

基于概率统计和专家评价的飞机供电系统遂行任务能力评估

胡辰宇^{1,2}, 潘晋新¹, 方欣³, 焦晓璇¹, 景博¹

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 94778 部队, 上海, 200082;

3. 北京科技大学教育经济与管理研究所, 北京, 100083)

摘要 针对飞机供电系统遂行任务能力评估问题, 提出基于统计分析 with 专家评价融合的方法。首先, 对某型飞机供电系统进行介绍, 分析其主要故障模式与故障原因; 其次, 通过供电系统故障统计数据, 拟合出供电系统故障威布尔分布, 并针对装备遂行任务的需求, 提出基于后验知识的任务期间装备故障概率计算方法。在此基础上, 针对遂行任务具体环境、强度等因素的差异, 采用基于专家经验打分的方式, 综合考虑振动、负载、自然环境等因素, 对供电系统环境因素进行评级。通过某型飞机供电系统实际故障数据进行验证, 结果表明, 该方法能够有效预测供电系统关键部件遂行任务条件下的故障概率, 并对任务环境因素进行综合评估, 以支撑遂行任务决策。

关键词 供电系统; 威布尔分布; 专家评价; 装备能力评估; 可靠性建模

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.02.002

中图分类号 V267 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)02-0011-08

An Assessment of Capability for Mission in Aircraft Power Supply System Based on Probability Statistics and Expert Evaluation

HU Chenyu^{1,2}, PAN Jinxin¹, FANG Xin³, JIAO Xiaoxuan¹, JING Bo¹

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 94778,

Shanghai 200082, China; 3. Institute of Education Economics and Management, Beijing University of

Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract In view of the task capability evaluation in power supply system at an aircraft, a method based on statistical analysis and expert evaluation is proposed. Firstly, the power supply system at a certain type of aircraft is introduced, and its main failure modes and failure reasons are analyzed. Secondly, the Weibull distribution of power supply system faults is fitted through the statistical data from power supply system faults, and a method of calculating equipment fault probability during the task based on posterior knowledge is proposed to meet the requirements of equipment tasks. On this basis, according to the differences in the specific environment and intensity of task, the environmental factors in the power supply system are rated by using the method of expert experience scoring in comprehensive consideration of the vi-

收稿日期: 2024-06-13

基金项目: 陕西省自然科学基金(2022JQ-586)

作者简介: 胡辰宇(1986-), 男, 黑龙江安达人, 工程师, 研究方向为飞机智能检测与健康管理。E-mail: huchenyu1986@qq.com

引用格式: 胡辰宇, 潘晋新, 方欣, 等. 基于概率统计和专家评价的飞机供电系统遂行任务能力评估[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(2): 11-18. HU Chenyu, PAN Jinxin, FANG Xin, et al. An Assessment of Capability for Mission in Aircraft Power Supply System Based on Probability Statistics and Expert Evaluation[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(2): 11-18.

bration, load, natural environment and other factors. The results show that the proposed method can effectively predict the failure probability of the key components in the power supply system under the condition of fulfilling the mission, and comprehensively evaluate the mission environmental factors, supporting the decision of fulfilling the mission.

Key words power supply system; Weibull distribution; expert evaluation; equipment capability evaluation; reliability modeling

供电系统是飞机的重要组成单元^[1],负责对飞机各系统供电^[2],对飞行安全和设备功能实现至关重要,尤其在外遂行任务期间,需要对供电系统的能力与状态做出准确评价。由于供电系统结构相对复杂、失效模式多样,且设备性能随使用时间退化明显,因此,对供电系统开展健康管理意义重大。

现阶段,基于数据驱动的方法在健康管理领域得到了广泛应用^[3],机器学习^[4]、深度学习^[5]等方法能够从装备的运维数据中挖掘状态信息,以判定装备健康状态^[6]。然而,由于供电系统在设计阶段对维护性考虑不足,导致运维过程中对其监控困难,据统计,在供电系统检测的 24 路数据中,仅有 8 个参数与供电系统性能直接相关,通过运维数据难以有效判定供电系统的健康状态,造成对供电系统的监测能力不足,数据驱动方法难以得到有效应用。

基于概率统计的可靠性评估方法是通过对大量装备的历史故障数据进行统计分析^[7-10],建立装备故障概率与时间的对应函数,常见的分布有威布尔分布^[11-12]、泊松分布^[13]等。基于概率统计的可靠性建模方法广泛应用于装备全寿命周期的寿命估计,由于其建模机理简单有效,已成为可靠性分析最常用的方法之一。然而,在可靠性建模方面,大多数文献面向的是基于故障数据如何进行建模,以提高建模精度。但在一定任务条件下,如何计算装备的可靠性,估计装备的任务遂行能力,是装备可靠性应用面临的实际问题。

针对这一问题,本文提出了一种概率统计与专家评价结合的方法,从任务期间装备统计故障概率与环境恶劣程度 2 个方法对任务遂行能力进行评估。通过供电系统故障统计数据,拟合出供电系统故障威布尔分布,并针对装备遂行任务的需求,提出基于后验知识的任务期间装备故障概率计算方法。同时,面向任务期间环境因素的差异,采用基于专家经验打分的方式,综合考虑振动、负载、自然环境等因素,对供电系统环境因素进行评级。本文方法通过某型飞机供电系统实际故障数据进行验证,对面向具体任务条件下的飞机供电系统状态评估具有参考价值。

1 飞机供电系统及其故障模式分析

1.1 供电系统简要原理

以某型飞机供电系统为例,主要由以下设备组成交流发电机,是主用交流电源,单台为 60 kVA,共 4 台。三相静止变流器,是备用交流电源,单台为 3.6 kVA,共 1 台。交流发电机控制保护器,是发电机的控制保护装置,实现对发电机调压点电压的自动调节,并在发电系统的供电特性超出规定时进行保护,交流发电机的输出线穿过差动和过流保护互感器,发电机控制保护器将互感器测量的参数与发电机内置互感器测量参数进行对比,实现发电机的差动、过流保护,并在发电机的供电特性超出规定时断开发电机主接触器,对输出电路进行保护,以实现发电机的过欠压、过欠频、短路、差动、过流、缺相等保护功能,确保交流发电机的供电品质能够满足要求^[13-14]。接触器属于交流电源系统重要部件,用于机上各交流供电通道的接通及转换^[15],其中主接触器(GB),用于发电机(GEN)向发电机汇流条(Bus)供电,发电机汇流条转换接触器(BTB)用于 2、3、4 号发电机汇流条向 1 号发电机汇流条的转换,负载转换接触器(LB)用于 2、3、4 号发电机汇流条向 II、III、IV 通道负载汇流条(LBus)供电,见图 1。

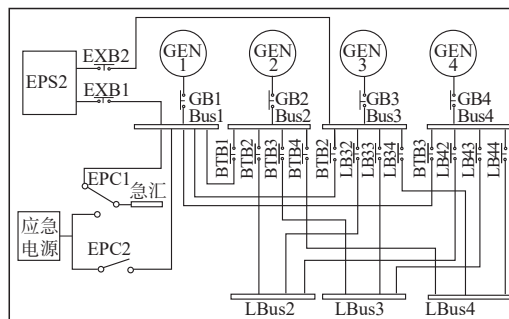


图 1 某型飞机供电系统原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of power supply system of an aircraft

1.2 供电系统故障模式分析

通过梳理某型飞机近 5 年的故障数据(总样本数 22 000、供电系统 3 000)基于故障位置和功用将

供电系统主要故障模式分为 4 类:供电端、供电通道、用电通道、用电端。

1.2.1 供电端故障模式

随着用电设备不断迭代升级,供电端负载率已达到或接近 100%的额定容量,沿用的三相静态变流器、交流配电装置、交流发电机等供电设备处于满负荷运行的状态,产品性能下降、问题持续增加。该样本数量 520,占供电系统总故障数的 17.33%,故障模式具体表现在:供电系统长时间大负载工作情况下,三相静止变流器内部线路烧蚀缺项故障;交流配电装置主通道总线故障;发电机内部整流二极管断裂导致供电系统缺项,失去供电能力,见图 2。

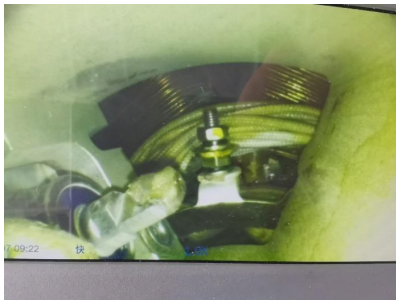


图 2 供电端交流发电机二极管根部断裂故障图

Fig.2 Fault diagram of AC generator diode root fracture at the power supply end

1.2.2 供电通道故障模式

供电端满负荷运转,给供电通道带来了巨大压力,导致电网过载、电压下降甚至设备损坏,影响了供电的稳定性可靠性。该样本数量 616,占供电系统总故障数的 20.53%,主要故障模式为:跳断路器、供电配置盒插头尾夹处电缆烧蚀痕迹、插头及插座插针、插孔间绝缘体烧蚀,见图 3。

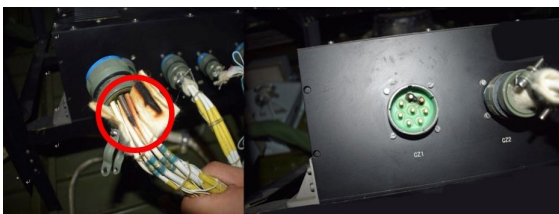
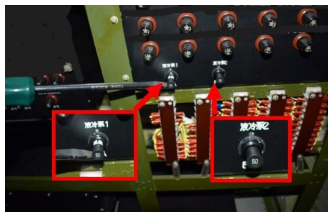


图 3 供电通道断路器、电缆、插座故障图

Fig.3 Power channel circuit breaker, cable, socket fault diagram

1.2.3 用电通道故障模式

供电系统大负载导致电网过载,尤其电网供电能力有限,当负载超过电网的承载能力时,可能导致

线路过热、短路或烧坏。该样本数量 498,占供电系统总故障数的 16.60%,主要故障模式为:接触器触点烧蚀,输出电缆插头烧蚀,封线体碳化,压线筒局部烧熔,熔化物与插头壳体形成短路,导致内外差动互感器检测到的电流不一致,产生差动保护,见图 4。



图 4 用电通道插头烧蚀故障图

Fig.4 Ablation failure diagram of electrical channel plug

1.2.4 用电端故障模式

用电端性能提升改进后,负载变大,通电时电缆的转接点、散热不良的区域温度过高,导致电缆绝缘层老化、熔化、击穿,最终导致电缆短路。该样本数量 1 366,占供电系统总故障数的 45.53%,主要故障模式为:用电设备大功率工作时,接线柱与导线连接产生大量热量,采用胶套做绝缘处理的接线柱处散热性能差,长时间工作后,导线热熔,设备性能变差,见图 5。

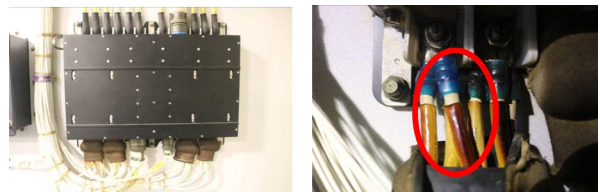


图 5 用电端设备散热、转接点烧蚀故障模式图

Fig.5 Failure mode diagram of heat dissipation and ablative point of the power terminal equipment

2 供电系统故障概率分析与建模

在原理分析的基础上,通过故障统计分析的方式,建立供电系统可靠性随时间变化的分布函数。从长期来看,随着飞机使用年限的增长,设备和系统内部的服役性能退化、外部的环境风险因素也是动态变化的,使得设备和系统在全寿命服役周期内的故障率、可靠性、可用性等指标具有动态性,供电系统设备的故障率符合浴盆曲线:设备全寿命服役周期内的各个时期,其故障率分别经历了急速下降、稳定不变和急速上升的动态变化过程,因此供电系统可靠性总体满足威布尔分布,如图 6 所示。

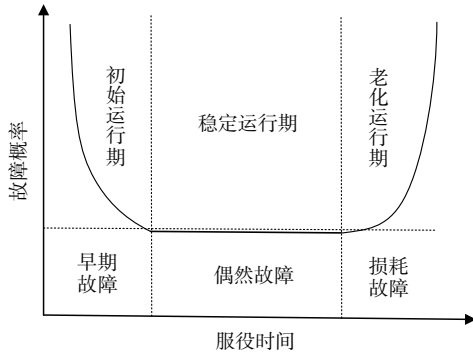


图6 交流供电设备故障率浴盆曲线

Fig. 6 Failure rate bathtub curve of AC power supply equipment

本文采用两参数威布尔分布对交流供电设备进行建模,假设威布尔分布可靠度函数为:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

不可靠度函数为:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

因此,交流供电设备威布尔分布求解的过程即通过历史故障数据拟合威布尔分布参数 β, η , 其求解过程可按照如下步骤开展:

步骤1 维修数据收集。收集计划维修数据、非计划维修数据,包括飞机总日历时间/飞行小时/飞行循环/空地比,计划维修任务的执行结果(发现故障或无故障)等。计划维修数据包含维修方案和航前、航后、过站、周检工作中包含的计划维修任务的信息;非计划维修数据包含飞机发生故障后,所执行的修复性维修任务所涉及的信息。

步骤2 维修记录甄选。得到不同类型的维修记录后,首先需要根据故障发现的时机对其进行一定甄别。数据可分为完整数据、左侧截尾数据、右侧截尾数据。其中,完整数据为故障发生时间与记录时间一致的数据;左侧截尾数据为故障发生时间在记录时间之前的数据;右侧截尾数据为故障发生时间在记录时间之后的数据。

维修数据的数据类型对应关系见表1,在维修任务开展过程中,存在多种发现故障的时机。如果在非计划维修工作中发现故障,例如飞机运行过程中内置测试(BIT)报出故障,说明报出故障时机与故障发生时机一致,此故障数据为完整数据;如果在计划工作中发现故障,例如在飞行前检查、周期性检查中发现故障,说明故障在检查前已经发生,但在运行过程中未报出,此类故障数据为左侧截尾数据;在计划工作与非计划工作中,如发现部件完好,说明故障将在该时刻之后发生,此类数据为右侧截尾数据。

表1 飞机故障数据与截尾数据类型的对应关系

Tab. 1 Correspondence between aircraft fault data and truncated data types

维修数据来源	维修数据结果	数据类型
非计划工作	失效	完整数据
非计划工作	未失效	右侧截尾数据
计划工作	失效	左侧截尾数据
计划工作	未失效	右侧截尾数据

在数据收集过程中,主要收集完整数据与左侧截尾数据,且左侧截尾数据与真实故障时间存在一定偏差,将会给建立的可靠性模型引入一定的不确定性。

步骤3 故障点不可靠度计算。故障数据的最重要信息是故障发生时部件工作的时长,除此之外,还需要通过计算得到每个故障点的不可靠度。在威布尔分布中,不可靠度计算式为:

$$Q(t_i) = \frac{0.3 + i}{n + 0.4} \quad (3)$$

式中: i 为故障点按照从小到大顺序排列的序号; t_i 为故障时间; $Q(t_i)$ 为不可靠度。以某供电系统数据为例,其不可靠度计算见表2。

表2 失效点的不可靠度计算样例

Tab. 2 Sample calculation of unreliability of failure points

i	t_i/h	$Q(t_i)$
1	8.57	0.005 046 691
2	28.65	0.012 220 428
3	114.36	0.019 470 747
4	196.79	0.026 737 724
5	213.65	0.034 010 874
6	221.79	0.041 286 968

步骤4 利用最小二乘法,拟合求解得到威布尔分布的参数和置信区间。将威布尔分布转化为线性函数,即将 $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$ 转化为 $y = a + bx$, 并利用样本数据组 $(t, Q(t))$, 使用最小二乘法求解拟合出 a 和 b , 进而得出威布尔分布的 β 和 η , 其中 b 的拟合公式如下:

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

令 $x = \ln t, y = \ln[-\ln(1 - F(t))], b = \beta, a = -\beta \ln \eta$, 得到两参数威布尔分布的 β 和 η 后,通过拟合度 $\rho(x, y)$ 判断拟合的质量,若拟合度大于 0.9,表示拟合出的结果可用于计划维修任务间隔的优化,若不大于 0.9,表示威布尔拟合度较低,拟合结果不可用于维修任务间隔优化,需待数据累积后

再次进行计算。

步骤 5 遂行任务故障概率估计。计算出部件故障概率威布尔分布的相关参数 β 和 η 后,得到其故障概率密度为:

$$f(t) = -\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (5)$$

可以此为依据评估其在一定任务需求下的故障概率。假设在执行任务前,部件已工作时间为 T ,计划执行任务时间为 t_0 ,可估算,在任务期间,部件发生故障的概率为:

$$F(T, t_0) = \int_T^{T+t_0} -\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] dt \quad (6)$$

3 基于专家评价的供电系统遂行任务环境评估

通过建立供电系统威布尔分布模型,实现了对一定任务时间段内供电系统故障概率的估计。然而,威布尔分布的建立是基于对本场发生的故障大数据,模型中的知识是面向一般飞行训练状态下与本场环境条件下的数据建立的,在遂行任务条件下,任务需求、飞行环境、飞行时间等因素的变化,将会很大程度影响供电系统的故障概率。针对这一问题,本文通过专家系统的方式,综合考虑供电系统的具体使用工况与任务,给出遂行任务对供电系统的影响程度。

3.1 供电系统健康状态的分层分析模型

供电系统健康状态的分层分析模型见图 7。其中,第 1 层为系统层,用于评估整个供电系统健康状态;第 2 层为子系统层,将供电系统按组成部分划分为交流发电机、汇流条功率控制器、发电机汇流条等几大关键子系统,分别对其进行健康评估;第 3 层为

元件层,对于组成各个子系统的元件,如控制保护器、互感器组、主接触器、电源参数显示器、电压表、正常汇流条、应急汇流条、转换接触器、电缆和开关等部件进行评估。

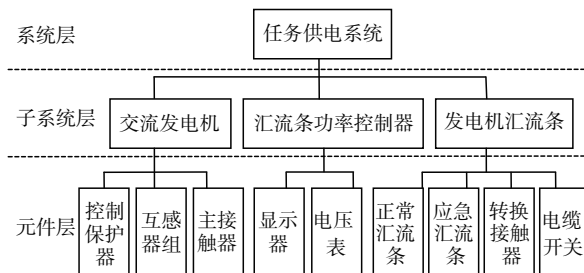


图 7 供电系统健康状态的分层分析模型

Fig. 7 Hierarchical analysis model of power supply system health status

3.2 供电系统遂行任务环境评估方法

为分析影响供电系统故障的主要因素,本文基于故障数据库的记录、查询故障时间该部件的飞行参数,通过提取飞参中的经纬度、日期、温度等信息,与故障数据进行匹配,并结合维修大纲与工作原理,分析影响飞机健康状态的主要因素。通过分析发现,影响供电系统故障频率的主要因素包括振动载荷,温度、湿度、沙尘等环境指标,负载,维护保养程度等因素,因此,本文计划从以上方面,对供电系统在外遂行任务期间环境因素进行综合评估^[16-18]。

本文将供电系统环境因素划分为 5 个等级,定义这 5 个等级对应的评语由高到低组成的评估集为: $R = \{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5\}$,依次对应{正常,轻度恶劣,中度恶劣,重度恶劣,极度恶劣}。由于该集合可表征为在不同程度上具有某种特定性质的元素总和,反映这些元素隶属于该集合的程度,其值介于 0~1 之间,因此该指标隶属于这个集合的程度越高,即表示健康值越高,见表 3。

表 3 供电系统遂行任务环境因素等级区间

Tab. 3 Level range of environmental factors for power supply system to perform tasks

环境因素	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
分值范围	0.80~1.00	0.61~0.80	0.41~0.60	0.21~0.40	0.00~0.20

设定得分为 S 、权重为 W 、振动系数为 Z 、自然环境严苛度为 T 、过载程度为 G 、维护保养系数为 P ,具体为:

1) 振动载荷系数:衡量设备振动强度和频率的重要参数,当超出设计载荷时,会影响设备寿命。振动传感器振动数值与振动载荷系数有对应关系,见表 4。综合得分计算公式: $S = WZ$ 。

表 4 振动数值与振动载荷系数的对应关系

Tab. 4 Correspondence between vibration value and vibration load coefficient

振动数值	$\leq 2g$	$(2g, 4g]$	$> 4g$
振动载荷系数	1	0.7	0.5

2) 自然环境:按照安装位置的温度、湿度、密封度等环境状态严苛程度打分,设备在潮湿、多尘、高

温或有腐蚀性气体的环境中使用时,其寿命会受到影响,这些环境因素可能导致设备内部的腐蚀、磨损或老化,从而降低性能和寿命。综合得分计算公式: $S=WT$ 。

3)负载:按照峰值超过规定、常态超过额定的程度、时间进行打分。超限情况与负载得分有对应关系,见表5。综合得分计算公式: $S=WG$ 。

表5 振动数值与振动载荷系数的对应关系

Tab.5 Correspondence between vibration value and vibration load coefficient

超限情况	0	<10%	10%~20%	20%~30%	30%~40%	>40%
负载得分	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0

4)维护保养:在设备全生命周期内,定期针对性地进行维护保养有助于提升设备健康程度,延长使用寿命。在周期内按时检查得分为1,否则为0,综合得分计算公式: $S=WP$ 。

权重的比例源于设备现有故障数据的积累,会随着数据不断地更新迭代调整。

4 供电系统健康评估实例验证

4.1 部件威布尔分布模型建立

交流发电机是供电系统的重要组成部分,是用电设备的供电来源,其健康状态直接影响飞机安全性能与设备性能发挥^[19]。本文以交流发电机为例,基于可靠性建模对机件健康状态进行评估研究。通过查阅数据,某单位交流发电机故障发生时及其对应故障时工作时间见表6。

表6 某交流发电机故障发生时及其对应故障时工作时间
Tab.6 Failure timing of an alternator and its corresponding working time

序号	故障发现日期	工作时次	发现时机	数据类型
1	2019-03-29	1 752:30:00	BIT 报故	完整
2	2019-08-01	1 754:10:00	BIT 报故	完整
3	2019-09-23	345:25:00	BIT 报故	完整
4	2019-10-30	596:43:00	BIT 报故	完整
5	2020-01-02	445:26:00	飞行前检查	左侧截尾
6	2020-01-05	925:31:00	BIT 报故	完整
7	2020-04-07	223:39:00	BIT 报故	完整
8	2020-04-14	579:38:00	周期性维修	左侧截尾
9	2020-05-08	572:46:00	飞行后检查	左侧截尾
10	2020-06-02	594:42:00	BIT 报故	完整
11	2020-06-02	579:38:00	BIT 报故	完整
12	2020-06-02	734:25:00	周期性维修	左侧截尾
13	2020-07-04	579:39:00	BIT 报故	完整
14	2020-09-22	876:17:00	BIT 报故	完整
15	2020-10-03	671:14:00	BIT 报故	完整

首先对数据进行预处理,将数据按照故障发生时间的先后顺序进行排列,通过式(1)进行换算,得到不同运行时间对应的可靠度^[20],部分数据见表7。

表7 某交流发电机故障可靠度计算表

Tab.7 Calculation table of fault reliability of an alternator

i	t_i/h	$Q(t_i)$
1	31	0.030 660
2	41	0.054 245
3	93	0.077 830
4	102	0.101 415
5	223	0.125 000
6	231	0.148 585
7	267	0.172 170
8	317	0.195 755

再通过最小二乘法对威布尔分布进行拟合,得到交流发电机可靠度的威布尔分布函数,见图8。

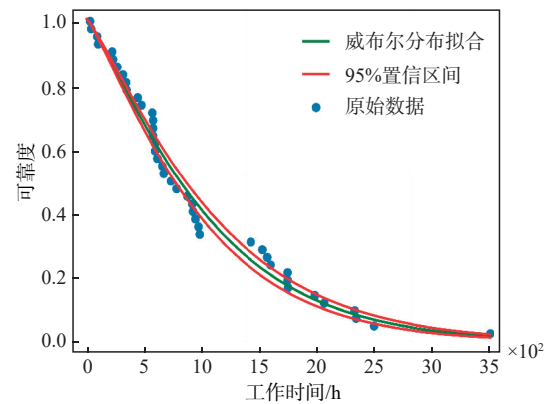


图8 交流发电机可靠度的威布尔分布函数

Fig.8 Weibull distribution function of alternator reliability

其中,威布尔分布的 $\eta=1\ 098.14, \beta=1.196$,即交流发电机可靠度的威布尔分布为:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{1\ 098.14}\right)^{1.196}} \quad (7)$$

通过威布尔分布,能够估算交流发电机故障概率与时间的对应关系,从而判定交流发电机的健康状态。

4.2 基于后验概率的部件遂行任务能力估计

通过故障统计数据建立的部件威布尔分布模型,是从大量故障历史数据中获取的经验模型,然而,要估计某一特定部件在一定任务需求下发生故障的概率,还需要通过该部件的使用情况与任务进行计算。

由建立的威布尔分布模型可知,交流发电机的威布尔分布参数为 $\eta=1\ 098.14, \beta=1.196$,其故障概率密度为:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right] = 2.76 \times 10^{-4} t^{0.196} e^{-\left(\frac{t}{1\ 098.14}\right)^{1.196}} \quad (8)$$

假设在执行任务前,例如通过查阅履历,发现交流发电机工作时间为 1 000 h,计划执行任务时间为 50 h,由此可估算,在任务期间,部件发生故障的概率为:

$$F(T, t_0) = \int_{1000}^{1050} 2.76 \times 10^{-4} t^{0.196} \cdot e^{-\left(\frac{t}{1098.14}\right)^{1.196}} dt = 0.0216 \quad (9)$$

即该部件在执行此任务过程中,发生故障的概率为 2.16%。

4.3 基于专家经验的遂行任务环境评估

通过建立供电系统威布尔分布模型,实现了对一定任务时间段内,供电系统故障概率的估计。然而,面向不同任务时,任务需求、飞行环境、飞行时间等因素的变化,将会很大程度影响供电系统的寿命。因此,本小节通过专家系统的方式,综合考虑供电系统的具体使用工况与任务,给出遂行任务对供电系统的影响程度。

通过第 3 节的分析,影响供电系统故障频率的主要因素包括振动载荷,温度、湿度、沙尘等环境指标,负载,余度,维护保养程度等因素。因此,在权值确定方面,本文通过查阅相关故障,统计故障发生时的这几类因素情况,估算不同因素对故障的影响情况,从而确定不同因素的权重。

以交流发电机为例,经统计,本单位共发生过 317 起故障,通过查阅故障发生时的飞行参数,发现影响振动载荷超标 6 起、恶劣自然环境 25 起、负载电流电压超限 17 起、超过大修时间未换件 3 起,从而,将振动载荷、自然环境、负载、维护保养 4 个因素的权重确定为 0.12、0.49、0.33、0.06。

以交流发电机某次任务遂行过程为例,基于第 3.2 节中的计算公式,振动值为 0.84g 小于 2g,振动载荷系数为 1,计算振动载荷得分为 0.1;环境长期在沿海高温潮湿下,自然环境严苛度为 0.6,计算自然环境得分为 0.294;负载长期占比 60% 以下,过载程度为 1,计算负载得分为 0.33;周期性定检维护 3 次,维护保养系数为 1,计算维护保养得分为 0.06,见表 8,依照综合评估示例表总分 0.804,综合判定此次任务环境情况为正常。

表 8 供电系统交流发电机任务环境评估表

Tab. 8 Power supply system alternator task environment assessment table

振动载荷	自然环境	负载	维护保养	总分	综合				
权重	得分	权重	得分	权重	得分				
0.12	0.12	0.49	0.294	0.33	0.33	0.06	0.06	0.804	正常

5 结语

本文面向供电系统遂行任务的应用场景,采用了基于概率统计与专家评价的方法,对供电系统遂行任务的能力进行评估。在概率统计方面,通过收集供电系统故障数据,建立了飞机供电系统可靠度威布尔分布函数,并提出采用后验概率的方式,对一定任务时间内的装备故障概率进行估计;在专家评价方面,主要面向遂行任务条件下,任务需求、飞行环境、飞行时间等因素的变化,综合考虑供电系统的具体使用工况与任务,评估遂行任务对供电系统的影响程度。通过威布尔分布与综合打分,向使用者提供了两方面信息:一是通过历史大数据分析,在某次遂行任务过程中,供电系统发生故障的概率;二是此次任务过程影响供电系统故障的环境因素得分。使用者可通过这两方面因素,综合分析供电系统遂行任务能力。

参考文献

- [1] 马凯. 轻型飞机电气系统及电磁防护方案设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
MA K. Design of Electrical System and Electromagnetic Protection Scheme for Light Aircraft [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [2] QI Z, HAN Z Q, GAO S B. Analysis and Research of Networked Traction Power Supply System[J]. Frontier Academic Forum of Electrical Engineering, 2023, 24(8): 599-607.
- [3] LIU J J, ZHANG J F, YANG Z L, et al. A Novel Data-Driven Method of Ship Collision Risk Evolution Evaluation during Real Encounter Situations[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 249: 110228.
- [4] GUPTA V, MISHRA V K, SINGHAL P, et al. An Overview of Supervised Machine Learning Algorithm [C]//2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART). Moradabad: IEEE, 2022: 87-92.
- [5] 何慧霞, 武森, 魏桂英, 等. 混合属性数据深度无监督融合特征学习方法[J]. 计算机科学与探索, 2024, 18(7): 1852-1864.
HE H X, WU S, WEI G Y, et al. Deep Unsupervised Fusion Feature Learning Method for Mixed Attribute Data[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2024, 18(7): 1852-1864. (in Chinese)
- [6] LI X, CHEN Z T, ZHANG X, et al. An Electrical Equipment Image Enhancement Approach Based on Zero-DCE Model for Power IoTs Edge Service [C]//

- 2021 IEEE 6th International Conference on Cloud Computing and Big Data Analytics (ICCCBDA). Chengdu: IEEE,2021: 496-500.
- [7] JIANG Y, CUKIC B, MA Y. Techniques for Evaluating Fault Prediction Models[J]. Empirical Software Engineering,2008,13(5): 561-595.
- [8] 鲁相,褚卫华,盖文,等. 随机参数非共轭分布下的可靠性建模方法[J]. 国防科技大学学报,2025,47(1): 230-238.
- LU X, CHU W H, GAI W, et al. The Reliability of the Random Parameters under the Conjugate Distribution Modeling Method[J]. Journal of National University of Defense Technology,2025,47(1):230-238. (in Chinese)
- [9] 冯洪,齐金平,刘晓宇,等. 考虑随机变失效阈值的多相关退化可靠性建模[J]. 中国机械工程,2024,35(5): 811-820.
- FENG H, QI J P, LIU X Y, et al. Reliability Modeling for Multi-Correlation Degradation Considering Random Variable Failure Threshold[J]. China Mechanical Engineering,2024,35(5): 811-820. (in Chinese)
- [10] GRODZENSKY S Y. Reliability Models Based on Modified Weibull Distributions [J]. Measurement Techniques,2013,56(7): 768-774.
- [11] 王冉,周雁翔,胡雄,等. 基于EMD多尺度威布尔分布与HMM的轴承性能退化评估方法[J]. 振动与冲击,2019,41(3):209-215.
- WANG R, ZHOU Y X, HU X, et al. Bearing Performance Degradation Evaluation Method based on EMD Multi-Scale Weibull Distribution and HMM[J]. Journal of Vibration and Shock,2019,41(3):209-215. (in Chinese)
- [12] 杨阳,王艺,张昕宇,等. 航空发动机首翻期内故障率Weibull分布拟合[J]. 航空发动机,2024,50(5): 42-46.
- YANG Y, WANG Y, ZHANG X Y, et al. Weibull Distribution Fitting of Aero Engine Failure Rate during First turn[J]. Aircraft engine,2024,50(5):42-46. (in Chinese)
- [13] 陈海洋,谭通,赵良超. 飞机主电源系统空中断电故障分析与研究[J]. 航空维修与工程,2024(6): 75-78.
- CHEN H Y, TAN T, ZHAO L C. Analysis and Research on the Failure of Aircraft Main Power System in the Air[J]. Aviation Maintenance & Engineering,2024(6): 75-78. (in Chinese)
- [14] 赖思齐,陈桂鹏,颜佳佳,等. 飞机电源系统故障诊断方法综述及发展趋势[J]. 航空工程进展,2024,15(3): 27-44.
- LAI S Q, CHEN G P, YAN J J, et al. Review and Development Trend of Fault Diagnosis Methods for Aircraft Power Supply System[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering,2024,15(3): 27-44. (in Chinese)
- [15] 王乐,杨帅,朱时阳,等. 基于泊松分布的输电线路跳闸概率预测方法[J]. 高电压技术,2017,43(11): 3777-3783.
- WANG L, YANG S, ZHU S Y, et al. Prediction Method of Transmission Line Trip Probability Based on Poisson Distribution[J]. High Voltage Engineering,2017,43(11): 3777-3783. (in Chinese)
- [16] 李奎,马典良,赵成晨,等. 基于Bayes推断的交流接触器剩余电寿命预测[J]. 仪器仪表学报,2024,45(1): 34-45.
- LI K, MA D L, ZHAO C C, et al. Residual Electrical Life Prediction of AC Contactor Based on Bayesian Inference[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2024,45(1): 34-45. (in Chinese)
- [17] 刘洪,王浩嘉,徐正阳,等. 基于联络馈线负载率松弛约束的中压配电网供电单元划分[J]. 电力自动化设备,2024,44(7):108-115.
- LIU H, WANG H J, XU Z Y, et al. Division of Power Supply Units in Medium Voltage Distribution Network Based on Slack Constraint of Load Rate of Liaison Feeder[J]. Power Automation Equipment,2024,44(7):108-115. (in Chinese)
- [18] 王玘. 基于健康状态的高速铁路牵引供电系统主动维护策略研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- WANG Q. Research on Active Maintenance Strategy of High-Speed Railway Traction Power Supply System Based on Health Status[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2018. (in Chinese)
- [19] YUCESAN Y A, DOURADO A, VIANA F A C. A Survey of Modeling for Prognosis and Health Management of Industrial Equipment[J]. Advanced Engineering Informatics,2021,50: 101404.
- [20] 张剑锋,徐芳,张燕,等. 三参数威布尔分布的参数估计及置信限计算方法[J]. 机械强度,2024,46(5): 1136-1142.
- ZHANG J F, XU F, ZHANG Y, et al. Parameter Estimation and Confidence Limit Calculation Method of Three-Parameter Weibull Distribution[J]. Journal of Mechanical Strength,2024,46(5): 1136-1142. (in Chinese)

(编辑:陈斐)