

生产设备合作关系网络的建模与分析

李文翔^{1,2} 危 霞¹ 江 昊³ 盛玉霞^{1,2}

(武汉科技大学信息科学与工程学院 武汉 430081)¹

(武汉科技大学冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心 武汉 430081)²

(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)³

摘 要 区域产业集群中的生产资源能形成多样复杂的合作关系。探讨如何挖掘和利用这些关系来规划和控制集群内部元素的合作,以提供高效的云制造生产服务。采用广义社会合作网络模型描述集群中的制造合作关系,提出构建设备合作网络(FCN)的方法;面向不同的设备选择策略(随机、均衡、带偏好随机及带偏好均衡)设计 FCN 动态增长过程;基于网络规模、节点度分布、项目度分布和平均最短距离等指标对一个 FCN 实例的统计特性展开分析,指出均衡策略具有比随机策略更大的网络规模,而随机策略具有较明显的无标度和小世界特性;进而提出基于设备动态加权和子任务集中处理的设备选择优化策略。

关键词 社会合作网络,云制造,设备调度,统计特性

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.9.031

Modeling and Analysis on Facilities Collaboration Network

LI Wen-xiang^{1,2} WEI Xia¹ JIANG Hao³ SHENG Yu-xia^{1,2}

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)¹

(Engineering Research Center for Metallurgical Automation and Detecting Technology of

Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)²

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)³

Abstract There exist complex collaboration relations among production resources in regional enterprise cluster. To achieve efficient cloud manufacturing services, this paper explored how to mine and utilize these relations for controlling the collaboration behaviors. It described the collaboration relations based on generalized social collaboration network, and proposed the method for building Facility Collaboration Network (FCN). It further designed the dynamic growth process of FCN for different facility selection strategies (random, balanced, random with preference and balanced with preference). Based on the metrics such as network scale, degree distribution and average shortest distance, it analyzed the statistical characteristics of an instance of FCN, and stated that balanced strategies possess larger network scale, while random strategies exhibit obvious scale-free and small-world characteristics. At last, it proposed strategies (dynamic weighing of facilities and concentrative processing of successive subtasks) for employing facilities efficiently.

Keywords Social collaboration network, Cloud manufacturing, Facilities scheduling, Statistical characteristics

1 引言

经济全球化和社会化分工的迅速发展,以及产品复杂度的不断提升,使得企业之间的合作制造显得越发必要,且它们呈现出大规模、多目标、多角色和多层次的特点,这就促进了区域产业集群的发展^[1]。区域产业集群包括特定地域内同行业的多个企业,能依据生产过程高效协调利用生产资源,是目前全球产业链的一个突出特征。另一方面,云制造^[2]是一种基于网络平台的新制造模式,能对分散的加工资源按照标准规范进行虚拟化描述、发布和组合,通过公共的服务平台,供

不同需求的企业发现、匹配和选用,以提供灵活的制造服务。它为区域产业集群中的企业优化协作利用资源提供了一条思路,是未来工业信息化和智能化的保障。在云制造中,合理地管理并调度分布式设备^[3]等生产资源以高效地组织设备之间的合作,对于提升生产效率、降低成本十分重要,是云制造实现并发挥作用所必须解决的难题。

区域产业集群中各企业及生产资源具有强关联性,能形成多层次、多类型的复杂合作关系,并伴随生产过程产生大量的信息数据^[4],体现在用户、设备、原料、生产过程及产品等方面。如何有效挖掘和利用这些关系和数据来预测、评价和规

到稿日期:2015-06-16 返修日期:2015-09-28 本文受国家自然科学基金(61371126,61501337),教育部留学回国人员科研启动基金,湖北省教育厅科研计划项目(Q20141110,Q20151101)资助。

李文翔(1979—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为物联网,E-mail:liwx2006@hotmail.com;危霞(1993—),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络;江昊(1976—),男,博士,教授,主要研究方向为社会网络;盛玉霞(1979—),女,博士,讲师,主要研究方向为信号处理。

划集群内部元素的合作以提供便捷高效的云制造服务,是十分有意义的研究方向,满足制造业信息化和智能化的需要。

区域产业集群生产过程中的合作关系可以描述为一种广义社会合作网络^[5],其中顶点一般表示为企业、设备及各种资源,边一般表示顶点间的合作关系。它蕴含丰富的信息,能够体现设计、物流、生产、销售等各个环节的特点和规律,是对产业制造过程进行描述和优化的有效方法。相比企业之间的合作,较小粒度的设备之间的合作关系表现出更为丰富的信息。目前针对设备资源合作关系及特性的研究还很少^[6],缺乏有效的模型和工具来对各种现象加以分析和优化。本文以包装印刷生产企业集群为例,提出图数据分析方法,探讨设备合作关系网络(FCN)的演化机制和指标特性,挖掘影响生产制造效率的规律和特点,用于优化云制造环境下分布式设备的合作方式。具体贡献包括:1)基于协作生产过程的相关实体及其关系,提出 FCN 构造方法以及不同设备调度策略下 FCN 的动态增长过程;2)基于对 FCN 相关指标(网络规模、节点度分布、项目度分布和平均最短距离)的统计特性的分析,提出了面向设备调度优化的策略,包括设备动态加权和连续子任务集中处理。

2 相关工作

较早针对生产合作关系网络的研究大多面向企业间合作,其中文献[7]将企业或功能当作网络节点,给出了合作网络的基本模型;文献[8]指出美国经济中的需求者-供应者关系网络不符合无标度分布特性,提出体现需求者-供应者真实关系特性的改进增长模型;文献[9]综合考虑节点群落特性、节点间双向择优选择机制及节点间合作关系消亡等因素,提出业务关联的多产业链合作网络加权演化模型及算法;文献[10]探讨面向服务的企业合作关系网络的聚类特性,并提出对应网络的架构模型。以上研究均未涉及任务实现的细节,且对节点之间的连接方式的描述比较抽象,难以对各类资源进行有效的优化配置。

很多研究工作考虑到生产过程的具体实现方式,其中 Liu L. L. 在文献[11]中采用粒子群方法优化资源分配,并将广义资源作为合作关系网络节点进行辅助分析。文献[12]又针对云制造服务构建复杂网络模型,其中将处理每个子任务的云服务当作节点,探讨了度分布、路径长度、顶点介数、聚类系数等统计量,并以 LED 聚光灯生产为例给出选择云服务的启示。文献[13]提出产品开发过程网络模型,将参与生产的要素分为设计节点和资源节点,探讨对应合作关系网络的演化模型、统计特性(含度、聚类系数、介数、健壮性等指标)及物理特性,设计社区发现算法用于负载均衡,并通过汽轮机转子的生产实例对相关方法加以分析验证。文献[14]针对制造网格中资源节点所构成的加权合作网络,探讨其中的社区结构和基于模块度的社区划分方法,并提出基于 Newman 快速算法的改进算法。目前尚无研究探讨设备合作方式对生产的影响,因而难以对设备间的高效合作方式提出有价值的建议,本文则通过探讨 FCN 的增长过程及统计特性,提出面向生产过程优化的设备选择策略。

3 设备合作关系网络模型

3.1 网络构建

参与区域产业集群生产过程的相关实体包括任务、工序、

子任务、设备及企业。云制造系统收集用户提出的生产任务请求,形成任务实例集 $t = \{t_1, t_2, t_3, \dots\}$,其中多个任务可以属于一类工序,故任务实例和工序类型形成 $M:1$ 的关系。云制造系统掌握了所有工序类型的知识,它们构成工序类型集 $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots\}$,对任务进行分解得到所有子任务类型集合 $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots\}$,每个工序类型由若干类子任务按一定规程组合而成,而每类子任务又可以属于多种工序,故工序类型和子任务类型形成 $M:N$ 的关系。提供云制造服务的所有设备构成设备类型集 $F = \{F_1, F_2, F_3, \dots\}$,每类设备可以完成多类子任务,每类子任务也可以在多类设备上完成,故它们形成 $M:N$ 的关系。所有参与企业构成企业实例集 $e = \{e_1, e_2, e_3, \dots\}$,一个企业内可能具有多类设备,一类设备也可能存在于多个企业实例中,故设备类型和企业实例形成 $M:N$ 的关系。

考虑到多类设备合作完成一个任务,可形成一个关于具体任务和设备 $\{f_1, f_2, f_3, \dots\}$ 的二分图。基于这样的映射关系,将这类二部图对设备进行投影得到单模式网络,其中各个节点为设备,如果两个节点共同完成一个任务,则它们之间有一条连边,对应构造出 FCN,其中各点的度对应该设备所参与的任务的数目,其示例如图 1、图 2 所示。此外,相关实体的关联和影响特性也体现在选点和连边的具体策略中。

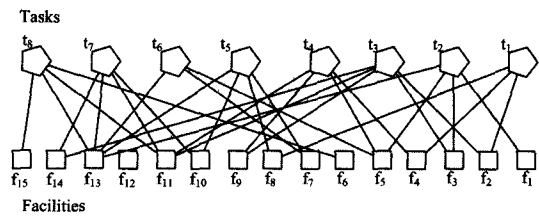


图 1 任务与设备映射关系二分图示例

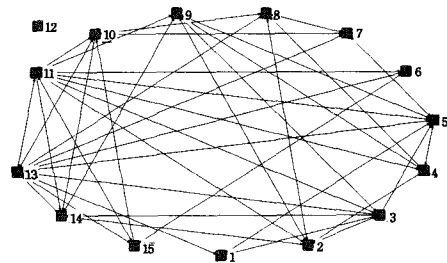


图 2 设备合作关系二分图投影

3.2 设备合作关系实例

文中以湖北省一个包装印刷生产集群在 3 年内的生产情况为例加以分析,其主要的特点如下:集群内共包含 25 家企业,2007 台 51 类设备,22 种子任务按不同方式组合成 60 种工序/产品;各子任务的处理在所有工序中具有相对固定的先后顺序,而企业中的设备功能和子任务的匹配也具有相对固定性,这就使得各个企业在产品制造过程中偏向于上游、中游或下游,具有相对固定的地位;在 3 年时间内存在旧设备的退出和新设备的引进,以 1 天为一个时间点,用设备 ID 表示各设备,其实际使用时段用图 3 所示的竖直线描述。

3 年内共有 5500 多个任务订单,用任务 ID 表示各任务,其发生时间如图 4 所示,其中任务首先按工序类型排列,属于同类工序的任务排列在一起,而在同类工序中,各任务按出现时间先后排序。从中可看出,所有任务需求可以分为 3 类:1)整个 3 年时间段内不间断的持续任务,对应日常需求订单,

对应图4中任务ID的大致范围为[1, 2300]; 2) 周期性任务, 在每年固定的时间产生, 对应季节性订单, 任务ID的大致范围为[2300, 4000]; 3) 随机性任务, 对应突发性的生产需求。各类任务的订单数目差异十分显著。

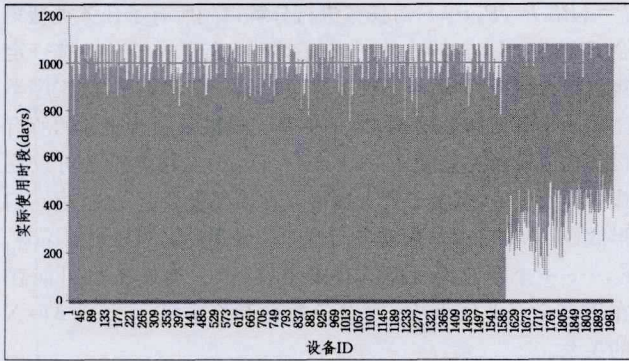


图3 各设备实际使用时段分布

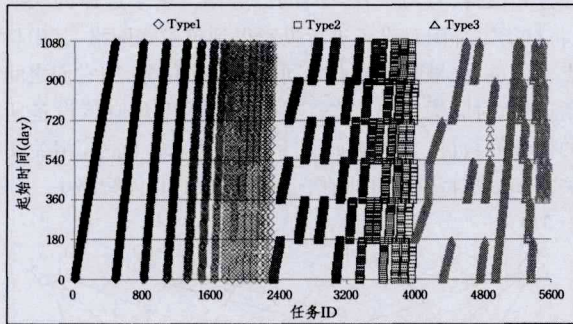


图4 各任务的发生时间

4 网络自组织性描述

面向复杂的包装印刷生产任务, 设备的分配调度时机和方式取决于以下3个方面: 1) 任务的工序特性, 包括任务期望产量、各子任务的加工处理要求; 2) 用户对特定企业、设备的选择偏好; 3) 当前企业、设备的负载。

文中针对4种典型设备分配调度策略展开分析和比较。

1) 随机选择(RAN): 在功能匹配且可用的设备中随机选择。

2) 带偏好随机选择(RAN-P): 首先在偏好企业的匹配且可用的设备中随机选择, 若无设备可用, 再在其它企业的匹配且可用的设备中随机选择。该方式刻意将子任务集中到某些设备。

3) 均衡选择(BAL): 在匹配且可用的设备中选择累积负载最小的。该方式刻意构建分散的FCN连接。

4) 带偏好均衡选择(BAL-P): 首先在偏好企业的匹配且可用的设备中选择累积负载最小的, 若无设备可用, 再在其它企业的匹配且可用的设备中选择累积负载最小的。该方式刻意将子任务集中到某些设备, 同时刻意构建分散的FCN连接。

在文献[15]的基础上, 提出基于任务驱动的FCN增长过程。

1) 分解: 将当前任务 T_i 按工序分为 $N_{S_i}(i)$ 个子任务 S_{ij} , $0 \leq j \leq N_{S_i}(i)$ 。

2) 选择: 令 N_F 为设备总数, 为每个子任务 S_{ij} 分配一个设备, 任意设备 $F_k (0 \leq k \leq N_F)$ 被分给 S_{ij} 的概率依不同策略

有所区别, 具体如下。

RAN: 令设备集合 $F(i, j)$ 能实现 S_{ij} , 其中设备数目为 $N_F(i, j)$, 则设备 F_k 被 S_{ij} 选中的概率为:

$$P_k(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{N_F(i, j)}, & F_k \in F(i, j) \\ 0, & F_k \notin F(i, j) \end{cases} \quad (1)$$

BAL: 令设备集合 $F(i, j)$ 能实现 S_{ij} , 其中当前具有最小的负载的动态子集为 $FMin(i, j)$, 其设备数目为 $N_{FMin}(i, j)$, 则

$$P_k(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{N_{FMin}(i, j)}, & F_k \in FMin(i, j) \\ 0, & F_k \notin FMin(i, j) \end{cases} \quad (2)$$

RAN-P: S_{ij} 偏好的设备集合为 $FP(i, j)$, 数目为 $N_{FP}(i, j)$, 非偏好的为 $F(i, j) - FP(i, j)$, 数目为 $N_F(i, j) - N_{FP}(i, j)$, S_{ij} 被偏好企业设备接纳的概率为 $P_E(i, j)$ (依设备当前负载动态设定), 则

$$P_k(i, j) = \begin{cases} \frac{P_E(i, j)}{N_{FP}(i, j)}, & F_k \in FP(i, j) \\ \frac{1 - P_E(i, j)}{N_F(i, j) - N_{FP}(i, j)}, & F_k \in F(i, j) - FP(i, j) \\ 0, & F_k \notin F(i, j) \end{cases} \quad (3)$$

BAL-P: S_{ij} 偏好的设备集合为 $FP(i, j)$, 其中当前具有最低负载的动态子集为 $FPMin(i, j)$, 数目为 $N_{FPMin}(i, j)$; 非偏好的为 $F(i, j) - FP(i, j)$, 其中具有最低负载的动态子集为 $FNPMin(i, j)$, 数目为 $N_{FNPMin}(i, j)$, S_{ij} 被偏好企业接纳的概率为 $P_E(i, j)$, 则

$$P_k(i, j) = \begin{cases} \frac{P_E(i, j)}{N_{FPMin}(i, j)}, & F_k \in FPMin(i, j) \\ \frac{1 - P_E(i, j)}{N_{FNPMin}(i, j)}, & F_k \in FNPMin(i, j) \\ 0, & F_k \in \text{other} \end{cases} \quad (4)$$

对 T_i 中的每个子任务重复进行以上过程。

3) 增长: T_i 选中的设备集合记为 $\{F_{k1}, F_{k2}, F_{k3}, \dots, F_{k(s)}\}$, 由于一个设备上可能完成 T_i 的多个子任务, 因此 $s(i) \leq N_{S_i}(i)$, 将设备集合中新出现的节点添加到网络中。

4) 连接: 对 $\{F_{k1}, F_{k2}, F_{k3}, \dots, F_{k(s)}\}$ 的节点两两连边, 形成完全图。

5 设备合作关系网络特征分析

基于以上的网络增长过程进行仿真, 可以根据以上4种选择策略获取不同的FCN, 此外, 由实际生产关系数据可得真实的协作关系网络。针对实例中的5500多个任务, 以500个任务增长为间隔取得11个任务场景, 探讨对应的网络统计特征及其随任务增长的变化特性^[16]。

5.1 网络规模

各任务场景下, 在网络增长过程中顶点和边的数目如图5所示, 其中负载均衡策略(BAL、BAL-P)所用节点数目很快就达到了最大值并保持稳定, 而其它策略则体现出一种连续且减速增长的效果, 同条件下, BAL的节点数目明显多于RAN, 且BAL-P的节点数目明显多于RAN-P。其原因在于负载均衡策略尽可能地选择未用过的设备作节点, 因此尽早完成了所有参与节点的遍历, 由于设备更新相对缓慢, 因此后

期任务场景中基本上没有明显地新增节点,而随机策略可能重复利用某个设备多次,导致有很多节点未被使用,而其可以作为后期的新节点。

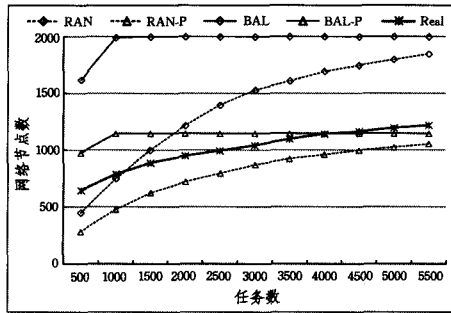


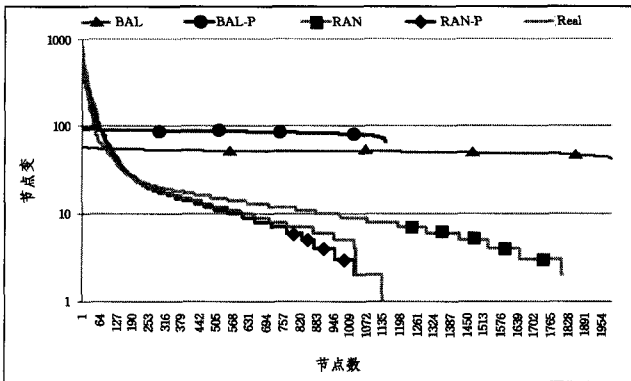
图5 网络节点数增长

另外,有偏好情况下的节点数目一般要远远小于无偏好情况下的,其原因在于偏好选择使所用设备更加集中于部分受偏好的企业中。实际数据(记为 Real)对应的增长特性则比较明显地接近随机偏好选择策略,但其节点数一直比 RAN-P 的数据多,这说明了实际数据具有 RAN 和 RAN-P 的混合效果。

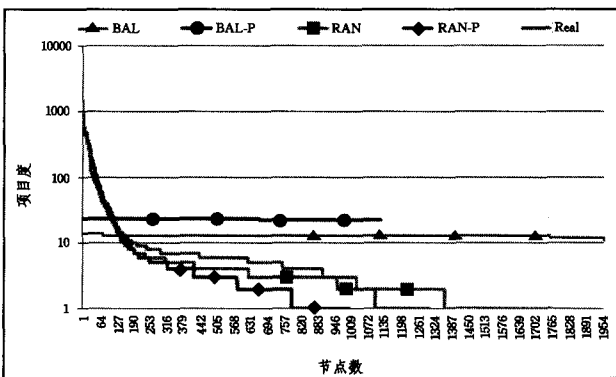
5.2 度、项目度分布

广义合作网的节点度是指一个参与者连接其他参与者的数量。项目度则表示一个参与者参加项目的数目。

图6示出了11个任务场景下节点度及项目度随节点数目增加而递减的规律。



(a) 节点度



(b) 项目度

图6 节点度和项目度分布

从图6中可看出,负载均衡策略在各点上都具有相似的节点度和项目度,故 BAL 和 BAL-P 在相关设备中实现了均衡的累积负载,尽管处理的任务数有很大差异。在 BAL-P 策略中所用的设备数目较少,故 BAL-P 的平均节点度和平均项

目度要高于 BAL 的。RAN-P、RAN 策略及实际数据的分布接近 Scale free 特性,其原因在于图4中几十种工序类型所对应的任务分布具有明显的不均衡性,少数工序类具有很多任务数目,进而导致对某类设备的频繁使用。考虑到实际数据具有 RAN 和 RAN-P 的混合特性,后面不再对其单独分析。

5.3 平均最短距离

令 V 为顶点集, d_{ij} 为节点 i 到 j 的最短距离,则网络平均最短距离体现了从一个节点到另一个节点所要走的平均长度,即

$$l = \frac{1}{N(N+1)} \sum_{i,j \in V(i \neq j)} d_{ij} \quad (5)$$

各任务场景下的 FCN 平均最短距离如图7所示,可以发现 RAN 和 RAN-P 的平均最短距离一直略大于 2,体现了明显的小世界效应;而 BAL 和 BAL-P 的平均最短距离则在早期的任务场景中很大,这体现了 BAL 和 BAL-P 策略中网络增长初期不同任务所用设备的高度孤立性。

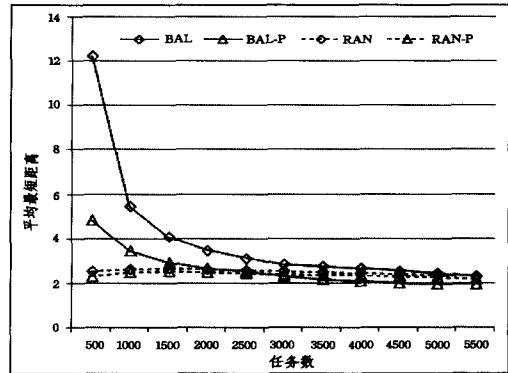


图7 平均最短路径长度的变化

从结果数据中观察到,均衡策略下的网络规模比随机策略的要大,而带偏好选择策略的网络规模比非偏好选择策略的要小得多。均衡策略中各节点具有相似的节点度和项目度,而随机策略中的节点度与项目度则体现了无标度特性。从平均最短距离可看出,随机策略具有明显的小世界效应。

6 设备选择策略

基于前面的分析,发现影响设备选择的要素包括:

1) 用户倾向于选择具有较低开销或时延的设备,但实际上设备的开销或时延将随自身状态(如负载)而动态变化。此外,相同类型的任务倾向于采用相同的设备集合,但当原先受到偏好的设备的负载很高时,宜采用 BAL 策略选择低负载的其它设备。因此需要灵活调整对企业或设备的偏好。

2) 有时同一任务中顺序执行的子任务可在一个设备中完成,这将减少部件在设备或企业中的运输步骤,提升效率。

对应设计合作设备选择策略,以开销或时延为优化指标,在设备分配优化模型中考虑的优化策略有以下两点。

1) 设备动态加权。有必要根据设备中处理时延或开销的动态变化对应调整用户的偏好。云制造服务系统中的中心控制器能周期性地评估各设备状态,包括优选、普通及过载,对应的权重值可取从高到低的不同值。优选状态的设备具有低的时延或开销,可被同类型的多个任务重复利用。

2) 连续子任务集中处理。如果一个工序中顺序相邻的多个连续子任务能集中在一个设备或企业中完成,则能明显降低部件运输的时间或开销。对应有两个指标,①在设备 $f_{k,i}$

中能处理的任务 t_i 的连续子任务数目 $SN_f(i, k, l)$, ②在企业 e_k 的不同设备中能处理的任务 t_i 的连续子任务数目 $SN_e(i, k)$ 。进而提出加权增益 G 来体现连续子任务集中处理的优化效果, 其中系数 α_f 要大于 α_e , 因为子任务共用设备比共用企业能节省更多的开销或时间。

$$G(i, k, l) = \alpha_f \cdot SN_f(i, k, l) + \alpha_e \cdot SN_e(i, k) \quad (6)$$

结束语 文中的工作提供了面向云制造中生产过程设计和管理的思路。针对 FCN 的特性分析能提供典型的设备合作模式, 给出针对设备工作负载或企业中设备分布的动态调整的建议。所提出的两个设备选择优化策略能融合到未来的智能优化算法设计中, 例如作为遗传算法中染色体适应度函数的系数, 以获取全局优化的设备选择/分配方案。

深入的研究工作还包括综合考虑企业和设备等各级元素及生产过程要求而构建复杂且全面的多层合作网络, 并探讨其中的特性, 以及针对任务的异构性设计不同的处理策略。

参 考 文 献

- [1] Gan Lu, Zhang Jian, Hong Jie. Research on partner selection of industrial cluster enterprises based on knowledge complementarity [J]. WIT Transactions on Information and Communication Technologies, 2014, 56: 255-262
 - [2] Liu Ning, Li Xiao-ping, Shen Wei-ming. Multi-granularity resource virtualization and sharing strategies in cloud manufacturing[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 46: 72-82
 - [3] Adam J, Janiak W A, Tomasz K, et al. A survey on scheduling problems with due windows [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 242(2): 347-357
 - [4] Yi Xiao-meng, Liu Fang-ming, Liu Jiang-chuan, et al. Building a network highway for big data: architecture and challenges [J]. IEEE Network, 2014, 28(4): 5-13
 - [5] Wang Long, Ma Ying-hong. Competition and fitness in one-mode collaboration network [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2015, 25(1-3): 136-144
 - [6] Ding Zhao-yun, Jia Yan, Zhou Bin, et al. Survey of influence analysis for social networks [J]. Computer Science, 2014, 41(1): 48-53(in Chinese)
丁兆云, 贾焰, 周斌, 等. 社交网络影响力研究综述 [J]. 计算机科学, 2014, 41(1): 48-53
 - [7] Schuh G, Monostori L, Csaji BC, et al. Complexity-based modeling of reconfigurable collaborations in production industry [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 445-450
 - [8] Atalay E, Hortacsu A, Roberts J, et al. Network structure of production [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(13): 5199-5202
 - [9] Chen Jing, Sun Lin-fu. Model of business-related multi-industrial chain collaborative network [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2010, 16(5): 1088-1095(in Chinese)
陈静, 孙林夫. 业务关联的多产业链协作网络模型[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(5): 1088-1095
 - [10] Zhang Fu-qiang, Jiang Ping-yu, Zhu Qi-qi, et al. Modeling and analyzing of an enterprise collaboration network supported by service-oriented manufacturing [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(9): 1579-1593
 - [11] Liu Li-lan, Shu Zhi-song, Sun Xue-hua, et al. Optimum distribution of resources based on particle swarm optimization and complex network theory [C]//Final Program and Book of Abstracts of the 2010 International Conference on Life System Modeling & 2010 International Conference on Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment. 2010: 101-109
 - [12] Liu L, Chen C, Yu T. Characteristics analysis of cloud services based on complex network [M]// Computation Intelligence, Networked Systems and Their Applications. Springer Berlin Heidelberg, 2014: 318-330
 - [13] Fu Lei-jie, Jiang Ping-yu, Cao Wei. Modeling and performance analysis of product development process network [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013, 36(6): 1489-1502
 - [14] Yin Yong, Li Yu, Zhang Chao-yong. Study on community structures in manufacturing grid and the algorithm for community partition of its resource nodes [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 526: 222-229
 - [15] Ramasco J J, Dorogovtsev S N, Romualdo Pastor-Satorras. Self-organization of collaboration networks [J]. Physical Review E, 2004, 70(3): 03610
 - [16] Qin Li, Yang Zi-long, Huang Shu-guang. Synthesis evaluation method for node importance in complex networks [J]. Computer Science, 2015, 42(2): 60-64(in Chinese)
秦李, 杨子龙, 黄曙光. 复杂网络的节点重要性综合评价 [J]. 计算机科学, 2015, 42(2): 60-64
-
- (上接第 151 页)
- [9] Tembine H, Altman E, El-Azouzi R, et al. Multiple access game in ad-hoc network [C] // ACM Proc. ValueTools. Nantes, France, 2007, 321
 - [10] Tembine H, Altman E, El-Azouzi R, et al. Evolutionary games with random number of interacting players applied to access control[C]//Proc. IEEE/ACM WiOpt. 2008: 344-351
 - [11] Tembine H, Altman E, El-Azouzi R, et al. Evolutionary games in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2010, 40(3): 634-646
 - [12] 威布尔. 演化博弈论[M]. 王永钦. 上海: 上海人民出版社, 2006
 - [13] Cheng Yan-hong, Li Zhi-shu, Chen Liang-yin. An Adaptive MAC Protocol for Wireless LANs Under Error-Prone Environment [J]. Computer Research and Development, 2012, 49(1): 174-182 (in Chinese)
程艳红, 李志蜀, 陈良银. 差错信道下无线局域网的自适应 MAC 协议[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(1): 174-182
 - [14] Cheng Yuan, Zhang Yuan, Gao Xi-qi. Performance analysis of packet dropping probability under error-prone channel in WLAN[J]. Journal on Communications, 2007, 28(5): 126-131 (in Chinese)
程远, 张源, 高西奇. 差错信道下无线局域网丢包率性能分析 [J]. 通信学报, 2007, 28(5): 126-131