

分布式乘性偏好环境下的多准则 模块划分综合评价方法

湛炎辉^{1,2}, 陈剑涛², 班华电³, 郑富元³

(1. 广西水利电力职业技术学院 机电工程学院, 广西 南宁 530023; 2. 广西科技大学 机械与汽车工程学院, 广西 柳州 545006;
3. 广西徐沃工程机械设备有限公司, 广西 南宁 530105)

摘要: 为了应对模块划分评价方案中评价准则单一、权重分配过于主观等问题, 提出了产品模块划分方案的模块度、模块可替换性、模块结构完整性的评价准则及其计算方法。在此基础上, 提出多个二级模块划分评价指标, 用以确定评价准则间的权重分配; 应用了在分布式乘性偏好环境下的最优-最劣多准则决策模型, 用于确定该方法中相关参数的权重分配问题; 综合考虑了所有决策者的意愿, 使最终模块划分方案更具客观性。最后, 以挖掘机工作臂的模块划分验证了方法的可行性。

关键词: 模块划分评价; 多准则决策方法; 挖掘机

中图分类号: TH 16; TU 621

文献标志码: A

文章编号: 1672-5581(2025)02-0254-05

Research on comprehensive evaluation method of multi-criteria module division in distributed multiplicative preference environment

CHEN Yanhui^{1,2}, CHEN Jiantao², BAN Huadian³, ZHENG Fuyuan³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Guangxi Water Resources and Electric Technology College, Nanning 530023, Guangxi, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China; 3. Guangxi Xuwo Construction Machinery Equipment Co., Ltd., Nanning 530105, Guangxi, China)

Abstract: In order to deal with the problems of single evaluation criteria and too subjective weight allocation in the evaluation scheme of module division, the evaluation criteria and calculation methods of module degree, module replaceable and module structural integrity of the product module division scheme were proposed. On this basis, multiple secondary evaluation indicators of module division were proposed to determine the weight allocation among evaluation criteria. The optimal and worst many criterion decision model in the distributed multiplicative preference environment is applied to determine the weight distribution of the relevant parameters in the method, and the will of all decision makers is comprehensively considered to make the final module division scheme more objective. Finally, the module division of the excavator working arm is used to verify the feasibility of the method.

Key words: module division evaluation; multi-criteria decision making method; excavator

为应对产品快速设计生产的需求,对产品进行模块划分的方法已经在产品设计与制造领域广泛应用^[1]。罗澄清等^[2]通过对多轴线运输车进行模块化设计实现了产品的快速设计;王建正等^[3]对产品进模块化设计实现了产品的绿色制造;文献^[4]基于产品的物料清单提出了一种适用于复杂产品的模块划分方法。产品的模块划分方案不是唯一的,合理的划分才能够发挥其在产品设计生产中的作用,因此构建产品模块划分评价方案非常重要。刘丹等^[5]将客户的需求偏好融入模块划分方案的指标选择,基于模糊层次分析法提出了一种多准则群决策的模块划分评价方法;魏文远^[6]结合主客观综合权重法与逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)多方案优选方法,建立了一种方案多属性的模块划分评价体系。

针对模块划分方案的选取,本文提出了一种分布式乘性偏好环境下的多准则模块划分综合评价方法。该方法以模块度、模块可替换性和模块结构完整性等3个准则作为模块划分方案的评价标准,并利用分布式乘性偏好环境下的多准则决策模型,从产品的多个方面分配上述3个准则的权重。该方法降低了决策者的主观因素对模块划分方案的影响,使其能够适应更多应用场景的需求。

1 多准则模块划分综合评价方法

本研究提出了3个模块划分评价准则及其计算方法,并引入分布式乘性偏好环境下的最优-最劣多准则决策方法(best-worst method, BWM),用于计算在多影响因素下的模块划分评价准则的权重分配问题^[7]。

1.1 模块划分方案评价指标

产品模块划分一般会产生多个划分方案,针对这一问题,在研究中综合分析产品的设计生产、装配维修、回收利用等方面,提出 $X = \{x_1 \text{ 模块度}; x_2 \text{ 模块可替换性}; x_3 \text{ 模块结构完整性}\}$ 3个评价准则来确定最佳模块划分方案。

1.1.1 模块度准则

以产品零部件数量为 n 的综合关联矩阵 $P_{n \times n}$ 为基础,提出模块内聚合度 D_1 以及模块间聚合度 D_2 的概念:

$$D_1^N = \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{j=1}^{N_n} \alpha(M_i^N, M_j^N), N=1, 2, \dots, Z \quad (1)$$

$$D_2^N = \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{v=1}^Z \sum_{j=1}^{V_n} \alpha(M_i^N, M_j^V), V \neq N \quad (2)$$

式中: Z 为划分方案中的模块数; N_n 、 V_n 为第 N 和 V 个模块中的零部件数; D_1^N 为模块 N 的模块内聚合度; $\alpha(M_i^N, M_j^N)$ 为模块 N 中第 i 和第 j 个零部件对应的关联度值; D_2^N 为模块 N 与其他模块间的总关联度值; $\alpha(M_i^N, M_j^V)$ 为模块 N 中第 i 个零部件和模块 V 中第 j 个零部件对应的关联度值,若零部件与自身的关联度记为1,则 D_1^N 、 D_2^N 需减去这一数值。

据此提出了产品模块划分方案的模块度 MD :

$$D_I = \sum_{v=1}^Z D_1^V \quad (3)$$

$$D_W = \sum_{v=1}^Z D_2^V \quad (4)$$

$$MD = \frac{D_I - D_W}{D_I + D_W} \quad (5)$$

式中: D_I 为方案中所有模块内聚合度之和; D_W 为方案中所有模块间聚合度之和; MD 的取值范围是 $[-1, 1]$,对 MD 进行归一化处理:

$$MD^G = \frac{MD + 1}{2} \quad (6)$$

1.1.2 模块可替换性准则

模块可替换性主要与模块内包含的零部件数量以及与其他零部件的关联数相关,这两者的数值越高则模块的可替换性越差。基于此,提出模块 N 可替换性 MT^N 的计算方法:

$$MT^N = 1 - \frac{m_N + m'_N}{n} \quad (7)$$

式中: MT^N 为第 N 个模块的可替换性; n 为产品总零部件数; m_N 为第 N 个模块包含的零部件数; m'_N 为产品其他零部件与第 N 个模块中零部件相关的数量。方案平均模块可替换性 MT 与归一化 MT^G 分别为

$$MT = \frac{1}{Z} \sum_{v=1}^Z MT^V \quad (8)$$

$$MT^G = \frac{n}{n-1} MT \quad (9)$$

1.1.3 模块结构完整性准则

模块结构完整性高的定义是在尽可能小的空间里使模块功能尽可能独立完成,且模块的安装难度要尽可能低。因此,提出以功能完整度、装配复杂度、空间占有率综合评价模块结构完整性。为了量化判断指标减少人为误差,咨询相关专家、产品设计人员和产品装配人员的意见制定了指标赋值定义,见表1。

表1 模块结构完整性指标赋值参考

Tab.1 Module structural integrity value

参考值	功能完整度	装配复杂度	空间占有率
1.0	功能非常完整	简单	低
0.8	能独立完成某项功能	较为简单	较低
0.6	需其他模块协助完成	中等	中等
0.4	与其他模块共同完成	安装复杂	较高
0.2	协助其他模块	非常复杂	非常高
0.0	几乎不参与产品功能运作	不可拆卸安装	几乎遍布产品

通过表1评价模块N的功能完整度、装配复杂度、空间占有率, 获得其数值依次记为 MR_1^N, MR_2^N, MR_3^N , 则模块N的结构完整性为

$$MR^N = r_1 MR_1^N + r_2 MR_2^N + r_3 MR_3^N \quad (10)$$

式中: r_1, r_2, r_3 分别为功能完整度、装配复杂度、空间占有率3个评价指标的权重, 且 $r_1 + r_2 + r_3 = 1$ 。模块划分方案的平均模块结构完整性指标MR计算公式为

$$MR = \frac{1}{Z} \sum_{v=1}^Z MR^v \quad (11)$$

式中: MR^v 为第V个模块的结构完整性, MR的取值范围是[0, 1]。

1.2 模块划分准则影响因素

除了上述模块划分评价准则外, 引入模块划分二级评价指标 $Y = \{y_1, \text{设计复杂度}; y_2, \text{维修难度}; y_3, \text{模块重用度}; y_4, \text{结构稳定性}; y_5, \text{经济适用性}; y_6, \text{环保性}; y_7, \text{销售层}; y_8, \text{客户层}\}$ 用以确定前者在模块划分评价中所占的权重。该指标几乎涵盖了产品的全生命周期, 使模块划分方案更具泛用性。

1.3 基于分布式乘性偏好关系的模块划分准则权重分配模型

1.3.1 分布式乘性偏好关系

定义1 设评价准则集为 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, 设 $A = (a_{ij})_{m \times m} \subset Y \times Y$ 为定义在准则集上的分布式乘性偏好关系, 其中 $a_{ij} = \{(b^k, f_{ij}(b^k)) | i \neq j, k = 1, 2, \dots, (m)k\}$ 表示指标 y_i 相对于 y_j 的分布式乘性偏好, b^k 为乘性偏好值, $f_{ij}(b^k)$ 为乘性偏好值 b^k 所占比例, 且 $\sum_{k=1}^{(m)k} f_{ij}(b^k) = 1$, $(m)k$ 为 a_{ij} 中乘性偏好值的个数; 根据文献[8]选取1~9比率标度作为乘性偏好值的取值标度, 取值参考见表2。

定义2 令分布式乘性偏好 a_{ij} 的期望为

$$E(a_{ij}) = \sum_{k=1}^{(m)k} [b^k \cdot f_{ij}(b^k)] \quad (12)$$

表2 乘性偏好值参考

Tab.2 Multiplicative preference value reference

偏好值	偏好值描述
1	两者同等重要
3	前者稍微重要
5	前者明显重要
7	前者非常重要
9	前者极端重要
2, 4, 6, 8	两个等级犹豫取中间值

1.3.2 模块划分准则权重分配BWM模型

设向量 $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ 为指标集Y的权重向量, 最优指标 y_B 与其他指标比较获得最优指标比较向量 $P_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bm})$, 其他指标与最劣指标 y_W 比较获得最劣指标比较向量 $P_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{mW})$, 且 $a_{BB} = 1, a_{WW} = 1$, 权重分配最理想的情况是 $\frac{u_B}{u_i} = E(a_{Bi})$ 且 $\frac{u_i}{u_W} = E(a_{iW})$, 参考BWM建立如式(13)所示优化模型, 以求最佳权重分配方案。

模型1

$$\begin{aligned} & \min \varphi \\ \text{s.t. } & \varphi = \max_i \left\{ \left| \frac{u_B}{u_i} - E(a_{Bi}) \right|, \left| \frac{u_i}{u_W} - E(a_{iW}) \right| \right\}, \\ & i = 1, 2, \dots, m \\ & \sum_{i=1}^m u_i = 1 \\ & u_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (13)$$

求解模型1即可获得 φ 的值以及最优权重分配向量U。检验偏好一致性的计算公式为^[9]

$$CR = \frac{\varphi}{CI} \quad (14)$$

式中:CI为一致性指数, 其取值可根据最优、最劣指标之间的比值获得, 具体见表3。

表3 一致性指数取值

Tab.3 Values of consistency index

a_{BW}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CI	0.00	0.44	1.00	1.63	2.30	3.00	3.73	4.47	5.23

当 $CR \leq 0.1$ 时, 认为偏好关系满足一致性要求; 否则需调整偏好关系 a_{Bi} 与 a_{iW} 的取值, 以使一致性指标达到一致性要求。

1.4 模块划分综合评价

模块划分综合评价完整步骤如下:

步骤1 设 $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_t)$ 为模块划分方案集, 通过上述计算方法获取各组划分方案的 $MP_s = (MD_s^G, MT_s^G, MR_s)$ ($s = 1, 2, \dots, t$)。

步骤2 获得二级评价指标间的分布式乘性

偏好向量 P_B 和 P_W , 同理确定在二级评价指标 y_i ($i=1, 2, \dots, 8$) 下模块划分准则 MD 、 MT 、 MR 间的乘性偏好向量 $P_B^i = (a_{B1}^i, a_{B2}^i, a_{B3}^i)$ 以及 $P_W^i = (a_{1W}^i, a_{2W}^i, a_{3W}^i)$ 。

步骤3 对上述向量依次使用模型1的方法求解二级评价指标权重 $U = (u_1, u_2, \dots, u_8)$ 、对应指标下模块评价准则的权重 $U^i = (u_1^i, u_2^i, u_3^i)$, 以及其对应的 φ 值; 根据式(14)检验其是否符合一致性要求。

步骤4 利用如下公式可获得模块划分方案评价准则的综合权重 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$:

$$\omega_x = \sum_{i=1}^8 u_i \cdot u_x^i, \quad x = 1, 2, 3 \quad (15)$$

步骤5 通过如下公式计算各方案的综合评价指数并选取出最佳模块划分方案:

$$MM_s = MP_s \cdot \omega, \quad s = 1, 2, \dots, t \quad (16)$$

2 模块划分方案评价实例

以挖掘机的工作臂装置来验证多准则模块划

分综合评价方法的可行性。挖掘机工作臂的主要组成部件如图1所示。依据文献[10]中方法获取产品零部件综合关联矩阵 L , 如图2所示。

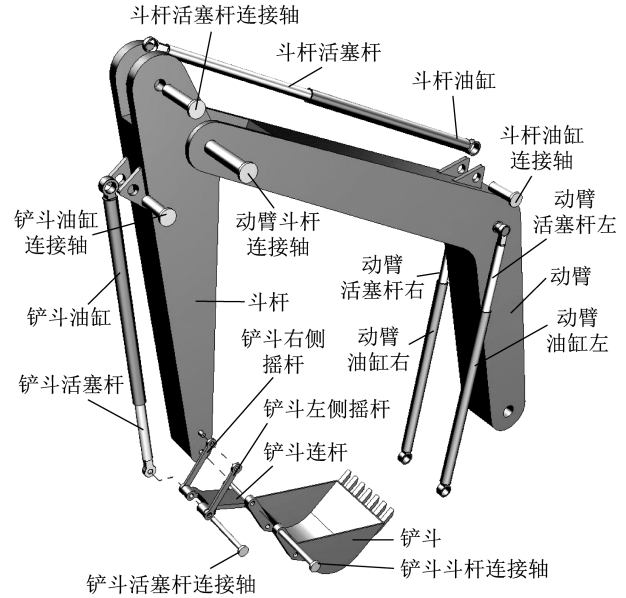


图1 挖掘机工作臂结构

Fig.1 Excavator arm structure diagram

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑳	
①	1	0.35	0.78	0.35	0	0.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
②	0.35	1	0.35	0.78	0	0.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
③	0.78	0.35	1	0.35	0	0.73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
④	0.35	0.78	0.35	1	0	0.73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
⑤	0	0	0	0	1	0.73	0.15	0.35	0.35	0.35	0.73	0	0	0	0	0	0	0	0	
⑥	0.53	0.53	0.73	0.73	0.73	1	0.73	0.73	0.18	0.38	0.73	0	0	0	0	0	0	0	0	
⑦	0	0	0	0	0.15	0.73	1	0.73	0.38	0.38	0.38	0	0	0	0	0	0	0	0	
⑧	0	0	0	0	0.35	0.73	0.73	1	0.38	0.81	0.38	0	0	0	0	0	0	0	0	
⑨	0	0	0	0	0.35	0.18	0.38	0.38	1	0.73	0.73	0	0	0	0	0	0	0	0	
⑩	0	0	0	0	0.35	0.38	0.38	0.81	0.73	1	0.73	0	0	0	0	0	0	0	0	
⑪	0	0	0	0	0.73	0.73	0.38	0.38	0.73	0.73	1	0.73	0.73	0.73	0.35	0.18	0.38	0.73	0.73	
⑫	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.73	1	0.38	0.18	0.38	0.73	0.73	0.73	0.35	0.15
⑬	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.73	0.38	1	0.18	0.38	0.73	0.73	0.73	0.35	0.15
⑭	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.73	0.18	0.18	1	0.73	0.38	0.18	0.38	0	0
⑮	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.73	0.38	0.38	0.73	1	0.38	0.38	0.53	0.35	0
⑯	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.35	0.73	0.73	0.38	0.38	1	0.73	0.73	0.73	0.15
⑰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.18	0.73	0.73	0.18	0.38	0.73	1	0.73	0.38	0.15
⑱	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.38	0.73	0.73	0.38	0.53	0.73	0.73	1	0.38	0.15
⑲	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.73	0.35	0.35	0	0.35	0.73	0.38	0.38	1	0.73
⑳	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.73	0.15	0.15	0	0	0.15	0.15	0.15	0.73	1

图2 挖掘机工作臂零部件综合关联矩阵

Fig.2 Excavator arm design structure matrix

机电产品模块划分的最佳模块数应该在 \sqrt{n} 左右^[11], n 为产品零部件数量,因此选择其模块划分备选方案为3、4、5组模块,参考文献[10]对综合关联矩阵 L 做层次聚类分析得到3组模块划分方案:

方案1 $\{Q_1^1(1,2,3,4); Q_1^2(5,6,7,8,9,10); Q_1^3(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20)\}$;

方案2 $\{Q_2^1(11); Q_2^2(12,13,14,15,16,17,18,19,20); Q_2^3(1,2,3,4); Q_2^4(5,6,7,8,9,10)\}$;

方案3 $\{Q_3^1(6); Q_3^2(5,7,8,9,10); Q_3^3(11); Q_3^4(12,13,14,15,16,17,18,19,20); Q_3^5(1,2,3,4)\}$ 。

通过决策组:模块划分专家2人、产品设计人员2人、产品装配维修人员2人、产品销售人员2人以及客户意见2人,确定模块结构完整性最优指标为功能完整度 MR_1 ,最劣指标为装配复杂度 MR_2 ,并对各项指标做出对比评价,得到分布式乘性偏好向量数据(见表4)。利用式(13)中的模型1对模块结构完整性指标进行权重分配,求解得各指标权重为 $r_1=0.6372, r_2=0.1316, r_3=0.2312, \varphi=0.1568, CR=0.0682 < 0.1$,满足一致性要求。结合决策组对3组方案模块结构完整性性指标的综合评分见表5。

由式(6)、式(9)计算各方案的模块度、模块可替换性的归一化数值 MD^G, MT^G 见表6。

以1~9为乘性比例标度,综合决策组的意见选

表7 二级评价指标间的偏好向量

Tab.7 Preference vector among secondary evaluation indicators

指标	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
最优指标	$\{(1,0.1); (3,0.9)\}$	$\{(2,0.1); (3,0.2); (4,0.6)\}$	$\{(3,0.2); (4,0.8)\}$	1	$\{(4,0.5); (5,0.2); (7,0.3)\}$	$\{(3,0.2); (5,0.4); (6,0.4)\}$	$\{(8,1)\}$	$\{(2,0.1); (3,0.); (5,0.8)\}$
最劣指标	$\{(3,0.2); (4,0.8)\}$	$\{(3,0.5); (4,0.5)\}$	$\{(1,0.1); (3,0.9)\}$	$\{(8,1)\}$	$\{(2,0.2); (3,0.6); (4,0.2)\}$	$\{(1,0.4); (3,0.6)\}$	1	$\{(1,0.3); (3,0.7)\}$

同理,分别得到在指标 $y_i(i=1,2,\dots,8)$ 下模块划分准则集 $X=\{x_1$ 模块度; x_2 模块可替换性; x_3 模块结构完整性 $\}$ 的权重分配比例 U^i 以及对应的 φ^i ,依次为 $U^1=(0.5633,0.3256,0.1111), \varphi^1=0.0698; U^2=(0.1923,0.5615,0.2462), \varphi^2=0.0804; U^3=(0.3599,0.5337,0.1064), \varphi^3=0.0170; U^4=(0.2632,0.6316,0.1053), \varphi^4=0.0000; U^5=(0.1136,0.3062,0.5802), \varphi^5=0.1054; U^6=(0.1220,0.2621,0.6159), \varphi^6=0.0505; U^7=(0.1087,0.5457,0.3456), \varphi^7=0.0208; U^8=(0.1250,0.6464,0.2286), \varphi^8=0.1716$ 。

由上述数据利用式(15)可得出3个模块评价准

表4 结构完整性性指标偏好向量

Tab.4 Structural integrity preference vector

指标	MR_1	MR_2	MR_3
最优指标 MR_1	1	$\{(5,1)\}$	$\{(3,0.6); (2,0.4)\}$
最劣指标 MR_2	$\{(5,1)\}$	1	$\{(3,0.2); (2,0.4); (1,0.4)\}$

表5 划分方案结构完整性对比

Tab.5 Scheme structural integrity comparison

指标	MR_1	MR_2	MR_3	MR
方案1	0.75	0.60	0.80	0.74182
方案2	0.70	0.70	0.75	0.71156
方案3	0.60	0.80	0.50	0.60320

表6 模块划分方案对比

Tab.6 Comparison of module division schemes

划分方案	MD^G	MT^G
方案1	0.8318	0.4912
方案2	0.6883	0.5000
方案3	0.6137	0.5368

取最优指标为 y_4 和最劣指标为 y_7 ,并给出模块划分二级评价指标集的分布式乘性偏好关系,见表7。利用模型1求解得二级模块评价指标的权重为 $U=(u_1, u_2, \dots, u_8)=(0.1371, 0.1234, 0.0999, 0.3404, 0.1041, 0.0710, 0.0403, 0.0838), \varphi=0.4408$ 。由表2可知, $CI=0.47$,因此 $CR < 0.1$ 一致性检验通过。

则之间的权重分配比例为 $\omega=(0.2640, 0.5089, 0.2293)$,通过式(16)可计算出3组模块划分方案的综合评价指数依次为 $MM_1=0.6386, MM_2=0.5982, MM_3=0.5723$ 。对比3组数据发现,方案一的评价综合指数最高,因此选取方案一{动臂模块(1,2,3,4);斗杆模块(5,6,7,8,9,10);铲斗模块(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20)}为最佳模块划分方案。

3 结语

本文提出了一种基于分布式乘性偏好环境下

(下转第281页)

低级错误,避免轴腔内壁发生磕碰损坏。试验表明,装置系统足够精确,重复性和再现性较高,满足发动机装配要求。但存在系统误差,推断为扳手头在自动折叠后,加上扳手杆较长,结构连接精度降低所致,后续应优化改进。

发动机转子螺母深盲腔自动化连接技术为国内首次应用,可大幅度提高装配准确性和一致性,不仅改善了航空发动机工作稳定性和可靠性,更为机械行业内复杂工况下的精密连接提供参考,具有广阔的市场应用价值和现实意义。

参考文献:

- [1] 刘长福,邓明. 航空发动机结构分析[M]. 西安:西北工业大学出版社,2011.
- [2] 石宏. 航空发动机装配工艺技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2015.
- [3] KLOCKE F, VESELOVAC D, AUERBACH T, et al. Intelligent assembly for aero engine components [J]. Intelligent Robotics and Applications, 2008, 5315: 927-935.
- [4] PAPASTATHIS T, RYLL M, BONE S, et al. Development of a reconfigurable fixture for the automated assembly and disassembly of high-pressure rotors for Rolls-Royce aero engines[C]// Proceedings of 5th IFIP WG 5.5 International Precision Assembly Seminar. Berlin:Springer,2010:283-289.
- [5] SICH J H, PIERCE C M. Flexible manufacturing systems at GE aircraft engines: the right choice at the right time[C]// Proceedings of the Symposium on Flexible Automation. New York:ASME,1992:235-242.
- [6] 张渝,李琳,陈津,等. 航空发动机重要装配工艺分析及研展展望[J]. 航空制造技术,2019(15):14-21.
- [7] 刘思佳. 航空发动机转子柔性装配系统平台构型研究[D]. 沈阳:航空航天大学,2016.
- [8] 王志,刘清林,冉健,等. 航空发动机三自由度装配平台结构设计[J]. 装备制造技术,2017(7):1-4.
- [9] 黄松. 航空发动机多自由度装配平台设计与分析[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2015.
- [10] 周烁,汪俊熙,刘宜胜,等. 大型商用航空发动机整机装配工艺浅析[J]. 技术前沿,2014(5):92-96.
- [11] 魏企业,石宏,孙方成,等. 航空发动机转子装配螺栓自动拧紧机设计与分析[J]. 机械,2017(6):67-70.
- [12] 张雷. 力矩拧紧机的应用及拧紧方式、参数的选择[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [13] 马逢时,周炜,刘传冰. 六西格玛管理统计指南[M]. 北京:中国人民大学出版社,2007.

(上接第258页)

的多准则模块划分综合评价方法,该方法以模块划分方案的模块度、模块可替换性以及模块结构完整性为基本评价准则,并通过决策组人员从设计复杂度、维修难度、模块重用度、结构稳定性、经济适用性、环保性、销售层、客户层8个维度综合评价3个划分准则的优劣程度,利用分布式乘性偏好环境下的BWM模型确定其权重,计算得出模块划分方案综合评价指数的取值,并确定待选方案中的最优方案。最后,以挖掘机工作臂的模块划分验证了该方法的可行性。

参考文献:

- [1] 蔡业彬. 模块化设计方法及其在机械设计中的应用[J]. 机械设计与制造,2005(8):154-156.
- [2] 罗澄清,赵登标,张瑞亮,等. 多轴线运输车的模块化设计方法研究[J]. 机械设计与制造,2024(7):310-316.
- [3] 王建正,张利强,韩新民,等. 基于模块化的高端装备关键零部件绿色设计平台开发[J]. 制造业自动化,2022,44(7):113-115,178.
- [4] 谌炎辉,周德俭,冯志君,等. 基于BOM的复杂产品模块划分方法研究[J]. 中国机械工程,2012,23(21):2590-2593.
- [5] 刘丹,王保兴. 基于混合模糊多准则群决策的模块划分方案评价[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(4):149-153.
- [6] 魏文远. 机械产品结构模块化设计与多属性评价方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.
- [7] 杨荣庆,唐孝安,张强,等. 分布式乘性偏好环境下考虑决策者偏好调整意愿的最优-最劣多准则决策方法[J]. 中国管理科学,2024,32(7):65-75.
- [8] SAATY T. The analytical hierarchy process [M]. New York:McGraw-Hill Press,1980.
- [9] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method[J]. Omega,2015,53:49-57.
- [10] 毛恩荣,马静仪,杜岳峰,等. 基于层次聚类算法的大型玉米收获机械模块划分方法[J]. 中国农业大学学报,2022,27(5):73-85.
- [11] 谌炎辉,周德俭,袁海英,等. 复杂产品的最小最大划分模块化方法[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(1):9-14.