

文章编号:1000-6893(2010)03-0526-06

# 基于 SFA 的研制阶段装备保障方案评价模型

曲丽丽, 康锐, 肖波平

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100191)

## SFA-based Evaluation Model of Materiel Support Plan in Product Development Phase

Qu Lili, Kang Rui, Xiao Boping

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

**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, 提出基于随机前沿分析(SFA)的评价模型。首先, 分析提炼保障系统的特性, 在此基础上, 建立保障系统的特性评价参数, 然后构建基于 SFA 的评价模型, 通过计算保障方案的效率指数进行保障方案的评价, 实现了保障方案的排序, 以及评价指标的灵敏度分析。最后, 结合研制阶段某型号飞机保障方案给出评价示例, 并与数据包络分析(DEA)评价结果进行对比分析, 评价结果具有较高的一致性, 从而验证了该模型的可行性和有效性, 可为研制方在研制阶段保障方案的评价决策和改进设计提供有效的技术支持。

**关键词:** 评价; 保障方案; 随机前沿分析; 研制阶段; 灵敏度分析

**中图分类号:** V215.7 **文献标识码:** A

**Abstract:** In order to solve the problem that there exist many drawbacks in support plan evaluation in terms of approaches and methods in previous studies, this article presents an evaluation model based on stochastic frontier analysis (SFA). First, support system characteristics are abstracted, based on which the evaluation parameters of support system characteristics are established. Second, a model based on SFA is established to calculate support efficiency indexes for assessing the support plan, and the ranking of alternative support plans is realized. In addition, the sensitivity analysis of evaluation indexes is made. Finally, evaluating a certain type of aircraft support plan is performed as an example. The two evaluation results of the data envelopment analysis (DEA) model and the SFA model demonstrate high consistency according to a comparative analysis of evaluation results. Thus, the feasibility and validity of the evaluation model based on SFA are established. This model can provide excellent decision support for evaluating and improving support plans in the product development phase.

**Key words:** evaluation; support plan; stochastic frontier analysis (SFA); development phase; sensitivity 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, 为保障系统持续改进提出建议, 进而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<sup>[1-11]</sup>在角度和方法上存在一定的问题:

(1) 在评价角度上, 部分研究是对保障系统的资源要素的评价, 部分研究是对装备系统效能评价, 但都没有从保障系统整体特性分析, 对保障系统的整体特性评价。

(2) 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; ③数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)法不需要主观确定权重和训练数据, 完全依赖样本数据, 但一旦数据存在误差, 将严重影响评价结果, 而且随着评价指标个数的增多, 会出现多个保障方案同时有效的情况。

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, 采用随机前沿分析

(Stochastic Frontier Analysis, SFA)法评价保障系统特性,该方法除了具备DEA法的优势外,还考虑了研制阶段数据误差的干扰,评价结果离散度较小,可以做统计检验,而且不会出现多个保障方案同时有效的情况。

## 1 保障系统的整体特性

对于保障系统来说,必须具备反应迅速、运行高效、易于部署的特征,才能使装备快速形成战斗力,发挥其效能,满足平时训练和战时使用任务。因此,保障系统的整体特性可以概括归纳为:及时性、有效性和部署性。

### (1) 及时性

及时性是保障系统完成保障要求的时间特性。“保障要求”是指保障过程要达到的保障效果的定性或者定量要求。定量要求如加100 L油,定性要求如系留牢固等。及时性是对保障过程时间特性的描述,包含两部分: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。这是对保障系统性能非常重要的要求,也是保障系统设计和评价时要重点考虑的特性。

### (2) 有效性

有效性是保障系统完成保障要求的效率特性。有效性是对保障过程中运行效率高低的描述,包含两部分: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。有效性是对保障系统性能非常重要的要求,也是保障系统设计和评价时要重点考虑的特性。

### (3) 部署性

部署性是保障系统满足部署要求的能力。部署性反映了保障系统的机动灵活程度和快速反应能力。部署性与所部署的保障资源的种类、数量、体积和质量等因素密切相关。

谈论及时性、有效性和部署性离不开装备任务要求和装备保障设计特性,保障系统特性分析必须是在给定的装备任务要求与装备保障设计特性的基础上进行的。给定的装备任务要求包含任务环境要求、任务强度要求、任务持续时间和任务中要求使用的装备数量等。装备的保障设计特性是指与保障有关的装备设计特性,如装备的可靠性、维修性、测试性和使用保障性等设计特性。只有装备任务要求和保障设计特性一定时,才能确定保障要求与部署要求,进而才能进行保障系统

的特性分析。

## 2 保障系统评价参数体系

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,建立保障系统评价参数体系。

### 2.1 保障系统特性评价参数

#### (1) 及时性参数

表征保障系统及时性的及时开始和及时完成的参数分别是保障资源获取时间和保障活动时间。保障资源获取时间是指因等待所需的保障资源使得保障系统未能及时开始保障活动的时间。保障活动时间是指保障系统从开始保障活动到完成保障活动的时间。在研制阶段,对使用过程中由于管理原因造成的延误时间难以控制,在此不予考虑。

由于保障活动可以分为使用保障活动、预防性维修保障活动和修复性维修保障活动3类,因此,上述两类时间参数可以细分为平均使用保障资源获取时间、平均预防性维修保障资源获取时间、平均修复性维修保障资源获取时间、平均使用保障活动时间、平均预防性维修保障活动时间和平均修复性维修保障活动时间6个时间参数。

#### (2) 有效性参数

表征保障系统有效性的满足效率和利用效率参数分别是保障资源满足率和保障资源利用率。保障资源满足率是指在规定的期间内,保障资源需求能够被满足的概率。保障资源利用率是指在规定的期间内,保障资源的实际使用时间占总拥有时间的比值。

根据保障资源的分类,有效性参数可细分为保障设备满足率、保障设施满足率、备件保障概率、保障设备利用率、保障设施利用率和备件利用率6个参数。

#### (3) 部署性参数

表征保障系统部署性的参数主要有部署的保障资源总体积、部署的保障资源总质量和保障规模。保障规模是指部署保障资源所需规定运输工具的数量。在研制阶段,对使用过程中保障资源在运输工具中的码放方式难以控制,在此不予考虑。通常在已知部署保障资源的种类、数量、保障物资的包装总质量和总体积后,根据运输工具的载重量和容积换算得到运输工具的数量。

## 2.2 保障系统评价参数体系

在上述 3 类特性参数的基础上,依据科学性、全面性、客观性、可行性等原则,建立如表 1 所示的保障系统评价参数体系。

表 1 保障系统评价参数体系

Table 1 Evaluation index system of support system

评价目标	评价准则	评价参数	计算方法
及时性	平均使用保障资源获取时间 $t_{GRO}$	平均使用保障资源获取时间	在规定的期间内,获取使用保障资源的总时间与使用保障活动总数之比
	平均预防性维修保障资源获取时间 $t_{GRPM}$	平均预防性维修保障资源获取时间	在规定的期间内,获取预防性维修保障资源的总时间与预防性维修保障活动总数之比
	平均修复性维修保障资源获取时间 $t_{GRCM}$	平均修复性维修保障资源获取时间	在规定的期间内,获取修复性维修保障资源的总时间与修复性维修保障活动总数之比
	平均使用保障活动时间 $t_{OS}$	平均使用保障活动时间	在规定的期间内,使用保障活动的总时间与使用保障活动总数之比
	平均预防性维修保障活动时间 $t_{PMS}$	平均预防性维修保障活动时间	在规定的期间内,预防性维修保障活动的总时间与预防性维修保障活动总数之比
	平均修复性维修保障活动时间 $t_{CMS}$	平均修复性维修保障活动时间	在规定的期间内,修复性维修保障活动的总时间与修复性维修保障活动总数之比
保障系统综合评价	保障设备满足率 $FR_{SE}$	保障设备满足率	在规定的期间内,保障设备能满足保障需求的次数与保障设备需求总次数之比
	保障设施满足率 $FR_{SF}$	保障设施满足率	在规定的期间内,保障设施能满足保障需求的次数与保障设施需求总次数之比
	备件保障概率 $FR_{SP}$	备件保障概率	在规定的期间内,需要备件时不缺备件的概率
	保障设备利用率 $UR_{SE}$	保障设备利用率	在规定的期间内,保障设备的实际工作时间占总拥有时间的比值
	保障设施利用率 $UR_{SF}$	保障设施利用率	在规定的期间内,保障设施的实际工作时间占总拥有时间的比值
	备件利用率 $UR_{SP}$	备件利用率	在规定的期间内,备件实际使用数量与配置的备件数量之比
部署性	保障规模 LF	保障规模 LF	$\max \left( \left[ \frac{\text{保障物资的总包装质量}}{\text{运输工具的载重量}} + 0.5 \right], \left[ \frac{\text{保障物资的总包装体积}}{\text{运输工具的容积}} + 0.5 \right] \right)$

## 3 基于 SFA 的评价模型

SFA 是由 Meeusen & Broeck (1977 年)、Aigner, Lovell, Schmidt (1977 年) 与 Battese & Corra (1977 年) 等人各自独立提出的理论框架和计量方法,并应用于实践中的<sup>[12-13]</sup>,是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 SFA 评价模型的基本思想是:先估计一个保障函数,且考虑到该保障函数中误差项目的复合结构及其分布形式,采用相应的技术来估计保障函数中的各个参数,计算保障方案的效率指数,判断保障方案是否位于保障方案前沿面上。保障方案前沿面是由保障方案可能集中有效的保障方案构成的支撑超平面。模型基本可以表达为

$$y = f(x, \beta) \exp(\nu - u)$$

式中: $y$  为保障方案的输出; $x$  为一组输入; $\beta$  为一组待定的矢量参数。误差项为复合结构:第 1 部分  $\nu$  表示统计噪声效应的随机误差项,通常认为服从  $N(0, \sigma_v^2)$  分布,  $\nu \in iid$  (独立一致分布);第 2 部分  $u$  表示非效率项,反映输出非效率的程度,其分布方式由所选参数方法设定,且  $u \geq 0, u \in iid$ 。因此,该保障方案的效率状态用  $TE = \exp(-u)$  表示,TE 为效率指数,TE 越大,说明保障方案越接近保障前沿面,保障方案越优秀。当  $u = 0$  时,  $TE = 1$ ,保障方案有效,保障方案恰好处于保障前沿面上,即  $y = f(x, \beta) \exp \nu$ ;若  $u > 0$  时,  $TE < 1$ ,则保障方案处于保障前沿面下方,即保障非效率状态,如图 1 所示。

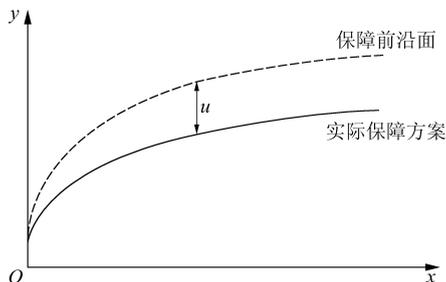


图 1 基于 SFA 的评价模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of evaluation model based on SFA

### 3.1 确定输入与输出指标

每个保障方案都有若干个输入指标和输出指标。确定输入指标和输出指标的原则是:输入指

注: [ ] 表示四舍五入取整。

标越小越好,而输出指标越大越好。对第 2 节中提出的保障系统及时性、有效性和部署性评价参数进行分析,可以容易地确定及时性参数和部署性参数都是越小越好,应为输入指标,有效性参数是越大越好,应为输出指标。因此,确定保障方案的输入指标  $I_1 \sim I_7$  分别为  $t_{GRO}$ 、 $t_{GRPM}$ 、 $t_{GRCM}$ 、 $t_{OS}$ 、 $t_{PMS}$ 、 $t_{CMS}$  和 LF 这 7 个参数,输出指标  $O_1 \sim O_6$  分别为  $FR_{SE}$ 、 $FR_{SF}$ 、 $FR_{SP}$ 、 $UR_{SE}$ 、 $UR_{SF}$  和  $UR_{SP}$  这 6 个参数。

### 3.2 输入和输出指标的预处理

由于保障方案的多个评价指标之间相互影响,反映的信息有所重叠,采用主成分分析法对输入指标和输出指标分别进行简化,使评价指标降维,用几个综合指标代替原始多个指标。

假设输入指标主成分有  $m$  个,  $I_k$  为第  $k$  个输入指标,则第  $j$  个输入主成分可表示为

$$X_j = \sum_{k=1}^7 \alpha_{jk} I_k \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

假设有效性指标主成分有  $n$  个,  $O_k$  为第  $k$  个有效性指标,则第  $l$  个有效性主成分可表示为

$$Y_l = \sum_{k=1}^6 \omega_{lk} O_k \quad (l = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

由于 SFA 模型要求输出指标个数是 1,若  $n > 1$ ,则以每个有效性主成分  $Y_l$  所对应的特征值占所提取主成分总的特征值之和的比例作为权重计算有效性主成分综合值  $Y$ ,以下简称有效性综合值。

当输入主成分值和有效性综合值有负值时,不满足评价模型的要求,对其作适当的线性变形而不影响模型输出结果<sup>[14]</sup>,即输入主成分值和有效性综合值分别平移  $a$  和  $b$ :

$$\begin{cases} a: X_j = X_j + a & (j = 1, 2, \dots, m) \\ b: Y = Y + b \end{cases}$$

式中:  $a$  和  $b$  为非负的,这样可使所有的参数值均取正值,其保障前沿面只发生平移,形状不变。

### 3.3 建立评价模型

由于 Battes&Coelli(1995 年)提出的评价模型得到了广泛应用,本文拟在此基础上,运用基于柯布-道格拉斯(Cobb-Douglas)函数作为保障函数,建立研制阶段保障方案评价模型为

$$\left. \begin{aligned} \ln Y_i &= \beta_0 + \sum_{j=1}^m (\beta_j \ln X_{ji}) + \epsilon_i \\ \epsilon_i &= \nu_i - u_i \\ TE_i &= \exp(-u_i) \\ \gamma &= \frac{\sigma_u^2}{\sigma_u^2 + \sigma_v^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $Y_i$  为第  $i$  个保障方案的有效性综合值;  $X_{ji}$  为第  $i$  个保障方案的第  $j$  个输入主成分;  $m$  为输入主成分的个数;  $i$  为保障方案的序号;  $\beta_0$  为截距项;  $\beta_j$  为待估计的参数,实际上是各输入主成分的输出弹性。

误差项由  $\nu_i$  和  $u_i$  两部分组成,二者相互独立。第 1 部分  $\nu_i$  为随机误差项,服从  $N(0, \sigma_v^2)$  分布,第 2 部分  $u_i$  为非效率项,可服从半正态分布、指数分布、截断正态分布和伽马分布等。但很多研究已经证明,虽然  $u_i$  分布形式对效率指数有影响,但  $u_i$  分布形式对排序结果是不敏感的<sup>[15]</sup>,因此在本模型中,假设  $u_i$  服从正半部的正态分布  $N(0, \sigma_u^2)$ 。

$\gamma$  也是待估计参数,显然,  $\gamma = 0$  时,  $\sigma_u^2 \rightarrow 0$ ,进一步可推理得到误差  $\epsilon_i = \nu_i$ 。统计检验中,如果  $\gamma = 0$  这一原假设被接受,说明所有保障方案都位于保障前沿曲线上,此时,无需使用 SFA 技术,直接运用最小二乘法即可。

### 3.4 灵敏度分析

由于保障系统特性指标之间相互影响,根据评价结果,可以分析各输入指标对有效性综合值的灵敏度,为今后的保障方案的改进优化提供辅助决策。

式(3)中弹性系数  $\beta_j$  的含义是:当  $\beta_j > 0$  时,  $X_j$  每增加 1%,可促使有效性综合值提高  $\beta_j$  个百分点;当  $\beta_j < 0$  时,  $X_j$  每增加 1%,可促使有效性综合值降低  $\beta_j$  个百分点。若综合考虑所有的输入指标,根据式(1)可推导得到第  $k$  个输入指标  $I_k$  每增加 1%,可促使有效性综合值变化  $\Delta Y / \Delta I_k = \sum_{j=1}^m (\beta_j \alpha_{jk})$ : 当  $\Delta Y / \Delta I_k > 0$  时,表示有效性综合值提高;当  $\Delta Y / \Delta I_k < 0$  时,表示有效性综合值下降。

## 4 应用案例

研制阶段某型号飞机有 5 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 2 所示。

表 2 保障系统特性评价参数

Table 2 Evaluation parameters of support system characteristics

保障方案	$t_{GRO}$ /min	$t_{GRPM}$ /min	$t_{GRCM}$ /min	$t_{OS}$ /min	$t_{PMS}$ /min	$t_{CMS}$ /min	LF/架次 伊尔 76
1	10	12	12	10	12	10	7
2	8	10	12	8	25	10	7
3	30	20	25	15	10	10	5
4	16	20	25	15	12	12	6
5	10	8	8	20	15	30	7

保障方案	FR <sub>SE</sub>	FR <sub>SF</sub>	FR <sub>SP</sub>	UR <sub>SE</sub>	UR <sub>SF</sub>	UR <sub>SP</sub>
1	0.85	0.78	0.88	0.50	0.48	0.54
2	0.820	0.80	0.85	0.55	0.50	0.58
3	0.65	0.60	0.72	0.78	0.70	0.78
4	0.78	0.80	0.80	0.50	0.48	0.50
5	0.80	0.80	0.82	0.48	0.50	0.50

对输入输出指标分别进行主成分分析,得到输入主成分两个,有效性主成分一个,分别用  $X_1$ 、 $X_2$  和  $Y$  表示:

$$\begin{cases} X_1 = 0.445t_{GRO} + 0.463t_{GRPM} + 0.457t_{GRCM} + 0.09t_{OS} - 0.331t_{PMS} - 0.215t_{CMS} - 0.463LF \\ X_2 = 0.088t_{GRO} - 0.094t_{GRPM} - 0.107t_{GRCM} + 0.689t_{OS} - 0.322t_{PMS} + 0.626t_{CMS} - 0.042LF \\ Y = -0.41FR_{SE} - 0.415FR_{SF} - 0.382FR_{SP} + 0.416UR_{SE} + 0.421UR_{SF} + 0.404UR_{SP} \end{cases}$$

将表 2 的数据标准化代入计算后,3 个主成分都有部分为负值,均平移 10 个单位后,3 个主成分都是正值。使用 Frontier4.1 程序进行分析,求解 SFA 评价模型式(3),得到 5 个保障方案的效率状况,具体数值如表 3 所示。

表 3 SFA 模型计算保障方案效率指数

Table 3 Efficiency indexes of support plans calculated by SFA model

保障方案	1	2	3	4	5
效率指数	0.820	0.991	0.976	0.706	0.970

模型还计算出了输入主成分的参数、标准差和 T 统计值,如表 4 所示。

根据表 3 和表 4 的分析结果来看,可以得到这样的结论:

(1)  $\gamma = 0.999\ 999\ 9$ ,似然比统计检验在 1% 的显著水平下显著,说明导致保障方案非效率的因素是可以控制的,有必要对影响保障方案非效率的因素进行分析。式(3)中的误差项有着明显的复合结果,因此,对这些保障方案使用 SFA 是

很有必要的。并且  $\gamma$  和似然比检验值都很大,说明设定的模型是可靠的。

(2) 表 3 数据表明,保障方案的优劣排序是:保障方案 2,保障方案 3,保障方案 5,保障方案 1,保障方案 4。

(3) 用 DEA 法评价这 5 个保障方案效率的结果如表 5 所示。

表 4 SFA 模型参数回归结果分析

Table 4 Parameter regression analysis in SFA model

参数	参数估计	标准差	T 统计值
$\beta_0$	0.128 580 3	1.179 867 0	0.108 978 6
$\beta_1$	1.018 537 0	0.165 653 3	6.148 603 0
$\beta_2$	-0.022 831 0	0.395 972 7	-0.057 657 7
$\sigma^2$	0.028 815 7	0.031 621 7	0.911 263 7
$\gamma$	0.999 999 9	0.058 585 2	17.069 150 0
对数似然值		49.367 8	
单边偏误似然比检验值		32.135 4	

注:①该模型检验显著性水平为 1%;②对数似然值是极大似然估计法得到的统计量;③似然比检验统计量符合混合卡方分布。

表 5 DEA 模型计算保障方案效率指数

Table 5 Efficiency indexes of support plans calculated by DEA model

保障方案	1	2	3	4	5
效率指数	0.827	1.000	1.000	0.720	0.977

利用 SPSS 软件对 SFA 模型和 DEA 模型计算得到的保障方案效率指数进行 Spearman 相关性检验,计算其相关系数为 0.921,显著性概率水平为 0.05,结果如表 6 所示。说明两种评价模型计算得到的效率值具有很强的相关性,同时也验证了 SFA 模型在研制阶段保障方案评价中的应用是合理的。

表 6 SFA 模型与 DEA 模型效率指数相关性检验

Table 6 Correlation test of efficiency indexes based on SFA and DEA models

	SFA 模型	DEA 模型
SFA 模型	Pearson 相关系数	1.000
	双侧显著性概率	0.921
	样本数	0.026
DEA 模型	Pearson 相关系数	0.921
	双侧显著性概率	1.000
	样本数	0.026

(4) 从两个输入主成分的产出弹性来看, $\beta_1 = 1.019$ , $\beta_2 = -0.023$ ,根据 3.4 节的结论,计

算得到及时性和部署性参数值每增长1%时,有效性综合值的变化,结果数据如表7所示。

表7 灵敏度分析结果

Table 7 Sensitivity analysis results

输入参数	$t_{GRO}$	$t_{GRPM}$	$t_{GRCM}$	$t_{OS}$	$t_{PMS}$	$t_{CMS}$	LF
$\frac{\Delta Y}{\Delta I_k}$	0.451	0.474	0.468	0.076	-0.330	-0.233	-0.471

分析表7的数据,发现保障资源获取时间和保障规模是较为敏感的,提高保障资源获取时间的3个参数和降低保障规模参数,是提高有效性综合值的主要方法。

## 5 结论

(1) 通过计算保障方案的效率指数,实现保障方案的评价及排序,并用应用案例证明了SFA评价模型结果与DEA评价模型结果具有很好的 consistency,验证了该评价模型的可行性,可实现研制阶段的保障方案评价决策。

(2) 通过及时性和部署性参数对有效性的灵敏度分析,得到对有效性较为敏感的及时性和部署性参数,可为研制阶段保障方案的设计改进提供参考依据。

由于本模型是基于各保障方案特性参数值构建的保障前沿面,因此需要得到较为准确的特性参数值,故本模型更适用于详细设计阶段的保障方案的评价决策。

## 参 考 文 献

- [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, 2006.  
Chen Yejing. Study on evaluation method of materiel maintenance support plan[D]. Changsha: 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, 2006.  
Xu Dong. The research on key technologies of integrated logistics support[D]. Changsha: 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): 321-324.  
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): 321-324. (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] U. S. Army Forms Management Officer. Test and evaluation policy[R]. AR 73-1, 2004.
- [6] Lappin M K. Supportability evaluation prediction process [C]// Annual Proceedings of Reliability and Maintainability Symposium. 1988; 102-107.
- [7] Secretary of the Air Force. Determining mission capability and supportability requirements[R]. Afi10-602, 2005.
- [8] Jones J V. Integrated logistics support handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [9] Blanchard B S. Logistics engineering and management [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2004.
- [10] Kumar U D, Nowicki D, Ramirez-Marquez J E, 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.
- [11] 刘占伟, 邓四二, 滕弘飞. 复杂工程系统设计方案评价方法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(12): 1488-1491.  
Liu Zhanwei, Deng Sier, Teng Hongfei. Survey on the evaluation methods of design schemes in a complicated engineering system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(12): 1488-1491. (in Chinese)
- [12] 房卓. 基于DEA和SFA的物流企业综合绩效评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
Fang Zhuo. Study on comprehensive performance evaluation system of logistics enterprise based on DEA and SFA [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [13] 何枫, 陈荣, 何炼成. SFA模型及其在我国技术效率测算中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2004(5): 46-50.  
He Feng, Chen Rong, He Liancheng. The measurement of chinese technical efficiency: the application of stochastic frontier production function[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2004(5): 46-50. (in Chinese)
- [14] 熊国强, 党兴华. 具有非正值评价指标的DEA方法及其应用[J]. 系统工程理论方法应用, 2003(12): 153-156.  
Xiong Guoqiang, Dang Xinghua. Study of DEA and its application with non-positive evaluation index[J]. System Engineering Theory Methodology Applications, 2003 (12): 153-156. (in Chinese)
- [15] Kumbhakar S C, Knox Lovell C A. Stochastic frontier analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 5-15.

### 作者简介:

曲丽丽(1981—)女,博士研究生。主要研究方向:可靠性系统工程与综合保障工程。  
Tel: 010-82316968  
E-mail: lili.qu@126.com

(编辑:李铁柏,徐晓)