

基于主成分回归和分层置信规则库的企业风险评估模型

刘彬彬¹ 朱海龙¹ 韩晓霞² 穆全起¹ 贺 维^{1,2}

1 哈尔滨师范大学计算机科学与信息工程学院 哈尔滨 150025

2 中国人民解放军火箭军工程大学 西安 710025

(1242185650@qq.com)

摘 要 作为一种具有专家系统和数据驱动模型特征的新型智能专家系统,置信规则库(Belief Rule Base, BRB)在风险评估和健康状态评估等领域中发挥着重要作用。BRB 因其自身既可以处理数值数据,又可以处理来自异构源的语言定性知识的优势,能够帮助企业进行有效的风险评估。但是实际企业风险评估体系中指标种类较多且有冗余性,传统 BRB 无法进行指标选择且易造成规则爆炸从而导致计算量大和模型准确度较低等问题。针对上述问题,文中提出一种主成分回归和分层置信规则库(Principal Component Regression, Hierarchical Belief Rule Base, PCR-HBRB)的企业风险评估模型,通过筛选有效指标节约计算时间,同时结合定性与定量信息进行分析评估从而得到较高准确度的评估结果。首先,通过 PCR 筛选出影响企业的主要指标,根据筛选出来的指标建立分层置信规则库(HBRB)的企业风险评估推理模型,并采用证据推理(Evidential Reasoning, ER)对模型进行推理。然后,采用投影协方差矩阵自适应进化策略(Projection Covariance Matrix Adaptation Evolutionary Strategies, P-CMA-ES)对模型进行优化。最后,通过对某企业的财务状况进行风险评估案例验证了模型的有效性。

关键词: 主成分回归; 分层置信规则库; 企业风险评估; 证据推理; 投影协方差矩阵自适应进化策略

中图法分类号 TP391

Enterprise Risk Assessment Model Based on Principal Component Regression and Hierarchical Belief Rule Base

LIU Shan-shan¹, ZHU Hai-long¹, HAN Xiao-xia², MU Quan-qi¹ and HE Wei^{1,2}

1 College of Computer Science and Information Engineering, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

2 Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China

Abstract As a new intelligent expert system with the characteristics of expert system and data-driven model, the belief rule base (BRB) plays an important role in risk assessment and health status assessment. BRB has the advantages of processing numerical data and linguistic qualitative knowledge from heterogeneous sources, which can help enterprises conduct effective risk assessments. However, in the actual enterprise risk evaluation system, there are many types of indicators and redundancy. Traditional BRB cannot select indicators and is easy to cause rule explosion, which leads to problems such as large calculation amount and low model accuracy. In response to the above problems, this paper proposes a principal component regression and hierarchical confidence rule base (Principal Component Regression, Hierarchical Belief Rule Base, PCR-HBRB) enterprise risk assessment model, which saves calculation time by screening effective indicators, and combining qualitative with quantitative information to analyze and evaluate, to obtain higher accuracy evaluation results. Firstly, the PCR method is used to screen out the main indicators that affect the states of the company, the hierarchical confidence rule base (HBRB) inference model of company status risk assessment is established based on the selected indicators, and the model is reasoned by the evidence reasoning (ER). Then, the projection covariance matrix adaptive evolution strategy (P-CMA-ES) is used to optimize the model. Finally, the effectiveness of the model is verified through a risk assessment case of a certain enterprise's financial situation.

Keywords Principal component regression, Hierarchical belief rule base, Enterprise risk assessment, Evidential reasoning, Projection covariance matrix adaptation evolutionary strategies

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(F2018023, LH2021F038); 哈尔滨师范大学博士科研启动金项目(XKB201905); 哈尔滨师范大学计算机科学与信息工程学院自然科学基金项目(JKYKYZ2020004)

This work was supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China(F2018023, LH2021F038), Ph.D. Research Start-up Foundation of Harbin Normal University(XKB201905) and Natural Science Foundation of the School of Computer Science and Information Engineering, Harbin Normal University(JKYKYZ2020004).

通信作者: 朱海龙(2656972775@qq.com)

1 引言

随着信息技术的不断发展,风险评估中所涉及的风险指标也逐渐增多。风险评估(Risk Assessment)是指在风险事件发生之前或之后(但还没有结束),对该事件给人们的生活、生命、财产等各个方面造成的影响和损失的可能性进行量化评估的工作。风险评估主要应用于金融^[1]、网络^[2-3]、市场、工业、企业自身风险^[4]等领域。随着经济体量的日益增大,各行各业的企业在规模不断扩大的同时,风险也有所提高,对于企业的风险评估也逐渐成为目前企业管理的重要手段之一。通过对企业进行风险评估能够及时对企业的运行模式以及资金管理进行调整,从而最大限度地降低企业的经济损失,同时及时规避企业在运行中可能遇到的风险。

针对企业的风险评估以其财务风险为主要评估方向,常用的方法主要分为两大类:1)定量方法。文献[5]利用大数据技术,通过BP神经网络建立互联网财务风险预警模型,并且通过遗传算法(genetic algorithm,GA)对模型进行优化;文献[6]在贝叶斯网络的基础上建立了银行间负债的模型,并通过机器学习算法进行抽样进行压力测试,对于金融风险发生的概率进行预测;文献[7]将SPSS数据分析软件作为分析工具,对近年来列出的34家海洋工程设备制造商进行了财务风险评估,并根据分析结果给出了相应的建设性意见;文献[8]采用定量分析方法对财务风险评估的解释变量模型和控制变量模型进行分析,并在此基础上,采用自适应模糊加权控制方法对财务风险评估数据和大数据分类进行信息融合,对财务风险评估中的线性规划和平方拟合采用资产收益控制和创新评价模型。2)定性方法。文献[9]利用改进的层次分析法对远洋运输企业的财务风险综合评估,在一定程度上为企业规避风险;文献[10]在风险治理的基础上提出一种协作式金融风险风险评估方法,将不同的企业组合起来,从相似处总结风险发生趋势,为风险评估提供一种新的思路;文献[11]利用因子分析法,从定性角度构建金融风险指标,根据不同地区分析其风险状况。上述两类方法分别从定量和定性的角度独立分析风险情况,实际上在对企业风险评估的过程中涉及的指标较多并且既包含定性信息又包含定量信息,同时受外部环境因素的影响,这些指标具有不确定性,而目前现有的研究方法并未考虑实际企业风险评估的指标信息中存在的 uncertainty、多样性和有效性等情况。因此,在实际的企业风险评估中易引发计算量大、计算时间长和准确率较低等问题。

针对选取指标有效性这一问题,主成分分析法(principal component analysis,PCA)作为一种数据分析的技术,能够有效对数据进行压缩和消除冗余^[12-13],并且经过PCA筛选出的数据能够反映原来指标的大部分信息。PCR是在PCA的基础上,以主成分为自变量进行分析并构建回归关系的一种方法^[14],该方法可以消除变量间的多重共线性问题,从而选取有效指标。

针对企业风险评估中不确定性的情况,置信规则库(belief rule base,BRB)对于处理不确定信息具有良好的处理能力。BRB的理论基础是基于专家系统和证据理论^[15]。置信度被引入if-then规则中,该规则可以表达各种类型的不确定信息,包括歧义性、随机性和无知性。置信结构使BRB在不

确定的情况下揭示知识时更加灵活。在BRB的推理过程中,证据推理(ER)算法^[16]用于汇总置信规则。使用ER算法作为推理引擎可以很好地描述、转换和整合不确定性下的各种信息,并可以获得统一的结论。由于以上特性,BRB可以接受多种输入信息,包括定量信息、定性信息等。因此,BRB已被广泛用于风险评估^[17]中,并且BRB在健康状态评估^[18]、决策、可靠性评估、网络安全状况感知、故障诊断等许多领域也得到了广泛应用^[19-20]。BRB的结构已不断优化^[21-22],但是在实际企业风险评估中指标过多且存在冗余指标时,传统BRB不具备选择最优指标的能力,并且当输入属性过多时BRB会出现规则爆炸问题,而采用分层置信规则库(hierarchical belief rule base,HBRB)能够避免这一问题的发生^[23]。

综上,本文提出建立一个企业风险评估模型PCR-HBRB。首先利用PCR选取有效评估指标,再通过HBRB在存在不确定性的情况下对企业进行风险评估,最后对模型进行优化从而进一步提高准确率。本文的贡献如下:1)首先,为解决BRB在风险评估状态指标过多时无法选取有效指标的问题,采用PCR对风险指标进行筛选。2)建立企业风险评估模型PCR-HBRB,从而提高风险评估模型的准确度。3)为了同时考虑模型的准确性和复杂性,构造了一个优化模型,优化PCR-HBRB的风险评估模型参数。

本文第2节阐述了实际企业风险评估中存在的问题;第3节构建了企业风险评估模型PCR-HBRB,并且定义了模型的优化过程;第4节通过案例分析验证了模型的有效性;最后总结全文。

2 问题描述

企业风险评估的准确性对于企业运营和管理至关重要,因此建立有效且准确的风险评估模型直接影响企业能否及时规避风险从而尽可能减少损失。本节阐述了实际企业风险评估中存在的问题,然后提出了一种企业风险评估模型PCR-HBRB。模型的整体流程如图1所示。

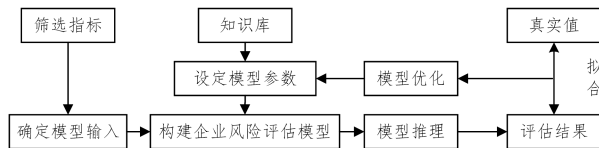


图1 企业风险评估模型流程图

Fig. 1 Flow chart of corporate state risk assessment model

问题1 在实际评估中,影响企业的指标较多,然而有些指标的数据较难获取或者同时包含定量信息和定性信息,有些指标则对于企业的影响程度可以忽略不计。若将所有指标全部作为评估指标,则会造成计算量较大,并且对于模型的准确率也会有影响。因此,选取有效的评估指标对于模型的建立极其重要。指标的选取可以描述为:

$$I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\} \quad (1)$$

$$I^* = S(I) \quad (2)$$

$$I^* = \{i_1, i_2, \dots, i_m\} \quad (3)$$

其中, I 表示原始指标集, $S(\cdot)$ 表示筛选方法, I^* 表示筛选后得到的指标集。

问题2 企业的运营和管理受到外部环境和内部双重因素的影响,因此指标数据在形成过程中具有不确定性,如何建

立合适的模型对具有不确定信息的企业进行风险评估是本文需要解决的第二个问题。那么企业风险评估模型可以描述为：

$$Y=g(I^*,\beta) \tag{4}$$

其中,Y表示模型输出结果,g(·)表示企业风险评估模型,β表示结果的置信度。

3 PCR-HBRB 的企业风险评估模型

本节定义了企业风险评估模型 PCR-HBRB 及其推理过程,主要包括:1)利用 PCR 选取对于企业风险影响较大的指标;2)阐述了模型的推理机制。

3.1 基于 PCR 的企业风险指标筛选

由于影响企业风险状态的指标较多,在一定程度上增加了数据采集的工作量,并且在实际调研中发现有些指标的数据获取难度较大甚至无法获取相应数据,因此选择对企业风险程度影响较大的风险指标对于接下来的企业风险评估模型的准确度至关重要。

然而在多数情况下,影响企业风险状态的指标之间可能存在相关性,从而增加了问题分析的复杂性,同时对分析带来不便。如果分别对每个指标进行分析,分析往往是孤立的,而不是综合的,而盲目减少指标会损失很多信息,容易产生错误的结论。PCR 在 PCA 的基础上首先能够在影响企业的指标体系中选取若干个彼此不相干的综合性指标,并且这些综合指标能反映出原来全部指标所提供的大部分信息,同时也能够消除变量之间多重共线性的问题。因此本文选取 PCR 作为筛选影响企业的指标的方法。其主要实现步骤如下。

步骤 1 对所有的样本进行中心化：

$$x_i=x_i-\frac{1}{n}\sum_{j=1}^nx_j \tag{5}$$

其中, x_i 表示第*i*个影响企业的指标。

步骤 2 计算所有指标数据的协方差矩阵 **C**：

$$C=\frac{1}{m}XX^T \tag{6}$$

其中, $X=\{x_1,x_1,\cdots,x_n\}$ 表示影响企业的指标集。

步骤 3 求出中协方差矩阵 **C** 的特征值λ,特征向量 **μ**。

步骤 4 将特征向量按对应特征值大小从上到下按行排列成矩阵,并计算特征值对应的累计信息贡献率：

$$c_j=\frac{\lambda_j}{\sum_{i=1}^m\lambda_i},j=1,2,\cdots,m \tag{7}$$

$$\eta_p=\frac{\sum_{k=1}^{l_p}\lambda_k}{\sum_{k=1}^M\lambda_k},p=1,2,\cdots,M \tag{8}$$

其中, c_j 为第*j*个特征值的信息贡献率, η_p 为前*p*个主成分*l*₁,*l*₂,⋯,*l*_{*p*}的累计信息贡献率,当*p*=*M*时, $\eta_p=1$ 。

步骤 5 计算回归结果,首先计算每个主成分对变量的荷载：

$$s_{ij}=\rho(H_i,G_j)=\sqrt{\lambda_i}\mu_{ij},i,j=1,2,\cdots,m \tag{9}$$
$$h_i=s_{i1}g_1+s_{i2}g_2+s_{i3}g_3+\cdots+s_{im}g_m$$

其中, μ_{ij} 代表向量 **μ**_{*i*} 的第*j*个分量,针对输出 *y*,使用选出的*q*个主成分进行多元线性拟合得到输出回归模型：

$$y=r+\eta_1h_1+\eta_2h_2+\cdots+\eta_qh_q$$
$$=r+\eta_1(s_{11}g_1+s_{12}g_2+s_{13}g_3+\cdots+s_{1m}g_m)+\eta_2(s_{21}g_1+s_{22}g_2+s_{23}g_3+\cdots+s_{2m}g_m)+\cdots+\eta_q(s_{q1}g_1+s_{q2}g_2+s_{q3}$$

$$g_3+\cdots+s_{qm}g_m)$$
$$=r+(\eta_1s_{11}+\eta_2s_{21}+\cdots+\eta_qs_{q1})x_1+(\eta_1s_{12}+\eta_2s_{22}+\cdots+\eta_qs_{q2})x_2+\cdots+(\eta_1s_{1m}+\eta_2s_{2m}+\cdots+\eta_qs_{qm})x_m \tag{10}$$

3.2 基于 HBRB 的企业风险评估推理模型

在实际工程中存在各种不确定因素,使得对于企业的风险评估难度较大,而 BRB 模型是一种具有专家系统和数据驱动模型特征的新型智能专家系统。在 BRB 中,有许多 if-then 规则,它们使用置信度来表示各种类型的不确定信息,包括模糊性、随机性和无知性。在当前的 BRB 模型研究中,置信规则是基于专家知识构建的。因此 BRB 对于具有不确定因素的企业能够进行有效的风险评估。由于影响企业的因素较多,BRB 输入属性过多会出现规则爆炸问题,本文采取 HBRB 避免这一问题。企业在 HBRB 中的规则表达如下：

$$R_K:\text{If } x_1 \text{ is } index_1 \wedge \cdots \wedge x_n \text{ is } index_n \text{ Then result is } \{(R_1,\beta_1)\cdots(R_m,\beta_m)\} \text{ with rule weight } \theta_1\cdots\theta_K \text{ and attribute weight } \sigma_1\cdots\sigma_n \tag{11}$$

其中, $index_i(a_1,\cdots,a_H)$ 是作为参考值集 *x_i* 的第*i*个影响企业的指标,*a_j*表示第*j*个*C_i*的参考值,*R_i*表示第*i*个企业的结果,β_{*i*}是*R_i*的置信度,θ_{*k*}表示第*k*条规则的规则权重,σ_{*i*}表示*x_i*的属性权重。在 BRB 中,规则的重要性用规则权重表示,属性的重要性用规则权重表示。

企业风险评估模型的推理过程即未训练的 HBRB 的推理过程,如图 2 所示。其推理步骤如下。

步骤 1 初始化。通过专家知识构建初始化规则置信度。

步骤 2 使用下式计算输入与参考值的匹配度：

$$a_i^s=\begin{cases} \frac{B_i^{n+1}-x_i}{B_i^{n+1}-B_i^n}, & s=n(A_i^n\leq x_i\leq A_i^{n+1}) \\ \frac{x_i-B_i^n}{B_i^{n+1}-B_i^n}, & s=n+1 \\ 0, & s=1,2,\cdots,S(s\neq n,n+1) \end{cases} \tag{12}$$

其中,*a_i^s*表示第*i*个输入 *x_i* 对于参考值 *A_i* 的匹配度。

步骤 3 计算规则激活权重,公式如下：

$$w_k=\frac{\theta_k\prod_{i=1}^T(a_i^s)^{\delta_i}}{\sum_{l=1}^L\theta_l\prod_{i=1}^T(a_i^s)^{\delta_i}} \tag{13}$$

其中,*w_k*表示第*k*条规则的激活权重,θ_{*k*}表示第*k*条规则的规则权重,δ_{*i*}表示第*i*个属性权重,*T*表示先行属性的数量。

步骤 4 使用 ER 分析算法生成每个企业风险评估结果的置信度,公式如下：

$$\beta=\frac{\mu\times[\prod_{k=1}^L(w_k\beta_{n,k}+1-w_k\sum_{i=1}^N\beta_{i,k})-\prod_{k=1}^L1-w_k\sum_{i=1}^N\beta_{i,k}]}{1-\mu\times[\prod_{k=1}^L1-w_k]}$$
$$\mu=\frac{1}{[\sum_{n=1}^N\prod_{k=1}^L(w_k\beta_{n,k}+1-w_k\sum_{i=1}^N\beta_{i,k})-(N-1)\prod_{k=1}^L1-w_k\sum_{i=1}^N\beta_{i,k}]}$$

步骤 5 最终输出为：

$$y_r=\sum_{n=1}^ND_n\beta_n \tag{15}$$

其中,*y_r*表示模型的实际输出,β_{*m*}表示相对于评价结果 *D_m* 的置信度。

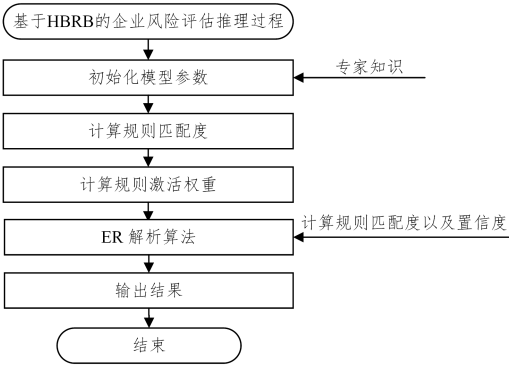


图 2 HBRB 模型推理过程

Fig. 2 Inference process of HBRB model

3.3 基于 HBRB 的企业风险评估推理模型的优化过程

未训练的 HBRB 风险评估模型有局限性,可以通过训练提高模型的准确性。为了提高基于 BRB 的故障预测模型的准确性,可以通过标记样本来优化模型的参数。模型的目标优化函数描述为:

$$\begin{aligned} \min \quad & MSE(\epsilon) \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{r=1}^R \beta_{r,k} = 1, k=1, \cdots, K \\ & 0 \leq \beta_{r,k} \leq 1 \\ & 0 \leq \theta_k \leq 1 \end{aligned} \tag{16}$$

通过以上分析,BRB 模型的优化问题是具有约束条件的全局优化问题。因此本文选择 P-CMA-ES 算法,该算法可以处理高维非线性优化问题^[24]。BRB 模型的优化过程如图 3 所示。

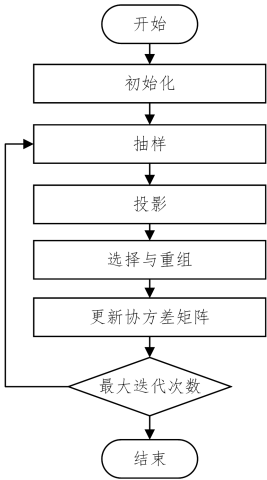


图 3 模型优化过程

Fig. 3 Optimization process of model

P-CMA-ES 算法的过程描述如下:

$$MSE(\epsilon) = \frac{1}{K} \sum_{K=1}^K (y_r - y_{\text{predicted}})^2 \tag{17}$$

备注 1:CMA-ES 是一种出色的无约束全局优化算法,具有快速收敛和高精度等优点,为了解决 BRB 模型中的等式约束问题,本文利用了 P-CMA-ES 算法,该算法通过投影操作实现等式约束的变换。

4 案例分析

4.1 以财务风险为主的企业风险评估模型构建

本文实验中集了 200 组关于某企业风险状态的相关数据,并从 32 个指标中通过对 PCR 回归模型计算的指标系数进行排序后筛选出对企业风险影响程度最大的 5 个指标。筛

选后的数据如图 4 所示,通过 PCR 得到的回归模型如下:

$$\begin{aligned} y = & 1.092397 + (-0.055897) * x_1 + 0.429305 * x_2 + \\ & 0.049889 * x_3 + 0.046558 * x_4 + 0.418799 * x_5 + \\ & (-0.016587) * x_6 + (-0.047619) * x_7 + 0.162699 * \\ & x_8 + 0.187351 * x_9 + 0.492892 * x_{10} + 0.084468 * \\ & x_{11} + 0.000003 * x_{12} + (-0.049889) * x_{13} + \\ & (-0.007764) * x_{14} + 0.004611 * x_{15} + 0.301468 * x_{16} + \\ & (-0.007131) * x_{17} + (-0.080197) * x_{18} + \\ & (-0.405534) * x_{19} + (-0.226260) * x_{20} + 0.017135 * \\ & x_{21} + 0.014329 * x_{22} + 0.226952 * x_{23} + 0.134604 * \\ & x_{24} + 0.000133 * x_{25} + 0.009086 * x_{26} + 0.000035 * \\ & x_{27} + 0.143368 * x_{28} + (-0.269603) * x_{29} + 0.051169 * \\ & x_{30} + (-0.000002) * x_{31} + 0.000601 * x_{32} \end{aligned} \tag{18}$$

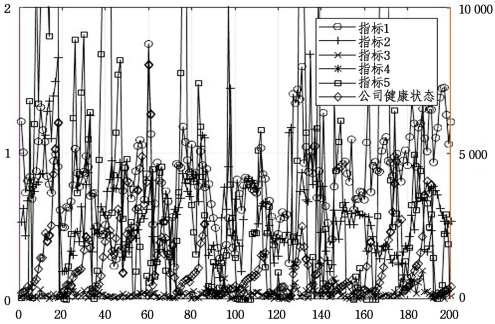


图 4 实验数据

Fig. 4 Experimental data

根据上式选取前 5 个主成分,即 $x_2, x_3, x_6, x_{11}, x_{20}$ 作为本次实验评估指标 1—5。指标对应含义如表 1 所列。

表 1 指标对应含义

Table 1 Corresponding meaning of indicators	
Num	Meaning
指标 1	Liquidity ratio
指标 2	Asset management ratio
指标 3	Accounts receivable turnover rate
指标 4	Business cycle
指标 5	Debt ratio

确定风险评估指标后,为避免 BRB 输入属性过多出现规则爆炸问题,建立 HBRB 风险评估模型,其结构对应关系如图 5 所示,同时结合专家知识构建初始置信规则以及输入属性的参考值。其中各指标的参考值如表 2—表 6 所列。根据式(11),以 BRB4 为例,输入属性为指标 1 和指标 2,其对应的置信规则为:

R_K : If x_1 is 指标 1 $\wedge$ x_2 is 指标 2
Then result is $\{(R_1, \beta_1), \cdots, (R_m, \beta_m)\}$ with rule weight $\theta_1, \cdots, \theta_k$ and attribute weight $\sigma_1, \cdots, \sigma_n$ (19)

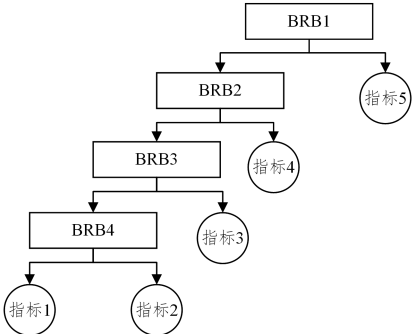


图 5 筛选指标对应 HBRB 图

Fig. 5 HBRB diagram corresponding to screening indicators

表 2 BRB1 中指标 1 的参考值

Table 2 Reference value of index1 in BRB1

Reference point	vl	l	m	h	vh
Reference value	0.222	0.373	0.81	1.048	1.748

表 3 BRB1 中指标 2 的参考值

Table 3 Reference value of index2 in BRB1

Reference point	vl	l	m	h	vh
Reference value	0.148	0.364	0.531	0.668	1.678

表 4 BRB2 中指标 3 的参考值

Table 4 Reference value of index3 in BRB2

Reference point	vl	l	m	h	vh
Reference value	0.002	0.015	0.037	0.059	0.193

表 5 BRB3 中指标 4 的参考值

Table 5 Reference value of index4 in BRB3

Reference point	vl	l	m	h	vh
Reference value	0.222	0.373	0.81	1.048	1.748

表 6 BRB4 中指标 5 的参考值

Table 6 Reference value of index5 in BRB4

Reference point	vl	l	m	h	vh
Reference value	0.222	0.373	0.81	1.048	1.748

4.2 实验结果分析

在初始风险评估模型中,由于外部因素对模型的影响,使得初始置信度规则的可靠性降低,从而影响了评估模型的准确性。为了解决这个问题,根据第 3 节中的优化模型,调整风险评估模型的结构,同时在训练过程中评估参数。本节中以 BRB1 为例,其优化后的参数如表 7 所列。

表 7 BRB1 的优化属性参数

Table 7 Optimized attributes parameters of BRB1

BRBi	规则 权重	属性		输出分布 ($R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$)
		x_1	x_2	
BRB1	0.8908	vl	vl	{0.0,0.0,0.1,0.9}
BRB1	0.6308	vl	l	{0.0,0.0,0.2,0.8}
BRB1	0.9287	vl	m	{0.0,0.0,0.25,0.75}
BBR1	0.3327	vl	h	{0.0,0.0,0.25,0.75}
BRB1	0.4616	vl	vh	{0.0,0.0,0.3,0.7}
BRB1	0.5068	l	vl	{0.0,0.0,0.1,0.9}
BRB1	0.6302	l	l	{0.0,0.0,0.2,0.8}
BRB1	0.4932	l	m	{0.0,0.0,0.25,0.75}
BRB1	0.6685	l	h	{0.0,0.0,0.3,0.7}
BRB1	0.1299	l	vh	{0.0,0.0,0.3,0.7}
BRB1	0.6052	m	vl	{0.0,0.0,0.1,0.9}
BRB1	0.1480	m	l	{0.0,0.0,0.15,0.85}
BRB1	0.4995	m	m	{0.0,0.0,0.35,0.65}
BRB1	0.4146	m	h	{0.0,0.0,0.2,0.2,0.6}
BRB1	0.1929	m	vh	{0.0,0.1,0.2,0.2,0.5}
BRB1	0.5489	h	vl	{0.0,0.0,0.1,0.9}
BRB1	0.2588	h	l	{0.0,0.0,0.2,0.8}
BRB1	0.9416	h	m	{0.0,0.0,1.0,2.0,0.7}
BRB1	0.2061	h	h	{0.0,0.2,0.2,0.1,0.3,0.2}
BRB1	0.4166	h	vh	{0.0,0.3,0.3,0.25,0.2,0.15}
BRB1	0.2805	vh	vl	{0.0,0.0,0.2,0.8}
BRB1	0.7095	vh	l	{0.0,0.0,0.2,0.8}
BRB1	0.4653	vh	m	{0.0,0.2,0.3,0.3,0.2}
BBR1	0.1052	vh	h	{0.2,0.2,0.3,0.2,0.1}
BRB1	0.8931	vh	vh	{0.3,0.4,0.2,0.1,0.0}

如图 6 所示,利用 PCR 筛选出来的 5 个指标再通过 HBRB 进行风险评估,开发的模型可以准确地估计企业此时的风险状态。此外,在本节中将本文方法与 BP,GA 和贝叶斯网络这 3 种企业定量风险方法以及因子分析这种企业定性风险方法进行对比。每种方法分别进行了 10 轮实验,PCR-HBRB 与它们的平均 MSE 和最佳 MSE 结果显示在表 8 中,其结果表明本文开发的模型相较于目前单一的定性或定量风

险评估方法能够更有效地评估企业,模型的准确率更高。这 4 种方法与真实值的拟合如图 7 所示。对比图 6 和图 7 可知,PCR-HBRB 拟合效果更好,评估结果与实际企业风险状态更接近,进一步验证了模型的有效性。所有方法的 MSE 值对比如图 8 所示。

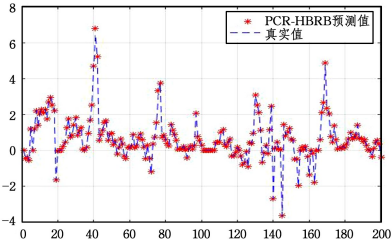


图 6 PCR-HBRB 与真实值拟合图

Fig. 6 Fitting results of FTA-BRB and real value

表 8 PCR-HBRB 和其他方法的 MSE

Table 8 MSE generated by PCR-HBRB and other methods

num	method	average MSE	best MSE
1	PCR-HBRB	0.002	0.057
2	BP	2.0876	7.447
3	GA	0.1541	0.1541
4	ELM	2.5676	10.848
5	factor analysis		

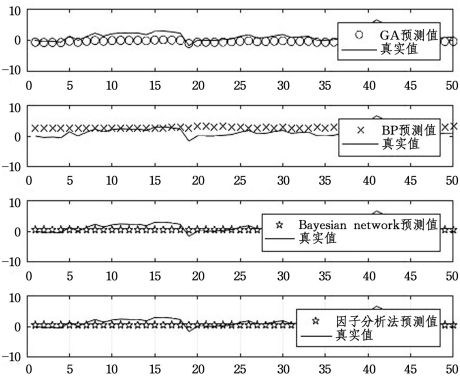


图 7 其他 4 种方法与真实值拟合图

Fig. 7 Fitting results of the other four methods and real value

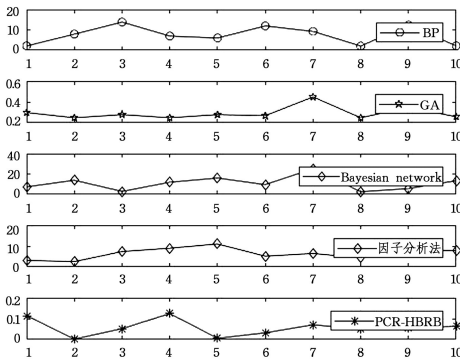


图 8 4 种方法和 PCR-HBRB 的 MSE 值对比

Fig. 8 MSE comparison of four methods and PCR-HBRB

通过对实验结果的分析,可以得到以下结论:

- 1)在 10 轮实验中,PCR-HBRB 的 MSE 在 0.002 和 0.1141 之间,在对比方法中 MSE 值最低。这表明 PCR-HBRB 模型能够有效对企业进行风险评估。
- 2)通过 PCR 筛选的指标能为后续 HBRB 建模提供有效支撑。
- 3)相较于其他单一的定性或定量风险评估方法,本文开

发的模型从半定量角度建模,对存在不确定信息的数据具有良好的处理能力。

结束语 为了有效对企业进行风险评估,本文先采用PCR方法筛选出对企业最具影响的指标,使得对企业的风险评估能够更精准,并且减少计算时间,同时利用筛选后的指标建立PCR-HBRB风险评估模型对企业风险状态进行评估,并且在已开发的PCR-HBRB风险评估模型的优化模型中优化模型参数,这样可以根据实际系统调整PCR-HBRB风险评估模型。

从案例研究可以看出,PCR-HBRB准确度较高,并且训练后的PCR-HBRB比BP,RBF,ELM性能更好,进一步验证了本文提出的PCR-HBRB企业风险评估模型能够有效地对企业目前风险状态进行评估。但其仍有改进的空间,由于企业在发展的过程中的风险指标在不断变化,而本文提出的模型无法动态进行风险评估,因此未来我们的研究方向将针对实时性进行探索,构建动态企业风险评估模型,从而对企业风险状态进行更有效的评估。

参 考 文 献

- [1] WANG Z Q, SONG X B, WANG Y Z. Evaluation and Research on Short-term Financial Risks of my country's Real Economy—Comprehensive Evaluation and Early Warning of Short-term Financial Risks with Consideration of Stock and Flow[J]. Management World, 2020, 36(10): 156-170, 216-222.
- [2] ZHAN X, GUO H, HE X Y, et al. Research on Security Risk Assessment Method of State Grid Edge Computing Information System[J]. Computer Science, 2019, 46(S2): 428-432.
- [3] LIU J F, CHEN J. Evaluation of Network Node Invasion Risk Based on Fuzzy Game Rules[J]. Computer Science, 2018, 45(10): 138-141.
- [4] CHEN X, XIANG Y. Construction and Application of Enterprise Risk Knowledge Graph [J]. Computer Science, 2020, 47(11): 237-243.
- [5] DU G S, LIU Z X, LU H F. Application of innovative risk early warning mode under big data technology in Internet credit financial risk assessment[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2020, 386: 113260.
- [6] LI Y, LI S, JING L W. Financial Risk Network Evaluation Model Based on Bayesian Model and Machine Learning Algorithm [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(5): 1862-1869.
- [7] SUI S. Financial Risk Assessment of Listed Enterprises in Marine Engineering Equipment Manufacturing Industry[J]. Journal of Coastal Research, 2019, 94(sp1): 788-792.
- [8] QIONG K. Financial risk assessment model based on big data [J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 2019, 10(4): 14.
- [9] MO Q K, JIAN X T, SI M Y. Financial Risk Assessment of an Ocean Shipping Company Based on the AHP [J]. Journal of Coastal Research 2, 2020, 106(sp1): 481-485.
- [10] BRUNNER-KIRCHMAIR T M, WIENER M. Knowledge is power—conceptualizing collaborative financial risk assessment [J]. Journal of Risk Finance, 2019, 20(3): 226-248.
- [11] QIN MENGGE. China's one belt, one road, financial risk assessment based on factor analysis[J]. China Market, 2019(32): 14-16, 24.
- [12] QIU X G, WANG R Z, ZHANG W G, et al. Discrimination of

Mine Water Inrush Source Based on PCA-CRHJ model[J]. Industrial and Mining Automation, 2020, 46(11): 65-71.

- [13] HAN P P, XIA Y, DING M, et al. Wind farm equivalent modeling based on PCA and CA-ST methods[J]. Acta Solar Energy, 2020, 41(11): 267-277.
- [14] LIU Y, HU W, GUO X X, et al. Rapid discrimination of three marine fish surimi by Tri-step infrared spectroscopy combined with Principle Component Regression[J]. Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 2015, 149: 516-522.
- [15] YANG J B, XU D L. A study on generalising Bayesian inference to evidential reasoning[C]// International Conference on Belief Functions, BELIEF 2014. Belief Functions: Theory and Applications, 2014: 180-189.
- [16] YANG J B, LIU J, WANG J, et al. Belief rule-base inference methodology using the evidential reasoning approach—RIMER [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2006, 36(2): 266-285.
- [17] ZHAO F J, ZHOU Z J, HU C H, et al. A New Evidential Reasoning-Based Method for Online Safety Assessment of Complex Systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 48(6): 954-966.
- [18] QIU S Q, MOHAMED S, WALTER S, et al. A valuation-based system approach for risk assessment of belief rule-based expert systems[J]. Information Sciences, 2018, 466: 323-336.
- [19] ZHOU Z J, FENG Z C, HU C H, et al. Aeronautical relay health state assessment model based on belief rule base with attribute reliability[J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 197: 0950-7051.
- [20] ZHOU Z J, HU G Y, HU C H, et al. A Survey of Belief Rule-Based Expert System[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 1-15.
- [21] LI G L, ZHOU Z J, HU C H, et al. A new safety assessment model for complex system based on the conditional generalized minimum variance and the belief rule base[J]. Safety Science, 2017, 93: 108-120.
- [22] ZHOU Z J, HU G Y, ZHANG B C, et al. A Model for Hidden Behavior Prediction of Complex Systems Based on Belief Rule Base and Power Set[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 48(9): 1649-1655, 2018.
- [23] FENG Z C, ZHOU Z J, HU C, et al. A New Belief Rule Base Model With Attribute Reliability [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(5): 903-916.
- [24] HE W, HU G Y, ZHOU Z J, et al. A new hierarchical belief-rule-based method for reliability evaluation of wireless sensor network[J]. Microelectronics Reliability, 2018, 87: 33-51.
- [25] YIN X J, WANG Z L, ZHANG B C, et al. A Double Layer BRB Model for Health Prognostics in Complex Electromechanical System[J]. IEEE Access, 2017, 5: 23833-23847.



LIU Shan-shan, born in 1997, postgraduate. Her main research interests include artificial intelligence and belief rule base.



ZHU Hai-long, born in 1972, Ph.D, associate professor. His main research interests include artificial intelligence and so on.