

含硫天然气脱硫净化装置模块化设计

杨黎鹏¹, 李维国²

(1. 中国石化石油工程设计有限公司, 山东东营 257026; 2. 中国石油大学(华东)理学院, 山东青岛 266580)

摘要:针对含硫天然气脱硫净化问题,提出一种基于功能-几何相关性-接口的产品概念设计过程模型,根据此模型为天然气脱硫净化装置设备间的相关度 r_{ij}^k 赋值,由层次分析法计算设备间功能、几何相关性、接口的权值 $w_k(k=1,2,3)$,并用图分割法为其生成模块划分方案。将单项和综合指标评价相结合,对划分方案加以评价,选出最佳模块化方案。结果表明:用于含硫天然气脱硫净化装置,可成功生成两种模块化方案;方案1合成权值为0.7639,大于方案2的0.2361。

关键词:工程设计;模块化;图分割;相关度;模块化评价

中图分类号:TH 122 **文献标志码:**A

引用格式:杨黎鹏,李维国.含硫天然气脱硫净化装置模块化设计[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(3):176-182.

YANG Lipeng, LI Weiguo. Modular design of desulfurization and purification equipment of sulfur containing natural gas[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2019,43(3):176-182.

Modular design of desulfurization and purification equipment of sulfur containing natural gas

YANG Lipeng¹, LI Weiguo²

(1. SINOPEC Petroleum Engineering Corporation, Dongying 257026, China;

2. College of Science in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

Abstract:In view of the problem of desulfurization and purification for sulfur-containing natural gas, a model of product conceptual design process was proposed based on the function-geometric correlation-interface. And the correlation degree r_{ij}^k between equipment in desulfurization and purification devices of natural gas can be assigned according to the model. The weights of functions, geometric correlation and interfaces between equipment, $w_k(k=1,2,3)$, could be calculated by analytic hierarchy process, and then the graph segmentation was introduced to achieve module partitions. Through the combination of single index and comprehensive indicators evaluation, the division scheme was evaluated and the best modularization scheme could be selected. It is found that for the desulfurization and purification devices of sulfur-containing natural gas, two modular schemes can be generated: scheme 1 and 2. The combined weight of scheme 1 is 0.7639, which is larger than 0.2361 of scheme 2.

Keywords: engineering design; modularization; graph segmentation; correlation degree; modular evaluation

石油天然气工程系统的模块化不仅可以满足大批量生产,而且具有高效率、低成本的优势。童时中^[1]指出,为了获得最佳效益,从系统角度出发,研究产品或者系统的构成形式,采用分解和组合的方法,

建立模块体系,并运用模块组合成产品或者系统的全过程。Langlios等^[2]提出模块化是一个系统性概念,通常指模块元素分离与重新组合成系统的过程。Sanchez等^[3]提出模块化是将复杂任务分解成相对简

收稿日期:2019-01-03

基金项目:国家重点研发计划资助(2017YFC1405600);中石化集团公司科研项目(SG15-14K);中央高校基本科研业务费专项(15CX02055A)

作者简介:杨黎鹏(1963-),男,高级工程师,硕士,研究方向为油田电力工程设计和数字化工程设计。E-mail: yanglp.osec@sinopec.com。

通信作者:李维国(1964-),男,教授,博士,研究方向为计算数学与力学等。E-mail: liwg@upc.edu.cn。

单的活动,并且各个活动能够同时独立进行,可以有效管理产品和流程的方法。Baldwin 等^[4]认为模块化是将复杂任务分解成相对简单的活动,一个大系统的不同部分大多数是由模块构成的。模块化能降低系统研发的复杂性,降低产品整体研发及制造的复杂度,从而减少研发费用,提高创新效率^[5],模块化能够实现系统的并行开发,还可以实现资源共享。现有的模块划分方法(如启发式模块创建方法、遗传算法^[7]等)对于天然气脱硫净化装置并不适用。启发式模块创建算法只能从功能角度探讨模块的形成方法,不能完全体现出设计需求约束等问题。遗传算法是模拟自然界中生物进化机制的一种迭代算法,黄小侨等曾基于遗传算法对常减压装置进行多目标优化^[6],但该算法需计算其相应的适应函数、相关概率等^[8],过程繁琐。笔者针对天然气脱硫净化装置的实际情况,提出基于功能-几何相关性-接口的产品概念设计过程模型,在计算相关度时提出赋值表,并运用图分割聚类算法^[9]建立一种针对该系统的模块化划分方法。概念设计过程模型突出最主要的划分依据功能相关性,且引入接口这个相关项目,在忽略设备内部行为、状态等复杂因素^[10]的情况下,考虑设备间的能量流、物质流、信息流。

1 基于图分割的天然气处理装置模块化设计

模块化设计是一个复杂的决策过程,它要求决策者从实际需求出发,进行功能分解,原理求解,零

部件构成,装配布局^[11],在此基础上对模块划分结果做出评价。

1.1 产品的子功能-设备序列

天然气处理装置的模块化,主要依据相应的天然气处理装置的工艺流程,通过对其进行分解处理,获得完整的设备序列。之后从中选取所有需要模块化的设备,并通过黑箱法和 IDEF0 方法制成最终的产品子功能-设备序列模型。其中方框表示设备,方框的输入、输出表示该设备与外界的物质、能量、信息交换。在 IDEF0 功能描述方法中,除设备和输入输出外还有支撑、控制、约束条件等。模型见图 1。其中设备序列共 n 个,以设备 A_i 和 A_{i+1} 为例。

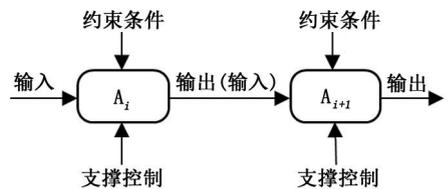


图 1 子功能-设备序列模型部分图

Fig. 1 Partial diagram of sub function-device sequence model

1.2 概念结构设计过程

概念结构设计中的产品模块化主要按功能进行分解,目前模块化中典型的概念设计过程模型有功能-结构模型^[12]、功能-行为-结构模型^[13]、功能-原理-结构模型^[14]。

对于天然气处理装置而言,各设备间的相互关系主要包括功能、几何相关性、接口(表 1),其中功能

表 1 设备间的相关值

Table 1 Related values between devices

相关项目	相关性	相关值 r_{ij}^k	含义
功能	缺一不可	1	设备 A_i, A_j 为完成其父功能存在,而缺一不可
	互相影响	0.5	设备 A_i 为更好地促进(抑制)设备 A_j 而存在
	无	0	设备 A_i, A_j 不相关
几何相关性	极强	1	永久连接不可拆分
	较强	0.8	固定连接难以拆分
	适中	0.6	固定连接容易拆分
	一般	0.4	移动连接不可拆分
	较弱	0.2	移动连接可以拆分
	无	0	没有连接
接口	物质、能量、信息	1	设备间存在物质、能量、信息联系
	物质、能量	0.919	设备间存在物质、能量联系
	物质、信息	0.812	设备间存在物质、信息联系
	能量、信息	0.269	设备间存在能量、信息联系
	物质	0.731	设备间存在物质联系
	能量	0.188	设备间存在能量联系
	信息	0.081	设备间存在信息联系
	无	0	设备间无联系

是指完成一项功能时设备间的相互作用,几何相关性是指设备间的连接状态,设备接口主要包括设备间的物质流、能量流、信息流联系。若设备 A_i 和 A_j 间存在一定的功能、几何相关性、接口的关系,则设备 A_i 和 A_j 具有相关性,其相关值 $r_{ij}^k(k=1,2,3;i,j=1,2,\dots,n)$ 根据表 1 进行赋值,其中 k 代表功能、几何相关性、接口 3 个相关项目。

设备间相关值数据通过模糊分级给出,特别地,决策人员根据比例标度表(表 2)给出相关设备间的物质、能量、信息成对比矩阵(表 3),模块化过程中所涉及的所有成对比矩阵在满足一致性检验的情况下,均可以进行适当调整,再由层次分析法得出设备间的物质、能量、信息的权值,若设备间同时存在物质、能量、信息或者两者以上的联系,则权值相加即可(表 1 接口部分中相应的权值)。

表 2 比例标度
Table 2 Scaling table

因素比因素	量化值
同等重要	1
稍微重要	3
较强重要	5
强烈重要	7
极端重要	9
两相邻判断的中间值	2,4,6,8

表 3 设备间物质、能量、信息的成对比矩阵及权值

Table 3 Pairwise comparison matrix of material, energy and information between devices and weights

成对比矩阵	物质	能量	信息	权值
物质	1	5	7	0.731
能量	1/5	1	3	0.188
信息	1/7	1/3	1	0.081

1.3 图分割模块划分

为表达设备间的相关性引入相关度的概念:

设备 A_i 和 $A_j(i,j=1,2,\dots,n)$ 间的相关度用 r_{ij} 表示。相关度有如下性质: $r_{ii}=1, r_{ij}=r_{ji}$, 则设备 A_i 和 $A_j(i,j=1,2,\dots,n)$ 之间的相关值 r_{ij}^k 与相关度 r_{ij} 的关系如下:

$$r_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^m w_k r_{ij}^k, & i \neq j; \\ 1, & i = j. \end{cases} \quad i, j \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (1)$$

式中, m 为表 1 相关项目的个数, $m=3$; w_k 为第 k 种相关项目的权值系数; r_{ij}^k 为设备 A_i 和 A_j 间第 k 种相关项目的相关值; n 为子功能-设备序列模型中包含的设备个数。

采用无向图 G 来表示产品子功能-设备序列模

型中设备之间的关系,图的结点 x_i 表示设备,图的边 e_{ij} 表示设备 A_i 和 A_j 间的联系,则有

$$G = [X, E], X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, E = \{e_{ij} = (x_i, x_j) | x_i, x_j \in X\}, i, j \in \{1, 2, \dots, n\}.$$

步骤 1: 确定无向图 G 的边 E 的权值 $w(e) = r_{ij}$ 。若对于任意的 $j \in \{1, 2, \dots, n\}, r_{ij} = 0$, 则结点 x_i 被舍掉。

步骤 2: 断开相关度 r_{ij} 较小的边。给定相关度 r_{ij} 的阈值 r_0 , 从无向图 G 中移出权值小于 r_0 的边, 形成结点集 X 上的图 $G': G' = \{(X, E') | E' = E - \{e' | w(e') < r_0\}\}$ 。

步骤 3: 确定聚类。根据步骤 2, 断开连接后, 相互连通的结点构成一个聚类, 即可以得到模块化方案。

1.4 模块化方案评价

运用单项指标评价与综合指标评价^[15]的方法作为天然气处理装置模块化方案的评价方法。其中, 单项指标评价要求模块化方案要满足每一项必需的准则, 否则该方案就被舍弃, 其他准则不必再检验。其目的是排除不可行的方案, 以减轻综合指标评价的工作量。在此基础上用层次分析法进行综合评价选出最佳的方案。层次分析法是一种定性定量分析相结合的多目标决策综合分析方法, 其步骤如下:

(1) 构建实际层次结构模型, 分为目标层 A , 准则层 B , 方案层 C ;

(2) 根据表 2 得到成对比矩阵 $A-B$, 利用层次分析法得到准则层的权值 $\omega_j(j=1, 2, \dots, J, \text{表示选择的准则层的准则序号})$;

(3) 根据表 2 得到成对比矩阵 $B(j)-C, j=1, 2, \dots, J$, 利用层次分析法得到各个方案对于各个准则层的权值 $p_{ij}(i=1, \dots, I, \text{表示选择的方案序号})$;

(4) 比较各个可行性方案 $C(i)$ 的合成权值 $k_i = \sum_{j=1}^J p_{ij} \omega_j, k_i$ 越大, 相应方案越优。

2 天然气脱硫净化装置模块化实现

本案例为油气处理站场中的天然气脱硫净化装置模块化设计, 其总体功能为天然气井口采集的含硫天然气进行脱硫净化处理, 保证外输天然气的含量和水露点指标满足国家一类天然气要求, 并得到副产品硫磺。装置涵盖的工艺流程包括井口天然气加热、节流、降压等配套设备, 其中需要模块化的设备共 91 个(表 4)。

表 4 设备名称及设备位号

Table 4 Device name and corresponding device tag

序号	设备位号	设备名称	序号	设备位号	设备名称
1	V-202	缓蚀剂储罐	47	E-501	真空循环液冷却器
2	P-201	缓蚀剂加注泵	48	V-502	滤液收集罐
3	P-202	插桶泵	49	P-503	滤液泵
4	V-203	甲醇储罐	50	TN-501	反冲液收集罐
5	P-203	甲醇加注泵	51	P-501	反冲液泵
6	P-204	外输管线甲醇注入泵	52	BL-501	尾气引风机
7	H-201	水套加热炉	53	V-503	尾气吸附罐
8	V-201	酸气分离器	54	PD-501	皮带输送机
9	T-301	吸收塔	55	T-502	熔硫釜
10	V-301	净化气分液罐	56	TN-508	液硫池
11	V-303	消泡剂注射罐	57	P-501	液硫提升泵
12	V-302	闪蒸罐	58	G-901	蒸汽锅炉
13	E-301	溶液冷却器	59	Z-1001	脱盐水撬
14	T-201	污水汽提塔	60	V-1001	脱盐水储罐
15	E-801	湿净化气冷却器	61	P-1001	高压水泵
16	V-801	净化气分离器	62	V-601	火炬分液罐
17	FT-801	聚结过滤分离器	63	FL-601	放空火炬
18	T-801	三甘醇吸收塔	64	TN-201	污水罐
19	E-802	气体-贫三甘醇换热器	65	V-504	酸气分液罐
20	V-802	燃料气缓冲罐	66	T-503	脱硫塔
21	V-806	三甘醇闪蒸器	67	AL-501	空冷器
22	FT-802	颗粒过滤器	68	K-601	空压机
23	FT-803	活性炭过滤器	69	V-603	工厂风储罐
24	E-803	重沸器	70	Z-1101	循环冷却水撬
25	T-802	精馏柱	71	FV-201	FV-201
26	V-803	三甘醇缓冲罐	72	LV-202	LV-202
27	V-805	凝液罐	73	KV-301	KV-301
28	E-804	贫富液换热器	74	KV-302	KV-302
29	AC-801	泵前冷却盘管	75	PV-301	PV-301
30	P-801	甘醇泵	76	ESDV-301	ESDV-301
31	T-401	一级氧化塔	77	LV-302	LV-302
32	T-402	二级氧化塔	78	LV-303	LV-303
33	P-402	一级硫浆泵	79	ESDV-302	ESDV-302
34	P-403	二级硫浆泵	80	LV-504	LV-504
35	P-401	喷射泵	81	LV-801	LV-801
36	P-404	贫液循环泵	82	PV-801	PV-801
37	BL-401	罗茨鼓风机	83	PV-802	PV-802
38	E-401	空气冷却器	84	BDV-801	BDV-801
39	V-402	除臭吸附罐	85	ESDV-801	ESDV-801
40	V-401	消泡剂加注罐	86	FV-403A	FV-403A
41	V-401	超重力氧化器	87	KV-401A	KV-401A
42	BL-402	超重力配套鼓风机	88	KV-402A	KV-402A
43	V-404	超重力配套除臭吸附罐	89	LV-501	LV-501
44	FT-501	真空过滤机	90	LV-502	LV-502
45	P-502	水环真空泵	91	LV-503	LV-503
46	V-501	气液分离器			

以此建立产品子功能-设备序列模型(此处以设备 1 和设备 2 为例,图 2)。

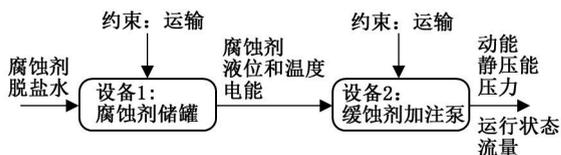


图 2 设备 1 和设备 2 的模型

Fig. 2 Model diagram of device 1 and 2

根据决策人员提供的设备间有关功能、几何相

关性、接口的成对比矩阵(表 5),由层次分析法得出设备间功能、几何相关性、接口的权值。

表 5 设备间功能、几何相关性、接口的成对比矩阵及权值

Table 5 Pairwise comparison matrix of functionality, geometric correlation and interface between devices and weights

成对比矩阵	功能	几何相关性	接口	权值
功能	1	6	8	0.761
几何相关性	1/6	1	3	0.166
接口	1/8	1/3	1	0.073

首先根据表2得到设备两两之间关于功能的相关值矩阵 $M_1 = (r_{ij}^1)_{91 \times 91}$, 关于几何相关性的相关值矩阵 $M_2 = (r_{ij}^2)_{91 \times 91}$, 关于接口的相关值矩阵 $M_3 = (r_{ij}^3)_{91 \times 91}$ 。由式(1)得设备两两之间相关度矩阵 $M = (r_{ij})_{91 \times 91}$, 其无向图 G 见图3。

根据各设备之间相关度矩阵 M , 分别选择方案1为 $r_0 = 0.5138$ 和方案2为 $r_0 = 0.506031$, 得到划分情况如图4和图5。模块数(设备数大于等于2的模块)分别为13和4。

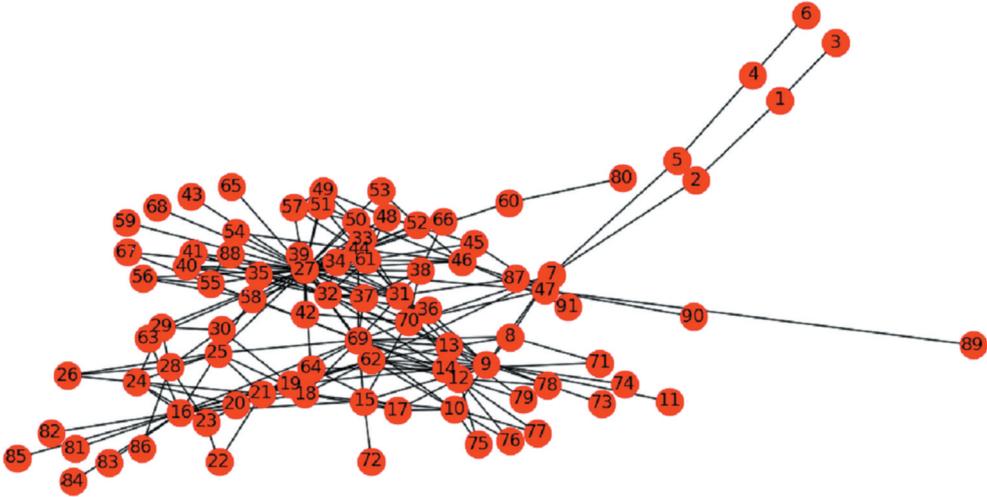


图3 子功能-设备序列相关性无向图

Fig.3 Undirected graph of correlation of sub function-device sequences

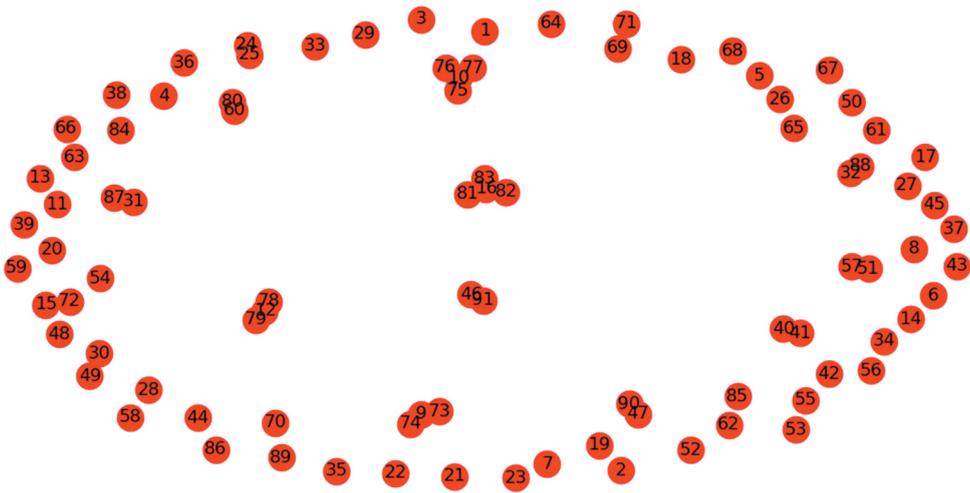


图4 $r_0 = 0.5138$ 时无向图的分割 G'_1

Fig.4 Segmentation G'_1 from undirected graph when $r_0 = 0.5138$

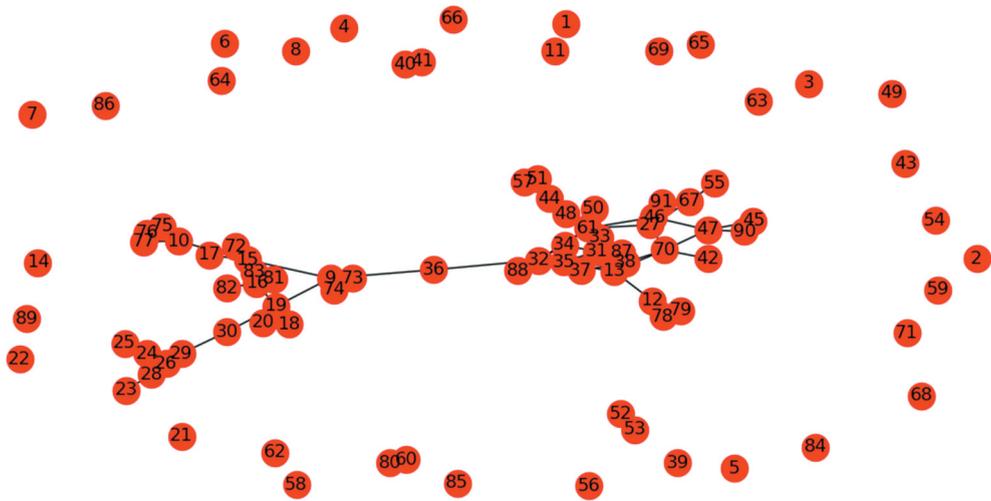


图 5 $r_0=0.506031$ 时无向图的分割 G'_2

Fig. 5 Segmentation G'_2 from undirected graph when $r_0=0.506031$

对上述两种方案展开评价,首先确定实际层次结构模型(表 6)。

表 6 层次分析法结构

Table 6 Structure table of analytic hierarchy process

目标层 A	选择最优方案 A			
准则层 B	经济性 B_1	运输难度 B_2	建造难度 B_3	复用性 B_4
方案层 C	方案 1: C_1 方案 2: C_2			

其次,利用层次分析法得到准则层的权值 ω_j (表 7)和两个方案对于各个准则的权值 p_{ij} (表 8 ~ 表 11), $i=1,2$ 表示方案序号, $j=1,2,3,4$, 表示准则层序号。

表 7 成对比矩阵 A-B 及准则层权值 ω_j

Table 7 Pairwise comparison matrix A-B and weights of criteria layer ω_j

成对比矩阵	经济性 B_1	运输难度 B_2	建造难度 B_3	复用性 B_4	权值
经济性 B_1	1	3	5	7	0.5571
运输难度 B_2	1/3	1	1/5	1/7	0.0603
建造难度 B_3	1/5	5	1	5	0.2521
复用性 B_4	1/7	7	1/5	1	0.1306

表 8 成对比矩阵 B_1-C 及权值 p_{i1}

Table 8 Pairwise comparison matrix B_1-C and weights p_{i1}

经济性 B_1	方案 1	方案 2	权值
方案 1	1	3	0.75
方案 2	1/3	1	0.25

表 9 成对比矩阵 B_2-C 及权值 p_{i2}

Table 9 Pairwise comparison matrix B_2-C and weights p_{i2}

运输难度 B_2	方案 1	方案 2	权值
方案 1	1	4	0.80
方案 2	1/4	1	0.20

表 10 成对比矩阵 B_3-C 及权值 p_{i3}

Table 10 Pairwise comparison matrix B_3-C and weights p_{i3}

建造难度 B_3	方案 1	方案 2	权值
方案 1	1	3	0.75
方案 2	1/3	1	0.25

表 11 成对比矩阵 B_4-C 及权值 p_{i4}

Table 11 Pairwise comparison matrix B_4-C and weights p_{i4}

复用性 B_4	方案 1	方案 2	权值
方案 1	1	5	0.83
方案 2	1/5	1	0.17

根据上述数据计算各个方案 $C(i)$ 的合成权值 k_i , 根据表 12 可知方案 1 的 k_1 值较大, 优先选择方案 1。

表 12 C 层总排序

Table 12 Total ordering of layer C

C	B				$k_i = \sum_{j=1}^J p_{ij}\omega_j$
	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	
	p_{i1}	p_{i2}	p_{i3}	p_{i4}	
方案 1	0.75	0.80	0.75	0.83	0.7639
方案 2	0.25	0.20	0.25	0.17	0.2361

3 结束语

为天然气脱硫净化装置设备间的相关度 r_{ij}^k 赋值, 由层次分析法计算设备间功能、几何相关性、接口的权值 w_k ($k=1,2,3$), 并用图分割法为其生成模块划分方案。将单项和综合指标评价相结合, 对划分方案加以评价, 选出最佳模块化方案。结果表明方案 1 合成权值为 0.7639, 大于方案 2 的 0.2361, 方案 1 优于方案 2。

参考文献:

- [1] 童时中. 模块化原理设计方法及应用[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 1-399.
- [2] LANGLOIS R N, ROBERTSON P. Networks and innovation in a modular system; lessons from the microcomputer and stereo component industries [J]. *Research Policy*, 1992, 21(4): 297-313.
- [3] SANDERSON S, UZUMERI M. Managing product families: the case of the Sony Walkman [J]. *Research Policy*, 1995, 24(5): 761-782.
- [4] BALDWIN C Y, CLARK B. Managing in an age of modularity [J]. *Harvard Business Review*, 1997, 75(5): 84-93.
- [5] 卡尔斯·鲍德温, 金·克拉克, 克拉克, 等. 设计规则: 模块化的力量[M]. 中信出版社, 2006: 1-411.
- [6] 黄小侨, 李娜, 李军, 等. 基于遗传算法的常减压装置多目标优化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(2): 163-168.
HUANG Xiaoqiao, LI Na, LI Jun, et al. Multi-objective optimization of crude and vacuum distillation system based on genetic algorithm [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016, 40(2): 163-168.
- [7] 王日君, 张进生, 葛培琪, 等. 模块化设计中模块划分方法的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2008(7): 17-21.
WANG Rijun, ZHANG Jinsheng, GE Peiqi, et al. Research on methodology of module division in modular design [J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 2008(7): 17-21.
- [8] 梁永图, 周星远, 颜筱函, 等. 大型成品油管道调度的开泵方案优化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(5): 130-138.
LIANG Yongtu, ZHOU Xingyuan, YAN Xiaohan, et al. Optimization of pump start-up schemes for large-scale multiproduct pipelines [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(5): 130-138.
- [9] 龚京忠, 邱静, 李国喜. 基于图分割的机械系统概念模块划分[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(3): 103-108.
GONG Jingzhong, QIU Jing, LI Guoxi. Conceptual module identifying for mechanism based on graph partitioning [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2007, 29(3): 103-108.
- [10] 张永学, 于丹丹, 胡承云, 等. 基于响应面法的油田蓄热式加热炉燃烧器优化设计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 156-162.
ZHANG Yongxue, YU Dandan, HU Chengyun, et al. Optimization design of oilfield regenerative heating furnace burner based on response surface method [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(2): 156-162.
- [11] STONE R B, WOOD K, CRAWFORD R H. A heuristic method for identifying modules for product architectures [J]. *Design Studies*, 2000, 21(1): 5-31.
- [12] 张建明, 魏小鹏, 张德珍. 产品概念设计的研究现状及其发展方向[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(8): 613-620.
ZHANG Jianming, WEI Xiaopeng, ZHANG Dezhen. Research status and development direction of product conceptual design [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2003, 9(8): 613-620.
- [13] UMEDA Y. Supporting conceptual design based on FBS modeler [J]. *Ai Edam Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, 2009, 10(4): 275-288.
- [14] 史冬岩. 基于功能的概念设计求解过程研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
SHI Dongyan. Research on solution process of conceptual design based on function [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [15] 凌震宇, 周建钊. 模块划分方案的评价方法研究[J]. 工程机械, 2005(5): 24-26.
LING Zhenyu, ZHOU Jianzhao. Research on evaluation method of module partition scheme [J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2005(5): 24-26.

(编辑 刘为清)