

基于灰关联分析的船型方案多目标综合评价研究

王运龙, 林焰*, 纪卓尚

(大连理工大学 船舶 CAD 工程中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对多准则船型优选决策问题中评价指标不独立性问题, 利用灰色系统理论对不完备信息的处理能力, 以灰色理论为基础, 建立了适用于船型方案优选的灰关联多目标综合评价模型, 用于船舶方案设计过程中的方案论证, 并以载重量为 35 000DWT 原油船的方案论证作为实例进行了计算分析. 结果表明, 该方法既在一定程度上考虑了设计方案各指标间的关联性, 又反映了事物的客观本质, 减少了决策过程中设计者的主观臆断性, 而且简单实用, 评判结果合理可信.

关键词: 灰关联分析; 船型方案; 多目标综合评价; 模型

中图分类号: U662.3 **文献标志码:** A

0 引言

在船舶设计制造行业, 船舶总体设计包括主尺度要素确定、型线设计、总布置以及结构设计等多方面内容, 是一个相互影响、相互衔接、错综复杂的有机整体. 在船型论证或船舶初步设计阶段确定船舶主尺度及主要船型要素时, 通常需要采用适当的方法, 对形成的多个船型方案根据选定的评价指标确定最优方案, 这实质上是一个多目标多方案决策问题. 在上述问题中, 由于各项指标组成一个整体, 各项指标之间是相互影响、相互制约的, 方案的某些准则经常会出现一定的相关性或不协调的情况. 针对这种较为复杂的多准则船型优选决策问题, 本文利用灰色系统理论对不完备信息的处理能力, 以灰色理论为基础, 给出基于灰关联分析的船型方案多目标综合评价方法, 以便对多方案多准则船型方案的相对优劣做出有效评判.

1 基于灰关联分析的船型方案多目标综合评价模型

灰色系统理论是研究解决灰色系统分析、建模、预测、决策和控制的理论, 是 20 世纪 80 年代初由我国著名学者邓聚龙教授提出并发展的. 他把一般系统论、信息论、控制论的观点和方法延伸

到社会、经济、生态等抽象系统, 运用数学方法, 发展了一套解决信息不完备系统即灰色系统的理论和方法^[1]. 灰色系统理论建立以来, 已成功地应用于工程控制、经济管理、未来学研究、社会系统、生态系统和农业系统等各个领域^[2]. 灰关联分析是其主要组成部分之一.

1.1 基本算法

灰色关联分析是根据灰色系统理论的思想提出来的, 是对一个系统发展态势的定性描述和比较, 它通过对参考序列与比较序列各点之间的距离分析来确定各序列之间的差异性和接近性, 并根据序列曲线几何形状的相似程度来判断灰色过程发展态势的关联程度. 灰色关联分析用灰色关联度来描述因素间关系的强弱、大小和次序. 如果样本数据列反映出两因素变化的态势(大小、方向、速度等)基本一致, 则它们之间的关联度较大; 反之则关联度较小. 与传统的多因素分析方法相比, 灰色关联分析对数据要求较低且计算量小, 便于广泛应用. 灰色关联分析的核心是计算关联度^[3].

灰色关联分析方法步骤如下:

(1) 确定分析序列

在对所研究问题定性分析的基础上, 确定一个因变量因素和多个自变量因素, 设因变量数据构成参考 X'_0 , 各自变量数据构成比较序列 X'_{0j} (j

$= 1, 2, \dots, n)$, 即

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X}'_1 & \mathbf{X}'_2 & \cdots & \mathbf{X}'_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_{01} & x'_{02} & \cdots & x'_{0n} \\ x'_{11} & x'_{12} & \cdots & x'_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x'_{m1} & x'_{m2} & \cdots & x'_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}'_j = (X'_{0j} \ X'_{1j} \ X'_{2j} \ \cdots \ X'_{mj})^\top, j = 1, 2, \dots, n, m$ 为变量序列的长度(样本数量). 这里第 1 行实质为参考样本 A_0 的样本值, 第 2 行为比较样本 A_1 的样本值, 依次类推.

(2) 变量序列量纲一化

由于各指标原始数据量纲不同, 数量级差也有悬殊, 为使其具有可比性, 需要对原始数据进行量纲一化处理. 对指标序列的原始数据量纲一化处理的方法可采用级差变换和效果测度变换.

① 级差变换法

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{ij\min}}{X_{ij\max} - X_{ij\min}}$$

其中 $X_{ij\max}$ 表示相对于第 j 个指标的最大值, $X_{ij\min}$ 表示相对于第 j 个指标的最小值.

② 效果测度变换法

对于收益型指标即指标值越大越好的指标 $X'_{ij} = X_{ij} / X_{ij\max}$;

对于成本型指标即指标值越小越好的指标 $X'_{ij} = X_{ij\min} / X_{ij}$;

对于适中型指标即指标值越接近标准值 X_0 越好的指标 $X'_{ij} = 1 - \frac{|X_{ij} - X_0|}{\max_j |X_{ij} - X_{ij\max}|}$.

选取合适的量纲一化方法对 $(\mathbf{X}'_1 \ \mathbf{X}'_2 \ \cdots \ \mathbf{X}'_n)$ 处理后的序列为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X}_1 & \mathbf{X}_2 & \cdots & \mathbf{X}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{02} & \cdots & x_{0n} \\ x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

(3) 求差序列、最大差和最小差

计算式(2)中的第 1 行(参考样本)与其余各行(比较样本)对应的绝对差值, 形成如下的绝对差值矩阵:

$$\begin{pmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \cdots & \Delta_{1n} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Delta_{m1} & \Delta_{m2} & \cdots & \Delta_{mn} \end{pmatrix}$$

其中 $\Delta_{ij} = |x_{0j} - x_{ij}|, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2,$

$\cdots, n$.

绝对差值矩阵中的最大数和最小数即为最大差和最小差:

$$\max_i \max_j \{\Delta_{ij}\} \triangleq \Delta_{\max} \quad (3)$$

$$\min_i \min_j \{\Delta_{ij}\} \triangleq \Delta_{\min}$$

(4) 计算关联系数

将绝对差值矩阵中数据作如下变换:

$$\epsilon_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \rho \Delta_{\max}} \quad (4)$$

得关联系数矩阵

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \cdots & \epsilon_{1n} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \cdots & \epsilon_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \epsilon_{m1} & \epsilon_{m2} & \cdots & \epsilon_{mn} \end{pmatrix}$$

其中分辨系数 ρ 在 $(0, 1)$ 内取值, 一般情况下依据关联系数矩阵中情况多在 0.1 至 0.5 之间取值, ρ 越小越能提高关联系数之间的差异. 关联系数 ϵ_{ij} 是不超过 1 的正数, Δ_{ij} 越小, ϵ_{ij} 越大, 它反映了第 i 个比较样本 A_i 与参考样本 A_0 在第 j 指标的关联程度.

(5) 计算关联度

比较样本 A_i 与参考样本 A_0 的关联程度是通过 n 个关联系数来反映的, 取其平均值即为关联度:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \epsilon_{ij} \quad (5)$$

(6) 依据关联度排序

对各比较序列与参考序列的关联度从大到小排序, 关联度越大, 说明其比较序列与参考序列变化的态势越一致.

1.2 基于灰关联分析的船型方案多目标综合评价模型

灰关联分析是灰色系统分析和处理随机量的一种方法, 它采用曲线几何形状分析比较的方法, 根据事物序列曲线几何形状的相似程度, 用量化的方法评判事物间的关联程度, 曲线形状彼此越相似, 关联度越大, 数值上越接近 1; 反之, 关联度越小, 数值也越接近 0. 关联度的大小反映了备选评价方案与相对最优方案之间的相似程度, 从而形成以关联度大小作为评价方案优劣的准则, 是一种客观评价方法. 因此, 基于灰色关联度大小作为方案决策是一种行之有效的方法. 根据灰色关联分析的基本原理与方法, 可以将船型方案多目标综合评价的对象看做是时间序列(每个被评价对象对应的各项指标), 从而借助于灰色关联分析

对这些时间序列进行排序. 这里可以将被评价方案各项指标值构成的序列视为比较序列,选择最优样本数据作为参考序列,即将各方案评价指标中的最优值组成理想方案作为参考序列,与其关联度越大的评价方案则越好.

设用 n 个指标 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \cdots, \mathbf{X}_n$ (不失一般性,设其均为正项指标),对 m 个样本(评价方案)进行评价,量纲一化后形成如下数据矩阵:

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}$$

其中第 i 个样本数据 $\mathbf{X}_i = (x_{i1} \quad x_{i2} \quad \cdots \quad x_{in})$ ($i = 1, 2, \cdots, m$).

构造最优样本(理想方案):

$$\mathbf{X}_0 = (x_{01} \quad x_{02} \quad \cdots \quad x_{0n}) \tag{6}$$

其中 $x_{0j} = \max\{x_{ij}\}, j = 1, 2, \cdots, n$.

由以下公式计算出样本 $\mathbf{X}_i$ ($i = 1, 2, \cdots, m$)

与最优样本 $\mathbf{X}_0$ 的关联度 r_{0i} .

$$\Delta_{ij} = |x_{0j} - x_{ij}|; i = 1, 2, \cdots, m, j = 1, 2, \cdots, n \tag{7}$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{\min_i \min_j \Delta_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta_{ij}}{\Delta_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta_{ij}} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \rho \Delta_{\max}}; i = 1, 2, \cdots, m, j = 1, 2, \cdots, n \tag{8}$$

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \epsilon_{ij}; i = 1, 2, \cdots, m \tag{9}$$

最后由 r_i ($i = 1, 2, \cdots, m$) 即可对 m 个样本(评价方案)排出优劣顺序.

2 计算实例

2.1 算例简介

本文以文献[4]和[5]提出的载重量为 35 000DWT原油船的方案论证为实例,进行计算比较说明. 文献[4]提供了 6 个方案,其中 5 个较好方案是通过变值分析法获得的,其相应的各项技术、经济衡准指标如表 1 所示,方案 6 为人为构造的坏方案.

表 1 35 000DWT 原油船船型方案数据

Tab. 1 Main performance criteria of 35 000DWT crude oil tanker design schemes

方案	v_s/kn	净现值/万元	必要运费率/(元 $\cdot\text{t}^{-1}$)	造价/万元	投资回收期/a
1	13.88	1 833.76	28.44	9 067.0	12.07
2	14.31	2 089.80	28.18	9 196.1	11.67
3	14.39	2 089.39	28.28	9 246.1	11.69
4	14.47	2 085.44	28.22	9 284.1	11.72
5	14.40	2 019.39	28.31	9 283.2	11.86
6	13.80	1 820.00	28.46	9 290.0	12.10

2.2 量纲一化处理

在表 1 中的 5 项评价指标中,速度指标和净现值指标属于收益型指标即指标值越大越好的指

标,必要运费率、造价和投资回收期属于成本型指标即指标值越小越好的指标,采用效果测度变换法进行量纲一化处理结果如表 2 所示.

表 2 35 000DWT 原油船船型方案数据量纲一化结果

Tab. 2 Effects of non-dimensional quantities of main performance criteria of 35 000DWT crude oil tanker design schemes

方案	v_s/kn	净现值/万元	必要运费率/(元 $\cdot\text{t}^{-1}$)	造价/万元	投资回收期/a
1	0.959 2	0.877 5	0.990 9	1.000 0	0.966 9
2	0.988 9	1.000 0	1.000 0	0.986 0	1.000 0
3	0.994 5	0.999 8	0.996 5	0.980 6	0.998 3
4	1.000 0	0.997 9	0.998 6	0.976 6	0.995 7
5	0.995 2	0.966 3	0.995 4	0.976 7	0.984 0
6	0.953 7	0.870 9	0.990 2	0.976 0	0.964 5

2.3 构造最优样本,求差序列、最大差和最小差

由表 2 可得最优样本(理想方案) $\mathbf{X}_0 = (1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1)$,由 $\Delta_{ij} = |x_{0j} - x_{ij}|$ ($i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n$) 得到绝对差值矩阵为

$$\begin{pmatrix} 0.040\ 8 & 0.122\ 5 & 0.009\ 1 & 0 & 0.033\ 1 \\ 0.011\ 1 & 0 & 0 & 0.014\ 0 & 0 \\ 0.005\ 5 & 0.000\ 2 & 0.003\ 5 & 0.019\ 4 & 0.001\ 7 \\ 0 & 0.002\ 1 & 0.001\ 4 & 0.023\ 4 & 0.004\ 3 \\ 0.004\ 8 & 0.033\ 7 & 0.004\ 6 & 0.023\ 3 & 0.016\ 0 \\ 0.046\ 3 & 0.129\ 1 & 0.009\ 8 & 0.024\ 0 & 0.035\ 5 \end{pmatrix}$$

其中 $\Delta_{\max} = 0.129\ 1$; $\Delta_{\min} = 0$.

2.4 计算关联系数

按式(8)将绝对差值矩阵中数据作变换,得关联系数矩阵:

0.240 5	0.095 3	0.585 4	1.000 0	0.280 4
0.538 7	1.000 0	1.000 0	0.479 1	1.000 0
0.700 2	0.985 0	0.785 0	0.399 9	0.883 0
1.000 0	0.860 9	0.901 1	0.355 7	0.751 6
0.727 4	0.277 0	0.737 6	0.356 6	0.446 3
0.218 0	0.090 9	0.567 5	0.349 7	0.266 5

$\rho = 0.4$, ρ 越小越能提高关联系数之间的差异,其取值不会对排序造成影响.

2.5 计算关联度

按式(9)可得各船型方案与理想方案的关联度:方案 1, 2.201 6; 方案 2, 4.017 7; 方案 3, 3.753 1; 方案 4, 3.869 3; 方案 5, 2.545 0; 方案 6, 1.492 7.

关联度越大,说明该船型方案越接近于理想方案,该船型方案越好.由此得到各方案的排序结果为

方案 2>方案 4>方案 3>方案 5>方案 1>方案 6

2.6 结果分析

文献[4]中利用基于 C^2R 模型的 DEA 有效性方法得到的各方案排序结果为(括号内方案为同级 DEA 有效方案)

(方案 2≡方案 3≡方案 4)>方案 5>方案 1>方案 6

基于模糊综合评判的评优排序结果为

方案 2>方案 3>方案 4>方案 5>方案 1>方案 6

可见利用基于灰关联分析的船型方案多目标综合评价的评判结果与基于 C^2R 模型的 DEA 有效性方法和基于模糊综合评判的评优排序结果基本一致.

3 结 语

算例表明基于灰关联分析的船型方案多目标综合评价方法用于解决多方案、多准则的船型优选问题是合理和有效的.与现有方法相比其特点是:

(1)充分利用现有数据,考虑了指标间相互影响、相互关联的特点;

(2)基于被评价方案和理想方案的接近性原则,不需要人为确定指标权重,排除了很多主观因素的影响,保证了评价结果的客观性和科学性;

(3)计算方法简单、实用,评判结果合理可信.

参考文献:

[1] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1987

[2] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 2002

[3] 叶义成,柯丽华. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006

[4] 刘寅东,李树范. 船型技术经济综合评判的 DEA 方法[J]. 大连理工大学学报, 1995, 35(6):873-878
(LIU Yin-dong, LI Shu-fan. Study of DEA method for evaluation of multi-objective ship plan [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1995, 35(6):873-878)

[5] 刘寅东,李克秋. 数据包络分析模型与方法在船型方案排序择优中的应用[J]. 中国造船, 1998(3):1-6

Research on multi-object comprehensive evaluation for ship schemes based on grey relation analysis

WANG Yun-long, LIN Yan*, JI Zhuo-shang

(Ship CAD Engineering Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: According to the idependence of the evaluation criteria in the problems of making the decisions to select multi-object ship schemes, utilizing the processing capacity of grey system theory for imperfect information, based on grey system theory, the grey relation multi-object comprehensive evaluation model is built which is suitable for selecting the optimal ship scheme. It is used in scheme demonstration in the process of designing the ship schemes. A case study of the scheme demonstration of 35 000DWT crude oil tanker in which the model has been used in solving the problems of multi-object comprehensive evaluation for ship schemes shows that it takes the correlation of indices into account to a certain extent, and reflects the objective true nature of the things, reduces designers' subjectivity in the process of decision-making at the same time. It's easy and useful, and the result is rational and believable.

Key words: grey relation analysis;ship scheme;multi-object comprehensive evaluation;model