要于后者
9	两个元素相比,前者极端重要于后者
2,4,6,8	相邻两判断的中间值
倒数	若 $i, j$ 的重要性之比为 $a_{ij}$ ,则 $j$ 与 $i$ 的重要性之比为 $1/a_{ij}$

### 2.3 确定指标层各因素的权重并判断差异程度

指标层各因素权重确定方法与准则层确定权重的方法相同,其向量权重区间如式(3)所示:

$$\tilde{z}_m = (\tilde{z}_{my})_{1 \times s} = [\alpha_m x_m^-, \beta_m x_m^+] \quad (3)$$

式中: $z_{my}$ 指第 $m$ 个类因素下第 $y$ 个子因素的权重,其中 $1 \leq m \leq 4; s$ 指第 $m$ 个类因素下子因素的个数。

指标层差异程度的确定是对比该层目标产品与历史产品之间每个子因素的差异程度,亦是赋值1~9的区间数或其倒数<sup>[4]</sup>,如 $\tilde{H}_{my} = [H_{my}^-, H_{my}^+]$ 所示,其中

$\tilde{H}_{my}$ 为第 $m$ 个类因素下第 $y$ 个子类因素的差异程度。在确定了子因素权重向量和差异程度向量后,

则第  $m$  个类因素的差异程度  $C_m$  的计算公式如式(4)所示:

$$\tilde{C}_m = \sum_{y=1}^s (\tilde{z}_{my} \cdot \tilde{H}_{my}) \quad (4)$$

式中: $\tilde{z}_{my}$  指第  $m$  个类因素下第  $y$  个子因素的权重; $H_{my}$  指第  $m$  个类因素下第  $y$  个子类因素的差异程度。

将权重  $\tilde{z}_m$  和差异程度  $\tilde{C}_m$  代入公式(5),即可计算得出第  $j$  个相似设备的修正因子  $\tilde{\theta}_j$ 。

$$\tilde{\theta}_j = \frac{\sum_{m=1}^4 (\tilde{C}_m \cdot \tilde{z}_m)}{\sum_{j=1}^w \sum_{m=1}^4 (\tilde{C}_m \cdot \tilde{z}_m)} \quad (5)$$

式中: $w$  指相似设备的个数。

由式(5)求取的修正因子  $\tilde{\theta}_j = [\theta_j^-, \theta_j^+]$  是区间数,一般情况下可直接取其上下限均值为修正因子具体值  $\theta_j$ 。

### 2.4 设备失效率计算

采用该方法进行设备失效率计算时,无需考虑失效时间是否服从指数分布,只需计算出所有历史设备的平均故障率,即可计算得到目标设备的失效率。

基于历史数据开展设备失效率计算,其中第  $j$  个设备的平均失效率  $\bar{\lambda}_{his(j)}$  计算公式为:

$$\bar{\lambda}_{his(j)} = \int_0^T \lambda(t) dt / T_j \quad (6)$$

式中: $T_j$  指第  $j$  个设备的飞行时间。在确定了历史设备失效率和修正因子后,即可开展目标设备失效率  $\bar{\lambda}_{pre}$  计算,若共有  $w$  个相似设备,具体计算方法见公式(7)。

$$\bar{\lambda}_{pre} = \frac{1}{w} \sum_{j=1}^w (\bar{\lambda}_{his(j)} / \theta_j) \quad (7)$$

## 3 基于手册/PoF 相似产品的可靠性预计

### 3.1 确定修正因子

针对历史使用设备与目标设备使用环境和工作状态差异,包括但不限于电压、机械应力、温度、湿度、振动、载荷、污染条件等,根据手册或 PoF 模型,确定设备中各元器件的失效率变化,并求得取值,进而计算得出修正因子  $\theta$ ,计算方法见公式(8)和公式(9)。

$$\theta = \max_{1 \leq k \leq n} \theta_k \quad (8)$$

$$\theta_k = \frac{\lambda_k^1}{\lambda_k^0} \quad (9)$$

式中: $\theta$  为修正因子,基于保守性考虑选取  $\theta_k$  中的最大值,一般情况下  $\theta \geq 1$ ;  $\theta_k$  指目标设备和历史设备中第  $k$  个元器件的失效率比; $\lambda_k^1$  为根据手册或 PoF 模型得出的第  $k$  个元器件在目标设备中的失效率。其中手册预计和 PoF 模型使用方法可参考文献 [7-10];  $\lambda_k^0$  为第  $k$  个元器件在历史设备中的失效率。

### 3.2 确定置信度和历史设备失效率计算

假设设备失效时间服从指数分布,则按公式(10)、(11)、(12)求解出历史设备失效率区间  $\lambda_{his} = [\lambda_{low}, \lambda_{high}]$ 。

$$\lambda_{high} = \frac{\chi_{2(r+1), \alpha}^2}{2T} \quad (10)$$

$$\lambda_{low} = \frac{\chi_{2r, 1-\alpha}^2}{2T} \quad (11)$$

其中:

$$T = \sum_i N_i T_i \quad (12)$$

式中: $\chi^2$  为卡方分布; $r$  为该故障模式的发生次数; $\alpha$  为显著性水平,介于 0 与 1 之间; $T$  为飞机运行时间的统计时长; $N_i$  为设备在第  $i$  架机的装机数量; $T_i$  为第  $i$  架机的飞行小时; $\lambda_{high}$  为失效率区间最大值; $\lambda_{low}$  为失效率区间最小值。

历史设备失效率  $\lambda_{his} = [\lambda_{low}, \lambda_{high}]$  是区间数,为降低预计的风险程度,民机设备不建议采用乐观估计值,因此历史设备失效率选取悲观估计值  $\lambda_{high}$ 。

由于不同等级设备对飞机产生的影响不同,因此不同设备的失效率的置信水平选择也存在差异<sup>[11]</sup>,设备等级和置信度选择关系如表 3 所示。

表 3 设备等级和置信度对应关系

分类	解释说明	重要度等级	置信度要求	备注
关键件及候选项	I 类 2 阶	a	≥90%	影响安全
	其他	b	≥80%	
重要件及候选项	重要件指有重要特性而不具有关键特性的零部件	c	≥60%	

表3(续)

分类	解释说明	重要度等级	置信度要求	备注
影响签派的设备	影响签派的设备,且非 MMEL 项,或在 MMEL 清单中但单个设备故障不能派遣	d	≥60%	—
其他设备	除上述外的其他设备	其他	≥40%	—

### 3.3 设备失效率计算

依据设备等级和置信度对应关系表,确定历史设备失效率。若设备重要度等级为 a 类,则其置信度要求大于等于 90%,假设置信度为 90%,由于是单边估计,则  $\alpha$  取值 0.1。将其代入公式(9)和(10),即可求解出历史设备失效率  $\lambda_{his(\alpha=0.1)} = \lambda_{high(\alpha=0.1)}$ 。

在确定了历史设备失效率  $\lambda_{his}$  和修正因子后,目标设备失效率指标预计值计算公式见公式(13)。

$$\lambda_{pre} = \lambda_{his} \times \theta \quad (13)$$

式中: $\lambda_{his}$  为历史数据得到的设备失效率估计值; $\lambda_{pre}$  为目标设备失效率预计值; $\theta$  为修正因子。

## 4 应用实例

以某型飞机电源系统电子设备 60 Hz 逆变器为例,采用基于手册-相似产品可靠性预计方法进行该设备失效率预计。具体预计过程如下:

1) 计算历史设备失效率。已知某型飞机该设备实际故障次数 7 次,在所有机型的累计飞行时间为 150 000 h。由于该电子设备重要度等级为“其他”,选择 40% 置信度区间。因此根据公式(10)和(12),可算得出该电子的历史数据失效率为  $9.32 \times 10^{-5}$ 。

2) 确定修正因子。逆变器由输入滤波器、DC 板部件、AC 板部件、输出滤波器等主要部件组成。应用在目标机型上的产品相较历史设备架构设计未发生变化,元器件的种类和数量也相同,但工作环境和系数存在差异。其中对该设备影响较大的元器件是石英晶体谐振器和低压差稳压器,其相关信息见表 4,根据公式(9)计算出  $\theta_k$  分别为 1.064 4 和 0.972 4,基于保守估计,选取最大的  $\theta_k$  值,因此修正因子为 1.064 4。

表 4 基于手册新元器件预计结果

元器件名称	元器件类别	数量	质量等级	Pi 值系数	新设备元器件故障率	历史元器件故障率
石英晶体谐振器	石英	2	N/A	1Base=0.35	0.705 0	0.745 1
				PI_E=10 PI_Q=0.2		
低压差稳压器	集成电路	2	N/A	PI_E=10 PI_Q=0.25 PI_T=6.14	0.765 3	0.744 2
				PI_V1=1 PI_L=1		
				PI_IC1=0.427 2		
				PI_IC2=0.040 6		
				PI_IC3=0.003 2		

3) 目标设备失效率计算:基于以上计算结果,将历史设备失效率和修正因子代入公式(13),即可得到目标设备失效率为  $9.92 \times 10^{-5}$ 。

## 5 结论

研究基于历史数据开展民机电子设备可靠性指标预计的方法:

1) 与传统相似分析法相比,提出了两种新的相似产品可靠性预计方法,很好地解决了无法准确地定量评估新老产品间可靠性水平差异以及传统方法预计精确度低的难题,大大地提高了历史数据的使用价值,降低了民机电子设备可靠性预计成本。

2) 基于功能和架构、设计要求、制造装配、环境适应性等因素的综合影响,建立了民机电子设备可靠性修正因子评价模型。该模型有助于确定更加准确的修正因子,从而提高了目标产品失效率预计结果的精确性。

3) 将手册或 PoF 模型和历史数据结合使用,同时建立了设备重要度等级和置信度的关联性,实现了小样本量分级分类开展产品可靠性预计,提高了相似产品法的精确度和可信度。

### 参考文献:

[ 1 ] 卓红艳. 基于相似产品信息的某系统任务可靠性预计方法[J]. 兵工自动化. 2014,33(6): 8-10,15.  
 [ 2 ] 赵嘉媛. 基于 AHP-相似产品法的水下液力机械手直流无刷电机可靠性预计[J]. 现代制造技术与装备, 2020,56(12): 67-70.  
 [ 3 ] 杨兆军,郝庆波,陈菲,等. 基于区间分析的数控机床

- 可靠性模糊综合分配方法[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(3): 321-329.
- [4] 郝庆波, 杨兆军, 陈菲, 等. 基于改进的相似比较法的加工中心可靠性预计[C]//中国机械工程学会可靠性工程分会. 2012年全国机械行业可靠性技术学术交流会暨第四届可靠性工程分会第四次全体委员大会论文集. [出版地不详;出版社不详], 2012.
- [5] 高羨明, 洪军, 刘瑞萍, 等. 多准则数控机床模块谱系聚类的划分方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 131-136.
- [6] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 285-287.
- [7] 中国人民解放军总装备部. 电子设备可靠性预计手册; GJB/Z 299C-2006[S/OL]. [2023-10-16]. <https://www.doc88.com/p-99439757657258.html>.
- [8] U. S. Department of Defense. Military handbook; reliability prediction of electronic equipment: MIL-HDBK-217F[M]. [S. l. ;s. n. ], 1991.
- [9] 王强, 吴海容, 陈晓晨. 基于故障物理的航空电子设备高可靠性评估[J]. 航天器环境工程. 2016, 33(2): 216-219.
- [10] 王云, 邵将, 曾晨晖, 等. 航空电子产品基于故障物理的可靠性工程技术[C]//中国航空学会. 探索 创新 交流(第4集): 第四届中国航空学会青年科技论坛. 北京: 航空工业出版社, 2010: 85-87.
- [11] 中国人民解放军总装备部. 可靠性鉴定和验收试验: GJB 899A-2009. [2023-10-16]. <https://max.book118.com/html/2022/0403/6003104222004131.shtml>.

#### 作者简介

杨丽 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 民用飞机使用数据和可靠性设计。E-mail: yangli3@comac.cc

## Reliability prediction for civil aircraft electronic equipment based on historical data

YANG Li \*

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

**Abstract:** In response to the problem of traditional similarity analysis method that are difficult to accurately quantitatively evaluate the degree of difference and low reliability between the target product and similar products, this paper proposes two new reliability prediction methods for civil aircraft electronic equipment, taking into account the similarity level and sample size of the product. A method of using interval analytic hierarchy process (AHP) to determine reliability correction factor can quantify fuzzy information and improve the accuracy of expected result. One approach is to use handbook or physics of failure (PoF) model to determine reliability correction factor, as well as introduce the concept of correlation between equipment importance level and confidence, to achieve small sample size classification for product reliability prediction, improving the accuracy and credibility of similarity analysis method.

**Keywords:** reliability prediction; electronic equipment of civil aircraft; similarity analysis method; correction factor; confidence

\* Corresponding author. E-mail: yangli3@comac.cc