

# 基于 RMS 关键特征偏好排序 的重构方案评估方法

王国新, 黄思翰, 商曦文, 阎艳, 杜景军

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对如何构建反映可重构制造系统本质特性的评估指标定量模型, 以及某一重构方案相对其他方案优势和劣势都绝对明显情况下如何实现多方案优选的问题, 提出一种基于 RMS 关键特征偏好排序的重构方案评估方法. 在综合考虑可重构机床组件调整、制造单元调整基础上, 建立衡量 RMS 可缩放性、可转换性、可诊断性、模块化、可集成性和定制化等特征的量化模型, 以此为基础形成重构方案的评估指标, 并采用层次分析法分配评估指标权重. 评估过程中, 先从局部采用部分偏好排序评估方法分别对方案的优势和劣势进行评估, 然后从整体上通过完全偏好排序评估方法对重构方案的净优势进行评估, 最终得出重构方案的综合评估结果. 并以某研究所 RMS 车间为例, 阐述了该方法的实施过程并验证其有效性和实用性.

**关键词:** 可重构制造系统; 重构方案评估; 层次分析法

中图分类号: TP 391 文献标志码: A 文章编号: 1001-0645(2017)05-0466-07

DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2017.05.006

## Reconfiguration Plan Evaluation Based on Preference Ranking of Key Characteristics in Reconfigurable Manufacturing System

WANG Guo-xin, HUANG Si-han, SHANG Xi-wen, YAN Yan, DU Jing-jun

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to develop a quantitative evaluation index model for the essential characters of RMS (reconfigurable manufacturing system) and to optimally select the configuration plans with their outstanding advantage and disadvantage comparison, an evaluation method was proposed based on PROMETHEE (preference ranking organization method for enrichment evaluation). Analyzing the reconfiguration of the reconfigurable machine tool and manufacturing cell, a basic evaluation index and the quantitative model was designed to take the key characters of RMS, scalability, convertibility, diagnosability, modularity, integrability and customization. AHP (analytic hierarchy process) was used to assign the weight for these indexes. In the evaluation process, PROMETHEE I was applied firstly to analyze the advantage and disadvantage for each alternative plan. Secondly, PROMETHEE II was adopted to analyze the comprehensive advantage. Finally, the sequence of alternative plans was decided based on the analyzed results. A case study from a shop floor of an institute was presented to validate the effectiveness and practicability.

**Key words:** reconfigurable manufacturing system (RMS); RMS evaluation; analytic hierarchy process (AHP)

收稿日期: 2015-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105039)

作者简介: 黄思翰(1991—), 男, 硕士生, E-mail: 2120140324@bit.edu.cn.

通信作者: 王国新(1977—), 男, 副教授, E-mail: wangguoxin@bit.edu.cn.

目前,从产品需求量的波动到产品品种的多样化,制造企业需要具备对市场的高度敏感性,能够对市场的变化做出快速的响应,及时推出满足客户需求的产品,可重构制造系统 RMS<sup>[1]</sup>作为新兴制造系统,引起了企业的高度关注. RMS 是一种为响应市场不规则需求的突然变化,在设计之初就考虑通过快速改变系统结构和软硬件组元来调整生产能力和功能的制造系统<sup>[2]</sup>. 因此如何对 RMS 的设计方案进行评估优选,对可持续重构及快速响应能力具有重要的意义. 武志军等<sup>[3]</sup>分析了影响 RMS 性能的因素,构建了层次化的综合评估指标体系,并利用灰色关联分析法确定指标权重,对重构方案进行模糊综合评价;窦建平<sup>[4]</sup>综合考虑定性和定量因素,提出了一种混合层次决策方法,提升了 RMS 重构方案决策的效率;Goyal 等<sup>[5]</sup>通过两阶段的评估方法对重构方案进行评估,同时阐明了在方案评估和选择中对重构能力进行分析的必要性;Rehman 等<sup>[6]</sup>提出了一个层次分析法的 RMS 评估框架,以生产效率为评估指标,从三个层次对方案进行评估;Saxena 等<sup>[7]</sup>提出了一种三阶段的 RMS 重构方案评估方法,包括需求分析、重构方案设计和方案评估,结合人工免疫系统算法筛选出最优或者近优的重构方案. 上述研究主要以生产时间、生产成本等通用化的制造系统评估指标为主,缺少反映 RMS 本质特性的量化评估指标. 此外现有评估方法无法解决重构方案优势较大、劣势也比较明显的排序问题.

针对上述问题,文中以能够反映 RMS 本质的 6 个关键特征(可缩放性、可转换性、可诊断性、模块化、可集成性、定制化)入手,构建 RMS 重构方案的评估指标,并建立指标的数学模型以实现量化的评估. 以层次分析法(AHP)<sup>[4]</sup>解决指标权重问题. 对多指标偏好排序算法 PROMETHEE<sup>[8]</sup>分别从局部和整体实现对重构方案的综合、客观评估.

## 1 RMS 关键特征评估指标量化模型

RMS 6 个关键特征从本质上反映了可重构制造系统的生产能力、重构能力和响应能力,以这些特征作为 RMS 重构方案的评估指标可以综合反映出 RMS 的能力和性能,通过建立每个指标的数学模型,实现评估指标从定性向定量的转化.

### 1.1 可缩放性评估指标的量化模型

可缩放性是指在生产批量改变时,RMS 的生产能力可以通过增减机床模块或机床,以及重排工序

等手段达到增减系统产能的目的. RMS 缩放能力体现在为响应市场需求波动而付出的调整量大小. 在实际生产中,生产能力的调整量一般是以投产批量为依据,而且要考虑调整的平稳性. 因此,文中定义一个调整梯度的概念,即根据 RMS 实际情况,以调整梯度为依据进行产能的缩放. 此外,在整个生命周期内通过重构能够形成多个构形,每个构形拥有一定的产能,因此从所有构形出发考虑,产能在客观上存在最大值和最小值. 在定义调整梯度、最大产能和最小产能之后,根据调整梯度计算出重构次数,并分析每次重构的成本、时间、系统级调整量、机床级调整量等参数,得出缩放性的量化模型如式(1)~(4)所示.

$$S = \frac{1}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \frac{1}{N_{\Delta}} \sum_{i=1}^{N_{\Delta}} \lambda_i^T \lambda_i^C \alpha_i \Delta_i, \quad (1)$$

$$\lambda_i^T = T_i / T_i^p, \quad (2)$$

$$\lambda_i^C = C_i / C_i^p, \quad (3)$$

$$\alpha_i = (\omega_1 N_i^a + \omega_2 N_i^m) / N_i. \quad (4)$$

式中: $S$  为 RMS 的可缩放性,是一个取值范围在 0~1 之间的量纲一的值, $S$  越接近 0,表明缩放性能越好,当  $S$  越接近 1,表明缩放性能越差,甚至没有缩放能力; $\Delta_{\max}$ 、 $\Delta_{\min}$  为 RMS 产能的最大值和产能最小值; $\Delta_i$  为进行重构时的调整梯度; $N_{\Delta}$  为 RMS 从产能最小值到产能最大值之间存在的调整梯度数量; $\lambda_i^T$  为完成调整梯度  $\Delta_i$  的时间参数; $T_i$  为完成调整梯度  $\Delta_i$  需要的重构时间; $T_i^p$  为第  $i$  次重构的生产周期; $\lambda_i^C$  为完成调整梯度  $\Delta_i$  的成本参数; $C_i$  为完成调整梯度  $\Delta_i$  需要的重构成本; $C_i^p$  表示第  $i$  个生产周期的生产成本; $\alpha_i$  表示完成调整梯度  $\Delta_i$  需要进行的系统级和机床级调整参数; $N_i^a$  表示系统级调整参数; $N_i^m$  为机床级调整参数; $\omega_1$ 、 $\omega_2$  为系统级调整参数和机床级调整参数的权重; $N_i$  为完成调整梯度  $\Delta_i$  前,RMS 包含的机床数量.

### 1.2 可转换性评估指标的量化模型

可转换性是指 RMS 根据市场需求快速调整生产功能的能力,包括生产不同零件族及同一零件族内不同零件时进行的生产功能转换. 根据可转换性的定义,从零件族的转换以及每个零件族内不同零件之间的转换对可转换性进行建模. RMS 必须具备加工零件族内所有零件的能力,零件族内的不同零件间的功能转换只需要进行机床主轴调整、刀具替换、夹具变动等机床级的调整. 因此,分析零件之间的功能转换时只需考虑机床级的调整;而分析零

件族的功能转换时,除了要考虑机床级的调整外,还要从系统角度考虑机床的增加、删除、替换、移动等系统级的调整. 基于上述分析,建立的 RMS 可转换性量化模型如式(5)~(7)所示.

$$C_v = \omega_1 C_1 + \omega_2 C_2, \quad (5)$$

$$C_1 = 1 / \left[ \frac{1}{2N_p - 1} \sum_{i=1}^{N_p-1} \sum_{j=i+1}^{N_p} (N_{ij}^s + N_{ij}^l + N_{ij}^t) \right], \quad (6)$$

$$C_2 = 1 / [S_c (N_a + N_d + N_r + N_m)]. \quad (7)$$

式中: $C_v$  为 RMS 的转换能力, $C_v$  的取值在 0 和 1 之间,越接近 1,表明转换能力越强,反之越弱; $C_1$  和  $C_2$  分别为 RMS 在零件族内和零件族间的转换能力; $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别表示  $C_1$  和  $C_2$  的权重; $N_p$  为零件族包含的零件种类; $2N_p - 1$  表示零件族内不同零件之间进行转换的总次数; $N_{ij}^s$ 、 $N_{ij}^l$  和  $N_{ij}^t$  分别为从生产第  $i$  种零件转换到生产第  $j$  种零件时需要进行主轴调整的机床数量、进行刀具调整的机床数量、进行夹具调整的机床数量; $S_c$  为需要进行转换的零件族之间的相似性系数; $N_a$ 、 $N_d$ 、 $N_r$  和  $N_m$  分别为零件族之间转换时需要增加的机床数量、删除的机床数量、替换的机床数量和移动的机床数量.

### 1.3 可诊断性评估指标的量化模型

可诊断性是指为了减少重构后的斜升时间而进行的快速诊断的能力. 斜升时间的长短取决于 RMS 的诊断能力,过长的斜升时间将会降低 RMS 的响应能力,影响重构方案的实施. RMS 的诊断能力与 RMS 中的诊断工序数量、诊断样本大小、诊断准确率有关. 综上分析,建立的 RMS 可诊断性量化模型如式(8)~(11)所示.

$$D = \frac{1}{N_\Delta} \sum_{i=1}^{N_\Delta} \lambda_i^d \lambda_i^s \lambda_i^t X_i, \quad (8)$$

$$\lambda_i^d = N_i^{d0} / N_i^d, \quad (9)$$

$$\lambda_i^s = N_i^{s0} / N_i^s, \quad (10)$$

$$\lambda_i^t = T_i^p / T_i^r. \quad (11)$$

式中: $D$  为 RMS 的诊断能力, $D > 0$ , $D$  值越大,表明 RMS 的诊断能力越强; $N_\Delta$  为 RMS 进行重构的次数; $X_i$  为第  $i$  次重构后,RMS 在斜升(ramp-up)期间对生产的产品进行质量检验的准确率; $N_i^{d0}$  为第  $i$  次重构后,RMS 具有的机床总数量; $N_i^d$  表示第  $i$  次重构后,制造系统中诊断设备的数量; $\lambda_i^d$  表示诊断设备因子; $N_i^{s0}$  为第  $i$  次重构后,RMS 进行诊断时生

产的产品总数量; $N_i^s$  为第  $i$  次重构后,RMS 进行诊断时抽取的样本大小; $\lambda_i^s$  为抽检样本因子; $T_i^p$  为第  $i$  次重构后,RMS 的生产周期; $T_i^r$  为第  $i$  次重构后,RMS 的斜升时间; $\lambda_i^t$  表示斜升时间因子.

### 1.4 模块化评估指标的量化模型

模块化是指按照模块的思想来设计系统,模块是一个独立的单元,该单元可以很便捷地同其他单元结合、重置、替代、交换来构建不同的结构或系统. 模块粒度是衡量一台机床包含的模块数量是否与机床所具备的功能或产能相匹配的概念. 粒度的取值可以参照正态分布,即存在一个模块数量点使得模块粒度达到最佳. 模块的独立性关系到 RMS 重构的效率,就机床级而言,模块的独立性体现在机床模块的接口数量,接口数量越少,模块之间的耦合越少,模块独立性就越好;就系统级而言,模块的独立性也就是制造单元的独立性,零件跨单元加工次数越少,说明制造单元的独立性越好. 综上分析,建立的 RMS 模块化量化模型如式(12)~(14)所示.

$$M = \omega_1 M_1 + \omega_2 M_2, \quad (12)$$

$$M_1 = \frac{1}{N_\Delta} \sum_{k=1}^{N_\Delta} \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^P N_i} \sum_{i=1}^P G_i \sum_{j=1}^{N_j} \frac{1}{N_{ij}} \right), \quad (13)$$

$$M_2 = \frac{1}{N_\Delta N_k} \sum_{k=1}^{N_\Delta} G_k \sum_l \frac{1}{N_{kl}}. \quad (14)$$

式中: $M$  为 RMS 的模块化性能, $M$  的取值在 0 和 1 之间,越接近 1 表明模块化性能越好,反之则越差; $M_1$  和  $M_2$  分别为机床级和系统级的模块化性能; $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为  $M_1$  和  $M_2$  的权重; $N_\Delta$  为 RMS 从产能最小值到产能最大值之间存在的调整梯度数量; $P$  为 RMS 的工序数量,即机床数量; $N_i$  为第  $i$  台机床包含的模块数量; $G_i$  为第  $i$  台机床的模块粒度,取值在 0 和 1 之间,粒度值越接近 1,模块划分越合理; $G_k$  为第  $k$  次重构的模块粒度,性质与  $G_j$  相同; $N_{ij}$  为第  $i$  台机床的第  $j$  个模块的接口数量; $N_k$  为第  $k$  次重构后的单元数量,也就是系统级模块数量; $N_{kl}$  为第  $k$  次重构后的第  $l$  个单元的跨单元加工次数.

### 1.5 可集成性评估指标的量化模型

可集成性是指制造设备和控制模块等构件具有与其他构件进行集成的接口以及易于将新技术或新工艺集成到现有系统的能力. 在重构过程中,机床模块的软、硬件接口标准统一,就会大大减少修正时间和成本,甚至为 0,若接口不是标准的,需要进行接口修正,之后才能进行安装和调试来实现所需的

功能和产能. 基于此,建立的 RMS 可集成性量化模型如式(15)~(17)所示.

$$I = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{N_i} (\omega_1 \alpha_j^h + \omega_2 \beta_j^s), \quad (15)$$

$$\alpha_j^h = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{C_j^{ha}}{C_j^h} + \frac{T_j^{ha}}{T_j^h} \right), \quad (16)$$

$$\beta_j^s = 1 - T_j^{sa} / T_j^s. \quad (17)$$

式中: $I$  为 RMS 的集成性能, $I$  的取值在 0 和 1 之间,越接近 1 表明集成性能越好,反之则越差; $P$  为 RMS 的机床数量; $N_i$  为第  $i$  台机床包含的模块数量; $\alpha_j^h$  为第  $i$  台机床的第  $j$  个模块硬件调整参数; $\beta_j^s$  为第  $i$  台机床的第  $j$  个模块软件调整参数; $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别为硬件调整参数和软件调整参数的权重,且  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ ;  $C_j^{ha}$ 、 $C_j^h$ 、 $T_j^{ha}$ 、 $T_j^h$ 、 $T_j^{sa}$  和  $T_j^s$  分别表示第  $i$  台机床的第  $j$  个模块的硬件调试成本、硬件安装成本、硬件调试时间、硬件安装时间、软件接口调试时间、软件调试时间.

### 1.6 定制化评估指标的量化模型

定制化是指基于零件族及具体零件加工所需的柔性来选择机床和构件系统. 定制化涉及了零件族和加工设备,需要从零件和功能两个角度衡量 RMS 的定制化指标. 首先要 RMS 的零件进行归类成族,然后根据零件族设计 RMS 的构形,该过程需要考虑的效率问题. 从功能角度而言,定制化意味着高设备利用率. 因此,其定制化的能力也就越强. 基于上述分析,建立的 RMS 定制化评估指标的量化模型如式(18)~(20)所示.

$$C_m = \lambda_T Y P, \quad (18)$$

$$\lambda_T = 1 - T_{pt} / T_0, \quad (19)$$

$$Y = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \frac{N_i}{N}. \quad (20)$$

式中: $C_m$  为 RMS 的定制化能力,取值在 0 和 1 之间,值越接近 1 表明定制能力越强; $\lambda_T$  为零件族构建时间的影响因子; $T_{pt}$  为从零件族构建到构形构建完毕的时间,构建零件族花费的时间越多,定制化能力就越弱; $T_0$  为生产周期; $P$  为零件族包含的零件种类; $Y$  为设备利用率; $N_i$  为第  $i$  种零件用到的机床数量; $N$  为 RMS 包含的机床总数量.

## 2 RMS 重构方案评估方法

文中采用 PROMETHEE 对重构方案进行评估,该方法为决策者提供了一组可行方案的部分优先关系 (PROMETHEE I) 和完全优先关系

(PROMETHEE II) 排序算法. 算法包含 7 个步骤: ① 计算重构方案的评估指标偏好函数值; ② 计算重构方案的评估偏好指数; ③ 计算重构方案的评估排序指数; ④ 采用 PROMETHEE I 对重构方案的评估排序指数进行排序; ⑤ 计算重构方案的评估完全排序指数; ⑥ 采用 PROMETHEE II 对重构方案的评估完全排序指数进行排序; ⑦ 重构方案评估排序数据流图绘制和排序结果分析.

PROMETHEE I 从重构方案的优势和劣势两个角度对方案进行评估. PROMETHEE II 通过求解重构方案优势与劣势的差值进行综合评估,可以对 PROMETHEE I 无法排序的方案进行排序. PROMETHEE 没有给出指标权重确定方法,权重确定过程中需要考虑决策者的主观性和评估指标的客观性,因此选取兼顾主观性和客观性的 AHP 来确定指标的权重,AHP 方法的一致性检验保证了指标权重计算结果的合理性.

## 3 实验验证

以某研究所 RMS 车间为例,对文中提出的方法进行验证. 文中以车间历史数据为依据,分析和获取计算评估指标相关参数的数据如表 1 所示. 根据表 1 中的数据,结合第 2 节构建的评估指标量化模型,计算 10 个候选方案的指标数据,并进行排序,如表 2 所示. 根据表 2 的排序结果进行绘制数据趋势图,如图 1 所示. 根据图 1 的评估指标趋势图,结合文献[8]对于偏好函数的定义,进行评估指标的偏好函数选择和参数确定,如表 3 所示. 根据表 4 的评估指标相对重要性矩阵,结合 AHP 权重计算方法得出权重向量

$$W =$$

$$[0.129 \quad 0.228 \quad 0.230 \quad 0.190 \quad 0.104 \quad 0.119].$$

计算一致性检验指标  $C_R = 0.036 < 0.100$ , 即比较矩阵通过了一致性检验,说明权重是合理的.

采用 PROMETHEE 算法对方案进行评估. 计算每个方案的部分排序指标  $\Phi^+$ 、 $\Phi^-$ ; 最后计算每个方案的部分排序指数  $\Phi$ , 即求  $\Phi^+$  与  $\Phi^-$  的差值. 对 10 个方案的部分排序指数和 PROMETHEE II 完全排序指数进行整理,如表 5 所示.

利用 PROMETHEE I 和 PROMETHEE II 的排序规则对方案进行排序,排序的结果如图 2 和图 3 所示.

表 1 10 个候选方案的评估指标相关参数数据  
Tab. 1 Related parameter data of 10 alternative plans

指标	参数	方案									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
可伸缩性	$\Delta_{\max}$	1 100	1 100	1 300	1 300	1 000	1 500	1 400	1 700	2 000	1 600
	$\Delta_{\min}$	100	200	500	300	300	100	300	500	350	200
	$N_{\Delta}$	10	9	2	2	14	7	5	3	11	4
	$\lambda_i^T$	0.500	0.450	0.380	0.323	0.500	0.520	0.500	0.300	0.500	0.375
	$\lambda_i^C$	0.440	0.476	0.420	0.410	0.378	0.390	0.500	0.491	0.300	0.412
	$\Delta_i$	100	100	400	500	50	200	250	500	150	400
	$\alpha_i$	1.50	2.50	3.10	4.75	2.12	4.22	2.89	6.12	2.56	5.11
	$C_1$	1.000	0.800	1.250	0.750	0.600	0.636	0.429	0.500	0.571	0.556
	$C_2$	0.284	0.282	0.189	0.249	0.216	0.294	0.408	0.355	0.267	0.197
	$\omega_1$	3	4	5	3	6	7	6	4	4	5
可转换性 $C_v$	$\omega_2$	1	2	2	0	3	2	3	0	4	3
	$N_p$	1	2	1	3	3	5	6	4	2	1
	$N_s$	1	1	1	1	4	4	5	4	1	5
	$N_t$	0.440	0.710	0.660	0.670	0.580	0.378	0.490	0.564	0.625	0.633
	$N_f$	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1
	$S_c$	0	1	1	2	2	4	0	1	4	1
	$N_a$	2	2	0	1	2	1	3	2	0	1
	$N_d$	4	1	6	2	3	3	1	0	1	5
	$N_r$	0.520	0.413	0.330	0.560	0.610	0.470	0.510	0.511	0.601	0.578
	$N_m$	0.480	0.587	0.670	0.440	0.390	0.530	0.490	0.489	0.399	0.422
可诊断性	$N_{\Delta}$	3	10	4	2	5	6	3	8	1	7
	$\lambda_i^d$	5.0	2.0	3.0	3.2	4.0	2.5	1.0	2.0	6.0	3.0
	$\lambda_i^T$	8.00	6.67	4.00	7.00	6.00	3.81	3.00	4.80	8.33	4.00
	$\lambda_i^C$	1.00	2.50	2.00	1.75	2.00	2.90	4.00	2.12	0.90	1.87
	$X_i$	0.901	0.923	0.892	0.951	0.805	0.888	0.990	0.796	0.850	0.890
	$M_1$	0.182	0.218	0.158	0.165	0.238	0.172	0.203	0.172	0.175	0.094
	$M_2$	0.176	0.460	0.770	0.307	0.894	0.160	0.155	0.263	0.148	0.145
	$\omega_1$	0.513	0.475	0.564	0.612	0.390	0.530	0.467	0.493	0.541	0.550
	$\omega_2$	0.487	0.525	0.436	0.388	0.610	0.470	0.533	0.507	0.459	0.450
	$G_i$	0.910	0.871	0.950	0.990	0.950	0.860	0.810	0.860	0.700	0.940
模块化	$G_k$	0.880	0.920	0.770	0.920	0.894	0.800	0.930	0.790	0.890	0.870
	$N_{ij}$	5	4	6	6	4	5	4	5	4	10
	$N_{kl}$	5	2	1	3	1	5	6	3	6	6
	$N_{\Delta}$	3	5	4	4	6	2	2	3	7	3
	$N_k$	2	3	2	5	4	4	6	4	5	2
	$N_i$	30	43	22	35	27	60	48	44	31	50
	$\alpha$	0.880	0.700	0.770	0.900	0.864	0.892	0.940	0.920	0.860	0.867
	$\beta$	0.912	0.800	0.820	0.840	0.870	0.798	0.850	0.700	0.860	0.900
	$\omega_1$	0.513	0.550	0.570	0.650	0.611	0.574	0.560	0.540	0.520	0.580
	$\omega_2$	0.487	0.450	0.430	0.350	0.389	0.426	0.440	0.460	0.480	0.420
定制化	$\lambda_T$	0.900	0.700	0.400	0.500	0.900	0.950	0.940	0.950	0.700	0.600
	$P$	1	1	4	3	5	2	1	1	2	1
	$Y$	0.850	0.910	0.951	0.960	0.670	0.850	0.901	0.790	0.843	0.730

表 2 10 个候选方案的 6 个评估指标值排序结果  
Tab. 2 Data rank of alternative plans evaluation index

指标	方案									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S	0.033	0.060	0.247	0.315	0.029	0.122	0.165	0.376	0.035	0.226
$C_v$	0.656	0.496	0.539	0.529	0.450	0.455	0.419	0.429	0.450	0.404
D	108.10	307.70	85.67	74.56	193.10	147.10	35.64	129.70	38.25	139.70
M	0.179	0.345	0.425	0.220	0.638	0.166	0.177	0.218	0.163	0.117
I	0.896	0.745	0.792	0.879	0.866	0.852	0.900	0.819	0.860	0.881
$C_m$	0.700	0.640	0.380	0.480	0.600	0.810	0.850	0.750	0.590	0.400

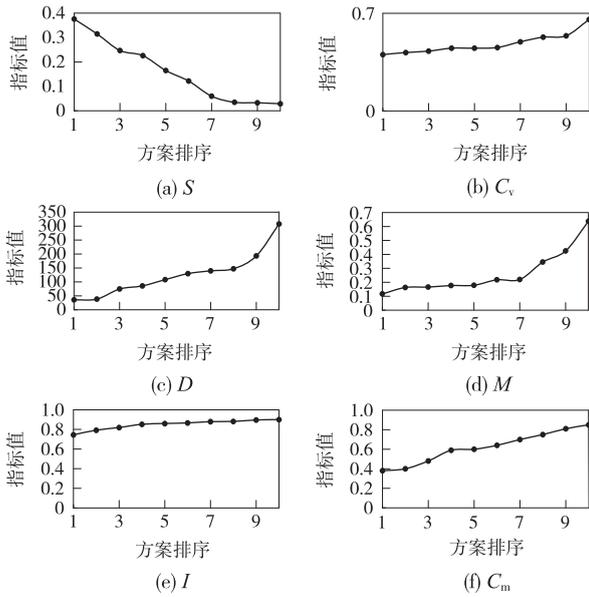


图 1 6 个评估指标量化数据趋势图

Fig. 1 Chart of evaluation index quantitative data

表 3 偏好函数以及相关参数的确定

Tab. 3 Preference function selected and related parameters determined

指标	偏好函数	偏差参数	
		$l$	$l+s$
S	Linear	-0.01	-0.22
$C_v$	Level	0.15	0.30
D	Level	120	250
M	Linear	0.05	0.10
I	V-shape	0.01	
$C_m$	Level	0.30	0.45

表 4 指标重要性比较矩阵

Tab. 4 Comparison matrix of evaluation index

指标	S	$C_v$	D	M	I	$C_m$
S	1	2/3	3/5	6/7	3/5	5/3
$C_v$	3/2	1	4/5	5/4	3/1	4/3
D	5/3	5/4	1	3/5	3/1	5/3
M	7/6	4/5	5/3	1	5/4	5/4
I	5/3	1/3	1/3	4/5	1	4/5
$C_m$	3/5	3/4	1/2	4/5	5/4	1

表 5 方案排序指标计算结果

Tab. 5 Ranking index calculation results of 10 plans

方案编号	$\Phi^+$	$\Phi^-$	$\Phi$
1	0.192 8	0.080 7	0.112 1
2	0.275 6	0.150 4	0.125 1
3	0.172 0	0.159 4	0.012 6
4	0.095 1	0.114 8	-0.019 7
5	0.268 7	0.058 9	0.209 8
6	0.054 5	0.158 3	-0.103 8
7	0.127 7	0.114 3	0.013 4
8	0.060 4	0.169 7	-0.109 3
9	0.043 9	0.172 6	-0.128 6
10	0.071 6	0.183 2	-0.111 6

从图 2 可以看出,只考虑方案的优势时,方案 2 是最优的,方案 9 是最差的. 但是方案 2 和方案 5,方案 3 和方案 7,方案 6 和方案 10,方案 9 和方案 10,都属于方案间的优势很大,但劣势也很大,导致方案无法排序,因此需要进一步通过 PROMETHEE II 的数据流图确定顺序关系. 图 3 则是利用 PROMETHEE II 完全排序方法对方案进行排序的结果. 从图可以看出方案 5 变成了最优的方案,方案 9 还是最差的方案. 从图 3 可知方案 5 优于方案 2,方案 1 优于方案 7,方案 3、4、6、8、10、9 依次排序. 因此通过 PROMETHEE II 完全排序方法解决了 PROMETHEE I 排序时出现部分方案无法进行排序的问题,为同时具有优势和劣势的方案给出了明确的排序结果.

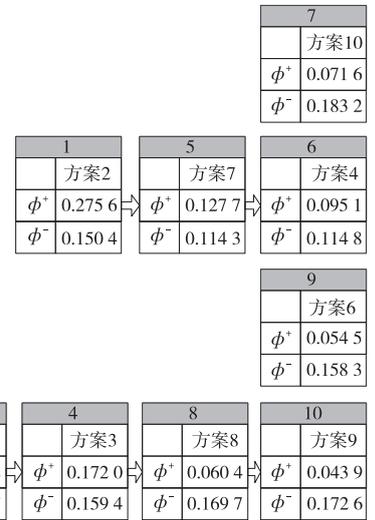


图 2 部分排序结果图(PROMETHEE I)

Fig. 2 PROMETHEE I partial ranking

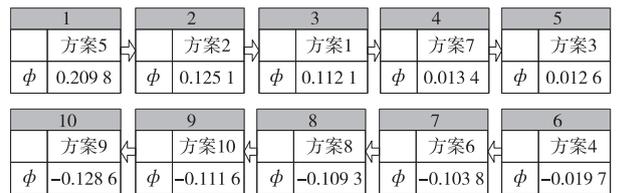


图 3 完全排序结果图(PROMETHEE II)

Fig. 3 PROMETHEE II complete rankings

PROMETHEE I 算法从局部对重构方案进行评估,决策者可以从方案的优势或者劣势的大小对方案进行筛选,做出决策,即当决策者看重方案的优势时,可以选择优势评估值最大的方案 2;当决策者看重方案的劣势时,可以选择劣势评估值最小的方案 5. PROMETHEE II 算法从整体对重构方案进行评估,兼顾了方案的优劣势,选择优势较大、劣势

较小的方案. 综上, 方案 2 虽然优势值最大, 但是劣势值也较大, 是假优方案; 而方案 5 的优势值虽然不是最大(排在第 2), 但是劣势值最小, 利用完全排序方法将方案 5 选为满意方案.

## 4 结束语

文中提出一种基于 RMS 关键特征偏好排序的重构方案评估方法. 通过实验表明, 以关键特征作为评估指标, 从本质上反映了 RMS 的特性, 保证了评估的有效性, 通过对评估指标建立数学模型, 实现从定性的主观评判转化为定量的客观评判. PROMETHEE 评估方法的应用, 可以实现从部分和总体两方面分析方案的优劣势, 解决了某些优势较大、劣势也比较明显的重构方案排序困难的问题, 剔除了假优方案.

### 参考文献:

- [1] Koren Y, Heisel U, Jovan F, et al. Reconfigurable manufacturing systems[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1999, 48(2): 527 - 540.
- [2] Koren Y. The rapid responsiveness of RMS [J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(23 - 24): 6817 - 6827.
- [3] 武志军, 宁汝新, 王爱民. 可重构制造系统布局规划方案的灰色模糊综合评价方法[J]. 中国机械工程, 2007, 18(19): 2313 - 2318.  
Wu Zhijun, Ning Ruxin, Wang Aimin. Grey fuzzy synthetically evaluation method for RMS layout planning [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(19): 2313 - 2318. (in Chinese)
- [4] 窦建平, 戴先中, 孟正大. 基于混合层次分析法的可重构制造系统重构方案选择[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(7): 1360 - 1366.  
Dou Jianping, Dai Xianzhong, Meng Zhengda. Configuration selection of reconfigurable manufacturing system based on hybrid analytical hierarchy process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(7): 1360 - 1366. (in Chinese)
- [5] Goyal K K, Jain P K, Jain M. Optimal configuration selection for reconfigurable manufacturing system using NSGA II and TOPSIS [J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(15): 4175 - 4191.
- [6] Rehman A U, Subash B A. Evaluation of reconfigured manufacturing systems: an AHP framework [J]. International Journal of Productivity and Quality Management, 2009, 4(2): 228 - 246.
- [7] Saxena K L, Jain P K. A model and optimization approach for reconfigurable manufacturing system configuration design[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(12): 3359 - 3381.
- [8] Brans J P, Vincke P. A preference ranking organization method[J]. Management Science, 1985, 31(6): 647 - 656.

(责任编辑: 孙竹凤)