

分层构权灰色主成分评价模型及其应用

王玲玲^{1,2†}, 方志耕¹

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106; 2. 江苏大学 财经学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 针对评价实践中客观存在的“原始变量不多”与“样本量不多”, 构建分层构权灰色主成分评价模型. 首先, 在科学设置评价子系统及下属指标项的前提下, 分层赋予相应归一化重要性权; 其次, 生成评价所需的加权规格化矩阵, 据此计算灰色相似关联度矩阵, 替代相关系数矩阵求解评价样本各子系统的主成分综合得分; 然后, 将所得分值按各子系统重要性权进一步合成得出最终评价依据; 最后, 结合火电机组性能综合评价实例, 对不同评价方法得出的评价实际效果进行对比分析. 理论研究及案例分析论证表明, 对于评价实践中存在的少变量、小样本以及评价指标间不一定满足线性相关关系的情形, 分层构权灰色主成分评价模型具备科学性、有效性和较优的适用性.

关键词: 灰色相似关联度; 分层构权; 主成分评价; 灰色评价; 多指标评价; 火电机组

中图分类号: C81

文献标志码: A

Multi-layer weighted grey principal component evaluation model and its application

WANG Ling-ling^{1,2†}, FANG Zhi-geng¹

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. Department of Economics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Considering the lack of primitive variables and samples, which exists objectively in the evaluation practice, the multi-layer weighted grey principal component evaluation model is constructed. Firstly, the normalized importance weights are assigned to the subsystem of the evaluation system and the corresponding indices respectively under the premise that all of them are established scientifically. On that basis, the weighted normalized matrix for evaluation is generated to calculate the grey similitude correlation degree matrix, and the principal component scores of each evaluation subsystem are calculated based on it instead of the traditional correlation matrix. Then, the final evaluation basis is obtained through weighting the scores of each evaluation subsystem by their importance weights. Finally, performances of thermal power generation units are analyzed comparatively by using different evaluation models including the proposed model. Theoretical research and case analysis demonstrate that the proposed model is scientific, effective and more suitable in these situations where there are insufficient evaluation variables, or the sample size is small, as well as there may be a non-linear correlation between evaluation indicators.

Keywords: similitude degree of grey incidence; multi-layer weighted; principal component evaluation; grey evaluation; multi-index evaluation; thermal power generation unit

0 引言

主成分分析法操作方便^[1], 其降维思想与多指标评价指标序化的要求十分契合^[2], 是目前应用最为广泛的降维方法之一^[3]. 但是一些学者同时也指出, 主成分分析法的应用受一定条件限制: 1) 原始变量不多、数据结构比较简单的问题不适合用主成分分析^[4]; 2) 主成分是原始指标的线性组合, 因而它是一种“线性”降维技术, 只能处理线性问题^[1,5]; 3) 指标

是正向、标准化的, 主成分与变量显著相关^[6].

考虑到灰色关联度可以测度序列或者变量之间的非线性、小样本的关联关系, 针对主成分分析存在的一些局限, 本文将灰色关联度和主成分分析加以融合, 构建分层构权灰色主成分评价模型.

1 文献综述

作为主流研究方法, 主成分分析相关研究十分活跃. 一些学者对主成分分析原始数据无量纲化方

收稿日期: 2017-10-23; 修回日期: 2018-04-02.

基金项目: 国家社科基金项目(12AZD102); 国家自然科学基金项目(71673120, 71503105).

责任编辑: 李登峰.

†通讯作者. E-mail: wangll@ujs.edu.cn.

法进行了研究. 孟生旺^[7]认为, 采用标准化方法(Z-SCORE)在消除量纲和数量级影响的同时, 丢失了原始数据的部分信息, 因而建议采用均值化方法; 这一观点的合理性已通过数学推导加以证明^[5], 并且在装备战备水平评估^[8]、火电机组综合评价^[9]等多领域评价实践中得到成功应用. 还有学者考虑权重应兼顾重要性权与信息量权, 对规格化后的原始数据进一步加重要性权再进行主成分分析^[2, 10].

针对主成分分析评价指标之间信息重复问题, 许多学者将分级评价指标体系的思路引入主成分分析^[2, 11], 并构建了分层构权主成分评价模型^[12-13]、组合加权主成分评价模型^[14]等.

对于指标间存在的非线性关系或主成分与原始数据之间的非线性关系, 学者们提出了核主成分分析法^[1, 15]、“对数中心化”的非线性主成分分析法^[5]、随机非线性主成分分析法^[16]、基于非线性投影的对数主成分评价法^[17]和灰色主成分评价模型^[18]等.

还有一些学者结合实际研究问题的特点, 探讨了面向变量均值与协方差结构时变的切换主成分分析法^[19]、面向函数型数据的函数型主成分分析法^[20]、面向样本中含有离群值的稳健主成分分析法^[21]等.

上述研究涵盖了主成分分析的所有主要步骤, 使得主成分分析能更加有效地实现信息集结. 本文充分借鉴和综合上述研究成果, 构建分层构权灰色主成分评价模型. 其整体思路是先对评价指标体系进行分层, 由此将评价总系统划分为若干子系统, 对各评价子系统及下属指标项分层赋予相应归一化重要性权; 然后基于加重要性权后的数据计算灰色相似关联度矩阵, 替代相关系数矩阵求解子系统主成分综合得分, 将所得分值进一步按重要性加权合成最终评价依据. 相对于现有的一些研究成果, 本文提出的方法具有以下优势: 通过分层, 解决了指标体系信息重复的问题; 由于灰色系统研究的是贫信息、小样本的问题, 采用灰色关联度, 不仅可以度量指标间的非线性关系, 还可以用于评价对象较少或者分层后评价指标较少的情况; 而且本文对几种典型的灰色关联度进行了分析, 引入了更为合适的灰色相似关联度. 本文所提出的分层构权灰色主成分评价模型是对主成分分析的一个有益探索, 能为解决一些特定问题提供合适、合理的方法.

2 分层构权灰色主成分评价模型构建与实施步骤设计

2.1 分层构权灰色主成分评价模型构建

定义1 将评价指标体系中所有逆向指标与适度性指标对应的原始数据正向化处理, 再进行无量

纲化处理, 由此所得数据称为正向规格化数据.

正向规格化数据获得的具体方式, 可以借鉴现有的相关成果, 如文献[6]、文献[9]等. 在综合评价尤其是复杂系统评价过程中, 不再将多个评价指标放在同一层面, 而是按“类内的各指标具有较高正相关性”的原则将评价总系统划分为 $k(k = 1, 2, \dots, l)$ 个评价子系统, 评价实践中, 还可以考虑对规格化处理后的数据加重要性权^[2], 从而“使被赋予更大权数的、在评价子系统中较为重要的变量的数据方差相应被拉长, 在主成分分析评价中得到了更多的重视, 从而将主、客观赋权有机地结合起来, 使子系统评价结果更加符合综合评价问题的目标和实际”^[12].

定义2 设第 k 个评价子系统下属指标项数为 $n^{(k)}$, 对各评价子系统及下属指标项分层赋予归一化重要性权, 所得权重分别称为子系统重要性权与指标项重要性权. 记子系统重要性权为 $W^{(k)}$, 满足

$$\sum_{k=1}^l W^{(k)} = 1, \text{ 记子系统下属的指标项重要性权为}$$

$$w_j^{(k)} (j = 1, 2, \dots, n^{(k)}), \text{ 满足 } \sum_{j=1}^{n^{(k)}} w_j^{(k)} = 1.$$

定义3 设评价样本中包含 m 个被评价对象, 记第 $i (i = 1, 2, \dots, m)$ 个被评价对象对应于第 k 个评价子系统下属第 j 个指标的原始表现值为 $x_{ij}^{(k)}$, $z_{ij}^{(k)}$ 为 $x_{ij}^{(k)}$ 对应的正向规格化数据, 若对其按 $w_j^{(k)}$ 加权后的指标表现值为

$$wz_{ij}^{(k)} = w_j^{(k)} z_{ij}^{(k)}, \quad (1)$$

则称矩阵 $WZ^{(k)} = [wz_{ij}^{(k)}]_{m \times n^{(k)}}$ 为基于重要性权的评价样本第 k 个评价子系统的加权规格化矩阵.

定义4 采用上述加权规格化矩阵 $WZ^{(k)}$ 对评价子系统进行主成分分析与评价, 再对所得子系统评价结果进一步按 $W^{(k)}$ 加权合成, 得出最终评价结果, 称这一评价模型为分层构权主成分评价模型.

正向规格化数据的获得、评价子系统的划分以及重要性权的设置可结合具体问题选择合适的方法.

分层构权主成分评价模型应用过程中往往会面临评价子系统下属指标项不多即“原始变量不多”的情形, 加之评价实践客观上亦存在“样本量不多”的情形, 这些均会影响应用该方法所得评价结果的可靠度. 鉴于应用主成分分析法所得评价分值主要依赖于各指标间相关性的确定^[22], 为增强评价结果的可靠度, 一个可行的方案是将面向“小样本”、“贫信息”的灰色系统理论与之相结合^[18].

灰色关联度是序列之间联系紧密程度的数量表征^[23], 最常用的灰色关联度有邓氏关联度、灰色绝对关联度、灰色相对关联度、灰色综合关联度、灰色相

似关联度和灰色接近关联度. 从中选择合适的灰色关联矩阵替代相关系数矩阵, 进行分层构权主成分分析与评价, 对结果将有直接而重要的影响.

依据文献[23], 邓氏关联度的计算结果不满足对称性, 即系统行为特征序列的选择直接影响其计算结果, 而灰色接近关联度适用于序列意义、量纲完全相同的情形. 对于评价实践而言, 所构建的评价指标体系对各指标排列的先后顺序并无也不需严格规定, 尽管各指标“量纲完全相同”可通过无量纲化的方法实现, 但“序列意义完全相同”这一条件几乎无法满足. 因而, 由上述两种灰色关联度构成的矩阵均不适合替代相关系数矩阵进行分层构权主成分分析与评价. 而灰色绝对关联度、灰色相对关联度与灰色综合关联度都是基于序列折线形状的相似程度衡量序列间联系的紧密性, 统称为广义灰色关联度. 灰色相似关联度是在广义灰色关联度的基础上进行的改进, 侧重于依据序列在几何形状上的相似程度对序列间联系的紧密性进行测度, 被认为是“克服了原模型存在的问题, 更易于实际应用”^[23]. 因此, 本文选择灰色相似关联度矩阵替代相关系数矩阵进行分层构权主成分分析与评价.

事实上, 在保留原始变量尽可能多的信息的前提下达到降维目的, 从而简化问题的复杂性并抓住问题的主要矛盾是主成分分析的基本思想^[24]. 正因为此, 实际应用中基于什么矩阵求解主成分需着眼于最大限度地吸取何种信息, 矩阵类别并非固定不可变^[4]. 本文所提出的基于灰色相似关联度矩阵求解主成分与原有基于相关系数矩阵求解主成分, 两者的共同之处在于两类矩阵均力求有效提供原始变量之间相关关系的信息; 不同之处在于灰色相似关联度反映的是变量之间的整体关联性, 不局限于反映线性相关关系, 由此计算得到的主成分, 是从关联性角度对信息的抽取, 能对变化趋势相似的变量进行有效集结, 它不仅可用于少变量、小样本的问题分析, 而且对样本有无明显的规律不作要求. 基于灰色相似关联度的主成分分析具有相对更广的适用性.

定义5 设 $W^{(k)}$ 和 $WZ^{(k)}$ 如上所述, $R^{(k)}$ 为 $WZ^{(k)}$ 对应的灰色相似关联度矩阵, 若根据 $R^{(k)}$ 求解评价样本每个评价子系统的主成分综合得分, 然后按 $W^{(k)}$ 加权合成其评价总系统主成分综合得分, 据此进行排序与评价, 则称这一评价模型为分层构权灰色主成分评价模型.

依据文献[23]中灰色相似关联度的计算方法, 可以对 $WZ^{(k)}$ 对应的灰色相似关联度矩阵 $R^{(k)}$ 作进一

步定义.

定义6 设包含 m 个被评价对象的评价样本第 k 个评价子系统的加权规格化矩阵 $WZ^{(k)}$ 中, 第 j ($j = 1, 2, \dots, n^{(k)}$) 个与第 j^* ($j^* = 1, 2, \dots, n^{(k)}$) 个指标构成的系统行为序列分别为

$$\begin{aligned} X_j^{(k)} &= (wz_j^{(k)}(1), wz_j^{(k)}(2), \dots, wz_j^{(k)}(m)), \\ X_{j^*}^{(k)} &= (wz_{j^*}^{(k)}(1), wz_{j^*}^{(k)}(2), \dots, wz_{j^*}^{(k)}(m)), \end{aligned}$$

对应的始点零化像分别为

$$\begin{aligned} X_j^{(k)0} &= (wz_j^{(k)0}(1), wz_j^{(k)0}(2), \dots, wz_j^{(k)0}(m)), \\ X_{j^*}^{(k)0} &= (wz_{j^*}^{(k)0}(1), wz_{j^*}^{(k)0}(2), \dots, wz_{j^*}^{(k)0}(m)). \end{aligned}$$

令

$$s_j^{(k)} - s_{j^*}^{(k)} = \int_1^m (X_j^{(k)0} - X_{j^*}^{(k)0}) dt,$$

则有

$$\varepsilon_{jj^*}^{(k)} = \frac{1}{1 + |s_j^{(k)} - s_{j^*}^{(k)}|}, \quad (2)$$

$$R^{(k)} = [\varepsilon_{jj^*}^{(k)}]_{n^{(k)} \times n^{(k)}}, \quad (3)$$

称 $R^{(k)}$ 为 $WZ^{(k)}$ 对应的灰色相似关联度矩阵.

定义7 设 $R^{(k)}$ 如式(3)所述, $R^{(k)}$ 的特征值记为 $\lambda_j^{(k)}$, 存在 $\lambda_1^{(k)} > \lambda_2^{(k)} > \dots > \lambda_{n^{(k)}}^{(k)}$, 设 $\lambda_j^{(k)}$ 对应的标准正交特征向量为 $u_{gj}^{(k)}$ ($g = 1, 2, \dots, n^{(k)}$), 按“最优样本主成分得分优于最劣样本主成分得分”^[25] 这一原则检验与调整 $u_{gj}^{(k)}$ 的方向, 记调整后的标准正交特征向量为 $tu_{gj}^{(k)}$, 按累计方差贡献率 $\alpha^{(k)}$ 超过 85% 的准则确定评价样本第 k 个评价子系统最终选择的主成分个数 $p^{(k)}$ ($p^{(k)} < n^{(k)}$), 称 $Y_i^{(k)}(h)$ ($h = 1, 2, \dots, p^{(k)}$) 为基于分层构权灰色主成分评价模型的评价样本中, 第 i 个被评价对象对应于第 k 个评价子系统的第 h 个主成分得分. 其中

$$\alpha^{(k)} = \frac{\sum_{j=1}^{p^{(k)}} \lambda_j^{(k)}}{\sum_{j=1}^{n^{(k)}} \lambda_j^{(k)}}, \quad (4)$$

$$Y_i^{(k)}(h) = \sum_{g=1}^{n^{(k)}} tu_{gh}^{(k)} \cdot wz_{ig}^{(k)}. \quad (5)$$

定义8 设 $Y_i^{(k)}(h)$ 如式(5)所述, $\alpha^{(k)}(h)$ 为基于方差贡献率的第 k 个评价子系统中第 h 个主成分的归一化信息量权, 称 $F_i^{(k)}$ 为基于分层构权灰色主成分评价模型的第 i 个被评价对象第 k 个评价子系统的主成分综合得分. 其中

$$\alpha^{(k)}(h) = \frac{\lambda_h^{(k)}}{\sum_{j=1}^{p^{(k)}} \lambda_j^{(k)}}, \quad (6)$$

$$F_i^{(k)} = \sum_{h=1}^{p^{(k)}} \alpha^{(k)}(h) \cdot Y_i^{(k)}(h). \quad (7)$$

定义9 设 $F_i^{(k)}$ 如式(7)所述,称

$$F_i = \sum_{k=1}^l W^{(k)} \cdot F_i^{(k)} \quad (8)$$

为基于分层构权灰色主成分评价模型的第 i 个被评价对象评价总系统主成分综合得分.

2.2 基于分层构权灰色主成分评价模型的评价步骤

对上述定义进行归纳,可以得到分层构权灰色主成分评价模型的评价步骤如下.

Step 1: 筛选指标,科学设置 $k(k = 1, 2, \dots, l)$ 个评价子系统及其下属指标项.

Step 2: 对各评价子系统及下属指标项分层设置归一化重要性权 $W^{(k)}$ 、 $w_j^{(k)}(j = 1, 2, \dots, n^{(k)})$,搜集原始数据,根据式(1)得到评价样本对应于各评价子系统的加权规格化矩阵 $WZ^{(k)}$.

Step 3: 根据式(2)和(3)求解各加权规格化矩阵对应的灰色相似关联度矩阵 $R^{(k)}$.

Step 4: 根据式(4)确定各评价子系统的主成分个

数 $p^{(k)}$.

Step 5: 根据式(5)~(7)求解评价样本基于分层构权灰色主成分评价模型的评价子系统主成分综合得分 $F_i^{(k)}(i = 1, 2, \dots, m)$.

Step 6: 根据式(8)求解评价样本基于分层构权灰色主成分评价模型的评价总系统主成分综合得分 $F_i(i = 1, 2, \dots, m)$,据此进行评价分析.

3 案例分析

本部分引用文献[9]中的案例“火电机组运行状态综合评价”,对分层构权灰色主成分评价模型的可行性及有效性进行探讨.

3.1 分层构权灰色主成分评价模型的可行性

文献[9]中最终用于6个火电机组运行状况综合评价的指标体系共含11个指标.本文仍采用这一评价指标体系,但在具体评价过程中,采用分层构权灰色主成分评价模型,结合原文相关描述,将“火电机组整体运行状况”视为评价总系统,下设“可靠性子系统运行状况”与“经济性子系统运行状况”两个评价子系统,前者包含4个指标,后者包含7个指标,如表1所示.

表1 火电机组运行状况综合评价指标体系及重要性权赋值表

系统层	子系统重要性权 $W^{(k)}$	指标层	指标项重要性权 $w_j^{(k)}$
可靠性子系统	0.1667	等效可用系数 / %	0.3500
		运行暴露率 / %	0.1500
		非计划停运次数 / 次	0.2000
		非计划停运小时 / h	0.3000
经济性子系统	0.8333	供电煤耗 / (gce/kw.h)	0.6667
		厂用电率 / %	0.0333
		发电综合耗水率 / (kg/kw.h)	0.0333
		锅炉补水率 / %	0.0667
		真空严密性 / (Pa/min)	0.0667
		主蒸汽温度 / °C	0.0667
		再热蒸汽温度 / °C	0.0667

沿用文献[9]所采用的方法将原始数据正向化,并进一步做无量纲化处理.鉴于较多学者认为标准化方法会影响主成分提取效果,本文进行无量纲化处理时选择线性比例法,将某一指标正向化后的数据除以该指标的最大值,由此获得评价所需的正向规格化数据.依据《全国火电燃煤机组竞赛评比管理办法》(2012版)中的评分方案,对各评价子系统及下属指标进行主观重要性赋权.以子系统重要性权设置为例,评分方案中与现有评价指标体系相关的基准分值共36分,其中可靠性子系统6分,经济性子系统30分,按相应分值所占比例设置子系统重要性权,可得前者为0.1667,后者为0.8333.各评价子系统下属指标项对

应重要性权亦采用类似方法设置,最终结果见表1.

根据表1列出的指标项重要性权 $w_j^{(k)}$,将可靠性子系统与经济性子系统对应的正向规格化数据分别加权,在此基础上,依据各评价子系统加权规格化矩阵求解其灰色相似关联度矩阵,及相应的特征值和标准正交特征向量,结果如表2所示.

由表2可知,可靠性子系统与经济性子系统第1主成分累计方差贡献率均超过90%,按累计方差贡献率大于85%选择主成分个数,这两个评价子系统最终选择的主成分个数均为1.按前文所述方法验证与调整对应标准正交特征向量方向,计算不同评价子系统下各火电机组第1主成分得分.由于可靠性与经

表2 火电机组评价子系统主成分特征值和方差贡献率表

可靠性子系统				经济性子系统			
主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%	主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	3.664 2	91.61	91.61	1	6.722 5	96.04	96.04
2	0.303 3	7.58	99.19	2	0.189 1	2.70	98.74
3	0.029 4	0.74	99.93	3	0.037 0	0.53	99.27
4	0.003 0	0.07	100	4	0.025 2	0.36	99.63
				5	0.017 6	0.25	99.88
				6	0.006 8	0.10	99.97
				7	0.001 8	0.03	100

表3 火电机组各评价子系统及整体运行状态主成分综合得分表

综合得分	机 组					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
可靠性子系统	0.494 312	0.403 954	0.483 871	0.479 734	0.497 468	0.241 397
经济性子系统	0.366 877	0.357 040	0.353 149	0.345 946	0.350 403	0.348 155
机组整体	0.388 116	0.364 859	0.374 936	0.368 244	0.374 914	0.330 362

济性子系统最终选择的主成分个数为1,相应第1主成分得分即为各火电机组不同评价子系统主成分综合得分.对此进一步按子系统重要性加权即可求得各火电机组整体运行状态的主成分综合得分,相关计算结果如表3所示.

表3中的数据结果显示,不同火电机组整体运行状态得分从高到低依次为S1, S3, S5, S4, S2, S6,得分越高的火电机组整体运行状态相对更好,相应评价结果的得出可以验证评价实践中应用分层构权灰色主成分评价模型的可行性.

3.2 分层构权灰色主成分评价模型的有效性

为进一步验证分层构权灰色主成分评价模型的有效性,本部分结合实际竞赛结果,对不同方法所得火电机组运行整体状况评价结论进行比较.用于比较的方法一种是原文献所采用的均值化改进主成分评价模型,另一种是尝试用灰色相对关联矩阵替代相关系数矩阵进行主成分评价的灰色主成分评价模型^[18].

基于均值化改进主成分评价模型所得的火电机组整体运行状态评价结论直接引用文献[9],基于灰色主成分评价模型所得的火电机组整体运行状态评价结论则通过计算获得.主要计算过程如下:原始数据正向化后,进行初值像处理,计算指标间的灰色相对关联度矩阵,及相应的特征值和标准正交特征向量,结果如表4所示.

由表4可知,按累计方差贡献率超过85%的原则,最终选择的主成分个数为2.将标准正交特征向量与初值像数据相乘可得不同火电机组第1主成分与第2主成分得分;同时,在表1的基础上,对指标项重要性权进行归一化处理,结果如下:

表4 基于灰色主成分评价模型的火电机组主成分特征值和方差贡献率表

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	9.091 8	82.65	82.65
2	1.025 3	9.32	91.97
3	0.344 4	3.13	95.11
4	0.222 0	2.02	97.12
5	0.099 8	0.91	98.03
6	0.082 2	0.75	98.78
7	0.052 0	0.47	99.25
8	0.028 5	0.26	99.51
9	0.024 9	0.23	99.74
10	0.023 6	0.21	99.95
11	0.005 4	0.05	100.00

$$w = (0.059 5, 0.025 5, 0.034 0, 0.051 0, 0.553 3, 0.027 7, 0.027 7, 0.055 3, 0.055 3, 0.055 3, 0.055 3).$$

依据文献[18]中的定义,进一步计算得出第1主成分与第2主成分对应的客观权重为(0.826 5, 0.093 2)、重要性权重为(0.299 3, 0.340 0),将二者信息集结最终归一化后的权重为(0.886 4, 0.113 6),最终得出编号S1~S6的火电机组整体运行状态的主成分综合得分依次为2.949 6, 2.621 8, 2.759 3, 2.745 1, 2.850 8, 2.065 2.

不同方法计算得出的火电机组整体运行状态主成分综合得分无法直接比较,为进行对比,整理运用上述方法得到的火电机组整体运行状态最终排名结果,如表5所示.

由表5可知,应用灰色主成分评价模型所得最终评价结论与实际竞赛结果相比,一致的数目相对最少,仅为2,第2名和第3名、第5名和第6名这两组排名发生错位.分层构权灰色主成分评价模型与均值化改进主成分评价模型所得评价结论与实际竞赛结

表5 不同方法所得各火电机组整体运行状态排序对比

方法	S1	S2	S3	S4	S5	S6	与实际一致数目	第1主成分方差贡献率
本文方法	1	5	2	4	3	6	4	可靠性子系统91.61%;经济性子系统:96.04%
均值化改进法	1	6	2	5	3	4	4	40.41%
灰色主成分	1	5	3	4	2	6	2	82.65%
实际竞赛结果	1	6	2	4	3	5	-	-

果吻合的数目相同,均为4,各有1组排名发生错位,前者是第5名和第6名发生错位,后者是第4名和第5名发生错位. 从与实际结果吻合数目来看,分层构权灰色主成分评价模型与均值化改进主成分评价模型两者相同,均相对优于灰色主成分评价模型.

进一步比较分层构权灰色主成分评价模型与均值化改进主成分评价模型. 表5中,均值化改进主成分评价模型第1主成分方差贡献率仅为40.41%,为达到现有评价效果原文献共选择了4个主成分,本文所提方法两个子系统第1主成分的方差贡献率均超过90%. 评价实践中,两个子系统各选用了1个主成分,显然,较之均值化改进主成分评价模型,分层构权灰色主成分评价模型在降维效果上相对更优.

综上所述,对比均值化改进主成分评价模型与灰色主成分评价模型,分层构权灰色主成分评价模型相对更为有效.

4 结论

本文在现有研究的基础上,通过将灰色相似关联度引入主成分分析与评价,构建了分层构权灰色主成分评价模型,为“原始变量不多”、“样本量不多”的评价实践提供了一种新方法. 案例分析结果进一步论证了所建模型的可行性与有效性. 需说明的是,科学设置评价子系统及下属指标项是应用本文所提方法得到合理评价结果的前提条件,而本文所建模型面向但不局限于“原始变量不多”或“样本量不多”的情形. 在评价信息集结方面,本文所建模型兼顾重要性权与信息量权,评价过程中借鉴文献[2]与文献[12]中的做法,各评价子系统中先对正向规格化数据加重要性权,依据加权规格化数据求解主成分,结合信息量权计算相应主成分综合得分. 本文的案例结果也说明了这一数据处理方式的合理性.

参考文献(References)

[1] Schölkopf B, Smola A, Müller K R. Nonlinear component analysis as a kernel eigenvalue problem[J]. *Neural Computation*, 1998, 10(5): 1299-1319.

[2] 李靖华, 郭耀煌. 主成分分析用于多指标评价的方法研究——主成分评价[J]. *管理工程学报*, 2002, 16(1): 39-43.
(Li J H, Guo Y H. Principal component evaluation — A

multivariate evaluate method expanded from principal component analysis[J]. *J of Industrial Engineering/Engineering Management*, 2002, 16(1): 39-43.)

[3] 李正欣, 郭建胜, 惠晓滨, 等. 基于共同主成分的多元时间序列降维方法[J]. *控制与决策*, 2013, 28(4): 531-536.
(Li Z X, Guo J S, Hui X B, et al. Dimension reduction method for multivariate time series based on common principal Component[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(4): 531-536.)

[4] 黄宁. 关于主成分分析应用的思考[J]. *数理统计与管理*, 1999, 18(5): 44-46.
(Huang N. The application and consideration about principal component analysis[J]. *J of Applied Statistics and Management*, 1999, 18(5): 44-46.)

[5] 叶双峰. 关于主成分分析做综合评价的改进[J]. *数理统计与管理*, 2001, 20(2): 52-55.
(Ye S F. The application and consideration about principal component analysis[J]. *J of Applied Statistics and Management*, 2001, 20(2): 52-55.)

[6] 林海明, 杜子芳. 主成分分析综合评价应该注意的问题[J]. *统计研究*, 2013, 30(8): 25-31.
(Lin H M, Du Z F. Some problems in comprehensive evaluation in the principal component analysis[J]. *Statistical Research*, 2013, 30(8): 25-31.)

[7] 孟生旺. 用主成份分析法进行多指标综合评价应注意的问题[J]. *统计研究*, 1992, 9(4): 67-68.
(Meng S W. Some problems in multi-index comprehensive evaluation based on principal component analysis[J]. *Statistical Research*, 1992, 9(4): 67-68.)

[8] 豆建斌, 卢兴华, 杨彭远, 等. 基于改进主成分分析法的装备战备水平评估研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2011, 33(1): 71-73.
(Dou J B, Lu X H, Yang P Y, et al. Research on evaluation for the standard of military equipment readiness based on improved principal components analysis method[J]. *Command Control & Simulation*, 2011, 33(1): 71-73.)

[9] 商立群, 王守鹏. 改进主成分分析法在火电机组综合评价中的应用[J]. *电网技术*, 2014, 38(7): 1928-1933.
(Shang L Q, Wang S P. Application of improved principal component analysis in comprehensive assessment on thermal power generation units[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(7): 1928-1933.)

[10] 周蓂棋, 徐向阳, 贾晨, 等. 改进主成分分析法在区域

- 水资源综合评价中的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(3): 88-91.
- (Zhou L Q, Xu X Y, Jia C, et al. Application of improved principal component analysis in comprehensive assessment on regional water resource[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(3): 88-91.)
- [11] 叶宗裕. 对主成分综合评价方法若干问题的探讨[J]. 浙江师范大学学报: 社会科学版, 2006, 31(6): 87-90.
- (Ye Z Y. On issues of comprehensive evaluation by principal component analysis[J]. J of Zhejiang Normal University: Social Sciences, 2006, 31(6): 87-90.)
- [12] 王晓鹏, 曹广超. 基于多元统计和GIS的环境质量评价研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 67-69.
- (Wang X P, Cao G C. Environmental quality assessment based on multivariate statistics and GIS[M]. Beijing: Science Press, 2013: 67-69.)
- [13] 李连香, 许迪, 程先军, 等. 基于分层构权主成分分析的皖北地下水水质评价研究[J]. 资源科学, 2015, 37(1): 61-67.
- (Li L X, Xu D, Cheng X J, et al. Groundwater quality assessment in Northern Anhui based on multi-layer weighted principal component analysis[J]. Resources Science, 2015, 37(1): 61-67.)
- [14] 乌拉孜别克·热苏力汗, 龚朝庭, 陈敏. 基于组合加权主成分方法的新疆工会服务能力综合评价[J]. 数理统计与管理, 2016, 35(4): 571-578.
- (Wulazibiek Resulihan, Gong C T, Chen M. Comprehensive service capability evaluation of the Xinjiang union based on the combination of weighted principal component method[J]. J of Applied Statistics and Management, 2016, 35(4): 571-578.)
- [15] 潘文砚, 王宗军. 基于核主成分分析的低碳经济发展水平评价研究[J]. 金融与经济, 2016(4): 55-59.
- (Pan W Y, Wang Z J. Evaluation of the level of lowcarbon economic development based on kernel principal component analysis[J]. J of Finance and Economics, 2016(4): 55-59.)
- [16] Lopez-Paz D, Sra S, Smola A, et al. Randomized nonlinear component analysis[J]. Computer Science, 2014, 4: 1359-1367.
- [17] 叶明确, 杨亚娟. 主成分综合评价法的误区识别及其改进[J]. 数量经济技术经济研究, 2016(10): 142-153.
- (Ye M Q, Yang Y J. Erroneous zone identification and improvement of synthesis evaluation based on principal component analysis[J]. The J of Quantitative & Technical Economics, 2016(10): 142-153.)
- [18] 袁周, 方志耕. 灰色主成分评价模型的构建及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(8): 2086-2090.
- (Yuan Z, Fang Z G. The construction and application of grey principal component evaluation model[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2016, 36(8): 2086-2090.)
- [19] De R K, Timmerman M E, Van D I, et al. Switching principal component analysis for modeling means and covariance changes over time[J]. Psychological Methods, 2014, 19(1): 113-132.
- [20] Salvo F D, Ruggieri M, Plaia A. Functional principal component analysis for multivariate multidimensional environmental data[J]. Environmental & Ecological Statistics, 2015, 22(4): 739-757.
- [21] Oh T H, Tai Y W, Bazin J C, et al. Partial sum minimization of singular values in robust PCA: Algorithm and applications[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2016, 38(4): 744-758.
- [22] Abdi H, Williams L J. Principal component analysis[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2010, 2(4): 433-459.
- [23] 刘思峰, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 第8版. 北京: 科学出版社, 2017: 49-67.
- (Liu S F, et al. Grey system theory and its applications[M]. The 8th ed. Beijing: Science Press, 2017: 49-67.)
- [24] 何晓群. 多元统计分析[M]. 第4版. 北京: 中国人民大学出版社, 2015: 117.
- (He X Q. Multivariate Statistical Analysis[M]. 4th ed. Beijing: China Renmin University Press, 2015: 117.)
- [25] 白雪梅, 赵松山. 对主成分分析综合评价方法若干问题的探讨[J]. 统计研究, 1995, 12(6): 47-51.
- (Bai X M, Zhao S S. A discussion of some problems on synthesis evaluation based on principal component analysis[J]. Statistical Research, 1995, 12(6): 47-51.)

作者简介

王玲玲(1980—), 女, 副教授, 博士生, 从事多元统计、可靠性评价等研究, E-mail: wangll@ujs.edu.cn;

方志耕(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事灰色系统理论、质量与可靠性管理等研究, E-mail: zhigengfang@163.com.

(责任编辑: 孙艺红)