doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.048

考虑零部件间间接连接关系的模块划分方法

王奇瑞[1]　毛罕平[1,2]　李青林[1]

(1.江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室,镇江 212013;
2.江苏省农业装备与智能化高技术研究重点实验室,镇江 212013)

摘要:模块化的产品架构可以缩短研发周期、提高研发效率和产品可靠性,有效解决大规模生产和多样化客户需求之间的矛盾。针对现有模块划分方法常忽略零部件间间接连接关系对模块划分的影响,造成重要设计依赖信息遗失的问题,建立了基于电容类比法的节点相似度模型,量化了零部件间直接和间接连接关系共同作用的效果,实现了模块的精确划分。首先,采用区间直觉模糊集分析了零部件之间的综合关联关系,将综合关联自相关矩阵映射为复杂网络;然后,建立了基于电容类比法的节点相似度模型,并以该相似度模型为中心度测度,提出了一种网络层次聚类(Network hierarchical clustering,NHC)算法,实现了复杂农机装备的模块精确划分;最后,对联合收获机脱粒装置进行模块划分,验证了 NHC 算法的有效性。采用 NHC 算法获得的划分方案的平均模块度比改进的 GN 算法提高了 24.6%,获得的产品结构树比改进的 GN 算法更合理。

关键词:复杂农机装备;模块划分;等效电容;网络层次聚类

中图分类号:TP391.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)09-0418-09　　**OSID**:

Module Partition Method Considering Influence of Indirect Connection between Components

WANG Qirui[1]　MAO Hanping[1,2]　LI Qinglin[1]

(1. *Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology*, *Ministry of Education*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*
2. *High-tech Key Laboratory of Agricultural Equipment and Intelligentization of Jiangsu Province*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: Agricultural machinery equipment research and development usually has problems such as long research and development cycle, low efficiency and poor product reliability. The modular product architecture can shorten the research and development cycle, improve research and development efficiency and product reliability, and effectively solve the contradiction between large-scale production and diverse customer needs. To solve the problem that the existing module division methods ignored the influence of indirect connection between components on the module division, which resulted in the loss of important design dependency information, a node similarity model was established based on capacitance analogy method, the joint effect of direct and indirect connection between components was quantified, and the accurate module division was realized. Firstly, the interval valued intuitionistic fuzzy set was used to analyze the comprehensive correlation between components, and the comprehensive correlation autocorrelation matrix was mapped to a complex network. Then, a node similarity model based on the capacitance analogy method was established, and the similarity model was used as a central measure to propose a network hierarchical clustering (NHC) algorithm, which realized the discovery of complex network communities. Finally, the effectiveness of the NHC algorithm was verified by dividing the threshing device module of the combine harvester. The average modularity of the division scheme obtained by the NHC algorithm was 24.6% higher than that of the improved GN algorithm, and it was more reasonable to obtain the product structure tree than the improved GN algorithm.

Key words: complex agricultural machinery equipment; module division; equivalent capacitance; network hierarchical clustering

收稿日期:2020-06-10　修回日期:2020-07-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0700100)

作者简介:王奇瑞(1983—),男,博士生,主要从事农业装备数字化设计与仿真技术研究,E-mail:wangqirui83@126.com

通信作者:毛罕平(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与设施农业环境控制技术研究,E-mail:maohp@ujs.edu.cn

0　引言

我国地域差异大、农作物种类和种植模式多样，农机装备具有多功能、小批量、定制化及多样化的用户需求特征，农机装备普遍存在研发周期长、效率低、产品可靠性差等问题[1]。模块化的产品架构可以缩短研发周期、提高研发效率和产品可靠性，有效解决大规模生产和多样化客户需求之间的矛盾[2]，将其用于复杂农机装备的研发，不会因产品种类的增加而增加研发和制造成本。模块划分是模块化产品设计的基础。目前，模块划分的方法有很多，如模块化功能展开算法[3]、设计结构矩阵算法[4-6]、功能结构启发式算法[7]、功能相似性启发式算法[8]和模糊聚类算法等[9]。这些模块划分方法都是以零部件间的直接连接关系为原始驱动力，零部件之间的间接连接关系常常被忽略。然而，在许多情况下，零部件之间的间接连接关系同样包含重要的设计依赖信息[10]。JUNG 等[11]和 ASIKOGLU 等[12]提出的电阻类比法可以量化零部件之间的间接连接关系，从而影响许多与产品架构相关的重要决策。但是，电阻类比法没有给出显性的数学模型，不适合分析零部件较多的复杂农机装备。在产品设计过程中，评估零部件间直接和间接共同作用效果是难点。本文提出一种网络层次聚类（Network hierarchical clustering，NHC）算法，采用基于等效电容法的节点相似度模型，将零部件之间的直接和间接连接关系应用到模块划分过程，以期实现复杂农机装备模块的精确划分。

1　基于区间直觉模糊的综合关联强度

1.1　区间直觉模糊集

零部件之间的功能和物理关系信息是用于识别模块的主要依据[13-14]，因此本文将复杂农机装备零部件之间的功能和物理关系信息作为模块划分的原始驱动力。零部件间的关联关系分析主要依赖于工程师的经验，从而导致主观不确定性的存在。区间直觉模糊集用来量化复杂农机装备零部件之间的关联关系，可以减少决策信息的主观不确定性。IVIFS 理论是由 ATANASSOV 和 GARGOV 在直觉模糊集理论的基础上提出的。IVIFS 是一种处理不确定、复杂信息的数学工具[15]，可以表达和减少决策信息的不确定性和主观性[16-19]。IVIFS 使用区间表示隶属度、非隶属度和犹豫度，增强了信息表达的不确定性能力，有效地处理数据的不确定性和模糊性。

IVIFS[19]可以统一定义为

$$A=\{\langle x,M_A(x),N_A(x),H_A(x)\rangle \mid x\in X\} \tag{1}$$

其中　$M_A(x)=[\underline{\mu}_A(x),\overline{\mu}_A(x)]\subseteq[0,1]$

$N_A(x)=[\underline{v}_A(x),\overline{v}_A(x)]\subseteq[0,1]$

$\overline{\mu}_A(x)+\overline{v}_A(x)\leqslant 1$

式中　$M_A(x)$——x 到 A 隶属度

$N_A(x)$——x 到 A 非隶属度

$\underline{\mu}_A(x)$——隶属度区间下限

$v_A(x)$——非隶属度区间下限

$\overline{\mu}_A(x)$——隶属度区间上限

$\overline{v}_A(x)$——非隶属度区间上限

对于任意一个元素 $x\in X$，x 到 A 的区间犹豫度为

$$H_A(x)=[\underline{\pi}_A(x),\overline{\pi}_A(x)] \tag{2}$$

其中

$$\begin{cases}\underline{\pi}_A(x)=1-\overline{\mu}_A(x)-\overline{v}_A(x)\\ \overline{\pi}_A(x)=1-\underline{\mu}_A(x)-\underline{v}_A(x)\end{cases} \tag{3}$$

$A_j=\langle[\underline{\mu}_j,\overline{\mu}_j],[\underline{v}_j,\overline{v}_j]\rangle(j=1,2,\cdots,n)$ 是区间直觉模糊集。区间直觉模糊集的加权集算子[20]定义为

$$g_\omega^A(A_1,A_2,\cdots,A_n)=\sum_{j=1}^{n}\omega_jA_j=\left\langle\left[1-\prod_{j=1}^{n}(1-\underline{\mu}_j)^{\omega_j},1-\prod_{j=1}^{n}(1-\overline{\mu}_j)^{\omega_j}\right],\left[\prod_{j=1}^{n}\underline{v}_j^{\omega_j},\prod_{j=1}^{n}\overline{v}_j^{\omega_j}\right]\right\rangle \tag{4}$$

其中　$\sum_{j=1}^{n}\omega_j=1$

式中　ω_j——A_j 的权重，$\omega_j\in[0,1]$

区间直觉模糊值的函数定义[21]为

$$L_A(x)=\frac{1}{2}\left[\frac{\underline{\mu}_A(x)+\overline{\mu}_A(x)-\underline{v}_A(x)(1-\underline{\mu}_A(x))-\overline{v}_A(x)(1-\overline{\mu}_A(x))}{2}+1\right] \tag{5}$$

1.2　零部件综合关联强度计算

（1）功能关联强度

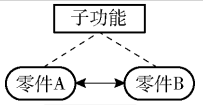
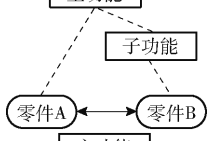
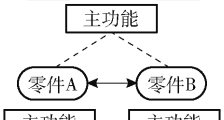
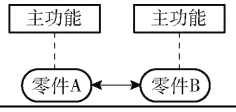
复杂农机装备子功能的优化，有助于实现产品的整体性能提升[22]。因此，需将同一子功能的所有零部件聚合到一个模块，以帮助子功能优化。表 1 给出了 2 个零部件间不同功能关联强度 IVIFS 相应的区间值，语言变量的关联强度分为 4 个层次：强、中、弱和无。

利用表 1 的评价标准对零部件的功能关联强度进行评价，得到功能关联强度的自相关矩阵[16]为

$$[R^f(A,B)]_{n\times n}=\begin{bmatrix}R^f(1,1)&R^f(1,2)&\cdots&R^f(1,n)\\R^f(2,1)&R^f(2,2)&\cdots&R^f(2,n)\\\vdots&\vdots&&\vdots\\R^f(n,1)&R^f(n,2)&\cdots&R^f(n,n)\end{bmatrix} \tag{6}$$

表 1 2 个零部件间的功能关联强度

Tab. 1 Functional correlation strength between two parts

强度	区间值$\langle[M_{AB}^{f}(x),N_{AB}^{f}(x)]\rangle$	描述	示意简图
强	$\langle[0.90,0.95],[0.02,0.05]\rangle$	2 个零件同时对同一个子功能有贡献	
中	$\langle[0.50,0.55],[0.40,0.45]\rangle$	一个对主功能有贡献,另一个对主功能下的子功能有贡献	
弱	$\langle[0.02,0.05],[0.90,0.95]\rangle$	2 个零件同时对同一个主功能有贡献	
无	$\langle[0,0],[1,1]\rangle$	2 个零件对 2 个不同主要功能有贡献	

其中

$$R^{f}(A,B)=\begin{cases}\langle[M_{AB}^{f}(x),N_{AB}^{f}(x)]\rangle & (A\neq B)\\ 0 & (A=B)\end{cases} \tag{7}$$

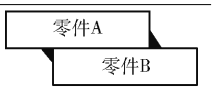
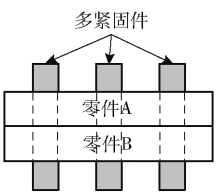
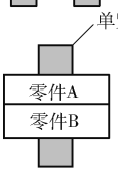
式中 $R^{f}(A,B)$——零件 A 和零件 B 之间的功能关联强度

(2)物理结构关联强度

在物理结构方面,为了提高零件布局的合理性和产品的拆装效率,需要保证模块内零件之间的物理连接关系紧密,模块间连接松散。表 2 给出相应 IVIFS 区间值。

表 2 2 个零部件间的物理结构关联强度

Tab. 2 Physical structure interaction strength between two parts

强度	区间值$\langle[M_{AB}^{p}(x),N_{AB}^{p}(x)]\rangle$	描述	示意简图
强	$\langle[0.90,0.95],[0.02,0.05]\rangle$	焊接	
中	$\langle[0.50,0.55],[0.40,0.45]\rangle$	多固定连接	
弱	$\langle[0.02,0.05],[0.90,0.95]\rangle$	单固定连接	
无	$\langle[0,0],[1,1]\rangle$	无	

利用表 2 的评价准则对零件的物理结构关联强度进行评价,得到物理结构关联强度的自相关矩阵[16]为

$$[R^{p}(A,B)]_{n\times n}=\begin{bmatrix}R^{p}(1,1) & R^{p}(1,2) & \cdots & R^{p}(1,n)\\ R^{p}(2,1) & R^{p}(2,2) & \cdots & R^{p}(2,n)\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ R^{p}(n,1) & R^{p}(n,2) & \cdots & R^{p}(n,n)\end{bmatrix} \tag{8}$$

其中

$$R^{p}(A,B)=\begin{cases}\langle[M_{AB}^{p}(x),N_{AB}^{p}(x)]\rangle & (A\neq B)\\ 0 & (A=B)\end{cases} \tag{9}$$

式中 $R^{p}(A,B)$——零件 A 和零件 B 之间的物理关联强度

(3)零部件间综合关联强度

零件 A 和零件 B 的关联强度加权集算子

$$\begin{aligned}R(A,B)&=w_{f}R^{f}(A,B)+w_{p}R^{p}(A,B)=\\ &\langle[1-(1-\underline{\mu}_{AB}^{f})^{w_{f}}(1-\underline{\mu}_{AB}^{p})^{w_{p}},\\ &1-(1-\overline{\mu}_{AB}^{f})^{w_{f}}(1-\overline{\mu}_{AB}^{p})^{w_{p}}],\\ &[(\underline{v}_{AB}^{f})^{w_{f}}(\underline{v}_{AB}^{p})^{w_{p}},(\overline{v}_{AB}^{f})^{w_{f}}(\overline{v}_{AB}^{p})^{w_{p}}]\rangle\end{aligned} \tag{10}$$

式中 w_f、w_p——功能和物理关联强度的权重

零部件之间综合关联强度计算为

$$L(R(A,B))=\frac{1}{2}\left[\frac{\underline{\mu}_{AB}+\overline{\mu}_{AB}-\underline{v}_{AB}(1-\underline{\mu}_{AB})-\overline{v}_{AB}(1-\overline{\mu}_{AB})}{2}+1\right] \tag{11}$$

2 加权复杂网络模型

2.1 加权复杂网络及其相关属性

加权复杂网络可以用图 $G=(V,E,W)$ 表示。$V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$ 代表网络中节点的集合,$E=\{e_{i1},e_{i2},\cdots,e_{in}\}$ 代表网络中所有边的集合,$W=\{w_{i1},w_{i2},\cdots,w_{in}\}$ 是边权集合,本文所涉及的复杂网络的属性如下:

(1) s_x 是复杂网络中节点强度，表示与 x 相连接的所有边权之和。节点强度可表示为[23-24]

$$s_x = \sum_{i=1}^{n} w_{xi} \tag{12}$$

式中　w_{xi}——与 x 点连接的边权

n——与 x 相连接边数量

(2) 复杂网络的路径是从一个节点到另一个节点所经过的边。路径长度是路径中边的数量。路径长度计算公式为[23-24]

$$L = \sum_{x,y}^{p} e_{xy} \tag{13}$$

式中　e_{xy}——连接矩阵 $\boldsymbol{E}$ 的组成元素

p——路径中边数量

(3) 复杂网络中的社区是指一系列紧密相连的节点集合，它们具有社区内节点紧密相连、社区间连接松散的特点。复杂网络模块度是衡量社区结构划分的定量指标。权重复杂网络模块度可表示为

$$Q = \frac{1}{2M} \sum_i \sum_j \left(w_{ij} - \frac{s_i s_j}{2M} \right) \delta(C_i, C_j) \tag{14}$$

式中　Q——权重复杂网络模块度

M——复杂网络边权之和

s_i、s_j——节点 i、j 强度

C_i、C_j——节点 i、j 所在的社区，如 i 和 j 在同一个社区，函数 $\delta(C_i, C_j)$ 值为 1，如不在同一个社区，函数 $\delta(C_i, C_j)$ 值为 0

2.2　农机装备复杂网络建模

假设复杂农机装备由 n 个零件组成，则所有零件视为网路中的节点，用集合 $V = \{v_1, v_2, \cdots, v_n\}$ 表示，其中 v_i 表示零件 i；零件与零件之间直接连接关系，用边集合 $E = \{e_{i1}, e_{i2}, \cdots, e_{in}\}$ 表示，e_{ij} 为 1 时表示零件 i 和零件 j 之间存在直接连接关系，e_{ij} 为 0 时表示零件 i 和零件 j 之间不存在直接连接关系；零件之间的直接连接强度，用边权集合 $W = \{w_{i1}, w_{i2}, \cdots, w_{in}\}$ 表示，w_{ij} 表示零件 i 和零件 j 之间直接连接强度，可以用式(11)计算获得零部件之间的综合关联强度。所以复杂农机装备的网络模型可以定义为 $G_P = (V, E, W)$。图 1 中的 29 个关键零部件及它们之间的直接连接关系分别映射为图 2 所示复杂网络的节点和边，零件间的关联强度用复杂网络中的边权表示。图 1 所示的切纵流脱粒装置可以映射为图 2 所示的网络模型。

3　复杂网络节点相似度模型与 NHC 算法实现

复杂网络提供了许多复杂系统结构的有用抽象[25]。社区发现是研究复杂网络结构的最佳方法。基于相似性原理的层次聚类是社区识别算法中的一种重要方法。根据边是添加到网络中还是从网络中移除，算法分为两大类[26]：凝聚算法[27]和分裂算法[28]。层次聚类可以很好地对复杂网络的核心节点进行分类。

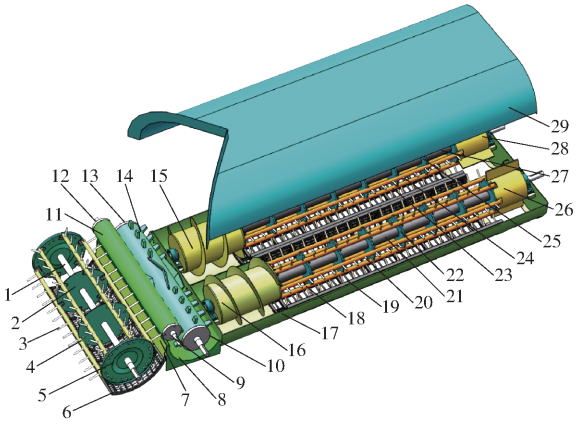


图 1　联合收获机脱粒装置结构图

Fig. 1　Threshing device of combine harvester

1. 切流脱粒滚筒轴　2. 切流脱粒滚筒隔板　3. 切流脱粒滚筒钉齿　4. 钉齿固定杆　5. 切流脱粒滚筒端板　6. 脱粒凹板　7. 连接板　8. 导流凹板　9. 导流滚轮左法兰　10. 轴流喂入滚轮左法兰　11. 导流滚轮　12. 导流滚轮右法兰　13. 轴流喂入滚轮右法兰　14. 轴流喂入滚轮　15. 右螺旋输送轮　16. 左螺旋输送轮　17. 下盖板　18. 左轴流钉齿固定杆　19. 轴流凹板　20. 左轴流钉齿　21. 左轴流脱粒滚筒轴　22. 左轴流脱粒滚筒隔板　23. 右轴流钉齿固定杆　24. 右轴流钉齿　25. 左轴流脱粒滚筒隔板　26. 左排草轮　27. 右轴流脱粒滚筒轴　28. 右排草轮　29. 上盖

3.1　复杂网络节点相似度模型

(1) 电容类比法

类比是研究零部件之间复杂连接关系的有效方法，JUNG 提出的电阻类比法可以有效地量化零件间的间接连接关系。然而，JUNG 提出的方法没有给出显性的数学模型，不利于分析零件较多的系统。本文提出一种电容类比法，将复杂网络中路径的权重计算转换为串联电路电容计算。

如图 3a 所示[24]，复杂网络中任意两点都是一系列长度不同的路径联通。通常可以用路径的权重表示路径对节点连接关系影响。当路径长度为 1 时，路径对节点连接关系的影响等于节点间的边权，即路径的权重等于边权。当路径长度大于 1 时，路径对节点连接关系的影响有如下特点：随着路径的增长，路径对节点连接关系的影响减弱。路径中任意边权增加，路径对节点连接关系的影响增强。路径对节点连接关系的影响小于路径中任意边的权重。这些特点与串联电容电路的电容计算非常相似。因此，可以用串联电容电路的电容计算等效计算复杂网络路径权重。图 3a 的复杂网络可等效为图 3b 所示的电容电路。图 3 中路径 $A—B—C—F$ 的权重可等效为图 4 所示电路的电容，计算式为

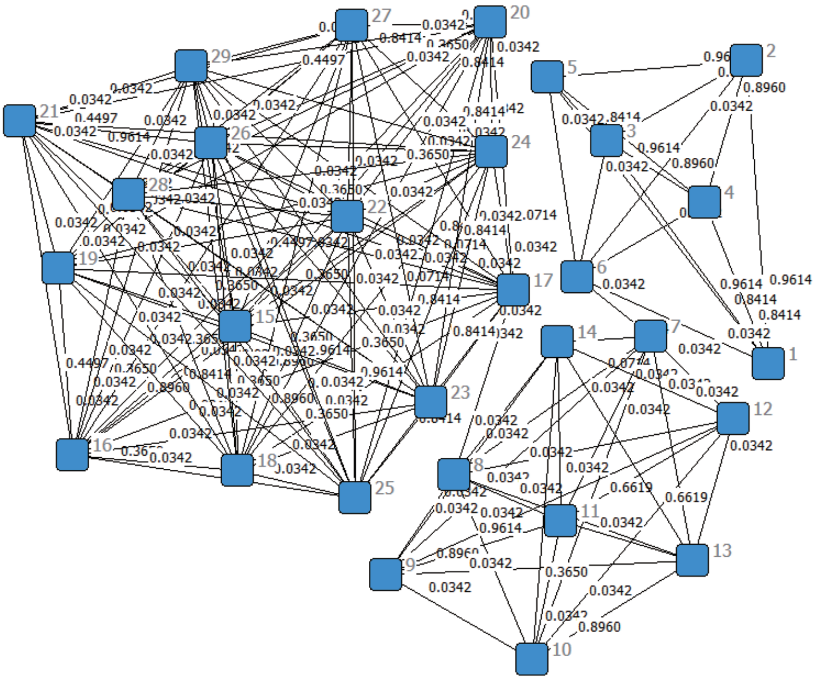


图 2 联合收获机脱粒装置网络模型

Fig. 2 Network model of threshing device of combine harvester

$$w_{AF}^{A-B-C-F}=C_{AF}=\frac{1}{\frac{1}{c_1}+\frac{1}{c_2}+\frac{1}{c_3}}=\frac{1}{\frac{1}{w_{AB}}+\frac{1}{w_{BC}}+\frac{1}{w_{CF}}} \tag{15}$$

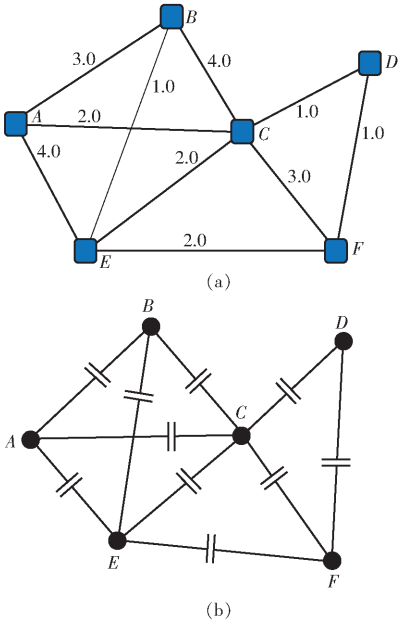


图 3 电容类比电路图

Fig. 3 Diagrams of equivalent capacitance circuit

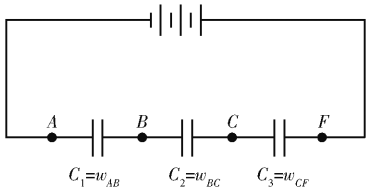


图 4 A 和 F 间的电容

Fig. 4 Capacitance between A and F

(2)节点相似度模型

复杂网络节点相似度为节点间所有路径贡献的累加[29]。考虑到长路径的贡献很小,且计算复杂度随着路径阶数的增加而迅速增加[29],因此本文路径的贡献仅考虑 3 阶及以下路径。本文将路径的贡献定义为路径权重与连接到路径中所有节点的边权重之和的比,复杂网络中长度小于等于 3 的路径贡献可以表示为

$$S_{xy}(1)=\frac{w_{xy}^{x-y}}{\mathrm{sum}(\Gamma(w(x))\cup\Gamma(w(y)))}=\frac{w_{xy}}{\mathrm{sum}(\Gamma(w(x))\cup\Gamma(w(y)))} \tag{16}$$

$$S_{xy}(2)=\sum_{z\in\Gamma(x)\cap\Gamma(y)}\frac{w_{xy}^{x-z-y}}{\mathrm{sum}(\Gamma(w(x))\cup\Gamma(w(y))\cup\Gamma(w(z)))}=\sum_{z\in\Gamma(x)\cap\Gamma(y)}\frac{\frac{1}{\frac{1}{w_{xz}}+\frac{1}{w_{zy}}}}{\mathrm{sum}(\Gamma(w(x))\cup\Gamma(w(y))\cup\Gamma(w(z)))} \tag{17}$$

$$S_{xy}(3)=\sum_{p,q\in l_{x\to y}}\frac{w_{xy}^{x-p-q-y}}{\mathrm{sum}(\Gamma(w(x))\cup\Gamma(w(p))\cup\Gamma(w(q))\cup\Gamma(w(y)))}=\sum_{p,q\in l_{x\to y}}\frac{\frac{1}{\frac{1}{w_{xp}}+\frac{1}{w_{pq}}+\frac{1}{w_{qy}}}}{\mathrm{sum}(\Gamma(w(x))\cup\Gamma(w(p))\cup\Gamma(w(q))\cup\Gamma(w(y)))} \tag{18}$$

式中　$S_{xy}(i)$——节点 x 和 y 之间，长度 $i=1,2,3$ 的路径贡献

$\Gamma(w(i))$——与 i 点相连接的边权的集合，$i\in\{x,y,z,p,q\}$

w_{ij}——i 和 j 之间的边权，$i、j\in\{x,y,z,p,q\}$

零件之间的相似度可定义为

$$S_{xy}=S_{xy}(1)+\Delta \tag{19}$$

其中　$$\Delta=S_{xy}(2)+S_{xy}(3)$$

式中　Δ——间接连接相似度，用于评估零部件间接连接关系

3.2　NHC 算法实现

层次聚类是复杂网络社区发现的一种早期且仍被广泛使用的技术[30]。层次聚类不是一种单一的技术，而是一整套技术，其核心原则为：测量网络中节点之间关联强度。通过对连接最紧密的节点进行分组，可以将网络划分为多个社区。具体的层次聚类方法在所使用的特定强度度量方法和连接节点分组规则方面有所不同。为了实现复杂产品的模块划分，将基于等效电容法的节点相似度模型应用于分裂层次聚类算法，提出的 NHC 算法如图 5 所示。

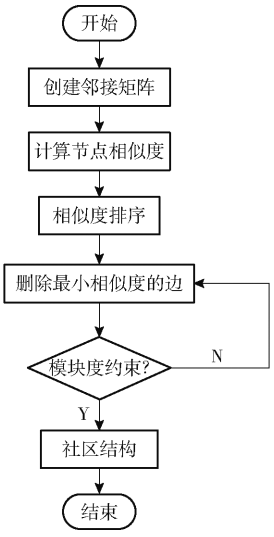


图 5　NHC 算法的求解过程

Fig. 5　Solution procedure of NHC algorithm

NHC 算法步骤如下：

(1)计算任意零件间的综合关联强度，建立复杂产品的无向加权网络。

(2)根据式(19)计算任意两零件之间的相似度。

(3)根据相似度对候选边进行排序。

(4)根据分裂聚类算法的原理，去除相似度较小的边(如果多个边具有相同的相似度，则随机去除一个)。

(5)计算原复杂网络在当前划分下的模块度。

(6)重复步骤(4)和步骤(5)。依次移除所有边以获得复杂网络的社区结构，如果存在特定的模块度约束，则在满足模块度约束时结束模块划分。

4　实例

4.1　切流纵轴流脱粒装置复杂网络建模

图 1 所示的切流纵轴流脱粒装置，在约翰迪尔公司 C 系列联合收获机和 CLASS 公司 LEXION 780－670 系列联合收获机中得到广泛的应用。收获后的作物先从图 1 所示的切流脱粒单元进入脱粒装置；经过切流脱粒单元脱粒后，再由导流滚轮导入纵轴流喂入滚轮；然后由纵轴流喂入滚轮喂入纵轴流脱粒分离单元；最后由纵轴流脱粒分离单元进行复脱和籽粒分离。整个过程脱粒装置功能具有初脱、导流和复脱分离 3 个子功能，切纵流脱粒装置物理结构上的关联关系可以根据零件之间的装配关系判断。本文选取图 1 中的 29 个主要零部件进行研究。利用式(11)计算零件间综合关联强度，转换为综合关联强度自相关矩阵

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix} 0 & 0.9614 & 0.8414 & 0.8414 & 0.9614 & \cdots & 0 \\ 0.9614 & 0 & 0.8414 & 0.8960 & 0.9614 & \cdots & 0 \\ 0.8414 & 0.8414 & 0 & 0.9614 & 0.8414 & \cdots & 0 \\ 0.8414 & 0.8960 & 0.9614 & 0 & 0.8960 & \cdots & 0 \\ 0.9614 & 0.9614 & 0.8414 & 0.8960 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \tag{20}$$

由于篇幅限制，式(20)只给出了部分数值。式(20)映射为图 2 所示的复杂网络。

4.2　脱粒装置模块划分结果

利用 Matlab 编制了基于 NHC 算法程序。通过应用 NHC 算法对图 2 所示的复杂网络进行模块划分，获得模块度和社区结构的关系如图 6 所示。模块划分的目的是最大化模块度[31]，由图 6 可知，模块度峰值为 0.393，对应的最优划分方案如图 7 所示。最优划分方案由 3 个模块组成，分别为：切流脱粒模块、导流模块和轴流脱粒分离模块。

4.3　与改进 GN 算法比较

LI 等[22]和 ZHANG 等[16]采用改进的 GN 算法实现了复杂机械产品的模块划分。图 8 为 NHC 算法和改进 GN 算法获得模块划分方案的模块度对比。通过比较发现，NHC 算法和改进 GN 算法获得的脱粒装置的最优模块划分方案的模块度相同，但在不同的模块划分粒度下，NHC 算法得到模块划分方案的模块度普遍高于改进 GN 算法。NHC 算法获得的平均模块度比改进 GN 算法提高了 24.6%。表明采用 NHC 算法获得的不同粒度下模块划分方案的模块内零件耦合度显著高于改进 GN 算法。

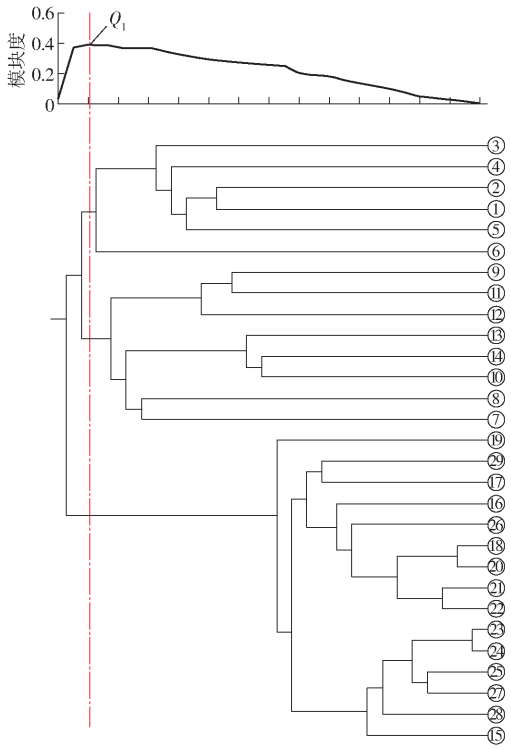


图 6 NHC 算法得到的模块度和社区结构树形图

Fig. 6 Modularity and dendrogram obtained by application of NHC algorithm

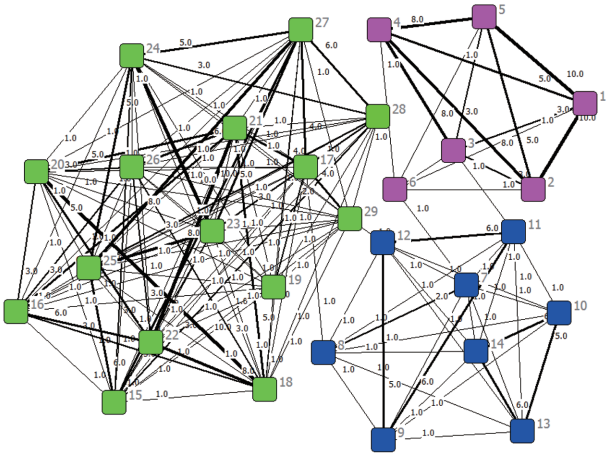


图 7 基于 NHC 算法的脱粒装置模块划分结果

Fig. 7 Module partition result of threshing device structure based on NHC algorithm

改进 GN 算法和 NHC 算法获得的社区结构树对比如图 9 所示。当模块数为 3 时,改进 GN 算法和 NHC 算法获得的最优模块划分方案相同,但两种方法得到的对应模块的树形图相差很大。如图 9b 所示,模块 1 的树形图显示模块 1 是通过以零件 1 为中心逐个添加部件形成的。这与切流脱粒模块装配顺序一致。如图 9a 所示,在模块 1 内部包含由零件 4 和零件 5 组成的子模块,该子模块的形成将导致零件 1 和零件 2 无法装配。因此,NHC 算法得到的模块 1 结构树更有助于工程师分析产品结构。图 9a 和图 9b 中的模块 2 之间的最大不同在于,

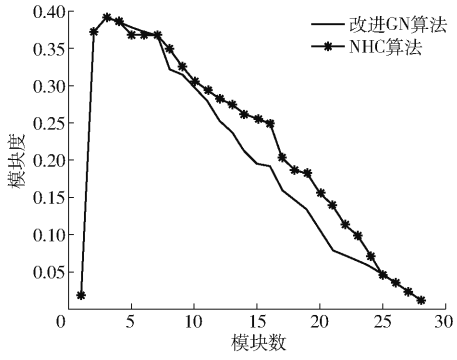


图 8 NHC 算法与改进 GN 算法性能比较

Fig. 8 Comparison between NHC algorithm and improved GN algorithm

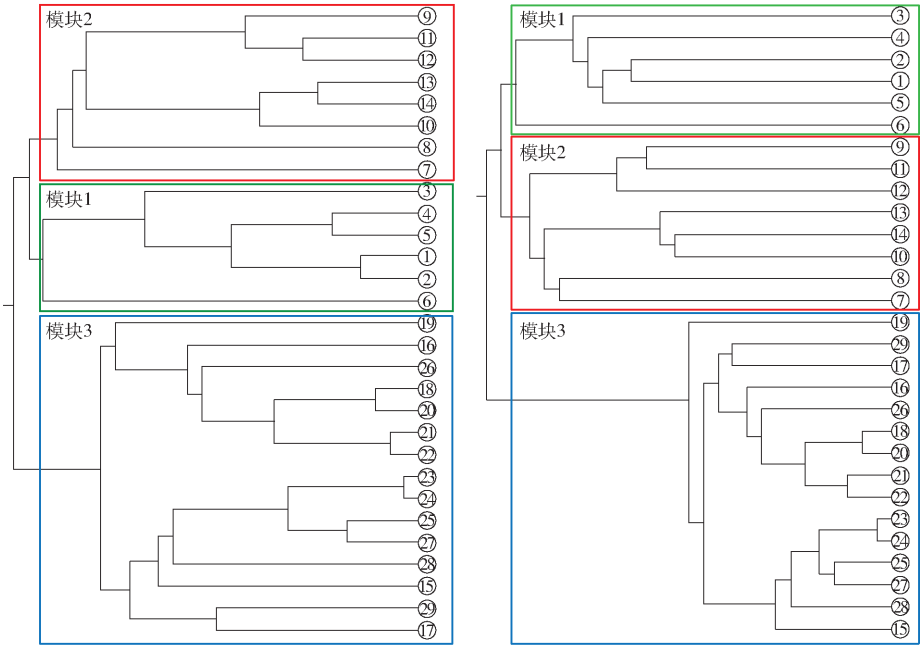
图 9b 中的模块 2 包含由零件 7、8 组成的子模块。如图 1 所示,零件 7、8 连接紧密而且都具有导流的功能,将其形成子模块有利结构和功能优化。因此图 9b 中模块 2 的树状图可以更好地保证功能和结构的独立性。图 9a 中的模块 3 比图 9b 中的模块 3 更早地被划分,如图 3 和图 4 所示,模块 3 内部零件连接的紧密性明显高于模块 1 和模块 2,所以模块 3 应该较晚地被划分,因此图 9b 中模块 3 的树状图更合理。模块划分不但是为获得最优的模块划分方案,获得合理的产品结构树形图同样非常重要。合理的树形图有助于设计人员理解和改进产品结构。为了获得合理的产品结构树形图,必须对零件间的连接关系进行精确的度量。NHC 算法考虑了零件间的直接与间接连接的交互效果,将更多的设计依赖关系融入模块划分,这是 NHC 算法优于改进的 GN 算法的主要原因。

4.4 工程实践

如图 7 所示,通过 NHC 算法获得的最佳模块划分方案由 3 个模块组成,分别为切流脱粒模块、导流模块和轴流脱粒分离模块。切流脱粒模块的作用是通过脱粒滚筒的打击,使谷物籽粒从穗上脱离,并尽可能地使籽粒从谷草混合物中分离;导流模块的作用是将从切流脱粒模块排出的谷草混合物输送到轴流脱粒分离模块;轴流脱粒分离模块的作用是对谷草混合物进行复脱,并将谷物籽粒从谷草混合物中分离出来。每个模块都实现了功能和结构的相对独立,有利于模块优化设计。模块划分结果与工程实践非常吻合。

5 结论

(1)IVIFS 是一种处理不确定、复杂信息的数学工具,可以减少决策信息的不确定性和主观性。采用 IVIFS 分析复杂农机装备零部件之间的关联关系,减小了由设计偏好和主观偏见引起的不确定性。



(a) 改进GN算法　　(b) NHC算法

图 9　基于改进 GN 算法和 NHC 算法的社区结构树

Fig. 9　Dendrograms obtained by application of modified GN algorithm and NHC algorithm

(2)基于等效电容法的复杂网络节点相似度模型,将更多的设计依赖信息应用到零部件间连接强度的评估过程,提高了零部件间连接关系的度量精度。

(3)提出了一种网络层次聚类(NHC)算法,实现了复杂农机装备的模块精确划分。通过 NHC 算法获得模块划分方案的模块内部耦合度和产品结构树均优于改进的 GN 算法。

参　考　文　献

[1] 杜岳峰,傅生辉,毛恩荣,等. 农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):1 - 17.
DU Yuefeng, FU Shenghui, MAO Enrong, et al. Development situation and prospects of intelligent design for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):1 - 17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190901&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.001. (in Chinese)

[2] BORJESSON F, HÖLTTÄ-OTTO K. A module generation algorithm for product architecture based on component interactions and strategic drivers[J]. Research in Engineering Design, 2014, 25(1):31 - 51.

[3] ERIXON G. Modular function deployment—a method for product modularization [D]. Stockholm: The Royal Institute of Technology, 1998.

[4] SHENG Z, LIU C, SONG J, et al. Module division and configuration modeling of CNC product-service system [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016,231(3): 494 - 506.

[5] JUNG S, SIMPSON T W. New modularity indices for modularity assessment and clustering of product architecture [J]. Journal of Engineering Design, 2016,28(1):1 - 22.

[6] OTTO K, HÖLTTÄ-OTTO K, SIMPSON T W, et al. Global views on modular design research: linking alternative methods to support modular product family concept development [J]. Journal of Mechanical Design, 2016,138(7):071101.

[7] STONE R B, WOOD K L, CRAWFORD R H. A heuristic method for identifying modules for product architectures [J]. Design Studies, 2000,21(1): 5 - 31.

[8] ZAMIROWSKI E J, OTTO K N. Identifying product portfolio architecture modularity using function and variety heuristics [C]// ASME Design Engineering Technical Conferences, 1999:12 - 15.

[9] MARTINEZ M, XUE D. A modular design approach for modeling and optimization of adaptable products considering the whole product utilization spans [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017,232(7):1146 - 1164.

[10] HAMRAZ B, CALDWELL N H M, RIDGMAN T W, et al. FBS linkage ontology and technique to support engineering change management [J]. Research in Engineering Design, 2015,26(1): 3 - 35.

[11] JUNG S, ASIKOGLU O, SIMPSON T W. A method to evaluate direct and indirect design dependencies between components in a product architecture [J]. Research in Engineering Design, 2018, 29: 507 - 530.

[12] ASIKOGLU O, SIMPSON T. A new approach for evaluating design dependencies in product architectures[C]//13th AIAA/

ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference, 2010.
[13] LI N, LI X, SHEN Y, et al. Risk assessment model based on multi-agent systems for complex product design [J]. Information Systems Frontiers, 2013, 17(2): 363 - 385.
[14] ZHANG F, CHEN J, ZHU Y, et al. Generalized score functions on interval-valued intuitionistic fuzzy sets with preference parameters for different types of decision makers and their application[J]. Applied Intelligence, 2018, 48: 4084 - 4095.
[15] ASAN U, KADAIFCI C, BOZDAG E, et al. A new approach to dematel based on interval-valued hesitant fuzzy sets [J]. Applied Soft Computing, 2018,66: 34 - 49.
[16] ZHANG N, YANG Y, ZHENG Y, et al. Module partition of complex mechanical products based on weighted complex networks [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019,30(4):1973 - 1998.
[17] 陈志旺, 陈林, 杨七,等. 用区间直觉模糊集方法对属性权重未知的群求解其多属性决策[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(8):1025 - 1033.
CHEN Zhiwang, CHEN Lin, YANG Qi,et al. Interval-valued intuitionistic fuzzy set method for group multi-attribute decision-making with unknown attribute weights[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(8):1025 - 1033. (in Chinese)
[18] 吴冲, 万翔宇. 基于改进熵权法的区间直觉模糊 TOPSIS 方法[J]. 运筹与管理, 2014(5):42 - 47.
WU Chong, WAN Xiangyu. Extended TOPSIS with interval-valued intuitionistic fuzzy information based on advanced entropy-weighted method[J]. Operations Research and Management Science, 2014(5):42 - 47. (in Chinese)
[19] ATANASSOV K, GARGOV G. Interval-valued intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1989, 31(3):343 - 349.
[20] YE J. Fuzzy cross entropy of interval-valued intuitionistic fuzzy sets and its optimal decision-making method based on the weights of alternatives [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(5):6179 - 6183.
[21] NAYAGAM V L G, MURALIKRISHNAN S, SIVARAMAN G. Multi-criteria decision-making method based on interval-valued intuitionistic fuzzy sets [J]. Expert Systems with Applications, 2011,38(3): 1464 - 1467.
[22] LI Y, CHU X, CHU D, et al. An integrated module partition approach for complex products and systems based on weighted complex networks [J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(15):4608 - 4622.
[23] 孙玺菁, 司守奎. 复杂网络算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
[24] 李玉鹏. 复杂产品系统模块化关键技术研究与应用[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
LI Yupeng. Research and application on key technologies of modularization for complex products and systems[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2014. (in Chinese)
[25] NEWMAN M E J. Communities, modules and large-scale structure in networks [J]. Nature Physics, 2012, 8(1): 25 - 31.
[26] CLAUSET A, NEWMAN M E J, MOORE C. Finding community structure in very large networks[J]. Physical Review E, 2004,70(2): 066111.
[27] JIANG Y, JIA C, YU J. An efficient community detection algorithm using greedy surprise maximization [J]. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 2014, 47(16): 165101.
[28] BOCCALETTI S, LATORA V, MORENO Y, et al. Complex networks: structure and dynamics[J]. Physics Reports, 2006, 424(4 - 5):175 - 308.
[29] BAI Meng, HU Ke, TANG Yi. Link prediction based on a semi-local similarity index[J]. Chin. Phys. B, 2011,20(12): 498 - 504.
[30] NEWMAN M E J. Networks: an introduction [J]. Astronomische Nachrichten, 2010, 327(8): 741 - 743.
[31] SINHA K, SUH E S. Pareto-optimization of complex system architecture for structural complexity and modularity [J]. Research in Engineering Design, 2017, 29(1): 123 - 141.