DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.339 **中图分类号**：TB114.3 **文献标志码**：A

考虑空间辐射-温度耦合效应的 DC-DC 电源寿命评估

宗怡明[1,2](中国电源学会学生会员)，方艳红[1,2]，锁 斌[1,2]
(1.西南科技大学信息工程学院，绵阳 621010；2.西南科技大学复杂环境装备可靠性研究中心，绵阳 621010)

摘要：DC-DC 电源在空间环境中同时受到长期低剂量率辐射和温度的共同影响，当前尚无空间辐射-温度耦合效应加速模型，因此如何评估 DC-DC 电源在耦合效应下的寿命是目前面临的一项重要挑战。基于此，提出了一种基于广义耦合加速模型和响应面加速模型的寿命评估方法。该方法以广义耦合加速模型和响应面加速模型为基础，首先通过粒子群算法进行最优加速模型的选择和参数估计；然后通过模型平均的方法建立最终的耦合效应加速模型；最后以某型 DC-DC 电源为对象，对不同应力组合下获得的加速性能退化数据进行耦合关系分析，并使用所提方法开展 DC-DC 耦合效应下的寿命评估，验证了新方法的有效性。

关键词：DC-DC 电源；加速退化试验；空间辐射-温度耦合效应；寿命评估

Life Evaluation of DC-DC Power Supply Considering Coupling Effect of Space Radiation and Temperature

ZONG Yiming[1,2], *Student Member*, *CPSS*, FANG Yanhong[1,2], SUO Bin[1,2]
(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
2. Research Center for Complex Environmental Equipment Reliability, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: DC-DC power supplies are simultaneously affected by long-term low-dose-rate radiation and temperature in a space environment. At present, there is no space radiation-temperature coupling effect acceleration model, and how to evaluate the life of DC-DC power supplies under the coupling effect is a challenge. A life evaluation method based on a generalized coupled acceleration model and a response surface acceleration model is proposed. First, the particle swarm optimization algorithm is used to select the optimal acceleration model and estimate its parameters. Then, the final coupling effect acceleration model is established through model averaging. Finally, a certain type of DC-DC power supply is taken as the object, the coupling relationship analysis of acceleration performance degradation data obtained under different stress combinations is carried out, and the proposed method is used to evaluate the life of DC-DC power supply under the coupling effect, thus verifying the effectiveness of the novel method.

Keywords: DC-DC power supply; accelerated degradation test; space radiation-temperature coupling effect; life evaluation

收稿日期：2024-12-04；**修回日期**：2024-12-23，2025-01-03；
录用日期：2025-01-09；**网络首发日期**：2025-02-11
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U1830133)；四川省高效电源变换技术工程研究中心基金资助项目(JS20231000536)；中央引导地方科技发展资金资助项目(2023ZYDF022)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant U1830133; Sichuan High Efficiency Power Conversion Technology Engineering Research Center Fund Project under the grant JS20231000536; the Central Government Guides Local Funds for Science and Technology Development under the grant 2023ZYDF022

随着 DC-DC 电源的广泛应用，作为航天器重要的供电部件，它需要在空间辐射环境下长期工作，这种辐射环境会在航天器系统电子元器件中引起电离辐射效应，引起元器件性能退化。当前，国内外学者针对 DC-DC 电源辐射、温度效应及寿命评估技术已开展了较多研究。研究表明，DC-DC

电源的电离辐射效应主要包括总剂量效应和低剂量率损伤增强 ELDRS(enhanced low-dose-rate sensitivity)效应。由于 ELDRS 效应的存在，采用实验室高剂量率的辐射结果与实际空间低剂量率环境下的结果有明显不同。相传峰等[1]和李小龙等[2]测试和分析了器件在不同剂量率辐射前、后的关键性能参数，得到了器件的敏感参数与辐射总剂量和剂量率之间的关系。Shi 等[3]和从忠超等[4]通过试验和仿真发现了粒子辐射会造成电源电学特性的退化，从而导致器件的功能失效，影响器件的工作寿命。王春晖等[5]和 Xia 等[6]对 DC-DC 电源进行加速寿命试验，采用传统加速模型得到寿命指标与应力的关系，预测其在正常工作应力条件下的寿命。Rigamonti 等提出了一些基于智能算法的寿命评估方法[7-11]，对其剩余寿命进行预测。但是，现有研究大多是针对辐射或温度的单一条件，且只是开展了加速试验研究，没有掌握辐射和温度耦合效应机制，也未建立相应的加速模型，进而没有实现定量的寿命评估。

加速模型的构建是加速试验评估的关键环节。目前许多学者对双应力加速模型进行了研究，并应用在实际工程中。现有的广义 Eyring 模型虽然考虑了 2 个应力之间的耦合作用，但只是简单的相乘关系，并不适用于所有的双应力耦合情况。对于辐射和温度双应力的研究，Fleetwood 等[12]首次提出了高温辐照加速方法，陆妩等[13]深入研究并提出变温辐照加速方法，但在这些方法中高温只是作为提升辐射试验效率的一个加速应力，而不是将高温、辐射共同作为加速应力来进行评估。

为解决上述问题，本文提出了一种基于广义耦合加速模型和响应面加速模型的寿命评估方法，选取某型号的抗辐照加固 DC-DC 电源作为研究对象实施加速寿命试验，讨论了考虑应力耦合效应与不考虑该效应 2 种情况下的寿命分布差异。分析结果显示，纳入应力耦合影响的寿命评估结果与实际情况更为吻合，强调了在进行此类评估时考虑应力耦合效应的重要性，验证了所提方法的有效性。

1 考虑辐射-温度耦合效应的加速模型构建

当前对加速模型的研究大多集中于单应力阶段，其中阿伦尼乌斯模型、逆幂律模型、艾林模型等是最常用也是最经典的加速模型。但本文研究的是 DC-DC 电源长期受到低剂量率辐射和温度的双重影响，常用的单应力加速模型不适用于这种情况，且其失效机理复杂，难以使用物理加速模型进行计算。因此，本文从统计加速模型角度，利用广义对数线性模型和响应面模型 2 种数学模型，通过赋予对应的权重构建最终的空间辐射-温度耦合效应下的加速模型，以此进行 DC-DC 电源在空间环境下的寿命评估。

1.1 耦合关系分析

DC-DC 电源内部对辐射敏感的器件有垂直双扩散金属氧化物场效应晶体管 VDMOS(vertical double-diffused MOSFET)、脉冲宽度调制 PWM(pulse width modulation)控制器和双极晶体管等，其中的双极器件在受到低剂量率辐射时会产生 ELDRS 效应。目前对航天航空类器件总剂量效应的考核广泛采用的是 50～300 rad(Si)/s 剂量率，而实际的空间典型剂量率范围为 1×10^{-4}～1×10^{-2} rad(Si)/s[14]。采用高剂量率试验得到的结果会明显高估器件的抗辐射水平，采用空间低剂量率试验耗时太长，因此必须要探索加速辐射的方法。目前比较成熟的方法为高温辐射法，使高温高剂量率可以达到空间低剂量率下对器件的辐射损伤效果。但不同温度和剂量率会存在不同的加速效果[15]，说明温度和剂量率之间存在一定的耦合作用，如果不考虑其中的耦合作用，可能会造成评估结果不准确，和实际寿命之间存在差异。

已知 DC-DC 电源工作时会受到辐射和温度的共同影响，可以对原始退化数据进行分析，将产品的退化量作为因变量分析辐射和温度对其的影响，并采用带交互作用的双因素方差分析来检验辐射-温度耦合效应是否显著，为建立最优辐射-温度耦

合效应下的加速模型做铺垫。

1.2 考虑广义耦合的加速模型

Nelson 通过对大量试验数据的分析研究，提出了融合物理和数学模型的广义对数线性模型，可将产品的寿命特征视为多个应力加速模型的对数线性相加[16]，具体为

$$\ln \xi = a_0 + a_1\varphi_1(s_1) + \cdots + a_n\varphi_n(s_n) \tag{1}$$

式中：$a_0, a_1, \cdots, a_n$ 为待估参数；$\varphi_1(s), \cdots, \varphi_n(s)$ 为加速应力函数；ξ 为寿命特征参数。

基于广义对数线性模型的框架，可得到 DC-DC 电源空间辐射-温度耦合效应下的加速模型为

$$\ln \xi = a_0 + a_1\varphi(T) + a_2 h(\dot{D}) + a_3 g(T, \dot{D}) \tag{2}$$

式中：$\varphi(T) = \exp(a_1 / T)$ 为 Arrhenius 模型；$h(\dot{D})$ 为 DC-DC 电源的辐射加速模型，$\dot{D}$ 为剂量率；$g(T, \dot{D})$ 为 DC-DC 电源总剂量-温度的耦合效应项，需要根据实际情况判断存在与否。

由于并没有明确的辐射-温度耦合加速模型，因此需要对数据进行分析，基于指数律和幂律的函数具有足够的灵活性，可以在参数变化的一定范围内拟合常用函数，能够很好地表征辐射加速模型。在探讨应力间的耦合现象时，需注意其关系并非仅限于简单的相乘模式。为了构建最优的辐射-温度耦合加速模型，需要对数据进行分析，从而确定最合适的耦合项，以确保模型能够准确反映实际情况。

1.3 基于响应面理论的加速模型

响应曲面函数描述了影响因子和响应值之间的数学关系，响应曲面函数的一般形式为

$$y = f(x_1, x_2, \cdots, x_i) + \varepsilon \tag{3}$$

式中：y 为因变量响应值；$x_1, x_2, \cdots, x_i$ 为自变量影响因素；ε 为误差项，$\varepsilon \sim (0, \sigma^2)$。

广义对数多项式加速模型提出，在加速试验中，产品所受的应力与寿命特征的对数存在某种数学关系，在响应面理论的基础上，可建立辐射-温度耦合加速模型为

$$\ln \xi = \beta_0 + \sum_{i=1}^{m}\beta_i S_i + \sum_{i=1}^{m}\beta_{ii} S_i^2 + \sum_{i=1, j=1, i<j}^{m}\beta_{ij} S_i S_j + \gamma \tag{4}$$

式中：m 为应力种类数量；S_i、S_j 为应力值；β_0、β_i、β_{ii}、β_{ij}、γ 为加速模型的待估计参数。

1.4 基于模型平均的综合加速模型

对于建立的加速模型，并没有严格的标准去进行筛选，如果只选择其中一种模型，则很可能忽视在模型选择过程中的不确定性。而模型平均方法是把来自不同模型的估计或者预测通过一定的权重进行平均，不轻易排除任何模型，避免有用信息丢失从而造成较大的误差。

本文采用基于均方误差 MSE(mean squared error) 的权重选择方法，基本原理是对均方误差较小的模型赋予较大的权重，对均方误差较大的模型赋予较小的权重。假设共有 M 个子模型，考虑赋予每个模型的权重为

$$w_i = \frac{1/\delta_{\mathrm{MSE}i}}{\sum_{i=1}^{M} 1/\delta_{\mathrm{MSE}i}} \tag{5}$$

式中，$\delta_{\mathrm{MSE}i}$ 为第 i 个模型的均方误差。

2 最优广义耦合加速模型选择及参数估计

2.1 加速退化模型建立

将本文所建立的加速模型和退化模型结合，建立 DC-DC 电源的辐射-温度耦合效应下的加速退化模型。Wiener 过程是描述产品性能退化过程的一种常用随机过程模型，与其他随机过程模型相比，Wiener 过程可以对非单调退化数据进行建模。

Wiener 模型在数学上可表示为

$$X(t) = X(0) + \mu t + \eta W(t) \tag{6}$$

式中：$X(0)$ 为样本的初始值；μ 为漂移参数；η 为扩散参数；$W(t)$ 为标准 Wiener 过程。

由于在加速寿命试验中产品的失效机理不发生改变，因此可知产品的 μ 值应力发生改变，而 η 值与应力无关。设 $f(\mu)$ 为建立漂移参数的加速模

型，可得似然函数为

$$L=\prod_{i=1}^{m_1}\prod_{j=1}^{m_2}\prod_{k=1}^{m_3}\frac{1}{\sqrt{2\pi\eta^2\Delta t_{ijk}}}\cdot \exp\left[-\frac{(\Delta X_{ijk}-f(\mu)\Delta t_{ijk})^2}{2\eta^2\Delta t_{ijk}}\right] \tag{7}$$

式中：m_1、m_2、m_3分别为某产品的组合应力个数、某个组合应力下的试验样品数、某个样品的测量次数；$\Delta X_{ijk}=X_{ijk}-X_{ij(k-1)}$为性能退化量的增量；$\Delta t_{ijk}=t_{ijk}-t_{ij(k-1)}$为时间增量。

将本文所建立的加速模型定义为A0，并定义文献[17-18]中提出的通用加速模型以及传统不考虑耦合作用的加速模型分别为A1和A2，将3个加速模型与同一个退化模型结合构建加速退化模型进行对比分析，以显示A0的有效性。A1和A2模型分别为

$$\ln\mu=a_0+a_1/T+a_2\dot{D}+a_3\dot{D}/T \tag{8}$$

$$\ln\mu=a_0+a_1/T+a_2\dot{D} \tag{9}$$

式中：$\ln\mu$为与寿命相关的特征量；a_0、a_1、a_2、a_3为模型待估计参数；T为温度。

2.2 最优加速模型选择及参数估计

设待估计参数为Ω，可以通过最大化加速退化模型的对数似然函数，自适应优化辐射加速模型形式和耦合项形式。由于模型参数较多，对数似然函数形式复杂，传统方法求解困难，因此引入粒子群算法选择出最优加速模型并进行参数估计。

首先定义粒子群中的变量，在寻找最优空间辐射-温度耦合加速模型的过程中，目标函数值为对数似然函数，优化目标是寻求最大的对数似然函数。然后更新辐射加速模型项和辐射-温度耦合项，并重复寻找最大似然函数，直到遍历所有的候选组合，输出最优辐射-温度耦合加速模型和相应的参数估计值。

3 DC-DC电源加速退化建模与寿命评估

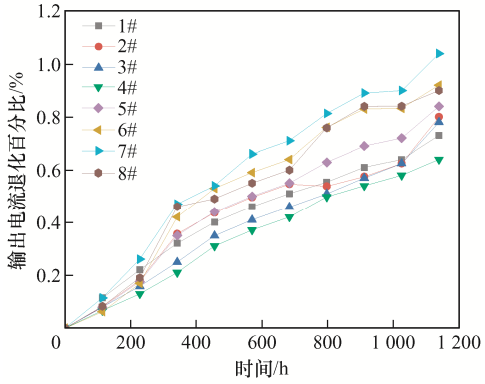
试验方案的设计见表1，其中辐射剂量率参考美国军用微电子器件试验标准 MIL-STD-883L[19]和中华人民共和国国家军用标准 GJB128B-2021[20]的规定，分别采用1 rad(Si)/s和100 rad(Si)/s 2个剂量率水平。本文设计了6组不同应力水平组合的加速退化试验，每组应力组合下有 8 个样本，发现DC-DC 电源的输出电流有明显退化，失效阈值定义为10%。

表 1 辐射剂量率和温度双应力水平组合

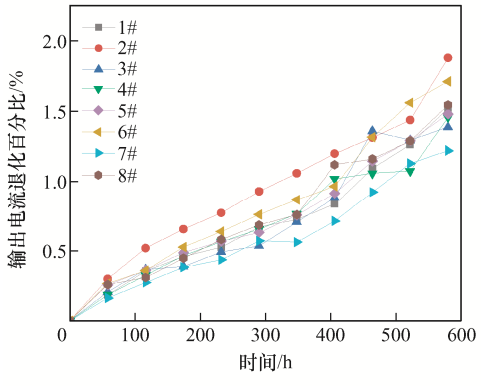
Tab. 1 Stress combinations of radiation and temperature

应力组合	温度/℃	剂量率/(rad(Si)/s)	样本量
S1	90	1	8
S2	101	100	8
S3	113	1	8
S4	113	100	8
S5	125	1	8
S6	125	100	8

不同应力组合下DC-DC电源的输出电流的部分退化轨迹如图1所示，这些退化数据用于模型建



(a) S1组合



(b) S2组合

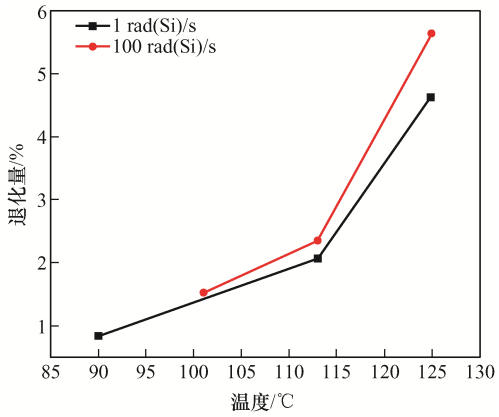
图 1 空间辐射-温度耦合作用下 DC-DC 电源输出电流的部分退化轨迹

Fig. 1 Partial degradation trajectory of output current from DC-DC power supply under space radiation-temperature coupling effect

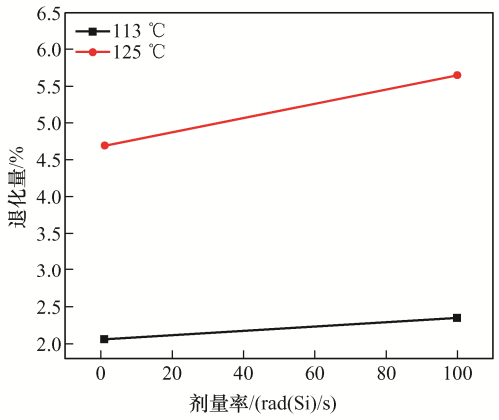
立和参数估计，其中 S6 的数据将用于验证模型和评估结果的准确性。

3.1 耦合关系分析

通过研究相同总剂量条件下，不同辐射剂量率和温度组合下的 DC-DC 电源输出电流退化百分比的变化规律，分析辐射剂量率和温度对 DC-DC 电源性能参数的影响作用，并使用带有交互作用的双因素方差分析来判断是否存在耦合作用。DC-DC 电源性能参数的分析结果如图 2 所示。



(a) 相同剂量率、不同温度的效应分析



(b) 相同温度、不同剂量率的效应分析

图 2　辐射和温度应力对 DC-DC 电源输出电流的影响效应分析

Fig. 2 Analysis of effects of radiation and temperature stress on output current from DC-DC power supply

在图 2 中，横轴表示不同程度的温度和剂量率，纵轴表示 DC-DC 电源输出电流退化速率的平均值。根据图 2 可以看出，DC-DC 电源输出电流均值在不同应力水平组合下，退化率曲线是非平行的，说明加速应力之间存在耦合作用。由图 2(a)还可看出温度对 DC-DC 电源输出电流均值的影响为一条上升的折线，可以认为温度对其的影响存在非线性效应。

带交互作用的双因素方差分析不仅能够分析辐射剂量率和温度对 DC-DC 电源的输出电流退化速率的影响，还可以分析其耦合作用对退化速率的影响，最终找到 DC-DC 电源输出电流退化速率的显著影响因素。

方差分析结果见表 2，可以看出辐射剂量率、温度以及它们的耦合作用对应的概率 p 都小于给定的显著性水平 0.050 0，所以可以认为这 2 种加速应力及它们的耦合作用都对 DC-DC 电源的输出电流有显著影响。

表 2　DC-DC 电源辐射剂量率和温度双因素方差分析结果

Tab. 2 Results of two-factor analysis of variance between radiation and temperature for DC-DC power supply

来源	平方和	自由度	均方值	F 统计量	p
$\dot{D}$	3.781 9	1	3.781 9	13.60	0.001 0
T	71.775 2	1	71.775 2	258.03	0
$T\cdot\dot{D}$	1.298 1	1	1.298 1	4.67	0.039 5

3.2 DC-DC 电源空间辐射-温度耦合效应下的寿命评估

对于 Wiener 随机过程，一般认为漂移系数会随着应力的变化而改变，扩散系数与应力无关。可利用 DC-DC 电源在各应力组合下的加速退化数据建立漂移系数的加速模型，分别建立考虑广义耦合的最优加速模型和基于响应面的加速模型，再利用基于均方误差的权重计算方法计算 2 种加速模型的权重，构建出最终的加速模型。

对于考虑广义耦合的加速模型，将退化模型与候选加速模型 A0、A1、A2 相结合，构建加速退化模型的对数似然函数，进行参数估计，结果见表 3。

赤池信息准则 AIC(Akaike information criterion)是衡量统计模型拟合优良性的一个标准，通常选取 AIC 最小的模型。表 3 中相应的参数估计和 AIC 证明了模型 A0 的优越性，表明了辐射-温度耦合效应的存在，也说明了基于有限指数律的项不完全适配所有的应力效应。

表 3 模型 A0、A1、A2 的参数估计结果

Tab. 3 Parameter estimation results of models A0, A1 and A2

模型	a_0	a_1	a_2	a_3	AIC
A0	162.180 0	−187 264	−19.883 3	19.991 3	−454.127 4
A1	22.815 3	−10 893	0.063 6	−22.471 9	−431.037 6
A2	23.990 0	−11 429	0.006 0	--	−444.370 4

对于本文构建的模型 A0，通过粒子群算法优化辐射加速模型项和空间辐射−温度的耦合项，得到最优广义耦合加速模型形式为

$$\ln\mu = 162.180\,4 - 1.87\times10^{4}/T - 19.883\,3\cdot\ln\dot{D} + 19.991\,3\cdot\ln(\dot{D}/T) \tag{10}$$

由 DC-DC 电源辐射和温度的耦合关系分析可知，辐射应力和温度应力对 DC-DC 电源的寿命特征参数的影响存在非线性效应和耦合效应，基于响应面理论，根据各应力下的参数估计结果，建立加速模型，可得漂移参数的加速模型数学表达式为

$$\ln\mu = 22.1 - 10\,720/T + 35\,830/T^2 + 0.077\dot{D} - 27.57\dot{D}/T \tag{11}$$

2 个加速模型的均方误差分别为 $5.040\,6\times10^{-8}$ 和 $7.724\,0\times10^{-8}$，由此计算得到 2 个加速模型的权重分别为 0.61 和 0.39。利用得到的权重将最优广义耦合加速模型(式(10))和基于响应面的加速模型(式(11))融合，得到最终的加速模型。

最后，根据建立的加速模型外推出 DC-DC 电源在 S6 应力下和空间环境下的寿命指标，得到使用寿命与可靠度曲线，并与通用加速模型 A1 以及不考虑耦合的加速模型 A2 外推出的结果进行对比，结果如图 3 和图 4 所示。从图 3 中可以看出，由 S6 应力下的伪寿命使用经验累积分布函数计算出的可靠度离散点与本文加速模型得到的可靠度曲线更为贴近，由此可以证明本文建立的加速模型的准确性。从图 4 中可以看出，不考虑应力间耦合效应的估计结果比较好，而考虑了耦合效应的加速模型的评估结果寿命更短，更符合实际预期。所以为了得到更为准确的寿命估计，必须考虑实际耦合作用。

根据要求，该产品在可靠度为 0.85 下的寿命需超过 5 年，根据评估结果可知，DC-DC 电源在

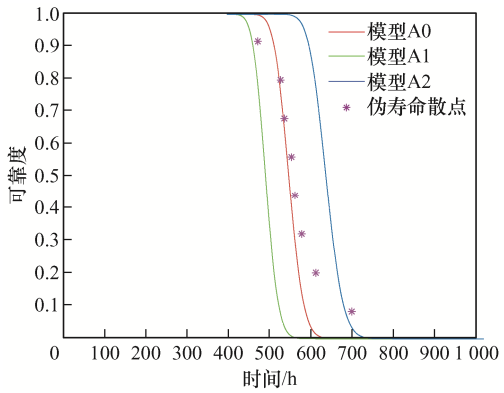


图 3 在 S6 工作条件下，基于不同加速模型的可靠度

Fig. 3 Reliability based on different acceleration models under operating condition of S6

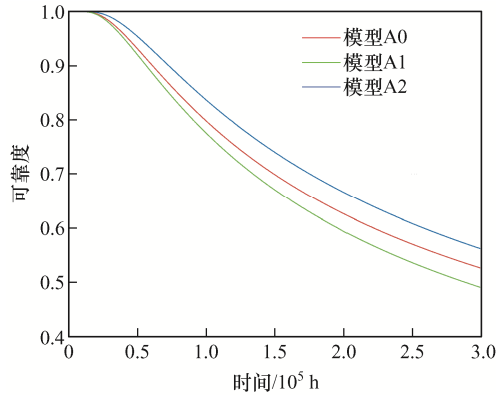


图 4 在工作条件 40 ℃、0.001 rad(Si)/s 下，基于不同加速模型的可靠度

Fig. 4 Reliability based on different acceleration models under operating condition of 40 ℃ and 0.001 rad(Si)/s

可靠度为 0.85 时的使用寿命约为 3 308 天，即 9.06 年；当采用加速模型 A1 时，可得到产品的保守估计寿命为 8.33 年，说明该产品满足设计要求。

4 结语

本文针对 DC-DC 电源在空间辐射−温度耦合效应下缺乏加速模型的问题，提出一种空间辐射−

温度耦合效应下的加速寿命评估方法，并将其应用于某型号产品的寿命评估。首先，通过分析不同应力组合下的 DC-DC 电源在相同总剂量时参数的变化趋势，确定了辐射和温度对 DC-DC 电源性能的影响存在耦合作用，为下一步构建加速模型提供理论基础。其次，利用粒子群优化的方法确定辐射加速模型和辐射-温度耦合项的具体函数形式，并进行参数估计，然后结合均方误差的权重选择方法构建最终的加速模型。最后通过实例对所提出方法进行验证，并与其他加速模型的结果进行对比，结果表明该方法更贴近于实际工作环境，可以实现 DC-DC 电源在空间辐射-温度耦合效应下的寿命评估。

参考文献：

[1] 相传峰, 李小龙, 陆妩, 等. 不同温度辐照下栅控双极晶体管的总剂量效应参数退化研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(12): 2183-2190.
Xiang Chuanfeng, Li Xiaolong, Lu Wu, et al. Investigation of ionization-induced parameter degradation in GLPNP bipolar transistors at different temperatures [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(12): 2183-2190. (in Chinese)

[2] 李小龙, 陆妩, 王信, 等. 典型模拟电路低剂量率辐照损伤增强效应的研究与评估[J]. 物理学报, 2018, 67(9): 218-226.
Li Xiaolong, Lu Wu, Wang Xin, et al. Estimation of low-dose-rate degradation on bipolar linear circuits using different accelerated evaluation methods [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(9): 218-226. (in Chinese)

[3] Shi Linfeng, Sun Chengyue, Liu Yong, et al. Effect of cell structures on electrical degradation of GaAs laser power convertors after 1 MeV electron irradiation and structure-optimization for improving radiation resistance [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2024, 278: 113206.

[4] 丛忠超, 周军, 李占行, 等. Buck隔离型DC/DC变换器在高剂量率条件下的总剂量辐射损伤机理研究[J]. 微电子学, 2023, 53(6): 988-993.
Cong Zhongchao, Zhou Jun, Li Zhanhang, et al. Study on the total dose radiation damage mechanism of Buck isolated DC/DC converters under high dose rate conditions [J]. Microelectronics, 2023, 53(6): 988-993. (in Chinese)

[5] 王春晖, 李芳蓉, 李晓钢. DC/DC 变换器加速寿命试验技术研究[J]. 环境技术, 2019, 37(6): 136-140.
Wang Chunhui, Li Fangrong, Li Xiaogang. Research on accelerated life test technology of DC/DC converter [J]. Environmental Technology, 2019, 37(6): 136-140. (in Chinese)

[6] Xia Qian, Yue Jiguang, Chen Jichang, et al. A digital twin based reliability assessment of Superbuck converters [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(9): 095008.

[7] Rigamonti M, Baraldi P, Zio E, et al. Particle filter-based prognostics for an electrolytic capacitor working in variable operating conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1567-1575.

[8] 任宏宇, 余瑶怡, 杜雄, 等. 基于优化长短期记忆神经网络的 IGBT 寿命预测模型[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1074-1086.
Ren Hongyu, Yu Yaoyi, Du Xiong, et al. IGBT lifetime prediction model based on optimized long short-term memory neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 1074-1086. (in Chinese)

[9] 尹杰, 刘博, 孙国兵, 等. 基于迁移学习和降噪自编码器-长短时间记忆的锂离子电池剩余寿命预测[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 289-302.
Yin Jie, Liu Bo, Sun Guobing, et al. Transfer learning denoising autoencoder-long short term memory for remaining useful life prediction of Li-ion batteries [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 289-302. (in Chinese)

[10] 毛明波, 孟昭亮, 高勇, 等. 基于 PSO-BP 神经网络的 SiC MOSFET 模块寿命预测方法研究与实现[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 229-235, 258.
Mao Mingbo, Meng Zhaoliang, Gao Yong, et al. Research and implementation of life prediction method for SiC MOSFET module based on PSO-BP neural network [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 229-235, 258. (in

Chinese)

[11] 刘晓明, 任宇朋, 陈海, 等. 基于改进支持向量回归的超级电容器寿命预测[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 320-328.
Liu Xiaoming, Ren Yupeng, Chen Hai, et al. Life prediction of supercapacitor based on improved support vector regression [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 320-328. (in Chinese)

[12] Fleetwood D M, Kosier S L, Nowlin R N, et al. Physical mechanisms contributing to enhanced bipolar gain degradation at low dose rates [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, 41(6): 1871-1883.

[13] 陆妩, 李小龙, 于新, 等. 双极器件 ELDRS 效应研究进展[J]. 原子核物理评论, 2019, 36(4): 477-483.
Lu Wu, Li Xiaolong, Yu Xin, et al. Progress in ELDRS effect of bipolar devices [J]. Nuclear Physics Review, 2019, 36(4): 477-483. (in Chinese)

[14] 刘敏波, 陈伟, 姚志斌, 等. 双极集成电路低剂量率辐射损伤增强效应的高温辐照加速实验[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(3): 034003.
Liu Minbo, Chen Wei, Yao Zhibin, et al. Accelerated test of enhanced low dose rate sensitivity using elevated temperature irradiation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(3): 034003. (in Chinese)

[15] 姚志斌, 陈伟, 何宝平, 等. 低剂量率辐照损伤增强效应的高温辐照加速试验机理研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(6): 1144-1152.
Yao Zhibin, Chen Wei, He Baoping, et al. Research on mechanism of elevated temperature irradiation accelerated test for enhanced low dose rate sensitivity [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(6): 1144-1152. (in Chinese)

[16] 王华, 张静远, 王鹏, 等. 基于广义对数线性模型的可靠性评估方法[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(3): 101-104.
Wang Hua, Zhang Jingyuan, Wang Peng, et al. Reliability evaluation method based on general log-linear model [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2018, 39(3): 101-104. (in Chinese)

[17] Liu Yao, Wang Yashun, Fan Zhengwei, et al. A new universal multi-stress acceleration model and multi-parameter estimation method based on particle swarm optimization [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2020, 234(6): 764-778.

[18] Liu Yao, Wang Yashun, Fan Zhengwei, et al. Reliability modeling and a statistical inference method of accelerated degradation testing with multiple stresses and dependent competing failure processes [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 213: 107648.

[19] U.S. Department of Defense. Test method standard for microelectronics: MIL-STD-883L [S]. Washington, D.C.: U.S. Department of Defense, 2019.

[20] 中央军委装备发展部. 半导体分立器件试验方法: GJB128B-2021[S]. 北京: 中央军委装备发展部, 2021.
Equipment Development Department of the Central Military Commission. Test methods for discrete semiconductor devices: GJB128B-2021 [S]. Beijing: Equipment Development Department of the Central Military Commission, 2021. (in Chinese)



宗怡明

作者简介：

宗怡明(2000—)，女，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：可靠性评估。E-mail：2878103310@qq.com。

方艳红(1978—)，女，通信作者，博士，副教授。研究方向：智能仪器设备。E-mail：3504611896@qq.com。

锁斌(1979—)，男，博士，教授。研究方向：可靠性设计分析，不确定信息处理。E-mail：suo.y.y@163.com。

(责任编辑：孙美菊)