

# 基于多层次 Petri 网的复杂产品分布协同研发体系设计方法

韩立岩, 刘 慧, 韩 璐

(北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191)

**摘要:**首次提出面向复杂产品研发的分布协同系统多层次 Petri 网模型。以新支线飞机 ARJ21 的分布协同研发系统为例,模型通过粒度清晰化实现知识流程的分层,通过可达性检验发现研发整体流程和模块开发子流程中的瓶颈与障碍,进而实现了系统流程再造,提高了研发效率。该方法突破以往的经验设计思路,实现了研发系统设计的科学化与工具化。

**关键词:**知识管理;分布协同系统;Petri 网;航空企业;研发管理

**中图分类号:** TP 182

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1001-506X.2011.06.16

## Multilevel Petri net-based distributed collaborative R&D system design for complex products

HAN Li-yan, LIU Hui, HAN Lu

(School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** For a complex product research and development (R&D) system, a new multilevel Petri net-based distributed collaborative R&D system model is constructed, as demonstrated in ARJ21's case. Upon the granularity, the adaptive hierarchical organization for knowledge flow is achieved, and by the analysis of reachability, the bottlenecks in knowledge process are discovered, which realizes system process reengineering and improves the efficiency of R&D. The new method provides the programmed tool for R&D system design instead of by experience.

**Keywords:** knowledge management; distributed collaborative system; Petri net; aviation enterprises; research and development (R&D) management

## 0 引言

复杂产品研发是多技术、多层次、多研发主体形成的复杂系统,如航空器、航天器、大型船舶等。采用多层次分布式的研发模式是有效的组织形式。但是在以往的实践中,研发主体的分层分组连接、多种技术的融合、技术风险控制、过程控制等关键环节的系统设计总是延续经验与惯例,而组成系统的各个节点之间的知识流动更是缺少自顶向下的科学设计。这成为影响复杂产品研发效率的瓶颈。

Petri 网技术在最初成功应用于通信领域后,得到信息、自动化、系统工程和生产运作等领域专家的广泛重视<sup>[1]</sup>。目前,Petri 网的理论与技术研究仍然比较活跃。在理论层次上,核心论题是 Petri 网的结构和性质,可以分为两个方向:一个方向从物理要素上进行扩展,研究热点主要是多层次 Petri 网和着色 Petri 网。文献[2]提出了多层次 Petri 网的构建方法和划分准则,其研究表明合理的划分层次可以有效提高 Petri 网的性能;文献[3]对多代理多层次 Petri 网的整合进

行讨论,并证明了通过增加代理库所可以有效保证多层 Petri 网整合的一致性;文献[4]提出了基于有色 Petri 网的工作流计划方法,通过有效的任务分组和阶段划分,实现了静态全局优化和动态局部优化的结合。同时,另一个研究方向主要从 Petri 网中参数的性质进行扩展。文献[5]对连续事件系统进行了 Petri 网建模,并逐渐发展成为 Petri 网的混合模式;文献[6]参考生物放电频率,构建连续时间集,在此基础上形成 Petri 网连续调整方法;文献[7]考虑构成系统节点关联的时间非精确性,引入时间模糊集,然后运用动态规划方法进行建模,拓展了时间不确定情形下 Petri 网的特性。在技术层面,研究集中在仿真技术和面向对象的建模技术上,例如应用 Prosit 框架对系统连续状态进行模拟分析<sup>[8]</sup>。

在管理领域,文献[9]提出了企业流程再造的 Petri 网分析方法,文中运用多层 Petri 网建立了企业活动分析与流程优化的模型框架;文献[10]将时间 Petri 网模型应用于柔性制造单元的生产工序管理;文献[11]提出了企业知识管理的 Petri 网模型。

收稿日期:2010-12-10; 修回日期:2011-05-06。

基金项目:国家自然科学基金(78381001,70821061)资助课题

作者简介:韩立岩(1955-),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为复杂产品工程、知识管理。E-mail:hanly@buaa.edu.cn

但迄今为止,尚无 Petri 网方法在研发管理中的应用。作为典型的复杂产品系统,高端装备研发过程需要一种自顶向下的多层次多主体参与的具有动态协调机制的研发系统设计方法。在分布式协同设计领域,文献[12]实现了基于互联网的零件装配设计,提供了一种分布式研发的具体实践模型;文献[13]在其研究工作中构造了一种能够广泛支持集成化零件设计和装配设计的框架;文献[14]提出了航空产品研发方面多领域协同设计的总体框架。

但是,以往的分布式研发组织设计常依经验展开,尚无流程化的系统分析工具<sup>[15]</sup>。本文的主要贡献在于以航空器设计为具体对象,提出了复杂产品分布协同式研发体系的多层 Petri 网优化方法,突出其中知识管理的功能,并提出了知识库所关联的三种基本类型和表示研发活动的变迁组合的三种基本类型,并在新支线 ARJ21 飞机研发管理系统的应用中论证了上述方法的优势。以此为复杂产品研发的分布协同系统提供一种有效的科学化和工具化设计方法。

## 1 分布协同研发的 Petri 网建模方法

### 1.1 模型设定

Petri 网是一种以位置或者库所(place)、变迁(transition)、弧(arc)、标记或者托肯(token)为基本元素构成的一种网络模型。以多元组  $PN = \{P, T, F, M_0\}$  表示一个 Petri 网,其中  $P = \{P_0, P_1, \dots, P_m\}$ , 表示库所的集合,库所在研发中表示技术知识; $T = \{T_0, T_1, \dots, T_n\}$  表示变迁的集合,变迁具体表示研发活动,从中产生新的知识或者实现技术创新,因此变迁是库所之间的联系; $F$  表示弧的集合,用以表示库所与变迁之间的互相连接; $M_0$  为网络中所有库所中托肯的初始分布的总合,称为网络初始状态, $M$  则表示任一种可能的状态<sup>[16]</sup>。

用图论的语言,Petri 网可以被描述为二元有向图,弧的方向代表变迁的关系,库所中托肯的数量表示当前的状态,变迁依据其自身规则导致托肯在 Petri 网中运动。

在研发 Petri 网建模中表示知识的库所和表示研发过程的变迁是相互依存关系。库所是不可分的最小粒子,而变迁是复合粒子,它可以放大为一个子 Petri 网。所有的库所和变迁之间必须有弧的连接,库所和库所的连接必须通过变迁,而变迁和变迁之间的相连必须通过库所。也就是说,从一个已知知识到新知识要通过研发过程来实现。

### 1.2 知识与研发过程关联分析

分析一个一般研发过程,首先要理清所涉及的技术知识的相互关联性。任何一个复杂产品的研发都以预先研究为基础,由此形成一个知识库。要对库中的知识进行研发关联分析,在 Petri 网中表现为库所之间的联系形式。

研发过程中相关知识之间存在着三种基本的联系形式:独立形式、依赖形式、耦合形式,如图 1 所示。独立形式表示知识之间相互独立形成,无须变迁的联系。知识 A 依赖知识 B 表示知识 A 是 B 的条件或者前提。知识 A 耦合知识 B 表示知识 A 和 B 互为前提,相互依赖。

从研发执行过程来看,研发与知识的组合存在着串行、并行、循环三种方式。其中,串行方式是指研发活动 B 在另一研发活动 A 完成后再执行;并行方式是指研发活动 A 和

B 同时执行;循环方式是指在 A 和 B 之间进行轮循,直到满足某种条件为止。研发活动关系如图 2 所示。库所与变迁的组合就是研发过程的具体体现,也就是知识的流动过程。

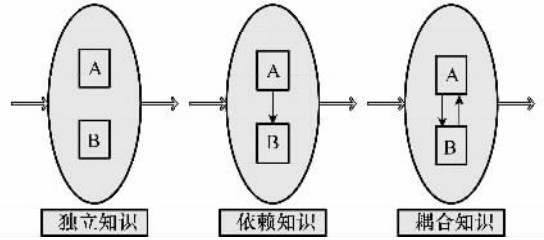


图 1 研发知识关系类型

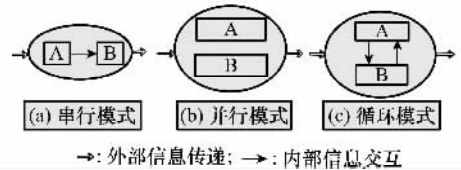


图 2 研发活动关系图

#### (1) 串行活动类型

串行过程是库所和变迁的单向连接。知识的三种关联形式都可能出现在串行活动类型中。对于依赖和耦合关联的库所只需要注意其在变迁发生中的相应顺序即可。

#### (2) 循环活动类型

循环活动中的知识具有典型的耦合关系。这在复杂产品的研发中尤为突出,关键技术环节之间相互影响,需要经常性的协调和技术方案反复调整,在研发中形成相互反馈关系。因此,在循环活动类型中就要包含变迁回路。

#### (3) 并行活动类型

并行活动是指可以同时进行的研发过程,可以有独立知识关联和依赖知识关联,但不能存在耦合知识关联。因为耦合知识之间需要相互联系,任何一个都不能单独使用,所以不符合并行过程的特征。对于依赖知识的并联模型如图 3 所示,其中 A、B 表示相应的知识。

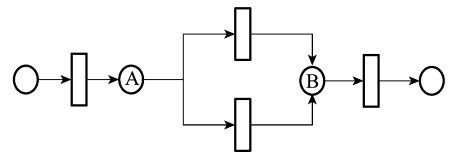


图 3 Petri 网依赖知识的并联模型

### 1.3 建模过程

根据上述分析,应用 Petri 网对研发过程的知识流程建模。这是一个自顶向下的分析与设计过程,具体步骤如下:

**步骤 1 知识库关联分析。**对于预先研究所形成的知识库的每一个技术知识进行库所关联分析,形成知识库关联 Petri 网,表示为关系矩阵。其中任何两个知识的关联度都可以从矩阵中获得。

**步骤 2 系统模块分解。**要从产品的设计目标出发将整个产品体系分解为部件模块,具体表现为每个模块的子 Petri 网设定。实际上,每一个子 Petri 网都是若干变迁的组合。

**步骤 3 模块级子 Petri 网设计。**对于每一个部件模块,从知识库关联 Petri 网中选择相关知识,形成子 Petri 网的初步框架;进而设计表示知识的库所之间的变迁,即形成每一个研发过程的环节。由此得到整个研发所涉及的所有子 Petri 网。整个网络中的所有库所都赋予相应的托肯,表示知识状态,进而整合为整个 Petri 网的状态。库所托肯的变化反映状态优化的结果。

**步骤 4 变迁粒度分析。**计算每一个变迁(即研发过程)的粒度,根据行业特点确定阈值,低于阈值的称为非清晰变迁,进而筛选所有的非清晰变迁。

**步骤 5 非清晰变迁的子 Petri 网设计。**非清晰变迁意味着相对应的研发过程的技术路线不清晰,其中所包含的关键技术需要作更为细致的知识分解。换言之,完成这一变迁需要其他知识的参与,因此需要将该变迁进一步分解为子 Petri 网。这个变迁的子 Petri 网中所包含的库所仍然来自于整个研发的技术知识库。这一过程就是整个研发过程的分层,也就形成了分层 Petri 网。

**步骤 6 库所关联的完备化。**根据所有的子 Petri 网的库所关联,对于顶层网中的每一个库所进行关联关系的完备化,即在第一步工作的基础上添加所有的子 Petri 网的库所关联。

**步骤 7 可达性检验。**对于整个多层 Petri 网进行可达性检验,发现并排除死锁,保证系统的覆盖性和活性。针对死锁,通过增加库所或者赋予子 Petri 网的方式加以排除。

**步骤 8 着色调节。**针对分层 Petri 网的接口,通过着色加以标识。例如使用相同接口的市场调研和技术调研环节,则应当使用着色 Petri 网。

经过上述 8 个步骤就完成了多层研发 Petri 网的设计。

建模的关键在对知识和流程的刻画。用库所表现知识本身,用变迁表现知识流动。在每个子 Petri 网建模的过程中,首先应该对所有研发执行过程的知识流动(即多个变迁之间的组合)类型进行分析,分别归为串行、并行、循环三种方式;然后,具体分析相应研发过程(即变迁)中所联系的库所的输入与输出性质、以及相关知识之间的联系(即库所与库所之间的联系),具体分为独立、依赖和耦合。

从以上建模过程可以看出 Petri 网能更好地描述知识流动的过程,模型也更加简单清晰。而且,对于整个产品研发的分布式协同的组织设计可以用库所所表示的知识联系特性来进行相应的分布管理,集中各自的优势资源来创造知识库所需的托肯;使用变迁来协同不同的库所之间的活动,使用托肯的数量来控制变迁发生从而可以有效协同不同库所之间的工作。因而,以此为基础动态地刻画复杂产品研发过程中的知识流动,能够更好地控制和调整产品研发进程,及时排出流动中的障碍与瓶颈,提高研发管理的效率。

分布式研发体系的分层结构是实施的难点。分层与否以及分层的多少完全依据研发中关键技术开发的需要。在 Petri 网模型中分层取决于变迁的粒度清晰程度,对于粒度不够清晰的变迁要进行放大,赋予一个子研发体系,即指派一个子 Petri 网,对其进行结构化设计。

## 2 ARJ21 飞机研发的多层 Petri 网模型

ARJ21 飞机的研发设计充分吸取了前面的经验教训,采用了以满足客户市场需求为最终目标的分布协同的研发

模式,大大提高了项目的研发效率和顺应市场需求变化的灵活性。在其分布式协同的研发体系中,知识流动与共享机制和需求动态调整机制发挥了关键作用,多层次 Petri 网模型是有说服力的理论依据与提升。

### 2.1 ARJ21 飞机的分布式协同研发设计

ARJ21 飞机研制过程有以下主要特征:(1) 产品结构层级多,可以分为原材料元器件级、组件级、部件级和系统级;(2) 产品各主要部件和系统之间相互关联程度高;(3) 产品界面和接口十分复杂,耦合性强;(4) 产品研制周期长,流程十分复杂,同时飞机设计定型所需验证、试验和试飞的科目多,仅地面验证试验就多达 53 项;(5) 涉及多种工程技术和使用融合,仅飞机发动机就涉及 24 个大的专业技术领域;(6) 产品研制投入大,成本控制难,研制风险大。总之,ARJ21 飞机是十分典型的复杂产品系统,需要系统内部分层的节点互动,具有长期动态调整特性,只能采取分布式协同研发才能保证项目顺利进行。

ARJ21 飞机研发体系的分布协同特性贯穿于项目全过程。在初始阶段,首先确定民用飞机研发基础架构,并设计相应的研发组织体系模式;由专门成立的中国商用支线飞机公司负责项目总体规划、市场开发、飞机方案设计与协调、工程总体实施计划、销售和服务任务,并作为项目研发的总承包商。其次,按照基于基础架构的分布式模块化研发模式进行研发设计。设计制造分工采用“联合定义、分包设计、专业化制造”的模式,承办单位按照总设计师和总工程师单位的工程总体要求集中联合工作,共同完成飞机的顶层设计。最后,在详细设计阶段制定设计工作包,择优选择有资质单位承担分包部分的详细设计工作。产品的试制和制造分工严格按照航空产业结构能力与布局确定的专业化定点开展工作。具体分布式设计研发模式如图 4 所示。

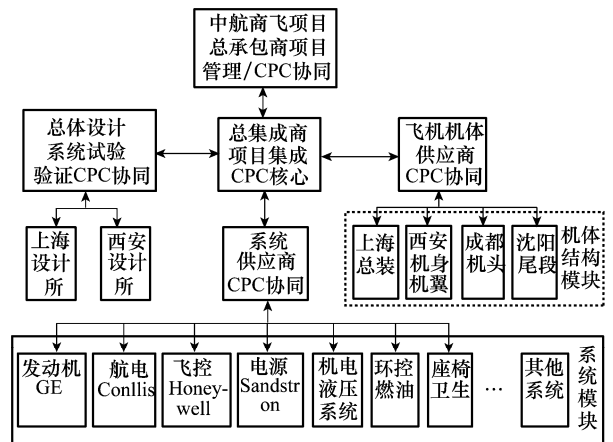


图 4 ARJ21 飞机研发的分布式设计

在 ARJ21 飞机采用分布式协同研发模式的同时,其产品研发的流程管理也根据分布式系统的特点展开。ARJ21 飞机是国内第一家实现异地协同设计研发的项目,也是国内第一家开展全球供应商网络协同研发的项目。采用 CPC 异地协同平台,有效确保了研制的进度,加快了项目协调管理的力度,提高了研发的效率。在项目研发设计过程中,所有的顶层模块都采用一致的流程标准进行分解细化,其中模块的规范化顶层分解设计如图 5 所示。

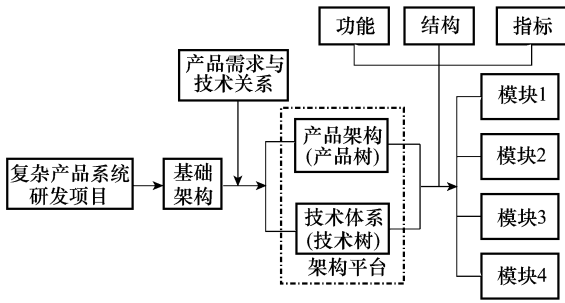


图 5 ARJ21 飞机产品开发的模块顶层分解图

与此同时,ARJ21 飞机研发过程特别注重技术与产品开发的相互支撑、相互促进的互动作用,对飞机研发的核心技术开发与工程应用实施并行管理与交互过程控制。

### 2.2 ARJ21 研发的分布协同 Petri 网

在研发知识管理中,Petri 网技术不仅可以描述某一具体流程的微观知识流动情况,更可以用不同层次的 Petri 网描述系统宏观的知识流动。

在 ARJ21 飞机的研发过程中,按照 2.1 节中分布协同研发系统的结构设计框架,构造了研发的过程阶段模式,如图 6 所示。该图详细描述了基于基础架构平台的研发流程框架,即形成了宏观层面的 Petri 网。

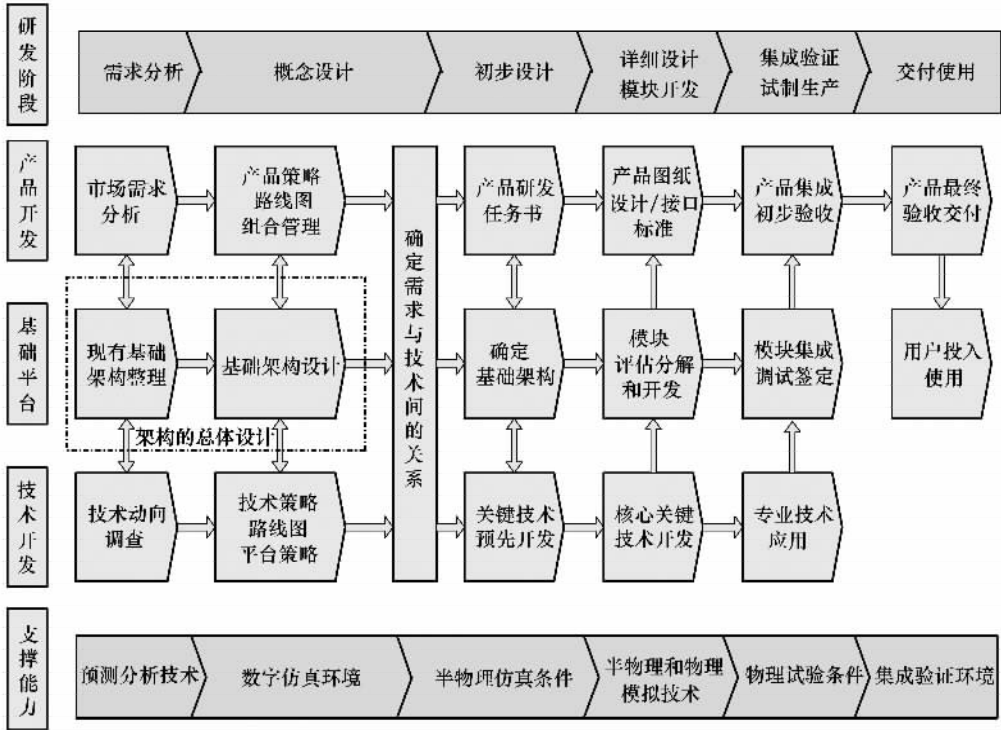


图 6 ARJ21 飞机研发的系统流程框架

这样一个总体层面的研发分布式系统可以实现一定程度上的管理和协同,但是其中一些模块(变迁)的知识描述的粒度是不清晰的,所涉及各个模块很难从上述流程中找到统一的知识协同标准。即各个阶段的研发任务虽然可以通过此流程表示,但是在不同模块的研发环节之间的知识交互并不能得到清晰地反映。这就需要对此框架层次进行细分,针对不清晰的变迁构建子 Petri 网,形成 Petri 网分层。

以粒度清晰为准则将整体框架划分为宏观与微观两个层次。宏观层次由各个部装子系统或者技术模块构成,每个子系统由技术相关或者流程相关的研发机构组成微观层次,划分主要依据飞机研发的分布式设计(见图 4)。宏观层面对应总集成商的工作流程,微观层面对应各分包商的工作流程。这样的划分既有利于协同节点的一致性,又符合组织结构的分工设计,从而使两个层次清晰,协同节点明确。

分层后,再分别使用 Petri 网的技术对宏观流程与微观重点模块进行设计和调试。宏观流程模型如图 7 所示,其

中每一个方块变迁都表示一个微观子模块系统。从而每一个变迁需要根据具体的托肯来触发,就可以较好地控制不同库所之间的知识流动速度,实现研发过程相关知识的有效协同。

从研发项目的宏观流程图中可以看出 ARJ21 飞机的整个研发过程需要许多环节并行和串行开展。尤其在市场可行性分析和基础架构设计两个变迁之间需要使用相同的库所条件,所以需要对此进行合理协调,避免死锁的发生。同时,在知识流并行的环节,如前期的市场调研、技术动向调研和现有架构整理三个环节中,知识流速最慢的环节决定了该环节的知识流动效率,而在后续的串行环节中,每一个环节都制约着整个研发网络的知识效率,所以在对分布协同系统进行优化时,需要对这些环节投入更多的人力物力等,以保证整个研发工作的顺利进行。同时可以看出,模块开发和测试环节需要大量的托肯才能触发,也就找到了系统知识流程中的关键环节,即研发管理的重点环节。据此加强对重点环节的管理,优化托肯的产生过程就可以大

大提高整个系统的知识传输与共享效率,进而保证研发进程。对其中的关键环节进一步使用 Petri 网络建模技术对其进行微观层次的系统设计。以模块开发测试环节为例,根据

2.1 节中模块的规范化顶层分解原则,结合 Petri 网的流程设计,其微观流程图如图 8 所示<sup>[17]</sup>。其中,着色库所表示宏观模型中的上下游接口,即需要给宏观流程传递的托肯。

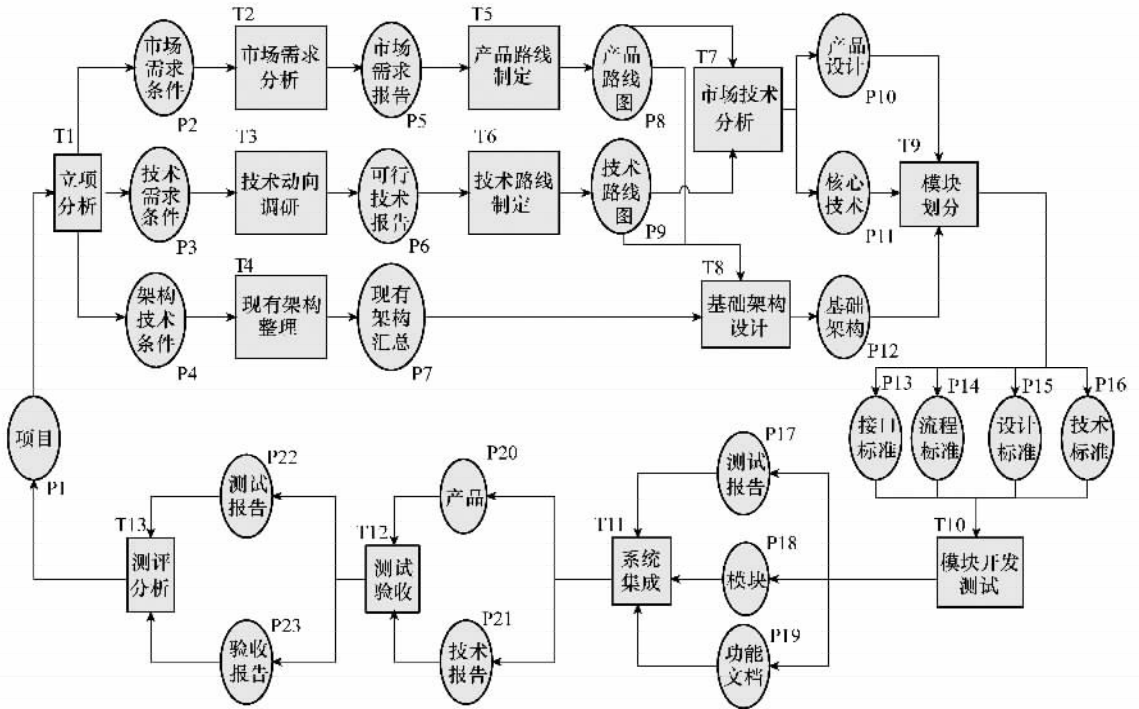


图 7 ARJ21 飞机研发基于 Petri 网的宏观流程图

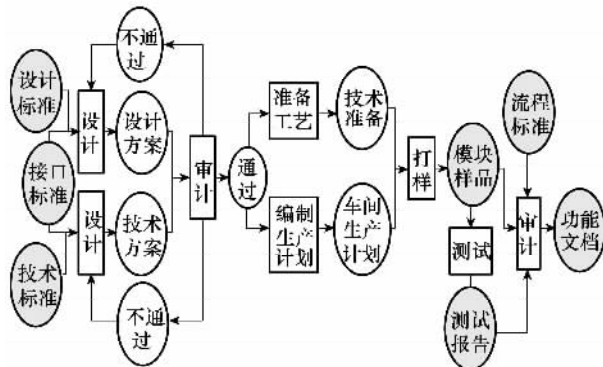


图 8 ARJ21 模块开发测试的 Petri 网微观流程图

图 8 中的椭圆圈是业务流程中的各个条件节点,在节点之间流转的内容就是与业务相关的技术知识,在 Petri 网中可以用托肯来表示。同时,变迁表示的事件模块也可以进一步细化分解到各个部门层次,从而协同在同一机构不同部门之间的知识传递。

从上述 Petri 网模型中可以清楚地看到,当总体部门制定好技术标准、接口标注和设计标准后即可与专业所进行设计定型,此项工作完成后由审计员对方案进行核定。此时,专业所人员与总体部门审计员的知识发生交互,如果通过,则交由下一步工序,否则会把图纸返回专业所。这个环节本身属于知识的耦合过程,需要用循环过程描述控制;同时,这两个环节间的知识属于独立过程可以并行执行,在单一 Petri 网上需要用并行表示,若是着色 Petri 网则使用不

同的托肯来描述。从模型可以清楚地看出该循环环节是整个知识流动的瓶颈环节,只有控制好该环节的效率才能提高研发项目的整体效率。当然,在后续的每一个环节中,知识节点进行交互时都有知识流动的发生,而且知识环节都是串行的,环环相扣,在实践中仍需要注意记录每个环节的知识流动情况,找到制约知识流动的障碍,才能根据其特点予以改进。

### 3 可达性仿真实验

Petri 网的可达性表示网络从一个状态迁移到另一个状态的性质。所谓一个 Petri 网的状态是指每一个库所确定一个托肯分布。给定初始状态  $M_0$  与任意  $M$ ,且  $M_0 \neq M$ ,如果通过  $M_0$  的变迁组合能过渡到  $M$ ,则称状态  $M$  是可达的。如果一个变迁所指库所的托肯数大于输入弧数,即该库所知识量大于输入知识量,就称该变迁是可以触发的。如果在一个 Petri 网的初始状态  $M_0$  下,其所有变迁都是可以触发的,则称该 Petri 网满足可达性,也称该 Petri 网具有活性。通过可达性检验,可以发现死锁,并加以排除。可达性特别包含了 Petri 网的覆盖性,即任何两个库所之间的可达性。所以,可达性问题直接决定了 Petri 网的可行性与运行效率。

可达性检验依据如下必要性定理来实现。

**必要性定理<sup>[16]</sup>** 若  $M_0$  到  $M$  是可达的,则方程  $M = M_0 + A \times f$  存在非负整数解。其中  $A$  是关联矩阵,  $f$  为变迁序列向量。具体形式为

$$A = [a_{ij}]_{m \times n} = [a_{ij}^+ - a_{ij}^-]_{m \times n} \quad (1)$$

$$f = \sum_{i=1}^k v_i \quad (2)$$

式中,  $m$  是 Petri 网中库所数目;  $n$  为变迁数目;  $v_i = (v_i(t_1), v_i(t_2), \dots, v_i(t_n))^T$  为第  $i$  次的变迁分量, 且只有一个

元素为 1。

根据以上定理, 对 ARJ21 分布协同研发的 Petri 网模型进行可达性仿真实验。使用可达性树仿真的结果如表 1 所示。

表 1 研发流程 Petri 网可达树仿真结果表

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
P1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
P3	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P4	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0
P5	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
P6	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P7	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
P10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
P11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
P12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
P13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T2	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
T3	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T4	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1
T5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
T6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
T8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
T9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

从表 1 中可以明显看出, 在 M18 状态, 只有 P12 有托肯, 所以会发生死锁, 以致后续环节不能进行。所以需要原研发流程进行改造才能提高其活性。

究其原因可以看出, 主要是技术路线障碍: P8、P9 需要为两个变迁所调用而导致死锁。所以, 要将 P8 和 P9 各拆分成两个库所, 一个用于市场分析 T7, 一个用于架构设计 T8, 新设计的 Petri 图如图 9 所示。经过改造后的 Petri 网研发体系通过了可达性仿真实验, 具体过程不加赘述。可见, Petri 网在复杂研发项目流程管理优化中有显著的应用效果。

### 4 结束语

针对 ARJ21 飞机研发, 提出了分布式研发系统的一般 Petri 网分析框架, 并且基于知识粒度的清晰化目标, 以多

层 Petri 网解决了复杂环节知识流的描述和优化; 其中, 宏观层次和微观层次内部通过库所实现知识协同, 微观层次之间通过变迁在宏观层次中进行知识流动。如此, 不仅可以清晰描述不同层次的知识流动, 并且能够结合各层次的具体特征和资源, 识别与控制各层次中知识流动瓶颈, 保证上下层次之间知识传递的畅通, 更清晰地体现系统设计意图。而可达性检验是保证研发 Petri 网性能的关键, 用于排除初始研发 Petri 网可能存在的死锁环节。

基于目标的适应性知识流是提高分布协同研发系统效率和质量的关键。考虑到研发的进度控制和需求的动态调整, 今后应当考虑人员、工具、时间、费用等有关研发效率和经济效益的资源信息, 建立含时间参数的动态 Petri 网, 以提高具有长期动态调整要求的复杂产品研发系统的适应性、改进和优化能力。

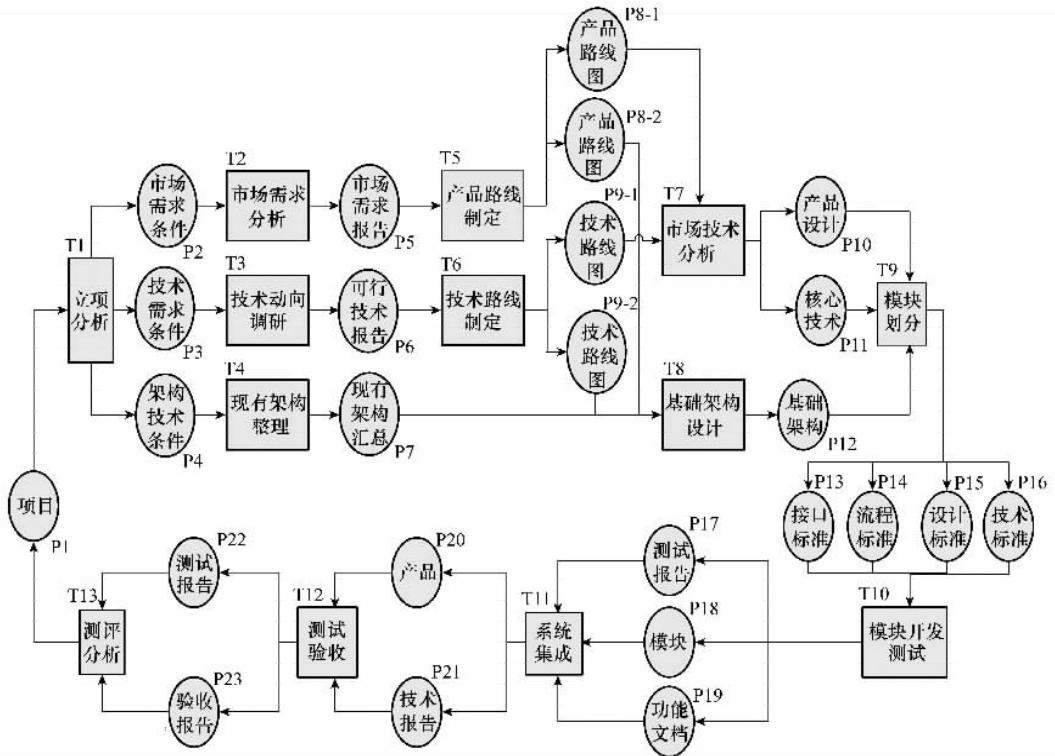


图 9 ARJ21 飞机研发基于 Petri 网的改进流程图

参考文献:

[1] Petri A. Communication mitautomaten[D]. Bonn: Institute for Instrumental Mathematic, 1962.

[2] Vasilis G, Achilles K, Panayotis P. Comparative study and categorization of high-level petri nets[J]. *The Journal of Systems and Software*, 1998, 43(2): 133 - 160.

[3] Ou-Yang C, Winarjo H. Petri-net integration-an approach to support multi-agent process mining[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(4): 4039 - 4051.

[4] Xiao Z J, Zhong M. A method of workflow scheduling based on colored Petri nets[J]. *Data & Knowledge Engineering*, 2011, 70(2): 230 - 247.

[5] Champagnata R, Estebana P, Pingaud H, et al. Petri net based modeling of hybrid systems[J]. *Computers in Industry*, 1998, 36(1 - 2): 139 - 146.

[6] Renato C, Manuel S. Timing and liveness in continuous Petri nets[J]. *Automatica*, 2011, 47(2): 283 - 290.

[7] Fatih 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.

[8] Gaujal B, Jean-Marie A, Mussi P, et al. High speed simulation of discrete event systems by mixing process oriented and equational approaches[J]. *Parallel Computing*, 1997, 23(1 - 2): 219 - 233.

[9] van der Aalst W, van Hee K M. Business process redesign: a Petri-net-based approach[J]. *Computers in Industry*, 1996, 29(1 - 2): 15 - 26.

[10] Zuberek W M, Kubiak W. Timed Petri nets in modeling and analysis of simple schedules for manufacturing cells[J]. *Com-*

*puters and Mathematics with Applications*, 1999, 37(11 - 12): 191 - 206.

[11] 承文, 韩立岩. 航天企业基于知识流的知识管理体系框架[J]. *系统工程与电子技术*, 2006, 28(11): 1675 - 1678. (Cheng W, Han L Y. Framework of knowledge management system based on knowledge flow in aerospace enterprise[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(11): 1675 - 1678.)

[12] Shyamsundar N, Gadh R. Collaborative virtual prototyping of product assemblies over the Internet [J]. *Computer-Aided Design*, 2002, 34(10): 755 - 768.

[13] Bidarra R, Kranendonk N, Noort A, et al. A collaborative framework for integrated part and assembly modeling[C] // *Proc. of the Association for Computing Machinery Solid Modeling Conference*, 2002: 389 - 400.

[14] 徐路宁, 张和明, 张永康. 复杂产品的多领域协同设计[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2004, 25(5): 376 - 379. (Xu L N, Zhang H M, Zhang Y K. Multidisciplinary cooperative design for complex products [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2004, 25(5): 376 - 379)

[15] 周密, 承文, 韩立岩, 等. 知识流模型及其在航天企业中的应用[J]. *中国管理科学*, 2005, 13(5): 79 - 86. (Zhou M, Cheng W, Han L Y, et al. Practice of applying knowledge flow model in the astronautic enterprise[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2005, 13(5): 79 - 86.)

[16] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. (Wu Z H. *Introduction to Petri nets*[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.)

[17] 周密, 韩立岩. 知识流的 Petri 网模型[J]. *计算机工程与设计*, 2005, 26(8): 2149 - 2148. (Zhou M, Han L Y. Modeling knowledge flow with Petri net[J]. *Computer Engineering and Design*, 2005, 26(8): 2149 - 2148.)