

模糊理论在铁路客运安全指标权重 优化算法中的应用

吴 江¹,陈滋顶²,贾元华¹,孙东冶¹

(1.北京交通大学 交通运输学院,北京 100044;2.国家铁路局 运输监督管理局,北京 100891)

摘 要:客运安全评价是保证铁路运输安全高效的重要手段.为了解决安全评价中指标权重确定的问题,将模糊理论与层次分析法相结合,给出各评价指标权重的变化区间,并在各区间内生成不同权重值.通过蒙特卡洛模拟的仿真实验来生成针对不同指标权重值所产生的评价结果,并通过量化方法得出该评价结果的方差.以方差作为遗传算法的适应度函数进行后向反馈,实现指标权重的优化,并将优化后的权重用于我国各铁路企业客运安全评价结果的计算.实验结果表明:该方法可以在充分尊重专家对指标权重评定的基础上,对权重进行微调,使得评价结果对指标得分更加敏感.

关键词:铁路客运;权重优化;模糊理论;安全评价;遗传算法

中图分类号:U298.2 **文献标志码:**A

Application of fuzzy theory to weight optimization algorithm of railway passenger transport safety index

WU Jiang¹, CHEN Ziding², JIA Yuanhua¹, SUN Dongye¹

(1.School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044,China;
2. Department of Transport Supervision and Management of the State Railway Administration, Beijing 100891,China)

Abstract: Passenger safety evaluation is an important means to ensure the safety and efficiency of railway transportation. In order to solve the problem of index weight determination in security evaluation, this paper firstly combines fuzzy theory with Analytic Hierarchy Process (AHP) to give the weight variation interval of each index. Then, the simulation results of Monte Carlo simulation are used to generate the evaluation results for different index weights, and the variance of the evaluation results is obtained by the quantitative method. Finally, the variance is used as the fitness function of the genetic algorithm to carry out the backward feedback to realize the optimization of the index weight. And the optimized weights are applied to the calculation of passenger safety evaluation results of railway enterprises in China. The experimental results show that the method can fine tune the weights on the basis of full respect of the experts' evaluation of the in

收稿日期:2017-11-29
基金项目:国家铁路局专项基金(T16I00030);中央高校基本科研业务费专项资金(2017YJS110)
Foundation items: Special Foundation of National Railway Administration of China(T16I00030);Fundamental Research Funds for the Central Universities(2017YJS110)
第一作者:吴江(1989—),男,山西吕梁人,博士生.研究方向为交通运输规划与管理. email:15114239@bjtu.edu.cn.
引用格式:吴江,陈滋顶,贾元华,等.模糊理论在铁路客运安全指标权重优化算法中的应用[J].北京交通大学学报,2018,42(3):37—43.
WU Jiang, CHEN Ziding, JIA Yuanhua, et al. Application of fuzzy theory to weight optimization algorithm of railway passenger transport safety index[J].Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(3): 37—43.(in Chinese)

dex weights, and make the evaluation results more sensitive to the index score.

Keywords: railway passenger transportation; weight optimization; fuzzy theory; safety evaluation; genetic algorithm

随着我国既有铁路旅客列车的大面积提速、新建高速铁路及城际客运专线的不断投入运营,铁路旅客运输生产安全压力逐渐增大,面临的风险种类、程度与以往相比都发生了很大的变化.铁路客运安全保障水平的提高,不仅取决于运输企业依照相关安全生产法规严格自律,更需要政府主管部门的科学有效监管,严格执法.因此,建立一套切实可行的铁路旅客安全评价体系,并将其作为政府监管部门履行职责的主要依据和参考,十分必要.

目前国内外有关铁路运输安全评价研究的绝大部分文献,都是从铁路企业的角度出发,从铁路系统各个业务流程来建立安全评价指标体系.国内方面,包括根据事故指标与隐患指标相结合共同评价的思路,建立行车安全评价指标体系^[1];从人为因素对铁路运输的安全影响出发,提出的基于层次分析法的机车行车安全评价^[2];基于风险的定量安全评估过程,确定的铁路客运安全评价体系^[3];以及基于科学工作流的铁路行车安全评价体系研究^[4].国外方面,包括从风险分析的角度考虑,基于事件树分析法和事故树分析法,构建的高铁系统风险评价方法^[5];基于传统的铁路系统风险分析,构建的基于马尔科夫链的分析与评价方法^[6];以及针对于铁路系统设计与运营中的风险所进行的量化与评估方法^[7].

综合上述文献,从铁路系统各个业务流程来建立安全评价指标体系,即事前评估,可在一定程度上对风险与事故进行预防,避免隐患的发生.但在评价的过程中,评价指标的选择基本以定性为主,指标值的量化和权重的确定大多是以专家打分的方式完成,这在一定程度上造成评价结果的主观性较强,可信度不高.因此,本文作者在此基础上,运用模糊理论,设计了一种指标权重优化的定量化方法,以增加该类评价方式的客观性和可信度.

1 问题描述

以定性指标为主的评价体系,其评价结果的主观性主要体现在两个方面,一是专家在对各个指标打分时存在的主观性,二是专家对各指标权重进行确定时存在的主观性,如图 1 所示.

由图 1 可知,此类评价问题的完成主要面临以下问题:

1)定性指标的大量设置导致此类问题的评价数

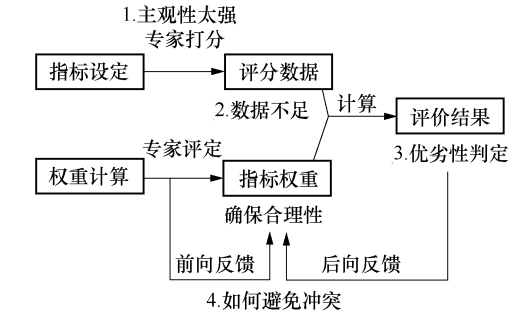


图 1 评价流程图

Fig.1 Flow chart of evaluation

据主要来自于主观的专家打分,无法精确地通过科学客观的统计、计算方法获得较为客观的数据^[8-9].

2)由于只能以专家打分为数据获取渠道,使得科研工作者无法大量频繁的获取评价数据,从而进一步增加了评价结果的随机性和不确定性.

3)目前还缺乏相关方法,来定量化分析评价结果的优劣性,尤其是在诸如铁路客运安全评价的此类软课题中,并没有标准的评价结果来与设计方案所得出的评价结果相比较.从而无法通过评价结果来调整方案中的指标权重,形成反馈机制.

4)如图 1 所示,指标权重通常是由专家的专业素养、一致性检验等前馈机制所调节的.因此,当建立后向反馈机制时,需要考虑如何避免两种反馈机制的冲突.

基于这种情况,本文将模糊理论与层次分析法相结合,设计了一种指标权重的优化方法,来解决以上问题,并将其运用于用于我国各铁路企业客运安全评价结果的计算,见图 2.

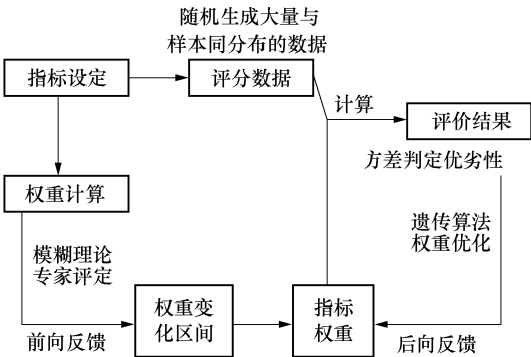


图 2 改进后的评价流程图

Fig.2 Flow chart of improved evaluation

模糊理论是对生活中许多边界不清楚事物进行研究的一种理论工具,由于人与人之间的差别,对模

糊事物的评判存在一定的主观性.对事物进行评价时,许多对象的类属界限不够清楚,导致评价的模糊性.虽然模糊事物没有绝对的界限,但通过界定一个元素对某个模糊集合的隶属关系,依照一定的标准对模糊事物进行评判有相对的合理性.因此,模糊集合的概念应运而生.利用模糊集合能够克服经典集合论的缺点,对模糊问题进行合理的评价和分析^[10].

如图 3 所示,在本文所设计的算法中,模糊理论的引入旨在运用特殊的隶属度函数,对专家给出的初步确定权重区间化,并将这些区间作为遗传算法的搜索空间,从而实现该算法在特定空间内对初步确定权重的微调.

表 1 铁路客运安全评价主要指标

Tab.1 Security evaluation index system for railway passenger transportation

风险源	评价指标	评估内容示例	指标编号	初步权重
火灾风险	安全检查	安检人员不到位,安检设备故障,安检工作不认真	1	0.038
	防火禁烟管理	对易燃易爆品查堵遗漏,禁烟宣传不到位,旅客在禁烟场所吸烟	2	0.135
	设施设备	消防设施、器材缺失,违章使用大功率电器,私接电线	3	0.034
旅客意外伤害风险	车站安全设施	站台设计不规范,站台设施不良,引导标语缺失,站台地面坑洼不平,电梯设备故障等	4	0.089
	车内安全设施	列车车门、防护栏、安全锤等设施缺失或损坏	5	0.066
事故救援不力风险	应急预案	对突发情况预想不足,应急预案内容不准确,动态更新不及时	6	0.126
拥挤、踩踏风险	进出站检票	旅客积压,检票系统故障	7	0.020
	旅客候车	候车组织不力,通道不通畅	8	0.148
	站台乘降	站台通道有积水,组织管理不当	9	0.007
旅客人身健康及财产风险	食品进货储存	进货渠道不规范,出售“三无”、变质食品,售饭监管不到位	10	0.100
基础管理风险	安全规章制度	制度建设不健全,规章管理欠缺	11	0.147
	旅客信息安全	自动售票机、验票机及站车监控视频信息管理的合法、合规性	12	0.090

2.2 指标权重的计算

目前,对于此类问题的指标权重确定方法可分为两类:第 1 类是由相关专家根据知识、经验判断各评价指标相对于评价目标的相对重要程度,后经过综合处理获得指标权重,如:专家调查法、层次分析法(AHP)^[11]等;第 2 类是直接依据各被评对象指标数据的特征来确定权重,如:标准离差法、灰色关联法、熵权法^[12]等.鉴于本文获得的样本数据量较少,所以首先排除对数据完备性要求较高的第 2 类方法.考虑到专家调查法在样本量较小时易受主观影响,偏离度较大,本文选用层次分析法作为权重初步确定的计算方法.层次分析法的主要步骤为:建立系统递阶层次结构、构造两两比较判断矩阵及一致性检验.表 1 第 5 列所示的是通过层次分析法得到指标初步权重值^[13].

3 权重变化区间的生成

鉴于层次分析法在专家的选取及专家评分上存

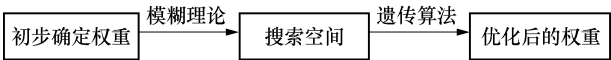


图 3 权重优化流程图

Fig.3 Flow chart of weight optimization

2 指标权重的初步确定

2.1 评价指标的遴选

对于铁路客运安全评价指标项的选取,国内目前还没有统一的标准.因此,本文基于实地调研,依据铁路客运安全中潜在的 6 类风险,建立了包含 12 项评价内容的主要评价指标(见表 1)用于算例验证.

在较大的随机性.因此,本文通过模糊理论初步确定权重值计算的变化区间,并以此确定优化算法的搜索空间.

3.1 隶属度函数的确定

首先取模糊集合 A1、A2、A3,分别表示指标权重“较小、适中、较大”3 个等级,并以此生成相应的隶属度函数,如图 4 所示.

由图 4 可知,本文对模糊集合选用与现实情况较为贴近的高斯隶属函数表示,如

$$\mu_{A_i} = e^{-\frac{(x-c_i)^2}{2\sigma^2}}, x \in (0,1), i = 1,2,3 \quad (1)$$

式中: c_i 表示均值; σ 表示方差.在参数的设定上,为了细分指标权重,本文通过初始权重值所形成的区间范围来确定正态隶属度函数的方差.即通过不断调整方差,使得模糊集 A2 的高斯隶属度函数在 x 轴上的截距正好等于由初始权重值所形成的区间.同时,为了不失一般性,本文中 3 个隶属度函数拥有相同的方差.在均值的设定上,3 个正态隶属度函数的均值分别设为初始指标权重集合中的最小值、均

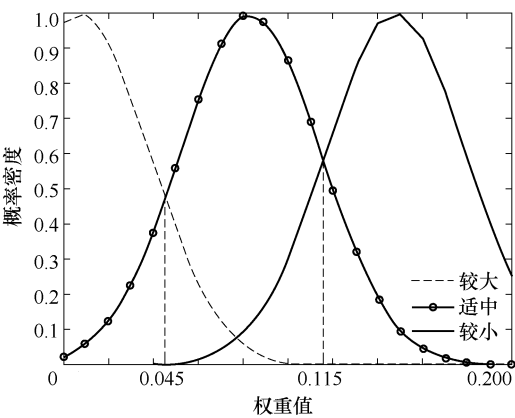


图 4 高斯隶属度函数

Fig.4 Gaussian membership function

值和最大值,以便于通过确定隶属度函数的位置,来更加均衡的覆盖权重指标^[14],相关参数见表 2.

表 2 隶属度函数参数

Tab. 2 Membership function parameters

参数标定	σ	c_i
A1	0.031	0.007
A2	0.031	0.080
A3	0.031	0.148

3.2 权重变化区间的确定

将各指标权重的初始值代入式(1)中计算隶属度,并根据最大隶属度原则,确定 12 个初始指标权重所处的等级.本文所要达到目的是确保指标权重变化不超出其现有的等级,通过式(1)可计算出图 3 中 3 种隶属度函数交点的横坐标对应的权重分别为 0.045 和 0.115.从而得出各指标权重的变化区间见表 3.

表 3 权重变化区间

Tab. 3 Weight variation interval

指标编号	初始权重	模糊判定	模糊集区间
1	0.038	较小	(0,0.045)
2	0.135	较大	(0.115,0.200)
3	0.034	较小	(0,0.045)
4	0.089	适中	(0.045,0.115)
5	0.066	适中	(0.045,0.115)
6	0.126	较大	(0.115,0.200)
7	0.020	较小	(0,0.045)
8	0.148	较大	(0.115,0.200)
9	0.007	较小	(0,0.045)
10	0.100	适中	(0.045,0.115)
11	0.147	较大	(0.115,0.200)
12	0.090	适中	(0.045,0.115)

表 3 第 3 列表示的是通过最大隶属度原则判定出的各指标权重所处的模糊等级,第 4 列表示的是各指标所处模糊集的范围,即指标权重被允许的变化区间.

4.指标权重的优化

4.1 指标打分数的生成

为了模拟评价过程,本文依据 12 个安全评价指标生成 12 组随机数,每组数据包含 5 000 个介于 0~100 的随机整数,作为各指标的初始打分数据.通过分析调研获得的专家打分数据发现,这些数据大致服从正态分布.因此,为了与实际情况尽可能地接近,12 组数据都是基于式(2)所示的林德伯格-莱维(Lindeberg-Levi)的中心极限定理生成的,服从正态分布的相互独立随机数列,且与调研所获得的数据拥有相同的均值和方差.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} p\left(\frac{1}{\sqrt{n}\sigma}\left(\sum_{i=1}^n X_i - n\mu\right) \leq x\right) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (2)$$

式(2)表示的是中心极限定理的主要内容.如果随机变量序列, X_1, X_2, \dots, X_n 独立同分布,并且具有有限的数学期望和方差 $E(X_i) = \mu, D(X_i) = \sigma^2 > 0$,则对一切 $x \in R$ 都满足式(2).因此,对于服从均匀分布的随机变量 X_i ,只要 n 足够大,随机变量 $(\sum_{i=1}^n X_i - n\mu) / \sqrt{n}\sigma$ 服从 $N(0,1)$.图 5 表示的是 10 组随机数据的正态分布曲线.

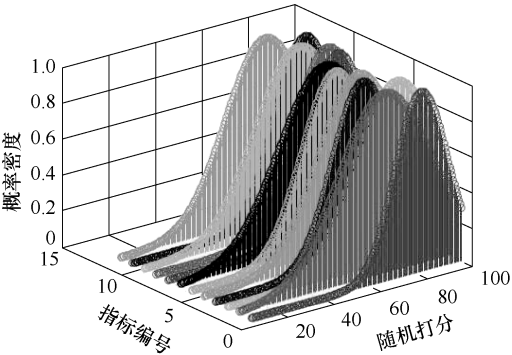


图 5 随机打分数分布

Fig.5 Distribution graphs of randomly fractional

4.2 优化目标

本文中,铁路客运安全评价结果将由多个指标得分加权求和得出.基于上述随机打分数据和初始指标权重,本文就得到了一组包含 5 000 个数据的评价结果,来模拟 5 000 次铁路客运安全评价.基于相同的随机打分数,不同的权重组合将生成不同的评价结果,因此本文将由一组评价指标的权重为计算单位,以由此计算出的一组评价结果的方差作为适应度函数,设计遗传算法来求解下列数学问题:

$$\max F = D(Y) \quad (3)$$

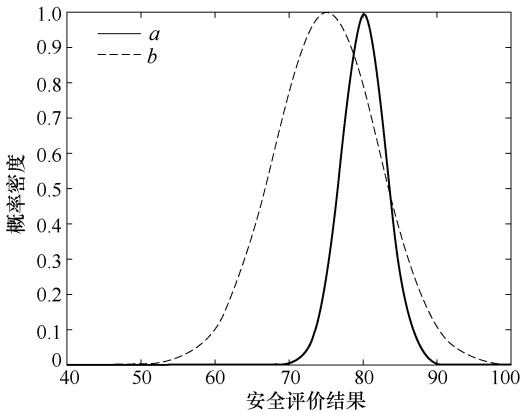
$$Y = Z \cdot X \quad (4)$$

$$x_i^1 \leq x_i \leq x_i^2, i \in 1, 2, \dots, 10 \tag{5}$$

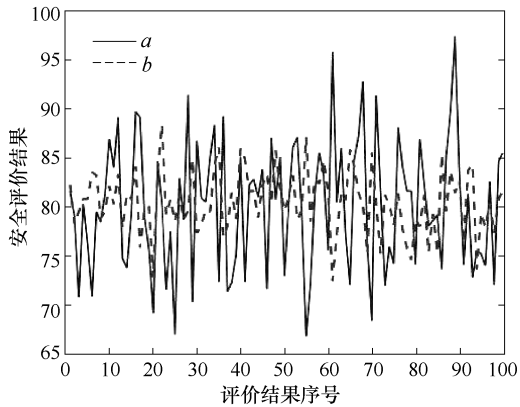
$$\sum_{i=1} x_i = 1, i \in 1, 2, \dots, 10 \tag{6}$$

式中: Y 表示生成的一组评价结果; Z 表示各指标的随机打分数矩阵; X 表示任意一组指标权重; x_i 表示该组中第 i 个指标的权重; x_1^i, x_2^i 分别表示该权重波动的上下界. 目标函数式(3)表示最大化一组评价结果的方差; 式(4)是评价结果生成的矩阵表现形式; 式(5)表明了所有的权重值不得超出其相应的波动区间; 式(6)表明处于同一组的权重值的和为 1.

在目前的研究中, 基于评价结果的方差来对指标权重进行负反馈调节的基本思想是, 如果某项指标的变化对评价结果而言没有明显变化, 则该属性的权重应为 0; 反之, 如果评价结果在某项指标上有较大的差异, 则该属性应赋予较大的权重. 而方差是统计学中反映差异程度的一个重要指标. 基于方差最大化的思想, 一组权重应使得相对应的评价结果总方差达到最大^[15], 从而使得评价结果在整体覆盖范围和对打分数的敏感性程度两个方面更加合理的解释实际情况, 如图 6 所示.



(a) 覆盖范围对比



(b) 打分值变动的敏感性对比

图 6 不同方差结果对比

Fig.6 Comparison of different variance results
如图 6(a)所示, 对于通过不同指标权重生成的

两组评价结果分布, 方差较大的 a 组评价结果分布跨越了 54~100 分的分值区间, 而 b 组评价结果仅跨越了 70~90 分的区间, 显然第一组评价结果更有利于评价工作中对不同铁路企业安全情况的区分. 同时, 较大的方差也使得评价结果在概率分布上更加均匀, 详细情况见图 6(b)所示. 对于通过相同的随机数生成的两组评价结果(随机选择 100 个), 拥有较大方差的 a 组评价结果其分布更加分散, 波动更加剧烈, 表明该组评价结果对于打分值的变动更加敏感, 可以更直观地反映打分值的变化所引起的评价结果的变化情况.

4.3 本文算法

在本文所设计的遗传算法中, 一个染色体是由一组指标权重构成的. 因此需要解决的主要问题是, 保证经历过变异和交叉的子代染色体, 仍然满足式(6), 即权重之和为 1 的条件. 本文通过单点交叉方法处理: 首先, 两个父代染色体在任一基因位发生交叉时, 基因总和将发生变化, 这部分变化将由没发生交叉的其他 11 个基因共同承担, 以保证子代染色体的基因总和为 1, 如图 7 所示.

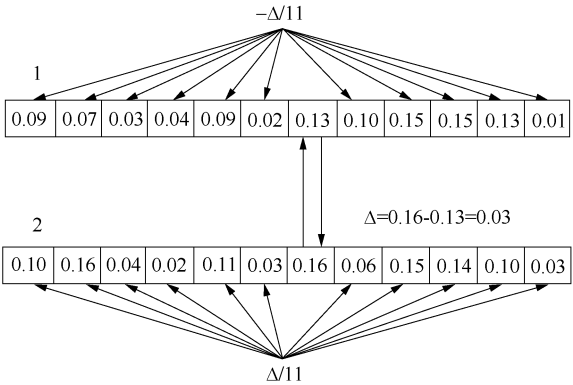


图 7 单点交叉方式

Fig.7 Single point crossing mode

图 7 中可知, 由于交叉过程使得染色体 1 的基因总和增加 Δ , 所以本文将染色体 1 的其他 11 个基因同时减少 $\Delta/11$, 染色体 2 的变化与此相反. 通过这种方法, 首先达到了基因交叉的目的, 保证了种群的多样性. 同时, 这种方法可以使得未发生交叉的基因变化程度较小, 不容易超出其所处的波动区间. 其次, 这种方式不会引起基因总和的变化.

4.4 结果分析

本文根据随机生成的打分数据、专家调研和模糊理论所得到的权重区间, 以及所设计的遗传算法, 进行指标权重的优化. 算法一共运行 5 次, 每次都是基于不同的随机打分数进行. 算法中交叉概率设为 0.9, 最大迭代次数为 1 000 次, 运算收敛情况见图 8.

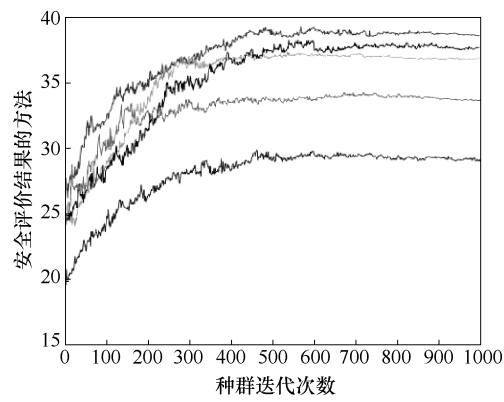


图 8 遗传算法收敛情况

Fig.8 Convergence of genetic algorithm

从图 8 中可知,在基于不同的随机打分数进行的多次优化中,算法均在 500 次左右实现收敛.为了不失一般性,取 5 次优化中最优染色体的平均值,并

将其归一化后,作为最终的指标权重,用于实际项目中评价结果的计算,见表 4.

表 4 中的第 8 列表示经过 5 次优化后的指标权重归一化均值,最后 1 列表示优化后权重的变化幅度,从表中可知,12 个指标权重经优化后的变化情况较为多样,变化幅度最小的为第 12 号指标,权重减少 1.78%,说明该指标的初始权重基本可以代表其在全部指标中的重要程度.变化幅度最大的为第 9 号指标(站台沉降),权重经优化后扩大了 261.22%,说明对于该指标的初始权重设定偏小,不足以说明其重要性.

为了验证该方案的合理性,本文根据表 4 中优化后的权重指标及初始权重指标,聘请相关专家对我国现有的 10 个铁路客运企业进行安全评价,评价结果对比见表 5.

表 4 权重优化及评价结果

Tab.4 Weight optimization and evaluation results

指标编号	初始权重	第 1 次优化	第 2 次优化	第 3 次优化	第 4 次优化	第 5 次优化	归一化均值	变化幅度/%
1	0.038	0.025	0.020	0.018	0.035	0.007	0.021	−45.38
2	0.135	0.159	0.181	0.133	0.159	0.194	0.165	22.39
3	0.034	0.029	0.018	0.035	0.038	0.022	0.028	−16.84
4	0.089	0.095	0.089	0.071	0.114	0.084	0.091	2.11
5	0.066	0.022	0.003	0.018	0.020	0.009	0.014	−78.69
6	0.126	0.129	0.124	0.118	0.120	0.116	0.122	−3.44
7	0.020	0.042	0.005	0.019	0.015	0.031	0.022	11.68
8	0.148	0.134	0.198	0.196	0.165	0.165	0.171	15.74
9	0.007	0.029	0.005	0.040	0.030	0.022	0.025	261.22
10	0.100	0.083	0.098	0.098	0.105	0.105	0.098	−2.15
11	0.147	0.154	0.173	0.148	0.122	0.174	0.154	4.75
12	0.090	0.099	0.086	0.106	0.078	0.072	0.088	−1.78

表 5 不同权重下的评价结果

Tab.5 Evaluation results under different weights

铁路局	指标 1	指标 2	指标 3	指标 4	指标 5	指标 6	指标 7	指标 8	指标 9	指标 10	指标 11	指标 12	结果 1	结果 2
郑州	94.9	93.9	54.4	64.2	95.3	98.5	65.4	56.4	30.2	94.2	81.3	80.8	81.1	78.9
太原	40.3	88.7	53.6	58.1	79.5	73.3	58.7	45.2	36.8	32.7	47.4	78.8	60.4	59.7
北京	49.4	99.0	72.3	88.3	54.4	99.6	72.7	89.6	88.9	87.6	94.4	96.6	88.4	91.1
济南	84.5	85.1	99.8	99.6	32.7	99.0	63.9	91.1	55.6	82.9	75.8	31.8	79.2	81.3
成都	95.6	47.0	57.7	77.0	73.7	79.1	59.7	86.0	31.5	95.2	97.5	95.2	80.2	78.6
南宁	40.5	35.1	49.7	84.0	70.9	78.6	87.8	74.4	58.4	54.8	75.8	87.4	67.7	67.1
上海	65.9	79.5	87.8	88.3	39.1	99.5	88.4	96.7	80.5	91.1	97.7	98.5	88.2	90.8
武汉	59.0	97.2	51.1	94.9	30.3	97.7	92.1	99.2	56.1	96.1	81.3	89.6	86.4	89.9
南昌	69.4	37.1	52.2	59.5	83.8	79.2	82.4	46.3	58.8	47.9	81.8	43.4	59.9	57.6
兰州	51.8	91.9	50.1	78.5	36.0	81.5	63.2	93.0	50.7	92.0	84.9	60.2	78.2	81.2
方差	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	114.4	152.1

表 5 中,“结果 1”列表示基于初始权重计算出 的评价结果,“结果 2”列表示基于优化后的权重计

算出的评价结果,由最后一行的数据可知,经权重优化后,对 10 个铁路客运企业的安全评价结果的方差由原来的 114.4 提升为 152.1,扩大了 33%.结果分布更加分散,有效的区分了不同铁路客运企业的现有安全状况,从而为相关铁路客运企业的安全监督与管理提供数据参考.

5 结 论

本文基于模糊理论和遗传算法建立的反馈调节机制,提出了一种解决安全评价中指标权重确定的量化方法,一定程度上弥补了此类问题面临的主观性较强的缺陷.基于本文得出的结果,对全文做出如下总结:

1)模糊理论在弱化专家打分的主观性方面,具有一定的可行性.研究表明:通过模糊理论,以专家打分数为基础生成模糊区间,可在充分尊重专家打分值的基础上,降低专家打分时的主观性,提升评价结果的可信度.

2)以评价结果的方差作为评价结果优劣的评判标准,具有一定的合理性.研究表明:对多组随机打分数所生成的多次评价结果的方差,可以在评价范围的覆盖率以及对评分变化的敏感性两个方面评判评价结果的优劣性,从而构成对权重指标的负反馈调节机制.

3)基于模糊理论所设计的遗传算法在指标权重优化方面,表现良好.在选定以方差作为评判评价结果优劣的指标后,通过对实际案例的对比分析,对于相同的 10 组打分数,经过优化后的权重所得出的评价结果,其方差提高了 33%,说明方法有效.

在今后的研究中应选取更丰富的指标来进一步验证方法的科学性和有效性.同时,多次评价结果的得出是基于多次生成的随机打分数,这一方法不可避免地使得最终的优化结果存在一定的随机性和偶然性.在将来的研究中,应着重注意该部分的创新和验证.

参考文献 (References):

[1] 肖贵平. 铁路行车安全评价研究[J]. 中国安全科学学报, 1995(4):32—36.
XIAO Guiping. Study on railway traffic safety evaluation [J]. China Safety Science Journal, 1995(4): 32—36. (in Chinese)

[2] 宋祥波, 肖贵平, 聂磊. 铁路安全评价方法的探讨与分析[J]. 工业安全与环保, 2006, 32(12):34—36.
SONG Xiangbo, XIAO Guiping, NEI Lei. Discussion and analysis of railway safety evaluation method [J]. In-

dustrial Safety and Environmental Protection, 2006, 32 (12):34—36. (in Chinese)

[3] 刘敬辉, 戴贤春, 郭湛. 铁路系统基于风险的定量安全评估方法[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 123—128.
LIU Jinghui, DAI Xianchun, GUO Zhan. Research on passenger flow structure and high speed railway operation strategy of middle long distance channel [J]. Journal of China Railway Sciences, 2009, 30(5): 123—128. (in Chinese)

[4] 杜彦华, 吴秀丽, 钱程. 基于科学工作流的铁路行车安全评价系统研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(12):76—82.
DU Yanhua, WU Xiuli, QIAN Cheng. Research on train operation safety evaluation system based on scientific workflow [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(12):76—82. (in Chinese)

[5] LEIGHTON C , DENNIS C R. Risk assessment of a new high speed railway [J]. Quality & Reliability Engineering International, 2010, 11(6):445—455.

[6] CESARIO P, SACCO N, SCIUTTO M. A discrete time markov chain approach to global risk analysis in railway transportation[C]// COMPRAIL, 2008:123—131.

[7] HAILE J P. Quantified risk assessment in railway system design and operation [J]. Quality & Reliability Engineering International, 2007, 11(6):439—443.

[8] 郑丽媛, 高宁波, 胡启洲. 基于集成法的高速铁路运营安全综合评价[J]. 交通信息与安全, 2015, 33(3):65—70.
ZHENG Liyuan, GAO Ningbo, HU Qizhou. A comprehensive evaluation of high-speed railway operation safety based on an integrated method [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2015, 33(3):65—70. (in Chinese)

[9] 李映红, 赵小会. 铁路编组站安全评价研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2013(4): 25—30.
LI Yinghong, ZHAO Xiaohui. Research on safety evaluation of railway marshaling station [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2013(4): 25—30. (in Chinese)

[10] 刘世豪, 刘志刚. 地铁安全性能模糊综合评价模型及其应用研究[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(3): 100—104.
LIU Shihao, LIU Zhigang. Research on fuzzy comprehensive evaluation model for subway safety performance and its application [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(3): 100—104. (in Chinese)

[11] 郭湛, 商小雷, 李海. 基于 AHP 的轨道交通安全评价体系模型[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(3): 123—125.