

基于 Weibull 混合分布的航空发动机零部件寿命建模

袁忠大¹, 程秀全¹, 王大伟²

(1. 广州民航职业技术学院 飞机维修工程学院, 广州 510403; 2. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 针对航空发动机在维修工作中存在重要零部件使用寿命及失效率难以估算的问题, 搜集了发动机重要零部件燃油计量活门、整体驱动发电机、液压机械组件的使用寿命数据, 并运用 Weibull 混合分布及单 Weibull 分布分别建立了上述重要零部件的寿命模型。在模型求解过程中采用了经典的三参数相关系数优化法, 求出发动机重要零部件的可靠度、失效率及故障概率密度函数。通过计算得出 Weibull 混合分布模型的线性相关系数 r_g 比单 Weibull 分布模型的大; 同时 $K-S$ 假设检验结果显示, Weibull 混合分布的统计量观测值 D_n 均小于临界值 $D_{30, 0.1}$ 。结果表明: 相对于单 Weibull 分布, Weibull 混合分布模型更精确地表征了发动机重要零部件的寿命数据, 从而有效地提高寿命参数的估算精度; Weibull 混合分布模型的可靠性有助于发动机管理工程师制定视情维修方案; 并对航材备件的数量有指导意义, 具有较高的推广应用价值。

关键词: 航空发动机; 部件寿命; 威布尔混合分布; 可靠性模型; 寿命建模

中图分类号: V235.13

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.04.013

Aeroengine Component Life Modeling Based on Mixed Weibull Distribution

YUAN Zhong-da¹, CHENG Xiu-quan¹, WANG Da-wei²

(1. School of Aircraft Maintenance Engineering, Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou 510403, China;

2. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In response to the difficulties in estimating the service life and failure rate of important components during aeroengine maintenance, the service life data of important aeroengine components were collected, including the fuel metering valve, the integral drive generator, and hydraulic mechanical components. Life models of these components were established by using mixed Weibull distribution and single Weibull distribution respectively. In the process of solving the model, the classical three-parameter correlation coefficient optimization method was used to find the reliability, failure rate, and failure probability density function of these components. The results show that the linear correlation coefficient r_g of the mixed Weibull distribution model is larger than that of the single Weibull distribution model. Meanwhile, the $K-S$ hypothesis test results show that the observed statistical values D_n of the mixed Weibull distributions are all less than the critical value $D_{30, 0.1}$. The above results show that compared with the single Weibull distribution, the mixed Weibull distribution model can more accurately characterize the life data of important engine components, thus effectively improving the estimation accuracy of life parameters. The mixed Weibull distribution model, owing to its reliability, is helpful for engine management engineers to make condition-based maintenance plans and can be used in guiding the determination of the number of spare parts which is worthy of extensive application.

Key words: aeroengine; component life; mixed Weibull distribution; reliability model; life modeling

0 引言

在民航发动机维修工作中, 需依据部件的可靠性制定视情维修方案, 并以此对航材库的备件数量进行评估, 因此航空发动机的可靠性直接关系到飞机运行

的安全性和经济性。对航空公司而言, 对发动机进行可靠性评估和管理是机务维修的重要工作内容之一^[1-3]。为顺应中国民航局对智慧民航的发展要求, 航空公司及适航管理部门给予了高度重视。

统计分布是对机械电子系统进行寿命数据分析

收稿日期: 2023-01-11 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51575117)、广东省普通高校特色创新项目(2023KTSCX238)、广东省教育科学规划课题(2023GXJK696)、广东省高职院校产教融合创新平台项目(2024CJPT012)资助

作者简介: 袁忠大(1984), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 袁忠大, 程秀全, 王大伟. 基于 Weibull 混合分布的航空发动机零部件寿命建模[J]. 航空发动机, 2024, 50(4): 95-100. YUAN Zhongda, CHENG Xiuquan, WANG Dawei. Aeroengine component life modeling based on mixed Weibull distribution[J]. Aeroengine, 2024, 50(4): 95-100.

的重要方法,其中 Weibull 分布广泛用于对机械电子系统的使用寿命进行建模,对各种机电系统的寿命数据具有很好的适应性,因而在可靠性工程中有着不可替代的作用。诸多学者对 Weibull 分布模型进行了研究。Wang 等^[4]基于广义渐进式混合滤波对恒应力 Weibull 竞争风险模型进行了推导;Kazemi 等^[5]基于 I 型混合滤波对逆 Weibull 分布的参数进行了估计;Kumar 等^[6]基于单 Weibull 分布模型的参数对印度 Tirumala 地区的风能潜力进行了估计;韩威等^[7]基于 PCA 和 Weibull 分布对滚动轴承的剩余寿命预测方法进行了研究;倪百秀等^[8]基于三参数 Weibull 分布模型对台风灾害损失进行了研究,实践证明该模型可精准预测台风灾害损失;文昌俊等^[9]基于 Weibull 分布模型对谷物干燥机的可靠性进行了分析,有助于企业的经营决策;张建平等^[10]基于 Weibull 分布模型对光电器件的寿命快速评估进行了研究,发现其具有很高的工程应用价值;黄珂磊^[11]基于 Weibull 分布模型对轿车车身疲劳寿命的稳健性优化设计进行了研究;梁娜^[12]基于 Weibull 分布模型对抽检方法设计与供应保障成本优化进行了研究。上述研究均基于单 Weibull 分布模型,当存在多个故障模式时,模型的精度难以满足日趋增强的可靠性评估要求。

为提高模型精度,本文运用三参数 Weibull 混合分布建立了 3 种发动机零部件的寿命模型,采用经典的三参数相关系数优化法对寿命模型进行发动机关键零部件的可靠度、失效率及故障概率密度函数的数值分析。

1 Weibull 混合分布模型

Weibull 混合分布模型可描述为存在多个使用故障的复杂机电系统,其计算精度高于传统的单 Weibull 分布。发动机作为一种复杂的机械电子系统,部件的工作强度大,使用频率高,其可靠性无法用单 Weibull 分布模型描述,因而需引入三参数 Weibull 混合分布模型^[13]。

假设发动机某部件有 n 个子故障,且该故障的寿命数据服从 Weibull 分布,则此部件的可靠度函数为

$$R(t) = \sum_{i=1}^n [p_i \cdot R_i(t)], \left(\sum_{i=1}^n p_i = 1 \right) \quad (1)$$

式中: $R_i(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma_i}{\eta_i} \right)^{\beta_i} \right]$, $1 \leq i \leq n$, t 为发动机部件的工作时间。

故障概率密度函数为

$$f(t) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot f_i(t), \left(\sum_{i=1}^n p_i = 1 \right) \quad (2)$$

式中: $f_i(t) = \frac{\beta_i}{\eta_i} \left(\frac{t - \gamma_i}{\eta_i} \right)^{\beta_i - 1} \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma_i}{\eta_i} \right)^{\beta_i} \right]$

失效率函数为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \cdot f_i(t)}{\sum_{i=1}^n [p_i \cdot R_i(t)]} \quad (3)$$

式中: p_i 为各子故障所占的权重系数。

2 发动机部件寿命建模

2.1 燃油计量活门

2.1.1 FMV 寿命数据

燃油计量活门(Fuel Metering Valve, FMV)的寿命数据见表 1。

表 1 FMV 的寿命数据

序号	1	2	3	4	5
时间/h	1599	1774	1979	1999	2235
序号	6	7	8	9	10
时间/h	2499	2548	2739	3062	3099
序号	11	12	13	14	15
时间/h	3334	3450	3467	3601	4007
序号	16	17	18	19	20
时间/h	4355	4896	5699	5999	6377
序号	21	22	23	24	25
时间/h	6478	6714	6898	7285	7420
序号	26	27	28	29	30
时间/h	7855	8220	8664	9787	9995

2.1.2 FMV 威布尔概率图

FMV 寿命数据 Weibull 概率分布如图 1 所示^[14]。

从图中可见,FMV 的寿命数据无法用 1 条直线拟合,30 个寿命数据可分为 2 组:

(1) 1599, 1774, 1979,

1999, 2499, 3099, 3334, 3467, 3601, 4007, 4355,

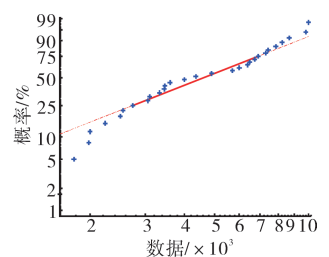


图 1 FMV 寿命数据 Weibull 概率分布

4896, 5699, 5999, 6377;

(2) 6478, 6714, 6898, 7285, 7420, 7855, 8220, 8664, 9787, 9995, 2235, 2548, 2739, 3062, 3450。

因而该部件的寿命数据符合 2 重 Weibull 混合分布,依据文献[15]可得 Weibull 子分布模型的权重系数分别为 $p_1=0.72, p_2=0.28$,用三参数相关系数优化法分别对 2 重 Weibull 混合分布模型和单 Weibull 分布模型进行参数估计,见表 2^[16]。

表 2 模型的参数估计值(FMV)

模型	$\hat{\beta}$	$\hat{\eta}$	$\hat{\gamma}$	r_g
Weibull 混合分布	$\hat{\beta}_1 = 2.73$	$\hat{\eta}_1 = 2559$	$\hat{\gamma}_1 = 1425$	0.9473
	$\hat{\beta}_2 = 1.29$	$\hat{\eta}_2 = 7218$	$\hat{\gamma}_2 = 249$	
Weibull 分布	$\hat{\beta} = 2.31$	$\hat{\eta} = 4643$	$\hat{\gamma} = 935$	0.8791

从表中可见,2 重 Weibull 混合分布模型的线性相关系数 r_g 比单 Weibull 分布模型大,因而对发动机部件寿命数据的拟合效果更佳。同时,由表 2 可得 FMV 的可靠度函数为

$$R(t) = 0.72e^{-(t-1425)/2559}^{2.73} + 0.28e^{-(t-249)/7218}^{1.29} \quad (4)$$

故障概率密度函数为

$$f(t) = 0.72 \frac{2.73}{2559} \left(\frac{t-1425}{2559}\right)^{1.73} e^{-[(t-1425)/2559]^{2.73}} + 0.28 \frac{1.29}{7218} \left(\frac{t-249}{7218}\right)^{0.29} e^{-[(t-249)/7218]^{1.29}} \quad (5)$$

失效率函数为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{p_1 f_1(t) + p_2 f_2(t)}{p_1 R_1(t) + p_2 R_2(t)} \quad (6)$$

2.1.3 K-S 假设检验(FMV)

K-S 假设检验^[17]结果见表 3。

表 3 K-S 假设检验结果(FMV)

分布类型假设	D_n	$D_{30,0.1}$	对比
Weibull 混合分布	0.087	0.21756	$D_n < D_{30,0.1}$

从表中可见,Weibull 混合分布 K-S 检验的统计量观测值小于临界值,因此接受原假设。

2.2 整体驱动发电机

2.2.1 IDG 寿命数据

整体驱动发电机(Integral Drive Generator, IDG)的寿命数据见表 4。

2.2.2 IDG 威布尔概率图

IDG 寿命数据 Weibull 概率分布如图 2 所示。

从图中可见, IDG 的寿命数据无法用 1 条直线拟合,因而该部件的寿命数据符合 2 重 Weibull 混合分

表 4 IDG 的寿命数据

序号	1	2	3	4	5
时间/h	1270	1670	1825	2003	2180
序号	6	7	8	9	10
时间/h	2215	2218	2423	2447	2551
序号	11	12	13	14	15
时间/h	2615	2773	2813	3479	3916
序号	16	17	18	19	20
时间/h	3990	4079	4369	4378	4568
序号	21	22	23	24	25
时间/h	4669	4908	5268	5809	5859
序号	26	27	28	29	30
时间/h	6008	6459	6723	7149	7749

布,依据文献[15]可得 Weibull 子分布模型的权重系数分别为 $p_1=0.37, p_2=0.63$,用三参数相关系数优化法分别对 2 重 Weibull 混合分布模型和单 Weibull 分布模型进行参数估计,见表 5。

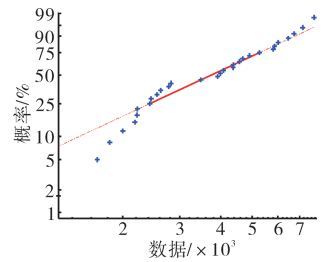


图 2 IDG 寿命数据 Weibull 概率分布

表 5 模型的参数估计值(IDG)

模型	$\hat{\beta}$	$\hat{\eta}$	$\hat{\gamma}$	r_g
Weibull 混合分布	$\hat{\beta}_1 = 1.62$	$\hat{\eta}_1 = 6679$	$\hat{\gamma}_1 = 1475$	0.9352
	$\hat{\beta}_2 = 1.19$	$\hat{\eta}_2 = 4903$	$\hat{\gamma}_2 = 1065$	
Weibull 分布	$\hat{\beta} = 1.37$	$\hat{\eta} = 5259$	$\hat{\gamma} = 1017$	0.8895

由表 5 可得 IDG 的可靠度函数为

$$R(t) = 0.37e^{-(t-1475)/6679}^{1.62} + 0.63e^{-(t-1065)/4903}^{1.19} \quad (7)$$

故障概率密度函数为

$$f(t) = 0.37 \frac{1.62}{6679} \left(\frac{t-1475}{6679}\right)^{0.62} e^{-[(t-1475)/6679]^{1.62}} + 0.63 \frac{1.19}{4903} \left(\frac{t-1065}{4903}\right)^{0.19} e^{-[(t-1065)/4903]^{1.19}} \quad (8)$$

失效率函数为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{p_1 f_1(t) + p_2 f_2(t)}{p_1 R_1(t) + p_2 R_2(t)} \quad (9)$$

2.2.3 K-S 假设检验(IDG)

K-S 假设检验结果见表 6。

表 6 K-S 假设检验结果(IDG)

分布类型假设	D_n	$D_{30,0.1}$	对比
Weibull 混合分布	0.096	0.21756	$D_n < D_{30,0.1}$

2.3 液压机械组件

2.3.1 HMU 寿命数据

液压机械组件(Hydraulic Mechanical Unit, HMU)

的使用寿命数据见表7。

表7 HMU的使用寿命数据

序号	1	2	3	4	5
时间/h	2001	2017	2025	2054	2091
序号	6	7	8	9	10
时间/h	2098	2179	2269	2513	2779
序号	11	12	13	14	15
时间/h	2803	3192	3640	3839	3901
序号	16	17	18	19	20
时间/h	4098	4121	4539	4568	4869
序号	21	22	23	24	25
时间/h	5029	5061	5187	5319	5723
序号	26	27	28	29	30
时间/h	6527	7479	7621	7801	7895

2.3.2 HMU威布尔概率图

HMU寿命数据Weibull概率分布如图3所示。

从图中可见, HMU的使用寿命数据无法用1条直线拟合, 因而该部件的使用寿命数据符合2重Weibull混合分布, 依据文献[15]可得Weibull子分布模型的权重系数分别为 $p_1=0.41, p_2=0.59$, 用三参数相关系数优

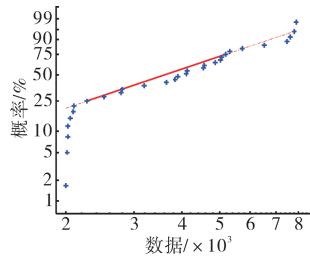


图3 HMU寿命数据Weibull概率分布

化法分别对2重Weibull混合分布模型和单Weibull分布模型进行参数估计, 见表8。

表8 模型的参数估计值(HMU)

模型	$\hat{\beta}$	$\hat{\eta}$	$\hat{\gamma}$	r_g
Weibull混合分布	$\hat{\beta}_1 = 1.25$	$\hat{\eta}_1 = 8743$	$\hat{\gamma}_1 = 876$	0.9547
	$\hat{\beta}_2 = 1.74$	$\hat{\eta}_2 = 6679$	$\hat{\gamma}_2 = 239$	
Weibull分布	$\hat{\beta} = 1.51$	$\hat{\eta} = 7531$	$\hat{\gamma} = 697$	0.8324

由表8可得HMU的可靠度函数为

$$R(t) = 0.41e^{-[(t-876)/8743]^{1.25}} + 0.59e^{-[(t-239)/6679]^{1.74}} \quad (10)$$

故障概率密度函数为

$$f(t) = 0.41 \frac{1.25}{8743} \left(\frac{t-876}{8743} \right)^{0.25} e^{-[(t-876)/8743]^{1.25}} + 0.59 \frac{1.74}{6679} \left(\frac{t-239}{6679} \right)^{0.74} e^{-[(t-239)/6679]^{1.74}} \quad (11)$$

失效率函数为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{p_1 f_1(t) + p_2 f_2(t)}{p_1 R_1(t) + p_2 R_2(t)} \quad (12)$$

2.3.3 K-S假设检验(HMU)

K-S假设检验结果见表9。

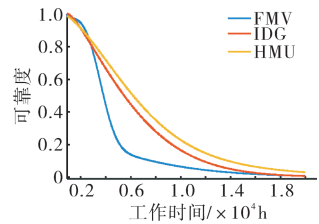
表9 K-S假设检验结果(HMU)

分布类型假设	D_n	$D_{30,0.1}$	对比
Weibull混合分布	0.079	0.21756	$D_n < D_{30,0.1}$

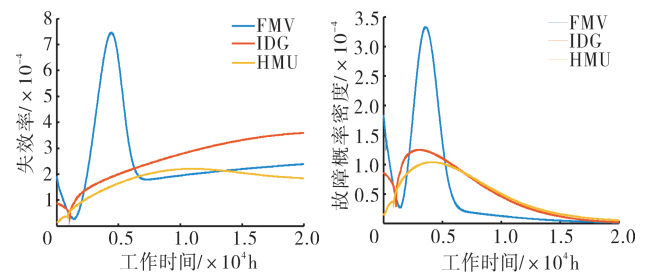
3 发动机零部件寿命模型分析

3.1 Weibull混合分布模型

由式(4)~(12)分别绘制FMV、IDG、HMU的可靠度函数、失效率函数及故障概率密度函数, 如图4所示。



(a) 可靠度函数



(b) 失效率函数 (c) 故障概率密度函数

图4 FMV、IDG、HMU的3种函数

从图4(a)中可见, FMV、IDG、HMU的可靠度均随着工作时间的延长而逐渐下降。其中, FMV的可靠度在初始阶段下降较慢, 但随着时间的延长而急剧下降, 由于在3种部件中, FMV的 β 值最大, 因而可靠度曲线斜率的绝对值最大。由此可见, β 值直接决定了部件可靠度的变化速率。

依据FMV、IDG、HMU的可靠度曲线得出部件在经过任意工作时间后的可靠度。例如给定工作时间为1500 h, 则由图4(a)可知FMV、IDG、HMU的可靠度分别为0.9722、0.9656、0.9536。

从图4(b)中可见, FMV的失效率先降低, 当工作时间达到1430 h时其失效率达到最低点, 此时FMV处于磨合期。然后随工作时间的增加而急剧增加, 当工作时间为4490 h时失效率达到波峰状态, 接着随着时间的延长而短时间内急剧下降, 当工作时间为6910 h时出现拐点, 最后随使用时间的延长而缓慢上升。与之相比, IDG的失效率随工作时间的延长先降低后急剧升高, 拐点在1060 h处, 可见在1060 h前IDG处于磨合期; HMU的失效率随工作时间的延长先增加后缓慢降低。

从图4(c)中可见, 随着工作时间的延长, FMV与IDG的故障概率密度先减小到达1个波谷, 此时IDG

的工作时间为 1060 h;随着使用时间的延长,二者的故障概率密度均达到峰值状态,此时 IDG 的工作时间为 3010 h;最后二者的故障概率密度进一步减小。HMU 的故障概率密度先增加到峰值后减小。三者中 HMU 的峰值最小,显示出其良好的可靠性及较低的失效率,而 FMV 峰值较高,表明该部件的使用可靠性不高,由此可见发动机制造厂商应在发动机的生产设计环节对其加以升级优化,不断提升航空产品质量,从而更好地保障航空安全。

在工程实践中,发动机性能管理工程师可根据图 4 综合考虑,在保证航空安全的基础上制定合理的视情维修策略,从而使航空公司的经济效益和社会安全效益保持最大化。

例如:由图 4(a)可知,当工作时间达到 1080 h 时, HMU 的可靠度下降为 0.9805 (假设安全阈值为 0.9800),且随着使用时间的延长其可靠度下降较快,因而此时应对 HMU 进行检修或更换以保证飞行安全;由图 4(b)可知,当 FMV 的工作时间在 2460~6520 h 区间,其失效率超过了 2×10^{-4} ;由图 4(c)可知,在此时间区间内其故障概率密度也维持在 2.41×10^{-5} 以上,即图 4(b)、图 4(c)处于波峰的时间基本一致,因而在此使用时间区间应对 FMV 进行重点检修或维护。

此外还可根据形状参数 β 的数值范围大致确定部件的失效类型^[18], FMV、IDG、HMU 的失效类型见表 10。

表 10 部件的失效类型

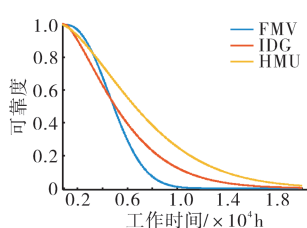
部件名称	形状参数 β	失效类型
FMV	$\hat{\beta}_1 = 2.73, \hat{\beta}_2 = 1.29$	早期耗损失效
IDG	$\hat{\beta}_1 = 1.62, \hat{\beta}_2 = 1.19$	早期耗损失效
HMU	$\hat{\beta}_1 = 1.25, \hat{\beta}_2 = 1.74$	早期耗损失效

3.2 单 Weibull 分布模型

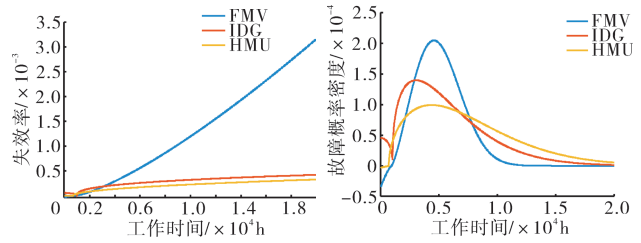
作为对比,依据表 2、5、8 分别建立 FMV、IDG、HMU 的单 Weibull 分布模型,其可靠度函数、失效率函数及故障概率密度函数如图 5 所示。

将单 Weibull 分布模型与 Weibull 混合分布模型的部件失效率与故障概率密度函数图像对比可知:

(1)从图 5(b)中可见,



(a) 可靠度函数



(b) 失效率函数

(c) 故障概率密度函数

图 5 单 Weibull 分布模型的部件 3 种函数

单 Weibull 分布模型随着工作时间的延长, FMV、IDG、HMU 的部件失效率函数图像近似为直线,但由于 FMV、IDG、HMU 均为复杂的机械电子系统,其故障模式复杂多变,故在工程实践中很难用 1 条直线表示其失效率。

故 Weibull 混合分布模型的部件失效率(图 4(b))更符合工程实践,由此可见相对单 Weibull 分布模型, Weibull 混合分布模型的精度更高,能兼顾同一部件的多种失效模式;

(2)如图 5(c)所示 FMV 的故障概率密度函数相对图 4(c)的简化,同时工作时间在 0~936 h 区间时, FMV 的故障概率密度函数为负值,与工程实践严重相悖。这也是由于相对 Weibull 混合分布模型,单 Weibull 分布模型的精度不高,无法兼顾 FMV 的多种失效模式。

由此可见,相对于单 Weibull 分布模型, Weibull 混合分布模型的精度更高,更适用于故障复杂多变的机械电子系统,因而可更好地拟合发动机零部件的寿命数据。

4 结论

(1)航空发动机部件多为复杂的机械电子系统,其故障类型复杂多变,因而其寿命数据经常不是单 Weibull 分布,因而在工程实践中为保证发动机部件寿命模型的拟合精度,需用 Weibull 混合分布模型来表征发动机部件的寿命数据。

(2)依据 Weibull 混合分布模型可较精确地计算出发动机部件在经过任意使用时间后的可靠度、失效率以及平均故障间隔时间等可靠性指标,有助于发动机管理工程师制定视情维修方案;同时基于 Weibull 混合分布模型也可计算出发动机各部件的航材备件数量,具有较高的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 马红亮,冯蕴雯,刘骞,等.一种航空发动机运行可靠性评估方法[J].航空工程进展,2021,12(5):42-49.
MA Hongliang, FENG Yunwen, LIU Qian, et al. Evaluation method of aeroengine operation reliability[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5):42-49.(in Chinese)
- [2] 冯蕴雯,潘维煌,刘佳奇,等.基于机器学习的飞机动力装置运行可靠性[J].航空学报,2021,42(4):394-404.
FENG Yunwen, PAN Weihuang, LIU Jiaqi, et al. Operation reliability of aircraft power plant based on machine learning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4):394-404.(in Chinese)
- [3] 洪骥宇.基于深度学习的航空发动机可靠性分析[D].南京:南京航空航天大学,2018.
HONG Jiyu. Research on aero-engine reliability analysis based on deep learning[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.(in Chinese)
- [4] Wang L, Tripathi Y M, Lodhi C, et al. Inference for constant-stress Weibull competing risks model under generalized progressive hybrid censoring[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2022, 192(2): 70-83.
- [5] Kazemi M, Azizpoor M. Estimation of the inverse Weibull distribution parameters under type-I hybrid censoring[J]. Austrian Journal of Statistics, 2021, 50(5):38-51.
- [6] Kumar M B H, Balasubramanian S, Padmanaban S, et al. Wind energy potential assessment by Weibull parameter estimation using multiverse optimization method: a case study of Tirumala region in India[J]. Energies, 2019, 12(11):2158.
- [7] 韩威,杨杏,李刚,等.基于PCA和威布尔分布的滚动轴承剩余寿命预测方法研究[J].机械制造与自动化,2022,51(4):61-64.
HAN Wei, YANG Xing, LI Gang, et al. Research on residual life prediction method of rolling bearing based on PCA and Weibull distribution[J]. Machine Building and Automation, 2022, 51(4):61-64.(in Chinese)
- [8] 倪百秀,赵莉莉,王颖,等.基于三参数威布尔分布模型的台风灾害损失研究[J].安庆师范大学学报(自然科学版),2022,28(3):53-58.
NI Baixiu, ZHAO Lili, WANG Ying, et al. Study of typhoon disaster loss based on three-parameter Weibull distribution model[J]. Journal of Anqing Normal University (Natural Science Edition), 2022, 28(3): 53-58.(in Chinese)
- [9] 文昌俊,陈哲,徐云飞,等.基于威布尔分布的谷物干燥机可靠性分析[J].机电工程,2022,39(7):972-977.
WEN Changjun, CHEN Zhe, XU Yunfei, et al. Reliability analysis of grain dryer based on Weibull distribution[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2022, 39(7):972-977.(in Chinese)
- [10] 张建平,张蓓.基于三参数威布尔函数法的光电器件寿命快速评估模型及其应用[J].电子元件与材料,2021,40(2):137-143.
ZHANG Jianping, ZHANG Bei. Fast life evaluation model of photoelectric devices based on three-parameter Weibull function method and its application[J]. Electronic Components and Materials, 2021, 40(2):137-143.(in Chinese)
- [11] 黄珂磊.基于威布尔分布的轿车车身疲劳寿命稳健性优化设计[D].长春:吉林大学,2022.
HUANG Kelei. Robust optimization design for fatigue life of car body based on Weibull distribution[D]. Changchun: Jilin University, 2022.(in Chinese)
- [12] 梁娜.威布尔分布下抽检方法设计与供应保障成本优化[D].成都:电子科技大学,2022.
LIANG Na. Sampling method design and supply guarantee cost optimization under Weibull distribution[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.(in Chinese)
- [13] 袁忠大,符双学,王大伟.基于威布尔混合分布的航空发动机可靠性评估[J].航空计算技术,2015,45(5):65-67.
YUAN Zhongda, FU Shuangxue, WANG Dawei. Aeroengine reliability evaluation based on Weibull hybrid distribution[J]. Aeronautical Computing Technology, 2015, 45(5):65-67.(in Chinese)
- [14] 周博,谢东来,张宪海. MATLAB 科学计算[M].北京:机械工业出版社,2010:168-179.
ZHOU Bo, XIE Donglai, ZHANG Xianhai. MATLAB scientific calculation[M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 168-179.(in Chinese)
- [15] 白杰,袁忠大,王伟.威布尔混合分布可靠性模型的权重计算[J].航空维修与工程,2012,47(6):49-51.
BAI Jie, YUAN Zhongda, WANG Wei. Weight calculation of Weibull hybrid distribution reliability model[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2012, 47(6):49-51.(in Chinese)
- [16] 张德丰. Matlab 概率与数理统计分析[M].北京:机械工业出版社,2009:178-183.
ZHANG Defeng. Matlab probability and mathematical statistics analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 178-183.(in Chinese)
- [17] 陈家鼎. 概率与统计[M].北京:北京大学出版社,2007:364-378.
CHEN Jiading. Probability and statistics[M]. Beijing: Peking University Press, 2007: 364-378.(in Chinese)
- [18] 袁忠大,程秀全,张勇.民用航空发动机引气系统部件寿命建模[J].航空发动机,2020,46(1):6-11.
YUAN Zhongda, CHENG Xiuquan, ZHANG Yong. Component life modeling of civil aeroengine bleed air system[J]. Aeroengine, 2020, 46(1):6-11.(in Chinese)

(编辑:贺红井)