

面向产品开发活动的细胞交互模型研究^{*}

Cell Interaction Model for Product Development Activity

西北工业大学机电学院 王春霞 秦现生
西安邮电学院管理工程学院 曹宜英

[摘要] 为实现产品开发活动交互的自主性和多样性,更好地支持产品开发过程管理与优化,在对细胞的交互机理、物质能量及信息的输入输出渠道研究的基础上,基于 Petri 网构建了面向产品开发的细胞交互元模型,给出了模型的定义及变迁规则。以汽车油泵单向阀测试装置开发过程为实例,验证了建模方法的有效性。

关键词: 产品开发 活动 Petri 网 细胞交互元模型 仿生设计

[ABSTRACT] In order to realize the autonomy and diversity of interaction among product development activities, an interaction model of product development activities is constructed based on the cell interaction mechanism, which can support the management and optimization of product development process. Firstly, the cell interaction mechanism is analyzed. Secondly, the function of cell membrane and input/output channels of the matter, energy and information are illustrated in detail. Thirdly, the cell interaction meta-model is established by using Petri net. Finally, the meta-model is validated in the design process of automobile fuel pumps.

Keywords: Product development Activity Petri net Bionic design Cell interaction meta-model Bionic design

产品开发是包含大量复杂活动的系统工程。活动之间通过物质、能量、信息不断交互构成一个有序的过程。对活动间交互机制与模式的优化设计及合理组织,有利于优质、高效地实施产品的开发管理,以实现产品开发 TQCSE (周期、质量、成本、服务、环境) 目标的大幅提升。目前,产品开发活动之间交互关系的研究主要从宏观和微观两个层面进行,站在集成产品开发宏观的角度,传统的串行开发方式,活动间多是按技术流程串行、“抛过墙”式地传递物质、能量和信息,易造成活动间协同与沟通的困难^[1-2]。为促进活动间协同与沟通,并行

工程强调建立信息集成框架、DFX/CAX 能使工具和 IPT 组织模式等协同工作环境,以期通过环境的健全和过程集成为协同工作提供方便^[3-5];精益生产则引入价值分析,试图借助于建立活动间的价值链,来协同和优化产品开发过程^[6-7]。

微观上主要针对活动两两及多个之间交互的内在机制与具体模式进行研究。如文献 [8][9] 将基于 Agent 和面向对象的方法,用于产品开发活动的描述。针对 Agent 之间及其与外部环境的交流,文献 [10] 将 Agent 在结构上分为与外界交互的感知器、反作用于外部环境的效应器和对信息进行加工的信息处理器, Agent 之间基于标准接口和统一的语言进行交流。文献 [11] 则提出采取消息发布与响应机制实现对象之间的操作、调用、应答。文献 [12] 在上述研究基础上,针对产品开发,提出了产品开发 ProA (活动及其实现过程) 的概念,建立了基于 Petri 网的产品开发 ProA 模型,通过 ProA 接口和外幔,开展 ProA 间的交流,实现对输入、输出、输入到输出的转换(映射)及资源质与量的管理。这些可用于活动交互的模式其优点是简单易实现,但机制机械,渠道单调,缺乏交互的柔性、多样性、多态性以及复杂环境和交互对象的自主、自适应性,不利于更好地支持产品开发管理。

细胞作为构筑复杂生物体结构和功能的基本单元,能在 DNA 的作用(通过 DNA 编码蛋白执行各种功能)下,根据自身的需求和环境状况自主地调控沟通内容(质与量)、交互方式和渠道,其精巧的渠道结构、高效的交互机制、丰富多样的交互方式,使生命活动能够在非结构化、动态多变的环境中高度有序和自主地进行,为构建人造系统提供了优秀的范例。借鉴生物体细胞间的交互机制和交互方式,构建出细胞的交互模型,将模型应用于产品开发活动中,有助于提高活动交互的自主性。

1 细胞交互机理

生物体的生理功能和一切生命现象都是以细胞为基础表达的。细胞按一定的方式相互作用和交互形成组织、器官最终构成生物整体。人的任何行为,如思考、

^{*} 国家自然科学基金资助项目(70472066, 70771091)资助。

行走、应激反应等都是约 200 种不同类型的 10 万亿个细胞协同作用的结果。在此过程中,细胞之间物质、能量和信息交互频繁,复杂却有条不紊,其基石是细胞独特的交互机制。

细胞间一切物质、能量和信息的交互都是通过细胞膜实现的。细胞膜主要由脂类(约占 50%)、蛋白质(42%)和糖类(2%~8%)组成。双层脂类分子构成了细胞膜的基本结构,水和氧气等小分子物质能够通过,离子、小的带电分子和所有大分子物质则不能自由通过,起到屏障作用。膜蛋白(包括载体蛋白和通道蛋白)镶嵌其中,是膜功能的主要执行者,膜上大量与物质转运有关的蛋白在细胞膜上形成若干不同的渠道,供物质转运使用,膜上的一些蛋白还可实现信号传递,这些蛋白与细胞外信号分子结合后被激活,将信号传递至细胞内。糖类和膜蛋白结合在一起,起到细胞识别和传递信息的作用。细胞膜在脂、蛋白、糖的协同运作下,完成诸如边界保护、调节运输、信号检测与传导、细胞间通信以及细胞识别和连接等细胞间物质、能量和信息的交互。表 1 归纳了物质、能量、信息出入细胞的渠道及特征。

细胞膜的上述交互功能,是通过膜上蛋白来实现的。膜上蛋白根据结构和性能的不同,分别结合相应的外部物质,完成物质的运输、能量和信息的传递。根据细胞中心法则,蛋白质由 DNA 编码、RNA 转录翻译成氨基酸,再由核糖体将氨基酸装配而成,膜功能的实现受 DNA 的控制。基于此,细胞的交互机理可归纳为:细胞的物质、能量和信息交换是由膜上蛋白载体在 DNA 的控制、环境的影响和能量的支持下,自主从细胞外环境中获取自身所需的物质、能量和信息的过程。

2 交互渠道 Petri 网表达

Petri 网借助于直观易懂的图形表示和严格的数学

定义,形象、逼真地反映事物之间的联系,便于动态仿真,由此成为描述和分析各种复杂生化网络的有效工具。利用 Petri 网描述对象(如细胞及其与环境)之间的输入输出关系,能很好地反映由对象构成的系统如组织、器官以及生命体的静、动态特征。表 1 中的所有交互渠道都可以用 Petri 网来表达。下面以主动运输的 Na^+/K^+ 泵转运途径为例,说明 Petri 网的构造过程。

哺乳动物的神经和骨骼肌细胞,正常时细胞内 K^+ 浓度大约为细胞外的 30 倍,细胞外 Na^+ 浓度大约为细胞内的 12 倍。这种不均匀分布,是神经和肌肉等组织具有兴奋性的基础。维持这种不均衡分布的就是细胞膜上广泛存在的 Na^+/K^+ 泵。 Na^+/K^+ 泵是膜上蛋白质,也是一种 ATP 酶,能够水解 ATP,它通过磷酸化和去磷酸化过程发生构象的变化来转运 Na^+ 和 K^+ 。其过程可简述为:当细胞内 Na^+ 离子浓度升高时,在膜内侧与泵结合,激活 ATP 酶活性,使 ATP 分解,酶被磷酸化后构象发生变化,与 Na^+ 结合的部位转向膜外侧;磷酸化后的酶对 Na^+ 的亲合力降低而对 K^+ 的亲合力高,因而在膜外侧释放 Na^+ 、而与 K^+ 结合,结合后使酶去磷酸化,构象复原,与 K^+ 结合的部位转向膜内侧, K^+ 与酶的亲合力降低被释放在膜内。

在这个过程中,若用库所 O 表示蛋白质、被转运的离子和环境影响因素;用变迁表示生化反应,构象变化和位置迁移;以有向弧来连接库所和变迁;便可得到图 1(b)所示的细胞 Na^+/K^+ 泵主动运输 Petri 网模型。简单扩散、膜泡运输、信号传导及细胞膜上其他所有的运输渠道和过程都同样可以用 Petri 网表达,如图 1(a、c、d)所示。

3 基于 Petri 网的细胞交互模型

3.1 细胞交互模型

在细胞交互过程中,对于同一物质,被动运输、膜泡

表1 细胞输入输出渠道

交互渠道		交互的方式及特征	转运内容	备注
被动运输	简单扩散	脂溶性或极性较小的小分子物质通过物理扩散透过细胞膜;从高浓度侧向低浓度;不消耗 ATP	O_2 、 CO_2 等	物质运输
	协助扩散	非脂溶性或亲水性分子;借助膜蛋白;不消耗 ATP;物质分子从高浓度向低浓度扩散	氨基酸、葡萄糖、金属离子	能量获取
主动运输	Na^+/K^+ 泵 Ca^{2+} 泵等	离子、营养物和代谢物等逆浓度梯度;需要载体协助;消耗 ATP;具有选择性	离子、营养物和代谢物	物质运输
膜泡运输	胞吞	大分子物质及颗粒性物质不能穿过细胞膜;以膜泡包裹的方式出入;此方式也需要消耗 ATP	蛋白质、多核苷酸和多糖等	物质转运
	胞吐			
信号传导	进入胞内	脂溶性小分子直接进入细胞内部	信号分子	信息交换
	PKA、PKC、IP3、 Ca^{2+} 途径	信号不直接进入胞内。膜上的某些蛋白属于信号受体蛋白,与胞外信号分子相结合被激活,然后将信号转入胞内,使胞内发生各种生化反应和生物学效应。		

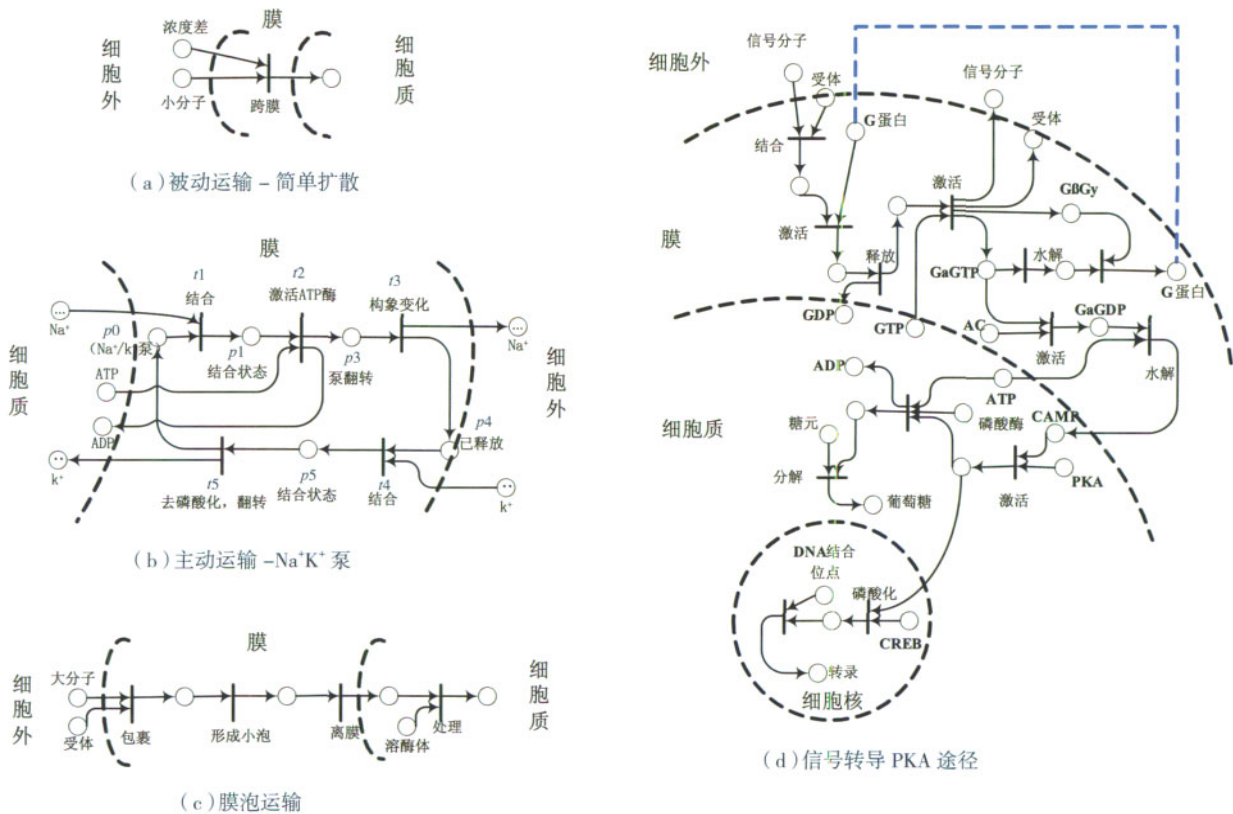


图1 交互渠道的表达
Fig.1 Expression of interactive channels

运输输入、输出的机制、方式相同；对于主动运输，为表达方便，结合 Ca 离子的主动运输渠道，将 Na⁺/K⁺ 泵渠道拆分为输入和输出途径分别表示；对于信息传递渠道，仅表示出在膜上传递的部分。以此方式综合细胞膜上发生的典型物质运输、能量传递及信息传导渠道，建立基于 Petri 网的细胞交互模型，并以该模型作为交互元模型，用于描述细胞间及其与环境的交互。如图 2 所示。

模型包括 4 个部分和 3 类活动。4 个部分为细胞膜、细胞质、细胞核 (DNA) 及细胞外环境。

(1) 细胞膜上集中了所有的交互渠道，承担内外联系的作用，按一定的机制、通过相应渠道输入输出；

(2) 细胞质是细胞内发生各种生化反应的场所，通过细胞内转换，将输入转化为输出；

(3) 细胞核内 DNA 提供合成运输、转换相关蛋白的编码，为细胞运行和交互提供规则；

(4) 细胞所有输入来自细胞外部环境中，所产生的代谢物也输出到周围环境中，同时环境中的各种物质浓度、信息也对细胞的交互发生影响。

3 类活动为输入、输出和转换操作。

(1) 输入：所有进入细胞的物质、能量和信息均来自于外部环境中，合称为输入项。输入项根据属性不同经相应渠道进入细胞。

(2) 输出：细胞将代谢物(输出项)释放到周围环境。

(3) 转换操作是指细胞内的蛋白质、细胞器，对输入项即时进行加工处理，满足自身需要或转换为输出。

为应用的方便性，将图 2 符号化表示为图 3。其中 S_{in} 表示所有输入项；S_{out} 表示所有输出项；E_v 为对交互产生影响的环境信息；膜上封装所有渠道；连接线表示根据输入项和输出项属性不同，选择相应渠道出入。

3.2 模型定义

定义：细胞交互 Petri 网模型可用七元组 PN 来描述

$PN = \{P^I, P^O, P^{Ev}, P^{ATP}, P^D, T, F\}$ ，并且元素满足下列条件：

(1) $PI = \{PI_s, PI_{s'}\}$ 为输入渠道库所的有限集合；

$PI_S = \{PI_{s0}, PI_{f0}, PI_{a0}, PI_{en0}, PI_{Is}, PI_{ws}\}$ 为输入库所的有限集合。其中 PI_{s0} 内的托肯表示脂溶性的小分子；

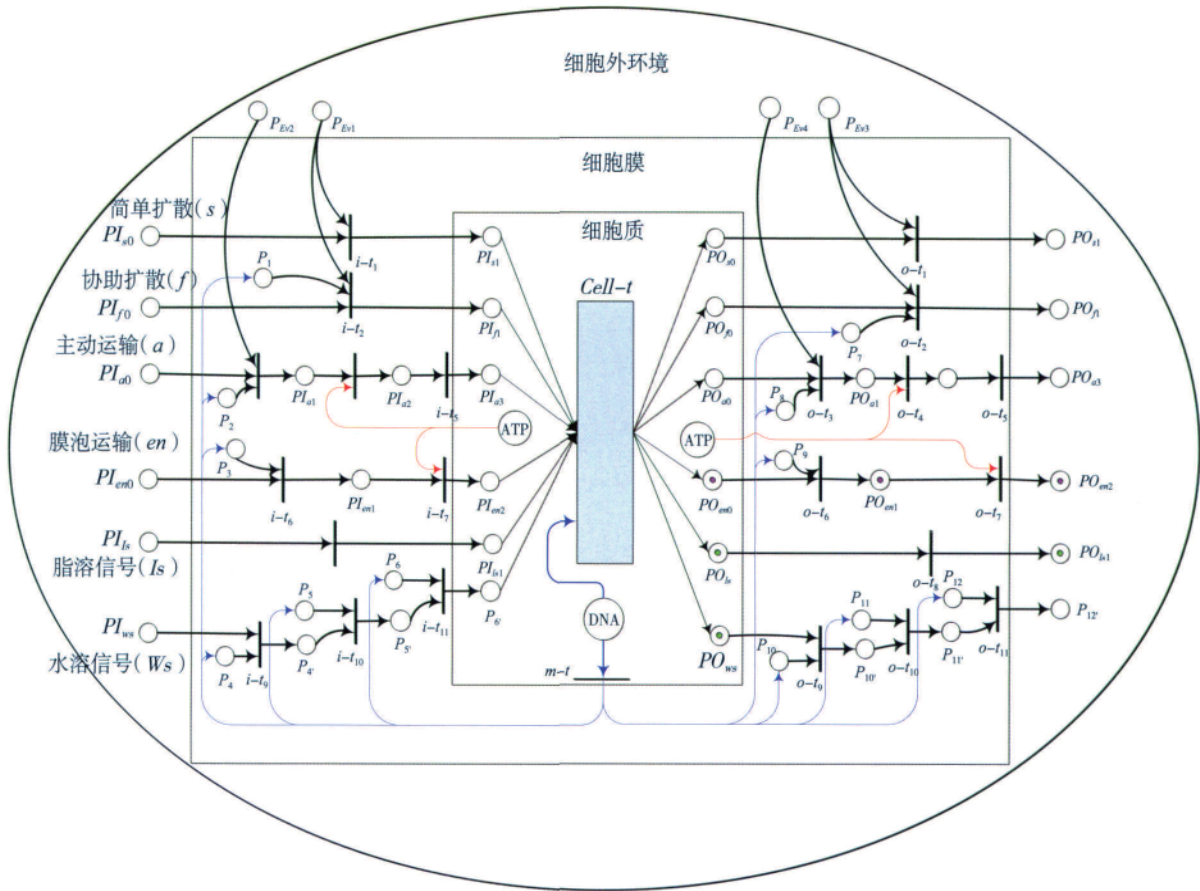


图2 基于Petri网的细胞交互元模型
Fig.2 Petri net metamodel of cell interactions

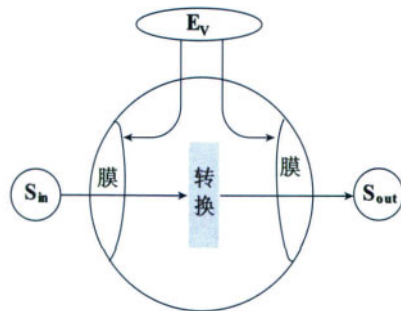


图3 细胞交互元模型符号化表示
Fig.3 Symbolic expression of metamodel

PI_{f0} 内的托肯表示水溶性的小分子; PI_{a0} 内的托肯表示各类小分子物质, PI_{en0} 内的托肯表示大分子及颗粒物质; PI_{Is} 内的托肯表示脂溶性的信号分子; PI_{ws} 内的托肯表示水溶性的信号分子; 所有库所容量为1;

$PI_s = \{PI_{s1}, PI_{f1}, PI_{a1}, PI_{a2}, PI_{a3}, PI_{en1}, PI_{en2}, PI_{Is1}\}$ 为输入项在细胞膜上转运过程中库所的有限集合;

(2) P^o 为输出渠道库所的有限集合; 定义与 P^i 类似, 不再分别列出。

(3) $P_{Ev} = \{P_{Ev1}, P_{Ev2}, P_{Ev3}, P_{Ev4}\}$ 为环境中对交互产生影响的信息库所; 其中 P_{Ev1} 托肯表示输入物质细胞外浓度大于细胞内; P_{Ev2} 托肯表示输入物质细胞外浓度小于细胞内; P_{Ev3} 托肯表示输出物质细胞内浓度大于细胞内; P_{Ev4} 托肯表示输出物质细胞内浓度小于细胞内。值为1。

(4) P^{ATP} 为细胞内生物能量 ATP 库所, 库所容量为无限;

(5) P^D 为 DNA 库所, 库所内的托肯代表编码膜蛋白的基因, 库所容量为 $n, n \in N$;

(6) $P_p = \{P_{p1}, P_{p2}, \dots, P_{p12}\}$ 为膜蛋白库所的有限集合;

(7) $T = \{i_{-t_1} \dots i_{-t_{11}}, o_{-t_1} \dots o_{-t_{11}}, m_{-t}, cell_{-t}\}$ 为变迁的有限集合;

(8) F 为库所与变迁间弧的有限集。

3.3 变迁及变迁规则

为了便于描述, 对变迁进行分类并确定变迁规则如下:

通道类变迁: 通过膜上的不同渠道, 实现物质运输、能量和信息的运输与传导。包括输入变迁 i_{-t} 和输出变

迁 o_t ;

细胞内转换变迁: 把输入转换成输出。以 $cell_t$ 表示;

DNA 控制变迁: DNA 通过编码蛋白质, 实现对细胞膜上渠道及细胞内转换的控制。以 m_t 表示。

(1) 通道类变迁规则: 对 $p \in \cdot i_t$, 当且仅当所有 $M(P)=1$, 则 i_t 变迁, 变迁后对 $p \in i_t \cdot$, $M(P)=1$ 。输出类相同。

(2) 细胞内转换变迁规则: 当 $M(P^0)=1$, 对于其余的 $p \in \cdot cell_t$, $\forall M(P)=1$, 则 $cell_t$ 变迁, 变迁后对 $p \in cell_t \cdot$, 根据变迁后输出项属性相对应 $M(P)=1$ 。

(3) DNA 控制变迁规则: 当 $M(P^0)=1$, 则 m_t 变迁, 变迁后对 $p \in m_t \cdot$, $\forall M(P)=1$ 。

4 应用实例

在汽车油泵中, 将单向阀组件装配入储油桶内后, 需对单向阀灵活性进行测试, 然后才能完成其他装配工作。测试装置包括测试头、测试头固定装置和气泵 3 个部分, 基于细胞交互元模型, 构建测试装置开发过程模型如下:

(1) 确定基本活动单元。

细胞交互元模型可以作为描述产品开发活动的基

本单元。基本单元粒度根据实际产品开发过程的复杂程度来确定, 使其既符合细胞的特点又在实际过程中便于管理。在单向阀测试装置开发过程中, 共有 6 个活动: 测试头设计、测试头加工、测试头保护装置设计、测试头保护装置加工、气泵购买及测试头装置装配。在建模方法中将上述活动定义为 6 个细胞单元。

(2) 定义输入、输出项通透属性。

输入输出项的通透属性是指活动边界允许物质、能量、信息进入活动的性质。确定活动所涉及的各种物质、能量、信息, 根据输入项的稀缺程度、获取成本及活动对其的需求程度不同, 并结合其出入活动的方式、特点进行通透值、控制属性设定。通透性定义原则如下:

为输入项通透属性赋值 v ,

$$\begin{cases} 0 < v \leq 0.1 & \text{极小分子} \\ 0 < v \leq 1 & \text{小分子} \\ v > 1 & \text{大分子及颗粒物} \end{cases}$$

为活动边界的控制属性赋值 k ,

$$\begin{cases} k=0 & \text{允许顺浓度自由扩散} \\ k=1 & \text{需载体帮助扩散} \end{cases}$$

则有:

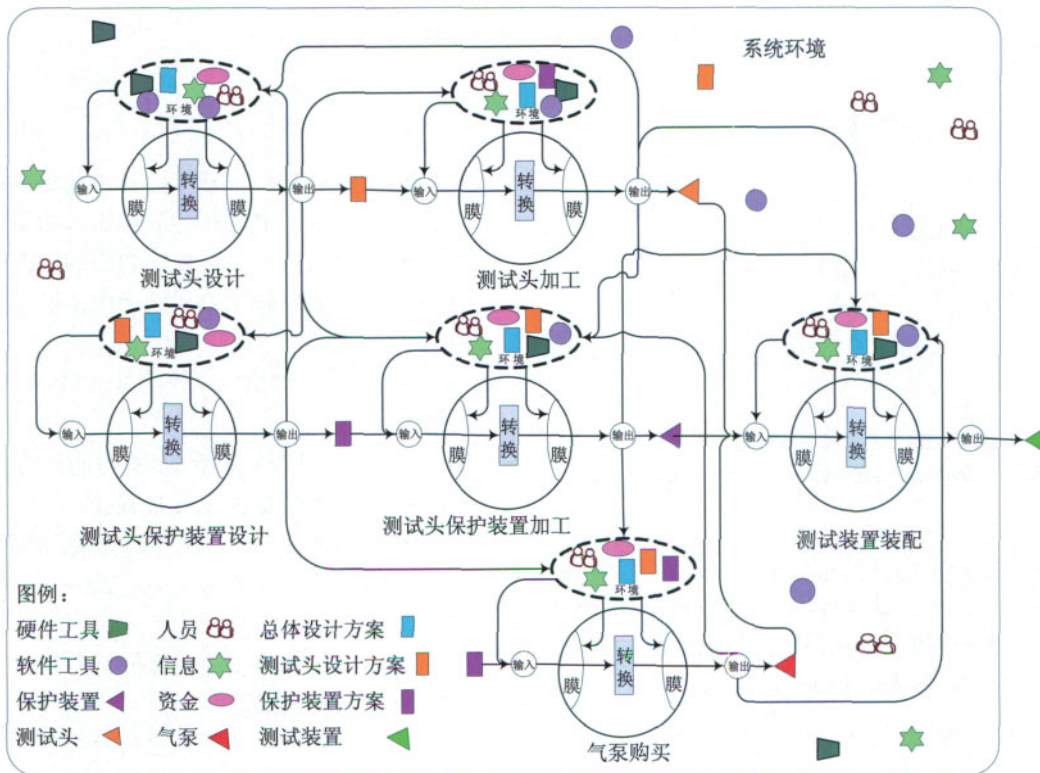


图4 单向阀测试装置开发活动交互模型

Fig.4 Application model in development activity of testing device for valve

当 $0 < v \leq 0.1, k=0$ 时, 浓度差 > 0 则通过 s 渠道
 当 $0 < v \leq 0.1, k=1$ 时, 浓度差 > 0 通过 f 渠道
 当 $0 < v \leq 1, k=1$ 时, 则 a 渠道通过
 当 $v > 1$ 时, 则 en 渠道通过
 脂溶性信号则 Is 渠道通过
 水溶性信号则 Ws 渠道通过

以测试装置设计为例, 活动交互涉及的物质、能量、信息及其属性分析设定如表 2 所示。

表2 物质、能量、信息属性值

输入输出项名称	通透属性 (V, K)	输入输出项名称	通透属性 (V, K)
硬件工具	0.5, 1	人员	0.4, 1
软件工具	0.3, 1	信息	0.2, 0
保护装置	0.8, 1	资金	0.3, 1
总体设计方案	1.5, 1	测试头设计方案	0.5, 1
保护装置方案	0.5, 1		

(3) 构建单向阀测试装置开发过程模型。

任一物质、能量、信息输入系统环境, 通过相对应渠道进入活动内部, 活动开始运行, 经内部的转换操作, 把结果输出活动的外环境中, 相邻活动因外环境的变化, 自主地选择输入项进入活动, 实现了系统内不同活动之间自主交互。图 4 为基于细胞交互的单向阀测试装置开发过程模型。

对于测试装置开发活动, 任一物质、能量或信息进入活动的微环境, 例如总体设计方案(通透属性为 1.5, 1)通过 en 渠道进入活动, 经过活动内部的转换操作, 转化为设计方案(属性为 0.5, 1)经 a 渠道输出, 输出的方案直接进入紧密相连的下游活动——测试头加工, 其他输出, 如释放的多余资源、设计活动过程中产生的信息等, 则进入相邻活动(测试头加工、测试头保护装置设计、加工)的微环境中, 由相邻活动根据自身的需求决定自身是否获取。同样地, 对进入系统内的物质、能量、信息等做出任一调整, 这一变化信息进入任一活动, 都会引起整个系统的活动作出相应的调整, 最后产生的结果输出系统外环境。

(4) 基于细胞交互元模型的产品开发活动交互模型特性分析。

基于细胞交互元模型, 通过产品开发 DNA 编码边界运转载体, 在产品开发活动边界上有相应的运转载体存在, 对应的输入项才能进入, 实现了产品开发活动交互的自主性。

交互的多样性体现在多渠道输入输出的过程。在

活动中对于不同属性的输入项经由不同渠道进入, 进入时间及方式完全由活动自主控制, 能够反映现实活动中活动输入输出的多种方式。

基于细胞交互元模型构建的产品开发过程中, 每个活动都能对外界及系统内紧密相关的活动的变化, 作出快速的反应, 实现时间和空间上的无缝隙交互, 提高了整个过程的适应性和系统柔性。

5 结束语

本文针对产品开发过程建模中如何提高活动交互的效率及自主性, 提出了一种基于细胞交互机制的产品开发活动交互建模方法。该方法以细胞交互机制为理论基础, 基于 Petri 网构建了细胞交互元模型, 根据输入输出的不同属性采取不同的渠道进出活动, 提高了活动交互的自主性、多样性及系统柔性。论文中的一些具体问题, 如 DNA 如何操控细胞内的转换, 以自主获取外部物质、能量和信息, 以及活动之间交互的多途径描述等方面, 还需要进一步研究。

参考文献

- [1] 熊光楞. 并行工程的理论与实践. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [2] 秦现生. 并行工程的理论与方法. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [3] Joglekar N R, Ford D N. Product development resource allocation with foresight. *European Journal of Operational Research*, 2005, 160 (1): 72-87.
- [4] 黄红星, 张和明, 熊光楞. 并行工程中产品信息集成研究. *计算机工程与应用*, 2002, 10: 30-32
- [5] 李健, 张鸿梁, 王计斌, 等. 基于网络的协同设计方法研究. *清华大学学报(自然科学版)*, 2000, 40(9): 93-96.
- [6] 詹姆斯 P 沃麦克, 丹尼尔 T 琼斯. 沈希瑾, 张文杰, 李京生. 精益思想: 消灭浪费, 创造财富, 译. 北京: 商务印书馆, 1999.
- [7] 张明华. 精益造船模式研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005, 5.
- [8] 徐亚斌, 秦现生. 彭炎午并行工程中产品、活动和组织的集成建模. *制造业自动化*, 2000, 22(2): 17-20.
- [9] 曹健, 张友良, 赵海燕. 基于 Agent 的产品并行开发过程管理系统. *中国机械工程*, 1999(4): 414-417.
- [10] Wooldridge M, Jennings N R. Intelligent Agents: Theory and practice. *Knowledge Engineering*, 1995, 10(2): 115-152.
- [11] 范玉顺, 曹军威. 复杂系统的面向对象建模、分析与设计. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [12] 曹宜英, 秦现生, 王炜. 产品开发 ProA 一般 Petri 网模型研究. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(12): 2328-2334.

(责编 三丰)