

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108387

变工况下航空逆变器健康评估方法研究^{*}左景航¹ 王友仁¹ 王景霖² 司滕¹ 孙灿飞²(1.南京航空航天大学自动化学院 南京 211106; 2.上海航空测控技术研究所故障诊断与健康管理工作
航空科技重点实验室 上海 201601)

摘要: 工况的变化会引起功率变换器电路健康表征参数随之变化,导致无法判断健康表征参数是因电路性能的退化还是因工况的变化引起的。针对该关键问题,以航空逆变器为研究对象,首先采用多评价指标优选模型优选出相关敏感的健康表征参数;然后基于极限学习机建立工况-无故障情况下健康表征参数映射模型;最后基于当前健康表征参数与映射模型输出的健康表征参数之间的相对变化量构建考虑工况条件的电路健康指标,实现不同工况下航空逆变器的健康评估。实验结果表明,该评估方法可以有效减小工况变化对健康指标的影响。在变工况情况下,相比于直接基于欧氏距离构建健康指标的评估方法,平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)分别降低了64.4%、66.8%。

关键词: 航空逆变器;欧氏距离;健康指标;健康评估

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Research on health evaluation method of aviation inverter under variable working conditions

Zuo Jinghang¹ Wang Youren¹ Wang Jinglin² Si Teng¹ Sun Canfei²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Aeronautical Key Laboratory of Fault Diagnosis and Health Management Technology, Shanghai Aeronautical Measurement and Control Technology Institute, Shanghai 201601, China)

Abstract: The variation of operating conditions will lead to the variation of circuit health characterization parameters, so it is impossible to judge whether the health characterization parameters are caused by the degradation of circuit performance or the variation of operating conditions. Aiming at this key problem, aviation inverter is taken as the research object. Firstly, a multi-evaluation index optimization model was used to select the relevant sensitive health characterization parameters. Then, based on extreme learning machine, the mapping model of health representation parameters under the condition of working condition and no fault was established. Finally, based on the relative changes between the current health representation parameters and the health representation parameters output by the mapping model, the circuit health indicators considering working conditions were constructed to realize the health assessment of the aviation inverter under different working conditions. The experimental results show that the proposed method can effectively reduce the influence of working conditions on health indicators, and the MAE and RMSE of the proposed method are 64.4% and 66.8% lower than those of the method directly based on euclidean distance.

Keywords: aeronautical inverter; euclidean distance; health indicator; health evaluation

0 引 言

航空功率变换器是飞机二次电源系统的重要组成部分,其用途为实现直流交流电能之间的转换,进而向机载用

电设备提供不同需求的电源。航空功率变换器时常工作于高频启停、过压过流操作下,当元器件损伤累积到某种程度将会导致功率变换器整体性能的下降甚至失效,进而可能引发较大的安全隐患。若维修人员能够提前对当前功率变

收稿日期:2021-11-18

^{*} 基金项目:航空科学基金(201933052001)项目资助

换器健康状态进行有效的评估,事先采取维修措施,将会极大程度上减小经济损失^[1]。

通过检测功率变换器电路信号,从监测的信号中提取蕴含电路故障信息的健康表征参数,构建表征电路退化状态的健康指标,展开电路级健康评估的技术日益受到关注。国内外学者大都选择电路输出电压为监测量,且以输出电压均值作为健康表征参数开展研究。Wang等^[2]通过提取Buck电路的输出电压均值及其纹波比构造故障特征向量,利用不同退化程度样本间故障特征向量的马氏距离构建故障指示器FI对电路进行状态评估。He等^[3]选择DC-DC电路输出电压均值作为健康指标,基于幂函数退化模型进行电路健康评估。孙权等^[4-5]选取Sepic电路的输出电压均值作为健康指标,分别采用高斯过程回归方法与无迹粒子滤波方法进行健康指标时间序列的递推预测。Jia等^[6]将DC-DC变换器输出电压均值作为健康指标,将其值减小20%作为转换器功能失效判据,用粒子滤波算法对电路进行剩余使用性能估计。上述方法都采用电路的输出电压作为监测量,由于输出电压的监测便利,减轻了信号监测的成本,但上述方法都未考虑工况变化对健康表征参数的影响,方法都局限于单一工况的情形。

除此之外,也有学者选择输出电流、电源模块壳温、输入电流、输出功率等作为电路状态监测量。袁义生等^[7]通过遗传算法优化支持向量机的方法建立10kW三相光伏并网逆变器的效率模型,将输入电压与输出功率作为模型输入量,对逆变器状态进行估计。祝勇俊等^[8]选取光伏逆变器输出功率作为健康状态性能参数,使用随机过程理论方法建立性能退化模型对光伏逆变器进行寿命评估。姜伟等^[9]选择输出电压值、纹波电压、输入电流、壳温作为故障特征参数,分别基于置信值的单参数的方法及基于马氏距离的多参数的方法,对直流28V转5V、3.3V电路进行健康评估。上述方法选择了多样的监测信号,但监测信号如输出电流、输出功率等在监测时需要侵入电路甚至破坏电路,进而造成获取监测信号困难,监测成本加重。同样地,这些方法仍只考虑了单一工况条件,未考虑工况变化对电路健康评估的影响。

从以上电路级健康评估技术研究中可以发现,多数研究都是在单一工况下,并没有考虑负载、输入电压等变工况对电路的影响。因此本文以航空逆变器为对象,为了减少或消除工况对健康指标的影响。首先采用多评价指标优选模型得到电路健康表征参数,然后通过极限学习机方法构建无故障情况下工况参数与健康表征参数的映射模型得到当前工况下电路无故障时健康表征参数,求取当前监测健康表征参数与无故障情况下健康表征参数的相对变化量,进一步构建电路健康指标对不同工况下的航空逆变器健康状态进行评估。

搭建了实验电路平台,以并联电容板来模拟不同退化程度的电容,并对不同退化程度的电容设置不同的工况条

件(本文为输入电压与负载阻值)。使用电路理想健康指标对直接使用欧式距离构建健康指标的方法与使用相对变化量构建健康指标的方法标定。通过对比两种健康指标与电路理想健康指标在不同工况条件下的接近程度来验证所提方法的有效性。

1 单相航空逆变器健康表征参数

1.1 单相航空逆变器监测信号选择

航空逆变器一般采用两级式结构^[10]。反激变换器常被作为航空逆变器的前级DC-DC电路。航空逆变器后级则采用基于载波移相SPWM控制的双Buck全桥逆变器,其电路特点是能够避免桥臂直通、安全可靠。高。

在功率变换器的故障原因中,电解电容及功率开关器件失效的占比高达64%^[11]。因此本文将前级DC-DC输出滤波电容与后级DC-AC逆变电路中的MOSFET功率管作为航空逆变器关键功率器件。共选择13个监测信号,但这些信号中必然包含大量冗余故障信息,所以还需分析航空逆变器电路可测信号在不同故障模式下的故障敏感性以及信号特征间的相关性,结合测试成本挑选出故障敏感的监测信号^[12]。

本文通过相关度来衡量监测信号特征对器件故障特征参数的敏感性强弱、监测信号特征之间的相关性强弱^[13]。选择自然领域中广泛用于评价变量间相关度大小及统计关系强弱的皮尔逊相关系数作为本文相关度的计算函数:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2) (\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2)}} \quad (1)$$

其中, x_i 、 y_i 分别为两个列向量第*i*个元素, n 为向量长度。

最终选择的监测信号为直流母线电压和功率开关管 Q_3 的漏源极电压。直流母线电压信号能够反映电解电容的健康状态,功率开关管 Q_3 的漏源极电压信号中提取出的导通电压信号特征对器件退化参数敏感,能够反映电路中MOSFET功率管退化程度。

1.2 健康表征参数优选

确定了与器件退化特征参数敏感且互不相关的监测信号后,还需进一步对监测信号展开挖掘与分析,获得能够随器件退化程度加深而单调变化、适用性更强的健康表征参数,来表征航空逆变器的健康状态^[14]。从时域、频域上分析监测信号特点,分别提取出监测信号的特征参数,并利用小波包分析方法挖掘潜在的与航空逆变器健康状态退化程度相关的特征参数,共同构建健康表征参数候选库。选取了9个时域特征,7个频域特征,小波包分析得到36个特征参数,组成了共52维的健康表征参数优选库。

针对建立好的健康表征参数候选库,需优选出随着电

路退化程度的加深,能够呈现单调变化趋势,同时在工况影响下的变动幅度不应太大的健康表征参数,否则无法判断健康表征参数的变化是因电路性能的退化还是因工况的变化引起的。本文采用多评价指标特征优选模型^[15]对候选库中的健康表征参数进行优选,模型如式(2)所示。

$$W = w_1 Tre(F, T) + w_2 Mon(F) + w_3 Rob(F)$$

$$s. t. \begin{cases} w_i > 0 \\ \sum_i w_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中, W 为综合评价指标,取值范围 $[0, 1]$, w_i 为权重系数,根据经验选取 w_1 为 0.3、 w_2 为 0.5、 w_3 为 0.2。 $Tre(\cdot)$ 为趋势性指标, $Mon(\cdot)$ 为单调性指标, $Rob(\cdot)$ 为鲁棒性指标。

在信号的单调性、趋势性和鲁棒性上对 52 维特征向量进行综合评分,分值越高,代表其随工况的波动越小。如图 1 所示,得分最高的前两名为 9 号和 12 号特征,所对应的特征参数分别为直流母线电压 800 Hz 处幅值、功率管 Q_3 导通电压均值。

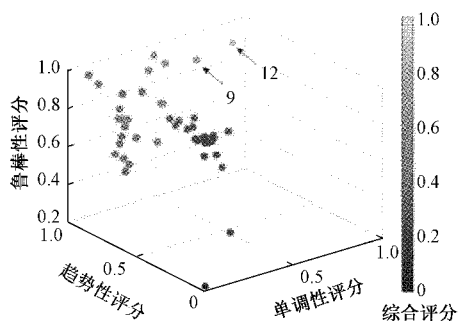


图 1 健康表征参数候选库中特征参数评分

2 电路健康状态评估方法

健康表征参数往往随工况参数变化而变化,所以本文提出一种工况映射模型,将其将工况参数映射为电路中的器件均为标称值时的健康表征参数,即求取在当前工况下,电路正常工作时的健康表征参数,记作无故障健康表征参数。然后在当前测得的健康表征参数与无故障健康表征参数的相对变化量基础上,构建电路健康指标对电路健康状态进行评估,具体流程如图 2 所示。

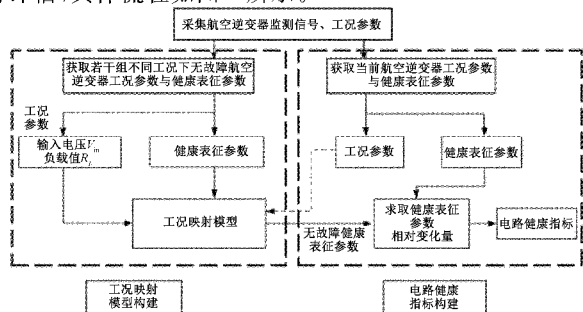


图 2 不同工况下电路健康评估流程

2.1 工况映射模型构建

以工况参数作为映射模型输入,健康表征参数作为映射模型输出,使用多组不同工况下健康电路的数据进行训练,使用应用广泛的极限学习机(extreme learning machine, ELM)来训练工况映射模型^[16],以得到工况参数对应的电路无故障健康表征参数。

映射模型的输入为采集的健康电路在不同工况下的 n 个工况参数(输入电压、负载阻值),输出则为无故障电路工作在不同工况下的 m 个健康表征参数。

2.2 航空逆变器电路健康状态评估

由映射模型输出的无故障健康表征参数记为 H ,采集得到的健康表征参数记为 HP ,无故障表征参数与采集的健康表征参数的相对变化量记为 FI ,求取 FI 与零点的欧氏距离,归一化后作为电路健康指标,记为 HI_{FI} 。电路健康指标构建步骤如下。

1) 采集第 k 组待测电路的工况参数(输入电压、负载阻值)、监测信号,从监测信号中提取出 n 个健康表征参数 HP_1, HP_2, \dots, HP_n 。

2) 将工况参数输入已经训练好的工况-健康表征参数映射模型,得到电路无故障时健康表征参数 H_1, H_2, \dots, H_n 。

3) 计算监测信号中提取的健康表征参数与步骤 2) 中无故障健康表征参数的相对变化量 FI :

$$FI_i = \left| \frac{HP_i - H_i}{H_i} \right|, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

4) 求取 FI 与零点的欧氏距离 D 进行归一化,从而构建电路健康指标 HI_{FI} 。

$$HI_{FI}(k) = 1 - \frac{D(k) - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (4)$$

当关键元器件退化参数在容差范围内变化时,将 HI_{FI} 记为 HI_a 。利用健康指标 HI_{FI} 对电路健康状态进行评估,如式(7)所示。

$$\text{电路状态} \begin{cases} \text{健康,} & HI_a \leq HI_{FI} \leq 1 \\ \text{故障,} & 0 < HI_{FI} < HI_a \\ \text{失效,} & HI_{FI} \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

2.3 电路健康指标标定

通过构建电路理想健康指标对健康评估方法的准确性进行标定。理想健康指标是指在电路元器件参数均假设为标称值的理想情况下,所构建的仅与电路关键元器件退化程度相关,与工况参数无关的指标,其物理意义为当前关键元器件状态距离元器件标称工作状态下(所有关键元器件参数均为标称值)的距离^[17-18]。但电路在真实工作状态下其元器件参数不可能一直保持在标称值,因此理想的健康指标实际是不存在的。但是可以通过计算电路健康指标与理想健康指标的逼近程度来对电路健康评估方法的准确性进行标定,电路健康指标与理想健康指标的偏差程度越小,则电路健康指标的准确性越高^[19]。

当电路中存在 m 个关键元器件时,使用 m 维器件参数

空间内3个点的距离构建理想健康指标;如图3所示,其中 X 变量为电容的等效串联电阻(equivalent series resistance, ESR), Y 变量为MOSFET功率管导通电阻 R_{on} , A 点为电路中关键元器件参数取标称值的空间点; B 点为关键元器件中某一器件参数率先达到失效值的空间点, M 点为当前电路中关键元器件参数为实测值的空间点, tol 区域为电路元器件参数容差, 当 M 点位于 tol 区域内时, 电路处于健康状态。 M 点与 A 点的空间距离记为 d_j , B 点与 A 点的距离记为 d 。

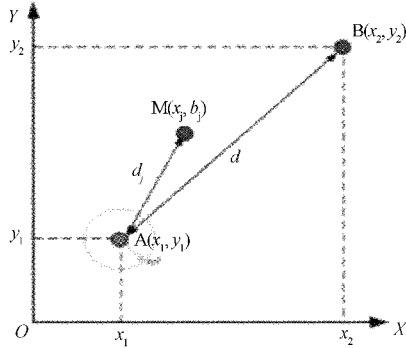


图3 理想健康指标构建示意图

定义理想健康指标 HI_{idea} 公式:

$$HI_{idea}(j) = 1 - \frac{d_j}{d} = 1 - \frac{\sqrt{(x_j - x_1)^2 + (y_j - y_1)^2}}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}},$$

$j = 1, 2, \dots, k$

(6)

其中, x_1 为电解电容的 ESR 标称值, y_1 为 MOSFET 功率管的导通电阻标称值。 x_2 为电路失效时电解电容 ESR 值, y_2 为电路失效时 MOSFET 功率管导通电阻值, x_j 为 ESR 实测值, y_j 为 R_{on} 实测值。

3 实验结果分析

3.1 实验样机

实验样机如图4所示, 主要由电路部分和数据采集部分组成。电路部分由前级倍压反激变换器电路及其控制电路、后级双 Buck 全桥逆变电路及其控制电路、两级电路中 MOSFET 功率管驱动芯片的辅助隔离供电模块(多路 12 VDC 输出)、电解电容并联实验板、可滑动调节阻值的功率电阻(500 W)组成; 实验数据采集部分由 CYBERTEK DP6130 高压差分探头(可测最大电压值: 1 300 V, 带宽: 50 MHz, 最大衰减倍数: 500 倍, 测量精度: $\pm 2\%$)、四通道数据采集卡 Handyscope HS4(最大分辨率: 16 位)、PC 机(型号: 联想 E431)、PC 端采集显示软件 Tiepie Multi Channel(设置采样频率为 5 MHz)组成。

3.2 工况映射模型验证

为了验证基于极限学习机的工况映射模型的有效性与其优越性, 同时与基于多元回归模型的工况映射模型和实测的健康表征参数进行对比分析。以平均绝对误差

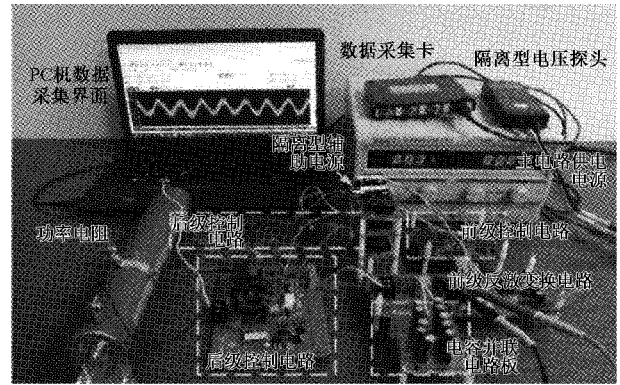


图4 单相航空逆变器实验电路及数据采集平台

(mean absolute error, MAE)、均方根误差 (root-mean-square error, RMSE) 和拟合系数 R^2 作为性能评价指标。

首先将标称值为 $100 \mu\text{F}$ 电容并联实验板接入电路中, 并采集 49 组电路正常工作在不同工况下的直流母线电压信号、输入电压值和输出负载值, 提取出直流母线电压 800 Hz 处幅值作为电路健康表征参数。以其中 40 组样本数据作为训练集, 剩余 9 组作为测试集, 对 ELM 映射模型与多元回归映射模型进行训练和测试。如图5所示为后 9 组测试集模型输出健康表征参数结果。如图6所示为两种工况映射模型的相对误差。

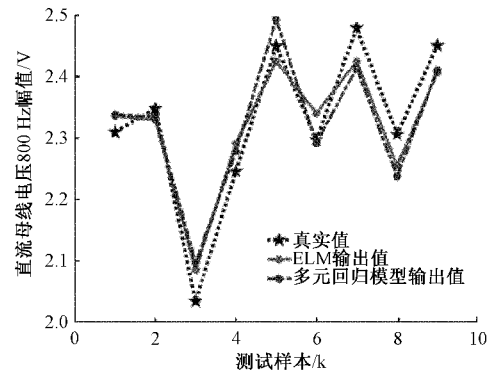


图5 工况映射模型输出健康表征参数

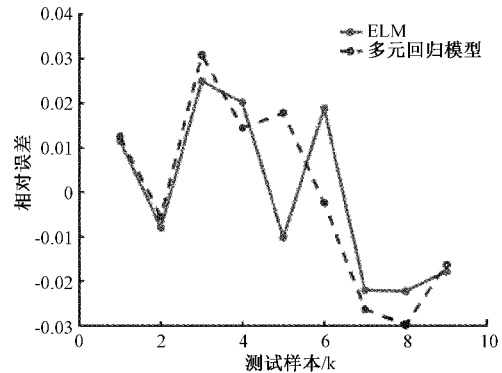


图6 两种工况映射模型的相对误差

由图5、6可知, 实际电路中训练的两种工况映射模型其整体趋势与实际健康表征参数变化相同, 最大相对误差

仅为 $3.085\ 540 \times 10^{-2}$ 。如表 1 所示为两种工况映射模型的评价指标。

表 1 工况映射模型性能评价指标

评价指标	ELM	多元回归模型
MAE	$3.991\ 167 \times 10^{-2}$	$3.999\ 184 \times 10^{-2}$
RMSE	$4.177\ 922 \times 10^{-2}$	$4.533\ 741 \times 10^{-2}$
R^2	0.893 750	0.874 881

由表 1 可知,相比于基于多元回归的工况映射模型,基于 ELM 的工况映射模型精度更高,其拟合优度达到 0.89 以上,均方根误差与平均绝对误差均在 0.042 以下。各项性能评价指标都优于基于多元回归的映射模型。

3.3 电路健康评估方法实验验证

1) 关键元器件退化模拟及工况条件设置

(1) 电解电容退化模拟

由于后级逆变电路中功率管的导通电阻值均为毫欧级,同时更换后级功率管为相同退化水平的功率管可行性较低,故选用电容并联电路板对不同工况下单电容故障模式下的单相航空逆变器电路健康评估方法进行验证。

通过 2.2 μF 、4.7 μF 和 10 μF 三种规格的电解电容进行交叉组合并联,模拟电路中直流母线上 100 μF 电解电容的退化。使用安捷伦 4263B LCR 测试仪在 120 Hz 测量频率下测量电容并联实验板的电容值及 ESR 值,共获得 33 组不同退化程度的电解电容。

(2) 工况条件设置

在获得的 33 组不同退化程度的电解电容基础上,将 1~17 组、26~33 组设置为标准工况(即输入电压 28 V,负载电阻 66 Ω);将 18~25 组的电解电容接入电路时,通过调节直流供电电源电压值与功率电阻阻值,使电路工作在不同输入电压与负载阻值下。具体设置如表 2 所示。

表 2 实验样本工况设置

实验样本	输入电压/V	负载阻值/ Ω
1~17	28	66
18	25	74.7
19	27	74.7
20	29	74.7
21	31	74.7
22	25	55.9
23	27	55.9
24	29	55.9
25	31	55.9
26~33	28	66

2) 电路健康指标实验验证

定义直接求取实测的健康表征参数向量与电路标称状态下健康表征参数向量的欧氏距离所得到的健康指标为

HI_{ED} 。通过将健康指标 HI_{FI} 与 HI_{ED} 在不同工况条件下进行对比分析来验证所提方法能够有效降低工况变化对电路健康评估的影响。

同时构建实验电路的理想健康指标为:

$$HI_{idea}(j) = 1 - \frac{d_j}{d} = 1 - \frac{|ESR(j) - ESR_{normal}|}{ESR_{threshold} - ESR_{normal}}, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

其中, ESR_{normal} 为电解电容的 ESR 标称值, $ESR_{threshold}$ 为电路失效时电解电容 ESR 值, $ESR(j)$ 为 ESR 实测值。第 1 组样本电容容量标称为 100 μF 时,使用 LCR 测试仪测得的 ESR 为 0.77 Ω ,即 $ESR_{normal} = ESR(1) = 0.77 \Omega$;在第 27 组时,所测得的 ESR 第 1 次超过 2.156 Ω (标称值的 2.8 倍),为 2.213 Ω ,因此将第 27 组对应的 ESR 作为式(9)中 $ESR_{threshold}$ 的值,即 $ESR_{threshold} = ESR(27) = 2.213 \Omega$ (由于用于模拟电容退化的并联电容无法得到准确的理论 ESR 阈值,故选择第 1 次超过理论 ESR 阈值的值作为 $ESR_{threshold}$ 的计算值)。实验电路中两种健康指标(HI_{FI} 与 HI_{ED})与理想健康指标(HI_{idea})的变化如图 7 所示。

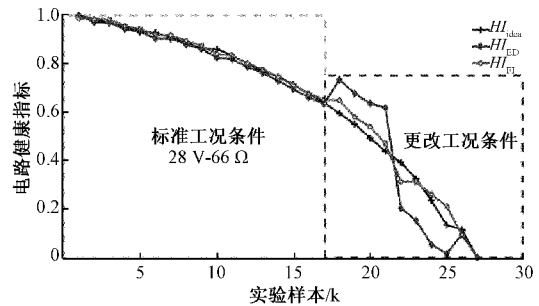


图 7 实际电路两种健康指标变化图

利用平均绝对误差 MAE、均方根误差 RMSE 和拟合系数 R^2 对 HI_{FI} 和 HI_{ED} 进行评价,评价结果如表 3 所示。

表 3 两种电路健康指标准确性对比

评价指标	HI_{ED}	HI_{FI}
MAE	$5.370\ 460 \times 10^{-2}$	$1.906\ 608 \times 10^{-2}$
RMSE	$8.689\ 477 \times 10^{-2}$	$2.881\ 639 \times 10^{-2}$
R^2	0.910 559 83	0.990 163 86

由图 7 和表 3 可知,随着电路健康状态退化不断加深,两种方法构建的电路健康指标在前 17 组标准工况下呈现单调下降趋势。但本文中通过相对变化量构建的电路健康指标 HI_{FI} 在变工况条件下的整体变化趋势与构建的理想健康指标 HI_{idea} 重合度更好,而直接使用欧氏距离构建的健康指标 HI_{ED} 在变工况条件下,其与理想健康指标的偏差程度更大。两种健康指标的拟合均在 0.91 以上,但使用相对变化量构建的健康指标 HI_{FI} 在 3 个评价指标上均优于使用欧氏距离构建的健康指标 HI_{ED} ,其平均绝对误差仅为 0.019 066,均方根误差为 0.028 816,均小于 HI_{ED} 。其中,平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)分别降低

了64.4%和66.8%。由此验证了利用所提方法建立的健康指标相比于直接利用欧氏距离构建的健康指标所受到工况变化的影响更小,可以有效降低工况变化对电路健康评估的影响,提高电路健康评估的准确性。

当电解电容的电容值变化为 $\pm 20\%$ 时,将此时的健康指标作为健康指标容差边界,即 $HI_a = HI(7) = 0.9181$ 。对电路健康状态进行评估:

$$\text{电路状态} \begin{cases} \text{健康,} & 0.9181 \leq HI \leq 1 \\ \text{故障,} & 0 < HI < 0.9181 \\ \text{失效,} & HI \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

4 结 论

本文提出了一种基于工况-健康表征参数映射模型的电路健康评估方法。基于极限学习机的工况映射模型实现了工况参数到电路无故障健康表征参数的映射,在工况映射模型的基础上构建了考虑工况条件的电路健康指标,对不同工况条件下电路健康状态进行评估。

实验结果表明,工况-健康表征参数映射模型能够准确地将工况参数映射为电路无故障健康表征参数。基于当前健康表征参数与无故障健康表征参数相对变化量所构建的电路健康指标受工况变化影响小,电路健康评估更准确。相比于直接使用欧氏距离构建的健康指标 HI_{ED} ,通过相对变化量构建的电路健康指标 HI_{EI} 在变工况条件下的整体变化趋势与构建的理想健康指标 HI_{idea} 重合度更好。所提出的评估方法对航空电源的健康评估以及可靠性管理具有重要的参考价值。

未来还可使用优化算法对模型进行寻优。本文只考虑了输入电压和负载这两种工况,后续研究还可将电路实际应用场合下的电磁干扰、温湿度、振动等因素考虑在内,进而实现更全面、更准确的电路健康状态评估。

参考文献

- [1] 邱立军,吴明辉. PHM技术框架及其关键技术综述[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(2): 10-15.
- [2] WANG L, YUE J G, SU Y Q, et al. A novel remaining useful life prediction approach for superbuck converter circuits based on modified grey wolf optimizer-support vector regression [J]. Energies, 2017, 10(4): 459.
- [3] HE Q C, CHEN W H, PAN J, et al. A prognostic method for predicting failure of dc/dc converter[J]. Microelectronics Reliability, 2017, 74: 27-33.
- [4] 孙权,王友仁,姜媛媛,等. 基于GPR的SEPIC变换器故障预测方法[J]. 电力电子技术, 2018, 52(6): 17-20.
- [5] 孙权,王友仁,吴祎,等. 基于无迹粒子滤波的功率变换器剩余寿命预测方法[J]. 电源学报, 2019, 17(5): 197-202.
- [6] JIA Z, LIU Z, VONG C M, et al. Real-time response-based fault analysis and prognostics techniques of

- nonisolated DC-DC converters [J]. IEEE Access, 2019, 7: 67996-68009.
- [7] 袁义生,钟青峰. 基于支持向量机的光伏逆变器损耗预测方法[J]. 电力电子技术, 2018, 52(3): 36-39.
- [8] 祝勇俊,孙权,朱其新,等. 基于维纳过程的光伏逆变器寿命评估方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(20): 115-119, 152.
- [9] 姜伟,张春雷,时林林,等. 基于单/多参数的DC-DC模块电源健康评估技术研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2019, 51(2): 14-20.
- [10] YAO K, LI H, LI L, et al. A noninvasive online monitoring method of output capacitor's C and ESR for DCM flyback converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(6): 5748-5763.
- [11] CEN Z, STEWART P. Condition parameter estimation for photovoltaic buck converters based on adaptive model observers [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2016, 66(1): 148-160.
- [12] 陈华坤,章卫国,史静平. 航空电子设备故障预测特征参数提取方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(3): 364-373.
- [13] 吴祎,王友仁,姜媛媛,等. 基于特征参数退化的DC/DC变换器故障预测[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 181-188.
- [14] LU Y, CHRISTOU A. Prognostics of IGBT modules based on the approach of particle filtering [J]. Microelectronics Reliability, 2019, 92: 96-105.
- [15] MOHAMAD A A, HOBLOS G, PUIG V. A hybrid system-level prognostics approach with online RUL forecasting for electronics-rich systems with unknown degradation behaviors [J]. Microelectronics Reliability, 2020, 111: 113676.
- [16] 陈志强,陈旭东, JOSÉ, 等. 深度学习在设备故障预测与健康中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 206-226.
- [17] 张筱辰,朱金大,杨冬梅,等. 基于t-SNE流形学习与快速聚类算法的光伏逆变器故障预测技术[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 41-47.
- [18] 何晋,李维希,李智轩,等. 基于可拓灰云聚类-状态区间范围差异的断路器状态评估方法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(17): 8-13.
- [19] 何怡刚,李凯伟,朋张胜,等. 基于改进最小二乘支持向量机的IGBT模块键合线状态评估方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 170-176.

作者简介

左景航,硕士研究生,主要研究方向为开关电源健康评估与寿命预测。

E-mail: Zzjh199105@163.com

王友仁,教授,博士生导师,主要研究方向为检测技术与信号处理、机载设备故障诊断与健康预报、仿生硬件与智能系统。

E-mail: wangyrac@nuaa.edu.cn