2026 年 第 26 卷 第 29 期
2026, 26(29): 12846-08

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671-1815
CN 11-4688/T

DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2507763
引用格式:崔铁军, 邢辉阳, 李莎莎. 物理限制下电气元件故障率与因素影响分析及控制[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(29): 12846-12853.
Cui Tiejun, Xing Huiyang, Li Shasha. Analysis and control of failure rate and factor influence of electrical components under physical limitations[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(29): 12846-12853.

环境科学、安全科学

物理限制下电气元件故障率与因素影响分析及控制

崔铁军[1,2,3], 邢辉阳[1], 李莎莎[1,2*]
(1.沈阳理工大学环境与化学工程学院, 沈阳 110159; 2.沈阳理工大学辽宁省安全工程产业学院, 沈阳 110159;
3.北京大学政府管理学院, 北京 100871)

摘 要 为研究电气元件在物理材料性能限制下的故障率情况,建立了因素影响分析和控制方法。首先讨论了电气元件故障的物理限制;其次建立了故障率分布解析式,讨论了因素对故障率的影响;最后构建了故障率控制方案。基于电气元件故障类型和影响因素,构建了 12 维因素空间及故障率分布解析式。通过解析式求导获得了电气元件故障率的特征。温度对故障率呈指数级影响,电流密度呈平方级影响,电场强度在介质击穿中也可能呈指数级影响,衬底电流与湿度等因素亦会产生相应影响。因素优化途径为动态参数,环境参数,制造工艺参数。据此建立了三级故障率控制方案,其成本依次升高,效果依次减小。实例分析获得了元件受因素影响的情况,确定了温度 340 K、激活能 0.6 eV 等关键故障率变化阈值。为考虑物理限制下的电气元件故障特征分析提供方法。

关键词 电气安全; 物理限制; 元件故障率; 因素影响; 优化控制
中图法分类号 X913; **文献标志码** A

Analysis and Control of Failure Rate and Factor Influence of Electrical Components under Physical Limitations

CUI Tie-jun[1,2,3], XING Hui-yang[1], LI Sha-sha[1,2*]
(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;
2. Liaoning Safety Engineering Industry School, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;
3. School of Government, Peking University, Beijing 100871, China)

[**Abstract**] To study the failure rate of electrical components under the limitation of physical material properties, a factor influence analysis and control method was established. The physical limitations of electrical component failures were first discussed. Then, an analytical expression for the failure rate distribution was established, and the influence of factors on the failure rate was discussed. Finally, a failure rate control scheme was constructed. Based on the failure types and influencing factors of electrical components, a 12-dimensional factor space and an analytical expression for the failure rate distribution were constructed. The characteristics of the failure rate of electrical components were obtained by deriving the analytical expression. Temperature has an exponential effect on the failure rate, current density has a square effect, and electric field strength may also have an exponential effect in dielectric breakdown. Factors such as substrate current and humidity also have corresponding effects. Accordingly, a three-level failure rate control scheme was established, with the cost increasing and the effect decreasing in turn. Case studies obtained the influence of factors on components, and determined key failure rate change thresholds such as temperature 340 K and activation energy 0.6 eV. It provides a method for analyzing the failure characteristics of electrical components considering physical limitations.

[**Keywords**] electrical safety; physical limitation; component failure rate; factor influence; optimization control

收稿日期: 2025-11-08 **修订日期**: 2026-04-07
基金项目: 辽宁省科技计划联合计划(2025-MSLH-584);辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金(LJ212410144051,LJ212410144032)
第一作者: 崔铁军(1983—),男,汉族,辽宁沈阳人,博士,教授,博士研究生导师。研究方向:系统可靠性及系统故障演化理论。E-mail:ctj.159@163.com。
* **通信作者**: 李莎莎(1988—),女,汉族,辽宁盘锦人,博士,副教授。研究方向:安全系统工程,系统可靠性。E-mail:lsslntu@163.com。

电气系统运行中电气元件故障频发,严重影响系统可靠性与安全性。当前电子技术向高频、高温、高功率密度发展,元件面临的电迁移、腐蚀等物理限制愈发突出。现有研究多聚焦单一故障机理,缺乏对多物理因素耦合下故障率演化规律的系统分析。元件故障易引发连锁反应,精准量化其物理限制下的故障率意义重大,但传统模型存在诸多不足,加之高端领域对高可靠元件需求激增,建立多物理因素耦合下的故障率分析与控制方法,成为保障现代电气系统安全运行的关键。

对于电子元件故障原因、过程和特征等的分析正在迅速增加,包括基于融合图形差分场、改进型高效能网络、能量熵配电网等的故障过程分析[1-2],烧蚀-热-力学多场耦合及失效机理[3],航空航天滑环磨损失效模式和预测[4],多物理场耦合和多目标优化策略[5]等。

这些研究在建立元件故障分析理论和技术上做出了有益尝试,但也存在不足。一方面,在故障机理分析层面,多数研究孤立探讨电迁移、腐蚀等单一失效模式,忽略多机理间复杂耦合关系,如高温与湿度协同加速腐蚀等。另一方面,在故障模型构建上,传统模型难以兼顾物理机制的完整性与计算效率,且模型参数敏感性分析缺乏统一量化标准,使其对不同场景的适应性受限。故障控制策略研究也有短板,部分抑制方法因成本高、控制复杂,难以应用。

为解决上述问题,现构建多物理因素耦合故障率(分布)模型,综合考虑电迁移、腐蚀、热载和介质击穿故障机理,构建 12 维因素空间,并量化因素影响。通过对各因素求导,分析其对故障率的敏感性,据此提出分级故障率控制方案,旨在精准控制故障率,提升电气元件可靠性。

1　电气元件故障的物理限制

电气元件的故障由物理材料特性与环境载荷的相互作用决定,其核心故障源于物理材料无法承受能量或物质作用的极限,明确这些物理限制是研究元件故障的关键。典型故障包括电迁移、腐蚀、热载流子效应和介质击穿,均与材料的物理化学极限相关,各类故障的演化具有独特物理机制。根据文献[6-8]给出的电气元件故障类型,包括电迁移故障、腐蚀故障、热载故障和介质击穿故障。并用平均失效前时间(mean time to failure,MTTF)量化电子元件失效过程。电迁移故障 $\mathrm{MTTF}_{\mathrm{EM}}$、腐蚀故障 $\mathrm{MTTF}_{\mathrm{COR}}$、热载故障 $\mathrm{MTTF}_{\mathrm{HCI}}$ 和介质击穿故障 $\mathrm{MTTF}_{\mathrm{TDDB}}$ 如式(1)所示。

$$\begin{cases}\mathrm{MTTF}_{\mathrm{EM}} = AJ^{-2}\exp\left(\dfrac{E_{\mathrm{a}}}{kT}\right)\\ \mathrm{MTTF}_{\mathrm{COR}} = A(R_{\mathrm{H}})^{-2}\exp\left(\dfrac{E_{\mathrm{a}}}{kT}\right)\\ \mathrm{MTTF}_{\mathrm{HCI}} = B(I_{\mathrm{sub}})^{-2}\exp\left(\dfrac{E_{\mathrm{a}}}{kT}\right)\\ \mathrm{MTTF}_{\mathrm{TDDB}} = \dfrac{t_0\exp\left(\dfrac{E_{\mathrm{a}}}{kT}-\gamma E_x\right)+\tau_0\exp\left(\dfrac{G}{E_x}\right)}{t_0\exp\left(\dfrac{E_{\mathrm{a}}}{kT}-\gamma E_x\right)\tau_0\exp\left(\dfrac{G}{E_x}\right)}\end{cases} \tag{1}$$

式(1)中:A 为材料工艺相关常数,反映金属导线微观结构和材料特性对电迁移的影响;J 为电流密度,即单位面积上通过的电流,$\mathrm{A/cm^2}$;E_{a} 为激活能,电迁移过程中原子移动所需克服的能量障碍,eV;k 为玻尔兹曼常数;T 为绝对温度,K;R_{H} 为相对湿度,%;B 为半导体器件结构和材料相关常数,反映器件对热载流子效应的敏感程度,cm/s;I_{sub} 为衬底电流,半导体器件工作时流经衬底的电流,A;t_0 为介质材料和制造工艺相关时间常数,s;τ_0 为介质材料和制造工艺相关的初始时间常数,s;γ 为电场加速因子,反映电场对介质击穿过程的加速作用,cm/mV;E_x 为施加在绝缘介质上的电场强度,V/cm;G 为介质缺陷和电场分布相关的常数,MV/cm。

由于 MTTF 与故障率 λ 互为倒数,可得到电迁移故障 λ_{EM}、腐蚀故障 λ_{COR}、热载故障 λ_{HCI} 和介质击穿故障 λ_{TDDB} 的解析表达式。

2　故障率分布解析式构建

故障率的物理意义是单位时间内元件发生失效的概率,描述元件在某一瞬时状态下的失效风险,反映元件可靠性的动态变化率。其数学定义为 $\lambda(t) = \lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{P(t < T \leqslant t+\Delta t \mid T > t)}{\Delta t}$,其中 T 为元件寿命,$P(T > t)$ 为元件工作到时间 t 仍未失效的概率[可靠度 $R(t)$]。即元件有效到 t 时刻,在 t 到 $t+\Delta t$ 时间内失效的瞬时概率。根据第 1 节分析,在物理限制条件下,电气元件的故障率可表示为 $\lambda_{\mathrm{p}} = \lambda_{\mathrm{EM}} + \lambda_{\mathrm{COR}} + \lambda_{\mathrm{HCI}} + \lambda_{\mathrm{TDDB}}$,又由于 MTTF 与故障率 λ 互为倒数,因此 $\lambda_{\mathrm{p}} = \dfrac{1}{\mathrm{MTTF}_{\mathrm{EM}}} + \dfrac{1}{\mathrm{MTTF}_{\mathrm{COR}}} + \dfrac{1}{\mathrm{MTTF}_{\mathrm{HCI}}} + \dfrac{1}{\mathrm{MTTF}_{\mathrm{TDDB}}}$。显然 λ_{p} 受到 4 种不同物理限制下的故障类型影响,而各故障类型的故障率又由各自的因素(参数)影响。考虑到这些因素都是在一定范围内变化的,因此 λ_{p} 需要进一步澄清这些变化的影响。

为解决上述问题,建立故障率分布模型。其物理意义是故障率是由所有相关因素值及其变化决定的,在这些变化过程中对应了不同的故障率,这就形成了故障率分布。引入因素空间[9-10]模型构建故障率分布。定义所有因素构成的集合为 X,故障率值为 $\lambda_p(X)$,当所有因素取某一范围时,$\lambda_p(X)$ 就成为因素空间中的连续分布曲面。而因素空间是以所有因素 X 及故障率 $\lambda_p(X)$ 为坐标轴,因素变化范围及[0,1]为边界形成的希尔伯特空间。这就呈现了在因素空间中,随因素值变化的故障率分布 $\lambda_p(X)$。反之,如果所有因素有且只有一个值,那么故障概率分布 $\lambda_p(X)$ 将退化为故障率值 λ_p。

从该定义可知,故障率分布 $\lambda_p(X)$ 可表征电气元件在所有可能的运行情况下的故障率及其变化特征,蕴含了电气元件故障的全部信息。那么故障率分布的解析式如式(2)所示。

$$\lambda_p = \frac{1}{AJ^{-2}\exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)} + \frac{1}{A R_H^{-2}\exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)} + \frac{1}{B I_{sub}^{-2}\exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)} + \frac{t_0\exp\left(\frac{E_a}{kT}-\gamma E_x\right)\tau_0\exp\left(\frac{G}{E_x}\right)}{t_0\exp\left(\frac{E_a}{kT}-\gamma E_x\right)+\tau_0\exp\left(\frac{G}{E_x}\right)} \tag{2}$$

观察式(3)的特点,其中 E_a/kT 与其他变量无关,其本身变化由内部的 3 个变量确定,因此设 $E_{kT}=E_a/(kT)$,作为一个整体变量进行考虑。4 类故障的核心触发机制、作用区域与敏感参数相互独立,电迁移由高电流密度驱动作用于金属导线,腐蚀依赖湿度作用于电极界面,热载与介质击穿由电场强度主导且分别作用于沟道和绝缘介质,无直接因果触发或耦合反馈,仅温度等存在弱交叉影响,且该影响已在各故障率解析式中单独量化。因此式(2)成立。这时式(2)可转化为式(3)。

$$\lambda_p = \frac{1}{AJ^{-2}\exp(E_{kT})} + \frac{1}{A R_H^{-2}\exp(E_{kT})} + \frac{1}{BI_{sub}^{-2}\exp(E_{kT})} + \frac{t_0\exp(E_{kT}-\gamma E_x)\tau_0\exp\left(\frac{G}{E_x}\right)}{t_0\exp(E_{kT}-\gamma E_x)+\tau_0\exp\left(\frac{G}{E_x}\right)} \tag{3}$$

最终电气元件的故障率分布解析式如式(3)所示。因素为 A、J、E_{kT}、R_H、B、I_{sub}、t_0、γ、E_x、τ_0、G,故障率值 λ_p,形成了 12 维因素空间。当然这些因素有一些是常数,这时因素将退化为背景常量,不影响 λ_p 的变化。可将 11 维因素按照属性圆[11]的方式投影到一个平面,该平面包含 11 个维度,称为属性平面。λ_p 维与属性平面垂直,这时 $\lambda_p(X)$ 就是在属性平面之上的故障率分布曲面,数学表达式就是故障率分布解析式。

3 因素对故障率的影响

研究因素对故障率的影响,是澄清电气元件发生故障和失效的根本途径,也是保障元件实现预定功能并保证可靠性的关键。而因素对故障率的影响主要体现在数值及其变化方面。在故障率分布曲面上,这些对应于曲面上的点及其各因素的切线方向。因此研究因素对故障率的影响必须确定因素变化造成故障率变化的情况及原因。为解决上述问题,可对各因素关于故障率分布 $\lambda_p(X)$ 求导,因此,对影响 $\lambda_p(X)$ 的 11 个因素(参数)进行求导,并给出各参数与故障率分布的求导结果。

3.1 分析变量对故障率分布的影响规律

电流密度 J 增大时,λ_p 线性增大;含 J^2 的平方项效应,电流密度翻倍可使故障率增至 4 倍,是电迁移故障的核心驱动因素。

绝对温度 T 导数特性 $\frac{\partial\lambda_p}{\partial T}\propto\frac{E_a}{kT^2}\exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$,呈指数增长趋势;表明温度微小升高可通过热激活效应显著提升电迁移、腐蚀、热载故障的故障率,是决定性环境因素。

在介质击穿故障中,电场强度 E_x 增大导致电子雪崩效应加剧,故障率呈指数上升。它与缺陷常数 G 共同作用,电场集中可加速局部击穿。

衬底电流 I_{sub} 增大反映载流子能量升高,热载故障加剧;增长是线性的,但衬底电流通常为微安级,实际影响次于 J 和 T。

相对湿度 R_H 升高加速腐蚀反应,但需超过临界值才显著;但仅影响腐蚀故障,在干燥环境中影响忽略。

工艺常数 A 和 B,增大 A 可降低电迁移/腐蚀故障,但受限于制造能力调整成本高;增大 B 可抑制热载故障,但效果随 I_{sub} 增大而减弱。

对于介质相关常数 t_0、τ_0、G 和 γ,t_0 和 τ_0 是影响介质击穿的时间常数,与缺陷密度相关,属于制造端固有参数调整空间有限;G 和 γ 反映缺陷与电场耦合强度,设计阶段可通过优化绝缘层均匀性降低 G,但效果弱于温度、电流等动态参数。

3.2 根据重要性对变量影响排序

对于绝对温度 T,热激活效应使故障率随温度

呈指数变化,是最强的普适性主导因素。对于电流密度 J,电迁移故障的 J^2 项有放大效应,且电流直接决定金属原子迁移速率,在高电流下影响仅次于温度。对于电场强度 E_x,介质击穿的临界失控特性在高压场景中,E_x 超过阈值可导致瞬间失效,风险极高。对于衬底电流 I_{sub},对热载故障是线性影响,虽不及平方或指数效应,但直接关联半导体器件内部损伤,在高频器件中需重点关注。对于相对湿度 R_H,腐蚀故障的湿度阈值特性在潮湿环境中影响显著,但属于特定环境下的重要因素,普适性低于前四项。对于工艺常数 A、B,其决定材料本征可靠性,但属于制造端优化范畴,设计阶段难以调整且导数量级受限于工况参数。对于介质相关常数 t_0、τ_0、G、γ,主要影响介质击穿的概率分布且依赖制造工艺,在模型中属于背景参数,动态影响较弱。

综上,根据上述因素影响特征,对于电气元件故障率的控制策略为温度控制优先,通过散热设计降低温度,可显著抑制所有热激活相关故障(电迁移、腐蚀、热载),成本效益比最高。电流与电场可协同优化,在电路设计中限制电流密度和电场强度,可分别降低电迁移和介质击穿风险。工艺与环境适配优化,潮湿环境中需强化防潮设计,而高可靠性需求时可通过材料升级提升参数,虽成本较高,但能从根本上降低故障率。因此,电气元件可靠性设计应先控制可变因素,再优化固有属性,优先考虑设计条件,其次是环境条件,最后是制造工艺条件。

4　故障率控制方案构建

根据上述导数结果、影响程度等建立故障率控制方案。目标是考虑控制措施成本及其难易程度,形成低成本高效控制方案。根据式(3)和式(4)的定性特征讨论各因素控制措施及其成本的估计情况。

4.1　各因素控制措施及其成本的估计

对于绝对温度 T,被动散热措施增加散热片、优化 PCB 铺铜或布局,无需额外硬件,在设计阶段实现;主动散热措施,加装风扇、液冷系统,但需硬件投入,适合中高功率场景。被动散热成本极低,主动散热成本中等。可预计温度每降低 10 ℃,热激活相关电迁移、热载流子故障率可降低 50% 以上。

对于电流密度 J,控制措施包括电路设计优化和工艺升级。前者增大导线截面积、降低电流密度,设计阶段调整线宽,无额外成本;后者采用厚金属布线工艺,需制造端配合,成本中等。设计优化无成本,工艺升级需产线调整。可预计电流密度降低 30%,电迁移故障率可降低约 50%。

对于电场强度 E_x,措施包括绝缘层优化和材料升级。前者增加介质厚度、优化电极形状,设计阶段调整,无额外成本;后者使用高介电强度材料。设计优化低成本,材料升级需验证成本。可预计电场强度降低 20%,介质击穿风险可降低约 40%。

对于衬底电流 I_{sub},措施包括驱动电路优化和器件结构改进。前者调整偏置电压、减少载流子注入,设计阶段仿真优化,成本低;后者采用深沟槽隔离等工艺,需制造工艺支持,成本中等。设计优化低成本,工艺改进中等成本。可预计衬底电流降低 25%,热载流子故障率可降低约 30%。

控制相对湿度 R_H 的措施包括防潮设计和环境控制。元件表面涂覆防潮涂层、使用密封封装,材料成本低,工艺简单;加装除湿装置,适用于特定潮湿环境,成本中等。涂层工艺低成本,环境控制设备成本中等。湿度控制在临界值以下,可预计腐蚀故障率可降低 80% 以上。

控制工艺常数(A、B)的措施为材料替换和半导体工艺优化。铜导线替代铝导线 A 增大,抗电迁移能力提升,材料成本高;离子注入优化 B 增大,抗热载流子能力提升,产线改造成本高。材料/工艺升级需高投入,周期长。可预计 A、B 提升 20%,对应故障率降低约 20%。

控制介质相关常数(t_0、τ_0、G、γ)的措施为缺陷管控和电场均匀性设计。提高光刻精度、增加缺陷检测,设备升级成本高,良率提升收益滞后;优化电极边缘形状,设计阶段低成本调整。缺陷管控需高端设备,设计优化低成本。可预计缺陷密度降低 50%,介质击穿故障率可降低约 30%。

4.2　故障率控制方案

据上述分析,降低电气元件故障率的方案可分为一级、二级、三级,成本升高但故障率逐渐降低。

一级方案为设计阶段低成本优化(成本 <5%,效果 >50%)。如被动散热并电流密度优化:PCB 铺铜面积增加 50%,导线线宽从 10 μm 增至 15 μm;温度降低 8 ~ 10 ℃,电流密度降低 30%,电迁移和热载流子故障率合计降低 60% 以上。电场强度优化:栅氧化层厚度从 10 nm 增至 15 nm,电极边缘倒圆;电场强度降低 25%,介质击穿风险降低约 50%。

二级方案为环境与工艺适配(成本 10% ~ 15%,效果 >70%)。防潮涂层并驱动电路优化:元

件表面涂覆派瑞林涂层(材料成本约 3%),调整驱动电压降低衬底电流 15%;湿度影响基本消除,热载流子故障率再降 20%。主动散热补充:加装微型风扇(成本约 5%),温度再降 5 ℃,热激活故障率额外降低约 30%。

三级方案为制造工艺升级(成本约 >20%,效果递减)。材料替换:关键路径导线改用铜工艺(成本增加 15% ~20%);电迁移故障率再降 25%,适合高可靠性需求场景。缺陷检测升级:引入原子力显微镜检测晶圆缺陷,设备成本高,适合大规模生产;初始缺陷密度降低 40%,介质击穿风险降低约 25%。

4.3 方案构建原则总结

优先通过设计阶段的无/低成本措施(温度、电流、电场优化)实现高收益,再根据可靠性需求逐步叠加环境适配和工艺升级。消费级产品采用一级方案。工业/车规级产品采用一级二级方案叠加。航天级等高可靠场景采用一级、二级、三级方案叠加。三级故障率控制策略中,成本-效果量化数据均基于失效物理(physics of failure,PoF)理论共识、工业界可靠性优化实践及相关文献实验结论推导。①策略效果数据源于电迁移、热载流子效应、TDDB 等失效机理的固有规律[6-7,13];②成本占比数据参考半导体制造与电力电子领域工程实践[6-7,12];③策略优先级契合优先通过设计降低故障率,再考虑工艺升级的原则[7],且与先控制可变因素,再优化固有属性的路径一致[12]。虽然上述量化数据为估算,但实现了对物理规律和工程实际的客观反映,完全可为电气元件的故障率控制提供工程指导,具备合理性与适用性。

5 实例分析

5.1 对故障率的影响

某电气元件其自身参数和环境参数总结如下:电流密度 $J=250\ \mathrm{A/cm^2}$;激活能 E_a 变化范围 0.1 ~ 1.0 eV;玻尔兹曼常数 $k=8.617\times10^{-5}\ \mathrm{eV/K}$;绝对温度 T 变化范围 273 ~400 K;相对湿度 $R_H=50\%$;热载流子效应常数 $B=10\ \mathrm{cm/s}$;衬底电流 $I_{sub}=4\times10^{-5}\ \mathrm{A}$;电场加速因子 $\gamma=7\ \mathrm{cm/mV}$;电场强度 E_x 变化范围 10^6 ~ $10^7\ \mathrm{V/cm}$;初始时间常数 $\tau_0=1.0\times10^{-11}\ \mathrm{s}$;模型常数 $G=350\ \mathrm{mV/cm}$;时间常数 $t_0=6.3\times10^4\ \mathrm{s}$。将参数代入式(3)可得到该元件在该条件下的故障率 $\lambda_p=1.244\ 218\times10^{-4}\ \mathrm{h^{-1}}$。进一步的,考虑绝对温度对该元件故障率的影响,可将绝对温度 T 的变化范围设为 273 ~400 K,每 10 K 作为一个采样点形成绝对温度值集合,其余参数不变。根据式(3)进行计算,得到温度变化对元件故障率的影响,如图 1 所示。

图 1 展示了温度与电气元件故障率之间的关系。从曲线趋势看,随着温度升高,故障率呈现上升趋势,符合一般电气元件的可靠性规律。温度上升导致故障更容易发生。而对于电场强度在 10^6 ~ 10^7 V/cm 变化时,对故障率 λ_p 几乎没有影响。对于激活能 E_a 在 0.1 ~1.0 eV 变化,其他参数不变,则故障率 λ_p 如图 2 所示。

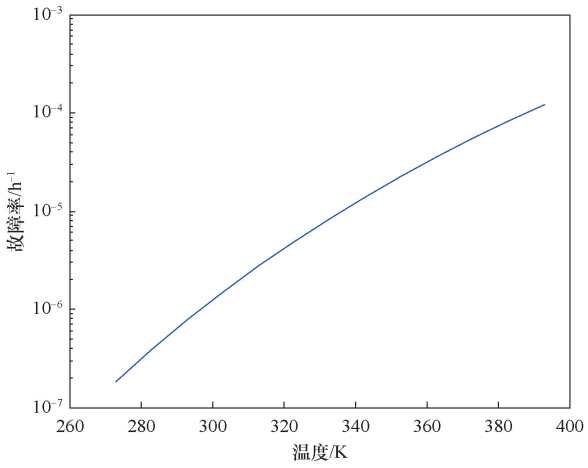

图 1 温度变化对元件故障率的影响

Fig. 1 Influence of temperature change on component failure rate

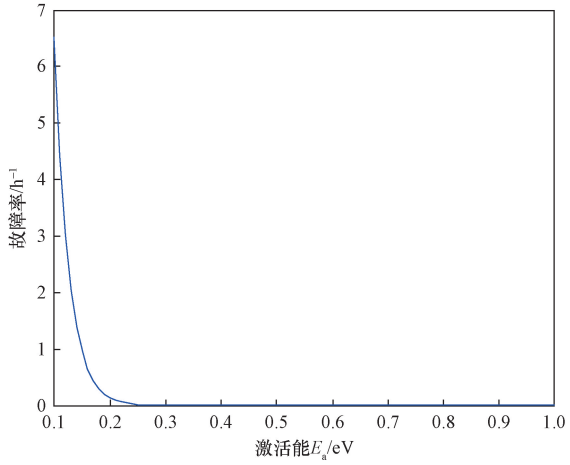

图 2 激活能变化中的故障率变化

Fig. 2 Failure rate variation with activation energy change

5.2 对故障率分布的影响

考虑到三维图像限制,取绝对温度 T 为 273 ~ 400 K,激活能 E_a 为 0.5 ~ 1.5 eV 作为变化因素,$\lambda_p(T,E_a)$ 为分布曲面,其结果如图 3 所示。

如图 3 所示,随温度升高,故障率显著上升,高温将加速元件内部失效;随激活能增大,故障率呈下

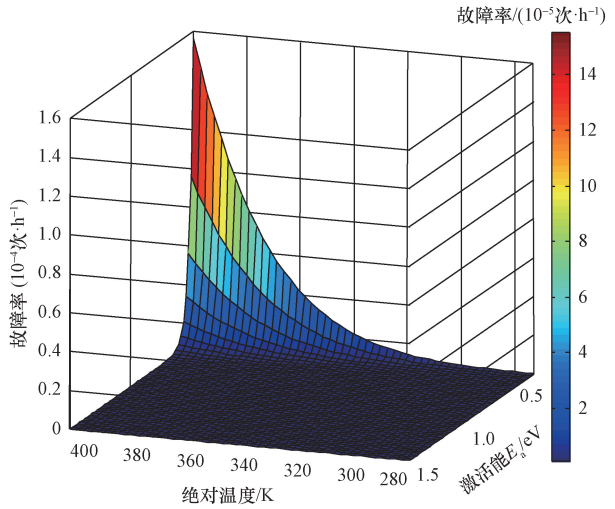

图 3　绝对温度及激活能变化下的故障率分布

Fig. 3　Failure rate distribution under changes of absolute temperature and activation energy

降趋势,高激活能能提高失效能量阈值。这表明温度越高、激活能越低,元件故障率越高。也显示了多物理因素耦合(物理限制)下的电气元件故障率特性。

5.3　影响故障率的变化特征

进一步,可利用导数分析各因素影响故障率的变化特征。如绝对温度 T、电场强度 E_x、激活能 E_a 对故障率 λ_p 的影响可分别以 $\frac{\partial \lambda_p}{\partial T}$、$\frac{\partial \lambda_p}{\partial E_x}$ 和 $\frac{\partial \lambda_p}{\partial E_a}$ 表示。但由于设 $E_{kT}=\frac{E_a}{kT}$,且 E_a、k 和 T 这些变量与其他变量无相关性,如使用式(3)则 $\frac{\partial \lambda_p}{\partial T}$ 和 $\frac{\partial \lambda_p}{\partial E_a}$ 可通过 $\frac{\partial \lambda_p}{\partial E_{kT}}$ 的形式计算;如使用式(2)可直接代入计算。上述结果如图 4 所示。

图 4(a)识别了高温失效风险区间。低温段(260 ~ 340 K)导数约为 0,故障率对温度不敏感;340 K 后导数急剧上升,温度稍增将使故障率大幅提高。确定了元件高温失效阈值约为 340 K。设计时需将温度控制在 340 K 以下避免进入高风险区。图 4(b)显示全范围导数约为 0,故障率对电场强度变化极不敏感。设计时无需过度关注电场强度。图 4(c)中,$E_a<0.6$ eV 时导数负且绝对值大,激活能稍降故障率会急剧上升;$E_a>0.6$ eV 后导数趋近 0,激活能影响消失。因此,可定义元件激活能安全阈值为 0.6 eV,制造运维中需确保材料激活能不低于此值,避免引发故障。通过量化故障率对因素的变化速率,将抽象物理规律转化为可操作的控制方法,从而保障元件安全运行。

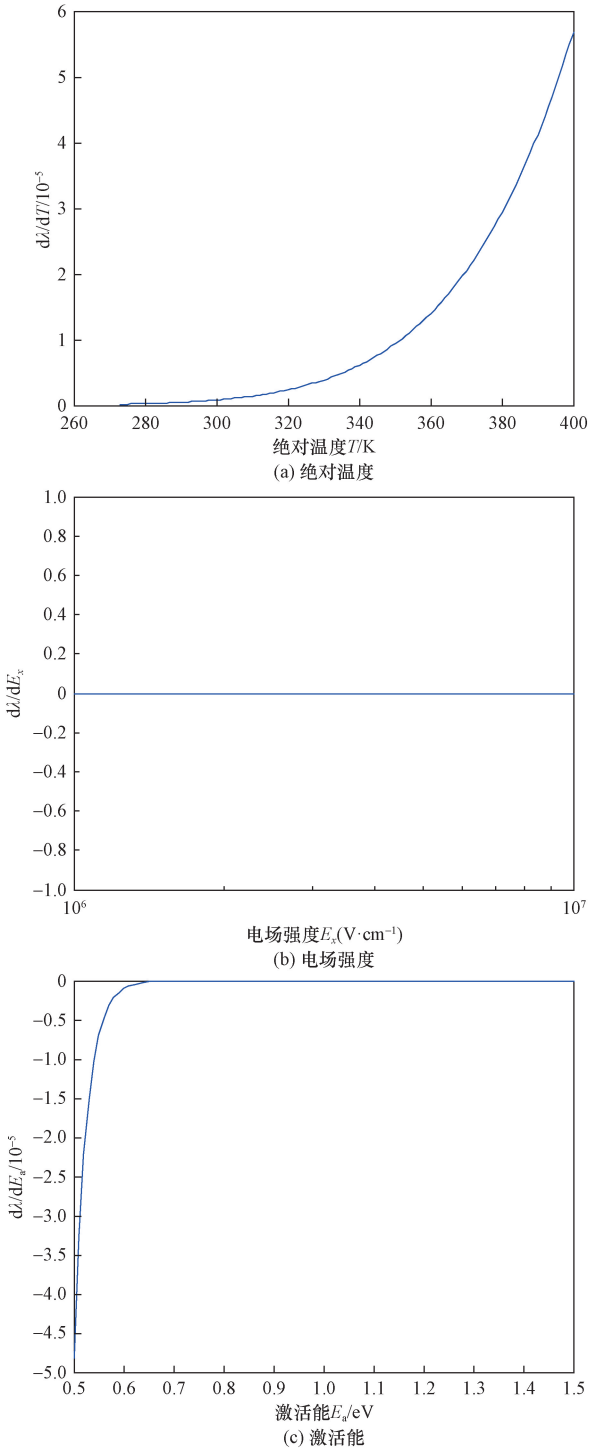

图 4　故障率的导数变化

Fig. 4　Derivative changes of failure rate

5.4　讨论

构建了多物理因素耦合(物理限制)的故障率分布模型;将电迁移、腐蚀等故障机理通过数学解析式量化,形成 12 维因素空间;揭示了温度、电流密度等参数对故障率的非线性影响,为电气元件故障分析提供跨尺度分析框架。提出了三级控制方案,按成本与效果分级,为设计阶段散热、材料选型提

供依据。确立了动态 > 环境 > 工艺的优化优先级。控制元件故障应优先控制温度、电流等动态因素,再优化制造工艺。方法优点在于,从物理失效机理出发,构建数学模型,实现现象解释与量化分析统一;通过三维曲面、导数曲线直观展示参数影响,降低工程应用条件。局限在于,假设故障机理独立叠加,未考虑参数相关性;电场强度等参数研究范围有限,适用性受限;未考虑参数波动的累积效应,与实际工况存在偏差。研究根据元件材料的物理限制,给出了典型的电气元件故障率分布解析式,并研究了因素对故障率的影响作用,基于这些开展了应用性研究,为电气类元件故障及其变化提供研究依据。

另外,故障率代表单位时间失效概率;故障率分布是因素空间中随影响因素变化的连续曲面,包含全部运行工况信息。随影响因素改变,故障率演化为故障率分布;当分布内各影响因素取定值时,故障率分布退化为故障率。式(2)中 E_a 、k 和 T 为独立变量,式(3)将其整合为 E_{kT} 整体变量。二者本质一致,均描述 12 维因素空间的故障率分布,式(3)是式(2)的变量整合形式。目的是简化导数解析式。

为进一步验证方法合理性与准确性,选取文献[6]实验数据进行对比分析。文献[6]对某元件在温度 T = 300 K 、电流密度 $J = 0.1 \times 10^6$ A/ cm^2 等条件下的故障率进行了计算,得到 $\lambda_p = 0.846 \times 10^{-6}$ h^{-1} ,与本文结果相对偏差较小,在工程可接受范围内。偏差源于文献[6]采用串联模型将电迁移、热载流子、TDDB 三者的故障率直接相加;而本文模型通过因素叠加更细致地考虑各机理间的非线性耦合。文献[13]对某器件进行了 TDDB 寿命测试,在 T = 398 K 、测试电压 5 kV 条件下,实测寿命与本文模型在相同电场强度下的计算结果趋势一致,故障率均为量级 10^{-5} h^{-1} 。文献[14]对 MOSFET 衬底电流与温度关系进行了建模与实验验证,表明衬底电流随温度升高呈指数增长,与图 1 温度对故障率的指数影响规律一致。以上对比表明,所建多物理因素耦合故障率分布模型,与文献数据具有良好一致性,验证了方法的合理性与工程适用性。

6 结论

(1)电气元件的故障源于电迁移、腐蚀等物理机制,其总故障率由电迁移、腐蚀、热载和介质击穿四类故障率叠加而成。构建了包含 12 维因素的空间模型及故障率分布解析式,并推导了各因素对故障率分布的偏导数。求导结果表明:温度对故障率呈指数级影响,电流密度呈平方级影响,电场强度在介质击穿中也可能呈指数级影响,衬底电流与湿度等因素亦会产生相应影响。各因素对故障率的影响程度不同,其中温度最为关键,电流密度次之,电场强度和衬底电流等影响依次递减。基于上述分析,本文提出了针对动态参数、环境参数及制造工艺参数的优化途径。

(2)基于导数分析和因素影响程度,构建了三级故障率控制方案。一级为设计阶段低成本优化,如被动散热、优化电流密度和电场强度,成本最低效果最大;二级为环境与工艺适配,如防潮涂层、主动散热等;三级为制造工艺升级,如材料替换、缺陷检测升级,成本最大效果最小。对于实例元件,温度升高故障率上升,激活能增大故障率下降;导数分析确定了温度 340 K、激活能 0.6 eV 等关键阈值。研究为电气元件在物理限制下的故障控制等提供了可操作方法。另外,量化数据虽为估算,但趋势变化是对物理规律和工程实际的客观反映,可为电气元件的故障率控制提供科学、可行的工程指导。

参 考 文 献

[1] 冯鹏帆, 郝如江, 尚腾龙, 等. 基于融合图形差分场和改进型高效能网络的齿轮箱故障诊断[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(3): 1038-1045.
Feng Pengfan, Hao Rujiang, Shang Tenglong, et al. Gearbox fault diagnosis based on MDF and improved EfficientNet[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(3): 1038-1045.

[2] 高淑萍, 赵峰, 张志华, 等. 基于注入信号与广义 S 变换能量熵的配电网故障选线方法[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(32): 13844-13855.
Gao Shuping, Zhao Feng, Zhang Zhihua, et al. Method of fault line selection for distribution network based on injected signal and generalized S-transform energy entropy[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(32): 13844-13855.

[3] Huang Y, Hao D, Hu Y, et al. A peridynamic multiphysics model for ablative-thermo-mechanical coupling and failure mechanism in charring composites[J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 292: 130227.

[4] Si C, Zheng D, Sun S, et al. Physical model of electrical contact friction for wear failure analysis and prediction of aerospace slip rings[J]. Engineering Failure Analysis, 2026, 186: 110526.

[5] Kang Z Y, Wu H B, Yang G D, et al. Compact design of 550 kV GIL based on multi-physics coupling and multi-objective optimization strategy[J]. Energy, 2026, 348: 140475.

[6] 张宇, 程中华, 连光耀, 等. 基于 PoF 模型和 FTA 的电子装备故障模式分析[J]. 现代防御技术, 2023, 51(4): 86-96.
Zhang Yu, Cheng Zhonghua, Lian Guangyao, et al. Failure mode analysis of electronic equipment based on PoF model and FTA[J]. Modern Defence Technology, 2023, 51(4): 86-96.

[7] Thaduri A, Verma A K, Gopika V, et al. Reliability prediction of

semiconductor devices using modified physics of failure approach [J]. International Journal of Systems Assurance Engineering and Management, 2013, 4(1): 33-47.

[8] Hu C M, Simon C T, Hsu F, et al. Hot-electron-induced MOSFET degradation-model, monitor, and improvement[J]. Electron Devices IEEE Transactions on, 1985, 32(2): 375-385.

[9] 曾繁慧, 胡光闪, 孙慧, 等. 因素空间理论下的因果概率推理分类算法研究[J]. 智能系统学报, 2024, 19(4): 1042-1051.
Zeng Fanhui, Hu Guangshan, Sun Hui, et al. A causal probabilistic inference classification algorithm based on factor space theory [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2024, 19(4): 1042-1051.

[10] 吕金辉, 郭嗣琮, 汪培庄. 基于因素空间理论的直觉模糊概念外延构建及其在决策中的应用[J]. 运筹与管理, 2023, 32(5): 175-180.
Lü Jinhui, Guo Sizong, Wang Peizhuang. Construction of the intuitionistic fuzzy concept extension based on factor space and its application in decision making[J]. Operations Research and Management Science, 2023, 32(5): 175-180.

[11] 崔铁军, 李莎莎, 王来贵. 基于属性圆的多属性决策云模型构建与可靠性分析应用[J]. 计算机科学, 2017, 44(5): 111-115.
Cui Tiejun, Li Shasha, Wang Laigui. Multi-attribute decision making model based on attribute circle and application of reliability analysis[J]. Computer Science, 2017, 44(5): 111-115.

[12] 刘峰松, 陆金, 陶有飞. 场效应管时间相关介质击穿的失效机制研究[J]. 集成电路应用, 2017, 34(11): 30-34.
Liu Fengsong, Lu Jin, Tao Youfei. The time dependent dielectric breakdown failure study of MOSFET[J]. Application of IC, 2017, 34(11): 30-34.

[13] 李梓腾, 王进军, 陈炫宇, 等. 基于 TDDB 的数字隔离器寿命测试系统[J]. 现代电子技术, 2025, 48(6): 39-44.
Li Ziteng, Wang Jinjun, Chen Xuanyu, et al. TDDB-based lifespan testing system for digital isolators[J]. Modern Electronics Technique, 2025, 48(6): 39-44.

[14] 王林, 王军, 王丹丹. 纳米级 MOSFET 衬底电流的偏置依赖性建模[J]. 电子技术应用, 2016, 42(10): 37-39.
Wang Lin, Wang Jun, Wang Dandan. Bias dependent modeling of substrate current of nanoscale MOSFET[J]. Microelectronic Technology, 2016, 42(10): 37-39.