

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018 年 12 月 20 日 (20.12.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/227673 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06F 17/50 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2017/091661
- (22) 国际申请日: 2017 年 7 月 4 日 (04.07.2017)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201710456036.4 2017年6月16日 (16.06.2017) CN
- (71) 申请人: 浙江大学(ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。
- (72) 发明人: 丁一(DING, Yi); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。加鹤萍(JIA, Heping); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。刘瀚琳(LIU, Hanlin); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。彭锐

(PENG, Rui); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。宋永华(SONG, Yonghua); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。郭创新(GUO, Chuangxin); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。

(74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限公司(HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO., LTD.); 中国浙江省杭州市西湖区玉古路 147 号黄鸿年科技综合大楼 215 室/林超, Zhejiang 310013 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,

(54) Title: POLYMORPHIC DECISION DIAGRAM-BASED METHOD FOR ANALYZING AND CALCULATING RELIABILITY OF SYSTEM COMPRISING STANDBY

(54) 发明名称: 一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法

(57) Abstract: Disclosed in the present invention is a polymorphic decision diagram-based method for analyzing and calculating reliability of a system comprising standby. A polymorphic system model comprising standby mode components is built; and a polymorphic decision diagram is established according to the state transfer possibility of each component in a system. By means of the building, simplification and decomposition of the polymorphic decision diagram of the system, the occurrence probability of each path in sub-diagrams of the polymorphic decision diagram of the system is obtained by utilizing integral operation, and the occurrence probability of each path in the polymorphic decision diagram is calculated by considering failure probability during startup of standby components, so that the system reliability is calculated. With the method according to the present invention, a polymorphic system comprising standby is used as an object, and polymorphic components comprising standby whose state transfer complies with any distribution may be processed in a programmed manner, so that accuracy is high and the calculation speed is fast; and the method is of important significance for reliability theoretical analysis of the polymorphic standby system whose state transfer complies with any distribution as well as the engineering application thereof.

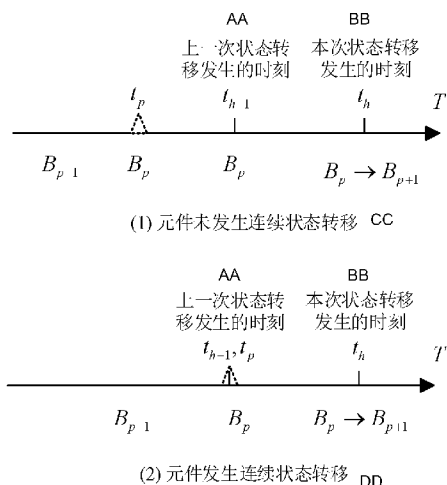


图 1

- AA The moment when the last state transfer occurs
BB The moment when the present state transfer occurs
CC (1) No continuous state transfer of components occurs
DD (2) Continuous state transfer of components occurs

PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本发明公开了一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法。建立含有备用模式元件的多态系统模型, 根据系统中各个元件发生状态转移的可能性, 建立多态决策图。通过系统多态决策图的建立、简化、分解, 利用积分运行算得到系统多态决策图子图中每条路径出现概率, 并考虑备用元件启动时的失效概率, 计算多态决策图中每条路径出现的概率, 从而计算系统的可靠性。本发明方法以含备用的多态系统为对象, 可程序化处理状态转移服从任意分布的含备用多态元件, 精确性高, 运算速度快, 对状态转移服从任意分布的多态备用系统可靠性理论分析及其工程应用具有重要意义。

一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法

技术领域

本发明属于复杂工程系统可靠性分析领域，特别是涉及了一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法，利用多态决策图方法对含备用元件的工程系统进行运行可靠性分析和计算。

背景技术

在工程系统中，为了保证系统的可靠性，通常会利用冗余技术，如热备用、冷备用、温备用等为系统增加备用元件。一旦运行元件发生故障，备用元件可以投入运行以保持系统的高可靠性。此外，元件也会存在多个离散状态值，呈现多态特性。现有的分析方法在分析多态元件构成的含备用系统时存在一定的局限性，解析方法如马尔可夫过程模型要求元件的状态转移服从指数分布，而二叉决策图方法仅能用来处理含两状态元件的系统；模拟方法仅能得到近似解，且一般需要较长的计算时间。因此，为更切合实际工程系统，对含多态元件且其状态转移服从任意分布的备用系统进行可靠性分析十分关键，对完善多态可靠性分析理论具有重要意义。

发明内容

本发明的目的是针对含多态元件的备用系统，提供一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法。

本发明方法首先建立含有备用元件的多态系统模型，依据元件不同状态的容量以及系统需求，建立发生状态转移的系统多态决策图。通过系统多态决策图的建立、简化、分解，利用积分运行算得到系统多态决策图子图路径中每条支路出现概率的积分表达式，再乘以根节点的出现概率，并考虑备用元件的启动故障，进而得到每条路径的出现概率。最后，将系统多态决策图中的每条路径相加，得到系统的可靠性。本发明方法可通过编程实现自动计算。

本发明对含备用的多态系统可靠性分析理论分析具有一定的指导意义，对更好地分析及评估由状态转移服从任意分布的多态元件构成的含备用系统法人可靠性提供了科学依据。

本发明采用的具体技术方案包括以下步骤：

- 1) 建立含有备用模式元件的多态系统模型；
- 2) 根据系统中各个元件发生状态转移的所有可能性，建立多态决策图；
- 3) 计算多态决策图中第 e 条路径出现的概率 P_e ；

4) 考虑备用元件启动时的失效概率, 将多态决策图中第 e 条路径出现的概率修正为 P'_e ;

5) 计算系统的可靠性 P_{system} 。

所述步骤 1) 具体构建以下多态系统模型:

多态系统主要由 N 个已按顺序编号的具有多态的元件 A_i 构成, $i=1, \dots, N$, i 表示元件序数, N 表示元件总数, 第 i 个元件 A_i 具有 B_i 个已按顺序编号的状态以及运行模式和备用模式的两种模式;

状态所对应的容量按状态编号顺序依次递减, 第 i 个元件 A_i 处于第 j 个状态下的容量为 C_{ij} , $j=1, \dots, B_i$, j 表示状态序数; 系统容量需求为 D ;

初始时刻, 所有的元件均处于第 1 个状态, 并且各个元件的工作模式按以下设定: 设定前 k 个元件 A_i 处于运行模式, 后 $(N-k)$ 个元件 A_i 处于备用模式, 所述的 k 满足前 k 个元件的容量总和大于或等于系统容量需求 D , 且前 $(k-1)$ 个元件的容量总和小于系统容量需求 D 的要求。

由于本方法分析系统在运行时的可靠性, 考虑到元件在运行时的不可维修性, 本模型不考虑元件的维修。

考虑系统中各个元件发生状态转移的所有可能性, 计算状态转移后系统可能的可用容量来构建多态决策图, 直到发生状态转移后系统可用容量不能满足系统需求或系统中无能够发生状态转移的元件, 则停止建立多态决策图。应该注意到的是, 若系统中处于运行模式的元件发生状态转移, 可能使得处于备用模式的元件启动到运行模式。

系统中的元件发生状态转移采用以下设定: 设定一个元件的一次状态转移作为系统的一次状态转移, 因此系统每发生一次状态转移仅有一个元件发生状态转移, 系统每发生一次状态转移在多态决策图中增加一层元件每发生一次状态转移是由当前编号顺序的状态转移到下一编号顺序的状态。

多态决策图的建立过程中的每一次元件发生状态转移, 都要使得已处于运行模式的所有元件的容量相加不小于系统容量需求 D 。

将每个元件处于各自当前状态的容量相加作为系统当前的可用容量, 系统中处于运行模式的元件数量及处于备用模式元件的数量与系统容量需求 D 有关, 必要条件是要使得所有已处于运行模式的所有元件的容量相加不小于系统容量需求 D 。若状态转移后所有处于运行模式的元件的容量总和小于系统容量需求 D , 则需将处于备用模式的元件按照编号顺序启动变换为运行模式。并且工作模式只能从备用模式向运行模式单方向转换。

系统每发生一次状态转移后, 记录以下数据: 发生状态转移的元件编号和

该元件在发生状态转移前的状态以及该状态的起始时间, 发生状态转移后系统需启动的处于备用模式的元件编号和该元件启动时所处在状态以及该状态的起始时间。

所述步骤2) 中, 设定系统初始运行时刻为 t_0 , 发生第 h 次状态转移的时刻为 t_h , 有 $t_0 < t_1 < \dots < t_h < \dots$, 以系统初始时刻所有元件的综合状态作为多态决策图的根节点, 以系统发生状态转移后可能的所有元件的综合状态作为多态决策图的节点, 以节点之间的状态转移作为支路, 连贯支路相连形成路径。

所述步骤2) 中, 多态决策图具体采用以下方式建立:

2.1) 在系统的初始时刻 t_0 , 系统未发生状态转移的系统状态作为多态决策图的根节点, 根节点为系统最好的状态, 系统的可用容量 SC_0 为:

$$SC_0 = \sum_{i=1}^N C_{i,1}$$

2.2) 在系统发生第一次状态转移后的 t_1 时刻, 系统发生第一次状态转移有 $(N+1)$ 种可能, $(N+1)$ 种包括 N 个元件各自发生的一次状态转移或没有任何元件发生状态转移, 故多态决策图的根节点演变有 $(N+1)$ 个子节点, 作为根节点下的第一层; 构建从 t_0 到 t_1 的每条支路, 各条支路下系统的可用容量 SC_1^g 采用以下公式计算获得:

$$SC_1^g = \begin{cases} \sum_{i=1, i \neq g}^N C_{i,1} + C_{g,2} & (g=1, \dots, N) \\ \sum_{i=1}^N C_{i,1} & (g=N+1) \end{cases}$$

其中, g 表示系统发生第一次状态转移的可能性序号, $g=N+1$ 表示没有任何元件发生状态转移;

2.3) 在系统发生第二次状态转移后的 t_2 时刻, 对于系统发生第一次状态转移后每一可能(根节点的每个子节点), 系统再发生第二次状态转移同样有 $(N+1)$ 种可能, 故根节点演变得到的 $(N+1)$ 个子节点再各自演变出 $(N+1)$ 个子节点, 构建从 t_1 到 t_2 的每条支路, 各条支路下系统的可用容量 SC_2^h 采用以下公式计算获得:

$$SC_2^h = \begin{cases} \sum_{i=1, i \neq g, h}^N C_{i,1} + C_{g,2} + C_{h,2} (g, h = 1, \dots, N; h \neq g) \\ \sum_{i=1, i \neq g, h}^N C_{i,1} + C_{h,3} (h = g = 1, \dots, N) \\ \sum_{i=1, i \neq g}^N C_{i,1} + C_{g,2} (h = N+1) \end{cases}$$

其中, h 表示系统发生第二次状态转移的可能性序号, $h = N+1$ 表示没有任何元件发生状态转移;

2.4) 在系统发生第三次状态转移后的 t_3 时刻及以后时刻, 按照步骤 2.1)~2.3) 的规律方式进行类推计算, 直到所有元件均已处于运行模式并且所有元件的可用容量总和小于系统容量需求 D 或已无元件能够发生状态转移(即所有元件的状态均达到最大编号), 则停止建立多态决策图。

优选地, 所述步骤 2) 具体实施时, 需要对同构的子树进行合并以简化系统多态决策图, 也就是说, 若两个节点的状态转移信息相同, 则可将指向这两个节点的边合并, 即状态转移后的计算只需进行一次。所述的状态转移信息相同是指发生状态转移的时间、发生状态转移的元件、状态转移前元件所处状态和该状态的起始时间、状态转移后需启动的处于备用模式的元件状态和该状态的起始时间均相同。

所述步骤 3) 中, 多态决策图的第 e 条路径出现的概率是由路径所经过支路的出现概率 Pr_e^g 的乘积再乘以根节点出现的概率得到。

将系统多态决策图中的节点分为两类: 第一类为有元件发生状态转移且无备用元件启动, 第二类为有元件发生状态转移且有备用元件启动。

如图 1 所示, 第一类和第二类中, 元件发生状态转移有两种情况: ①元件未发生连续状态转移, ②元件发生连续状态转移, 连续状态转移是指至少连续发生两次状态转移。如图 1 的上图所示, t_p 和 t_{h-1} 时刻之间存在时间间隔, t_p 和 t_h 是非连续的, 元件未发生连续状态转移。如图 1 的下图所示, t_p 和 t_{h-1} 是同一时刻, t_p 和 t_h 是连续的, 元件发生了连续状态转移。

所述步骤 3) 中, 元件 A_i 根据初始的工作模式和之后工作模式是否发生改变的情况分为三类, 分别为初始时刻处于运行模式的元件 A_i^v 、初始时刻处于备用模式并始终处于备用模式的元件 A_i^s 和初始时刻处于备用模式并之后启动转变为运行模式的元件 A_i^o ;

即在系统初始时刻, 前 k 个元件 A_i 处于运行模式, 表示为 $A_i^v (i = 1, \dots, k)$;

后 $(N-k)$ 个元件 A_i 处于备用模式,并且根据备用模式是否启动变换为运行模式分为两类,分别表示为 $A_i^s(i=k+1,\dots,N)$ 和 $A_i^o(i=1,\dots,k)$ 。上述中的字母 y 表示初始为运行模式, s 表示始终备用模式, o 表示初始备用模式转换为运行模式

然后采用以下方式计算支路的出现概率 $\Pr_e^g$:

(1) 在 t_h 时刻,对于有元件发生状态转移且无备用元件启动的情况(第一类节点),发生状态转移过程可能表示为 $A_i^y/A_i^s/A_i^o \rightarrow NA$,具体含义为: $A_i^y \rightarrow NA$ 表示系统初始运行时在运行模式的元件 A_i^y 从状态 B_p^y 转移到状态 B_{p+1}^y , $A_i^s \rightarrow NA$ 表示系统初始运行时在备用模式的元件 A_i^s 从状态 B_p^s 转移到状态 B_{p+1}^s (这种情况下系统不需要处于备用模式的元件启动), $A_i^o \rightarrow NA$ 表示系统初始运行时在备用模式且状态转移后启动变换到运行模式的元件 A_i^o 从状态 B_p^o 转移到状态 B_{p+1}^o (这种情况不会发生在系统第一次状态转移);

对应的状态转移过程分为三类支路 $t_h\{A_i^y:B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y\}$ 、 $t_h\{A_i^s:B_p^s \rightarrow B_{p+1}^s\}$ 或 $t_h\{A_i^o:B_p^o \rightarrow B_{p+1}^o\}$,以支路 $t_h\{A_i^y:B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y\}$ 为例,支路 $t_h\{A_i^y:B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y\}$ 出现的概率 $\Pr_e^g(T)$ 采用以下公式计算:

$$\begin{cases} \frac{\int_{t_{h-1}}^T R_{B_p^y}^{A_i^y}(t_{h-1}-t_p) dF_{B_p^y}^{A_i^y}(t_h-t_p) R_{B_{p+1}^y}^{A_i^y}(T-t_h)}{R_{B_p^y}^{A_i^y}(T-t_h)}, t_{h-1} > t_p \\ \frac{\int_{t_{h-1}}^T dF_{B_p^y}^{A_i^y}(t_h-t_p) R_{B_{p+1}^y}^{A_i^y}(T-t_h)}{R_{B_p^y}^{A_i^y}(T-t_h)}, t_{h-1} = t_p \end{cases}$$

其中, T 为系统运行时间, t_{h-1} 为系统发生上一次状态转移的时刻($0 < t_1 < \dots < t_{h-1} < t_h < T$), t_p 为元件 A_i^y 在状态 B_p^y 的起始时间, $F_{B_p^y}^{A_i^y}(t_h-t_p)$ 为元件 A_i^y 从状态 B_p^y 转移到状态 B_{p+1}^y 的累积分布函数,其中 (t_h-t_p) 表示系统发生第 h 次状态转移的时间与系统发生状态转移时所处的状态的时间之间的时间差, $R_{B_p^y}^{A_i^y}(T-t_h)$ 表示元件 A_i^y 从状态 B_p^y 转移到状态 B_{p+1}^y 的可靠性函数, $R_{B_{p+1}^y}^{A_i^y}(T-t_h)$ 表示元件 A_i^y 从状态 B_{p+1}^y 转移到状态 B_{p+2}^y 的可靠性函数, $R_{B_p^y}^{A_i^y}(t_{h-1}-t_p)$ 表示表示元件 A_i^y 从状态 B_p^y 转移到状态 B_{p+1}^y 的可靠性函数, $(T-t_h)$ 表示系统运行时间与系统发生第 h 次状态转移的时间之间的时间差, $(t_{h-1}-t_p)$ 表示系统发生上一次状态转移的时间与系统发生第 h 次状态转移的时间之间的时间差;若状态 B_p^y 为元件 A_i^y 最后一个状态,则令 $R_{B_{p+1}^y}^{A_i^y}=1$ 。

支路 $t_h\{A_i^s:B_p^s \rightarrow B_{p+1}^s\}$ 和支路 $t_h\{A_i^o:B_p^o \rightarrow B_{p+1}^o\}$ 的计算方式和支路 $t_h\{A_i^y:B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y\}$ 计算方式相同;

(2) 在 t_h 时刻, 对于有元件发生状态转移且有备用元件启动的情况 (第二类节点), 发生状态转移过程可能表示为 $A_i^y / A_i^o \rightarrow (A_{j_1}^s, \dots, A_{j_r}^s)$, 具体含义为: 元件 A_i^y / 元件 A_i^o 从状态 B_p^y / B_p^o 转移到状态 B_{p+1}^y / B_{p+1}^o , 且有 r 个处于备用模式的元件 $A_{j_1}^s, \dots, A_{j_r}^s$ 从状态 $B_{p_r}^s$ 启动到状态 $B_{p_r}^o$;

对应的状态转移过程分为两类支路 $t_h \{A_i^y : B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y, A_{j_r}^s : B_{p_r}^s \rightarrow B_{p_r}^o\}$ 或 $t_h \{A_i^o : B_p^o \rightarrow B_{p+1}^o, A_{j_r}^s : B_{p_r}^s \rightarrow B_{p_r}^o\}$, 以支路 $t_h \{A_i^y : B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y, A_{j_r}^s : B_{p_r}^s \rightarrow B_{p_r}^o\}$ 为例, 支路 $t_h \{A_i^y : B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y, A_{j_r}^s : B_{p_r}^s \rightarrow B_{p_r}^o\}$ 出现的概率 $\Pr_e^g(T)$ 采用以下公式计算:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\int_{t_{h-1}}^T \prod_{u=1}^r R_{B_{p_u}}^{A_{j_u}^s}(t_h - t_{p_u}) R_{B_{p_u}}^{A_i^o}(T - t_h) R_{B_p^y}^{A_i^y}(t_{h-1} - t_p) dF_{B_p^y}^{A_i^y}(t_h - t_p) R_{B_{p+1}^y}^{A_i^y}(T - t_h)}{\prod_{i=1}^r R_{B_{p_u}}^{A_{j_u}^s}(T - t_{p_u}) R_{B_p^y}^{A_i^y}(T - t_p)}, t_{h-1} > t_p \\ \frac{\int_{\tau_{l-1}}^T \prod_{i=1}^r R_{B_{p_u}}^{A_{j_u}^s}(t_h - t_{p_u}) R_{B_{p_u}}^{A_i^o}(T - t_h) dF_{B_p^y}^{A_i^y}(t_h - t_p) R_{B_{p+1}^y}^{A_i^y}(T - t_h)}{\prod_{i=1}^r R_{B_{p_u}}^{A_{j_u}^s}(T - t_{p_u}) R_{B_p^y}^{A_i^y}(T - t_p)}, \tau_{h-1} = \tau_p \end{array} \right.$$

其中, r 为状态转移所启动变换的处于备用模式的元件个数, t_{p_u} 为启动变换的第 u 个处于备用模式的元件在状态 B_{p_u} 的起始时刻; 若状态 B_{p+1}^y 为元件 A_i^y 最后一个状态, 则令 $R_{B_{p_u}}^{A_{j_u}^s} = 1$ 。

支路 $t_h \{A_i^o : B_p^o \rightarrow B_{p+1}^o, A_{j_r}^s : B_{p_r}^s \rightarrow B_{p_r}^o\}$ 的计算方式和支路 $t_h \{A_i^y : B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y, A_{j_r}^s : B_{p_r}^s \rightarrow B_{p_r}^o\}$ 计算方式相同。

所述步骤 3) 中的根节点出现的概率 $P_0(T)$ 为:

$$P_0(T) = \sum_{i=1}^k R_{B_1}^{A_i^y}(T) \cdot \sum_{i=k+1}^N R_{B_1}^{A_i^s}(T)$$

其中, k 为初始时刻系统中处于运行模式的元件总数, $R_{B_1}^{A_i^y}(T)$ 表示运行元件 A_i^y 从状态 B_1^y 转移到状态 B_2^y 的可靠性函数, $R_{B_1}^{A_i^s}(T)$ 表示备用元件 A_i^s 从状态 B_1^s 转移到状态 B_2^s 的可靠性函数。

所述步骤 3) 中, 采用以下公式计算第 e 条路径出现的概率 P_e 为:

$$P_e(T) = P_0(T) \cdot \prod_g \Pr_e^g(T)$$

其中, $\Pr_e^g$ 为第 e 条路径所包含的第 g 条支路的出现概率, $e = 1, \dots, E$, e 表示多态决策图中的路径序号, E 表示多态决策图中的路径总数, $P_0(T)$ 表示根节点出现的概率。

所述步骤 4) 中, 考虑第 e 条路径中第 l 个备用元件启动时的失效概率 q_e^l ,

采用以下公式计算考虑备用元件启动的失效概率后,第 e 条路径出现的概率 P'_e :

$$P'_e(T) = \prod_{l=1}^L (1 - q_e^l) \cdot P_e(T) = \prod_{l=1}^L (1 - q_e^l) \cdot P_0(T) \cdot \prod_g \text{Pr}_e^g(T)$$

其中, L 为第 e 条路径中从备用模式启动变换的元件个数, q_e^l 为第 e 条路径中第 l 个处于备用模式的元件启动时的失效概率。

所述步骤5)是将系统中每条路径出现的概率相加,得到系统的可靠性,公式如下:

$$P_{system} = \sum_{e=1}^E P'_e$$

其中, P'_e 表示考虑备用元件启动的失效概率后的第 e 条路径出现的概率。

为了程序化实现本发明所提出的方法,在建立多态决策图后,对多态决策图进行分解,将系统发生相同状态转移次数的路径组成一个子图(每一层作为子图);对于每个子图,将其中每条路径的出现概率相加作为子图的发生概率,再将所有子图的发生概率与根节点的出现概率相加,得到系统的可靠性。

本发明的有益效果:

本发明方法以含备用的多态系统为对象,可程序化处理状态转移服从任意分布的含备用多态元件,精确性高,运算速度快。

本发明方法可进一步完善多态系统可靠性分析理论,对状态转移服从任意分布的多态系统可靠性理论分析及工程应用具有重要意义,并提供一条行之有效的技术途径。

本发明相比于现有分析计算方法,优势在于本发明方法能够处理含备用元件的系统的可靠性分析,适用范围更广,且能够直接程序自动化实现系统的可靠性分析,不需局限于手动整理路径出现概率的积分公式,在实际工程应用以及可靠性计算中具有更好的效果。

附图说明

图1是元件状态转移的两种情况,(1)表示该元件未发生连续状态转移,(2)表示元件发生连续状态转移。

图2是实施例系统多态决策图。

图3是实施例系统多态决策图分解图,(1)表示系统发生一次状态转移,(2)表示发生两次状态转移。

图4是利用两种方法计算实施例系统可靠性随时间变化的曲线图。

图5是考虑备用元件不同启动失效概率的系统可靠性曲线图。

具体实施方式

本发明以下结合实施例及其附图作进一步说明如下。

本实施例如下：

实施的系统中有 3 个元件(A_1, A_2, A_3)，其状态及容量如表 1 所示，系统需求为 15。元件状态转移的时间分布服从威布尔分布，其参数如表 2 所示。由元件容量及系统需求可知，在系统运行的初始时刻，元件 A_1 和 A_2 在运行模式，元件 A_3 在备用模式。备用元件 A_3 的启动失效概率 q 分别为 0, 0.1, 0.2。

表 1 系统元件状态及容量

元件/状态/容量	1	2	3
A_1	10	5	0
A_2	8	4	0
A_3	6	3	0

表 2 元件状态转移时间的威布尔分布参数

元件/参数		状态 1 → 状态 2		状态 2 → 状态 3	
		比例参数	形状参数	比例参数	形状参数
A_1		2	200	2	200
A_2		2	200	2	200
A_3	备用	1.5	300	1.5	300
	运行	1.5	150	1.5	150

本发明进行可靠性分析计算步骤如下：

根据以上步骤，可得到系统多态决策图如图 2 所示，由于发生再次状态转移已不满足系统需求，故系统发生两次状态转移后就停止多态决策图的建立。图中，将系统多态决策图依次从左向右编号，可以得到共有 12 条路径， Nu 表示无元件发生状态转移。

基于多态决策图，利用数值积分，可以计算得到每条支路的出现概率。

根节点的出现概率 $P_0(T)$ 为：

$$P_0(T) = R_{B_1}^{A_1}(T) \cdot R_{B_1}^{A_2}(T) \cdot R_{B_1}^{A_3}(T)$$

对于第①条路径中，第一条支路 $t_1 \{A_1: B_1 \rightarrow B_2, A_3^s: B_1^s \rightarrow B_1^o\}$ 的出现概率 $\text{Pr}_1^1(T)$ 为：

$$\text{Pr}_1^1(T) = \frac{\int_0^T R_{B_1}^{A_3^s}(t_1) R_{B_1}^{A_3^o}(T-t_1) dF_{B_1}^{A_1}(t_1) R_{B_2}^{A_1}(T-t_1)}{R_{B_1}^{A_3}(T) R_{B_1}^{A_1}(T)}$$

第二条支路 $t_2 \{A_2 : B_1 \rightarrow B_2\}$ 的出现概率 $\text{Pr}_1^2(T)$ 为:

$$\text{Pr}_1^2(T) = \frac{\int_0^T dF_{B_1}^{A_2}(t_2) R_{B_2}^{A_2}(T - t_2)}{R_{B_1}^{A_2}(T)}$$

则多态决策图第①条路径的出现概率 $P_1(T)$ 为:

$$P_1(T) = P_0(T) \cdot \text{Pr}_1^1(T) \cdot \text{Pr}_1^2(T)$$

考虑到备用元件 A_3 启动时的失效概率 q_1^1 , 将第一条路径的出现概率修正为 $P_1'(T)$:

$$P_1'(T) = P_1(T) \cdot (1 - q_1^1) = P_0(T) \cdot \text{Pr}_1^1(T) \cdot \text{Pr}_1^2(T) \cdot (1 - q_1^1)$$

对于第⑩条路径中, 第一条支路 $t_1 \{A_3^s : B_1^s \rightarrow B_2^s\}$ 的出现概率 $\text{Pr}_{10}^1(T)$ 为:

$$\text{Pr}_{10}^1(T) = \frac{\int_0^T dF_{B_1}^{A_3^s}(t_1) R_{B_2}^{A_3^s}(T - t_1)}{R_{B_1}^{A_3^s}(T)}$$

第二条支路 $t_2 \{A_3^s : B_2^s \rightarrow B_3^s\}$ 的出现概率 $\text{Pr}_{10}^2(T)$ 为:

$$\text{Pr}_{10}^2(T) = \frac{\int_0^T dF_{B_2}^{A_3^s}(t_2 - t_1)}{R_{B_2}^{A_3^s}(T - t_1)}$$

则多态决策图第⑩条路径的出现概率 $P_{10}(T)$ 为:

$$P_{10}(T) = P_0(T) \cdot \text{Pr}_{10}^1(T) \cdot \text{Pr}_{10}^2(T)$$

由于第⑩条路径没有备用元件启动, 故第⑩条路径的出现概率修正为 $P_{10}'(T)$:

$$P_{10}'(T) = P_{10}(T) = P_0(T) \cdot \text{Pr}_{10}^1(T) \cdot \text{Pr}_{10}^2(T)$$

在图 2 中, 可以看到, 第 12 条路径的出现概率等于根节点的出现概率, 即:

$$P_{12}'(T) = P_{12}(T) = P_0(T)$$

通过类似步骤可以得到其他路径的出现概率, 进而得到系统的可靠性 P_{system} 为:

$$P_{system} = \sum_{e=1}^{12} P_e'$$

为了程序化实现本发明所提出的方法, 在本实施例中, 需将图 2 分解为两个子图, 如图 3 所示, 分别对应系统发生 1 次状态转移 (如图 3 的(1))、系统

发生 2 次状态转移（如图 3 的(2)）。利用数值积分方法，得到系统多态决策子图的发生概率，将其与根节点的出现概率相加，得到系统的可靠性。系统的可靠性随时间变化的曲线图如图 4 所示。为了证明本发明所提出算法的有效性，将利用多态决策图的计算结果与蒙特卡洛模拟方法的结果进行对比，如图 4 所示。从图 4 可以看出，随着系统运行时间的增大，系统的可靠性随之减小；也可以看出本发明所提出方法计算结果的正确性。

此外，将本发明所提出方法的计算时间约为 67.31 秒，而蒙特卡洛模拟方法采样十万次的计算时间约为 326.16 秒，由此充分说明了本发明所提出方法的有效性以及在计算时间上的优越性。考虑到备用元件启动时的失效概率，图 5 为考虑备用元件不同的启动失效概率的系统可靠性，可以看到，备用元件的启动失效概率度系统可靠性有一定的影响，且该概率越大，系统可靠性越低。

最后应当说明的是，以上示例仅用以说明本发明的技术方案而非对其限制，尽管参照上述示例对本发明进行了说明，所属领域的普通技术人员应当理解；依然可以对本发明的具体实施方式进行修改或同等替换，而未脱离本发明精神和范围的任何修改或者同等替换，其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

权利要求书

1. 一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法，其特征在于该方法包括以下步骤：

- 1) 建立含有备用模式元件的多态系统模型；
- 2) 根据系统中各个元件发生状态转移的所有可能性，建立多态决策图；
- 3) 计算多态决策图中第 e 条路径出现的概率 P_e ；
- 4) 考虑备用元件启动时的失效概率，将多态决策图中第 e 条路径出现的概率修正为 P'_e ；
- 5) 计算系统的可靠性 P_{system} 。

2. 根据权利要求 1 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法，其特征在于：所述步骤 1) 具体构建以下多态系统模型：

多态系统主要由 N 个已按顺序编号的具有多态的元件 A_i 构成， $i=1, \dots, N$ ， i 表示元件序号， N 表示元件总数，第 i 个元件 A_i 具有 B_i 个已按顺序编号的状态以及运行模式和备用模式的两种模式；

状态所对应的容量按状态编号顺序依次递减，第 i 个元件 A_i 处于第 j 个状态下的容量为 C_{ij} ， $j=1, \dots, B_i$ ， j 表示状态序号；系统容量需求为 D ；

初始时刻，所有的元件均处于第 1 个状态，并且各个元件的工作模式按以下设定：设定前 k 个元件 A_i 处于运行模式，后 $(N-k)$ 个元件 A_i 处于备用模式，所述的 k 满足前 k 个元件的容量总和大于或等于系统容量需求 D ，且前 $(k-1)$ 个元件的容量总和小于系统容量需求 D 的要求。

3. 根据权利要求 1 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法，其特征在于：所述步骤 2) 是考虑系统中各个元件发生状态转移的可能性，计算发生可能的状态转移后系统的可用容量来构建多态决策图，直到发生状态转移后导致系统可用容量不能满足系统需求或系统中无能够发生状态转移的元件，则停止建立多态决策图。

4. 根据权利要求 3 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法，其特征在于：系统中的元件发生状态转移采用以下设定：设定一个元件的一次状态转移作为系统的一次状态转移，元件每发生一次状态转移是由当前编号顺序的状态转移到下一编号顺序的状态；将每个元件处于各自当前状态的容量相加作为系统当前的可用容量，若状态转移后所有处于运行模式的元件的容量总和小于系统容量需求 D ，则需将处于备用模式的元件按照编号顺序启动变换为运行模式。

5. 根据权利要求 3 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法, 其特征在于: 系统每发生一次状态转移后, 记录以下数据: 发生状态转移的元件编号和该元件在发生状态转移前的状态以及该状态的起始时间, 发生状态转移后系统需启动的处于备用模式的元件编号和该元件启动时所处在状态以及该状态的起始时间。

6. 根据权利要求 1 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法, 其特征在于: 所述步骤 2) 中, 设定系统初始运行时刻为 t_0 , 发生第 h 次状态转移的时刻为 t_h , 有 $t_0 < t_1 < \dots < t_h < \dots$, 以系统初始时刻所有元件的综合状态作为多态决策图的根节点, 以系统发生可能的状态转移后所有元件的综合状态作为多态决策图的节点, 以节点之间的状态转移作为支路, 连贯支路相连形成路径。

7. 根据权利要求 1 或 6 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法, 其特征在于: 所述步骤 2) 中, 多态决策图具体采用以下方式建立:

2.1) 在系统的初始时刻 t_0 , 系统未发生状态转移的系统状态作为多态决策图的根节点, 系统的可用容量 SC_0 为:

$$SC_0 = \sum_{i=1}^N C_{i,1}$$

2.2) 在系统发生第一次状态转移后的 t_1 时刻, 系统发生第一次状态转移有 $(N+1)$ 种可能, $(N+1)$ 种包括 N 个元件各自发生的一次状态转移或没有任何元件发生状态转移, 构建从 t_0 到 t_1 的每条支路, 各条支路下系统的可用容量 SC_1^g 采用以下公式计算获得:

$$SC_1^g = \begin{cases} \sum_{i=1, i \neq g}^N C_{i,1} + C_{g,2} & (g=1, \dots, N) \\ \sum_{i=1}^N C_{i,1} & (g=N+1) \end{cases}$$

其中, g 表示系统发生第一次状态转移的可能性序号, $g=N+1$ 表示没有任何元件发生状态转移;

2.3) 在系统发生第二次状态转移后的 t_2 时刻, 对于系统发生第一次状态转移后每一可能, 系统再发生第二次状态转移同样有 $(N+1)$ 种可能, 构建从 t_1 到 t_2 的每条支路, 各条支路下系统的可用容量 SC_2^h 采用以下公式计算获得:

$$SC_2^h = \begin{cases} \sum_{i=1, i \neq g, h}^N C_{i,1} + C_{g,2} + C_{h,2} (g, h = 1, \dots, N; h \neq g) \\ \sum_{i=1, i \neq g, h}^N C_{i,1} + C_{h,3} (h = g = 1, \dots, N) \\ \sum_{i=1, i \neq g}^N C_{i,1} + C_{g,2} (h = N+1) \end{cases}$$

其中, h 表示系统发生第二次状态转移的可能性序号, $h = N+1$ 表示没有任何元件发生状态转移;

2.4) 在系统发生第三次状态转移后的 t_3 时刻及以后时刻, 按照步骤 2.1)~2.3) 的规律方式进行类推计算, 直到所有元件均已处于运行模式并且所有元件的可用容量总和小于系统容量需求 D 或已无元件能够发生状态转移(即所有元件的状态均达到最大编号), 则停止建立多态决策图。

8. 根据权利要求 7 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法, 其特征在于: 所述步骤 2) 具体实施时, 若两个节点的状态转移信息相同, 则可将指向这两个节点的边合并, 即状态转移后的计算只需进行一次。

9. 根据权利要求 1 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法, 其特征在于: 所述步骤 3) 中, 多态决策图的第 e 条路径出现的概率是由路径所经过支路的出现概率 Pr_e^g 的乘积再乘以根节点出现的概率得到。

10. 根据权利要求 9 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法, 其特征在于: 所述步骤 3) 中, 元件 A_i 根据初始的工作模式和之后工作模式是否发生改变的情况分为三类, 分别为初始时刻处于运行模式的元件 A_i^y 、初始时刻处于备用模式并始终处于备用模式的元件 A_i^s 和初始时刻处于备用模式并之后启动转变为运行模式的元件 A_i^o ;

然后采用以下方式计算支路的出现概率 Pr_e^g :

(1) 在 t_h 时刻, 对于有元件发生状态转移且无备用元件启动的情况, 发生状态转移过程可能表示为 $A_i^y / A_i^s / A_i^o \rightarrow NA$, 具体含义为: $A_i^y \rightarrow NA$ 表示系统初始运行时在运行模式的元件 A_i^y 从状态 B_p^y 转移到状态 B_{p+1}^y , $A_i^s \rightarrow NA$ 表示系统初始运行时在备用模式的元件 A_i^s 从状态 B_p^s 转移到状态 B_{p+1}^s , $A_i^o \rightarrow NA$ 表示系统初始运行时在备用模式且状态转移后启动变换到运行模式的元件 A_i^o 从状态 B_p^o 转移到状态 B_{p+1}^o ;

对应的状态转移过程分为三类支路 $t_h \{A_i^y : B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y\}$ 、 $t_h \{A_i^s : B_p^s \rightarrow B_{p+1}^s\}$ 或 $t_h \{A_i^o : B_p^o \rightarrow B_{p+1}^o\}$, 支路 $t_h \{A_i^y : B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y\}$ 出现的概率 $\text{Pr}_e^g(T)$ 采用以下公式计算:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\int_{t_{h-1}}^T R_{B_p^y}^{A_i^y}(t_{h-1}-t_p) dF_{B_p^y}^{A_i^y}(t_h-t_p) R_{B_{p+1}^y}^{A_i^y}(T-t_h)}{R_{B_p^y}^{A_i^y}(T-t_h)}, t_{h-1} > t_p \\ \frac{\int_{t_{h-1}}^T dF_{B_p^y}^{A_i^y}(t_h-t_p) R_{B_{p+1}^y}^{A_i^y}(T-t_h)}{R_{B_p^y}^{A_i^y}(T-t_h)}, t_{h-1} = t_p \end{array} \right.$$

其中, T 为系统运行时间, t_{h-1} 为系统发生上一次状态转移的时刻 ($0 < t_1 < \dots < t_{h-1} < t_h < T$), t_p 为元件 A_i^y 在状态 B_p^y 的起始时间, $F_{B_p^y}^{A_i^y}(t_h-t_p)$ 为元件 A_i^y 从状态 B_p^y 转移到状态 B_{p+1}^y 的累积分布函数, 其中 (t_h-t_p) 表示系统发生第 h 次状态转移的时间与系统发生状态转移时所处的状态的时间之间的时间差, $R_{B_p^y}^{A_i^y}(T-t_h)$ 表示元件 A_i^y 从状态 B_p^y 转移到状态 B_{p+1}^y 的可靠性函数, $R_{B_{p+1}^y}^{A_i^y}(T-t_h)$ 表示元件 A_i^y 从状态 B_{p+1}^y 转移到状态 B_{p+2}^y 的可靠性函数, $R_{B_p^y}^{A_i^y}(t_{h-1}-t_p)$ 表示表示元件 A_i^y 从状态 B_p^y 转移到状态 B_{p+1}^y 的可靠性函数, $(T-t_h)$ 表示系统运行时间与系统发生第 h 次状态转移的时间之间的时间差, $(t_{h-1}-t_p)$ 表示系统发生上一次状态转移的时间与系统发生第 h 次状态转移的时间之间的时间差;

支路 $t_h \{A_i^s : B_p^s \rightarrow B_{p+1}^s\}$ 和支路 $t_h \{A_i^o : B_p^o \rightarrow B_{p+1}^o\}$ 的计算方式和支路 $t_h \{A_i^y : B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y\}$ 计算方式相同;

(2) 在 t_h 时刻, 对于有元件发生状态转移且有备用元件启动的情况, 发生状态转移过程可能表示为 $A_i^y / A_i^o \rightarrow (A_{j_1}^s, \dots, A_{j_r}^s)$, 具体含义为: 元件 A_i^y / 元件 A_i^o 从状态 B_p^y / B_p^o 转移到状态 B_{p+1}^y / B_{p+1}^o , 且有 r 个处于备用模式的元件 $A_{j_1}^s, \dots, A_{j_r}^s$ 从状态 $B_{p_r}^s$ 启动到状态 $B_{p_r}^o$;

对应的状态转移过程分为两类支路 $t_h \{A_i^y : B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y, A_{j_r}^s : B_{p_r}^s \rightarrow B_{p_r}^o\}$ 或 $t_h \{A_i^o : B_p^o \rightarrow B_{p+1}^o, A_{j_r}^s : B_{p_r}^s \rightarrow B_{p_r}^o\}$, 支路 $t_h \{A_i^y : B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y, A_{j_r}^s : B_{p_r}^s \rightarrow B_{p_r}^o\}$ 出现的概率 $\text{Pr}_e^g(T)$ 采用以下公式计算:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\int_{t_{h-1}}^T \prod_{u=1}^r R_{B_{p_u}^s}^{A_{j_u}^s}(t_h-t_{p_u}) R_{B_{p_u}^o}^{A_{j_u}^o}(T-t_h) R_{B_p^y}^{A_i^y}(t_{h-1}-t_p) dF_{B_p^y}^{A_i^y}(t_h-t_p) R_{B_{p+1}^y}^{A_i^y}(T-t_h)}{\prod_{i=1}^r R_{B_{p_u}^s}^{A_{j_u}^s}(T-t_{p_u}) R_{B_p^y}^{A_i^y}(T-t_p)}, t_{h-1} > t_p \\ \frac{\int_{\tau_{i-1}}^T \prod_{i=1}^r R_{B_{p_u}^s}^{A_{j_u}^s}(t_h-t_{p_u}) R_{B_{p_u}^o}^{A_{j_u}^o}(T-t_h) dF_{B_p^y}^{A_i^y}(t_h-t_p) R_{B_{p+1}^y}^{A_i^y}(T-t_h)}{\prod_{i=1}^r R_{B_{p_u}^s}^{A_{j_u}^s}(T-t_{p_u}) R_{B_p^y}^{A_i^y}(T-t_p)}, \tau_{h-1} = \tau_p \end{array} \right.$$

其中, r 为状态转移所启动变换的处于备用模式的元件个数, t_{p_u} 为启动变换的第 u 个处于备用模式的元件在状态 B_{p_u} 的起始时刻;

支路 $t_h \{A_i^o : B_p^o \rightarrow B_{p+1}^o, A_{j_r}^s : B_{p_r}^s \rightarrow B_{p_r}^o\}$ 的计算方式和支路 $t_h \{A_i^y : B_p^y \rightarrow B_{p+1}^y, A_{j_r}^s : B_{p_r}^s \rightarrow B_{p_r}^o\}$ 计算方式相同。

11. 根据权利要求 9 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法, 其特征在于: 所述步骤 3) 中的根节点出现的概率 $P_0(T)$ 为:

$$P_0(T) = \sum_{i=1}^k R_{B_1}^{A_i^y}(T) \cdot \sum_{i=k+1}^N R_{B_1}^{A_i^s}(T)$$

其中, k 为初始时刻系统中处于运行模式的元件总数, $R_{B_1}^{A_i^y}(T)$ 表示运行元件 A_i^y 从状态 B_1^y 转移到状态 B_2^y 的可靠性函数, $R_{B_1}^{A_i^s}(T)$ 表示备用元件 A_i^s 从状态 B_1^s 转移到状态 B_2^s 的可靠性函数。

12. 根据权利要求 1 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法, 其特征在于: 所述步骤 3) 中, 采用以下公式计算第 e 条路径出现的概率 P_e 为:

$$P_e(T) = P_0(T) \cdot \prod_g \text{Pr}_e^g(T)$$

其中, Pr_e^g 为第 e 条路径所包含的第 g 条支路的出现概率, $e=1, \dots, E$, e 表示多态决策图中的路径序号, E 表示多态决策图中的路径总数, $P_0(T)$ 表示根节点出现的概率。

13. 根据权利要求 1 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法, 其特征在于: 所述步骤 4) 中, 采用以下公式计算考虑备用元件启动的失效概率后, 第 e 条路径出现的概率 P'_e :

$$P'_e(T) = \prod_{l=1}^L (1 - q_e^l) \cdot P_e(T) = \prod_{l=1}^L (1 - q_e^l) \cdot P_0(T) \cdot \prod_g \text{Pr}_e^g(T)$$

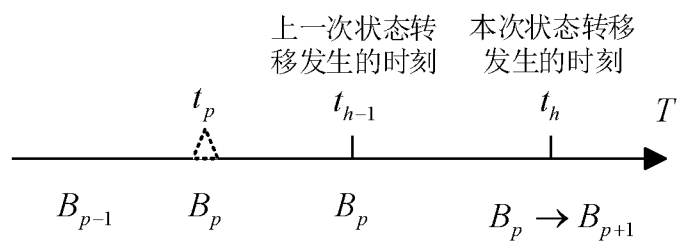
其中, L 为第 e 条路径中从备用模式启动变换的元件个数, q_e^l 为第 e 条路径中第 l 个处于备用模式的元件启动时的失效概率。

14. 根据权利要求 1 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法, 其特征在于: 所述步骤 5) 是将系统中每条路径出现的概率相加, 得到系统的可靠性, 公式如下:

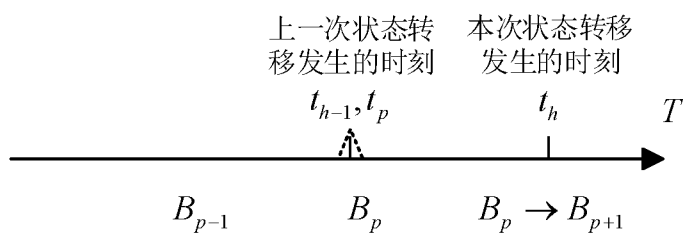
$$P_{\text{system}} = \sum_{e=1}^E P'_e$$

其中, P'_e 表示考虑备用元件启动的失效概率后的第 e 条路径出现的概率。

15. 根据权利要求 1 所述的一种基于多态决策图的含备用系统可靠性分析计算方法，其特征在于：在建立多态决策图后，对多态决策图进行分解，将系统发生相同状态转移次数的路径组成一个子图；对于每个子图，将其中每条路径的出现概率相加作为子图的发生概率，再将所有子图的发生概率与根节点的出现概率相加，得到系统的可靠性。



(1) 元件未发生连续状态转移



(2) 元件发生连续状态转移

图 1

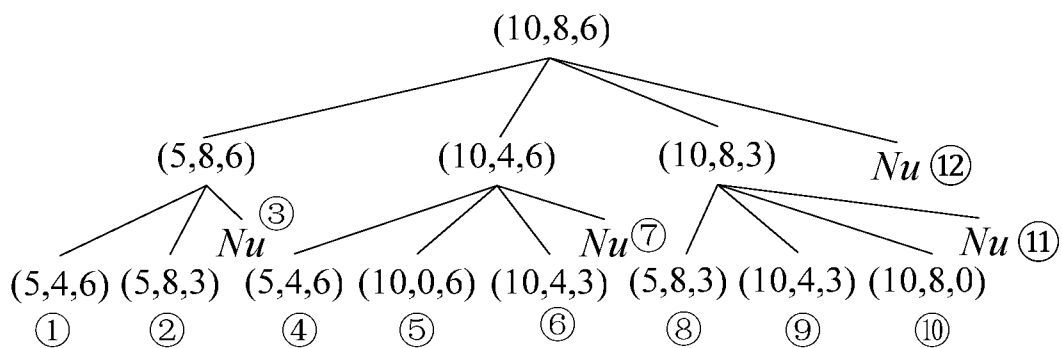


图 2

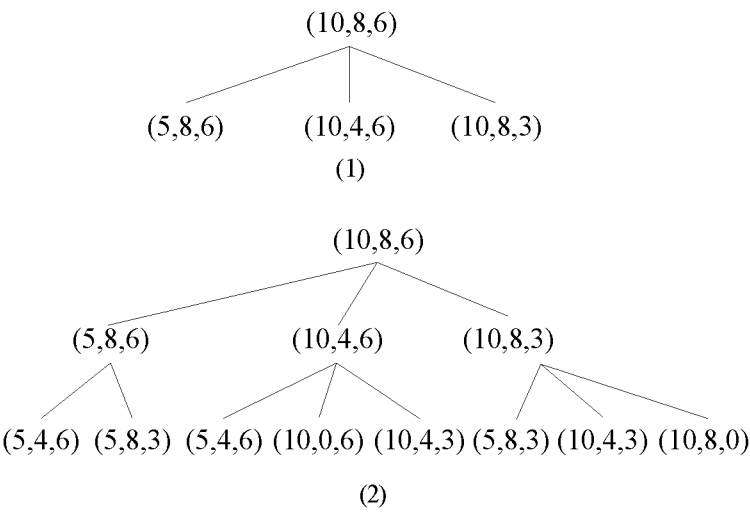


图 3

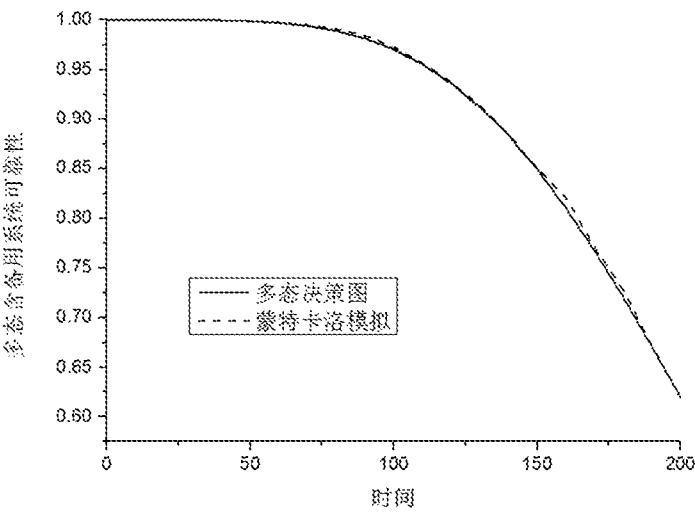


图 4

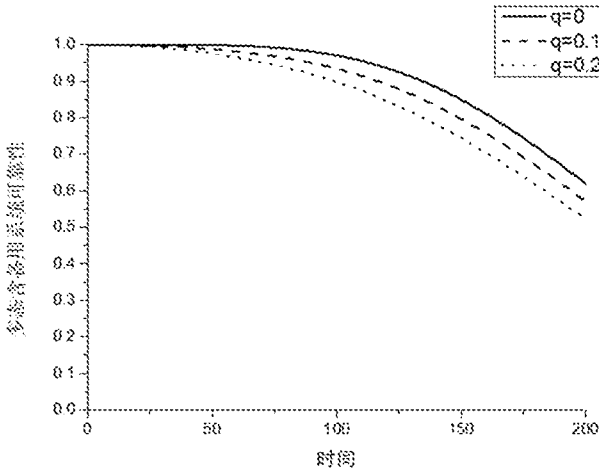


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/091661

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/50 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F 17/50

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNKI; DWPI; IEEE; Web of Science: 多态, 多, 状态, 决策图, 判决图, 备用, 冗余, 可靠, multi-state, multiple, state, decision diagram, decision graph, standby, backup, redundance, reliability

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	ZHAI, Q. et al., "Reliability of Demand-based Warm Standby Systems Subject to Fault Level Coverage", Applied Stochastic Models in Business and Industry, 31 December 2015 (31.12.2015), 31(3), pages 380-393	1-9, 11-15
A	CN 106056217 A (NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY), 26 October 2016 (26.10.2016), entire document	1-15
A	CN 105389434 A (ZHEJIANG NORMAL UNIVERSITY), 09 March 2016 (09.03.2016), entire document	1-15
A	翟庆庆等, "基于多值决策图的温储备系统可靠性建模方法", 北京航空航天大学学报, 31 March 2016 (31.03.2016), 42(3), pages 459-464, (ZHAI, Qingqing et al., Multi-valued Decision Diagram Based Reliability Modeling of Warm Standby Systems, Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics)	1-15

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 04 January 2018	Date of mailing of the international search report 05 February 2018
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer WU, Guangping Telephone No. (86-10) 62411829

International application No.
PCT/CN2017/091661

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2009)

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/091661

A. 主题的分类 G06F 17/50 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类		
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G06F 17/50 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNABS; CNKI; DWPI; IEEE; Web of Science: 多态, 多, 状态, 决策图, 判决图, 备用, 冗余, 可靠, multi-state, multiple, state, decision diagram, decision graph, standby, backup, redundancy, reliability		
C. 相关文件		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
X	Q, Zhai 等. "Reliability Of Demand-based Warm Standby Systems Subject To Fault Level Coverage" APPLIED STOCHASTIC MODELS IN BUSINESS AND INDUSTRY, 第31卷, 第3期, 2015年 12月 31日 (2015 - 12 - 31), 第380-393页	1-9, 11-15
A	CN 106056217 A (西北工业大学) 2016年 10月 26日 (2016 - 10 - 26) 全文	1-15
A	CN 105389434 A (浙江师范大学) 2016年 3月 9日 (2016 - 03 - 09) 全文	1-15
A	翟庆庆 等. "基于多值决策图的温储备系统可靠性建模方法" 北京航空航天大学学报, 第42卷, 第3期, 2016年 3月 31日 (2016 - 03 - 31), 第459-464页	1-15
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。		
* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 "T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件		
国际检索实际完成的日期		国际检索报告邮寄日期
2018年 1月 4日		2018年 2月 5日
ISA/CN的名称和邮寄地址		受权官员
中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10) 62019451		吴广平 电话号码 (86-10) 62411829

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2017/091661

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	106056217	A	2016年 10月 26日	无	
CN	105389434	A	2016年 3月 9日	无	

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)