



# 基于数据包络分析法的铁路客运站能效评价

马卫武, 孙 政, 雷先鹏, 尹 政, 李立清, 刘小燕

中南大学能源科学与工程学院, 长沙 410083

**摘要** 分析铁路客运站经济效益和旅客舒适度的影响因素, 确定输出指标, 以铁路客运站的各种能耗因素作为输入指标, 用数据包络分析 (DEA) 模型进行线性规划求解, 得出了客运站的总体效率、纯技术效率、规模效率和相对排序, 提出了使非 DEA 有效的客运站达到 DEA 有效的途径。并通过比较各有效客运站能效的横切效率的大小, 得出所有客运站能效利用情况的最终排序。对铁路客运站能效提高提出有针对性的建议, 以期改进和提高铁路运输质量和增强铁路运输的综合竞争力提供参考依据。

**关键词** 舒适度; 数据包络分析; 能效; 客运站

**中图分类号** TK01+.1

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2009)15-0087-05

## Energy Efficiency Evaluation Based on Data Envelope Analysis for a Railway Station

MA Weiwu, SUN Zheng, LEI Xianpeng, YIN Zheng, LI Liqing, LIU Xiaoyan

*School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China*

**Abstract** The objective of this research is to evaluate the energy efficiency for a railway station, based on an energy efficiency analysis. Firstly, the influencing factors of passenger's comfort extent in the waiting environment and the economic benefit of the railway station are analyzed and an output index system is established. Secondly, various energy consumption factors form the input index system. On the basis of DEA model, with linear programming methods, the total efficiency, the pure technology efficiency, the scale efficiency and the relative order are obtained. Methods are proposed to turn a non-DEA efficient railway station into a DEA efficient one. Then the crosscut efficiency between different railway stations are compared. According to the results, the final ordered list of all stations based on energy efficiency and

passengers' comfort extent is obtained, with some important and useful suggestions for improving the railway station energy efficiency. Some proposals are given for improving the transportation quality and comprehensive competitiveness.

**Keywords** comfort; data envelopment analysis; energy efficiency; railway station

建设资源节约型社会, 是基于当前中国国情做出的战略决策, 是为中国今后的社会发展模式提出的科学规划<sup>[1]</sup>。随着经济社会的发展, 人们对生活质量的要求越来越高, 对出行时舒适度的要求也越来越高, 在满足旅客舒适度的条件下节约能源是非常必要的。

本研究采用数据包络分析 (Data Envelopment Analysis, DEA) 方法, 构建铁路客运站能耗评价指标体系, 定量探讨影响铁路客运站能效的主要因素, 客观评价客运站的能耗利用情况和节能对策。对中国 5 个典型客运站的能效进行实证研究, 分析影响客运站生产效率的主要因素, 得出客运站的生产效率值与相对排序。

### 1 铁路客运站能效的 DEA 模型

DEA 模型是由运筹学家 A. Charnes 和 W. W. Cooper 等提出和创建的, 它是对若干同类型的具有多输入、多输出的决策单元 (Decision Making Unit, DMU) 进行相对效率与效益

收稿日期: 2009-04-26

基金项目: 铁道部科技研究开发重点项目 (2007Z011); 国家自然科学基金项目 (20676154)

作者简介: 马卫武, 讲师, 研究方向为建筑节能, 电子信箱: maweiwu@yahoo.com.cn



方面比较的一种有效方法<sup>[2-3]</sup>。DEA 以某一系统中的实际决策单元为基础,建立在决策单元的“Pareto 最优”概念之上,这种方法不需要预先设定边界函数的形式,也不需要通过统计的方法估计函数中的各个参数,只需将观测值以边界方式用包络加以分析,并利用数学规划模型求解这一边界,确定系统的效率前沿面,得到各个决策单元的相对效率以及规模效益等方面的信息,进而分析决策单元是否为 DEA 有效,从而判断各个单元输入、输出的合理性、有效性。其相应的 C<sup>2</sup>R、C<sup>2</sup>GS<sup>2</sup>、C<sup>2</sup>WH、C<sup>2</sup>W 等模型已成为管理科学与系统工程领域里一种重要而有效的分析工具<sup>[4-5]</sup>。

设有  $n$  个铁路客运站  $DMU_j, j=1, 2, \dots, n$ , 各个站有  $m$  项能源输入和  $s$  项效益与舒适度输出,  $(X_j, Y_j)$  为第  $j$  个站所对应的输入和输出指标向量集 ( $j=1, 2, \dots, n$ ), 则输入向量为  $X_j=(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$ , 输出向量为  $Y_j=(y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj})^T$ 。  $x_j, y_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n$ , 即其分量非负, 且至少有一个是正的。

1) 基于输入评价 DMU 总体效率的具有非阿基米德无穷小的 C<sup>2</sup>R 模型为

$$\begin{cases} \min \theta - \varepsilon (\hat{e}^T s^- + e^T s^+) \\ \text{st} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j + s^- = \theta x_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j - s^+ = y_0, \lambda \geq 0, j=1, 2, \dots, n \\ s^+ \geq 0, s^- \geq 0 \\ \hat{e}=(1, 1, \dots, 1)^T \in \mathbf{R}^m, e=(1, 1, \dots, 1)^T \in \mathbf{R}^s \\ \varepsilon \text{ 为非阿基米德无穷小} \end{cases} \quad (1)$$

用该模型可以评价 DMU 的技术和规模的综合效率,称为总体效率。设式(1)的最优解为  $\lambda^*, s^*, s^{*+}, \theta^*$ , 有结论如下:

若  $\theta^*=1$ , 且  $s^{*-}=0, s^{*+}=0$ , 则 DMU 为 DEA 有效, 即在这  $n$  个评价单元中, 在原输入  $X$  的基础上所获得的输出  $Y$  已经达到最优。

若  $\theta^*=1$ , 且  $s^{*-} \neq 0$  或  $s^{*+} \neq 0$  时, 则 DMU 为弱 DEA 有效, 即在这  $n$  个评价单元中, 对于输入  $X$  可以减少  $s^*$  而保持原输出  $Y$  不变, 或在输入  $X$  不变的情况下将输出提高  $s^{*+}$ 。

若  $\theta^* < 1$ , 则 DMU 为 DEA 无效。令  $\hat{x}_0 = \theta^* x_0 - s^{*-}, \hat{y}_0 = y_0 - s^{*+}$ , 则  $(\hat{x}_0, \hat{y}_0)$  为  $(x_0, y_0)$  在有效前沿面上的投影, 相对于原来的  $n$  个 DMU 是有效的。

若存在  $\hat{\lambda}_j (j=1, 2, \dots, m)$ , 使  $\sum_{j=1}^n \lambda_j^n = 1$  成立, 则  $DMU_{j_0}$  为规模效益不变; 若不存在  $\hat{\lambda}_j (j=1, 2, \dots, m)$ , 使  $\sum_{j=1}^n \lambda_j^n = 1$  成立, 则  $\sum_{j=1}^n \lambda_j^n < 1 \Leftrightarrow DMU_{j_0}$  为规模效益递增,  $\sum_{j=1}^n \lambda_j^n > 1 \Leftrightarrow DMU_{j_0}$  规模效益递减。

2) 基于输入评价 DMU 纯技术效率的具有非阿基米德无穷小的 C<sup>2</sup>GS<sup>2</sup> 模型为

$$\begin{cases} \min \theta - \varepsilon (\hat{e}^T s^- + e^T s^+) \\ \text{st} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j + s^- = \sigma x_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j - s^+ = y_0, \lambda \geq 0, j=1, 2, \dots, n \\ s^+ \geq 0, s^- \geq 0 \\ \hat{e}=(1, 1, \dots, 1)^T \in \mathbf{R}^m, e=(1, 1, \dots, 1)^T \in \mathbf{R}^s \\ \varepsilon \text{ 为非阿基米德无穷小} \end{cases} \quad (2)$$

该模型计算出的 DMU 效率是纯技术效率, 反应 DMU 的纯技术效率情况, 称为纯技术效率。设式(2)的最优解为  $\lambda^*, s^{*-}, s^{*+}, \sigma^*$ , 根据文献[4]有如下结论: ① 若  $\sigma^*=1$ , 则  $DMU_{j_0}$  为弱 DEA 有效; ② 若  $\sigma^*=1$ , 且  $s^{*-}=0, s^{*+}=0$ , 则  $DMU_{j_0}$  为 DEA 有效。

3) DMU 纯规模效率的计算公式为

$$s^* = \frac{\theta^*}{\sigma^*} \quad (3)$$

根据 DEA 理论, 总体效率  $\theta^*$ 、纯技术效率  $\sigma^*$ 、纯规模效率  $s^*$  3 个参数之间存在式(3)关系, 因此可由式(3)直接计算 DMU 的纯规模效率。

## 2 评价指标体系

### 2.1 输入指标

输入指标均为能耗指标, 可分为全站总能耗、空调能耗、照明能耗、电梯能耗和其他能耗等 5 项指标。所考查的 5 个客运站中, 能源类型各不相同, 为方便比较能源消耗量, 需要把不同的能源消耗量折算为标准煤的消耗量, 为了更好地与客运站规模联系起来, 把所有能耗按人均计算。

### 2.2 输出指标

评价一个单元效率的高低, 总是要看它的输入、输出的数值。当一个单元的输入值越小, 而输出值越大, 则这个单元是以较小的输入获得了较大的输出, 效率高; 反之则为效率低<sup>[6]</sup>。室内温度、室内 CO<sub>2</sub> 浓度、等待电梯时间和综合照度作为旅客舒适度输出数据的评价指标。其中室内温度、室内 CO<sub>2</sub> 浓度和电梯等待时间这 3 项指标, 当输入的能耗越大时, 它们的数值反而越小, 这与 DEA 算法要求不相符。对于照度值, 包括候车室照度和站台照度, 将二者综合考虑, 定义为综合照度值。因此需要对舒适度输出指标的数值进行处理。

1) 室内温度。适合大部分旅客热舒适度的标准值, 夏季选择 26℃ 为基准值, 冬季选择 20℃ 为基准值, 此时舒适度定为 10 级, 温度每升高或降低 0.5℃, 热舒适度等级下降 1 级。级别越高, 室内热舒适度越好<sup>[7-8]</sup>。

2) 室内 CO<sub>2</sub> 浓度。根据大气环境质量标准 (GB 3095-82) 和一些较发达国家与地区所建议的室内空气标准, 对室内 CO<sub>2</sub> 浓度进行分级, 以 700 mL/m<sup>3</sup> (洁净程度为良) 为基准值, 此时的舒适度为 13 级。CO<sub>2</sub> 浓度每上升 100 mL/m<sup>3</sup>, 舒适度等级下降 1 级。2 000 mL/m<sup>3</sup> 及以上为 1 级。级别越高, 室内 CO<sub>2</sub>



表 3 中,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, v_1, v_2, v_3, v_4$  分别为各输入、输出的权值向量(影子价格), 由  $C^2R$  模型求得  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$  分别为输入数据的约束条件中各松弛变量值,  $s_6, s_7, s_8, s_9$  分别为输出数据的约束条件中各松弛变量值。  $\sum_i \lambda_i$  为  $C^2R$  模型变量  $\lambda_j$  ( $j=1, 2, \dots, 5$ )之和, 根据其值可以判断 DMU 的规模效益状况,  $\sigma$  根据  $C^2GS^2$  模型求得。  $s^*$  值由  $s^* = \theta^* / \sigma^*$  求得。

### 3.3 效率分析

客运站效率的高低采用总体效率、纯技术效率和规模效率 3 种效率值判断。一般而言, 总体效率为 1 表示最有效率的单位, 即其整体运作处于最佳状态; 从技术效率可以看出, 各部门对于投入要素是否有效的运用, 以达到产出最大化, 其值越高表示其投入资源使用情形越有效率; 规模效率可用

$\sum_i \lambda_i$  为 1 作为分界线, 分为规模效益不变 ( $\sum_i \lambda_i = 1$ )、递增 ( $\sum_i \lambda_i < 1$ )、递减 ( $\sum_i \lambda_i > 1$ ) 3 种情形<sup>[6]</sup>。由表 3 可以看出, 5 个站的总体效率  $\theta$  分别为 1, 0.497 623 6, 0.920 398, 1, 1; 纯技术效率  $\sigma$  分别为 1, 0.590 351 9, 1, 1, 1; 规模效益  $s$  分别为 1, 0.842 927, 0.920 398 0, 1, 1。5 个站的初排序为:  $A=D=E>C>B$ 。

### 3.4 DMU 在生产前沿面上的投影和影子价格分析

根据 DEA 理论, 非 DEA 有效的 DMU 在生产前沿面上的投影是 DEA 有效的, 即通过适当调整非 DEA 有效的 DMU 输入、输出数值可以使其达到 DEA 有效。

下面以 C 站为例进行分析。要使其达到 DEA 有效, 需要对其输入和输出数据进行调整。要达到 DEA 有效, 也即要使 C 站的效率达到 1, 需要把各项输入的数据调整为: 全站人均总耗能  $X_1=2.76$ 、人均空调耗能  $X_2=2.13$ 、人均照明耗能  $X_3=0.42$ 、人均电梯耗能  $X_4=0.24$ 、人均其他耗能  $X_5=0.14$ 。输出数据调整为: 站台综合照度等级  $Y_1=10$ 、电梯等待时间等级  $Y_2=7$ 、室内  $CO_2$  浓度等级  $Y_3=13$ 、室内温度等级  $Y_4=10$ 。这样, 数据达到最优值, DEA 为有效, 总体效率为 1。

C 站各输入、输出的影子价格分别为:  $\omega_1=0, \omega_2=0.248756, \omega_3=0, \omega_4=0, \omega_5=0.238806, v_1=0, v_2=0, v_3=0, v_4=0.09204$ 。由此可知, 全站人均总耗能、人均照明能耗、人均电梯能耗 3 项输入指标和站台综合照度等级、电梯等待时间等级、室内  $CO_2$  浓度等级 3 项输出指标的影子价格均为 0, 表明单独降低这 3 项输入中的任一项或增加这 3 项输出中的任一项均不影响其 DEA 效率。空调能耗的影子价格  $\omega_2=0.248756$ , 在 C 站所有能源消耗中影子价格(权值)最大, 可见空调能耗对 C 站的整体能源消耗影响最大; 其他能耗的影子价格  $\omega_5=0.238806$ , 其影响次之。在输出中, 室内温度等级的影子价格  $v_4=0.09204$ , 对其总体效率影响最大。

同时, 从计算结果可以看出,  $\sum_i \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 = 1.21 > 1$ , 说明 C 站处于规模效益递减的阶段。

### 3.5 能源效率的最终排序

对于 A、D、E 站, 由于均为有效单元, 其排序采用计算平均横切效率  $\alpha$  进行<sup>[14]</sup>。

E 站相对于 D 站的横切效率为

$$\alpha_1 = v_D^T Y_E = (0, 0, 0, 0.166667)^T (9, 9, 13, 7) = 1.17$$

E 站相对于 A 站的横切效率为

$$\alpha_2 = v_A^T Y_E = (0, 0, 0.017819, 0.091312)^T (9, 9, 13, 7) = 0.87$$

E 站的平均横切效率为

$$\bar{\alpha}_E = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = 1.02$$

同理, 可以求出 A 和 D 站的平均横切效率为

$$\bar{\alpha}_A = 0.57 \quad \bar{\alpha}_D = 0.61$$

由此可以得出:  $\bar{\alpha}_E > \bar{\alpha}_D > \bar{\alpha}_A$ 。所以, 在总体效率均为 1 的 A 站、D 站和 E 站中, 通过比较它们的平均横切效率, 可以进一步对它们的能源利用效率进行区分, 结果为 E 站最优, D 站次之, A 站最差。

综上所述, 5 个客运站的最佳排序为:  $E > D > A > B > C$ 。

### 3.6 综合分析

1) E 站的总体效率最高, 且各项舒适度等级和经济效益指标均处于较高的水平。E 站的照明能耗只占总能耗量的 6%, 为 5 个站最低。因为 E 站为新建站, 其建筑顶端采用透光好的玻璃材料, 白天靠自然光照明, 既提高了照度等级, 又节省了能源。但同时, 由于玻璃围护结构的热传导系数大, 太阳光射进候车大厅内提高了室内温度, 从而造成空调能耗的增加, 该站中央空调的能耗占到了总能耗的 81%。

2) D 站的综合能效排名第 2 位。该站属于老式车站, 候车室面积小, 中央空调的能耗相对较小。由于是老式车站, 各项设施老化不完善, 造成旅客的舒适度等级为 5 个站最低。

3) A 站照明能耗约占总能耗的 10%, 在 5 个站中处于较低水平。因为 A 站采用新型节能灯代替传统的白炽灯, “照明智能控制系统”得到推广, “绿色光源”应用范围进一步扩大, 并且联合生产厂家开发了基于 PROFIBUS 现场总线技术的新一代智能控制系统, 该系统根据列车实时告示系统, 实现了控制灯具盏数最少化、灯具开关时间合理化、操作控制人性化, 彻底解决了以往因人工关闭不及时而造成的长明灯现象, 所以节电效果明显。

4) B 站的总体效率小于 1, 说明存在着能源的浪费, 旅客的舒适度也没有得到相应的提高。B 站中央空调为老式 LiBr 燃油空调, 效率低, 能耗大。B 站的一部分候车大厅在一楼, 分流了部分需要乘坐电梯的旅客, 使得该站电梯能耗较低。

5) C 站的总体效率最低, 一方面是因为存在部分能源浪费, 而主要原因在于 C 站位于首都, 代表国家形象, 因此对旅客各方面的舒适度等级要求高, 而造成能耗量很大。例如 C 站没有楼梯, 全部为自动扶梯, 所以 C 站的电梯能耗量为 1 024.7 t 标准煤, 远高于其他客运站。



#### 4 结论

将铁路客运站的能耗作为输入指标,经济效益和旅客的舒适度作为输出指标,使得能源管理者不仅能够通过权重、松弛变量等找出铁路客运站能效不佳的原因及进一步提高能效的方法和方向,而且能够在评价过程中获得更多的能源管理信息,这对 DEA 方法的应用是有益的补充。DEA 模型是一个优秀、强大的决策管理工具,为充分利用其优点,要因地制宜,结合被评价对象的特点选择合适的数据模型;通过构建合理的概念模型来挖掘更多的管理信息。

应用  $C^2R$  和  $C^2GS^2$  能效模型对中国 5 个典型客运站进行了实证分析,发现铁路客运站能源效率体现在旅客舒适度与经济效益两个方面,因此,必须在满足旅客舒适度的基础上提高能源的效率。首先,对于老式铁路客运站,要完善满足旅客舒适度的候车设施,提高舒适度等级;其次,因为空调设备能耗所占比例最大,老式低效的空调设备制约了客运站能效的提高;第三,运用“智能控制系统”所取得节电效果明显,可以在铁路客运站推广;第四,能源浪费是造成能效低的重要原因。

#### 参考文献 (References)

- [1] 江亿. 中国建筑节能年度发展研究报告 2007[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.  
Jiang Yi. China building energy conservation annual report of the development research in 2007 [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007.
- [2] Cooper W W, Seiford L M, Zhu J. Handbook on data envelopment analysis[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [3] Cooper W W, Seiford L M, Tone K. Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [4] 魏权龄. 评价相对有效性的 DEA 方法 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1987.  
Wei Quanling. The DEA method of the review on relative effectiveness

- [M]. Beijing: Chinese Renmin University Press, 1987.
- [5] 魏权龄. 数据包络分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
Wei Quanling. An introduction to efficiency and productivity analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [6] Seiford L M. Data envelopment analysis: The evolution of state of the art (1978-1995)[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 1996, 7(2): 99-137.
- [7] GB 50019-2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.  
GB 50019-2003 Code for design of heating ventilation and air conditioning[S]. Beijing: China Planning Press, 2004.
- [8] GB 50226-2007 铁路旅客车站建筑设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.  
GB 50226-2007 Code for design of railway passenger station buildings [S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [9] 马卫武. 室内新风量对室内空气品质影响的不确定性方法分析研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2003.  
Ma Weiwu. Research on the nondeterminacy method of indoor fresh air volume effectiveness on indoor air quality[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2003.
- [10] 李立清, 马卫武. 铁路客运站能耗因素分析和节能研究项目中期报告[R]. 长沙: 中南大学, 2008.  
Li Liqing, Ma Weiwu. Metaphase report on the energy element analysis and energy saving research at the railway station[R]. Changsha: Central South University, 2008.
- [11] 高雷阜. 最优化理论与方法[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2005.  
Gao Leifu. Optimization theory and methods[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2005.
- [12] 卢开澄. 单目标、多目标和整数规划 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.  
Lu Kaicheng. Simple target, multi-target and integer optimization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.
- [13] 王三喜, 屈洋, 黄建明. 基于 DEA 模型的部队编制方案评价[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 21(4): 21-26.  
Wang Sanxi, Qu Yang, Huang Jianming. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2006, 21(4): 21-26.

(责任编辑 赵佳)

#### ·学术动态·



### “2010 年全国冶金物理化学学术会议”征文

由国家自然科学基金委员会工程与材料学部、中国金属学会、中国有色金属学会和中国稀土学会联合主办,安徽工业大学承办的“2010 年全国冶金物理化学学术会议”定于 2010 年 4 月在安徽省马鞍山市召开。

会议论文集由《中国稀土学报》出版。征文内容包括:冶金热力学,冶金动力学与反应工程学,冶金与固体电化学,冶金新工艺、新技术、新方法绿色化学,材料物理化学,计算冶金物理化学,稀土化学及稀土元素在冶金与新材料中的应用,冶金物理化学与资源综合利用,冶金物理化学与环境和工业生态,以及与冶金和材料物理化学相关的科学问题和研究方法等。征文截稿日期为 2009 年 9 月 30 日。

联系方式:安徽省马鞍山市安徽工业大学省冶金重点实验室(243002) 周芸;电话:0555-2311879,13955585501,13500535643;电子信箱:ywh2010@ahut.edu.cn。