基于 DEA 的研制阶段装备保障方案评价模型

曲丽丽 康 锐

(北京航空航天大学 工程系统工程系，北京 100191)

摘 要：针对目前研制阶段装备保障方案评价在角度和方法上的不足，提出基于数据包络分析(DEA，Data Envelopment Analysis)的评价模型. 分析提炼保障系统的整体特性，建立保障系统的特性评价参数，构建基于数据包络分析的评价模型，通过计算保障方案的相对效率指数进行保障方案的评价，采用基于劣势前沿面的数据包络分析评价模型对多个有效保障方案进行二次评价，实现了保障方案的排序. 结合研制阶段某型号军用飞机保障方案给出评价示例，从而验证了该模型的可行性和有效性，可为国防工业部门在研制阶段保障方案的评价上提供有效的决策支持.

关 键 词：评价；保障方案；研制阶段；数据包络分析

中图分类号：V 215.7

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)12-1459-05

Evaluation model of materiel support plan in development phase based on DEA

Qu Lili Kang Rui

(Dept. of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To solve the problem that support plan evaluation existed many defects in angles and methods in the previous studies, the evaluation model based on data envelopment analysis (DEA) was presented. The support system general characteristics were abstracted, and evaluation parameters of support system characteristics were established. The model based on data envelopment analysis was established to calculate relative efficiency indexes for assessing support plans, and the evaluation model based on inferior frontier was used to reevaluate several effective support plans, and ranking of alternatives was realized. Evaluating certain type military aircraft support plans were given as an example, feasibility and validity of the model were verified. It could provide excellent decision supporting for defense industrial sections to evaluate materiel support plans in development phase.

Key words: evaluation; support plan; development phase; data envelopment analysis

研制阶段对装备保障方案进行评价，能够确认保障系统是否满足装备使用要求，确定最优的保障方案，使装备和保障系统能够良好地协调和匹配，充分发挥装备系统效能，因此，如何评价保障方案是一个至关重要的决策问题. 以往对保障方案的评价研究[1-7]在角度和方法上存在一定的问题：在评价角度上，或者是对保障系统的资源要素的评价，或是对装备系统效能评价，但都没有从保障系统自身特性分析，对保障系统的整体特性评价；在评价方法的选择上，①常用的多属性综合评价方法如层次分析法、模糊综合评价法、逼近理想解法、灰色关联分析法在权重的确定上带有很大程度的主观性，导致评价结果的不稳定；②人工神经网络、遗传算法等评价方法不需要确定权重，但是需要训练样本训练模型，使模型达到满意的精度，但在研制阶段，无法提供充足的训练数据. 为了解决上述问题，本文首先提炼保障系统的特性，建立特性评价参数，采用数据包络分析评价保

收稿日期：2008-11-27

作者简介：曲丽丽(1981—)，女，山东威海人，博士生，lili. qu@126. com.

障系统特性,该方法直接利用保障系统特性参数的数据,不需要额外的训练数据,而且权重的确定总是从最有利于决策保障方案的角度,可以排除主观因素的影响,具有很强的客观性.

1 保障系统的整体特性

1) 及时性

及时性是保障系统完成保障目标的时间特性."保障目标"是指保障过程要达到的保障效果的定性或者定量要求.及时性包含2部分:①保障系统在装备需要保障时,能否马上提供服务,即及时开始;②保障系统一旦开始执行任务,能否快速完成,即及时完成.

2) 有效性

有效性是保障系统完成保障目标的效率特性.有效性包含2部分:①对保障资源满足保障需求的效率高低的描述,即满足效率;②对保障资源被使用的效率高低的描述,即利用效率.

3) 部署性

部署性是保障系统满足部署要求的能力.与所部署的保障资源的包装要求、装卸要求、运输要求、安装和操作设备所需人员数量以及补给的数量等因素密切相关.

2 保障系统特性评价参数

在保障系统特性研究的基础上,针对每种特性提炼出若干个参数加以表征,以此作为保障系统特性的评价参数.

2.1 及时性参数

表征保障系统及时性的参数主要有平均保障时间和平均等待时间.

1) 平均保障时间

在规定的期间内,保障系统从开始保障到完成保障目标要求所需时间的平均值.其度量方法是:在规定的期间内,保障系统使用维修保障的总时间与使用维修保障事件总数之比.

$$\text{平均保障时间}=\frac{\text{使用维修保障总时间}}{\text{使用维修保障事件总数}}$$

2) 平均等待时间

在规定的期间内,保障系统从接到保障任务到开始保障所需等待时间的平均值.其度量方法是:在规定的期间内,保障系统使用维修保障等待的总时间与使用维修保障事件总数之比.

$$\text{平均等待时间}=\frac{\text{使用维修保障等待总时间}}{\text{使用维修保障事件总数}}$$

2.2 有效性参数

表征保障系统有效性的参数主要有保障系统满足率和保障系统利用率.

1) 保障系统满足率

在规定的期间内,当保障任务需求产生时,保障系统可立即执行该保障任务的概率.

$$\text{保障系统满足率}=\frac{\text{零等待的使用维修保障事件数}}{\text{使用维修保障事件总数}}$$

2) 保障系统利用率

在规定的期间内,保障系统的实际使用时间占总拥有时间的比率.

$$\text{保障系统利用率}=\frac{\text{保障系统使用时间}}{\text{保障系统总拥有时间}}$$

2.3 部署性参数

表征保障系统部署性的参数主要有保障规模、转场时间和部署时间.

1) 保障规模

保障规模是指部署保障资源所需的运输工具的数量.主要考虑保障资源的包装体积和包装重量,同时需结合具体资源的运输要求,如易碎、防湿、勿颠倒、勿挤压等.在选定某种运输工具后,可以初步计算部署保障资源所需要的运输工具的数量.

$$x=\max\left\{\frac{\text{保障资源的包装质量}}{\text{运输工具的载重量}},\frac{\text{保障资源的包装体积}}{\text{运输工具的容积}}\right\}$$

$$\text{运输工具的数量}=\begin{cases}x & x\text{为整数}\\ \text{int}(x)+1 & x\text{为非整数}\end{cases}$$

2) 转场时间

将部署的保障资源全部运送到指定区域所需的时间.

转场时间=装资源的总时间+卸资源的总时间+往返运输的总时间

3) 部署时间

部署的保障系统从抵达新战场到形成保障能力所需的时间.

上述评价参数在研制阶段初期,可通过相似系统数据或解析计算方法得到,在研制阶段后期,可通过构建保障活动的仿真模型分析计算得到.

3 基于数据包络分析的评价模型

数据包络分析(DEA,Data Envelopment Analysis)是1978年由著名运筹学家查恩斯、库伯以及罗兹首先提出的[8],在相对效率评价概念的基础上建立起来的一种新的系统分析方法.基于

数据包络分析的评价模型的基本思路是:计算保障方案的相对效率指数,评价保障方案是否有效,本质上是判断是否位于保障方案可能集的"前沿面"上.保障方案前沿面是由保障可能集中有效保障方案构成的支撑超平面.评价流程图如图 1 所示.

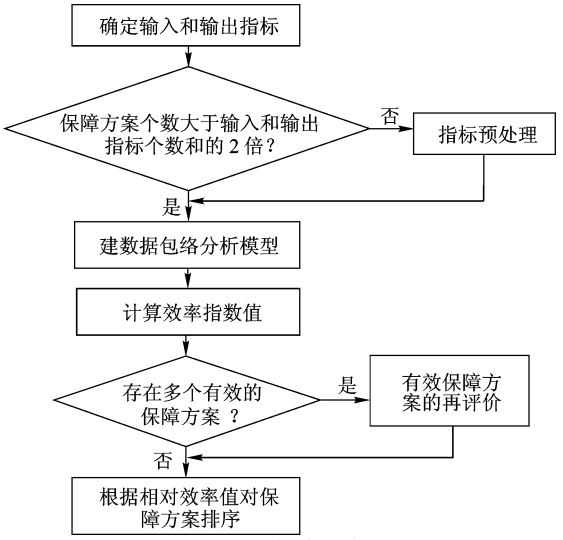


图 1　基于 DEA 的保障方案评价流程图

3.1　确定输入指标和输出指标

每个保障方案都有若干个输入和输出.确定输入指标和输出指标的原则是:输入指标越小越好,而输出指标越大越好.对保障系统的 3 个特性评价参数进行分析,可以容易地确定出平均保障时间、平均延误时间、保障规模、转场时间和部署时间,越小越好,应为输入指标,保障系统满足率和利用率越大越好,应为输出指标.

3.2　指标的预处理

研制阶段评价保障方案时,实际工程中保障方案个数不会很多,当保障方案的个数小于输入和输出指标个数和的 2 倍时,会导致评价结果中有效的保障方案个数增大,不能很好地反映保障方案间的差异性.

为了减少这种情况的发生,先采用主成分分析法分别对输入指标和输出指标进行处理,将原来的数量较多的且存在相关关系的指标转化为由原来指标的线性组合构成的新指标变量,新指标数量较少、相互无关,且保持了原指标的主要信息量.若经主成分分析后得到的输入和输出指标值为负值,不能满足数据包络分析模型要求的输入输出指标为非负的要求,根据数据包络分析模型的"变换不变性",对各保障方案的输入、输出的数据做"加值"处理变换,即各输入向量平移 $\boldsymbol{\alpha}$:$\boldsymbol{X}_j=\boldsymbol{X}_j+\boldsymbol{\alpha}$,各输出向量平移 $\boldsymbol{\beta}$:$\boldsymbol{Y}_j=\boldsymbol{Y}_j+\boldsymbol{\beta}$,其中,$\boldsymbol{X}_j$,$\boldsymbol{Y}_j$ 为主成分分析后第 j 个保障方案的输入和输出向量,$\boldsymbol{\alpha}$,$\boldsymbol{\beta}$ 为非负向量.这样可使所有输入、输出数据均取正值,其保障方案前沿面只发生平移,形状不变,即保障方案的有效性不变.

3.3　建立数据包络分析模型

假设有 n 个保障方案,每个保障方案有 m 种输入指标和 s 种输出指标.设 $\boldsymbol{X}_j=(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{mj})^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{Y}_j=(y_{1j},y_{2j},\cdots,y_{sj})^{\mathrm{T}}$,$j=1,2,\cdots,n$ 分别为第 j 个保障方案的输入向量和输出向量,$\boldsymbol{v}=(v_1,v_2,\cdots,v_m)^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{u}=(u_1,u_2,\cdots,u_s)^{\mathrm{T}}$ 分别为输入和输出向量的权向量.由于:①对于 2 个保障方案$(\boldsymbol{X},\boldsymbol{Y})$和$(\hat{\boldsymbol{X}},\hat{\boldsymbol{Y}})$,若分别以 $\boldsymbol{X}$ 和 $\hat{\boldsymbol{X}}$ 的 α 和 $1-\alpha$ 倍之和输入,可以输出 $\boldsymbol{Y}$ 和 $\hat{\boldsymbol{Y}}$ 的 α 和 $1-\alpha$ 倍之和输出,即保障方案可能集满足凸性公理;②以较多的输入和较少的输出进行保障是可能的,即保障方案可能集满足无效性公理;③保障可能集是满足凸性和无效性公理的集合的交,即保障方案可能集满足最小性公理.因此采用数据包络分析的 $\mathrm{B^2C}$ 模型[9].

$$\left.\begin{aligned}&\max=\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}y_0-\mu_0\\&\text{s.t.}\ \boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}x_j-\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}y_j+\mu_0\geqslant 0\quad j=1,2,\cdots,n\\&\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}x_0=1\\&\boldsymbol{\omega}\geqslant 0\quad\boldsymbol{\mu}\geqslant 0\quad\mu_0\in E^1\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

根据线性规划的对偶理论,得到式(1)的对偶规划模型,进一步引入松弛变量 s^+ 和 s^-,将不等式约束变为等式约束,得到下式:

$$\left.\begin{aligned}&\min\theta\\&\text{s.t.}\ \sum_{j=1}^{n}\lambda_j x_j+s^+=\theta x_0\\&\sum_{j=1}^{n}\lambda_j y_j-s^-=y_0\\&\sum_{j=1}^{n}\lambda_j=1\\&\lambda_j\geqslant 0\quad j=1,2,\cdots,n\\&s^+\geqslant 0\quad s^-\geqslant 0\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

3.4　计算相对效率指数

求解式(2)的最优值 θ^0,θ^0 也称作保障方案 j_0 的相对效率指数,存在:①保障方案 j_0 为弱有效的充分必要条件是 $\theta^0=1$;②保障方案 j_0 为有效的充分必要条件是 $\theta^0=1$,且对于每个最优解 λ^0,都有 $s^{+0}=0$,$s^{-0}=0$;③当 $\theta^0<1$ 时,保障方案 j_0 为非有效.

3.5　有效单元的进一步评价

当有多个保障方案的相对效率指数值为 1,

即有多个有效保障方案时，通过构造劣势前沿面[10]的方法进一步评价. 基本思路是：将所有有效的保障方案从保障方案可能集中去掉，以非有效保障方案组成的新保障方案可能集为基础构造新的有效前沿面，以新前沿面为基准判断原有效的保障方案的有效性，进一步评价原有效的保障方案.

不妨设原保障方案可能集中前 k 个保障方案是(弱)有效的，后面的 $n-k$ 个保障方案为非有效的，则(弱)有效的保障方案 $j_0(j_0=1,2,\cdots,k)$ 基于劣势前沿面的数据包络分析评价模型为

$$\left.\begin{aligned}&\min\theta\\&\text{s.t.}\sum_{j=k+1}^{n}\lambda_j x_j+s^+=\theta x_0\\&\sum_{j=k+1}^{n}\lambda_j y_j-s^-=y_0\\&\sum_{j=k+1}^{n}\lambda_j=1\\&\lambda_j\geqslant 0\quad j=k+1,2,\cdots,n\\&s^+\geqslant 0\quad s^-\geqslant 0\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

3.6 保障方案排序

根据相对效率指数 θ^0 对保障方案进行排序，θ^0 越大，说明保障方案越好. 首先根据式(2)求解的相对效率指数 θ^0，对保障方案排序，当有多个有效的保障方案时，根据式(3)求解的相对效率指数 θ^0，对原(弱)有效的保障方案排序.

4 某军用飞机保障方案评价

研制阶段某型号军用飞机有 6 个保障方案，每个保障方案的及时性、有效性和部署性特性参数如表 1 所示. $I_i(i=1,2,\cdots,5)$ 分别表示保障系统的平均保障时间、平均等待时间、保障规模、转场时间和部署时间，$O_j(j=1,2)$ 分别表示保障系统满足率和利用率. 其中，4 个时间参数的单位是 min，保障规模的单位是架次伊尔 76.

表 1 保障方案特性评价参数

保障方案	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	O_1	O_2
1	25	25	7	2400	3600	0.85	0.50
2	30	28	7	2360	3450	0.82	0.55
3	38	40	6	1800	2800	0.65	0.78
4	35	32	6	2000	3200	0.78	0.50
5	28	32	7	2080	3300	0.80	0.48
6	28	42	6	1780	2500	0.62	0.80

由于保障方案的个数远远小于输入输出评价指标个数和的 2 倍，因此对输入输出指标分别进行主成分分析，得到输入和输出向量各一个，分别用 $\boldsymbol{X}$ 和 $\boldsymbol{Y}$ 表示.

$$\boldsymbol{X}=-0.39I_1-0.44I_2+0.46I_3+0.48I_4+0.44I_5$$

$$\boldsymbol{Y}=0.71O_1-0.71O_2$$

将表 1 中数据标准化后代入计算，有部分为负值，输入和输出向量分别平移 3 个和 2 个单位后，结果填入表 2 的第 2 列和第 3 列，求解数据包络分析评价模型式(2)，计算结果如表 2 的第 4～6 列所示.

表 2 保障方案输入输出指标及计算结果

保障方案	输入向量 $\boldsymbol{X}$	输出向量 $\boldsymbol{Y}$	相对效率指数 θ^0	s^{+0}	s^{-0}
1	5.545	4.159	1.000	0	0
2	4.557	3.085	0.858	0	0
3	0.616	0.922	1.000	0	0
4	0.974	0.648	0.632	0	0.274
5	4.216	2.003	0.537	0	0
6	2.092	1.181	0.483	0	0

由表 2 的结果可知，保障方案优先排序为：保障方案 1 和保障方案 3＞保障方案 2＞保障方案 4＞保障方案 5＞保障方案 6.

保障方案 1 和保障方案 3 通过构建劣势前沿面(如图 2 所示)，求解基于劣势前沿面的数据包络分析评价模型式(3)，计算得到保障方案 1 和保障方案 3 的相对效率指数 θ^0，分别为 1.108 和 2.239，由此可断定保障方案 3 优于保障方案 1.

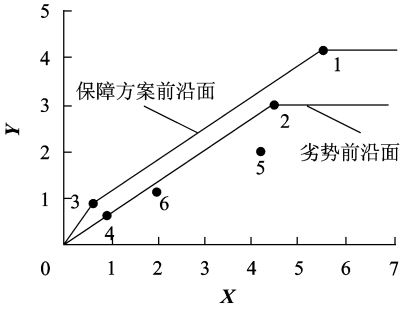


图 2 建立劣势前沿面示意图

5 结束语

本文针对研制阶段现有保障方案评价角度和方法上的不足，构建了一个评价模型. 首先，在评价角度方面，从保障系统的功能需求出发，抽象保障系统的整体特性，在此基础上，建立保障系统整体特性参数，作为保障系统的评价参数；其次，在评价方法上，完全依赖保障系统的特性数据，建立了基于数据包络分析的评价模型，实现保障方案的评价及排序，排除主观因素的影响，客观性强. 最后通过结合某型号飞机保障方案做出示例评价，验证了该模型的可行性和有效性，可为研制阶段的保障方案评价提供一种有效的方法和技术手段.

参考文献(References)

[1] 陈叶菁.装备维修保障设计方案评估方法研究[D].长沙:国防科技大学信息系统与管理学院,2006
Chen Yejing. Study on evaluation method of materiel maintenance support plan[D]. Changsha: School of Information System & Mangement, National University of Defense Technology, 2006(in Chinese)

[2] 徐东.装备综合保障关键技术研究[D].长沙:国防科技大学机电工程与自动化学院,2006
Xu Dong. The research on key technologies of integrated logistics support[D]. Changsha: College of Mechatronics Engneering and Automation, National University of Defense Technology, 2006(in Chinese)

[3] 姜晨,赵喜春,殷志祥.基于 eEPC 的保障方案权衡建模仿真[J].弹箭与制导学报,2007,27(2):320－324
Jiang Chen, Zhao Xichun, Yin Zhixiang. eEPC-based modeling and simulation in support concept trade off[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(2):320－324(in Chinese)

[4] Bevilacqua M, Braglia M. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2000, 70(1):71－83

[5] Michael A Bourcier. Logistic test and evaluation in flight test [R]. RTO-AG-300-V20, 2001

[6] Dinesh Kumar U. Nowicki David, Jose E Ramirez-Marquez, et al. A goal programming model for optimizing reliability, maintainability and supportability under performance based logistics [J]. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 2007, 14(3):251－261

[7] Headquarters Department of the Army. Integrated logistics support [R]. AR700-127, 2005

[8] Charnes A, Cooper W W, Rhode E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. European Journal of Operational Research, 1978, 12:429－444

[9] 魏权龄.数据包络分析[M].北京:科学出版社,2004
Wei Quanling. Data envelopment analysis [M]. Beijing: Science Press, 2004(in Chinese)

[10] 黄朝峰,沈永平,陈英武.基于生产前沿面的 DEA 有效单元再评价研究[J].运筹与管理,2008,17(2):48－52
Huang Chaofeng, Shen Yongping, Chen Yingwu. Research on re-evaluating DEA efficient DMU based on production frontier[J]. Operations Research and Management Science, 2008, 17(2):48－52(in Chinese)

(编　辑:娄　嘉)

(上接第 1445 页)

4　结 束 语

本文所得到的选择概率计算量比较大,这是放宽 IID 条件所必需付出的代价.重要的是,虽然在推导过程中假设随机项服从 Gumbel 分布,但该过程可以用于任何其他分布情形,这为解决实际问题提供了普适性途径,不必再局限于 IID 条件和 Gumbel 分布.

参考文献(References)

[1] McFadden D. Modeling the choice of residential location [C]// Karlqvist A, Snickars F, Weibull J. Spatial Interaction Theory and Planning Models. Amsterdam: North-Holland, 1978:105－142

[2] 关宏志.非集计模型:交通行为分析的工具[M].北京:人民交通出版社,2004
Guan Hongzhi. Disaggregate mode: a tool of traffic behavior analysis[M]. Beijing: China Communications Press, 2004(in Chinese)

[3] McFadden D, Train K E. Mixed MNL models of discrete response [J]. Journal of Applied Econometrics, 2000, 15(5): 447－470

[4] Hess S, Bierlaire M. Estimation of value of travel-time savings using mixed logit models [J]. Transportation Research Part A, 2005, 39(3): 221－236

[5] Greene W H, Hensher D A. Accounting for heterogeneity in the variance of unobserved effects in mixed logit models [J]. Transportation Research Part B, 2006, 40(1):75－92

[6] 陆化普,黄海军.交通规划理论研究前沿 [M].北京:清华大学出版社,2007:77－91
Lu Huapu, Huang Haijun. Theory research progress of transportation planning [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007:77－91(in Chinese)

[7] Train K E. Discrete choice methods with simulation[M]. UK: Cambridge University Press, 2003

[8] Nelsen R B. An introduction to Copulas[M]. Second Edition. New York: Springer Verlag, 2006

[9] Genest C, Rivest L P. A characterization of Gumbel's family of extreme value distributions [J]. Statist Probab Lett, 1989, 8(3): 207－211

[10] Hutchinson T P, Lai C D. Continuous bivariate distributions, emphasising applications [M]. Adelaide: Rumsby Scientific Publishing, 1990

[11] Joe H, Xu J J. The estimation method of inference functions for margins for multivariate models [R]. Department of Statistics, University of British Columbia, Technical Report, 166, 1996

[12] 杨振海,程维虎.基于 Logistic 总体Ⅱ型截尾样本分布参数的近似极大似然估计[J].北京工业大学学报,2004,30(2):235－240
Yang Zhenhai, Cheng Weihu. Approximate maximum likelihood estimation based on Logistic distribution parameters of type Ⅱ censored samples [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2004, 30(2):235－240 (in Chinese)

(编　辑:赵海容)