

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.10.002

考虑主体属性及与任务匹配的产品协同设计效率

邢青松^{1,2}, 杨育¹, 刘爱军¹, 于国栋¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆交通大学管理学院, 重庆 400074)

摘要:设计主体的属性特征与设计任务间匹配程度是影响产品协同创新设计效率的重要因素。对设计主体进行属性特征分析、分类和对不同类型组合定量计算,在定义设计任务特征属性的基础上建立以产品协同创新设计总体持续时间最短为目标的效率模型,并设计基于 PSO 算法的模型求解方法。以某公司风机机舱的协同创新设计为例,验证了考虑主体属性及与任务匹配情况下的产品协同创新可缩短设计周期,提高设计效率。

关键词:产品协同创新;设计主体;设计任务;效率

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)10-008-08

Efficiency of product collaborative innovation design based on the attribute and matching task

XING Qingsong^{1,2}, YANG Yu¹, LIU Aijun¹, YU Guodong¹

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. School of Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The degrees that the design agent capacity matches the design task are an important factor affecting the efficiency of collaborative product innovation design. The classification and quantitative calculation of different types of design agent capacity combination is carried out after the characteristic of design agent is analyzed. An efficiency model whose goal is the shortest entire time is constructed based on the definition of task attribute, and then the solving method of efficiency model are designed based on particle swarm optimization algorithm. The collaborative product innovation design of cabin is taken as an example to prove that considering the matching agent attribute with task can shorten the design cycle and improve design efficiency.

Key words: product collaborative innovation; design agent; design task; efficiency

市场的繁荣和技术的飞速发展使产品的复杂程度不断增加,产品创新需要处理的信息量越来越大,分工也越来越细化,单个企业难以独立完成产品的研发和制造,需要充分利用客户、供应商和科研院所等单位 and 主体的力量来协同创新。因此,围绕跨组织和单位的产品协同设计研究已成为产品开发领域

的重要方向^[1]。侯亮等^[2]以产品设计任务分解和分配为切入点,通过考虑不同任务间的交互和影响,基于模糊匹配方法对跨组织产品协同设计任务的分解及协同供应商的选择和匹配进行了研究;梁学栋等^[3]针对分布式协同设计环境下多任务复杂交叉协调困难的问题,在考虑协同任务之间的耦合关系基

收稿日期: 2013-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(71071173);重庆市重点科技攻关项目(2010GGB108);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090191110004)

作者简介: 邢青松(1983-),男,重庆大学博士研究生,主要从事协同设计、产品创新、生产建模仿真等研究,
(E-mail) xingqingsong_2003@126.com。

基础上,采用灰关联分析法对协同设计任务权重赋值,并对带权设计任务进行排序,以优化产品协同创新设计总体时间;宋李俊等^[4]在不考虑主体性格、能力等属性特征的情况下,通过主观赋予任务权重和确定任务剩余处理时间,采用最小化完工时间的在线排序方法研究了不同状态的协同设计任务排序,以期缩短产品开发周期,提高产品设计效率;JOGLEKAR N R 等^[5]将主体视为设计资源的其中一种,依据设计任务的优先度来构建产品协同设计效率资源最优配置模型;MING, YAN 等^[6]基于产品生命周期理论,并考虑产品设计的技术特征,对协同设计及制造的过程框架进行了系统的定性描述,但缺乏对产品设计时间及设计效率方面的定量分析;庞辉等^[7]在建立设计任务网络图的基础上,综合考虑协作项目间、任务间及任务自身的具体因素和约束,基于均衡-适度原则建立了任务到团队成员分配的扩展数学模型,并利用匈牙利算法进行求解;FATIH 等^[8]考虑构成协同设计任务完成时间节点的非精确性,在引入时间模糊集的基础上,运用模糊时间 Petri 网和动态规划相结合的方法,建模构建了旨在缩短产品设计周期的效率模型;蒋增强等^[9]在考虑产品开发成本和质量的基础上,将协同产品设计过程视为柔性作业车间的多目标机加工优化问题,并运用混合智能算法来求解,以期节约产品开发成本,提高产品创新设计效率;HUANG 等^[10]通过对设计任务特征进行分析,确定其相互间的依赖关系和优先级,并在此基础上采用 Web 服务本体描述语言及相关调度算法,设计开发了产品协同设计周期集成管理系统,以控制产品设计周期,提高产品设计效率。

目前关于产品协同创新设计效率的研究主要从设计任务优先度及其相互间依赖关系入手,运用各种相关算法对其以类作业车间的机加工问题进行建模并求解,进而获得更优的任务分解和分配排程,实现设计效率的提升。但产品协同创新设计任务分配与作业车间调度问题并非完全相同,它们存在着一定差异,例如作业车间中同种类型的机加工设备对工件的加工基本没有差别,而协同设计主体间在技术创新能力、协同工作能力和设计工具使用时的熟练程度方面等就存在较大差异。因此,在上述研究的基础上,笔者从微观角度对设计主体为个体的参与产品协同设计时的效率进行了研究。通过分析设计主体和设计任务的属性特征,分类和定量计算主体能力和性格特征,以寻求设计主体和任务的合理匹配,在此基础上,借鉴机加工作业车间调度思想,建立以产品协同创新设计总体持续时间最短为目标的效率模型,并通过某公司风机机舱的协同创新设

计验证所提方法的正确性和有效性。

1 产品协同创新设计的主体属性

产品协同创新设计作为典型的人机复杂系统。从实体角度来看,主要包括创新设计主体、任务和资源等;从虚拟系统的角度来看,包括主体创造性、产品设计任务信息、协同组织机制、创新方法和技术等;从动力系统的角度来看,主要包括设计任务知识流、产品信息流和价值流等^[11-12]。从实体的微观角度考虑产品协同创新设计中作为个体的设计主体属性特征,并通过分析设计主体-任务的匹配关系,构建产品协同创新设计的效率模型。

1.1 产品协同创新设计主体第一属性

产品协同创新设计作为深度集成多主体的产品创新设计模式,强调各设计主体间的全方位协同工作。然而,由于团队成员不仅有企业和科研院所的专业设计人员,而且有性别、年龄、地域、知识背景和兴趣爱好不同的客户,参与设计的主体特征呈现多样性和异质性。产品协同创新设计过程不仅是设计任务和资源的分解、分配、调度及管理过程,而且是依据设计主体本人性格、经验和技能对产品设计任务进行协同分析、推理、整合、创新设计的过程,并通过上述过程影响着产品协同创新设计的效率。由此可见,设计主体和设计任务的合理匹配对提升产品协同创新设计效率的研究具有重要意义。

在产品协同创新设计中,可以从 2 个方面定义设计主体的属性,即第一属性和第二属性:第一属性主要是指设计主体的做事属性,包括基本工作能力、创新工作能力和协同工作能力;第二属性主要是指设计主体的为人属性,即性格属性,包括主动决策性格和被动服从性格。

定义 1 产品协同设计主体的属性集合(Attribute Set, AS)为 $A = \{F, S\}$,其中: F 为产品创新设计主体的第一属性集合; S 为产品创新设计主体的第二属性集合。

设计主体的第一属性集合可以通过定义 $F = \{B_{ag}, I_{ag}, C_{ag}\}$ 表示,其中: B_{ag} 为设计主体的基本工作能力; I_{ag} 为设计主体的创新工作能力; C_{ag} 为设计主体的协同工作能力。

1) 基本工作能力 B_{ag} 。基本工作能力是指设计主体通过教育获得的专业理论知识,并与所从事工作的具体实践经验相结合形成的能成功处理专业领域内的普通技术问题的能力。

2) 创新工作能力 I_{ag} 。创新工作能力是指设计主体运用自身形象思维、逻辑思维、抽象思维和系统

思维,并借助一定的创新理论、方法和工具,在借鉴其他相关行业领域知识的基础上,创造性解决产品创新设计问题的能力。设计主体创新工作能力的评价可以从以下 3 个方面进行。

①领域知识的广度:设计主体自身拥有的与产品创新设计任务相关的各类显性知识和隐性知识,既有产品设计专业内知识,又包含美学、色彩学、材料学、人因学和结构力学等与产品设计相关学科领域的知识。设计主体的知识广度是产品创新设计时形象思维、抽象思维和系统思维的基础,也直接影响逻辑思维的严谨程度,从而反映出设计主体的创新工作能力。

②领域知识的高度:指设计主体不仅能够运用技术、工具层面的相关知识处理创新设计任务,而且能通过理论和方法层面来系统和全局地解构、处理产品的创新设计任务。

③领域知识的深度:指设计主体可以洞悉自身承担设计任务的微小调整给整个产品创新设计带来的变化、返工及调整的能力,它是设计主体严谨逻辑思维的具体体现,也是其创新工作能力的一种表现。

3)协同工作能力 C_{ag} 。产品创新设计中的协同工作主要有 2 个方面。

①基于任务关系的协同,由于产品设计任务之间存在联系,A 在执行产品设计任务时,需要与其任务具有依赖关系的设计主体 B 进行过程及数据协同^[4]。

②互助性的协同,此类协同主要指因设计任务的难易度、优先度和重要度等原因,为缩短总体任务完成时间而执行的任务过程中不同性格和能力特征的设计主体人力资源调配和协同。

1.2 协同产品创新设计主体第二属性

设计主体的第二属性 S 主要是指产品创新设计过程中设计主体的为人属性,也叫性格属性。对此,国内外学者做了大量相关研究^[13-14],以文献^[13]所提出的基于多元统计分析的 4 种性格属性定量计算方法应用较为广泛。文中在上述研究的基础上将设计主体的性格属性分为下述 2 大类 6 属性。

定义 2 $S = \{I_{ch}, P_{ch}\}$,其中: I_{ch} 为主动决策性格,主要包括果断型、中型和优柔型; P_{ch} 为被动服从性格,主要包括自觉型、合作型和服从型。

1.3 产品协同创新设计主体属性的定量计算

对设计主体的属性进行分析之后,采用专家模糊评价方法对设计主体进行定量评价,在此基础上对不同性格属性的设计主体间协同的进行定量计算,为建立产品协同创新设计效率模型奠定基础。

基于专家模糊评价的主体属性特征效用值可以

分为 5 个等级:“很差(VP)”“较差(P)”“中等(F)”“较好(G)”“很好(VG)”,如表 1 所示。

表 1 设计主体的专家模糊评价效用等级值

主体属性	设计主体的专家评语效用值等级				
	(0.8,1)	(0.6,0.8)	(0.4,0.6)	(0.2,0.4)	(0,0.2)
基本工作能力	很好	较好	中等	较差	很差
创新工作能力	很好	较好	中等	较差	很差
协同工作能力	很好	较好	中等	较差	很差

设 f_i 为第 i 位设计主体的第一属性值, $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ 为 m 个来自不同领域的创新设计主体构成的能力属性全域空间,对于每个设计主体的第一属性能力值,可记为 $f_{ij} = [t_{ij}, \bar{t}_{ij}]$ 。为了便于评价分析,文中采用最大最小值方法将上述属性能力值进行标准化、归一化处理。

$$\begin{cases} \underline{t}'_{ij} = \frac{t_{ij} - \bigwedge_{i=1}^m t_{ij}}{\bigvee_{i=1}^m t_{ij} - \bigwedge_{i=1}^m t_{ij}}, \\ \bar{t}'_{ij} = \frac{\bar{t}_{ij} - \bigwedge_{i=1}^m \bar{t}_{ij}}{\bigvee_{i=1}^m \bar{t}_{ij} - \bigwedge_{i=1}^m \bar{t}_{ij}}, \end{cases}$$

式中: $\bigwedge_{i=1}^m t_{ij}$ 和 $\bigwedge_{i=1}^m \bar{t}_{ij}$ 表示设计主体的第 j 个属性能力指标中的区间模糊数的左右区间最小值; $\bigvee_{i=1}^m t_{ij}$ 和 $\bigvee_{i=1}^m \bar{t}_{ij}$ 表示设计主体的第 j 个属性能力指标中的区间模糊数的左右区间最大值;于是可以得到设计主体标准化处理后的全域空间, $f'_i = [\underline{t}'_{ij}, \bar{t}'_{ij}]$, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, 3$ 。

文献^[13]根据设计主体的性格属性分为对外联系、事物决策、信息追踪和焦点关注等 4 个方面的特征。文中将产品协同创新设计中不同设计主体的性格属性特征归纳为 6 个方面,如表 2 所示。

表 2 设计主体性格属性特征

性格属性	类型	表现特征	属性标识
主动决策性 I_{ch}	果断型	决策迅捷、善用规则、深入本质	J+F
	中矩型	决策一般、墨守成规、滞于本质	J+T
	优柔型	决策缓慢、囿于规则、困于本质	P+T
被动服从性 P_{ch}	自觉型	长于宏观,擅于沟通	N+E
	合作型	长于微观,擅于沟通	S+E
	服从型	长于微观,拙于沟通	S+I

其中:J 表示判断 (Judging),属于结果导向思维模式,直击事物本质,并迅速做出决定;F 表示感觉 (Feeling),事物或问题通过感官刺激后的类天赋似的跃迁思维模式;T 表示思考 (Thinking),在明确了事物的原则和标准后,可通过赋予严谨的客观的逻辑推理来抓住事物或问题的本质;P 表示感知 (Perceiving),属过程导向思维模式,比较发散多变,做决定较慢;N 表示直觉 (iNtuitive),是一种对事物或问题整体简约直观思维模式;E 表示外向 (Extrovert),善于与人交流和沟通,处事积极乐观为人;S 表示理智 (Sensing),对细微事物感触灵敏、注重细节、思虑周详;I 表示内向 (Introvert),羞于与人交流和沟通、处事被动、为人木讷。

根据设计主体性格类型的不同表现特征,可以分别得到主动决策性 I_{ch} 和被动服从性 P_{ch} 的属性向量,然后借鉴文献[13]的定量计算方法,对设计主体

的不同性格属性符号的组合进行赋值,即:

$$I_{ch} = (\alpha_{J+F}, \alpha_{J+T}, \alpha_{P+T}) = \begin{bmatrix} \alpha_{J+F} & \alpha_{J+T} & \alpha_{P+T} \\ \alpha_{J+F} & \delta \cup \theta & \delta \cup \delta & \bar{\delta} \cup \delta \\ \alpha_{J+T} & \delta \cup \delta & \delta \cup \theta & \bar{\delta} \cup \theta \\ \alpha_{P+T} & \bar{\delta} \cup \delta & \bar{\delta} \cup \theta & \delta \cup \theta \end{bmatrix}$$

其中 $\delta=9, \theta=3, \bar{\delta}=-3$;

$$P_{ch} = (\beta_{N+E}, \beta_{S+I}, \beta_{S+E}) = \begin{bmatrix} \beta_{N+E} & \beta_{S+I} & \beta_{S+E} \\ \beta_{N+E} & \theta \cup \delta & \delta \cup \theta & \delta \cup \delta \\ \beta_{S+I} & \delta \cup \theta & \theta \cup \bar{\delta} & \theta \cup \theta \\ \beta_{S+E} & \delta \cup \delta & \delta \cup \theta & \delta \cup \delta \end{bmatrix}$$

其中 $\delta=9, \theta=3, \bar{\delta}=-3$ 。接着通过定义向量算子 \otimes 来构造设计主体的性格属性矩阵,可得到设计主体的性格属性赋值矩阵

$$I_{ch} \otimes P_{ch} = \begin{bmatrix} \alpha_{J+F}\beta_{N+E} & \alpha_{J+F}\beta_{S+I} & \alpha_{J+F}\beta_{S+E} & \alpha_{J+T}\beta_{N+E} & \alpha_{J+T}\beta_{S+I} & \alpha_{J+T}\beta_{S+E} & \alpha_{P+T}\beta_{N+E} & \alpha_{P+T}\beta_{S+I} & \alpha_{P+T}\beta_{S+E} \\ \alpha_{J+F}\beta_{N+E} & 24 & & & & & & & \\ \alpha_{J+F}\beta_{S+I} & 24 & 12 & & & & & & \\ \alpha_{J+F}\beta_{S+E} & 30 & 24 & 30 & & & & & \\ \alpha_{J+T}\beta_{N+E} & 30 & 30 & 36 & 24 & & & & \\ \alpha_{J+T}\beta_{S+I} & 30 & 18 & 24 & 24 & 24 & & & \\ \alpha_{J+T}\beta_{S+E} & 36 & 30 & 36 & 30 & 24 & 30 & & \\ \alpha_{P+T}\beta_{N+E} & 18 & 18 & 24 & 12 & 12 & 18 & 24 & \\ \alpha_{P+T}\beta_{S+I} & 18 & 6 & 6 & 12 & 0 & 6 & 24 & 12 \\ \alpha_{P+T}\beta_{S+E} & 24 & 18 & 24 & 18 & 12 & 18 & 30 & 24 & 30 \end{bmatrix}$$

2 产品协同创新设计中设计主体-任务的匹配

在产品协同创新设计过程中,由于不同任务间优先度、难易度、重要度及关联关系存在差异^[4],加上设计主体在各种工作能力和性格属性方面的不同,使设计主体和设计任务间的合理匹配成为产品协同创新设计效率提升的关键环节。

2.1 设计任务的属性特征

产品协同创新设计任务从上游到下游包含众多,且其相互之间存在着关联及影响。对此,文中通过下述定义来分析设计任务间的关联关系和特征。

定义 3 任务集 $T = \{T_i | 1 \leq i \leq n, i \in \mathbb{R}\}$ 表示所有任务组成的集合, n 表示任务数。

定义 4 任务特征集合 $T_{feat} = \{R, P, I, H\}$, 其中, $R = \{r_{ij} | 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n\}$, $i \in \mathbb{R}, j \in \mathbb{R}$ 表示各设计任务间的关联关系, n 表示设计任务数,并且

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{任务 } i \text{ 完成后才能安排任务 } j; \\ 0, & \text{任务 } j \text{ 的安排不受任务 } i \text{ 的影响。} \end{cases}$$

$P = \{p_k | 0 < p_k \leq 1, 1 \leq k \leq n, k \in \mathbb{R}\}$ 表示某一设计任务 T_i 相比与其他任务在整个设计排程中的优先程度。 I 表示设计任务的重要度,主要从 2 个方面衡量:一是任务占整个项目的时间,任务所占的时间越长越重要;二是任务在项目中的先后次序和关联度,在前面的任务对后面的任务均有直接或者间接的影响,且又有大量后续任务与其关联依赖,则表明该任务越重要。设 δ_{ik} 是任务 T_i 的预期完成时间; $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij}$ 表示整个项目中各设计任务的关联度之和, $\sum T_i$ 表示与任务 T_i 相关联的设计任务; Δ^{total} 表示整个协同设计项目的预期持续时间,可得设计任务重要度计算式

$$I = \left\{ I_{ik} \left| I_{ik} = \frac{\delta_{ik}}{\Delta^{total}} + \frac{\sum T_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij}} + \frac{p_{ik}}{\sum_{k=1}^n p_{ik}} \right. \right\},$$

$$1 \leq i, k \leq n; i, k \in \mathbb{R};$$

$H = \left\{ H_{ik} = \xi_{ik} \times \frac{\delta_{ik}}{\Delta^{total}} \right\}$ 表示设计任务的难易度,其

中 ξ_{ik} 表示设计任务 T_i 在产品协同创新过程中即需要设计主体协同工作数量,表现在设计主体属性上即为该设计任务对设计主体的各工作能力及性格属性要求的强度。

2.2 设计主体和任务间的匹配

在产品协同创新设计过程中,对某一设计任务来说,设计主体的各种能力和设计任务是否匹配、不同性格属性的设计主体间是否有效协同,对任务的执行时间具有比较显著影响。因此,尽可能寻求设计主体间及设计主体与任务间的合理匹配是缩短产品设计周期,提高协同创新设计效率的重要途径。

由于设计主体第二属性的匹配可通过前述其性格属性赋值的矩阵的归一化处理得到,在此主要针对设计主体的能力属性匹配进行定义计算。由前述可知,全部创新设计主体和设计任务的向量空间分别 $\mathbf{C}=(C_1, C_2, \dots, C_m), \mathbf{T}=(T_1, T_2, \dots, T_n)$ 。同时,对于 $\forall C_i \in \mathbf{C}, i=1, 2, \dots, m; \exists$ 该设计主体的属性特征向量空间 $\mathbf{C}_i=(f_i, s_i)=(B_{ag}^i, I_{ag}^i, C_{ag}^i, I_{ch}^i, P_{ch}^i); \forall T_j \in \mathbf{T}, j=1, 2, \dots, n$ 设计任务的属性特征向量空间 $\mathbf{T}_j=(r'_j, P_j, I_j, H_j)$,其中 $r'_j = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}}$,为标准化处理后的设计任务 j 的关联度。

定义 5 设计主体与设计任务间能力属性匹配

$\Omega_{C_1, C_2, \dots, C_m}^{match} = \sum_{l=1}^3 \epsilon_l \Omega_{\sum_k C_k^{match} l}$,其中 ϵ_l 是某项任务 T_j 对第 l 种能力的需求强度,即不同任务对某一主体的能力需求侧重点有所不同,可通过特征向量法对其进行计算^[15]。首先建立判断矩阵,并对所需求的能力属性间的重要度进行比较,如表 3 所示。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \text{基本能力} & \text{创新能力} & \text{协同能力} \\ \zeta_{11} & \zeta_{12} & \zeta_{13} \\ \zeta_{21} & \zeta_{22} & \zeta_{23} \\ \zeta_{31} & \zeta_{32} & \zeta_{33} \end{bmatrix}.$$

表 3 重要程度赋值

能力属性间比较	某任务对能力属性需求程度值					相邻值之间的重要性
	同重要	稍重要	较重要	很重要	极重要	
取值	1	3	5	7	9	2,4,6,8

然后,求解判断矩阵 \mathbf{A} 的最大特征值 λ_{\max} 所对应的特征向量,对其进行标准化,使特征向量的和为 1,并将标准化的特征向量近似地作为相对应的各项能力的权重 ϵ_l 。而 $\Omega_{C_1, C_2, \dots, C_m}^{match}$ 表示不同能力和性格属性的设计

主体 i_1, i_2, \dots, i_m 对某项任务 T_j 的匹配度。可由式 $\Omega_{C_1, C_2, \dots, C_m}^{match} = \text{Match}(C_i, T_j) = 1 - \frac{T_j - C_i}{\Sigma' - \Sigma}, T_j, C_i \in [\Sigma, \Sigma']$ 计算, $C_i \in [p_1, q_1]$ 设计主体某一能力属性的值; $T_j \in [p_2, q_2]$ 设计任务对某一能力属性的需求值, $\Sigma = \min(p_1, p_2), \Sigma' = \max(q_1, q_2), p, q$ 分别表示表 1 中模糊区间对应的区间值的上、下确界。

3 产品协同创新设计效率模型构建与求解

3.1 产品协同创新设计的效率模型构建

在未考虑产品开发成本的情况下,通过分析设计主体和设计任务属性特征,并进行定量计算使设计主体和设计任务合理匹配,以缩短产品协同创新设计任务的总体完成时间,既是产品协同创新设计效率提升的重要途径,也是衡量其设计效率的重要体现。建立总体持续时间最短为目标的产品协同创新设计效率模型为

$$\text{OPT} \varphi(\mathbf{T}, \mathbf{C}),$$

$$\min \left\{ \sum_{\lambda} [\max_{i \leq l \leq m} C_{\max}^{\lambda} [T_j, C_i]] \right\}, j = 2, \dots, n.$$

已知设计任务所预期完成需要的时间,以及依据设计任务关联度、重要度、紧急度和难易度得出的设计流程,各设计任务的设计次序约束集 $\Theta = (T'_1, T'_2, \dots, T'_n), j=1, 2, \dots, n, \lambda$ 为设计任务的设计阶段数; $C_{\text{ost}}^{\lambda}(T'_j, C_i)$ 为在某个设计阶段中设计任务 j 在某个设计主体 C_i 上的设计时间,即

$$C_{\text{ost}}^{\lambda}(T'_1, C_1) = T_{T'_1, C_1}, \quad (1)$$

同时需要满足以下 3 个约束条件。

1) 创新设计主体个人能力约束,即一个主体的前一个设计任务结束以后才能进行下一部分的设计。

$$\begin{cases} T_{\text{set}, T'_j, C_l} \geq T_{\text{finish}, T'_q, C_g}, \\ \mathbb{S}_{T'_j, C_l} = \mathbb{S}_{T'_q, C_g} = 1, \\ \mathbb{S}_{T'_j, l} = \begin{cases} 1, \text{操作 } D_{T'_j, l} \text{ 在创新主体 } L \text{ 手上设计,} \\ 0, \text{其他.} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $D_{T'_j, l}$ 为第 T'_j 设计任务在第 l 个设计主体的操作; $T_{\text{set}, T'_j, C_l}$ 为操作 $D_{T'_j, l}$ 的开始时间; $T_{\text{finish}, T'_j, l}$ 为操作 $D_{T'_j, l}$ 的完成时间; $T_{T'_j, C_l}$ 为操作 $D_{T'_j, l}$ 的加工时间。

2) 产品创新设计任务的序列约束。上一阶段最长持续时间的协同设计任务完成后才可进入后一阶段的协同设计任务。

$$C_{\text{ost}}^{\lambda} \left[\bigvee_{i=1}^m (T'_j, C_i) \right] - C_{\text{ost}}^{\lambda-1} \left[\bigvee_{i=1}^m (T'_j, C_i) \right] \geq \bigvee_{i=1}^m [P_{T'_j, i} + S_{T'_j, i}]. \quad (3)$$

3) 设计主体与设计任务匹配约束:在某一阶段

设计主体与设计任务合理匹配完成某项设计任务时间小于预期完成时间,即

$$C_{\text{ost}}^{\lambda} \left[\sum_i^{\xi_j} \sum_l^3 \epsilon_l \Omega_l^{\text{match}} (T'_j, C_i) \right] \leq \delta_i, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

3.2 基于 PSO 算法的模型求解步骤

产品协同创新设计效率模型中不同能力属性和性格属性的设计主体和设计任务进行合理匹配,并在相关条件的约束下,以总体持续时间最短为目标而进行的协同设计过程涉及到大量数据的组合优化计算。因此,有必要寻求适用的启发式算法进行求解,而粒子群最优化算法(particle swarm optimization, PSO)因具有操作简单、并行性好、参数少、收敛速度快、鲁棒性好等优点,成为组合优化问题和非线性优化问题的有效优化工具^[16]。它利用每个粒子本身的认知记忆功能及群体的合作行为形成群体寻优的正反馈机制来完成全局寻优过程,其思想与协同设计中多主体合作与协同的思想类似,更适合求解多主体参与的产品协同创新设计协调与优化问题。

设计如下 PSO 算法求解多主体参与的产品协同创新设计协同效率问题,以充分利用来自不同领域的设计主体的技术及创新能力提高产品协同创新设计的效率。 P 为 PSO 种群的大小; M 为参与产品协同设计的主体数; N 为分解后的设计任务数。由定义 3 设计任务为一个 N 维向量的搜索空间,在每一任务的搜索方向可供选择匹配的设计主体离散集合 $M = (C_1, C_2, \dots, C_m)$, PSO $[j]$ 为 PSO 群的第 j 粒子的位置, PSO $[j][i]$ 为设计主体 i 所匹配的设计任务; PSO 群被表示为一个包括 N 个粒子的 NM 排列,每一个粒子代表 N 个设计任务中的一个向量,且在一个 M 维搜索空间飞行。 $V[j]$ 为粒子 j 的旅行距离(或速率); G_{best} 表示全局最优位置; $P_{\text{best}}[j]$ 表示粒子 j 局部最优位置,即每一阶段与设计任务合理匹配的设计主体; $C_{\text{ost}}^{\lambda}(i, j)$ 为每一阶段设计主体完成与其匹配设计任务所需时间函数; $P_{\text{best}}_C_{\text{ost}}(i, j)$ 为由粒子所见到的局部最优时间函数。因此, N 个设计任务与 M 个设计主体的产品协同创新设计效率,可映射为在最短周期内 N 个粒子对应的 M 个最佳粒子位置。

步骤 1 对每一设计任务 j 从设计主体集合 M 随机初始化 PSO $[j][i]$, 并随机初始化每一粒子的速率 $V[j]$, 给定粒子群规模 N , 解空间维数 M , 局最优 G_{best} 和局部最优 $P_{\text{best}}[j]$, 最大进化代数 \max_{iter} 。

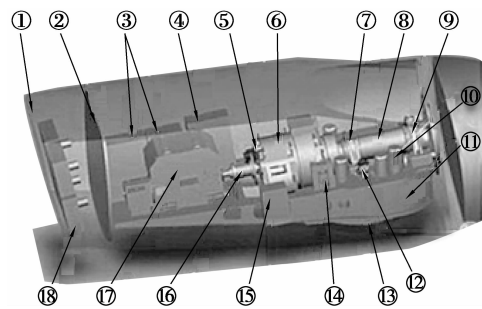
步骤 2 按照进化规则, 自适应动态改变 $V[j]$ 值, 粒子在全局和局部进行寻优。以每一阶

段的时间函数用于评价粒子的适应值, 选出合理匹配。

步骤 3 计算每一阶段每一设计任务对匹配主体完成时间 $C_{\text{ost}}(i, j)$, 并以全局最优 G_{best} 和局部最优 $P_{\text{best}}[j]$ 的 $C_{\text{ost}}(i, j)$ 来确定最终粒子位置。

4 应用实例

中船重工 H 风电公司主要从事风力发电机的产品研发, 现开发设计一款 2 MW 的风机, 右图 1 所示为该款风机核心部件机舱的产品透视图, 共包括 18 个设计任务(T_1, T_2, \dots, T_{18}), 各设计任务名称如表 4 所示, 右设计流程图如图 2 所示。同时, 参与对其协同设计的共有来自不同领域的 10 个设计主体(C_1, C_2, \dots, C_{10})。各设计主体的能力属性及性格属性各设计任务属性特征和预期完成时间如表 4~表 6 所示。



注: ①机舱罩; ②散热墙; ③变频器; ④控制柜; ⑤制动器; ⑥齿轮箱; ⑦后主轴承; ⑧主轴; ⑨前主轴承; ⑩偏航驱动; ⑪机架; ⑫液压单元; ⑬偏航轴承; ⑭齿轮箱弹性支撑; ⑮齿轮箱油泵; ⑯联轴器; ⑰发电机; ⑱散热器

图 1 2 MW 风机机舱透视图及各部分任务编号

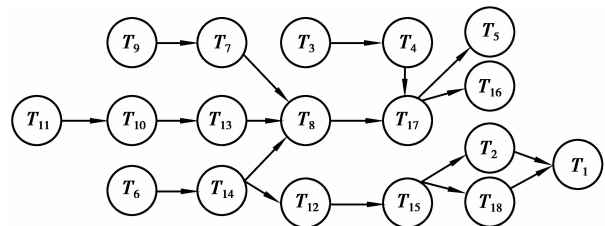


图 2 各设计任务流程图

表 4 各设计任务名称及属性特征值

任务名称	属性特征			
	R	P	I	H
T_1 (机舱罩设计)	0.333	0.1	0.093	0.084
T_2 (散热墙设计)	0.333	0.2	0.093	0.064
T_3 (变频器设计)	0.417	0.5	0.214	0.444
T_4 (控制柜设计)	1.000	0.6	0.301	0.472
T_5 (制动器设计)	0.250	0.4	0.120	0.096

续表 4

任务名称	属性特征			
	R	P	I	H
T ₆ (齿轮箱设计)	0.667	0.7	0.286	0.536
T ₇ (后轴承设计)	0.167	0.8	0.132	0.028
T ₈ (主轴设计)	0.750	0.9	0.240	0.165
T ₉ (前轴承设计)	0.167	0.8	0.128	0.024
T ₁₀ (偏航驱动设计)	0.417	0.8	0.207	0.219
T ₁₁ (前后机架设计)	1.000	0.9	0.280	0.130
T ₁₂ (液压系统设计)	0.500	0.4	0.144	0.168
T ₁₃ (偏航轴承设计)	0.333	0.8	0.161	0.111
T ₁₄ (齿轮箱弹性支撑设计)	0.167	0.6	0.096	0.026
T ₁₅ (齿轮箱油泵设计)	0.250	0.7	0.131	0.058
T ₁₆ (联轴器设计)	0.333	0.3	0.097	0.025
T ₁₇ (发电机设计)	0.833	0.9	0.296	0.505
T ₁₈ (散热器设计)	0.333	0.2	0.083	0.044

表 5 各设计主体属性特征值

设计主体	能力及属性特征				
	B' _{ag}	I' _{ag}	C' _{ag}	I' _{ch}	P' _{ch}
C ₁	(0.85, 0.92)	(0.91, 0.96)	(0.45, 0.58)	0.154	0.05
C ₂	(0.67, 0.78)	(0.82, 0.87)	(0.63, 0.80)	0.077	0.10
C ₃	(0.61, 0.72)	(0.68, 0.75)	(0.81, 0.86)	0.051	0.20
C ₄	(0.64, 0.77)	(0.81, 0.83)	(0.65, 0.73)	0.051	0.15
C ₅	(0.84, 0.95)	(0.87, 0.93)	(0.42, 0.56)	0.154	0.05
C ₆	(0.65, 0.80)	(0.74, 0.80)	(0.81, 0.87)	0.077	0.10
C ₇	(0.81, 0.93)	(0.84, 0.95)	(0.61, 0.73)	0.103	0.05
C ₈	(0.86, 0.94)	(0.88, 0.97)	(0.82, 0.96)	0.154	0.20
C ₉	(0.68, 0.78)	(0.66, 0.80)	(0.65, 0.76)	0.077	0.20
C ₁₀	(0.81, 0.94)	(0.83, 0.92)	(0.67, 0.78)	0.103	0.20

表 6 各设计任务预期完成时间

任务名称	预期完成时间/h	任务名称	预期完成时间/h
T ₁	36	T ₁₀	63
T ₂	28	T ₁₁	56
T ₃	96	T ₁₂	38
T ₄	102	T ₁₃	32
T ₅	42	T ₁₄	11
T ₆	116	T ₁₅	25
T ₇	24	T ₁₆	22
T ₈	48	T ₁₇	88
T ₉	21	T ₁₈	19

用 Matlab 编程实现设计主体和设计任务间的匹配收敛及整个协同产品创新设计项目任务周期最短。在实验中,算法参数设置如下:种群规模 P_{size} 设

置为 20,维数为 10,进化代数为 400, $V[j]$ 初始化为 0.9 并随迭代次数增加线性递减。运行结果如图 3 所示,在独立运行 50 次达到设计主体与任务达到合理匹配。同时为验证该算法在产品协同设计应用时较其他启发式算法的性能,在相同种群规模和最大进化代数的情况下,与遗传算法(genetic algorithm, GA)和免疫克隆算法(immune clonal algorithm, ICA)进对比,其中,交叉率 $P_c=0.80$,变异率 $P_m=0.1$;克隆选择概率 P_s 为 0.70、克隆抑制半径 P_y 为 0.7。运行结果的收敛曲线表明,PSO 算法较免疫克隆算法和 GA 算法更适合产品协同创新设计效率的求解。

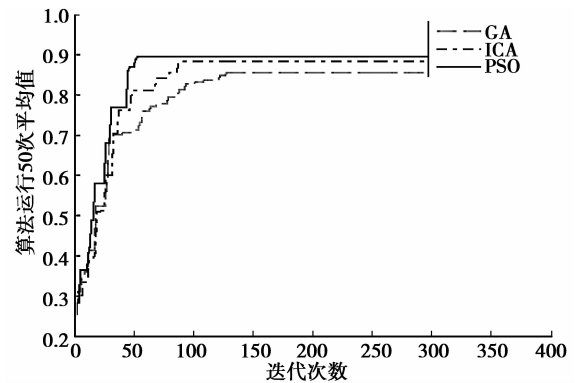


图 3 设计主体与设计任务匹配收敛曲线图

根据产品协同创新设计效率模型,在寻求设计主体与设计任务达到理想匹配的同时,以总体持续时间最短作为衡量设计效率的目标函数,可以得出的设计任务完工时间为 138 h;同时,为比较在协同设计中考虑设计主体和设计任务匹配给产品协同创新设计总体持续时间缩短带来的效率提升,以相同的种群规模、维数空间和进化代数,但仅以设计任务属性,不考虑设计主体-任务间的匹配来计算产品协同创新设计项目的总体持续时间为 149 h。对比结果显示考虑设计主体-任务间匹配关系能够从总体上缩短产品设计周期,提高产品协同创新设计的效率。

5 结 论

产品协同创新设计过程中考虑设计主体属性能力和任务间的匹配,有利于合理规划的任务、缩短设计周期,提高产品协同创新设计效率。在不考虑产品协同创新设计成本的情况下,文中通过分析参与产品协同创新设计的主体属性特征及设计任务的特点,对主体属性能力进行了分类方法,在此基础上以产品协同创新设计总体持续时间最短为目标构建了考虑设计主体与设计任务匹配的效率模型,并运用

PSO 算法求解。仿真结果表明,在设计主体与任务达到理想匹配时能较显著地缩短产品协同设计周期,提高了产品协同设计效率。

产品协同创新设计是一个复杂迭代和循环耦合的过程,其中影响设计效率因素很多。对此,如何在上述研究的基础上,同时考虑设计任务间循环耦合并使得产品开发成本、时间整体最优将是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 张婉君,刘伟,张子健. 供应商参与协同产品开发中的任务指派问题研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(6):1231-1236.
ZHANG Wanjun, LIU Wei, ZHANG Zijian. Task assignment for suppliers' participation in collaborative product development [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(6): 1231-1236.
- [2] 侯亮,陈峰,温志嘉. 跨企业产品协同开发中的设计任务分解与分配[J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(12):1976-1981.
HOU Liang, CHEN Feng, WEN Zhijia. Design task decomposition and allocation for inter-firm product collaborative development [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41 (12): 1976-1981.
- [3] 梁学栋,戈鹏,杨育,等. 基于依赖约束的产品设计功能属性匹配选择[J]. 中国机械工程, 2011, 22(2): 227-231.
LIANG Xuedong, GE Peng, YANG Yu, et al. Function matching and selection for product design based on dependency constraints [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(2): 227-231.
- [4] 宋李俊,杨育,杨洁,等. 产品协同设计中的任务排序研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(7): 798-803.
SONG Lijun, YANG Yu, YANG Jie, et al. Study on task scheduling in collaborative product development [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19 (7): 798-803.
- [5] JOGLEKAR N R, FORD D N. Product development resource allocation with foresight [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 160 (1): 72-87.
- [6] MING X. G, YAN, J. Q, WANG X H, et al. Collaborative process planning and manufacturing in product lifecycle management [J]. Computers in Industry, 2008, 59(2-3): 154-166.
- [7] 庞辉,方宗德,郭辉,等. 面向协同设计任务调度问题研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(10): 1899-1903.
PANG Hui, FANG Zongde, GUO Hui, et al. Research on task scheduling method of cooperative design[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30 (10): 1899-1903.
- [8] FTIH T, CENGIZ K. Modeling a flexible manufacturing cell using stochastic Petri nets with fuzzy parameters [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(5): 3910-3920.
- [9] 蒋增强,刘明周,赵韩,等. 基于多目标优化的产品协同开发任务调度研究[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 154-162.
JIANG Zengqiang, LIU Mingzhou, ZHAO Han, et al. Task scheduling of product cooperative development based on multi-objective optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 154-162.
- [10] HUANG H F, KAO H P, JUANG Y S. An integrated information system for product design planning [J]. Expert Systems with Application, 2008, 35 (1-2): 338-349.
- [11] LUO LE, ZHANG XIAO-DONG, LI YING-ZI. Multi-mode resource-constrained scheduling of collaborative product development project [M] // Lecture Notes in Computer Science, 2010, 6240: 294-299.
- [12] ZHANG X D, LUO L, YANG Y, et al. A simulation approach for evaluation and improvement of organizational planning in collaborative product development projects [J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(13): 3471-3501.
- [13] CHEN S J, LI L. Modeling team characteristics for the formation of a multifunctional team in concurrent engineering [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2004, 51(2): 111-124.
- [14] RICHARD R R, ARONSON Z A. Personality validity: the role of schemas and motivated reasoning [J]. International Journal of Selection and Assessment, 2006, 14(4): 372-380.
- [15] CHU C H, WU P H, HSU Y C. Multi-agent collaborative 3D design with geometric model at different levels of detail [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(2): 334-347.
- [16] 焦巍,刘光斌,张金生,等. 基于粒子群算法的地磁匹配航迹规划[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(11): 2106-2111.
JIAO Wei, LIU Gangbin, ZHANG Jinsheng, et al. Geomagnetic matching path planning based on PSO algorithm [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2010, 30(11): 2106-2111.