

云设计制造模式下的社交化协作团队构建方法

陈健, 莫蓉, 初建杰, 陈登凯, 官静

(西北工业大学 陕西省工业设计工程实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要: 研究云环境中提供设计与制造服务成员的社交化协同合作形式, 针对云设计制造模式特征与社交化协作团队成员特点, 以团队成员综合服务能力为研究对象建立优选指标体系, 着重分析优选过程中需要考虑的定量与定性指标, 采用量化研究方法为优选指标给出计算依据, 并依据优选指标体系建立一种面向云设计制造模式的团队优化构建模型, 将团队成员选择过程转化为多目标优化过程, 采用灰色关联度分析法对模型进行求解, 以此解决云环境中团队成员存在的不确定性、差异性与多样性问题, 实现社交化协作团队的构建. 以医疗镇痛泵研发任务中团队构建过程为例, 说明所提方法的有效性和正确性.

关键词: 社交化协作; 团队构建; 优选体系; 灰色关联度分析; 云设计制造 (CBDM)

中图分类号: TP 391.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-973X(2019)03-0444-11

Construction of social collaboration team in cloud design and manufacturing mode

CHEN Jian, MO Rong, CHU Jian-jie, CHEN Deng-kai, GONG Jing

(Shaanxi Engineering Laboratory for Industrial Design, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The social collaborative forms of members who provide design and manufacturing service in the cloud environment were investigated. Aiming at the characteristics of cloud-based design and manufacturing (CBDM) model and the characteristics of social collaborative team members, the optimization index system was established taking the comprehensive service ability of team members as the research object; the quantitative and qualitative indexes to be considered in the optimization selection process were analyzed. Based on the quantitative research method, the calculation basis of the optimal index was given, and a social collaboration team optimization construction model for cloud design and manufacturing model was established according to the preference index system. The selection process of team members was transformed into multi-objective optimization process, and a grey correlation analysis method was used to solve the model, so as to solve the uncertainty, diversity and difference of team members in the cloud environment and realize the construction of the social collaboration team. The team building process of the medical analgesia pump was taken as an example to illustrate the validity and correctness of the proposed method.

Key words: social collaboration; team construction; optimization system; grey relational analysis; cloud-based design and manufacturing (CBDM)

目前多数中小企业在产品设计制造过程中面临着控制成本、缩短周期、技术改进等问题. 随着网络

技术与设计制造服务模式的快速发展, 云服务、物联网等新技术已经融入到产品设计制造服务中.

收稿日期: 2018-05-23. 网址: www.zjujournals.com/eng/fileup/HTML/201903005.htm

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFB1104205); 高等学校学科创新引智计划资助项目 (B13044).

作者简介: 陈健 (1987—), 男, 博士生, 从事计算机辅助工业设计、云设计服务研究. orcid.org/0000-0002-5386-4852.

E-mail: ureycj@163.com

通信联系人: 初建杰, 男, 副教授. orcid.org/0000-0002-0113-4030. E-mail: cjj@nwpu.edu.cn

同时,众包、众创、众筹等创新协作模式也与网络化产品设计制造模式紧密结合,云设计制造(cloud-based design and manufacturing, CBDM)模式为企业在产品设计制造过程中提供了新的解决思路^[1]。

CBDM模式不仅具备新技术,而且紧密结合创新协作模式,是对以往产品设计制造服务模式的延伸与变革。在CBDM模式中,企业根据需求在云服务平台发布任务,通过任务分解、设计制造资源优化整合、团队构建、协同分配等方式将整个产品设计制造过程封装为云设计制造服务,并向企业反馈最终的解决方案^[2-3]。该模式可有效为中小企业解决在产品设计制造过程中遇到的诸多问题。同时, CBDM模式还可为中小企业提供按需使用的个性化服务,如产品全生命周期的研发以及产品设计、制造等单项服务或多项综合服务。但是提供这种云设计制造服务的成员具有多样性、异步性、组合性等特征,并在协作过程中具有社交化与动态化特点^[4]。因此, CBDM模式下将社交化协作团队优化构建技术作为提升设计制造资源利用效率的关键技术之一,对CBDM服务模式的实施和开展具有重要作用。

目前,国内外在网络化协同设计制造团队优化构建方面的相关研究成果如下。张丽娜等^[5]在服务团队构建过程中加入过滤前端,并将服务质量(quality of service, QoS)感知技术与社会关系理论结合,以此提升团队协作效率。杜瑞忠等^[6]通过对云服务成员进行评估建立个性化优选模型,以提高网络环境团队服务的质量。刘敬等^[7]提出了基于团队成员的个人能力与协作能力的优选策略,并采用Pareto算法对优选策略进行求解。Quelin等^[8]以荣誉、合作性等作为团队成员优选指标,并建立基于指标信息的多目标优选体系。Chen等^[9]利用Myers Briggs型指标分析成员协作能力,以此为基础完成网络化团队组建。Feng等^[10]采用基于协同信息的跨职能团队(cross-functional teams, CFTs)成员选择方法,结合遗传算法实现对成员多目标规划模型的求解。Wang等^[11]将团队构建问题分解成若干子问题,采用禁忌搜索算法对子问题进行求解。张倩等^[12]通过分析虚拟协同设计环境中资源管理与共享等问题,采用Web服务技术实现云服务中成员的优选。Ardagna等^[13]将团队构建问题定义为一个混合整数线性规划问题,在优化过程中采用循环剥离的方法实现团队构建。Tao等^[14]以短时间、低成本与高可靠性为优化目标,根据

粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)的原则,优选出团队构建最优方案。郑维强等^[15]通过构建多目标优化数学模型,采用Epsilon-SPEA2优化算法得到云服务团队构建方案最优解。

以上研究针对网络化环境下协同设计制造团队构建提供了多种思路,团队优化构建相关研究主要集中在2个方面:团队成员选择局部优化与全局优化。局部优化方法在单项指标性能方面,优于其他方法,但是在多目标优化问题上存在缺陷。全局优化方法主要依据成员相对的重要度进行优选,综合考虑了不同成员的组建效果。但这种方法在成员数量巨大的情况下,可能无法找到最优的团队构建方案^[16]。因此,本文以面向云设计制造服务模式的社交化协作团队构建过程为研究对象,建立基于团队成员综合能力的优化指标体系,采用局部与全局优化混合的方法,将总的多目标优化模型分解为面向各个子任务的优化模型,实施面向子任务的分布式团队优化构建,并采用灰色关联度分析方法对各优化模型进行求解,最终实现社交化协作团队的优化构建。

1 云设计制造模式下社交化协作团队的特点与技术框架

1.1 云设计制造模式服务体系及特点

CBDM模式为企业与社交化协作团队成员提供虚拟聚集的云服务平台,企业向平台提出具体需求,平台根据需求集中发布设计制造任务。同时,平台将各提供服务的成员按照需求任务组建成为社交化协作团队,随着任务的发布与结束,社交化协作团队也随之构建与解散。在整个过程中,云平台对团队成员进行统一集中管理与经营,其基本的服务体系如图1所示。

CBDM模式的服务特点主要包括:

1) 众包性。

云服务平台将子任务分布式交给提供服务的成员,参与的成员在云服务平台中临时组成协作团队。这种特性可以为企业在云平台中吸引更多的外部资源,使企业参与到产品的研发中^[1]。

2) 线上线下结合性(online to offline, O2O)。

CBDM模式的服务是采用O2O形式,成员线上完成子任务的信息输入输出,线下执行子任务。同时,云服务平台在线上完成对任务的管理与控制,并对用户与成员的线上行为进行监控,对线下服务质量进行评估。

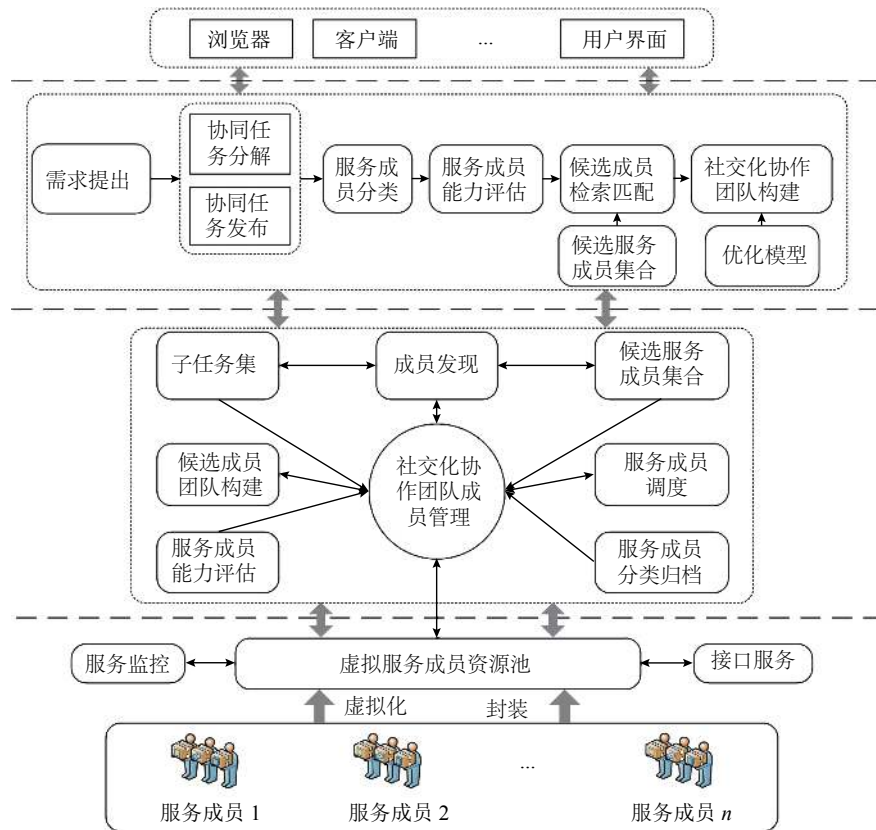


图 1 云设计制造模式服务体系与流程

Fig.1 Cloud design and manufacture mode of service system and process

在 CBDM 模式中, 社交化协作团队成员在其服务流程中体现出的特征如下。

1) 不确定性。

云服务平台将分散在不同地理位置的服务成员虚拟集中, 为分布各地的企业提供服务。然而, 不同的团队成员在成本、质量、时间、可靠性、协作性与共享性等方面存在较大的差异, 这给团队构建带来许多不确定因素。同时, 团队成员在构成上往往存在跨专业、跨领域的现象。

2) 社交化协作性。

由于 CBDM 可以给企业提供灵活的按需使用服务, 而服务过程是线上线下相结合^[17]。子任务在具体的执行过程中, 团队成员借助平台中社交化的交互工具, 或者其他智能终端进行任务信息交流。因此, 在协同合作过程中, 团队成员交流会因任务的推进情况自行组织, 交流的次数与内容也更灵活, 交流过程中网络化的社交性特征体现更为明显。

1.2 社交化协作团队优化构建技术框架

CBDM 模式下的社交化协作团队优化构建技术框架包含 3 个阶段: 任务分解、成员检索与匹

配^[18]、团队优化构建, 如图 2 所示。

1) 任务分解。

CBDM 模式中任务分解主要包含 2 个方面。

a) 任务分解: 将复杂的任务分解为若干个易于团队成员独立执行的子任务^[19]; b) 工作流程控制与调度: 分解后的子任务之间具有串行、并行、循环与选择 4 种关系^[20]。同时, 云服务平台需要规划子任务的工作流顺序, 以及每项子任务的信息输入输出顺序。

2) 成员检索与匹配。

成员检索与匹配的主要功能是为每个子任务寻找对应的候选成员集合。平台根据子任务的需求分析, 检索满足条件的成员, 每个子任务都对应 1 个候选成员集合。

3) 团队优化构建。

任务分解、成员检索与匹配是团队优化构建的准备阶段。同时, 社交化协作团队优化构建是本研究的重点。CBDM 模式下的社交化协作团队优化构建的数学描述如下: 当企业提出任务后, 由云平台将任务分解为若干个子任务, 子任务集合表示为 $t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 其中 t_n 表示子任务集

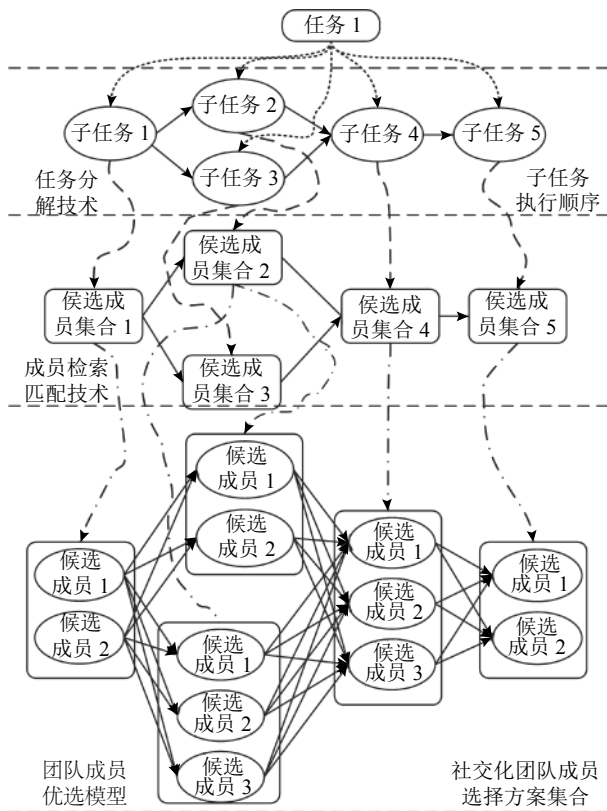


图2 社交化团队构建优化过程

Fig.2 Social team building optimization process

合 t 中的第 n 个子任务. 云服务平台再根据成员检索与匹配技术, 寻找合适的候选成员集合 S_{CM} , 每个子任务对应的候选成员集合表示为 $S_{CM} = \{S_{CM}^1, S_{CM}^2, \dots, S_{CM}^n\}$, 其中 S_{CM}^n 表示候选成员集合 S_{CM} 中第 n 个子任务对应的候选成员集. 每个成员集合中的成员表示为 M , 每个成员对应的集合表示为 $S_{CM}^n = \{M_1^n, M_2^n, \dots, M_j^n\}$, 其中 M_j^n 表示为子任务 t_n 对应的成员候选集 S_{CM}^n 中第 j 个候选成员. 如果 $j=1$ 时, M_j^n 为子任务 t_n 唯一的成员. 由于云服务平台聚集了大量可以提供设计与制造服务的成员. 所以, j 的取值在通常情况下大于 1, 即 $j>1$ 时, 将从候选成员集合 S_{CM}^n 中每个 M_j^n 成员中选择 1 名成员, 组成社交化协作团队的构建方案 S_C , 其中 $S_C = \{M_k^1, M_k^2, \dots, M_k^n\}$, 其中 M_k^n 代表在候选成员集合 S_{CM}^n 中选择的执行子任务 T_s^n 的成员. 因此, 社交化协作团队构建共有 $\prod_{j=1}^m K_j$ 种可能的方案, 其中 m 代表候选成员集的数量, K_j 代表每个候选成员集中成员的数量. 随后, 根据成员优选指标体系与社交化协作团队优化模型, 并采用灰色关联度的方法对模型进行求解, 得到 $\prod_{j=1}^m K_j$ 种方案中的最优解.

2 社交化协作团队成员优选指标体系

2.1 团队成员优选模型

在产品研发过程中, 云服务平台会为企业寻找合适的团队成员. 企业希望花费较低的成本、较短的时间, 获得优质的设计制造服务. 团队成员则希望在合理的时间中通过付出专业的服务, 获得丰厚的报酬. 这种供需双方之存在的矛盾将影响到社交化协作团队的构建. 因此, 基于 CBDM 模式的服务体系与团队成员特点, 结合云服务中协同设计任务的可用性、可组合性、动态性与协作性的特点^[2, 21]. 云服务平台需要建立一种基于多目标的团队成员优选指标体系.

文献^[22]归纳总结了多项网络环境下团队成员优选指标. 由于各种网络环境下的团队成员优选指标存在差异性, 以及各个指标的侧重也不同, 结合其他文献中成员指标选择的经验^[7, 19, 20], 本研究选取时间、成本、质量这 3 项作为成员的基础优选指标.

1) 时间 T .

时间是云服务平台快速响应企业需求的重要指标之一, T 代表成员完成子任务所消耗的所有时间. T 的目标变量主要包括: 子任务执行时间 T_e 、等待成员执行子任务时间 T_w 与物流时间 T_l . 其中, T_e 代表成员在接到子任务信息输入后, 执行子任务并完成信息输出花费的时间; T_w 代表成员如果被其他任务共享使用, 则需要执行完成其他任务所需要的时间; T_l 代表如果某子任务完成后需要物流运输 (如, 样机模型) 花费的时间.

2) 成本 C .

成本是企业需要支付的所有服务费用, C 的目标变量主要包括: 团队成员服务费用 C_s 与物流费用 C_l . 其中, C_s 代表企业需要向各个成员支付的费用, C_l 代表产生物流运输需要支付的费用.

3) 质量 Q .

质量是衡量团队成员综合能力的重要指标, 该指标可以直接反应出成员是否有能力执行相应的子任务, 也是评判设计制造服务品质的依据. Q 的目标变量包括: 专业能力 Q_p 、工作经验 Q_e 、满意度 Q_s . 其中 Q_p 代表成员在产品设计制造中某领域解决问题的能力; Q_e 代表成员在某领域工作的时间; Q_s 代表成员以往完成的任务得到用户的认可度.

除了以上 3 项基本的成员优选指标外, 根据

团队成员社交化特点,还选取可靠性、协作性与共享性作为成员优选指标。

4) 可靠性 R .

在网络环境的服务交易中,用户高度注重团队成员的安全可信.同时,设计与制造环节涉及诸多的知识产权归属与技术保密问题.因此,可靠性是判断团队成员安全性与信誉的重要指标. R 的目标变量主要包括:任务执行可靠性 R_t 、任务信息保密性 R_s 与成员信用度 R_c .其中 R_t 反映团队成员在执行子任务过程中,是否能按照规定时间完成高质量的工作; R_s 反映成员在以往的执行子任务过程中是否有技术泄密或知识产权纠纷记录; R_c 反映成员是否能按照用户要求完成相关任务。

5) 协作性 O .

协作性是衡量团队成员在网络化环境中的协同合作能力,该指标综合反应出成员在团队中的沟通能力,也是团体中各成员间知识共享与补充的重要环节. O 的目标变量包括:交流沟通能力 O_t 、协同合作能力 O_s 与协同合作次数 O_n .其中 O_t 代表成员在协同合作过程中社交化的沟通能力; O_s 代表成员团队合作能力; O_n 代表成员在以往工作中与其他成员的合作次数。

6) 共享性 S .

在 CBDM 环境中,由于存在大量的任务需求,部分团队成员可能会被不同的任务共享选择并使用.共享性一方面可以反映出团队成员在 CBDM 环境中的综合服务能力,另一方面也反映出团队成员是否准备就绪可以立即使用.如果团队成员被多个不同的任务共享使用,则由时间指标中的 T_w 表示完成在执行中的共享任务需要的时间.共享性指标的目标变量为 S , S 代表了团队成员被多个任务共享使用的情况。

由于 CBDM 模式中团队成员具有多项优选指标,各指标也存在若干项目标变量.团队成员优选指标需要在若干目标变量取值范围内尽可能取得最优值.因此,团队成员优选模型是由优选指标、目标变量与约束条件组成,由 u 个目标变量, c 个约束条件组成的团队成员优选模型,其数学描述如下:

$$\begin{cases} \min F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_u(x)]^T, \\ \text{s.t. } H(x) = [h_1(x), h_2(x), \dots, h_m(x)] \geq 0, \\ G(x) = [g_1(x), g_2(x), \dots, g_k(x)] \leq 0, \\ m+k=c. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F(x)$ 表示多目标优选指标函数, $f_u(x)$ 为待优化的目标变量函数; $H(x)$ 与 $G(x)$ 表示不同优

化方向下目标变量的约束条件函数, $h_m(x)$ 与 $g_k(x)$ 为目标变量 $f_u(x)$ 不同方向优化的约束条件; m 与 k 为不同优化方向下目标变量的约束条件数量, c 为所有目标变量的约束条件总和。

在 CBDM 模式下,云服务平台需要对成员各个优选指标及其目标变量进行综合全面的权衡,使各目标变量最大程度上达到均衡的最优,团队成员选择指标优化向如图 3 所示。

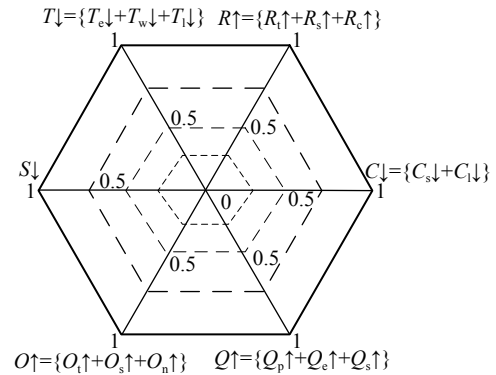


图 3 团队成员指标优化方向

Fig.3 Team member index optimization direction

2.2 团队成员优选指标体系及计算方法

在 CBDM 模式下的云服务平台中,参与任务的团队成员优选指标数据由平台来进行处理与存储.根据各指标的特点,其中一部分目标变量的数据通过成员已完成的任务评价情况进行累计获得,另一部分目标变量的数据由团队成员自主向云服务平台提交。

通过对现有相关文献的研究,子任务在云服务平台中通常存在 4 种关系^[2, 20-21, 23],对应子任务 4 种关系的优选指标的数学描述如下。

1) 时间.

总服务时间 $T=T_e+T_w+T_l$,其中 T_e 为成员以前处理相似任务的时间数据平均值, T_w 为云服务平台统计得到的等待成员执行子任务的时间数据, T_l 为云服务平台通过计算地理位置距离得到的物流时间数据,子任务 4 种关系下时间指标的计算公式如下:

$$\min T = \begin{cases} \sum_{i=1}^n [T_e(i) + T_w(i) + T_l(i)] & (\text{串行关系}), \\ \max [T_e(i) + T_w(i) + T_l(i)] & (\text{并行关系}), \\ \sum_{i=1}^n [T_e(i) + T_w(i) + T_l(i)] \times P_i & (\text{选择关系}), \\ K_i \times \sum_{i=1}^n [T_e(i) + T_w(i) + T_l(i)] & (\text{循环关系}). \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_i 为团队成员被选中的概率 ($P_i \leq 1$), K_i 为团队成员循环使用的次数 ($K_i \geq 0$).

2) 成本.

服务成本 $C=C_s+C_l$, 其中 C_s 为成员向云服务平台提交的预计服务费用数据, C_l 为云服务平台通过计算地理位置距离得到的物流成本数据, 子任务 4 种关系下成本指标的计算公式如下:

$$\min C = \begin{cases} \sum_{i=1}^n [C_s(i) + C_l(i)] & (\text{串行关系}), \\ \sum_{i=1}^n [C_s(i) + C_l(i)] & (\text{并行关系}), \\ \sum_{i=1}^n [C_s(i) + C_l(i)] \times P_i & (\text{选择关系}), \\ K_i \times \sum_{i=1}^n [C_s(i) + C_l(i)] & (\text{循环关系}). \end{cases} \quad (3)$$

3) 质量.

服务质量 $Q=(Q_p+Q_e+Q_s)/N$, 其中 Q_p 为成员以前处理相似任务的质量数据平均值, Q_e 为成员在云服务平台中参与过任务的累计时间数据平均值, Q_s 为成员在云服务平台中参与过任务的综合评价数据平均值, N 为成员参与子任务的次数, 子任务 4 种关系下质量指标的计算公式如下:

$$\max Q = \begin{cases} \sum_{i=1}^n [Q_p(i) + Q_e(i) + Q_s(i)]/N & (\text{串行关系}), \\ \sum_{i=1}^n [Q_p(i) + Q_e(i) + Q_s(i)]/N & (\text{并行关系}), \\ \sum_{i=1}^n [Q_p(i) + Q_e(i) + Q_s(i)] \times P_i & (\text{选择关系}), \\ \sum_{i=1}^n [Q_p(i) + Q_e(i) + Q_s(i)]/N & (\text{循环关系}). \end{cases} \quad (4)$$

4) 可靠性.

成员可靠性 $R=(R_t+R_s+R_c)/N$, 其中 R_t 为成员以前处理相似任务的可靠性数据平均值, R_s 为成员在云服务平台中参与过任务的保密性数据平均值, R_c 为成员在云服务平台中参与过任务的信用度评价数据平均值, 子任务 4 种关系下可靠性指标的计算公式如下:

$$\max R = \begin{cases} \sum_{i=1}^n [R_t(i) + R_s(i) + R_c(i)]/N & (\text{串行关系}), \\ \sum_{i=1}^n [R_t(i) + R_s(i) + R_c(i)]/N & (\text{并行关系}), \\ \sum_{i=1}^n [R_t(i) + R_s(i) + R_c(i)] \times P_i & (\text{选择关系}), \\ \sum_{i=1}^n [R_t(i) + R_s(i) + R_c(i)]/N & (\text{循环关系}). \end{cases} \quad (5)$$

5) 协作性.

成员协作性 $O=n(O_t+O_s+O_n)/N_o$, 其中 O_t 为成员间交流沟通能力评价数据, O_s 为成员在云服务平台中通过专业知识帮助其他成员解决问题的能力评价数据, O_n 为成员在云服务平台中参与过任

务的次数, n 为成员在单独一项任务中被选择的次数, N_o 为成员在云服务平台中被选择的次数, 子任务 4 种关系下时间的计算公式如下:

$$\max O = \begin{cases} \prod_{i=1}^n n[O_t(i) + O_s(i) + O_n(i)]/N_o & (\text{串行关系}), \\ \min n[O_t(i) + O_s(i) + O_n(i)]/N_o & (\text{并行关系}), \\ \sum_{i=1}^n \{n[O_t(i) + O_s(i) + O_n(i)]/N_o\} \times P_i & (\text{选择关系}), \\ \min n[O_t(i) + O_s(i) + O_n(i)]/N_o & (\text{循环关系}). \end{cases} \quad (6)$$

6) 共享性.

成员共享性 $S=T_n(S_i)/T_s$, 其中 T_s 表示最近固定的时间(如两周内), S_i 表示团队成员在 T_s 时间内被共享使用的次数, T_n 表示团队成员在 T_s 时间内完成 S_i 次服务所用的总时间. 当 S 取值较大时表示无法预知团队成员在某个特定时间内是否可用, 当取值较小时表示团体成员一直可供使用. 子任务 4 种关系下共享性指标的计算公式如下:

$$\min S = \begin{cases} \prod_{i=1}^n T_n(S_i)/T_s & (\text{串行关系}), \\ \min [T_n(S_i)/T_s] & (\text{并行关系}), \\ \sum_{i=1}^n [T_n(S_i)/T_s] \times P_i & (\text{选择关系}), \\ \min T_n(S_i)/T_s & (\text{循环关系}). \end{cases} \quad (7)$$

团队成员优选模型由 6 项优选指标、15 项目标变量与 6 项约束条件组成, 即 $\text{Opt}[T, C, Q, R, O, S]$, 团队成员优化选择的总体目标是短周期、低成本、低共享性、高质量、高可靠性与协作性, 优选指标体系的数学模型如下:

$$\min F(x) = [T, C, Q, R, O, S]^T, \quad \left. \begin{aligned} \text{s.t. } T &\leq T_{\max}, C \leq C_{\max}, Q \geq Q_{\min}, \\ R &\geq R_{\min}, O \geq O_{\min}, S \leq S_{\min}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

3 社交化协作团队优化构建模型

3.1 团队优化构建模型

在 CBDM 模式下的社交化协作团队构建过程中, 团队构建的优化过程可以看作是由团队成员优选指标组成, 其中多项目标变量可以看作是优化决策的方向, 团队构建优化模型由优选目标下不同的目标变量复合组成. 因此, CBDM 模式下社交化协作团队优化构建模型如图 4 所示.

3.2 模型求解

在产品研发过程中, 2 个子任务之间具有串行、并联、选择与循环的关系, 多个子任务间的关系更加复杂化, 团队成员构建的方案也随之复杂

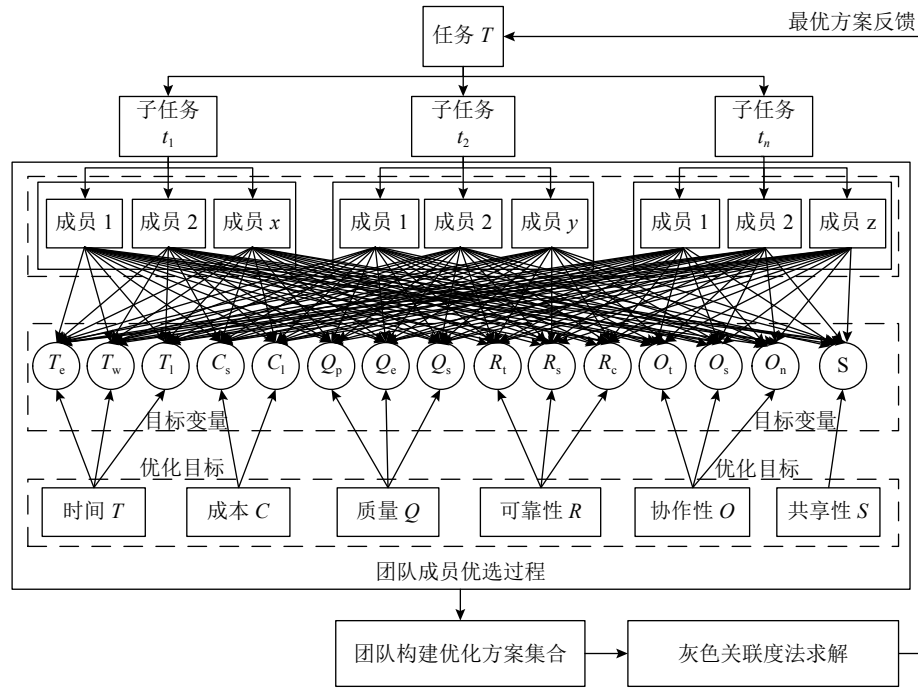


图4 社交化协作团队优化构建模型

Fig.4 Social collaborative team optimization structure mode

化. 因此, 在模型求解过程中, 需要先明确所有子任务间的工作流顺序. 根据工作流顺序、子任务与团队成员数量, 得到 $\prod_{j=1}^m K_j$ 种社交化协作团队构建方案, 所有方案都来自于团队成员优选模型. 同时, 由于各方案之间目标变量存在关联性, 难以直接判断并选出最优方案. 因此, 采用基于灰色关联度分析法求解. 该方法是一种描述各指标之间影响程度的分析法, 利用一部分已知数据去量化研究新的系统, 根据团队成员优选指标之间优化方向与目标变量来衡量彼此的关联程度. 求解大致思路如下: 先求团队构建的所有方案与最佳指标组成的理想方案关联系数, 再由关联系数推导出关联度, 最终依据关联度的取值大小完成最终团队构建方案的优化选择. 由于在 CBDM 环境中团队成员的优选指标包含定性与定量 2 种, 同时, 各优选指标之间不是相互独立, 而是存在一定的关联性, 采用灰色关联度分析法适用于 CBDM 环境中社交化协作团队构建中成员的优选问题^[23]. 具体求解的步骤如下.

1) 目标变量数据归一化.

由于 6 项优选目标之间度量单位的差异性, 在求解前需要进行归一化处理, 以消除单位的对计算过程的影响. 构建团队成员对应的目标变量信息矩阵 $Y=[y_{ij}]_{m \times n}$, 其中 y_{ij} 表示社交化协作团队 S_{CM}^i 对应目标变量 j 的权值, m 为社交化协作团队的数量, n 为目标变量的个数.

2) 对矩阵 Y 的数据进行规范化处理.

团队成员优选指标包括定性与定量 2 种类型, 根据指标的性质可以分为效益型指标与成本性指标^[23]. 其中, 效益型指标值越大越接近理想方案, 成本型指标值越小越接近理想方案. 将 $Y=[y_{ij}]_{m \times n}$ 矩阵中的元素进行规范化处理, 得到矩阵 $Y'=[y'_{ij}]_{m \times n}$, 其数学描述如下:

效益型指标 (值越大目标越优):

$$y'_{ij} = \begin{cases} \frac{y_{ij} - \min_j \{y_{ij}\}}{\max_j \{y_{ij}\} - \min_j \{y_{ij}\}}, & \max_j \{y_{ij}\} - \min_j \{y_{ij}\} \neq 0; \\ 1, & \max_j \{y_{ij}\} - \min_j \{y_{ij}\} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

成本型指标 (值越小目标越优):

$$y'_{ij} = \begin{cases} \frac{\max_j \{y_{ij}\} - y_{ij}}{\max_j \{y_{ij}\} - \min_j \{y_{ij}\}}, & \max_j \{y_{ij}\} - \min_j \{y_{ij}\} \neq 0; \\ 1, & \max_j \{y_{ij}\} - \min_j \{y_{ij}\} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

式中: i 表示第 i 个社交化协作团队, j 表示其对应的第 j 个目标变量权值; $\max_j \{y_{ij}\}$ 与 $\min_j \{y_{ij}\}$ 表示社交化协作团队 S_{CM}^i 在第 j 个目标变量的最大值与最小值.

3) 计算相对最优灰色关联度系数.

相对最优灰色关联度系数代表所有团队构建方案与最优指标组成理想方案的关联性. 根据式 (10)

计算得到社交化协作团队 S_{CM}^i 第 j 个目标变量与理想化最优的变量值的关联系数:

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |y'_{ij} - 1| + \rho \max_i \max_j |y'_{ij} - 1|}{|y'_{ij} - 1| + \rho \max_i \max_j |y'_{ij} - 1|}. \quad (11)$$

式中: ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 一般取值为 0.5^[23].

4) 确定目标变量权值.

目标变量之间的相对重要度具有差异性, 权重值可由专家打分评价或直接赋权获得. 假设目标变量的权值 $w=[w_1, w_2, \dots, w_l]^T$, l 为目标变量的个数. 本文采用直接赋权获得, 其数据可以通过云服务平台直接赋权得到^[7], 其中, $w \in [0, 1.0]$, 1.0 对应最优, 0 对应最差.

5) 计算灰色关联度.

$$r_i = \sum_{j=1}^l (\xi_{ij} \cdot w_j). \quad (12)$$

式中: r_i 表示第 i 个社交化协作团队构建方案的关联度, 关联度代表了所有团队构建方案与理想方案的接近程度. w_j 表示第 j 个目标变量的权值.

6) 团队构建方案关联度排序优选.

$$\text{Opt } S_C = \max \{r_1, r_2, \dots, r_i\}. \quad (13)$$

由灰色关联度 r_i 可以得到社交化协作团队构建方案在成员优选目标体系下的评价结果, 并根据 r_i 大小进行优选, r_i 值越大, 社交化协作团队构建方案越接近最优理想化方案.

4 应用案例

以医疗镇痛泵在云服务平台设计制造中社交化协作团队优化构建过程为应用案例. 该案例由医疗设备制造企业提出设计制造需求, 由云服务平台对任务与团队成员进行集中管理, 通过任务分解、成员检索匹配, 采用本文所提优化方法, 完成社交化协作团队的优化构建.

4.1 任务分解与成员检索匹配

由企业向云服务平台提交新型医疗镇痛泵的设计制造需求, 根据需求云服务平台将总任务具体分解为 6 个子任务, 分别为概念设计、造型设计、结构设计、人机工效设计、样机试制、模具设计, 对各子任务进行编号如表 1 所示.

通过对子任务间关系分析, 结合产品全生命周期研发活动过程, 6 项子任务间的信息输入输出关系与 workflow 顺序如图 5 所示.

由图 5 可知, 子任务间的关系主要为串行与

表 1 医疗镇痛泵设计制造子任务编号

Tab.1 Submission number of the design and manufacture of the medical analgesic pump

子任务编号	成员集合编号	名称
t_1	S_{CM}^1	概念设计
t_2	S_{CM}^2	造型设计
t_3	S_{CM}^3	结构设计
t_4	S_{CM}^4	人机工效设计
t_5	S_{CM}^5	样机试制
t_6	S_{CM}^6	模具设计

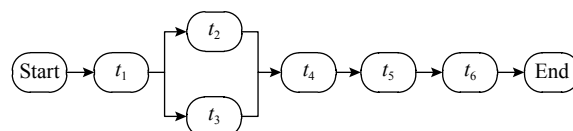


图 5 子任务间关系及 workflow 顺序

Fig.5 Relationship between subtasks and the workflow

并行关系, 其中子任务 t_2 与 t_3 为并行关系. 图中有向箭头代表了各个子任务之间信息的输入、输出方向, 以及子任务的工作流顺序.

根据表 2 可知, 子任务对应的候选团队成员

表 2 医疗镇痛泵设计制造子任务对应候选成员

Tab.2 Corresponding candidate members for medical analgesic pump design and manufacture of subtasks

子任务	成员集合	成员编号	候选成员
t_1	S_{CM}^1	M_1^1	设计公司 A
		M_2^1	大学 A
t_2	S_{CM}^2	M_1^2	设计公司 A
		M_2^2	设计公司 B
		M_3^2	设计研究所 A
t_3	S_{CM}^3	M_1^3	设计公司 B
		M_2^3	设计公司 C
		M_3^3	大学 B
t_4	S_{CM}^4	M_1^4	设计研究所 A
		M_2^4	大学 A
t_5	S_{CM}^5	M_1^5	CNC 公司
		M_2^5	3D 打印公司
t_6	S_{CM}^6	M_1^6	设计公司 B
		M_2^6	制造企业 A
		M_3^6	制造企业 B

集合,云服务平台通过匹配检索技术寻找符合子任务要求的候选团队成员,候选成员共检索到有 15 个,如表 2 所示.

根据图 6 中子任务关系、 workflow 顺以及参与任务的候选成员数量,并采用 1.2 章节中的计算方法,可以得到社交化协作团队构建的方案数量为 $\prod_{j=1}^m K_j$ 种,即 144 种方案.

4.2 建立社交化协作团队成员优选指标体系

在医疗镇痛泵的设计制造子任务集下,云服务平台聚集了可提供服务的 15 名团队候选成员.根据表 1 中的指标体系以及式(1)~(8),云服务平台建立面向医疗镇痛泵产品研发的社交化协作团队成员优选指标体系,其中目标变量的数据通过云服务平台数据库获得.由于各优选目标的数据计量单位不统一,目标变量中时间、成本的计量单位为元与小时,其他 3 项目标的计量为 5 分打分制.因此,需要对原始目标变量的数据进行

归一化处理.医疗镇痛泵任务的社交化协作团队成员优选指标体系与归一化参数如表 3 所示.

4.3 团队构建最优方案求解

根据图 4 与图 5 可以得到 144 种团队构建方案示意图,如图 6 所示.

将归一化后的目标变量参数采用式(9)、(10)进行规范化处理,再应用式(11)计算得到相对最优灰色关联度系数,式(11)中的分辨系数 ρ 取值为 0.5.通过云服务平台直接赋权得到目标变量的权值, $w=[0.113, 0.045, 0.01, 0.165, 0.065, 0.102, 0.015, 0.102, 0.101, 0.023, 0.036, 0.023, 0.103, 0.054, 0.049]$.由式(12)计算得到 144 种方案与理想最优的团队构建方案接近程度值,如表 4 所示.表 4 中方案 1 代表的团队构建方案为 $\{M_1^1, M_2^1, M_3^1, M_1^4, M_2^5, M_3^6\}$,即由 {设计公司 A, 设计公司 B, 设计研究所 A, CNC 公司} 组成社交化协作团队,144 种方案都以此类推进行排序.

表 3 团队候选成员的指标体系与归一化参数
Tab.3 Index system and normalized parameters of team members

优选指标	T			C		Q			R			O			S
目标变量	T_e	T_w	T_l	C_s	C_l	Q_p	Q_e	Q_s	R_t	R_s	R_c	O_t	O_s	O_n	
M_1^1	0.20	0.04	0.00	0.52	0.00	0.30	0.20	0.20	0.27	0.12	0.11	0.20	0.11	0.06	0.02
M_2^1	0.70	0.08	0.00	0.37	0.00	0.33	0.12	0.18	0.37	0.22	0.21	0.11	0.19	0.22	0.05
M_1^2	0.30	0.06	0.00	0.48	0.00	0.40	0.09	0.15	0.23	0.27	0.29	0.25	0.09	0.01	0.04
M_2^2	0.40	0.02	0.00	0.55	0.00	0.28	0.22	0.17	0.31	0.09	0.10	0.29	0.05	0.04	0.32
M_3^2	0.80	0.07	0.00	0.33	0.00	0.42	0.33	0.09	0.18	0.29	0.21	0.19	0.21	0.31	0.26
M_1^3	0.40	0.02	0.00	0.62	0.00	0.44	0.14	0.33	0.20	0.28	0.30	0.31	0.14	0.09	0.37
M_2^3	0.33	0.01	0.00	0.55	0.00	0.39	0.28	0.11	0.26	0.20	0.19	0.27	0.21	0.11	0.26
M_3^3	0.80	0.07	0.00	0.34	0.00	0.20	0.18	0.22	0.19	0.26	0.27	0.14	0.27	0.31	0.43
M_1^4	0.44	0.01	0.00	0.28	0.00	0.35	0.22	0.30	0.24	0.29	0.18	0.13	0.31	0.27	0.02
M_2^4	0.51	0.20	0.00	0.22	0.00	0.44	0.18	0.22	0.20	0.21	0.15	0.12	0.23	0.33	0.08
M_1^5	0.30	0.02	0.02	0.45	0.01	0.39	0.31	0.15	0.40	0.10	0.19	0.34	0.22	0.19	0.01
M_2^5	0.10	0.00	0.02	0.86	0.01	0.20	0.09	0.35	0.22	0.09	0.14	0.21	0.29	0.09	0.00
M_1^6	0.33	0.01	0.00	0.42	0.00	0.29	0.30	0.20	0.33	0.04	0.20	0.31	0.24	0.22	0.00
M_2^6	0.40	0.02	0.00	0.37	0.00	0.22	0.36	0.19	0.41	0.01	0.25	0.24	0.21	0.19	0.01
M_3^6	0.47	0.00	0.00	0.51	0.00	0.31	0.29	0.27	0.38	0.05	0.31	0.33	0.16	0.22	0.00

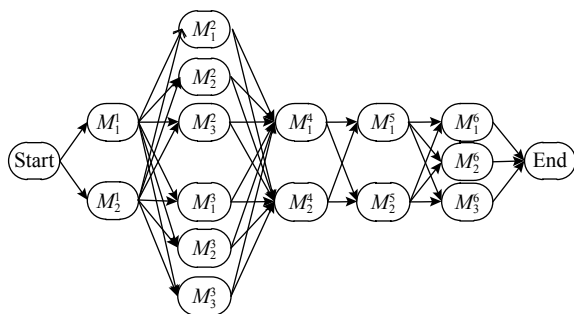


图6 团队构建方案示意图

Fig.6 Team building schematic diagram

表4 144种团队构建方案与理想最优方案接近程度值

Tab.4 Proximity values of 144 team building schemes and ideal optimal solutions

方案	r_i	方案	r_i	方案	r_i	方案	r_i
1	0.473 1	5	0.541 1	141	0.446 9
2	0.512	6	0.547 1	89	0.566 9	142	0.422 9
3	0.501 1	7	0.410 1	90	0.591 2	143	0.436 1
4	0.538	8	0.454 4	144	0.404 8

由表4可知,所有方案与理想最优方案的关联度值,通过式(13)可得出最优的医疗镇痛泵任务社交化协作团队构建方案为90.第90号的团队构建方案为 $\{M_1^1, M_3^2, M_2^3, M_1^4, M_2^5, M_3^6\}$,即医疗镇痛泵的子任务概念设计、造型设计、结构设计、人机工效设计、样机试制、模具设计,分别由设计公司A、设计研究所A、设计公司C、设计研究所A、3D打印公司与制造企业B组成社交化协作团队共同完成.

5 结 语

本文在分析CBDM模式服务流程、体系与协作团队成员特点的基础上,提出了一种云服务平台环境下团队优化构建方法.通过对团队成员优化指标中的目标变量进行量化分析,建立了一种面向成员能力与服务质量的优选指标体系.同时,构建了一种社交化协作团队优化模型,并结合优选指标体系采用灰色关联度法对优化模型求解,得到最优的社交化协作团队构建方案.最终,以医疗镇痛泵研发任务的团队优化构建过程为例,验证了所提方法的有效性与正确性.但本研究主要是面向单任务的团队构建优化模型,对多任务复杂情况下的团队优化构建问题,以及共享

性与队成员综合服务能力之间的关系将是下一步探索与研究的重点.

参考文献 (References):

- [1] WU D, ROSEN D W, WANG L, et al. Cloud-based design and manufacturing: a new paradigm in digital manufacturing and design innovation [J]. **Computer-Aided Design**, 2015, 59(C): 1-14.
- [2] 陈健, 莫蓉, 初建杰, 等. 工业设计云服务平台协同任务模块化重组与分配方法[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(3): 720-730.
- CHEN Jian, MO Rong, CHU Jian-jie, et al. Modular restructuring and distribution method of collaborative task in industrial design cloud platform [J]. **Computer Integrated Manufacturing System**, 2018, 24(3): 720-730.
- [3] BUYYA R, YEO C S, VENUGOPAL S, et al. Cloud computing and emerging IT platforms: vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility [J]. **Future Generation Computer Systems**, 2009, 25(6): 599-616.
- [4] 李伯虎, 张霖, 任磊, 等. 再论云制造[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 11(3): 449-457.
- LI Bo-hu, ZHANG Lin, REN Lei, et al. Further discussion on cloud manufacturing [J]. **Computer Integrated Manufacturing System**, 2011, 11(3): 449-457.
- [5] 张丽娜, 余阳. 海量O2O服务组合的优化[J]. 浙江大学学报:工学版, 2017, 51(6): 1259-1268.
- ZHANG Li-na, YU Yang. Optimization of massive O2O service composition [J]. **Journal of Zhejiang University: Engineering Science**, 2017, 51(6): 1259-1268.
- [6] 杜瑞忠, 田俊峰, 张焕国. 基于信任和个性偏好的云服务选择模型[J]. 浙江大学学报:工学版, 2013, 47(1): 53-61.
- DU Rui-zhong, TIAN Jun-feng, ZHANG Huan-guo. Cloud service selection model based on trust and personality preferences [J]. **Journal of Zhejiang University: Engineering Science**, 2013, 47(1): 53-61.
- [7] 刘敬, 余隋怀, 初建杰, 等. 设计云服务平台下的网络团队成员优选决策[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(6): 1205-1215.
- LIU Jing, YU Sui-huai, CHU Jian-jie, et al. Member optimal selection of network team [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2017, 23(6): 1205-1215.
- [8] QUELIN B. Core competencies, R&D management and partnerships [J]. **European Management**

- Journal**, 2000, 18(5): 476–487.
- [9] CHEN S J, LIN L. Modeling team member characteristics for the formation of a multifunctional team in concurrent engineering [J]. **IEEE Transactions on Engineering Management**, 2004, 51(2): 111–124.
- [10] FENG B, JIANG Z Z, FAN Z P, et al. A method for member selection of cross-functional teams using the individual and collaborative performances [J]. **European Journal of Operational Research**, 2010, 203(3): 652–661.
- [11] WANG Z, YAN H S, MA X D. A quantitative approach to the organisation of cross-functional teams in concurrent engineering [J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2003, 21(10-11): 879–888.
- [12] 张倩, 齐德昱. 面向服务的云制造协同设计平台[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39(12): 75–81.
ZHANG Qian, Qi De-yu. Service oriented cloud manufacturing collaborative design platform [J]. **Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition**, 2011, 39(12): 75–81.
- [13] ARDAGNA D, PERNICI B. Adaptive Service composition in flexible processes [J]. **IEEE Transactions on Software Engineering**, 2007, 33(6): 369–384.
- [14] TAO F, ZHAO D, HU Y, et al. Resource service composition and its optimal-selection based on particle swarm optimization in manufacturing grid system [J]. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2009, 4(4): 315–327.
- [15] 郑维强, 冯毅雄, 谭建荣, 等. 制造资源混合粒度优化组合方案求解技术[J]. **计算机辅助设计与图形学学报**, 2012, 24(3): 281–289.
JIA Wei-qiang, FENG Yi-xiong, TAN Jian-rong, et al. Scheme solving technology for clustering optimization of manufacturing resources with hybrid granularities [J]. **Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics**, 2012, 24(3): 281–289.
- [16] 刘波. 云制造环境中面向多任务的服务组合与优化技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
LIU Bo. Study on multi-task oriented services composition and optimization in cloud manufacturing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [17] 贺东京, 宋晓, 王琪, 等. 基于云服务的复杂产品协同设计方法[J]. **计算机集成制造系统**, 2011, 17(3): 533–539.
HE Dong-jing, SONG Xiao, WANG Qi, et al. Method for complex product collaborative design based on cloud service [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2011, 17(3): 533–539.
- [18] TU Y L, KAM J J. Manufacturing network for rapid tool/die making [J]. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 2006, 19(1): 79–89.
- [19] 易树平, 谭明智, 郭宗林, 等. 云制造服务平台中的制造任务分解模式优化[J]. **计算机集成制造系统**, 2015, 21(8): 2201–2212.
YI Shu-ping, TAN Ming-zhi, GUO Zong-lin, et al. Manufacturing task decomposition optimization in cloud manufacturing service platform [J]. **Computer Integrated Manufacturing System**, 2015, 21(8): 2201–2212.
- [20] 易安斌. 云制造资源服务组合优化选择问题研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2016.
YI An-bin. Research on resource service composition optimal-selection problem in cloud manufacturing [D]. Guangdong: South China University of Technology, 2016.
- [21] 尹超, 张云, 钟婷. 面向新产品开发的云制造服务资源组合优选模型[J]. **计算机集成制造系统**, 2012, 18(7): 1368–1378.
YIN Chao, ZHANG Yun, ZHONG Ting. Optimization model of cloud manufacturing services resource combination for new product development [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2012, 18(7): 1368–1378.
- [22] WANG X, VITVAR T, KERRIGAN M, et al. A QoS-aware selection model for semantic web services [J]. **Lecture Notes in Computer Science**, 2006, 4294/2006: 390–401.
- [23] 吴英. 基于众包的云制造运作模式及其服务组合研究[D]. 安徽: 安徽工程大学, 2016.
WU Ying. Research on operation mode of cloud manufacturing based on crowdsourcing and its service composition [D]. Anhui: Anhui Polytechnic University, 2016.