

# 装备维修优化的决策分析

郑东良, 杜纯

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:**维修是一种实践性很强的活动过程,先进的装备需要科学的维修与现代化的管理,需要科学地确定维修内容,但很少从决策分析的角度来讨论维修优化问题。本文从维修需求和维修目标出发,根据决策分析的基本程序,构建了维修价值函数和效用函数,并采用影响图刻画了维修活动之间的关系,量化分析了维修活动的优化问题,给出了一个有关的实例分析过程。

**关键词:**维修优化;决策分析;影响图

**中图分类号:**N945.12   **文献标识码:**A   **文章编号:**1009-3516(2003)05-0082-05

到目前为止,装备维修领域应用最成功的方法,是由美国的诺兰和希普于1978年确定的以可靠性为中心的维修(RCM, Reliability - Centered Maintenance)<sup>[1-2]</sup>, RCM在保证装备使用安全、提高装备完好率、改善维修经济性等方面取得了显著的效果和效益,并使维修登上了科学的殿堂。随着装备的发展和使用的规模化,维修的科学化要求显著增强,要求科学地确定维修内容,优化维修工序<sup>[3-4]</sup>。目前,RCM已在航空、航天、核工业、铁路等行业领域得到了广泛应用,但RCM在很大程度上是一种以实践经验为主的方法,应用的有效性在一定程度上取决于人的隐性知识,很少从决策分析的角度来探讨维修优化问题。本文尝试将决策理论与RCM相结合,探索装备科学维修的途径和方法,加快维修的科学化进程。

决策理论一般可分为两种形态:一是求解性,通过建立一种精心设计的指标体系,规范地表示和描述维修优化问题的需求和偏好;二是描述性,刻画实际的决策过程,描述各种维修活动是如何处理需求的。需求和偏好可以用一个系统特性列表来表示,如高可靠性,低环境危险性,高安全性,低维修费用等。但在实际问题中,这些目标存在着矛盾和不可公度性,往往不能同时得到满足,因此必须建立一个描述目标优先程度的偏好结构。当确定了系统目标以后,就必须确定达到目标的行动方案,因而需要建立相应的数学模型,以便分析各方案的优劣和定量评价各维修活动效果。决策分析的特征之一就是,一方面它能够建立系统的需求和偏好结构体系;另一方面它又能根据需求和偏好进行优化分析,刻画实际决策过程<sup>[5-6]</sup>。

## 1 维修决策目标

RCM的基本目标是最经济的资源消耗保持和恢复装备的固有可靠性与安全性。由于维修资源的有限性,保持系统所有设备、部件等的高性能指标是不可能的,也是不可取的,因此必须确定系统目标相应的优先度。根据一般的系统特性,这些优先目标可归纳为高安全性、低环境危险性、高使用规范性和低维修费用。

### 1.1 目标和系统特性

决策者经常直接列出一个如上的系统特性优先目标清单,这些目标往往是矛盾的,不可能同时达成。处理这些矛盾的的基本方法,一般是建立一个系统特性集。系统特性可视为随机变量。

### 1.2 维修任务

在RCM中,有四项基本的维修任务<sup>[4,7]</sup>:①定期故障查找任务;②定期视情维修任务;③定期拆修任务;④定期报废任务。RCM的关键作用在于它能系统地查找故障原因,并应用逻辑决断法确定技术可行而又值

得做的维修活动来预防和控制重大故障发生的概率,而这也正是维修活动决策优化研究的一个主要目标。

## 2 维修活动量化模型与影响图

### 2.1 维修活动的量化方法

设  $X$  为一系统特性向量,  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 。考虑在区间长度  $\tau$  的时间间隔内完成定期预防性维修活动,量化基于向量  $X$  的维修活动,即可得到各种特性  $x_i$  和  $\tau$  之间的关系。

$$x_i = x_i(\tau), i = 1, 2, \dots, n \tag{1}$$

构建式(1)的一个有效方法是采用自下而上的系统工程方法,即首先建立部件级的维修活动量化模型;其次据此建立部件和系统特性之间的关系模型,见图1。

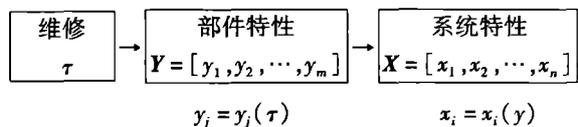


图1 维修活动量化模型

$Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]$  为部件的特征向量,如  $y_j$  为平均部分停机维修时间 MFDT (mean fractional down time),用以描述一个需要定期检测的部件。假设部件故障率为常数  $\lambda_j$ ,则可近似得到该部件的特性描述  $y_j = y_j(\tau) \approx \lambda_j \tau / 2$ ,由此可进一步确定系统模型  $x_i = x_i(y)$ ,  $x_i = x_i(\tau)$ 。在系统模型建立过程中可应用故障树分析、马尔可夫模型等方法和技术,本文将侧重介绍应用马尔可夫模型建立维修活动优化模型的过程和方法。在建模过程中应注意,每一部件的特性  $y_j$  都可能影响到系统的几个特性  $x_i$ 。

### 2.2 维修活动的模型描述

对于维修活动,如果其对系统特性的影响事先是已知的,则处理这种问题可应用价值函数;如果维修活动的影响只能用概率来描述,那么处理这种不确定性的方法就必须应用效用函数,并且需要确定决策者的风险偏好。价值函数只需进行价值权衡,而效用函数不仅需要价值权衡,还要进行风险辨识。

对于系统特征向量  $X$ ,如果需要确定出其偏好结构就必须对系统特征向量进行辨优,这对决策者来说,显得很不方便,因此在实际决策问题分析过程中,往往代之以价值函数。实际上,效用函数可看作是价值函数的扩展,维修优化的目的只是为了获得维修活动的最大效用期望值。当然,较之价值函数,效用函数的确定是一件更为困难的事情,它涉及到决策者的风险观念<sup>[5,8,9]</sup>。

### 2.3 影响图

从上述分析可以看出,维修活动、系统特性和价值/效用函数之间存在着密切的关系,这种关系可用影响图 (influence diagram) 来形象描述 (见图2)。影响图可描述决策 (维修活动)、随机变量 (系统特性) 和偏好 (效用函数) 之间的关系<sup>[10]</sup>。

图2中有三种类型的节点。决策节点表示决策者进行决策活动的一种状态,如维修类型;机会节点表示一种实际状态,这些状态可用随机变量来描述,图中应用了两种类型的机会节点:中继节点描述系统的部件特性,主节点表示系统特性,主节点的值作为系统特性和效用函数的输入;价值节点则表示效用函数。

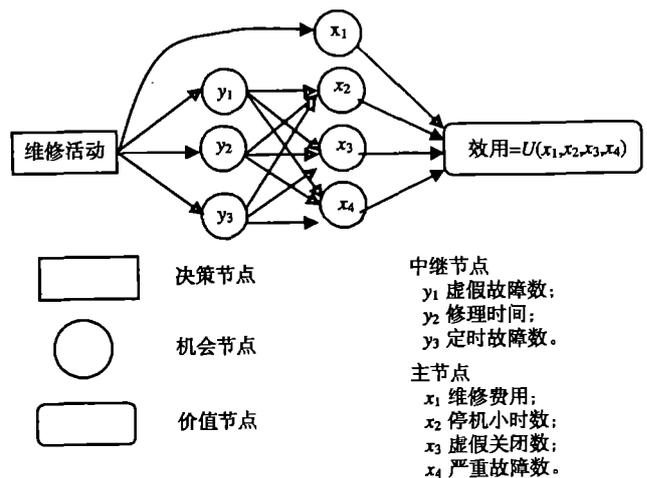


图2 维修活动、系统特性和效用函数之间关系影响图

## 3 维修系统的效用函数和损失函数

效用函数的确定一般是通过和决策者的辨优对话而获得<sup>[5-6]</sup>。如确定安全性和环境保护方面的费用  $C_s$ , 决策者一般可能被询问  $C_s$  的值是否与下列两个结果等价:①  $A = \{ \text{花费 } C_s, \text{ 避免一次高压状态} \}$ ; ②  $B = \{ \text{不花费任何费用, 但有一次高压状态} \}$ 。当决策者在确定  $C_s$  时,还应考虑人员、环境危险性,以及由于一次高压状态而引起的可能的物质损失。在进行系统维修优化决策时,应考虑的其他费用还有如系统错误关闭

的费用  $C_{inp}$ , 每小时使用的损失费用  $C_u$  以及维修费用  $C_m$  等, 据此可建立描述决策者和损失函数之间关系的线性损失函数:

$$L = \lambda C_{inp} + UC_u + SC_s + C_m \quad (2)$$

式中:  $\lambda$  表示系统的故障率,  $U$  表示系统的不可用度,  $S$  表示系统不可控制事件的变化率。

维修费用一般包括预防性维修费用和修复性维修费用。将所有的维修费用累加并用  $C_{tot}$  (maintenance cost) 表示。计算时应考虑预防性维修、修复性维修的强度, 以及每一维修活动的费用。若  $A_{PM}$  表示预防性维修活动集合,  $A_{CM}$  表示修复性维修活动集合, 则系统总的维修费用  $C_{tot}$  为

$$C_{tot} = \sum_{i \in A_{PM}} \frac{C_{PM,i}}{\tau_i} + \sum_{j \in A_{CM}} C_{CM,j} \cdot f_j \quad (3)$$

式中:  $C_{PM,i}$  表示预防性维修活动的费用,  $\tau_i$  表示预防性维修性活动之间的时间间隔;  $C_{CM,j}$  表示修复性维修活动的费用,  $f_j$  表示单位时间修复性维修活动的次数。对式(2)求极值, 即可得到系统维修活动优化结果。

### 4 实例分析

根据文献[11], 设有一气体压气机, 气体通过压气机的一个主动压缩机和一个旁通压缩机被压缩。为了保证气体正常流出, 安装了一个压力控制器(PC), PC 控制压缩机的动力; 如果这个控制过程失效, 则由系统过程关闭系统提供安全屏障; 对于高压, 压力传感器(PT)作用关闭阀(SDV), 压缩机停止工作, 气体被关闭。为分析简单起见, 仅考虑两种维修活动, 其影响图见图3。

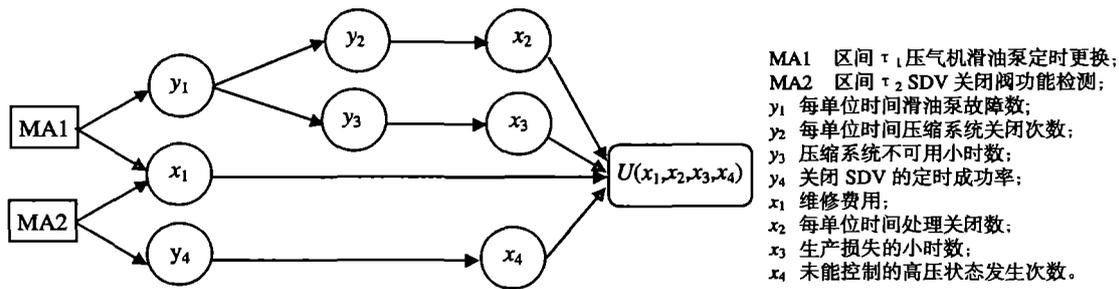


图3 系统维修活动影响图

#### 4.1 维修活动的确定

考虑主动压气机润滑油泵机械磨损这种故障原因, 根据故障原因和故障后果, 设该维修活动为定时拆修, 即在某一区间  $\tau_1$  内定时更换主动压气机的润滑油泵, 用 MA1 表示。对于关闭阀 SDV, 其有一隐蔽功能故障, 在隐蔽功能故障被发现之前, 该阀的定期故障可能导致潜在故障的发生。因此, 对于该类故障应进行定期故障检测, 即在区间  $\tau_2$  内应完成对 SDV 的功能检测, 用 MA2 表示。

#### 4.2 维修活动的量化

由图3, MA1 和 MA2 两种维修活动影响系统维修费用的特征变量为  $x_1$  和部件特性变量  $y_1, y_4$ 。  $y_1$  为一随机变量, 表示润滑油泵故障次数, 可用润滑油泵故障率  $\lambda_L$  来度量。假设润滑油泵故障是由于机械磨损, 设故障特性服从威布尔分布, 其特征寿命为  $\eta$ , 形状参数为  $m$ 。

假设润滑油泵在区间  $\tau_1$  之后更换, 故障在  $\tau_1$  某一时间发生, 根据最小维修策略<sup>[12]</sup>, 润滑油泵故障的平均故障率为

$$\lambda_L(\tau_1) = \frac{1}{\tau_1} \int_0^{\tau_1} m\eta^{-m} t^{m-1} dt = \eta^{-m} \tau_1^{m-1} \quad (4)$$

其它故障原因导致的主动压气机的故障率用  $\lambda_0$  表示, 则主动压气机的系统故障率  $\lambda_A(\tau_1)$  为

$$\lambda_A(\tau_1) = \lambda_0 + \eta^{-m} \tau_1^{m-1} \quad (5)$$

由式(5)可确定出 MA1 和  $\lambda_A(\tau_1)$  之间的功能关系, 从而确定出系统特性和  $\lambda_A(\tau_1)$  之间的关系。式中  $\lambda_0$  独立于  $\tau_1$ 。

特征变量  $y_4$  表示 SDV 未能定时关闭事件的发生概率, 可用 MFDT 度量。假设 SDV 安全危害性故障密度为  $\nu_{SDV}$ , MA2 为在区间  $\tau_2$  内完成 SDV 功能检测的维修活动, 则有

$$P_{SDT}(\tau_1) \approx \nu_{SDV} \cdot \frac{\tau_2}{2} \tag{6}$$

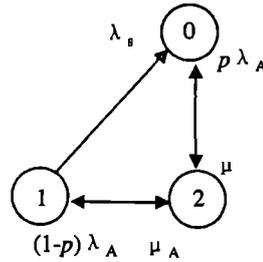
4.3 维修活动的系统分析

将主动压气机和旁通压气机视为一个系统,即可导出系统关闭的故障率  $\lambda_c$  和不可用度  $\mu_c$  的模型,  $\lambda_c$  用于衡量  $y_2$ ,  $\mu_c$  用于衡量  $y_3$ 。应用马尔可夫状态转移模型(见图4),可得  $\lambda_c$  和  $\mu_c$  的计算公式。

应用马尔可夫模型,系统稳定状态的概率为

$$P_2 = \frac{\mu(\lambda_S + \mu_A)}{(p\lambda_A + \mu)(\lambda_S + \mu_A) + (1-p)\lambda_A(\lambda_S - \mu)} \tag{7}$$

$$P_1 = \frac{(1-p)\lambda_A P_2}{\lambda_S + \mu_A} \tag{8}$$



状态:  
 2 主动压气机正常, 旁通压气机故障;  
 1 主动压气机故障, 旁通压气机正常;  
 0 主动压气机故障, 旁通压气机故障。

图4 系统的马尔可夫图

$$P_0 = 1 - P_1 - P_2 \tag{9}$$

式中:  $\lambda_A$  为主动压气机故障率;  $\lambda_S$  为旁通压气机故障率;  $p$  为旁通压气机从故障到正常工作的概率,  $0 < p < 1$ ;  $\mu_A$  为主动压气机的平均故障率;  $\mu$  为系统故障的平均故障率。压气机系统的不可用度为

$$\mu_c = P_0 \tag{10}$$

压气机系统关闭的故障率为

$$\lambda_c = p\lambda_A P_2 + \lambda_S P_1 \tag{11}$$

进一步整理,可得到下列近似公式

$$\mu_c = \mu_c(\lambda_A) = C_1 \lambda_A + C_2 \tag{12}$$

$$\lambda_c = \lambda_c(\lambda_A) = C_3 \lambda_A \tag{13}$$

式中:  $C_1 = (1 + \lambda_S/\mu_A)(p/\mu + (1-p)/\mu_A) - (1-p)/\mu_A$ ;  $C_2 = -\lambda_S/\mu_A$ ;  $C_3 = p(1 + \lambda_S/\mu_A) + (1-p)\lambda_S/\mu_A$ 。

4.4 维修活动的系统模型

考虑系统特性  $x_2, x_3, x_4$ , 整个系统压气机错误关闭的故障率为

$$\lambda = \lambda_c + \lambda_{SDV} + \lambda_{PT} + \lambda_{PC} \tag{14}$$

式中:  $\lambda_{SDV}, \lambda_{PT}, \lambda_{PC}$  分别表示压气机系统部件错误关闭的故障率。

该系统的使用不可用度为

$$U = 1 - (1 - \mu_c)(1 - \mu_{SDV})(1 - \mu_{PT})(1 - \mu_{PC}) \approx \mu_c + \mu_{SDV} + \mu_{PT} + \mu_{PC} \tag{15}$$

假设相互独立,系统高压而不能控制的状态发生概率为

$$S = [1 - (1 - P_{SDV})(1 - P_{PT})] \nu_{PC} \tag{16}$$

式中:  $P_{SDV}, P_{PT}$  分别表示关闭阀、压力传感器的 MFDT,  $\nu_{PC}$  表示压力控制器由故障到使用状态的密度。根据式(14)、(15)和(16),即可建立如式(2)所示的压气机系统维修费用损失函数  $L$ 。

4.5 维修系统优化决策

通过上述两个维修活动 MA1 和 MA2 说明具体的维修系统优化过程和结果。

MA1:是在区间  $\tau_1$  更换润滑油的维修活动,  $\tau_1$  的优化值可以通过最小化损失函数而得。应用式(3)、

(6)、(12)、(13)、(14)和(15),对式(2)微分并令  $\frac{\partial L}{\partial \tau_1} = 0$ ,得

$$\tau_1 = \eta \left( \frac{C_{PM1}}{(C_3 C_{up} + C_1 C_u + C_{CM,1})(m-1)} \right)^{1/m} \tag{17}$$

MA2:在区间  $\tau_2$  内进行功能检测维修活动,  $\tau_2$  的优化值可通过最小化损失函数而得。应用式(3)、(6)

和(8),对式(2)微分并令  $\frac{\partial L}{\partial \tau_2} = 0$ ,得

$$\tau_2 = \sqrt{\frac{C_S \nu_{SDV} (1 - P_{PT}) \nu_{PC}}{2 C_{PM2}}} \tag{18}$$

通过上述量化分析,即可得到系统定时拆修和功能检测的维修间隔期,进一步改进了维修的针对性和有效性,同时也提供了一种可行的维修策略的研究方法模型。

## 5 结束语

在以可靠性为中心的维修分析中,引入决策分析技术,并将决策分析与影响图结合,建立了一种维修优化决策分析模型的框架结构。虽然许多方面只是简要涉及,但这种方法对进一步促进 RCM 的发展,更好地理解和掌握维修优化决策问题的各个方面是十分有益的。随着装备的大型化、复杂化和体系化,维修往往是由多种不同的活动组合而成的,因此,应用决策分析技术对维修活动、维修效果进行量化分析和评估决策显得十分必要和有意义,这对科学地确定维修内容,改善维修的针对性和有效性具有重要的作用。实际上,维修优化决策分析还有许多问题值得进一步研究,如维修优化决策模型中偏好结构的建立、效用函数的确定与应用等。

### 参考文献:

- [ 1 ] Nowlan F S, Heap H F. Reliability - centered Maintenance [ R ]. AD - A066579, 1978.
- [ 2 ] Nowlan F S. Preventive Maintenance - Past, Present and Future [ A ]. AIAA Conference on Air Transportation, Technical Perspectives and Forecasts [ C ]. Calif: Los Angeles, 1978.
- [ 3 ] SAE JA1011. 1999. Evaluation Criteria for Reliability - centered Maintenance Processes [ S ].
- [ 4 ] 陈学楚. 维修基础理论 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [ 5 ] 李怀祖. 决策理论导引 [ M ]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [ 6 ] 汪应洛. 系统工程 [ M ]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [ 7 ] Moubrey J. Reliability - centered Maintenance [ M ]. Oxford: Butterworth - Heinenann, 1997.
- [ 8 ] Keeney R L, Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preference and Value Tradeoffs [ M ]. New York: John Wiley and Sons, 1976.
- [ 9 ] Degroot M H. Optimal statistical decisions [ M ]. New York: McGraw - Hill Inc, 1970.
- [ 10 ] Shachter R D. Evaluating influence diagrams [ J ]. Operations Research, 1986, 34(6): 871 - 882.
- [ 11 ] Vatn J. Maintenance optimization from a decision theoretical point of view [ J ]. reliability engineering and system safety, 1997, (58): 119 - 126.
- [ 12 ] Aschter H, Feingold H. Repairable systems reliability. Modeling, Inference, Misconceptions and their Causes [ M ]. New York: Marcel Dekker Inc, 1984.

(编辑: 姚树峰)

## Decision Analysis of Optimization in Equipment Maintenance

ZHENG Dong - liang, DU Chun

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China )

**Abstract:** Proceeding from requirements and goals in maintenance and according to the basic procedures of decision analysis, this paper builds up a maintenance optimization model by value and utility functions, visualizes the relations between the maintenance activities by adopting influence diagrams, and quantitatively analyzes the optimization of maintenance activities. Finally the paper gives an illustrative example.

**Key words:** optimization in maintenance; decision analysis; influence diagram