

· 电子机械工程 ·

## 时间约束下 $k/N(G)$ 机群任务可用度的建模方法

陈光宇<sup>1</sup>, 李 婧<sup>1</sup>, 刘 楠<sup>2</sup>, 王惟贤<sup>1</sup>, 梁晨宇<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学经济与管理学院 成都 611731; 2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心 四川 绵阳 621900)

**【摘要】**考虑执行任务过程中运行时间和维修时间的约束, 提出一种评估 $k/N(G)$ 机群任务可用度的简便建模方法。构建机群运行过程和时间模型图, 分析机群与系统之间运维时间的关系; 基于系统任务可用度的解析式, 推导出 $n/N(G)$ 机群任务可用度的解析式; 选用解析与仿真相结合的方法, 建立机群维修过程的随机Petri网模型, 结合 $n/N(G)$ 机群任务可用度的解析式给出模型参数的计算方法; 利用已知参数的仿真模型可得时间约束下 $k/N(G)$ 机群的任务可用度。通过算例分析揭示机群任务可用度随着运行时限、维修时限的变化趋势, 以及与无时间约束下 $k/N(G)$ 机群可用度的差异。

**关键词** 机群; 任务可用性; 建模; 时间约束

**中图分类号** N945

**文献标志码** A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-0548.2014.06.026

## Mission Availability Modeling Methods for $k/N(G)$ Fleet under Time Constraints

CHEN Guang-yu<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, LIU Nan<sup>2</sup>, WANG Wei-xian<sup>1</sup>, and LIANG Chen-yu<sup>1</sup>

(1. School of Management and Economics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics Mianyang Sichuan 621900)

**Abstract** Under runtime and maintenance time constraints during a mission, a simple and efficient modeling method is presented to evaluate mission-availability of  $k/N(G)$  fleet. The diagrams describing the fleet operational process and mission-time are given to analyze the relationship of runtime and maintenance time between systems and the fleet. An analytical formula for  $n/N(G)$  fleet is deduced by using the formulas of system mission-availability. By combining analytical and simulation methods, a stochastic Petri net model for maintenance process of fleets is given, and the parameters of the model is calculated by combining the analytical formula. The mission-availability of  $k/N(G)$  fleet under time constraints is obtained by the simulation model with the parameters. A numerical example is given to illustrate the trends of mission-availability of  $k/N(G)$  fleet under operational time-limit or maintenance time-limit, respectively, and the mission-availability difference between time constraints and no time constraints.

**Key words** fleet; mission availability; modeling; time constraint

由多个单元组成, 共同合作完成一些具体任务的多主体系统, 如大型核电机组、风能发电厂、机器人机群、舰队、导弹群和无人机群<sup>[1]</sup>等, 常被统称为机群(Fleet)<sup>[2]</sup>。在机群特性研究中, 可用性分析是一个重要的研究课题。机群任务可用性的建模与分析对于设计一个高效、经济的系统是必要的。

近年来, 在机群(多主体系统)层面上的可用性研究已逐渐引起学者的关注。在研究过程中, 根据机群运行条件的不同, 可将机群划分为不同的类型。根据机群中系统是否独立可分为独立和非独立机群; 根据机群是否冗余可分为冗余和非冗余机群;

根据机群中系统是否同质, 可分为同质和非同质机群。研究者针对不同运行条件下机群可用度的评估开展了研究。文献[3]针对独立并联同质机群, 在系统失效和维修时间都服从指数分布且维修工充足的条件下, 建立机群状态转换的马尔可夫模型, 然后根据马尔科夫理论, 给出了评估机群稳态可用度的方法。针对非独立冗余同质机群, 文献[2]同样建立机群的马尔科夫模型, 通过模型中系统失效率的变化来描述机群中系统之间的影响, 提出了一种非独立机群的建模方法。文献[4]针对非独立不同质机群中系统之间的影响和功能不同的情况, 采用随机回

收稿日期: 2013-10-09; 修回日期: 2014-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(71172095); 科技部创新方法工作专项项目(2013IM020400); 部级基金

作者简介: 陈光宇(1969-)男, 博士, 教授, 主要从事质量管理与可靠性方面的研究。

报网(stochastic reward net, SRN), 建立了非独立不同质机群的SRN模型。SRN是随机Petri网(stochastic petri net, SPN)的一个分枝, 随机Petri网以研究模型系统的组织结构和动态行为为目标, 着眼于系统中可能发生的各种状态变化以及变化之间的关系<sup>[5]</sup>。SPN与马尔科夫模型相比, 在多个方面提高了模型描述功能, 有效地提升了建模效率和分析能力。

文献[1-4]考虑了机群运行过程中是否独立、是否同质及是否冗余的情况, 但在实际工程应用中, 机群执行一项任务时往往有时间限制。文献[6]体现了任务时限和维修时限的要求, 将装置时间约束下, 单次任务可用度评价模型推广到多次任务, 给出ICF激光装置多次任务可用性评价模型、评价方法及分析步骤。但将该方法直接运用到机群任务可用度的评价时, 会暴露出模型变量增加和计算复杂等问题, 并且在具体运行的机群进行任务可用度定量分析时, 由于存在应用条件的限制, 很难确定其失效次数及运行时间和维修时间的具体分布<sup>[7]</sup>。为此, 文献[7]采用计算机数字仿真方法, 依据对失效和修复状态的识别, 确定各系统的工作状态, 建立了可用性仿真逻辑关系, 得到机群可用度的估计值。但该方法计算复杂且不能给出机群任务可用度的精确值。

鉴于以上问题, 本文在机群独立同质的条件下, 考虑机群运行和维修时间的限制。通过分析机群的运行状态, 给出机群与系统之间的运维时间关系, 得到机群运行和维修时间的具体分布以及精确评估  $n/N(G)$  机群任务可用度的解析式, 简化了机群任务可用度的计算方法; 采用SPN模型描述时间约束, 并结合  $n/N(G)$  机群的解析式给出SPN模型参数的求解方法, 通过仿真得到  $k/N(G)$  机群的任务可用度。

### 1 理论和方法研究基础

可用性是系统在规定的使用与维修方式下, 在给定的时间内能够完成规定功能的能力。依据系统工作和非工作时间的定义, 系统可用度有多种形式: 瞬时可用度<sup>[8]</sup>、任务可用度<sup>[9]</sup>(区间可用度)和稳态可用度。不同形式的可用度其对应的评估方法不同。

#### 1.1 时间约束下系统的任务可用度评估方法

文献[10]提出一种时间约束下系统的任务可用度模型, 其描述为: 对于可修系统, 在计划运行时间  $T$  内, 在所有失效的累积修复时间不超过维修时限条件下, 成功执行任务的概率。具体公式为:

$$A_i(T, T_d) = 1 - F_i(T) + \sum_{m=1}^{\infty} [F_i^m(T) - F_i^{m+1}(T)] G_{i,m}(T_d) \tag{1}$$

式中,  $F_i(t)$  是系统的累积失效分布函数;  $F_i^m(T) - F_i^{m+1}(T)$  是在  $(0, T)$  内发生  $m(m=1, 2, 3, \dots)$  次失效的概率;  $F_i^m(t)$  是在  $(0, t)$  时间内发生不少于  $m$  次失效的概率;  $G_{i,m}(T_d)$  是指系统  $m$  次累积维修时间之和小于  $T_d$  的概率, 而且每次维修时间服从  $G_i(t)$  分布函数。式中前一部分是指系统在  $(0, T)$  时间内没有失效的概率, 后一部分是指在  $(0, T)$  时间内失效, 且在  $(0, T_d)$  内维修完好的概率。其中,  $G_{i,m}(t)$  可根据  $G_i(t)$  得到, 当  $G_i(t)$  属于指数分布,  $G_{i,m}(t)$  为 Gamma 分布函数。

同样条件下, 文献[6]给出式(1)的简化形式:

$$A_i(T, T_d) = 1 - F_i(T) + F_i(T) W_i(T_d) \tag{2}$$

式中,  $W_i(T_d)$  表示在  $(0, T_d)$  内系统维修完好的概率。

#### 1.2 无时间约束的 $k/N(G)$ 机群可用度建模方法

$k/N(G)$  机群为含有  $n(n=1, 2, \dots)$  个系统的机群。 $k/N(G)$  机群正常工作要求组成机群的  $n$  个系统中至少有  $k$  个系统正常工作<sup>[11]</sup>, 其中  $k \leq n$ 。当  $k=1$  时,  $n$  个系统组成并联机群; 当  $k=n$  时,  $n$  个系统组成串联机群, 也即  $n/N(G)$  机群。

针对独立同质  $k/N(G)$  机群, 假设机群中系统修复如新, 在系统的失效和维修时间都服从参数为  $\lambda$  和  $\mu$  的指数分布, 且只有一个维修工的情况下, 文献[2]用生灭过程描述机群的运行状态, 并给出了其可用度的评估方法。

设机群的状态空间数为  $n$ 。  $n, n-1, n-2, \dots, k, \dots, 3, 2, 1, 0$  表示机群系统中处于正常工作状态的系统个数,  $\pi_i$  为机群中有  $i$  个系统正常工作的稳定概率。机群的状态如图1所示。

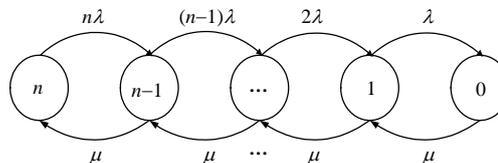


图1  $k/N(G)$  机群状态图

由马尔科夫及更新过程理论, 可得  $k/N(G)$  机群的稳态可用度为:

$$A = \sum_{i=k}^n \pi_i = \pi_n \left\{ 1 + \sum_{i=1}^{n-k} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^i \frac{n!}{(n-i)!} \right\} \tag{3}$$

### 2 时间约束下机群运行状态描述

以本文描述的机群为基础, 考虑运行时限和维

修时限的条件, 分析机群的运行状态。

机群中系统存在运行和修复两种状态。机群运行的系统数量满足任务要求的条件下, 机群的运行和维修时间没有超过运行和维修时限机群可用, 反之机群不可用。

设  $t_{i,j}$  和  $\tau_{i,j}$  分别表示第  $i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) 个系统第  $j$  ( $j=1,2,\dots,m$ ) 次的运行时间和失效后的维修时间且都服从指数分布, 如图2所示。  $t_i$  和  $\tau_i$  分别表示系统  $i$  失效  $m$  次的累积运行时间和累积维修时间, 有:

$$t_i = \sum_{j=0}^m t_{i,j}, \quad \tau_i = \sum_{j=0}^m \tau_{i,j}$$

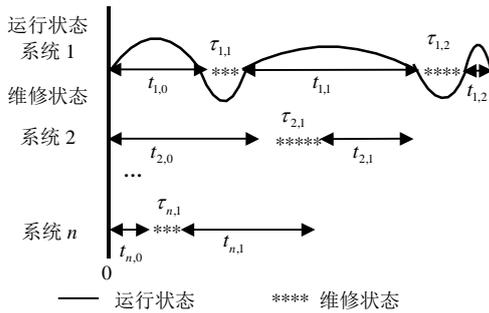


图2 系统运维时间图

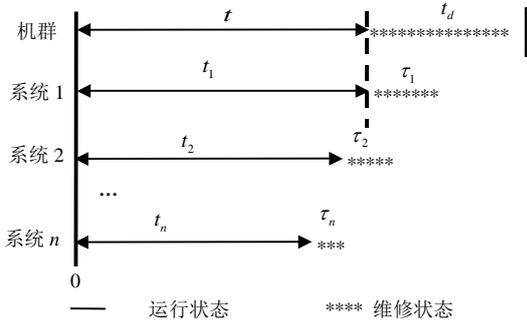


图3 机群运维时间图

机群运维时间图如图3所示,  $t$  为机群运行时间,  $T$  为运行时限,  $t_d$  为机群维修时间,  $T_d$  为维修时限。机群可用应满足的时间约束为  $0 < t_d \leq T_d$ , 且  $0 < t \leq T$ 。

由于有系统失效, 机群中其他系统继续运行, 机群的运行时间应为最长的系统累计运行时间, 如图2所示。机群与系统运行时间的关系可表示为:

$$t \geq t_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

在一个维修工的情况下, 无论机群中失效的系统有几个, 只有一个系统完成维修后, 才能进行下一个系统的维修。因此, 机群的维修时间为各失效系统的累积维修时间之和, 有:

$$t_d = \sum_{i=1}^n \tau_i \quad (5)$$

经过上述分析, 找出了机群与系统运维时间的关系, 从而容易将对机群的时间约束转化为系统的时间约束, 并得到机群的运行和维修时间分布。

### 3 时间约束下n/N(G)机群任务可用度的解析式

基于时间约束下系统任务可用度的评估方法, 参考式(1), 给出机群在运行时限  $T$  内, 在所有失效的累积修复时间不超过维修时限  $T_d$  条件下, 成功执行任务的概率为:

$$A(T, T_d) = 1 - F(T) + \sum_{m=1}^{\infty} [F^m(T) - F^{m+1}(T)] G_m(T_d) \quad (6)$$

式中,  $F(t)$  为机群的累积失效分布函数;  $G_m(t)$  为机群在内  $(0, t)$  完成  $m$  次维修的概率。

当系统的失效时间服从参数为  $\lambda$  的指数分布时, 机群在  $(0, T)$  内无系统发生失效的概率为:

$$1 - F(T) = \prod_{i=1}^n [1 - F_i(T)] = e^{-n\lambda T} \quad (7)$$

由式(4)可知, 机群运行时间为  $n$  个系统中最长的累计运行时间, 机群发生  $m$  次修复如新后运行时间  $t$  服从  $\Gamma(m, n\lambda)$  分布。则机群在  $(0, T)$  内发生不小于  $m$  次失效的概率为:

$$F^m(T) = P(t \leq T) = 1 - \sum_{j=0}^{m-1} e^{-n\lambda T} \frac{(n\lambda T)^j}{j!}$$

从而得到机群在  $(0, T)$  内发生  $m$  ( $m=1,2,\dots$ ) 次失效的概率:

$$F_F^m(T) - F_F^{m+1}(T) = e^{-n\lambda T} \frac{(n\lambda T)^m}{m!} \quad (8)$$

同理, 由式(5)可知, 机群维修时间  $t_d$  服从  $\Gamma(m, \mu)$  分布, 机群在维修时限内完成维修的概率为:

$$G_m(T_d) = 1 - \sum_{j=0}^{m-1} e^{-\mu T_d} \frac{(\mu T_d)^j}{j!} \quad (9)$$

将式(7)~式(9)的结果带入式(6), 得到时间约束下  $n/N(G)$  机群的任务可用度为:

$$A(T, T_d) = e^{-n\lambda T} + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \left[ e^{-n\lambda T} \frac{(n\lambda T)^m}{m!} \right] \left[ 1 - e^{-\mu T_d} \sum_{j=0}^{m-1} \frac{(\mu T_d)^j}{j!} \right] \right\} \quad (10)$$

从式(10)的第二部分可以看出,  $n/N(G)$  机群容易找到失效次数与维修次数的一一对应关系。但对于  $k/N(G)$  机群, 这种对应关系很难获取。

### 4 时间约束下k/N(G)机群任务可用度的评价方法

对于时间约束下k/N(G)机群任务可用度的评价公式，可参考式(2)的推导思路<sup>[6]</sup>，得到：

$$A(T, T_d) = 1 - F(T) + F(T)W(T_d) \quad (11)$$

式中， $W(T_d)$ 表示在 $(0, T_d)$ 内k/N(G)机群维修完好的概率。将式(7)的结果带入式(11)，有：

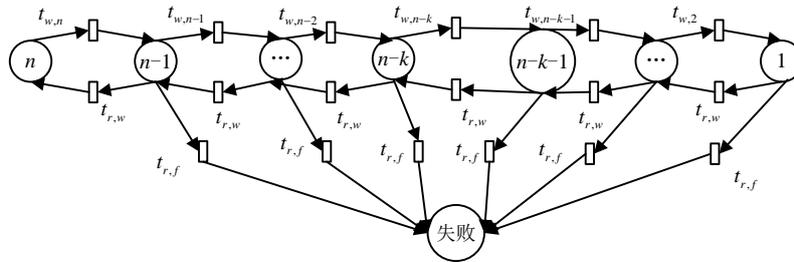


图4 机群维修过程的SPN模型

表1 SPN模型各库所及变迁意义

参数	意义
$P_n$	机群中有n个系统正常工作
$P_{n-1}$	机群中有n-1个系统正常工作，1个系统正在维修
$P_1$	机群中有1个系统正常工作，1个系统正在维修
$P_{failure}$	机群维修时间超过维修时限，处于不可用状态
$t_{r,w}$	机群中系统由维修状态到正常工作状态的变迁速率
$t_{r,f}$	机群中系统由维修状态到失效状态的变迁速率
$t_{w,i}$	机群中系统由正常工作状态到维修状态的变迁速率

在描述机群状态转移的过程中需要考虑维修时限对变迁速率的影响。设系统失效后在维修时限内完成维修的权重为 $W_1$  ( $0 < W_1 < 1$ )，没有完成维修的权重为 $1 - W_1$ ，则变迁速率  $t_{r,w} = W_1\mu$ ， $t_{r,f} = (1 - W_1)\mu$ 。机群中系统由正常工作状态到维修状态的变迁速率与机群中正常工作的系统个数相关： $t_{w,i} = i\lambda$ 。

SPN模型的初始状态为：机群中有系统正在维修，即初始token在库所  $P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, P_{n-k}, \dots, P_1$ 。

设n/N(G)机群在维修时限内维修完好的概率为  $W_n(T_d)$ ，则  $W_n(T_d)$  的值对应SPN模型仿真后机群所有系统都正常工作的概率，即库所  $P_n$  的概率。同理，对于k/N(G)机群， $W(T_d)$  的值对应SPN模型中至少有k个系统正常工作的概率，即库所  $P_n, P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, P_{n-k}$  的概率之和。

要想得到SPN模型中各库所的概率得先确定参数  $W_1$  的值。对于n/N(G)机群，通过式(10)和SPN模型都可得到其任务可用度，本文考虑利用解析与仿真相结合的方法来确定参数  $W_1$  的值。具体步骤如下：

$$A(T, T_d) = e^{-n\lambda T} + (1 - e^{-n\lambda T})W(T_d) \quad (12)$$

式中， $W(T_d)$  的值与机群中处于维修状态的系统数量和失效次数相关。随机Petri网具有较强的表达系统动态行为的能力<sup>[12]</sup>，本文拟采用SPN模型来描述系统维修情况及状态变化，利用仿真方法得到  $W(T_d)$  的值。

建立机群维修过程的SPN模型，如图4所示。其中各库所和变迁代表的意义如表1所示。

1) 对于n/N(G)机群，联立式(10)和式(12)，得到

$W_n(T_d)$  的解析式：

$$W_n(T_d) = \frac{\sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{e^{-n\lambda T} (n\lambda T)^m}{m!} \left[ 1 - e^{-\mu T_d} \sum_{j=0}^{m-1} \frac{(\mu T_d)^j}{j!} \right] \right\}}{1 - e^{-n\lambda T}} \quad (13)$$

将已知参数带入式(13)可得  $W_n(T_d)$  的值；

2) 设置SPN模型初始token的位置为库所  $P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, P_{n-k}, \dots, P_1$ ，将已知参数输入模型中。其中， $w_i$  取(0,1)范围内的任意数。

3) 在(0,1)范围内搜索  $W_1$  的值，使仿真后库所  $P_n$  的概率即  $W_n(T_d)$  的仿真结果与步骤1)中  $W_n(T_d)$  的值相等。由此，得到  $W_1$  的值。

最后，将步骤3)中  $W_1$  的值输入SPN模型中，进行1 000 000次蒙特卡洛仿真，得到处于库所  $P_n, P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, P_{n-k}$  的概率，计算各库所概率之和即为k/N(G)机群  $W(T_d)$  的值，带入式(12)得时间约束下k/N(G)机群的任务可用度。

### 5 算例分析

以6个系统组成的装置为例，开展案例分析。利用本文方法评价其时间约束下的任务可用度，进一步分析时间约束对机群可用度的影响，同时与无时间约束的机群可用度评估方法进行比较。

#### 5.1 时间约束下某装置任务可用度结果分析

参考文献[6]，装置中单系统的失效时间服从  $\lambda = 0.003 58$  的指数分布，维修时间服从参数为  $\mu = 0.014 925$  的指数分布。分别考虑6/6和4/6装置在

不同时间约束条件下任务可用度的变化情况。

对6/6装置, 考虑维修时限为30、60、120、180 min, 运行时限为120、180、240、300 min时的装置的可用度。将时间参数带入式(12), 得到6/6装置任务可用度结果如表2所示, 对应的曲线如图5所示。

表2 不同运行时限和维修时限下6/6装置可用度

$T_d/\text{min}$	$T/\text{min}$	$A(T, T_d)$	$T_d/\text{min}$	$T/\text{min}$	$A(T, T_d)$
30	120	0.167 996	120	120	0.449 742
	180	0.064 261		180	0.253 278
	240	0.023 872		240	0.133 019
	300	0.008 67		300	0.066 267
60	120	0.264 272	180	120	0.607 674
	180	0.119 648		180	0.397 175
	240	0.051 57		240	0.239 994
	300	0.021 424		300	0.136 417

从图5可以看出, 在维修时限不变的情况下, 6/6装置的任务可用度随运行时限增加而降低; 在运行时限不变的情况下, 随维修时限降低而减少。

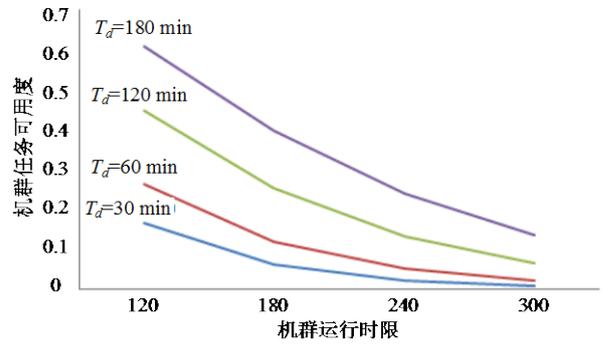


图5 不同维修时限下, 6/6装置任务可用度随运行时间变化曲线

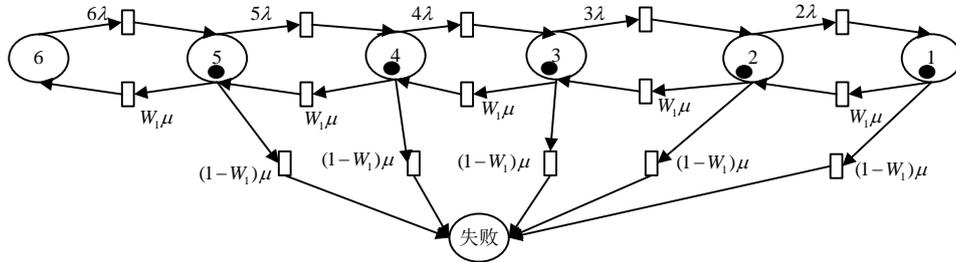


图6 4/6装置  $W(T_d)$  的SPN模型

对4/6装置, 分别考虑装置维修时限为120 min, 运行时限为120、180、240、300 min时的任务可用度及装置运行时限为240 min, 维修时限为30、60、120、180 min时的任务可用度。

按照文中提出的算法步骤, 首先建立4/6装置维修过程的SPN模型, 初始token为  $P_5, P_4, P_3, P_2, P_1$ , 如图6所示。

当装置维修时限为120 min时, 6/6与4/6装置SPN模型的  $W_1$  值相等。以运行时限  $T = 240\text{min}$  为例, 将时间参数带入式(13), 有:

$$W_6(120) = \frac{\sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \left[ e^{-6 \times 240 \lambda} \frac{(6 \times 240 \lambda)^m}{m!} \right] \left[ 1 - e^{-120 \mu} \sum_{j=0}^{m-1} \frac{(120 \mu)^j}{j!} \right] \right\}}{1 - e^{-6 \times 240 \lambda}} = 0.119 508$$

将与  $W_6(120)$  对应的  $W_1 = 0.534 493 295$  输入图6的SPN模型中, 经过蒙特卡洛仿真得到4/6装置120 min内完成修复的概率为:

$$P_6 + P_5 + P_4 = 0.516 701$$

将结果带入式(12), 计算在维修时限120 min时, 不同运行时限下装置的任务可用度, 结果如表4所示。

当装置计划运行时限  $T = 240\text{min}$  一定, 维修时限变化时,  $W_1$  的值会发生变化。以维修时限为30 min为例, 将时间参数带入式(13), 得  $W_6(30) = 0.014 816$ 。将  $W_6(30)$  对应的  $W_1 = 0.074 797 674$  输入图6的SPN模型中, 经过蒙特卡洛仿真得到4/6装置在30 min内完成修复的概率为:  $P_6 + P_5 + P_4 = 0.230 962$ 。

同理可得到维修时限为60, 180 min时装置完成维修的概率, 如表3所示。

表3 不同维修时限下  $W_1$  和  $W(T_d)$  的值

$T_d/\text{min}$	$W_6(T_d)$	$W_1$	$W(T_d)$
30	0.014 816	0.074 797 674	0.230 962
60	0.046 315	0.225 879 646	0.313 799
120	0.119 508	0.534 493 295	0.516 701
180	0.224 971	0.748 891 823	0.671 686

将不同维修时限下  $w(T_d)$  的值带入式(12)中, 计算在运行时限为240 min时, 4/6装置的任务可用度, 结果如表4所示。

表2和表4的数据用图形表示, 分别如图7和图8所示, 6/6和4/6装置任务可用度随运行时限和维修时限的变化趋势是一致的。从图7可以看出, 当装置的运行时限一定时, 装置的任务可用度随维修时限的

增加而增长。从图8可以看出，当装置维修时限一定时，装置的任务可用度随运行时限的延长而降低。同时，相比6/6装置任务可用度的降低幅度，增加同样长短的运行时间，4/6装置的降低幅度相对缓慢。

表4 4/6装置任务可用度与 $T$ 、 $T_d$ 的对应值

$T/\text{min}$	$A(T, T_d)$	$T_d/\text{min}$	$A(T, T_d)$
120	0.553 127	30	0.235 373
180	0.526 587	60	0.317 735
240	0.519 282	120	0.519 282
300	0.517 272	180	0.673 569

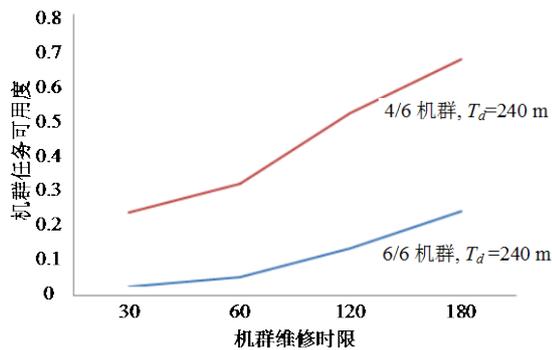


图7 装置可用度与维修时限变化曲线图

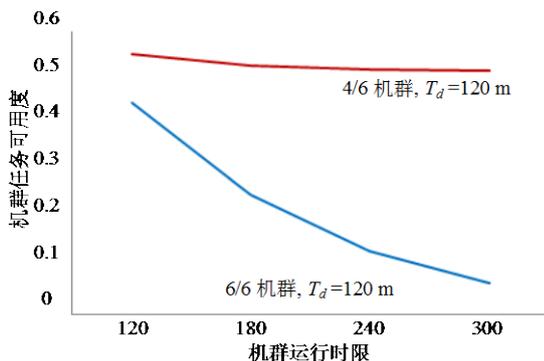


图8 装置可用度与运行时限变化曲线

通过上述对可用度结果的分析，可以得到以下的结论：

- 1) 装置任务可用度随运行时限和维修时限的变化趋势表明，装置的任务可用度与其运行时限呈负相关，与其维修时限呈正相关。
- 2) 4/6装置和6/6装置的任务可用度随运行时限降低幅度的差异表明，增加冗余可以在一定程度上削弱运行时限对装置任务可用度的影响。

### 5.2 可用度评估方法对比分析

为了将本文的评估方法与1.2中的评估方法进行比较，进一步明确其适用范围及差异，本文分别计算 $k$ 取1、2、3、4、5、6时两种评估方法的装置可用度。结果如表5所示，对应曲线如图9所示。

由图9可知，两种方法的可用度大小关系为

$A > A(T, T_d)$ 。造成这种差异的原因是： $A$ 的求解只考虑了维修工的限制，没有考虑机群在执行任务过程中的时间约束，而 $A(T, T_d)$ 的求解既考虑维修人员的限制也考虑运行时间和维修时间的限制。

表5 不同 $k$ 值下装置可用度

$k$	$A$	$A(T, T_d)$
1	0.999 97	0.823 281
2	0.999 118	0.626 042
3	0.989 203	0.499 742
4	0.927 611	0.309 429
5	0.712 407	0.205 732
6	0.311 378	0.133 019

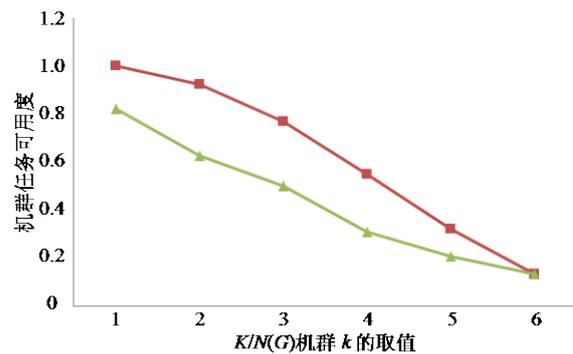


图9  $k/6(G)$ 装置可用度随 $k$ 值变化曲线

## 6 结论

针对时间约束下机群任务可用度的评估问题，本文采用解析和仿真相结合的方法将任务可用度的评估方法从 $n/N(G)$ 机群推广到 $k/N(G)$ 机群，提出简便有效的 $k/N(G)$ 机群可用度评价的综合建模方法。算例研究表明：1) 为满足机群任务可用度的设计要求，可尽量压缩机群的运行时限来降低机群在任务间隔时间内的失效发生次数；同时，也可通过适当地延长维修时限改善机群在任务间隔时间内的修复效果，从而有效地提升机群的任务可用度。2) 机群的冗余设计对机群任务可用度的提升是显著的。上述研究有助于系统设计师开展设计优化，提升系统的综合效能。

### 参考文献

[1] 赵敏, 姚敏. 无人机群变航迹多任务综合规划方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(4): 560-563.  
ZHAO Min, YAO Min. Study on changeable path planning and multi-task assignment optimization design for unmanned aerial vehicles cluster[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(4): 560-563.

[2] ZHANG Y S, BASTANI F Y I L, CHENG J, et al. Availability analysis of robotic swarm systems[J]. IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable

- Computing, 2008(14): 331-338.
- [3] 樊兴, 张国平, 夏学知. 多机情报处理系统可用性建模分析[J]. 华中科技大学学报, 2009, 37(7): 62-65.  
FAN Xing, ZHANG Guo-ping, XIA Xue-zhi. Modeling the availability for multi-computer intelligence processing systems[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2009, 37(7): 62-65.
- [4] 范新媛, 徐国治, 应忍冬, 等. 基于随机回报网的机群系统可用性建模及仿真[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1655-1658.  
FAN Xin-yun, XU Guo-zhi, YING Ren-dong, et al. Modeling and analysis of cluster system availability with stochastic reward net[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(8): 1655-1658.
- [5] 刘士喜, 许志才, 方贤文. 基于随机 Petri 网的机群系统可信赖性研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(24): 6190-6193.  
LIU Shi-xi, XU Zhi-cai, FANG Xian-wen. Dependability research of cluster system based on stochastic Petri nets[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(24): 6190-6193.
- [6] 陈光宇, 张小民, 郑万国, 等. ICF激光装置的任务可用性模型和分析方法[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(9): 2103-2108.  
CHEN Guang-yu, ZHANG Xiao-min, ZHENG Wan-guo, et al. Evaluation methods and models of mission availability for ICF laser facilities[J]. High Power Laser and Particle Beam, 2012, 24(9): 2103-2108.
- [7] 高文, 祝明发, 徐志伟, 等. 基于维修时间约束的机群系统可用度的仿真算法[J]. 计算机学报, 2001, 24(8): 876-880.  
GAO Wen, ZHU Ming-fa, XU Zhi-wei, et al. A simulation algorithm of cluster system's availability with in repair time constrains[J]. Chinese J Computers, 2001, 24(8): 876-880.
- [8] 王立超, 杨懿, 于永利, 等. 离散Weibull分布下系统瞬时可用度的波动分析[J]. 系统工程学报, 2010, 25(2): 277-283.  
WANG Li-chao, YANG Yi, YU Yong-li, et al. Undulation analysis of instantaneous availability under discrete Weibull distributions[J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(2): 277-283.
- [9] 毛德军, 李庆民, 黄傲林. 编队防空系统任务可用度评估与保障方案优化[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(7): 1394-1402.  
MAO De-jun, LI Qing-min, HUANG Ao-lin. System availability evaluation and support project optimization for anti-aircraft system of ship formation[J]. System Engineering-Theory and Practice, 2011, 31(7): 1394-1402.
- [10] BIROLINI A. Quality and reliability of technical systems[M]. New York: Springer-Verlag Press, 1994.
- [11] 胡涛, 俞建.  $k/N(G)$ 表决冗余多阶段任务系统可靠性优化模型[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(1): 217-220.  
HU Tao, YU Jian. Reliability optimization model of  $k/N(G)$  phased mission systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(1): 217-220.
- [12] 原菊梅, 侯朝桢, 王小艺, 等. 考虑环境因素的分布式系统可靠性建模及其分析[J]. 控制与决策, 2007, 22(3): 309-313.  
YUAN Ju-mei, HOU Chao-zhen, WANG Xiao-yi, et al. Iistributed system reliability modeling and analysis considering environment factors[J]. Control and Decision, 2007, 22(3): 309-313.

编辑 黄 莘