

文章编号: 1000-8055(2004)6-0745-04

卫星推力器可靠性评估和寿命预测

王凭慧¹, 范本尧², 傅惠民¹

(1. 北京航空航天大学 固体力学研究所, 北京 100083;

2. 中国空间技术研究院, 北京 100081)

摘要: 提出一种卫星推力器无失效数据可靠性分析方法, 该方法能够在高置信水平下给出卫星推力器可靠度和使用寿命的置信下限。同时还建立了卫星推力器强检验和弱检验方法, 前者适用于对首次采用的卫星推力器的验收, 而后者适用于对已长期使用的卫星推力器的例行的批抽样检验。文中对卫星推力器寿命遵循 Weibull 分布和对数正态分布的情况分别进行了详细讨论。

关键词: 航空、航天推进系统; 卫星推力器; 无失效数据; 寿命预测; 可靠性评估; 强检验; 弱检验

中图分类号: TB301; O211

文献标识码: A

Reliability Assessment and Life Prediction for Satellite Engine

WANG Ping-hui¹, FAN Ben-yao², FU Huimin¹

(1. Institute of Solid Mechanics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The method of reliability assessment and life prediction for zero-failure data of satellite engines is presented in the paper. Thus the one-sided lower confidence limits of reliability and life for zero-failure data can be calculated by the method. The reliability assessment and life prediction of the two-parameter Weibull and log-normal distributions are discussed at some length. The method for strong test and weak test of satellite engines are established, which can inspect and control the quality of satellite engines with a high precision. The method has been used in the reliability assessment and life prediction of some satellite engines successfully.

Key words: aerospace propulsion system; satellite engine; zero-failure data; life prediction; reliability assessment; strong test; weak test

卫星推力器是为卫星转移轨道和调整姿态提供动力的重要设备, 一旦失效将直接影响到卫星的正常使用, 这就要求它与卫星有相同的寿命。但是, 由于受研制时间和试验经费的限制, 卫星推力器的寿命试验无法长时间地进行, 所以, 得到的都

是无失效寿命数据。由于无失效数据是人为中止其试验时间, 它们不包含寿命随机分布的正确信息, 所以对这种数据进行统计分析难度较大。目前国内尚无有效的卫星推力器可靠性评估和寿命预测方法。工程上已经发现, 在地面试验中运行良

收稿日期: 2004-09-16; 修订日期: 2004-11-01

基金项目: 国防科技预研项目(413280203)

作者简介: 王凭慧(1960—), 男, 江苏扬州人, 高级工程师, 北京航空航天大学博士生, 主要从事可靠性及项目评价方法研究。

好的卫星推力器,却在太空中出现了故障,严重影响卫星的正常使用。本文对此进行了深入系统的研究,在文献[1~3]基础上,建立了一种卫星推力器无失效数据可靠性评估和寿命预测方法。由于卫星推力器属于机电部件,其寿命通常遵循 Weibull 分布或对数正态分布,所以文中分别对卫星推力器寿命遵循 Weibull 分布和对数正态分布的情况进行了详细讨论,并给出了卫星推力器可靠性验证及其验收方法。

1 卫星推力器寿命遵循 Weibull 分布时的可靠性分析方法

1.1 卫星推力器寿命预测方法

设某型号卫星推力器寿命遵循 Weibull 分布 $W(\alpha, \beta)$, 其中 α 为形状参数, β 为尺度参数。 $t_i, i=1, 2, \dots, n$ 是它的一组无失效寿命试验数据, 那么, 当 α 已知时, 根据文献[1]可知, 对于给定的可靠度 R , 卫星推力器的可靠寿命 t_R 的置信水平为 γ 的单侧置信下限为:

$$t_{RL} = \left[\frac{\ln R}{\ln(1-\gamma)} \sum_{i=1}^n t_i^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad (1)$$

但是, 实际中形状参数 α 是未知的, 因此, 还不能直接采用式(1)对卫星推力器无失效寿命数据进行可靠性分析。由于在许多情况, α 虽然未知, 但可以知道 $\alpha \geq \alpha_0$, 其中 α_0 是一已知常数。此时, 若给定的可靠度 R 满足:

$$R \geq (1-\gamma)^\omega \quad (2)$$

式中:

$$\omega = \prod_{i=1}^n t_i^{\alpha_0} / \sum_{i=1}^n t_i^{\alpha_0} \quad (3)$$

$$\lambda = t_i^{\alpha_0} / \sum_{i=1}^n t_i^{\alpha_0} \quad (4)$$

则卫星推力器的可靠寿命 t_R 的置信水平为 γ 的单侧置信下限由下式计算^[1]:

$$t_{RL}^* = \left[\frac{\ln R}{\ln(1-\gamma)} \sum_{i=1}^n t_i^{\alpha_0} \right]^{1/\alpha_0} \quad (5)$$

1.2 卫星推力器可靠度评估方法

根据文献[1]可知, 当给定的寿命 t 满足:

$$t \leq \prod_{i=1}^n t_i^{\lambda} \quad (6)$$

时, 卫星推力器的可靠度 $R(t)$ 的置信水平为 γ 的单侧置信下限为:

$$R_L^* = \exp \left\{ t^{\alpha_0} \ln(1-\gamma) / \sum_{i=1}^n t_i^{\alpha_0} \right\} \quad (7)$$

1.3 卫星推力器强检验方法

当首次使用某一型号卫星推力器时, 对于规定的寿命指标 t , 可靠度指标 R 和置信水平 γ , 可采用下面的强检验方法进行验收^[2]。

按寿命指标 t 进行验收: 首先由式(5)求得卫星推力器的可靠寿命 t_R 的置信水平为 γ 的单侧置信下限 t_{RL}^* , 当:

$$t_{RL}^* \geq t \quad (8)$$

时, 则可在 γ 的置信水平下断定卫星推力器的可靠寿命 t_R 大于规定的寿命指标 t , 即该批卫星推力器合格。

按可靠度指标 R 进行验收: 首先由式(7)求得卫星推力器的可靠度 $R(t)$ 的置信水平为 γ 的单侧置信下限 R_L^* , 当:

$$R_L^* \geq R \quad (9)$$

时, 则可在 γ 的置信水平下断定卫星推力器的可靠度 $R(t)$ 大于规定指标 R , 即该批卫星推力器合格。

1.4 卫星推力器弱检验方法

若某一厂家的某种型号卫星推力器经长期使用, 一直都是合格的, 此次只是例行的批抽样检验, 则对于规定的寿命指标 t , 可靠度指标 R 和置信水平 γ , 可采用下面的弱检验方法(相当于假设检验)进行验收。

按寿命指标 t 进行验收: 若 R 满足:

$$R \geq \gamma^{\omega} \quad (10)$$

则可由下式:

$$t_{RU}^* = \left[\frac{\ln R}{\ln \gamma} \sum_{i=1}^n t_i^{\alpha_0} \right]^{1/\alpha_0} \quad (11)$$

求得 t_{RU}^* 当:

$$t_{RU}^* \geq t \quad (12)$$

时, 由文献[2]可知, 不能在 γ 的置信水平下拒绝“卫星推力器的可靠寿命 t_R 大于规定的寿命指标 t ”这个结论, 因此, 可以认为该批卫星推力器合格。

按可靠度指标 R 进行验收: 若 t 满足式(6), 则可由下式:

$$R_U^* = \exp \left\{ t^{\alpha_0} \ln \gamma / \sum_{i=1}^n t_i^{\alpha_0} \right\} \quad (13)$$

求得 R_U^* , 当:

$$R_U^* \geq R \quad (14)$$

时, 由文献[2]可知, 不能在 γ 的置信水平下拒绝“卫星推力器的可靠度 $R(t)$ 大于规定指标 R ”这个结论, 因此, 可以认为该批卫星推力器合格。

2 卫星推力器寿命遵循对数正态分布时的可靠性分析方法

2.1 卫星推力器寿命预测方法

设某型号卫星推力器对数寿命遵循正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, $x_i = \lg t_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, 是其一组无失效数据, 那么由文献[1]可知, 对于给定的可靠度 R , 该卫星推力器的对数可靠寿命 x_R 的置信水平为 γ 的单侧置信下限为:

$$x_{RL} = \bar{x} - (u_R - u_{R_0})\sigma \quad (15)$$

式中:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad u_R = \Phi^{-1}(R)$$

$$u_{R_0} = \Phi^{-1}(R_0), \quad R_0 = (1 - \gamma)^{1/n}$$

工程实际中, 标准差 σ 通常是未知的, 所以不能直接采用式(15)进行可靠性分析。但是许多情况可以得到 σ 的上限 σ_0 。此时, 若给定的可靠度 $R \geq (1 - \gamma)^{1/n}$, 那么卫星推力器的对数可靠寿命 x_R 的置信水平为 γ 的单侧置信下限由下式给出:

$$x_{RL}^* = \bar{x} - (u_R - u_{R_0})\sigma_0 \quad (16)$$

即卫星推力器可靠寿命 t_R 的单侧置信下限 $t_{RL}^* = 10^{x_{RL}^*}$ 。

2.2 卫星推力器可靠度评估方法

根据文献[1]可知, 当给定的寿命 t 满足条件:

$$x = \lg t \leq \bar{x} \quad (17)$$

时, 卫星推力器的可靠度 $R(t)$ 的置信水平为 γ 的单侧置信下限由下式计算:

$$R_L^* = \Phi\left(u_{R_0} + \frac{\bar{x} - x}{\sigma_0}\right) \quad (18)$$

根据式(16)和式(18)对卫星推力器无失效数据进行可靠性评估和寿命预测时, 寿命较短的无失效数据可以舍弃, 此时得到的仍然是置信水平为 γ 的置信下限。

2.3 卫星推力器强检验方法

当卫星推力器对数寿命遵循正态分布时, 对于规定的寿命指标 t , 可靠度指标 R 和置信水平 γ , 可采用下面方法之一对卫星推力器进行强检验验收^[3]。

按寿命指标 t 进行验收: 首先由式(16)求得卫星推力器的对数可靠寿命 x_R 的置信水平为 γ 的单侧置信下限 x_{RL}^* , 当:

$$t_{RL}^* = 10^{x_{RL}^*} \geq t \quad (19)$$

时, 则可在 γ 的置信水平下断定卫星推力器的可靠寿命 t_R 大于规定的寿命指标 t , 即该批卫星推力器合格。

按可靠度指标 R 进行验收: 首先由式(18)求得卫星推力器的可靠度 $R(t)$ 的置信水平为 γ 的单侧置信下限 R_L^* 。当 $R_L^* \geq R$ 时, 则可在 γ 的置信水平下断定卫星推力器的可靠度 $R(t)$ 大于规定的指标 R , 即该批卫星推力器合格。

2.4 卫星推力器弱检验方法

同样, 对于规定的寿命指标 t , 可靠度指标 R 和置信水平 γ , 可采用下面方法之一对卫星推力器进行弱检验验收。

按寿命指标 t 进行验收: 若给定的可靠度 $R \geq R_0$, 则可由下式:

$$x_{RU}^* = \bar{x} - (u_R - u_{R_0})\sigma_0 \quad (20)$$

计算 x_{RU}^* , 其中 $u_{R_0}^* = \Phi^{-1}(R_0^*)$, $R_0^* = \sqrt[n]{\gamma}$ 。当:

$$t_{RU}^* = 10^{x_{RU}^*} \geq t \quad (21)$$

时, 由文献[3]可知, 不能在 γ 的置信水平下拒绝“卫星推力器的可靠寿命 t_R 大于规定的寿命指标 t ”这个结论, 因此, 可以认为该批卫星推力器合格。

按可靠度指标 R 进行验收: 若 t 满足 $x = \lg t \leq \bar{x}$, 则可由下式:

$$R_U^* = \Phi\left(u_{R_0} + \frac{\bar{x} - x}{\sigma_0}\right) \quad (22)$$

求得 R_U^* 。当 $R_U^* \geq R$ 时, 由文献[3]可知, 不能在 γ 的置信水平下拒绝“卫星推力器的可靠度 $R(t)$ 大于规定的指标 R ”这个结论, 因此, 可以认为该批卫星推力器合格。

3 应用举例

表 1 给出了某型号卫星推力器无失效寿命试验数据, 现要求该推力器对应于 $t = 26$ 万次脉冲点火的置信水平 $\gamma = 0.9$ 的可靠度置信下限。

根据工程经验, 设该卫星推力器寿命遵循 Weibull 分布, 其在太空中的失效模式为燃烧室或喉管烧坏。燃烧室和喉管所用材料为钛合金和镍合金, 美国波音公司通过对大量 Weibull 分布试验数据的统计分析, 建议钛合金结构取 $\alpha_0 = 3$ 。考虑到燃烧室和喉管材料中还有镍合金, 所以, 为了保守起见, 本文建议取 $\alpha_0 = 2.5$ 。

下面根据本文方法对表 1 中卫星推力器无失效寿命试验数据进行统计处理, 首先由式(6)可

表 1 某型号卫星推力器无失效试验数据

Table 1 Zero-failure data of some satellite engines

序号 <i>i</i>	脉冲点火 <i>t_i</i> (万次)	序号 <i>i</i>	脉冲点火 <i>t_i</i> (万次)
1	50	9	108
2	50	10	108
3	20	11	208
4	62	12	52
5	95.2	13	52
6	52	14	43.3
7	52	15	75
8	52		

知, 给定的 $t = 26$ 万次脉冲点火满足条件:

$$t = 26 \leq \prod_{i=1}^n t_i^{\lambda} = 133.5$$

式中 λ 由式(4)计算。因此, 可以根据式(7)求得该卫星推力器对应于 $t = 26$ 万次脉冲点火的置信水平 $\gamma = 0.9$ 的可靠度置信下限为:

$$R_L^* = \exp\left\{t^{\alpha_0} \ln(1 - \gamma) / \sum_{i=1}^n t_i^{\alpha_0}\right\} = 0.9933$$

4 结 论

(1) 虽然根据无失效数据无法求得Weibull分布的形状参数 α 和对数正态分布的标准差 σ , 但是对于 α 的下限 α_0 或 σ 的上限 σ_0 , 目前工程上已经积累大量的资料。

(2) 针对Weibull分布无失效数据的情况, 建立了卫星推力器可靠性分析方法, 该方法能够将所有无失效寿命数据进行累加, 从而大大提高可靠性评估和寿命预测的精度。

(3) 针对对数正态分布无失效数据的情况, 提出一种卫星推力器可靠性分析方法, 该方法能够充分发挥对数正态分布的可靠度和使用寿命置信下限较高的优点。

(4) 根据中心极限定理和最弱环模型可知, 卫星推力器寿命往往既近似遵循对数正态分布, 又近似遵循Weibull分布。因此, 可以根据可靠度和使用寿命置信下限的高低来决定采用Weibull分布还是采用对数正态分布。

(5) 提出了卫星推力器强检验方法。当首次使用某一型号卫星推力器时, 可采用强检验方法对该卫星推力器进行验收。

(6) 提出了卫星推力器弱检验方法。若某一厂家的某种型号卫星推力器经长期使用, 一直都是合格的, 此次只是例行的批抽样检验, 则可采用弱检验方法对该卫星推力器进行验收。

(7) 由于弱检验属于拒绝检验, 相当于假设检验, 显著性水平为 $1 - \gamma$, 因此, 置信水平 γ 越高, 越不容易拒绝原有的结论。此外, 弱检验便于对可靠寿命和可靠度进行检验, 而假设检验则难以检验此类问题。

参考文献

[1] 傅惠民, 王凭慧. 无失效数据的可靠性评估和寿命预测[J]. 机械强度, 2004, 26(3): 260- 264

[2] 梁朝虎, 傅惠民. Weibull分布置信检验方法[J]. 机械强度, 2004, 26(3): 265- 269

[3] 傅惠民, 梁朝虎. 正态分布置信检验方法[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 305- 312

FU Huimin, LIANG Zhao-hu. Confidence Test Method for Normal Distribution[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(3): 305- 312