# 航空发电机健康特征参数与老化 模式分析



汤孝,高朝晖,郗展,王爽

西北工业大学,陕西西安 710072

摘 要:航空三级式无刷发电机中旋转整流器整流二极管的老化是发电机外特性退化的重要来源。本文选择二极管正向导 通压降的变化作为其主要老化模式,对二极管老化和发电机外部特性参数间的关联性进行研究。采用 Saber 软件搭建航空 发电机老化模型,利用蒙特卡罗仿真功能,获取大量发电机外部特性参数数据,从中筛选出与旋转整流器二极管老化状态存 在较强关联性的健康特征参数,用来表征发电机的健康状态。本文还分析了不同工况条件对发电机健康特征参数与二极管 老化关联性的影响,表明在比较健康状态参数变化时需保持相同的发电机工况。

关键词:健康管理; 航空发电机; 二极管老化; 蒙特卡罗仿真; Pearson 相关系数

## 中图分类号:TP206+.3;TM34

#### 文献标识码:A

目前,大中型飞机主电源系统普遍采用的是三级式无 刷交流发电机,其包括三个同步发电机和旋转整流器,具有 技术成熟的优点<sup>[1]</sup>。旋转整流器为三相全桥整流电路,其 正常运行期间处于高速旋转状态,部件多、故障率较高,且 老化故障不易直接检测<sup>[2]</sup>。对于航空三级发电机,如果能 通过发电机外部可测关联特征量对旋转整流器早期老化特 性进行分析判断,对发电机潜在隐藏的故障进行早期预警, 可极大提高飞机主电源系统运行的可靠性,避免事故发生, 对飞机安全飞行意义重大<sup>[3]</sup>。

故障预测与健康管理 (prognostics and health management, PHM)技术能够监控设备健康状况、预测故障的发生,从而大幅提高设备运维效率。PHM方法主要分为基于模型(model-based)和数据驱动(data-driven)。基于模型的PHM方法需要建立对象系统可靠的物理模型或数学模型,深入研究对象系统的故障变化和发展的机理,不断调整和修正模型;数据驱动的PHM方法采用机器学习和统计分析算法将大量原始数据或历史数据转化为系统正常/异常行为的相关信息和预测模型<sup>[4-5]</sup>。对于航空发电机这样的复杂系统,建立一个能够描述系统中多个物理过程动态变

## DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.06.004

化情况的数学模型是极其困难的,这是基于模型方法的瓶颈所在<sup>[6]</sup>。采用基于数据驱动的方法实现复杂系统的健康管理,该方法侧重于历史的数据信息,通用性较强,已经成为了目前复杂工业过程监测和运行状态评价等相关领域的主流方法,并且还在进一步发展和完善。参考文献[7]将基于灰色关联度的故障特征自适应提取方法应用于航空发电机的励磁电流信号,实现了航空发电机旋转整流器中二极管的故障诊断。航空发电机的故障预测应借鉴故障诊断的方法,不同之处在于故障诊断关注于发电机外特性参数变化的最终结果,而故障预测应侧重于发电机外特性参数变化的最终结果,而故障预测应侧重于发电机外特性参数变化的过程,通过机器学习相关算法对大量发电机外特性参数数据进行数据挖掘和对比分析,提取能够表征发电机老化程度的健康特征参数,这是实现航空发电机的健康管理的基础。

本文采用Saber软件建立航空发电机仿真模型,通过设 置模型中旋转整流器整流二极管正向电压的变化值来表 征其不同的老化程度,基于软件中提供的蒙特卡罗仿真分 析功能,采用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法获取数据,其是 一种采用随机抽样统计来估算结果的计算方法。蒙特卡

收稿日期:2020-11-30;退修日期:2021-03-01;录用日期:2021-03-15 基金项目:西北工业大学硕士研究生创意创新种子基金(CX2020022)

引用格式: Tang Xiao, Gao Zhaohui, Xi Zhan, et al. Analysis on health characteristic parameters and aging mode of aerospace generator[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(06):27-35. 汤孝, 高朝晖, 郗展, 等. 航空发电机健康特征参数与老化模式分析[J]. 航 空科学技术, 2021, 32(06):27-35.

罗方法的主要思想是在计算机上模拟实际概率过程,然后 加以统计处理。在计算机上利用蒙特卡罗方法可以解决 很多理论和应用科学问题,在很大程度上代替许多大型 的、难以实现的复杂试验<sup>[8-9]</sup>。在获取大量航空发电机外 特性参数数据样本之后,筛选出与旋转整流器二极管老化 状态存在较强关联性的健康特征参数,对其变化趋势进行 分析,用以评估发电机健康状态。同时还分析了不同工况 条件对发电机健康特征参数的影响,为后续研究奠定 基础。

# 1 发电机老化模型和仿真工况

航空发电机存在多种老化故障来源,机械方面有轴承 磨损、转子偏心等,电气方面有旋转整流器二极管老化、绝 缘老化等。发电机内部电路中包含大量电力电子器件,半 导体器件抗干扰、抗过载能力较差,而发电机的机械结构较 为稳定可靠,同时,根据相关航空电源生产厂家长期试验的 结果和参考文献[10]~文献[12]给出的相关研究和分析,航 空发电机外特性退化其中一个重要来源为旋转整流器中整 流二极管的老化故障,所以本文仅关注由旋转整流器中整 流二极管老化引起的发电机外特性退化的特征。旋转整流 器中二极管的工作环境恶劣,在热应力和电应力的双重作 用下容易老化发生故障。在瞬态过电流应力环境下,由于 大量热量的注入导致焊锡熔化,其可能发生短路和断路故 障[13];二极管的正向电压值随老化时间呈现出缓慢上升趋 势[14]。本文选择正向电压作为二极管的老化参数,其变化 直接影响旋转整流器的输出电压,从而影响发电机的输出 外特性,需要及时并有效地进行老化检测。

## 1.1 发电机模型和器件等效模型

本文搭建的发电机模型主要由三级无刷式交流发电机、模拟式电压调节器(generator control unit, GCU)和负载部分构成,具体结构组成图如图1所示。在Saber搭建的发电机模型中,永磁机、励磁机和主发电机采用数学模型,GCU、旋转整流器和负载部分等采用电路模型。其中,旋转整流器采用三相全桥整流电路,该电路中每个二极管都采用包含直流电压源的等效模型来代替,等效模型中直流电压源的电压值直接体现为二极管的正向电压。

Saber 仿真软件内置的蒙特卡罗仿真功能能够实现单 组自动多次不同参数值循环仿真,每组仿真前需要改变整 流二极管等效模型中直流电压源的电压,即正向电压值,赋 值方式采用分布函数。因为三级无刷发电机旋转整流器中 包含上下桥臂总6支整流二极管,所以,单次蒙特卡罗仿真 需要分别对6个整流二极管等效模型中直流电压源的电压 值进行赋值。



图1 航空发电机仿真模型结构图

Fig.1 The structure diagram of the aerospace generator's simulation model

#### 1.2 二极管正向电压值老化范围

某型号整流二极管的正向电压均值为1.8V左右。为 了模拟航空发电机的老化过程,参考文献[14]中给出的大 功率发光二极管正向电压值随时间所呈现的老化趋势和程 度,拟定二极管正向电压V<sub>F</sub>参数值,其中,二极管正向电压 V<sub>F</sub>拟给定4组不同的均匀分布"uniform(*a*, *b*)"函数,分别代 表不同老化程度,见表1。在对Saber模型进行蒙特卡罗分 析之前,需要使用特定分布函数对选中的参数进行赋值, 本文采用均匀分布"uniform(*a*, *b*)"对正向电压V<sub>F</sub>进行赋 值,这样,正向电压的取值就均匀分布在以*a*为中心值、*b* 为变化比率的范围内。

表1 整流二极管的正向电压设置 Table 1 Forward voltage setting of rectifier diode

参数	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
	变化范围	变化范围	变化范围	变化范围
$V_{\rm F}$ /V	uniform (1.8,0.1)	uniform (2.4, 0.1)	uniform (2.9,0.08)	uniform (3.4,0.06)

## 1.3 发电机外特性参数和仿真工况

对于航空发电机内部的老化与故障,并不能直接对其内 部的主要故障部件进行参数测量和故障诊断,只能通过可测 量的外部特性参数来进行老化预测或者故障诊断。根据发 电机实际结构和分析需要,可以选择的外特性参数有:主发 电机的三相电压电流有效值、直流分量和交流畸变系数,励 磁机的励磁电压电流的平均值和直流畸变系数<sup>[15-16]</sup>,由于与 频率相关的供电特性参数主要由转子转速和电机极对数确 定,与发电机内部整流二极管老化无关,所以没有选择频率 相关参数。 根据拟定的4组二极管正向电压老化值设置相关模型 参数并进行多组Saber蒙特卡罗分析仿真。鉴于发电机工 况可能会对发电机外特性参数产生影响,所以,本研究分别 进行了不同输出视在功率S。、不同功率因数λ和不同输出电 流交流畸变系数df情况下的发电机模型仿真。在线性阻感 负载情况下的工况设置见表2,其中,表2中的S<sub>N</sub>为航空发 电机的额定输出视在功率,通过改变负载的电阻值和电感 值实现不同的输出视在功率和功率因数。

表2 线性阻感负载工况设置 Table 2 Setting of system condition under linear load

仿真组	1	2	3	4
S <sub>o</sub>	100%S <sub>N</sub>	100%S <sub>N</sub>	$100\%S_{ m N}$	100%S <sub>N</sub>
λ	1.00	0.75	0.50	0.30
仿真组	5	6	7	8
S <sub>o</sub>	$50\% S_{\rm N}$	$50\% S_{\rm N}$	50% $S_{\rm N}$	50% S <sub>N</sub>
λ	1.00	0.75	0.50	0.30
仿真组	9	10	11	12
S <sub>o</sub>	$10\% S_{\rm N}$	$10\% S_{\rm N}$	$10\% S_{\rm N}$	$10\% S_{\rm N}$
λ	1.00	0.75	0.50	0.30

在非线性负载情况下的工况设置见表3,通过添加全桥 整流器负载或高次电流谐波,实现主发电机三相输出电流 交流畸变系数*df*的改变,其中,第2~4组相近的输出电流*df* 是通过整流器负载或不同谐波分量实现的,第5组和第6 组、第7组和第8组相同的输出电流*df*是通过不同谐波分量 实现的。

表3 非线性负载工况设置 Table 3 System condition under non-linear load

以下仿真组 $S_o$ 和 $\lambda$ 都相同, $S_o$ =100% $S_N$ , $\lambda$ =0.75							
仿真组	1	2	3	4			
输出电流 df	3.85%	17.823%	17.838%	17.839%			
仿真组	5	6	7	8			
输出电流 df	29.539%	29.539%	45.769%	45.769%			

# 2 发电机健康特征参数的确定

## 2.1 发电机健康特征参数的筛选

本文分别从主发输出电压电流波形和励磁机励磁电压 电流波形中提取相关稳态外特性参数,并通过对比分析各 外特性参数变化趋势,从中筛选出能有效地表征发电机老 化过程(健康状态)的健康特征参数。 2.1.1 主发电机的外特性参数

图2中给出了在整流二极管正向电压分别处于表1所 示的4组不同老化值时,与主发电机三相输出电压电流相 关的各稳态外特性参数数据均值点的变化曲线图,包含输 出电压电流有效值*V*<sub>ms</sub>和*I*<sub>ms</sub>、输出电压电流直流分量*V*<sub>dc</sub>和 *I*<sub>dc</sub>、输出电压电流交流畸变系数*df*。此时工况为发电机处 于满载,功率因数为0.75。图2中的显示的数据点都是每组 仿真数据样本的均值点。

根据图2可知,对于主发电机三相电压电流的有效值 来说,其相对变化程度太小,二极管正向电压均值在1.8~ 3.4V 范围之间所对应的电压有效值变化差值小于0.05V, 同时电流有效值变化差值小于0.2A.实际测量环境中的于 扰噪声可能影响真实有效值变化差值的辨别,而且,输出电 压和电流的有效值分别主要与电压调节器(GCU)和负载阻 抗相关,所以,有效值不适用于表征发电机的健康状态;对 于主发电机三相电压电流的直流分量来说,其变化也不明 显,而且电压直流分量4个数据点的绝对值都小于0.15mV, 电流的直流分量4个数据点的绝对值都小于0.05mA,实际 测量环境中的干扰噪声可能对直流分量值的测量有极大干 扰,无法获取其准确值;对于A相电压电流的交流畸变来 说,各数据点交流畸变系数值都小于0.1%,环境中的干扰 噪声和快速傅里叶算法本身的泄露误差都将较为严重地影 响电压和电流交流畸变系数测量计算的准确性,而且,线性 负载条件下的输出电压电流波形基本没有畸变。综上,与 主发电机输出电压电流相关的稳态外特性参数都不适用于 表征发电机的健康状态。

2.1.2 励磁机的外特性参数

在对励磁机的励磁电压和励磁电流外特性参数进行老 化数据对比研究时,增加了每组数据集的箱形图,用于反映 数据集的分布特性。

图3中给出了在整流二极管正向电压分别处于4组老 化值范围、发电机处于满载,功率因数为0.75工况条件下与 励磁机的励磁电压电流相关的稳态外特性参数数据样本的 均值点和箱形图。

从图3可知,对于励磁电压电流平均值、励磁电压电流 直流畸变系数这4个参数来说,它们的变化趋势都较明显 且单调。其中,励磁电流和励磁电压平均值的分布比较集 中,励磁电流直流畸变系数的分布较分散,励磁电压直流 畸变系数的异常值较多。励磁电压电流相关的外特性参数 变化明显,可以用来作为表征发电机老化的健康特征 参数。





Fig.2 Mean point curve of output characteristic parameters of main generator



Fig.3 Mean point curve and boxplot of excitation characteristic parameters of exciter

### 2.2 健康特征参数中冗余参数的剔除

2.1节所述的4种励磁外特性参数之间可能存在冗余变 量,它们在反映航空发电机健康状态时的作用基本相同,如 果同时考虑这些参数,将会增加健康管理模型的复杂度和 计算量。因此,所以为了精简老化数据集,需要对上述发电 机健康特征参数进行两个参数之间相关度的研究,以下引 入Pearson 相关系数。

Pearson 相关系数是被称为"统计学之父"的 Karl Pearson 提出的,也是目前较为常用的一种相关性分析方法。Pearson 相关系数能够反映变量之间线性相关关系的密切程度。对于两个变量*X*、*Y*之间的Pearson 相关系数的定义为:

$$\rho_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Y_i - \bar{Y})^2}}$$
(1)

式中: $\rho_{X,Y}$ 代表了*X*和*Y*两个随机变量之间线性相关程度的 指标,其范围在[-1,1]之间。当 $\rho_{X,Y}$ 的绝对值越接近1,表示 两个变量的线性相关性越强,反之则越弱,一般相关系数小 于0.4时,则认为两个参数之间弱相关或者不相关。

由于励磁电流平均值的分布最为集中且变化明显,所 以现采用励磁电流平均值为基准,分析其和其他三个参数 在不同正向电压老化值条件下的Pearson相关系数,结果如 图4所示。

由图4中给出的各相关系数值可知, 励磁电流平均值 和励磁电压平均值、励磁电流直流畸变系数的 Pearson 相关



图4 满载、功率因数0.75工况下各励磁特征参数之间的相关系数

Fig.4 Correlation coefficient between excitation characteristic parameters when  $S_0=100\%$ SN,  $\lambda=0.75$ 

系数平均值均小于0.4,它们之间的线性相关性较弱。为了 缩减数据集的维度,同时减少未来阶段相应机器学习算法 数据处理的工作量,本文选择励磁电流平均值、励磁电压平 均值或励磁电流直流畸变系数三者中最不相关的两个参数 作为表征发电机健康状态的健康特征参数,并剔除励磁电 压直流畸变系数这一冗余参数。

# 3 发电机工况变化对外特征参数的影响

上文对旋转整流器二极管参数老化对发电机外特性参数的影响进行研究。但是,发电机正常工况的变化同样也 会引起外特性参数发生变化,因此在对发电机老化状态进 行预判时,必须排除因工况变化引起的健康特征参数的变 化导致的对发电机老化预判的影响。接下来,将研究工况 和负载类型对励磁电压平均值和励磁电流平均值这两个参 数的影响,以便排除工况和负载类型对旋转整流器整流二 极管老化程度判断的影响。

在线性负载或非线性负载条件下,航空发电机的工况 (输出视在功率S<sub>o</sub>、功率因数λ、输出电流交流畸变系数)将对 上述发电机健康特征参数值(励磁电压平均值和励磁电流 平均值)产生影响,因此,下文研究负载情况、功率因数、输 出电流交流畸变对励磁电压平均值和励磁电流平均值的影 响趋势和程度。

#### 3.1 输出视在功率对健康特征参数的影响

图5中给出了航空发电机处于相同功率因数0.75、S。分别占额定功率的10%、50%(半载)和100%(满载)工况下, 励磁机励磁电压平均值和励磁电流平均值4组数据集均值 点的老化曲线。

由图5中曲线对比可知,在线性负载条件下,当发电机 的功率因数相同时,不同*S*。所对应的健康特征参数均值点 曲线之间发生平移。对于二极管4组取值范围,当*S*。上升, 励磁电压平均值和励磁电流平均值的4个均值点都有较大 幅度地上升,该现象可以利用主发电机的电枢反应来解释。 随着*S*。的增大,主发电机电枢反应的去磁效应也随之增强, 所以,励磁机需要更高的励磁电压和励磁电流来抵消主发 的去磁作用。当λ处于1.00、0.50和0.30时,*S*。对励磁电压 平均值和励磁电流平均值的影响与图5相同,本文不再 赘述。

#### 3.2 功率因数对健康特征参数的影响

图 6 中给出了航空发电机在 S<sub>o</sub>为满载(100% 额定功率)、功率因数分别为 1.00、0.75、0.50 和 0.30 工况下,其励磁机励磁电压平均值和励磁电流平均值数据集均值点的 8 条



图5 励磁电压平均值和励磁电流平均值均值点曲线对比
 (不同 S<sub>0</sub>, λ 为 0.75, 线性负载工况)

Fig.5 Comparison of the sample mean between the excitation voltage and the excitation current under different output power  $S_{o}$ , when  $\lambda$ =0.75

老化曲线。

从图6中不同功率因数对应的特征参数均值点老化曲 线对比可知,当发电机的S。都为满载时,随着λ的增大,励 磁电压平均值和励磁电流平均值的均值点都逐渐下降,这 是因为随着功率因数的增大,主发电机励磁磁动势与电枢 磁动势的夹角减小并趋于90°,这时,电枢磁动势的直轴分 量下降,去磁效应减弱,所以,励磁机的励磁电压电流都随 之相继下降。当S。处于50%S<sub>N</sub>、10%S<sub>N</sub>时,λ对励磁电压平 均值和励磁电流平均值的影响与图6相同,本文不再赘述。

综上两种工况(输出视在功率、功率因数)的影响,如果 不确定发电机的工况,则无法单独依靠上述健康特征参数 来估计发电机的老化程度。在采用励磁电压和励磁电流平 均值作为表征发电机健康状态的健康特征参数时,必须考 虑输出视在功率*S*。和输出电压电流波形的功率因数λ对这 两种健康特征参数的影响。

#### 3.3 电流畸变对发电机外特征参数的影响

为了研究非线性负载对励磁电流平均值和励磁电压平均值的影响,在原有线性阻感负载的条件下,再并联三相全

功率因数0.75不同S。特征参数均值点曲线

桥整流器或者三相受控电流源,以提高输出电流的交流畸变系数 df。其中,受控电流源的频率分别设置成基波频率





Fig.6 Comparison of the sample mean between the excitation voltage and the excitation current under different power factor  $\lambda$ , when  $S_0=100\% S_N$ 

(400Hz)的两倍和三倍,即在干路电流中添加基波电流的二次谐波和三次谐波。

通过一系列参数计算和仿真验证,确定了9组不同的 负载参数,这9组负载对应相同的输出视在功率S。=100%S<sub>N</sub> 和相同的功率因数0.75,区别在于输出电流的交流畸变系 数和畸变形状不尽相同,图7给出了这9组负载对应的输出 电流波形。

从图7中可以看出,第3~5组输出电流的交流畸变系数 都处于17.8%附近,其中第3组对应三相全桥整流器负载, 第4组只包含基波和三次谐波,第5组只包含基波和二次谐 波,这三组输出电流波形所包含的谐波成分各异,所以畸变 形状各不相同。同样地,还有第6、7组电流波形和第8、9组 输出电流的交流畸变系数分别为29.5%和45.8%。交流畸 变系数相同的电流波形用作对照组,以说明在输出电流交 流畸变系数*d*f相同的情况下,电流交流畸变形状的不同是 否会影响励磁电压平均值和励磁电流平均值。 接下来,对这9组包含不同的负载参数的发电机模型 进行不同二极管正向电压老化值(4组范围)的蒙特卡罗分 析仿真,所得到的9条励磁电压平均值均值点曲线和9条励 磁电流平均值均值点曲线分别如图8和图9所示。





Fig.7 A-phase output current corresponding to different AC distortion factor

从图 8 和图 9 中曲线的对比可知,在 S<sub>o</sub>和λ都相同的条 件下,随着输出电流交流畸变系数 df的增大,励磁电压平均 值和励磁电流平均值的均值点在4组二极管正向电压老化 范围内都呈现明显下降趋势,这也可以利用主发电机的电 枢反应说明。当主发的输出电流交流畸变系数 df增大,在 S<sub>o</sub>不变的条件下,输出电流波形中基波的占比下降,其幅值 也逐渐下降,这导致主发基波产生的电枢磁动势减少,而高 次电流谐波所产生的高次谐波电枢磁动势在一个基波周期 范围内既有增磁又有去磁,并且增磁作用和去磁作用相互 抵消,因此主发电机整体的去磁效应随之逐渐减弱,维持主 发原有输出电压值所需的励磁机励磁电压和励磁电流都相 继下降。

同时,图8和图9中的9条曲线所对应的S。和λ都保持

一致,对于其中输出电流交流畸变系数 df 相同或近似的曲线,在二极管正向电压4组取值范围,其励磁电压平均值和 励磁电流平均值均值点都非常接近。这是因为此时电流波





Fig.8 The sample mean of the excitation current corresponding to different AC distortion factor



S。和λ相同时输出电流df对励磁电压平均值的影响



Fig.9 The sample mean of the excitation voltage corresponding to different AC distortion factor 形中基波的幅值并没有明显改变(S。相同,交流畸变系数可 以表示基波的占比),去磁作用不变,所以励磁机励磁电压 平均值和励磁电流平均也不会有明显变化。

从上述研究可以看出,输出视在功率S<sub>o</sub>、功率因数λ和 输出电流交流畸变系数df等工况条件的变化将对励磁电 压、电流各发电机健康特征参数产生明显影响,因此,在利 用这些健康特征参数对发电机老化进行预判估计时,一定 要排除因工况引起的健康特征参数的变化。

# 4 结束语

对于复杂系统,数据驱动的PHM方法依赖于系统老化 的历史外特性参数数据。本文分析了航空发电机结构中最 易出现故障的部件为旋转整流器中的二极管,并选择二极 管正向导通压降的变化作为其主要老化模式。采用 Saber 软件搭建了航空发电机及其部件的老化模型,利用软件内 置的蒙特卡罗分析功能,采集处理了发电机处于各种工况 条件下大量的仿真波形数据结果,并从数据中筛选出了可 用于表征发电机健康状态的健康特征参数:励磁机的励磁 电压和电流平均值。这都为后续航空发电机健康管理提供 了研究基础和方向。最后,进一步研究分析了输出视在功 率 S<sub>o</sub>、功率因数λ和输出电流交流畸变系数 df等工况条件对 所选健康特征参数的影响。S<sub>o</sub>与励磁电压电流平均值呈正 相关关系,而λ和 df 与励磁电压电流平均值呈负相关关系。

本文只考虑了航空发电机中旋转整流器的二极管的老 化,发电机内部其他部件的老化也可能引起健康特征参数 相同的变化,后续研究有必要针对不同部件同时老化进行 解耦;而且本文只给出了健康特征参数随二极管老化的变 化趋势,两者之间的定量关系也需要未来进一步探究;同 时,由于工况的影响,分析健康特征参数的变化时需要保持 相同的发电机工况条件,以排除因工况改变引起的对健康 特征参数的影响。

#### 参考文献

[1] 王薛洲,张晓斌,潘荻.飞机三级发电机的建模与仿真[J].计算 机仿真, 2013, 30(4):59-62.

Wang Xuezhou, Zhang Xiaobin, Pan Di. Modeling and simulation of aircraft three-stage synchronous generator[J]. Computer Simulation, 2013,30(4):59-62. (in Chinese)

[2] 沈颂华,朱新宇.基于故障字典的旋转整流器故障检测方法
 [C]//中国航空学会航空电气工程第三届学术年会,1999:
 22-26.

Shen Songhua, Zhu Xinyu. Rotating rectifier fault detection method based on fault dictionary[C]//Proceedings of the Third Annual Conference of Aviation Electrical Engineering of Chinese Society of Aeronautics, 1999:22-26. (in Chinese)

[3] 王洁,周鑫,李元祥.飞机供电系统健康管理技术研究[J].航空 科学技术,2019,30(11):57-61.

Wang Jie, Zhou Xin, Li Yuanxiang. Research of the health management for the aircraft power supply system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(11): 57-61. (in Chinese)

 [4] 吴克雄,王振华.基于专家系统和数据驱动的健康评估分析 方法[J].黑龙江科学,2019,10(16):64-65.
 Wu Kexiong, Wang Zhenhua. Health assessment and analysis

method based on expert system and data driven[J]. Heilongjiang Science, 2019, 10(16):64-65. (in Chinese)

[5] 吕镇邦,孙倩,王娟.民用客机健康管理系统的工程技术研究[J].航空科学技术,2020,31(7):27-34.

Lv Zhenbang, Sun Qian, Wang Juan. Research on engineering techniques of civil aircraft health management system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(7): 27-34. (in Chinese)

- [6] 龙凤, 王忠, 程绪建,等. 一种基于信息融合的军用电子产品 PHM方案设计[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(9):86-90.
  Long Feng, Wang Zhong, Cheng Xujian, et al. A PHM blueprint based on information fusion for military digital devices[J]. Microelectronics & Computer, 2010, 27(9): 86-90. (in Chinese)
- [7] 崔江,唐军祥,龚春英,等.一种基于改进堆栈自动编码器的 航空发电机旋转整流器故障特征提取方法[J].中国电机工程 学报,2017,37(19):5696-5706.

Cui Jiang, Tang Junxiang, Gong Chunying, et al. A fault feature extraction method of aerospace generator rotating rectifier based on improved stacked auto-encoder[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2017, 37(19):5696-5706. (in Chinese)

[8] 晏力.蒙特卡罗分析方法在EDA中的应用[J].重庆工商大学 学报(自然科学版), 2005,22(4):354-356.

Yan Li. Application of method of Monte Carlo analysis to EDA [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2005,22(4):354-356. (in Chinese)

- [9] 陈江华.蒙特卡罗分析方法与电子电路模拟[J].山东工业大 学学报, 2000(1):91-95.
   Chen Jianghua. Monte Carlo analysis method and electronic circuit simulation[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2000(1):91-95. (in Chinese)
- [10] Pan Haiyang, Dong Ensheng, Jiang Yilin, et al. Prognostic and health management for aircraft electrical power supply system[C]//Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2012 Beijing), 2012:1-5.
- [11] Batzel T D, Swanson D C. Prognostic health management of aircraft power generators[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2):473-482.
- [12] 张敬,李颖晖,朱喜华,等. 三级式发电机旋转整流器故障特征提取[J]. 微电机, 2011(7):99-103.
  Zhang Jing, Li Yinghui, Zhu Xihua, et al. Fault feature extraction for rotating rectifier of three-stage generator[J].
  Micromotors, 2011(7): 99-103. (in Chinese)
- [13] Van B E, Barbieri T, Barkley A, et al. Surge current failure mechanisms in 4H-SiC JBS rectifiers[C]//2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Chicago, USA,2018:415-418.
- [14] 赵阿玲,尚守锦,陈建新.大功率白光LED寿命试验及失效 分析[J].照明工程学报,2010(1):51-55+60.
  Zhao Aling, Shang Shoujin, Chen Jianxin. Life test and failure mechanism analyses for high-power white LED[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2010(1): 51-55+60. (in Chinese)
- [15] 王宏霞, 王守芳, 邓建,等. GJB181A—2003 飞机供电特性
  [S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2003.
  Wang Hongxia, Wang Shoufang, Deng Jian, et al. GJB 181A—2003 Aircraft electric power characteristics[S]. Beijing: Military Standard Publishing Department of General Armament Department, 2003. (in Chinese)
- [16] British Standards Institution. ISO1540 Aerospace : Chara cteristics of aircraft electrical systems[S]. Britain: British Standards Institution, 2006.

# Analysis on Health Characteristic Parameters and Aging Mode of Aerospace Generator

Tang Xiao, Gao Zhaohui, Xi Zhan, Wang Shuang

Northwestern Polytechnical University, Xi' an 710129, China

**Abstract:** The aging of the rectifier diodes in the rotating rectifier is an important cause for the degradation in the aerospace three-stage brushless generator. In this study, changes in the forward voltage value of the diodes are selected as the main aging mode, and the correlation between diodes aging and external parameters is studied. The aging model of the generator is built in Saber, and the Monte Carlo simulation is used to produce a large amount of external parameters data-set of the generator. The external characteristic parameters strongly correlated with aging status of the diodes are extracted from the data-set, which represent the generator's health status. The study also analyzes the influence of different operating conditions on the correlation between the characteristic parameters and the aging of diodes, which indicates that generator operating conditions need to be kept the same when comparing changes in characteristic parameters.

**Key Words:** health management; aerospace generator; diode aging; Monte Carlo simulation; Pearson correlation coefficient

Received: 2020-11-30; Revised: 2021-03-01; Accepted: 2021-03-15

Foundation item: The Seed Foundation of Innovation and Creation for Graduate Students in Northwestern Polytechnical University (CX2020022)