

基于模糊综合评价法的大型船舶轴系材料择优研究

蔡朋¹, 肖丹², 洪玉燕²

(1. 海军装备部驻某部, 湖北 武汉 430063; 2. 宁波东红船舶海洋工程设计股份有限公司 浙江 宁波 315048)

摘要: 本文以某大型船舶轴系轴段材料的选取择优为研究对象, 通过对备选材料力学性能分析, 确定了轴段材料评价因素集, 采用德尔菲法对具有丰富经验的设计专家和制造专家进行征询得到模糊评判矩阵, 然后基于模糊综合评价法对备选材料进行择优计算, 最终得到了适用于该船舶的最佳轴系材料, 为该船舶轴系材料的选取提供了解决方案。

关键词: 大型船舶; 轴系材料; 模糊综合评价法

中图分类号: U66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 08—0089—03

船舶轴系是船舶动力装置的重要组成部分, 它承受主机扭转所产生的扭转力、由螺旋桨和轴的自重产生的弯曲力、由螺旋桨的旋转产生的推力等船舶运动产生的各种载荷。为保证轴系能满足设计要求, 轴系需要达到以强度为代表的一系列力学性能要求^[1]。随着船舶大型化和对轻量化、可靠性、使用寿命等要求的日益提高, 对大型船舶轴系材料的研究和选取迫在眉睫。过大的轴径, 不仅会大幅增加轴系重量, 还会增加轴系生产、安装和维护的难度, 同时会影响船舶的装载量和机动性。要实现轴系轻量化, 选取力学性能更优的高强合金钢作为轴系材料, 是一个合理可行的途径。

本文以某大型船舶轴系轴段材料的选取择优为研究对象, 通过对备选材料力学性能分析, 确定了轴段材料评价因素集, 采用德尔菲法对具有丰富经验的设计专家和制造专家进行征询得到模糊评判矩阵, 然后基于模糊综合评价法对备选材料进行择优计算, 最终得到了适用于该船舶的最佳轴系材料, 为该船舶轴系材料的选取提供了解决方案。

1 模糊综合评价法简介

模糊综合评价方法的基本数学理论依据是模糊变换, 其理论基础如下:

设有两个有限集合, 即 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, $V=\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, m 和 n 都是自然数。假设 R 是 U 与 V 之间的一个模糊关系, 即有

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

假设 $A=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 为 U 上的模糊子集, $B=(b_1, b_2, \dots, b_m)$ 为 V 上的模糊子集, 当 $B=A \cdot R$ 关系式成立时, 则称 B

是 A 的像, 称 A 是 B 的原像, 称 R 是 U 到 V 上的一个模糊变换。

模糊评价法具体构建步骤如下^[3]:

(1) 建立被评价事物的因素集 $U=(b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n)$, 其中, i 和 n 为自然数, $i=1, 2, 3, \dots, n$; u_i 表示对被评价事物做综合评价时需考虑的因素。

(2) 构建评价等级集 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_m\}$ 其中, j 和 m 为自然数, $j=1, 2, 3, \dots, m$; v_j 表示评价等级。

(3) 确定各因素间的权数分配集 $A=\{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}$, 其中 $a_i > 0$, 且 $a_1 + a_2 + \dots + a_i + \dots + a_n = 1$, a_i 表示因素 u_i 在评价事物中所占的权重, 它反映了对诸因素的一种权衡。

(4) 确定模糊评价矩阵 R 。从 U 到 V 的模糊关系即为被评价实物的评价要素与评价等级之间的关系, 可用模糊评价矩阵 R 来表述描述:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

R 中的元素 r_{ij} ($i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$) 表示从因素 u_i 着眼, 被评价事物能被等级 v_j 的隶属度。

本文中 R 的具体确定采用德尔菲法进行。

(5) 综合评价结果 B 的求取。利用普通矩阵乘法, 则可求出被评价事物的综合评价结果, 即有:

$$B = A \cdot R = (a_1, a_2, \dots, a_n) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (3)$$

其中, $b_1 + b_2 + \dots + b_j + \dots + b_m$ 之和应等于 1; 若 $b_1 + b_2 + \dots + b_j + \dots + b_m$ 之和不等 1, 应进行归一化处理。

2 基于德尔菲法的模糊综合评价法轴系材料择优方案

2.1 备选轴段材料介绍

根据本船轴系设计需求, 筛选出 0Cr17Ni4Cu4Nb、

18Cr2Ni4W、45CrNiMoVA、38Cr2Ni2Mo 和 34CrNi2Mo 五种材料作为备选材料，各材料的主要性能指标详见表 1。

表 1 备选材料力学性能

性能指标 材料名称	抗拉强度 Rm/MPa	屈服强度 Re/MPa	延伸率 A5/%	断面收 缩率 Z%	冲击功		硬度 HB
					室温	-10℃	
					KU ₂ /J	KV ₂ /J	
0Cr17Ni4Cu4Nb	≥930	≥725	≥15	≥45	-	≥41	≤363
18Cr2Ni4W	≥1180	≥885	≥10	≥45	-	≥31	≤269
45CrNiMoVA	≥1470	≥1325	≥7	≥35	-	≥31	≤269
38Cr2Ni2Mo	≥800	≥600	≥15	≥45	≥43	≥20	235-277
34CrNi2Mo	≥800	≥600	≥14	≥33	≥35	≥27	235-275

2.2 确定被评价事物的因素集

依据 CCS、ABS、BV、LR、DNV 等船级社船舶建造规范对轴系相关规定，本船轴系材料以材料的强度、塑性性能、韧性和硬度四个方面作为评价因素，建立评价因素集表 2 所示。

表 2 轴系材料选取评价因素表

序号	性能因素	代号	序号	评价因素	代号
1	强度	U ₁	1	抗拉强度 Rm/MPa	u ₁₁
			2	屈服强度 Re/MPa	u ₁₂
2	塑性性能	U ₂	1	延伸率 A5/%	u ₂₁
			2	断面收缩率 Z/%	u ₂₂
3	韧性	U ₃	1	室温 KU ₂ /J	u ₃₁
			2	-10℃ KV ₂ /J	u ₃₂
4	硬度	U ₄	1	硬度(HB)	u ₄₁

2.3 确定评价因素权重向量

基于船舶建造规范对轴系材料的相关要求和船舶轴系专家咨询，确定轴系材料各性能因素间的权重为 A = (0.4,0.1,0.2,0.3)。各性能评价因素二级指标之间的权重为：强度 A1=(0.5,0.5)、塑性性能 A2=(0.7,0.3)、韧性 A3=(0.6,0.4)、硬度 A4=(1.0)。

2.4 采用德尔菲法确定模糊评判矩阵

德尔菲法也称专家调查法，其本质上是一种反馈匿名函询法，其流程是对所要评价的问题制定专家咨询表，然后匿名征询专家意见，对专家意见进行整理与分析后再反馈给专家，再次征询意见，再整理分析，直至专家意见统一^[4]。

根据德尔菲法原理，制定 5 种材料的性能评级表如表 3 所示。被咨询专家根据自己掌握的专业知识和工作经验完成五种材料的评价并打分，分数使用 A、B、C、D、E 表示，分别对应 100、80、60、40、20 分。

表 3 性能评级表

材料名称		0Cr17Ni4Cu4Nb	18Cr2Ni4W	45CrNiMoVA	38Cr2Ni2Mo	34CrNi2Mo
性能因素	评价因素	分数	分数	分数	分数	分数
强度	抗拉强度					
	屈服强度					
塑性性能	延伸率					
	断面收缩率					
韧性	KU ₂ /J					
	KV ₂ /J					
硬度	硬度(HB)					

将咨询表发往包括船厂、研究所、设计院和高校等不同船舶相关单位的 10 位专家手中，并在专家完成填写后回收并统计数据，统计的结果如表 4 所示（仅以 0Cr17Ni4Cu4Nb 为例，其余 4 种材料的咨询结果略）。

表 4 0Cr17Ni4Cu4Nb 德尔菲法统计表格

材料名称		0Cr17Ni4Cu4Nb				
性能因素	评价因素	A	B	C	D	E
强度	抗拉强度	8	2	0	0	0
	屈服强度	8	1	1	0	0
塑性性能	延伸率	7	2	1	0	0
	断面收缩率	8	1	1	0	0
韧性	KU ₂ /J	1	1	3	3	2
	KV ₂ /J	2	3	2	2	1
硬度	硬度(HB)	6	1	2	1	0

以此作为模糊综合评价的数据支持。上表中数字代表对该材料的某评价因素选择指定等级的专家人数。在模糊评价矩阵中，某项的值即为上表中对应的值除以参加调研的专家总人数。

按照上述方法，分别计算抗拉强度、塑性性能、韧性和硬度的模糊综合评价矩阵 R₁、R₂、R₃、R₄ 如下：

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.2 \\ 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

以同样方法计算得到全部五种备选材料各项性能因素的模糊综合评价矩阵。

2.5 基于模糊综合评价法的轴系材料择优结果

对于某一种材料，其某项代号为 i 的性能因素评价计算为该性能评价因素权重集乘以该性能的模糊评判矩阵，由德尔菲法获得。

$$B_i = A_1 \cdot R_1 = (a_1, a_2, \dots, a_n) \cdot (r_1, r_2, \dots, r_n) \quad (8)$$

完成所有性能因素评价的评价计算后，开始计算该项材料的综合评价结果，即各性能因素间的权重乘以综合模糊评判矩阵。

$$B = A \cdot R = [0.4 \quad 0.1 \quad 0.2 \quad 0.3] \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

最后用综合评价结果 B 乘以评价等级集 P 得到综合评价分数。

$$W = B \cdot P^T = B \cdot (100, 80, 60, 40, 20) \quad (10)$$

以 0CrNi20Cr17Ni4Cu4Nb 为例, 其计算如下:

$$R = \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.15 & 0.05 & 0 & 0 \\ 0.73 & 0.17 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.14 & 0.18 & 0.26 & 0.26 & 0.16 \\ 0.6 & 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = (0.4, 0.1, 0.2, 0.3)$$

$$B = A \cdot R = (0.601, 0.143, 0.142, 0.082, 0.032)$$

结果和为 1, 不用进行归一化。

评价向量 $P=(100, 80, 60, 40, 20)$, 则最终得分 $W_1 = B \cdot P^T = 84$ 。

同理计算其余材料的评价分数, 计算结果如表 5 所示。

表 5 轴系材料择优评价结果表

材料名称	0Cr17Ni4Cu4Nb	18Cr2Ni4W	45CrNiMoVA	38Cr2Ni2Mo	34CrNi2Mo
评价总得分	分数	89.84	87.74	91.4	92

根据上述计算可知, 34CrNi2Mo 的综合评价得分最高, 因此选择其作为目标船型轴系轴段的材料的优选材料。

3 总结

论文针对船舶大型化后, 轴系直径和重量越来越

大的问题, 提出采用高强合金钢材料作为轴系材料的思路来减轻轴系重量, 同时保证足够的强度。轴系材料的选取是一个综合择优的过程, 本文提出了以模糊数学为原理的模糊综合评价方法建立材料评价指标体系, 应用德尔菲法对具有丰富经验的设计专家和制造专家进行征询得到模糊评判矩阵, 然后基于模糊综合评价法对备选材料进行择优计算, 计算结果表明 0Cr17Ni4Cu4Nb、18Cr2Ni4W、45CrNiMoVA、38Cr2Ni2Mo、34CrNi2Mo 五种备选材料中 34CrNi2Mo 的综合评分最高, 因此采用 34CrNi2Mo 作为目标船舶轴系轴段材料的解决方案。论文构建了一套轴系材料优选方法, 为轴系材料的择优提供了一种解决方案。

参考文献:

- [1] 凌华星. 船舶轴系轴径综合优化方法与支撑工具软件开发 [D]. 武汉理工大学, 2020.
- [2] 左莉, 梅峰太. 模糊数学理论的船舶航道安全评价方法 [J]. 船舶科学技术, 2021, 43(04): 40-42.
- [3] 王锐. 模糊综合评判法在技术标评审中的应用 [J]. 江西建材, 2020(03): 135-136.
- [4] 齐国舟, 历华. 德尔菲法在工程造价各阶段的应用研究 [J]. 建筑经济, 2021, 42(S1): 92-95.

