

发动机零部件的安全寿命确定

北京航空航天大学 孔瑞莲* 王延荣

【摘要】 用三参数威布尔分布的置信限, 确定某发动机零件的安全寿命。并对用两参数威布尔分布的点估计出的寿命作一比较, 得出切合实际的结果。

关键词: 置信限 航空发动机 安全 寿命

分类号: V232 O346.23

1 三参数威布尔分布

发动机零部件的寿命通常遵循三参数威布尔分布^[1]。然而, 长期以来国际上一直没有一种方法能够很好地确定三参数威布尔分布置信限, 以至于在工程中根据三参数威布尔分布得出的结果的可信程度(置信度)无法保证。近年来北航傅惠民教授得出了三参数威布尔分布置信限的计算方法^[2]。本文根据这一方法, 对发动机零部件进行寿命评估, 并确定了某发动机零件的安全寿命单侧置信下限和双侧置信区间, 同时对两参数和三参数威布尔分布点估计的寿命作了比较, 得出了切合实际的结果。

发动机零部件的寿命服从三参数威布尔分布时, 其寿命一定遵循下式变化:

$$f(t) = (m/\eta) \cdot ((t - t_0)/\eta)^{m-1} \cdot e^{-((t - t_0)/\eta)^m} \quad (1)$$

式中 m 、 η 、 t_0 分别是威布尔分布的形状参数、尺度参数和位置参数。

当发动机零部件工作到时刻 T 时(见图 1 示), 其左部阴影部分的面积是发动机零部件失效的概率, 即

$F(T) = \int_0^T f(t) dt = 1 - e^{-((t - t_0)/\eta)^m}$, 说明发动机零部件工作到这个时刻, 已有 $100F(T)\%$ 失效。其可靠度 $R =$

$\int_T^\infty f(t) dt = e^{-((t - t_0)/\eta)^m}$, 说明有 $100R\%$ 发动机零部件的

寿命 $t > T$ 。在寿命评定时, 人们最关心的是安全寿命的确定, 也称百分位值, 即给定可靠度 R^* , 就有对应的安全寿命

$t_R = t_0 + \eta [\ln(1/R^*)]^{1/m}$ 。高可靠度的 t_R 在工程中具有十分重要的意义, 但实际中的 t_R 无法求得。因此, 工程中大量运用样本观测值求百分位值的估计量 $\hat{t}_R$, 此量的估计有点估计法和区间估计法。点估计法是用样本观测值估计出安全寿命的具体值来, 这种方法所确定的百分位值 $\hat{t}_R$, 可能大于母体的真值 t_R , 也可能小于母体的真值 t_R , 没有十分把握就等于母体的真值。而区间估计可以某一概率值保证母体真值落在这个区间内。

故此, 本文是应用三参数威布尔分布的置信限来确定某发动机零件的安全寿命 $\hat{t}_R$ 。

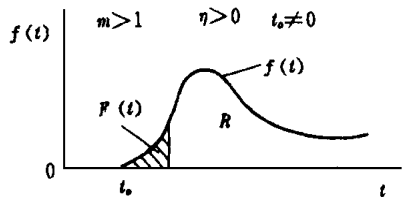


图1 威布尔分布曲线

2 发动机零部件安全寿命的确定

2.1 理论基础^[2]

当发动机零部件的寿命遵循威布尔分布时,可用下述方法求得置信度为 γ 的安全寿命。

设测得一组 n 个发动机零部件的寿命数据 $t_1 < t_2 < \cdots < t_n$,则对应于发动机零部件寿命 t_i 的置信度为 γ 的破坏概率单侧置信上、下限 P_{ui} 、 P_{Li} ($i = 1, 2, \cdots, n$)由下式求得:

$$P_{ui} = \frac{\hat{m}[(n-i+1)]F_{1-\gamma, 2i, 2(n-i+1)}}{1 + \hat{m}[(n-i+1)]F_{1-\gamma, 2i, 2(n-i+1)}} \quad (2)$$

$$P_{Li} = 1 - P_{u(n-i+1)} \quad (3)$$

式中 $F_{1-\gamma, 2i, 2(n-i+1)}$ 为 F 分布上百分位值,可查 F 分布函数表得到。文献[2]发现并证明了三参数威布尔分布母体百分位值的单侧置信下限曲线 P_u 和单侧置信上限曲线 P_L ,可分别用(4)、(5)两式描述。

置信度为 γ ,可靠度为 $R = 1 - P$ 的安全寿命 t_R 的单侧置信下限 t_{RL} 和单侧置信上限 t_{Ru} 分别由下面两式求得

$$t_{RL} = t_{0L} + \eta_L [\ln(1/R)]^{1/m_L}, t_{Ru} = t_{0u} + \eta_u [\ln(1/R)]^{1/m_u} \quad (4)$$

式中 m_L 、 η_L 、 t_{0L} 和 m_u 、 η_u 、 t_{0u} 均为待定参数,可根据数据 (t_i, P_{Li}) 、 (t_i, P_{ui}) ($i = 1, 2, \cdots, n$),并应用威布尔三参数相关系数优化法^[3]求得安全寿命 t_R 的置信度为 $2\gamma - 1$ 的置信区间 $[t_{RL}, t_{Ru}]$ 。

2.2 某发动机零件安全寿命的确定

本文对某发动机零件抽取7件进行疲劳寿命试验,其寿命数据如表1所示。选用近似中位秩 $P_{mi} = (i - 0.3)/(n + 0.4)$ 公式^[1],应用两参数威布尔分布和三参数威布尔分布的点估计法,分别算出威布尔分布的两个参数 $\hat{m}$ 、 $\hat{\eta}$ 和威布尔分布的3个参数 $\hat{m}$ 、 $\hat{\eta}$ 、 $\hat{t}_0$;给定置信度 $\gamma = 95\%$ 分别根据(2)、(3)式求出百分位秩 P 的单侧置信上限 P_{ui} 和置信下限 P_{Li} 见表1所示。

表1 零件疲劳寿命试验数据及中位秩 P_{mi}

	1	2	3	4	5	6	7
疲劳寿命 t_i (小时)	1416	1918	2032	2261	3088	3377	4232
中位秩 P_{mi}	0.09459	0.22973	0.36486	0.5000	0.63514	0.77025	0.90541
置信上限 P_{ui}	0.3482	0.5207	0.6587	0.7747	0.8712	0.9466	0.992
置信下限 P_{Li}	0.0073	0.0534	0.1288	0.2253	0.3413	0.4793	0.6518

2.3 计算步骤

(1)将测量得到的数据从小到大排列,即 $t_1 < t_2 < \cdots < t_n$;

(2)根据给定的置信度 $\gamma = 95\%$,样本总数 $n = 7$,查 F 分布函数表,得到 F 分布的上百分位值 $F_{1-\gamma, 2i, 2(n-i+1)}$,分别代入(2)、(3)式,算得 P_{ui} 、 P_{Li} 值,见表1所示;

(3)应用威布尔分布两参数的点估计,求得累积失效率的估计值:

$$F(t, \hat{m}, \hat{\eta}) = 1 - e^{-(t/\hat{\eta})^{\hat{m}}} = 1 - e^{-(t/3300)^{2.93}} \quad (5)$$

(4)用威布尔分布三参数相关系数优化法的点估计,求得累积失效率的估计值:

$$F(t, \hat{m}, \hat{\eta}, \hat{t}_0) = 1 - e^{-(t-\hat{t}_0)/\hat{\eta})^{\hat{m}}} = 1 - e^{-(t-1026)/1846)^{1.497}} \quad (6)$$

其相关系数 $r = -0.9883$ 。

(5)用威布尔分布三参数相关系数优化法,根据 (t_i, P_{ui}) 和 (t_i, P_{Li}) 分别计算出 P_{ui} 的置信度

为 $\gamma = 95\%$ 的单侧置信上限, 也就是母体百分位值的单侧置信下限曲线为:

$$F(t, \hat{m}_L, \hat{\eta}_L, \hat{t}_{oL}) = 1 - e^{-[(t - \hat{t}_{oL}) / \hat{\eta}_L]^{m_u}} = 1 - e^{-[(t - 708) / 1305]^{1.498}} \quad (7)$$

其相关系数 $r = -0.9881$ 。

P_{Li} 的置信度为 95% 的单侧置信下限, 也就是母体百分位值的单侧置信上限曲线为:

$$F(t, \hat{m}_u, \hat{\eta}_u, \hat{t}_{ou}) = 1 - e^{-[(t - \hat{t}_{ou}) / \hat{\eta}_u]^{m_u}} = 1 - e^{-[(t - 1267) / 2796]^{1.683}} \quad (8)$$

其相关系数 $r = -0.9881$ 。

(6) 当 $F = 0.1\%$ (破坏概率 P), 则由上式 (5) ~ (8) 分别求得破坏概率为 $P = 0.1\%$ 。即可靠度 $R = 99.9\%$ 的母体百分位值 t_R (安全寿命) 的估计值 $\hat{t}_{Rm} = 312$ h, 即两参数法求得的中值安全寿命; $\hat{t}_{Rm} = 1045$ h, 即三参数法求得的中值安全寿命; 置信度 $\gamma = 95\%$ 的单侧置信下限 $\hat{t}_{RL} = 721$ h 和单侧置信上限 $\hat{t}_{Ru} = 1313$ h, 以及破坏概率 $P = 0.1\%$, 置信度为 $\gamma = 90\%$ 的置信区间 $[721, 1313]$ 。

3 计算结果讨论

(1) 此一组发动机零件寿命数据是来自服从三参数威布尔分布的母体, 因其相关系数 $r \geq 0.988$, 说明线性拟合很佳。

(2) 用两参数点估计求得的中值安全寿命 $\hat{t}_{Rm} = 312$ h 比三参数点估计求得的中值安全寿命 $\hat{t}_{Rm} = 1045$ h 小得多。三参数威布尔分布是从弱环理论发展起来的, 它是有最小寿命的分布 ($t_o \neq 0$), 即认为发动机零部件工作到最小寿命以后才开始失效, 才具有不等于零的失效概率,

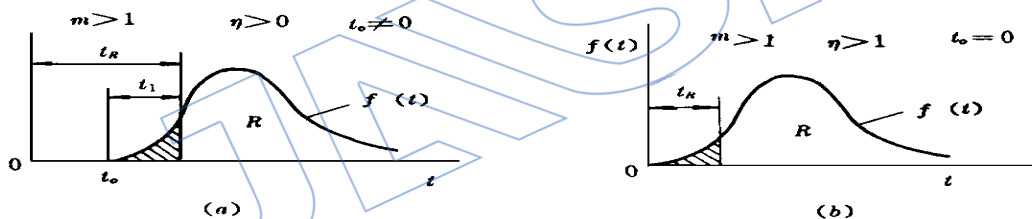


图2 (a) 最小寿命不等于零 (b) 最小寿命等于零的威布尔分布

其安全寿命 t_R , 就等于最小寿命 t_o 再加上有一定失效概率的寿命 t , 见图 2(a)。两参数评估出来的发动机零部件的安全寿命, 是忽略了最小寿命, 即让最小寿命等于零 ($t_o = 0$), 说明发动机零部件一开始工作其失效概率就不等于零, 见图 2(b)。故此用三参数评估发动机零部件的寿命比两参数评估发动机零部件的寿命更为准确, 更加符合实际。只有当发动机零部件不经筛选或检验就投入使用, 工作一开始就有失效的可能, 这样的发动机零部件的寿命是服从两参数威布尔分布的。否则, 当发动机零部件的寿命是服从三参数威布尔分布时, 而用两参数法估计出的寿命, 就会增加维修费用, 造成不必要的浪费。

(3) 用点估计得出的寿命 $\hat{t}_{Rm}$ 值, 定为发动机零部件的寿命指标有很大的分散性, 只有 50% 的把握 $\hat{t}_{Rm}$ 小于或等于母体的真值 t_R , 如在大于母体真值的 $\hat{t}_{Rm}$ 下工作, 失效概率增加, 安全性降低, 危险性增大。

(4) 如果根据文献 [2] 取置信度 $\gamma = 90\%$, 破坏概率 $P = 0.1\%$ 来估计发动机零件的安全寿命是个区间值, 即 $[721, 1313]$, 说明母体的真值 t_R 有 90% 的把握落在这个区间内。如选用安全寿命的单侧置信下限值, 定为发动机零件的寿命指标, 有 95% 的把握发动机零件的寿命 t 是大大

于 $\hat{t}_R$ 值, 能保证某发动机零件有 99.9% 的可靠度。

从上述得出, 发动机零部件的确定, 要选用安全寿命的单侧置信下限值或双侧置信区间, 才能保证发动机零部件工作安全可靠。

参 考 文 献

- 1 Abernethy R B 著, 唐鸿昌等译. 威布尔分析手册. 北京航空航天大学, 1992
- 2 傅惠民, 高镇同, 徐人平. 三参数威布尔分布的置信限. 航空学报, 1992, 13(3): A 153
- 3 傅惠民, 高镇同. 确定威布尔分布三参数的相关系数优化法. 航空学报, 1990, 11(7): A 323
- 4 赵长占, 侯贵仓. 叶片疲劳试验报告. 北京航空航天大学, 1993

(责任编辑 魏星禄)

JALSP

nents. The shifts in efficiency resulted from the change of tip clearance will be predicted by semi-empirical formula, with the aid of the tip clearance model of the variations of the tip clearance, efficiency and thrust with transient time have been estimated. The results prove the effectiveness and accuracy of the model.

Key words Gas turbines Transient process Blade tip Clearance

EFFECT OF CURVING OF HEAVY-DUTY BLADES ON WALL FLOW

Han Wanjin, Lü Hongwei, Lu Wencai, Wang Zhongqi

(Power Engineering Dept. Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

ABSTRACT

Static pressures on endwalls and blade surfaces and growth of the losses along flow direction were measured, and the flow visualizations of the endwall and blade suction surface with ink traces were also made. The experimental results show that the positive curving of the blade increases the streamwise adverse pressure gradient in the cascade inlet and makes isobars on the front part of the blade suction surface into opposed "C" shape, thereby the saddle point separation near the blade leading edges and convergence of separation lines on the suction surface to the cascade middle are intensified. The negative curving of the blade reduces the adverse pressure gradient in the cascade inlet and makes isobars perpendicular to the endwall on the front part of the blade suction surface. As a result not only the separation flow near saddle point weakens, but also the separation flow on the suction surface turns into free vortex laminal separation so as to avoid interception of the upper and lower separation lines. In consequence, the secondary vortex losses are decreased greatly.

Key words Turbines Curving Blades Wall flow

CHARACTERISTICS OF INTERNAL FLOW PERFORMANCE OF AN STF FAN PROPULSION SYSTEM

Shan Peng and Ma Jihua

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

The total characteristics of a Supersonic Through Flow (STF) fan propulsion system of unconventional configuration have been studied. Therefrom some conclusions are obtained as: 1. The system's bypass ratio must be actively controlled by adjusting both core and bypass engine's through flow areas. 2. A general propulsion system with a bypass ratio variable cycle is able to hold a higher fan compression ratio or a stronger fan power in supersonic flight, when it is coupled with a variable core nozzle critical section area. 3. For this new concept propulsion system, the specific thrust per unit of the total air mass flow does not vary with altitude up to the stratosphere. Some calculational results are presented briefly to support the above-mentioned conclusions.

Key words Supersonic flight Supersonic through flow Turbofan Propulsions characteristics

EVALUATION OF SAFETY LIVES OF AEROENGINE PARTS

Kong Ruilian and Wang Yanyong

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

The safety lives of parts in an aeroengine are determined by use of the confidence limits of three-parameter Weibull distribution. The safety lives obtained by the point estimation of three-parameter Weibull distribution have been compared with those of two-parameter Weibull distribution. It is shown that this method is convenient in engineering application.

Key words Aircraft engines Confidence limit Safety Life