

基于设计结构矩阵和着色 Petri 网的产品设计过程建模与仿真

李海涛 杨波 尹晓玲 王兴祖 姚孔
 济南大学, 济南, 250022

摘要: 将设计结构矩阵与着色 Petri 网结合后, 进行了产品设计过程建模与仿真的研究。首先利用设计结构矩阵对产品设计过程进行建模, 从产品设计过程特点出发, 为支持基本过程逻辑的描述定义了着色 Petri 网基本网模型结构, 将设计结构矩阵映射为着色 Petri 网, 建立了产品设计过程着色 Petri 网模型。在此基础上建立了对设计资源进行有效分配的动态分配模型, 通过定量仿真分析, 实现了产品开发过程资源冲突的检测及资源的重新分配和调整。桥式起重机小车设计的实例说明了该方法的有效性。

关键词: 设计结构矩阵; 产品设计过程; 建模与仿真; 着色 Petri 网

中图分类号: TP391.72

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2014.01.021

Product Design Process Modeling and Simulation Based on DSM and Colored Petri Nets

Li Haitao Yang Bo Yin Xiaoling Wang Xingzu Yao Kong
 University of Jinan, Jinan, 250022

Abstract: Combined the DSM (design structure matrix) and the colored Petri nets, this paper presented a research of product design process modeling and simulation. First, the product design process was modeled based on the DSM, and to support the description of the basic logic process, the basic nets model structure of the colored Petri nets was defined from the view of product design process characteristics. Through the mapping from the DSM to the colored Petri nets, a colored Petri nets model of product design process was established. On the basis of that, the dynamic distribution model of the effective design resources distribution was established. Through quantitative simulation analysis, the collision detection, reallocation and adjustment of the resource were realized in the product development process. As an example, a bridge crane car design was used to show the effectiveness of the method.

Key words: design structure matrix; product design process; modeling and simulation; colored Petri net

0 引言

产品设计过程具有分布性、层次性、动态性和离散性等特点, 高效的产品设计离不开高质量的开发过程。一个能准确描述和分析产品开发过程与信息流动的产品开发过程模型, 已成为成功实现产品开发的重要保证^[1]。产品设计过程建模与仿真就是在这种环境下产生的。

为加强产品开发人员之间的协作和协调, 并对产品开发过程进行分析、改进、监控和管理, 常采用关键路径法 (CPM)、计划评审法 (PERT)、UML 方法、IDEF 方法、设计结构矩阵 (DSM) 和 Petri 网等方法。但上述方法在具体应用上仍存在一定的局限性, 如 UML 方法和 IDEF 方法都只是一种描述方法, 无法建立可执行的过程模

型, 不支持过程的分析与改进, 也不是一个好的定量分析方法。为克服以上问题, 许多学者提出了将上述方法结合进行过程建模研究。祖旭^[2]提出了基于 IDEF0 和 Petri 的集成建模方法, 实现了对复杂过程系统的有效分析和仿真; 吕超等^[3]针对可重组制造系统的两种重组方式, 通过将 UML 与 OPN 结合的建模方法来建立可重组制造系统的完整模型。

目前, 还鲜见将 DSM 与 Petri 网相结合, 并基于其算法及操作过程来对设计过程进行建模与仿真的相关应用。作为过程建模的有力工具, DSM 可以通过执行相关的矩阵操作来优化设计过程, 可以描述和分析活动的迭代性, 因此 DSM 方法以及基于 DSM 的一些相关扩展方法在产品领域具有广泛的应用。赵亮等^[4]提出了基于双层次 DSM 技术的多技术系统产品设计方法, 解决了多技术系统产品设计中返工迭代多的问

收稿日期: 2012-08-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50975124, 50905074);
 山东省高等学校科技计划资助项目 (J09LD07)

题;李潇波等^[5]应用数学方法对优化后的 DSM 与原 DSM 的矩阵复杂度进行了计算,使复杂度大大降低,耦合任务流程更为明确和合理。但 DSM 不能清楚表达全局设计活动之间的依赖关系的缺点依旧无法改变。Petri 网具有规范的语义、图形化表达形式、广泛的适用性、数学分析能力、较成熟的数学模型,且有软件对 Petri 网模型进行定性和定量分析,有利于设计过程的优化^[6-10]。因此,将 DSM 和 Petri 网进行结合,对问题的解决具有实质性的帮助。

1 基于 DSM 的产品设计过程建模

过程建模就是在明确设计目标的情况下,把设计任务进行分解,然后通过各个任务的依赖关系进行任务的重组,得到一个合理的设计流程。过程模型是设计过程管理和监督的依据。

1.1 设计过程的单元化建模

产品系统的设计往往是由若干设计任务按照一定的原则或规律进行的。一个复杂的设计过程往往可以分解为一些简单的基本单元。从信息流的角度,依据设计任务之间的时序关系,可将设计任务之间的关系分为串行、并行和耦合,并可采用邻接矩阵的形式加以描述。在此,本文给出了设计结构矩阵基本单元的定义,如图 1 所示。

	A	B
A	*	0
B	1	*

	A	B
A	*	0
B	0	*

	A	B
A	*	1
B	1	*

(a) 串行关系 (b) 并行关系 (c) 耦合关系

图 1 设计任务关联单元模型的矩阵表示

设计任务关联单元模型矩阵中,行元素与列元素之间的关系表示如下:① 对角线上的元素表示设计任务本身,用“*”表示;② 矩阵中的元素“1”表示设计任务之间存在着参数交互,即设计任务 a_j 提供信息给设计任务 a_i ,此时矩阵元素 $a_{ij} = 1 (i \neq j)$;③ 矩阵中的元素“0”表示设计任务 a_j 与设计任务 a_i 没有参数交互, $a_{ij} = 0 (i \neq j)$ 。通过矩阵可以较好地表达设计任务之间局部依赖、制约等复杂关系。

不难看出,设计结构矩阵从时间上表明了任务执行的先后关系。对角线下方的元素表示来自前期任务的信息可以被后面的任务所利用;对角线上方的元素表示后期任务中产生的信息会导致前期任务的返工。

1.2 设计过程的 DSM 建模

单元模型是表达设计任务之间关联关系的基本模型,在此基础上可建立复杂产品的设计结构

矩阵,来表达其组成任务之间复杂的时序关系与关联关系。

设计结构矩阵是一个 N 阶的方阵,矩阵的行和列分别对应各个任务,矩阵的元素 1 和 0 代表任务之间是否有依赖,1 表示有依赖,0 表示无依赖。通过直接对矩阵进行坐标变换,得到新的 N 阶方阵,从而对设计任务进行分析和重组,得到新的流程,实现对设计过程的有效规划,以便对设计过程进行分析、监督和改进。

规定 DSM 的重构遵循以下原则:

(1)使 DSM 尽量成为下三角矩阵。

(2)如果矩阵某一行的元素全部为零,则对应该行的设计任务可以单独进行,而不受其他设计任务的影响。因该任务不需要其他设计任务提供任何知识,所以该任务应该尽可能早地实施和完成。

(3)如果矩阵某一列的元素全部为零,则对应该列的设计应该尽可能晚地在其他设计任务之后执行。因为该任务没有为其他设计任务提供知识,但可能需要其他设计任务提供信息。

DSM 重构的基本过程如图 2 所示。首先根据设计任务之间的依赖关系(本文指设计任务间的参数依赖关系)建立设计任务的有向图。从图 2 可以看出,该产品的设计可分成 7 个设计任务。在此基础上,根据图 1 所描述的单元模型,建立设计任务的初始 DSM 描述模型。然后,按照 DSM 的重构原则,求出重构后的 DSM,并确定有顺序关系、并行关系和耦合关系的设计任务及设计任务的优先级,建立设计流程图。

2 DSM 到 Petri 网的映射算法

复杂产品设计过程中,DSM 建立的模型相当庞大,并且对设计过程的阅读也缺乏整体性的把握。虽已有研究通过建立层次 DSM 将设计过程进行层次化、模块化处理,但在耦合任务多的产品设计中,设计任务的时序关系往往比较混乱,也不能避免设计参数在传递过程中存在的冲突,因此需要一种清晰的图形化建模方法,来反映设计过程中的耦合关系,并描绘设计全过程。Petri 网具有坚实的数学基础和易理解的图形表示特征,这使得用 Petri 网进行分析和交流都非常方便。为此,本文采用 DSM 到 Petri 网的映射算法,实现 DSM 到 Petri 网的映射,从而将设计过程以着色 Petri 网的形式表现出来。

Petri 网由三种基本要素(库所、变迁以及连接两者的弧)组成。通常情况下,一个设计任务可

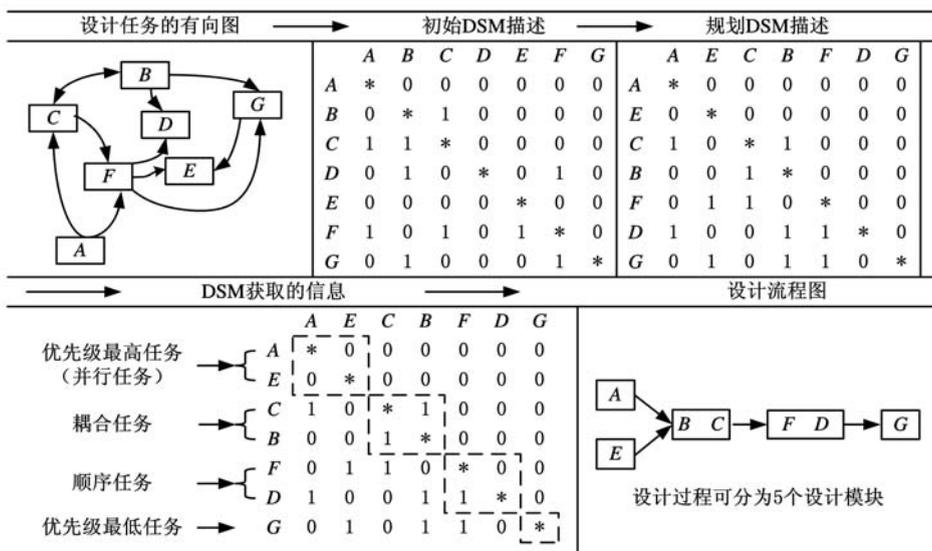


图 2 设计过程的 DSM 建模

以用设计资源、设计行为和满足设计的阈值进行描述,这恰好对应 Petri 网的三要素,库所存放设计资源,资源量用托肯表示;变迁表示设计行为;弧上的权重表示满足设计的阈值,每个设计任务根据定义 1 进行 Petri 网描述。

定义 1 设 $N^* = (P, T, F^*)$ 为一个 Petri 网的三元组,对于 $x \in P \cup T$,满足

- (1) $\bullet x = \{y \mid y \in P \cup T \wedge (y, x) \in F^*\}$
- (2) $x \bullet = \{y \mid y \in P \cup T \wedge (x, y) \in F^*\}$

其中, P 为库所的集合; T 为变迁的集合; F^* 为库所和变迁间有向弧的集合; $\bullet x$ 为 x 的前集或输入集; $x \bullet$ 为 x 的后集或输出集; $\bullet x \cup x \bullet$ 为 x 元素的外延, $x = (\bullet x) \bullet = (x \bullet)$ 。

库所对应着设计任务的条件,即活动发生的因果关系,变迁对应着过程的可执行活动,库所中的托肯代表一个过程实例的状态。一个变迁有一定数量的输入库所和输出库所(分别代表事件的前集条件和后集条件)。当某事件的前集条件成立时,该设计任务(变迁)发生,并将托肯转移到后集库所中。

已有的定义只定义了条件(设计资源)与事件(设计任务)之间的关系,为了清晰描述设计任务与设计任务之间的联系(变迁与变迁之间的关联),将定义 1 进行推广,得到定义 2。

定义 2 设 $N^* = (P, T, F^*)$ 为一个 Petri 网的三元组,对于 $x \in P \cup T$,满足

- (1) ${}^*x = \bullet(\bullet x)$
- (2) $x^* = (x \bullet) \bullet$

其中, *x 为 x 的前序或输入序; x^* 为 x 的后序或输出序; ${}^*x \cup x^*$ 为 x 元素的序外延。

本文依据参数关联定义任务间的时序,如图

1a 中具有串联关系的设计任务 A 与 B。设计任务 A 将设计参数传递给设计任务 B 后,设计任务 B 才能够顺利进行,称为 A 是 B 的前序任务, B 为 A 的后序任务,设计任务 A、B 为串行关系。如果两个相邻的变迁(设计任务)互为前序和后序关系,则两种设计活动是耦合关系,存在数据参数的相互传递。因此在协同设计环境下,这两个设计任务最好划分为在一个设计小组内进行。

以图 2 所示的设计过程为例,说明 DSM 向 Petri 网的映射算法。该设计共有 7 个设计任务,它们之间设计参数传递关系如图 3 所示。

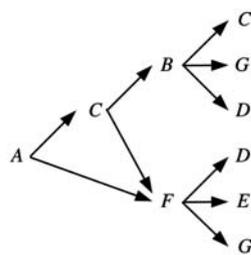


图 3 设计任务间设计参数传递的树状图

DSM 向 Petri 网的映射算法如下:

(1) 根据设计任务间的参数传递关系建立 DSM。

(2) 遍历 DSM 中值为 1 的元素,找出其纵横坐标,建立设计参数传递关系集: $M = \{(A, C), (A, F), (C, B), (C, F), (F, D), (F, E), (F, G), (B, C), (B, G), (B, D)\}$ 。

(3) 搜索 DSM,标识任务间的时序关系,即判定该任务是前序任务、后序任务还是与其他任务没有联系(可进行并行设计),具体方法为: $\forall m \in \{A, B, C, D\}, \forall n \in \{A, B, C, D\}$, 如果 m 和 n 之间的关联 $(m, n) \in M$, 那么任务 m 是前序任务, n 为后序任务, 否则他们之间没有参数传

递,为并序关系。

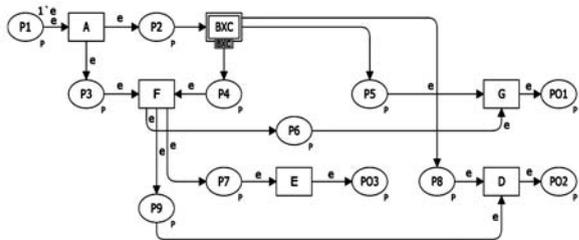
(4) 将每个设计任务分为设计任务准备和执行两个阶段。其中,设计任务准备用库所表示,库所包含设计资源;执行用变迁表示,代表设计。因此 7 个设计任务可以分成 7 种状态和 7 种行为,即 $P = \{A_{sat}, B_{sat}, C_{sat}, D_{sat}, E_{sat}, F_{sat}, G_{sat}\}$, $T = \{A_{act}, B_{act}, C_{act}, D_{act}, E_{act}, F_{act}, G_{act}\}$, P 中的 $A_{sat} \sim G_{sat}$ 为库所, T 中的 $A_{act} \sim G_{act}$ 为变迁,连接两者的关系用有向弧来表示。

(5) $\forall P_{sat,i} \in P$ 及对应的 $\forall t_{act,i} \in T$,任取有向弧 $f = (P_{sat,i}, t_{act,i}) \in F^*$,这三者构成了设计任务的一组 Petri 网单元,构成的三元组单元为 $\{P_{sat,i}, t_{act,i}, (P_{sat,i}, t_{act,i})\}$ 。

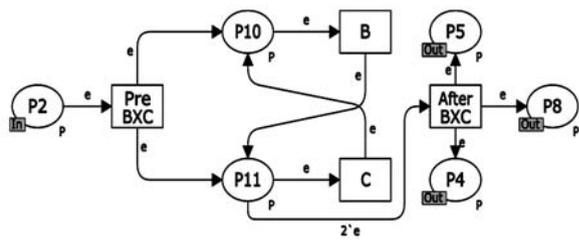
(6) 每组 Petri 网单元之间,即设计任务间的关联,用一条由变迁指向库所的有向弧表示,即 $(t_{act,i}, P_{sat,i+1})$ 。 $P_{sat,i+1}$ 为下一个设计任务的准备阶段。

(7) 最后添加输出库所,以及末端变迁与输出库所之间的有向弧联系,形成一个完整的 Petri 网。

因此,根据 DSM 向 Petri 网的映射算法,将图 2 所示的设计过程转化为如图 4 所示的 Petri 网。由于 B、C 间为耦合关系,将 B、C 建立层次化子模型单独描述。从图 4 可以看出,设计任务 F 需在设计任务 B 与设计任务 C 的耦合任务 $B \times C$ 及设计任务 A 均完成后才能进行,此外, F 的后序任务为 G、E、D。



(a)DSM 向 Petri 映射的父模型



(b)DSM 向 Petri 映射的子模型

图 4 DSM 向 Petri 映射的模型

3 基于着色 Petri 网过程建模及分析

着色 Petri 网是在 Petri 网的基础上提出的

一种扩展的 Petri 网模型,用于建立复杂的过程模型。相比 Petri 网,它具有表达能力强、结构简单、层次清晰等优点,因此本文采用着色 Petri 网对设计过程进行建模。

3.1 基于着色 Petri 的设计过程建模

着色 Petri 网模型要素(库所、变迁、弧)表示设计过程的要素(设计资源、设计行为、操作),用这些模型要素的属性来区分同一类型系统要素的不同个体。着色 Petri 网中,称这些属性为色彩。着色 Petri 网将 Petri 网中的托肯扩展为颜色集,对托肯着以不同的颜色,其实质就是对托肯进行分类,以表达复杂的对象。

设计过程中的着色 Petri 网建模可以通过定义 3 完成。

定义 3 产品设计过程阶段的建模用九元组着色 Petri 网来描述,即 $(\Sigma, P, T, A^+, N^+, C^+, G^+, E^+, I)$,且各元素需满足下列条件:

(1) Σ 是有限非空类的集合,称为颜色集。颜色集决定了着色 Petri 网中的类型、运算和函数。

(2) P 是各个设计任务前集中资源的有限集合。

(3) T 是各个设计任务的有限集合。

(4) A^+ 是设计任务和设计条件之间传递权重的有限集合,并且 $P \cap T = P \cap A^+ = T \cap A^+ = \Phi$ 。

(5) C^+ 是由设计任务集合映射到颜色集的颜色函数。

(6) N^+ 为节点函数,是 A^+ 映射到 $P \times T \cup T \times P$ 的函数,这里 \times 表示 P 与 T 的笛卡尔积。

(7) G^+ 为由设计任务映射到表达式的守卫函数,其值为布尔型变量类型,且函数中的变量属于 Σ 。

(8) E^+ 是由弧映射到表达式的函数,其值必须属于此弧响应库所的颜色集上的多重集。

(9) I 是由设计资源映射到表达式的初始化函数。其值必须属于设计资源颜色集上的多重集。

结合定义 3,着色 Petri 网中的映射关系采用标注的形式体现。Petri 网三元组的标注顺序如图 5 所示。我们规定:①库所 P 的标注顺序是名字、类型/颜色集、初始标识;②变迁 T 的标注顺序是名字、警卫函数、时间延迟、代码段;③弧 f 只有一个标注,标注可为函数、常数、变量等。

着色 Petri 网具有有效的分析技术和工具,其中的 CPN tools 是丹麦奥尔胡斯大学和美国宇航局联合开发的一个集编辑、仿真和分析于一体

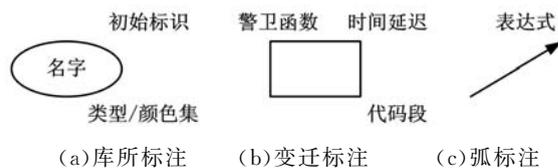


图 5 Petri 网三元组元素的标注顺序

的着色 Petri 网工具,它结合了 Petri 网可以描述开发过程以及程序语言可以定义数据类型和操作数据的特点。因而 CPN tools 既可以用来验证系统的功能或逻辑的正确性,又可以进行系统性能的评价,为此,本文用 CPN tools 进行设计过程的建立及仿真。

3.2 着色 Petri 网的分析

建立了设计过程的着色 Petri 网模型后,可对其进行分析。对着色 Petri 网的分析包括定性分析和定量分析。

3.2.1 着色 Petri 网的定性分析

着色 Petri 网定性分析是指通过分析 Petri 网模型逻辑上的正确性来消除异常结构。用 CPN tools 进行建模时,着色 Petri 网模型自行进行仿真并生成空间状态报告,空间状态报告详细描述该着色 Petri 网模型的可达性、有界性、活性、回复性、公平性等性质。产品开发过程中,当完成其着色 Petri 网模型后,通过空间状态报告可发现所建模型中存在的不可回复和死的变迁,以及死锁发生在哪些变迁(事件)处。在此基础上,可对方案进行有效修改,避免产品开发繁复的迭代过程,减少设计开发的危险。

3.2.2 着色 Petri 网的定量分析

着色 Petri 网在逻辑上正确时,需判断设计过程能否达到设计要求,因而要进行定量分析。通常情况下,可利用 CPN tools 的监视功能以及库所和变迁的时间阀进行系统建模的定量分析。从模型中获取有效数据,并对数据进行分析 and 比较,可以很好地研究系统的性能。定量分析可用在以下两个方面:

(1)资源冲突及资源利用率分析。通过 Petri 网对资源属性的分析,可以更方便地进行资源的 Petri 网建模。设计过程不可避免地发生资源利用冲突,通过着色 Petri 网对资源进行描述,可以得到不同颜色的集合, Petri 网模型描述了资源的利用情况,当发现冲突则停止仿真分析,并进行错误检查。仿真过程中,当完成了定性仿真,并确定没有冲突,可通过定量分析得到各资源的利用率情况。每个资源的利用率各不相同,当高利用率资源有损耗时,设计过程经过一定次数的循环后,

这些设计资源有可能不足以满足设计任务所需要的量,造成资源冲突,此刻,我们需更改设计过程,使其在设计完成前不能有死锁的发生。

(2)时间分析。设计过程的一个非常重要的参数是时间。着色 Petri 网可以模拟设计过程的执行情况,得到设计过程的时间消耗特征,如反应时间、等待时间、项目设计进度等。设计过程中,有不同的设计方案,在方案抉择中,通过着色 Petri 网的建模并经过多次仿真,得到各个设计方案的平均设计时间,可选择用时最少的方案,并通过调整方案,得到最满意的设计方案。

4 实例

桥式起重机是横架于车间、仓库和料场上空进行物料调运的起重设备,下面以桥式起重机小车为例说明基于 DSM 和着色 Petri 网的产品设计过程建模与仿真策略的应用。桥式起重机小车的基本组成如图 6 所示。

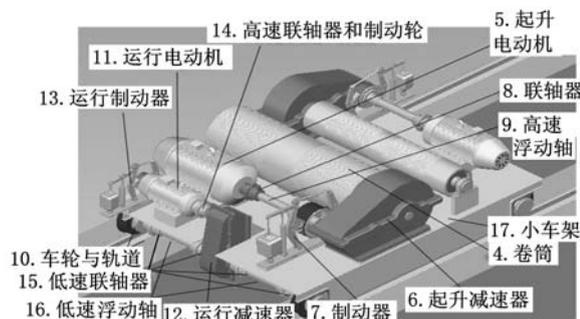


图 6 桥式起重机小车实物图

4.1 基于 DSM 的设计过程改进与重组

根据桥式起重机小车的结构设计特点,我们将其设计要求进行分解,确定其设计任务主要由以下部件设计的子任务组成:1. 滑轮组和吊钩组;2. 钢丝绳;3. 起升动滑轮;4. 卷筒;5. 起升电动机;6. 起升减速器;7. 制动器;8. 联轴器;9. 高速浮动轴;10. 车轮与轨道;11. 运行电动机;12. 运行减速器;13. 运行制轴;14. 高速联轴器和制动轮;15. 低速联轴器;16. 低速浮动轴;17. 小车架。这 17 个设计任务是有参数传递的,如子任务 1 设计参数需要传递给子任务 4、5、6、7,子任务 14 的设计参数要传递给 11、13、15,其他依次类推。根据图 1 所示的构造设计结构矩阵基本单元模型,可以建立表 1 所示的桥式起重机设计任务矩阵,即初始 DSM 描述。

根据设计结构矩阵的重组法则,通过对表 1 所示的设计矩阵进行变换,可得到表 2 所示的新矩阵,即规划 DSM 描述。

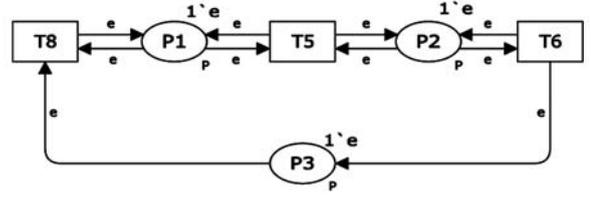
表 1 桥式起重机初始 DSM 描述

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	滑轮组和吊钩组	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	钢丝绳	1	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	起升动滑轮	0	1	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	卷筒	1	1	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	起升电动机	1	1	0	0	*	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	起升减速器	1	1	0	1	1	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	制动器	1	0	0	1	1	1	*	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	联轴器	0	0	0	0	1	1	0	*	1	0	0	0	0	0	0	0	0
9	高速浮动轴	0	0	0	0	1	0	1	1	*	1	0	0	0	0	0	0	0
10	车轮与轨道	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0	0
11	运行电动机	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	*	1	0	1	0	0	0
12	运行减速器	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	*	0	0	0	0	0
13	运行制动器	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	*	1	0	0	0
14	高速联轴器和制动轮	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	*	0	0	0	0
15	低速联轴器	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	*	0	0
16	低速浮动轴	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	*	0	0
17	小车架	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	*

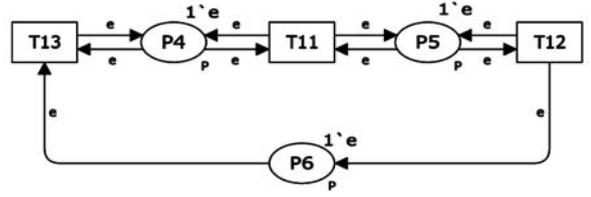
表 2 桥式起重机规划 DSM 描述

		10	1	2	3	4	6	5	8	7	9	12	11	14	13	15	16	17
10	车轮与轨道	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	滑轮组和吊钩组	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	钢丝绳	0	1	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	起升动滑轮	0	0	1	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	卷筒	0	1	1	0	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	起升减速器	0	1	1	0	1	*	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	起升电动机	0	1	1	0	0	1	*	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	联轴器	0	1	0	0	0	1	1	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	制动器	0	0	0	0	1	1	1	1	*	0	0	0	0	0	0	0	0
9	高速浮动轴	0	0	0	0	0	1	0	1	1	*	0	0	0	0	0	0	0
12	运行减速器	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*	1	0	0	0	0	0
11	运行电动机	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	*	0	1	0	0	0
14	高速联轴器和制动轮	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	*	0	0	0	0	0
13	运行制动器	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	*	0	0	0	0
15	低速联轴器	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	*	0	0	0
16	低速浮动轴	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	*	0
17	小车架	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	*

规划后的设计结构矩阵可以提炼出 2 组耦合任务集:5、6、8 属耦合关系,11、12、13 属耦合关系。因此,把它们按照聚类关系分配在可顺序执行设计的 2 个小组内完成其设计。根据 DSM 向 Petri 网的映射关系得到用 Petri 网表示的两组耦合任务基础模型,如图 7 所示。



(a) 耦合任务 1:5、6、8 耦合的 Petri 网表示



(b) 耦合任务 2:11、12、13 耦合的 Petri 网表示

图 7 耦合设计任务的 Petri 网表示

4.2 DSM 向 Petri 网映射及模块化设计流程的构建

据 DSM 向 Petri 网的映射算法,我们将桥式起重机 DSM 向 Petri 网映射,得到图 8 所示的基于 Petri 网的设计过程模型。表 3、表 4 所示为桥式起重机设计过程 Petri 网模型中,库所和变迁的含义。由着色 Petri 网可以得到 T5、T6、T8 相互耦合,T11、T12、T13 相互耦合,而它们之间又没有参数传递,可以并行执行,由此描述设计过程的时序关系。

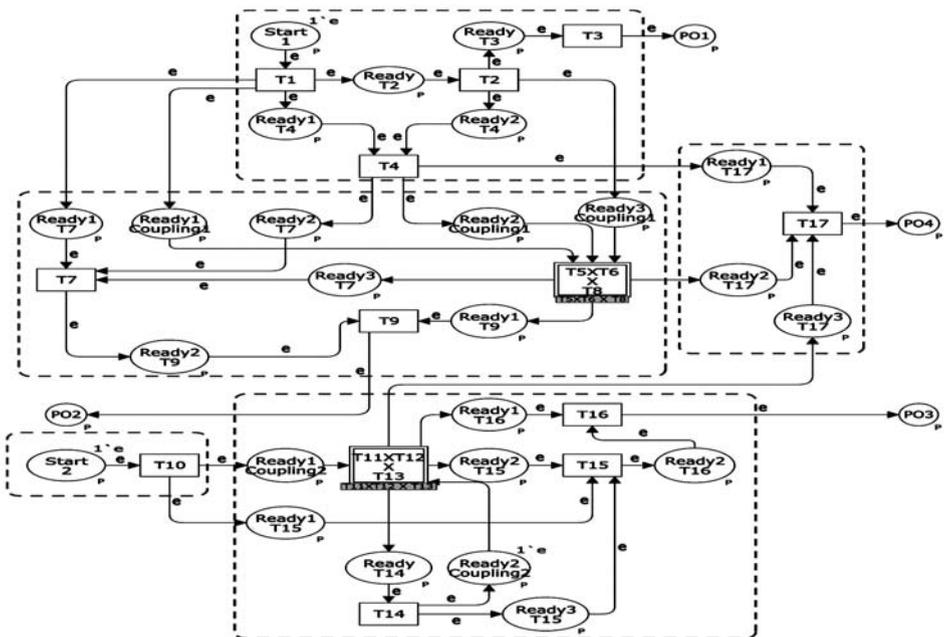


图 8 基于 DSM 的小车设计过程着色 Petri 网模型

表 3 设计过程中库所含义对照表

库所	含义
Start 1	滑轮组和吊钩组设计资源准备
Ready T2	钢丝绳设计资源准备
Ready T3	起升动滑轮设计资源准备
Ready1 T4	卷筒设计资源准备 1
Ready2 T4	卷筒设计资源准备 2
Ready1 Coupling1	耦合设计 1 资源准备 1
Ready2 Coupling1	耦合设计 1 资源准备 2
Ready3 Coupling1	耦合设计 1 资源准备 3
Ready1 T7	制动器设计资源准备 1
Ready2 T7	制动器设计资源准备 2
Ready3 T7	制动器设计资源准备 3
Ready1 T9	高速浮动轴设计资源准备 1
Ready2 T9	高速浮动轴设计资源准备 2
Start 2	车轮和轨道设计资源准备
Ready1 Coupling2	耦合设计 2 资源准备 1
Ready2 Coupling2	耦合设计 2 资源准备 2
Ready T14	高速联轴器和制动轮设计资源准备
Ready1 T15	低速联轴器设计资源准备 1
Ready2 T15	低速联轴器设计资源准备 2
Ready3 T15	低速联轴器设计资源准备 3
Ready1 T16	低速浮动轴资源准备 1
Ready2 T16	低速浮动轴资源准备 2
Ready1 T17	小车架设计资源准备 1
Ready2 T17	小车架设计资源准备 2
Ready3 T17	小车架设计资源准备 3
PO1	输出 1
PO2	输出 2
PO3	输出 3
PO4	输出 4

表 4 设计过程中变迁含义对照表

变迁	含义
T1	滑轮组与吊钩组设计
T2	钢丝绳设计
T3	起升动滑轮设计
T4	卷筒设计
T5×T6×T8	起升电动机、起升减速器和联轴器耦合设计
T7	制动器设计
T9	高速浮动轴设计
T10	车轮和轨道设计
T11×T12×T13	运行电动机、运行减速器和运行制动器耦合设计
T14	高速联轴器和制动轮设计
T15	低速联轴器设计
T16	低速浮动轴设计
T17	小车架设计

实际生产过程中,要求缩短产品的设计周期,产品设计也不是顺序进行的,而是利用模块化、层次化、资源利用最大化的产品设计方法,来缩短设计周期,使产品快速上市,形成产品竞争力。因此,通过对着色 Petri 网模型的分析,按照模块化设计原则,确定将桥式起重机小车的设计由 5 个设计小组来完成,即小车架设计小组 (Team 1)、车轮和轨道设计小组 (Team 2)、小车运行机构模块设计小组 (Team 3)、钢丝绳卷绕系统设计小组

(Team 4)和传动装置设计小组 (Team 5)。各个小组所包含的设计任务如表 5 所示。

表 5 设计小组的划分

设计小组划分	设计小组包含的设计任务
Team 1	T17
Team 2	T10
Team 3	T11、T12、T13、T14、T15、T16
Team 4	T1、T2、T3、T4
Team 5	T5、T6、T7、T8、T9

设计模块之间存在着时序关系,由着色 Petri 网模型可以得出具有时序关系的桥式起重机模块化设计流程,如图 9 所示。

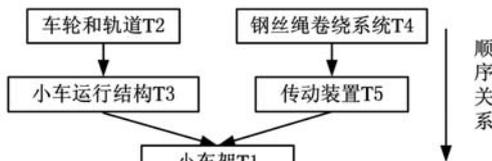


图 9 桥式起重机模块化设计流程

在建立有优先顺序的多个设计模块模型时,通过引入反库所的形式来反映变迁(设计任务)发生的先后。

4.3 设计任务优先级基本单元模型

本文利用反库所构造变迁优先级别,来反映不同设计小组执行设计任务的先后顺序。图 10 中,由于弧 T1 - P2、P2 - T2 与 T2 - Anti - place、Anti - place - T1 的方向相反,所以库所 Anti - place 叫做反库所。下面给出反映设计任务优先级级别的基本单元模型。

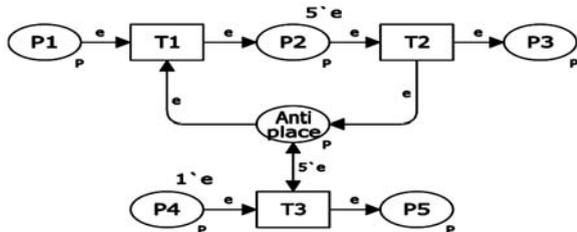


图 10 利用反库所构造的设计任务优先模型

设计任务 T2 处在使能状态,激发 T2,使得 T2 的后集 P3 和 Anti - place 增加托肯,当库所 Anti - place 里的托肯增加到其连接变迁 T3 的弧上的权重时(权重为 5'e,表示此设计任务需要 5 个单元的资源),由于 T3 满足激发的前提条件(T3 的两个前集中的托肯数均小于它们到变迁 T3 连接的权重),那么我们说 T2 的后序设计任务 T3 满足了激发条件。设计过程模型中,此优先级模型常用在设计模块的优先顺序的构造上。

4.4 基于着色 Petri 网的资源冲突仿真

根据上述分析,采用 CPN ML 描述方法,建立资源冲突环境下的桥式起重机小车机构的设计

过程着色 Petri 网模型。首先,根据定义 3,给出其着色 Petri 网模型的定义。

(1)设计过程的着色 Petri 网模型的三个元素:设计资源(库所)、设计行为(变迁)和连接两者的有向弧。

(2)定义起重机小车设计资源有 5 种,即人力资源、计算机硬件资源、计算机软件资源、物料资源和信息资源。因此设定颜色集: $colset\ PACK-AGE = with\ human\ | hardware\ | software\ | material\ | information$ 来表示设计资源集合。

(3)初始函数:用于表示设计资源映射到表达式的初始函数。如钢丝绳卷绕系统设计小组的初始设计资源,是一个多重集,其初始函数为 $1\ hu-$

$man\ ++5\ hardware\ ++1\ software\ ++1\ material\ ++2\ information$ 。

(4)设计任务映射到表达式的守卫函数。这里我们没有定义守卫函数,守卫函数为空。因此守卫函数的布尔型表达默认为 true。

(5)弧表达式函数:表示生成一个依赖于相邻库所颜色集的多重集合。如钢丝绳卷绕系统设计小组 Team 4 设计完成后,资源释放的量值,其弧表达式函数可用多重集 $a\ ++b$ 表示。

根据模块化设计、并行设计及资源利用最大化要求,按照定义 3 的规范,即可建立面向资源冲突检测的、桥式起重机小车设计流程图,并利用 CPN tools 建立其仿真模型,如图 11 所示。

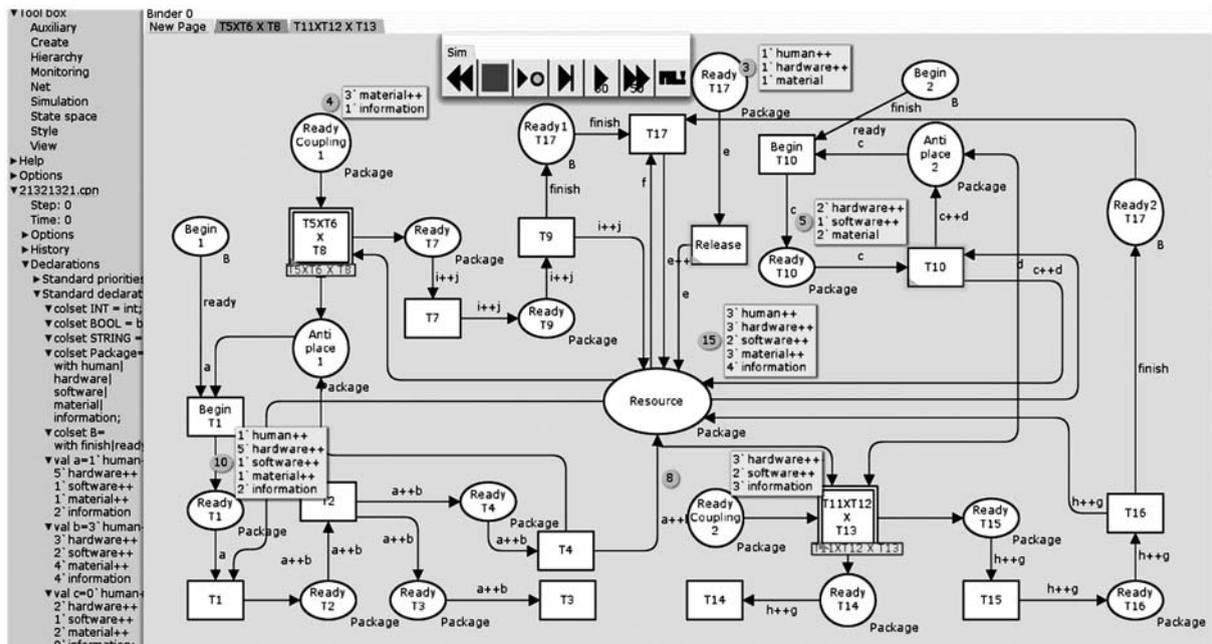


图 11 桥式起重机小车设计过程仿真模型

图 11 所示的着色 Petri 网模型体现了设计过程的层次性(图 11 中的 2 个耦合任务采用替代变迁连接子页)、离散性(划分为 5 个设计模块便于设计并行,缩短设计时间)、分布性及动态性(资源的动态性分配)的需求,其建模具有合理性。

4.5 着色 Petri 网的分析

根据图 11 建立的桥式起重机小车设计过程仿真模型,利用 CPN tools 软件,可生成其状态空间报表,从中可以得到所建立的着色 Petri 网模型的一系列的性质。这里截取报告的一部分来分析所建立的着色 Petri 网的有界性、活性和公平性部分,如图 12 所示。

当过程被锁住,不能继续进行,称为“死锁”;设计被黏住,不能继续进行,称为“活锁”。图 12 中,整个着色 Petri 网中的“死锁”发生在变迁 Begin T1 和 Begin T2 处。我们发现,变迁 Begin T1

和变迁 Begin T2 各自的前集库所 Begin 1 和库所 Begin 2 并没有进入流程发挥作用。此网中不存在“活锁”的情况,即设计过程没有被“黏住”进入死循环。

表达设计模块的时序关系时,加入反库所的形式,将设计过程划分为 5 个设计模块并由 5 个设计小组完成。前序设计模块完成后,后序设计模块才能进行;前序任务所需的资源不足时,后序设计任务的资源可以优先释放,来满足前序设计任务,从而避免由于资源冲突造成的“活锁”和“死锁”状态。

4.6 DSM 与 Petri 网集成建模评价效率及评价指标

通过构建 DSM 可以看出,每个设计任务均有明确的前序任务和后序任务,但无法判断此设计任务处于整个流程的具体位置,也不知何时会

Boundedness Properties		
Best Integer Bounds	Upper	Lower
New_Page'Anti_place_1 1	10	0
New_Page'Anti_place_2 1	5	0
New_Page'Begin_1 1	0	0
New_Page'Begin_2 1	0	0
New_Page'Ready_T16 1	16	0
New_Page'Ready_Coupling_1 1	8	0
New_Page'Ready_Coupling_2 1	4	0
New_Page'Ready_T10 1	5	0
New_Page'Ready_T11 1	10	0
New_Page'Ready_T14 1	16	0
New_Page'Ready_T15 1	16	0
New_Page'Ready_T17 1	6	0
New_Page'Ready_T2 1	26	0
New_Page'Ready_T3 1	26	0
New_Page'Ready_T4 1	26	0
New_Page'Ready_T7 1	21	0
New_Page'Ready_T9 1	21	0
New_Page'Resource 1	48	4
Liveness Propertied		
Dead Markings		
[119]		
Dead Transition Instances		
New_Page'Begin_T1 1		
New_Page'Begin_T2 1		
Live Transition Instances		
None		
Fairness Properties		
No infinite occurrence sequences		

图 12 状态空间报告中的有界性、活性与公平性分析

进行此项任务,缺乏对设计流程的整体的监控和管理。但是通过 DSM 和 Petri 网的集成建模,根据 Petri 网的仿真,很容易得出顺序任务、并行任务及耦合任务,且设计流程一目了然。Petri 网的替代变迁体现出设计任务的层次性,及仿真过程的动态性、离散性等,相对于其他的过程建模所体现出的仅仅描述的方法,优势明显。因此,结合 DSM 的任务重组及 Petri 网的仿真,在进行设计过程建模时,具有实际意义。

5 结语

针对复杂产品在设计初期就要分析其设计的可行性,并对其进行有效规划,本文提出了将 DSM 与着色 Petri 网相结合的过程建模方法,其主要工作有:①提出了一种设计过程的单元化建模方法和基于 DSM 重构的设计过程建模方法;②结合 DSM 和 Petri 网的过程建模优点,推导出由 DSM 到 Petri 网的映射算法,并构建了与 DSM 单元矩阵相对应的 Petri 网单元模型;③将基于着色 Petri 网的过程建模及分析方法,运用在机械产品设计开发领域,对产品的设计规划、监控及判断设计方案优劣有很好的参考价值。

本文中的研究仍有一定的局限性,如 DSM 向 Petri 网的映射仅限在 Petri 网的图形表达上,因此不能用计算机自动进行映射;此网中虽然加入了优先级概念,但是没有加入时间的分析,及通

过监控分析数据来进行分析建立的设计流程。此外, Petri 网具有严格的数学表述方式,如何在 Petri 网严格数学形式的关联矩阵和设计结构矩阵之间建立一种联系,从而满足自动映射;复杂产品过程模型建立后,如何根据资源的更改或增减实时修改 Petri 网模型,增强 Petri 网的可拓展性;如何提高模型验证、性能分析方法等的有效性,这些都有待继续深入研究。

参考文献:

- [1] 王啸峰,卞致瑞. 基于有色 Petri 网的产品协同开发过程建模方法研究[J]. 工程设计学报, 2010, 17(2):91-97.
Wang Xiaofeng, Bian Zhirui. Modeling Technology of Product Collaborative Development Process Based on Colored Petri Nets[J]. Journal of Engineering Design, 2010, 17(2):91-97.
- [2] 祖旭. 基于 Petri 网理论的产品开发过程建模方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
- [3] 吕超,李爱平,徐立云. 基于 OPN 与 UML 的可重组制造系统建模方法研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(22):2680-2686.
Lü Chao, Li Aiping, Xu Liyun. Research on Modeling of Reconfigurable Manufacturing System Based on OPN and UML[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(22):2680-2686.
- [4] 赵亮,许正蓉. 基于双层次 DSM 技术的多技术产品设计方法[J]. 中国机械工程, 2008, 19(3):338-342.
Zhao Liang, Xu Zhengrong. Two-layer DSM Method for Multi-tech System Product Design[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(3):338-342.
- [5] 李潇波,赵亮,许正蓉. 基于改进的 DSM 耦合任务规划方法的研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(2):212-217.
Li Xiaobo, Zhao Liang, Xu Zhengrong. Research on Improved DSM Algorithm for Coupling Task Order Programming[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(2):212-217.
- [6] Shen R L, Yang Chengying, Li Jiahong. Analysis of the Problem Description in the Algorithm for Inventive Problem Solving Using Petri Nets[J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 35:290-303.
- [7] 曲长征,于永利,陶凤和. 无优先权维修活动及其 Petri 网建模[J]. 中国机械工程, 2011, 22(2):204-207.
Qu Changzheng, Yu Yongli, Tao Fenghe. Non-priority Maintenance Activity and Modeling Based on Petri Net[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(2):204-207.

角接触球轴承保持架柔性多体动力学分析

姚廷强 谢伟 谭阳

昆明理工大学,昆明,650093

摘要:考虑套圈、钢球和保持架的结构弹性变形与动态接触关系,建立了角接触球轴承柔性多体接触动力学有限元仿真模型。在不同引导游隙、转速和径向力下,运用 ANSYS/LS-DYNA 仿真分析了角接触球轴承的动力学性能,以及保持架的动态冲击应力和稳定性。计算讨论了角接触球轴承的动态接触应力,获得了保持架的角速度、动态冲击应力、质心运动轨迹等仿真结果,它们与理论计算结果具有较好的一致性。结果表明,球轴承运动速度的变化对保持架的动态冲击应力和稳定性的影响较大。

关键词:角接触球轴承;保持架;有限元法;动力学分析

中图分类号:TH133.33;O313.7

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.01.022

Flexible Multi-body Dynamics Analysis on Cage of Angular Contact Ball Bearings

Yao Tingqiang Xie Wei Tan Yang

Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650093

Abstract: Considering the structural deformation of inner, outer and cage and dynamic contact relationship among the ball, raceways and cage, a flexible multi-body contact dynamics model of angular contact ball bearings was established by FEM (finite element method). The dynamic contact simulation analysis was achieved by ANSYS/LS-DYNA and the calculated dynamics characteristics were discussed with different radial loads, rotating speeds, guide clearances. The calculated results of angular contact ball bearings were verified by theoretical values such as dynamic contact stress, angular speed of cage, dynamic impact stress and trace of cage's center. The dynamic impact stress and stability of cage are affected especially by the variety of angular speed.

Key words: angular contact ball bearing; cage; finite element method; dynamics analysis

0 引言

滚动轴承力学研究历经了静力学、拟动力学和动力学过程。Wensing^[1]利用广义型函数描述外圈结构弹性变形,运用 ANSYS 对球轴承动力学进行模态分析和瞬态分析。Rubio 等^[2]基于有限元法,利用 Algor 仿真分析了圆柱滚子轴承的相关特性。Harris^[3]运用有限元方法仿真分析了不同滚子母线圆柱滚子轴承的静力学特性。穆立祥^[4]利用 ANSYS 对球轴承有限元模型进行静力学分析。唐云冰^[5]分别采用拟动力学方法和有限

元法研究了球轴承的静态载荷分布规律。文献[6-7]在 ANSYS/LS-DYNA 中建立了正常的和缺失钢球的深沟球轴承的动力学有限元模型,来研究钢球缺失对轴承动态性能的影响。林腾蛟等^[8]应用软件 ANSYS/LS-DYNA 对不同转速下深沟球轴承的运动状态进行了动力接触分析。高春良^[9]采用 ANSYS/LS-DYNA 分析了正常和存在故障情况下球轴承的动力学性能。文献[10-11]考虑了保持架构件柔性变形的影响,运用 ADAMS 分析了刚性和柔性保持架的质心运动轨迹。文献[12-13]忽略保持架、摩擦和钢球的弹性变形,运用多体动力学方法,计算了深沟球轴承和角接触球轴承的柔性多体接触动力学特性与振动

收稿日期:2013-03-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11002062);昆明理工大学引进人才启动基金资助项目(KKSA201101018)

[8] Ha Seungchul, Suh Hyo-Won. A Timed Colored Petri Nets Modeling for Dynamic Workflow in Product Development Process[J]. Computers in Industry, 2008, 59:193-209.

[9] 谢楠,李爱平. 基于扩展随机 Petri 网的可重组制造系统建模与分析方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12):224-230.

Xie Nan, Li Aiping. Modeling and Analysis of

Reconfigurable Manufacturing System by Extended Stochastic Petri Nets[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12):224-230.

[10] 李青. 基于 CPN 软件开发过程建模[D]. 东营:中国石油大学(华东), 2009. (编辑 张洋)

作者简介:李海涛,男,1986年生。济南大学机械工程学院硕士研究生。主要研究方向为协同设计、设计过程建模。发表论文7篇。杨波,女,1968年生。济南大学机械工程学院教授、博士。