

文章编号:1674-8190(2015)02-205-06

基于试验数据与使用数据融合的产品寿命 可靠性分析方法

何宇廷,高潮

(空军工程大学 航空航天工程学院,西安 710038)

摘要: 可靠性数据分析作为描述、评价产品可靠性的理论方法,已经成为可靠性工程的重要组成部分。针对产品在实际使用中存在未失效数据且数量较多的情况,提出一种将试验数据与使用数据相融合的产品寿命可靠性分析方法。在产品寿命服从典型分布时,利用试验数据与使用数据融合后的数据,采用随机右截尾情形下的极大似然估计方法估算产品寿命分布函数中的参数,进而对产品寿命的可靠性进行分析计算。结果表明:在相同的可靠度和置信水平下,利用试验数据与使用数据融合后增大了样本容量,提高了产品可靠性分析的准确性。

关键词: 产品寿命;可靠性;数据融合;当量化;似然函数

中图分类号: V216.3

文献标识码: A

Method of Reliability Life Analysis for Product Based on the Fusion of Test Data and Usage Data

He Yuting, Gao Chao

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: As a method of describing and evaluating the reliability of product, analysis of reliability data has been an important component of reliability engineering. Aimed at the problem that the no failure data of some products exist and the number is more, the method of reliability life analysis for product based on the fusion of test data and usage data is put forward. The parameters of distribution function can be estimated by the maximum likelihood estimate method when the product life obeys some classical distributions, then the reliability of product life is analyzed by using the data fusion. The examples indicate that the sample capacity is increased after the data fusion, and the analysis accuracy of product life reliability can be improved under the same reliability and confidence level.

Key words: product life; reliability; data fusion; equivalent; likelihood function

0 引言

一个系统是由一些产品组成的具有规定功能的整体。在实际工作中,某些情况下需把一个复杂的系统看作由许多产品组成的系统,以期通过各产品的寿命与可靠性数据计算或推断整个系统的寿

命与可靠性。大型复杂系统的可靠性分析是可靠性研究的方向之一,大型复杂系统的可靠性是建立在小产品可靠性基础上的,特别是以可靠性为中心的维修思想确立后,对产品的可靠性分析就显得非常有必要。

可靠性是产品质量的重要特征。可靠性是产品在规定的条件和时间内,完成规定功能的能力,而这种能力通常通过概率值来表示。定性分析产品的可靠性不能满足工程需求,因此必须进行定量分析。对产品可靠性进行定量分析,就是对产品进

行可靠性数据分析。可靠性数据分析是贯穿于产品研制、试验、生产、使用和维修全过程的一项基础性工作,在可靠性工程中发挥重要作用^[1]。

早期的可靠性数据分析主要是失效数据的可靠性数据分析,J. E. Lawless^[2]总结了相关的寿命数据分析方法,所列方法至今仍是寿命数据分析的主要方法。随着技术的进步与产品质量的提高,高可靠性产品的试验和使用中无故障情况出现地越来越多,因此无故障数据分析受到了广泛地重视与研究,并取得了很大的进展。

产品的可靠性寿命是通过产品的试验数据和使用数据分析而得到的,对产品进行可靠性评估,通常采用研制最后阶段定型试验的试验数据。但由于各种原因,试验通常是小样本情况,特别对于航空航天产品,试验件极少,只有一件或两件。产品的试验失效数据处理已有一套成熟的方法,但经典方法的评估精度不能满足工程需要,并且由于产品实际使用情况的复杂性,仅采用试验环境下的试验数据计算的可靠性寿命不能精确地预测和评估产品在实际使用环境下的寿命状态。产品在投入市场后通常进行市场调查,从而得到产品的实际使用数据,包括失效数据和未失效数据。如果能够把产品的使用数据用于可靠性评估,则评估的数据量大幅增加,从而提高产品可靠性分析的准确性。但是产品的试验数据与使用数据是在不同的环境下得到的,试验产品与使用产品不属于同一母体,数据不具有可比性。傅惠民等^[3-4]、蒋同斌^[5]、刘雨时等^[6]给出了正态分布及威布尔分布下的定时无失效数据的可靠性分析方法,但是上述方法只考虑了定时无失效数据,并未考虑试验失效数据。赵宇^[1]、张恒喜等^[7]、陈传尧^[8]给出了各种数据的可靠性分析方法,但是并未将产品试验数据与实际使用数据相融合进行可靠性分析。

本文研究基于产品试验数据与使用数据融合的产品寿命可靠性分析的问题。首先提出产品试验环境与使用环境当量化的问题;其次介绍随机右截尾情形下的似然函数,再次利用试验数据与使用数据融合后的数据来估计产品寿命分布中的参数,对产品的可靠性进行分析计算;最后举例说明基于产品试验数据与使用数据融合的产品寿命可靠性分析方法的准确性。

1 产品试验环境与使用环境的当量化

通常情况下,产品在投入市场前,进行随机抽样试验来确定产品的可靠性寿命。同型产品随机抽样试验寿命是在相同的试验环境下得到的,多数服从某种分布。在市场调查时可以得到同型产品的实际使用数据,因为试验环境与使用环境是不同的,所以试验产品与实际使用产品属于不同的母体,产品使用数据不能直接用来进行产品可靠性分析计算。如果将产品试验数据与实际使用数据用于产品可靠性分析,就必须将产品试验环境与实际使用环境当量化,把试验数据与使用数据当量为同一个环境下的数据,则认为试验产品与使用产品属于同一个母体。

传统数据当量化方法是使用环境折合系数法^[9]。采用环境折合系数折合产品使用数据,把使用数据折合到试验环境下,然后将折合后的数据与试验数据合并来进行产品可靠性分析。环境折合系数可通过专家经验,或根据相似产品试验数据,利用相应的统计方法分析取得。由于产品的使用寿命是产品质量损伤问题,环境对产品的损伤是高度非线性问题,例如航空航天产品,其服役环境非常恶劣。而环境折合系数法是线性折算方法,不适用于非线性问题的分析。

若把产品使用环境下的数据当量到产品试验环境下,就必须对产品失效机理进行研究,得到当量化因子。经过当量化后的使用产品与试验产品来自同一母体,使用产品当量寿命与试验产品试验寿命来自同一分布,利用数学统计方法对产品可靠性进行分析计算。

对于不同的产品,首先需要找到合适的方法确定当量化因子,这是融合未失效数据和失效数据的前提。对于电子产品,通常采用环境折合系数法;对于金属结构,通常采用等损伤原理法。例如,飞机是在不同的载荷及环境条件下服役的,所以属于不同的母体,服役飞机的飞行寿命数据不能直接分析计算飞机结构可靠性。服役飞机数据与试验数据相融合的具体方法为:服役飞机在使用时造成疲劳损伤,当服役飞机飞行一段时间后,计算每架飞机当前的累积疲劳损伤值,然后把每架飞机的飞行

时间根据等损伤原理折算为相同载荷及环境条件下的当量飞行小时,可认为每架飞机的当量飞行小时来自同一个母体以及服从同一分布,把变母体问题转变为同母体问题。

2 随机右截尾情形下的似然函数

随机右截尾试验是指,从分布函数为 $F(x, \theta)$ 的总体中,随机抽取 n 个个体,进行寿命试验(或观测),对于每个个体(寿命是 $X_i, i=1, \dots, n$)相应地有试验停止时间,即截尾时间 $Y_i (i=1, \dots, n)$,对第 i 个个体得到的观测值 $X_i \wedge Y_i$ (取最小值),令 $t_i = X_i \wedge Y_i$,则可得数据 $(t_i, \delta_i) (i=1, \dots, n)$, $\delta_i = 1$ 表示 t_i 是试验失效数据, $\delta_i = 0$ 表示 t_i 是未失效数据。则数据 $(t_1, \delta_1), \dots, (t_n, \delta_n)$ 的似然函数为^[10]

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \theta)^{\delta_i} [1 - F(t_i, \theta)]^{1-\delta_i} \quad (1)$$

3 服从典型分布随机右截尾情形下的最大似然估计方法

设 r 个同型产品的试验失效寿命为 $X_1, \dots, X_r, n-r$ 个同型服役产品的无失效寿命为 X_{r+1}, \dots, X_n 。产品的失效寿命与无失效寿命截尾时间为 Y_1, \dots, Y_r 与 Y_{r+1}, \dots, Y_n ,则截尾时间 Y_i 相当于产品的失效寿命与无失效寿命 X_i 。此时, $\delta_i = 1 (i=1, \dots, r), \delta_i = 0 (i=r+1, \dots, n), t_i = X_i \wedge Y_i (i=1, \dots, n)$ 。

3.1 单参数指数分布场合失效数据与未失效数据的统计分析

设产品寿命 X 服从单参数指数分布,分布函数和密度函数分别为

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\theta}}, x \geq 0 \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{1}{\theta} e^{-\frac{x}{\theta}}, x \geq 0 \quad (3)$$

式中: θ 是分布的一个参数,通常称为率参数。

则似然函数为

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \theta)^{\delta_i} [1 - F(t_i, \theta)]^{1-\delta_i} = \frac{1}{\theta^n} e^{-\sum_{i=1}^r \frac{x_i}{\theta}} e^{-\sum_{i=r+1}^n \frac{x_i}{\theta}} = \frac{1}{\theta^n} e^{-\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\theta}} \quad (4)$$

$$\ln L = -r \ln \theta - \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\theta} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \theta} = -\frac{r}{\theta} + \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\theta^2} \quad (6)$$

令 $\frac{\partial \ln L(\theta)}{\partial \theta} = 0$, 得如下方程:

$$-r + \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\theta} = 0 \quad (7)$$

利用式(7)得到参数 θ 的近似最大似然估计值 $\hat{\theta}$ 。得出产品寿命服从单参数指数分布时的分布函数:

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\hat{\theta}}} \quad (8)$$

则产品的可靠度为

$$R(x_0) = P(x > x_0) = 1 - F(x_0) \quad (9)$$

3.2 对数正态分布场合失效数据与未失效数据的统计分析

设产品的寿命 N 服从对数正态分布,则可记为

$$\lg N = X \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (10)$$

式中: μ 为对数寿命期望; σ 为对数寿命标准差。

分布函数和密度函数分别为

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (11)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

则似然函数为

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \theta)^{\delta_i} [1 - F(t_i, \theta)]^{1-\delta_i} = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^r} \times e^{-\sum_{i=1}^r \frac{(x_i-\mu)^2}{2\sigma^2}} \prod_{i=r+1}^n \left[\int_{x_i}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \right] \quad (13)$$

根据文献[11]可知:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \mu} = \sum_{i=1}^r \frac{(x_i - \mu)}{\sigma^2} + \sum_{i=r+1}^n \frac{\int_{x_i}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \frac{t-\mu}{\sigma^2} dt}{\int_{x_i}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \sigma} = -\frac{n}{\sigma} + \sum_{i=1}^r \frac{(x_i - \mu)^2}{\sigma^3} + \sum_{i=r+1}^n \frac{\int_{x_i}^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \frac{(t-\mu)^2}{\sigma^2} dt}{\sigma \int_{x_i}^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt} = 0 \quad (15)$$

从式(14)~式(15)可解出 μ, σ 的近似最大似然估计 $\hat{\mu}, \hat{\sigma}$, 从而得到产品寿命服从对数正态分布

时的分布函数:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^x e^{-\frac{(\lg t - \hat{\mu})^2}{2\sigma^2}} dt = \Phi\left(\frac{\lg t - \hat{\mu}}{\sigma}\right) \quad (16)$$

则产品的可靠度为

$$R(x_0) = P(x > x_0) = 1 - F(x_0) \quad (17)$$

3.3 双参数威布尔分布场合失效数据与未失效数据的统计分析

设产品寿命 X 服从双参数威布尔分布, 分布函数和密度函数分别为

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m} \quad (18)$$

$$f(x) = \frac{m}{\eta} x^{m-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m} \quad (19)$$

式中: η 为双参数威布尔分布的形状参数; m 为特征寿命。

则似然函数为

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \theta)^{\delta_i} [1 - F(t_i, \theta)]^{1-\delta_i} = \frac{m^r}{\eta^{rm}} \times e^{-\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\eta}\right)^m} \prod_{i=1}^r x_i^{m-1} \quad (20)$$

$$\ln L = r \ln m - rm \ln \eta - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\eta}\right)^m + (m-1) \sum_{i=1}^r \ln x_i \quad (21)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \eta} = -\frac{mr}{\eta} + m \sum_{i=1}^n \frac{x_i^m}{\eta^{m+1}} \quad (22)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial m} = \frac{r}{m} - r \ln \eta - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\eta}\right)^m \ln \left(\frac{x_i}{\eta}\right) + \sum_{i=1}^r \ln x_i \quad (23)$$

令 $\frac{\partial \ln L}{\partial \eta} = 0$, $\frac{\partial \ln L}{\partial m} = 0$, 得如下方程^[12]:

$$-r + \sum_{i=1}^n \frac{x_i^m}{\eta^m} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{r}{m} - r \ln \eta - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\eta}\right)^m \ln \left(\frac{x_i}{\eta}\right) + \sum_{i=1}^r \ln x_i = 0 \quad (25)$$

从式(24)~式(25)解出参数 η, m 的最大似然估计 $\hat{m}, \hat{\eta}$, 从而得到产品寿命服从双参数威布尔分布时的分布函数:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\hat{\eta}}\right)^{\hat{m}}} \quad (26)$$

则产品的可靠度为

$$R(x_0) = P(x > x_0) = 1 - F(x_0) \quad (27)$$

当产品寿命服从其他分布时, 该数据融合方法

仍然适用。

4 实例

4.1 实例 1

已知某型电子设备寿命服从指数分布, 随机抽取 5 台产品进行寿命试验。记录的失效时间为 500, 1 350, 2 130, 2 500, 3 120 h。在该电子设备的使用过程中进行市场调查, 调查结果(包括失效数据与未失效数据)为 200, 200, 280, 290, 300, 2 000(失效), 2 200 h(失效)。假设其当量到试验环境下的数据为 190, 210, 320, 350, 350, 3 500(失效), 3 800 h(失效)。计算该产品在 95% 可靠度下的寿命值。

(1) 仅利用试验数据求解产品可靠度寿命总试验时间为

$$T = 500 + 1\ 350 + 2\ 130 + 2\ 500 + 3\ 120 = 9\ 600\ \text{h}$$

$$\hat{\theta} = \frac{T}{n} = \frac{9\ 600}{5} = 1\ 920\ \text{h}$$

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\hat{\theta}} = \frac{1}{1\ 920} = 5.21 \times 10^{-4}$$

$$N_{0.95} = \hat{\theta} \ln\left(\frac{1}{0.95}\right) = 1\ 920 \times \ln\left(\frac{1}{0.95}\right) = 98.48\ \text{h}$$

(2) 利用数据融合求解产品可靠度寿命总试验时间为

$$T = 190 + 210 + 320 + 350 + 350 + 3\ 500 + 3\ 800 + 9\ 600 = 18\ 320\ \text{h}$$

根据式(7)计算可得:

$$\hat{\theta} = \frac{T}{r} = \frac{18\ 320}{7} = 2\ 617.14\ \text{h}$$

$$N_{0.95} = \hat{\theta} \ln\left(\frac{1}{0.95}\right) = 2\ 617.14 \times \ln\left(\frac{1}{0.95}\right) = 134.24\ \text{h}$$

4.2 实例 2

已知飞机某结构的疲劳寿命服从对数正态分布, 对 4 件该结构进行疲劳寿命试验, 在试验环境下测得试件的疲劳寿命分别为 12 400, 13 400, 13 500, 13 800 h。飞机在进行大修时得到该结构的使用数据为 1 000, 1 000, 1 000, 1 000, 1 000, 1 000, 1 000, 1 000, 1 000, 1 000 h, 假设使用数据当量到试验环境下的数据为 850, 920, 960, 990, 1 000, 1 050, 1 120, 1 260, 1 350, 1 400 h。计算该

结构在置信度为 90%、可靠度为 99.87% 的可靠性寿命。

(1) 仅利用试验数据求解产品可靠度寿命试验对数寿命如表 1 所示。

表 1 试验对数寿命数据
Table 1 Test log-life data

i	N_i/h	X_i
1	12 400	4.093 4
2	13 800	4.139 9
3	16 000	4.204 1
4	18 100	4.257 7

$$\text{子样均值: } \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^4 X_i = 4.173 8$$

$$\text{子样标准差: } s = \frac{\sum_{i=1}^4 X_i^2 - n \bar{X}^2}{n-1} = 0.072$$

采用疲劳分散系数方法^[13]计算结构可靠性寿命,取 $\sigma = s$,则该结构的可靠性寿命为

$$N_{R,\gamma} = \frac{10^{\bar{X}}}{L_f} = \frac{10^{\bar{X}}}{10^{(\frac{u}{\sigma} - u_p)\sigma}} = \frac{10^{4.173 8}}{10^{(\frac{u}{\sigma} - u_p)0.072}} = 8 143.8 \text{ h}$$

(2) 利用数据融合求解产品可靠度寿命

疲劳试验寿命及当量寿命取对数后为随机右截尾寿命数据(包括 4 个试验寿命数据与 10 个无失效右截尾数据),如表 2 所示。

表 2 随机右截尾数据

Table 2 Random right truncation data

i	N_i/h	$X_i = \lg N_i$
1	12 400	4.093 4
2	13 800	4.139 9
3	16 000	4.204 1
4	18 100	4.257 7
5	850	2.949 0
6	920	2.963 8
7	960	2.982 3
8	990	2.995 6
9	1 000	3.000 0
10	1 050	3.021 2
11	1 120	3.049 2
12	1 260	3.100 4
13	1 350	3.130 3
14	1 400	3.146 1

取 $\sigma = s = 0.072$,将表 2 中的随机右截尾寿命数据代入式(14),解得 $\hat{\mu} = 4.172 5$ 。

根据式(17)可知,99.87%可靠度下的疲劳寿命为

$$N_R = 10^{\hat{\mu} - u_p \sigma} = 10^{3.903 8} = 9 029 \text{ h}$$

对数正态分布的置信系数^[11]为 $S_{LC} = 10^{\frac{u}{\sigma}}$,则该结构的可靠性寿命为

$$N_{R,\gamma} = \frac{N_R}{S_{LC}} = \frac{N_R}{10^{\frac{u}{\sigma}}} = 8 530.8 \text{ h}$$

4.3 实例 3

已知某产品铝合金结构的寿命服从双参数威布尔分布。对 3 件试验件在试验环境下进行寿命试验,得到寿命为 20 000,37 000,50 000 h。市场调查时得到该铝合金结构的使用数据为 3 000,3 500,4 000,4 500,5 000,5 500,6 000 h,假设使用数据当量到试验环境下的数据为 2 900,3 600,3 960,4 470,5 130,5 840,5 940 h。求该铝合金结构在置信度为 90%、可靠度为 99.87% 的可靠性寿命。

(1) 仅利用试验数据求解产品可靠度寿命

通过大量试验的统计推断得到:对于铝合金, $m = 4.0$ 。

按照最大似然法,对于有限个完全寿命子样,可得到特征寿命的点估计值:

$$\hat{\eta} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^3 N_i^m \right)^{\frac{1}{m}} = 40 764.47$$

根据式(27)可知,99.87%可靠度下的疲劳寿命为

$$N_R = \frac{\hat{\eta}}{\left(\ln \frac{1}{R} \right)^{-\frac{1}{m}}} = \frac{40 764.47}{5.3} = 7 691.4 \text{ h}$$

双参数威布尔分布的置信系数为^[12]

$$\text{可靠度系数: } S_R = \left(\ln \frac{1}{R} \right)^{-\frac{1}{m}} \quad (28)$$

$$\text{置信系数: } \int_0^{s_c} \frac{mn^n}{\Gamma(n)} X^{mn-1} e^{-nX^m} dX = \gamma \quad (29)$$

通过文献[14]可知,试件数为 3、置信水平为 90%的置信系数为 $S_c = 1.2$ 。则可靠性寿命为

$$N_{R,S} = \frac{N_R}{S_c} = \frac{7 694.1}{1.2} = 6 411.75 \text{ h}$$

(2) 利用数据融合求解产品可靠度寿命

取 $m=4.0$, 利用试验数据与当量使用数据, 代入式(24)求得 $\hat{\eta}=40\ 769$

$$N_R = \frac{\hat{\eta}}{\left(\ln \frac{1}{R}\right)^{-\frac{1}{m}}} = \frac{40\ 764.47}{5.3} = 7\ 691.4\ \text{h}$$

根据文献[14]可知, 试件数为 10、置信水平为 90% 的置信系数为 $S_c=1.135$, 则铝合金结构可靠性寿命为

$$N_{R,s} = \frac{N_R}{S_c} = \frac{7\ 694.1}{1.135} = 6\ 778.9\ \text{h}$$

5 结 论

本文研究了不完全数据信息的产品寿命可靠性分析方法, 提出了依据损伤相等原则将产品使用环境当量化为试验环境以实现产品试验数据与使用数据融合进而进行产品寿命可靠性分析的方法, 给出了三种典型分布随机右截尾情形下的最大似然估计方法。

基于试验数据与使用数据融合的产品寿命可靠性分析方法的关键是找出当量化因子, 只有将使用环境数据当量转换到试验环境下的当量数据, 才能进行未失效数据与失效数据的融合。

基于产品的试验数据与使用数据, 利用随机右截尾情形下的似然函数对产品的寿命分布参数进行参数估算, 然后进行产品寿命可靠性分析, 克服了采用试验数据进行产品寿命可靠性分析时数据较少的缺点。将试验数据与使用数据融合后用于产品可靠性分析计算, 将显著增大样本容量, 可以提高产品可靠性分析计算的准确性。

参 考 文 献

- [1] 赵宇. 可靠性数据分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
Zhao Yu. Data analysis of reliability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [2] Lawless J E. 寿命数据中的统计模型与方法[M]. 茆诗松, 等, 译. 北京: 中国统计出版社, 1998.
Lawless J E. The statistical model and method for the Life data[M]. Translated by Mao Shisong, et al. Beijing: China Statistics Press, 1998. (in Chinese)
- [3] 傅惠民, 张勇波. 正态分布定时无失效数据可靠性分析方法[J]. 航空动力学报, 2010, 2(25): 384-387.

- Fu Huimin, Zhang Yongbo. Method of reliability analysis for time truncated zero-failure data based on normal distribution[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 2(25): 384-387. (in Chinese)
- [4] 傅惠民, 张勇波. Weibull 分布定时无失效数据可靠性分析方法[J]. 航空动力学报, 2010, 12(25): 2807-2810.
Fu Huimin, Zhang Yongbo. Method of reliability analysis for time truncated zero-failure data based on Weibull distribution[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 12(25): 2807-2810. (in Chinese)
- [5] 蒋同斌. 基于威布尔分布的无失效数据的可靠性分析[J]. 金陵科技学院学报, 2005, 3(21): 8-13.
Jiang Tongbin. Reliability analysis of no-failure data in Weibull distribution [J]. Journal of Jinling Institute of Technology, 2005, 3(21): 8-13. (in Chinese)
- [6] 刘雨时, 刘茹青. 基于无失效数据的可靠性分析计算[J]. 第二炮兵工程学院学报, 2003, 1(17): 34-37.
Liu Yushi, Liu Ruqin. Reliability analysis based on the no-failure data[J]. Journal of the Second Artillery Engineering Institute, 2003, 1(17): 34-37. (in Chinese)
- [7] 张恒喜, 郭基联, 朱家元, 等. 小样本多元数据分析方法及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.
Zhang Hengxi, Guo Jilian, Zhu Jiayuan, et al. Multivariate data analysis and application with few observations [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2002. (in Chinese)
- [8] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
Chen Chuanyao. Fatigue and fracture[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2002. (in Chinese)
- [9] 龚庆祥, 赵宇, 顾长鸿. 型号可靠性工程手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
Gong Qingxiang, Zhao Yu, Gu Changhong. Model reliability engineering handbook[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [10] 陈家鼎. 生存分析与可靠性[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
Chen Jiading. Subsistence analysis and reliability[M]. Beijing: Peking University Press, 2005. (in Chinese)
- [11] 熊峻江. 疲劳断裂可靠性工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
Xiong Junjiang. Fatigue and fracture reliability engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [12] 何宇廷, 高潮, 安涛, 等. 试验与服役数据融合的飞机结构安全寿命分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2015, 16(1): 1-5.
He Yuting, Gao Chao, An Tao, et al. Analysis of safe life for aircraft structures based on the test data and service data fusion[J]. Journal of Air Force Engineering University;

- portation aircraft airworthiness standards[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011. (in Chinese)
- [4] 刘永寿, 袁修开, 刘军, 等. 结构细节疲劳额定值 DFR 及其试验方法的研究[J]. 实验技术与管理, 2008, 25(1): 27-29.
Liu Yongshou, Yuan Xiukai, Liu Jun, et al. Research on structure detail fatigue rating DFR and testing method[J]. Experimental Technology and Management, 2008, 25(1): 27-29. (in Chinese)
- [5] 《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》编委会. 民机结构耐久性与损伤容限设计手册: 上册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
Editorial board of *civil aircraft structure durability and damage tolerance design manual*. Civil aircraft structure durability and damage tolerance design manual; Vol. 1[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [6] 中国航空研究院. 军用飞机疲劳、损伤容限、耐久性设计手册: 第一册[M]. 北京: 中国航空研究院, 1994.
Chinese Aeronautical Establishment. Military aircraft fatigue, damage tolerance, durability design manual; Vol. 1 [M]. Beijing: Chinese Aeronautical Establishment, 1994. (in Chinese)
- [7] 董彦民, 刘文斌, 杨超. 军用飞机结构耐久性设计的细节疲劳额定值方法[J]. 航空学报, 2010, 31(12): 2357-2364.
Dong Yanmin, Liu Wenting, Yang Chao. Military aircraft durability design method based on detail fatigue rating[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(12): 2357-2364. (in Chinese)
- [8] 董彦民, 贺小帆, 刘文斌. 基于不同寿命分布的 DFR 值换算关系[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(12): 1524-1528.
Dong Yanmin, He Xiaofan, Liu Wenting. Conversion relation of detail fatigue rating based on different fatigue life distribution[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(12): 1524-1528. (in Chinese)
- [9] 黄啸, 刘建中, 马少俊, 等. 细节疲劳额定强度计算参量取值敏感性研究[J]. 航空学报, 2012, 33(5): 863-870.
Huang Xiao, Liu Jianzhong, Ma Shaojun, et al. Sensitivity analysis of the parameters in detail fatigue rating equation [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(5): 863-870. (in Chinese)
- [10] 陈滨琦, 曾建江, 王一丁, 等. DFR 法在结构疲劳优化设计中的应用[J]. 航空学报, 2013, 34(5): 1122-1128.
Chen Binqi, Zeng Jianjiang, Wang Yiding, et al. Application of DFR method to optimal fatigue design of structures [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(5): 1122-1128. (in Chinese)

作者简介:

樊优优(1984-),女,工程师。主要研究方向:金属材料疲劳与断裂、结构耐久性与损伤容限设计。

常文魁(1981-),男,高级工程师。主要研究方向:金属材料疲劳与断裂、结构耐久性与损伤容限设计、可靠性工程。

(编辑:马文静)

(上接第 210 页)

- Natural Science Edition, 2015, 16(1): 1-5. (in Chinese)
- [13] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
Gao Zhentong. Applied statistics in fatigue[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1986. (in Chinese)
- [14] 中国飞机强度研究所. 军用飞机结构耐久性/损伤容限分析和设计指南: 第一册[M]. 西安: 中国飞机强度研究所, 2005.
Aircraft Strength Research Institute of China. Military aircraft structure durability/failure tolerance analysis and design manual; Vol. 1[M]. Xi'an: Aircraft Strength Research

Institute of China, 2005. (in Chinese)

作者简介:

何宇廷(1966-),男,博士,教授,博导。主要研究方向:飞机结构强度、可靠性与安全性。

高潮(1986-),男,博士研究生。主要研究方向:飞机结构强度、可靠性与安全性。

(编辑:赵毓梅)