



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108108552 B

(45)授权公告日 2020.05.19

(21)申请号 201711361668.9

(22)申请日 2017.12.18

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 108108552 A

(43)申请公布日 2018.06.01

(73)专利权人 北京航空航天大学
地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72)发明人 陈颖 俞晓勇 李颖异 康锐

(74)专利代理机构 北京孚睿湾知识产权代理事
务所(普通合伙) 11474
代理人 曹珂琼

(51)Int.Cl.
G06F 30/20(2020.01)
G06F 119/02(2020.01)

(56)对比文件

CN 102509023 A,2012.06.20,
CN 106503368 A,2017.03.15,
US 2012/0247315 A1,2012.10.04,
陈颖等.基于故障物理的电子产品可靠性仿
真分析方法.《中国电子科学研究院学报》.2013,
第8卷(第5期),第444-448页.

审查员 舒瀚

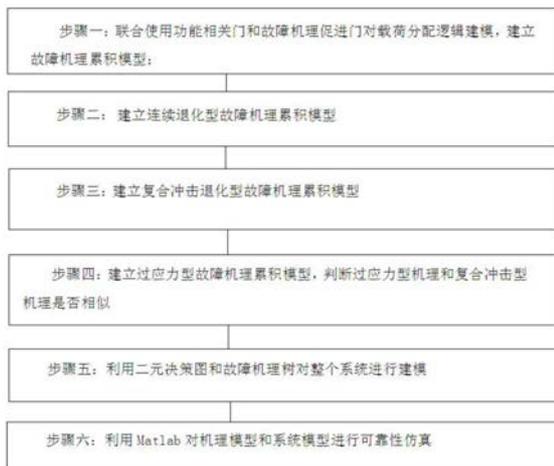
权利要求书3页 说明书12页 附图13页

(54)发明名称

基于故障机理损伤累积模型的载荷共担行为建模与仿真方法

(57)摘要

本发明提供一种基于故障机理损伤累积模型的载荷共担行为建模与仿真方法,其包括以下步骤:步骤一:联合使用功能相关门和故障机理促进门对载荷分配逻辑建模,建立通用的故障机理累积模型;步骤二:建立连续退化型故障机理累积模型;步骤三:建立复合冲击退化型故障机理累积模型;步骤四:建立过应力型故障机理累积模型;步骤五:利用二元决策图和故障机理树对系统进行建模;步骤六:利用Matlab对机理模型和系统模型进行可靠性仿真,并得到部件的损伤量曲线,子系统和系统的可靠度曲线。本发明从损伤量的角度出发建模,这种建模方法能更加准确和高效的计算系统的可靠度,为研究k/n系统的可靠性提供了一种新思路。



1. 一种基于故障机理损伤累积模型的载荷共担行为建模与仿真方法,其特征在于:其包括以下步骤:

步骤一:联合使用功能相关门和故障机理促进门对载荷分配逻辑建模,建立故障机理累积模型;

步骤二:根据步骤一获得的故障机理累积模型,建立连续退化型故障机理累积模型,所述连续退化型故障机理引起的载荷是阶段性变化,将每一个载荷恒定的阶段作为一个子区间,在每一个子区间上损伤量连续递增;

步骤三:建立复合冲击退化型故障机理累积模型,将系统中的部件分成作为待分析故障对象的部件M和所述系统中的剩余部件N,当经过*i*次载荷变化后即时刻 t_i ,部件M分担的载荷低于载荷阈值时,则所述部件M任意时刻的损伤量就是所述时刻 t_i 之前的损伤量的累积;如果在 t_i 时刻载荷重新分配后,剩余部件N分担的载荷超过载荷阈值,则所述部件M在第*i*次冲击到来时立即失效;

步骤四:建立过应力型故障机理累积模型,判断过应力型机理和复合冲击型机理是否相似;

步骤五:利用二元决策图和故障机理树对整个系统进行建模;

步骤六:利用Matlab对机理模型和系统模型进行可靠性仿真,对整个系统的结构和功能进行分析,通过所建立的前述各故障机理的物理模型获取模型中的参数,获得所述部件M中各机理初始的寿命分布和损伤量曲线,考虑前述各故障机理之间的相关性后,得到所述部件M初始的寿命分布,并获得整个系统和所述整个系统所包含的子系统的可靠度曲线;

步骤一中建立故障机理累积模型的具体步骤为:

①由故障机理 FM_j 作用下部件M的寿命 τ_j ,得到机理的单位损伤量 Δd_j ,所述单位损伤量的表达式如下:

$$\Delta d_j = \frac{1}{\tau_j};$$

②由步骤①得到在一个任意小的区间 $(t_{p-1}, t_p]$ 内,故障机理 FM_j 造成的损伤量 $d_{p,j}$;

$$d_{p,j} = \Delta d_{p,j} \cdot (t_p - t_{p-1});$$

③计算在时刻 t_i 的总损伤量 $d_j(t_i)$,将区间 $(0, t_i]$ 分为若干个子区间,然后将每一个子区间的损伤量根据以下表达式进行累加,

$$d_j(t_i) = \sum_{p=1}^l \Delta d_{p,j} \cdot (t_p - t_{p-1})$$

其中,*l*为子区间的个数;

步骤三在建立复合冲击退化型机理累积模型时,包括以下两种方法:

①在经过*i*次载荷变化后即时刻 t_i ,部件M分担的载荷低于载荷阈值,则所述部件M任意时刻的损伤量的表达式如下所示:

$$\begin{aligned}
 d_j(t) &= \alpha_1 b_1 \cdot \Delta d_{1,j} + \alpha_2 b_2 \cdot \Delta d_{2,j} + \cdots + \alpha_i b_i \cdot \Delta d_{i,j} \\
 &= \sum_{p=1}^i \alpha_p b_p \cdot \Delta d_{p,j} \\
 &= \sum_{p=1}^i \alpha_p b_p \cdot \frac{1}{\tau_{p,j}}
 \end{aligned}$$

其中, $[B]_{i \times 1}$ 为在每一个载荷大小下部件承受的载荷冲击次数, $[B]_{i \times 1} = [b_1 \cdots b_p \cdots b_i]$, $[A] = [\alpha_1 \cdots \alpha_p \cdots \alpha_i]$ 为冲击强度系数, 其定义为冲击载荷与单位冲击载荷的比值; 所述部件M的可靠度函数如下表达式所示:

$$\begin{aligned}
 R_j(t) &= P(\text{第}i\text{次冲击时的载荷} < \text{载荷阈值}) \cdot P(d_j(t) < 1) \\
 &= P(L_i < L_{th}) \cdot P\left(\sum_{p=1}^i \alpha_p b_p \cdot \frac{1}{\tau_{p,j}} < 1\right)
 \end{aligned}$$

L_i 表示第*i*次冲击时的载荷大小, L_{th} 是部件的载荷阈值;

②如果在 t_i 时刻载荷重新分配后, 剩余部件N分担的载荷超过载荷阈值, 所述部件M的可靠度函数如下表达式所示:

$$\begin{aligned}
 R_j(t) &= P(L_i > L_{th}) \cdot P(d_j(t_{i-1}) < 1) \\
 &= P\left(\sum_{p=1}^{i-1} \alpha_p b_p \cdot \frac{1}{\tau_{p,j}} < 1\right) \cdot P(L_i > L_{th})
 \end{aligned}$$

2. 根据权利要求1所述的基于故障机理损伤累积模型的载荷共担行为建模与仿真方法, 其特征在于: 步骤二具体包括以下步骤:

利用下述表达式计算t时刻的总损伤量,

$$d_j(t) = \sum_{p=1}^i \int_{t_{p-1}}^{t_p} \Delta d_{p,j} dt;$$

连续退化过程分为线性退化和非线性退化, 如果连续退化过程为非线性退化, 则在将各阶段的损伤量进行累加的时候, 引入损伤率 θ_j , 然后利用下列表达式得到总损伤量:

$$d_j(t) = \sum_{p=1}^i \left[\left(\frac{t_p}{\tau_{p,j}} \right)^{\theta_j} - \left(\frac{t_{p-1}}{\tau_{p,j}} \right)^{\theta_j} \right]$$

3. 根据权利要求1所述的基于故障机理损伤累积模型的载荷共担行为建模与仿真方法, 其特征在于: 步骤四在建立过应力型故障机理累积模型时, 如果过应力型机理和复合冲击型机理相似, 该部件的可靠度函数如下表达式所示:

$$R_j(t) = P(L_i < L_{th}).$$

4. 根据权利要求1所述的基于故障机理损伤累积模型的载荷共担行为建模与仿真方法, 其特征在于: 对整个系统的结构和功能进行分析的具体步骤包括:

- a1、确定系统正常工作的关键部件、充分条件和必要条件;
- a2、列出所有引起系统故障的部件故障的顺序组合; 以及
- a3、分析部件间的载荷共担关系。

5. 根据权利要求1所述的基于故障机理损伤累积模型的载荷共担行为建模与仿真方法,其特征在於:步骤六中,所述系统寿命曲线的获得包括以下步骤:

c1、从各部件寿命分布中提取同一位置的值,构成一组寿命组合;

c2、对寿命组合中的值按从小到大的顺序排列,得到新的组合;

c3、计算部件的单位损伤量 $\Delta d_j = \frac{1}{\tau_j}$;

c4、利用c3中的损伤量表达式计算每次载荷变化时的部件的总损伤量 $d_{i,q}$,并得到部件的损伤量曲线;

c5、假设寿命和总损伤量之间的关系式为: $T_{i,q} = \tau_q (1 - d_{i,q})$,由步骤c4中得到的 $d_{i,q}$,以及初始寿命 τ_q ,就可以得到受载荷共担影响后的寿命 $T_{i,q}$;

c6、当第 $n-k+1$ 个部件故障时, k/n 系统失效,所以第 $n-k+1$ 个部件的寿命 $T_{i,q}^{(n-k+1)}$ 就是系统寿命,即系统寿命 $T_{s,q} = T_{i,q}^{(n-k+1)}$;以及

c7、通过输出的系统寿命数值,拟合出系统寿命曲线。

6. 根据权利要求4所述的基于故障机理损伤累积模型的载荷共担行为建模与仿真方法,其特征在於:步骤a1中,所述关键部件为部件故障后使得系统直接故障的部件,对于 k/n 系统,充分条件为正常工作的部件个数大于或等于 k ,必要条件为子系统工作的部件个数大于或等于 k 。

基于故障机理损伤累积模型的载荷共担行为建模与仿真方法

技术领域

[0001] 本发明属于产品可靠性建模与仿真领域,具体涉及一种考虑载荷共担效应的k/n系统故障行为建模与仿真方法。

背景技术

[0002] 在可靠性工程领域,利用冗余来提高系统的可靠性是一种常见的做法,k/n系统就是其中的一种。在分析冗余系统可靠性时,常常假设系统部件是相互独立的。然而,在实际的系统中,失效的相关性会增加系统的联合故障概率,并降低整个系统的可靠度,所以越来越多的关注集中在改进故障预测模型上。载荷共担指的是在系统中所有部件共同分担载荷,当某一部件故障时,总载荷重新在剩余部件中分配。在现实中有很多的载荷共担系统,比如吊桥、并联的发电机系统、液压系统和分布式计算机系统。所以假设部件相互独立是无效的。

[0003] 虽然k/n系统的应用范围很广泛,但是计算此类系统的方法很有限。对其中的k/n(G)系统,即由n个部件组成,当至少k个部件正常工作则能正常运行的系统,以下简称“k/n系统”。(k的含义)从上个世纪80年代早期,一些学者就给出了k/n系统的实际例子并致力于寻求该系统可靠性的精确公式;1981年有人提出了部件独立同分布的k/n系统可靠性的精确公式,这是一个递推公式,但该公式不管形式还是推导都相当繁琐;当n个部件相互独立而可靠度不一定相同时(k的含义解释一下),有学者给出了k/n系统可靠性的递推公式,并在此基础上设计了递归算法计算系统的可靠度,同年其他人出了一般情况下的递推公式,此公式更快的计算出系统的可靠度。后来,一些学者开始了更符合实际的部件相依系统的可靠性和可靠性界的研究:一些学者给出了部件服从Markov条件时,k/n系统的递推公式以及精确公式。这些模型的缺点是计算可靠度的过程比较复杂,更重要的一点是没有考虑载荷共担的影响。

[0004] 前人也对具有载荷共担效应进行研究,提出了一些模型。比如,比例故障率模型(PHM),故障时间加速模型(AFTM),篡改故障率(TFR)模型是三种载荷和寿命关系模型。其中,PHM模型假设故障率是基准故障率和累积因子的乘积,AFTM模型强调载荷对寿命的影响。另外,在TFR模型中,部件的故障率完全取决于当前施加的载荷和部件的使用时长,与加载历史无关。而累积故障率(CE)模型的寿命是利用部件的有效使用时间来计算,其中有效使用时间是所有加载持续时间乘以相应的加速因子的总和。但上述PHM,AFTM,TFR和CE模型描述了载荷变化引起的故障率变化,但从未澄清变更的具体原因。因此,评估该模型的数据只能在不同的载荷加载阶段收集,这就使得这些模型在实践中难以使用。

[0005] 其他的一些研究分析了部件是故障型的载荷共担系统,即假定部件的故障是突然性的、灾难性的,一旦发生立即引起系统停止工作。然而另一种类型的故障是退化型的,这意味着部件的性能逐步退化,直到不能满足系统所需要的性能阈值。在部件退化的载荷共担系统中,任意一个部件退化后,每一个剩余部件的工作负载增加,导致更高故障率和性能退化率。但可以发现是,目前对载荷共担的研究还不太成熟,主要原因是载荷共担机制引入

的固有复杂性。

[0006] 如果从部件故障的根本原因入手,即从故障机理的角度出发,问题就有了突破性的进展。实际上,部件所分担的载荷影响的是故障机理的发展速率,分担的载荷越大故障机理的发展速率也就越大。在我们以前的工作中,研究故障机理及其关系时,是用故障机理树和二元决策图(BDD)来建立系统模型的,数据分析是用故障物理(PPoF)的方法。在这些研究成果的基础上,若能提出一种基于故障机理的,可以描述k/n系统载荷共担行为,以及载荷加载历史与可靠性之间关系的模型,这将会大大简化计算过程,同时提高计算的准确度。

[0007] 通过对现有技术进行检索和查新,国内外尚没有学者提出并利用一种基于故障机理的模型,对考虑载荷共担效应的k/n系统进行建模,以及结合蒙特卡罗法仿真的方法。

发明内容

[0008] 本发明的目的在于解决现有建模方法无法有效评估具有载荷共担效应的k/n系统复杂的载荷历史问题,提出的故障机理累积模型描述出k/n系统在部件依次故障后,剩余部件载荷变化以及故障机理发展速率的变化,以及故障机理在不同的阶段造成的损伤量的累积,这使得对k/n系统故障行为的描述更为清晰,并能更高效、更精确地计算k/n系统的可靠度。最后配套的提出一种基于蒙特卡罗法的仿真方法。

[0009] 本发明是这样实现的:

[0010] 本发明提供一种基于故障机理损伤累积模型的载荷共担行为建模与仿真方法,其包括以下步骤:

[0011] 步骤一:联合使用功能相关门和故障机理促进门对载荷分配逻辑建模,建立故障机理累积模型;

[0012] 步骤二:根据步骤一获得的故障机理累积模型,建立连续退化型故障机理累积模型,所述连续退化型故障机理引起的载荷是阶段性变化,将每一个载荷恒定的阶段作为一个子区间,在每一个子区间上损伤量连续递增;

[0013] 步骤三:建立复合冲击退化型故障机理累积模型,将系统中的部件分成作为待分析故障对象的部件M和所述系统中的剩余部件N,当经过i次载荷变化后即时刻 t_i ,部件M分担的载荷低于载荷阈值时,则所述部件M任意时刻的损伤量就是所述时刻 t_i 之前的损伤量的累积;如果在 t_i 时刻载荷重新分配后,剩余部件N分担的载荷超过载荷阈值,则所述部件M在第i次冲击到来时立即失效;

[0014] 步骤四:建立过应力型故障机理累积模型,判断过应力型机理和复合冲击型机理是否相似;

[0015] 步骤五:利用二元决策图和故障机理树对整个系统进行建模;

[0016] 步骤六:利用Matlab对机理模型和系统模型进行可靠性仿真,对整个系统的结构和功能进行分析,通过所建立的前述各故障机理的物理模型获取模型中的参数,获得所述部件M中各机理初始的寿命分布和损伤量曲线,考虑前述各故障机理之间的相关性后,得到所述部件M初始的寿命分布,并获得整个系统和所述整个系统所包含的子系统的可靠度曲线。

[0017] 优选地,步骤一中建立故障机理累积模型的具体步骤为:

[0018] ①由故障机理 FM_j 作用下部件M的寿命 τ_j ,得到机理的单位损伤量 Δd_j ,所述单位损

伤量的表达式如下：

$$[0019] \quad \Delta d_j = \frac{1}{\tau_j} ;$$

[0020] ②由步骤①得到在一个任意小的区间 $(t_{p-1}, t_p]$ 内，故障机理FM_j造成的损伤量 $d_{p,j}$ 。

$$[0021] \quad d_{p,j} = \Delta d_{p,j} \cdot (t_p - t_{p-1}) ;$$

[0022] ③计算在时刻 t_1 的总损伤量 $d_j(t_1)$ ，将区间 $(0, t_1]$ 分为若干个子区间，然后将每一个子区间的损伤量根据以下表达式进行累加，

$$[0023] \quad d_j(t_1) = \sum_{p=1}^l \Delta d_{p,j} \cdot (t_p - t_{p-1})$$

[0024] 其中， l 为子区间的个数。

[0025] 优选地，步骤二具体包括以下步骤：

[0026] 利用下述表达式计算 t 时刻的总损伤量，

$$[0027] \quad d_j(t) = \sum_{p=1}^l \int_{t_{p-1}}^{t_p} \Delta d_{p,j} dt ;$$

[0028] 连续退化过程分为线性退化和非线性退化，如果连续退化过程为非线性退化，则在将各阶段的损伤量进行累加的时候，引入损伤率 θ_j ，然后利用下列表达式得到总损伤量：

$$[0029] \quad d_j(t) = \sum_{p=1}^l \left[\left(\frac{t_p}{\tau_{p,j}} \right)^{\theta_j} - \left(\frac{t_{p-1}}{\tau_{p,j}} \right)^{\theta_j} \right] .$$

[0030] 优选地，步骤三在建立复合冲击退化型机理累积模型时，包括以下两种方法：

[0031] ①在经过 i 次载荷变化后即时刻 t_i ，部件M分担的载荷低于载荷阈值，则所述部件M任意时刻的损伤量的表达式如下所示：

$$[0032] \quad \begin{aligned} d_j(t) &= \alpha_1 b_1 \cdot \Delta d_{1,j} + \alpha_2 b_2 \cdot \Delta d_{2,j} + \cdots + \alpha_i b_i \cdot \Delta d_{i,j} \\ &= \sum_{p=1}^i \alpha_p b_p \cdot \Delta d_{p,j} \\ &= \sum_{p=1}^i \alpha_p b_p \cdot \frac{1}{\tau_{p,j}} ; \end{aligned}$$

[0033] 其中， $[B]_{i \times 1}$ 为在每一个载荷大小下部件承受的载荷冲击次数， $[B]_{i \times 1} = [b_1 \cdots b_p \cdots b_i]$ ， $[A] = [\alpha_1 \cdots \alpha_p \cdots \alpha_i]$ 为冲击强度系数，其定义为冲击载荷与单位冲击载荷的比值；

[0034] 所述部件M的可靠度函数如下表达式所示：

$$[0035] \quad \begin{aligned} R_j(t) &= P(\text{第}i\text{次冲击时的载荷} < \text{载荷阈值}) \cdot P(d_j(t) < 1) \\ &= P(L_i < L_{th}) \cdot P\left(\sum_{p=1}^i \alpha_p b_p \cdot \frac{1}{\tau_{p,j}} < 1\right) ; \end{aligned}$$

[0036] L_i 表示第 i 次冲击时的载荷大小， L_{th} 是部件的载荷阈值；

[0037] ②如果在 t_i 时刻载荷重新分配后，剩余部件N分担的载荷超过载荷阈值，所述部件

M的可靠度函数如下表达式所示：

$$R_j(t) = P(L_i > L_{th}) \cdot P(d_j(t_{i-1}) < 1)$$

$$= P\left(\sum_{p=1}^{i-1} a_p b_p \cdot \frac{1}{\tau_{p,j}} < 1\right) \cdot P(L_i > L_{th})$$

[0039] 优选地，步骤四在建立过应力型故障机理累积模型时，如果过应力型机理和复合冲击型机理相似，该部件的可靠度函数如下表达式所示：

$$R_j(t) = P(L_i < L_{th})$$

[0041] 优选地，对整个系统的结构和功能进行分析的具体步骤包括：

[0042] a1、确定系统正常工作的关键部件、充分条件和必要条件；

[0043] a2、列出所有引起系统故障的部件故障的顺序组合；以及

[0044] a3、分析部件间的载荷共担关系。

[0045] 优选地，步骤六中，所述系统寿命曲线的获得包括以下步骤：

[0046] c1、从各部件寿命分布中提取同一位置的值，构成一组寿命组合；

[0047] c2、对寿命组合中的值按从小到大的顺序排列，得到新的组合；

[0048] c3、计算部件的单位损伤量 $\Delta d_j = \frac{1}{\tau_j}$ ；

[0049] c4、利用c3中的损伤量表达式计算每次载荷变化时的部件的总损伤量 $d_{i,q}$ ，并得到部件的损伤量曲线；

[0050] c5、假设寿命和总损伤量之间的关系式为： $T_{i,q} = \tau_q (1 - d_{i,q})$ ，由步骤c4中得到的 $d_{i,q}$ ，以及初始寿命 τ_q ，就可以得到受载荷共担影响后的寿命 $T_{i,q}$ ；

[0051] c6、当第 $n-k+1$ 个部件故障时， k/n 系统失效，所以第 $n-k+1$ 个部件的寿命 $T_{i,q}^{(n-k+1)}$ 就是系统寿命，即系统寿命 $T_{s,q} = T_{i,q}^{(n-k+1)}$ ；以及

[0052] c7、通过输出的系统寿命数值，拟合出系统寿命曲线。

[0053] 优选地，步骤a1中，所述关键部件为部件故障后使得系统直接故障的部件，对于 k/n 系统，充分条件为正常工作的部件个数大于或等于 k ，必要条件为子系统工作的部件个数大于或等于 k 。

[0054] 与现有技术相比，本发明具有以下有益效果：

[0055] 1、本发明首次联合使用FDEP门和MACC门对载荷分配逻辑建模，FDEP门常用来模拟功能相关行为，其实也可以用来表达载荷共担效应，其中触发事件被定义为 k/n 系统中的某一个部件故障，而且这个部件和系统中的其他部件共同分担载荷，触发事件的发生使得剩余部件中故障机理的发展速率变快，这个过程用MACC门的故障机理树表示。综上，这种利用图形的建模法将载荷共担行为的逻辑剖析清楚，为进一步建立数值模型提供前提。

[0056] 2、本发明构建了考虑载荷共担效应的故障机理累积模型，并用这个模型研究了三种主要类型的失效过程，连续退化型、复合冲击退化型和过应力型的载荷共担效应。最后通过仿真的方法，得到部件的损伤量函数，系统和子系统的可靠度函数，进一步研究系统的可靠性。提出的故障机理累积模型考虑了载荷加载历史和载荷变化对机理发展速率的影响，从损伤量的角度出发建模，这种建模方法能更加准确和高效的计算系统的可靠度，为研究 k/n 系统的可靠性提供了一种新思路。另外，本发明提出的这一套仿真流程，解决了在进行

k/n系统可靠性分析时,故障部件顺序和时间不确定性带来的难题,而且这套方法同样也适用于其他的系统。

附图说明

- [0057] 图1是本发明的工作流程示意图;
- [0058] 图2a是本发明使用FDEP门的载荷共担效应逻辑图;
- [0059] 图2b是本发明MACC门的载荷共担效应逻辑图;
- [0060] 图3a是本发明中连续退化过程的载荷和损伤量曲线之一;
- [0061] 图3b是本发明中连续退化过程的载荷和损伤量曲线之二;
- [0062] 图3c是本发明中连续退化过程的载荷和损伤量曲线之三;
- [0063] 图3d是本发明中连续退化过程的载荷和损伤量曲线之四;
- [0064] 图4是本发明中连续退化过程的损伤累积曲线;
- [0065] 图5是本发明中第一类复合冲击退化过程;
- [0066] 图6是本发明中第二类复合冲击退化过程;
- [0067] 图7是本发明中的过应力型故障过程;
- [0068] 图8是本发明中的稳压系统;
- [0069] 图9是本发明中的RL的故障机理树和BDD;
- [0070] 图10a是本发明中的载荷共担影响保护电阻故障的FDEP门;
- [0071] 图10b是本发明中的载荷共担影响稳压器故障的FDEP门;
- [0072] 图11是本发明中的RL的故障机理树;
- [0073] 图12是本发明中的稳压系统的故障树和故障机理树;
- [0074] 图13是本发明中的系统的一种故障场景;
- [0075] 图14是本发明中的稳压系统的一种故障顺序;
- [0076] 图15是本发明中的部件的损伤累积曲线;
- [0077] 图16是本发明中的稳压器子系统的可靠度曲线;
- [0078] 图17是本发明中的保护电阻子系统的可靠度曲线;以及
- [0079] 图18是本发明中的稳压系统可靠度曲线。

具体实施方式

[0080] 以下将参考附图详细说明本发明的示例性实施例、特征和方面。附图中相同的附图标记表示功能相同或相似的元件。尽管在附图中示出了实施例的各种方面,但是除非特别指出,不必按比例绘制附图。

[0081] 本发明提供一种基于故障机理损伤累积模型的载荷共担行为建模与仿真方法,其包括以下步骤:

[0082] 步骤一:联合使用功能相关门和故障机理促进门对载荷分配逻辑建模,建立通用的故障机理累积模型;图2a和图2b为使用FDEP门和MACC门的载荷共担效应逻辑图。

[0083] 步骤二:建立连续退化型故障机理累积模型,图3a-图3b为连续退化过程的载荷和损伤量曲线。

[0084] 步骤三:建立复合冲击退化型故障机理累积模型。

[0085] 步骤三在建立复合冲击退化型机理累积模型时,随着剩余部件的减少,部件分担的载荷增大,载荷则有可能大于阈值,因此在建立复合冲击退化型机理累积模型时,包括以下两种方法:

[0086] ①在经过*i*次载荷变化后即时刻 t_i ,某部件分担的载荷未到达阈值,则该部件任意时刻的损伤量就是此时刻之前的损伤量的累积,如在每一个载荷大小下,部件承受的载荷冲击次数为 $[B]_{i \times 1}$,那么 $[B]_{i \times 1} = [b_1 \cdots b_p \cdots b_i]$,冲击强度系数定义为冲击载荷与单位冲击载荷的比值,表示为 $[A] = [a_1 \cdots a_p \cdots a_i]$;则该部件任意时刻的损伤量的表达式如下所示:

$$\begin{aligned}
 d_j(t) &= a_1 b_1 \cdot \Delta d_{1,j} + a_2 b_2 \cdot \Delta d_{2,j} + \cdots + a_i b_i \cdot \Delta d_{i,j} \\
 &= \sum_{p=1}^i a_p b_p \cdot \Delta d_{p,j} \\
 &= \sum_{p=1}^i a_p b_p \cdot \frac{1}{\tau_{p,j}}
 \end{aligned}$$

[0087]

[0088] 该部件的可靠度函数如下表达式所示:

$$\begin{aligned}
 R_j(t) &= P(\text{第}i\text{次冲击时的载荷} < \text{载荷阈值}) \cdot P(d_j(t) < 1) \\
 &= P(L_i < L_{th}) \cdot P\left(\sum_{p=1}^i a_p b_p \cdot \frac{1}{\tau_{p,j}} < 1\right)
 \end{aligned}$$

[0089]

[0090] ②如果在 t_i 时刻载荷重新分配后,剩余部件分担的载荷超过了载荷阈值,则该部件在第*i*次冲击到来时立即失效,该部件的可靠度函数如下表达式所示:

$$\begin{aligned}
 R_j(t) &= P(L_i > L_{th}) \cdot P(d_j(t_{i-1}) < 1) \\
 &= P\left(\sum_{p=1}^{i-1} a_p b_p \cdot \frac{1}{\tau_{p,j}} < 1\right) \cdot P(L_i > L_{th})
 \end{aligned}$$

[0091]

[0092] 图4为连续退化过程的损伤累积曲线,图5是本发明中第一类复合冲击退化过程;图6是本发明中第二类复合冲击退化过程;图7是本发明中的过应力型故障过程。

[0093] 步骤四:建立过应力型故障机理累积模型;

[0094] 步骤五:利用二元决策图和故障机理树对系统进行建模;

[0095] 步骤六:利用Matlab对机理模型和系统模型进行可靠性仿真,并得到部件的损伤量曲线,子系统和系统的可靠度曲线。

[0096] 优选地,步骤一中建立通用的故障机理累积模型的具体步骤为:

[0097] ①由机理 FM_j 作用下部件的寿命 τ_j ,可以得到机理的单位损伤量 Δd_j ,计算表达式如下:

$$\Delta d_j = \frac{1}{\tau_j}$$

[0098]

[0099] ②由步骤①可以得到在一个任意小的区间 $(t_{p-1}, t_p]$ 内,故障机理 FM_j 的造成损伤量 $d_{p,j}$ 。

$$d_{p,j} = \Delta d_{p,j} \cdot (t_p - t_{p-1});$$

[0100]

[0101] ③计算在时刻 t_1 的总损伤量 $d_j(t_1)$,将区间 $(0, t_1]$ 上分为若干个子区间,然后将每一个子区间的损伤量根据以下表达式进行累加,

$$[0102] \quad d_j(t_1) = \sum_{p=1}^l \Delta d_{p,j} \cdot (t_p - t_{p-1})$$

[0103] 其中, l 为子区间的个数。

[0104] 优选地,步骤二具体包括以下步骤:

[0105] 利用下述表达式计算 t 时刻的总损伤量,分析发现连续退化型机理引起的载荷是阶段性变化,则将每一个载荷恒定的阶段作为一个子区间,在每一个子区间上损伤量连续递增;

$$[0106] \quad d_j(t) = \sum_{p=1}^l \int_{t_{p-1}}^{t_p} \Delta d_{p,j} dt;$$

[0107] 连续退化过程分为线性退化和非线性退化,如果连续退化过程为非线性退化,则在将各阶段的损伤量进行累加的时候,引入损伤率 θ_j ,然后利用下列表达式得到总损伤量:

$$[0108] \quad d_j(t) = \sum_{p=1}^l \left[\left(\frac{t_p}{\tau_{p,j}} \right)^{\theta_j} - \left(\frac{t_{p-1}}{\tau_{p,j}} \right)^{\theta_j} \right]。$$

[0109] 优选地,步骤四在建立过应力型故障机理累积模型时,发现过应力型机理和复合冲击型机理相似,该部件的可靠度函数如下表达式所示:

$$[0110] \quad R_j(t) = P(L_i < L_{th})。$$

[0111] 优选地,步骤六中利用Matlab对机理模型和系统模型进行可靠性仿真,具体包括以下几个步骤:

[0112] a对整个 k/n 系统的结构和功能进行分析;

[0113] b通过PPoF的方法,得到部件中各机理初始的寿命分布,考虑故障机理之间的相关性后,得到部件初始的寿命分布;

[0114] c计算系统寿命。

[0115] 优选地,步骤a中,对系统分析的具体内容包括:

[0116] a1确定系统正常工作的关键部件,充分条件和必要条件。

[0117] a2列出所有引起系统故障的部件故障的顺序组合;

[0118] a3分析部件间的载荷共担关系。

[0119] 优选地,步骤c中,计算系统的寿命包括以下几步:

[0120] c1从各部件寿命分布中提取同一位置的值,构成一组寿命组合;

[0121] c2对寿命组合中的值按从小到大的顺序排列,得到新的组合;

[0122] c3计算部件的单位损伤量 $\Delta d_j = \frac{1}{\tau_j}$;

[0123] c4利用c3中的损伤量表达式计算每次载荷变化时的部件的总损伤量 $d_{i,q}$,并得到部件的损伤量曲线;

[0124] c5假设寿命和总损伤量之间的关系式: $T_{i,q} = \tau_q (1 - d_{i,q})$,由步骤c4中得到的 $d_{i,q}$,以及初始寿命 τ_q ,就可以得到受载荷共担影响后的寿命 $T_{i,q}$;

[0125] c6当第 $n-k+1$ 个部件故障时, k/n 系统也就失效了,所以第 $n-k+1$ 个部件的寿命 $T_{i,q}^{(n-k+1)}$ 就是系统的寿命,即 $T_{s,q}=T_{i,q}^{(n-k+1)}$;

[0126] c7通过输出的系统寿命数值,拟合出系统的寿命曲线。

[0127] 以下实施例是利用FMC模型,对一个包含1/2子系统和2/3子系统的稳压系统进行建模并进行MATLAB仿真分析,以此体现本发明的有益效果。

[0128] 本发明是一种基于FMC模型的 k/n 系统故障行为建模方法,具体实施步骤如下:

[0129] 步骤一:分析确定系统各部件的主要故障机理、机理类型及相关关系。

[0130] 本例稳压管稳压电路中,经过整流电路和电容滤波器滤波得到的直流电压,再经过三个保护电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 ,以及两个并联的稳压器 F_1 和 F_2 组成的稳压电路,最后接到负载 R_L 上,如附图8所示。附图8中各符号所代表的部件含义如表1所示。

[0131] 表1简化电路图中各符号的含义

部件符号	含义
R1	金属膜电阻器 I
R2	金属膜电阻器 II
R3	金属膜电阻器 III
F1	稳压器 I
F2	稳压器 II
RL	负载

[0133] 经过对此稳压系统中各部件在储备期和工作期作FMMEA分析,确定各部件的主要故障机理、机理类型及相关关系如表2所示。

[0134] 表2故障机理,机理类型及相关关系

部 件	故障机理	机理 符号	机理 类型	机理特征	影响	影响符 号
R1	银迁移	R1f1	连续退化	损伤累积	短路	MR1
	电晕放电	R1f2	连续退化	损伤累积	短路	
R2	银迁移	R2f1	连续退化	损伤累积	短路	MR2
	电晕放电	R2f2	连续退化	损伤累积	短路	
R3	银迁移	R3f1	连续退化	损伤累积	短路	MR3
	电晕放电	R3f2	连续退化	损伤累积	短路	
F1	电载荷冲 击	F1f1	复合冲击 退化型	损伤累积	开路	MF11
	时间相关 介质击穿	F1f2	连续退化 型	损伤累积	参数漂移	MF12
F2	电载荷冲 击	F1f1	复合冲击 退化型	损伤累积	开路	MF21
	时间相关 介质击穿	F1f2	连续退化 型	损伤累积	参数漂移	MF22
RL	材料退化	Rf1	连续退化 型	损伤累积	退化	MRL1
	过电压	Rf2	过应力型	过载	短路	MRL2

[0136] 步骤二:建立部件的故障机理树模型和BDD模型,以及利用FDEP门对载荷共担行为建模。

[0137] 对整个系统进行分析,系统正常工作的前提是负载电阻正常工作,而引起负载电阻故障的机理有两个,退化和过电压。负载电阻两端接了两个稳压器,稳压器的作用是维持负载电阻两端的电压恒定。所以只有当两个稳压器都故障时,负载电阻才可能发生过电压故障。另外保护电阻能起到分压的作用,当两个或两个以上故障时,子系统才失效。如附图9所示。

[0138] 附图10a-图10b利用FDEP门来解释载荷共担效应,图10a表示当一个保护电阻失效(触发事件CR)时,剩余的保护电阻和稳压器分担总载荷。如果两个稳压器中的任何一个发生开路故障(触发事件CF),则另一个和其并联的稳压器将分担更多的电压,如附图10b)所示。

[0139] 当一个保护电阻短路时,RL上的电压也会增加,这将增加电阻RL中机理MD和OVS的发展速率。其中机理MD和OVS是相互竞争的关系。附图11说明了失效机理和相关性。如果稳压器分担更多的电压,TDDb和ELI也将被加速,故障机理树和附图11类似。

[0140] 当三个保护电阻中的任何一个短路时,电路中的总电阻将减小,并且剩余的两个电阻分担的载荷将增加。如果稳压器断路,电路中的总电阻将增加,电路中的电流将减小。其实故障机理的发展速度直接取决于电压,也就是说,触发事件“短路保护电阻”将加速电阻中的故障机理,而“稳压器开路触发事件”将抑制电阻器中的故障机理。

[0141] 步骤三:对稳压系统建立模型。

[0142] 当两个稳压器发生故障并且至少两个保护电阻故障时,负载电阻将会发生过电压失效。附图12是案例系统的故障机理树。

[0143] 三个保护电阻的故障时间可能不同,以及两个稳压器的故障时间也可能不同。因此,案例系统可能有许多故障场景。例如,附图13显示了一种故障场景,其中故障顺序是稳压器1,稳压器2,电阻器1和电阻器2。当稳压器1发生故障时,调稳压2分担的载荷将增加,因此与电压有关的故障机理的发展速率将增加。同时,三个保护电阻上分担的电压降低了,导致其上的机理发展速度下降。稳压器2发生故障后,三个保护电阻上的电压会上升。在其中一个保护电阻发生故障后,剩余的两个电阻所分担的电压也会增加。每当电压重新分配时,负载电阻中的故障机理的发展速度将被加速或抑制,直到系统发生故障。图14以另一种方式说明情况,其中“+”和“-”符号表示故障机理被加速和抑制。图14中的实线表示部件的故障顺序,虚线表示故障部件影响其他部件分担的载荷的变化。例如,F1的故障将导致R1~R3的载荷重新分配。

[0144] 步骤四:对所有的故障场景进行模拟。

[0145] 通过PPoF方法得到各主要故障机理的寿命分布形式及分布参数,如表3所示。

[0146] 表3主要故障机理的寿命分布

机理符号	分布类型	参数		
		$\beta(\theta)$	$\eta(\sigma)$	λ
R1f1	威布尔	3.26	12652	/
R1f2	指数分布	/	/	12542
R2f1	威布尔	3.28	12673	/
R2f2	指数分布	/	/	12562
R3f1	威布尔	3.27	12663	/
R3f2	指数分布	/	/	12552
F1f1	对数正态	9.92	0.27	/
F1f2	对数正态	8.67	0.3	/
F1f1	对数正态	9.82	0.26	/
F1f2	对数正态	8.69	0.31	/
Rf1	对数正态	8.72	0.27	/
Rf2	对数正态	8.69	0.31	/

[0149] 这个例子中共有120个故障场景,所有这些场景都需要模拟。为了解决案例系统中的载荷共担问题,执行下列程序。首先,根据获得的故障机理的寿命分布,离散寿命时间,得到样本组。其次,根据FMC模型计算损伤量。每一个样本,对应相应的故障情况。利用载荷分配规则和FMC模型,可以考虑故障累积和加速效应。第三,计算出每个离散时间得到的部件、子系统和系统寿命,然后拟合出部件的损伤量曲线,以及子系统和系统的可靠度曲线。下表总结了所提出的可靠性仿真策略。

	Procedure1	基于蒙特卡洛仿真的系统可靠度函数曲线获取
	Input:	每一个部件中故障机理的寿命分布
	1:	考虑故障机理相关性, 得到的部件初始寿命分布
		%%故障顺序组合的不同%%
	2:	for $q=1,2,\dots,N$ do
[0150]	3:	从各部件寿命分布中提取同一位置 q 的值, 构成一组寿命组合, 如: $[\tau]_{n \times 1}^q = (\tau_q^{(1)}, \tau_q^{(2)}, \dots, \tau_q^{(n)})$
	4:	对 $[\tau]_{n \times 1}^q$ 中的值按从大到小的顺序排列, 得到新的寿命组合, 如下: $[\tau']_{n \times 1}^q = (\tau_q^{(1')}, \tau_q^{(2')}, \dots, \tau_q^{(n')})$
	5:	计算部件的损伤量 $\Delta d_q^{(i)} = \frac{1}{\tau_q^{(i)}}$
		%%故障部件的不同%%
	6:	for $i=1,2,\dots,n-k$ do
		%%剩余部件的不同%%
	7:	for $i'=i+1=2,3,\dots,n-k+1$ do
	8:	计算 $d_{i,q}^{(i)}$
		end
[0151]	9:	计算载荷共担影响后部件 C_{n-k+1} 的寿命 $T_{i,q}^{(n-k+1)} = \tau_q^{(n-k+1)} (1 - d_{i,q}^{(n-k+1)})$
		end
	10:	计算系统的寿命 $T_{s,q} = T_{s,q}^{(n-k+1)}$
		End
	11:	在获得 $[T_{s,q}]_{N \times 1}$ 后, 利用所有的数据拟合出可靠度曲线
	Output:	系统的可靠度曲线
[0152]	步骤五:	对步骤四得到的可靠性曲线进行分析。

[0153] 附图15显示了当故障情况如附图13所示时根据部件损伤量曲线。在6116小时,部件F1首先故障,此时电路的结构发生变化,与F1并联的F2分担的电压变大,而三个保护电阻分担的电压变小。对于部件中的故障机理而言,高电压意味着更快的发展速率,低电压则发展速率变慢。所以F2在故障机理ELI和TDDDB竞争作用下的损伤量累积速率变大,曲线变得陡峭,如F2曲线中1后面的部分。相反R1在机理SM和CD竞争下的损伤累积速率变小,曲线变得平缓,如R1曲线中点1和点2之间的部分。R2曲线的变化和R1类似。F2在6599小时故障,F2的故障导致部件R1和R2分担的电压都变大,所以损伤累积的速率都变大,这从两条曲线点2后面部分变陡可以看出。7110小时R1故障,R2分担的电压变大,损伤累积速率变大,曲线变陡,如R2曲线中点3后部分所示。R2在7469小时故障,这使得系统的结构进一步遭到破坏。经分析负载电阻两端没有稳压器作用,而且保护电阻R3分担的电压有限,负载电阻发生过电压故障。最终R2的故障导致整个系统发生故障。

[0154] 在附图16中虚线是不考虑载荷共担影响时,1-out-of-2稳压器子系统的可靠度曲线,实线则考虑了载荷共担影响。根据图16很容易得出,考虑载荷共担后稳压器子系统的可靠度要小于不考虑时的。载荷共担的影响虽然只在有部件故障后才表现出来,但是由于部件故障时间具有分布性,所以图中两条曲线在一开始就表现差异。另外一方面,通过仿真我们得到在不考虑载荷共担影响时,稳压器子系统的平均寿命大约是7207小时,而考虑载荷共担影响后此子系统的平均寿命大约是4994小时。这就说明载荷共担对这个稳压器子系统的的影响非常大。

[0155] 类似的,附图17中虚线是不考虑载荷共担影响时,2-out-of-3保护电阻子系统的可靠度曲线,实线则考虑了载荷共担影响。在不考虑载荷共担影响和考虑载荷共担影响两种情况下,保护电阻子系统的平均寿命分别是11242小时和11082小时。另外从图17中可以直观的看出两条曲线差别较小。将图16和图17中两个子系统的可靠度曲线进行对比,不难发现保护电阻子系统的可靠度受载荷共担的影响较小。经过仔细地分析,我们得出这是由系统的功能决定的。系统发生过应力故障的前提是稳压器子系统故障,而对保护电阻子系统没有这样的要求。所以在很多情况下当系统故障时,保护电阻没有都故障,也就是说可能在三个电阻都故障之前系统已经故障。

[0156] 将附图16,16和17进行对比,附图18中系统可靠度降低到0的时间最短,特别是小于稳压器子系统的。从系统的结构和功能上分析,负载电阻发生过电压故障的前提是稳压器子系统先故障。但负载电阻除了受过电压故障机理的影响还受到材料退化MD的影响。而且机理MD也受到载荷共担的影响,所以才使得系统的可靠度更低。当不考虑负载分担效应时,整个系统的平均寿命是6027小时,而考虑到这个影响,则是5167。从系统平均寿命的变化可以看出,系统的可靠度受载荷共担的影响较大。所以对k/n系统进行可靠性分析时,不能忽视载荷共担的作用。

[0157] 最后应说明的是:以上所述的各实施例仅用于说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分或全部技术特征进行等同替换;而这些修改或替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围。

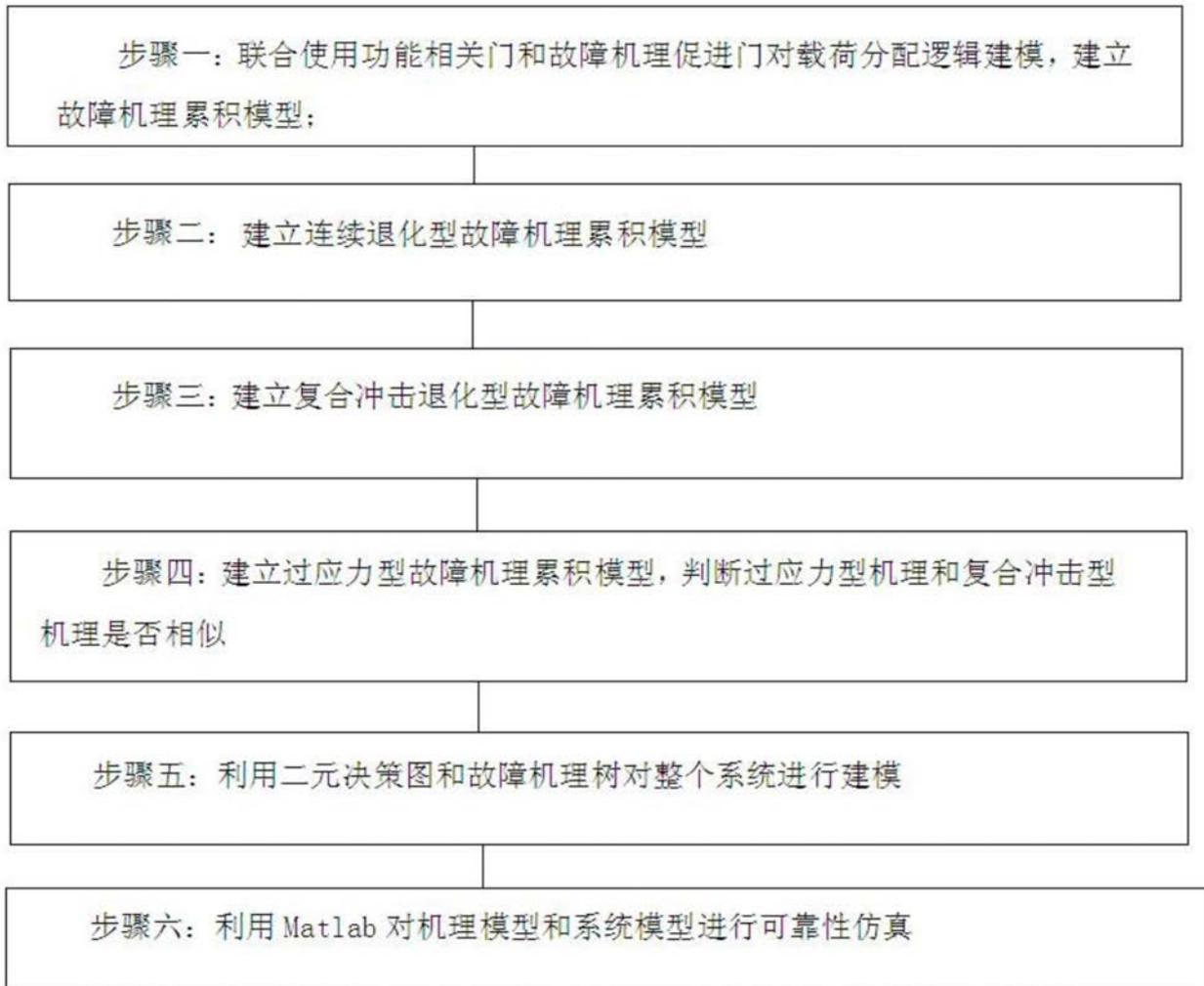


图1

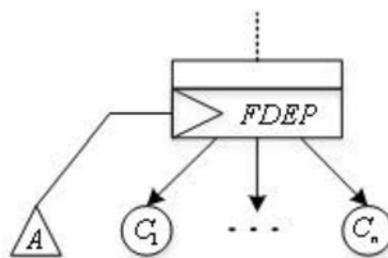


图2a

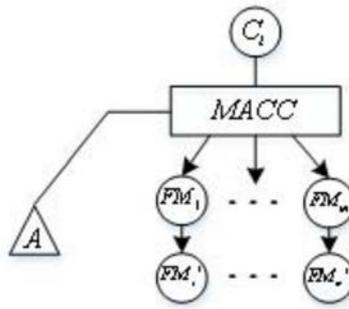


图2b

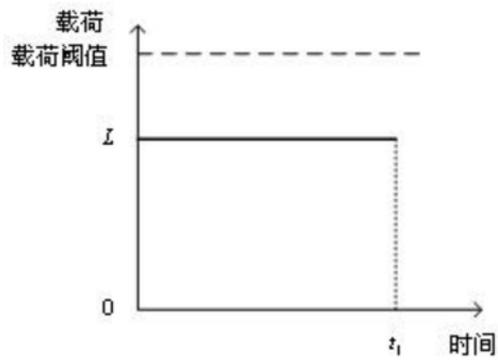


图3a

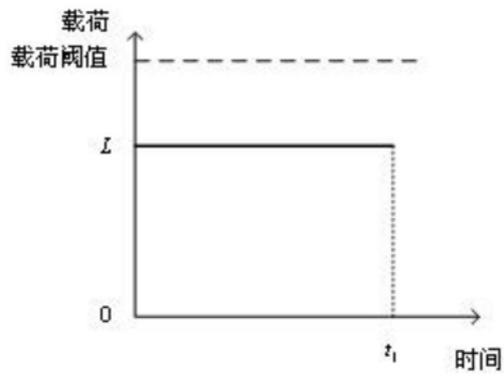


图3b

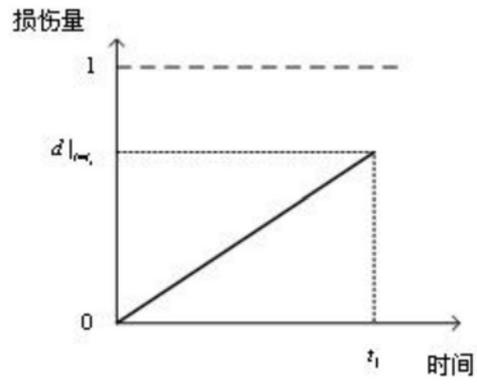


图3c

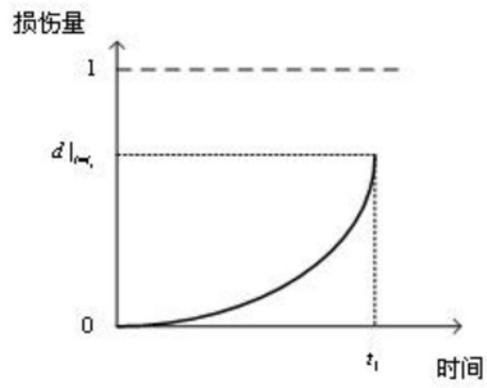


图3d

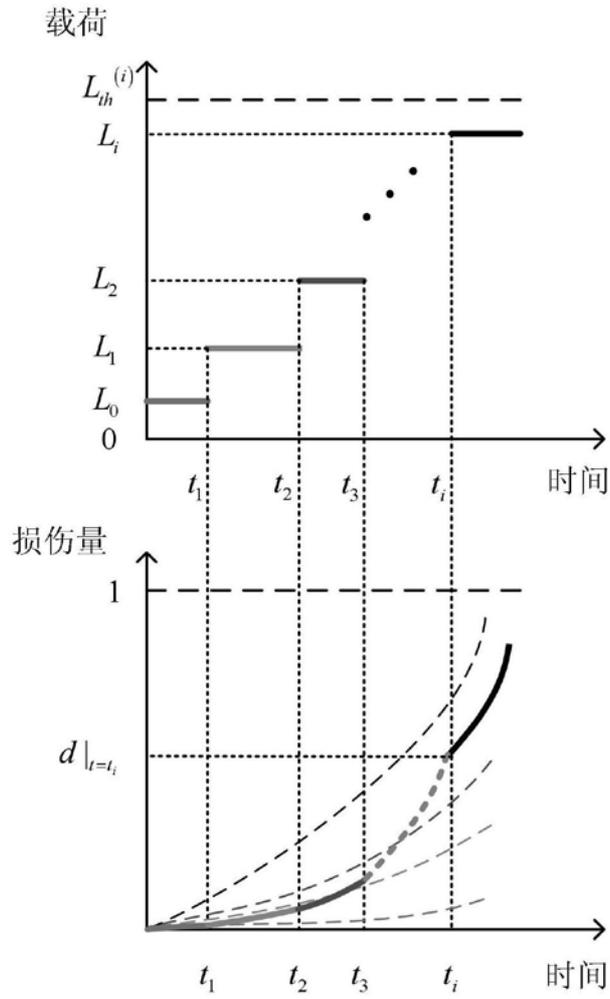


图4

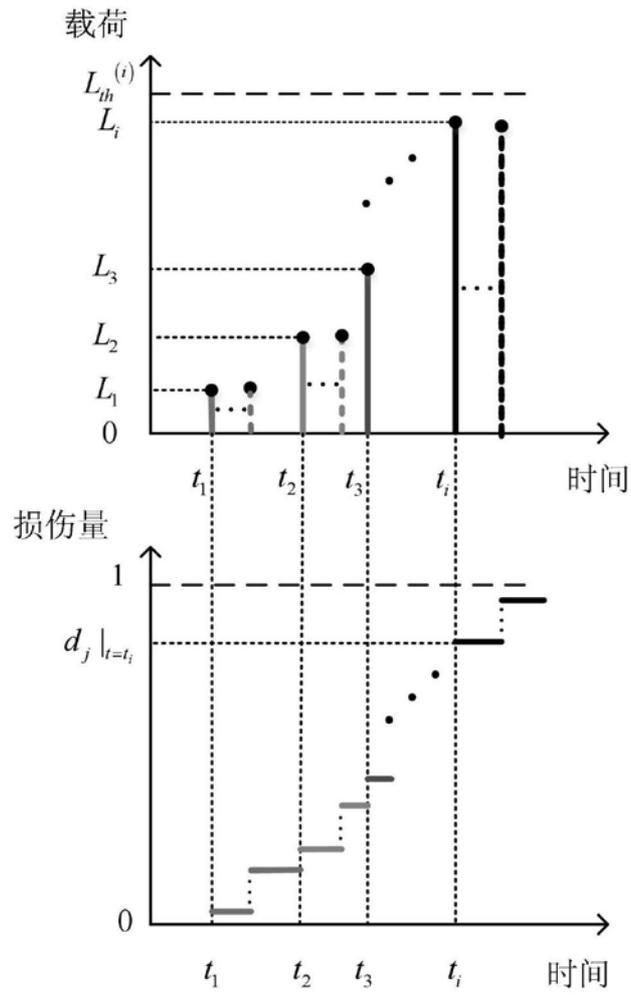


图5

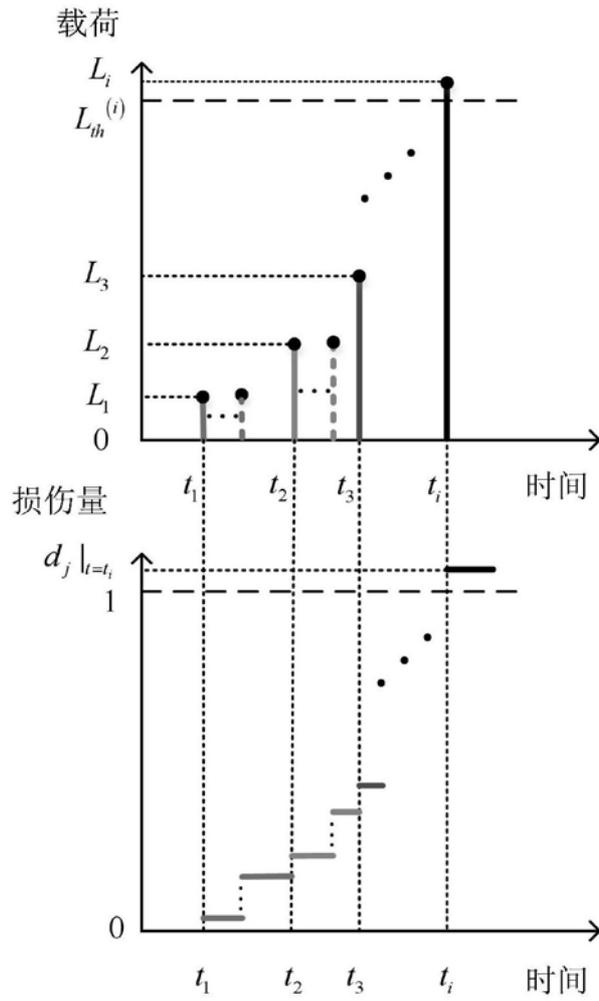


图6

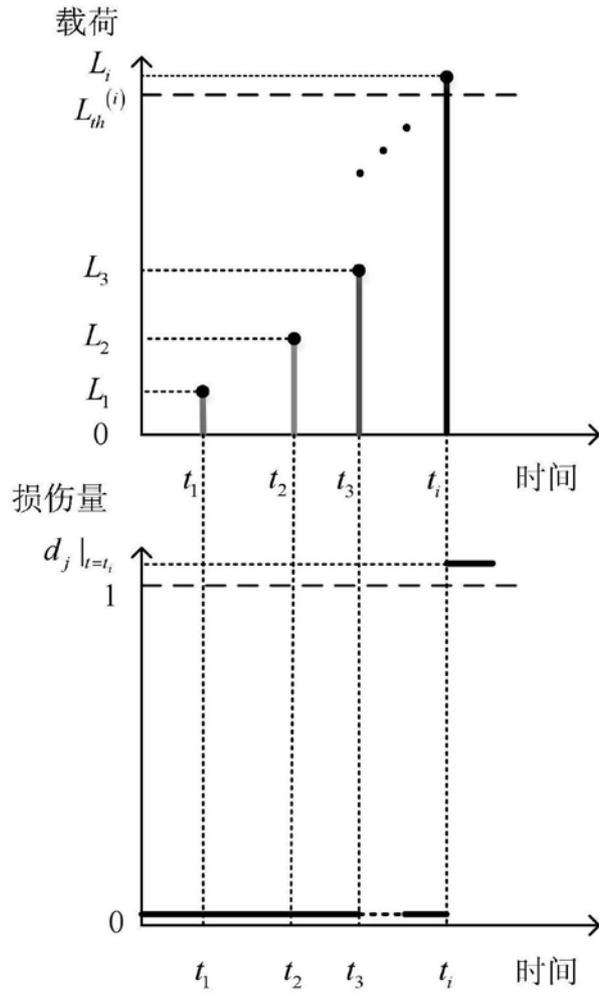


图7

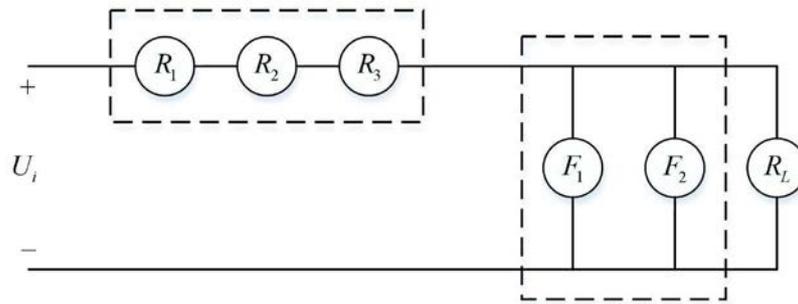


图8

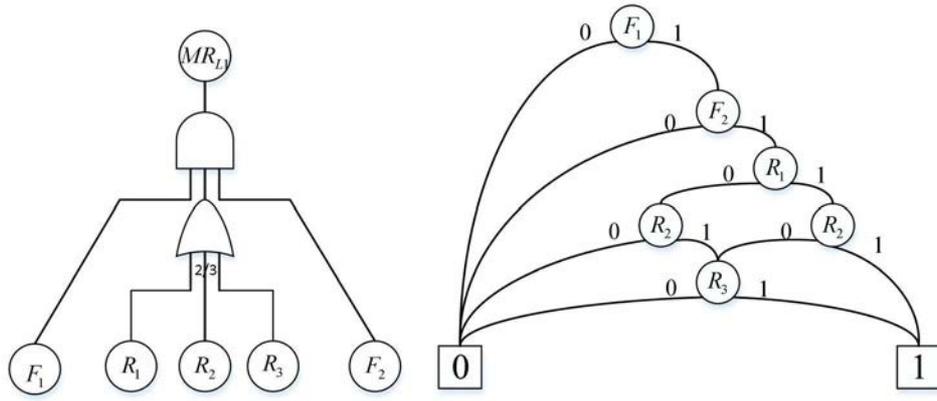


图9

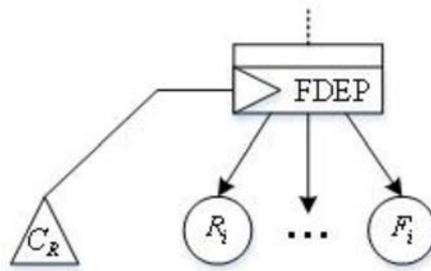


图10a

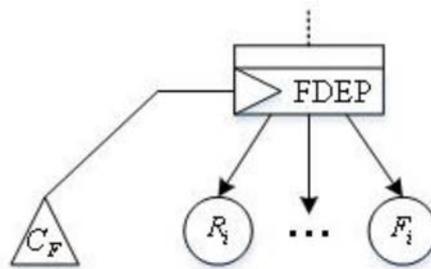


图10b

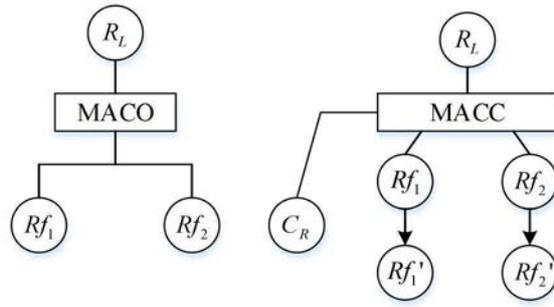


图11

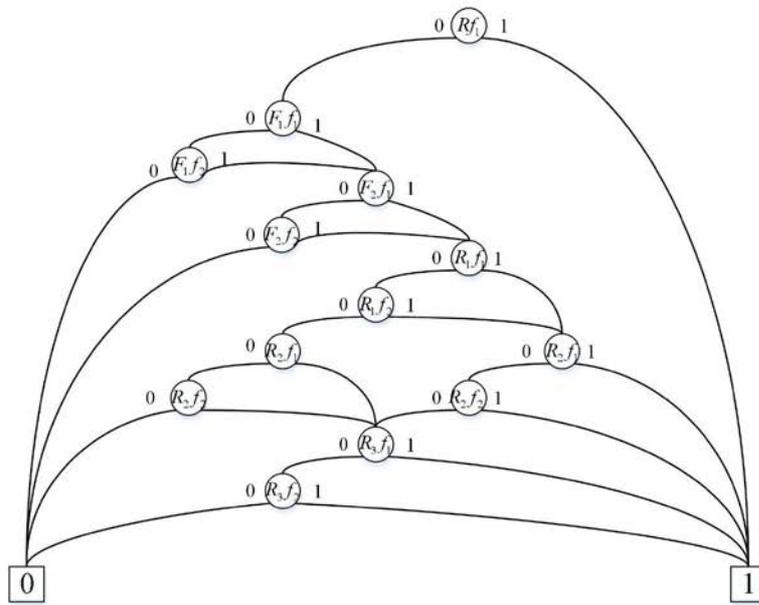
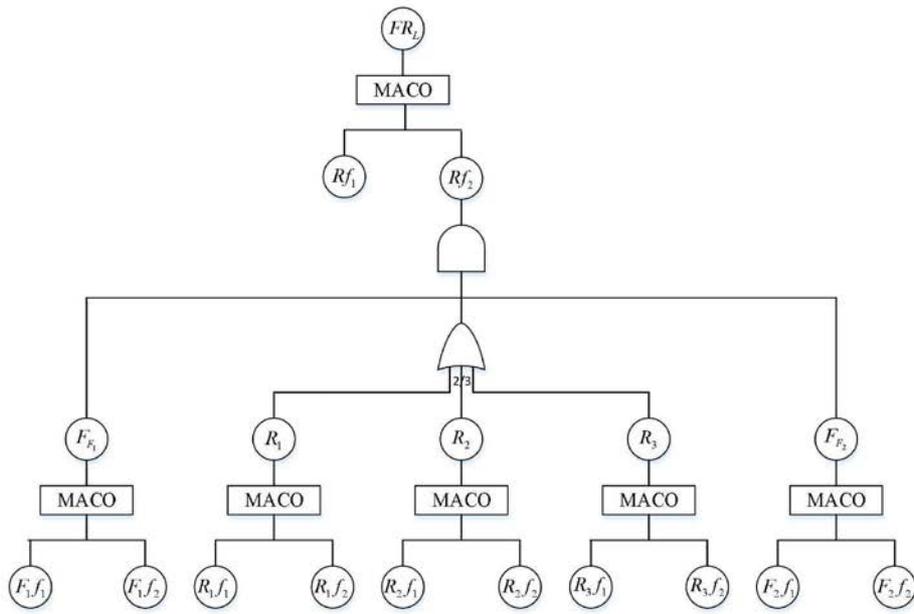


图12

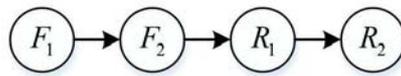


图13

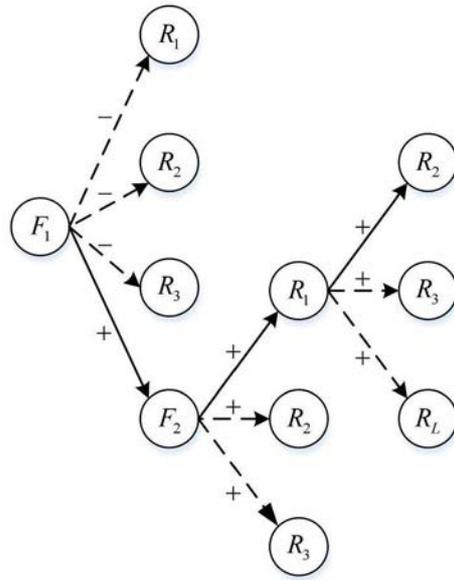


图14

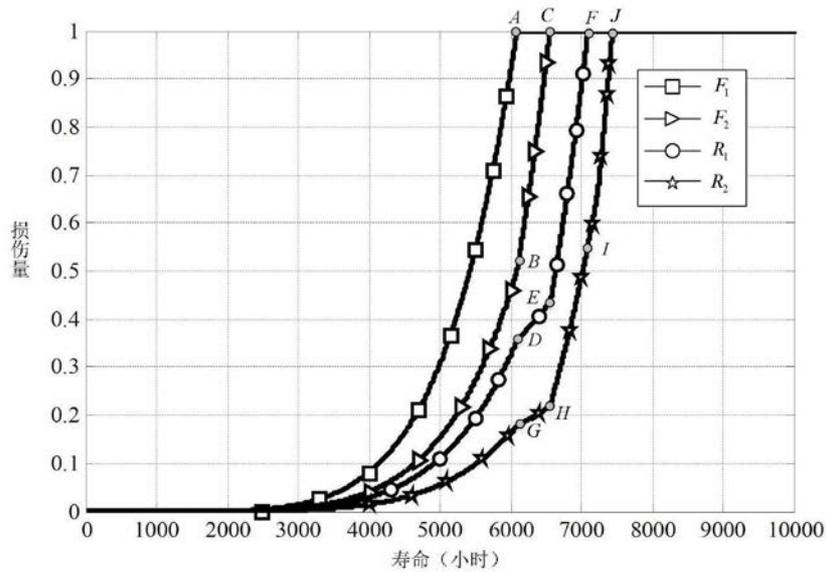


图15

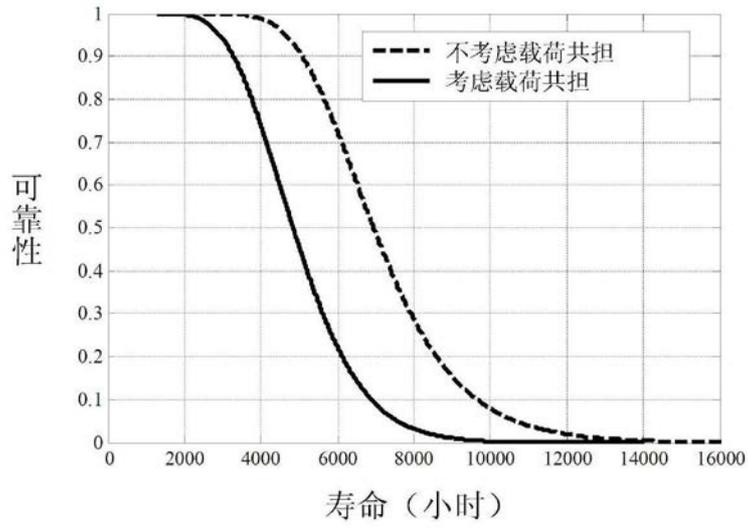


图16

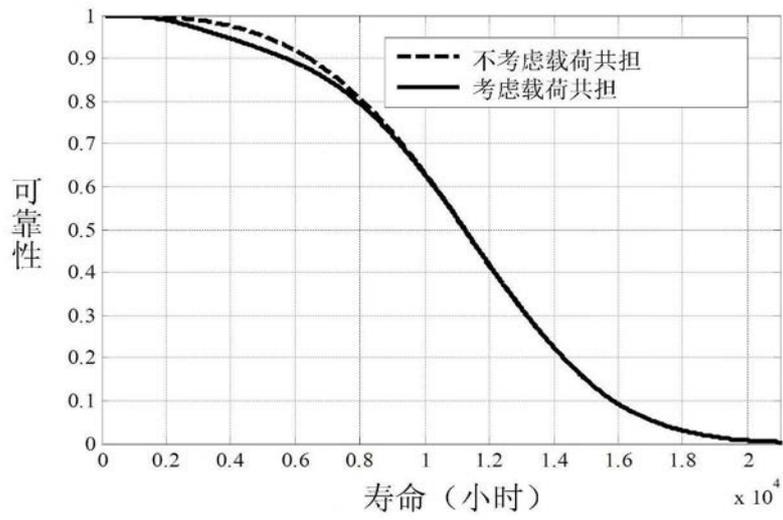


图17

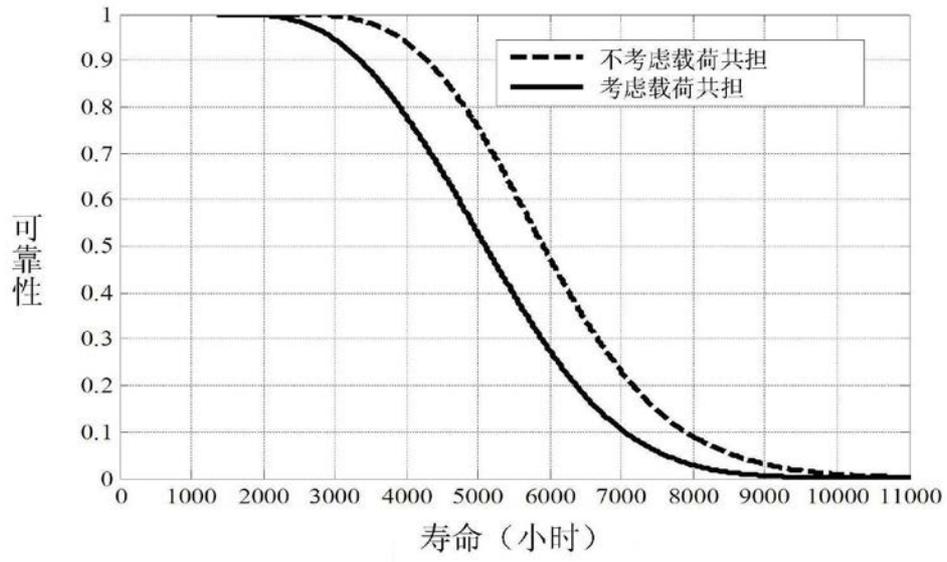


图18