第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0057-07

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ　2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:邱文昊, 黄考利, 连光耀, 等. 基于热失效与灵敏度的故障模式分析方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 57—63
Qiu Wenhao, Huang Kaoli, Lian Guangyao, et al. Failure mode analysis method based on thermal failure and sensitivity[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 57—63

武器技术

基于热失效与灵敏度的故障模式分析方法

邱文昊[1,2]　黄考利[1,2*]　连光耀[2]　李会杰[2]
(陆军工程大学石家庄校区[1],中国人民解放军 32181 部队[2],石家庄 050003)

摘　要　针对测试性验证试验中现有故障模式分析方法主观性、盲目性较强以及历史数据缺乏的问题,在传统方法的基础上,提出基于热失效与灵敏度分析的改进故障模式分析方法。首先,依据现有方法的不足,明确了改进故障模式分析方法的流程;其次,建立试验对象温度场分布模型,分析温度对性能退化的影响;然后,通过识别工作中的过热区域分析由热失效造成的故障模式;最后,依据灵敏度分析结果进一步补充对试验对象功能影响较大部分的故障模式。实例应用表明,与传统方法相比,该方法在热失效分析基础上,结合功能特性分析,能够获得更加完备的潜在故障模式,有效提高了测试性验证试验样本的可信度。

关键词　测试性验证试验　故障模式分析　性能退化　热失效　灵敏度
中图法分类号　TJ760;　　**文献标志码**　A

故障模式、影响及危害性分析(failure mode effect and critically analysis, FMECA)是指从硬件或功能等方面层次化分析电子装备的失效机理,尽可能全面地遍历装备可能出现的故障模式;并针对故障模式分析结果确定每种故障模式对装备工作状态的影响。同时依据故障模式发生概率及严重程度等因素确定其危害性。故障模式分析是属于 FMECA 的先导性工作[1,2],是开展可靠性、维修性和测试性等研究的基础[3—5]。在测试性领域,基于故障注入的测试性验证试验就是以装备可能出现的故障模式为备选样本进行实装故障注入,通过试验数据处理评估装备测试性水平[6],准确客观地获取装备的故障模式将直接影响到测试性验证试验的可信性。

目前,故障模式研究方法很多。文献[7]采用归纳分析方法总结了航天飞机主发动机高压燃料涡轮泵的典型故障模式,并分析了关键部件故障的解决方法,文献[8]分析了机电作动系统常见的故障模式;并用于故障诊断。文献[9]针对月球着陆器动力下降段 3 种典型故障模式,分析其对稳定性着陆的影响,上述方法大多依靠设计人员经验。文献[10]提出了灰色理论和模糊证据理论相结合的故障模式危害性分析方法,但都没有研究获取故障模式的过程。文献[11]通过收集历史故障数据,提出了一种基于数据挖掘的故障模式分析方法。文献[12]采用失效机理与试验相结合的方法分析潜在故障模式。文献[13]为研究特高压直流换流阀饱和电抗器的主要应力形式,采用热加速寿命试验预计饱和电抗器的平均使用寿命,发现薄弱环节。

国内外研究现状表明,现有研究主要集中在识别改进设计缺陷、故障诊断等方面。分析故障模式的方法主要是依靠经验分析、采用历史故障数据分析或采用试验方法分析。设计人员分析的方法盲目性较强,导致试验备选样本不可靠。基于试验的方法获取故障模式成本较高,主要应用于故障诊断,在测试性验证试验中可操作性不强。采用历史数据的方法具有较好的可操作性和准确性,但新装备不存在历史故障数据。

马里兰大学最先提出寿命消耗监测法,利用环境应力信息建立失效物理模型,并应用于故障预测,取得了良好效果。该研究表明,电子装备故障的发生与其工作环境紧密相关,主要是由电子产品性能退化引起的。失效过程的不断累积造成性能退化,直到不能满足功能要求而导致故障发生。基于此,本文考虑环境应力中温度因素对电子装备性能退化

2018 年 7 月 28 日收到　装备预研基金(9140A27020215JB40001)和国防预先研究科研项目(51327030104)资助
第一作者简介:邱文昊(1990—),博士研究生。E-mail:997750944@qq.com。
*通信作者简介:黄考利(1958—),博士,教授。E-mail:hkl320@sina.com。

的影响,结合灵敏度分析理论,在缺乏历史失效数据的情况下客观分析电子装备故障模式。最后,通过实例应用验证该方法的有效性。

1 改进故障模式分析方法

理论上,对装备的故障模式分析应采用穷举法,分析得到装备所有可能出现的故障,以此作为故障样本进行测试性验证试验。然而在实际应用中,一方面穷举装备所有的故障模式是不可能的;另一方面,对于新装备来说没有历史失效数据,很难得到客观准确的故障模式。

随着电子产品可靠性越来越高,故障模式已经不再是突发失效的硬故障,而是具有退化特征的软故障,绝大多数电子装备的失效机理都可以追溯到其潜在的性能退化过程上,也就是说性能退化最终导致了装备故障的出现。统计结果表明,造成电子装备性能退化的主要环境应力是温度,热失效已经成为电子装备性能退化的主要形式[14,15],对于部分高功率器件,温度每升高 10 ℃,其故障率甚至会增加一倍以上。此外,对于灵敏度较高的元件,实际值稍微偏离标称值都会导致电路输出特性发生很大变化,直接影响输出性能。因此,以热失效为基础,结合灵敏度分析理论,提出一种改进故障模式分析方法,如图 1 所示。首先有设计分析人员依据电子装备的功能结构对故障模式进行初步分析;然后建立温度场模型,对受试对象进行热失效分析,发现其薄弱部位,分析由热失效导致的故障模式;最后,计算受试对象部件的灵敏度,补充热失效分析中缺失的灵敏度较高部分的故障模式。

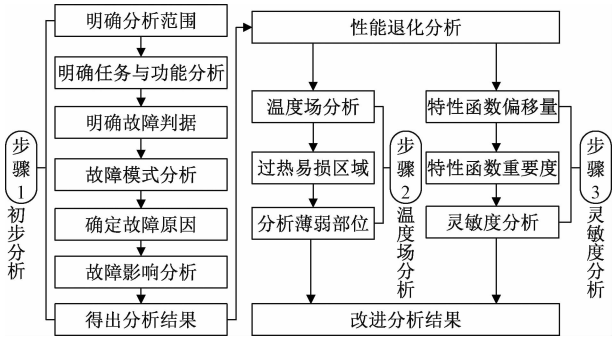

图 1 改进故障模式分析方法

Fig. 1 Improved failure mode analysis method

2 热失效分析

2.1 温度场分布模型

由于正常工作环境下热辐射对温度场影响较小,故该模型只考虑热传导和热对流两种传热方式[16]。由傅里叶定律和热平衡方程可得电子装备内部温度变化的三维导热方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{g}=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

式(1)中:$T(x,y,z,t)$ 为 t 时刻的节点温度;ρ 为材料平均密度,kg/m^3;C_p 为定压比热容,J/(kg·K);k_x、k_y、k_z 分别为 x、y、z 方向上的导热系数,W/(m·K);$\dot{g}$ 为单位体积产热量,W/kg。

由于正常工作环境下热辐射对温度场影响较小,故该模型只考虑热传导和热对流两种传热方式,简化后的电子装备传热学模型如图 2 所示。

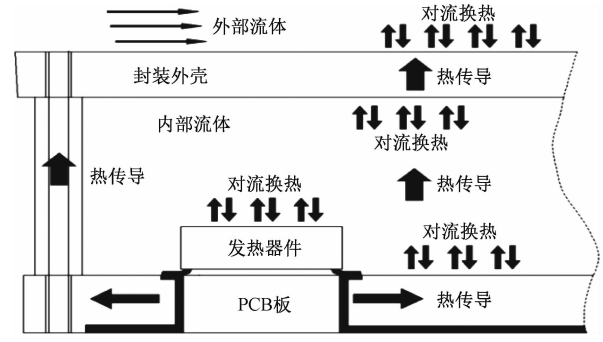

图 2 简化的传热学模型

Fig. 2 Simplified heat transfer model

假设电子装备正常工作时的温度是恒定的,即 $\frac{\partial T}{\partial t}=0$;为简化计算,忽略连接线和连接机构,印制电路板(printed circuit board,PCB 板)、机箱等可视为各向同性材料,即 $k_x=k_y=k_z=k$。为求解传热数学模型,需要定义热传导与热对流边界条件。

2.1.1 热流边界条件

边界面 Φ 处热流密度已知,为 $\dot{q}_0$,则边界条件表示为

$$-k\frac{\partial \Phi}{\partial n}=\dot{q}_0 \tag{2}$$

式(2)中:$\frac{\partial}{\partial n}$ 为边界面 Φ 沿外法向的导数,表示该处热流密度已知。

2.1.2 对流边界条件

对流传热边界条件表示为导入(出)表面的热流密度等于表面对流换入(出)热流密度,即:

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial x}n_x+\frac{\partial T}{\partial y}n_y+\frac{\partial T}{\partial z}n_z\right)=h(T-T_f) \tag{3}$$

式(3)中:n_x、n_y、n_z 为垂直于边界的法向量;T_f 为周围流体温度;h 为对流换热系数,W/(m^2·K)。

根据边界条件式(2)和式(3)就可以采用有限体积法解析出式(1)所包含的二阶偏微分方程的解,即稳定状态下电子装备的温度场分布 $T(x,y,z)$。

2.2　热失效分析

设温度应力下的退化量为 $x(t)$,t 时刻退化量的分布为 $F(x,t)$,概率密度函数为 $f(x,t)$。由于威布尔分布对退化数据有较好的适用性[17],假设 $f(x,t)\sim\text{Weibull}[\beta,\eta(t)]$,则:

$$f(x,t)=\begin{cases}\dfrac{\beta}{\eta(t)}\left[\dfrac{x}{\eta(t)}\right]^{\beta-1}\mathrm{e}^{-\left[\frac{x}{\eta(t)}\right]^{\beta}}, & x\geqslant 0\\ 0, & x<0\end{cases}\tag{4}$$

式(4)中:形状参数 β 为与应力和时间无关的常量,尺度函数 $\eta(t)$ 为与应力有关的退化量。而 Arrhenius 模型[18]可以表征电子设备性能指标退化速率与温度应力之间的关系,取:

$$\eta(t)=C\mathrm{e}^{\frac{E}{KT}}t\tag{5}$$

式(5)中:C 为常数;E 为激活能,eV,K 为玻尔兹曼常数。则可靠度为

$$R(t)=1-F(x,t)=\left[1-\int_{-\infty}^{t}f(x,t)\,\mathrm{d}t\right]\Big|_{x=l}=1-\exp\left[-\left(\frac{l}{C\mathrm{e}^{\frac{E}{KT}}t}\right)^{\beta}\right]\tag{6}$$

式(6)中:l 为失效阈值,则故障率为

$$\lambda(t)=-\frac{\mathrm{d}\ln R(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{\left\{1-\exp\left[-\left(\frac{l}{C\mathrm{e}^{\frac{E}{KT}}t}\right)^{\beta}\right]\right\}}\frac{\beta}{t}\times\exp\left[-\left(\frac{l}{C\mathrm{e}^{\frac{E}{KT}}t}\right)^{\beta}\right]\left(\frac{l}{C\mathrm{e}^{\frac{E}{KT}}t}\right)^{\beta}\tag{7}$$

式(7)中:E、K、β 均为常量,对退化规律没有影响,因此只剩下 C 和 l 两个变量。参考文献[19]的参数值,分别得出 273 ~ 373 K 下 C 和 l 变化时的故障率曲线,如图 3 所示。

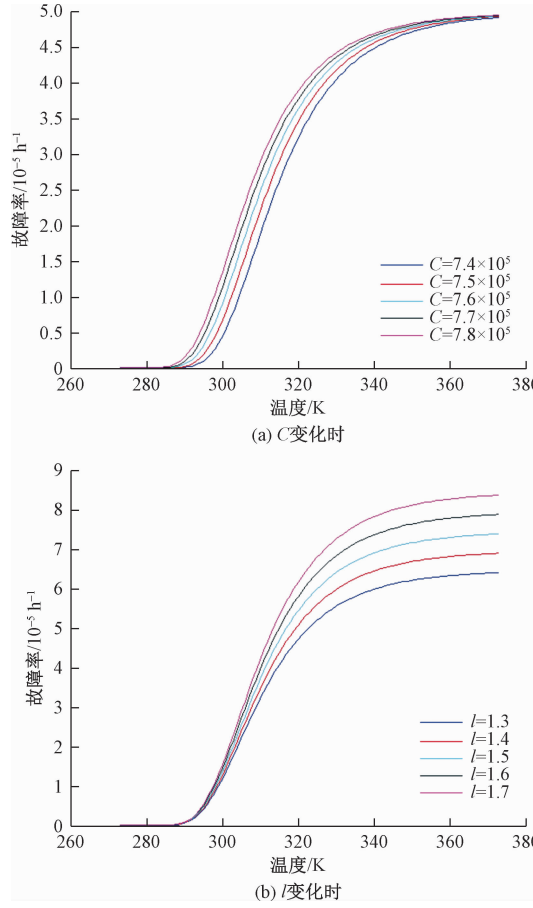

图 3　温度应力下故障率曲线

Fig. 3　Failure rate curve under temperature stress

由图 3 可以看出,式(7)中参量变化仅影响具体故障率数值,整体退化规律并没有变化,即不同产品性能退化规律在 Weibull-Arrhenius 模型下是相似的。在电子装备正常工作温度范围(295 ~ 310 K)内,温度每升高 5 K,其故障率甚至会增加一倍以上。也就是说,温度的升高会导致电子设备故障率增大,而且在正常工作温度范围内故障率增加较快,电子设备性能退化严重,容易导致故障的发生。

3　灵敏度分析

电路中元器件性能退化是指元件 v_i 参数指标偏离其标称值,而导致电路输出特性函数 H_j^{o} 的变化情况,由于电子装备元件数量庞大,故障模式分析时无法遍历所有元件,容易造成电路中部分敏感元件的故障模式缺失。因此,需要分析电路中元件灵敏度,补充热失效分析中缺失的灵敏度较高元件的故障模式。

设包含 n 个元件和 m 个输出特性函数的电路网络,其相对灵敏度定义为

$$S_{v_i}^{H_j^{\mathrm{o}}}=\frac{\partial\ln H_j^{\mathrm{o}}}{\partial\ln v_i}=\left.\frac{\frac{\Delta H_j^{\mathrm{o}}}{H_j^{\mathrm{o}}}}{\frac{\Delta v_i}{v_i}}\right|_{\Delta x_i\to 0}=\frac{v_i}{H_j^{\mathrm{o}}}\frac{\partial H_j^{\mathrm{o}}}{\partial v_i}\tag{8}$$

式(8)中:$S_{v_i}^{H_j^{\mathrm{o}}}$ 为元件 v_i 相对于输出特性函数的灵敏度;H_j^{o} 为电路正常状态下输出特性函数,ΔH_j^{o} 为函数值,即特性参数的偏移量,$j=1,2,\cdots,m$;v_i 为第 i 个元件标称值,Δv_i 为该标称值的偏移量,$i=1,2,\cdots,n$。

通常电路有多种参数,需要选择偏移量最大的特性参数作为灵敏度分析的目标,首先建立元件偏移量与特性参数偏移量之间的关系:

$$\frac{\Delta H_j^{\mathrm{o}}}{H_j^{\mathrm{o}}}=S_{v_i}^{H_j^{\mathrm{o}}}\frac{\Delta v_i}{v_i}=\frac{v_i}{H_j^{\mathrm{o}}}\frac{\partial H_j^{\mathrm{o}}}{\partial v_i}\frac{\Delta v_i}{v_i}\tag{9}$$

定义 $\left[\dfrac{\Delta v}{v}\right]_{n\times 1}=\left[\dfrac{\Delta v_1}{v_1},\dfrac{\Delta v_2}{v_2},\cdots,\dfrac{\Delta v_n}{v_n}\right]^{\mathrm{T}}$ 为元件的偏

移量向量，$\left[\frac{\Delta H^o}{H^o}\right]_{m\times 1}=\left[\frac{\Delta H_1^o}{H_1^o},\frac{\Delta H_2^o}{H_2^o},\cdots,\frac{\Delta H_m^o}{H_m^o}\right]^{\mathrm{T}}$ 为输出特性函数的偏移量向量，$[S_{v_i}^{H_j^o}]_{m\times n}$ 为元件 v_i 相对于输出特性函数 H_j^o 的灵敏度矩阵，则式(9)可表示为

$$\left[\frac{\Delta H_j^o}{H_j^o}\right]=[S_{v_i}^{H_j^o}]\left[\frac{\Delta v}{v}\right] \tag{10}$$

式(10)的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix}\frac{\Delta H_1^o}{H_1^o}\\ \frac{\Delta H_2^o}{H_2^o}\\ \vdots\\ \frac{\Delta H_m^o}{H_m^o}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}S_{v_1}^{H_1^o} & S_{v_2}^{H_1^o} & \cdots & S_{v_n}^{H_1^o}\\ S_{v_1}^{H_2^o} & S_{v_2}^{H_2^o} & \cdots & S_{v_n}^{H_2^o}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ S_{v_1}^{H_m^o} & S_{v_2}^{H_m^o} & \cdots & S_{v_n}^{H_m^o}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{\Delta v_1}{v_1}\\ \frac{\Delta v_2}{v_2}\\ \vdots\\ \frac{\Delta v_n}{v_n}\end{bmatrix} \tag{11}$$

由式(11)可得到电路中元件相对于第 j 个输出特性函数的偏移量，即：

$$\frac{\Delta H_j^o}{H_j^o}=S_{v_1}^{H_j^o}\frac{\Delta v_1}{v_1}+S_{v_2}^{H_j^o}\frac{\Delta v_2}{v_2}+\cdots+S_{v_n}^{H_j^o}\frac{\Delta v_n}{v_n} \tag{12}$$

定义特性参数重要度为 $Z_j=\max\left(\frac{\Delta H_j^o}{H_j^o}\right)$，选择重要度最大的输出特性函数作为目标函数，得到相对于该函数的各元件灵敏度，进而以此为根据分析故障模式。

4 实例应用

以某型装备 A8 模块(简称 A8)为例，对该方法进行实例验证。该组合包括移位寄存器、DA 转换、比例运算等 7 个模块。

首先对 A8 进行温度场分析，根据图 2 的模型做出如下假设：PCB 板所有材料均视为各向同性；传热仅考虑 PCB 板、器件之间以及和空气的对流导热。正常工作时，芯片和大功率器件是主要发热部件。

根据式(2)和式(3)设置边界条件，在初始环境温度为 20 ℃，自然对流条件下，求解式(1)得到器件达到热稳定状态时温度场分布 $T(x,y,z)$ 如图 4 所示。

由图 4 可以看出，A、B、C 三部分为过热区域，其温度范围约为 22 ~ 24 ℃，非过热区域温度约为 20 ~ 22 ℃，根据图 3 可知 A、B、C 三个区域的故障率明显高于其他区域，因此根据温度场分布得到的 A8 故障模式分析结果如表 1 所示(备注为热失效)。由于长期工作在故障率较高的温度范围，因此发生度等级定义为Ⅲ级。

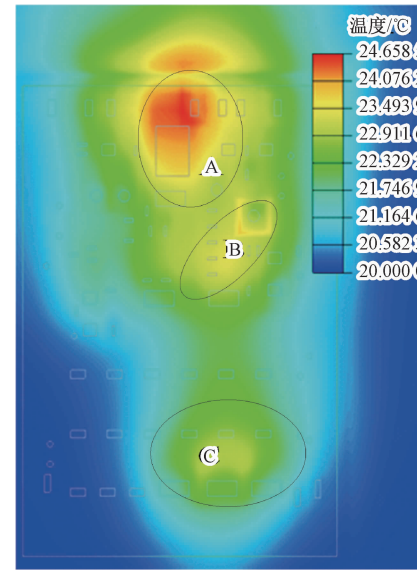

图 4 A8 温度场分布

Fig. 4 Temperature field distribution of A8

上述温度场分析仅考虑了环境应力对故障模式的影响，而不在过热区域，但损坏后会对电子装备性能造成决定性影响的元件同样是故障模式分析应当考虑的部位。由于移位寄存器模块、D/A 转换模块、比较器和稳压器主要由功能芯片组成，其故障模式已经遍历，下面对缓冲放大、比例运算和滤波器模块进行灵敏度分析，A8 由两路相同电路组成，图 5 为其中一路功能电路图。

直流增益 K、品质因素 a 和截止频率 W 为电路的特性函数，定义为

$$K=-\frac{R_9R_{12}R_{17}}{R_8R_{11}R_{18}} \tag{13}$$

$$a=\sqrt{\frac{C_{19}}{C_{18}}}\left(\sqrt{\frac{R_{17}}{R_{19}}}+\sqrt{\frac{R_{19}}{R_{17}}}+\sqrt{\frac{R_{17}R_{19}}{R_{18}^2}}\right) \tag{14}$$

$$W=\sqrt{\frac{1}{R_{17}R_{19}C_{18}C_{19}}} \tag{15}$$

代入式(8)计算得到灵敏度矩阵为

$$\boldsymbol{S}'=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0\\ 1 & 0.39 & 0.5\\ 1 & 0.70 & 0\\ 0 & 0.31 & 0.5\\ 0 & 0.5 & 0.5\\ 0 & 0.5 & 0.5\end{bmatrix} \tag{16}$$

然后由式(11)计算可得特性函数偏移量矩阵 $\frac{\Delta \boldsymbol{H}^o}{\boldsymbol{H}^o}=[0.3\quad 0.12\quad 0.1]^{\mathrm{T}}$，则特性参数重要度为

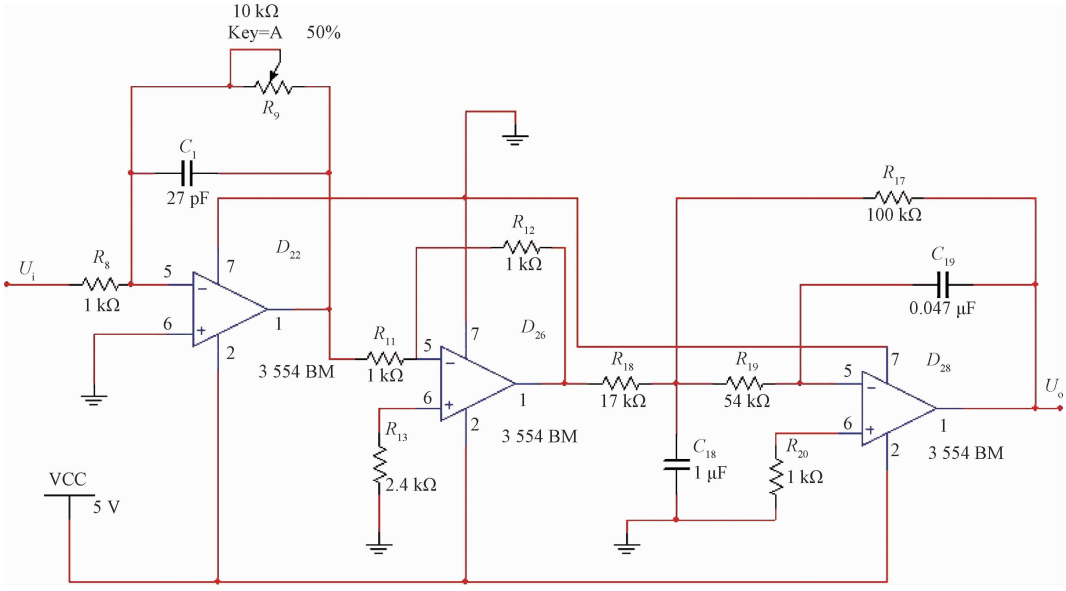

图 5　部分功能电路

Fig. 5　Part of functional circuit diagram

Z_j = 0.3,因此以直流增益为目标函数。R_8、R_9、R_{11}、R_{12}、R_{17}、R_{18}为 A8 的高灵敏度器件,由于 R_8 为 D_{13}内部电阻,R_{11}、R_{12}本身已经在 A8 工作的过热区域,因此补充了由于器件 R_9、R_{17}、R_{18}失效导致的故障模式,如表 1 所示(备注为灵敏度),由于这些器件不在工作的过热区域,其发生度等级定为Ⅳ级。

根据上述分析过程及表 1 的故障模式分析结果可知,由于外围电路器件较多,传统的主观分析方法只是简单分析了由功能芯片引起的故障模式;通过热失效分析可以有针对性地分析外围电路故障模式,补充了处于温度较高,及易损区域的故障模式,比如由电阻 R_1、R_3、R_7 故障引起的"D/A 转换模块参考电压异常"等;根据灵敏度分析结果补充了高灵敏度元器件性能退化可能引起的故障模式,比如 R_{17}、R_{18}失效引起的"滤波器模块输出信号有杂波"等,进一步完善了 A8 潜在的潜在故障模式。另外,由于传统方法仅依靠分析人员主观经验,得出的发生度等级均为Ⅳ级,没有区分度,而以温度场分布为依据可以有效区分故障模式发生度等级,比如"D/A 转换模块输出引脚异常"由Ⅳ级修正为Ⅲ级。

5　结论

针对现有故障模式分析方法主观性、盲目性较

表 1　A8 故障模式分析结果

Table 1　Failure mode analysis result of A8

功能名称	故障模式	故障原因	对 LRU 的影响	发生度等级	备注
移位寄存器模块	寄存器 A 引脚输出异常	D_1 ~ D_3、D_7 ~ D_9 器件失效	无法完成移位功能	Ⅳ	原始
	寄存器 B 引脚输出异常	D_4 ~ D_6、D_{10} ~ D_{12}器件失效	无法完成移位功能	Ⅳ	原始
D/A 转换模块	输出引脚异常	D_{13}、D_{15}器件失效	无法完成 D/A 转换	Ⅲ(Ⅳ)	原始
	参考电压异常	电阻 R_1、R_3、R_7 故障	D/A 转换错误	Ⅲ	热失效
缓冲放大器模块	引脚输出信号脉动大	C_1、C_2 器件失效	放大器输出增益错误	Ⅲ	热失效
	引脚无输出	D_{22}、D_{23}器件失效	缓冲放大器无输出	Ⅳ	原始
	引脚输出信号增益错误	电位器 R_9 失效	放大器输出增益错误	Ⅳ	灵敏度
比例运算模块	反向输入信号异常	R_{11}、R_{12}失效	输出电压错误	Ⅲ	热失效
	引脚输出错误	D_{26}器件失效		Ⅲ(Ⅳ)	原始
滤波器模块	调零电压异常	电位器 R_{20}故障	滤波器输出信号错误	Ⅳ	原始
	引脚无输出	D_{28}器件失效		Ⅲ	热失效
	输出信号有杂波	R_{17}、R_{18}失效		Ⅳ	灵敏度
比较器模块	基准电压错误	电阻 R_{24}、R_{25}、R_{29}故障	比较器输出错误	Ⅳ	原始
	输出信号脉动大	电容 C_{19}失效		Ⅲ	热失效
稳压器模块	工作电压异常	稳压器失效	A8 不工作	Ⅲ(Ⅳ)	原始

强的问题,从热失效和灵敏度分析的角度获取典型故障模式,得出如下结论。

(1)简化的传热学模型能够得到装备工作的相对温度,识别其过热区域,进而基于温度场分布的性能退化特性分析由热失效导致的故障模式。

(2)由于仅依靠热失效分析容易造成部分敏感元件的故障模式缺失,通过特性参数重要度能够计算装备元件的灵敏度,进而补充对电子装备功能影响较大部分的故障模式。

(3)实例应用表明,与现有分析方法相比,该方法从电子装备工作环境和功能特性两方面分析潜在故障模式,能够真实准确地反应装备故障水平,有效提高测试性验证试验故障样本的置信度。

参 考 文 献

1 Wang C, Qiu J, Liu G J, *et al*. Testability evaluation using prior information of multiple sources. Chinese Journal of Aeronautics, 2014; 27(4):867—874

2 Deng Y L, Li Q M, Lu Y. A research on subway physical vulnerability based on network theory and FMECA. Safety Science, 2015; 80(1): 127—134

3 邢国强, 沈亚东, 梁 斌. 基于多源验前信息的故障检测率 Bayes 融合评估方法. 科学技术与工程, 2012; 12(15): 3606—3609
Xing Guoqiang, Shen Yadong, Liang Bin. Bayesian fusion and estimation method for fault detection rate based on prior information of multiple sources. Science Technology and Engineering, 2012; 12(15): 3606—3609

4 Lu C Y, Liu S J. A fatigue life prediction method of rolling bearing under elliptical contact elastohydrodynamic lubrication. Journal of Southeast University (Engineering Science), 2017; 33(1): 46—52

5 Antonella C, Fabrizio H, Roberta I, *et al*. A dempster-shafer theory-based approach to the failure mode, effects and criticality analysis (FMECA) under epistemic uncertainty: Application to the propulsion system of a fishing vessel. Reliability Engineering and System Safety, 2017;159: 69—79

6 李睿峰, 李文海, 唐小峰, 等. 基于故障物理注入的模拟电路测试性分析方法. 科学技术与工程, 2017;17(1): 43—48
Li Ruifeng, Li Wenhai, Tang Xiaofeng, *et al*. Testability analysis method of analog circuit basedon physical injection. Science Technology and Engineering, 2017; 17(1): 43—48

7 刘士杰, 梁国柱. 航天飞机主发动机高压燃料涡轮泵的故障模式. 航空动力学报, 2015; 30(3): 611—626
Liu Shijie, Liang Guozhu. Failure modes of space shuttle main engine high-pressure fuel turbopump. Journal of Aerospace Power, 2015; 30(3): 611—626

8 李 璠, 毛海涛. 飞机机电作动系统故障模式分析与故障诊断方法. 航空维修与工程, 2016;(3): 47—50
Li Fan, Mao Haitao. The method of failure mode analysis and diagnosis for aircraft electromechanical actuation system. Aviation Maintenance & Engineering, 2016;(3): 47—50

9 吴建云, 王春洁, 宋顺广. 月球着陆器典型故障模式分析. 宇航学报, 2014;35(6): 633—638
Wu Jianyun, Wang Chunjie, Song Shunguang. Analysis of typical failure for lunar lander. Journal of Astronautics, 2014; 35(6): 633—638

10 Liu H C, Liu L, Bian Q H, *et al*. Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory. Expert System with Applications, 2011;38(4): 4403—4415

11 何月顺, 丁秋林. 基于数据挖掘思想的故障模式分析. 应用科学学报, 2005;23(5): 545—547
He Yueshun, Ding Qiulin. Analysis of fault pattern based on data mining. Journal of Applied Sciences, 2005;23(5): 545—547

12 Tang W, Jing B, Huang Y F, *et al*. Feature extraction for latent fault detection and failure modes classification of board-level package under vibration loadings. Science China (Technological Sciences), 2015;58(11): 1905—1914

13 陈 鹏, 孙宝奎, 纪 锋. ±1100 kV 特高压直流换流阀饱和电抗器样机的失效模式与加速寿命试验方法. 高电压技术, 2016; 42(8): 2612—2617
Chen Peng, Sun Baokui, Ji Feng. Fault mode analysis and accelerated life test method of the saturable reactor prototype for ±1 100 kV UHVDC converter valves. High Voltage Engineering, 2016; 42(8): 2612—2617

14 Sieinberg D S. Vibration analysis for electronic equipment. 3rd ed. New York: Wiley, 2000

15 Zeng Z, Li X B, Li M, *et al*. Analysis of power consumption on laser solder joints of electric connector. Chinese Journal of Electronics, 2014;23(4): 666—668

16 Kanda R, Jain K. Thermal management of low volume complex electronic system. Proceeding of the International Conference on Research and Innovations in Mechanical Engineering. New Delhi: Springer, 2014: 508—529

17 郭必柱, 邓 建. 可靠性分析威布尔三参数估计方法比较分析. 科学技术与工程, 2010;10(25): 6117—6122
Guo Bizhu, Deng Jian. Comparative study on parameters estimation methods for fatigue life distribution on reliability. Science Technology and Engineering, 2010; 10(25): 6117—6122

18 Laidler K J. The development of the Arrhenius equation. Journal of Chemical Education, 1984; 61(6): 494—498

19 王玉明. 基于性能退化数据的电子产品可靠性分析研究. 石家庄: 军械工程学院, 2009
Wang Yuming. Research on electronic products reliability analysis based on performance. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2009

Failure Mode Analysis Method Based on Thermal Failure and Sensitivity

QIU Wen-hao[1,2], HUANG Kao-li[1,2*], LIAN Guang-yao[2], LI Hui-jie[2]
(Shijiazhuang Campus, Army Engineering University[1], Unit 32181 of PLA[2], Shijiazhuang 050003, China)

[**Abstract**] Considering the traditional failure mode analysis problem of higher subjectivity, stronger blindness and lacking of electronic equipment historical failure data in traditional failure mode effect and critically analysis (FMECA), based on the traditional method, an improved method of failure mode analysis on the basis of based on thermal failure and sensitivity analysis was proposed. Firstly, the process of the improved method was clarified according to the existing method. Secondly, the electronic equipment temperature distribution model was established to analysis the effect of temperature on the working environment to performance degradation. Then the heated area was identified through temperature distribution, and the failure mode that caused by thermal failure was analyzed. Finally, the failure mode which has great influence on electronic equipment function was supplemented according to the results of component sensitivity. The results of application combination show that, this method combines with thermal failure analysis and functional analysis and can obtain more complete potential failure mode, while being more applicable for testability verification test.

[**Key words**] testability verification test　failure mode analysis　performance degradation　thermal failure　sensitivity