

## 【兵器与装备】

## 基于偏好 DEA 模型的防空导弹阵地选择\*

张要一<sup>1</sup>, 秦建军<sup>1</sup>, 周浩<sup>2</sup>

(1. 94776 部队, 上海 201209; 2. 空军工程大学 导弹学院训练部, 陕西 三原 713800)

**摘要:**运用偏好 DEA 模型对防空导弹阵地进行优选, 建立评估指标体系和 AHP 偏好锥 DEA 模型, 计算横切效率, 以解决多个 DEA 有效备选阵地的排序问题, 用算例验证了模型的合理性。

**关键词:**防空导弹; 阵地选择; 偏好 DEA 模型

**中图分类号:** TP301.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-0707(2008)02-0004-04

防空导弹阵地是防空导弹部队遂行防空作战的依托, 阵地选择的好坏直接影响着兵器战技性能的发挥和人员、兵器车辆的安全。在以往的研究中, 优选阵地的方法有模糊综合评判法<sup>[1]</sup>、多层次灰色评价法<sup>[2]</sup>、层次分析法<sup>[3]</sup>、遗传算法<sup>[4-5]</sup>等。这些评价方法, 比较依赖于人的主观判断, 从而使得可信度不高, 评价的可重复性不好。阵地选择是多目标决策问题, DEA 方法运用数学规划模型评价具有多个输入、多个输出的决策单元间的相对有效性<sup>[6]</sup>, 适用于解决此类问题。本研究建立评选阵地的指标体系, 运用偏好 DEA 模型对备选阵地评估, 并计算了相对效率指标, 使得能对多个 DEA 进行有效地备选阵地排序。

## 1 评估指标体系的建立

一般来说, 待评选的阵地不是一个真正意义上具有经济投入和产出的决策单元, 其投入和产出是不容易区分的。在评价阵地时, 有些指标是越小越好, 如总费用、雷达遮蔽角等, 有些指标则是越大越好, 如到居民点的距离、雷达直视距离等。以往应用 DEA 方法处理这类决策问题时, 通常采用 Schinnar 提出的利用只有投入指标的 DEA 模型<sup>[7]</sup>, 他将所有的指标转变为越小越好的表示方式, 与生产过程中投入的特点一致。

根据 Cooper 研究, 应用 DEA 模型, 决策单元的输入输出指标应符合下列要求<sup>[8]</sup>:

- 1) 决策单元的输入和输出指标的选择应当反映决策者对决策单元的相对有效性评估相关元素的兴趣。
- 2) 对所有的决策单元, 可以得到输入和输出值, 而且这些数值须为正数。
- 3) 从效率比的原则考虑, 输入的数值应越小越好, 而输出的数值应该越大越好。

根据这一要求, 可以建立输入输出指标体系, 以越低越好的指标为输入指标, 以越高越好的指标为输出指标,

从而可用 DEA 模型来处理。

输入指标:

- 1) 投入的总费用, 包括营房基建费用、阵地修建费用、营区附近道路修建费用及其他费用, 总之是使阵地能达到作战使用状态所需的总费用。
- 2) 阵地到保卫目标的距离。
- 3) 阵地的平均遮蔽角。
- 4) 阵地与敌空袭兵器可能来袭航路的距离。

输出指标:

- 1) 阵地到居民点的距离, 考虑作战环境对居民点带来的危险及在作战训练中周围对环境造成的声、光、气和电磁等污染, 原则上距居民点越远越好。
- 2) 与强干扰源的距离, 与电磁、化工等强干扰源、危险源的距离越远越好。
- 3) 阵地与外相连的道路数量, 道路越多, 机动时可选的余地就越大, 有利于提高战时机动的自由度, 提高机动效率。
- 4) 雷达的直视距离, 主要考虑在地形的影响下与巡航导弹可能来袭航路逆向的雷达直视距离。建立的输入、输出指标体系如图 1 所示。

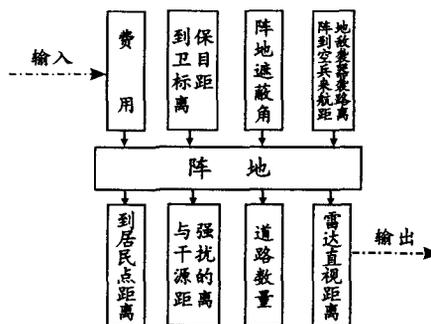


图 1 阵地选择评估指标体系

\* 收稿日期: 2008-01-12

作者简介: 张要一(1979—), 男, 山东临沂人, 博士, 主要从事防空作战指挥运筹分析研究。

## 2 AHP 偏好锥 DEA 模型

经典 DEA 方法是在输入输出的观察数据基础上,采用变化权来对各 DMU 进行评价,在评价 DMU<sub>i</sub>时,就选择最有利于该 DMU<sub>i</sub>的权,这样其评价结果不受任何人为因素的影响,但也不能反映出输入(输出)指标之间确实存在的重要程度不同的问题,某些评价问题必须能反映决策者的偏好.而层次分析法(AHP)是完全根据人的主观判断来构造判断矩阵,体现了人决策思维的基本特征:分析、判断、综合,这种方法充分反映了决策者的偏好.但在某种程度上,AHP 方法又“过于”依赖决策者主观判断<sup>[9]</sup>.

鉴于 DEA 方法和 AHP 方法各自的特点,将这 2 种方法结合起来,即将层次分析方法思想应用到 DEA 相对有效性评价中,来建立 AHP 约束锥的概念,使 DEA 评价的客观分析与 AHP 的主观分析相结合,从而使 DEA 方法更适合实际.

1) AHP 约束锥.为了反映决策者对各指标重要性的偏好,分别对投入指标和产出指标应用 AHP 法,建立 2 个 9 标度判断矩阵:

$$\overline{C}_m = (c_{ij})_{m \times m}, \overline{B}_s = (b_{ij})_{s \times s}$$

其中:  $c_{ij} > 0, c_{ij} = c_{ji}^{-1}, c_{ii} = 1; b_{ij} > 0, b_{ij} = b_{ji}^{-1}, b_{ii} = 1$ .

对其进行一致性检验,一般认为  $C. I. < 0.05$  时,判断矩阵的一致性可以接受.设  $\lambda_c$  和  $\lambda_b$  分别为判断矩阵  $\overline{C}_m$  和  $\overline{B}_s$  的最大特征值,令

$$C = \overline{C}_m - \lambda_c E_m, B = \overline{B}_s - \lambda_b E_s$$

其中:  $E_m$  和  $E_s$  分别为  $m$  阶和  $s$  阶单位矩阵.

由式

$$CV \geq 0, V = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T \geq 0 \quad (1)$$

$$BU \geq 0, U = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)^T \geq 0$$

构成闭凸锥,称为 AHP 约束锥.并且,AHP 约束锥闭包不为空,即  $\text{Int } V_{\text{AHP}} \neq \Phi, \text{Int } U_{\text{AHP}} \neq \Phi$ .

2) AHP 约束锥 DEA 模型.对于决策单元 DMU<sub>j0</sub>,使用 AHP 方法对权重选择加一定的偏好限制,由此构造出 AHP 约束锥 DEA 模型:

$$(JHJ) \begin{cases} \max \frac{U^T Y_0}{V^T X_0} \\ \frac{U^T Y_j}{V^T X_j} \leq 1, j = 1, \dots, n \\ U \in U_{\text{AHP}} = \{U \mid BU \geq 0, U \geq 0\} \\ V \in V_{\text{AHP}} = \{V \mid CV \geq 0, V \geq 0\} \end{cases} \quad (2)$$

由 Charnes-Cooper 变换,分式规划(2)可化为等价的线性规划模型,如式(3).

$$P^j \begin{cases} \max \mu^T Y_0 \\ \omega^T X_j - \mu^T Y_j \geq 0, j = 1, \dots, n \\ \omega^T X_0 = 1 \\ \mu \in U_{\text{AHP}} = \{U \mid BU \geq 0, U \geq 0\} \\ \omega \in V_{\text{AHP}} = \{V \mid CV \geq 0, V \geq 0\} \end{cases} \quad (3)$$

定义 1 如果  $P^j$  存在最优解  $\omega^0, \mu^0$ ,使得  $\mu^{0T} Y_0 = 1$ ,则

称 DMU<sub>j0</sub> 为弱 DEA 有效<sup>[6]</sup>.

定义 2 如果  $P^j$  存在最优解  $\omega^0, \mu^0$ ,使得  $\mu^{0T} Y_0 = 1$ ,且  $\mu^0 \in \text{Int } U_{\text{AHP}}, \omega^0 \in \text{Int } V_{\text{AHP}}$ ,则称 DMU<sub>j0</sub> 为 DEA 有效<sup>[6]</sup>.

研究表明<sup>[10]</sup>,当 AHP 判断矩阵的一致性检验指标控制越小时,则 DMU 的评价结果就越反映决策者的主观偏好;当一致性检验指标控制越大时,则 DMU 的评价结果反映客观实际的特点就越强.

## 3 横切效率计算模型

采取 AHP 偏好锥 DEA 模型能够有效地从所有备选阵地中剔除非有效的阵地,但是无法对多个 DEA 有效的 DMU 排序,因为 DEA 有效阵地的充要条件是总体效率值为 1,且无输入、输出松弛,若从输入、输出着手,无法区别有效阵地孰优孰劣.但从另一个角度出发,不是选择最有利于该阵地备选方案的权重,而是选择最有利于其余备选阵地方案的权重,有效单元的差别性就显现出来了.为此,引入横切效率的概念.在运用式(3)计算被评价决策单元的效率时,同时计算出其余决策单元在此权重下的效率值,列入表 1.

表 1 简单效率与横切效率

DMU	1	2	...	$j$	...	$t$	...	$n$
1	$E_{11}$	$E_{12}$	...	$E_{1j}$	...	$E_{1t}$	...	$E_{1n}$
2	$E_{21}$	$E_{22}$	...	$E_{2j}$	...	$E_{2t}$	...	$E_{2n}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$j$	$E_{j1}$	$E_{j2}$	...	$E_{jj}$	...	$E_{jt}$	...	$E_{jn}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$t$	$E_{t1}$	$E_{t2}$	...	$E_{tj}$	...	$E_{tt}$	...	$E_{tn}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$n$	$E_{n1}$	$E_{n2}$	...	$E_{nj}$	...	$E_{nt}$	...	$E_{nn}$
	$l_1$	$l_2$	...	$l_j$	...	$l_t$	...	$l_n$

在表 1 中,左对角元素称为简单效率(Simple-efficiency),其余称为横切效率(Cross-efficiency).如  $E_{jj}$  为第  $j$  个决策单元在取“最有利于该决策单元”权重下的简单效率; $E_{ij}, i = 1, \dots, n, i \neq j$  是第  $i$  个决策单元权重取“最有利于第  $j$  个决策单元”的条件下的效率值.根据有关文献,定义平均横切效率<sup>[11]</sup>:

$$l_j = \frac{\sum_{i=1}^n E_{ij}}{n-1}, j = 1, \dots, n \quad (4)$$

则  $l_j$  表示第  $j$  个决策单元平均横切效率值,对同为有效的决策单元,  $l_j$  越大,表明无论选取有利于自己还是有利于其他决策单元的权重,效率都更接近 1,这样的决策单元有效性更为稳定,因此,可以根据  $l_j$  的大小对有效单元进行排序.

## 4 算例

建立了包含输入、输出共 8 个指标的评价指标体系,根

据 Charnes 经验公式, 备选的决策单元应该满足  $n \geq 2(m + s)$ , 即备选阵地个数不应小于 16 个. 经过实地的阵地勘察, 选择了 18 处备选阵地, 勘察获得的基础数据如表 2.

首先用 9 标度法对输入、输出指标分别进行判断, 给出判断矩阵.

$$\overline{C}_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 1/2 & 1/7 \\ 4 & 1 & 3 & 1/3 \\ 2 & 1/3 & 1 & 1/5 \\ 7 & 3 & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\overline{B}_4 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 6 \\ 1/2 & 1 & 2 & 4 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 5 \\ 1/6 & 1/4 & 1/5 & 1 \end{pmatrix}$$

$\lambda_c = 4.05$  和  $\lambda_b = 4.12$  分别为判断矩阵  $\overline{C}_m$  和  $\overline{B}_s$  的最大特征值, 计算判断矩阵的一致性, 分别为:

$$C.I. = \frac{\lambda_c - 4}{4 - 1} = 0.02 < 0.05, C.I. = \frac{\lambda_b - 4}{4 - 1} = 0.04 < 0.05$$

符合要求, 因此, 可以认为判断矩阵满意. 令

$$C = \begin{pmatrix} -3.05 & 1/4 & 1/2 & 1/7 \\ 4 & -3.05 & 3 & 1/3 \\ 2 & 1/3 & -3.05 & 1/5 \\ 7 & 3 & 5 & -3.05 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} -3.12 & 2 & 3 & 6 \\ 1/2 & -3.12 & 2 & 4 \\ 1/3 & 1/2 & -3.12 & 5 \\ 1/6 & 1/4 & 1/5 & -3.12 \end{pmatrix}$$

则 AHP 约束锥为:

$$CV \geq 0, V = (v_1, v_2, v_3, v_4)^T \geq 0$$

$$BU \geq 0, U = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4)^T \geq 0$$

由此, 可以建立评估 DMU1 的 AHP 约束锥 DEA 模型:

$$P' \begin{cases} \max \mu^T Y_0 \\ \omega^T \overline{X} - \mu^T \overline{Y} \geq 0 \\ \omega^T X_0 = 1 \\ \mu \in U_{AHP} = \{U \mid BU \geq 0, U \geq 0\} \\ \omega \in V_{AHP} = \{V \mid CV \geq 0, V \geq 0\} \end{cases} \quad (5)$$

同理, 可列出求解其他 17 个 DMU 有效性的线性规划模型. 用软件求解, 得评估结果如表 3 所示.

综合考虑指挥员的对于输入、输出指标的主观判断, 由计算分析可知, 有效决策单元为 DMU3, DMU12, DMU14 和 DMU17. 由于评选结果为 4 个决策单元有效, 即有 4 个备选阵地可供选择, 仍需对其进行排序. 用横切效率对 4 个 DEA 有效的决策单元排序. 计算结果见表 4.

表 2 备选阵地的输入和输出数据

DMU	输入数据				输出数据			
	费用/ 千万	阵地到保 卫目标 距离/km	阵地平 均遮蔽 角/rad	与巡航导弹 可能来航 路距离/km	阵地到居 民点的距 离/km	与强干扰 源距离/ km	道路 数量/ 条	雷达直 视距离/ km
1	12	16	0.12	5	9	8	2	30
2	14	15	0.20	6	8	9	2	30
3	6	10	0.10	3	15	30	3	60
4	14	9	0.20	7	13	16	3	37
5	13	7	0.18	8	8	10	1	33
6	10	13	0.16	9	9	8	2	44
7	16	10	0.20	6	9	8	1	40
8	9	4	0.08	4	14	22	3	42
9	16	11	0.14	8	10	12	1	39
10	10	12	0.16	7	9	10	1	36
11	16	14	0.17	2	10	9	2	30
12	8	5	0.10	3	13	16	4	43
13	15	13	0.13	4	9	11	1	48
14	12	13	0.14	2	8	9	2	50
15	7	13	0.18	9	14	9	2	39
16	17	19	0.20	6	10	11	1	36
17	7	3	0.09	3	23	21	2	40
18	18	16	0.20	9	9	8	1	33

表 3 AHP 约束锥 DEA 模型阵地评估结果

DMU	Score	Weights								Slacks							
		Input				Output				Input				Output			
		$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$	$S_1^-$	$S_2^-$	$S_3^-$	$S_4^-$	$S_1^+$	$S_2^+$	$S_3^+$	$S_4^+$
1	32.67%	0	0	0.06	0.19	0.04	0	0.03	0.02	0	0	0	0	0	6	0	0
2	29.07%	0	0.03	0	0.1	0	0	0.05	0.03	0.03	0	0	0	0.3	4.53	0	0
3	100.00%	0	0	0	0.33	0	0.02	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	40.44%	0.02	0.03	0.02	0.07	0	0	0.04	0.02	0	0	0	0	8.27	4.28	0	0
5	39.72%	0.04	0.07	0	0	0	0	0	0.03	0	0	0.3	0.6	10.98	7.33	0.65	0
6	39.72%	0.03	0.06	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0.26	0.18	16.3	15.1	0.2	0
7	43.75%	0	0.03	0	0.11	0	0	0	0.02	1.13	0	0.01	0	9.12	12.62	1	0
8	82.94%	0.06	0.12	0	0	0	0	0.04	0.02	0	0	0.05	0.04	10.95	0.78	0	0
9	34.96%	0.01	0.03	0.02	0.06	0	0	0	0.03	0	0	0	0	10.6	8.33	0.95	0
10	36.42%	0.02	0.03	0.02	0.07	0	0	0	0.03	0	0	0	0	9.66	8.74	0.8	0
11	83.33%	0	0	0	0.5	0.05	0	0.02	0.02	10.87	3.73	0.06	0	0	0.77	0	0
12	100.00%	0	0.06	0	0.23	0	0	0.03	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
13	60.73%	0	0.04	0.04	0.13	0	0	0	0.02	4.22	0	0	0	3.37	13.03	1.4	0
14	100.00%	0	0.01	0.5	0.4	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
15	38.48%	0.03	0.06	0	0	0	0	0.04	0.02	0	0	0.35	0.41	8.47	11.52	0	0
16	31.15%	0	0.01	0.05	0.15	0.03	0	0	0.02	0.99	0	0	0	0	6.15	0.77	0
17	100.00%	0	0.22	0.2	0.08	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	24.13%	0.01	0.02	0.02	0.05	0	0	0	0.03	0	0	0	0	5.95	9.02	0.65	0

表 4 有效单元的横切效率

DMU	DMU <sub>3</sub>	DMU <sub>12</sub>	DMU <sub>14</sub>	DMU <sub>17</sub>
1	10.91%	31.28%	27.03%	9.13%
2	10.10%	28.95%	22.64%	8.38%
3	100.00%	100.00%	88.89%	24.39%
4	15.15%	38.60%	24.75%	20.16%
5	7.95%	30.53%	19.64%	14.44%
6	6.06%	32.98%	23.10%	9.97%
7	8.59%	41.92%	30.77%	13.24%
8	35.61%	80.17%	50.00%	46.05%
9	9.47%	32.40%	23.08%	12.95%
10	9.09%	32.19%	24.00%	11.14%
11	30.30%	50.77%	58.54%	12.22%
12	36.36%	100.00%	66.15%	38.24%
13	17.42%	58.24%	53.48%	11.23%
14	30.30%	85.48%	100.00%	10.50%
15	6.73%	29.47%	20.42%	15.49%
16	11.62%	29.76%	26.77%	8.51%
17	44.44%	98.85%	62.75%	100.00%
18	5.72%	22.77%	17.10%	8.41%
ACE	15.26%	48.49%	37.59%	16.14%

由计算结果可知,平均横切效率排序为 DMU12 > DMU3 > DMU14 > DMU17. 因此,最有效的备选阵地为 12 号阵地,其余依次为 3,14 和 17 号。

## 5 结束语

本研究中应用了能反映决策者主观偏好的 AHP 偏好锥 DEA 模型,并提出用平均横切效率来解决同为有效单元的排序困境. 在建立评价指标体系的基础上,应用偏好 DEA 模型对防空导弹阵地进行评价选择,算例表明,该模型的方法是有效的.

## 参考文献:

- [1] 韩晓明,杨建军. 地空导弹部队阵地选择方案决策模型研究[J]. 中国管理科学,2001,9(2):43-48.
- [2] 郭张龙,李为民,申卯兴. 地空导弹部队阵地选择方案多层次灰色评价[J]. 系统工程与电子技术,2002,24(11):69-72.
- [3] 卢金涛,杨瑞娟,熊祝平. 雷达阵地选择多目标决策方法[J]. 空军雷达学院学报,2003,17(1):13-15.
- [4] 陈杨,赵兴录. 战役后勤基地(兵站)单位优化配置遗传算法设计[J]. 系统工程与电子技术,2001(3):43-46.
- [5] 郭彤城,慕春棣. 并行遗传算法在无线通讯网络基站选址中的应用[J]. 系统工程理论与实践,2003(2):57-61.
- [6] 魏权龄. 数据包络分析[M]. 北京:科学出版社,2004.

## 4 关键技术处理

实验系统中最主要的是实验模型图生成,传感器和实验装置初始化类的设计,线型 LINE 类的处理,鼠标监听事件的建立等关键技术。

4.1 实验模型图生成. 实验系统中传感器、检测控制部件及实验装置等虚拟部件外形图,可以全部用 Java 编程实现,而且在网上运行快,但编程复杂,难度大. 这里采用 Photoshop8.0 建模生成可供 Java 程序调用处理的 GIF 图片的方法,既不影响网上运行速度,且编程简单.

4.2 传感器和实验装置初始化类的设计. 传感器和实验装置均有接线节点,各元器件在外形、输入和输出接点等方面均有共性,因此传感器和实验装置初始化类的设计采用公共类与继承子类设计方式,既保证程序结构的合理性和可读性,又能提高程序执行效率. 首先建立基础类 IconNode. Java,用于规定传感器和实验装置共有的特征,建立 SytNode. Java 和 DzybcgqNode. Java 子类,子类继承基础类 IconNode. Java 中定义的所有变量、常量等属性和方法,同时分别又加入了各自独特的成员属性使得各个子类之间能够区分开来.

4.3 线型 LINE 类的处理. 线型 LINE 类为连接用导线类,存放导线的起点、中间点、终点和起止连接面板接线柱等各种参数,因此 LINE 类中需定义如下变量参数:

fromNode—导线开始部分所在面板或节点的编号;  
fromButton—导线开始所在的面板的接线柱的编号;  
endNode—导线结束所在的面板或节点的编号;  
endButton—导线结束所在的面板的接线柱的编号;  
Points—导线中间的关键点的编号及坐标值.

此外,还要设计 setFromButton(Point p), getFromButton() 和 beLined() 等方法,实现接线柱的设置、获取及连线等. 如 setFromButton(Point p) 和 getFromButton() 方法具体设置为:

```
public void setFromButton(Point p) {
    this.fromNode = p.x;
    this.fromButton = p.y;
} //设置接线柱节点坐标
public Point getFromButton() {
    Point p = new Point();
    p.x = this.fromNode;
```

```
p.y = this.fromButton;
```

```
return p;
```

```
} //获取接线柱节点坐标
```

4.4 鼠标控制监听事件的建立. 鼠标控制监听事件由 MouseProcess 类函数实现,拖动监听事件由 MouseMotionProcess 类函数实现,在 MouseProcess 类函数中主要定义 mouseClicked(MouseEvent e), mousePressed(MouseEvent e) 和 mouseReleased(MouseEvent e) 3 种方法, mouseClicked(MouseEvent e) 用于传递鼠标在点击规定区域时,引起变化的布尔变量值; mousePressed(MouseEvent e) 用于鼠标按下时,进行的连线操作; mouseReleased(MouseEvent e) 用于鼠标释放操作. 只有将 3 种方法有机结合并合理设置,才能实现鼠标监听的有效控制<sup>[6]</sup>. 在 MouseMotionProcess 类函数中主要定义 mouseMoved(MouseEvent e) 和 mouseDragged(MouseEvent e) 2 种方法, mouseMoved(MouseEvent e) 鼠标捕着需移动砝码对象, mouseDragged(MouseEvent e) 则响应并移动砝码,将 2 种方法有机结合并合理设置,实现砝码的加减载移动.

## 5 结束语

本虚拟实验采用面向对象的 Java 编程技术, Java Applet 网络小程序运行模式,具有界面直观、可操作性强,经济适用、安全好,理论联系实际、开放性等特点. 在校园网上运行,网上传输速度快,运行稳定性好,经学员实验使用,学员对其中实验的重点、难点掌握较好,学习兴趣高,节约了实验费用,实验效果良好.

## 参考文献:

- [1] Bruce Eckel. Java 编程思想[M]. 侯捷,译. 北京:机械工业出版社,2002.
- [2] David M. Geary. Java2 图形设计[M]. 李建森,蒋欣军,龚绕莞,译. 北京:机械工业出版社,2000.
- [3] 杨后川,黄阳,代明,等. 三相异步电动机 Y- $\Delta$ 减压启动控制网络虚拟实验系统研制[J]. 机电产品开发与创新, 2006(3):121-122.
- [4] 杨后川. 三相异步电动机控制网络虚拟实验系统的设计实现[J]. 微计算机信息, 2006(3):125-126.
- [5] 杨后川,等. 电阻应变片传感器网络虚拟实验系统开发[J]. 微计算机信息, 2006(3):127-130.
- [6] 杨后川,等. 电阻应变片传感器网络虚拟实验系统开发[J]. 微计算机信息, 2006(3):131-134.
- [7] Schinnar A P. Measuring productive efficiency of public service provision[C]//University of Pennsylvania. Pennsylvania: School of Public and Urban Policy, 1980:143-157.
- [8] Cooper W W, Seiford L M, Tone K. Data Envelopment Analysis[M]. Boston: Kluwe Academic Publishers, 2000.
- [9] 王莲芬,许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京:中国人民大学出版社,1990.
- [10] Charnes A, Cooper W W, et al. Cone ratio data envelopment analysis and multi-objective programming[J]. International Journal of Systems Science, 1989, 20(7): 1099-1118.
- [11] Doyle J, RGreen. Efficiency and Cross-efficiency in DEA: Derivation, Meanings and Uses[J]. J Opl Res Soc, 1994, 45(5):42-49.

(上接第7页)