

Synthetic Evaluation Method Research on Maintenance Plan of Large Equipment Maintenance*

Fangfang Wang, Xiaojian Hu

School of Management, Hefei University of Technology, Key Laboratory of Optimization and Intelligent Decision-Making Ministry of China, Hefei
Email: wangff1222@163.com, xiaojianhu@sohu.com

Received: Nov. 28th, 2011; revised: Dec. 13th, 2011; accepted: Jan. 1st, 2012

Abstract: Large equipment maintenance has many process, its scheduling is relatively complex. It is difficult to choose the best plan. To solve this problem, is proposed based on DS evidence theory, analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method of a comprehensive assessment of the large equipment maintenance project. Fusion using DS evidence theory more than expert opinion, the level of analysis to get the weight of each index, a comprehensive evaluation of fuzzy comprehensive evaluation to obtain the optimal plan, so to avoid subjective factors influence the decision-making results, and the establishment of an integrated assessment model for large equipment maintenance plan, through the large equipment maintenance program evaluation, validation of the model is reasonable.

Keywords: Large Equipment Maintenance; DS Evidence Theory; Level of Analysis; Fuzzy Comprehensive Evaluation

大型装备维修计划综合评估方法研究*

王芳芳, 胡小建

合肥工业大学管理学院, 过程优化与智能决策教育部重点实验室, 合肥
Email: wangff1222@163.com, xiaojianhu@sohu.com

收稿日期: 2011 年 11 月 28 日; 修回日期: 2011 年 12 月 13 日; 录用日期: 2012 年 1 月 1 日

摘要: 大型装备维修集很多工序于一体, 调度计划相对复杂, 难以选择出最佳计划。针对该问题, 提出了一种基于证据理论、层次分析法和模糊综合评判的维修计划综合评估方法。该方法采用证据理论融合多专家意见, 层次分析法得到各指标权重, 模糊综合评判进行综合评价得到最优计划, 这样避免了主观因素对决策结果的影响, 并建立了维修计划综合评估模型, 通过对维修计划的评价, 验证了该模型的合理性。

关键词: 大型装备维修; 证据理论; 层次分析法; 模糊综合评判

1. 引言

制造服务已成为制造业新的经济增长点, 研制为装备制造企业、装备用户企业和装备服务企业提供全面的 MRO 数字化解决方案和信息化集成技术的面向大型装备的维修、维护和大修(MRO)支持系统势在必行。解决 MRO 关键技术之一的精益 MRO 过程管理则需要协同计划方法, 由此便产生了大型装备维修计

划评估问题。

大型装备维修计划是企业在计划期内维护、检查和修理大型装备的计划, 大型装备维修不同于其他设备的维修, 它需要对大型装备进行拆装, 各种大型装备的类型不同, 其维修的工序、时间和优先级也不尽相同。维修的数量也会因季节的不同而不同。大型装备的维修方式定义为 5 种情况: 技能提升(SLU)、事后维修(OTF)、周期预防性维修(FTM)、状态维修(CBM)、技术维修(DOM)。

*基金项目: 国家“863”计划资助项目(2009AA043403)。

大型装备维修计划按时间可分为年度、季度、月度计划、旬计划、周计划；以机车维修为例，维修类型可以分为大修、轻大修、中修、辅修。同一种修程下，不同的机车类型对应的里程不同。

且随着机车性能越来越高，修理体制改革，不同维修类型对应的里程数也随之调整。机车大修是全面的恢复性修理，大修后的机车，基本上需达到新车的水平；轻大修是指仅次于大修的检修(包括走行部及部分车厢的电气维修)；中修主要是修理走行部，因此必须把机车架起推出走行部进行修理；辅修是属于临时性的维修和养护，辅修不进维修厂，由机务段进行维修保养。维修计划评估是关于维修计划的相关活动、特征、产出成果、影响等方面的数据、信息的收集与分析，以判断并提高维修计划的效率和效果，并有助于做出未来的决策。

传统的装备维修主要根据维修人员经验和一般性的装备维修技术手册制定维修计划和分配维修资源，缺乏准确性、优选性。大型装备维修计划评估是保证维修计划编制合理、执行成功并取得效果的关键性措施。对大型装备维修计划进行评估，可以衡量计划制定的合理性及可行性，发现计划编制的局限性和不足，及时动态制定和调整计划，使计划编制更加合理，维修资源能够得到最优利用。

2. 大型装备维修计划评价指标体系

根据设备维修的要求和标准，主要从成本、时间及混合指标这三个方面建立如表 1 所示的指标体系^[1]。

Table 1. Hierarchical structure
表 1. 指标体系

目标层	准则层	指标层
大型装备维修计划评估	成本	库存费
		延迟赔偿费
		调度管理费
		调度净现值
		平均待修时间
	时间	平均在修时间
		最大拖期/提前时间
		平均拖期/提前时间
	混合指标	台位利用率
		最大台位负载
平均台位负载		
台位均衡使用率		
		人工利用率

3. 大型装备维修计划综合评估模型

层次分析法^[2]是一种定性和定量相结合的多目标决策方法，用于确定个指标间的权重大小，它把复杂问题分解，开成层次结构，系统化，层次化，且方法简单易于实现。该方法中判断矩阵是决策者意愿的体现，同时存在着决策者的个人意见，即带有主观性。采用多个专家评估的办法，并使用 D-S 证据理论对多个专家的意见进行数据融合，可以大大降低专家的个人主观意见对整个评估结果的影响，提高评估的可靠性、客观性和真实性。采用模糊综合评判可以将指标的真实值和层次分析法得到的权值相结合，从而得到最终结果，综合评价方法步骤如下：

首先，结合实际评价中的可操作性和信息有效性，使用证据理论对多位专家意见进行融合，对各个指标进行比较，形成判断矩阵，克服其它方法中决策者主观意见影响评价结果的不足；其次，采用层次分析法确定指标权重，将评价者的专业知识和经验判断给予充分量化^[3]。最后，采用模糊综合评判进行评估得到最终结果。

3.1. 利用证据理论改造判断矩阵

传统的层次分析法的判断矩阵的取值往往由一个专家分析得到，带有主观性，不确定性，在这里则采用证据理论融合多专家的意见得到判断矩阵的取值，消除其主观性。

Dempster 合成法则^[4]

设 Bel_1, \dots, Bel_n 是同一识别框架 Θ 上的两个信度函数， m_1, \dots, m_n 分别是其对应的基本可信度分配， $Bel_1 \oplus \dots \oplus Bel_n$ 存在且基本可信度分配为 m ，则定义 $m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n$ 为：

$$m(A) = (1 - K)^{-1} \sum_{\substack{A_i \cap \dots \cap A_n = A \\ A_i, \dots, A_n \subset \Theta}} m_1(A_1) \dots m_n(A_n) \quad (1)$$

$$\text{其中: } K = \sum_{\substack{A_i \cap \dots \cap A_n \neq \emptyset \\ A_i, \dots, A_n \subset \Theta}} m_1(A_1) \dots m_n(A_n) \quad (2)$$

使用证据理论改造判断矩阵的方法：1) 由多位专家独立的对评估指标间的重要性进行评估。2) 根据专家的评估结果，使用证据理论对多位专家的意见进行证据合成，获得专家们对每个相关指标综合评价，确定两两判断矩阵。

层次分析法主要采用 1-9 标度法，对 n 个指标进行两两比较得到一个正互反矩阵 A ，其中 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ，满足 $a_{ii} = 1$ ， $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$)，并对其进行一致性检验，则 a_{ij} 含有 17 种取值，根据 DS 证据理论，标度识别框架^[5] $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9, \theta_{10}, \theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}, \theta_{15}, \theta_{16}, \theta_{17}\}$ ，其中 $\theta_1 = 9$ ， $\theta_{17} = 1/9$ 。

由于存在评价客体的不确定性和专家个人主观性，专家对于两个指标的重要性判断并不完全准确，对自己的意见有所保留，但总的来说还是在某个范围内变动。焦元 θ_i 是判断矩阵的取值，专家给出对可能的取值的信任程度 a 以及不确定的信任度，即对整个识别框架 Θ 信任度。

针对来自不同证据源的数据，使用证据理论相关公式可以综合求出新的基本概率指派函数 $m(A)$ 。例如，现有一组数据，定义专家 1 和专家 2 的意见分别为信度函数 Bel_1 和 Bel_2 ， m_1 和 m_2 分别是其对应的基本概率指派函数，焦元为九级标度，专家对各焦元的信度如表 2 所示。

使用 Dempster 合成法则对三个专家的意见进行数据融合，由公式(1)(2)得到数据融合结果见表 3。

Table 2. Professor belief
表 2. 专家信度

评语集	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6
θ_1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.05	0.3
θ_2	0.6	0.5	0.7	0.55	0.8	0.5
θ_3	0.2	0.3	0.05	0.05	0.05	0.1
θ_4	0	0	0	0	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
θ_{17}	0	0	0	0	0	0
不确定 Θ	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1

Table 3. Data fusion result
表 3. 数据融合结果

评语集	数据融合结果
θ_1	0.2351
θ_2	12.1846
θ_3	0.1042
θ_4	0
\vdots	\vdots
θ_{17}	0
不确定 Θ	0.0029

比较表 2 和表 3，采用证据理论进行数据融合后，比如评语集 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的取值分别为 2, 3, 4，通过证据理论融合对评估指标 θ_2 支持度增加，则层次分析法判断矩阵的取值为 3。通过证据理论的数据融合作用增强了专家持相同意见的评估值，削弱了持不同的意见的评估值，并将数据融合结果的最大值对应的标度作为判断矩阵的取值。

3.2. 层次分析法求得各指标权重

具体步骤如下^[6]：

根据评估对象的实际情况，构造层次分析模型。

根据专家们对各个元素相对于上一层的某要素而言，评定该层次中各有关元素相对重要性的意见，利用证据理论对专家们的意见进行融合，构造判断矩阵。

层次单排序。根据判断矩阵计算其最大特征根 λ_{max} 及其对应的特征向量 W ，将特征向量归一化后即求得该层次下各个元素的权重。

一致性检验。通常情况下，由于客观事物的复杂性和主观判断的不稳定性，专家的判断往往会出现不一致，即 $\lambda_{max} > n$ ，则其所对应的特征向量就不能反应真实的情况，定义一致性指标

$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$ ，一致性比率 $CR = CI / RI$ ，其中 RI 为平均随机一致性指标，可以通过查表得到，当 $CR < 0.1$ 时，即判断矩阵不满足一致性，需要调整判断矩阵直至满足一致性检验为止。

层次总排序。逐层利用单排序计算相对于上层的权重，直至目标层，得到目标层相对于最底层指标的权重，即层次总排序。若上一层所有元素 A_1, A_2, \dots, A_m 的层次总排序已经完成，得到的权重值分别为， a_1, a_2, \dots, a_m ，与 a_j 对应的本层次元素 B_1, B_2, \dots, B_n 的层次单排序结果为 $[b_1^j, b_2^j, \dots, b_n^j]^T$ ，即层次总排序为归一化的正规向量。

3.3. 基于模糊综合评判的综合评价

在大型装备维修支持系统中，指标值都是可以从数据库中直接或间接得来，模糊综合评判可以将层次分析法得来的权重和各指标值结合起来，得到最后评价结果^[7]。

引入模糊数学的隶属函数将各种指标值变换到[0, 1]范围内可比较的值^[8]。

定量指标的隶属函数^[9]

成本型指标的隶属函数

$$b_{ij} = (a_j^{\max} - a_{ij}) / (a_j^{\max} - a_j^{\min}) \quad (3)$$

效益型指标的隶属函数

$$b_{ij} = (a_{ij} - a_j^{\min}) / (a_j^{\max} - a_j^{\min}) \quad (4)$$

由此得到决策矩阵 B ，采用模糊综合评判方法得综合重要度

$$D = W \circ B^T \quad (5)$$

W 为层次分析法得出的权重。

选择模糊算子 $M(\bullet, +)$ ，根据最大隶属度原则，选择综合重要度最大的计划为最佳方案。

4. 实例分析

根据表 1 的指标体系由专家给出两两判断矩阵，

3.1 节所述方法融合得一级指标判断矩阵和二级判断矩阵分别为

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1/4 \\ 1 & 1 & 1/3 \\ 4 & 3 & 1 \end{pmatrix} \quad B_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/5 & 1/4 \\ 2 & 1 & 1/3 & 1/2 \\ 5 & 3 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1/3 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1/3 & 1/4 \\ 3 & 3 & 1 & 1/2 \\ 2 & 4 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad B_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 1/5 & 1/6 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1/4 & 1/3 \\ 3 & 2 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 5 & 4 & 2 & 1 & 1/2 \\ 6 & 3 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0.1 & 0 & 0.5 & 0.7 & 0.7 & 1 & 0.5 & 1 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0.7 & 0.5 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0.5 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

由公式(5)得综合重要度

$$D = [0.4999 \quad 0.5675 \quad 0.4293]$$

取 $D_L = \max D_i = 0.5675$ ，计划 2 的重要度最大，因此计划 2 为最优计划。

5. 结论

为了避免层次分析法中个人主观因素的影响，采用了 DS 证据理论、层次分析法与模糊综合评判相结

Table 4. Index data

表 4. 指标数据

	计划 1	计划 2	计划 3
库存费	300	200	310
延迟赔偿费	0	0	0
调度管理费	600	500	700
平均待修时间	16	10	30
平均在修时间	10	8	15
最大拖期/提前时间	3	4	3
平均拖期/提前时间	2	3	1
最大台位负载	9	10	12
平均台位负载	3	4	5
台位均衡使用率	0.5	0.7	0.6
人工利用率	0.7	0.6	0.8
调度净现值	250	200	300
台位利用率	3.1	3.3	2.9

求得各层指标权重分别为：

$$w_1 = (0.1749, 0.1924, 0.6327)$$

$$w_{21} = (0.0813, 0.1544, 0.4759, 0.2884)$$

$$w_{22} = (0.1418, 0.1140, 0.3142, 0.4300)$$

$$w_{23} = (0.0555, 0.0985, 0.1565, 0.2870, 0.4025)$$

则各指标的层次总排序的权重

$$w = (0.0142, 0.0270, 0.0832, 0.0504, 0.0273, 0.0219, 0.0605, 0.0827, 0.0351, 0.0623, 0.0990, 0.1816, 0.2547)$$

一组指标数据如表 4。

由公式(3)(4)得到的决策矩阵如下：

合的方法建立了大型装备维修计划综合评价模型。

通过对机车维修计划的评价，验证了采用层次分析法、DS 证据理论与模糊综合评判相结合进行大型装备维修计划评估的有效性。

参考文献 (References)

- [1] 陈文明, 苏冬平, 俞胜平, 郑秉霖. 一种炼钢连铸调度计划的综合模糊评价方法[J]. 控制工程, 2005, 12(6): 545-548.

- [2] 陈衍泰, 陈国宏, 李美娟. 综合评价方法分类及研究进展[J]. 管理科学学报, 2004, 7(2): 69-79.
- [3] 刘满凤. 企业管理中的量化评价方法评析[J]. 当代财经, 2003, 5: 80-82.
- [4] 刘心报. 决策分析与决策支持系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [5] 杨丽徙, 郭建宇, 程杰. 证据理论和层次分析法相结合的新农村电气化电能质量评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 26-30.
- [6] A. Awasthi, S. S. Chauhan. Using AHP and Dempster-Shafer theory for evaluating sustainable transport solutions. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(6): 787-796.
- [7] 曹束, 周根贵, 张定岳. 一种基于 AHP 和模糊理论的多方案综合评价方法[J]. 浙江工业大学学报, 2003, 31(4): 355-359.
- [8] 廖瑞金, 王谦, 骆思佳, 廖玉祥, 孙才新. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 70-75.
- [9] 吴秀丽, 孙树栋, 余建军, 蔡志强. 多目标柔性作业车间调度决策精选机制研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(2): 161-165.