

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2023.01.002

飞机整体驱动发电机可靠性与维修策略探究

王兢茹^{1*} 杨剑锋² 杨忠清¹

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016; 2. 工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610)

摘要: 针对飞机整体驱动发电机可靠性分析手段缺乏、故障样本小且维修策略相对保守的问题, 提出了以历史故障数据为驱动的贝叶斯和马尔可夫链融合的可靠性分析方法。首先, 利用蒙特卡洛方法对故障数据预处理以增大样本空间, 并通过最大信息熵法求解飞机整体驱动发电机的先验分布; 其次, 利用马尔可夫链方法对复杂后验分布进行解算; 最后, 以可靠性为中心给出飞机 IDG 的维修建议。经过数值仿真软件计算后得 IDG 的累计失效函数参数估计误差分别为 0.121 3 和 0.001 3, 误差较小。仿真结果表明, 提出的可靠性分析方法适用于小样本空间的飞机 IDG 可靠性分析, 并根据结果给出了维修建议。

关键词: 飞机整体驱动发电机; 最大信息熵; 可靠性; 维修策略

中图分类号: V215.7; VV233.3⁺22

文献标识码: A

OSID:



0 引言

随着飞机越来越系统化与集成化, 传统的液压系统、机械系统逐渐被电力驱动系统取代, 导致电力机载设备增多, 这就需要飞机装备更高可靠性的电源系统^[1-2]。飞机整体驱动发电机 (integrated drive generator, 简称 IDG) 由于其机械结构和控制方式相对简单, 广泛应用于多种飞机的供电系统中。IDG 作为航空发动机上的重要组件, 长时间工作在高空、高振动载荷等恶劣环境下, 复杂的工作环境使得 IDG 部件难以依照传统维修方法进行维修工作, 因此, 可基于历史故障数据对飞机 IDG 部件进行可靠性分析来制定维修策略。

在飞机部件的可靠性分析方面, 冯蕴雯等人以飞机快速存取记录器数据为基础, 建立了基于机器学习的动力装置可靠性模型, 进而证明所采用方法能够较好地反映该装置运行过程的时变可靠性规律^[3]; 郭媛媛等人提出一种基于飞机零部件原始数据的可靠性分析方法, 建立了基于多源数据的飞机

零部件可靠性模型^[4]; LI Huaiyuan 等人针对故障数据的信息不确定性等特点, 提出一种将检查样本转换为完整样本的飞机副翼可靠性分析方法^[5]; 沈安慰等人通过对比分析中位秩法和平均秩次法两种经验分布函数, 得到综合最小二乘法及平均秩次法的某航空装备的可靠性参数估计精度更高^[6]。然而, 随着飞机部件可靠度的提升, 其故障数据样本较小, 在小样本情况下, 上述的可靠性分析方法会造成分析结果与实际情况之间存在一定的误差。本文通过贝叶斯方法与马尔可夫蒙特卡洛过程给出了飞机 IDG 在小样本条件下的可靠性定量分析方法, 为 IDG 的维修与保障提供更为严谨的数据支持, 对保障飞机安全运行和提高飞机运行效率具有重要意义。

1 相关理论

1.1 飞机 IDG 原理

飞机整体驱动发电机又称组合驱动发电机, 由恒速传动装置和喷油冷却器及无刷交流发电机组合而成^[7]。飞机发动机提供了可变的输入转

* 通信作者. E-mail: wjr199708@163.com

引用格式: 王兢茹, 杨剑锋, 杨忠清. 飞机整体驱动发电机可靠性与维修策略探究[J]. 民用飞机设计与研究, 2023(1):8-14.
WANG J R, YANG J F, YANG Z Q. Research on reliability and maintenance strategy of aircraft integral drive generator [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(1):8-14(in Chinese).

速,发动机输出轴转动带动 IDG 主轴转动,由恒速传动装置将输入转速转换为恒定的转速,进而驱动 IDG 内部发电机转子转动。发电机控制系统实现发电控制,从而给飞机各系统供电。IDG 整体结构及剖视图如图 1 所示,工作示意图如图 2 所示。

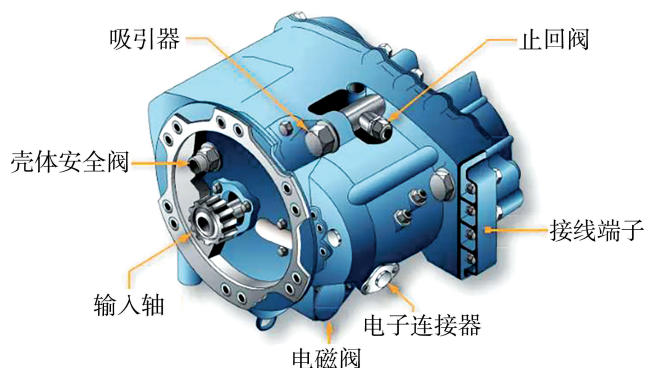


图 1 飞机整体驱动发电机结构图

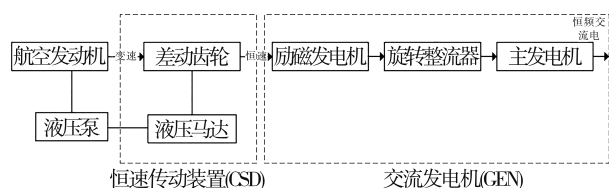


图 2 飞机 IDG 工作示意图

相比简单的机械系统,常规方式通常难以对飞机整体驱动发电机进行有效的故障诊断。从历史故障维修数据出发,对飞机 IDG 这类结构复杂且对可靠性要求较高的航空部件进行分析,逐渐成为目前航空维修业可靠性研究发展趋势。根据飞机 IDG 故障数据的特点进行可靠性分析,了解故障产生的规律,对制定经济合理的维修策略和提高飞机 IDG 的使用可靠性具有重要意义,同时也符合当下我国航空领域战略需求。

1.2 贝叶斯与蒙特卡洛马尔可夫

贝叶斯方法可利用先验信息对概率密度函数中的未知参数进行估计。如式(1)所示,联合分布函数 $h(x, \theta)$ 可分解为样本 x 在未知参数 θ 下的条件分布与样本边缘分布,式(2)的 x 边缘概率密度函数 $m(x)$ 又可表示为排除了任何有关未知量 θ 的信息的子样本集合。进而可得式(3)所示的考虑了先验信息的未知参数估计结果 $f(\theta|x)$ 。

$$h(x, \theta) = f \cdot \pi(\theta) \quad (1)$$

$$m(x) = \int_{\theta} f(x|\theta) \cdot \pi(\theta) d\theta \quad (2)$$

$$f(\theta|x) = \frac{h(x, \theta)}{m(x)} = \frac{f(\theta|x) \cdot \pi(\theta)}{\int_{\theta} f(x|\theta) \cdot \pi(\theta) d\theta} \quad (3)$$

贝叶斯方法利用了先验信息,能够对原有判断进行有效修正。就先验概率分布确定的问题,一般可由以往经验进行判断。如果先验信息比较缺乏,可先假设每个参数具有相同的先验概率。对于比较复杂的情况,可通过边缘分布密度、相互信息原理或最大熵方法等来确定先验概率。

马尔科夫链蒙特卡洛方法(Markov Chain Monte Carlo, 简称 MCMC)的核心在于其收敛性质。其基本思想是:首先,构造一条能稳定收敛的马尔科夫链,使其最终的平稳状态为待估参数的后验分布;然后,采用适当的抽样技术从该马尔科夫链中抽取样本;最后,对该后验分布进行蒙特卡洛积分。在 MCMC 方法中,关键在于生成稳定的马尔科夫链后对待估变量进行抽样,目前较精确的抽样方法包括 Metropolis-Hasting(MH)算法和 Gibbs 算法。MH 算法适用于低维数值运算,当变量维数较高时可采用 Gibbs 抽样。Gibbs 抽样对目标分布为多元分布的情况较为适用,可解决高维随机变量的抽样模拟问题。Gibbs 抽样中,设 z_i 为某随机变量, $p(\theta_i)$ 为第 j 组待估随机变量的边缘分布函数,在稳态分布中可按图 3 步骤进行抽样,完成马尔可夫链的一次实现,迭代 t 次后,可得到 $z^{(t)} = (z_1^{(t)}, \dots, z_m^{(t)})$, 整条马尔可夫链即为 $z^{(1)}, z^{(2)}, z^{(3)}, \dots, z^{(t)}$ 。

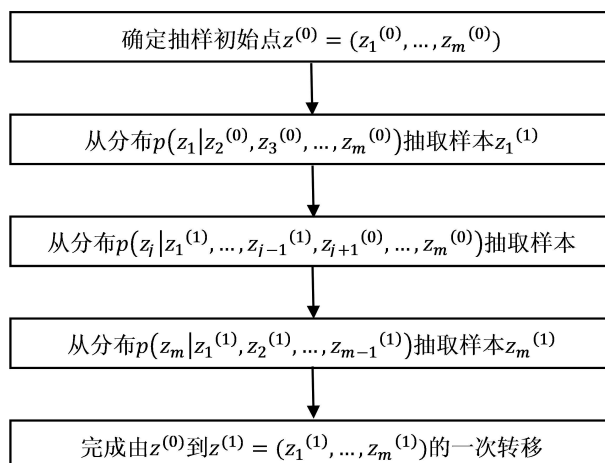


图 3 Gibbs 马尔可夫链一次实现流程图

2 基于贝叶斯与 MCMC 的 IDG 可靠性定量分析

现收集到某航空公司波音 737 飞机供电系统三年的飞行、客舱记录本和工作单等故障数据^[8],通过对统计数据预处理,得到表 1 所示的故障间隔时间,由样本量可知该样本为小样本。

表 1 飞机 IDG 故障间隔时间统计表

序号	故障间隔时间/h	序号	故障间隔时间/h
1	1 008.30	9	7 870.67
2	1 742.72	10	9 372.88
3	3 001.74	11	12 187.93
4	4 049.50	12	14 724.78
5	4 801.85	13	16 229.96
6	5 103.44	14	17 720.53
7	5 658.39	15	23 561.00
8	6 634.29		

2.1 先验分布

威布尔分布是当前可靠性领域中应用十分广泛的一种分布形式,对于飞机整体驱动发电机来说,可选用两参数的威布尔分布模型^[9]。式(4)为两参数威布尔分布的累计失效函数,其中, α 为比例参数, β 为形状参数。

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (4)$$

在得到故障数据后,先利用最大似然估计进行粗略的参数估计,可得到初始参数估计值 (α, β) 为(9 816.3, 1.417 4),经过 0.05 显著度的 KS 检验后,得 P 值为 0.995 0,远大于 0.05,故而可以认为该飞机 IDG 分布服从威布尔分布。

贝叶斯方法相对于传统可靠性参数估计方法而言,区别在于贝叶斯方法能够融入许多客观信息,使得即使小样本数据也能对未知参数进行合理推断。但是若先验分布选取不当,同时数据样本不足,会导致参数估计的准确度较低,因此,先验分布形式的选取十分重要。最大熵法的原理是在约束条件下极大化熵函数,选择最优的先验分布^[10]。最大熵法能够充分利用先验信息对可靠性参数进行

推断,并减小不确定因素的影响,因此采用最大熵法进行分析。

联合先验分布 $\pi(\alpha, \beta)$ 的最大熵可用式(5)表示,式(6)~(8)为 $\pi(\alpha, \beta)$ 最大熵的约束条件,通过对最大熵进行求解,得到双参数威布尔联合分布的先验分布表达式如式(9)所示。

$$\max H(\alpha, \beta) =$$

$$- \int_{-\infty}^{+\infty} \pi(\alpha, \beta) \cdot \ln \pi(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (5)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \pi(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = 1 \quad (6)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \alpha^2 \pi(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = E(\alpha^2) \quad (7)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \beta^2 \pi(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = E(\beta^2) \quad (8)$$

$$\pi(\alpha, \beta) = \frac{1}{2\pi\sigma_\alpha\sigma_\beta} \exp\left[-\frac{(\alpha - \bar{\alpha})^2}{2\sigma_\alpha^2} - \frac{(\beta - \bar{\beta})^2}{2\sigma_\beta^2}\right] \quad (9)$$

为得到参数的先验分布,需得两参数的均值与方差。首先需要通过反函数生成随机数的方法,对飞机整体驱动发电机的故障数据进行模拟,进而扩大参数的样本空间,其初始值选用最大似然估计值。利用蒙特卡洛法生成(0,1)中若干个随机数,代入式(10)的威布尔反函数中即可生成一组 IDG 的模拟故障数据。通过对故障数据进行拟合,可得到一组新的参数估计值。通过数值仿真软件模拟生成 30 组故障数据,每组包含 100 个故障时间节点,可得到 30 组参数估计值,表 2 展示了部分参数估计值与两参数的均值及方差。

$$t = \alpha \cdot \ln(1-F)^{\frac{1}{\beta}} \quad (10)$$

表 2 模拟失效数据值

序号	α	β
1	10 085.659 54	1.478 125 77
2	9 453.129 022	1.218 079 128
3	9 684.304 575	1.464 444 716
4	10 033.645 29	1.353 659 749
5	8 772.006 966	1.505 356 815
6	9 476.906 271	1.449 219 027
特征值	$\bar{\alpha} = 9 669.645 663,$ $\sigma_\alpha^2 = 265 947.357 1$	$\bar{\beta} = 1.435 628 515,$ $\sigma_\beta^2 = 0.015 582 161$

2.2 后验分布

先验分布函数结合由故障数据集 x 得出的样本似然函数 $f(x|\theta)$ 后,即可应用贝叶斯公式计算未知参数得后验概率分布:

$$f(x|\theta) = \frac{h(x, \theta)}{m(x)} = \frac{f(x|\theta) \cdot \pi(\theta)}{\int_{\theta} f(x|\theta) \cdot \pi(\theta) d\theta} \quad (11)$$

由失效数据集可得似然函数的形式如式(12)所示,根据前文得到的先验分布函数,可以将两参数的后验分布函数核函数表示为:

$$\begin{aligned} f(t|\alpha, \beta) &= \prod_{i=1}^n f(t_i|\alpha, \beta) \\ &= \frac{\beta^n (\prod_{i=1}^n t_i)^{\beta-1}}{\alpha^{n\beta}} \exp\left(-\frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\beta}}{\alpha^{\beta}}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} f(\alpha, \beta|t) &\propto f(t|\alpha, \beta) \cdot \pi(\alpha, \beta) \\ &= \frac{\beta^n (\prod_{i=1}^n t_i)^{\beta-1}}{2\pi\alpha^{n\beta}\sigma_{\alpha}\sigma_{\beta}} \exp\left[-\frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\beta}}{\alpha^{\beta}} - \frac{(\alpha - \bar{\alpha})^2}{2\sigma_{\alpha}^2} - \frac{(\beta - \bar{\beta})^2}{2\sigma_{\beta}^2}\right] \end{aligned} \quad (13)$$

此后验分布为高维,复杂且非常见的分布形式,若按照普通分布形式的计算方法进行参数计算会十分困难,故采用马尔可夫蒙特卡洛算法求解后验分布。将求得的后验分布函数进行边缘解算,得到如式(14)和式(15)所示的后验边缘分布形式。由于其分布形式较为复杂,故采用吉布斯抽样的方式对其求解。求解流程如图4所示。

$$f(\alpha|t, \beta) \propto \frac{1}{\alpha^{n\beta}} \exp\left[-\frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\beta}}{\alpha^{\beta}} - \frac{(\alpha - \bar{\alpha})^2}{2\sigma_{\alpha}^2}\right] \quad (14)$$

$$f(\beta|\alpha, t) \propto \frac{\beta^n (\prod_{i=1}^n t_i)^{\beta-1}}{\alpha^{n\beta}} \exp\left[-\frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\beta}}{\alpha^{\beta}} - \frac{(\beta - \bar{\beta})^2}{2\sigma_{\beta}^2}\right] \quad (15)$$

由于初始迭代阶段相对不稳定,为减小其对参数估计的影响,采用抽样稳定后的部分对参数统计量进行计算。为保证求解过程可靠,设置抽样迭代次数为 10 000 次,并舍弃前 500 次的不稳定抽样,使用后 9 500 次的参数迭代数据进行分析计算。两参数的迭代过程如图 5 所示,由于迭代过程中初始值使用最大似然估计得到的参数估计值,故整个过程收敛速度较快且相对稳定。

经过 MCMC 过程可得两参数的后验概率密度函数如图 6 所示,参数后验统计量见表 3。

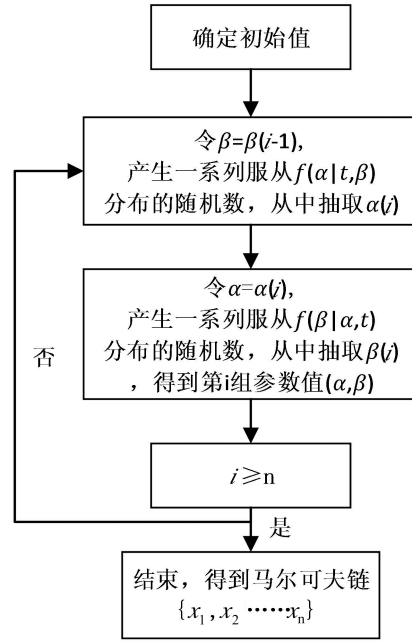
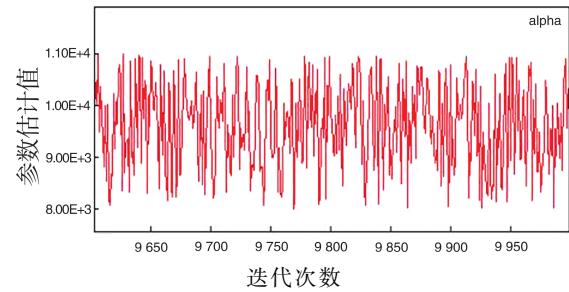
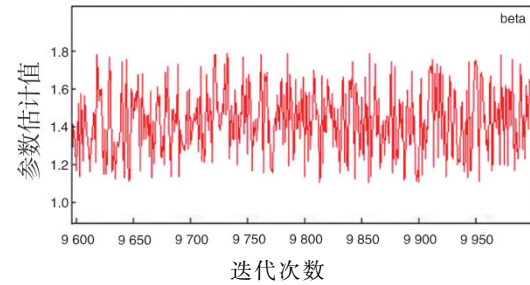


图4 MCMC 求解后验分布流程图

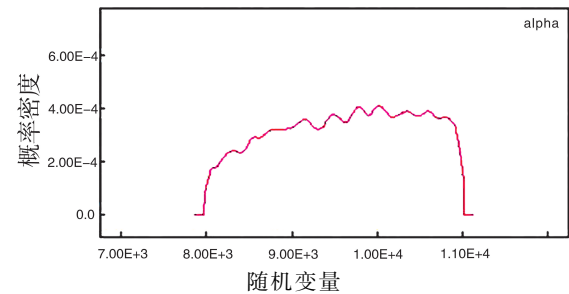


a) α 迭代过程



b) β 迭代过程

图5 参数迭代过程



a) α 后验概率密度函数

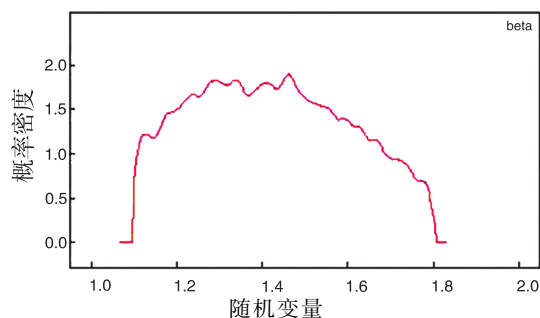
b) β 后验概率密度函数

图 6 后验概率密度函数

表 3 后验统计量

参数	α	β
均值	9 626	1.423
Sd 值	817.9	0.181 6
MC 误差	9.098	0.001 9
2.5% 分位数	8 138	1.122
中位值	9 681	1.415
97.5% 分位数	10 930	1.764
起始点	501	501
样本量	9 500	9 500

其中,MC 误差为样本标准差与样本量的平方根之比,根据经验,各待估参数的 MC 误差应当小于样本 sd 值的 5%。经计算,参数估计误差满足要求,且误差较小。至此,后验分布的参数估计结束。分别将两参数统计量带入式(16)~式(18),即可得此飞机 IDG 的可靠度、失效率函数与平均无故障工作时间。图 7 为 IDG 的可靠度曲线,图 8 为失效率曲线。

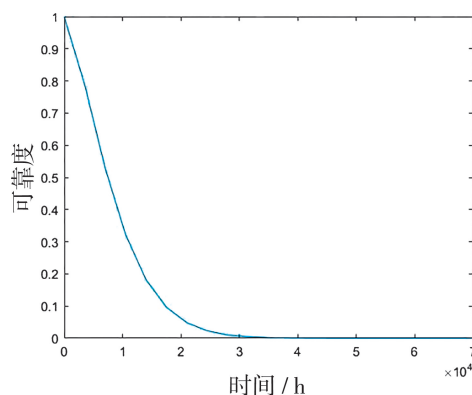


图 7 IDG 可靠度曲线

$$\begin{aligned}
 R(t) &= \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \\
 &= \exp\left[-\left(\frac{t}{9\,626}\right)^{1.423}\right] \quad (16)
 \end{aligned}$$

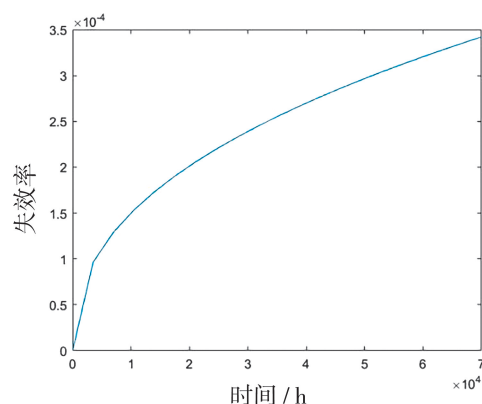


图 8 IDG 失效率曲线

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^{\beta}} = \frac{1.423 t^{0.423}}{9\,626^{1.423}} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
 \text{MTBF} &= \int_0^{\infty} t f(t) dt \\
 &= \alpha \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 8\,420.65 \text{ h} \quad (18)
 \end{aligned}$$

2.3 与传统分析方法对比

瑞蓝软件是目前行业常用的可靠性分析工具,已经发展为可靠性工程领域的专业软件。为了验证本文分析方法的正确性与优越性,采用瑞蓝的分析结果进行对比。

瑞蓝软件的两参数威布尔估计采用了工程上使用较多的秩回归法,求秩方法为中位秩法,将故障数据输入程序中,运行后可得比例参数 α 为 9 870.9,形状参数 β 为 1.31,可靠度曲线对比如图 9 所示。计算得两种方法之间的误差为 1.094×10^{-4} ,误差较小,说明所提出的方法准确性较高。计算可得,当可靠性为 0.95 h 时,对应的飞行时长为 1 027 FH,与应用贝叶斯 MCMC 分析得到的 1 193 FH 相差 166 FH,可看出对于高可靠性的飞机部件来说,软件得到的数据相对保守,在维持安全性的前提下,所提出的方法更加节省人力与经济成本。

3 飞机 IDG 维修建议

随着飞机飞行时间的增长,IDG 的可靠度逐渐下降,若仅仅按照传统的检修标准进行检修,IDG 在飞行时发生故障的风险将会增大。相反,若检修间隔过短,则可能会由于人员操作技术等问题增加飞机部件的故障率。故可建立以可靠性为中心的维

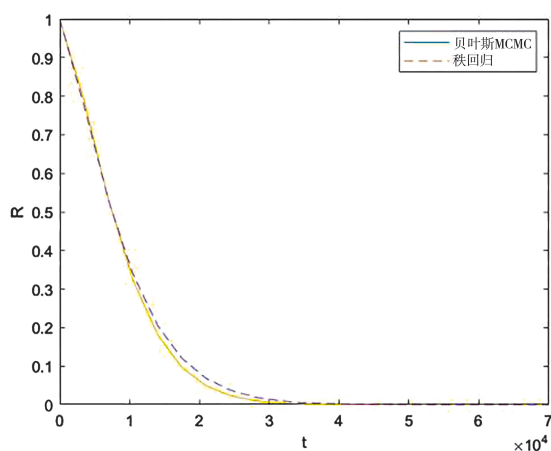


图9 可靠度曲线对比

修策略,使得结果既不因过于保守导致浪费人力与经济成本,也不会由于维修间隔过长导致飞行风险发生率的增长。

由前文分析可知 IDG 可靠度形状参数为 1.423,由威布尔分布的性质可知,当形状参数大于 1 小于 2 时,失效率随时间递增,且此时故障为早期损耗故障。对于早期损耗故障类型,一般可通过制定合理的维修时间间隔进行预防性维修,也可针对实际情况维修或状态维修。若规定 IDG 可靠度需达到 0.95 才可继续工作,由可靠度函数可知,当可靠度为 0.95 时,对应的飞行时长为 1 193 FH,表明当 IDG 工作 1 193 FH 后,应对 IDG 部件进行检修。然而,按照常规的浴盆曲线设立的设备大修周期只适用于少数设备,因此,采用状态检修的维修策略更为合适^[11]。在规定时间内,为减少多余的维修次数,降低成本,可采用的状态检测周期为 0.1 MTBF,即建议每经 842 FH 后,即应对该型号飞机 IDG 部件进行检修。

4 结论

1) 分析得到某型号飞机 IDG 可靠度服从参数为(9 626,1.423)的双参数威布尔分布。

2) 以得到的可靠性指标为中心给出了飞机 IDG 的维修建议,即每经 842 FH 应对该型号飞机 IDG 进行检修。

参考文献:

- [1] WHEELER P. Technology for the more and all electric aircraft of the future[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Automatica, October 19-21, 2016, Curico, Chile. [S. l.]:IEEE,2016.
- [2] WHEELER P, BOZHKO S. The more electric aircraft: technology and challenges[J]. IEEE Electrification Magazine,2014,2(4):6-12.
- [3] 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.
- [4] GUO Y Y, SUN Y C, LI L B, et al. Reliability assessment for multi-source data of mechanical parts of civil aircraft based on the model[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2019,33(7):3205-3211.
- [5] LI H Y, ZUO H F, LIU R C, et al. Evaluation of aileron actuator reliability with censored data[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2015,28(4):1087-1103.
- [6] 沈安慰,郭基联,王卓健. 航空装备现场数据可靠性评估方法有效性分析[J]. 航空学报,2014,35(5):1311-1318.
- [7] 王莉. 航空航天器供电系统[M]. 北京:科学出版社,2018.
- [8] 刘敬赞. 基于故障维修数据的飞机 IDG 可靠性分析[D]. 天津:中国民航大学,2021.
- [9] KAMINSKIY M P, KRIVTSOV V V. A simple procedure for Bayesian estimation of the Weibull distribution[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(4):612-616.
- [10] 王微. 基于信息熵法的数控机床贝叶斯可靠性评估方法研究[D]. 长春:吉林大学,2013.
- [11] 叶林,于新杰. 机械设备现代维修技术-状态维修[J]. 机械科学与技术,1999,18((3)):457-458;462.

作者简介

王兢茹 女,硕士。主要研究方向:可靠性工程。E-mail: wjr199708@163.com

杨剑锋 男,博士,高级工程师。主要研究方向:无人机系统可靠性与安全性、多体系统动力学建模与控制策略研究。E-mail: yangjeff2013@163.com

杨忠清 男,博士,硕士生导师。主要研究方向:飞行器设计,可靠性工程。E-mail: zqyang@nuaa.edu.cn

Research on reliability and maintenance strategy of aircraft integral drive generator

WANG Jingru^{1*} YANG Jianfeng² YANG Zhongqing¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. The Fifth Research Institute of MIIT, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In view of the lack of reliability analysis methods, small fault samples and relatively conservative maintenance strategies of aircraft integral drive generators, a reliability analysis method based on Bayesian and Markov chain fusion driven by historical fault data was proposed. Firstly, the Monte Carlo method was used to preprocess the fault data to increase the sample space, and the prior distribution of the aircraft overall drive generator was solved by the maximum information entropy method. Secondly, the Markov chain method was used to solve the complex posterior distribution. Finally, the maintenance suggestions of the aircraft IDG (integral drive generator) were given based on the reliability. The cumulative failure function parameter estimation errors of IDG calculated by numerical simulation software are 0.121 3 and 0.001 3 respectively, with small errors. The simulation results show that the proposed reliability analysis method is suitable for aircraft IDG reliability analysis in small sample space, and maintenance suggestions were given according to the results.

Keywords: aircraft integral drive generators; maximum information entropy; reliability; maintenance strategy

* Corresponding author. E-mail: wjr199708@163.com