

基于 HTCPN 的型号产品协同设计工作流程模型研究

郭东明, 邹灵浩*, 高航, 孙长乐, 王辉

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 型号产品协同设计工作流程建模是协同设计过程管理的关键环节. 针对型号产品协同设计的工作流程模型特点, 从项目粒度、开发周期和并行度三方面分析, 建立了一个在空间上三维分布的工作流模型. 分析了 Petri 网建模方法的不足, 采用扩充了定义的 HTCPN 对型号产品机翼协同设计的工作流模型进行建模和仿真, 并从可达性、死锁和任务冲突等性能方面分析了建模的正确性. 最后通过在协同设计系统中的应用, 表明该工作流模型是正确可行的.

关键词: 协同设计; HTCPN; 工作流模型; 建模

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

0 引言

现代战争的特点决定了型号产品设计制造企业必须具有在短时间内根据战场特定需求设计与制造型号产品和大批量生产的能力. 原有的串行设计制造模式已不能适应当代的产品开发要求, 型号产品的协同设计正成为增加企业产品设计制造能力、提高企业竞争力的设计模式. 在这个过程中, 建立型号产品协同设计的工作流程并对其进行建模和分析, 是建立有效的协同设计支持系统和环境的重要环节, 也是设计过程管理成败的关键.

目前国内外关于协同设计的工作流研究很多, 主要集中在以下两个方面: 一是在协同设计工作流程模型分析方面. 刘志等^[1]采用本体论来表示产品开发过程的活动、任务、状态和约束等; 邓家祺^[2]用场、层、域和节点对设计过程进行分解; 曹健等^[3]用过程结构树对设计过程进行层层分解; 孔建寿等^[4]根据分布计算环境下并行产品开发的特点, 对设计过程进行了层次分解和形式化描述, 最后形成项目树; 陈彦海等^[5]提出了支持 CAD/CAPP 并行的工作流模型, 从粒度和时间两个方面对设计任务进行划分. 虽然上述的研究都注意到模型的复杂性, 在某个方面对工作流程进行分解, 但并不能充分表达型号产品协同设计工作流程模型的特点. 二是在

工作流模型建模方法方面. 主要有关键路径法^[6]、设计结构矩阵^[7]、IDEF 方法^[8]和 Petri 网^[9~11]等, 这些方法各有优缺点, 适用于不同的场合, 但并不适用于型号产品的协同设计过程建模.

本文在前人的研究成果基础上, 以某型号产品机翼的协同设计工作流为例, 基于层次时间有色 Petri 网 (HTCPN), 结合同步工程, 建立一种三维的、层次分明的、支持计算机辅助设计/计算机辅助工艺规划并行的协同设计工作流模型, 并对其进行分析, 在协同设计系统中实施, 验证该模型及建模方法的正确性. 本研究旨在为型号产品协同设计系统实现协同过程管理提供一个有效可行的工作流模型.

1 型号产品协同设计工作流程模型分析

型号产品协同设计是一项复杂的工程项目, 其本质是一个宏观上并行、微观上串行、反复迭代的过程. 对于型号产品协同设计的工作流模型必须考虑以下特点:

(1) 工作流模型是阶段性的

即设计问题往往是由方案设计、初步设计、详细设计等分阶段、逐步逼近的过程, 必须按照阶段性求解协同问题.

(2) workflows 模型是 层次 的

型号产品协同设计项目一般都很复杂, 单一的企业或团队多数情况下不能解决, 这就需要对项目进行分解, 由不同企业或 IPT 团队共同解决, 这样分解的项目就具有了层次性.

(3) workflows 模型是 并行 的

即在广义上是 CAD/CAPP 的并行, 而实际上是经过层次分解后多个任务子集的并行. 协同设计就是充分利用 IPT 团队内各种设计人员, 使他们并行协同工作.

(4) workflows 是 协同 的

分解的大量任务之间并不是孤立的, 而是存在各种依赖关系, 各个设计团队必须保持协同, 才能使设计任务协调进行. 所以必须从以下 3 个方面对项目进行分解.

① 从项目粒度上进行划分

从技术角度分析, 不管协同设计过程有多复杂, 都可以应用项目管理(PM)中的工作分解结构(WBS)对其进行分解. 假如存在某型号产品协同设计项目 P , 则它可以沿项目粒度分解为

$P = \sum P_i, i = 1, 2, \cdots, n$, 子项目集合 P_i 就构成了协同产品开发的一种分布式组织结构, 即每个子项目在逻辑上对应于一个集成产品开发团队(IPT). 项目还可根据协同过程的需要进一步分解成 N 层具有一定粒度的多个任务, 即 $P = \sum T_{ij}, i = 1, 2, \cdots, n, j = 1, 2, \cdots, m$, 其中 T_{ij} 为第 i 项子项目下的第 j 项任务^[12].

② 从项目开发时间周期划分

在型号产品项目开发周期内, 不管是项目、子项目还是具体的任务, CAD 活动都可以分解为方案设计、初步设计(装配设计)和详细设计; 相应地, CAPP 活动可以划分为方案工艺分析、初步工艺设计(装配工艺分析)和详细工艺设计等阶段.

③ 从并行度划分

为了实现型号产品的协同设计, 需要及时把有关设计信息交与工艺/制造人员, 工艺/制造人员再根据设计信息及早期处理工艺和工装信息, 从而最大限度地减少设计反复, 缩短设计、生产准备和制造时间. 因此 workflow 必须采用并行的模式, 即 CAD/CAPP 的并行, 甚至与 CAM 的并行(如图 1 所示).

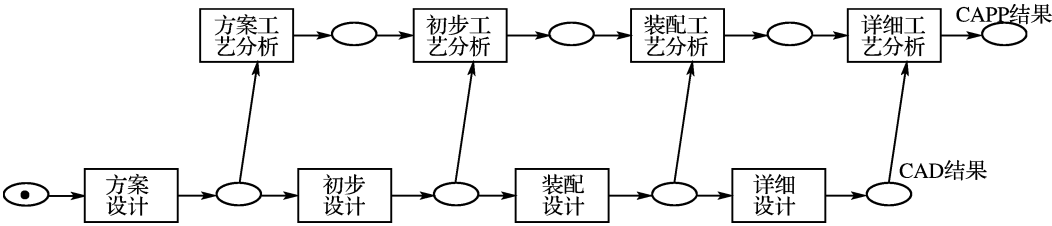


图 1 CAD/CAPP 并行模型
Fig. 1 Parallel model of CAD/CAPP

综合分析, 一个复杂的协同设计项目 P 最终可分解为一个设计任务集合体和多个流程相互嵌套的层次 workflow 模型. 在设计流程时, 就可以以项目 workflow 为主线, 嵌套子项目和任务的流程(分层、分页), 在设计各个阶段建模, 形成一个在空间上以时间、项目粒度和并行度三维分布的, 以 workflow 为主线的多层次模型. 以型号产品的机翼为例, 模型如图 2 所示.

2 飞机协同设计 workflow 建模研究

2.1 HTCPN 定义

Petri 网具有严密、易理解等特点, 是一种流行的系统建模方法. 其主要应用在一些简单的系

统中, 对复杂系统建模时, 存在以下不足: (1) 建立的模型非常庞大, 缺乏柔性. 例如对于一个型号产品协同设计系统, 模型可能需要几百甚至上千个库所和变迁, 这时的模型将非常复杂、混乱, 也难以理解. (2) 不能够描述复杂且具有层次性的模型. (3) 难以定量或定性分析协同设计过程性能.

因此本文借鉴文献[13]提出的 HTCPN 的概念, 针对型号产品的协同设计进行了补充. HTCPN 是基于 Petri 网在层次、时间和颜色上进行扩充的一种建模方法. 它有一些替代变迁, 允许在大型的 Petri 网里面嵌套一些小的子网构成更高层次的模型, 每一层称其为上层的子网(subnet). 可以将单个没有层次的有色 Petri 网称

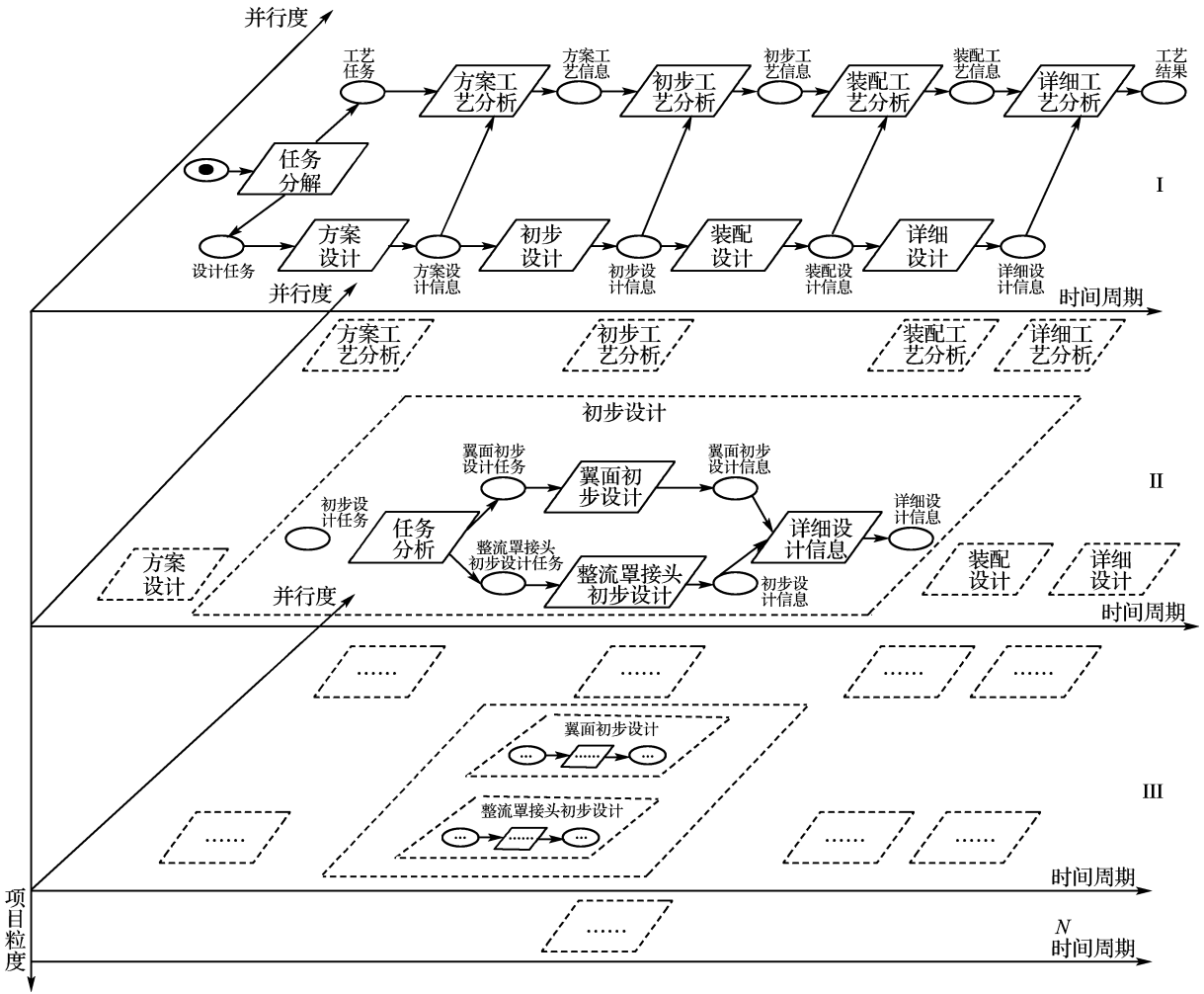


图 2 机翼协同设计 workflow 模型

Fig. 2 The workflow model of collaborative design for wing

做页. 一个页的输入输出库所称端口结点, 端口结点指明输入页的托肯和数量, 每一个替代变迁称做超级结点, 包含超级结点的页称超级页, 连接到超级结点的库所称做插座结点, 插座结点和端口结点通过端口分配函数相联系. 定义如下:

一个层次时间有色 Petri 网是一个多元组, $HTCPN = \{S, SN, SA, PN, PT, PA, FS, FT, PP\}$, 其中

- (1) S 是页的有限集合, 并且有
 - ① 对于每一页, $s \in S$ 是一个非层次的时间有色 Petri 网;
 - ② $\forall s_1, s_2 \in S: s_1 \cap s_2 \neq \emptyset$.
- (2) $SN \subseteq T$ 是替代变迁的集合.
- (3) SA 是页分配函数. 是从 SN 定义到 S 的函数, 而且任何页不是自身页的子页.
- (4) $PN \subseteq P$ 是端口结点的集合, 不同页之间

- 的信息流动通过端口结点完成.
- (5) PT 为端口类型函数, 是从 PN 定义到 $\{in, out, i/o, general\}$ 的函数.
 - (6) PA 为端口分配函数, 是从 SN 定义的如下二元关系:
 - ① $\forall t \in SN: PA(t) \subseteq X(t) \times PN_{SA(t)}$.
 - ② $\forall t \in SN, \forall (p_1, p_2) \in PA(t): PT(p_2) \neq general \Rightarrow ST(p_1, t) = PT(p_2)$.
 - ③ $\forall t \in SN, \forall (p_1, p_2) \in PA(t): C(p_1) = C(p_2) \wedge I(p_1) = I(p_2)$.
 - (7) $\forall fs \in FS, \forall p_1, p_2 \in fs: C(p_1) = C(p_2) \wedge I(p_1) = I(p_2)$.
 - (8) FT 是联合类型函数, 是从联合集定义到 $\{global, page, instance\}$ 的函数. 页联合结点集合和局部联合结点集合同属于一个页: $\forall fs \in FS: FT(fs) \neq global \Rightarrow \exists s \in S: fs \subseteq P_s$.

(9) *PP* 是定义在所有页上的多元集合。

注:①每一个替换变迁(结点)也是一个变迁,因而层次时间有色 Petri 网有 4 种形式. 令 T 是变迁的有限集, $T = T_1 \cup T_2 \cup T_3 \cup T_4$, 其中 T_1 是普通的活动变迁集合、 T_2 是时间的活动变迁集合、 T_3 是层次非时间的活动变迁集合、 T_4 是层次时间的活动变迁集合. ②端口结点有 4 种类型,即输入型、输出型、输入/输出型及通用型. ③联合类型函数有 3 种,即全局范围类型、整页范围类型及局部范围类型.

2.2 基于 HTCPN 的工作流建模

CPN Tools^[14] 是丹麦奥胡斯大学开发的 Petri网建模仿真软件,支持对 HTCPN 的建模与仿真,支持 Bottom-Up(自下而上)和 Top-Down(自上而下)两种建模方法. 本文采用后者对型号产品机翼 workflow 模型进行建模.

2.2.1 机翼 workflow 模型顶层模型 图 3 所示为在 CPN Tools 下对机翼协同设计 workflow 模型建

立的顶层模型. *MS* 为设计任务, *MD* 表示任务分解,延时 10 个时间单位后,分解为工艺任务 *PM* 和设计任务 *DM*. 接着 *PM* 和 *DM* 并行进行,在方案设计 *PjD* 延时 30 个时间单位完成后,将方案设计信息分别授权给方案工艺分析 *PoA* 和初步设计 *PrD*,在此 *PoA* 和 *PrD* 均为层次时间的活动变迁集合(T_4),可进一步分解. *PrD* 经过 60 个时间单位延时后,将初步设计信息 *PrDI* 和 *PrDI1* 分别发送给初步工艺分析 *PrPD* 和装配设计 *AD*. 随后 *AD* 经过 90 个时间单位延时后,将装配设计信息 *ADeI* 和 *ADeI1* 分别发送给装配工艺设计 *APD* 和详细设计 *DtD* 后, *DtD* 经过 60 个时间单位延时后,得到设计结果并将其交给详细工艺设计,经过 90 个时间单位延时后,得到最终的 *CAPP* 结果. 其中, *DM*、*PoA*、*PjD*、*PrD*、*PrPD*、*AD*、*APD*、*DtD*、*DtPD* 均为层次时间的活动变迁,需要进行分解. 由于模型比较庞大,在此仅以机翼模型的初步设计部分为例说明模型的建模过程.

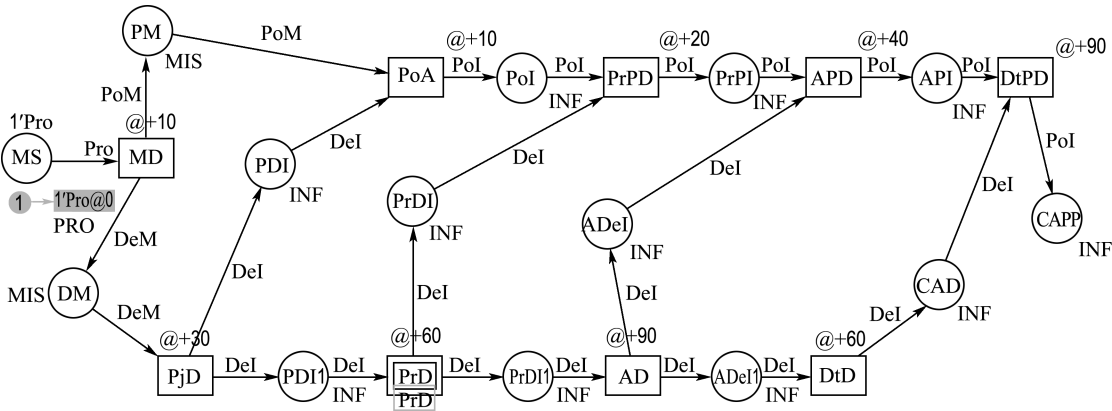


图 3 机翼顶层模型
Fig. 3 The top model of wing

2.2.2 初步设计模型 由于机翼任务比较复杂,将机翼分解为翼面初步设计 *WsPD* 和整流罩接头初步设计 *FPD*,设计完成后分别发送给工艺分

析和装配设计. 继续将翼面设计进行分解到第 3 层. 可以看到,本层的输入和输出对应于上层 *PrD* 替代变迁的输入输出库所. 具体模型见图 4.

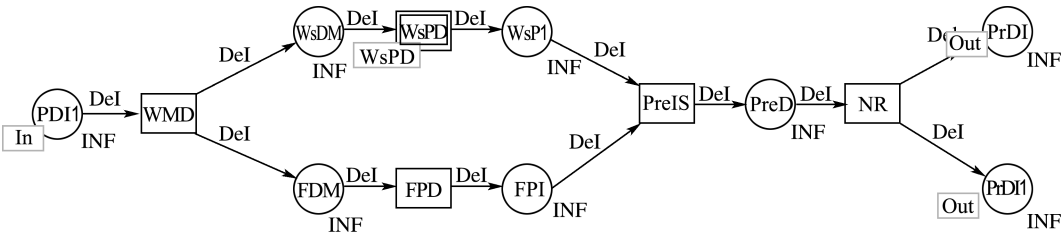


图 4 机翼初步设计模型
Fig. 4 The preliminary design model of wing

2.2.3 翼面初步设计模型 翼面的任务也较复杂,继续将其分解为主翼面 MWsPD、副翼 AilPD 和小翼初步设计 WIPD,本层的输入、输出库所对

应于上层的 MWsPD 替代变迁的输入输出库所。每个替代变迁对应于一个 IPT 团队,翼面初步设计模型见图 5。

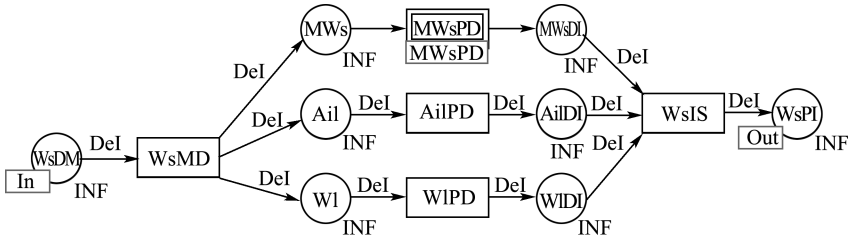


图 5 翼面初步设计模型

Fig. 5 The preliminary design model of the wing face

2.2.4 主翼面初步设计模型 主翼面模型比较简单,是初步设计的最底层,亦即一个 IPT 团队所要完成的任务。主翼面初步设计 MWPrD 是时间变迁 (T_2),经过延时完成后,再经过协商 Con、审查 CoR 最终得到主翼面初步设计信息。同样本层的输入、输出库所对应于上层的替代变迁

的输入输出库所。类似地,其他的初步设计都可以按照这个步骤完成,完成后即可进行装配设计,而装配设计、详细设计等都可以根据实际的任务和人员分配情况进行建模,从而完成整个机翼的协同设计过程模型,具体见图 6。

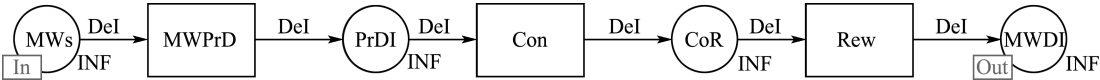


图 6 主翼面初步设计模型

Fig. 6 The preliminary design model of the main wing face

3 模型分析

(1)模型可达性分析

在 CPN Tools 中根据初始标识对模型进行

仿真,可以清楚地看到初始标识顺利地通过模型,如图 7 所示得到最终结果,说明建立的模型是可达的。

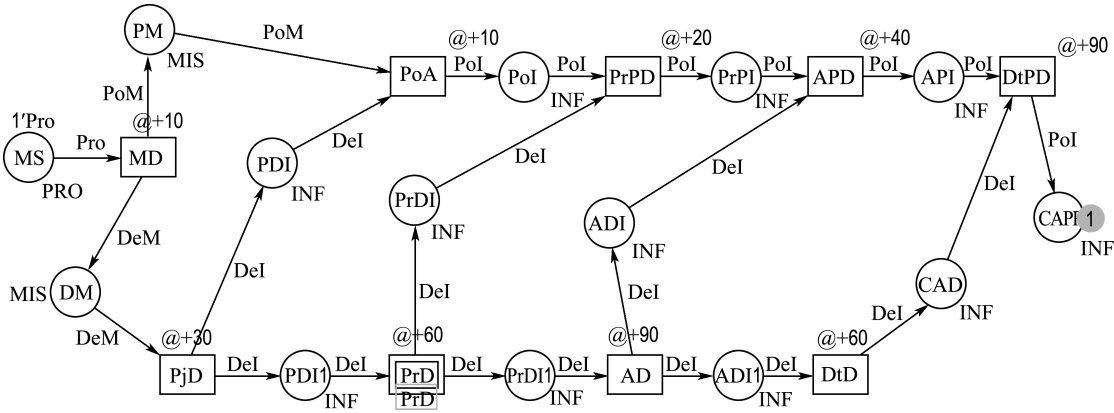


图 7 CPN Tools 中运行结果

Fig. 7 The running results in CPN Tools

(2)模型死锁分析

在实际的产品协同过程中,死锁就是互相等待对方的设计结果,导致设计过程不能进行.在对所建立的基于层次时间有色 Petri 网的产品协同模型仿真中,发现型号产品开发过程中模型没有死锁现象发生,这就是说开发过程模型是收敛的,按照过程模型所描述的步骤可获得最终设计结果.

(3)冲突分析

在基于层次时间有色 Petri 网的产品开发过程模型中,当两个或者多个任务产生相互矛盾的设计结果时,就会导致冲突发生.在对型号产品开发过程模型的仿真过程中,没有冲突情况发生,也就是说过程模型考虑到了各种可能的情况.所有不一致的设计结果会导致某(些)任务的迭代或重复设计,但是最终会取得一致.

通过在 CPN Tools 中动态仿真发现,模型中不存在死任务,对于任何一个任务总能找到合适

的路径通过 workflow 网络来完成,说明了利用 HTCPN 建模的正确性和合理性.

4 实例验证

针对上述提出的 workflow 模型和基于 HTCPN 的建模,开发的型号产品协同设计系统中集成了本模型,详细设计阶段的模型实例图如图 8 所示,在模型中,库所和变迁分别用圆和矩形代表,有向弧用带箭头的直线表示,加粗部分代表关键路径.可以展开的变迁是替代变迁,可以继续分解.点击可以查看下层的分解信息.当鼠标移到库所和变迁上时,会分别显示库所和变迁的详细信息.这样,在协同过程中,协同人员就可以根据模型图在各自的权限范围内查看任务的进展程度及相关的信息.可以看出,模型很好地描述了详细设计及其子任务的工作流程图.整个模型在协同系统中验证应用表明,效果良好.

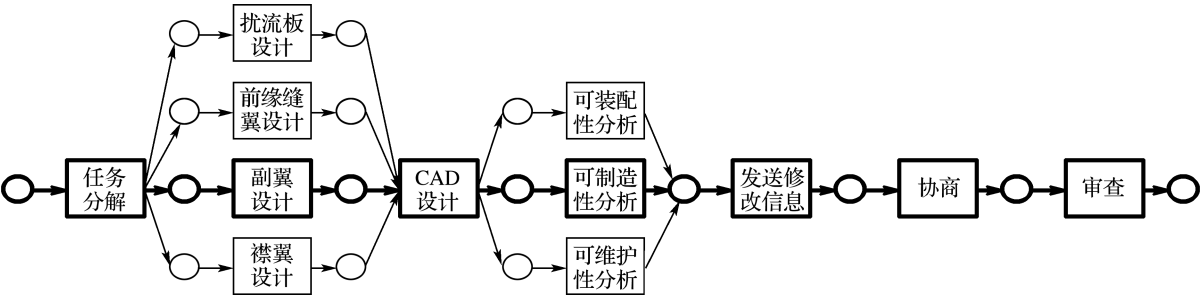


图 8 模型实例

Fig. 8 An example of the model

5 结 语

本文针对型号产品的协同设计 workflow 模型,以机翼模型为例,提出了一种三维分布的模型并对其建模分析验证.关键问题在于如何确定型号产品协同设计的工作流模型和如何对得到的模型进行建模和分析,为此,从项目粒度、开发周期和并行度三个方面分析型号产品协同设计过程的特点,建立了一个在空间上以时间、项目粒度和并行度三维分布的多层次模型.采用 HTCPN 建模方法并扩充其定义,系统地对某型号产品的机翼进行了建模和分析,并通过型号产品协同设计系统验证了模型的可行性.

参考文献:

[1] 刘 志,高 济.支持虚拟企业的过程建模和 workflow 管理系统[J].计算机辅助设计与图形学学报,2001,13(10):952-960

[2] 邓家提.产品设计的基本理论与技术[J].中国机械工程,2000,11(1-2):139-143

[3] 曹 健,张申生.面向并行工程的集成化产品开发过程管理系统研究[J].中国机械工程,2002,13(1):80-83

[4] 孔建寿,张友良,汪惠芬,等.协同开发环境中项目管理与 workflow 管理的集成[J].中国机械工程,2003,14(13):1122-1125

[5] 陈彦海, 刘文海, 金天国. 支持 CAD/CAPP 并行的 workflow 模型研究[J]. 计算机集成制造系统, 2004, **10**(12):71-76

[6] 黄洪钟, 刘伟, 李丽. 产品协同设计过程建模研究[J]. 计算机集成制造系统, 2003, **9**(11):955-959

[7] 张东民, 廖文和, 罗衍领. 基于设计结构矩阵的设计过程建模研究[J]. 应用科学学报, 2004, **22**(4):518-522

[8] 张维, 何卫平, 张定华. 基于 IDEF3 的并行工程过程建模[J]. 机械科学与技术, 2000, **19**(z1):166-168

[9] 宋玉银, 褚秀萍, 蔡复之. 基于时间 Petri 网的实时并行设计过程建模研究[J]. 计算机集成制造系统, 1999, **5**(6):17-22

[10] SALIMIFARD K, WRIGHT M. Petri net-based modeling of workflow systems:an overview [J]. **European Journal of Operational Research**, 2001, **134**(3):664-674

[11] ZHOU F, BO R F, HUANG H Z, *et al.* Hierarchical colored Petri nets based components for workflow system [J]. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2006, **20**(10):1527-1533

[12] ZOU L H, GOU D M, GAO H. Workflow modeling for cooperative production development based upon advanced Petri net [J]. **Key Engineering Materials**, 2009, **392-394**:810-815

[13] 陈春良, 王岩磊, 孙盛坤. HTCPN 在装备保障业务流程建模与优化中的应用[J]. 系统仿真学报, 2008, **20**(10):2746-2750

[14] LISA W. Performance analysis using CPN tools [C] // **Proceedings of the 1st International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools**. Pisa:Association for Computing Machinery, 2006

Study of workflow model for collaborative design of specified type-product based on HTCPN

GUO Dong-ming, ZOU Ling-hao*, GAO Hang, SUN Chang-le, WANG Hui

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The workflow modeling of collaborative design for specified type-product is the key of process management for collaborative design. By analyzing the features of workflow model for collaborative design of specified type-product from the project size, development cycles and the degree of parallelism, a workflow model of three-dimensional distribution in space was established. Then, through the analysis of the deficiencies of the Petri Net, the workflow model was modeled and simulated by using the expanded hybrid timed colored Petri net (HTCPN) and the model was also validated from the reachability, deadlock, task conflict and so on. Finally, an application example in collaborative design system shows that the workflow model is correct and feasible.

Key words: collaborative design; hybrid timed colored Petri net (HTCPN); workflow model; modeling