

文章编号: 1003-1421(2022)08-0103-07 中图分类号: U238;U284.59 文献标识码: A
DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2022.08.16

基于云模型和组合赋权法的高速铁路 行车调度系统可靠性评估

Reliability Evaluation of High Speed Railway Traffic Control System Based on Cloud Model and Combined Weighting Method

孙延浩^{1,2}, 张涛^{1,2}, 王涛^{1,2}, 丁舒忻^{1,2}, 盛凯^{1,2}, 李智^{1,2}
SUN Yanhao^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2}, WANG Tao^{1,2}, DING Shuxin^{1,2}, SHENG Kai^{1,2}, LI Zhi^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 通信信号研究所, 北京 100081; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 国家铁路智能运输系统工程技术研究中心, 北京 100081)

(1. Signal & Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. The Center of National Railway Intelligent Transportation System Engineering and Technology, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

摘要: 高速铁路行车调度系统的可靠性关系到整个高速铁路运输系统的安全, 对其展开可靠性评估对于保证高速铁路行车调度系统的安全, 提高系统的抗风险能力具有重要意义。考虑到高速铁路行车调度系统的复杂性, 提出一种基于云模型和组合赋权法的评估方法。该方法采用云模型对系统的可靠性进行表征, 并分别利用 G1 法和 CRITIC 法来计算系统设备的主客观权重, 在此基础上通过基于博弈论思想的组合赋权法获取设备的组合权重, 然后根据云模型的加权运算求得高速铁路行车调度系统可靠性评估云, 将其与可靠性等级评语云进行相似性度量, 进而得到评估结果。最后将该方法运用到某条高速铁路行车调度系统的可靠性评估中, 评估结果表明该系统运行良好, 可以实现高速铁路行车调度系统的主要功能。

关键词: 高速铁路; 调度系统; 可靠性评估; 博弈论; 组合赋权法; 云模型

Abstract: The reliability of a high speed railway traffic control system is related to the safety of the entire high speed railway transportation system, and its reliability assessment is of great significance to ensuring safe traffic control systems and improving their anti-risk capability. Considering the complexity of the high speed railway traffic control system, this paper proposed an evaluation method based on the cloud model and combined weighting method. The method employed the cloud model to characterize the reliability of the system, and the G1 method and CRITIC method were adopted to calculate the subjective and objective weights of the system equipment. The combined weighting method based on game theory was leveraged to obtain the combined weight of the equipment. Then the reliability evaluation cloud of the high speed railway train traffic control system was obtained according to the weighted operation of the cloud model, and the similarity was measured with the comment cloud to get evaluation results. Finally, the method was applied to the reliability evaluation of a high speed railway traffic control system. Results show that the system works well and can realize the main functions of a traffic control system.

Keywords: High Speed Railway; Traffic Control System; Reliability Assessment; Game Theory; Combined Weighting Method; Cloud Model

引用格式: 孙延浩, 张涛, 王涛, 等. 基于云模型和组合赋权法的高速铁路行车调度系统可靠性评估[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(8): 103-109.
SUN Yanhao, ZHANG Tao, WANG Tao, et al. Reliability Evaluation of High Speed Railway Traffic Control System Based on Cloud Model and Combined Weighting Method[J]. Railway Transport and Economy, 2022, 44(8): 103-109.

0 引言

高速铁路行车调度系统(以下简称“高铁行调系统”)是高速铁路运输系统的神经中枢,对于保障高速列车的安全、正点、高效运行发挥着巨大的作用^[1]。随着科技的不断进步,我国高铁行调系统以分散自律调度集中系统为基础,实现了以列车运行计划控制为中心的调度指挥自动化和远程化。高铁行调系统既是一个现代化的调度指挥管理信息系统,也是一个复杂的人-机巨系统^[2]。对于高铁行调系统而言,其设备和功能模块众多且结构复杂,人们关注的焦点往往不是设备本身的可靠性,而是系统运行的可靠性。但由于该系统的复杂性,很难用精确的数值来对其可靠性进行评估。因此,众多专家从系统论的角度出发将粗糙集理论、模糊集理论引入到此类复杂系统的可靠性评估中,不少学者为此展开了深入的研究, Gaonkar 等^[3]使用模糊逻辑规则库的模糊集映射,将其用于评估海上运输系统的运行可靠性; Kabir 等^[4]回顾模糊集理论在系统安全性和可靠性分析中的应用,并强调模糊集理论在解决不确定性问题方面的潜在作用;王保帅等^[5]采用层次分析法和群决策理论对某型号智能电表进行可靠性分配,再对基于该分配结果的设计方案进行可靠性预计评估; zhang 等^[6]利用区间值三角模糊和模糊贝叶斯网络对通信系统的数字保护系统进行模糊可靠性评估;黄海^[7]通过构建预测停电时间的粗糙集模型,来计算配电网的可靠性。

可以看出,大部分方法基本上是以模糊集或者粗糙集来对系统的可靠性指标进行表征,然而对于高铁行调系统这种复杂的系统来说,其可靠性指标还存在着巨大的不确定性和随机性,同时上述方法在可靠性指标的权重计算上也存在不足,一般常采用单一赋权法或简单的线性组合赋权法。为此,研究提出一种基于博弈论的组合赋权和云模型的系统可靠性评估方法,该方法既可以提高权重计算的准确性,又能很好地表征计算的随机性和模糊性,将其运用到高铁行调系统的可靠性评估中应用效果良好,可以为高铁行调系统的可靠性评估提供一定的理论基础和依据。

1 组合赋权法

对于高铁行调系统的可靠性评估来说,权重的获取十分重要。在指标的赋权过程中,不仅要体现主观性,更要体现客观性,单一的赋权方法不足以完全反映出指标的真实权重,为了使指标的赋权更加科学准确,分别运用 G1 法和 CRITIC(Criteria Importance Though Intercriteria Correlation, CRITIC)法来获取指标的主客观权重。并采用基于博弈论思想的组合赋权的方法将两者进行有机结合以获取指标的最终权重。

1.1 G1 法确定主观权重

G1 法是一种对层次分析法改进的主观赋权法,相较于层次分析法,它无需构建判断矩阵和一致性检验,其计算简便且效果良好,因而常用来赋权^[8]。其基本步骤如下。

(1) 确定各指标的重要性排序。假定指标集为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 确定指标集中的最重要指标,记为 x'_1 , 接着筛选次重要指标记为 x'_2 , 依此类推,直到所有指标按重要性排序完毕,记为 $X' = \{x'_1, x'_2, \dots, x'_n\}$ 。

(2) 确定各指标的相对重要程度。指标重要性判断标准如表 1 所示,根据表 1 对 X' 中指标的重要度进行判断,则 x'_{i-1} 与 x'_i 的重要性之比为 r_i , 计算公式为

$$r_i = \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中: λ_i 为第 i 个指标的权重; λ_{i-1} 为第 $i-1$ 个指标的权重。

表 1 指标重要性判断标准

Tab.1 Criteria for judging the importance of indicators

r_i	说明
1.0	指标 x'_{i-1} 与指标 x'_i 同等重要
1.2	指标 x'_{i-1} 比指标 x'_i 稍微重要
1.4	指标 x'_{i-1} 比指标 x'_i 明显重要
1.6	指标 x'_{i-1} 比指标 x'_i 强烈重要
1.8	指标 x'_{i-1} 比指标 x'_i 极端重要

(3) 计算各指标权重。利用 r_i 值, 计算第 n 个指标 λ_n 的权重值。

$$\lambda_n = \left(1 + \sum_{i=2}^n \prod_{k=i}^n r_k \right)^{-1} \quad (2)$$

其他指标的权重计算如下。

$$\lambda_{i-1} = r_i \lambda_i \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

1.2 CRITIC 确定客观权重

与常见的熵权法和标准离差法不同，CRITIC 法在计算权重时，同时考虑变异性和关联性对指标的影响，因而获取的权重更加可信^[9]。CRITIC 法的基本步骤如下。

(1) 计算各指标的标准差。标准差 σ_i 计算公式为

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{q=1}^m (y_{q,i} - \bar{y}_i)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中： $y_{q,i}$ 为第 q 个样本中指标 i 的值； \bar{y}_i 为 m 个样本中指标 i 的均值。

(2) 计算指标间的冲突性。指标 i 与其他指标的冲突性 p_i 计算公式为

$$p_i = \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{Cov(i, j)}{\sigma_i \sigma_j} \right) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中： $Cov(i, j)$ 为指标 i 和指标 j 的协方差； σ_i 和 σ_j 分别为指标 T_i 和指标 T_j 的标准差。

(3) 计算指标所包含的信息量。指标 i 所包含的信息量 c_i 计算公式为

$$c_i = \sigma_i p_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

(4) 计算客观权重。指标 i 的客观权重 ω_i 计算公式为

$$\omega_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^n c_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

1.3 基于博弈论组合赋权法

相较于简单的线性组合，基于博弈论思想的组合赋权法充分考虑不同权重间的相互关系，兼顾每种方法计算得出的权重^[10]。在利用 G1 法获取主观权重和 CRITIC 法获取客观权重的基础上，以 Nash 均衡作为协调目标，在 2 种权重之间寻找一致和妥协，即寻找最小化组合权重与主客观权重之间的偏差，并使偏差之和达到最小。基于博弈论的组合赋权步骤如下。

(1) 构建组合权重向量。采用简单线性组合的形式构建组合权重向量 W 的计算公式为

$$W = \alpha_1 A^T + \alpha_2 \Omega^T \quad (8)$$

式中： $A = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ 为主观权重向量； $\Omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 为客观权重向量； α_1 和 α_2 分别为主观权重向量和客观权重向量的线性组合系数。

(2) 优化权值。目的是使计算出的组合权重向量 W 与参与优化的权重向量 A, Ω 之间的偏差达到最小。可通过建立以下目标函数，实现对优化系数的确定。

$$\begin{cases} \min \|W^T - A\|_2 \\ \min \|W^T - \Omega\|_2 \end{cases} \quad (9)$$

根据矩阵的微分性质，得到公式 (9) 的一阶导数转化为线性方程组

$$\begin{bmatrix} AA^T & A\Omega^T \\ \Omega A^T & \Omega\Omega^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AA^T \\ \Omega\Omega^T \end{bmatrix} \quad (10)$$

求解公式 (10)，然后归一化处理，得

$$\begin{cases} \alpha_1^* = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \\ \alpha_2^* = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \end{cases} \quad (11)$$

(3) 确定组合权重向量。根据计算结果，最终可获得优化后的组合权重向量 W 为

$$W = \alpha_1^* A^T + \alpha_2^* \Omega^T \quad (12)$$

式中： α_1^* 和 α_2^* 分别为优化后的组合系数。

2 云模型

2.1 云模型基本概念

云模型是一种可以实现定量数值和定性概念相互转换的理论模型，相较于传统隶属函数，它可以更好地反映变量的随机性和模糊性，因而被广泛用于自然语言处理、多属性决策、数据挖掘和智能控制等领域。

其构建过程如下：假定 C 为论域 U 上的定性概念，定量数值 $x \in U$ ，同时 x 也是 C 的一次随机实现，若 x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是具有稳定倾向的随机数，则称 $\mu(x)$ 在论域 U 上的分布为云，每个 $(x, \mu(x))$ 称为一个云滴。云模型一般通过数字特征期望值 Ex 、熵 En 和超熵 He 来刻画信息，通常将云模型记为 $C[Ex, En, He]$ ，其中期望值 Ex 为云滴在论域空间分布的期望，熵 En 为定性概念确定性的可度量程度，它反映了云滴中可被

期望概念接受的确定度大小和云滴的离散程度，超熵 He 为熵的确定性度量。通过改变期望值 Ex 、熵 En 和超熵 He 以及云滴的个数可以生成不同的云图，如给定云模型 $C[Ex, En, He] = C[0, 0.12, 0.01]$ ，1 000 个云滴生成的云图，云模型示意图如图 1 所示。

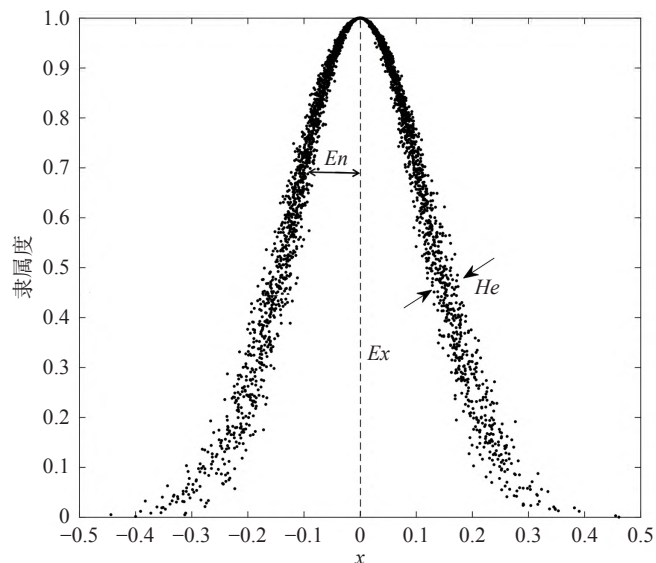


图1 云模型示意图
Fig.1 Cloud model

2.2 云模型的加权运算

由于客观世界大多数随机行为一般近似服从正态分布，因而研究采用正态云模型来描述高铁行调系统可靠性参数。对于正态云模型来说，一般采用双边约束 $[l_{min}, l_{max}]$ 来计算云模型的数字特征，即

$$\begin{cases} Ex = \frac{c_{min} + c_{max}}{2} \\ En = \frac{c_{max} - c_{min}}{6} \\ He = \eta \end{cases} \quad (13)$$

式中： l_{min} 、 l_{max} 分别为可以获取到的极小值和极大值； η 为常数，它反映了取值随机性的大小， η 通常为评语集最大值的百分之一，其值一般为 0.01^[11]。

在获取到云模型的数字特征后，还需要对其进行相应的运算，由于研究只用到加权运算，在这

里只对加权运算的规则做说明。假定第 i 个 ($i=1, 2, \dots, n$) 设备可靠性的云模型参数为 $C[Ex_i, En_i, He_i]$ ，其权重为 w_i ， $w_i > 0$ 且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ ，则加权运算规则如下^[12]。

$$\begin{cases} Ex = \sum_{i=1}^n Ex_i \times w_i \\ En = \sqrt{\sum_{i=1}^n En_i^2 \times w_i} \\ He = \sum_{i=1}^n He_i \times w_i \end{cases} \quad (14)$$

3 高速铁路行车调度系统可靠性评估

3.1 案例描述

我国高铁行调系统采用调度集中制，通过结合通信、信号、运输组织、远程控制、计算机网络等多学科技术，将现场实时信息传送到调度台，调度员根据现场信息，利用调度台下达运行计划，发布调度命令，处理突发情况，协调其他部门和系统来监控和指挥高速铁路的正常运行。为了提高系统的安全管理水平，对某铁路局集团公司下辖的某条线路高铁行调系统进行可靠性评估，高铁行调系统结构示意图如图 2 所示。

根据其结构和功能，构建功能结构层次模型，高铁行调系统功能结构层次模型如图 3 所示。功能结构层次模型分为 3 层，第一层为目标层，表示研究的最终目的，第二层为中间层，表示调度系统的功能，第三层为设备层，表示调度系统的设备构成，行车调度系统的功能分别需要相应的设备来支撑^[13]。

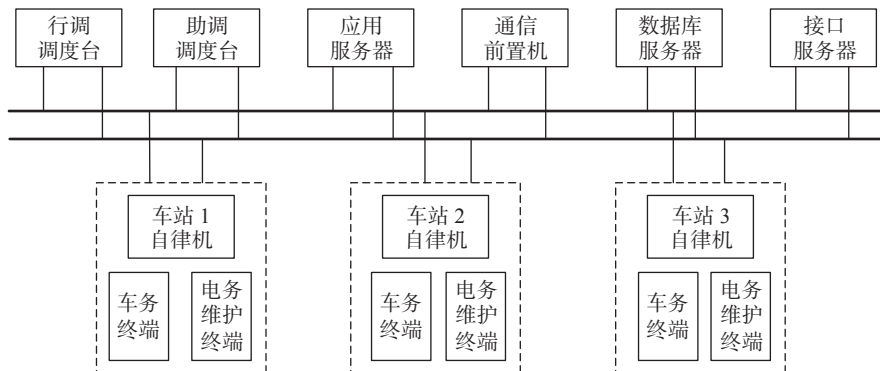


图2 高铁行调系统结构示意图

Fig.2 Structure of high speed railway traffic control system

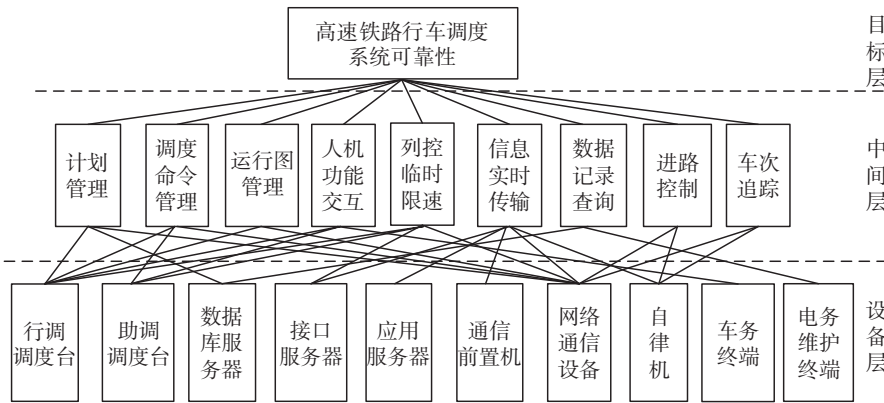


图3 高铁行调系统功能结构层次模型

Fig.3 Hierarchical model of functional structure of high speed railway traffic control system

目标层
中间层
设备层

论思想对线性组合系数进行优化，根据公式(8)至公式(12)得到优化后的组合系数 $\alpha_1^* = 0.428, \alpha_2^* = 0.572$ ，最后通过组合系数计算设备的组合权重。设备权重如表2所示。

(2) 获取各设备可靠度云数字特征。对于高铁行调系统各设备的可靠度，通过现场数据调研，利用设备无故障运用时间与设备规定运用时间之比来确定，计算公式为

$$\text{设备可靠度} = \frac{\text{设备无故障运行时间}}{\text{设备规定使用时间}} \times 100\% \quad (15)$$

由于各设备的数量均不唯一，因而各设备的可靠度存在极小值和极大值，采用双边约束的方法，利用公式(13)来获取云数字特征。设备云数字特征如表3所示。

(3) 确定可靠性等级评语集。根据相关领域专家经验以及参考文献[14]，将可靠性等级评语集的论域设为[0, 1]，并将高速铁路行调系统可靠性程度的评语集划分为5个等级，分别为：“出现致命故障，保持最低功能，保持基本功能，保持主要功能，保持全部功能”，评价集云数字特征如表4所示。将可靠性评语集生成云图得到可靠性评语云，可靠性评语云如图5所示。

(4) 云数字特征的加权运算。利用公式(14)，对各设备可靠度的云数字特征进行加权运算，得到高速铁路行调系统可靠性评估云数字特征 $C[Ex, En, He] =$

3.2 基于云模型和组合赋权法的可靠性评估

对于高铁行调系统可靠性的评估，研究采用基于组合赋权法和云模型相结合的方法来评估该条高铁线路的行车调度系统。首先，通过基于博弈论的组合赋权法来计算设备的权重；其次，通过现场数据来获取设备的评估云的数字特征；再次，制定相应的评语集，形成评语云；最后，将设备的评价进行加权云计算，形成系统的可靠性评估结果云。并将可靠性评估结果云与评语云进行相似性度量，进而得出可靠性评估结果，高铁行调系统可靠性评估流程如图4所示。

(1) 计算权重。分别利用G1法和CRITIC法计算底层设备的主客观权重和客观权重，再利用博弈

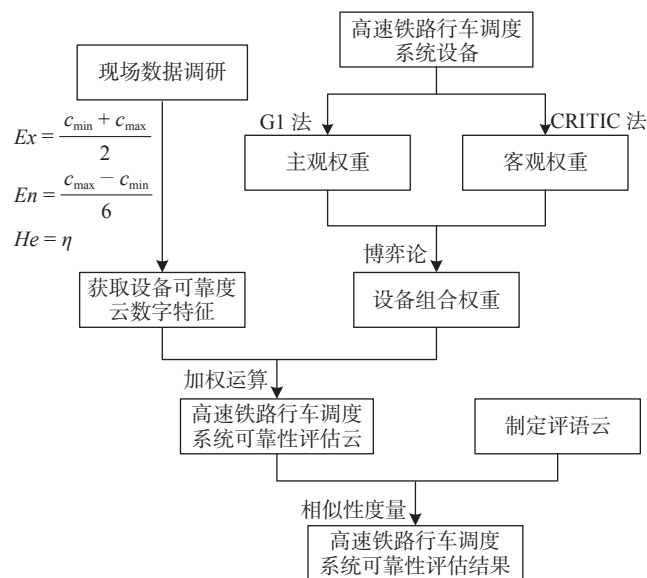


图4 高铁行调系统可靠性评估流程

Fig.4 Reliability assessment of high speed railway traffic control system

表2 设备权重

Tab.2 Equipment weights

设备名称	主观权重	客观权重	组合权重
行调调度台	0.112	0.124	0.119
助调调度台	0.117	0.108	0.112
数据库服务器	0.100	0.076	0.086
接口服务器	0.083	0.093	0.089
应用服务器	0.123	0.116	0.119
通信前置机	0.105	0.088	0.095
网络通信设备	0.109	0.096	0.102
自律机	0.101	0.112	0.107
车务终端	0.086	0.102	0.095
电务维护终端	0.064	0.085	0.076

表 3 设备云数字特征
Tab.3 Equipment cloud digital features

设备	云数字特征		
	Ex	En	He
行调度台	0.915	0.003	0.010
助调调度台	0.911	0.003	0.010
数据库服务器	0.972	0.001	0.010
接口服务器	0.897	0.012	0.010
应用服务器	0.934	0.002	0.010
通信前置机	0.886	0.018	0.010
网络通信设备	0.754	0.023	0.010
自律机	0.793	0.022	0.010
车务终端	0.808	0.015	0.010
电务维护终端	0.791	0.017	0.010

表 4 评价集云数字特征
Tab.4 Cloud digital features of evaluation grades

评价等级	数字特征			含义
	Ex	En	He	
出现致命故障	0	0.143	0.014	系统基本丧失全部功能，极易发生重大事故和人员伤亡
保持最低功能	0.490	0.060	0.006	系统故障达到临界，主要依靠非常站控模式运行
保持基本功能	0.690	0.053	0.005	系统有故障，系统性能下降，运输效率降低
保持主要功能	0.830	0.040	0.004	系统运行良好，故障可以得到及时处理，系统的主要功能都能够得以实现
保持全部功能	1.000	0.020	0.002	系统无任何故障，可以实现全部功能

$C[0.868, 0.014, 0.010]$ 。根据云数字特征来绘制云图，高速铁路调度系统可靠性评估云如图 6 所示。

(5) 评价结果。由图 6 可知，高铁行调系统可靠性评估云的期望值 $Ex=0.868$ ，处于“保持主要功能”和“保持全部功能”之间，更为偏向“保持主要功能”。为了使评价结果更为可靠准确，参考文献 [15] 提出的基于期望曲线相似程度和最大边界曲线的相似性度量方法对其进行相似性度量，可以得出高铁行调系统可靠性的评估云与“保持主要功能”的评语云更为相似。因此，该条高速铁路行车调度系统的可靠性评估结果为“保持主要功能”，即系统运行良好，可以实现高铁行调系统的主要功能。

4 结束语

近年来，我国高速铁路发展迅速，相较于普

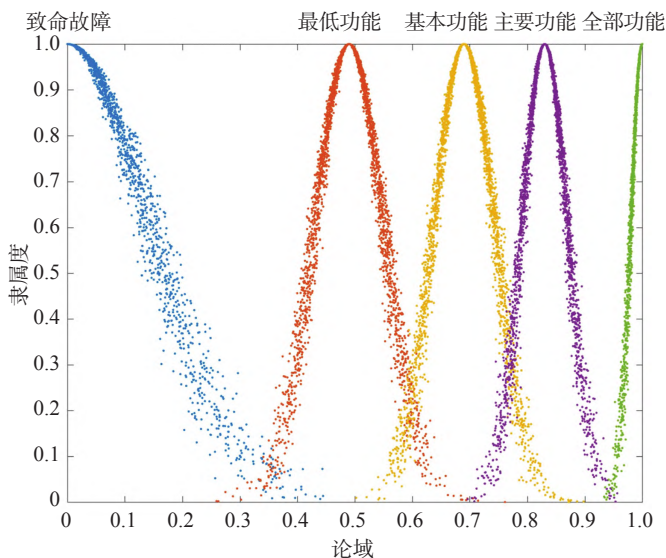


图 5 可靠性评语云
Fig.5 Reliability comment cloud

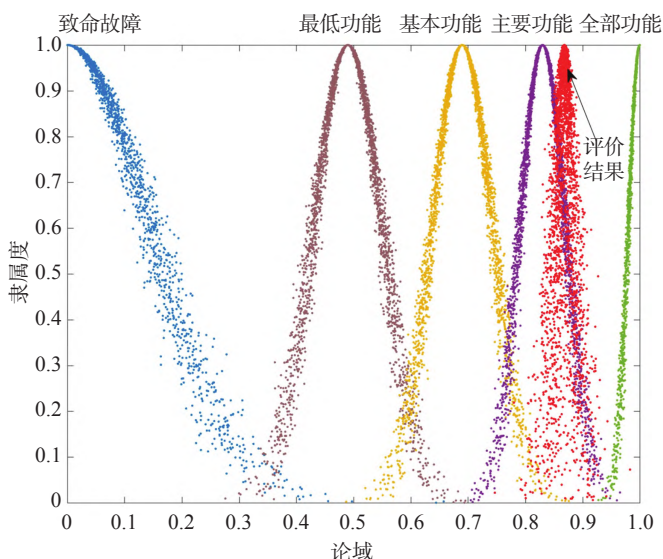


图 6 高速铁路调度系统可靠性评估云
Fig.6 Reliability evaluation cloud of high speed railway traffic control system

速铁路，高速铁路高密度、高速度的运营特点使得其行车安全成为重中之重。高铁行调系统作为高速铁路运输系统的神经中枢，其可靠性显得尤为重要。由于高铁行调系统的复杂性，对其进行系统级的可靠性评估存在较大的困难。为克服这种困难，以云模型作为系统可靠性的评估语言，结合基于博弈论思想的组合赋权法，通过加权运算，对高铁行调系统的可靠性进行评估，得到系统的可靠性评估等级，相较于单一的数值评价，在评估结果上更加直观。该方法在运用到现场高铁行调系

统的可靠性评估中时,也取得了良好的应用效果,但由于仅对某条线路的设备进行了数据收集,因而在样本数量及数据调研方面还存在一定的不足,下一步将对现场数据的收集进行相应的改善。

参考文献:

- [1] 赵宏涛,陈峰,许伟,等.基于云边协同的高速铁路智能行车调度系统研究[J].铁道运输与经济,2021,43(1):71-76.
ZHAO Hongtao, CHEN Feng, XU Wei, et al. High Speed Railway Intelligent Traffic Control System Based on Cloud Edge Collaboration[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(1): 71-76.
- [2] DENG Z, DENG N. Security Construction of High Speed Railway Dispatching Systems[C]//ICTE 2013. Safety, Speediness, Intelligence, Low-Carbon, Innovation. Reston: American Society of Civil Engineers, 2013: 871-879.
- [3] GAONKAR R S P, XIE M, NG K M, et al. Subjective Operational Reliability Assessment of Maritime Transportation System[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(11): 13835-13846.
- [4] KABIR S, PAPADOPOULOS Y. A Review of Applications of Fuzzy Sets to Safety and Reliability Engineering[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2018(100): 29-55.
- [5] 王保帅,尹家悦,胡珊珊,等.基于层次分析法和群体决策的智能电能表可靠性分配技术研究[J].电测与仪表,2021,58(12):169-174.
- [6] ZHANG R J, ZHANG L L, WANG N N, et al. Reliability Evaluation of a Multi-State System Based on Interval-Valued Triangular Fuzzy Bayesian Networks[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2016, 7(1): 16-24.
- [7] 黄海.基于粗糙集理论的配电网可靠性评估[D].南宁:广西大学,2013.
- [8] 王朝阳,薛锋,陈崇双.基于组合赋权TOPSIS法的城市轨道交通装备制造制造业集群竞争力评价[J].铁道运输与经济,2021,43(11):100-106.
WANG Zhaoyang, XUE Feng, CHEN Chongshuang. Competitiveness Evaluation of Urban Rail Transit Equipment Manufacturing Industrial Cluster Based on Combination Weighting TOPSIS Method[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(11): 100-106.
- [9] ŽIŽOVIĆ M, MILJKOVIĆ B, MARINKOVIĆ D. Objective Methods for Determining Criteria Weight Coefficients: a Modification of the CRITIC Method[J]. Decision Making: Applications in Management and Engineering, 2020, 3(2): 149-161.
- [10] 薛亮,赵胜川.基于PSR模型及博弈组合赋权的城市轨道交通运营水平评价研究[J].铁道运输与经济,2021,43(5):123-129.
XUE Liang, ZHAO Shengchuan. Urban Transit Operation Evaluation Based on PSR Model and Game Combination Weighting[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(5): 123-129.
- [11] 何乐平,徐应东,胡启军,等.基于博弈论-云模型的软岩隧道大变形风险评估[J].现代隧道技术,2021,58(6):85-94.
- [12] WU H W, ZHEN J, ZHANG J. Urban Rail Transit Operation Safety Evaluation Based on an Improved CRITIC Method and Cloud Model[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2020(16): 100206.
- [13] 孙延浩.高速铁路行车调度系统可靠性评估方法研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2020.
- [14] 张友鹏,杨金凤.基于云模型和组合赋权法的CTCS-3级列控系统可靠性评价[J].铁道学报,2016,38(6):59-67.
ZHANG Youpeng, YANG Jinfeng. Reliability Evaluation of CTCS-3 Based on Cloud Model and Combination Weighting Method[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(6): 59-67.
- [15] 李海林,郭崇慧,邱望仁.正态云模型相似度计算方法[J].电子学报,2011,39(11):2561-2567.
LI Hailin, GUO Chonghui, QIU Wangran. Similarity Measurement between Normal Cloud Models[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(11): 2561-2567.

收稿日期:2022-04-11

通信作者:丁舒忻(1991—),男,江西南昌人,中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所副研究员。

基金项目:国家自然科学基金高铁联合基金(U1834211);中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2021YJ097);北京华铁信息技术有限公司科研项目(2021HT02)

责任编辑:吴文娟