

doi: 10.7690/bgzd.2016.12.017

基于集对势的卫生装备效能评估与优化方法

王亚鹏^{1,2}, 王运斗¹, 李雅平³, 赵欣¹, 熊晓雯^{1,4}, 张巾帼⁵

(1. 军事医学科学院卫生装备研究所, 天津 300161; 2. 军事交通学院装备保障系, 天津 300161; 3. 武警后勤学院附属医院, 天津 300162; 4. 军事交通学院汽车指挥系, 天津 300161; 5. 军事交通学院基础部, 天津 300161)

摘要: 针对当前卫生装备效能评估方法的局限与不足, 采用集对势理论提出一种新的卫生装备效能评估与优化方法。介绍卫生装备效能评估指标体系和效能评估与优化模型, 以防护服效能评估与优化为例, 说明该方法的应用过程, 重点分析其优势。结果表明: 该方法不仅能从宏观上对卫生装备效能进行“评价排序”选出“最优”, 而且可以从微观上分析各个卫生装备效能的优劣所在, 基于组合优化思想生成一个效能“更优”的新装备, 从而实现卫生装备效能“选优”和“改进”的有机统一, 可以同时为装备使用者和研制者提供决策参考。

关键词: 卫生装备效能; 评估; 优化; 集对分析; 集对势

中图分类号: TP206 **文献标志码:** A

Evaluation and Optimal Method of Medical Equipment Effectiveness Based on Set Pair Potential

Wang Yapeng^{1,2}, Wang Yundou¹, Li Yaping³, Zhao Xin¹, Xiong Xiaowen^{1,4}, Zhang Jinguo⁵

(1. Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300161, China;

2. Equipment Support Department, Military Transportation University, Tianjin 300161, China;

3. Affiliated Hospital, Logistic University of Chinese Armed Police Force, Tianjin 300162, China;

4. Automobile Transportation Command Department, Military Transportation University, Tianjin 300161, China;

5. Basic Department, Military Transportation University, Tianjin 300161, China)

Abstract: In order to solve the problems and deficiencies of evaluation methods for medical equipment effectiveness, put forward a new evaluation and optimal model by using of set pair potential theory. First, it introduces the effectiveness evaluation index system and the evaluation and optimal model of the medical equipment, then takes the evaluation and optimal of protective clothing effectiveness as an example to explain how to use this method and analyze the advantages of this method. The results show that, this method not only can “evaluate and queue” and choose the “best” from many medical equipment macroscopically, but also can analyze the advantages and disadvantages of every equipment microscopically, and generate a new and “better” medical equipment by combining optimization theory. Realize unification of “choosing best” and “improvement” of medical equipment effectiveness. Therefore, this method can provide decision reference for equipment users and developers at the same time.

Keywords: medical equipment effectiveness; evaluation; optimal; set pair analysis; set pair potential

0 引言

卫生装备效能评估, 是指利用科学可靠的评估方法对卫生装备的卫勤保障能力进行评价, 是以卫生装备或卫生装备组成的系统作为评估客体, 测估其卫勤保障综合效能的过程, 通过评估衡量其达到主体需求的程度^[1]。根据主体需求不同, 卫生装备效能评估主要有 2 个目的: 一是选优, 即通过评估对比, 从多种同类卫生装备(系统)中选出效能最优的, 来最大程度满足主体需求; 二是改进, 即通过评估分析查找现有卫生装备(系统)的优劣所在, 为后续装备(系统)改进提供依据。通过文献检索发现, 当前在卫生装备效能评估方面已有较为深入的研究, 并形成了一些有代表性的成果。如文献[2-10], 这些文献中的评估方法均采用“对比排序”的办法

选出效能最优的装备, 这些方法都具有其理论上的科学性和实践上的有效性, 但普遍存在一些不足: 从评价思路上看, 大都属于“非此即彼”的单一性评价, 关注“评价排序”忽视“优化重组”, 不是“博采众家之长”的优化性评价; 从评价结果的分析与应用上看, 都是站在装备应用角度的“产品选优”, 缺乏从装备研制方面的“功能改进”。

基于上述认识, 笔者尝试运用集对分析理论中的集对势^[11]构建一种新的卫生装备效能评估与优化模型, 期望把卫生装备效能评估的 2 个目的兼顾起来, 实现“选优”与“改进”的有机统一。该方法不仅能够从宏观上对多种卫生装备的效能进行“评价排序”得出“最优”, 更重要的是能从微观上分析各个卫生装备的优劣之处, 基于“组合优化”

收稿日期: 2016-08-16; 修回日期: 2016-09-20

作者简介: 王亚鹏(1983—), 男, 河南人, 在读博士, 讲师, 从事装备保障、卫生资源配置与优化研究。

的思想生成一个效能“更优”的新装备^[12]，从而为装备使用者提供有价值的参考指导，同时也为装备研制者提供改进依据。

1 卫生装备效能评估指标体系

笔者旨在研究提出一种新的卫生装备效能评估与优化方法；因此，为了便于方法与模型的对比分析，以防护服为示例对象，借鉴文献[8]的研究成果构建防护服效能评估指标体系，如表1所示。

表1 防护服效能评估指标体系

一级指标	权重值	二级指标	二级指标相对一级指标权重值	二级指标最终权重值
作业能力	0.348 2	对病原体的防护能力	0.456 5	0.158 9
		舒适性	0.185 6	0.064 6
		重复使用性	0.065 7	0.022 9
		视野	0.185 6	0.064 6
		穿戴难易度	0.106 6	0.037 1
环境适应性	0.139 8	工作温度范围	1	0.139 8
体积和质量	0.128 9	质量	0.443 4	0.057 1
		包装体积	0.169 2	0.021 8
		可用型号	0.387 4	0.049 9
保障性	0.243 4	保存期限	0.327 5	0.079 7
		保修期	0.259 9	0.063 2
		培训需求	0.412 6	0.100 4
经济性	0.139 8	购置成本	0.666 7	0.093 1
		维护成本	0.333 3	0.046 6

2 卫生装备效能评估与优化模型

2.1 集对分析、联系度与集对势

集对分析(set pair analysis, SPA)是研究2个或多个事物同异反联系和转化的一种系统数学方法^[11]，其核心是将系统内的确定性和不确定性予以辩证的分析 and 数学处理，并将不确定性和确定性作为一个系统进行综合考察。它将系统的确定性分为“同一”与“对立”2方面，将不确定性定义为“差异”，三者相互联系、相互制约，并在一定条件下相互转化。集对分析的基本概念是集对及其联系度。所谓集对，是指具有一定联系的2个集合所组成的对子。联系度是对集对在某一特性的联系的定量刻画，其表达式为 $\mu = a + bi + cj$ ，其中 a, b, c 为非负实数，依次称为同一度、差异度和对立度，并且 a, b, c 三者的统一形成两集合联系度的整体，即 $a + b + c = 1$ ； i, j 分别为差异度和对立度的相应系数，一般规定 $i \in [-1, 1], j = -1$ 。

当 $c \neq 0$ 时，同一度 a 与对立度 c 的比值 a/c 称为所论集对在指定问题背景下的集对势，用“shi”表示^[11]，记为

$$\text{shi}(H) = \frac{a}{c} \quad (1)$$

当 $c \neq 0$ 时，算得的集对势是相对确定的，若 $a/c > 1$ ，称为集对的同势，若 $a/c < 1$ ，称为集对的反势，若 $a/c = 1$ ，称为集对的均势；当 $c = 0$ 时，式(1)的值变得无穷大，这时若 $b \neq 0$ ，则可以考察 a/b 的值，并看作是 $c = 0$ 情况下的集对势，由于 b 的相对不确定性，这时的集对势是相对不确定的。根据 a, b, c 的大小关系，集对势存在一定的次序关系^[11]，如表2所示。

表2 集对势等级与次序关系

序号	等级划分	集对势	a, b, c 的大小关系
1	一级	微均势	$a = c, b > a$
2	二级	弱均势	$a = c, b = a$
3	三级	强均势	$a = c, a > b > 0$
4	四级	准均势	$a = c, b = 0$
5	一级	准同势	$a > c, b = 0$
6	二级	强同势	$a > c, c > b$
7	三级	弱同势	$a > c, a > b > c$
8	四级	微同势	$a > c, b > a$
9	一级	准反势	$a < c, b = 0$
10	二级	强反势	$a < c, 0 < b < a$
11	三级	弱反势	$a < c, b > a, b < c$
12	四级	微反势	$a < c, b < c$
13	不确定同一势		$c = 0, a > b$
14	不确定势		$c = 0, a \leq b$

2.2 确定联系度^[13]

为方便叙述和计算，把卫生装备效能评估问题记为 $G = (S, E, \omega, X)$ ，其中， $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 表示待评估卫生装备集， s_k 为第 k 个待评估的卫生装备； $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 表示评估指标集， e_r 为第 r 个评估指标； $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ 表示指标权重集， $\omega_r (> 0)$ 为评估指标 e_r 的权重，且 $\sum_i \omega_i = 1$ ； $X = (x_{kr})_{m \times n}$ 表示决策矩阵， $x_{kr} (\geq 0)$ 为待评估卫生装备 s_k 关于指标 e_r 的量化值。

为在同一空间内进行分析，由各指标的量化值确定卫生装备效能最优集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 和最劣集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ，其中 u_r, v_r 分别表示评估指标 e_r 最大、最小的量化值。效能最优集和最劣集构成比较空间 $[V, U]$ 。

对于效益型指标(属性值越大越好)，在比较区间 $[v_r, u_r]$ 中，有 $\frac{x_{kr}}{u_r + v_r} \in [0, 1], \frac{x_{kr}^{-1}}{u_r^{-1} + v_r^{-1}} \in [0, 1]$ ，且他们在数值上分别表示 x_{kr} 与 u_r ， x_{kr} 与 v_r 的接近程度，其值越大，接近程度越高。同时，在 $[v_r, u_r]$ 区间中， x_{kr} 与 u_r 的接近说明了与 v_r 的远离。故由此定义集

对 $\{x_{kr}, u_r\}$ 的同一度 a_{kr} 和对立度 c_{kr} ，其表达式为

$$a_{kr} = \frac{x_{kr}}{u_r + v_r}, c_{kr} = \frac{x_{kr}^{-1}}{u_r^{-1} + v_r^{-1}} = \frac{u_r v_r}{(u_r + v_r)x_{kr}}$$

则差异度 $b_{kr} = 1 - (a_{kr} + c_{kr}) = \frac{(u_r - x_{kr})(x_{kr} - v_r)}{(u_r + v_r)x_{kr}}$ 。

根据上述分析，对于效益型指标，定义集对 $\{x_{kr}, u_r\}$ 的联系度为：

$$\mu_{\{x_{kr}, u_r\}} = \frac{x_{kr}}{u_r + v_r} + \frac{(u_r - x_{kr})(x_{kr} - v_r)}{(u_r + v_r)x_{kr}} i + \frac{u_r v_r}{(u_r + v_r)x_{kr}} j \quad (2)$$

同理，对于成本型指标(属性值越小越好)，在比较区间 $[v_r, u_r]$ 中，定义集对 $\{x_{kr}, u_r\}$ 的联系度为：

$$\mu_{\{x_{kr}, u_r\}} = \frac{u_r v_r}{(u_r + v_r)x_{kr}} + \frac{(u_r - x_{kr})(x_{kr} - v_r)}{(u_r + v_r)x_{kr}} i + \frac{x_{kr}}{u_r + v_r} j \quad (3)$$

式(2)、式(3)的同一度和对立度分别说明了对于指标 e_r ，卫生装备 s_k 趋向效能最优和最劣的程度。两式关于同一度和对立度互为对称，且具有相同的差异度，说明刻画的对立性和一致性。当 $x_{kr} = u_r$ 或 v_r 时，差异度最小为 0，表示不确定性最小；当 $x_{kr} = \sqrt{u_r v_r}$ 时，差异度最大为 $1 - \frac{2\sqrt{u_r v_r}}{u_r + v_r}$ ，表示不确定性最大。

综上所述，将式(1)、式(2)统一记为

$$\mu_{x_{kr}} = a_{kr} + b_{kr} i + c_{kr} j \quad (4)$$

2.3 确定权重

评估时，由于各评估指标的影响不同，需要以权重系数表示各评估指标的重要程度，进而才能在比较空间 $[V, U]$ 中，计算集对 $\{x_{kr}, u_r\}$ 的综合联系度，对不同卫生装备效能进行评估排序。确定指标权重的方法有很多，有层次分析法、熵权法等^[10]，为了确保数据统一，便于方法对比分析，文中卫生装备效能评估指标权重仍沿用文献[8]中的权重值，具体数值如表 1 中第 3、5、6 列所示。

2.4 计算综合联系度，确定集对势，进行评估与优化

计算卫生装备效能评估指标中一级指标的加权联系度：

$$\mu_k = a_k + b_k i + c_k j \quad (5)$$

其中， $a_k = \sum_{r=1}^n w_r a_{kr}, b_k = \sum_{r=1}^n w_r b_{kr}, c_k = \sum_{r=1}^n w_r c_{kr}$ ，

$k = 1, 2, \dots, s$ 。

计算卫生装备效能评估的综合联系度：

$$\mu_n = a_n + b_n i + c_n j \quad (6)$$

其中， $a_n = \sum_{j=1}^l W_j a_{nj}, b_n = \sum_{j=1}^l W_j b_{nj}, c_n = \sum_{j=1}^l W_j c_{nj}$ ，

$k = 1, 2, \dots, l$ 。

在式(5)和式(6)的基础上，可以由式(1)分别求得卫生装备效能一级评估指标的加权集对势和综合集对势，并根据综合集对势的大小结合表 1 中的等级关系对卫生装备进行评估排序，综合集对势 $shi(H)$ 越大，卫生装备整体效能越好；同时，根据单项指标的集对势可以对各卫生装备的单项效能指标进行比较，以便评估选出最好的指标，从而根据需要组合优化生成效能“更优”的新的卫生装备。

3 模型应用分析

为便于对比分析，笔者仍沿用文献[8]中的 6 种典型防护服，其基本信息如表 3 所示。

表 3 6 种典型防护服基本信息

序号	装备名称	生产厂家
1#	Chemtursion® Suit: Model 13	ILC Dover, Inc.
2#	Tychem® 10000 EX Commander	DuPont Tyvek® Protective Apparel
3#	Tychem® SL	DuPont Tyvek® Protective Apparel
4#	Tyvek® Coverall	DuPont Tyvek® Protective Apparel
5#	Trellechem® High Performance Suit (HPS)	Trelleborg Industries
6#	BWT 型医用防护服	北京邦维高科

由于文献[8]中没有给出 6 种防护服效能评估指标的原始数据，而其经过规范化处理后的指标数据中有多个数值为“0”，不适用于式(2)和式(3)计算评估指标的联系度，但考虑到数据规范化处理一般只改变数值，不会改变数据属性和数据间的逻辑关系；因此，笔者采用文献[8]中计算所得的灰色关联系数作为初始计算数据，如表 4 所示。

显而易见，上述 5 个一级评估指标中作业能力、环境适应性、维修保障性和经济性等 4 个指标为效益型指标，体积和质量为成本型指标；14 个二级评估指标中对病原体的防护能力、舒适性、重复使用性、视野、穿戴难易度、工作温度范围、可用型号、保存期限和保修期 9 个为效益型指标；质量、包装体积、培训需求、购置成本和维护成本等 5 个为成本型指标。

根据指标类型(效益型和成本型)不同，分别利用式(2)~式(4)计算二级指标的联系度，之后利用式(5)计算单个卫生装备一级指标的联系度，利用式(6)

计算每一种卫生装备效能的综合联系度，然后利用式(1)分别计算一级指标集对势和综合集对势，并依据集对势大小对卫生装备的一级指标与综合效能进行对比排序。计算结果如表5~表7所示。

表4 用于计算的初始数据

序号	一级指标	二级指标	1#	2#	3#	4#	5#	6#
1	作业能力	对病原体的防护能力	1	1	0.625	0.625	1	0.714 3
2		舒适性	0.714 3	0.625	1	1	0.625	0.714 3
3		重复使用性	1	0.454 5	0.454 5	0.454 5	1	0.714 3
4		视野	0.714 3	0.714 3	1	1	0.714 3	1
5		穿戴难易度	0.714 3	0.555 5	0.555 6	1	0.454 5	1
6	环境适应性	工作温度范围	0.714 3	0.714 3	0.555 6	0.555 6	1	0.555 6
7	体积和质量	质量	0.641 0	0.438 6	0.925 9	1	0.333 3	0.617 3
8		包装体积	0.543 5	0.403 2	0.746 3	1	0.333 3	0.531 9
9		可用型号	0.333 3	1	1	1	0.5	0.4
10	维修保障性	保存期限	0.333 3	0.333 3	0.333 3	0.333 3	1	0.333 3
11		保修期	0.333 3	0.333 3	0.333 3	0.333 3	1	0.757 6
12		培训需求	0.714 3	1	1	1	0.555 6	1
13	经济性	购置成本	0.602 4	0.694 4	0.980 4	1	0.333 3	0.961 5
14		维护成本	1	1	1	1	0.555 6	1

表5 卫生装备一级指标的联系度计算结果

装备序号	作业能力	环境适应性	体积和质量	维修保障性	经济性
1#	0.537 4+0.011 7i+0.450 9j	0.459 1+0.040 8i+0.500 0j	0.379 0+0.079 7i+0.541 3j	0.336 3+0.016 8i+0.646 9j	0.515 5+0.088 8i+0.395 7j
2#	0.490 9+0.005 9i+0.503 2j	0.459 1+0.040 8i+0.500 0j	0.487 6+0.058 0i+0.454 5j	0.412 1+0.587 9j	0.561 5+0.079 5i+0.359 1j
3#	0.459 3+0.005 9i+0.534 8j	0.357 2+0.642 8j	0.639 2+0.033 6i+0.273 2j	0.412 1+0.587 9j	0.704 5+0.006 5i+0.289 0j
4#	0.491 9+0.508 1j	0.357 2+0.642 8j	0.750 0+0.250 0j	0.412 1+0.587 9j	0.714 3+0.285 7j
5#	0.508 1+0.491 9j	0.642 8+0.357 2j	0.298 4+0.381 0i+0.320 6j	0.587 9+0.412 1j	0.285 7+0.714 3j
6#	0.496 1+0.018 8i+0.485 1j	0.357 2+0.642 8j	0.389 0+0.109 8i+0.501 2j	0.494 8+0.026 5i+0.478 8j	0.695 0+0.012 6i+0.292 4j

表6 卫生装备一级指标的集对势计算结果及排序情况

装备序号	作业能力		环境适应性		体积和质量		维修保障性		经济性	
	集对势	排序	集对势	排序	集对势	排序	集对势	排序	集对势	排序
1#	1.191 6	1	0.918 3	2	0.700 1	6	0.519 9	4	1.302 7	5
2#	0.975 5	4	0.918 3	2	1.072 9	3	0.700 9	3	1.563 8	4
3#	0.858 9	6	0.555 6	3	2.537 0	2	0.700 9	3	2.437 4	2
4#	0.968 0	5	0.555 6	3	3.000 3	1	0.700 9	3	2.500 1	1
5#	1.033 0	2	1.799 9	1	0.930 8	4	1.426 7	1	0.400 0	6
6#	1.022 6	3	0.555 6	3	0.776 2	5	1.033 5	2	2.377 2	3

表7 卫生装备的综合联系度与集对势计算结果及排序

装备序号	综合联系度	综合集对势	排序
1#	0.454 1+0.036 6i+0.509 5j	0.891 3	6
2#	0.476 8+0.026 3i+0.497 0j	0.959 3	5
3#	0.498 0+0.007 3i+0.494 8j	1.006 5	4
4#	0.518 0+0.482 1j	1.074 6	1
5#	0.488 3+0.049 1i+0.462 7j	1.055 4	2
6#	0.490 4+0.028 9i+0.480 8j	1.020 0	3

根据表7中计算结果可知：6种防护服的效能优劣排序为4#>5#>6#>3#>2#>1#，与文献[8]中采用灰色综合评价法所得的结果4#>3#>6#>5#>2#>1#大体一致，只是3#、5#和6#的排序有所不同。这说明文中采用的集对势评估方法有效。对于造成结果不一致的原因：3#、5#和6#3种防护服的效能差距不大，各有优劣，这在文献[8]中也被提及，不同的评估方法关注重点不同而导致排序结果不一样。因此，对于防护服的使用者或采购者来讲，可根据评估结果选择整体效能最优的4#防护服。

然而，根据表6中一级指标集对势的计算结果可以发现：4#防护服虽然整体效能最优，并不是所有指标都是最优的，甚至个别指标如作业能力排名

第5；相反，1#防护服虽然整体效能最差，并不是“一无是处”，反而作业能力排名第1。同理，5#防护服整体效能比3#防护服略好，但其经济性排名第6则远不及3#防护服的排名第2；而对于3#防护服，其作业能力和维修保障性排名均比5#防护服低，而这2个一级指标的权重比较大，对整体效能排序情况影响较大，从而拉低了排名，这也正是3#防护服和5#防护服在2种评价方法中出现排序“倒转”的另一个重要原因。

通过对一级评估指标集对势的微观分析，可以更好地发现每种防护服的优劣，做到“不仅知其优劣，而知其优劣所在”，从而为装备研制者“博采众家之长”提供改进参考。就我国生产的6#防护服来说，效能排名第3，虽然名次不错但缺乏“亮点”，5个一级指标的效能大都排名居中，体积和质量甚至靠后，说明我国防护服整体效能不错，还有很大的改进余地。