

doi: 10.7690/bgzdh.2021.03.012

基于 Markov-UGF 的复杂装备可靠性评估建模

王伊婧心¹, 丛林虎¹, 刘宇², 李志强³(1. 海军航空大学基础学院, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 91206 部队, 山东 青岛 266109;
3. 中国人民解放军 91388 部队, 广东 湛江 524022)

摘要: 为研究多状态元件各状态之间的转移过程及其组合爆炸问题, 对复杂装备进行可靠性评估, 应用 Markov 过程建立各状态之间的转移过程, 通过拉式变换与反拉式变换, 确定元件处于各个状态的概率函数, 构建基于通用生成函数的多状态系统可靠性模型, 给出在不同维修方式下的可靠性指标, 并以控制单元为例进行仿真分析。结果可知: 相比于完全维修和不完全维修, 视情维修可以使多状态系统及元件维持在一个更高的可靠度水平。

关键词: 多状态系统; Markov 过程; 通用生成函数; 完全维修; 不完全维修; 视情维修

中图分类号: E92 **文献标志码:** A

Reliability Evaluation Modeling for Complex Equipment Based on Markov-UGF

Wang Yijingxin¹, Cong Linhu¹, Liu Yu², Li Zhiqiang³(1. College of Basic Theories, Navy Aviation University, Yantai 264001, China;
2. No. 91206 Unit of PLA, Qingdao 266109, China; 3. No. 91388 Unit of PLA, Zhanjiang 524022, China)

Abstract: For researching transition process between each state and combination explosion problem of multi-state component, reliability evaluation of complex equipment is carried out, and Markov process is used to establish the transition process between each state. The probability function of the component in each state can be used to determine by Laplace transforming and inverse Laplace transforming. Thus, reliability assessment models of multi-states components under different maintenance methods are established. The reliability indexes under different maintenance methods are given. Taking control unit as example, the simulation analysis is analyzed. From the results, it's obvious that conditional based maintenance maintains an element/system at a higher level of reliability comparing to that of perfect repair and imperfect repair.

Keywords: multi-state system; Markov process; universal generating function; perfect repair; imperfect repair; conditional based maintenance

0 引言

随着可靠性理论研究的深入, 研究人员发现: 元件除了正常工作与故障失效状态外, 还有处于二者之间的中间劣化状态, 元件的可靠性研究从二元状态拓展到了多状态领域^[1-5]。由多状态元件构成的系统称为多状态系统, 二元状态是多状态的特例。当元件的故障失效时间服从指数分布时, 应用 Markov 过程可以直观、全面地描述多状态元件各状态之间的转移过程。然而, 随着系统中元件数量的增加, Markov 过程面临着组合爆炸问题。文献[6]应用 Markov 过程与贝叶斯网络相结合的方法, 确定了复杂系统在视情维修条件下的可靠性建模问题, 但是, 在贝叶斯网络模型中条件概率值的确定具有一定的不确定性。为避免不确定性问题的引入, 文献[7]应用通用生成函数 (universal generating

function, UGF) 确定了多状态复杂系统的可靠性建模方法, 但是, 其系统结构相对简单且未详细考虑元件在不同维修条件下的状态概率; 因此, 笔者应用 Markov 过程分析多状态元件在不同维修方式下的状态转移过程, 为克服组合爆炸问题, 应用 UGF 确定复杂系统在不同性能水平下的可靠度函数。

1 基于 Markov 过程的元件多状态转移过程

元件多状态包括正常运行、中间退化和故障失效状态。根据不同的状态划分标准^[8-9], 中间退化状态可以分为一级退化、二级退化等多个状态。假设某元件具有 k 个状态, 表示为 $g = \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$, 对于任意状态等级 i , 有 $g_{i+1} \geq g_i$ 。元件当前状态函数为 $G(t)$, 有 $G(t) \in g$, 性能水平函数为 $W(t)$, $W(t) \in w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$, 对于满足使用要求的元件,

收稿日期: 2020-10-20; 修回日期: 2020-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(51605487)

作者简介: 王伊婧心(1987—), 女, 山东人, 学士, 助教, 从事装备综合保障、装备管理研究。E-mail: 115474312@qq.com。

满足条件： $G(t) \geq W(t)$ 。

1.1 无维修条件下的状态转移过程

定义一个离散状态连续时间随机过程 $\{X(t)|t \geq 0\}$, $X(t) \in \{1, 2, \dots, K\}$, 时间参数 t 连续取值, $t \in [0, \infty)$ 。对于 $t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n < t$, 条件概率分布函数满足

$$\Pr\{X(t_n) = x_n | X(t_{n-1}) = x_{n-1}, \dots, X(t_1) = x_1, X(t_0) = x_0\} = \Pr\{X(t_n) = x_n | X(t_{n-1}) = x_{n-1}\} \quad (1)$$

则随机过程 $\{X(t)|t \geq 0\}$ 称为 Markov 过程^[10-11]。

图 1 为多状态元件发生渐变劣化和突变劣化的状态转移过程, 以 λ 表示失效率。在初始时刻, 元件处于完好无损状态 k , 随着时间推移可能发生从状态 k 到 $k-1$ 的渐变劣化过程, 或者发生从状态 k 到状态 $i(i < k-1)$ 的突变劣化过程。

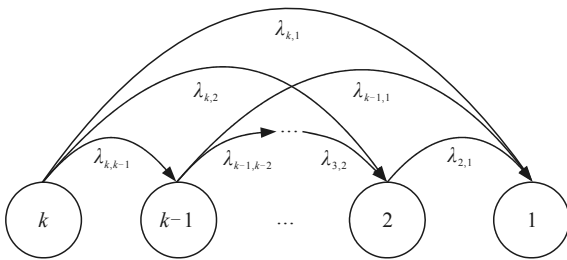


图 1 无维修条件下元件状态转移模型

根据元件的状态转移关系, 可以建立如下的微分方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_k(t)}{dt} &= -p_k(t) \sum_{e=1}^{k-1} \lambda_{k,e} \\ \frac{dp_i(t)}{dt} &= \sum_{e=i+1}^k \lambda_{e,i} p_e(t) - p_i(t) \sum_{e=1}^{i-1} \lambda_{i,e}, \quad i = 2, 3, \dots, k-1 \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= \sum_{e=2}^k \lambda_{e,1} p_e(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $\lambda_{i,j}$ 为元件从状态 i 转移到状态 j 的劣化密度函数； $p_i(t)$ 为元件处于状态 i 的概率函数。

微分方程满足初始条件：

$$p_k(0) = 1, p_{k-1}(0) = p_{k-2}(0) = \dots = p_1(0) = 0 \quad (3)$$

1.2 考虑维修因素的状态转移过程

当元件为多状态可修元件时, 除了发生渐变劣化和突变劣化的状态转移过程外, 还包括相应的最小维修和较大维修, 以 μ 表示维修率, 如图 2 所示：最小维修, 使元件从状态 i 转移到状态 $i+1$ ；较大维修, 使元件从状态 i 转移到状态 $k(k > i+1)$ 。在任意时刻 t , 元件处于状态 i , 下一时刻元件可能发生到状态 $j(j \neq i)$ 的转移, 或者继续停留在状态 i 。

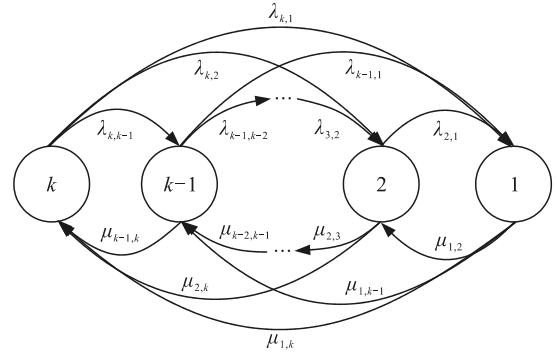


图 2 考虑维修因素的元件状态转移模型

由图可知：当元件发生故障失效时, 即处于状态 1, 完全维修可以使元件通过维修从状态 1 回到完好状态 k , 不完好维修可以使元件通过维修从状态 1 回到任一上级状态 $i(1 < i \leq k)$ 。对应的微分方程分别为：

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_k(t)}{dt} &= \mu_{1,k} p_1(t) - p_k(t) \sum_{e=1}^{k-1} \lambda_{k,e} \\ \frac{dp_i(t)}{dt} &= \sum_{e=i+1}^k \lambda_{e,i} p_e(t) - p_i(t) \sum_{e=1}^{i-1} \lambda_{i,e}, \quad i = 2, 3, \dots, k-1 \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= -\mu_{1,k} p_1(t) + \sum_{e=2}^k \lambda_{e,1} p_e(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_k(t)}{dt} &= \mu_{1,k} p_1(t) - p_k(t) \sum_{e=1}^{k-1} \lambda_{k,e} \\ \frac{dp_i(t)}{dt} &= \mu_{1,i} p_1(t) + \sum_{e=i+1}^k \lambda_{e,i} p_e(t) - p_i(t) \sum_{e=1}^{i-1} \lambda_{i,e} \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= -p_1(t) \sum_{e=2}^k \mu_{1,e} + \sum_{e=2}^k \lambda_{e,1} p_e(t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $\mu_{j,i}$ 为元件从状态 j 转移到状态 i 的维修密度函数。

对于大多数元件来说, 不可能修复如新。立足于故障机理分析, 视情维修通过对出现性能退化的元件进行维修, 可以使元件从退化状态 j 恢复到较好的任一状态 $i(j < i \leq k)$ 。根据元件的状态转移关系, 建立如下的微分方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_k(t)}{dt} &= \sum_{e=1}^{k-1} \mu_{e,k} p_e(t) - p_k(t) \sum_{e=1}^{k-1} \lambda_{k,e} \\ \frac{dp_i(t)}{dt} &= \sum_{e=i+1}^k \lambda_{e,i} p_e(t) + \sum_{e=1}^{i-1} \mu_{e,i} p_e(t) - p_i(t) \left(\sum_{e=1}^{i-1} \lambda_{i,e} + \sum_{e=i+1}^k \mu_{i,e} \right) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= \sum_{e=2}^k \lambda_{e,1} p_e(t) - p_1(t) \sum_{e=2}^k \mu_{1,e} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

2 基于 UGF 的多状态系统可靠性模型构建

2.1 向量通用生成函数定义

假设 $\mathbf{G} = (G_1, G_2, \dots, G_m)$ 为 m 维离散随机向量, 其

概率分布分别由集合 g 和 q 表示： g 为离散随机向量 G 的 M 个可能取值， q 为 M 个取值对应的概率，则有

$$g = \{g_1, g_2, \dots, g_M\} \quad (7)$$

式中： $g_l = (g_{l,1}, g_{l,2}, \dots, g_{l,m})$ ， $l = 1, 2, \dots, M$ 。

$$q = \{q_1, q_2, \dots, q_M\} \quad (8)$$

式中： $q_l = \Pr\{G = g_l\}$ ， $\sum_{l=1}^M q_l = 1$ 。离散随机向量 G 的向量通用生成函数为

$$U_G(z) = \sum_{l=1}^M q_l z^{g_l} \quad (9)$$

2.2 向量通用生成函数的运算

令 $H = (H_1, H_2, \dots, H_{m'})$ 为 m' 维离散随机向量，概率分布可用集合 h 和 p 描述，其中， $h = \{h_1, h_2, \dots, h_M\}$ 表示 H 所有可能的 M' 个取值， $h_k = (h_{k,1}, h_{k,2}, \dots, h_{k,m'})$ ， $p = \{p_1, p_2, \dots, p_{M'}\}$ 表示每个取值对应的概率。则向量通用生成函数^[12-13]为：

$$U_H(z) = \sum_{k=1}^{M'} p_k \cdot z^{h_k} \quad (10)$$

令 m'' 维离散随机变量 $D = (D_1, D_2, \dots, D_{m''})$ 为 G 和 H 的函数，即 $D = f(G, H)$ ，其中：

$$D_i = f_i(G_{r_1(1)}, \dots, G_{r_1(a_i)}, H_{s_1(1)}, \dots, H_{s_1(b_i)}) \quad (11)$$

可见， D_i 为离散随机向量 G 的第 $r_1(1), \dots, r_1(a_i)$ 个分量与离散随机向量 H 的第 $s_1(1), \dots, s_1(b_i)$ 个分量的函数。 D 的向量通用生成函数可以通过复合运算确定

$$U_D(z) = \Omega(U_G(z), U_H(z)) = \sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^{M'} q_l \cdot p_k \cdot z^{f(g_l, h_k)} \quad (12)$$

其中：

$$f(g_l, h_k) = (f_1(g_{l,r_1(1)}, \dots, g_{l,r_1(a_1)}, h_{k,s_1(1)}, \dots, h_{k,s_1(b_1)}), \dots, f_{m''}(g_{l,r_{m''}(1)}, \dots, g_{l,r_{m''}(a_{m''})}, h_{k,s_{m''}(1)}, \dots, h_{k,s_{m''}(b_{m''})})) \quad (13)$$

当 $m = m' = m''$ 时，随机向量维数相同，式(11)为 $D_i = f_i(G_i, H_i)$ 时，式(13)简化为

$$f(g_l, h_k) = (f_1(g_{l,1}, h_{k,1}), \dots, f_m(g_{l,m}, h_{k,m})) \quad (14)$$

2.3 多性能参数多状态系统可靠性分析

对于大型复杂系统，一般可以通过串并联逻辑关系进行简化。如图 3 所示，其可靠性分析的基本思路^[14-15]为：首先，根据元件的技术状态和处于各个状态的概率函数确定通用生成函数；然后，根据

元件之间的冗余设置确定分系统的通用生成函数；最后，通过系统结构函数确定多状态系统的可靠度指标。

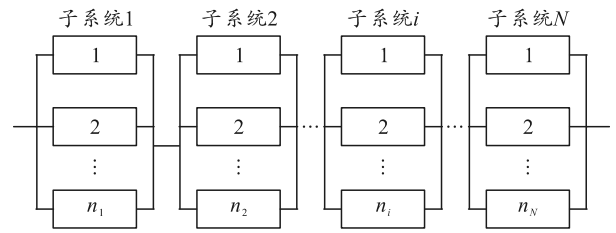


图 3 多状态串并联系统

2.3.1 确定元件向量通用生成函数

分系统 i 的元件 j 有 M_{ij} 个状态， t 时刻元件的状态性能为 $g_{ij}(t) = \{g_{ij1}(t), g_{ij2}(t), \dots, g_{ijM_{ij}}(t)\}$ ，对应状态概率为 $q_{ij}(t) = \{q_{ij1}(t), q_{ij2}(t), \dots, q_{ijM_{ij}}(t)\}$ 。向量通用生成函数为

$$U_{ij}(z, t) = \sum_{l=1}^{M_{ij}} q_{ijl}(t) z^{g_{ijl}(t)} \quad (15)$$

2.3.2 确定分系统向量通用生成函数

分系统 i 由 n_i 个元件并联组成，分系统性能与元件性能之间的关系表示为：

$$X_i = f(G_{i1}, G_{i2}, \dots, G_{in_i}) \quad (16)$$

式中： X_i 为分系统 i 的性能； $G_{i1}, G_{i2}, \dots, G_{in_i}$ 为元件性能。

分系统 i 的向量通用生成函数为

$$U_i(z, t) = \Omega(U_{i1}(z, t), \dots, U_{in_i}(z, t)) = \sum_{k=1}^{M_i} q_{ik}(t) z^{x_{ik}(t)} \quad (17)$$

式中： M_i 为分系统 i 的状态数； $\{x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{iM_i}(t)\}$ 为 t 时刻分系统 i 的状态性能； $\{q_{i1}(t), q_{i2}(t), \dots, q_{iM_i}(t)\}$ 为对应的概率。

2.3.3 确定多状态系统的可靠度

假设系统由 N 个分系统串联组成，系统结构函数为

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (18)$$

式中： Y 为系统性能； X_1, X_2, \dots, X_N 为分系统性能。

当系统结构函数已知时，系统向量通用生成函数为

$$U(z, t) = \Omega(U_1(z, t), \dots, U_N(z, t)) = \sum_{s=1}^{M_{\text{sys}}} q_s(t) z^{y_s(t)} \quad (19)$$

式中： M_{sys} 为系统状态数； $\{y_1(t), \dots, y_{M_{\text{sys}}}(t)\}$ 为 t 时

刻系统的状态性能； $\{q_1(t), \dots, q_{M_{\text{sys}}}(t)\}$ 为对应的状态概率。

定义运算符如下：

$$\delta(U(z, t), w) = \delta\left(\sum_{s=1}^{M_{\text{sys}}} q_s(t) z^{y_s(t)}, w\right) = \sum_{s=1}^{M_{\text{sys}}} \delta(q_s(t) z^{y_s(t)}, w) \quad (20)$$

式中， $\delta(q_s(t) z^{y_s(t)}, w) = \begin{cases} q_s(t), & y_s(t) \geq w \\ 0, & y_s(t) < w \end{cases}$ 。其中： w 为

系统的最小性能需求，当系统的状态性能不小于 w 时，系统可靠；当系统的状态性能小于 w 时，系统不可靠。在时刻 t 系统的可靠度为

$$R(t) = \delta(U(z, t), w) = \sum_{y_s(t) \geq w} q_s(t) \quad (21)$$

3 案例分析

某控制单元由多种电子元器件和机械部件构成，结构复杂、故障模式多样，在复杂运行环境条件下承受多种环境应力的冲击，性能指标随时间而逐渐退化。现以该控制单元电源出现故障为顶事件建立如图 4 所示的故障树模型。顶事件 TE 失效由 sys1、sys2 和 sys3 失效 3 个中间事件引起，而 sys1 由元件 C1、元件 C2 组成，sys2 由元件 C3、元件 C6、元件 C4 和元件 C5 组成，sys3 由元件 C7 和元件 C8 组成，各个元件的状态数、失效率、维修率、失效率比率和维修率比率如表 1 所示。

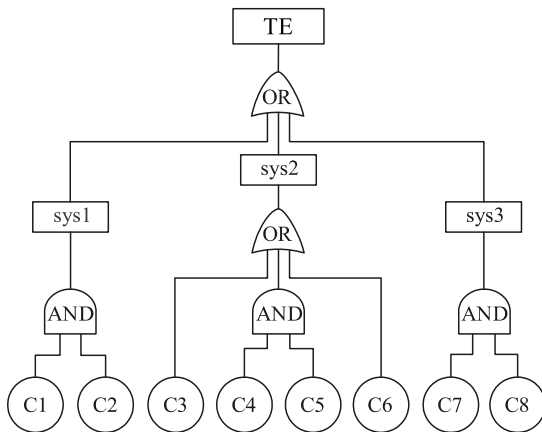


图 4 控制单元结构模型

表 1 控制单元元件年度参数 %

符号	状态数	失效率	失效率比率	维修率	维修率比率
C1	4	4.5	6:3:1	80	7:2:1
C2	3	5.0	7:3	85	8:2
C3	3	2.0	8:2	110	7:3
C4	2	3.5	—	80	—
C5	3	4.0	9:1	90	8:2
C6	4	3.0	7:2:1	120	7:2:1
C7	3	2.5	7:3	100	6:4
C8	3	2.5	7:3	100	6:4

对于 4 状态元件而言，失效率比率为 $\lambda_{4,3} : \lambda_{4,2} :$

$\lambda_{4,1}$ ，维修率比率为 $\mu_{1,4} : \mu_{1,3} : \mu_{1,2}$ ；对于 3 状态元件而言，失效率比率为 $\lambda_{3,2} : \lambda_{2,1}$ ，维修率比率为 $\mu_{1,3} : \mu_{1,2}$ 。

根据图 2 与式(6)可以建立 3 状态元件的状态转移 Markov 过程以及对应的微分方程组。现以元件 C2 为例，其状态转移过程和微分方程分别如图 5(a)和式(22)所示。同理，可以建立 4 状态元件的状态转移 Markov 过程以及对应的微分方程组，如图 5(b)和式(23)所示。

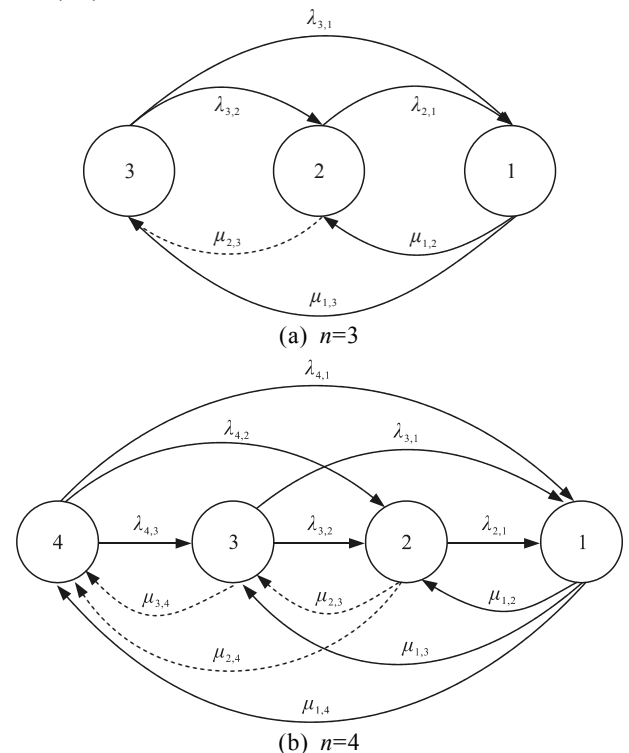


图 5 多状态元件状态转移过程

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_3(t)}{dt} &= -(\lambda_{3,2} + \lambda_{3,1})p_3(t) + \mu_{1,3}p_1(t) + \mu_{2,3}p_2(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} &= -(\lambda_{2,1} + \mu_{2,3})p_2(t) + \lambda_{3,2}p_3(t) + \mu_{1,2}p_1(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= -(\mu_{1,2} + \mu_{1,3})p_1(t) + \lambda_{3,1}p_3(t) + \lambda_{2,1}p_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_4(t)}{dt} &= -(\lambda_{4,3} + \lambda_{4,2} + \lambda_{4,1})p_4(t) + \mu_{3,4}p_3(t) + \mu_{2,4}p_2(t) + \mu_{1,4}p_1(t) \\ \frac{dp_3(t)}{dt} &= \lambda_{4,3}p_4(t) - (\lambda_{3,2} + \lambda_{3,1} + \mu_{3,4})p_3(t) + \mu_{2,3}p_2(t) + \mu_{1,3}p_1(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} &= \lambda_{4,2}p_4(t) + \lambda_{3,2}p_3(t) - (\lambda_{2,1} + \mu_{2,3} + \mu_{2,4})p_2(t) + \mu_{1,2}p_1(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= \lambda_{4,1}p_4(t) + \lambda_{3,1}p_3(t) + \lambda_{2,1}p_2(t) - (\mu_{1,2} + \mu_{1,3} + \mu_{1,4})p_1(t) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

经过拉式变换与反拉式变换，确定多状态元件的可靠度值。作为对比，建立 3 状态元件和 4 状态元件在完全维修与不完全维修条件下的状态转移过程以及对应的微分方程，经过拉式变换与反拉式变换即可确定元件的可靠度曲线。从图 6 可以看出：在有维修的情况下，多状态元件的可靠度随着时间逐渐趋向于平稳；但是，视情维修条件下的可靠度高于完全维修条件下的可靠度，而完全维修条件下的可靠度又高于不完全维修条件下的可靠度，与实际情况相吻合。

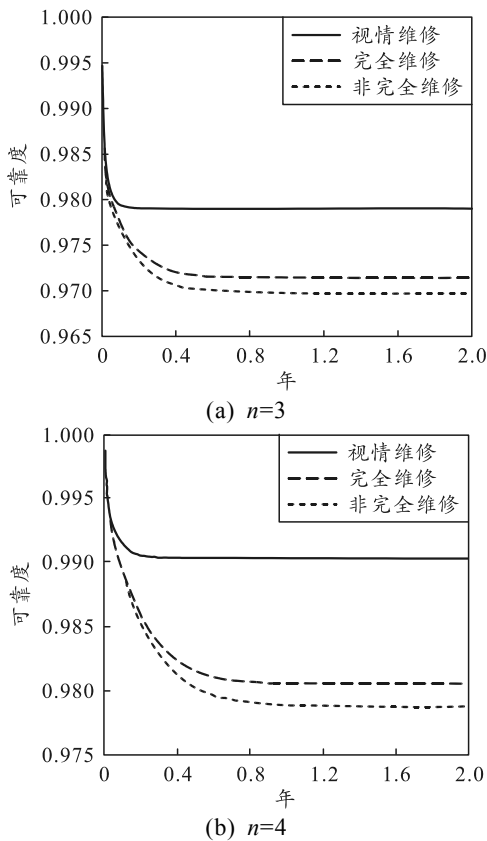


图 6 多状态元件可靠度

对控制单元中的 UGF 进行两两合成，首先将元件 C1 和元件 C2 的 UGF 合并成 $U_1(z)$ ，类似地，将元件 C4 和元件 C5 的 UGF 合并成 $U_2(z)$ ，元件 C7 和元件 C8 的 UGF 合并成 $U_3(z)$ ，对应的 UGF 分别如式(24)–(26)所示。根据串联系统元件 UGF 合成规则确定整个控制单元的 UGF，如式(27)所示。

$$U_1(z,t) = \Omega_{f_{par}}(p_{11}z^1 + p_{12}z^2 + p_{13}z^3 + p_{14}z^4, p_{21}z^1 + p_{22}z^2 + p_{23}z^3); \quad (24)$$

$$U_2(z,t) = \Omega_{f_{par}}(p_{41}z^1 + p_{42}z^2, p_{51}z^1 + p_{52}z^2 + p_{53}z^3); \quad (25)$$

$$U_3(z,t) = \Omega_{f_{par}}(p_{71}z^1 + p_{72}z^2 + p_{73}z^3, p_{81}z^1 + p_{82}z^2 + p_{83}z^3)。 \quad (26)$$

$$U(z,t) = \Omega(U_1(z,t), u_3(z,t), U_2(z,t), u_6(z,t), U_3(z,t))。 \quad (27)$$

如图 7 所示，在控制单元的 UGF 函数中代入各个元件的可靠度指标与状态等级，即可确定控制单元的可靠度指标。由于视情维修可以根据控制单元的实时检测数据判定单元的运行状态，一旦控制单元发生退化或者失效，就可以立即采取维修措施，确保控制单元有很高的使用可靠度。完全维修是在元件发生失效之后采取的措施，相比于视情维修存在一定的滞后性，此外，完全维修在理想条件下可以实现。应用文献[5]中的方法可以得到类似的结论，也证明了笔者所用方法的有效性与正确性。

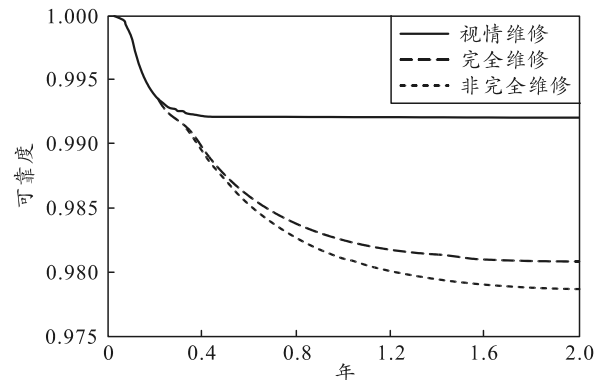


图 7 不同维修方式下控制单元的可靠度

4 结论

通过求解 Markov 过程的状态转移微分方程，可以确定元件的通用生成函数，进而根据复杂系统元件之间的串并联逻辑关系确定系统的通用生成函数。该方法避免了状态空间组合爆炸问题，此外，应用 Matlab 或者 R 程序语言，可以轻松地确定系统处于不同性能水平的特征函数。相比于贝叶斯网络模型，通用生成函数既避免了根据专家经验确定条件概率值这一繁琐过程，又避免了引入认知不确定性。

参考文献：

- [1] ANATOLY L, DAVID E, DAVID L, et al. A multi-state Markov model for a short-term reliability analysis of a power generating unit[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2012, 98: 1-6.
- [2] 李志强, 徐廷学, 董琪, 等. 基于 Markov 模型的多状态不可修元件可靠性评估[J]. 电光与控制, 2017, 24(9): 58-63.
- [3] ENRICO Z, LI Y F. A multi-state model for the reliability assessment of a distributed generation system via universal generating function[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2012, 106: 28-36.
- [4] 李志强, 徐廷学, 石中奇, 等. 基于 Markov 过程的多

- 状态可修元件可靠性建模[J]. 航空兵器, 2018, 25(5): 79-84.
- [5] 徐廷学, 李志强, 顾钧元, 等. 基于多状态贝叶斯网络的导弹质量状态评估[J]. 兵工学报, 2018, 39(2): 2240-2250.
- [6] 李志强, 徐廷学, 顾钧元, 等. 视情维修条件下的多状态控制单元可用性建模与分析[J]. 兵工学报, 2017, 38(11): 2240-2250.
- [7] BENTOLHODA J, LANCE F. A universal generating function-based multi-state system performance model subject to correlated failures[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2016, 152: 16-27.
- [8] ANATOLY L, ILIA F, YI D. Multi-state System Reliability Analysis and Optimization for Engineers and Industrial Managers[M]. New York: Springer London Dordrecht Heidelberg, 2010: 40-47.
- [9] ROBERTAS A, TOMAS I. Application of Bayesian methods for age-dependent reliability analysis[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2014, 30: 121-132.
- *****
- (上接第 47 页)
- [10] BITENCOURT L O, POGORZELSKI G, DE FREITAS R M, et al. A CFD-based analysis of the 14-Bis aircraft aerodynamics and stability[J]. Journal of Aerospace Technology and Management, 2011, 3(2): 137-146.
- [11] MIRZAEI M, KARIMI M H, VAZIRI M A. An investigation of a tactical cargo aircraft aft body drag reduction based on CFD analysis and wind tunnel tests[J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 23(1): 263-269.
- [12] EDDY P, NATARAJAN A, DHANIYALA S. Subisokinetic sampling characteristics of high speed aircraft inlets: A new CFD-based correlation considering inlet geometries[J]. Journal of Aerosol Science, 2006, 37(12): 1853-1870.
- [13] JUNG S K, SHIN S, MYONG R S, et al. An efficient CFD-based method for aircraft icing simulation using a reduced order model[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(3): 703-711.
- [14] 许可, 章荣平, 张刘. 大飞机缝翼滑轨影响研究[J]. 空气动力学学报, 2016, 34(3): 368-372.
- [15] 李永平, 贾慈力. 飞机侧滑角静压差准确测量仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(10): 82-85.
- [10] 耿岩, 郭霖瀚, 王寄明, 等. 考虑休眠的两部件系统可用度马氏建模方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 1996-2003.
- [11] 慕法群, 周炳海. 基于 Markov 过程的两级污水排放系统的预防性维护建模[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(2): 373-379.
- [12] 朱达伟, 周金宇, 庄百亮. 结构可靠性优化的通用生成函数-序列优化与可靠性评估方法[J]. 兵工学报, 2020, 41(2): 398-405.
- [13] 任博, 吕震宙, 李贵杰, 等. 基于通用生成函数的系统寿命可靠性分析[J]. 航空学报, 2013, 34(11): 2550-2556.
- [14] 潘刚, 尚朝轩, 蔡金燕, 等. 基于 Semi-Markov 模型的多态系统不完全维修决策研究[J]. 航空学报, 2017, 38(2): 320178.
- [15] 史跃东, 陈砚桥, 金家善. 舰船装备多状态可修复系统可靠性通用生成函数解算方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(9): 2215-2220.
- [16] 闫万方, 吴江浩, 张艳来. 分布式推进关键参数对 BWB 飞机气动特性影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(6): 1055-1065.
- [17] 薛帮猛, 张文升, 张志雄. 民用飞发集成构型中机翼多目标优化设计[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(6): 941-948.
- [18] 方自力, 刘超, 蒙泽海. 试验机机翼下挂载吊舱气动稳定性评估方法[J]. 飞行力学, 2015, 33(1): 75-82.
- [19] 董琦, 宗群, 张超凡. 强干扰影响下基于干扰补偿的大飞机智能自适应控制[J]. 中国科学, 2018, 48(3): 248-263.
- [20] 岳奎志, 齐红德, 柳文林. 超声速隐身歼轰机概念设计数值模拟[J]. 海军航空工程学院学报, 2014, 29(5): 448-454.
- [21] YUE K Z, CHENG L L, ZHANG T Y, et al. Numerical Simulation of the Aerodynamic Influence of an Aircraft on the Hose-Refueling System during Aerial Refueling Operations[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 49(1): 34-40.
- [22] YUE K Z, TIAN Y F, LIU H, et al. Conceptual design and RCS property research of three-surface strike fighter[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2014, 15(3): 309-319.