

基于 PCA-LINMAP-FCE 的通信系统维修性评价方法

徐池¹ 邱楚楚² 王志明³ 黄晓飞⁴

摘要

为提高通信系统维修性评价的实用性和可操作性,提出了一种基于 PCA-LINMAP-FCE 的维修性评价方法.在构建简化的维修性评价指标体系的基础上,将 PCA-LINMAP 与模糊综合评判(FCE)方法相结合,从定量和定性的角度对维修性进行评价.实例仿真分析表明,该方法可操作性强,且有效地降低了评价的主观随意性,使维修设计和作业人员全面掌控通信系统装备维修性的影响因素,能够为科学制定设计方案和维修实施决策方案提供决策信息.

关键词

维修性评价;主成分分析;多维偏好线性规划;模糊综合评判

中图分类号 E920

文献标志码

收稿日期 2012-03-12

作者简介

徐池,男,硕士,助教,研究方向为作战指挥与指挥自动化. leoxc0809@163.com

1 海军大连舰艇学院 通信系,大连,116018

2 海军大连舰艇学院 学院旅,大连,116018

3 海军 91703 部队,舟山,316107

4 海军 91916 部队,大连,116000

0 引言

维修性评价是为确定装备在实际使用、维修及保障条件下的维修性所进行的验证与评定工作,需要按照一定的评价指标体系和方法对维修性水平进行综合性评价,以揭示维修效果和维修工作薄弱环节,为加强维修管理进一步指明努力方向并提出具体要求^[1].对于通信系统而言,影响其维修性的因素是多种的,而且相互关联,同时评价因素中存在模糊概念,权重也带有模糊性,一般评价方法很难适用.针对通信系统的特点,确定维修性评价指标,运用主成分分析和多维偏好线性规划赋权方法确定各个指标的权重,结合模糊综合评判法对其维修性进行评价.

1 通信系统维修性分析及评价指标

根据所处的环境和条件,维修性可分为固有维修性和使用维修性^[2].以通信系统使用现状为例,使用部门最关心的是使用中的维修性.使用维修性是在实际使用维修中表现出来的维修性,更能直接地反映通信系统装备的使用要求.维修评价的目的是确定实际维修保障条件下的维修水平,观察实际保障、使用、维修条件对该设备维修性的影响,检查维修中所暴露出的维修性缺陷,将最终评价结果反馈运用到设备的全寿命过程中,使装备设计人员从设计端提高设备的固有维修性,同时可以根据维修性评价的中间关键数据为维修人员提高维修辅助决策信息,综合考虑各种因素,提高设备的使用维修性和维修效率.

通信系统维修性设计和使用的总体目标是简便、迅速、经济.为满足维修性标准,通过对通信系统影响因素的全面分析并借鉴层次分析思想,综合归纳出评价指标体系.分析通信系统的特点,结合维修性评价指标选择的相关原则,经过较为广泛的调查研究和专家咨询,分析设计人员和维修人员的需求,按照自下而上和反复平衡的方法,对应维修性“简便、迅速、经济”的要求标准,建立了以“简便性、时效性、经济性”为核心的通信系统维修性评价简化指标体系(图1).

2 PCA-LINMAP-FCE 方法

目前,常用的维修性评价方法实用性、可操作性不强,评价结果的定性因素较多,对指导维修性设计和维修实施的作用有限^[3].本文

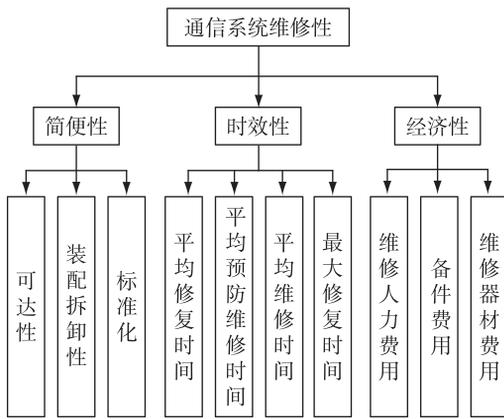


图1 通信系统维修性评价的简化指标体系

Fig.1 Simplified index system of maintainability evaluation for communication system

运用主成分分析和多维偏好线性规划赋权方法 (Principle Component Analysis-Linear Programming Technique for Multidimensional Analysis of Preference, PCA-LINMAP) 对指标进行赋权, 结合模糊综合评判 (Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCA) 从定性和定量相结合的角度评价维修性。

2.1 PCA-LINMAP 赋权方法

合理确定权重既重要又相当困难, 因为它们包含评价客体、主体的多种因素, 同时因素之间的关系错综复杂, 难以公式化表示。常用的赋权方法存在的不足主要有: 具有较强数学依据却容易受原始数据影响忽略决策者偏好; 具有相当的主观经验性和耗时性, 偶然性大于必然性, 致使评估或决策结果具有很大的主观随意性。指标权重的确定一直是维修性评价的瓶颈, 也是目前维修性评价在实际运用中接受度较低, 可操作性和实用性不强的主要原因。

PCA-LINMAP 方法权重原始信息直接来源于实际运用中的统计数据, 具有客观性, 一定程度上克服了主观赋权的随意性和不确定性, 还能够给出原始指标的单个权重, 结论明确且实用性强。它首先应用 PCA 从原始指标矩阵中求取样本的优劣排序, 然后应用 LINMAP, 基于上述样本优劣有序对确定各个指标权重, 完成指标赋权^[4-5]。

2.1.1 主成分分析子模型

假设有 n 个参加评价的样本, 每个样本有 m 个指标, 用决策矩阵 $(x_{ij})_{n \times m}$ 表示。

1) 原始数据标准化处理

为消除各指标的不可公度性, 将原始数据标准化处理, 对指标进行如下变换:

$$y_{ij} = \begin{cases} x_{ij}, & \text{正指标(效益型),} \\ -x_{ij}, & \text{逆指标(成本型),} \end{cases} \quad (1)$$

得到标准化矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times m}$,

其中

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - \bar{y}_j}{s_j}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij},$$

$$s_j = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2.$$

2) 求相关矩阵

$$R = (r_{jk})_{mm} = \frac{1}{n-1} Z^T Z,$$

$$r_{jk} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n z_{ji} z_{ki}, \quad j, k = 1, 2, \dots, m.$$

3) 求解特征值与特征向量

用雅可比方法求相关矩阵的特征值 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 同时求得相应的单位特征向量 $\beta_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 在仿真中可运用 Matlab 中现有的函数 eig 进行求解^[6]。

4) 选取主成分

选取前 p 个主成分, 正整数 p 满足 $\sum_{i=1}^p \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i \geq 85\%$ 的最小值。

5) 计算主成分得分值

第 i 个样品点在前 p 个主成分方向上的得分值 $Z_1^i, Z_2^i, \dots, Z_p^i$ 为

$$\begin{pmatrix} Z_1^i \\ Z_2^i \\ \vdots \\ Z_p^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1m} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \cdots & \beta_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{p1} & \beta_{p2} & \cdots & \beta_{pm} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \\ \vdots \\ z_{im} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

6) 计算总得分值

第 i 个样品的总得分值 F_i 为 $F_i = \sum_{j=1}^p P_j |Z_j^i|$, $i = 1, 2, \dots, n$, 其中 P_j 为第 j 个主成分保持原始数据总信息量的比重, 即: $P_j = \lambda_j / \sum_{i=1}^m \lambda_i$ 。

7) 确定样本有序对集 Q

按上述各样本的总得分值 F_i 由大到小进行优劣顺序排列, 确定样本优劣有序对集 Q , 即 $Q = \{(k, l) | k \geq l\}$ 。

2.1.2 多维偏好线性规划子模型

将标准化决策矩阵 $(z_{ij})_{nm}$ 作为 m 维指标空间中

有 n 个样本. 决策者最偏好的样本用指标空间中的理想点 $(z_1^*, z_2^*, \dots, z_m^*)^T$ 表示, 则空间中任一样本点 $(z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{im})^T$ 到理想点的加权欧几里德距离平方 S_i 为

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j (z_{ij} - z_j^*)^2, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

式中 $w_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 是第 j 个指标的权重平方. 指标权重的平方 w_j 可通过 LINMAP 子模型求解.

$$\min \sum_{(k,l) \in Q} \lambda_{kl}, \text{ 满足}$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m w_j (z_{lj}^2 - z_{kj}^2) - 2 \sum_{j=1}^m v_j (z_{lj} - z_{kj}) + \lambda_{kl}, \forall (k,l) \in Q \\ \sum_{j=1}^m w_j \sum_{(k,l) \in Q} (z_{lj}^2 - z_{kj}^2) - 2 \sum_{j=1}^m v_j (z_{lj} - z_{kj}) = h \\ w_j > 0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \\ \lambda_{kl} \geq 0, \quad \forall (k,l) \in Q, \\ v_j = w_j z_j^*, \quad \text{无约束} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\lambda_{kl} = \max\{0, (s_k - s_l)\}$, h 为避免问题平凡解而引入的某一正数.

2.2 模糊综合评判方法的基本原理

模糊综合评判就是应用模糊数学理论, 将系统要素和模糊要素解析化、定量化, 使方案的比较、评价建立在科学基础上^[7-8]. 其主要思想是首先定义一组评语集合, 然后通过打分获取所有评价指标的评价矩阵, 将所有指标的评价值利用一组设定的隶属函数将这些评价值转化为隶属度、隶属度权重, 最终生成相应隶属度权重矩阵, 最后通过引入指标权重向量, 经过模糊变换运算最终得到一个具体的评价结果. 模糊综合评判的关键技术是建立问题的层次结构模型, 确定评价因素的隶属度函数分布, 并建立模糊关系. 维修性受许多因素的影响, 评价因素之间也存在模糊概念, 在评价指标权重确定的基础上运用模糊综合评判方法对维修性评价结果进行集结综合, 能够较好地解决评价中存在的不确定性, 并且, 该方法的数学模型简单, 容易软件实现, 对多因素、多层次的复杂问题评判效果比较好, 单一的评估结果具有明确的物理意义.

3 基于 PCA-LINMAP-FCE 的通信系统维修性评价

根据通信系统的维修性评价的特点和评价目的, 将 PCA-LINMAP 赋权方法与 FCE 方法相结合, 对通信系统的维修性进行评价. 图 2 是基于 PCA-LINMAP-FCE 的通信系统维修性评价流程.

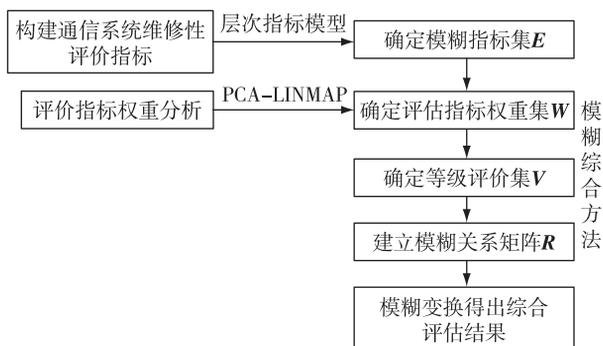


图2 维修性评价流程

Fig.2 Flow chart for maintainability evaluation

模糊综合评判的具体步骤如下:

1) 确定因素集

通信系统的维修性的因素集分为一级指标集 $E_i (i = 1, 2, 3)$ (简便性、时效性、经济性) 和二级指标集 $E_{ij} (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4)$.

2) 确定权重集

运用 PCA-LINMAP 方法对一级指标和二级指标进行赋权, 给出具体数值. 其中, 一级指标集 $E_i (i = 1, 2, 3)$ 的权重集为 $E_{ij} (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4)$; 二级指标集 $E_{ij} (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4)$ 的权重集为 $W_{E_i} = \{W_{E_{ij}}\} (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4)$.

3) 确定评价集

维修性的评价集为 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$, 分别为 {好, 较好, 一般, 较差, 差} 相应评价集的归一化分值为 {90, 70, 50, 30, 10}.

4) 建立评价矩阵

r_{ij} 表示因素 E_i 被评为 v_j 的隶属度. 评价矩阵保持归一化. 根据维修性指标的复杂性难以用具体的模糊分布确定, 采用专家评判法较为合适, 设 n 为有效咨询次数, y_{ij} 为因素 E_i 被评为 v_j 的次数, 则有 $r_{ij} = y_{ij}/n$.

5) 通信系统维修性多层次模糊综合评判

指标集 E 和评价集 V 之间的模糊关系为 $R = (r_{ij})_{nm}$, r_{ij} 是 E_i 和 v_j 之间的隶属关系. 若指标集 E 对应的权重集为 $W_E = \{W_{E_i}\} (i = 1, 2, 3)$, 则模糊综合评判记为

$$P = W_{E_i} \cdot R = [W_{E_1}, W_{E_2}, \dots, W_{E_n}] \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

评价目标 T 的加权平均评价值为 $V_T = P \cdot E^T$.

4 实例分析

利用上述方法来评价某型通信系统的维修性.受篇幅限制,详细阐述维修性评价指标体系中“时效性”的评价运算过程,简便性和经济性指标仅给出评价的结果,不对过程进行说明.

4.1 数据来源与选取

通过调研和参考历史数据,得到5个评价测量样本如表1.

表1 时效性指标原始数据
Table 1 Data of timeliness indicators h

评价指标	平均修复时间	平均预防修复时间	平均维修时间	最大修复时间
1	0.30	3.50	1.80	1.50
2	0.20	2.60	1.50	0.95
3	0.35	3.20	1.30	1.20
4	0.40	3.00	1.70	1.60
5	0.25	2.80	1.55	1.30

4.2 求相关系数矩阵R

由仿真计算得到相关系数矩阵如表2.

表2 时效性指标相关系数矩阵
Table 2 Correlation coefficient matrix of timeliness indicators

评价指标	平均修复时间	平均预防修复时间	平均维修时间	最大修复时间
平均修复时间	1.000 0	-0.189 0	-0.398 5	0.997 9
平均预防修复时间	-0.189 0	1.000 0	0.131 8	-0.167 6
平均维修时间	-0.398 5	0.131 8	1.000 0	-0.427 1
最大修复时间	0.997 9	-0.167 6	-0.427 1	1.000 0

4.3 计算特征值与贡献率

求相关矩阵特征值及其贡献率与累计贡献率如

表4 某型通信系统的维修性评价指标权重及隶属度向量

Table 4 Maintenance evaluation index weights and membership vector of a communication system

一级指标	权重	二级指标	权重	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
E_1	0.355	E_{11}	0.441 6	0.2	0.4	0.4	0	0
		E_{12}	0.336 5	0.1	0.3	0.4	0.2	0
		E_{13}	0.221 9	0.2	0.3	0.3	0.2	0
E_2	0.455	E_{21}	0.416 5	0.3	0.5	0.2	0	0
		E_{22}	0.283 6	0	0.3	0.4	0.3	0
		E_{23}	0.059 3	0.2	0.6	0.1	0.1	0
		E_{24}	0.195 6	0.1	0.3	0.6	0	0
E_3	0.190	E_{31}	0.284 5	0	0.1	0.5	0.3	0.1
		E_{32}	0.181 3	0	0.3	0.4	0.3	0
		E_{33}	0.534 2	0	0.2	0.6	0.2	0

表3. 因为前3项特征根的累计贡献率为99.968% > 85%, 包含了原始变量99.968%的信息, 可以用第一主成分, 第二主成分, 第三主成分进行评价, 且评价可信度为99.968%.

4.4 求综合得分值

经过计算排序可得到5个样本点的时效性评价相对得分值, 排名顺序为(3、4、5、1、2), 与原始数据基本相符, 计算结果可信.

表3 特征值与贡献率

Table 3 Eigenvalues and contribution ratios

序号	原始特征值		
	λ	贡献率/%	累计贡献率/%
1	2.327 8	58.195	58.195
2	0.940 3	23.508	81.703
3	0.730 6	18.265	99.968
4	0.001 3	0.032	$m = 3$

4.5 求出样本有序对集Q求解指标权重

按上述各样本的总得分值由大到小进行优劣顺序排列, 确定样本优劣有序对集Q, 即

$$Q = \{(3, 4), (3, 5), (3, 1), (3, 2), (4, 5), (4, 1), (4, 2), (5, 1), (5, 2), (1, 2)\}.$$

将Q代入LINMAP模型, 求得时效性下4个指标的权重平方值向量

$$W = (0.134, 0.063, 0.003, 0.029)^T,$$

将W平方并进行归一化处理得各指标的权重为

$$(0.416 5, 0.283 6, 0.059 3, 0.195 6).$$

4.6 求出各级指标权重并评价维修性

根据样本, 采取同样的计算方法和流程, 得到维修性评价指标的各级权重系数. 由10位评价人员和专家判断指标的指标隶属度向量, 如表4所示.

4.7 模糊综合评判计算过程

1) 一级评价计算

E_1 的模糊评价向量为

$$P_1 = W_{E_{1i}} \cdot R_1 = [0.4165 \quad 0.2836 \quad 0.0593 \quad 0.1956] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.6 & 0 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$[0.1564 \quad 0.3876 \quad 0.3200 \quad 0.0910 \quad 0].$$

E_1 的加权平均评价值为

$$V_{E_1} = P_1 \cdot V = 59.9380.$$

同理, E_2 和 E_3 的模糊评价向量为

$$P_2 = W_{E_{2i}} \cdot R_2 =$$

$$[0.1542 \quad 0.3542 \quad 0.4000 \quad 0.0916 \quad 0],$$

$$P_3 = W_{E_{3i}} \cdot R_3 =$$

$$[0 \quad 0.1897 \quad 0.5353 \quad 0.2466 \quad 0.0285],$$

$$V_{E_2} = P_2 \cdot V = 61.4200,$$

$$V_{E_3} = P_3 \cdot V = 47.7270.$$

2) 二级评价计算

目标 T 的模糊评价向量为

$$P = W_E \cdot R = [0.1413 \quad 0.3546 \quad 0.6488 \quad 0.1053 \quad 0.0026].$$

目标 T 的加权平均评价值为

$$V_T = [0.1413 \quad 0.3546 \quad 0.6488 \quad 0.1053 \quad 0.0026] \cdot [90 \quad 70 \quad 50 \quad 30 \quad 10]^T = 73.1633.$$

实例中最终将维修性评价结果向量单值化,评价结果数值为 73.1633. 从整个模糊综合评判结果判断,该通信系统的维修性等级为“较好”. 结合一级指标的综合评价来分析,通信系统的维修性在时效性和简便性方面还有待提高.

5 结论

将 PCA-LINMAP 赋权方法和模糊综合评判方法相结合,研究了通信系统装备的维修性评价方法和过程. 通过分析及实际应用发现:维修性影响因素结构复杂,模糊综合评判法适用于多因素、多层次的复杂问题评判,应用广泛,但赋权过程主观性过强,容易影响评价结果的合理性. 运用 PCA-LINMAP 方法对评价指标进行赋权,权重原始信息来源于实际的统计数据,具有客观性,克服了主观赋权的随意性和不确定性. 方法将定性与定量知识有机地融合起来,为维修性作出系统、科学及客观的评价提供了依据. 同时,方法的运算过程适合计算机数据处理,易于软

件实现,实用性和可操作性较高,能够使维修设计和作业人员全面掌控通信系统装备维修性的影响因素^[9],为科学制定设计方案和维修实施决策方案提供决策信息.

参考文献

References

- [1] 高松. 船舶维修性评价及其改进研究[D]. 大连:大连海事大学研究生院,2010
GAO Song. The research on evaluation and improvement for ship maintainability [D]. Dalian: Graduate School of Dalian Maritime University, 2010
- [2] 于永利,朱小冬,郝建平,等. 系统维修性建模理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社,2007
YU Yongli, ZHU Xiaodong, HAO Jianping, et al. System maintainability modeling theory and technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007
- [3] 郭齐胜. 装备效能评估概论[M]. 北京:国防工业出版社,2005
GUO Qisheng. Introduction to equipment performance evaluation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005
- [4] 陈佳鸣. 甚低频超低频对潜通信应用效能评价研究[D]. 武汉:海军工程大学电子工程学院,2006
CHEN Jiayun. Research of VLF and ULF submarine communications applications performance evaluation [D]. Wuhan: College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, 2006
- [5] 应天元. 系统综合评价的赋权新方法:PC-LINMAP 耦合模型[J]. 系统工程理论与实践,1997,17(2):9-14
YING Tianyuan. A new model (PC-LINMAP) of weight calculation in multi-criterion system [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1997, 17(2): 9-14
- [6] 周建兴. Matlab7.0 从入门到精通[M]. 北京:人民邮电出版社,2008
ZHOU Jianxing. Introduction to Matlab7.0 [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2008
- [7] 付茂沼. 模糊综合分析在信息安全评估中的应用[J]. 西南交通大学学报,2010,45(3):440-444
FU Maoming. Application of fuzzy comprehensive analysis to information security evaluation [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(3): 440-444
- [8] 何新贵. 模糊知识处理的理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社,1998
HE Xingui. Fuzzy knowledge processing theory and technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998
- [9] 于永利,郝建平,杜晓明,等. 维修性工程理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社,2007
YU Yongli, HAO Jianping, DU Xiaoming, et al. Maintainability engineering theory and methods [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007

Method of maintainability evaluation based on PCA-LINMAP-FCE for communication systems

XU Chi¹ QIU Chuchu² WANG Zhiming³ HUANG Xiaofei⁴

1 Department of Communication, Dalian Naval Academy, Dalian 116018

2 Midshipman Brigade of Dalian Navy Academy, Dalian 116018

3 Unit 91703, Zhoushan 316107

4 Unit 91916, Dalian 116000

Abstract In order to enhance the practical and operational performance, a method based on PCA-LINMAP-FCE for maintainability evaluation is proposed. Combining PCA-LINMAP with fuzzy comprehensive evaluation, the provided approach evaluates the maintainability quantitatively and qualitatively on the basis of a simplified evaluation index system. Experimental results show that this high operational method reduces the arbitrary of subjective evaluation effectively. It is useful for maintenance personnel and designer to get acquainted with influencing factors of maintainability, and supply decision-making information for scientific design and implementation of maintaining scheme.

Key words maintainability evaluation; principle component analysis; linear programming technique for multidimensional analysis of preference; fuzzy comprehensive evaluation