

9-2-2020

Methodology Research for Health Condition Assessment of Power Supply Based on Simulation

Xuerong Ye

Department of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

Chen Cen

Department of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

Yixing Wang

Department of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

Guofu Zhai

Department of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Methodology Research for Health Condition Assessment of Power Supply Based on Simulation

Abstract

Abstract: Currently, the prognostics and health management research of switch mode power supply (SMPS) are mostly based on the field data with specified stress profile, which can hardly be adapted to the application in other stress condition. *A methodology research for health condition assessment of power supply based on simulation was proposed. The highly precise model was created for the injection of the quantitative degradation parameters of components. The database containing degradation characteristics of power supply was created by using design of experiment. The functions between stress factors and system outputs were confirmed based on least square method. Thus the health condition of the device will be estimated whatever the stress is.* The demonstration of a flyback power supply validates the accuracy and effectiveness of the proposed methodology.

Keywords

switch mode power supply, health condition assessment, design of experiment, EDA technology

Recommended Citation

Ye Xuerong, Chen Cen, Wang Yixing, Zhai Guofu. Methodology Research for Health Condition Assessment of Power Supply Based on Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(1): 185-191.

基于 EDA 的开关电源健康状态评估方法研究

叶雪荣, 陈岑, 王一行, 翟国富

(哈尔滨工业大学电气工程系, 哈尔滨 150001)

摘要: 目前开关电源的预测与健康研究多基于某特定应力下的监测数据, 其应力剖面固定, 难以推广应用到应力随机组合的实际场合中。通过对所建立的高精度仿真模型中注入定量退化的方式, 基于 EDA 技术开展了开关电源整体健康状态评估方法的研究。采用试验设计的方法, 构建电源退化特征标准数据库, 并采用最小二乘拟合方法, 确定应力因素与系统输出的函数关系。进而可评估得到任意应力组合作用下电源的实际健康状态。某反激开关电源的实际健康状态评估结果表明了所提出的方法有效可用。

关键词: 开关电源; 健康状态评估; 试验设计; EDA 技术

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 01-0185-07

Methodology Research for Health Condition Assessment of Power Supply Based on Simulation

Ye Xuerong, Chen Cen, Wang Yixing, Zhai Guofu

(Department of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Currently, the prognostics and health management research of switch mode power supply (SMPS) are mostly based on the field data with specified stress profile, which can hardly be adapted to the application in other stress condition. A methodology research for health condition assessment of power supply based on simulation was proposed. The highly precise model was created for the injection of the quantitative degradation parameters of components. The database containing degradation characteristics of power supply was created by using design of experiment. The functions between stress factors and system outputs were confirmed based on least square method. Thus the health condition of the device will be estimated whatever the stress is. The demonstration of a flyback power supply validates the accuracy and effectiveness of the proposed methodology.

Keywords: switch mode power supply; health condition assessment; design of experiment; EDA technology

引言

随着近年来“全电”概念的提出和逐步实现^[1],



作者简介: 叶雪荣(1981-), 男, 浙江人, 博士, 副教授, 研究方向为电器及电子系统的可靠性设计、测试与试验; 陈岑(1992-), 男, 黑龙江人, 博士生, 研究方向为电子产品退化状态评估及预测; 王一行(1995-), 男, 山西人, 硕士生, 研究方向为电子产品故障预测。

收稿日期: 2013-12-25 修回日期: 2014-04-20
基金项目: 国防科工局技术基础科研项目 (JSJC2013603C021)

新一代装备向全电功率能源系统的转型已成为必然趋势。随着系统用电量的大幅提升, 对系统电源的性能以及可靠性提出了更高的要求。据统计, 34%的电气设备故障是由电源故障引起的。电源作为系统核心部件, 其重要性不言而喻。以航空机载电源为例, 一旦故障必将导致机上控制、通信以及仪表等重要设备无法工作^[2], 不仅直接影响飞机稳定运行, 甚至会造成坠机、爆炸等灾难性后果。

对于重要设备的电源,维护是保障其可靠性的必要手段。传统的定期维护方法,耗费巨大但仍不能显著提高可靠性。近年来,美国军方提出了预测与健康状态管理(PHM, Prognostics and Health Management)以及基于状态的智能维护(CBM, Condition Based Maintenance)技术。此技术已在如直升飞机的动力传动等机械结构的维护中得到了广泛的应用^[3]。随着电子产品的飞速发展,将基于状态的智能维护思想引入电源领域十分必要。而智能维护思想的实现,首先需要准确获得电源的健康状态^[4]。

目前,国内外对于电源设备 PHM 的研究主要集中在关键元器件的故障预测上。基于元器件失效机理,结合相应的加速退化手段,监测元器件的敏感退化参数,并利用预测算法进行预测。如有学者分别对 MOSFET 阈值电压和导通电阻进行了监测,并利用粒子滤波、高斯回归等算法进行了剩余寿命预测研究^[5-6]。类似针对于元器件本体的监测与预测方法,很难适用于系统级的 PHM 研究。如 MOSFET 在某一电源系统中时,其阈值电压无法在线测得。另有学者提出了综合考虑多个器件退化情况,通过提取能反映电源整体退化的故障特征参数,利用灰色模型、最小二乘支持向量机等方法进行退化预测研究^[7-8]。但相关研究中固定了工作条件状态,无法实现不同组合应力作用下的预测和维护。本文基于 EDA 仿真技术,人为注入退化故障,以此开展电源健康状态评估方法的研究。首先建立电源 Pspice 仿真模型,并通过试验进行验证及修正;然后确定关键元器件及其退化模型;根据主要应力剖面设计仿真方案,得到未退化及故障(退化)注入后的仿真结果,由此构建电源健康特征数据库;最后将待评估电源的输出数据与特征数据库进行距离比对,从而实现对其实际健康状态的评估。实例应用结果表明,本文方法有效可用。

1 开关电源 Pspice 建模及验证

开关电源的仿真建模可由 Pspice, Saber 等 EDA 软件实现。建模时,大部分的元器件可从模

型库获得,其精度能满足要求。但对于变压器以及铝电解电容等特殊器件,采用仿真软件所提供的理想模型往往仿真结果欠佳。

1.1 变压器模型的建立

利用 Pspice 提供的 Transformer Designer 建立变压器模型,必须已知骨架结构、磁芯材料、气隙大小、绝缘材料等相关参数,一般设计者很难准确获得。本文采用等效电路方法进行了变压器仿真建模。

考虑了寄生电感、铁心损耗以及绕组损耗后的变压器模型如图 1 所示^[9]。

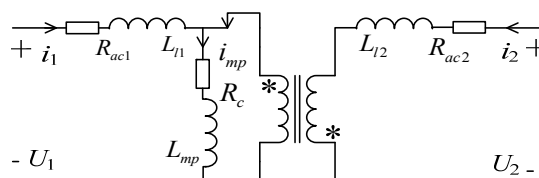


图 1 变压器等效电路仿真模型

可通过高频网络分析仪、高精度万用表等测量、计算得到图 1 等效电路中的各参数值。将变压器副边线圈短接,测得原边线圈电感即为原边漏感 L_{l1} ,同理可测副边漏感 L_{l2} ;将副边线圈开路,测得原边电感即为励磁电感 L_{mp} 。原副线圈具有一定的直流电阻 R_{dc1} , R_{dc2} ,而变压器工作在高频状态时,由于集肤效应会使其交流阻 R_{ac} 抗大于直流阻抗。 R_{ac}/R_{dc} 与电流频率、线圈直径以及温度等因素相关,圆铜线在 20°C , $f=100\text{ KHz}$ 时, $R_{ac}/R_{dc}=1.7$ 。直流电阻可利用万用表直接测得,并由此估算原副线圈交流电阻 R_{ac1} , R_{ac2} 。

1.2 铝电解电容模型的建立

铝电解电容作为电源退化过程中的典型退化器件之一,其仿真模型不能用简单的容值代替。根据铝电解电容器的物理结构,构造其等效电路如图 2 所示^[10]。

图中, L_s 为引线电感, R_{sp} 为介质损耗电阻, R_p 表示电解液及衬垫纸欧姆电阻,二极管 D 等效氧化膜介质的 PN 结效应。

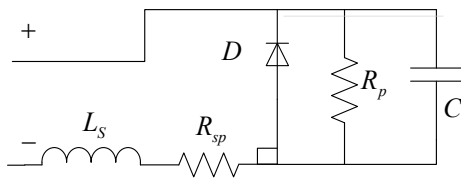


图 2 铝电解电容等效电路

1.3 开关电源的仿真模型及验证

本文所建立的某开关电源仿真模型拓扑结构如图 3 所示。

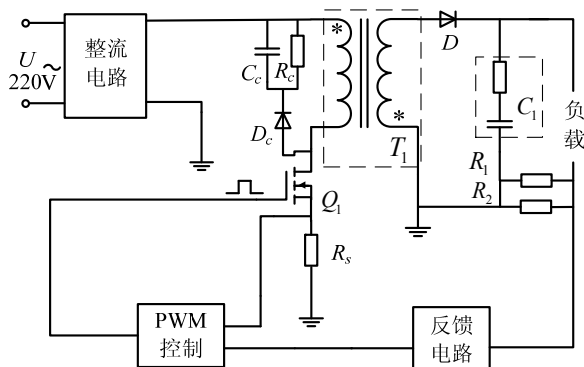


图 3 仿真模型拓扑结构

为验证模型准确性,需要将仿真模型关键节点波形与实测波形进行对比。开关管的占空比以及开关频率是电源系统中重要的参数,而二极管反向击穿电压等级以及开关速度同样会影响电源性能。由此选择 MOSFET 驱动波形、栅源电压波形以及二极管导通压降波形进行对比,如图 4~6 所示。

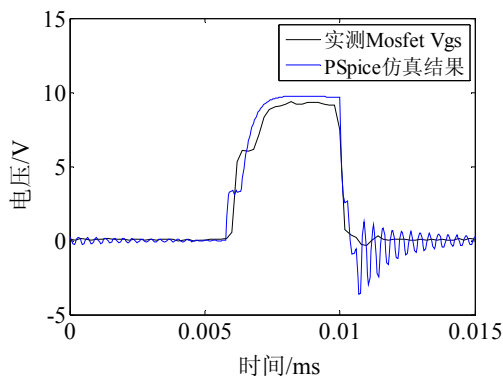


图 4 开关管驱动波形对比

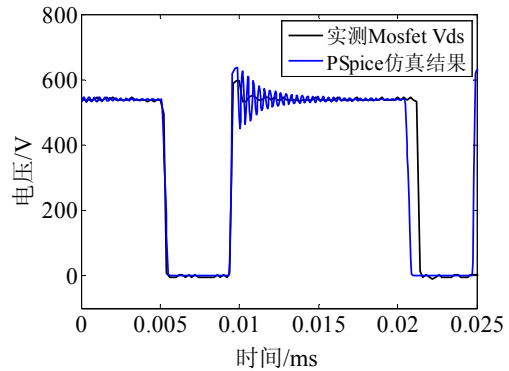


图 5 开关管漏源电压波形对比

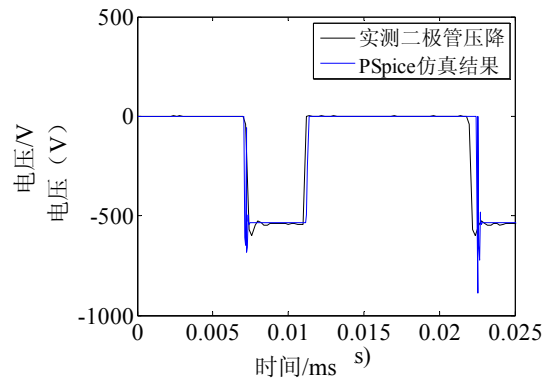


图 6 二极管导通压降对比

仿真模型的波形与实测波形相比,存在一定的开关振荡,分析发现这是由于仿真算法的收敛性导致的,但对于本文的方法研究不会产生影响。同时可以看出在开关频率方面存在一定的误差,这是由于系统中使用的 PWM 芯片的固定频率值与理想模型的误差导致的,仿真频率与实测频率分别为 62.5KHz 和 60.6KHz,误差为 3.1%。此外开关管驱动电压的仿真值和实测值分别为 9.7V 和 9.3V,误差为 4.3%。对比结果表明,所建立的仿真模型计算精度较高,可用于本文的研究。

2 开关电源输出特性退化仿真

2.1 开关电源主要元器件退化模型

开关电源中,电解电容的性能和指标直接影响着整个系统的性能^[10]。应用情况表明,电容器发生故障的概率在整个电力电子系统中最高^[11]。而采样电阻作为开关电源反馈控制的重要元器件,也对开关电源的输出性能等起到了重要的影响。此外,

MOSFET 作为电源中的核心器件, 其性能退化对整个系统的性能与可靠性有着重要的影响^[12]。

2.1.1 铝电解电容退化模型

通过对电解电容器退化机理的分析发现, 其内部物理、化学反应引起的最显著退化是电解液的损失和等效串联电阻 ESR 的增大^[10]。其退化模型可表示为:

$$C(t) = C_0 - \beta \cdot t \quad (1)$$

$$ESR(t) = ESR_0 \cdot e^{\beta t} \quad (2)$$

式中: C_0 为 C 的初值; ESR_0 为 ESR 的初值; t 为时间; β 为各自的退化系数。

2.1.2 电阻器件的退化模型

电阻的退化模型在不考虑初值的分散性且工作环境确定的条件下可以简化描述为:

$$R(t) = R_0 + \beta \cdot t \quad (3)$$

其中: t 为时间; β 为定义的退化系数; R_0 为电阻初值。

2.1.3 MOSFET 的退化模型

MOSFET 参数退化的直接原因是栅极氧化层通道遭到破坏。实验表明 MOSFET 的退化会导致跨导降低、阈值电压上升以及导通电阻的降低。其中阈值电压的变化最为明显, 其变化会导致开通时间增长, 从而导致功耗增加^[13]、温升增大, 更严重的退化甚至会直接降低系统的工作频率。

阈值电压的退化模型可以利用有效界面缺陷态密度 ΔN_{IT} 进行描述。此模型在 MOSFET 器件加速寿命退化试验^[12]中得到了很好的验证。将 ΔN_{IT} 近似用时间的对数替代^[14], 则模型简化为 $V_{th}(t) = V_{th}(0) + e^{\beta \cdot t}$ 。

2.1.4 非典型器件模型

除上述 3 类重要器件的退化模型, 退化过程还需要考虑变压器励磁电感以及非铝电解电容, 其退化模型可简化为:

$$L(t) = L_0 - \beta \cdot t \quad (4)$$

$$C_n(t) = C_{n0} - \beta \cdot t \quad (5)$$

2.1.5 元器件退化模型参数

参考已有研究结果^[15], 结合相关测试与分析, 确定了本文主要器件的退化参数, 如表 1 所示。

表 1 退化器件参数

元器件标号	初值	退化参数
C1	220 μ F	$\beta = -2.64 \times 10^{-3}$
ESR(C1)	0.2494 Ω	$\beta = 5.54 \times 10^{-5}$
R1	4.7 Ω	$\beta = 9.4 \times 10^{-6}$
R2	3.9 Ω	$\beta = 7.8 \times 10^{-6}$
T1	1.4 mH	$\beta = -1 \times 10^{-5}$
Q1	3.75 V	$\beta = 1.5 \times 10^{-5}$

2.2 仿真方案的试验设计

已有研究表明, 电源所承受应力如温度、输入电压、负载电阻等, 对其性能有着重要的影响。要准确评估电源健康状态, 理论上必须制备所有应力组合情况下的电源状态标准数据库。而多应力、多水平值全组合带来的仿真工作量十分巨大, 因此, 本文提出采用试验设计的方法, 以完成标准数据库的建立。某开关电源技术参数如下: 等效直流输入电压范围 380~420 V, 负载范围 165~245 Ω , 环境温度 -20~60 $^{\circ}$ C, 额定输出电流为恒流 710 mA。结合该电源实际工作状况, 将输入电压、负载电阻以及环境温度确定为 3 个应力因素, 在各自的波动范围内取 5 个水平值, 采用 $L_{25}5^3$ 正交表设计仿真方案(如表 2~3 所示)。

即便是采用试验设计, 构建特征数据库的仿真工作量仍然很大。本文利用 Autoit 对 Pspice 进行了二次开发(图 7), 使其可自动修改参数并循环运行, 显著缩短了数据库的制备周期。

表 2 试验设计方案

应力参数	输入电压/V	负载/ Ω	温度/ $^{\circ}$ C
水平值 1	380	165	-20
水平值 2	390	180	0
水平值 3	400	200	27
水平值 4	410	220	40
水平值 5	420	245	60

表 3 应力组合

应力组合	输入电压/V	负载/ Ω	温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	380	165	-20
2	380	180	0
3	380	200	27
4	380	220	40
5	380	245	60
6	390	165	0
7	390	180	27
8	390	200	40
9	390	220	60
10	390	245	-20
11	400	165	27
12	400	180	40
13	400	200	60
14	400	220	-20
15	400	245	0
16	410	165	40
17	410	180	60
18	410	200	-20
19	410	220	0
20	410	245	27
21	420	165	60
22	420	180	-20
23	420	200	0
24	420	220	27
25	420	245	40

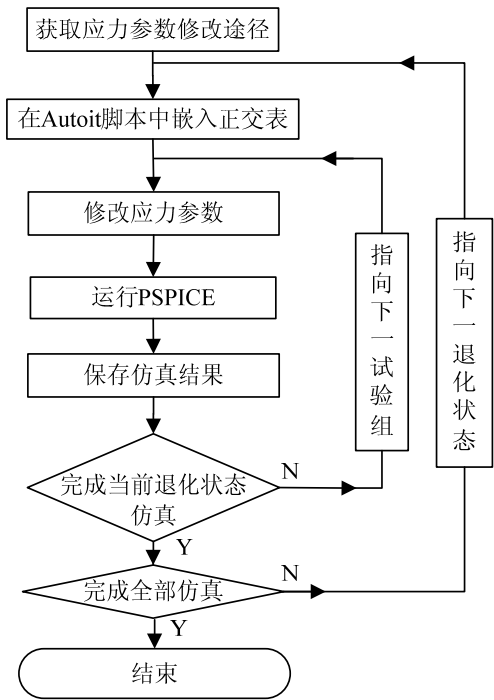


图 7 Pspice 二次开发流程图

3 健康状态评估方法

本文提出的健康状态评估方案如图 8 所示。

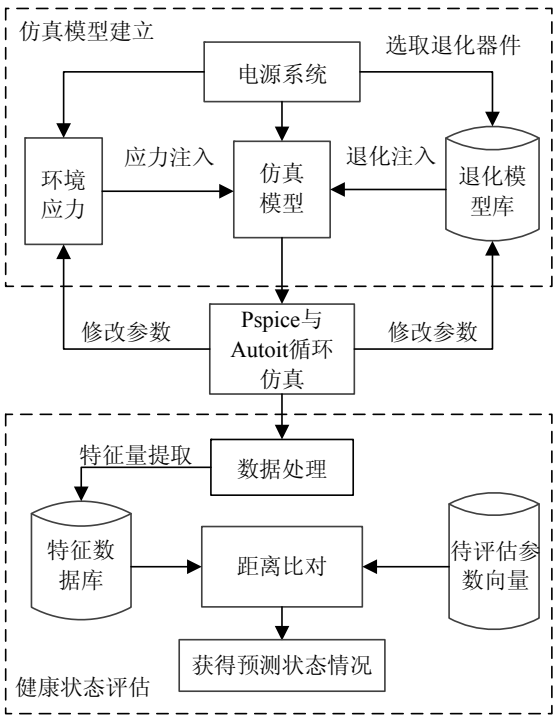


图 8 评估方案流程图

3.1 特征量选取

本例中, 经过大量数据分析后发现, 输出电流、电压纹波随系统的整体退化呈现出最为明显的变化趋势。由此说明, 输出电流 (图 9) 以及电压纹波 (图 10) 在本例中可以很好的表征系统退化程度即电源的健康状态, 故选为退化特征量。

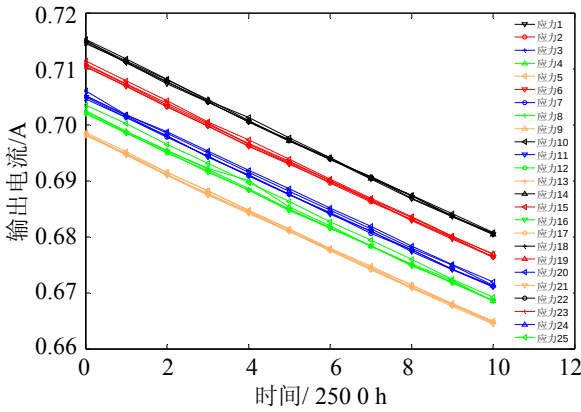


图 9 25 组不同应力条件下的输出电流退化趋势

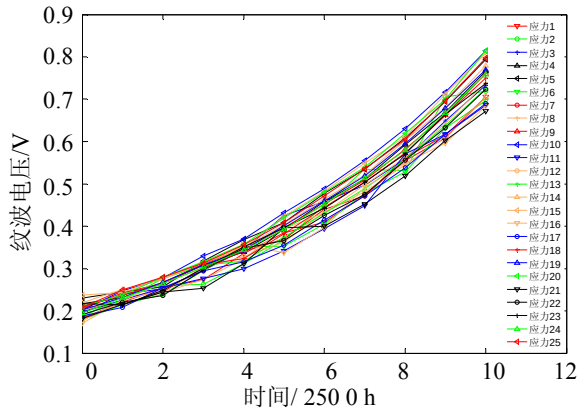


图 10 25 组不同应力条件下的输出电压纹波变化趋势

3.2 健康状态建模

特征量一方面受退化程度的影响,另一方面也受环境应力变化而产生偏移,如温度上升将导致采样电阻的漂移,使得稳定工作点随之漂移;恒流电路中的负载变化也将对输出纹波产生直接影响。本例利用正交试验构建一阶响应面模型,用最小二乘法对此多元函数进行拟合。由于不同的退化状态下的应力响应面存在差异但结构相似,因此可以利用不同响应面下的相同应力状态点的对比评估待测系统当前的状态。为避免数据的量级不同对拟合效果产生影响,应首先对数据进行平移-极差变换处理。拟合后分别得到输出电流及电压纹波与环境应力的函数关系:

$$I_o = -0.0339t + 0.0002V_{in} + 0.008R_L - 0.0162T + 0.7141$$

$$V_r = \exp(1.3056t - 0.0122V_{in} + 0.1399R_L - 0.0314T - 1.6456)$$

其中: V_{in} , R_L , T 分别对应于环境应力中的输入电压、负载以及温度应力。结果表明,运行时间对输出电流和电压纹波影响程度最大,而温度和负载变化也会分别对输出电流和电压纹波产生一定影响。

为方便研究,选取应力组合 1 作为基准应力状态点。表 4 给出不同健康状态下基准状态点的输出响应参数,即基准健康状态。

3.3 评估实例

利用响应面模型和原始待测状态参数,找到待测状态在固定状态点处的参数。将其与标准健康状

态表进行距离比对,确定近似状态。根据电源的应用背景,我们规定电源健康状态与各特征量关系如表 5。表 6, 7 所示为 5 组待测电源系统的健康状态评估结果。

表 4 基准健康状态表

工作时间/h	输出电流平均值/A	电压纹波/V
0	0.714086	0.192887
2500	0.710692	0.219789
5000	0.707298	0.250443
7500	0.703904	0.285372
10000	0.700510	0.325172
12500	0.697116	0.370524
15000	0.693722	0.422200
17500	0.690328	0.481084
20000	0.686934	0.548180
22500	0.683541	0.624634
25000	0.680147	0.711750

表 5 健康状态与特征量对应表

电源健康状态	输出电流	电压纹波
良好	$710 \pm 5 \text{ mA}$	$\leq 0.3 \text{ V}$
轻度退化	$\geq 700 \text{ mA}$	$\leq 0.6 \text{ V}$
严重退化	$< 700 \text{ mA}$	$> 0.6 \text{ V}$

表 6 待测组监测参数

待测组	电压/V	负载/ Ω	温度/ $^{\circ}\text{C}$	输出电流平均值/A	电压纹波/V
1	380	220	20	0.699609	0.268
2	385	230	25	0.691762	0.354
3	400	190	25	0.691320	0.318
4	420	65	0	0.696684	0.318
5	380	220	20	0.679478	0.595

表 7 测试电源健康状态评估结果

待测组	基准态电流/A	基准态电压纹波/V	评估运行时间/h	评估健康状态	实际运行时间/h
1	0.707 162	0.247	5126.0	良好	5 000
2	0.700 202	0.322	10244.4	轻度退化	10 000
3	0.700 078	0.312	10333.2	轻度退化	10 000
4	0.701 516	0.386	9268.5	轻度退化	10 000
5	0.687 031	0.549	19928.2	严重退化	20 000

表 7 中分别给出归算至基准态后的电流及电压纹波值, 对应表 3 即可评估待测电源输出特性的退化程度。而基于文中所建立的健康状态评估模型, 可得电源运行时间的评估结果。五组评估结果与实际运行时间的误差分别为 2.52%, 2.444%, 3.332%, 7.315% 以及 0.359%。第 4 组误差较另外几组较大, 其原因为负载 $65\ \Omega$ (见表 6) 偏离应力设定范围 ($165\sim 245\ \Omega$) 程度过大, 出现了超出应力响应面的情况。

4 结论

开关电源作为电气设备的核心部件, 其健康状态直接影响着整个系统的性能和可靠性。本文提出了一种新的基于 EDA 技术的开关电源健康状态评估方法。

(1) 通过对变压器、铝电解电容等关键元器件的特殊建模处理, 建立了仿真精度较高的开关电源仿真模型。其中频率仿真误差为 3.1%, 开关管驱动波形幅值误差为 4.3%。

(2) 基于试验设计和 Pspice 软件的二次开发, 通过对定量注入退化的仿真模型进行仿真及数据处理, 建立了可体现不同退化阶段电源特征的标准数据库。在此基础上, 通过健康状态评估建模, 可实现任意应力组合作用下开关电源的健康状态评估。

(3) 本文的研究工作, 不仅可为开关电源 PHM 研究提供通用性平台, 相关方法亦可推广应用于其他电子系统的预测与健康研究管理中。

参考文献:

- [1] 臧克茂. 陆战平台全电化技术研究综述 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2011, 25(1): 1-7.
- [2] 黄根全. 航空电源故障特征提取与故障诊断研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [3] Saha B, Vachtsevanos G. A model-based reasoning approach to system fault diagnosis [J]. WSEAS Transactions on Systems (S1109-2777), 2006, 5(8): 1997-2004.
- [4] Siddiqui A A, Haibin Y, QingHua Y, *et al.* PHM for air craft power supply generators using real-time frequency estimation based on 3-line DFT [C]// Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on. USA: IEEE, 2011: 2548-2551.
- [5] Saha S, Celaya J R, Vashchenko V, *et al.* Accelerated aging with electrical overstress and prognostics for power mosfets [C]// Energytech, 2011 IEEE. USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [6] Celaya J R, Saxena A, Vashchenko V, *et al.* Prognostics of power MOSFET [C]// Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 2011 IEEE 23rd International Symposium on. USA: IEEE, 2011: 160-163.
- [7] 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): 1380-1387.
- [8] 姜媛媛, 王友仁, 罗慧, 等. 电力电子电路故障评估新指标及基于 LSSVM 的预测新方法 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 43-50.
- [9] Zhai G, Zhou Y, Ye X, *et al.* A method of multi-objective reliability tolerance design for electronic circuits [J]. Chinese Journal of Aeronautics (S1000-9361), 2013, 26(1): 161-170.
- [10] 尚永爽, 王怡苹, 刘勇. 开关电源的故障预测及电解电容器退化研究 [J]. 电子测量技术, 2010, 33(11): 102-104.
- [11] Judkins J, Goodman D, Vonhout S. Practical considerations for power electronics system and actuator prognostics implementations [C]// Autotestcon, 2007 IEEE. USA: IEEE, 2007: 553-560.
- [12] 陈世杰. 功率 MOSFET 退化建模及寿命预测方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [13] Orsagh R, Brown D, Roemer M, *et al.* Prognostic health management for avionics system power supplies [C]// Aerospace Conference, 2005 IEEE. USA: IEEE, 2005: 3585-3591.
- [14] Cester A, Gerardin S, Paccagnella A, *et al.* Modeling MOSFET and circuit degradation through SPICE [C]// Solid-State Device Research Conference, 2005 IEEE. USA: IEEE, 2005: 403-406.
- [15] 周慧德. 开关电源中铝电解电容可靠性的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.