

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2023.02.011

基于云模型和组合赋权法的 CBTC 系统可靠性评价

何涛^a, 马洁^b

(兰州交通大学 a. 甘肃省工业交通自动化工程技术研究中心;

b. 自动化与电气工程学院, 兰州 730070)

摘要: 由于目前对 CBTC 系统的可靠性分析较少, 提出一种基于云模型和组合赋权法的 CBTC 系统的可靠性评价方法。首先根据 CBTC 系统的结构和功能, 建立了系统的功能型层次模型, 并采用组合赋权法确定底层设备的主观和客观权重值, 根据加法合成法得到系统的综合权重值; 然后, 计算 CBTC 系统底层设备的可靠度, 并使用云模型表示; 最后, 将虚拟云计算的 CBTC 系统可靠性综合指标新云和可靠性评价集的云模型进行相似度比较, 输出评价结果。结果表明, 基于云模型和组合赋权法的 CBTC 系统可靠性评价方法可以正确客观地描述该城市的 CBTC 系统完成规定功能的能力, 为研发和评估 CBTC 系统提供借鉴。

关键词: CBTC 系统; 可靠性评价; 云模型; 组合赋权法

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)02-130-010

Reliability evaluation of CBTC based on cloud model and combination weighting method

HE Tao^a, MA Jie^b

(a. Gansu Research Center of Automation Engineering Technology for Industry & Transportation,

b. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University,

Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: Since there are few reliability analysis of Communication Based Train Control System (CBTC) system, this paper presented a comprehensive evaluation method for reliability evaluation of the CBTC system based on the cloud model and the combination weighting method. Firstly, according to the structure and function of CBTC system, the functional hierarchical model of the system was established, and the subjective and objective weights of the underlying equipment were determined by the combination weighting method. The integrated weight value of the system was obtained according to the additive synthesis method. Secondly, the cloud model was used to represent the reliability of the underlying device

收稿日期: 2021-10-12

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题(2016X003-H); 甘肃省工业交通自动化工程技术研究中心 2019 年开放基金(GSITA201903); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(201901BX01)。

Supported by China Railway Corporation Science and Technology Research and Development Key Program (2016X003-H), 2019 Open Fund Project of Gansu Engineering Research Center of Industrial Transportation Automation(GSITA201903)and China National Railway Group Co., Ltd. Science and Technology Research and Development Program Project(201901BX01).

作者简介: 何涛(1977—), 男, 教授, 主要从事轨道交通信号方向研究, (E-mail)hetao@mail.l8jtu.cn。

通信作者: 马洁, 女, 硕士, (E-mail)1547623843@qq.com。

of the CBTC system. Finally, the similarity between the CBTC system reliability comprehensive index new cloud and the reliability evaluation set cloud model of virtual cloud computing was compared to obtain the final evaluation result. The results show that the CBTC system reliability evaluation method based on cloud model and combination weighting method can correctly and objectively describe the ability of CBTC system to complete the specified functions, which can be used for the research and development and evaluation of CBTC system.

Keywords: CBTC system; reliability evaluation; cloud model; combination weighting method

由于城市轨道交通的发展规模越来越大,由原来的轨道电路发展而来的基于通信的列车运行控制系统(CBTC, communication based train control system)正在迅速壮大。CBTC 系统集成了先进的控制技术、计算机技术和通信技术,具有系统化、网络化和智能化的特点。随着系统功能的逐渐强大,结构组成越来越复杂,与线路、运输组织、车辆等专业越来越密切,CBTC 系统作为城市轨道交通系统的“大脑”,一旦发生危险,轻则影响列车的运营秩序,重则发生特大事故^[1],因此对城市的 CBTC 系统进行可靠性评价具有重要意义。

对于复杂动态特性系统来说,人们更多关注系统在特定的时间和条件内,能够多大程度完成规定功能的能力。目前,对于轨道交通系统的可靠性评价,学者已进行了广泛研究^[2-3]。Jin 等^[4]提出使用分类、回归和总结等数据挖掘的方法对系统进行故障诊断和状态评估。张友鹏等^[5]提出基于云模型和证据理论的铁路信号系统风险评估模型,利用该模型对无线闭塞中心进行风险评估。董慧宇等^[6]提出了使用二维熵对 CBTC 信息安全进行了风险进行建模和评估。不难看出,这些研究都是对复杂系统风险进行评估,对其可靠性的研究比较少,对 CBTC 系统可靠性的研究更是少之又少。笔者提出基于云模型和组合赋权法的系统可靠性评价方法对西北某城市的 CBTC 系统进行可靠性分析,用层次分析法和 CRITIC 法计算主观权重值和客观权重值,使用加法合成法得到组合权重,反应了决策者的主观意愿,避免评价结果的主观臆断;最后使用云模型对结果进行评价,实现定性和定量之间转换,使得结果更加客观准确。

1 云模型相关概念

1.1 云模型

设 U 是一个用数值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念,若定量值 $x \in U$,且 x 是定性概念 C 的一次随机实现, x 对 C 的隶属度 $u(x) \in [0,1]$ 是稳定倾向的随机数^[7],即

$$u:U \rightarrow [0,1], \forall x \in U, x \rightarrow u(x), u(x) \in [0,1],$$

则 x 在论域 U 上的分布称为云,每个 x 称为一个云滴。

云模型实现模糊集理论中的模糊性和概率论中的随机性。用期望 Ex ,熵 En 和超熵 He 3 个数字特征表征一个概念,是一种定性定量转换模型。期望 Ex 是最能代表这个定性概念的点,反映云滴群的平均点;熵 En 反映了定性概念中的模糊性和随机性,揭示二者之间的关联性,是定性概念的不确定性度量;超熵 He 是熵的不确定性度量,反映云滴的凝聚度。超熵越小,云滴的凝聚度越好,即离散程度越小。图 1 所示的是使用 MATLAB 绘制的 $Ex=20, En=2, He=0.15$ 的正态云分布图^[8]。

对于存在双边约束 $[C_{\min}, C_{\max}]$ 的指标可以使用云模型描述,相应的 3 个数字特征为

$$\begin{cases} Ex = (C_{\min} + C_{\max})/2, \\ En = (C_{\max} - C_{\min})/6, \\ He = k. \end{cases} \quad (1)$$

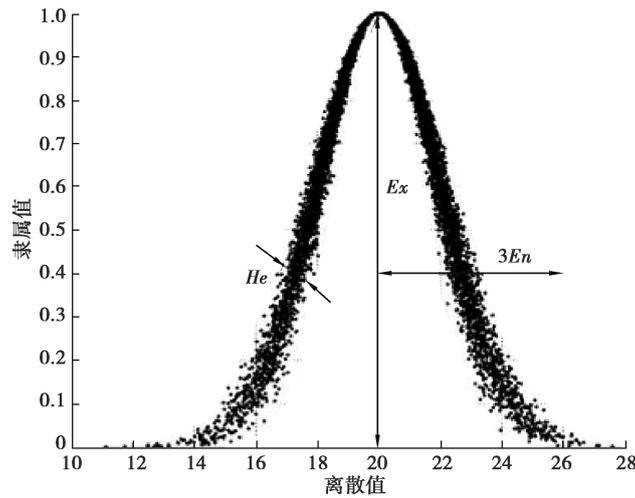


图 1 云分布图和数字特征

Fig. 1 Cloud map and digital features

1.2 正态云发生器

正态云发生器主要分为正向正态云发生器和逆向正态云发生器两类^[9]。

1.2.1 正向正态云发生器

正向正态云发生器是由定性的事物特征产生定量的事物,它根据云的数字特征 (Ex, En, He) 产生云滴,每个云滴都是该概念的一次具体实现。一维正向正态云发生器的输入是表示定性概念 C 的 3 个数字特征值 Ex, En, He 以及云滴 N ,输出是 N 个云滴的定量值,以及每个云滴代表概念 C 的隶属度 $u(x)$,

$$u(x) = e^{-\frac{(x - Ex)^2}{2 Ex^2}} \quad (2)$$

1.2.2 逆向正态云发生器

逆向正态云发生器是由定量的数据描述定性的事物特征,它通过计算样本的均值 \bar{X} 计算云发生器的期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 。一维的逆向云发生器输入是 N 个雨滴在定量论域的位置及每个云滴代表的隶属度,输出是定性概念的期望值 Ex 、熵 En 和超熵 He ,并给定云滴数。

1.3 虚拟云

虚拟云^[10]是按照某种应用目的,对各个基云的数字特征参数进行计算,得到结果作为新的数字特征构造成的新云。对于一个新云 T 可以通过基云定义为

$$T\{T_1(Ex_1, En_1, He_1), \dots, T_n(Ex_n, En_n, He_n)\}。$$

各个基云进行逻辑运算得到的新云就是虚拟云 $T(Ex, En, He)$ 。研究使用虚拟云的综合算法,计算公式如下

$$\begin{cases} Ex = \frac{Ex_1 \cdot w_1 + Ex_2 \cdot w_2 + \dots + Ex_n \cdot w_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n}, \\ En = \frac{w_1^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2} En_1 + \frac{w_2^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2} En_2 + \dots + \\ \frac{w_n^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2} En_n, \\ He = \frac{w_1^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2} He_1 + \frac{w_2^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2} He_2 + \dots + \\ \frac{w_n^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2} He_n^e, \end{cases} \quad (3)$$

式中: w_i 表示第 i 个指标权重; (Ex_i, En_i, He_i) 表示第 i 个指标的云模型参数; n 表示指标的个数。

2 组合赋权法

2.1 层次分析法

层次分析法(AHP, analytic hierarchy process)是定性和定量分析相结合的多目标决策方法。AHP 将复杂系统分解为若干个因素,并按照支配关系形成层次结构^[11-12]。运用 AHP 建模,分为 4 个过程:1)建立系统的层次结构模型;2)构造各层次的判断矩阵 \mathbf{R} ;3)对判断矩阵 \mathbf{R} 进行一致性校验;4)得到各因素的主观权重 $X_{si} (i=1,2,\dots,m)$ 和结构模型的主观权重向量 $\mathbf{X}_s=[X_{s1},X_{s2},\dots,X_{sm}]$ 。

根据专家意见构造判断矩阵 \mathbf{R} 是层次分析法的重点,采用 9 标度法对同层元素 i 和元素 j 两两比较其对上层元素的重要性 R_{ij} ,如表 1 所示,构造该层的判断矩阵 \mathbf{R} 。

表 1 9 标度法说明

Table 1 9 Scale method description

| 标度 | 重要性比较 |
|---------|-------------------------------------|
| 1 | 元素 i 和元素 j 同等重要 |
| 3 | 元素 i 比元素 j 稍微重要 |
| 5 | 元素 i 比元素 j 明显重要 |
| 7 | 元素 i 比元素 j 强烈重要 |
| 9 | 元素 i 比元素 j 极端重要 |
| 2,4,6,8 | 元素 i 比元素 j 重要性分别介于 1,3,5,7,9 之间 |
| 1~9 的倒数 | 表示上述标度中,元素 i 比元素 j 相互比较的重要性交换 |

2.2 CRITIC 法

2.2.1 CRITIC 法原理

CRITIC 法是由 Diakoulaki 提出的一种客观权重赋权方法^[13-15]。它的基本思想是通过各指标间的对比强度和冲突性来综合衡量其权重。对比强度是利用标准差 δ_i 的大小,若同一指标所有指数的标准差 δ_i 越大,说明其蕴含的信息量越大;指标之间的冲突性是以指标之间的相关系数 r_{ij} 为基础,如果 2 个指数有较强的正相关,则说明其冲突性较低。

2.2.2 CRITIC 赋值法计算权重步骤

假设共有 m 个元素,每个元素有 n 个指标,则评价矩阵 \mathbf{A} 可表示为^[14]

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

客观权重计算步骤如下:

1) 指标同向化。

正向指标的数值越大,反向指标的数值越小说明效果越好。在对 CBTC 系统进行可靠性评估的过程中,选用的指标都是正向指标。

2) 指标数据无量纲化。

由于系统的指标过多且单位不同,需要进行无量纲处理,处理方式如式(5)所示,得到标准矩阵 \mathbf{A}' 。

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (a_{ij})^2}} \quad (5)$$

3) 计算指标客观权重。

根据 CRITIC 赋值法, 计算标准矩阵 A' 的各指标间的相关系数 r_{ij} 、指标数据的冲突化指标 F_i 和信息量 I_i

$$\delta_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (a'_{ij} - \bar{a}'_i)^2}, \tag{6}$$

$$r_{ij} = \text{cov}(A'_i, A'_j) / (\delta_i \delta_j), \tag{7}$$

$$F_i = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}), \tag{8}$$

$$I_i = \delta_i F_i, \tag{9}$$

式中: \bar{a}'_i 是第 i 个指标的均值, 即矩阵 A' 第 i 行元素的均值; $\text{cov}(A'_i, A'_j)$ 是矩阵 A' 的第 i 行和第 j 行的协方差; r_{ij} 是评价指标 i 和 j 之间的相关系数; F_i 第 i 个指标与其他指标的冲突性量化指标; I_i 是第 i 个评价指标所包含的信息量。因此第 i 个因素的客观权重 X_i 为

$$X_i = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^n I_i}, \tag{10}$$

则客观权重向量 $X_o = [X_{o1}, X_{o2}, \dots, X_{om}]$ 。

2.3 组合赋权法

组合赋权法是将主观赋权法和客观赋权法有机地结合在一起, 使权重更加合理。使用加法合成法^[16]得到综合权重向量 X 为

$$X = \alpha X_s + (1 - \alpha) X_o, \tag{11}$$

式中: X_s 是主观赋权法得到的权重向量; X_o 是客观赋权法得到的权重向量。 α 是组合赋权法联系的待定系数, 使用差异系数法进行求解。

$$\alpha = \frac{n}{n-1} \left[\frac{2}{n} (X_1 + 2X_2 + \dots + nX_n) - \frac{n+1}{n} \right], \tag{12}$$

式中, $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为主观权重向量按升序排列后对应的分量, n 为评价元素个数。

3 CBTC 系统可靠性分析

CBTC 系统是一个复杂的分布式控制系统, 主要由控制中心设备、车站设备、轨旁设备、车载设备及网络通信设备 5 部分组成, 如图 2 是 CBTC 系统的组成结构。

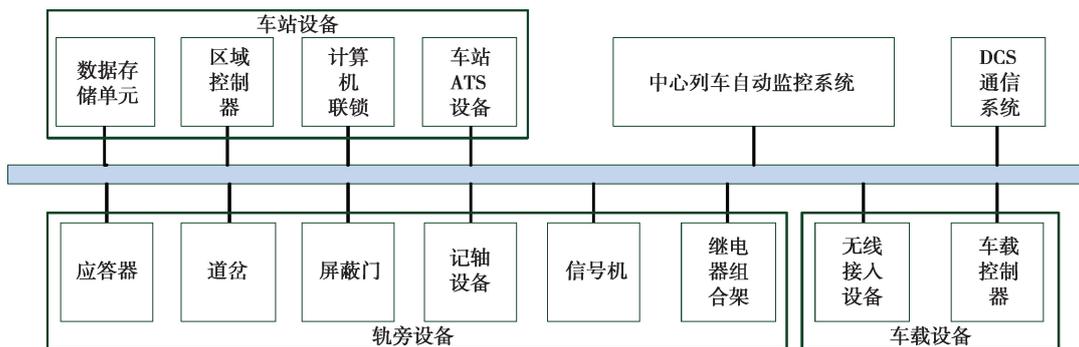


图 2 CBTC 系统组成结构示意图

Fig. 2 Structure of the interface adapter

3.1 模型架构

根据该城市轨道交通信号系统的功能需求和文献[1], 结合 CBTC 系统的自身结构, CBTC 系统主要分为辅助司机驾驶、辅助列车运行、保证行车安全、保护和辅助乘客以及为运营人员提供技术支持, 根据这些功能, 建立了如图 3 所示功能层次模型。其中, A 为目标层, B 为中间层, C 为最底层。

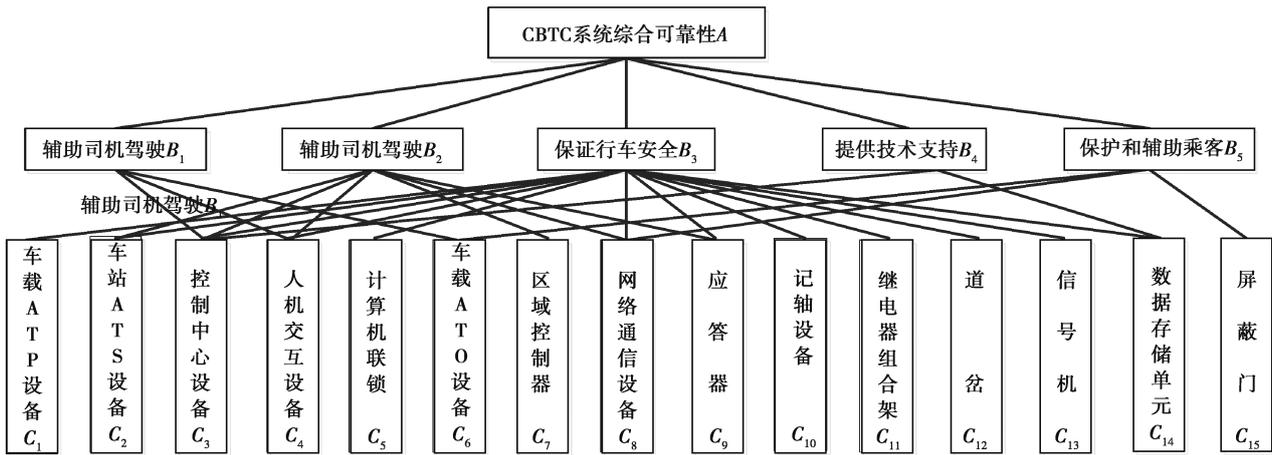


图 3 CBTC 系统功能层次结构模型

Fig. 3 CBTC system function hierarchy model

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 6 & 4 & 3 & 4 & 1/7 & 3 & 3 & 3 & 4 & 4 & 5 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1/2 & 4 & 2 & 4 & 2 & 1/7 & 2 & 2 & 2 & 4 & 4 & 5 & 4 \\ 1/2 & 2 & 1 & 3 & 3 & 2 & 3 & 1/5 & 1 & 2 & 3 & 3 & 2 & 4 & 2 \\ 1/6 & 1/4 & 1/3 & 1 & 1/3 & 1/4 & 1 & 1/6 & 1/3 & 1/3 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/3 & 1 \\ 1/4 & 1/2 & 1/3 & 3 & 1 & 1/4 & 1 & 1/5 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 3 & 2 & 2 & 4 \\ 1/3 & 1/4 & 1/2 & 4 & 4 & 1 & 4 & 1/2 & 3 & 3 & 4 & 3 & 2 & 3 & 6 \\ 1/4 & 1/2 & 1/3 & 1 & 1 & 1/4 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/7 & 1/7 & 5 & 6 & 5 & 2 & 2 & 1 & 4 & 4 & 2 & 4 & 3 & 5 & 6 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 3 & 2 & 1/3 & 2 & 1/4 & 1 & 1 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 8 \\ 1/3 & 1/2 & 1/2 & 3 & 2 & 1/3 & 2 & 1/4 & 1 & 1 & 1/3 & 1/4 & 2 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1/2 & 1/3 & 4 & 3 & 1/4 & 2 & 1/2 & 3 & 3 & 1 & 3 & 3 & 4 & 3 \\ 1/4 & 1/4 & 1/3 & 4 & 1/3 & 1/3 & 3 & 1/4 & 2 & 4 & 1/3 & 1 & 2 & 4 & 5 \\ 1/4 & 1/4 & 1/2 & 4 & 1/2 & 1/2 & 3 & 1/3 & 2 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1 & 4 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1/4 & 3 & 1/2 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1/2 & 1/3 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/4 & 1/2 & 1 & 1/4 & 1/6 & 1 & 1/6 & 1/8 & 1/4 & 1/3 & 1/5 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.2 可靠性云模型

根据文献[17],对于复杂系统将评价集划分为 5 个评价元素,如表 2 所示。出现致命故障代表 CBTC 系统出现灾难性故障,导致人员伤亡和财产损失;保持最低功能表示 CBTC 系统故障已达到临界,仅能保证列车安全运行;保持基本功能表示 CBTC 系统有故障,系统功能下降,可防止列车超速和冒进禁止信号;保持主要功能表示系统有轻微故障,系统性能良好表示可以实现 CBTC 系统主要功能;保持全部功能表示 CBTC 系统无任何故障,可以实现全部功能。每个评价元素均采用云模型来描述。

表 2 评价集云表示

Table 2 Evaluation set cloud representation

| 数字特征 | 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 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| E_x | 1.000 | 0.830 | 0.690 | 0.490 | 0.000 |
| E_n | 0.020 | 0.040 | 0.053 | 0.060 | 0.143 |
| H_e | 0.002 | 0.004 | 0.005 | 0.006 | 0.014 |

3.3 权重确定

3.3.1 确定主观权重

利用层次分析法确定 CBTC 系统各底层设备的主观权重,由专家意见和 9 标度法判断矩阵 R 如式(13)所示。

为了避免专家在判断时,对部分元素判断不准确,使用 MATLAB 计算出判断矩阵 R 进行一致性校验:一致性指标 CI (consistency index)和平均随机一致性指标 RI (random index)的比率称为随机一致性比率 CR (consistency ratio),当 $CR < 0.1$ 时,认为判断矩阵 R 具有一致性,否则就必须调整判断矩阵 R 。计算得:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.129\ 9}{1.609\ 7} = 0.080\ 7 < 0.1。$$

故判断矩阵 R 通过了一致性校验,将判断矩阵 R 的最大特征根对应的特征向量进行一致化处理得到

$$X_s = [0.147\ 2\ 0.106\ 0\ 0.098\ 0\ 0.017\ 5\ 0.044\ 7$$

$$0.100\ 7\ 0.027\ 9\ 0.141\ 4\ 0.050\ 4\ 0.046\ 5\ 0.077\ 8\ 0.057\ 7\ 0.043\ 8\ 0.022\ 8\ 0.017\ 5],$$

则 X_s 是 CBTC 系统可靠性综合评价中 15 个 C 层元素的主观权重向量。

3.3.2 确定客观权重

根据 CBTC 系统的结构和各底层元素对系统功能的影响,建立相应的故障树模型并转换为贝叶斯网络模型,采用贝叶斯网络计算出 CBTC 系统底层元素的重要度,如表 3 所示,其中 P 、 C 、 S 分别表示概率重要度、关键重要度和结构重要度。在构建的 CBTC 系统的模型中没有反向指标,所以不需要转化,无量纲化,得到标准矩阵 X'_s 如式(14)所示。

$$X'_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0.217\ 9 & 0.219\ 8 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.164\ 8 & 0.219\ 0 & 0.215\ 3 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.324\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0.073\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6.00 \times 10^{-4} & 9.11 \times 10^{-5} & 6.00 \times 10^{-4} & 1 & 1 & 0 & 9.10 \times 10^{-5} & 9.10 \times 10^{-5} & 9.09 \times 10^{-5} & 0 & 1 & 1 & 1 & 9.11 \times 10^{-5} & 9.11 \times 10^{-5} \end{bmatrix}。 \tag{14}$$

表 3 CBTC 系统各单元重要度
Table 3 CBTC system unit importance

| 重复度 | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 | C_6 | C_7 | |
|-----|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| P | 0.998 776 | 0.998 776 | 0.998 776 | 2.00×10^{-5} | 2.00×10^{-5} | 0.999 986 | 0.999 976 | |
| C | 3.64×10^{-10} | 4.26×10^{-12} | 3.36×10^{-9} | 1.45×10^{-8} | 2.74×10^{-20} | 0.324 577 | 5.47×10^{-15} | |
| S | 0.000 6 | 0.000 091 | 0.000 6 | 0.000 091 | 0.000 091 | 0.000 091 | 0.000 091 | |
| 重复度 | C_8 | C_9 | C_{10} | C_{11} | C_{12} | C_{13} | C_{14} | C_{15} |
| P | 0.998 776 | 0.998 776 | 0.998 780 | 1.5×10^{-5} | 2.00×10^{-5} | 2.00×10^{-5} | 0.998 900 | 0.998 776 |
| C | 3.44×10^{-13} | 4.32×10^{-8} | 0.037 462 | 7.62×10^{-9} | 1.55×10^{-12} | 5.19×10^{-7} | 2.56×10^{-10} | 0.34×10^{-10} |
| S | 0.000 091 | 0.000 091 | 0.000 091 | 0.000 091 | 0.000 091 | 0.000 091 | 0.000 091 | 0.000 091 |

使用 MATLAB 将矩阵式(7)、(8)、(9)、(10)计算主观权重向量 X_o :

$$X_o = [0.047\ 0\ 0.047\ 0\ 0.047\ 0\ 0.102\ 0\ 0.102\ 0\ 0.060\ 2\ 0.047\ 0\ 0.047\ 0\ 0.047\ 0\ 0.049\ 2\ 0.106\ 0\ 0.102\ 0\ 0.102\ 0\ 0.047\ 0\ 0.047\ 0]。$$

3.4 组合赋权法确定权重

根据式(11)和(12)计算得到 CBTC 系统基本单元组合权重 X ,如表 4 所示。

表 4 CBTC 系统组合赋权法基本单元权重
Table 4 CBTC system combination weighting method basic unit weight

| 评价方法 | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 | C_6 | C_7 | |
|------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 主观 | 0.147 2 | 0.106 0 | 0.098 0 | 0.017 5 | 0.044 7 | 0.100 7 | 0.027 9 | |
| 客观 | 0.047 0 | 0.047 0 | 0.047 0 | 0.102 0 | 0.102 0 | 0.060 2 | 0.047 0 | |
| 组合 | 0.097 1 | 0.076 5 | 0.072 5 | 0.059 8 | 0.073 4 | 0.080 5 | 0.037 5 | |
| 评价方法 | C_8 | C_9 | C_{10} | C_{11} | C_{12} | C_{13} | C_{14} | C_{15} |
| 主观 | 0.141 4 | 0.050 4 | 0.046 5 | 0.077 8 | 0.057 7 | 0.043 8 | 0.022 8 | 0.017 5 |
| 客观 | 0.047 0 | 0.047 0 | 0.049 2 | 0.106 0 | 0.102 0 | 0.102 4 | 0.047 0 | 0.047 0 |
| 组合 | 0.094 2 | 0.048 7 | 0.047 9 | 0.091 9 | 0.079 9 | 0.073 1 | 0.034 9 | 0.032 3 |

4 CBTC 系统可靠性评价结果

4.1 CBTC 系统基本单元云表示

假设基本单元的寿命 $t=5 \times 10^4$ h,考虑系统冗余结构和共因失效对系统可靠性的影响,可求得 CBTC 系统功能性模型基本单元的可靠度^[18-19]。考虑 CBTC 系统失效过程中各种不确定因素对系统可靠性的影响,根据 CBTC 系统功能性模型基本单元失效率的取值范围,可得到相应取值范围,根据式(1),得到 CBTC 系统功能性模型各基本单元的云表示,如表 5 所示。

表 5 CBTC 系统基本单元可靠性云表示
Table 5 CBTC system basic unit reliability cloud representation

| 数字特征 | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 | C_6 | C_7 | |
|------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Ex | 0.915 0 | 0.888 9 | 0.899 2 | 0.710 2 | 0.911 5 | 0.972 6 | 0.866 7 | |
| En | 0.024 3 | 0.005 2 | 0.000 67 | 0.003 2 | 0.018 3 | 0.003 4 | 0.021 3 | |
| He | 0.001 0 | 0.001 0 | 0.001 0 | 0.002 0 | 0.001 0 | 0.001 0 | 0.001 0 | |
| 数字特征 | C_8 | C_9 | C_{10} | C_{11} | C_{12} | C_{13} | C_{14} | C_{15} |
| Ex | 0.684 5 | 0.723 3 | 0.606 0 | 0.797 9 | 0.905 4 | 0.620 1 | 0.804 | 0.602 5 |
| En | 0.017 6 | 0.049 6 | 0.113 4 | 0.011 5 | 0.009 7 | 0.016 7 | 0.032 6 | 0.033 5 |
| He | 0.002 0 | 0.001 0 | 0.002 0 | 0.001 0 | 0.002 0 | 0.001 0 | 0.001 0 | 0.001 0 |

4.2 CBTC 系统可靠性评价结果

根据式(3)得到 CBTC 系统的评价综合模型的新云,计算得出 $Ex=0.810 5, En=0.017 5, He=0.001 3$,如图 4 所示,其中深黑色曲线表示 CBTC 系统可靠性的综合云模型。CBTC 系统综合云模型与系统“保持基本功能”以及“保持主要功能”的评价云相交,可以得到 CBTC 系统的可靠性云综合指标与“保持主要功能”的云模型相似。因此,该城市的 CBTC 系统可靠性综合评价结果为“保持主要功能”,即系统性能良好,可以实现 CBTC 系统的主要功能,防护列车运行安全运行。

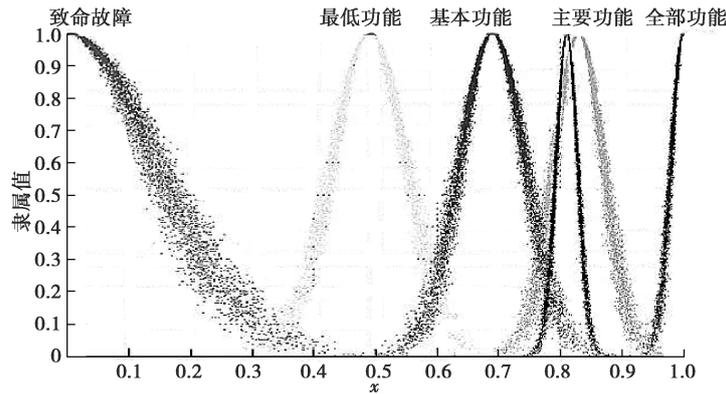


图 4 评价云和综合指标云

Fig. 4 Evaluation cloud and comprehensive indicator cloud

5 结 论

研究结合云模型和组合赋权法对该城市的 CBTC 系统建立了科学的可靠性评价模型,对于 CBTC 系统的研发提供了重要的理论和实际的依据。

1)研究使用的层次分析法和 CRITIC 赋值法从主观和客观 2 个方面对 CBTC 系统进行了评估,既能体现决策者的主观意愿,同时避免了评价结果的主观随意性。

2)采用云模型对该城市的 CBTC 系统进行可靠性评价,能够充分论证 CBTC 系统的可靠度模糊性和随机性,实现了定量和定性的转化,使结果更加客观准确。

3)从综合权重排序可看到,车载 ATP 设备、车站 ATS 设备以及网络通信设备所占综合权重较大,可以看出,提高这些综合权重占比大的设备可以有效提高该城市 CBTC 系统的可靠性,建议运营人员留意这些设备的运行情况。

参考文献:

- [1] 郜春海.基于通信的列车运行控制(CBTC)系统[M].北京:中国铁道出版社,2017.
Qi C H. Communication-based train operation control (CBTC) system [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.(in Chinese)
- [2] 张文韬,张友鹏,苏宏升,等.基于动态故障树的 CTCS-3 级 ATP 系统可靠性分析[J].工程设计学报,2014,21(1):18-26.
Zhang W T, Zhang Y P, Su H S, et al. Reliability analysis on ATP system of CTCS-3 based on dynamic fault tree[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2014, 21(1): 18-26.(in Chinese)
- [3] 伏玉明,刘伯鸿,宋爽.基于模糊综合评判的转辙机健康评估研究[J].铁道科学与工程学报, 2017,14(5):1070-1076.
Fu Y M, Liu B H, Song S. Research on health assessment methods for switch machine based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14 (5): 1070-1076.(in Chinese)
- [4] Jin W, Shi Z, Siegel D, et al. Development and evaluation of health monitoring techniques for railway point machines[C]//IEEE Conference on Prognostics & Health Management. USA, Austin: IEEE, 2015:1-11.
- [5] 张友鹏,李远远.基于云模型和证据理论的铁路信号系统风险评估[J].铁道学报,2016,38 (1):75-80.
Zhang Y P ,Li Y Y.Risk assessment of railway signal system based on cloud model and evidence theory[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38 (1): 75-80.(in Chinese)
- [6] 董慧宇,唐涛,王洪伟.基于二维结构熵的 CBTC 系统信息安全风险评估方法[J].自动化学报, 2019,45(1):153-162.
Dong H Y, Tang Tao, Wang H W. A 2D structure entropy-based approach to security assessment of communication-based train control system[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 45(1):153-162.(in Chinese)
- [7] 赵峰,王开铭,曹茜.基于云理论和组合赋权法的牵引变电所风险评估[J].安全与环境学报, 2017,17(5):1690-1695.
Zhao F, Wang K M, Cao Q. Risk assessment of the traction substation based on the cloud theory and combination weighing method [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(5): 1690-1695.(in Chinese)

- [8] 许大亮.利用 Matlab 绘制云模型[J].科技创新与生产力,2016(1):108-110.
Xu D L. Drawing the cloud model by matlab[J]. Sci-tech Innovation and Productivity,2016 (1):108-110.(in Chinese)
- [9] Yang B, Zhu Z Y. Mining multilevel spatial association rules with cloud models [J].Journal of Harbin Institute of Technology, 2005,(3):314-318.
- [10] 王芳.基于云模型的高校教师满意度综合评价[J].技术与创新管理,2009,30(5):636-639.
Wang F. A comprehensive evaluation method of the university teachers' job satisfaction based on the cloud model[J]. Technology and Innovation Management,2009,30(5):636-639.(in Chinese)
- [11] Metin Dağdeviren, İhsan Yüksel. Developing a fuzzy analytic hierarchy process (AHP) model for behavior-based safety management [J]. Information Sciences, 2007,178(6):1717-1733.
- [12] Zou Z H, Yun Y, Sun J N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. Journal of Environmental Science,2006, 18(5): 1020-1023.
- [13] Diakoulaki D , Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method[J]. Computers and Operations Research, 1995 (7): 763-770.
- [14] 张立军,张潇.基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法[J].统计与决策,2015(22):65-68.
Zhang L J, Zhang W. Weighted clustering method based on improved CRITIC method [J]. Statistics & Decision, 2015(22):65-68.(in Chinese)
- [15] 赵书强,汤善发.基于改进层次分析法、CRITIC 法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J].电力自动化设备, 2019,39(3):143-148,162.
Zhao S Q. Tang S F. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarch process, CRITIC method and TOPSIS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(3):143-148,162.(in Chinese)
- [16] 李刚,李建平,孙晓蕾等.主客观权重的组合方式及其合理性研究[J].管理评论,2017,29(12):17-26.
Li G, Li J P. Research on a combined method of subjective-objective weighing and the its rationality[J]. Management Review, 2017,29(12):17-26.
- [17] 覃庆努. 复杂系统可靠性建模、分析和综合评价方法研究[D].北京:北京交通大学,2013.
Tan Q N. The reliability modeling, analysis and comprehensive evaluation method of complex systems [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.(in Chinese)
- [18] QIN F, Cai Z H, Wu Y Q, et al. A novel reliability evaluation method for series-parallel systems based on cloud model[J]. Journal of Computational Information Systems, 2010, 6(10): 3237-3245.
- [19] 邓兵兵,代宝乾,汪彤.基于 Isograph 的地铁车载 ATP 系统动态故障树分析[J].中国安全生产科学技术,2016,12(5): 80-85.
Deng B B, Dai B Q, Wang T. Dynamic fault tree analysis of on-board ATP system in metro based on Isograph[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016,12 (5):80-85.(in Chinese)

(编辑 侯 湘)