

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.12.007

## 基于 RCM 的导弹装备最佳预防性维修周期决策

徐廷学, 张公学, 孙臣良

(海军航空工程学院兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对目前确定预防性维修周期时存在不确定性的问题, 建立了基于 RCM 的导弹装备维修周期决策模型。分别以总费用最小和可用度最大为目标建立导弹装备维修周期决策模型, 采用蒙特卡罗仿真进行模型求解, 采用模糊决策方法确定多目标综合最佳预防性维修周期, 并以某型导弹装备密封圈为例, 验证方法的有效性。实践分析结果表明: 该方法综合权衡了费用和可用度因素, 能较好地解决可用度低下且维修费用居高不下的问题, 有一定应用和参考价值。

**关键词:** RCM; 维修周期; 蒙特卡罗仿真; 模糊决策

**中图分类号:** TJ760.7 **文献标志码:** A

## Best Decision-Making for Preventive Maintenance Period of Missile Equipment Based on RCM

Xu Tingxue, Zhang Gongxue, Sun Chenliang

(Department of Ordnance Science & Technology, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Aimed at some uncertain problems in determining the maintenance period, the maintenance period decision models of missile equipment are established based on RCM. Respectively with the total costs minimum and availability maximum goals established the model, solved the models by Monte Carlo simulation, used fuzzy decision method to determine the optimal preventive maintenance cycle of multi-objective, and the effectiveness of the method is verified with certain missile equipment sealing ring as an example. Practical analysis of results showed that this method is a weighted combination of the costs and availability factors, and it can solve the problem that the low availability and high maintenance costs better. The method has some certain application and reference value.

**Key words:** RCM; maintenance period; Monte Carlo simulation; fuzzy decision

### 0 引言

以可靠性为中心的维修 (reliability centered maintenance, RCM) 分析, 是目前国际上通用的、用以确定装备预防性维修需求、优化维修制度的一种系统工程过程, 是发达国家军队及工业部门制定军用装备和设备预防性维修大纲的首选方法<sup>[1]</sup>。

在导弹装备 RCM 分析过程中, 预防性维修周期的确定是其中的一项重要内容, 也是 RCM 分析中需要解决的问题。目前, 有关 RCM 标准和文献中没有给出现成的方法来确定一个准确的维修周期。由于预防性维修周期的确定存在很大的不确定性, 在实际工作中, 通过工程人员的经验和定性判断来确定, 往往会造成“维修不足”或“维修过剩”。因而, 需要借助于建立科学、抽象的模型并对模型进行优化求解的方法得到合理的维修周期, 并在实践中进行检验。笔者基于 RCM, 对导弹装备最佳预防性维修周期决策进行研究。

### 1 导弹装备维修周期决策建模及仿真

#### 1.1 维修周期决策模型的建立

1) 建模假设及参数说明<sup>[2]</sup>。

① 每隔周期  $T$  进行更换, 如果期间发生故障则进行故障更换, 时间  $T$  为常数;

②  $C_p$ : 每次定时更换的总费用, 包括预防性更换的费用和系统或设备不能使用带来的损失;

③  $C_f$ : 每次故障的总费用, 包括故障更换费用和系统或设备不能使用带来的损失;

④  $C(T)$ : 以周期  $T$  进行更换时, 长期使用下的单位时间的费用;

⑤  $C(T, t)$ : 以周期  $T$  进行更换时, 在有限使用时间  $[0, t]$  内的期望费用;

⑥  $A(T)$ : 以周期  $T$  进行更换时, 长期使用条件下的平均可用度;

⑦  $T_p$ : 预防性更换所需的平均时间;

⑧  $T_f$ : 故障更换所需的平均时间;

⑨  $F(t)$ 、 $R(t)$  和  $f(t)$ : 产品首次故障时间累积分布函数、可靠度函数和故障密度函数, 其中, 当  $t=0$  时表示产品处于新状态。

2) 基于费用的导弹装备维修周期决策模型。

收稿日期: 2012-06-03; 修回日期: 2012-07-02

作者简介: 徐廷学(1962—), 男, 河南人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事装备综合保障理论与技术研究。

根据更新过程的基本理论，长期使用下，导弹装备的平均费用可表示为：

$$C(T) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(T, t)}{t} = \frac{\text{每个更新周期总费用的期望值}}{\text{更新周期长度}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{更新周期内总的期望费用} &= \text{预防性更换的费用} \times \\ &\text{预防性更换的概率} + \text{故障更换的费用} \times \\ &\text{故障更换的概率} = C_p R(T) + C_f F(T) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{期望更新周期长度} &= \text{平均预防性更换周期长度} \times \\ &\text{预防性更换的概率} + \text{平均故障更换周期长度} \times \\ &\text{故障更换的概率} = (T + T_p) \times R(T) + \int_0^T (t + T_f) f(t) dt \quad (3) \end{aligned}$$

由于  $T_p$  和  $T_f$  相对于维修周期  $T$  来说很小，因此在费用模型中可以忽略。此时，期望更新周期长度变为  $\int_0^T R(t) dt$ ，平均费用可表示为

$$C(T) = \frac{C_p R(T) + C_f [1 - R(T)]}{\int_0^T R(t) dt} \quad (4)$$

在式 (4) 中，如果  $T \rightarrow \infty$ ，表明没有进行更换，所有的费用都是由故障引起的。此时， $R(T) \rightarrow 0$ ，单位时间的费用为

$$C(T) \rightarrow C(\infty) \rightarrow C_f / \int_0^\infty R(t) dt = C_f / \text{MTTF} \quad (5)$$

为使更换经济有效，要合理地确定更换周期  $T$  以满足  $C(T) < C(\infty)$ 。如果没有满足此条件的  $T$  值，则说明定时更换是无效的，此时不值得进行定时更换。

### 3) 基于可用度的导弹装备维修周期决策模型。

为了保证导弹装备的正常使用，或降低备用品发生故障的风险，有时需要寻找合适的更换周期  $T$ ，以使得导弹装备的可用度最大。和建立费用模型类似，可以建立在长期使用情况下的可用度模型：

$$\begin{aligned} A(T) &= \frac{\text{一个更新周期中工作时间的期望值}}{\text{更新周期长度的期望值}} = \\ &\frac{T \times R(T) + \int_0^T t f(t) dt}{(T + T_p) \times R(T) + \int_0^T (t + T_f) f(t) dt} = \\ &\frac{\int_0^T R(t) dt}{(T + T_p) \times R(T) + \int_0^T (t + T_f) f(t) dt} \quad (6) \end{aligned}$$

当  $T \rightarrow \infty$  时，即不进行预防性维修工作的时候，可以得到

$$A(T) \rightarrow \text{MTTF} / (\text{MTTF} + T_f) \quad (7)$$

如果可用度是维修决策的主要因素，那么更换周期  $T$  应当满足

$$A(T) > A(\infty) \quad (8)$$

## 1.2 基于蒙特卡罗仿真的模型求解

前面基于费用和可用度要求建立了导弹装备定

期更换维修周期决策模型，但这些模型通常没有解析解，很难用解析的方法求解遵循各种目标的周期  $T$ 。由于导弹装备发生故障是随机的，因此故障发生的时间可以用随机变量来描述，就可以用蒙特卡罗仿真来对系统进行仿真计算<sup>[3]</sup>。

用蒙特卡罗仿真方法确定定时更换周期的基本思想是：根据经验确定一定期维修周期  $T$ ，将各随机变量输入计算机处理，并进行千万次抽样计算，得到该维修周期对应的费用或可用度值。多次改变  $T$  值，经过同样的抽样、统计得到  $C(T) \sim T$  曲线或  $A(T) \sim T$  曲线，在曲线图上对应最小  $C(T)$  值或最大  $A(T)$  值的维修周期即为导弹装备最佳定时更换维修周期。

## 2 导弹装备维修周期的多目标模糊决策

导弹装备维修周期虽可根据经济要求或可用度要求某一目标来确定，但在实际维修过程中，不能只考虑某一个因素，既要保证可用度也要考虑维修费用，这就要用到多目标综合分析方法，而多目标模糊决策方法正是解决这类问题的有力工具<sup>[4]</sup>。

采用模糊决策方法来确定导弹装备多目标综合最佳预防性维修周期的计算步骤如下：

1) 从任务可靠性要求、经济性要求和可用度要求的角度，分别采用单目标要求的预防性维修计算模型确定出在每个单目标下的预防性维修周期  $T_i$ 。

2) 采用多目标模糊决策方法对各种单目标的影响进行综合分析方法来获得多目标综合最佳预防性维修周期  $T$ 。

取域  $U = \{u_1, u_2, u_3\}$ ， $\tilde{A} \in F(U)$  为待确定的模糊集，其中： $u_1$  为可靠度目标； $u_2$  为可用度目标； $u_3$  为费用目标。根据模糊决策绝对比较法，采用以下步骤确定导弹多目标综合最佳预防性维修周期  $T$ 。

① 确定单目标指标  $x \in \{1, 2, 3\}$ ，使：

$$\tilde{A}(u_x) = \max \{ \tilde{A}(u_1), \tilde{A}(u_2), \tilde{A}(u_3) \} \quad (9)$$

② 将每个评议对象  $P_j (j = 1, 2, \dots, n)$  作两两比较

$$f_{u_x}(u_i, P_j), i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

③ 求出各单目标的隶属度  $\tilde{A}(u_i)$ ：

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n f_{u_x}(u_i, P_j), i = 1, 2, 3$$

$$\tilde{A}(u_i) = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} (i = 1, 2, 3) \quad (11)$$

④ 计算导弹装备最佳维修周期  $T$ ：

$$T = \sum_{i=1}^3 \tilde{A}(u_i) T_i \quad (12)$$

### 3 实例分析

某型导弹装备密封圈采用定时更换策略，推算其故障时间服从两参数威布尔分布，形状参数  $m$  和尺寸参数  $\eta$  分别为  $m=3.844$ ， $\eta=102.434$ 。推算该产品预防性更换所需的平均时间  $T_p=0.5$  h，故障更换所需的平均时间  $T_f=2$  h，每次定时更换的总费用  $C_p=500$  元，每次故障的总费用  $C_f=1000$  元，求最佳更换周期  $T$ 。

#### 3.1 以总费用最小为目标确定维修周期

根据式 (5) 计算产品不进行定时更换，只进行故障更换时单位时间所需费用如式 (13)

$$C(\infty) = C_f / \int_0^{\infty} R(t) dt = 1000 / \int_0^{\infty} \exp[-(\frac{t}{102.434})^{3.844}] dt = 10.79 \quad (13)$$

根据此值可大致估算仿真计算维修周期  $T$  的取值范围，取  $T \in [30, 180]$ ，步长为 10 d，仿真次数取 1 000 次，结果如表 1 和图 1 所示。

表 1 故障维修周期与费用的关系

$T/d$	$C(T)/(元/d)$	$T/d$	$C(T)/(元/d)$
20	25.06	100	9.39
30	16.85	110	9.79
40	12.90	120	10.16
50	10.75	130	10.45
60	9.58	140	10.64
70	9.02	150	10.74
80	8.89	160	10.78
90	9.05	170	10.79

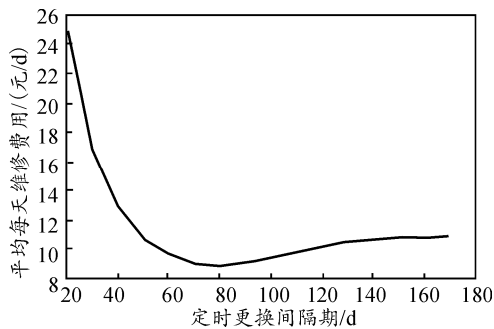


图 1  $C(T) \sim T$  关系曲线

从图 1 中可见，当  $50 \leq T \leq 160$  时， $C(T) < C(\infty)$ ， $C(80) = \min_T C(T) = 8.89$  元/d。因此，从减少费用角度来看，最佳更换周期为  $T=80$  d。

#### 3.2 以可用度最大为目标确定维修周期

类似地，首先根据式 (8) 求出不进行预防性维修时的可用度为  $A(\infty) = 97.89\%$ ，然后进行仿真计算，得到如表 2 和图 2 所示结果。当  $T \geq 30$  d 时，

$A(T) > A(\infty)$ ， $A(60) = \max_T A(T) = 98.85\%$ ；因此，从可用度角度考虑，最佳更换周期为  $T=60$  d。

表 2 故障维修周期与可用度的关系

$T/d$	$A(T)/\%$	$T/d$	$A(T)/\%$
20	97.55	100	98.38
30	98.31	110	98.23
40	98.66	120	98.09
50	98.81	130	98.00
60	98.85	140	97.94
70	98.80	150	97.90
80	98.70	160	97.89
90	98.55	170	97.89

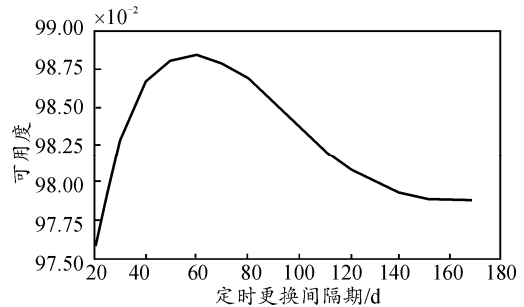


图 2  $A(T) \sim T$  关系曲线

#### 3.3 多目标模糊决策确定最佳维修周期

假设该产品维修周期的确定主要从可用度和维修费用 2 个角度来考虑；因此，取因素集  $U = \{u_1, u_2\}$ ，其中  $u_1$  为可用度最大， $u_2$  为总费用最小。现确定  $U$  中元素的模糊集，如式 (14)

$$\tilde{A} = (\tilde{A}(u_1), \tilde{A}(u_2)) \quad (14)$$

选 10 名有丰富经验的专家和技术维修人员作为评议者： $P = \{P_1, P_2, \dots, P_{10}\}$ 。经讨论后，这 10 名评议者认为该产品在维修过程中首先要保证其可用度，因此共同协定把  $u_1$  定为影响预防性维修周期的主要因素，并给打上 10 分，即

$$f_{u_1}(u_1, P_j) = 10 \quad (j = 1, 2, \dots, 10)$$

另外评分分别为：

$$\begin{aligned} f_{u_1}(u_2, P_1) &= 8, & f_{u_1}(u_2, P_2) &= 7, \\ f_{u_1}(u_2, P_3) &= 8, & f_{u_1}(u_2, P_4) &= 8, \\ f_{u_1}(u_2, P_5) &= 9, & f_{u_1}(u_2, P_6) &= 7, \\ f_{u_1}(u_2, P_7) &= 8, & f_{u_1}(u_2, P_8) &= 7, \\ f_{u_1}(u_2, P_9) &= 9, & f_{u_1}(u_2, P_{10}) &= 9. \end{aligned} \quad (15)$$

根据式 (11) 求得隶属度：

$$\alpha_1 = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} f_{u_1}(u_1, P_j) = 10 \quad (16)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} f_{u_1}(u_2, P_j) = 8 \quad (17)$$

将  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  归一化得：

$$\tilde{A}(u_1) = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0.5556, \quad \tilde{A}(u_2) = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0.4444 \quad (18)$$

故多目标综合最佳维修周期  $T$

$$T = \tilde{A}(u_1)T_1 + \tilde{A}(u_2)T_2 = 0.5556 \times 60 + 0.4444 \times 80 = 68.89 \approx 69(d) \quad (19)$$

### 4 结论

实例分析结果表明：根据不同目标确定出的维修周期可能不同，可用度最大和总费用最小 2 个目标不能同时达到最优。而同时考虑这 2 个因素，采用多目标模糊决策方法确定的导弹装备最佳维修周期接近单目标确定的各维修周期的平均值；因此，

\*\*\*\*\*

(上接第 7 页)

### 4.3 基于 SysML 的概念建模

应急空间侦察任务的概念模型共分为 2 层，顶层为整个应急空间侦察任务的作战过程概念模型，包括 4 个任务阶段，如图 6。模型底层为 4 个基本任务阶段的概念模型，是对顶层模型的细化，如图 7~10。基于上述 2 层模型的详细描述，建立应急空间侦察任务整体作战过程的概念模型，包括 4 个任务阶段以及 16 个作战活动，具体如图 11。

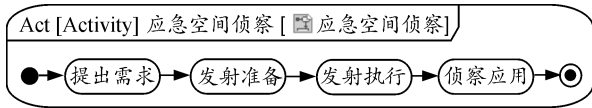


图 6 应急空间军事任务顶层概念模型

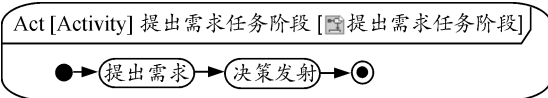


图 7 提出需求任务阶段模型

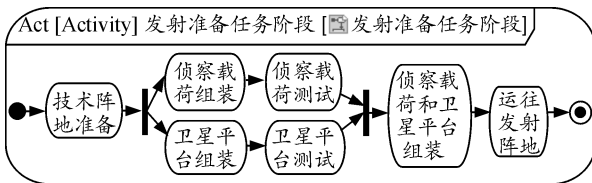


图 8 发射准备任务阶段模型

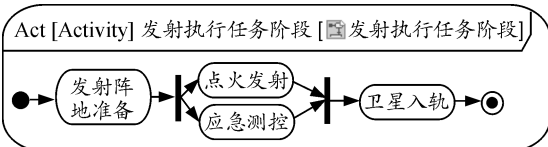


图 9 发射执行任务阶段模型

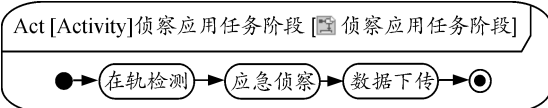


图 10 侦察应用任务

该方法综合权衡了费用及可用度等因素，能较好地解决可用度低下且维修费用居高不下的问题，但需要注意的是如何合理地确定每个评议者的数值。

### 参考文献：

[1] 贾希胜, 程中华. 以可靠性为中心的维修 (RCM) 发展动态[J]. 军械工程学院学报, 2002: 14(3): 29-32.  
 [2] 贾希胜. 以可靠性为中心的维修决策模型[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.  
 [3] 苏黄, 等. 基于遗传算法和蒙特卡罗仿真的设备维修策略优化[J]. 东南大学学报, 2006: 36(6): 941-945.  
 [4] 王可定, 周献中. 运筹决策理论方法新编[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 162-168.

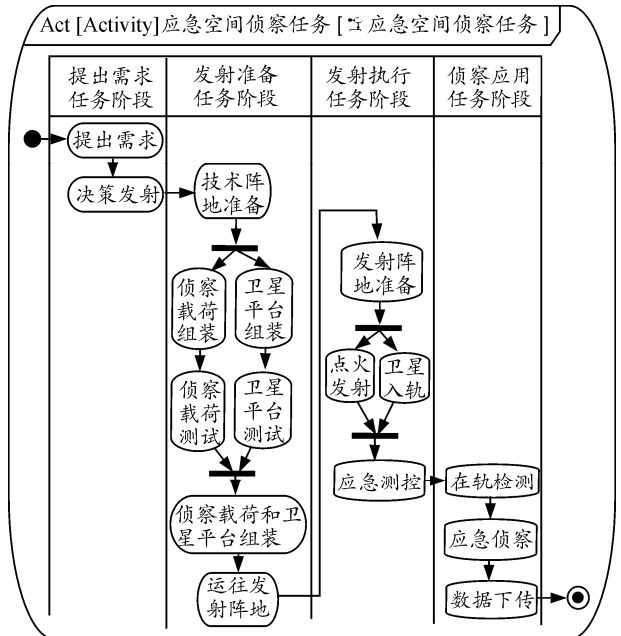


图 11 整体作战过程概念模型

### 5 结束语

笔者在介绍和分析 SysML 建模语言和概念建模方法的基础上，建立了应急空间军事任务的抽象概念模型，并基于 SysML 构建了典型应急空间军事任务的概念模型，验证了基于 SysML 的应急空间军事任务概念建模方法的可行性。

### 参考文献：

[1] 张钧屏. 应急空间技术——军事空间发展的必经之路[J]. 卫星应用, 2007, 15(1): 33-41.  
 [2] Jeremy Noel, Raymond Escorpizo, Edward Jones. Transforming the National Spacelift Architecture[EB/OL]. (2004-05)[2011-06]. <http://responsivespace.com/psearch.asp>.  
 [3] 陈洪辉, 苏伟, 柳海峰. SysML 及其在 C<sup>4</sup>ISR 系统建模中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(11): 60-64.