

# 现役装备维修性增长的投入精度控制

## Investment Precision Control of Maintainability Rise for Active Equipment

海军工程大学 王道福 谢 骏 张俊涛

[摘要] 装备维修性由含有多个参数的指标体系决定,其增长方案的优选属于多属性优化决策的范畴。数据包络分析理论以客观评价多属性参评单元和固有包容性见长,将它应用于装备维修性增长投入方案优化,不仅能对现有各方案进行优劣排序,而且可通过建立前沿面,指出非最优方案样本的具体问题所在及其改进的方向和程度,使得改进后的维修性增长方案相对于样本方案系列为最优。进一步地,还可据此对未来决策单元的可行性和改进措施等给出判断和精确指导。

关键词: 维修性增长 数据包络分析 投入精度控制 生产可能集

**[ABSTRACT]** The maintainability of equipment is determined by a series of indexes, the scheme of maintainability rise should derive from multi-properties optimization. The theory of data envelopment analysis (DEA) is good at evaluating the units with multi-properties. Used in scheme optimization of maintainability rise, the theory of DEA can not only rank all sample schemes but also show clearly the shortcomings and reform trend for the non-classic schemes by building frontier, and then make the non-classic schemes be best among all sample schemes after the shortcomings adjusted. Then the feasibility and adjust measure for suppositional decision making units could be obtained based on the foregone samples with the help of theory of DEA.

**Keywords:** Maintainability rise DEA Investment precision control Potential set of production

所谓维修性,是指装备在规定的条件下和规定的时间内,按规定的程序和方法进行维修时,保持和恢复其规定状态的能力<sup>[1-2]</sup>。从定义可知,维修性既取决于装备的许多自身因素,又取决于与维修保障条件有关的许多外部因素,也就是说,装备维修性是由结构设计因素和维修人员素质、维修工具设备等维修保

障资源共同决定的。现役装备维修性增长就是要从现役装备的维修性影响因素中挖掘潜力,开展创新性工作,使得装备维修更加方便快捷。装备维修性增长具有很高的投资收益率,对提高装备的战备完好性具有重要意义。

在维修性增长工程实践中,存在着投入估算精度不高、项目概预算失控等较为突出的问题,而且超支幅度或浪费程度也往往十分惊人。造成这一现象的原因是多方面的,其中既有客观因素(如物价上涨),更包含主观因素。主观因素主要源自对产出(维修性增长结果)与投入要素关系缺乏正确的认识,以至于难以从诸多措施中找出最有效的增长措施,继而病急乱投医。装备维修性增长活动是在一定的技术、经济和组织条件下进行的,在装备的内部工作机理和外部环境没有根本改变的情况下,某定值的装备维修性所需的多项资源投入应有相应下限。如果能根据历史数据确定装备维修性与相应多项资源投入下限的函数关系,那么对于装备维修性增长方案中的投入估算就可以尽可能靠近该下限,这样一来就不至于对其投入效益有不切实际的过高期望,也不至于不顾经济效率、盲目过度地投入。

问题归纳到一点:如何组织装备维修性增长工程投入绩效的正确评估。数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)方法以显著的客观性和包容性而见长<sup>[3-5]</sup>。在评估各参评单元时,该方法抛弃了常用的专家设定固定评判标准的方法,而是在一定限制条件下各单元以最利己的方式参评,从而避免了通常会遇到的专家主观性差异引起的争议和任何固定评估标准都难逃被抱怨的尴尬。更重要的是该方法不满足于对各单元优劣排序,可以通过对单元集合建立前沿面,指出各单元与理想状态的差距,追求校正结果的完美。相对而言,众多的评估方法中数据包络分析方法最适合解决维修性增长投入精度控制问题。

## 1 数据包络分析理论

### 1.1 基本思想

数据包络分析,是一种使用数学规划模型评价具有多个输入、多个输出决策单元(Decision Making Units, DMU)间相对有效性的方法。其基本思路是:将样本中每一被评价单位作为一个决策单元,将众多DMU构成被评价群体,通过对投入和产出比率的综合分析,以DMU各个投入和产出指标的权重为变量进行评价运算,确定有效生产可能集的前沿面,评断决策单元是否位于该前沿面上,位于前沿面上的为相对有效DMU,否则为相对无效DMU。同时,来用向前沿面投影的方法指出非DEA有效DMU的欠缺原因及应改进的方向和程度。进一步地,得出输入向量与输出向量的上述关系后,就可以对该环境下新的输入、输出向量对进行演绎和判断:新样本或越过前沿面,超出“历史”最佳效率而成为有待增加投入的不现实样本;或位于生产可能集内,成为有待减少投入、提高效率的非DEA有效样本。

现以最简单的单输入、单输出单元为例来说明数据包络分析方法。

图1以二维坐标的形式描述了某单输入-单输出对的系列样本(点A、B、C、D、F、P),根据这些样本,可以客观地确定出唯一的最大斜率(P点斜率),即最大效率。图1中射线OP表示生产可能集的有效前沿面,OP与输入轴所夹部分为生产可能集。点P位于前沿面上,为DEA相对有效的决策单元;点A、B、C、D、F位于有效前沿面下方,为相对无效单元。按照最小输入下获得最大输出的准则,可找到生产可能集中各无效单元在有效前沿面上的投影(如F单元的

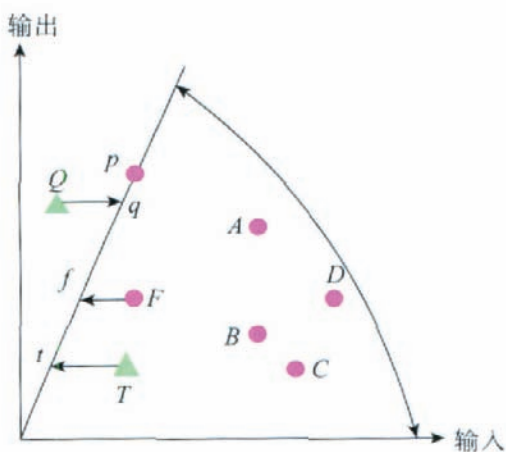


图1 样本系列的前沿面及对  
新样本的判断和改进

Fig.1 Frontier for samples and decision and  
reform for new samples

投影为f),并可将F的投入减小为f所对应的投入,达到同等输出效果,提高无效单元F的效率。

另外,基于以上数据(或者说样本系列)所确定的前沿面和生产可能集(见图1),在同样环境下给出新点Q、T,那么在判断新点相对于前沿面的位置后就可以给出相应的改进意见:位于生产可能集内的点T是合理的,但效率有待提高,提高方式与已明确位于生产可能集内的无效样本(如F点)相同;位于生产可能集外的点Q,表示超越了最高历史效率,被视为不现实的点,但可在保持输出不变的情况下,通过提高输入量而转化为现实合理的点q。

### 1.2 模型分析

假设有R个可比决策单元,每个决策单元都有m种类型的输入(表示该决策单元对“资源”的消耗,在维修性增长中它可以是改进装备、增强人力、改善维修保障工具或设备等所需的投入,也可以是投入的成效在修理时间、各种人力的修理工时、修理费用等方面所能达到的指标或指标上的改进,n种类型的输出(在消耗了资源之后,表明决策单元成效的一些指标,例如基于修理时间、工时等指标的综合维修水平)。决策的目标是从R个已知的可比决策单元中选择出最佳决策,或者基于R个已知的可比决策单元指导未来的方案优选。令DMU<sub>k</sub>(1 ≤ k ≤ R)为R个决策单元,X<sub>i</sub><sup>k</sup>(i = 1, 2, ..., m)为m个投入项,Y<sub>j</sub><sup>k</sup>(j = 1, 2, ..., n)为n个产出项标记,根据效率等于总产出除以总投入的定义,DMU<sub>k</sub>的效率E<sub>k</sub>为

$$E_k = \frac{\sum_{j=1}^n u_j^k Y_j^k}{\sum_{i=1}^m v_i^k X_i^k} \quad \begin{matrix} X_i^k, Y_j^k \geq 0, i = 1, \dots, m \\ u_i^k, v_j^k \geq 0, j = 1, \dots, n \end{matrix}$$

式中,u<sub>j</sub><sup>k</sup>、v<sub>i</sub><sup>k</sup>分别为在DMU<sub>k</sub>效率最大化的目标下,对DMU<sub>k</sub>最有利的第j个产出项权重和第i个投入项的权重。

DEA法的数学规划模式是把一个决策单位DMU<sub>k</sub>的效率E<sub>k</sub>最大化作为目标式,寻找对DMU<sub>k</sub>最有利的投入项权重组合v<sub>1</sub><sup>k</sup>,v<sub>2</sub><sup>k</sup>,...,v<sub>m</sub><sup>k</sup>,以及产出项权重组合u<sub>1</sub><sup>k</sup>,u<sub>2</sub><sup>k</sup>,...,u<sub>n</sub><sup>k</sup>,使得E<sub>k</sub>达到最大值,但所有DMU<sub>r</sub>(DMU<sub>r</sub>与DMU<sub>k</sub>区别在于前者泛指所有参加评估的决策单元中的任何一个单元,后者特指正在接受评估的决策单元)的效率必须小于或等于1。由此构造如下模型I:

$$I: \begin{cases} \max \frac{\sum_{j=1}^n u_j^k Y_j^k}{\sum_{i=1}^m v_i^k X_i^k} = E_k \\ \text{s.t.} \frac{\sum_{j=1}^n u_j^k Y_j^r}{\sum_{i=1}^m v_i^k X_i^r} \leq 1 \quad r = 1, 2, \dots, R \\ u_j^k > 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \\ v_i^k > 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases}$$

式中,  $X_i^r$  和  $Y_j^r$  分别为每个  $DMU_r$  的实际投入数据和产出数据,  $u_j^k$  和  $v_i^k$  是未知变量, 因此权重不是事先给定的, 而是由实际数据计算出来的。根据这样的权重组合计算  $DMU_k$  最佳效率  $E_k^*$ , 若  $E_k^* = 1$ , 表示  $DMU_k$  为相对有效  $DMU$ ; 反之, 若  $E_k^* < 1$ , 表示  $DMU_k$  为相对无效  $DMU$ 。现在规划式  $I$  采用分数规划的形式, 为方便求解, 可将目标式的分母强制设定为 1, 转换为一般线性规划模型并进一步对偶化, 得模型  $D$ :

$$D: \begin{cases} \min h_k = \theta \\ \text{s.t.} \sum_{r=1}^R \lambda_r X_i^r - \theta X_i^k + s_i^- = 0 \\ \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ \sum_{r=1}^R \lambda_r Y_j^r - s_j^+ = Y_j^k \\ \quad (j = 1, 2, \dots, n; \lambda_r, s_i^-, s_j^+ \geq 0; r = 1, 2, \dots, R) \end{cases}$$

式中,  $\theta$  表示决策单元的效率值;  $\lambda_r$  表示评估  $DMU_k$  相对效率时参考  $DMU_r$  比例;  $s_i^-$ 、 $s_j^+$  为松弛变量, 在线性规划模式中用来将不等式转换为等式。

令  $\theta^*$ ,  $\lambda_r^*$ ,  $s_i^{-*}$ ,  $s_j^{+*}$  为模型  $D$  的最佳解, 则  $DMU_k$  被评为相对有效的充分必要条件为  $\theta^* = 1$  且  $s_i^{-*} = s_j^{+*} = 0$ 。当相对无效的决策单元欲达到生产前沿面的效率目标时, 可以利用模型  $D$  中限制式  $\sum_{r=1}^R \lambda_r^* X_i^r = \theta^* X_i^k - s_i^{-*}$ 、

$\sum_{r=1}^R \lambda_r^* Y_j^r = Y_j^k + s_j^{+*}$  来计算所需的改善量:

$$\begin{cases} \Delta X_i^k = X_i^k - \sum_{r=1}^R \lambda_r^* X_i^r = X_i^k - (\theta^* X_i^k - s_i^{-*}) \\ \Delta Y_j^k = \sum_{r=1}^R \lambda_r^* Y_j^r - Y_j^k = (Y_j^k + s_j^{+*}) - Y_j^k \end{cases} \quad \text{。} \quad \text{①}$$

由①式可以明显看出, 若  $DMU_k$  为相对有效  $DMU$ , 则效率值  $\theta^* = 1$ , 且松弛变量  $s_i^- = s_j^+ = 0$ , 故  $\Delta X_i^k = \Delta Y_j^k = 0$ , 亦即投入量和产出量都不需要调整。反之, 任何一个  $DMU_k$  的效率若小于 1, 则必须减少  $\Delta X_i^k$  的投入量及增加  $\Delta Y_j^k$  的产出量, 才可以达到相对有效, 而虚拟参考点  $(X_i^{k*}, Y_j^{k*}) = (\sum_{r=1}^R \lambda_r^* X_i^r, \sum_{r=1}^R \lambda_r^* Y_j^r)$ , 是其他决策

单元以  $\lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_R]$  为权重的线性组合。

如果基于上述  $DMU$  样本对新的构想  $DMU_p$  进行效率判断和改进, 只需将模型  $D$  中正在接受评估的决策单元  $DMU_k$  改为  $DMU_p$ , 其余不变。具体模型见下式  $P$ :

$$P: \begin{cases} \min h_p = \theta \\ \text{s.t.} \sum_{r=1}^R \lambda_r X_i^r - \theta X_i^p + s_i^- = 0 \\ \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ \sum_{r=1}^R \lambda_r Y_j^r - s_j^+ = Y_j^p \\ \quad (j = 1, 2, \dots, n; \lambda_r, s_i^-, s_j^+ \geq 0; r = 1, 2, \dots, R) \end{cases} \quad \text{。}$$

$DMU_k$  与  $DMU_p$  的区别在于: 前者已明确是生产可能集中的单元; 后者有待进一步判断:  $h_p = \theta > 1$ , 为超越前沿面的单元,  $h_p = \theta \leq 1$ , 为生产可能集中的单元。

## 2 设备维修性增长方案优化应用实例

文献 [2] 给出了某种设备维修性评估体系, 其中包括 9 项输入评价指标 (平均维修时间、维修简单性、维修正确性、维修便利性、人力资源需求度、维修设备需求度、维修器材耗损率、维修设施需求度和技术资料需求度) 和 1 项输出指标 (即反映装备维修性的“综合维修水平”), 并通过神经网络的方式找出了综合维修水平与输入指标间的函数关系, 但这种关系是以“黑匣子”的隐式方式给出的, 无法指导维修性增长。而如果采用 DEA 方法, 则能有效克服其不足。

引用该评估体系给出的 20 个样本系列并虚构 2 个样本, 一起列于表 1。其中, 前 20 个样本为现实存在样本, 用来说明如何使用 DEA 模型进行效率排序, 进而实现各自的维修性增长投入精度控制; 后 2 个虚构样本主要用来说明基于已有样本如何评估新的维修性增长方案。将该装备已知的 20 个维修性增长样本方案数据代入模型  $D$  (其中  $R=20$ ,  $m=9$ ,  $n=1$ ), 借助 MATLAB 优化工具箱线性规划命令“LINPROG”, 可以算出各参数和目标函数的相应最优值。在此基础上, 依上节的分析进一步算出“虚拟参考点” (样本有前沿面上的投影) 和“节省量” (改善量)。其中, “节省量”为样本与虚拟参考点间的差距, 即达到同等维修性水平时可以减少的维修性投入, 见表 2。进一步地, 将已知的 20 个样本方案和虚构的 2 个新样本方案的相应数据代入模型  $P$ , 将结果列于表 2。从表 2 可以看出: ① 20 个现实的维修性增长方案中有近半数方案的效率值小于 1, 说明这些方案投入过度, 在满足维修性水平的前提下存在着减少投入的可能性。

表1 某种设备维修性增长方案

样本序号	平均维修时间	维修简单性	维修正确性	维修便利性	人力资源需求度	维修设备需求度	维修设施需求度	维修器材需求度	技术资料需求度	综合维修水平
1	91	87	53	41	87	74	38	85	93	98
2	74	56	59	62	76	81	86	47	73	69
3	94	92	61	49	95	82	87	78	46	94
4	76	64	53	67	91	81	72	48	75	78
5	92	47	98	83	54	75	91	82	67	91
6	73	76	57	63	81	49	82	73	77	85
7	74	66	54	48	73	62	43	56	68	77
8	64	67	83	90	57	68	74	78	80	84
9	67	83	84	56	64	58	67	79	76	76
10	45	58	64	76	59	90	81	76	72	75
11	63	67	74	87	69	73	67	84	84	71
12	82	84	73	75	57	54	49	52	63	61
13	72	48	54	67	72	61	68	84	73	80
14	63	67	81	64	59	63	76	78	84	79
15	72	74	63	74	81	75	67	79	75	77
16	87	62	73	84	78	81	90	74	59	80
17	63	73	64	92	57	67	79	69	65	71
18	83	67	71	68	57	67	79	69	65	71
19	87	63	62	67	69	78	87	77	80	81
20	88	76	57	81	64	81	76	64	69	78
构想 Q	72	48	54	67	72	61	68	72	73	80
构想 T	55	58	64	76	59	90	81	76	72	75

表2 某种设备维修性增长方案的调整

样本序号	效率	将输入改进到前沿面上等输出时的调整量(节省量)								
		平均维修时间	维修简单性	维修正确性	维修便利性	人力资源需求度	维修设备需求度	维修设施需求度	维修器材需求度	技术资料需求度
2	0.97	6.35	2.86	7.57	2.13	2.0	11.8	21.4	1.27	9.23
9	0.97	2.0	18.6	22	1.7	1.9	1.7	6.57	9.4	2.3
11	0.86	8.6	9.2	13.5	12.5	15.3	10	9.2	17.5	16.2
12	0.911	22.6	37.3	24.5	32.4	5.0	4.8	7.2	4.6	11.5
15	0.891	8.0	8.1	6.2	18.2	15.5	8.1	17	19	8.1
16	0.929	7.5	4.3	5	23	21.6	12.3	13.6	5.1	4.1
17	0.945	3.5	18.4	3.5	32.5	3.1	4.0	19	3.7	3.5
18	0.93	9.2	17.4	4.4	13	4.0	14	21	5.4	4.3
19	0.945	10	3.2	3.3	15.5	3.6	14.5	34.4	3.2	8.4
Q	1.086	0	0	0	0	0	0	0	-12	0
T	0.974	10	0	0	0	0	0	0	0	0

注：表中未列出的样本系列均为无须调整的相对有效决策单元。

(下转第 95 页)

表1 某型飞机保障系统配置管理数据

配置项节点名称 $t_T(t_T[n_i]=t_{TC}[n_{Ci}])$	活动树节点名称 $t_T(t_T[n_i]=t_{TOAS}[n_{Ai}])$	组织树节点名称 $t_T(t_T[n_i]=t_{TOAS}[n_{Oi}])$	维修级别 $t_{TO}(t_{TO}[n_{Oi}]=t_T[n_i])$	资源树节点名称 $t_T(t_T[n_i]=t_{TOAS}[n_{Si}])$	位置标识 $t_T(t_T[n_i]=t_{TC}[n_{Ci}])$	备选方案标识 $t_T(t_T[n_i]=t_{TC}[n_{Ci}])$	配置标识 $t_C(t_C[n_{Ci}]=t_{TC}[n_{Ci}])$
飞机保障系统	发动机保养	O1	外场	发动机保养油	A0001	00	6SS
飞机保障系统	发动机更换	O1	外场	发动机维护车	A0002	00	6SS
飞机保障系统	发动机定检	O1	外场	发动机维护车	A0003	00	5SS
飞机保障系统	发动机更换	D1	基地	发动机更换车	A0002	01	5SS

表示 $R_{TOAS}$ 表中组织树节点标识属性的值; $t_{TOAS}[n_{Ai}]$ 表示 $R_{TOAS}$ 表中活动树节点标识属性的值; $t_{TOAS}[n_{Si}]$ 表示 $R_{TOAS}$ 表中资源树节点标识属性的值; $t_C[n_{Ci}]$ 表示 $R_C$ 表中配置项节点标识属性的值; $t_{TC}[n_{Ci}]$ 表示 $R_{TC}$ 表中配置项节点标识属性的值; $t_{TO}[n_{Oi}]$ 表示 $R_{TO}$ 表中组织树节点标识属性的值。

#### 4 结束语

本课题研究了装备保障系统的分解结构,通过对装备保障系统分解结构建立过程中的配置管理需求进行分析,建立了装备保障系统配置管理的范树模型、信息模型和过程模型,可以为保障系统自上而下的设计过程提供建模指导,对保障系统设计过程中多系列和多方案和多视图的繁杂的产品数据配置过程进行有效的处理,产品配置管理是产品数据管理(PDM)中的重要功能,但要完成保障系统的PDM,仍需对保障系统的并行设计过程以及保障系统的技术状态管理做进一步的研究。

#### 参 考 文 献

- [1] 汪惠芬,张友良,罗定志. 协同开发环境中的产品定义模型. 计算机集成制造系统. 2001,7 (3): 26-31.
- [2] 孙强,王英林. 基于UML的复杂配置产品数据模型研究. 计算机工程. 2007,33 (14): 51-53.
- [3] 邹伟,张涛,郭波. 装备维修保障系统的多视图建模方法. 兵工自动化. 2005,24 (2): 24-25.
- [4] 张柳. 维修保障系统建模研究[D],石家庄:军械工程学院,2003. 1.
- [5] 郭霖瀚,康锐. 基本作战单元修复性维修过程建模仿真. 北京航空航天大学学报. 2007,33 (1): 27-31.
- [6] 郭霖瀚,康锐. 基本作战单元预防性维修保障过程建模仿真. 计算机仿真. 2007,24 (4): 36-39.
- [7] 马绍民,章国栋. 综合保障工程. 北京:国防工业出

版社,1995.

- [8] Richard Johnsonbaugh. Discrete mathematics. New York: Prentice Hall, 2001. 319-325.

(责编 侧卫)

(上接第86页)

②从已有实践看,新的维修性增长方案 $Q$ 效率值大于1,超出历史最高效率,说明方案 $Q$ 对投入效率过于理想化,不可行;方案 $T$ 效率值小于1,说明它存在投入过度的问题,有进一步提高效率的余地。另外,表2还显示了这些方案所对应的改进方向和改进程度。

#### 3 结束语

本课题通过引用数据包络理论,为设备维修性增长方案的优化提供了新的方法,克服了目前维修性增长方案优选评估存在的难以消除相关性、存在人为主观因素、不能提供改进方向等主要问题。另外,文中所用的DEA模型是最基本的模型,用于说明思路和方法已经足够,但在工程实践中还需考虑更多维修性增长现实因素,引进相应的新型DEA模型。

#### 参 考 文 献

- [1] 于永利,郝建平. 维修性工程理论与方法. 北京:国防工业出版社,2007.
- [2] 何春雨. 舰艇装备维修性综合评估方法研究[D]. 武汉:海军工程大学,2007.
- [3] 魏权龄. 数据包络分析(DEA). 北京:科学出版社,2006.
- [4] 张凌. 企业技术创新项目评价与决策体系研究. 北京:人民出版社,2006.
- [5] 简祯富. 决策分析与管理. 北京:清华大学出版社,2007.

(责编 小颖)