

基于失效模式及影响分析的数字化转型风险分析

尤建新, 彭博达, 徐涛

(同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

摘要: 引入模糊集理论、灰色关联分析(grey relational analysis, GRA)和逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)对失效模式及影响分析方法(failure mode and effect analysis, FMEA)进行改进,构建面向企业数字化转型的风险分析模型。首先,通过文献分析、专家访谈和问卷调查等方式,提出影响企业数字化转型的六维度因素。其次,结合模糊集理论将专家小组的定性评价指标转化为定量指标;随后,考虑了风险因子的综合权重,通过GRA和TOPSIS方法对失效模式进行排序。最后,将该模型应用于检测行业计划进行数字化转型的某企业,以验证方法的可行性,并提出相应管理建议。

关键词: 数字化转型;失效模式及影响分析;模糊集理论;灰色关联分析;逼近理想解排序法

中图分类号: C93

文献标志码: A

Risk Analysis of Digital Transformation Based on Failure Mode and Effect Analysis

YOU Jianxin, PENG Boda, XU Tao

(School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An improved failure mode and effect analysis (FMEA) method based on fuzzy theory, grey relational analysis (GRA) and technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) was proposed to construct risk analysis model for enterprise digital transformation. Firstly, factors of six dimension that had influence on digital transformation were proposed by literature analysis, expert interview and questionnaire survey. Next, through fuzzy theory, the qualitative evaluation index of expert group was translated into quantitative index. Then, comprehensive weight of risk factors was considered, and failure modes were sorted

through GRA and TOPSIS. Finally, the model was applied to a digital transformation enterprise in the testing industry to verify its feasibility. Moreover, management measures were suggested based on the analysis results.

Key words: digital transformation; failure mode and effect analysis; fuzzy set theory; grey relational analysis; technique for order preference by similarity to ideal solution

新一轮科技革命和产业变革加速演进,大数据、云计算、人工智能等数字技术引发各领域产业结构重构,全球正在进入以“数字化、智能化”为特征的数字经济时代。特别是在新冠疫情大流行期间,远程医疗、在线教育、协同办公等服务广泛应用,展现了数字经济的强大韧性。数字经济发展背景下,数字化转型成为发展数字经济的重要组成部分。数字化转型是建立在数字化转换与数字化升级基础上,进一步触及公司核心业务,以构建新商业模式为目标的高层次转型^[1]。

随着产业数字化转型加速推进,越来越多主体参与进来。一方面,数字技术赋能企业商业模式创新、组织创新和产品创新,增强企业竞争力。另一方面,企业在数字化转型过程中组织业务模式、组织架构、组织文化等多方面的变革,给企业带来诸多风险与挑战。据大样本统计,我国工业企业数字化转型向中高级阶段发展的基础虽不断夯实,但仍有超过80%的企业未突破综合集成,数字化转型发展尚处于中级及以下阶段^[2]。根据麦肯锡于2016年发布的报告,数字化转型失败的企业高达70%^[3]。2018年中国1000强企业中近一半的企业虽把数字化转型作为企业战略核心,但转型的失败率仍高达70%到80%^[4]。根据埃森哲研究报告,2019年我国仅有9%

收稿日期: 2021-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(71671125);上海市青年科技英才扬帆计划(21YF1449500)

第一作者: 尤建新(1961—),男,教授,博士生导师,管理学博士,主要研究方向为管理理论与工业工程。

E-mail: yjx2256@vip.sina.com

通信作者: 徐涛(1993—),男,博士生,主要研究方向为管理理论与工业工程。E-mail: xutao0709@yeah.net



论文
拓展
介绍

的企业数字化转型成效显著^[5]。因此数字化转型成为企业发展的最大风险之一^[6]。在此背景下,分析、评估企业在数字化转型过程中可能存在的风险并提出相应的预防措施对企业成功实施数字化转型和发展数字经济具有重要意义。

现有文献中,已经有诸多学者对企业实施数字化转型时面临的挑战进行讨论。比如陈毅贤^[4]指出企业数字化转型成功与否不仅在于技术的硬实力,关键在于组织和经营管理的软实力。Ciara Heavin^[7]等人同样提出成功的数字化转型不仅依赖于技术,还需要优秀的领导、支持性的文化和新的业务流程。陈春花^[8]从六个方面探讨了传统企业数字化转型的问题,其中最大的挑战是企业转型过程中如何保证原业务增长。吕铁^[9]从四个方面分析了传统产业数字化转型的问题,包括缺乏方法论支撑、数据资产积累薄弱、核心数字技术与第三方服务供给不足以及数字鸿沟明显。张夏恒^[10]通过对377家第三产业中小企业的调查,发现企业数字化转型存在着认识不足、技术应用程度低、融资困难、缺乏人才等问题。李舒沁^[11]则是研究了欧盟中小企业转型的困难,包括缺乏资金、缺少数字技能熟练的员工和面对大公司时议价能力有限等。

尽管已经有学者对相关问题进行讨论,但针对数字化转型过程中风险管控的研究仍然较少。因此,本文引入失效模式及影响分析(failure mode and effect analysis, FMEA)方法,构建企业数字化转型风险评估模型。首先,通过文献分析、专家访谈和问卷调查等方式,提出影响企业数字化转型的六维度因素。其次,结合模糊集理论将专家小组的定性评价指标转化为定量指标;随后,考虑了风险因子的综合权重,通过结合灰色关联分析(grey relational analysis, GRA)和逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution,

TOPSIS)对失效模式进行排序。最后,将该模型应用于检测行业计划进行数字化转型的某企业,以验证方法的可行性,并提出相应管理建议。

1 模型构建

FMEA是一种常用的可靠性分析技术,可以主动识别已知和潜在的失效模式并加以预防^[12]。但传统FMEA模型存在着许多不足^[13]。针对传统FMEA模型中存在的不足,许多学者都提出了相应解决方法^[14-17]。本文在使用模糊集理论和TOPSIS的同时,结合GRA计算相对贴近度,以更准确地表现样本值与理想解的贴合程度,并以此为依据确定失效模式风险大小^[18]。本文首先采用三角模糊数将定性评价语言转化成定量评价数值,以此构建潜在失效模式的风险评价矩阵;随后,确定风险因子主观权重和客观权重,以此计算综合权重,得到加权风险评价矩阵;其次,以加权风险评价矩阵为基础,计算样本数值与正、负理想解的欧式距离和灰色关联度;最后,综合欧式距离和灰色关联度计算失效模式的相对贴近度,并根据相对贴近度进行风险排序。

1.1 确定潜在失效模式

为分析企业数字化转型过程中的风险,本文基于文献分析、专家访谈、问卷调查等方式收集企业专家意见,并借鉴全面质量管理理论中影响质量的人、机、料、法、环五个因素,提出了影响企业数字化转型的六维度因素,包括人员,技术,资产,企业政策,组织架构和组织文化。其中,组织架构和组织文化均对应环境因素。考虑到数据作为企业数字化转型的关键要素,已成为企业的重要资源和战略资产^[19],因此资产维度中还包含数据资产风险。风险维度、失效模式编号和失效模式及影响如表1所示。

表1 企业数字化转型的失效模式及影响

Tab.1 Failure modes and effects of enterprise digital transformation

风险维度	失效模式编号	失效模式及影响
人员	FM1	缺少数字化转型人才,使企业难以找到转型的方向和路径
	FM2	领导不重视,缺乏沟通与宣传,导致员工对转型不理解或不认可
	FM3	员工只关注自身绩效,不对组织负责,导致转型工作难以实施
技术	FM4	缺少数字化技术或设备,无法形成新的业务模式
	FM5	数据资产积累薄弱,难以挖掘潜在价值,应用范围窄
资产	FM6	企业资金有限,无法对转型进行较大的投资
	FM7	对数字化转型内涵和重要性的认识不足,难以制定转型战略
企业政策	FM8	战略制定不当,企业在转型过程中破坏了原业务的增长和盈利能力
	FM9	部门间有矛盾和隔阂,导致信息传达衰减、沟通不畅,易形成“数据孤岛”
组织架构	FM10	系统封闭,缺少开放型的组织架构,难以实现与产业链上下游组织的合作
	FM11	缺少协同共生的企业文化,故步自封,阻碍转型工作的开展

1.2 模糊语言评价

(1) 构建风险因子模糊术语集

本文采用传统FMEA模型中的三种风险因子进行分析,分别为严重度(S)、发生度(O)和检测度

(D)^[13]。在对S、O、D进行定性评价之前,需要先建立相应的模糊术语集。本文使用{极低(R)、低(L)、中等(M)、高(H)、极高(V)}的五粒度模糊术语集进行描述,模糊术语集的具体含义见表2。

表2 模糊术语集含义

Tab.2 Meaning of fuzzy evaluative terms

模糊术语	严重度(S)	发生度(O)	检测度(D)
极低(R)	几乎不会影响企业数字化转型	发生概率极低	基本可确定被检测出
低(L)	对企业数字化转型有一定影响但可以克服	发生概率低	被检测出的概率高
中等(M)	导致企业数字化转型困难,影响企业正常运转	发生概率中等	被检测出的概率中等
高(H)	严重影响企业数字化转型,企业运转严重失常	发生概率高	很难被检测出
极高(V)	导致企业数字化转型失败	发生概率极高	几乎不会被检测出

(2) 确定模糊术语对应的三角模糊数

本文使用三角模糊数将定性评价语言进行定量化处理。三角模糊数可表示为 $A=(a, b, c)$,其中 a 和 c 分别为模糊数的下限和上限, b 为可能性最大的值。三角模糊数的隶属函数为

$$\mu_A(u) = \begin{cases} (u-a)/(b-a), & a < u \leq b \\ (c-u)/(c-b), & b < u \leq c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

根据专家知识和经验确定模糊术语对应的三角模糊数。假设有 k 个专家,第 l 个专家的权重 λ_l 可根据其专业程度和从业时间等因素来确定,该专家对失效模式某一风险因子的模糊评价术语为 $u_l=(a_l, b_l, c_l)$,根据式(2)综合所有专家的评价信息可得该语言术语对应的三角模糊数。

$$a = \sum_{l=1}^k \lambda_l a_l, b = \sum_{l=1}^k \lambda_l b_l, c = \sum_{l=1}^k \lambda_l c_l \quad (2)$$

其中, $\sum_{l=1}^k \lambda_l = 1$

(3) 三角模糊数去模糊化

模糊数去模糊化是应用GRA和TOPSIS计算的基础^[20],本文采用如下公式进行去模糊化处理^[21],即

$$A(u) = \frac{1}{6}(a + 4b + c) \quad (3)$$

1.3 计算风险因子权重与评价矩阵

1.3.1 构建初始风险评价矩阵

假设对 m 个失效模式从 n 个风险因子角度进行评价,结合专家权重,综合所有专家的评价信息,得到去模糊化之后相应的各指标值为 $r_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$,初始风险评价矩阵为 $R=(r_{ij})_{m \times n}$ 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

1.3.2 风险评价矩阵规范化

用向量规范化方法处理初始风险评价矩阵^[22],得到规范化风险评价矩阵 $X=(x_{ij})_{m \times n}$ 。

$$x_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij})^2}} \quad (4)$$

1.3.3 确定风险因子权重

(1) 确定风险因子主观权重

专家根据知识和经验对风险因子的权重进行主观评价。假设共有 k 个专家对 n 个风险因子的权重进行评价,则第 l 个专家对第 j 个风险因子权重的评价值为 c_{jl}^l 。

风险因子的综合主观权重向量为 $C=(c_1, c_2, \dots, c_n)$ 。

$$c_j = \sum_{l=1}^k \lambda_l c_{jl}^l, \sum_{j=1}^n c_j = 1 \quad (5)$$

(2) 确定风险因子客观权重

采用熵权法^[23]确定各个风险因子的客观权重。第 j 个风险因子的客观权重为 v_j ,风险因子的客观权重向量为 $V=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 。其中,

$$v_j = \frac{(1-b_j)}{\sum_{j=1}^n (1-b_j)} \quad (6)$$

$$b_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m a_{ij} \ln a_{ij} \quad (7)$$

$$a_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij} (j=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

(3) 确定风险因子综合权重

本文采用乘法合成的方法将主观权重和客观权重结合起来^[24],得到综合权重向量 $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

$$\omega_j = \frac{c_j v_j}{\sum_{j=1}^n c_j v_j} \quad (9)$$

(4) 计算加权风险评价矩阵

根据式 (10) 计算加权风险评价矩阵 $Y = (y_{ij})_{m \times n}$ [24]。

$$Y = (y_{ij})_{m \times n} = (\omega_j x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

1.4 风险排序

(1) 计算正、负理想解 [22]

正理想解为 $Y^+ = (y_1^+, y_2^+, \dots, y_n^+)$; 负理想解为 $Y^- = (y_1^-, y_2^-, \dots, y_n^-)$ 。其中,

$$y_j^+ = \max \{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{mj}\}, j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$y_j^- = \min \{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{mj}\}, j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

(2) 计算欧式距离 [22]

第 i 个失效模式的评价值到正、负理想解的欧式距离分别为 D_i^+ 和 D_i^- , 则

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

(3) 计算灰色关联度 [24]

以加权风险评价矩阵为基础, 计算第 i 个失效模式第 j 种风险因子的评价值与正理想解的灰色关联系数 ρ_{ij}^+ 。 $\xi \in [0, 1]$, 通常可取值 $\xi = 0.5$ 。

$$\rho_{ij}^+ = \frac{\min_{1 \leq j \leq n} \min_{1 \leq i \leq m} (|y_j^+ - y_{ij}|) + \xi \max_{1 \leq j \leq n} \max_{1 \leq i \leq m} (|y_j^+ - y_{ij}|)}{|y_j^+ - y_{ij}| + \xi \max_{1 \leq j \leq n} \max_{1 \leq i \leq m} (|y_j^+ - y_{ij}|)} \quad (15)$$

失效模式的评价值与正理想解的灰色关联系数矩阵为

$$P^+ = \begin{bmatrix} \rho_{11}^+ & \cdots & \rho_{1n}^+ \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1}^+ & \cdots & \rho_{mn}^+ \end{bmatrix} \quad (16)$$

第 i 个失效模式的评价值与正理想解的灰色关联度为

$$P_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \rho_{ij}^+, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (17)$$

同理, 可以计算失效模式的评价值与负理想解的相关数值与矩阵。

$$\rho_{ij}^- =$$

$$\frac{\min_{1 \leq j \leq n} \min_{1 \leq i \leq m} (|y_j^- - y_{ij}|) + \xi \max_{1 \leq j \leq n} \max_{1 \leq i \leq m} (|y_j^- - y_{ij}|)}{|y_j^- - y_{ij}| + \xi \max_{1 \leq j \leq n} \max_{1 \leq i \leq m} (|y_j^- - y_{ij}|)} \quad (18)$$

$$P^- = \begin{bmatrix} \rho_{11}^- & \cdots & \rho_{1n}^- \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1}^- & \cdots & \rho_{mn}^- \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$P_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \rho_{ij}^-, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (20)$$

(4) 将欧式距离和灰色关联度的量纲化为一 [25]

以 M_i 代表 $D_i^+, D_i^-, P_i^+, P_i^-$, m_i 代表量纲化为一后得到的数值 $d_i^+, d_i^-, p_i^+, p_i^-$, 计算公式为:

$$m_i = \frac{M_i}{\max_{1 \leq i \leq m} (M_i)}, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (21)$$

(5) 综合量纲为一的欧氏距离与灰色关联度 [25]

d_i^- 和 p_i^+ 的数值越大, 第 i 个失效模式的评价值越接近理想解; d_i^+ 和 p_i^- 数值越大, 第 i 个失效模式的评价值越远离理想解。综合考虑量纲为一的欧氏距离和灰色关联度, 得到:

$$S_i^+ = \alpha_1 d_i^- + \alpha_2 p_i^+, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (22)$$

$$S_i^- = \alpha_1 d_i^+ + \alpha_2 p_i^-, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (23)$$

其中, α_1, α_2 反映了决策者的偏好程度, 并且满足 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, 决策者可根据自身偏好确定它们的数值。

(6) 计算相对贴进度 [25]

相对贴进度可以反映待评失效模式的评价值与正理想解或负理想解的接近程度, 计算相对贴进度 γ_i 。

$$\gamma_i = \frac{S_i^+}{S_i^+ + S_i^-}, i = 1, 2, \dots, m \quad (24)$$

根据计算出的 γ_i 对各种失效模式进行排序, γ_i 越大表示待评样本越贴近正理想样本, 失效模式的风险越大, 应该优先处理; 反之, 则失效模式的风险越小。

2 模型应用

本文以检测行业计划进行数字化转型的某企业为例, 对影响其数字化转型的风险进行分析。该企业专业从事桥梁、隧道、公路、建筑等工程质量检测以及环境检测, 是当地规模较大、检测参数及项目最全的检验检测机构之一。企业已经制定信息系统战略规划, 对传统检测业务进行信息化改造, 目前已建

成多个信息化管理平台及系统。随着行业内竞争愈加激烈,企业后续规划实现多平台的数据互通,深挖积累的海量检测数据的潜在价值,实现数据再增值。

2.1 失效模式优先度排序

首先,由企业中从事数字化转型工作的人员组

成专家评价小组,并根据专家的专业程度、从业时间等因素确定专家权重,分别为0.25、0.25、0.2、0.2和0.1;再结合模糊集理论建立对失效模式风险因子进行评价的模糊术语集和对应的三角模糊数,内容如表3所示。

表3 模糊术语集及相应三角模糊数

Tab.3 Fuzzy linguistic term and corresponding triangular fuzzy numbers

专家	λ_i	R	L	M	H	V
1	0.25	(0,1.2,2.7)	(1.3,3.4,4.9)	(3.4,5.4,7.9)	(5.6,7.5,9.2)	(7.8,9.2,10)
2	0.25	(0,1.3,2.9)	(1.4,3.6,5.1)	(3.5,5.6,8.1)	(5.8,7.6,9.2)	(8,9.3,10)
3	0.2	(0,1.2,2.6)	(1.2,3.1,4.7)	(3.3,5.4,7.7)	(5.2,7.3,9)	(7.6,8.9,10)
4	0.2	(0,1.2,2.5)	(1.3,3.3,4.8)	(3.5,5.5,8.2)	(5.5,7.5,9.1)	(7.8,9.1,10)
5	0.1	(0,1.3,2.8)	(1.3,3.2,4.8)	(3.5,5.5,8)	(5.5,7.4,9)	(7.7,9.1,10)
总计	1	(0,1.235,2.7)	(1.305,3.35,4.88)	(3.435,5.48,7.98)	(5.54,7.475,9.12)	(7.8,9.135,10)

根据式(3)将三角模糊数转化成清晰数,保留两位小数,具体数值如表4所示。

表4 三角模糊数对应的清晰数

Tab.4 Clear numbers corresponded to triangular fuzzy numbers

语言术语	R	L	M	H	V
清晰数	1.27	3.26	5.56	7.43	9.06

对失效模式进行专家评价,其中专家一的评价结果如表5所示。综合专家评价信息得到风险评价矩阵,并根据式(4)对评价矩阵进行规范化处理。再对风险因子的主观权重进行专家评价,根据式(5)~(9)分别计算出风险因子的客观权重与综合权重,得到的结果如表6所示;然后根据式(10)计算出加权风险评价矩阵,如表7所示。

表5 失效模式专家评价

Tab.5 Evaluation of failure modes from expert

失效模式	严重度(S)	发生度(O)	检测度(D)
FM1	V	H	L
FM2	M	H	M
FM3	M	M	M
FM4	V	M	R
FM5	M	M	L
FM6	V	H	L
FM7	H	M	L
FM8	M	M	L
FM9	M	V	M
FM10	H	M	M
FM11	H	H	M

以加权风险评价矩阵为基础,确定正、负理想解,计算出欧氏距离与灰色关联度;然后将其量纲为一并取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$,计算出相对贴近度;根据相对贴近度对失效模式进行排序,得到的最终结果如表8所示。

表6 风险因子权重

Tab.6 Weights of risk factors

权重	严重度(S)	发生度(O)	检测度(D)
专家1(0.25)	0.4	0.3	0.3
专家2(0.25)	0.5	0.3	0.2
专家3(0.2)	0.4	0.4	0.2
专家4(0.2)	0.5	0.2	0.3
专家5(0.1)	0.4	0.3	0.3
客观权重	0.299	0.256	0.445
综合权重	0.412	0.237	0.351

表7 加权风险评价矩阵

Tab.7 Weighted risk assessment matrix

失效模式	严重度(S)	发生度(O)	检测度(D)
FM1	0.157	0.068	0.066
FM2	0.114	0.071	0.122
FM3	0.095	0.075	0.136
FM4	0.144	0.059	0.084
FM5	0.098	0.063	0.103
FM6	0.138	0.080	0.092
FM7	0.117	0.066	0.097
FM8	0.114	0.062	0.096
FM9	0.111	0.094	0.113
FM10	0.141	0.062	0.124
FM11	0.123	0.080	0.111

2.2 排序结果对比分析

为更好地说明本文提出的方法的优势,综合传统FMEA方法、基于TOPSIS的FMEA方法和本文方法进行对比分析,得到的结果如表9所示。

通过比较计算结果可以发现,采用传统FMEA方法对失效模式进行排序时,FM11的优先度最高;而采用基于TOPSIS的FMEA方法和本文方法进行排序时,FM10的优先度最高。这是因为后两者考虑了风险因子的权重,因严重度的权重更大,所以FM10排序更加靠前。这表明本文方法可以显示风险因子的相对重要性。

表 8 失效模式相对贴近度
Tab.8 Relative similarity of failure modes

失效模式	d_i^-	p_i^+	d_i^+	p_i^-	S_i^+	S_i^-	相对贴近度	排序
FM1	0.835	0.937	1.000	0.941	0.886	0.971	0.477	7
FM2	0.808	0.867	0.672	0.776	0.837	0.724	0.536	5
FM3	0.968	0.989	0.859	0.880	0.979	0.870	0.530	6
FM4	0.699	0.804	0.859	0.908	0.752	0.883	0.460	8
FM5	0.499	0.699	0.986	1.000	0.599	0.993	0.376	11
FM6	0.742	0.896	0.656	0.715	0.819	0.685	0.544	4
FM7	0.525	0.738	0.827	0.861	0.632	0.844	0.428	9
FM8	0.487	0.710	0.886	0.918	0.598	0.902	0.399	10
FM9	0.816	1.000	0.684	0.706	0.908	0.695	0.566	2
FM10	1.000	0.965	0.502	0.755	0.983	0.629	0.610	1
FM11	0.766	0.890	0.591	0.706	0.828	0.649	0.561	3

表 9 3种方法的计算结果
Tab.9 Calculations of three methods

失效模式	传统FMEA方法					基于TOPSIS的FMEA方法		本文方法	
	严重度(S)	发生度(O)	检测度(D)	RPN	排序	相对贴近度	排序	相对贴近度	排序
FM1	9	6	3	162	9	0.454	7	0.477	7
FM2	7	6	5	210	5	0.544	3	0.536	5
FM3	5	7	6	210	5	0.529	5	0.530	6
FM4	8	5	4	160	10	0.448	8	0.460	8
FM5	6	6	4	144	11	0.335	11	0.376	11
FM6	8	7	4	224	4	0.529	5	0.544	4
FM7	7	6	4	168	7	0.387	9	0.428	9
FM8	7	6	4	168	7	0.353	10	0.399	10
FM9	6	8	5	240	2	0.543	4	0.566	2
FM10	8	6	5	240	2	0.665	1	0.610	1
FM11	7	7	5	245	1	0.563	2	0.561	3

在传统 FMEA 方法中,FM9 和 FM10 之间、FM2 和 FM3 之间、FM7 和 FM8 之间的得分相同,无法更精确地对两者进行比较,利用本文方法则解决了其排序问题。并且由于考虑了风险因子的权重,FM11 的优先度有所下降,排到第 3 位,FM1 和 FM4 的排序反而有所提升。

在基于 TOPSIS 的 FMEA 方法中,虽然同样考虑了风险因子的权重,但计算结果表明,当保留三位小数时,相对贴近度的精确度不足。例如 FM9 和 FM2 的相对贴近度只相差 0.01,FM3 和 FM6 的相对贴近度相等。而利用本文方法,计算出的相对贴近度有了明显差别,使失效模式更易于排序。

2.3 失效模式排序分析

通过最终排序结果可以发现,该企业在数字化转型过程中,最需要优先处理的失效模式在组织架构(FM9、FM10)和组织文化(FM11)方面;该结果与企业现状较为符合。企业目前希望与产业链上下游实现资源共享和业务拓展,比如将建筑工程的设计数据和检测数据良性打通来为建设、管理、运营一体化服务,进而建立覆盖整个建设工程领域的信息战略联盟,形成一站式服务,增强在行业内的竞争

力。但实际工作中并未产生数据互通与信息共享,只是在业务中以个人关系的方式产生单点联系。从企业经验来看,在企业内部,普遍存在数据孤岛现象,难以实现数据共享,严重影响企业的数字化转型。在与上下游产业的联系方面,如果企业是一个封闭的系统,便难以获取外界信息,无法充分调动内外部资源进行数字化转型,无法形成良好的产业生态。另外,数字化转型需要企业内部所有员工的共同合作与努力,因此需要形成协同共生的企业文化^[8]。

其次,当企业有足够能力解决组织架构和组织文化方面的失效模式后,需要处理的失效模式集中在资金(FM6)和人员(FM1、FM2、FM3)方面。资金为企业转型提供保障,缺少资金的企业将难以引入先进信息化技术。若企业强行投入过多资金,则极有可能影响其传统业务,甚至产生破坏性后果。在人员方面,企业进行数字化转型不仅需要相应的人才,还需要领导足够重视,调动员工积极性,实现全员参与。

再次,技术(FM4)和政策(FM7、FM8)方面的失效模式排序较为靠后,企业不必对其优先处理但

仍需兼顾。数字化技术是数字化转型的重要支撑,该企业已建立诸多平台和系统,其他技术可通过自主研发或外购获得。政策可以为企业指明转型方向,企业需根据自身业务特点和需求制定合理的数字化战略,该企业目前已制定合理的初步战略。排在最后的失效模式是数据资产(FM5),该企业在发展过程中已积累大量数据,数据量的多少及数据应用对其转型的影响较小。但是数据为数字化转型的关键要素,企业仍需注重对数据资产的梳理,提升数据资产质量。

2.4 管理建议

针对该企业需要优先解决的数字化转型风险,本文提出以下建议:

(1)构建开放型组织,促进产业上下游合作。通过与产业内上下游企业进行合作,将能有效填补产业内企业的数字鸿沟,构建数字产业生态,从而挖掘业务增长点。

(2)领导重视、全员参与,形成协同共生文化。企业领导需要重视数字化转型工作,为员工带来信心与决心,通过广泛宣传,激发员工数字化转型热情,营造良好的转型氛围,同时加强培训,提高员工素养和能力。

(3)保证数字化转型的资金投入。企业在发展具有数字化特征的新业务的同时,需要激活传统业务来确保企业的盈利能力,以保证有足够的资金支持转型工作。

3 结语

分析、评估企业数字化转型过程中可能存在的风险并提出相应的预防措施对企业实施数字化转型和发展数字经济具有重要意义。本文利用模糊集理论、GRA和TOPSIS对传统的FMEA方法进行改进,并将其运用于具体案例。通过研究表明,改进后的模型有如下优点:

(1)使用模糊集理论,增加了将定性评价语言转化为定量数值的准确性,更能反映专家的评价语言信息;

(2)考虑了风险因子S、O、D的权重,将主观权重与客观权重结合起来,避免了由于认知偏差等原因造成的主观性过强的现象;

(3)解决了不同风险因子数值组合产生相同RPN值而导致的失效模式无法精确排序的问题。本文将提出的模型应用于计划进行数字化转型的某

企业,对其可能存在的风险进行评估,并从企业组织、企业文化和资金投入等方面提出相应管理建议。

本文研究仍存在一些不足之处,同时为进一步研究提供建议:

(1)本文在确定专家权重时较为主观,缺乏方法论支撑,未来研究可探索更加客观的权重分配方法。

(2)本文仍使用传统FMEA方法中的三个风险因子(严重度、发生度和探测度)对企业数字化转型的失效模式进行评价,未必能够完全准确地反应失效模式的特点,未来研究可探索新的风险因子,以使失效模式的排序更加精确。

作者贡献声明:

尤建新: 提出选题,设计论文框架。

彭博达: 整理文献,模型构建,论文的撰写和修改。

徐涛: 案例分析,模型完善,论文的撰写和修改。

参考文献:

- [1] 陈劲,杨文池,于飞.数字化转型中的生态协同创新战略——基于华为企业业务集团(EBG)中国区的战略研讨[J].清华管理评论,2019(6):22.
CHEN Jin, YANG Wenchi, YU Fei. Ecological collaborative innovation strategy in digital transformation—strategy discussion based on China region of Huawei enterprise business group (EBG)[J]. Tsinghua Business Review, 2019(6):22.
- [2] 李君,邱君降,成雨.工业企业数字化转型过程中的业务系统集成现状与发展对策[J].中国科技论坛,2019(7):113.
LI Jun, QIU Junjiang, CHENG Yu. Status quo and development countermeasures of industrial enterprises' business comprehensive integration during digital transformation [J]. Forum on Science and Technology in China, 2019(7):113.
- [3] MICHAEL B, ADRIAN F, GREG K, et al. The 'how' of transformation [R/OL]. [2016-5-9] <https://www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/the-how-of-transformation>.
- [4] 陈毅贤.八成企业数字化转型为何失败[N].中国企业报,2019-12-24(9).
CHEN Yixian. Why most of enterprises fail in digital transformation[N]. China Enterprise News, 2019-12-24(9).
- [5] 埃森哲.2019埃森哲中国企业数字转型指数研究[R/OL]. [2019-09-10] <https://www.accenture.cn/cn-zh/insights/digital/digital-transformation-index-2019>.
Accenture. China enterprise digital transformation index 2019 [R/OL]. [2019-09-10] <https://www.accenture.cn/cn-zh/insights/digital/digital-transformation-index-2019>.
- [6] NC State University's ERM Initiative, & Protiviti. Executive perspectives on top risks 2020—key issues being discussed in the boardrooms and c-suite [R/OL]. [2020-01-01] <https://www.protiviti.com/UK-en/insights/protiviti-top-risks-survey>.
- [7] HEAVIN C, POWER D J. Challenges for digital transformation -

- towards a conceptual decision support guide for managers [J]. *Journal of Decision Systems*, 2018, 27(S1):38.
- [8] 陈春花. 传统企业数字化转型能力体系构建研究[J]. *人民论坛·学术前沿*, 2019(18):6.
CHEN Chunhua. Research on building the digitalized transformation capability system of traditional enterprises [J]. *Frontiers*, 2019(18):6.
- [9] 吕铁. 传统产业数字化转型的趋向与路径[J]. *人民论坛·学术前沿*, 2019(18):13.
LÜ Tie. Trend and path of digitalized transformation of the traditional industries [J]. *Frontiers*, 2019(18):13.
- [10] 张夏恒. 中小企业数字化转型障碍、驱动因素及路径依赖——基于对377家第三产业中小企业的调查[J]. *中国流通经济*, 2020, 34(12):72.
ZHANG Xiaheng. Obstacles, driving factors and path dependence of digital transformation of small and medium-sized enterprise [J]. *China Business and Market*, 2020, 34(12):72.
- [11] 李舒沁. 欧盟支持中小企业数字化转型发展政策主张及启示[J]. *管理现代化*, 2020, 40(5):65.
LI Shuqin. EU's policy propositions and enlightenment on supporting the digital transformation of small and medium sized enterprises [J]. *Modernization of Management*, 2020, 40(5):65.
- [12] HUANG Jia, YOU Jianxin, LIU Huchen, *et al.* Failure mode and effect analysis improvement: a systematic literature review and future research agenda [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 199. DOI: 10.1016/j.res.2020.106885.
- [13] LIU Huchen, LIU Long, LIU Nan. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: a literature review [J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(2):828.
- [14] LIU Huchen, YOU Jianxin, DUAN Chunyan. An integrated approach for failure mode and effect analysis under interval-valued intuitionistic fuzzy environment [J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 207(1):163.
- [15] BHATTACHARJEE P, DEY V, MANDAL U K. Risk assessment by failure mode and effects analysis (FMEA) using an interval number based logistic regression model [J]. *Safety Science*, 2020, 132. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104967.
- [16] 尤建新, 徐涛, 毛人杰. 基于失效模式与后果分析的农场到家庭模式风险分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(4):604.
YOU Jianxin, XU Tao, MAO Renjie. Evaluation of the risk of farm to family failure modes using failure mode and effects analysis [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(4):604.
- [17] 尤建新, 郭仁祝, 杨迷影. 基于失效模式与后果分析的混合燃料发动机风险分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5):731.
YOU Jianxin, GUO Renzhu, YANG Miyong. Risk analysis of blended fuel engine based on an improved failure mode and effect analysis method [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(5):731.
- [18] 李彦斌, 于心怡, 王致杰. 采用灰色关联度与TOPSIS法的光伏发电项目风险评价研究[J]. *电网技术*, 2013, 37(6):1514.
LI Yanbin, YU Xinyi, WANG Zhijie. Risk assessment on photovoltaic power generation project by grey correlation analysis and TOPSIS method [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(6):1514.
- [19] 尤建新, 徐涛. 基于多准则决策方法的数据资产质量评价模型[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(4):585.
YOU Jianxin, XU Tao. A data asset quality evaluation model based on a multi-criteria decision-making method [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(4):585.
- [20] 门峰, 姬升启. 基于模糊集与灰色关联的改进FMEA方法[J]. *工业工程与管理*, 2008(2):55.
MEN Feng, JI Shengqi. An improved FMEA based on fuzzy set theory and grey relational theory [J]. *Industrial Engineering and Management*, 2008(2):55.
- [21] LIU Huchen, YOU Jianxin, LIN Qinglian, *et al.* Risk assessment in system FMEA combining fuzzy weighted average with fuzzy decision-making trial and evaluation laboratory [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2015, 28(7):701.
- [22] WANG Peng, ZHU Zhouquan, WANG Yonghu. A novel hybrid MCDM model combining the SAW, TOPSIS and GRA methods based on experimental design [J]. *Information Sciences*, 2016, 345:27.
- [23] 章穗, 张梅, 迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. *管理学报*, 2010, 7(1):34.
ZHANG Sui, ZHANG Mei, CHI Guotai. The science and technology evaluation model based on entropy weight and empirical research during the 10th five-year of China [J]. *Chinese Journal of Management*, 2010, 7(1):34.
- [24] 武春友, 郭玲玲, 于惊涛. 基于TOPSIS-灰色关联分析的区域绿色增长系统评价模型及实证[J]. *管理评论*, 2017, 29(1):228.
WU Chunyou, GUO Lingling, YU Jingtao. Evaluation model and empirical study of regional green growth system based on TOPSIS and grey relational analysis [J]. *Management Review*, 2017, 29(1):228.
- [25] TANG Juan, ZHU Honglin, LIU Zhi, *et al.* Urban sustainability evaluation under the modified TOPSIS based on grey relational analysis [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019. DOI: 10.3390/ijerph16020256.