

多阶段任务系统的备件保障度模型研究

张 涛¹, 高大化², 郭 波¹, 武小悦¹, 谭跃进¹

(1. 国防科技大学信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073;

2. 空军工程大学, 陕西 西安 710051)

摘要: 多阶段任务系统是指系统在连续完成多个阶段任务过程中,任务成功与部件的关系不断变化的系统. 定义了任务结构函数来表示任务成功与部件关系,同时给出了多阶段任务系统的备件保障度模型,该模型可以计算任意任务结构函数变化的多阶段系统的备件保障度,为任务前确定备件携行量提供决策依据.在该模型的基础上,给出了一个计算 k 阶段变化的 k/N 系统备件保障度的实例.

关键词: 多阶段任务系统; 备件; 备件保障度; k/N 系统; 任务结构函数

中图分类号: O213; T761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-5781(2006)01-0086-06

Spare availability model for phased mission systems

ZHANG Tao¹, GAO Da-hua², GUO Bo¹, WU Xiao-yue¹, TAN Yue-jin¹

(1. School of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Phased-mission system is a kind of system whose system configuration, success criteria and component behavior may vary from phase to phase. This paper defines the relation between system configuration and success criteria as mission configuration function and presents a spare availability mathematical model for phased mission system. Using this model, we can make a decision on the quantity of spare part in hand when the system will implement different phased mission. This paper gives an example on a k -out-of- N system with different k in different phases.

Key words: phased mission system; spare parts; spare availability; k -out-of- N system; mission configuration function

0 引 言

多阶段任务系统是指系统在连续完成多个阶段任务过程中,任务成功与部件的关系不断变化的系统.随着装备技术的发展及功能任务的多样化、多用途化,该类系统不断增多.例如某有源相控阵雷达(active phased array radar, APAR)上有四

个面,每个面由许多功能相同的传输与接收部件组成的,是一个热贮备冗余 $k/N(G)$ 系统(后面简称 k/N 系统),在满足基本要求的情况下,正常工作部件数量与全部部件数量的比值影响雷达的分辨率,当该雷达要完成多个连续的灵敏度要求不同的阶段任务时,该系统就是一种多阶段任务系统.备件保障度是指在指定的工作任务时间内,当

部件失效后,能够立即获得相应数量备件的概率.对于多阶段任务系统,备件保障度不仅仅取决于备件的数量和工作时间,还取决于每个阶段的任务成功与部件的关系,所以有必要研究多阶段任务系统的备件保障度模型.

在备件保障度和多阶段任务系统可靠性分析方面,国内外许多学者已经作了一些研究,文献[1,2]通过马尔可夫过程和更新过程给出了系统的最优战略储备量计算方法;文献[3]分析了给定部件失效的情况下,单个备件的订货和库存费用问题;文献[4~6]则分析了 k/N 系统在考虑初始备件数、维修策略以及维修能力等条件下的系统可用度模型.这些文献虽然给出了备件决策模型和有限备件的系统可靠性模型,但是研究的对象是固定结构的系统,而不是针对多阶段任务系统.文献[7~10]虽然基于马尔可夫过程^[7]、故障树^[8]、BDD^[9,10]等给出了一些计算多阶段任务系统可靠度的模型,但是并没有考虑备件对系统任务过程的影响;文献[11]给出了一种基于 BDD 的面向任务备件需求量预测算法,但该算法假设同一个部件在任务过程中最多失效一次.本文研究了多阶段任务系统的备件保障度模型,为这个领域的研究开展了有意义的探索.

1 问题描述

首先参考系统结构函数的概念,把每个阶段任务成功与部件关系定义为任务结构函数 F .同时引入路集与最小路集到任务结构函数中.举例说明,设系统共包含 4 个部件,分别表示为 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 ,系统在完成某阶段任务时要求 C_1 必须正常工作, C_2 、 C_3 至少有一个正常工作, C_4 无论什么状态都不影响任务成功,仍用 C_i 表示部件 C_i 的正常工作状态, \bar{C}_i 表示部件 C_i 的故障状态.则此时的任务结构函数可以表示为 $F = C_1 C_2 + C_1 C_3$, F 的最小路集为 (C_1, C_2) 、 (C_1, C_3) , F 的路集为 (C_1, C_2) 、 (C_1, C_3) 、 (C_1, C_2, C_3) 、 (C_1, C_3, C_4) 、 (C_1, C_2, C_4) 、 (C_1, C_2, C_3, C_4) .

现对要讨论的问题进行描述:设系统包含相

同部件数为 N (这些部件可能包含在多类功能单元中),部件失效时间服从参数为 λ 的指数分布且相互独立,部件可进行热更换,即系统不需要停止工作就可以更换备件,更换时间忽略.任务期间所有部件都工作,当且仅当部件失效后影响任务顺利进行时才更换备件,且采取最少备件消耗的备件更换策略,即存在多种备件更换方案可使系统恢复工作的情况下,选择备件消耗最小的方案.设系统需要连续完成 n 个阶段任务,各阶段任务的工作时间分别为 T_1, T_2, \dots, T_n ,任务结构函数分别为 F_1, F_2, \dots, F_n .求解在给定初始备件数 X 的情况下,系统在完成这次多阶段任务时的备件保障度 P .

2 求解算法

2.1 符号与关系定义

系统状态 $S = (s_1, s_2, \dots, s_N)$ 即为系统 N 个部件的状态组合,不妨设 s_i, s_j 为 S 中任意两个变量,分别表示第 i 和 j 个部件的状态, $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N, s_i \in \{0, 1\}, s_j \in \{0, 1\}$,其中 0 表示部件处于失效状态,1 表示部件处于正常状态, $0 = (0, 0, \dots, 0), 1 = (1, 1, \dots, 1)$ 分别表示系统处于的部件全部失效状态和部件全部正常状态.

$C(S)$ ——处于系统状态 S 中所有处于正常状态的部件集合, $C(S) = \{C_i \mid s_i = 1\}$,例如:当 $S = (1, 0, 1, 1)$ 时, $C(S) = \{C_1, C_3, C_4\}$.

$|S|$ —— (s_1, s_2, \dots, s_N) 中部件状态等于 1 的个数,例如:当 $S = (1, 0, 1, 1)$ 时,则 $|S| = 3, |0| = 0, |1| = N$.

设 s_i, s_j 为任意两个部件状态变量,定义部件状态变量的加法与减法运算为

$$s_i + s_j = \begin{cases} 1, & s_i = 1, s_j = 1 \text{ 或 } s_i = 0, \\ & s_j = 1 \text{ 或 } s_i = 1, s_j = 0 \\ 0, & s_i = 0, s_j = 0 \\ 0, & s_i = 1, s_j = 1 \text{ 或 } s_i = 0, \\ s_i - s_j = \begin{cases} s_j = 1 \text{ 或 } s_i = 0, s_j = 0 \\ 1, & s_i = 1, s_j = 0 \end{cases} \end{cases}$$

设 $S^{(i)}$ 和 $S^{(j)}$ 为任意两个系统状态变量, 定义系统状态变量的加法与减法运算定义为

$$S^{(i)} + S^{(j)} = (s_1^{(i)} + s_1^{(j)}, s_2^{(i)} + s_2^{(j)}, \dots, s_N^{(i)} + s_N^{(j)})$$

$$S^{(i)} - S^{(j)} = (s_1^{(i)} - s_1^{(j)}, s_2^{(i)} - s_2^{(j)}, \dots, s_N^{(i)} - s_N^{(j)})$$

若 $S^{(i)} - S^{(j)} = \dots$, 则 $S^{(i)} > S^{(j)}$; 若 $S^{(i)} - S^{(j)} = \dots$ 且 $|S^{(i)} - S^{(j)}| > 0$, 则 $S^{(i)} < S^{(j)}$; 若 $S^{(j)} - S^{(i)} = \dots$, 则 $S^{(i)} < S^{(j)}$; 若 $S^{(j)} - S^{(i)} = \dots$ 且 $|S^{(i)} - S^{(j)}| > 0$, 则 $S^{(i)} > S^{(j)}$.

$S_B^{(i)}$ —— 系统在第 i 阶段任务开始时刻的系统状态, $S_B^{(1)} = I$.

$S_E^{(i)}$ —— 系统在第 i 阶段任务结束时刻的系统状态, $S_E^{(i)} = S_B^{(i+1)}$.

$L_f(F)$ —— F 的路集系统状态集合, 即对于任意一个 F 的路集, 当 C_i 属于该路集, 则 $s_i = 1$, 否则 $s_i = 0$. 例如 F 的路集为 $\{C_1, C_2, C_3\}, \{C_1, C_3\}, \{C_1, C_2\}$, 则 $L_f(F)$ 为 $\{(1, 1, 1), (1, 0, 1), (1,$

$1, 0)\}$.

$L_m(F)$ —— F 的最小路集系统状态集合, 即对于任意一个 F 的最小路集, 当 C_i 属于该最小路集, 则 $s_i = 1$, 否则 $s_i = 0$. 例如 F 的最小路集为 $\{C_1, C_3\}, \{C_1, C_2\}$, 则 $L_m(F)$ 为 $\{(1, 0, 1), (1, 1, 0)\}$.

$X_D(S, F)$ —— 在系统当前状态为 S 且系统即将执行的阶段任务的任务结构函数为 F 时所需要更换的最小备件数量. 可知当 $S \notin L_f(F)$ 时, $X_D(S, F) = 0$.

$S_D(S, F)$ —— 在系统当前状态为 S 且系统即将执行的阶段任务的任务结构函数为 F 时更换最小备件数之后的系统状态, $S_D(S, F) \in L_f(F)$ 可知当 $S \in L_f(F)$ 时, $S_D(S, F) = S$.

定理 1 已知 F 为任务结构函数, $S_B \in L_f(F), S_E \in L_f(F)$, 则系统状态在 T 时间内从 S_B 变化到 S_E 且正好消耗 x 个备件的状态转移概率计算公式为

$$P(S_B, x, S_E, F, T) = \begin{cases} e^{-t/S_2} T(1 - e^{-t/S_1})^{S_3/S_2} & S_3 + S_4 \in L_m(F) \text{ 且 } |S_5| > 0 \text{ 且 } |S_3| = 0 \\ e^{-t/S_3} T(1 - e^{-t/S_1})^{S_4/S_3} & S_3 + S_4 \in L_m(F) \text{ 且 } |S_5| > 0 \text{ 且 } |S_3| > 0 \\ \frac{1}{x!} ((|S_3| + |S_4|) T)^x e^{-(|S_2| + |S_3| + |S_4|) T} (1 - e^{-T/S_1})^{S_3 + S_4} & S_3 + S_4 \in L_m(F) \text{ 且 } |S_5| = 0 \\ \frac{1}{x!} (|S_3| T)^x e^{-(|S_2| + |S_3| + |S_4|) T} (1 - e^{-T/S_1})^{S_3 + S_4} & S_3 + S_4 \notin L_m(F) \text{ 且 } |S_3| > 0 \\ e^{-(|S_2| + |S_4|) T} (1 - e^{-T/S_1})^{S_3 + S_4} & S_3 + S_4 \notin L_m(F) \text{ 且 } |S_3| = 0 \text{ 且 } x = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $S_1 = S_B - S_E - \sum_{L_k \in L_m(F)} L_k, S_2 = S_E - \sum_{L_k \in L_m(F)} L_k, S_3 = S_E - \sum_{L_k \in L_m(F)} (S_E - L_k), S_4 = S_E - S_2 - S_3,$

$$S_5 = S_B - S_1 - S_2 - S_3 - S_4, \quad (t) = |S_5| e^{-(|S_5| + 1)t} (1 - e^{-t})^{|S_5| - 1},$$

$${}_1(x) = \int_0^T (t) \frac{1}{x!} (|S_4| (T - t))^x e^{-(|S_4|) (T - t)} dt, \quad {}_2(x) = \int_{x_1 + x_2 = x} \left(\frac{1}{x_1!} (|S_3| T)^{x_1} e^{-|S_3| T} \cdot \right.$$

$$\left. \int_0^T (t) \frac{1}{x_2!} (|S_4| (T - t))^{x_2} e^{-(|S_4|) (T - t)} dt \right)$$

证明 把在系统初始状态中为正常的部件 $C(S_B)$ 分为 5 类, $C(S_1)$ 和 $C(S_5)$ 中的部件是在结束时刻处于失效状态的部件, 其中: $C(S_1)$ 中的部件不属于 F 的任何一个最小路集, $C(S_5)$ 中的部件属于 F 的某一最小路集. $C(S_2), C(S_3)$ 和

$C(S_4)$ 中的部件是在结束时刻处于正常状态的部件, 其中: $C(S_2)$ 中的部件不属于 F 的任何一个最小路集, $C(S_3)$ 中的部件属于 F 的任何一个最小路集, $C(S_4)$ 中的部件属于 F 的某一最小路集但不属于 F 的所有最小路集. 下面分别计算这

些部件的状态转移概率.

对于 $C(S1)$ 中的部件,因为 $S_E = L_f(F)$,所以这些部件失效不影响当前任务成功,因此不需要更换备件,得到这部分部件的状态转移概率为

$$1 = (1 - e^{-T/S1}) \quad (2)$$

对于 $C(S2)$ 中的部件,失效不影响当前任务,所以不会更换备件,而在系统结束时刻这些部件处于正常状态,所以在 T 时间内肯定没有失效,所以这部分部件的状态转移概率为

$$2 = e^{-T/S2} \quad (3)$$

对于 $C(S5)$ 中的部件,失效虽然暂时不影响当前任务,所以不会更换备件,但是这些部件的失效时间将影响后续的备件更换活动,因此分类对 $C(S3)$ 、 $C(S4)$ 和 $C(S5)$ 中的部件进行讨论:

1) 当 $S3 + S4 \leq L_m(F)$ 且 $S5 > 0$ 时, $C(S3)$ 中的部件在 T 时间内任何时刻发生失效都需要立即更换备件.

当 $S3 > 0$ 时,设这些部件消耗备件数为 x_1 ,可得这些部件的状态转移概率为

$$31(x_1) = \frac{1}{x_1!} (S3/T)^{x_1} e^{-S3/T} \quad (4)$$

当 $S3 = 0$ 时, $31(x_1) = 1, x_1 = 0$;

当 $C(S5)$ 中的部件全部失效后, $C(S4)$ 中的部件发生失效都需要立即更换备件,所以此时 $C(S4)$ 和 $C(S5)$ 中的部件正好消耗 x_2 个备件的状态转移概率为

$$32(x_2) = \int_0^T \frac{1}{x_2!} (S4/(T-t))^{x_2} e^{-S4/(T-t)} dt \quad (5)$$

其中, (t) 为在 t 时间内 $C(S5)$ 中部件失效且 $C(S4)$ 中部件正常的概率密度函数,计算公式为

$$(t) = S5 \cdot e^{-(S4+1)t} (1 - e^{-t})^{S5-1} \quad (6)$$

综合式(4)和式(5),可得 $C(S3)$ 、 $C(S4)$ 和 $C(S5)$ 中部件消耗 x 个备件的状态转移概率

$$3(x) = \begin{cases} 31(x_1) \cdot 32(x_2), & S3 > 0 \\ 32(x), & S3 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

2) 当 $S3 + S4 \leq L_m(F)$ 且 $S5 = 0$ 时,由于 $C(S3)$ 和 $C(S4)$ 中的部件都属于最小路集,所以

无论是 $C(S3)$ 还是 $C(S4)$ 中的部件在 T 时间内任何时候发生失效都需要立即更换备件,此时 $C(S3)$ 和 $C(S4)$ 中的部件正好消耗 x 个备件的状态转移概率为

$$3(x) = \frac{1}{x!} ((S3 + S4)/T)^x \cdot e^{-(S3 + S4)/T} \quad (8)$$

3) 当 $S3 + S4 > L_m(F)$ 时, $C(S4)$ 中的部件任何一个失效都暂时不需要更换备件,而实际这些部件处于正常状态,所以这些部件在 T 时间内没有失效, $C(S5)$ 中的部件在 T 时间内失效.

当 $S3 > 0$ 时,设 $C(S3)$ 中部件消耗备件数为 x ,则这部分部件的状态转移概率为

$$3(x) = \frac{1}{x!} (S3/T)^x e^{-(S3 + S4)/T} \cdot (1 - e^{-T/S5}) \quad (9)$$

当 $S3 = 0$ 时,可知系统中不可能消耗备件,所有 $x = 0$,此时 $3(x)$ 可以写成

$$3(x) = e^{-(S4)/T} (1 - e^{-T/S5}) \quad (10)$$

把所有部件的状态转移概率相乘 $1 \cdot 2 \cdot 3(x)$ 就可以得到 (S_B, x, S_E, F, T) . 证毕.

2.2 求解算法

分析系统运行过程可知,系统经历 n 个阶段,如图 1 所示,而每个阶段又可以分为两个过程,系统修整过程和系统执行任务过程.下面分别分析这两个过程的系统状态变化及转移概率.

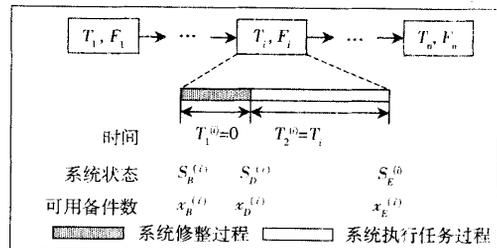


图 1 系统的阶段变化过程

1) 系统修整过程 $(S_B^{(i)} \rightarrow S_D^{(i)})$

系统修整过程是指在每个阶段开始时刻,由于当前阶段任务的要求和上一阶段任务的要求不同,所以可能需要更换备件的过程.当 S_{B_i} 不能满足当前任务要求的最小要求时,所以必须立即更换备件,根据备件消耗最小的更换策略,更换备件

数量 $x_1^{(i)} = X_D(S_B^{(i)}, F_i)$. 由于更换备件时间可以忽略, 所以系统调整过程时间始终为 $T_1^{(i)} = 0$. 系统修整过程结束后, 系统状态变为 $S_D^{(i)} = S_D(S_B^{(i)}, F_i)$.

2) 系统执行任务过程 ($S_D^{(i)}, S_E^{(i)}$)

系统执行任务过程是指系统处于执行任务状态, 过程时间为 $T_2^{(i)} = T_i$, 在该过程中, 当部件失效不影响任务继续进行, 则不更换备件, 否则立即对该失效部件更换备件.

要使得任务成功, 通过系统修整过程之后, 系

$$P_m(S_B^{(1)}, S_B^{(2)}, \dots, S_B^{(n+1)}, x) =$$

$$\sum_{x_1^{(1)}+x_2^{(1)}+\dots+x_1^{(n)}+x_2^{(n)}=x} i(S_D(S_B^{(i)}, F_i), x_2^{(i)}, S_B^{(i+1)}, F_i, T_i) \quad (11)$$

在 $S_B^{(1)}, S_B^{(2)}, \dots, S_B^{(n+1)}$ 已知的条件下, 总修整过程消耗备件数 X_1 计算公式如下

$$X_1 = \sum_{i=1}^n x_1^{(i)} = \sum_{i=1}^n X_D(S_B^{(i)}, F_i) \quad (12)$$

所以公式 (11) 可以修改为

$$P_m(S_B^{(1)}, S_B^{(2)}, \dots, S_B^{(n+1)}, x) = \begin{cases} \sum_{x_2^{(1)}+x_2^{(2)}+\dots+x_2^{(n)}=x-X_1} i(S_D(S_B^{(i)}, F_i), x_2^{(i)}, S_B^{(i+1)}, F_i, T_i), & X_1 \leq x \\ 0, & X_1 > x \end{cases} \quad (13)$$

用 $P_X(S_B^{(1)}, S_B^{(2)}, \dots, S_B^{(n+1)})$ 表示在给定 X 个备件条件下, 系统经历的状态分别为 $S_B^{(1)}, S_B^{(2)}, \dots, S_B^{(n+1)}$ 且任务成功的概率, 计算公式为

$$P_X(S_B^{(1)}, S_B^{(2)}, \dots, S_B^{(n+1)}) = \sum_{x=0}^X P_m(S_B^{(1)}, S_B^{(2)}, \dots, S_B^{(n+1)}, x) \quad (14)$$

所以只需要对所有可行集 SB 计算 P_X 并求和就可以得到 P

$$P = \sum_{(S_B^{(1)}, S_B^{(2)}, \dots, S_B^{(n+1)}) \in SB} P_X(S_B^{(1)}, S_B^{(2)}, \dots, S_B^{(n+1)}) \quad (15)$$

根据系统任务成功和维修策略要求, 易知可行集为

$$SB = \left\{ (S_B^{(1)}, S_B^{(2)}, \dots, S_B^{(n+1)}) \mid \exists i, i = 1, 2, \dots, n, S_B^{(i+1)} \leq L_f(F_i) \right\}$$

统状态肯定满足 $S_D^{(i)} \leq L_f(F_i)$ 的条件. 根据定理 1, 可以计算得到第 i 个阶段系统执行任务过程系统状态从 $S_D^{(i)}$ 变到 $S_E^{(i)}$ 且消耗 $x^{(i)}$ 个备件的概率

3) 计算备件保障度

用 $P_m(S_B^{(1)}, S_B^{(2)}, \dots, S_B^{(n+1)}, x)$ 表示阶段任务结束时的系统状态分别为 $S_B^{(1)}, S_B^{(2)}, \dots, S_B^{(n+1)}$ 且备件消耗数等于 x 的概率, 其中 $S_B^{(1)} = I$, 计算公式如下

$$\text{且 } S_B^{(i+1)} \leq S_D(S_B^{(i)}, F_i) \quad (16)$$

3 实例分析

现要评估 k/N 系统在完成一个 k 随阶段变化而变化的多阶段任务时的备件保障度, k 随阶段变化而变化的 k/N 系统属于多阶段任务系统的一个特例, 其每个阶段的任务可靠性框图都属于 k/N 结构. 假设系统共包含 N 个部件, 需要连续经历 n 个阶段, 阶段任务时间分别为 T_1, T_2, \dots, T_n , 任务结构分别为 $K_1/N, K_2/N, \dots, K_n/N$, 针对该类特殊系统, 可定义系统状态空间为 $S = \{0, 1, \dots, N\}$, 每种系统状态代表可工作部件的数量, 定义当 $S = 0, |S|$ 等于 S , 当 $S < 0, |S|$ 等于 $0, S^{(i)} \leq S^{(j)}$ 即为整数意义上大小比较. 系统经历的所有状态变量 $(S_B^{(1)}, S_B^{(2)}, \dots, S_B^{(n+1)})$ 为 $(k_1, k_2, \dots, k_{n+1})$, k_i 为第 i 个阶段开始时刻的可工作部件数. $L_f(F_i) = \{K_i, K_i + 1, \dots, N\}, L_m(F_i) = \{K_i\}, x_1^{(i)} = |K_i - k_i|, S_D^{(i)} = S_D(S_B^{(i)}, F_i) = \min(x(K_i, k_i))$. 该类系统的可行集 SB 满足的条件为 $k_{i+1} \leq k_i + |K_i - k_i|$, 然后根据求解过程, 可以得到备件保障度.

设 k/N 系统总部件数 $N = 5$, 部件失效时间服从 $\lambda = 0.0005$ 的指数分布, 部件失效只有在影

响当前任务进行时才更换备件. 现该系统要完成 4 类可分为 3 个阶段的连续任务, 分别计算这 4 类多阶段任务在备件数为 0 到 3 的条件下的备件保

障度, 阶段任务要求的最小工作部件数量、任务时间以及计算结果如表 1 所示, 图 2 给出了 4 类任务要求下备件保障度与备件数的关系曲线.

表 1 计算结果数据

任务过程参数		备件数 x			
		0	1	2	3
$K_1 = 2, K_2 = 3, K_3 = 2$	$T_1 = 200, T_2 = 500, T_3 = 500$	0.790 0	0.936 9	0.984 3	0.996 7
	$T_1 = 150, T_2 = 300, T_3 = 300$	0.925 5	0.986 1	0.997 9	0.999 7
$K_1 = 1, K_2 = 3, K_3 = 1$	$T_1 = 200, T_2 = 500, T_3 = 500$	0.838 8	0.958 0	0.991 2	0.998 5
	$T_1 = 150, T_2 = 300, T_3 = 300$	0.940 2	0.990 0	0.998 7	0.999 9

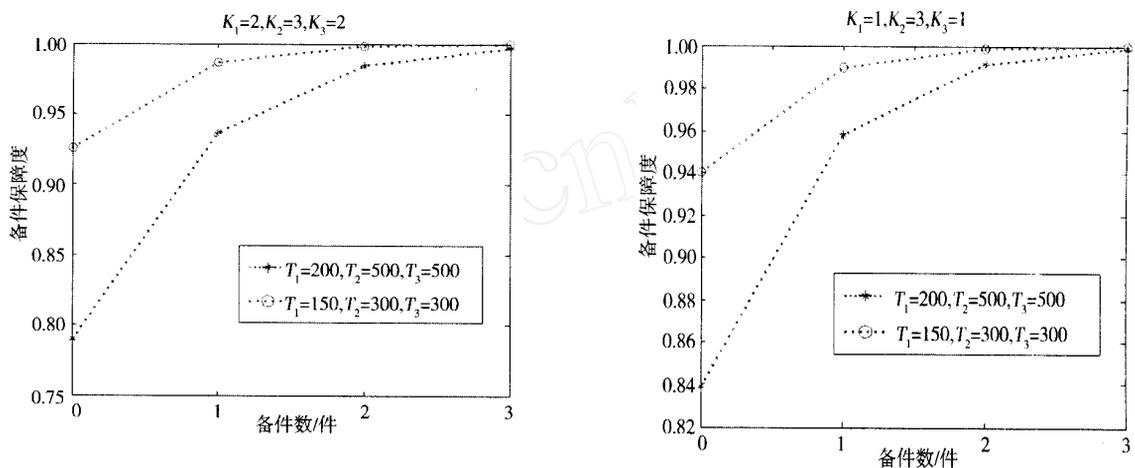


图 2 不同任务的备件保障度曲线

4 结束语

本文给出了一种任务结构函数任意变化的多阶段任务系统备件保障度模型, 该模型可以很好地反映备件数对系统在完成不同多阶段任务时的

成功概率的影响, 为实际工作中确定系统在完成特定任务情况下的备件携行量提供决策依据. 同时通过实例分析可知, 对于某些特殊结构系统 (例如串联系统、 k/N 系统等), 可以在该模型上, 对系统的状态进行调整以缩小系统状态空间, 从而提高运算效率.

参考文献:

[1]周江华, 肖 刚, 苗育红. 战略储备系统备件最优储备量计算的解析方法[J]. 航空学报, 2002, 23(4): 334—337.
 [2]Dinesh KU, Knezevic J. Availability based spare optimization using renewal process[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, (59): 217—223.
 [3]Armstrong MJ, Atkins D R. Joint optimization of maintenance and inventory policies for a simple system[J]. IEEE Trans. on Reliability, 1996, (28): 415—424.
 [4]Smith M A J, Dekker R. Preventive maintenance in a R-out-of-n system: The uptime, downtime and costs[J]. European Journal of Operations Research, 1997, (99): 565—583.
 [5]Frostig E, Levikson B. On the availability of R out of N repairable systems[J]. Naval Research Logistics, 2002, 49(5): 483—498.
 [6]de Smidt-Destombes K S, van der Heijden M C, van Harten A. On the availability of a k-out-of-N system given limited spares and repair capacity under a condition based maintenance strategy[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, (83): 287—300.

(下转第 111 页)

- Science & Systems Engineering, 1994, 3(4) : 334—338.
- [6] Xu Z S, Wei C P. A consistency improving method in analytic hierarchy process[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 116: 443—449.
- [7] 徐泽水, 达庆利. 两种修正判断一致性方法的比较分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(6) : 913—916.
- [8] Aguaron J, Moreno-Jimenez J M. The geometric consistency index: Approximated thresholds[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 147(1) : 137—145.
- [9] 李梅霞. AHP 判断矩阵一致性改进的一种新方法[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(2) : 122—125.
- [10] 朱建军, 刘士新. 一种新的改进不一致判断矩阵的方法[J]. 系统工程理论与实践, 2003, (11) : 95—110.
- [11] 王雪华, 秦学志. AHP 中判断矩阵一致性修正的模式识别法[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(11) : 56—59.
- [12] 王计平. 对一种层次分析法的误导的理论分析[J]. 系统工程学报, 1999, 14(1) : 95—98.
- [13] 王蓬芬. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1989.
- [14] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- [15] 张 晖, 吴 斌, 余张国. 引入模拟退火机制的新型遗传算法[J]. 电子科技大学学报, 2002, 32(1) : 39—42.
- [16] 蓝 海, 王 凌, 王 雄. 复杂函数全局最优化的改进遗传退火算法[J]. 清华大学学报, 2002, 42(9) : 1237—1240.
- [17] 刘 勇, 康立山. 数值并行算法—遗传算法[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

作者简介:

王 迅(1965—), 男, 河南人, 博士生, 研究方向: 决策分析;
董玉成(1979—), 男, 湖北人, 博士生, 研究方向: 决策分析;
陈义华(1957—), 男, 重庆人, 教授, 研究方向: 运筹与控制, 经济数学模型.

(上接第 91 页)

- [7] Kim K, Park K S. Phased-mission system reliability under Markov environment[J]. IEEE Trans. on Reliability, 1994, (43) : 301—309.
- [8] Vaario J K. Fault tree analysis of phased mission systems with repairable and non-repairable components[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, (74) : 169—180.
- [9] Zang Xinyu, Sun Hairong, Trivedi K S. A BDD-based algorithm for reliability analysis of phased-mission systems[J]. IEEE Trans. on Reliability, 1999, 3(48) : 50—60.
- [10] Li Liangqiao. The 6th International Conference on Reliability and Maintainability & Safety Proceedings[C]. Beijing: Hua Xia Publishing House, 2004. 11—15.
- [11] 张 涛, 郭 波, 谭跃进. 基于 BDD 的面向任务备件需求量预测算法[J]. 系统工程, 2004, 增刊: 318—320.

作者简介:

张 涛(1976—), 男, 安徽黄山人, 博士, 讲师, 研究方向: 可靠性工程、装备综合保障、信息管理系统等;
高大化(1979—), 男, 河南开封人, 硕士, 讲师, 研究方向: 可靠性工程、系统规划等;
郭 波(1962—), 男, 湖北武汉人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 可靠性工程、装备综合保障、系统规划等;
武小悦(1963—), 男, 山西平遥人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 可靠性工程、装备采办、系统建模与仿真等;
谭跃进(1957—), 男, 湖南长沙人, 硕士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 管理理论、系统工程、复杂系统理论等.