

文章编号:1671-8879(2017)03-0106-07

# 基于数据包络分析方法的地下道路 交通工程设计方案评价

刘丽芬<sup>1,2</sup>, 赵伟忠<sup>1,2</sup>, 刘星星<sup>1</sup>, 邵海鹏<sup>1</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

**摘要:**为了评价地下道路交通工程设计方案的优劣性,建立了以安全、技术、经济、运行效率和环境为导向的地下道路交通工程设计方案评价体系;引入数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法,分析其对地下道路交通工程设计评价的适应性;根据 DEA 方法对输入输出指标同向性的要求,选取地下道路的冲突点个数、建设投资费用、交通延误作为评价的输入指标,将设计通行能力和照度作为评价的输出指标,并充分考虑指标与评价对象的关联性和易量化性;最后以西安市创业新大陆地下隧道项目为例,用选取的指标对 DEA 方法进行验证。利用 DEA 方法模型中的规模收益可变的 BCC 模型(由 Banker、Charnes 和 Cooper 提出),得到 10 个地下道路交通工程设计方案的综合效率评价值,进而对这 10 个设计方案的技术效率和规模效率进行分析,指出各设计方案 DEA 无效的原因,并给出部分方案的改进方向和建议。研究表明:相较于规模收益不变的 CCR 模型(由 Charnes、Cooper 和 Rhodes 提出),规模收益可变的 BCC 模型更适合评价地下道路交通工程设计方案,得到地下道路不同工程设计方案的综合效率评价值;当有多个设计方案的综合效率值为 1 时,能给出这些方案的优劣排序,还可计算出各 DEA 无效方案的输入冗余率和输出亏空率,指出各设计方案的改进方向和步长,避免投入产出要素的过剩或不足。

**关键词:**交通工程;综合效率;数据包络分析;地下道路;评价

中图分类号:U491 文献标志码:A

## Evaluation on underground road transportation engineering design project based on data envelopment analysis

LIU Li-fen<sup>1,2</sup>, ZHAO Wei-zhong<sup>1,2</sup>, LIU Xing-xing<sup>1</sup>, SHAO Hai-peng<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Xi'an Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710068, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to evaluate the performance of underground road transportation engineering design projects, an evaluation hierarchy of underground road transportation engineering design project was established based on oriented security, technology, economy, efficiency of operation and environment. Data envelopment analysis (DEA) method was introduced to analyze the adaptation of underground road transportation engineering design evaluation. According to

收稿日期:2016-12-19

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAG05B04)

作者简介:刘丽芬(1963-),女,河南禹州人,西安市政设计研究院有限公司教授级高工,长安大学工学博士研究生,

E-mail:liulifan119@163.com.

homonymous provision of DEA to input and output indexes, number of conflict point, construction costs and traffic delay were chosen as input indexes, and design traffic capacity and illuminance were chosen as output indexes, which took full account of the relevance between indexes and evaluation objects, and easy to be quantified. Finally, by taking the New World Underground Tunnel Project in Xi'an as an example, the DEA method was verified by the selected indexes, using BCC (proposed by Banker, Charnes and Cooper) model, a special DEA method with variable returns to scale, was used to get the overall efficiency of the 10 underground road transportation engineering design projects, and then the technical efficiency and scale efficiency of those 10 design projects were analyzed and the cause of DEA invalid in each project was also revealed, so that the improvement direction and advice of some projects could be pointed out. The results show that compared with CCR (proposed by Charnes, Cooper and Rhodes) model whose returns to scale is constant, BCC model has a stronger adaptation to evaluate underground road transportation engineering design projects, and get the overall efficiency of different underground road transportation engineering design projects. When the overall efficiency of multiple design projects is 1, the method can not only obtain the relative merits of those projects, but also calculate input redundancy rate and output deficiency rate of each DEA invalid project to point out the improvement direction and step size, avoiding deficiency or surplus of input and output factors as well as wasting of resources. 3 tabs, 2 figs, 16 refs.

**Key words:** traffic engineering; overall efficiency; DEA; underground road; evaluation

## 0 引言

随着人口和车辆的快速增长,大城市地上空间已不能满足日益增长的交通需求,开发利用地下空间成为当前大城市建设的一种趋势。地下空间开发利用的规模不断扩大,引发了地下空间交通工程设计及其运行效率问题。如何科学合理规划城市地下空间开发利用的功能和规模,使其发挥最大效率,已成为当前亟待解决的问题。中国对地下空间开发利用起步较晚,早期的研究对于地下空间的功能、交通规划尚缺乏整体认识。随着近几十年的城市快速发展,地下空间的开发利用已逐步规范化,实现了分层次、分区域的开发格局,比如北京、上海等特大型城市,随着城市地下空间开发规模越来越大,地下空间的交通组织问题尤为重要,需要有与之配套的交通工程设施设计。交通工程设施设计的合理性是当前亟待解决的一个问题。

长期以来,对城市地下道路空间的评价主要集中在地下空间安全性、资源整合性、经济效益、可持续发展等方面,评价方法也主要以层次分析(AHP)法或主成分分析(PCA)法为代表的综合评价法为主。张生瑞等应用模糊识别原理,结合 AHP 权重确定方法,提出公路交通可持续发展的多级模糊识别综合评价模型,并建立了高速公路隧道交通环境评价指标体系,

其模型的建立反映了公路交通可持续发展的内涵,对区域公路交通可持续发展评价有借鉴作用<sup>[1-2]</sup>;陈红等应用德菲尔法,从隧道环境、交通运行环境、交通工程设施环境和气候环境 4 个方面建立评价体系,并对评价指标进行敏感性分析,构建了公路隧道运行环境安全评价指标体系<sup>[3-4]</sup>;尹政等以地下空间设计综合效益为目标,从经济、社会、环境等方面建立了综合评价指标体系,并采用改进的层次分析法区分不同指标的权重差异<sup>[5]</sup>;余豫新等将数据包络分析(DEA)方法运用到智能交通系统评价中,提出了重构的 DEA 模型,对有效决策单元进行再评价,实现了被评价单元的完全排序<sup>[6]</sup>;孔令曦等以生态城市建设和可持续发展为目标,从生存、发展、环境等方面,建立了城市地下空间开发规划的评价指标体系及其模糊综合评价模型<sup>[7]</sup>;王曦等基于组合评价方法,从地下空间的功能类型、开发规模、空间布局以及相互联系 4 个方面建立了 3 层次 11 项底层指标的规划方案评价体系<sup>[8]</sup>;党晓旭等利用复相关分析建立了区域道路交通安全评价指标体系,基于 DEA 原理,在 BCC(由 Banker、Charnes 和 Cooper 提出)模型的基础上,引入偏好信息,建立了面向面板数据、只有非期望输出、权重受限的道路交通安全广义 DEA 评价模型,并对中国等 9 个国家 2000~2012 年的道路交通安全水平进行了评价<sup>[9]</sup>。以上研究主要存在以下几点问题:①对

于地下空间的评价切入的视角太大,这样有可能选取的评价指标与评价对象本身的关联性不紧密;②指标的选取太繁杂,定性指标太多,虽能全面反映评价对象本身的属性,但是在指标权重确定时容易陷入主观判断,易导致指标权重与客观数据之间缺乏联系;③部分指标的具体数值采用专家调查法取得,说明这些指标在数据获取方面存在困难,这也使得最后的评价结果缺少客观性和说服力。

基于此,本文针对城市高强度开发区地下道路交通工程设计方案,引入 DEA 方法,构建了简洁且与地下道路设计联系紧密的评价指标体系。以设计方案的综合效率为评价目标,利用 DEA 方法中的 BCC 模型进行建模评价,用 MaxDEA5.0 软件进行模型求解,最后得到不同的地下交通工程设计方案综合效率评价结果,结合计算结果的冗余变量和松弛变量分析各设计方案 DEA 无效的原因,并对这些方案进行相应的改善。

## 1 地下道路交通工程设计方案评价的内容

一般来讲,城市地下空间交通服务的优劣体现为使用者对其的认可,包括服务设施、服务环境,也包括使用过程中的舒适度;从地下空间的功能上来考虑,即要提供完善的交通系统,提高其交通运行的性能;从开发建设者及运营的角度来看,降低系统费用,提高系统效益也是一个方面;从交通管理者角度来看,如何方便地管理,用最有限的措施达到最大的满意度也是管理的目标,其目的是提供一个完善的环境,并最大限度地减少系统的事故发生率和伤亡人数。考虑到地下道路交通工程设计方案评价的复杂性,本文结合 DEA 方法的特点来建立评价模型。

## 2 DEA 方法评价模型构建

### 2.1 DEA 方法的特点及其适用性分析

DEA 方法最初是由经济学家 Farell 用于私人企业中多部门或单元(称为决策单元,简称 DMU)间工作效率评价,其特点为<sup>[10]</sup>:①不仅可以对同类型决策单元的相对有效性做出评价和排序,而且还可以进一步分析各决策单元非 DEA 有效的原因及改进方向;②DEA 方法不需要确定各指标的权重,客观性较强;③DEA 方法通过对决策单元的原始数据进行计算评价,不必进行量纲一化处理,排除了人为因素。

DEA 方法融合了线性规划、多目标规划等,可以直接利用输入输出模型进行综合分析,符合交通工程设计中投入产出要素的多样性特点,对于地下交通工程设计方案效率评价具有很强的适用性,主要体现在以下几方面:①DEA 方法具有对多输入多输出结构复杂系统的适应性,而城市地下道路交通系统正是一个多目标复杂系统;②地下道路交通设计效率评价中,一个输入与一个输出之间可能存在某种非线性关系,这种关系一般很难定量表达,而 DEA 方法无需确定这种关系的显式表达,对于问题的解决有很大帮助;③地下空间交通设计效率的评价需建立多个评价指标来描述,这些指标难免出现量纲不一致的情况,而 DEA 方法并不直接对指标数据进行综合,在求解模型时无需对数据进行量纲一化处理。以上这些优点决定了 DEA 方法在进行地下道路交通工程设计方案优劣性比较时,具有很强的优越性。

### 2.2 指标体系的建立

方案评价采用 DEA 方法时需选取合适的输入输出指标,指标的选取有 3 个重要原则<sup>[11]</sup>:①指标必须直观且容易量化;②各指标的相关性不能太强;③指标个数和决策单元之间的数量关系宜满足

$$k_{DMU} \geq 2x \quad (1)$$

式中: $k_{DMU}$  为所有决策单元的个数; $x$  为所有输入输出指标的个数。

根据评价要素的不同,从安全评价、技术评价、经济评价、运行效率评价和环境评价 5 个方面来考虑,在此基础上系统地确定评价指标,以系统目标层为导向,确定了以评价内容、系统目标、评价指标为一体的层次化综合评价指标体系,如表 1 所示。

表 1 地下道路交通系统评价指标

Tab. 1 Evaluation indices of underground road transportation system

评价项目	评价指标	系统目标
安全评价	交通冲突点个数	交通管理者要求:最大限度地减少系统的事故发生率和伤亡人数
技术评价	设计通行能力	完善的交通系统性能,提高交通运行性能
经济评价	建设费用	开发建设者要求:降低系统费用,提高系统效益
运行效率评价	交通运行延误	道路使用者要求:减少系统排队、延误,提高系统的顺畅、通达性
环境评价	照度	道路使用者要求:具有最舒适的地下道路环境

### 2.3 评价指标的量化

(1) 交通冲突点个数  $N_f$

地下道路中交叉口和出入口的存在决定了冲突点的存在,其数值根据平交路口冲突点计算公式来确定,即

$$N_f = \frac{a^2(a-1)(a-2)}{6} \quad (2)$$

式中: $a$  为相交道路的条数。

(2) 工程建设费用

地下道路的建设费用一般涉及施工费、管迁费、路改费等,地下道路的选址、埋深、施工方法决定了各设计方案的费用差异。评价中,选取项目总投资为建设费用  $M$

$$M = \sum_I z_I c_I \quad (3)$$

式中: $z_I$  为工程量; $c_I$  为单位造价; $I$  为每个工程方案的建设项目。

(3) 交通延误  $D$

地下道路一般只允许小汽车通行,禁止行人和大货车通行,交通状况较地面道路简单,故交通延误比地面道路小。设计方案的延误数据一般不能直接获得,须借助交通仿真软件进行模拟,本文选用单辆小汽车的平均延误时间作为计算值。

(4) 设计通行能力  $C_D$

设计通行能力一般由设计方案决定。

(5) 照度  $L_a$

与地面道路相比,地下道路的设计要考虑到照明因素,照度的大小既要满足安全性的要求,又要考虑电力供应的经济性,一般由设计方案决定。

## 3 模型构建

### 3.1 模型选择

DEA 方法使用数学规划模型评价具有多输入多输出的部门或单位间的相对有效性(称为 DEA 有效)。设有  $n$  个决策单元  $DMU_j (j=1, 2, \dots, n)$ , 即本文中的待评价方案,每个决策单元有  $m$  个输入指标和  $s$  个输出指标。其中  $X_j, Y_j$  分别为第  $j$  个决策单元的输入指标值和输出指标值; $X_0, Y_0$  分别为该决策单元该项评价指标的输入、输出指标值; $\lambda_j$  为第  $j$  个评价单元的一组线性规划解;传统 DEA 模型(也称为 CCR 模型(由 Charnes, Cooper 和 Rhodes 提出))为<sup>[12-16]</sup>

$$\begin{aligned} \min & [\theta - \epsilon(e_m^T S^- + e_s^T S^+)] = V_{De1} \\ \text{s. t.} & \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j + S^- = \theta X_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j - S^+ \geq Y_0 \\ \lambda_j \geq 0, S^- \geq 0, S^+ \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $S^-, S^+$  分别为松弛变量和剩余变量; $\epsilon$  为非阿基米德无穷小量(大于 0 而小于任何正数的数); $V_{De1}$  为带有非阿基米德无穷小量的线性规划最优值; $e_m = [1, 1, \dots, 1]^T \in R^m$  和  $e_s = [1, 1, \dots, 1]^T \in R^s$  分别为  $m, s$  维单位向量, $R^m, R^s$  分别为  $m, s$  维向量空间; $\theta$  为综合效率。

根据上述模型给出被评价决策单元  $DMU_j (j=1, 2, \dots, k, \dots, n)$  有效性的定义:

定义 1. 若式(4)的最优解满足  $\theta = 1$ , 则称  $DMU_k$  为弱 DEA 有效(即 DEA 无效)。

定义 2. 若式(4)的最优解满足  $\theta = 1$ , 且有  $S^- = 0, S^+ = 0$  成立, 则称  $DMU_k$  为 DEA 有效。

定义 3. 若式(4)的最优解满足  $\theta < 1$ , 则称  $DMU_k$  为非 DEA 有效。

对于非 DEA 有效的决策单元,有 3 种方式可以将其改进为有效决策单元:保持产出不变,减少投入;保持投入不变,增大产出;减小投入的同时也增大产出。

假设现有 7 个被评价的决策单元,投入、产出项各有 1 项,投入项为  $X$ , 产出项为  $Y$ , 此时 7 个决策单元  $A \sim G$  的相对位置如图 1 所示。在 CCR 模型中,连接原点  $O$  与点  $B$  的射线构成前沿面,其余的点均位于该前沿面的下方。

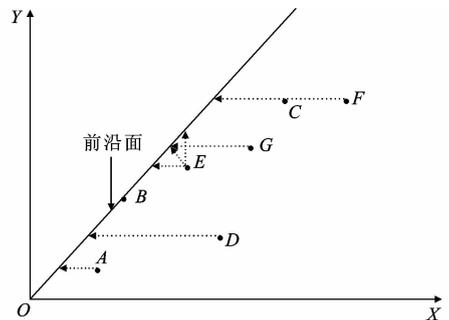


图 1 决策单元的分布及其在生产前沿面上的投影  
Fig. 1 Distribution of DMUs and their projections on production frontier

从图 1 可以看出,只有决策单元  $B$  位于生产前沿面上,而其他所有决策单元均位于该生产前沿面的下方,即决策单元  $A, C, D, E, F, G$  均为非 DEA 有效。为了使非 DEA 有效变为 DEA 有效,可依图 1 中箭头所示方向将非 DEA 有效的决策单元往前

沿面上投影。A、C、D、F、G均为减小投入而保持产出不变;而E给出了3种投影方式(减小投入,产出不变;保持投入不变,增大产出;或者同时减小投入和增大产出)。

CCR模型假设生产过程属于固定规模收益,即当输入指标以等比例增加时,输出指标也应以等比例增加。然而对于地下道路交通系统而言,输入指标的增加和输出指标的增加不是同步的(即投入比例的增加和产出比例的增加并非呈正比关系),故引入分析规模收益可变的BCC模型。BCC模型在

CCR模型的基础上,增加了限定条件 $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ ,使模型正好能适用于地下道路设计投入和产出不平衡这一现象的评价,使得评价结果能够反映各输入输出指标配置是否平衡,并指导开发设计人员增加或减少投入要素,以期在道路交通方案设计时获得最大效用。

### 3.2 输入输出的选择

DEA方法在进行评价时对输入和输出指标要求具有同向性,即一个系统的输入应越小越好,而输出则越大越好。对于地下空间交通系统而言,人们总是希望它的冲突点个数、建设投资费用、交通延误越小越好,而设计通行能力、照度越大越好。所以,本文将冲突点个数、建设投资费用、交通延误作为评价的输入指标,而将设计通行能力和照度作为评价的输出指标。

## 4 实例分析

### 4.1 实例介绍

西安市高新区的创业新大陆地下隧道工程主要连接创业新大陆商圈10个地块的地下空间及停车场库,隧道总长控制在3 000~4 000 m之间,投资额控制在2亿元左右。前期准备了10个待选方案,从道路布局形态上分为目字形、日字形、田字形、环形和方格网形,根据主线隧道高程不同又可分为深埋和浅埋2种,交叉组合共10种方案。其中目字形和日字形道路布局形态如图2所示,各方案的经济技术指标如表2所示。

### 4.2 模型计算和结果分析

基于DEA方法的BCC模型利用软件Max-DEA5.0进行计算,首先导入数据,模型选择“包络模型”,在基础模型下,距离函数选择“径向”,导向类型选择“产出导向”,规模收益选择“可变”,评价结果

如下页表3所示。

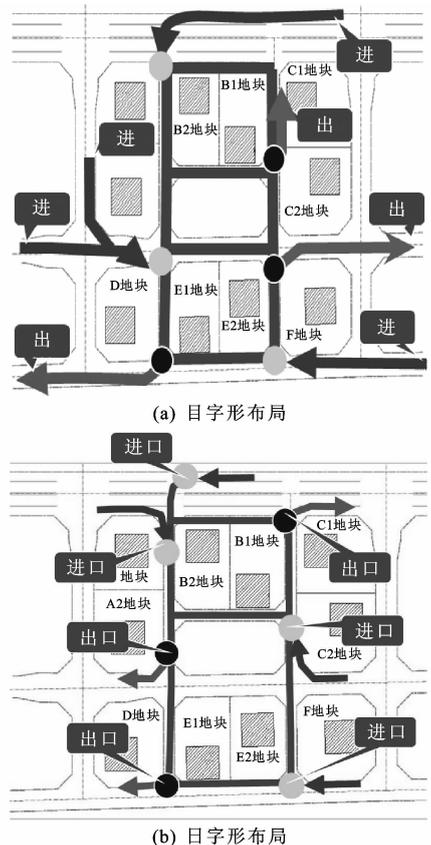


图2 不同道路布局形态

Fig. 2 Different road layout patterns

表2 创业新大陆地下隧道交通设计方案评价指标

Tab. 2 Transportation design scheme evaluation indices of Business in the New World Underground Tunnel

序号	方案类型	输入指标			输出指标	
		冲突点 个数	建设成本/ 万元	延误/ s	设计通行能力/ (pcu · h <sup>-1</sup> )	照度/ lx
方案一	深埋目字形	27	20 450	25.1	1 600	300
方案二	浅埋目字形	27	20 770	26.0	1 600	250
方案三	深埋日字形	21	20 290	23.7	1 400	300
方案四	浅埋日字形	21	20 665	23.9	1 400	250
方案五	深埋方格网形	77	21 590	34.3	1 800	300
方案六	浅埋方格网形	77	22 300	36.2	1 800	250
方案七	深埋田字形	96	20 535	32.0	2 000	300
方案八	浅埋田字形	96	20 600	32.5	2 000	250
方案九	深埋环形	16	19 020	20.0	1 200	300
方案十	浅埋环形	16	18 500	20.6	1 200	250

注:深埋为主线隧道在地面以下埋深11.6 m,浅埋为主线隧道在地面以下埋深10.1 m;数据来源西安市政设计研究院有限公司《创业新大陆可行性研究报告》。

根据表3计算结果可进行如下分析。

(1)DEA有效性。由评价结果可知,方案一的综合效率值为1,松弛变量和剩余变量均为0,为

表 3 创业新大陆地下隧道交通设计方案评价结果

Tab.3 Evaluation result of transportation design scheme of Business in the New World Underground Tunnel

序号	方案类型	$\theta$	$S_1^-$	$S_2^-$	$S_3^-$	$S_1^+$	$S_2^+$
方案一	深埋目字形	1.000 0	0	0	0	0	0
方案二	浅埋目字形	0.912 8	0	320	0.9	0	50
方案三	深埋日字形	0.783 2	6	0	0	200	0
方案四	浅埋日字形	0.789 3	6	215	0	200	50
方案五	深埋方格网形	0.632 8	50	1 140	9.2	0	0
方案六	浅埋方格网形	0.376 9	50	2 850	11.1	0	50
方案七	深埋田字形	0.968 3	79	85	6.9	0	0
方案八	浅埋田字形	0.943 7	79	150	7.4	0	50
方案九	深埋环形	0.671 3	0	0	0	400	0
方案十	浅埋环形	0.662 5	0	0	0	400	50

注: $S_1^-$ ,  $S_2^-$ ,  $S_3^-$  分别为冲突点个数、建设成本(万元)和延误的输入冗余量(s);  $S_1^+$ ,  $S_2^+$  分别为设计通行能力(pcu/h)和照度的输出亏空量(lx)。

DEA 有效;其余设计方案综合效率值均小于 1,为 DEA 无效,特别是浅埋方格网形(方案六)的综合效率值较低,只有 0.376 9。

相比较而言,虽然方案一从 5 个投入产出要素方面看,并不是每个要素均最优,但是把它的资源整合起来,无论在技术上还是规模上都达到了最优,而且在投入资源配置、利用和规模上都实现了 DEA 有效,因此是最优方案。方案七综合效率值达到了 0.968 3,可以考虑作为次优方案。

(2)输入冗余率及输出亏空率。输入冗余率和输出亏空率为各设计方案的改善提供了改进方向。浅埋目字形方案的  $\theta$  为 0.912 8,说明其布局合理,能有效减少车辆在地下通道的绕行距离,增加通行能力,提高整个地下交通系统的运行效率。而其  $S_2^-$  为 320,说明其建设费原本可以少投入 320 万元,这是因为浅埋方案需要对地面道路进行大规模改造,增加了其路改费,从而提高了整个工程的建设费用。

(3)输入指标影响。由计算结果可知,建设费用的小幅变化,可以引起效率值的较大变化,如方案五和方案六,在其他指标相差不多的情况下,方案六的建设费用比方案五多了 710 万元(表 2),效率值下降了约 0.26。冲突点个数的变化也会引起效率值较大变化,而通行能力的变化引起的效率值变化并不明显。所以,若要提高地下道路交通效率,首先应考虑降低其建设费用和减少冲突点个数,在此基础上再考虑通行能力的提高。

(4)资源配置。方案四和方案五技术和规模均 DEA 无效,这是由于其平面布局、工程造价、通行能力等均未达到资源最优配置。相比而言,方案五和

方案六的综合效率较低,这说明方格网形的布局不适合地下道路,因为一方面方格网形的布局比较复杂,交叉口多,交通组织困难,对于追求方向视认性很高的地下道路,有可能增加车辆在地下绕行距离,致使驾驶人迷路,降低通行效率;另一方面,地下道路的建设费用很高,方格网形布局的建设成本比目字形和日字形高许多,所以地下道路网的布局应尽量简单明了,使交通组织路线清晰。地下道路的方案改善可以从改善平面布局,资金的合理投入,提高车辆驶入驶出地下通道的方便程度,提高交通安全等方面入手,增加单位投入上的技术投入,从而同时提高技术效率和规模效率,以期达到综合效率有效的最终目的。

## 5 结 语

(1)根据地下道路交通系统的特点,从安全、技术、经济、运行效率和环境 5 个方面综合考虑,建立了地下道路交通工程设计方案评价指标体系;该评价体系架构简单,与评价对象的联系性强,操作方便,具有很强的实用性,评价指标意义清晰,指标值易于获得。

(2)引入 DEA 方法进行分析计算,DEA 方法的优点在于不用确定各指标的相关权重,避免了人为赋值,增强了评价的客观性;在规模收益不变的 CCR 模型不能很好适应地下道路交通工程设计方案的评价时,引入规模收益可变的 BCC 模型,对其适应性做了分析,并进行了实例计算。

(3)运用 MaxDEA5.0 软件计算各决策单元的综合效率,甄别出 DEA 有效和非 DEA 有效的评价对象;根据计算得到的冗余变量和松弛变量,给出各决策单元非 DEA 有效的原因,并指出改进方向,为管理者和设计者提供决策依据,避免投入要素的过剩和不足。

(4)多个决策单元的综合效率为 1 时,最优单元的识别方法以及模型构建的改善均有待进一步研究。

## 参考文献:

### References:

- [1] 张生瑞,邵春福,严海.公路交通可持续发展评价指标及评价方法研究[J].中国公路学报,2005,18(2): 74-78.  
ZHANG Sheng-ru, SHAO Chun-fu, YAN Hai. Evaluation indices and model of highway transportation

- sustainable development[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 74-78.
- [2] 张生瑞, 马壮林. 高速公路隧道交通环境评价指标体系[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(2): 77-80.  
ZHANG Sheng-ru, MA Zhuang-lin. Evaluation indices for traffic environment of expressway tunnel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(2): 77-80.
- [3] 陈红, 周继彪, 王建军, 等. 公路隧道运行环境安全评价指标与方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(4): 54-61, 74.  
CHEN Hong, ZHOU Ji-biao, WANG Jian-jun, et al. Safety evaluation indexes and method for traffic environment of highway tunnels[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(4): 54-61, 74.
- [4] 周继彪, 陈红, 甘左贤, 等. 公路隧道运行环境体系敏感性的灰色关联研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(12): 71-77.  
ZHOU Ji-biao, CHEN Hong, GAN Zuo-xian, et al. The sensitive gray relational research of operation environment system for expressway tunnel[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(12): 71-77.
- [5] 尹玫, 芮易, 朱合华, 等. 地下空间示范工程的综合评价[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(2): 219-223, 259.  
YIN Mei, RUI Yi, ZHU He-hua, et al. Comprehensive evaluation for underground demonstration project[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(2): 219-223, 259.
- [6] 余豫新, 王选仓, 张和, 等. 智能交通评价系统中DEA方法的优化[J]. 山东交通学院学报, 2010, 17(4): 17-21.  
YU Yu-xin, WANG Xuan-cang, ZHANG He, et al. Reconfiguration DEA's optimal in ITS evaluation[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2010, 17(4): 17-21.
- [7] 孔令曦, 沈荣芳. 城市地下空间发展可持续性评价[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(1): 119-122.  
KONG Ling-xi, SHEN Rong-fang. Evaluation of sustainability for development of underground space in urbs[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(1): 119-122.
- [8] 王曦, 刘松玉. 基于组合评价方法的城市地下空间详细规划方案评价[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44(5): 1072-1077.
- WANG Xi, LIU Song-yu. Evaluation for urban underground space detailed planning scheme based on combined evaluation method[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2014, 44(5): 1072-1077.
- [9] 党晓旭, 王元庆, 吴洲豪, 等. 改进的区域道路交通安全广义DEA评价模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(4): 11-16.  
DANG Xiao-xu, WANG Yuan-qing, WU Zhou-hao, et al. An improved generalized DEA evaluation model of regional road traffic safety[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(4): 11-16.
- [10] 郭京福, 杨德礼. 数据包络分析方法综述[J]. 大连理工大学学报, 1998, 38(2): 236-241.  
GUO Jing-fu, YANG De-li. Overview of data envelopment analysis method[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1998, 38(2): 236-241.
- [11] 杨国梁, 刘文斌, 郑海军. 数据包络分析方法(DEA)综述[J]. 系统工程学报, 2013, 28(6): 840-860.  
YANG Guo-liang, LIU Wen-bin, ZHENG Hai-jun. Review of data envelopment analysis[J]. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(6): 840-860.
- [12] CHARNES A, COOPER W W, LI S L. Using DEA to evaluate relative efficiencies in the economic performance of Chinese cities[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 1989, 23(6): 325-344.
- [13] BALF F R, REZAI H Z, JAHANSHALOO G R, et al. Ranking efficient DMUs using the Tchebycheff norm[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(1): 46-56.
- [14] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [15] BANKER R D, CHARNES A, COOPER W W. Some models for estimating technological and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J]. Management Science, 1984, 30(9): 1078-1092.
- [16] 马占新, 唐焕文. 一个综合的DEA模型及其相关性质[J]. 系统工程学报, 1999, 14(4): 311-316.  
MA Zhan-xin, TANG Huan-wen. A composite data envelopment analysis model and some properties of it[J]. Journal of System Engineering, 1999, 14(4): 311-316.