

doi: 10.7690/bgzd.2019.11.019

# 无人机可靠性验收方法

姚云峰<sup>1</sup>, 于磊<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 92419 部队, 辽宁 兴城 125100; 2. 中国人民解放军 91315 部队, 辽宁 大连 116305)

**摘要:** 为确保无人机产品的质量, 对无人机可靠性验收方法进行研究。依据无人机可靠性试验的统计特点, 建立无人机任务可靠性和基本可靠性模型, 采用《可靠性鉴定和验收试验》中短时高风险定时试验方案, 对无人机故障进行定义, 确定了无人机环境因子的取值, 给出了无人机任务可靠性和基本可靠性的验收方法, 并应用到某型无人机可靠性验收试验中。验证结果表明, 该方法对无人机产品可靠性验收具有一定借鉴意义。

**关键词:** 无人机; 任务可靠度; 致命性故障间隔任务时间; 平均故障间隔时间; 短时高风险定时试验

**中图分类号:** TP202<sup>+</sup>.1 **文献标志码:** A

## Reliability Acceptance Method for UAV

Yao Yunfeng<sup>1</sup>, Yu Lei<sup>2</sup>

(1. No. 92419 Unit of PLA, Xingcheng 125100, China; 2. No. 91315 Unit of PLA, Dalian 116305, China)

**Abstract:** In order to ensure the quality of UAV, the reliability acceptance method is studied. According to the statistical characteristics of UAV reliability testing, the mission reliability model and the basic reliability model of UAV are established; by the short-term and high-risk time terminated testing program of *Reliability testing for qualification and production acceptance*, the failure of UAV is defined, the numerical value of UAV environmental factors are established; and the acceptance methods of UAV mission reliability and basic reliability are provided. Then this method is applied to the reliability acceptance testing of certain type UAV. The test results show that the method has some reference value to the reliability acceptance of UAV products.

**Keywords:** UAV; mission reliability; mean time between critical failures; mean time between failures; short-term and high-risk time terminated testing

### 0 引言

可靠性是指产品在规定的条件下和时间内, 完成规定功能的能力。可靠性的概率度量称为可靠度。从设计的角度出发, 可靠性可分为基本和任务可靠性。基本可靠性即产品在规定条件下无故障的持续时间或概率, 用于度量产品无需保障的工作能力, 通常用平均故障间隔时间 (mean time between failures) 来度量。任务可靠性即产品在规定的任务剖面中完成规定功能的能力, 用于描述产品完成任务的能力, 通常用任务可靠度 (mission reliability) 和致命性故障间隔任务时间 (mean time between critical failures) 来度量<sup>[1]</sup>。

无人机产品在研制阶段通常明确其任务可靠度和平均故障间隔时间的规定值。无人机研制完毕后, 需进行必要的地面和空中飞行试验, 对无人机可靠性指标进行验收, 确保无人机质量合格。由于可靠性试验需要大量数据, 而无人机飞行试验相对复杂; 因此, 主要采用统计抽样的方法对无人机进行可靠性的验收。目前国内对于无人机可靠性验收试验方

法尚处于探索阶段, 笔者主要基于无人机样本的可靠性试验数据, 对无人机任务可靠性和基本可靠性的验收方法进行研究。

### 1 无人机可靠性模型

#### 1.1 无人机任务可靠性模型

无人机通常由机体结构、飞控导航系统、机载电气系统、动力系统、回收系统、载荷等组成。如图 1 所示, 无人机任何一个分系统发生故障, 都将导致无人机飞行任务失败; 因此, 无人机任务可靠性模型是无人机上各分系统的串联模型。

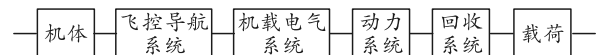


图 1 无人机任务可靠性

无人机任务可靠性数学模型可表示为:

$$R_{\text{无人机}} = R_{\text{机体}} \cdot R_{\text{飞控导航}} \cdot R_{\text{电气}} \cdot R_{\text{动力}} \cdot R_{\text{回收}} \cdot R_{\text{载荷}} \quad (1)$$

#### 1.2 无人机基本可靠性模型

无人机上设备众多, 分别服从于不同的寿命分布。考虑工程上需要的评估精度及效率, 对于由不

收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-08-26

作者简介: 姚云峰(1987—), 男, 河南人, 硕士, 工程师, 从事无人机应用研究。E-mail: 402936185@qq.com。

同类型和服从不同分布的产品组成的复杂系统,通常以指数分布对其进行评估或验证是保守的。同时,对于无人机单个分系统,在偶然故障期的失效率近似为常数<sup>[2]</sup>;因此,对无人机整机进行基本可靠性验收时,可按照指数分布进行。

无人机基本可靠性为机上可检测修复产品的串联模型,因此,无人机基本可靠性模型为除机体外的串联模型。基本可靠性 MTBF 为机上各分系统失效率  $\lambda$  之和的倒数。根据串联模型,其基本可靠性数学模型可表示为:

$$\lambda_{\text{无人机}} = \lambda_{\text{飞控导航}} + \lambda_{\text{电气}} + \lambda_{\text{动力}} + \lambda_{\text{回收}} + \lambda_{\text{载荷}}; \quad (2)$$

$$\text{MTBF}_{\text{无人机}} = \frac{1}{\lambda_{\text{无人机}}}。 \quad (3)$$

## 2 故障分类与环境因子

### 2.1 故障定义

故障分为责任故障和非责任故障。责任故障指各单机在试验中出现的关联的独立故障,以及由此引起的任何从属故障,是判决受试设备合格与否的依据。非责任故障不是由各单机本身所引起的故障,不属于考核范围。对无人机可靠性进行验收时,只有责任故障才计入验收的故障数,非责任故障不作为无人机可靠性考核合格与否的依据。非责任故障包括:

- 1) 安装不当、意外损坏或测试设备、辅助设备发生故障,导致无人机或机上设备失效或故障;
- 2) 由于误操作或不符合操作规程要求造成的失效或故障;
- 3) 不符合使用要求的环境条件导致的失效或故障;
- 4) 因超期使用器件使得该器件产生故障及其引发的从属故障;
- 5) 维修过程中引入的故障;
- 6) 工作时间超过规定寿命期限所引起的失效或故障;
- 7) 经证实,属某项将不再采用的设计所引起的受试产品故障。

除可以判定为非责任故障外,其他所有故障均应判定为责任故障,如:

- 1) 由于设计缺陷或制造工艺不良造成的故障;
- 2) 由于元器件或零部件潜在缺陷致使其失效造成的故障;
- 3) 间歇故障;

- 4) 超出规范的调整;
- 5) 由于软件引起的故障
- 6) 无法证实原因的异常。

### 2.2 责任故障分级与加权处理方法

造成无人机主要功能丧失,致使任务无法完成的故障,定义为一级故障。一级故障数用  $r_1$  表示,权重系数  $W_1$  取 1。

造成无人机次要功能如显示、校验等丧失的故障,定义为二级故障。二级故障数用  $r_2$  表示,权重系数  $W_2$  取 0.2。

基本上不影响无人机功能的故障,即轻微故障,定义为三级故障。三级故障数用  $r_3$  表示,权重系数  $W_3$  取 0.1。

故障加权处理公式为

$$r = r_1 \times W_1 + r_2 \times W_2 + r_3 \times W_3。 \quad (4)$$

### 2.3 环境因子

由于基本可靠性考虑的是与使用维修保障相关的因素,因此,对基本可靠性进行验收时主要是统计地面试验的各项信息,不需要考虑地面试验环境与实际飞行环境的差别,即不考虑环境因子。

对于任务可靠性,如果按照任务飞行结果进行验收,由于无人机飞行试验只有成功或失败 2 种结果,并且每次飞行试验结果在统计意义上是独立的,不受其他试验结果的影响;所以无人机飞行试验为成败型试验,不考虑环境因子。

如果采用地面试验数据结合飞行试验进行验收,由于地面常规试验环境与实际飞行试验环境差别较大,进行综合评定时,需确定环境因子对地面常规试验数据进行信息折合。由于环境因子的计算比较复杂,需要有可信的数据支持,而无人机试验信息有限;因此,如需采用地面试验数据进行任务可靠性验收,则借鉴其他型号做法。环境因子取值如下:

- 1) 实际使用环境、综合环境(可靠性试验)、力学环境: 1.0。
- 2) 环境应力筛选、自然环境: 0.8。
- 3) 静态环境(电磁兼容试验、仿真试验、模态试验,无振动): 0.05。
- 4) 静态环境(性能试验、常温测试、系统联试,无振动): 0.01。

采用相应的环境因子乘上相应的试验时间后累

加,即得到无人机可靠性验收时需用的总试验时间。

### 3 无人机可靠性验收

无人机可靠性验收通常采用抽样试验方法进行。由于抽样试验的先天弱点,研制方风险  $\alpha$  和使用方风险  $\beta$  均不可避免。即:  $\alpha$  是好产品被拒收的概率,有损于研制方的利益;  $\beta$  是不合格品被接受的概率,有损于使用方的利益<sup>[3]</sup>。

基于无人机实际飞行试验复杂,以及飞行架次限制,选取 GJB 899A—2009《可靠性鉴定和验收试验》中短时高风险定时试验方案中的第 30-2 号方案<sup>[4]</sup>如表 1 所示。

表 1 使用方风险  $\beta=30\%$  的定时试验统计方案

方案号	判决故障数		总试验时间 ( $\theta_1$ 的倍数)	鉴别比 $d$ $\alpha=30\%$
	接收	拒收		
30-2	1	2	2.44	2.22

由表可知:双方风险  $\alpha$ 、 $\beta$  均为 30% 时,鉴别比为 2.22,试验时间为 2.44  $\theta_1$ ,故障数小于或等于 1 时接收。

其中鉴别比是表述检验上限与检验下限差别程度的量,习惯用  $d$  表示,数学表达式<sup>[3]</sup>为:

$$d = \theta_0 / \theta_1 ; \quad (5)$$

或 
$$d = (1 - R_1) / (1 - R_0) . \quad (6)$$

式中:  $\theta_0$  为平均寿命的检验上限;  $\theta_1$  为平均寿命的检验下限;  $R_0$  为可靠度的检验上限;  $R_1$  为可靠度的检验下限。

#### 3.1 无人机任务可靠性验收

##### 3.1.1 按飞行架次数验收

无人机飞行任务属于成败型,任务可靠度的验收可按照二项分布进行。根据 GB4087.3—1985《数据的统计处理和解释二项分布可靠度单侧置信下限》<sup>[5]</sup>,样本大小为  $n$ ,失败数为  $F$ ,在置信水平  $\gamma$  下,可靠度  $R$  的单侧置信下限  $R_1$  按下式计算:

$$\sum_{x=0}^F \binom{n}{x} R_1^{n-x} (1 - R_1)^x = 1 - \gamma . \quad (7)$$

其中:当  $F=0$  时,  $R_1 = \sqrt[n]{1 - \gamma}$ ; 当  $F=n-1$  时,  $R_1 = 1 - \sqrt[n]{\gamma}$ 。

对于设计明确的无人机任务可靠度  $R$ ,可认为其是规定值,即为可靠度的检验上限,由鉴别比的定义可计算无人机任务可靠度的检验下限。根据无人机任务可靠度的检验下限和二项分布可靠度单侧

置信下限  $R_1$  数表<sup>[3]</sup>,即可得到相应置信水平下的样本大小(总飞行架次)、失败次数和单侧置信下限的数值,对无人机任务可靠性合格与否进行判定。

假设某型无人机任务可靠度为 0.85。对于一般的无人机装备,可取置信水平  $\gamma=0.80$ ,根据表 1 方案,鉴别比  $d$  取 2.22,则无人机任务可靠度的检验下限

$$R_1 = 1 - d(1 - R_0) = 0.667 .$$

根据二项分布可靠度单侧置信下限  $R_1$  数表<sup>[5]</sup>,可得置信水平  $\gamma=0.80$  时,无人机总飞行架次数  $n$ 、失败次数  $F$  和任务可靠度单侧置信下限  $R_1$  数值如表 2 所示。

表 2  $\gamma=0.80$  时无人机总飞行次数  $n$ 、失败次数  $F$  和任务可靠度单侧置信  $R_1$  下限数值

$n$	$F$		
	0	1	2
1	0.200 00	0.000 00	—
2	0.447 21	0.105 57	0.000 00
3	0.584 80	0.287 14	0.071 68
4	0.668 74	0.417 55	0.212 32
5	0.724 78	0.509 81	0.326 60
6	0.764 72	0.577 55	0.414 61
7	0.794 60	0.629 14	0.483 24
8	0.817 77	0.669 63	0.537 90
9	0.836 25	0.702 23	0.582 32
10	0.851 34	0.729 01	0.619 06
11	0.863 89	0.751 40	0.649 93
12	0.874 49	0.770 38	0.676 22

该型无人机任务可靠度的检验下限为 0.667,由表 2 可知,无人机任务可靠度验收合格的判据为:

无人机连续飞行 4 架次,失败 0 架次。

无人机连续飞行 8 架次,失败 1 架次。

无人机连续飞行 12 架次,失败 2 架次。

2016—2017 年,该型无人机连续飞行 4 架次,失败 0 架次,任务可靠度的单侧置信下限为 0.668 74,满足检验下限 0.667 的要求,任务可靠度验收合格。

##### 3.1.2 按 MTBCF 验收

无人机一次任务飞行时间为  $t$ ,可靠度置信下限为  $R_1$ ,无人机寿命服从指数分布,则根据

$$R_1 = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{\text{MTBCF}}}$$

$$\theta_1 = -(t / \ln R_1) . \quad (8)$$

假设某型无人机的任务可靠度为 0.85,一次任务飞行时间为 0.5 h。根据表 1,鉴别比取 2.22,任务可靠度的检验下限  $R_1$  为 0.667,则  $\theta_1 = 1.23$  h,总试验时间为:

$$T = 2.44 \theta_1 = 2.44 \times 1.23 \text{ h} = 3.01 \text{ h} .$$

统计无人机各项试验的通电工作时间，按照相应环境因子进行折算，当累计达到 3.01 h，且影响任务成败的责任故障数小于 1 个，任务可靠度指标满足要求。

### 3.2 无人机基本可靠性验收

对于设计要求的 MTBF，可认为其是规定值，即为可靠度的检验上限，由鉴别比的定义可计算无人机可靠度的检验下限<sup>[6]</sup>。根据表 1，可计算得到无人机可靠性的总试验时间。

假设某型无人机的 MTBF 设计值为 10 h，即  $\theta_0=10\text{ h}$ ，根据表 1 取  $d=2.22$ ，则平均寿命的检验下限为

$$\theta_1=\theta_0/d=4.5\text{ h}。$$

该无人机总试验时间为：

$$\theta=2.44\theta_1=10.99\text{ h}。$$

即统计该无人机在验收过程中各项地面试验和飞行试验的时间，累计达到 10.99 h，且责任故障数小于 1 时，MTBF 满足要求。

2016 年该型无人机进行验收试验时，某架无人机地面累计开机达 14 h，责任故障数为 0，则该无人机基本可靠性验收合格。

## 4 结论

笔者采用 GJB 899A—2009《可靠性鉴定和验收

\*\*\*\*\*

(上接第 66 页)

[2] 顾冬雷, 高正, 孙传伟. 无人直升机控制动态特性的频域辨识建模方法研究[J]. 南航学报, 2004(6), 688-692.

[3] 张鲁遥, 白梓永, 孙瑜, 等. 一种无人机自主航线控制策略[J]. 兵工自动化, 2018, 37(2): 39-42.

[4] KARL J. Astrom. 计算机控制系统——理论与设计[M].

试验》中短时高风险定时试验方案中的第 30-2 号方案，对无人机任务可靠性和基本可靠性验收方法进行了研究，得出以下结论：

1) 对于无人机任务可靠性，当无人机总飞行架次、失败次数和可靠度单侧置信下限满足二项分布可靠度单侧置信下限数表要求，或者对各项试验的累计通电工作时间按照相应环境因子进行折算后满足短时高风险定时试验方案中的第 30-2 号方案要求时，任务可靠性验收合格。

2) 对于无人机基本可靠性，当总试验时间和责任故障数满足短时高风险定时试验方案中的第 30-2 号方案要求时，基本可靠性验收合格。

### 参考文献：

[1] 冯静, 孙权, 罗鹏程, 等. 装备可靠性与综合保障[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2008: 29-44.

[2] 吕晓林, 朱文来. 无人机可靠性评估方法研究[J]. 宇航计测技术, 2012, 32(6): 77.

[3] 金碧辉. 系统可靠性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 22-25.

[4] GJB 899A—2009 可靠性鉴定和验收试验[S]. 2009: 97.

[5] GB 4087.3—1985 数据的统计处理和解释二项分布可靠度单侧置信下限[S]. 1985: 60-82.

[6] 沈杨杨, 杨忠, 张翔, 等. 一种倾转四旋翼无人机及其过渡段姿态控制[J]. 兵工自动化, 2018, 37(3): 82-87.

北京: 清华大学出版社, 2002: 332-380.

[5] DONALD M L. Automatic Flight Control Systems. Prentice Hall International Ltd, 1990[M]. Aeronautical Journal, 1991: 95.

[6] 顾冬雷. 无人直升机飞行控制系统的设计与实现[R]. 南航博士后出站报告, 2006.

[7] 杨磊松, 李松超. 一种小型箭射无人机外形设计与气动分析[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(6): 90-93.