

DOI:10.13196/j.cims.2016.03.006

基于 Petri 网的产品建模及其时序改进方法

贾丽臻^{1,2}, 檀润华^{1,2}, 张换高^{1,2+}, 刘伟^{1,2}

(1. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130;

2. 河北工业大学 国家技术创新方法与实施工具工程技术研究中心, 天津 300130)

摘要:为构建系统功能和行为模型以实现系统功能与行为优化,将 Petri 网建模语言应用于系统行为描述过程,提出一种行为建模与时序优化方法,对系统的动作时序进行改进。将技术系统中的能量流、物料流及信息流元素与有色 Petri 网结合,定义了系统行为建模语言。将系统行为分为串联、并联及反馈三种类型,并据此提出技术系统行为评定方法,提供系统动作时序的改进目标。提出 5 条行为优化路径及基于 Petri 网层次化建模过程的自顶向下行为优化方法,为系统动作时序的改进提供了方向与优化过程模型。将该产品行为建模方法与时序优化过程应用于一种纽扣电池阴极自动扣圈机的改进设计中,验证该行为优化过程模型的有效性。

关键词:时序;有色 Petri 网;行为分析;优化过程;自动扣圈机

中图分类号:TH122 **文献标识码:**A

Product modeling and timing improvement method based on Petri nets

JIA Lizhen^{1,2}, TAN Runhua^{1,2}, ZHANG Huangao^{1,2+}, LIU Wei^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. National Technological Innovation Method and Tool Engineering Research Center, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract:To realize the basis of systematic function and behavior optimization by constructing systematic function behavior model, a modeling and optimization method for mechanical system based on the Petri nets was proposed. In the technical system, the colored Petri nets was combined with the energy flows, material flows and signal flows to describe the systematic behaviors. The types of systematic behaviors could be categorized into series, paralleling and feedback, and an evaluation method to select the target behaviors was put forward according to this classification. Five behavioral improvement routes and a top-to-down method which based on hierarchical modeling process of Petri nets were presented to provide the direction and roadmap for timing optimization of product. An innovative design for the automatic machine of negative electrode shell and silicon seal of button battery was used to verify the effectiveness of proposed method.

Keywords: timing; colored Petri nets; behavior analysis; optimizing process; automatic machine

0 引言

功能、行为和结构是产品概念设计中广泛应用的三个主体,功能表达系统存在的目的,行为描述系统的动作时序过程,结构表达系统的组成。产品概

念设计的创新以结构的改变为表现形式,以功能、行为的优化为驱动力。作为功能和行为优化的基础环节,构建描述产品工作过程的功能和行为模型对实现产品创新具有重要意义。

目前,国内外学者对产品功能建模的研究已在

收稿日期:2015-01-02;修订日期:2015-11-02。Received 02 Jan. 2015;accepted 02 Nov. 2015.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275153);国家创新方法工作专项资助项目(2013IM030400)。**Foundation items:**Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 51275153), and the National Innovation Method Fund, China(No. 2013IM030400).

传统的 Pahl & Bietz(P&B)理论^[1]和功能—行为—结构(Function-Behavior-Structure, FBS)模型^[2]的基础上进行了拓展。文献[3-6]将本体论和语义信息用于功能建模过程,文献[7]提出了功能建模中功能基的扩展描述方法,从而有效解决了功能推理与优化问题,文献[8]将物理量和物理定律与功能建模相融合,有效提高了概念设计的创新性和高效性。然而,这些建模方法都是对产品工作过程中功能信息的静态描述,不能很好地体现功能实现的动态过程。文献[9-10]以能量流、物料流和信息流作为媒介,将技术系统的能源、传动、控制和操作子系统联系起来,提出了产品功能—行为分析模型,清晰地描述了产品的动态工作过程,文献[11]将 DANE 模型和 SAPPhIRE 模型集成并提出了 UNO-BID 模型描述系统行为,但均未进一步探索系统动作时序的优化方法。

Petri 网^[12]作为一种形式化的建模语言,能够直观地表达网系统中托肯的流动和变化情况,描述变迁的发生条件和顺序,构造被描述系统的动作时序过程。从 20 世纪 80 年代开始,许多具有工程背景的研究人员将 Petri 网应用于制造系统的建模、分析、验证与评价^[13-18],但将该模型服务于机械产品概念设计阶段的研究仍相对较少^[19-20]。因此,本文利用 Petri 网语言对系统动作时序过程进行建模,提出了技术系统行为分析与评定方法,将 Petri 网层次化建模过程与行为优化路径相结合,建立了自顶向下的行为优化过程模型,从而部分解决了技术系统概念设计阶段行为建模与优化问题。

1 面向概念设计阶段的 Petri 网建模语言

为提高 Petri 网对系统的建模能力,在基本网形式化方法的基础上已经发展了不同种类的 Petri 网模型,如随机 Petri 网、有色 Petri 网、面向对象 Petri 网和故障 Petri 网等。为体现机械系统中能量流(E)、物料流(M)和信息流(S)资源的流动过程,本文采用有色 Petri 网^[16]进行行为建模。

定义 1 $\Sigma = (P, T; F, C, I_-, I_+, M_0)$ 为描述机械系统动作过程的有色 Petri 网,其中:

- 1) $(P, T; F)$ 为有向网,称为 Σ 的基网。
- 2) I_- 和 I_+ 分别为 $P \times T$ 上的负函数和正函数, M_0 为初始标识。
- 3) 网系统中的库所 p 为机械系统中消耗与产生的资源状态, $[p_1, p_2, \dots, p_z](z \in R)$ 表示系统的状态

变化序列;变迁 t 为使系统资源发生变化的机械系统行为, $[t_1, t_2, \dots, t_r](r \in R)$ 表示行为发生的序列。

4) $C(p)$ 和 $C(t)$ 分别为机械系统有色 Petri 网模型中的托肯色集合和变迁色集合,其中 $C(p)(C(t)) \subset \{E_1, E_2, \dots, E_m, M_1, M_2, \dots, M_n, S_1, S_2, \dots, S_k\}$, $m, n, k \in R$; $\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ 、 $\{M_1, M_2, \dots, M_n\}$ 和 $\{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ 分别为系统中的能量、物料和信息资源。

2 基于 Petri 网模型的技术系统行为改进研究

2.1 技术系统行为分析

从技术系统动作时序来看,系统行为之间的关系可分为串联行为、并联行为和反馈行为三类:

(1) 串联行为 该类型表现为行为的顺次发生,前序动作的发生与否影响后序动作,但后序动作对前序动作不造成影响,如图 1 中的 t_1 和 t_2 。

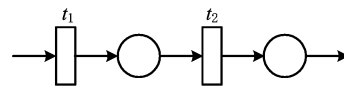


图1 串联行为

(2) 并联行为 该类型表现为行为的同时发生,两个或多个动作由相同(异)前置库所驱动,从而改变相同(异)后置库所的状态,如图 2 中的 t_3 和 t_4 。

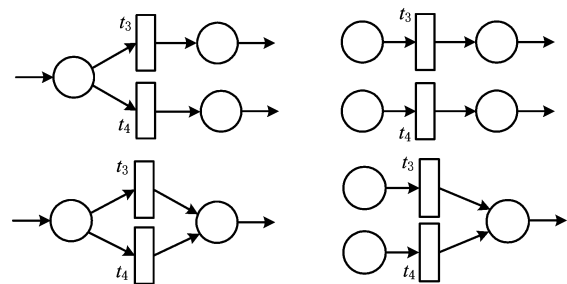


图2 并联行为

(3) 反馈行为 该类型表现为两种情况:①后序动作的发生辅助前序动作驱动库所状态变化;②后序动作的发生通过其所驱动库所中资源状态的变化抑止前序动作的发生,分别如图 3 中的 t_5 和 t_6 。

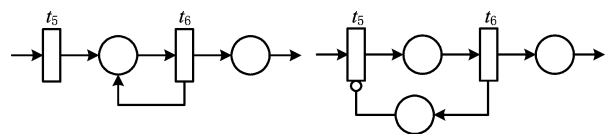


图3 反馈行为

2.2 技术系统行为评定

为优化产品的动作时序过程,对目标系统进行

建模之后,需分析行为改进的顺序,确定待改进行为序列,评定步骤如下:

(1)对目标产品进行需求分析,确定系统主要性能指标。按照指标的重要程度,分为基本指标、辅助指标和附加指标,权重值 θ 分别赋值 3、2、1,并将已确定的性能指标作为评价系统性能是否改进的基础。

(2)当某一行为单独且直接影响该评价指标时,其与该指标的关联度为 $\alpha=1$;当 $n(n \geq 2)$ 个行为同时且直接影响该评价指标时,设第 i 个行为与该指标的关联度为 α_i ,且 $\sum_{i=1}^n \alpha_i=1$ 。

(3)当某个行为以串联、并联或反馈方式与第 i 个行为相关从而间接影响该指标时,设行为相关系

数为 γ ,则该行为与目标指标的关联度为 $\beta=\gamma \cdot \alpha_i$ 。

(4)行为相关系数 γ 的设定规则如下:若为串联及反馈方式,则 $\gamma=1$;若为 m 个行为并联,则 $\sum_{j=1}^m \gamma_j=1$ 。

(5)设第 t 个行为的综合影响因子为 δ ,其与 p 个指标直接相关,与 q 个指标间接相关,则 $\delta=\sum_{i=1}^p \theta_i \alpha_i+\sum_{j=1}^q \theta_j \beta_j$ 。按照系统改进的要求,综合分析该行为对某个指标的单一影响因子及对多个指标的综合影响因子,从而确定待改进行为。

2.3 技术系统行为优化路径

为指导设计者对系统动作时序进行改进,本文提供 5 条行为优化路径,如表 1 所示。

表 1 行为优化路径

行为优化路径	优化内容	实例
行为合并	由于系统中行为动作过多从而产生较多负面作用时,考虑将行为合并,形成新的行为,以消除负面作用	原设计:电机驱动齿轮减速系统,经过齿轮的多次啮合,达到目标速度 优化设计:将齿轮间的多次啮合行为合并,由电机直接驱动转轴变速,实现目标
行为归一	当所建立的 Petri 网结构具有对称性,即资源的变化过程相同或相似时,将行为合二为一	原设计:热水阀和冷水阀分别控制的水温调节系统 优化设计:由于热水的调节行为和冷水的调节行为相同,将二者合并,由一个水阀控制
行为添加	添加辅助行为,提高行为的可靠性	原设计:开环控制系统 优化设计:为提高输出的准确性和稳定性,改进方案为将开环控制系统改为闭环控制系统
行为删除	当某个库所携带的信息只是触发变迁的发生,即为工具类资源时,可考虑通过改变行为方式,将该库所去除	原设计:双筒洗衣机,需要人为设定洗衣时间、触发甩干行为 优化设计:全自动洗衣机删除了使用者的干预行为
行为替代	当所建立的 Petri 网结构中的变迁使得系统的结构复杂,可靠性低,产生有害作用时,可考虑改变系统结构,用改进的行为代替原系统中的行为	原设计:波轮洗衣机中“去污”的功能是基于波轮与衣物及衣物与衣物的摩擦,但会造成衣物磨损 改进设计:滚筒洗衣机,用“击打”行为代替“摩擦”行为

3 基于 Petri 网层次化建模过程的技术系统行为优化研究

将产品总的输入和输出描述为总功能 F_1 ,总功能向下分解成下级分功能 F_2 ,下级分功能可以分解成次级分功能 F_3 ,一直分解到功能元 F_n ,从而形成技术系统的功能树模型,构成功能空间(F_S);若将产品总功能映射至产品的总行为 B_1 ,则总行为向下分解成下级子行为 B_2 ,下级子行为分解成次级子行为 B_3 ,一直分解到行为元 B_m ,即形成技术系统的行为树模型,构成行为空间(B_S);同理,可形成技术

系统的结构树模型,构成结构空间(S_S)。其中:功能空间和行为空间的元素映射关系为 f_{FB} ,行为空间和结构空间的元素映射关系为 f_{BS} ,如图 4 所示。

3.1 技术系统行为的 Petri 网层次化建模过程

本文将系统行为分为父行为和子行为。系统的功能由多个父行为在满足一定的约束条件下共同合作完成,某个父行为亦由多个子行为在满足一定的约束条件下按照规定的执行顺序实现。其中,约束条件为在实现目标的过程中,触发系统行为所需的能量、物料和信息等资源要素。依据第 1 章所述的建模语言,系统行为由 Petri 网中的变迁元素刻画,

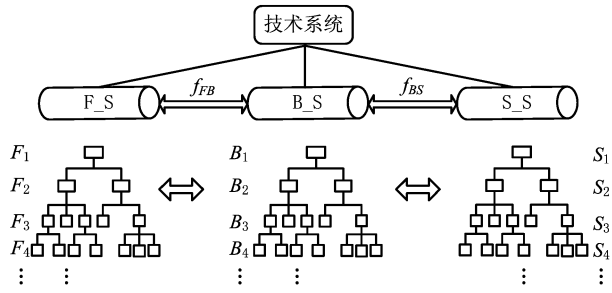


图4 技术系统FBS分解图

系统资源约束由 Petri 网中的托肯刻画,则有如下定义:

定义 2 单一父行为有色 Petri 网结构由 $\Sigma = (P_{sub}, T_{sub}; F_{sub}, C_{sub}, I_{sub-}, I_{sub+}, M_{sub0})$ 表示。其中: $P_{sub} = \{P_{in}, P_{sub_s}, P_{out}\}$, P_{in} 和 P_{out} 分别为该父行为的前置与后置库所, P_{sub_s} 为该父行为中各个子行为的前置与后置库所集合; T_{sub} 为组成该父行为的各个子行为集合;相应地, $F_{sub}, C_{sub}, I_{sub-}, I_{sub+}, M_{sub0}$ 分别为各个子行为的弧集、发生色与托肯色集、负函数和正函数集与初始标识。

定义 3 多个父行为组成的系统有色 Petri 网结构由 $\Sigma = (P, T; F, C, I_-, I_+, M_0)$ 表示。其中: $P = \{P_{sub1}, P_{sub2}, \dots, P_{subz}\}$ 为各个父行为对应的库所集合, $T = \{T_{sub1}, T_{sub2}, \dots, T_{subr}\}$ 为各个父行为集合。相应地, F, C, I_-, I_+, M_0 分别为系统父行为的弧集、发生色与托肯色集、负函数、正函数集与初始标识。

以图 4 中的行为序列 B_3 为父行为层,以行为序列 B_4 为各个子行为层, B_3 父行为层构成的变迁元素序列为 $[T_{31}, T_{32}, T_{33}, T_{34}, T_{35}]$,其中 T_{31}, T_{33} 和 T_{35} 分别对应子行为层变迁元素序列为 $[T_{41}, T_{42}], [T_{43}, T_{44}]$ 和 $[T_{45}, T_{46}, T_{47}]$,如图 5 所示。

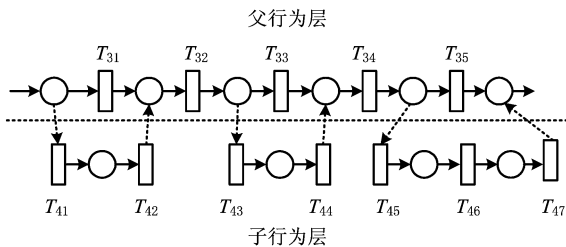


图5 技术系统层次Petri网示意图

3.2 自顶向下的技术系统行为优化过程

为全面改进系统的行为序列,采用自顶向下的整体—局部行为优化顺序,即首先对父行为层进行整体优化,再依次对子行为层进行局部优化。

一般而言,被优化的行为层级越高,系统的创新性越高。

1)整体优化 构建系统 Petri 网模型之后,宏观把握系统动作的协调性和时序衔接性,对系统行为进行分析和评定,并结合优化规则确定待优化行为序列。

2)局部优化 应用层次 Petri 网模型思想,分解已确定的某一变迁,建立局部子系统 Petri 网模型,并结合行为评定方法和优化规则优化系统行为。

自顶向下的技术系统行为优化过程如图 6 所示,具体步骤如下:

步骤 1 确定待改进的技术系统,分析系统的动作行为序列和结构,依据第 1 章所述面向机械系统的 Petri 网建模规则建立产品 Petri 网模型。

步骤 2 以系统问题为基础,依据技术系统行为分析及评定标准,确定待改进目标行为。

步骤 3 基于技术系统行为优化路径,对行为序列进行整体优化。

步骤 4 将目标父行为进一步分解为多个子行为,返回步骤 2 和步骤 3,对该父行为进行局部深度优化。

步骤 5 结合待改进技术系统可用资源与企业内外部资源,选定合适的行为序列,形成新的概念方案,完成产品的改进设计过程。

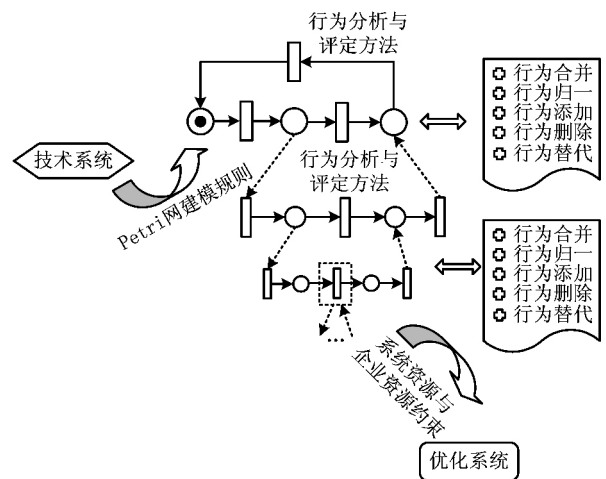


图6 自顶向下的行为优化过程

4 实例分析

本文以纽扣电池阴极自动扣圈机的创新设计为例,验证技术系统行为优化过程模型的有效性。将专利申请号为 201220736649.6 的专利“一种纽

扣电池阴极自动扣圈机”^[21]作为待改进的技术系统原型,其主要功能是将涂好密封胶的密封圈套入扣式电池圆形阴极钢圈中。该自动扣圈机的工作过程为首先启动密封圈供料机构,经门式分路机构和四路输送轨道,将密封圈输送到隔离下料机构的预定位置;然后启动极壳供料机构,以与密封圈输送相同的方式将极壳输送至预定位置;最后启动冲压机构将极壳压入密封圈中,如图 7 所示。

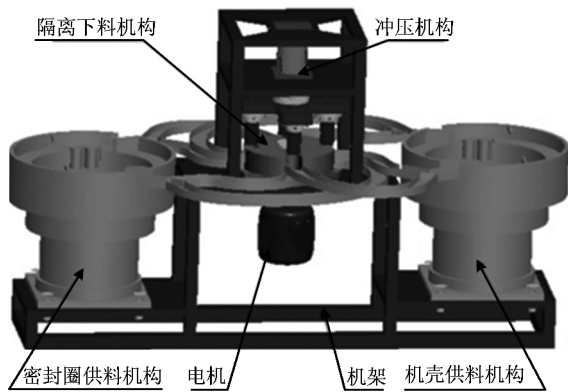


图7 自动扣圈机技术系统原型

4.1 建立自动扣圈机技术系统 Petri 网模型

依据文中所述建模规则、三种技术系统行为类型及自动扣圈机技术系统原型的工作原理,将系统工作过程按照行为发生顺序分为 7 个父行为,并确定父行为级能量流($E = \langle \text{电能} \rangle = \langle E_1 \rangle$)、物料流($M = \langle \text{密封圈} \rangle, \langle \text{极壳} \rangle, \langle \text{冲压机构} \rangle = \langle M_1 \rangle, \langle M_2 \rangle, \langle M_3 \rangle$)、信息流($S = \langle \text{密封圈启动信号} \rangle, \langle \text{极壳启动信号} \rangle, \langle \text{冲压启动信号} \rangle = \langle S_1 \rangle, \langle S_2 \rangle, \langle S_3 \rangle$),建立该自动扣圈机的整体动作过程着色 Petri 网模型如图 8 所示,图中各库所及父变迁的含义如表 2 所示,投影函数及恒同映射函数如表 3 所示,正、负函数值如表 4 所示。

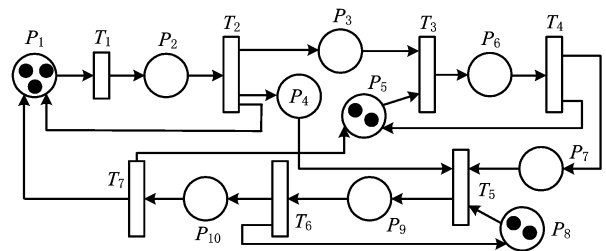


图8 系统父级行为Petri网模型

表 2 库所、变迁含义

P_{sub}	意义	托肯色	T_{sub}	意义	发生色
P_1	启动设备所需资源	$\{\langle M_1 \rangle, \langle E_1 \rangle, \langle S_1 \rangle\}$	T_1	运输密封圈	$\{\langle M_1, E_1, S_1 \rangle\}$
P_2	密封圈运输结束	$\{\langle M_1, E_1, S_1 \rangle\}$	T_2	密封圈定位	$\{\langle M_1, E_1, S_1 \rangle\}$
P_3	极壳运输所需电能	$\{\langle E_1 \rangle\}$	T_3	运输极壳	$\{\langle M_2, E_1, S_2 \rangle\}$
P_4	定位后的密封圈	$\{\langle M_1 \rangle\}$	T_4	极壳定位	$\{\langle M_2, E_1, S_2 \rangle\}$
P_5	待运输极壳状态	$\{\langle M_2 \rangle, \langle S_2 \rangle\}$	T_5	开始扣圈	$\{\langle M_1, M_2, M_3, E_1, S_3 \rangle\}$
P_6	极壳运输结束	$\{\langle M_2, E_1, S_2 \rangle\}$	T_6	结束扣圈	$\{\langle M_1, M_2, M_3, E_1, S_3 \rangle\}$
P_7	定位后的极壳	$\{\langle M_2, E_1 \rangle\}$	T_7	一次动作执行结束	$\langle M_1, M_2, E_1 \rangle$
P_8	扣圈所需资源	$\{\langle M_3 \rangle, \langle S_3 \rangle\}$			
P_9	扣圈过程	$\{\langle M_1, M_2, M_3, E_1, S_3 \rangle\}$			
P_{10}	扣圈后资源状态	$\{\langle M_1, M_2, E_1 \rangle\}$			

表 3 投影函数 Pri 及恒同映射函数 Id

函数名	Pr_1	Pr_2	Pr_3	Pr_4	Pr_5	Pr_6	Pr_7	$Id(\langle x, y \rangle)$
函数值	M_1	M_2	M_3	E_1	S_1	S_2	S_3	x, y

表 4 正、负函数集

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7
P_1	$I_- = Pr_1 + Pr_4 + Pr_5$	$I_+ = Pr_5$	0	0	0	0	$I_+ = Pr_1 + Pr_4$
P_2	$I_+ = Id$	$I_- = Id$	0	0	0	0	0
P_3	0	$I_+ = Pr_4$	$I_- = Id$	0	0	0	0

续表 4

P_4	0	$I_+ = Pr_1$	0	0	$I_- = Id$	0	0
P_5	0	0	$I_- = Pr_2 + Pr_6$	$I_+ = Pr_6$	0	0	$I_+ = Pr_2$
P_6	0	0	$I_+ = Id$	$I_- = Id$	0	0	0
P_7	0	0	0	$I_+ = Pr_2 + Pr_4$	$I_- = Id$	0	0
P_8	0	0	0	0	$I_- = Pr_3 + Pr_7$	$I_+ = Pr_3 + Pr_7$	0
P_9	0	0	0	0	$I_+ = Id$	$I_- = Id$	0
P_{10}	0	0	0	0	0	$I_- = Pr_1 + Pr_2 + Pr_4$	$I_- = Id$

4.2 自动扣圈机技术系统行为分析及评定

对自动扣圈机的设计和用户需求进行分析,按照技术指标的重要程度不同,将完全扣圈速率确定为技术系统的基本指标,将扣圈失误率及可实现性确定为辅助指标,将噪声确定为附加指标,其中可实现性指实现某行为的结构的加工难易程度。按照要求分别赋予权重 3,2 和 1,计算系统行为对上述指标的影响因子,如表 5 所示。由计算结果可知,行为 T_3 、 T_4 对系统的性能影响最大, T_1 、 T_5 对系统的性能影响较大, T_2 对系统性能影响相对较弱, T_6 对系统的性能影响可忽略。从系统动作时序角度出发,应用自顶向下分析方法,优化自动扣圈机的行为序列。

表 5 行为影响因子

行为	基本指标		辅助指标		附加指标	综合指标
	完全扣圈速率	扣圈失误率	可实现性	噪声		
T_1	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	1.9
T_2	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	1.3
T_3	0.4	0.5	0.2	0.2	0.2	2.8
T_4	0.3	0.5	0.2	0.1	0.1	2.1
T_5	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	1.9
T_6	0	0	0.1	0.2	0.2	0.4

4.3 自动扣圈机技术系统行为优化过程

4.3.1 自动扣圈机技术系统的自顶向下优化过程

首先,对技术系统进行整体行为优化。通过分析父行为 T_3 、 T_4 发现,极壳的运输及定位结构使得在扣圈机工作过程中,父行为运输密封圈、运输极壳和开始扣圈三个主要部分必须依次启动,这是造成系统工作效率较低的主要原因。密封圈的运输过程与极壳的运输过程具有异步对称性,应用“行为归一”原则,使得密封圈和极壳可同时运输以减少系统空闲时间,从而整体优化自动扣圈机的动作序列。

其次,对父行为 T_1 “运输密封圈”、 T_3 “运输极壳”和 T_5 “开始扣圈”进行局部优化。由于父行为“运输密封圈”和“运输极壳”具有同样的动作序列,只对父行为“运输密封圈”建立子行为 Petri 网模型,并将优化过程及结果应用于“运输极壳”动作序列。建立如图 9 所示的父行为 T_3 的 Petri 网模型,子行为库所和变迁含义如表 6 所示。依据技术系统行为评定方法,分析父行为 T_1 的子行为序列对技术指标的影响程度,如表 7 所示。

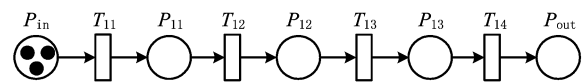


图9 运输密封圈子行为Petri网模型

表 6 子行为库所、变迁含义

P_i	意义	托肯色	T_i	意义	发生色
P_{in}	启动设备所需资源	$\langle \langle M_1 \rangle, \langle E_1 \rangle, \langle S_1 \rangle \rangle$	T_{11}	密封圈定序	$\langle \langle M_1, E_1, S_1 \rangle \rangle$
P_{11}	定序后的资源	$\langle \langle M_1, E_1, S_1 \rangle \rangle$	T_{12}	分两路输出密封圈	$\langle \langle M_1, E_1, S_1 \rangle \rangle$
P_{12}	两路输送后的资源	$\langle \langle M_1, E_1, S_1 \rangle \rangle$	T_{13}	分四路输出密封圈	$\langle \langle M_1, E_1, S_1 \rangle \rangle$
P_{13}	四路输送后资源	$\langle \langle M_1, E_1, S_1 \rangle \rangle$	T_{14}	四路运输密封圈	$\langle \langle M_1, E_1, S_1 \rangle \rangle$
P_{out}	密封圈运输结束	$\langle \langle M_1, E_1, S_1 \rangle \rangle$			

表 7 T_1 子行为影响因子

行为	基本指标		辅助指标		附加指标	综合指标
	完全扣圈速率	扣圈失误率	可实现性	噪声		
T_{11}	0.25	0.2	0.2	0.25	0.25	1.8

续表 7

T_{12}	0.25	0.3	0.8	0.25	0.25	3.2
T_{13}	0.25	0.5	0.8	0.25	0.25	3.6
T_{14}	0.25	0.5	0.8	0.25	0.25	3.6

分析上述影响因子发现,运输行为 T_{13} 和 T_{14} 对系统的影响较大。进一步分析表明,该行为对应的门式分路结构虽然在一定程度上弥补了该技术系统由于各个父行为顺次启动所带来的时间利用不充分问题,但使扣圈失误率增高,同时加大了制造难度。因此尝试“行为删除”原则删除该行为,应用“行为替代”和“行为合并”原则,保留 T_{12} 的两路运输结构。

父行为 T_5 的发生是通过冲压棒的冲压行为实现密封圈与极壳的结合,该行为虽然实现了“结合固体”的功能,但由于冲压棒过于依赖密封圈与极壳的定位精确度,不能有效保证扣圈正确率且不适应于上述已改进结构,尝试应用“行为替代”原则。利用计算机辅助创新(Computer Aided Innovation, CAD)软件,确定“真空效应”与“冲击效应”,即采用真空吸盘吸取极壳,且在极壳与密封圈的结合处对真空吸盘施加外力,从而将密封圈压入极壳。

4.3.2 自动扣圈机技术系统最终改进方案

通过分析该自动扣圈机的整体与局部行为优化过程,确定最终的纽扣电池自动扣圈装置概念方案。该结果优化了库所和变迁的状态,有效地消除了原设计缺陷,提高了设备的可靠性和生产效率。改进之后的技术系统工作过程为启动密封圈振动供料机

构,将密封圈输送至预定位置;同时启动极片振动供料机,将极片输送至预定位置;之后启动固定有吸盘的气缸,通过气缸的升降和平移动作完成扣圈功能。该技术系统改进后的父行为级能量流($E = \langle \text{电能} \rangle = \langle E_1 \rangle$)、物流流($M = \langle \text{密封圈} \rangle, \langle \text{极壳} \rangle, \langle \text{冲压机构} \rangle = \langle M_1 \rangle, \langle M_2 \rangle, \langle M_3 \rangle$)、信息流($S = \langle \text{密封圈启动信号} \rangle, \langle \text{极壳启动信号} \rangle, \langle \text{冲压启动信号} \rangle, \langle \text{位置检测信号} \rangle = \langle S_1 \rangle, \langle S_2 \rangle, \langle S_3 \rangle, \langle S_4 \rangle$),其 Petri 网模型及各库所、变迁的含义如图 10 和表 8 所示,投影函数及恒同映射函数和正、负函数值如表 9 和表 10 所示。以完全扣圈速率、扣圈失误率、可实现性、噪声及设备尺寸为评价指标,得到如图 11 所示的技术系统的性能改进雷达图。该最终方案的样机模型及实景图如图 12 和图 13 所示。

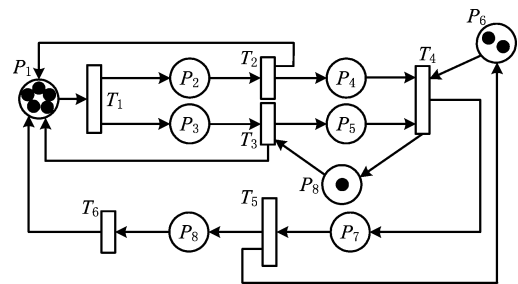


图10 改进后技术系统Petri网模型

表 8 改进后技术系统库所、变迁含义

P_{sub}	意义	托肯色	T_{sub}	意义	发生色
P_1	启动设备所需资源	$\{\langle M_1 \rangle, \langle M_2 \rangle, \langle E_1 \rangle, \langle S_1 \rangle, \langle S_2 \rangle\}$	T_1	运输密封圈和极壳	$\{\langle M_1, M_2, E_1, S_1, S_2 \rangle\}$
P_2	密封圈运输结束	$\{\langle M_1, E_1, S_1 \rangle\}$	T_2	密封圈定位	$\{\langle M_1, E_1, S_1 \rangle\}$
P_3	极壳运输结束	$\{\langle M_2, E_1, S_2 \rangle\}$	T_3	极壳定位	$\{\langle M_2, E_1, S_2 \rangle, \langle S_1 \rangle\}$
P_4	定位后的密封圈	$\{\langle M_1 \rangle, \langle E_1 \rangle\}$	T_4	扣圈动作开始	$\{\langle M_1, M_2, E_1, S_1 \rangle, \langle M_3 \rangle, \langle S_3 \rangle\}$
P_5	定位后的极壳	$\{\langle M_2, E_1 \rangle\}$	T_5	扣圈动作完毕	$\{\langle M_1, M_2, M_3, E_1, S_3 \rangle\}$
P_6	扣圈所需资源	$\{\langle M_3 \rangle, \langle S_3 \rangle\}$	T_6	一次动作执行结束	$\langle M_1, M_2, E_1 \rangle$
P_7	扣圈过程	$\{\langle M_1, M_2, M_3, E_1, S_3 \rangle\}$			
P_8	扣圈后资源状态	$\{\langle M_1, M_2, E_1 \rangle\}$			

表 9 改进后系统投影函数 Pri 及恒同映射函数 Id

函数名	Pr_1	Pr_2	Pr_3	Pr_4	Pr_5	Pr_6	Pr_7	Pr_8	$Id(\langle x, y \rangle)$
函数值	M_1	M_2	M_3	E_1	S_1	S_2	S_3	S_4	x, y

表 10 改进后系统正、负函数集

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
P_1	$I_- = Pr_1 + Pr_2 + Pr_4 + Pr_5 + Pr_6$	$I_+ = Pr_5$	$I_+ = Pr_6$	0	0	$I_+ = Id$
P_2	$I_+ = Pr_1 + Pr_4 + Pr_5$	$I_- = Id$	0	0	0	0
P_3	$I_+ = Pr_2 + Pr_4 + Pr_6$	0	$I_- = Id$	0	0	0
P_4	0	$I_+ = Pr_1 + Pr_4$	0	$I_- = Id$	0	0

续表 10

P_5	0	0	$I_+ = Pr_2 + Pr_4 + Pr_8$	$I_- = Id$	0	0
P_6	0	0	0	$I_- = Pr_3 + Pr_7$	$I_+ = Pr_3 + Pr_7$	0
P_7	0	0	0	$I_+ = Pr_1 + Pr_2 + Pr_6 + Pr_7$	$I_- = Id$	0
P_8	0	0	$I_- = Pr_8$	$I_+ = Pr_8$	$I_+ = Pr_1 + Pr_2 + Pr_4$	$I_- = Id$

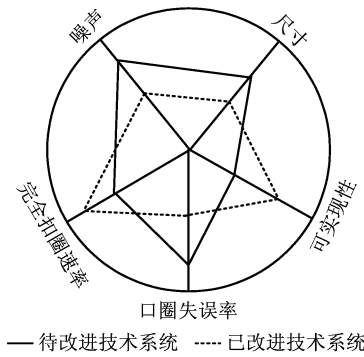


图11 系统改进性能比较

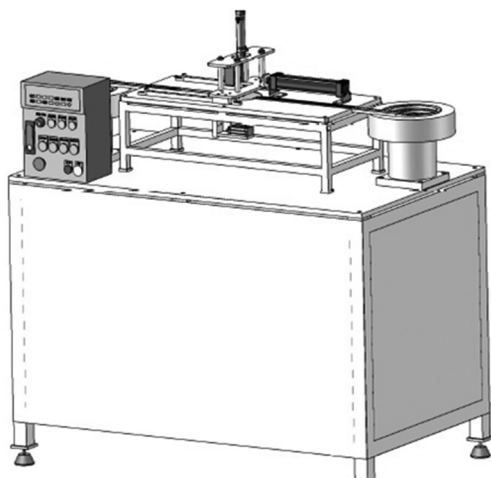


图12 改进的自动扣圈机样机

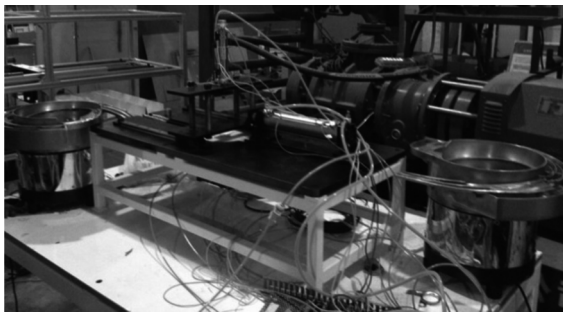


图13 改进的自动扣圈机实景图

5 结束语

本文围绕产品概念设计中的行为建模与优化展开研究,将产品设计模型中的能量流、物料流及信息流三种资源要素对应于有色 Petri 网系统中的托肯

元素,将产品工作过程中的时序动作对应于网系统中的变迁元素,由此建立技术系统有色 Petri 网模型。基于系统 Petri 网模型,提出系统行为分析及评定方法与行为优化路径,为产品动作时序的优化提供改进方向。将 Petri 网层次化建模过程与技术系统行为改进过程相结合,提出机械系统自顶向下的整体与局部优化过程模型。

与传统功能建模相比,本文的研究为技术系统模型“注入”了时间元素,体现出产品工作过程中资源的变化。与已有行为研究相比,本文提供了一种基于有色 Petri 网的行为建模与优化方法。文中虽借助 Petri 网在系统行为定性及定量分析方面进行了有益探索,但如何应用其代数分析工具解决设计优化问题仍需进一步研究。在未来的研究中,需要寻找二者的结合点,以期从更加客观的角度优化产品的时序过程。

参考文献:

- [1] PAHL G, BEITZ W. Engineering design;a systematic approach[M]. London, UK:The Design Council,1998.
- [2] QIAN L, GERO J. Function-behavior-structure paths and their role in analogy-based design[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 1996, 10 (4):289-312.
- [3] ZHANG Li, CHEN Gang, WANG Yuzhu, et al. Ontology-based function modeling framework & collaborative function design environment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(3):456-463 (in Chinese). [张立, 陈刚, 王玉柱, 等. 基于本体的功能建模框架及协同设计环境研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(3):456-463.]
- [4] YAN W, ZANNI-MERK C, CAVALLUCCI D, et al. An ontology-based approach for inventive problem solving[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014, 27: 175-190. DOI:10.1016/j.engappai.2013.07.005.
- [5] CAO Guozhong. Study of theory and method of function-oriented design[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2006 (in Chinese). [曹国忠. 面向功能的设计理论及实现方法研究[D]. 天津:河北工业大学, 2006.]
- [6] GUO Gang, TANG Huamao, LUO Yu. Semantic-based product functional formal modeling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(6): 1171-1177 (in Chinese). [郭钢,

- 汤华茂, 罗 歆. 基于语义的产品功能形式化建模[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(6): 1171-1177.]
- [7] YANG Bo, GAO Changqing, YIN Xiaoling, et al. Extended product function modeling for conceptual design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(15): 153-162(in Chinese). [杨 波, 高常青, 尹晓玲, 等. 面向概念设计的扩展功能建模方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15): 153-162.]
- [8] LI Zhiguang. Study on conceptual design based on function and physical laws[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014(in Chinese). [李志广. 基于功能和物理定律的概念设计研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.]
- [9] CASCINI G, ROTINI F, RUSSO D. Networks of trends: systematic definition of evolutionary scenarios[C]//Proceedings of Engineering, TRIZ Future Conference 2008. Amsterdam, the Nederland; Elsevier, 2011: 355-367.
- [10] CASCINI G, FANTONI G, MONTAGNA F. Situating needs and requirements in the FBS framework[J]. Design Studies, 2013, 34(5): 636-662.
- [11] ROSA F, CASCINI G, BALDUSSU A. UNO-BID: unified ontology for causal-function modeling in biologically inspired design[J]. International Journal of Design Creativity and Innovation, 2014, 3(3/4): 177-210.
- [12] WU Zhehui. Introduction of Petri nets[M]. Beijing: China Machine Press, 2006 (in Chinese). [吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.]
- [13] YUAN Chongyi. Petri nets application[M]. Beijing: Science Press, 2013(in Chinese). [袁崇义. Petri 网应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.]
- [14] GIRAULT C, VALK R. Petri nets for systems engineering[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003.
- [15] WANG Jinghua, HAN Jianghong, LIU Zhengyu, et al. Scheduling modeling in discrete manufacturing system based on oriented Petri Net[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(15): 4159-4162(in Chinese). [王景华, 韩江洪, 刘征宇, 等. 面向对象 Petri 网离散制造系统生产调度建模研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(15): 4159-4162.]
- [16] LIU Chang, SHI Haibo, YUAN Jie. Modeling and performance analysis of manufacturing processes with stochastic machine failures[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(9): 1704-1716(in Chinese). [刘 昶, 史海波, 袁 杰. 具有随机及其故障的制造过程建模与性能分析[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(9): 1704-1716.]
- [17] GU Yanwu, WANG Zuntong, WU Qidi. Application of object-oriented Petri-nets in system modeling[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(3): 437-441(in Chinese). [顾妍午, 王尊彤, 吴启迪. 面向对象 Petri 网技术在系统建模中的应用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(3): 437-441.]
- [18] LIU Mingzhou, ZHAO Zhibiao, GE Maogen, et al. Data chain modeling of mechanical products' assembly quality based on object-oriented Petri nets[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(4): 714-719(in Chinese). [刘明周, 赵志彪, 葛茂根, 等. 基于面向对象 Petri 网的机械产品装配质量数据链建模[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(4): 714-719.]
- [19] ZHOU Xiaoyong, LI Ping. Research on function decomposition unit of mechatronics product based on Petri net[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(21): 5662-5664(in Chinese). [周小勇, 李 萍. 基于 Petri 网的机电产品功能分解单元模型研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(21): 5662-5664.]
- [20] YANG Wendan. Research of model of mechanical and electrical products concept design based on Petri nets[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014(in Chinese). [杨雯丹. 基于 Petri 网的机电产品概念设计模型研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.]
- [21] CAO Guozhong, YANG Xing, GUO Haixia, et al. Automatic assembly machine for cathode shell and silicon seal of button battery: China, CN203013845U[P]. (2013-06-19)[2014-12-25](in Chinese). [曹国忠, 杨 兴, 郭海霞, 等. 一种纽扣电池阴极自动扣圈机: 中国, CN203013845U[P]. (2013-06-19)[2014-12-25].]

作者简介:

- 贾丽臻(1989—), 女, 河北沧州人, 博士研究生, 研究方向: 产品创新设计理论研究及应用等, E-mail: jializhen_1314@163.com;
- 檀润华(1958—), 男, 河北任丘人, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向: 产品设计理论和创新设计方法;
- 张换高(1973—), 男, 河北南宫人, 副教授, 博士, 研究方向: 产品创新理论和产品平台设计与创新, 通信作者, E-mail: zhgzwy@hebut.edu.cn;
- 刘 伟(1987—), 男, 河北邯郸人, 博士研究生, 研究方向: 产品创新设计、仿生设计等。