

基于 C-OWA 算子和灰色聚类的隧道全寿命周期运维经济性评价研究

许皓天 安镜如

(沈阳城市建设学院, 辽宁 沈阳 110167)

【摘要】隧道的科学运维是当前隧道研究领域的热点之一,它不仅涉及到对隧道建设工作的收尾完善,还代表着隧道未来的运营寿命。为解决隧道实际运维过程中运维策略的优化选择问题,从隧道运维成本的角度出发,以全寿命周期运维为切入点,针对隧道运维中的成本提出了一种资金分解规划思路,同时基于现实中隧道运维的实际数据,利用 C-OWA 算子和灰色聚类模型对隧道运维期内的维护优化策略以及相应的效益进行分析,得出了全寿命周期运维方式较传统矫正型运维方式在隧道运维期内具有更高的经济效益和社会效益的结论,为提高政府公共运营养护经费的分配效率和隧道的经济效益和社会效益提供了一种思路与建议。

【关键词】C-OWA 算子;灰色聚类模型;全寿命周期运维;经济性评价

一、引言

交通基础设施是国民经济基础性、先导性、战略性新兴产业,被誉为国民经济大动脉,党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视交通基础设施,做出一系列决策部署,推动我国交通基础设施取得了一系列历史性成就,发生了历史性变革。但是,随着城市交通体系的不断发展和完善,重点逐渐由建设转向运营管理。在城市基础设施的运营管理中,检测和养护维修是保障结构和交通安全的重要举措,其规模和耗资都十分巨大。

在隧道工程中,以隧道全寿命周期运维研究主要集中在隧道结构性能维护上,对经济性能评价研究度较低。因此,本文以某市城市隧道(下文简称 C 隧道)全寿命周期运维为研究对象,以寿命周期运维费用效益为切入点,基于该城市隧道工程运维真实数据,运用 C-OWA 算子赋权法和灰色系统理论进行评价,构建隧道全寿命周期运维效益综合分析模型,进而对隧道运维服务中经济性评价展开一定的探讨,以此帮助决策者优化管理、精准施策,从而实现隧道全寿命周期运维效益最大化。

二、C 隧道运维成本分析规划

全寿命周期运维成本划分的整体思路是基于全

寿命周期养护原则来执行的,以货币形式计量,原因是在以市场为导向的经济社会,货币式最统一、且可供比较的参照物,主要包括三大类费用:日常维护与保养费用、预防性养护费用和中大修养护费用。日常养护与保养不会改变隧道设施设备性能的日常养护和保养活动,按照“事前预警”的指导原则,以先进监测手段进行监测,并在此基础上规划与分配养护资金。日常养护和保养费用主要包括:机电和土建日常保养与维护费用、保洁费用、能源消耗费用、日常巡查费用、定期监测费用、日常养护与维护管理费用。

三、隧道全寿命周期运维经济性评价指标体系

OWA (Ordered Weighted Averaging, 有序加权平均) 算子理论由 Yager 教授提出,在此基础上,许多学者进行了深入改进研究,并提出了众多不同类型的 OWA 算子^[1],具体到赋权步骤如下:

1. 邀请 n 位专家,根据同一层次指标的重要性程度进行打分(0-10 打分法), n 位专家对各指标的初始打分数据集为($a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_n$),对打分数据从大到小排序并从 0 开始编号,得结果为 $b_0 \geq b_1 \geq b_2 \geq \dots \geq b_j \geq \dots \geq b_{n-1}$ 。

2. 数据 b_i 的权重 θ_{j+1} 计算公式如下,其中

$$\sum_{j=0}^{n-1} \theta_{j+1} = 1$$

$$\theta_{j+1} = \frac{c_{n-1}^j}{\sum_{k=0}^{n-1} c_{n-1}^k} = \frac{c_{n-1}^j}{2^{n-1}}, j = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

3. 对决策数据赋权, 得到指标因素的绝对权重 $\bar{w}_i$, 即:

$$\bar{w}_i = \sum_{j=0}^{n-1} \theta_{j+1} b_j (i=1, 2, \dots, m)$$

式中 m 为指标因素个数。

4. 计算各指标的相对权重 w_i , 即:

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{w}_i}$$

通过专家访谈, 邀请 10 位专家对隧道全寿命周期运维经济性评价指标进行权重评分, 运用 C-OWA 算子对各指标赋权^[3]。以指标 A_1 赋权为例, 将指标 A_1 的评分从大到小递减排序分大小递减排序得 (10, 10, 10, 10, 10, 9, 9, 9, 8, 8), 权重向量: $\theta_j = (0.00195, 0.01758, 0.07031, 0.16406, 0.24609, 0.24609, 0.16406, 0.07031, 0.01758, 0.00195)$

$$\text{指标 } A_1 \text{ 的绝对权重} = \bar{w}_1 = \sum_{j=0}^{n-1} \theta_{j+1} b_j = 9.48028$$

同理得到 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 、 B_3 权重的 (8.08773, 7.74594, 8.9100, 8.7459, 9.0701)

$$\text{各二级指标的相对权重 } w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{w}_i} = (0.376,$$

0.32, 0.304, 0.333, 0.327, 0.340)

各三级指标计算过程同上。

四、基于灰色系统理论的综合评价模型

(一) 全寿命周期运维效益测度及标准的界定

根据灰色聚类评价理论, 将隧道全寿命周期运维成本效益评价指标测度划分为优、良、合格、差四个等级, 如果评级指数介于二者之间, 则该值应为 3.5, 2.5, 1.5。各效益指标测量评价可以采用类似项目于项目之间的对比, 具体评价标准及相应灰度如表 3 所示。

表 3 隧道全寿命周期运维经济性指标等级划分

等级	评价标准	灰度 e
优	与传统运维相比产出显著效益	4
良	与传统运维相比产出少量效益	3
合格	与传统运维相比产出额外效益	2
差	与传统运维相比产出负效益	1

(二) 基于白化权函数的灰色聚类评价模型

1. 确定灰类及白化权函数。将隧道全寿命周期运维效益各二级指标的灰度与灰数分别划分 4 类: 优秀 ($e=4$), 良好 ($e=3$), 合格 ($e=2$), 差 ($e=1$), 指标评价介于某两个相邻灰类之间时可取中间值, 如 3.5, 2.5, 1.5。

2. 计算灰色评价系数。评价指标 A_{ij} 的评价矩阵 $D_i = (d_{ijk})_{s \times m}$, 共 m 个专家进行打分, 其中 d_{ijk} 表示第 i 个一级指标下的第 j 个指标的第 k 个专家的评分值。指标 A_{ij} 属于 e 灰类的评价系数

$$X_{ije} = \sum_{k=1}^m f_e(d_{ijk}), \text{ 总灰色评价系数 } X_{ij} = \sum_{e=1}^4 X_{ije}。$$

3. 计算灰色评价权向量及权矩阵。指标 A_{ij} 在灰度 e 下的评价系数 $r_{ije} = \frac{X_{ije}}{X_{ij}}$, 则其对各灰类的灰

色评价权向量 $r_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}, r_{ij4})$, A_i 下设的各二级指标权向量 r_{ij} 组合得到的指标 A_i 的灰色聚类权矩阵:

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{i11} & \cdots & r_{i14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{im1} & \cdots & r_{im4} \end{pmatrix}$$

4. 灰色聚类评估。 A_{ij} 的聚类评价, $U_i = w_i * R_i$, 构造综合灰色聚类矩阵为: $U' = (U_1, U_2, U_3)^T$, $U'' = (U_3, U_4, U_5)$

得到隧道全寿命周期运维投入和产出的综合聚类评价向量:

$$w_1 = w_{01} * U', \quad w_2 = w_{02} * U''$$

5. 根据灰色聚类评价原则, 将隧道全寿命周期运维成效阈值设定为 $V = (9.5, 6.2, 5)^T$, 隧道全寿命周期运维投入或者产出值为 $Z = wV$, 监管成效值为 $\phi = \frac{Z}{Z_0}$, 根据表 4 所界定的测度即可以判断隧道全寿命周期运维经济性成效。

表4 隧道全寿命周期运维经济性测度 单位: %

等级	优秀	良好	合格	差
测度	90-100	70-90	50-70	<50

五、实证分析

以某城市隧道工程C全寿命周期运维经济性为案例研究对象,该工程目前已经进入运营期,该工程运维内容包括道路、海底隧道、陆地隧道主体工程,同时新建排水、照明、通风、消防、绿化、交通工程,运维难度大,运维成本较高,相较于传统运维模式,全寿命周期运维模式的实现,对隧道运维方案经济性评价至关重要。因此,本文对该模式下C隧道工程运维方案的经济性予以综合评价,科学性评价项目运维方案的合理性。

邀请专家小组参照该隧道运维方案项目基本资料,对其全寿命周期运维效益进行模拟打分,并根据专家打分的结果进行模拟实证,主要步骤如下:

1. 邀请6位专家对该隧道全寿命周期运维效益进行打分,得到D1, D2, D3, D4, D5, D6一级指标灰色评价矩阵,以D₁为例:

$$D_1 = \begin{bmatrix} 3 & 3.5 & 3 & 4 & 3.5 & 3.5 & 2 \\ 3 & 3.5 & 3.5 & 3.5 & 3 & 3 & 4 \\ 2 & 2 & 2.5 & 2 & 2 & 2.5 & 6 \\ 4 & 3.5 & 4 & 4 & 3.5 & 3.5 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2.5 & 7 \\ 3.5 & 3.5 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3.5 & 3.5 & 3.5 & 3.5 & 3 & 3 \end{bmatrix}$$

2. 设定灰类及计算灰色评价系数:

3. 将各聚类矩阵与相应权重向量合成得到总灰色聚类评价矩阵:

$$U_1 = \begin{bmatrix} 0.381 & 0.400 & 0.219 & 0 \\ 0.410 & 0.432 & 0.160 & 0 \\ 0.360 & 0.440 & 0.200 & 0 \end{bmatrix} \quad U_2 = \begin{bmatrix} 0.374 & 0.437 & 0.189 & 0 \\ 0.324 & 0.390 & 0.286 & 0 \\ 0.354 & 0.434 & 0.212 & 0 \end{bmatrix}$$

4. 综合聚类评价向量为Z_i

$$w_1 = (0.384, 0.422, 0.194, 0)$$

$$w_2 = (0.351, 0.421, 0.228, 0)$$

5. 综合聚类评价向量为Z=(z₁, z₂)=(8.188, 8.071)

得到隧道全寿命周期运维经济性测度

$$\phi = \frac{z_2}{z_1} = 98.57\%, \text{ 根据表4所界定的经济性测度可知}$$

隧道全寿命周期运维经济性等级为“优秀”,与项目未使用全寿命周期运维相比较,有较大的效益产生,表明隧道全寿命周期运维所带来显著成效。

六、结语

隧道运维工作不仅关乎隧道建设的完善收尾,还代表了隧道未来的运营寿命。为了解决实际运维过程中的优化选择问题,我们从隧道运维成本的角度出发,以全寿命周期运维为切入点。基于真实隧道运维数据,利用C-OWA算子和灰色聚类模型,对隧道维护优化策略及其效益进行了深入分析。相较于传统的矫正型运维方式,以预防性养护为主的全寿命周期运维方式在运维期间能够带来更显著的经济和社会效益。

参考文献:

- [1] 李敏. 基于C-OWA算子和灰色聚类的智慧建造效益评价研究[D]. 青岛理工大学, 2023.
- [2] 赵柯, 聂春龙. 基于C-OWA算子和灰色聚类的建筑项目HSE评价研究[J]. 项目管理技术, 2021, 19(06):69-73.
- [3] 赵金先, 蒋克洁, 陈涛等. 基于C-OWA算子赋权的地铁PPP项目融资风险灰色聚类评价[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(02):128-137.
- [4] 杨高升, 王韵雨. 基于C-OWA算子和灰色聚类的水利工程监管成效评价[J]. 水利经济, 2020, 38(06):31-36+82.
- [5] 张凌, 王景昌. 基于C-OWA算子和灰色聚类的农产品供应链保鲜努力水平评价[J]. 物流工程与管理, 2020, 42(08):100-104.
- [6] 陈佳棋. 基于OWA算子改进的灰色聚类法的深基坑绿色施工评价体系研究[D]. 武汉科技大学, 2022.

项目来源: 2023年国家级大学生创新创业训练计划项目-基于K-means和改进神经网络的基础设施运维费用偏差预警研究(项目编号: 202313208004), 辽宁省教育厅基本科研项目(项目编号: LJKMZ20221925)