

基于组合赋权方法的城轨线路运营安全评价

王艳辉^{1,2}, 黄雅坤^{1,2}, 李 曼^{1,2}

(1. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 在对城市轨道交通线路运营安全进行详细分析的基础上, 系统地构建了城市轨道交通线路运营安全评价指标体系, 并对各指标的含义及计算方法进行了研究. 同时, 对城市轨道交通线路运营安全等级进行了划分, 采用层次分析法和熵值法组合赋权的方法来评价影响城市轨道交通线路运营安全的各项指标, 符合系统的完整性, 最后以北京市地铁 4 号线为例对其运营安全进行综合评价, 验证了该方法的合理性和可靠性, 为城市轨道交通运营安全决策与安全控制措施提供了理论依据.

关键词: 城市轨道交通; 评价指标体系; 层次分析法; 熵值法; 组合赋权

中图分类号: U231.92

文献标志码: A

Evaluation of Urban Rail Transit Line Operational Safety Based on Combination Weighting Method

WANG Yanhui^{1,2}, HUANG Yakun^{1,2}, LI Man^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control & Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Traffic & Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on an analysis of urban rail transit line operational safety, the line operational safety evaluation index system of urban rail transit is established, the meanings and calculation methods of indexes are studied and the line operating safety grade of urban rail transit is delimited. The line operational safety indexes of urban rail transit is evaluated with the method of analytic hierarchy process (AHP) and entropy method combination weights, which accords with system integrity. Beijing metro Line 4 is evaluated as an example to verify the rationality and reliability of this method. And it provides theoretical basis for operational safety decision-making and safety control measures of urban rail transit.

Key words: urban rail transit; evaluation index system;

analytic hierarchy process (AHP); entropy method; combination weighting

城市轨道交通作为解决城市交通拥挤的有效方法, 目前已经有了很大的发展. 轨道交通作为一种大众式的交通运输方式, 其安全与否, 直接关系到国家及民众的生命和财产安全. 然而, 目前国内外对于城市轨道交通线路运营方面的研究, 都只是局限于某一方面, 系统的研究较少. 为此, 本文从系统的角度出发, 提出了基于层次分析法(AHP)和熵值法组合赋权的城市轨道交通线路运营安全综合评价方法, 有效地克服了指标赋权人为的因素, 得出的结果符合实际情况, 客观合理.

1 城市轨道交通线路运营安全评价指标体系

在查阅相关资料和深入开展实地调研的基础上^[1-2], 本文认为影响城市轨道交通线路运营安全的主要因素可分为以下 5 大类.

1.1 车站指标(C_1)

车站指标只考虑由客流引起的因素, 此处的客流是指站台的进出站量. 线路车站安全综合指数(C_{11})

定义: 一定时期内, 该线路各车站安全指数的综合值.

指标说明: 线路安全综合指数是由各车站各个安全指数加和组成的. 计算公式如下:

$$X(s_i) = \sum_{j=1}^n \lambda_j x(s_{ij}) \quad (1)$$

式中: $X(s_i)$ 为 $(t, t+\Delta t)$ 时期, 线路 s_i 的安全综合指数; λ_j 为车站 s_{ij} 在线路 i 中的权重, $\lambda(s_{ij}) =$

收稿日期: 2012-08-14

基金项目: 国家“十二五”科技支撑项目(2011BAG01B02)

第一作者: 王艳辉(1974—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为安全技术及工程、交通安全工程理论、智能系统设计开发与集成.

E-mail: zhxywyh@126.com

$q(s_{ij}) / \sum_{j=1}^n q(s_{ij})$, $q(s_{ij})$ 为 $(t, t+\Delta t)$ 时期车站 s_{ij} 的客流量; $x(s_{ij})$ 为 $(t, t+\Delta t)$ 时期, 车站 s_{ij} 的安全指数, $x(s_{ij})$ 是指用本文的组合赋权方法计算出来的车站最终评价结果。

1.2 列车载客指标(C_2)

列车载客指标考虑由客流引起的因素, 此处的客流是指列车上实际的载客量。

线路运力运量匹配度(C_{21})

定义: 一定时间内, 线路区间满载率超过规定值的个数与线路区间总个数的比值。

指标说明: 满载率 K 是指区间列车运载乘客的平均满载程度, $K = q_0 / q$, q_0 为实际客流量, q 为额定客流量。依据《城市轨道交通运营管理办法》^[3], 规定值取满载率超过 80% 的区间。计算公式如下:

$$L(s_i) = \lambda_{\text{上}} \frac{r_{\text{上}}}{m} + \lambda_{\text{下}} \frac{r_{\text{下}}}{m} \quad (2)$$

式中: $L(s_i)$ 为 $(t, t+\Delta t)$ 时期, 线路 s_i 的运力运量匹配度; $r_{\text{上}}$ 、 $r_{\text{下}}$ 分别为上行区间和下行区间满载率超过 80% 的区间个数; m 为线路区间的个数; $\lambda_{\text{上}}$ 、 $\lambda_{\text{下}}$ 分别为上行和下行的权重, $\lambda_{\text{上}} = L_{\text{上}} / (L_{\text{上}} + L_{\text{下}})$, $\lambda_{\text{下}} = L_{\text{下}} / (L_{\text{上}} + L_{\text{下}})$, 其中 $L_{\text{上}}$ 、 $L_{\text{下}}$ 分别为上下行区间个数。

1.3 设备指标(C_3)

(1) 车辆安全指数(C_{31})

定义: 车辆安全指数是以车辆故障率、故障影响程度为自变量建立的综合评价函数, 用来表征车辆的安全状态。计算公式如下:

$$\zeta(s_i) = 1 - F_{\text{train}} \cdot (1 + \phi_{\text{train}}) \quad (3)$$

式中: $\zeta(s_i)$ 为统计周期内, 线路 i 车辆安全指数; F_{train} 为统计周期内, 线路 i 车辆故障率; ϕ_{train} 为受车辆故障影响的运营里程与计划运营里程的比值。

(2) 信号系统安全指数(C_{32})

定义: 信号系统安全指数是指以信号系统故障率、平均故障修复时间、故障影响程度为自变量建立的综合评价函数, 用来表征信号系统安全状态。计算公式如下:

$$\Psi(s_i) = 1 - F_{\text{sig}} \cdot \left[1 + \phi_{\text{sig}} + \frac{(t_{\text{max}} - T_{\text{MTTR, sig}})^2}{(\sum_{i=1}^n t_i - T_{\text{MTTR, sig}})^2} \right] \quad (4)$$

$$T_{\text{MTTR, sig}} = \frac{\sum t_i}{n_{\text{sig}}} \quad (5)$$

式(4)~(5)中: $\Psi(s_i)$ 为统计周期内, 线路 i 信号系

统安全指数; F_{sig} 为统计周期内, 线路 i 信号系统故障率; $T_{\text{MTTR, sig}}$ 为信号系统平均故障修复时间; t_i 为第 i 次故障修复时间; n_{sig} 为信号故障导致的影响行车故障次数; ϕ_{sig} 为受信号故障影响的运营里程与计划运营里程的比值; t_{max} 为最大故障修复时间。

(3) 供电系统安全指数(C_{33})

定义: 供电系统安全指数是以供电方式的不同来体现供电系统对于运营安全的影响程度。计算公式如下:

$$\Gamma(s_i) = 1 - \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_{\text{总}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $\Gamma(s_i)$ 为统计周期内, 线路 i 供电系统安全指数; t_1 、 t_2 、 t_3 分别表示线路处于单边供电, 越区供电, 失电状态的时间; $t_{\text{总}}$ 为表示供电系统总运行时间。

(4) 通信系统安全指数(C_{34})

定义: 通信系统安全指数由传输系统, 专用电话系统, 闭路监视系统, 广播系统, 无线系统故障率统计计算形成。计算公式如下:

$$\vartheta(s_i) = 1 - F_{\text{com}} \cdot \left[1 + \phi_{\text{com}} + \frac{(t_{\text{max}} - T_{\text{MTTR, com}})^2}{(\sum_{i=1}^n t_i - T_{\text{MTTR, com}})^2} \right] \quad (7)$$

$$T_{\text{MTTR, com}} = \frac{\sum t_i}{n_{\text{com}}} \quad (8)$$

式(7)~(8)中: $\vartheta(s_i)$ 为统计周期内, 线路 i 通信系统安全指数; F_{com} 为统计周期内, 线路 i 通信系统故障率; $T_{\text{MTTR, com}}$ 为通信系统的平均故障修复时间; t_i 为第 i 次故障修复时间; n_{com} 为通信故障导致的影响行车故障次数; ϕ_{com} 为受通信故障影响的运营里程与计划运营里程的比值。

(5) 机电系统安全指数(C_{35})

定义: 机电系统安全指数是以隧道通风系统计划服务时间、故障停用时间为自变量的函数, 用来表征线路中机电系统的安全状态。计算公式如下:

$$\gamma(s_i) = \frac{t_{\text{plan}} - t_{\text{bug}}}{t_{\text{plan}}} \quad (9)$$

式中: $\gamma(s_i)$ 为统计期内, 线路 i 机电系统安全指数; t_{plan} 为隧道通风系统计划服务时间; t_{bug} 为隧道通风系统故障停用时间。

1.4 环境指标(C_4)

此处是指线路环境指标, 包括轨道安全保障指数、隧道稳定性指数以及线路综合环境指数。

(1) 轨道安全保障指数(C_{41})

定义: 轨道安全保障指数是根据钢轨的损伤, 同时考虑伤损钢轨的分布情况来反映钢轨的安全状

况. 计算公式如下:

$$\sigma = \sigma(s_i) + \bar{\omega} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{K_i} \quad (10)$$

$$\sigma(s_i) = \begin{cases} 1 & \text{良好} \\ a & \text{轻伤} \\ b & \text{轻伤在发展} \\ c & \text{重伤} \\ d & \text{断轨} \end{cases}$$

式中: σ 为统计周期内, 线路 i 轨道安全保障指数; $\sigma(s_i)$ 为统计周期内, 线路 i 轨道质量指数, 可参考每日轨道检测质量报告; k_i 为该线路第 i 个区段中伤损钢轨的数量; K_i 为该线路第 i 个区段中钢轨的总数量; $\bar{\omega}$ 为故障设备区段分布折算因子, 是出现轨道伤损的区段个数与该线路区段总个数的比值; a, b, c, d 为表示运营的影响程度等级, 该值介于 0 到 1 之间.

(2) 隧道稳定性指数(C_{42})

定义: 隧道稳定性指数是通过监控隧道的变形值并统计计算而得, 反映了隧道的稳定性状况. 计算公式如下:

$$N(s_i) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{S_k/d_k}{S_0} \quad (11)$$

式中: $N(s_i)$ 为统计周期内(按月), 线路 i 的隧道稳定性指数; S_k 为第 k 个区间的隧道周边实测位移值; d_k 为第 k 个区间的两测点间距离; S_0 为隧道周边最大允许相对位移的阈值, 结合隧道地质条件、设计资料和相关标准规范具体确定; n 为线路 i 上的区间个数.

(3) 线路综合环境指数(C_{43})

定义: 线路各个车站环境指数与区间环境状况指数的组合值. 计算公式如下:

$$M(s_i) = a \sum_{j=1}^m \lambda_j E_j + b \sum_{k=1}^n \eta_k O_k \quad (12)$$

式中: $M(s_i)$ 为线路综合环境指数; E_j 为车站 s_{ij} 内环境综合指数; O_k 为第 k 个区间环境综合状况指数; λ_j 为车站 s_{ij} 在线路 i 中的权重, $\lambda(s_{ij}) = k(s_{ij}) / \sum_{j=1}^n k(s_{ij})$; η_k 为第 k 个区间在线路 i 中的权重, $\eta_k = w_k / \sum_{k=1}^n w_k$, w_k 为区间强度; a, b 分别为 E_j 和 O_k 的权重.

1.5 管理指标(C_5)

(1) 驾驶员安全保障指数(C_{51})

定义: 驾驶员年龄、工龄、职称、工作强度、工种特性的综合值.

驾驶员安全保障指数的确定是依据平均年龄指数 \bar{N} 、平均工龄指数 \bar{G} 、平均职称指数 \bar{Z} 、平均工作强度指数 \bar{Q} 、平均工种特性指数 \bar{X} 来综合确定的.

$$J_p = \alpha \bar{N} + \beta \bar{G} + \gamma \bar{Z} + \theta \bar{Q} + \varphi \bar{X} \quad (13)$$

式中: J_p 为驾驶员安全保障指数; $\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$ 为各项指数的权重, 采用专家打分法, 由多名专家给定经验值.

(2) 调度员安全保障指数(C_{52})

定义: 调度员年龄、工龄、职称、工作强度、工种特性的综合值.

调度员安全保障指数的确定是依据平均年龄指数 \bar{N} 、平均工龄指数 \bar{G} 、平均职称指数 \bar{Z} 、平均工作强度指数 \bar{Q} 、平均工种特性指数 \bar{X} 来综合确定的.

$$D_p = \alpha \bar{N} + \beta \bar{G} + \gamma \bar{Z} + \theta \bar{Q} + \varphi \bar{X} \quad (14)$$

式中: D_p 为调度员安全保障指数.

1.6 城市轨道交通线路运营安全评价指标体系

综上所述, 城市轨道交通线路运营安全综合评价指标体系如图 1 所示.

2 城市轨道交通线路运营安全综合评价方法

2.1 层次分析法和熵值法组合赋权综合评价

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是对定性问题进行定量分析的一种简便、灵活而又实用的多准则决策方法; 熵值法是一种客观赋权方法, 它通过计算指标的信息熵, 根据指标的相对变化程度对系统整体的影响来决定指标的权重. 层次分析法考虑了专家的经验 and 知识, 但主观随意性较大; 熵值法充分挖掘指标的原始数据蕴含的信息, 结果客观, 却不能反映专家及决策者的意见. 由于评价的指标在综合评价时的作用是不均等的, 因此, 各个指标的贡献大小可以通过层次分析法和熵值法综合确定权重来表示. 在城市轨道交通线路运营安全评价时, 需要考虑专家和决策者的主观判断, 针对主观判断的权重计算用 AHP 最为合适, 并且 AHP 依据判断矩阵计算比较成熟. 同时, 在对城市轨道交通线路运营评价指标体系进行综合分析时, 依据数据本身之间的关系, 运用熵值法确定各指标的权重, 能够深刻地反映指标信息熵值的效用价值, 进而对城市轨道交通线路运营安全进行评价. 因此, 本文采用 AHP 和熵值法组合赋权^[4-5]的方法来评价影响城市轨道交通线路运营安全的各项指标.

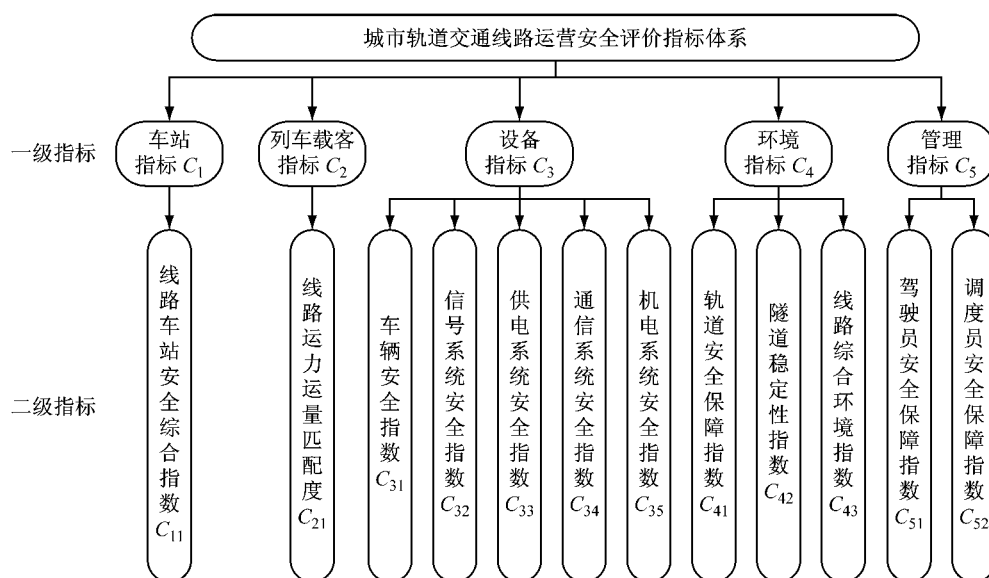


Fig.1 Urban rail line operational safety evaluation index system

2.2 组合赋权评价步骤

首先由 AHP 求出各个指标权重为 ω_i , 具体过程参见文献[6-8]; 然后由熵值法求出各个指标权重为 θ_i , 具体过程参见文献[9-11]. 最后由 AHP 和熵值法组合赋权的方法求出组合权重 λ_i , 具体过程如下:

(1) 计算组合权重:

$$\lambda_i = \frac{\omega_i \theta_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i \theta_i} \quad (15)$$

式中: λ_i 为由 AHP 和熵值法计算出的第 i 个指标的组合权重; ω_i 为由 AHP 得到的各指标权重; θ_i 为由熵值法得到的各指标权重; n 为指标个数.

(2) 计算各评价对象综合评价值:

$$S_i = \sum_{j=1}^n \lambda_i \cdot x_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

式中: S_i 为城市轨道交通线路运营安全综合评价值; x_{ij} 为第 j 个被评价对象的第 i 个指标的数值.

由城市轨道交通线路运营安全评价各个指标的计算公式可知, 每个指标的值越大, 指标的安全性越高, 进而可得, S_i 越大, 即城市轨道交通线路运营安全的综合评价值越高, 被评价对象的安全性越高. 通过比较所有的 S_i 值, 即可得出评价结论.

3 实例分析

在此选取北京市地铁 4 号线为研究对象, 用本文构建的评价方法对 4 号线运营安全进行评价. 利用 Matlab 7.0 软件对评价方法进行仿真, 验证了基

于 AHP 和熵值法组合赋权的城市轨道交通线路运营安全综合评价方法的正确性和合理性.

3.1 城市轨道交通线路运营安全等级

本文参考了《城市轨道交通运营安全管理办法》^[3]和《城市轨道交通运营安全验收评价细则》^[12], 对北京市轨道交通指挥中心提供的数据进行了大量的分析, 依据本文建立的城市轨道交通线路运营安全评价指标体系, 将城市轨道交通线路运营安全分为 5 个不同的等级, 见表 1.

表1 城市轨道交通线路运营安全等级

等级	一级	二级	三级	四级	五级
综合评价值 S_i	0.95~1	0.90~0.95	0.70~0.90	0.50~0.70	0.700~0.50

3.2 指标权重值

(1) AHP 确定指标权重值 ω_i

通过城市轨道交通线路运营安全评价指标体系的分析, 整个评价指标体系分为 3 层, 如图 1 所示. 第一层为目标层, 作为城市轨道交通线路运营安全的综合评价; 第二层为一级指标 (C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5), 包含了城市轨道交通线路上的车站、列车载客、设备、环境、管理评价的五个方面; 第三层为二级指标 (C_{11} 、 C_{21} 、 C_{31} 、 \dots 、 C_{51} 、 C_{52}), 隶属于上一层, 是对综合评价存有重要意义的线路运营安全评价的具体指标.

本文根据城市轨道交通线路历史运营情况给出判断矩阵中的指标数值, 构造出比较判断矩阵, 由于 AHP 计算权重的步骤较复杂, 故采用 Matlab 7.0 软件进行编程实现计算.

最终计算各指标权重 $\omega_i = (0.146\ 2, 0.080\ 6, 0.042\ 9, 0.179\ 1, 0.113\ 8, 0.072\ 0, 0.018\ 2, 0.030\ 1, 0.005\ 7, 0.010\ 7, 0.050\ 1, 0.250\ 6)$ 可作为城市轨道交通线路运营安全评价的依据。

(2) 熵值法确定指标权重值 θ_i

本文选取北京市地铁4号线为研究对象,由北

京市轨道交通指挥中心提供的2012年五一国际劳动节前后的部分基础数据,根据本文定义的城市轨道交通线路运营安全各指标的计算方法,得到城市轨道交通线路运营各指标的数值,即13个样本,见表2。

表2 城市轨道交通线路运营的样本

Tab.2 Urban rail transit line operation sample

日期	C_{11}	C_{21}	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	C_{35}	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{51}	C_{52}
2012-4-27	0.932	0.948	0.915	0.923	0.956	0.943	0.905	0.912	0.933	0.914	0.927	0.927
2012-4-28	0.578	0.611	0.696	0.645	0.538	0.582	0.605	0.616	0.629	0.684	0.556	0.578
2012-4-29	0.886	0.896	0.725	0.785	0.862	0.788	0.756	0.816	0.876	0.795	0.745	0.819
2012-4-30	0.825	0.806	0.723	0.816	0.726	0.818	0.755	0.835	0.749	0.789	0.726	0.809
2012-5-1	0.844	0.805	0.745	0.758	0.816	0.726	0.725	0.833	0.755	0.752	0.806	0.791
2012-5-2	0.568	0.524	0.599	0.586	0.602	0.613	0.599	0.596	0.675	0.698	0.598	0.702
2012-5-3	0.945	0.926	0.964	0.934	0.901	0.986	0.949	0.967	0.967	0.926	0.984	0.965
2012-5-4	0.768	0.815	0.826	0.762	0.795	0.791	0.822	0.833	0.741	0.735	0.794	0.856
2012-5-5	0.901	0.933	0.921	0.912	0.898	0.865	0.883	0.916	0.921	0.891	0.854	0.918
2012-5-6	0.934	0.915	0.934	0.926	0.946	0.968	0.898	0.831	0.922	0.934	0.915	0.899
2012-5-7	0.548	0.589	0.529	0.591	0.602	0.613	0.576	0.626	0.672	0.684	0.698	0.702
2012-5-8	0.884	0.925	0.916	0.914	0.891	0.925	0.883	0.954	0.938	0.935	0.948	0.921
2.12-5-9	0.952	0.968	0.902	0.978	0.962	0.953	0.966	0.965	0.897	0.982	0.986	0.965

由于熵值法计算复杂,故采用 Matlab 7.0 软件进行编程实现计算,得到线路运营安全评价的熵权为 $\theta_i = (0.105\ 0, 0.103\ 6, 0.091\ 8, 0.083\ 6, 0.098\ 6, 0.092\ 2, 0.086\ 8, 0.076\ 7, 0.062\ 3, 0.050\ 2, 0.090\ 0, 0.059\ 2)$ 。

(3) 组合赋权方法确定指标权重值 λ_i

通过层次分析法得到指标的主观权重 ω_i ,结合熵权 θ_i ,由式(15)得到城市轨道交通线路运营安全综合权重值为 $\lambda_i = (0.181\ 5, 0.098\ 7, 0.046\ 6, 0.177\ 0, 0.132\ 6, 0.078\ 5, 0.018\ 7, 0.027\ 3, 0.004\ 2, 0.006\ 4, 0.053\ 3, 0.175\ 3)$ 。

3.3 综合评价值

采用线性加权综合法,由式(16)得到2012年五一国际劳动节前后,北京市地铁4号线各时段的线路运营安全综合评价值为 $S_i = (0.932\ 9, 0.594\ 9, 0.826\ 5, 0.793\ 4, 0.792\ 5, 0.604\ 0, 0.945\ 7, 0.798\ 9, 0.904\ 4, 0.924\ 3, 0.610\ 1, 0.911\ 3, 0.961\ 9)$ 。

3.4 评价结果的验证

由以上实例可知2012年五一国际劳动节前后,北京市地铁4号线各天的线路运营安全综合评价值,根据表1中对线路运营安全等级的划分,4号线各天的运营安全等级分别为二级,四级,三级,三级,三级,四级,二级,三级,二级,二级,四级,二级,一级,三级,三级,二级,二级,一级,即由本文实例计算

可知:在五一国际劳动节前后,北京市地铁4号线运营安全等级为四级,在五一国际劳动节期间,线路运营安全等级为三级;在无国家法定节假日期间,周一、周五的线路运营安全等级为三级或四级,周六、日的线路运营安全等级为二级,周二到周四的线路运营安全等级为一级或二级。

由北京市轨道交通指挥中心提供的数据可知,在法定节假日前后,线路运营安全等级一般为四级或五级,在法定节假日期间,线路运营安全等级一般为三级;在无法定节假日期间,周一、周五由于上班高峰和放假高峰,线路运营安全等级一般为三级、四级或五级,周六、日,线路运营安全等级一般为二级或三级,周二到周四的线路运营安全等级为一级或二级。据此可知,由本文实例计算出的结果与北京市轨道交通指挥中心提供的数据一致,且与实际情况较吻合。因此可以看出通过组合赋权方法进行城市轨道交通线路运营安全评价的研究符合客观事实,从而也证明了所建立的城市轨道交通线路运营安全评价指标体系和基于 AHP 和熵值法组合赋权的评价方法的正确性。

4 结论

本文借鉴了国内外城市轨道交通运营安全评价的一些研究成果,紧密结合我国实际情况,针对城市

轨道交通线路运营安全评价问题进行了系统研究。

主要研究成果如下:

(1) 建立了城市轨道交通线路运营安全评价指标体系,包括车站指标、客流指标、设备指标、环境指标和管理指标这5个一级指标和12个二级指标。

(2) 将城市轨道交通线路运营安全划分为5个等级,运用AHP和熵值法组合赋权的方法对城市轨道交通线路运营安全进行了评价,在权重的确定上达到了主观与客观的统一,最后得到城市轨道交通线路运营安全的综合评价价值及其所属的等级。

本文还有很多不足的地方:比如对指标建立的完备性和计算方法还可以进一步改进,此外,还可以将该方法运用到实际数据中去,多次实验并进行改进完善。

参考文献:

- [1] 万传风,魏庆朝.城市轨道交通运行评价指标体系[J].中国安全科学学报,2006(5):13.
WAN Chuanfeng, WEI Qingzhao. Evaluation index system of urban rail transit operating[J]. China Safety Science Journal, 2006(5):13.
- [2] 王艳辉,罗文婷,郭晓妮.基于改进SP法的铁路应急能力综合评价研究[J].铁道学报,2009,31(2):17.
WANG Yanhui, LUO Wenting, GUO Xiaoni. Comprehensive assessment of railway emergency response capability based on the improved SP method[J]. Railway Society, 2009, 31(2):17.
- [3] 北京市人民政府.北京市城市轨道交通运营安全管理办法[S].北京:北京市人民政府,2009.
The People's Government of Beijing Municipality. Urban rail transit security operations management approach in Beijing [S]. Beijing: The People's Government of Beijing Municipality, 2009.
- [4] 郭亚军.综合评价理论、方法及应用[M].北京:科学出版社, 2007.
GUO Yajun. Comprehensive evaluation theory, methods and applications[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [5] 叶义成,柯丽华,黄德育.系统综合评价技术及其应用[M].北京:冶金工业出版社,2006.
YE Yicheng, KE Lihua, HUANG Deyu. Comprehensive assessment of the technology and its applications[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [6] Saaty L T. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 2009.
- [7] 罗文婷,王艳辉,贾利民,等.改进层次分析法在铁路应急预案评价中的应用研究[J].铁道学报,2008,30(6):24.
LUO Wenting, WANG Yanhui, JIA Limin, et al. Improved analytic hierarchy process in the evaluation of the railway emergency plan[J]. Railway Society, 2008, 30(6):24.
- [8] 许树柏.层次分析法[M].天津:天津大学出版社,2007.
XU Shubo. Analytic hierarchy process[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2007.
- [9] 杜栋,庞庆华,吴炎.现代综合评价方法与案例精选[M].北京:清华大学出版社,2008.
DU Dong, PANG Qinghua, WU Yan. Modern comprehensive evaluation methods and case selection[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [10] 郭显光.改进的熵值法及其在经济效益评价中的应用[J].系统工程理论与实践,2008,30(12):98.
GUO Xianguang. Improved entropy method and its application in the evaluation of economic benefit[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2008, 30(12):98.
- [11] 陆添超,康凯.熵值法和层次分析法在权重确定中的应用[J].电脑编程技巧与维护,2009(22):19.
LU Tianchao, KANG Kai. Entropy method and the Analytic Hierarchy Process in weight to determine [J]. Computer Programming Skills and Maintenance, 2009(22):19.
- [12] 国家安全生产监督管理总局.城市轨道交通运营安全验收评价细则[S].北京:煤炭工业出版社,2007.
State Administration of Work Safety Supervision. Safety evaluation standard on project completion of urban rail transit [S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2007.