

# 基于系统动力学的产品进化机制研究\*

付培红 李峰平 周宏明 周余庆 李沛

(温州大学机电工程学院,温州 325035)

**【摘要】** 基于自然生态系统和产品环境系统之间特性的相似性,引用生态系统的相关理论,构建产品生态环境系统的概念框架;应用系统动力学方法分析产品在生态环境系统框架下的进化机制,并采用模糊综合评判法建立进化的重要因素——市场期望的表达模型;最后以某企业自吸泵产品为例,说明产品进化分析的过程。

**关键词:** 系统动力学 产品生态环境 产品进化

**中图分类号:** TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)06-0195-07

## Product Evolutionary Mechanism Based on System Dynamics

Fu Peihong Li Fengping Zhou Hongming Zhou Yuqing Li Pei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

### Abstract

A conceptual framework for product ecosystem was proposed. System dynamic method was used to analyze the effect of system elements in product survival and evolution. First, similarities between the product environment system and natural ecosystem were analyzed. Then, a model for product ecosystem was constructed, and the key relationships between the product and its environment was analyzed by using system dynamic method for describing the effect of environment in product evolution. Lastly, a phylogenetic analysis of self-priming pump was given as an example.

**Key words** System dynamics, Product ecological environment, Product evolutionary

## 引言

产品进化是基于进化算法或模拟自然界生物的进化机理和过程进行产品分析的方法,目前主要用于产品设计领域。文献[1]提出了设计基因工程,文献[2~5]提出了基于产品基因工程的创新设计方法,文献[6]提出了基于直接进化理论的产品族结构方法,文献[7]提出了基于产品生态学的概念设计框架,文献[8]提出了基于功能模块的产品进化设计方法,文献[9]提出了基于共生进化原理的功能结构方案设计模型,文献[10]提出了进化驱动模式下的产品创新设计方法。

产品生存于特定的环境中,其生存环境具有两个特性:从时间坐标看环境是动态变化的;从系统结

构看环境是一个复杂的反馈系统。因此,要研究产品的生存和进化,必须从系统的高度阐述产品与环境的动态相互作用关系。本文利用生态学、系统动力学等理论和方法,分析产品与环境之间的相互作用关系,研究产品进化的动力学机制。

## 1 产品生态环境结构分析和描述

产品的生存环境是一个动态变化的复杂系统,影响产品生存和进化的因素错综复杂。而产品环境系统与自然生态系统,无论是在系统的组成、组成因素特点和因素间的关系等都具有相似的特质,其特性对比如表1所示。因此,可将产品视为生命体,以生态学的视角研究产品与其环境的相互关系和作用机理,称为产品生态环境。

收稿日期:2012-01-08 修回日期:2012-03-14

\* 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(71101112)、浙江省自然科学基金资助项目(Y6100680、Y6110542)和浙江省公益技术研究工业资助项目(2011C21066)

作者简介:付培红,讲师,主要从事工业工程、先进制造技术研究,E-mail: iamfph@163.com

表1 产品环境系统与自然生态系统特性对比

Tab.1 Trait contrast of product environment system and natural ecosystem

序号	产品环境系统	自然生态系统
1	产品生态系统由产品和非产品环境组成	自然生态系统由生物和非生物环境组成
2	产品有产生、进化和消亡的生命周期	生物有生命周期
3	产品存在于特定的环境中	生物生存于特定的环境中
4	产品遵守“适者生存”规律	生物遵守“适者生存”规律
5	不同的产品之间存在各种关系,相互作用	不同的生物之间通过多种关系,相互联系
6	产品与环境存在信息、物质和能量等传递	生物与环境存在能量转化、物质循环和信息传递
7	产品与环境相互作用,相互影响	生物与环境相互作用,相互影响

根据系统因素之间的相互关系,整个产品生态环境系统分为2个部分,分别为产品群体子环境和非产品子环境。系统的组成因素为产品个体、产品种群、产品群落和非产品环境因子等。系统因素的定义如下:

定义1:产品个体(product individual,简称PI)描述为产品基因( $P-DNA$ )、产品体( $P-B$ )和产品表型( $PI-PHE$ ),表达为三元组  $PI = (A_{P-DNA}, B_{P-B}, C_{PI-PHE})$ 。

其中,产品表型为能被消费者感知和评价的产品外在表现,表型可描述为表型参数名  $M_{PI-PRE}$ 、表型参数值  $R_{PI-PRE}$  和表型参数重要度  $W_{PI-PRE}$ ,则  $C_{PI-PHE} = (M_{PI-PRE}, R_{PI-PRE}, W_{PI-PRE})$ ,因表型一般由多参数组成,则产品的表型可表达为

$$C_{PI-PRE} = \begin{bmatrix} m_{pi-pre_1} & r_{pi-pre_1} & w_{pi-pre_1} \\ m_{pi-pre_2} & r_{pi-pre_2} & w_{pi-pre_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{pi-pre_m} & r_{pi-pre_m} & w_{pi-pre_m} \end{bmatrix} = (M_{PI-PRE}, R_{PI-PRE}, W_{PI-PRE})$$

定义2:产品种群(product population,简称PP)是指在一定市场空间内同种类产品个体的集合。种群划分是基于产品的表型,即将产品分类成独立种群的一系列特征,称为该种群的表型型。

表型型概述了种群的特征,种群描述为种群表型参数名  $M_{PP-PRE}$  和种群表型参数值  $R_{PP-PRE}$ ,则种群表达为  $C_{PP-PRE} = (M_{PP-PRE}, R_{PP-PRE})$ 。因为表型型一般为多个参数组成,可表达为

$$C_{PP-PRE} = \begin{bmatrix} m_{pp-pre_1} & r_{pp-pre_1} \\ m_{pp-pre_2} & r_{pp-pre_2} \\ \vdots & \vdots \\ m_{pp-pre_n} & r_{pp-pre_n} \end{bmatrix} = (M_{PP-PRE}, R_{PP-PRE})$$

若产品个体  $M_{PI-PRE}$  的元素个数为  $m$ ,种群  $M_{PP-PRE}$  的元素个数为  $n$ ,则  $m \geq n$ ;产品个体的  $r_{pi-pre_i}$  一般为确定的定量或者定性值,而种群的  $r_{pp-pre_j}$  一般为区间范围值。

定义3:产品群落(product community,简称PC)

是在一定市场空间内各种产品种群的集合。

定义4:非产品环境因子(environmental factor,简称EF)是指除产品外,直接或间接影响产品生存的各种因素。

定义5:产品生态环境系统具有3个特性:①环境为动态变化的复杂的反馈机制系统。②环境是一个相对的概念,它必须有一个特定的主体或中心,除此主体或中心外其他的都称为其环境。③环境与产品的关系是相互辩证的,环境对作用于产品,而产品又反作用于环境,两者相辅相成。

因环境的动态性和相对性,环境( $Pro-E$ )表述为时间要素( $time$ )、主体要素( $object$ )、环境组成因素( $PI, PP, PC, EF$ )、因素的参数值  $[W(PI), X(PP), Y(PC), Z(EF)]$ 、因素间的作用关系  $F(PI, PP, PC, EF)$ ,则  $Pro-E = \{time, object, (PI, PP, PC, EF), [W(PI), X(PP), Y(PC), Z(EF)], F(PI, PP, PC, EF)\}$ 。随着时间的变化,环境组成因素、因素参数数量、因素间相互关系都可能改变。

产品生态环境系统结构如图1所示,系统反馈示意如图2所示。

## 2 产品进化动力学模型和作用分析

从产品生存的生态环境系统结构和特性可知,系统组成要素复杂,信息规模大,涉及变量多,是一个高度非线性的多重反馈结构。

系统动力学(systems dynamics,简称SD)是Forrester J W最早提出的,目的是综合控制论、信息论和决策论的成果,以计算机为工具,分析研究信息反馈系统的结构和行为。系统动力学具有能较好保留现实系统的非线性、定性和定量相结合的优点,是一种分析处理非线性复杂系统的有效理论、方法和手段。鉴于产品生态环境和系统动力学的特性,采用系统动力学方法从产品之间的竞争和合作、非产品环境的限制和促进作用等多个方面分析产品进化机制。

### 2.1 竞争作用分析

竞争主要是产品之间为争夺共有的有限资源或

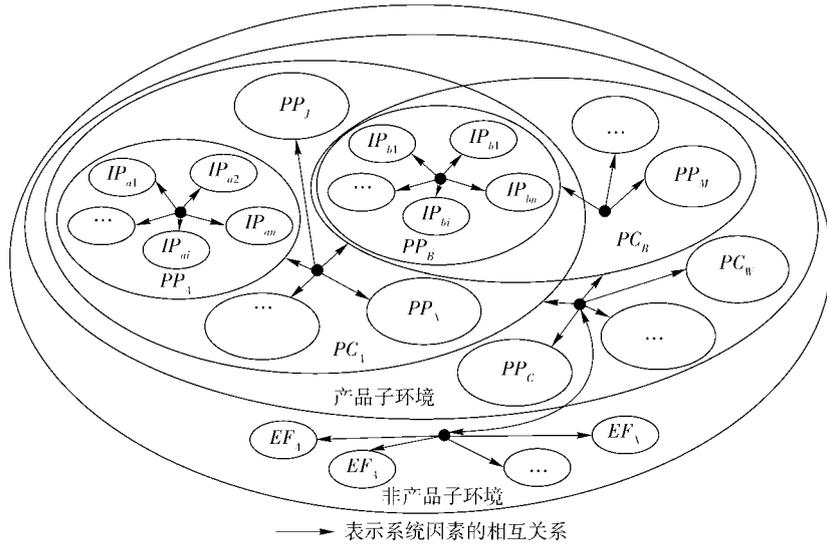


图 1 产品生态环境系统结构框架模型

Fig.1 Structural frame model of product ecological environment system

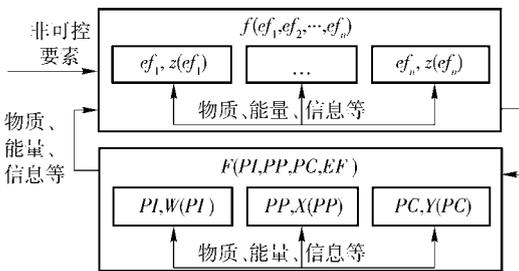


图 2 产品环境反馈系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of product environment feedback system

$$C_{PP-PRE(past)} = \begin{bmatrix} m_{pp-pre_1} & r_{pp-pre_1} \\ m_{pp-pre_2} & r_{pp-pre_2} \\ \vdots & \vdots \\ m_{pp-pre_n} & r_{pp-pre_n} \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$C_{PP-PRE(present)} = \begin{bmatrix} m_{pp-pre_1} & r_{pp-pre_1} \\ m_{pp-pre_2} & r_{pp-pre_2} \\ \vdots & \vdots \\ m_{pp-pre_m} & r_{pp-pre_m} \end{bmatrix}$$

者为了获取更大的市场空间而产生的相斥作用。竞争主要发生在种群内部或者具有类似表型的可相互替代的不同种群之间。

例如：种群 A 内产品 a 为了获取更多的市场空间，改进产品表型，提升产品综合性能，提高了市场对产品的要求（期望），使产品 a 的市场适应度提高，降低其他产品的市场适应度，从而获得更多的市场空间。市场空间扩大可以增加企业收入，提高创新研发等的可用投入，进一步促进产品进化。而种群内部产品的进化将导致其他产品进化压力增加，从而迫使其他产品进化。此外，产品进化导致相关技术知识的发展，而其他产品通过学习可分享相关技术，逐步提升种群产品性能，从而使得种群协同进化。假设不考虑种群外的环境因素作用，种群内产品协同进化示例的因果关系如图 3 所示。

竞争导致种群的表型型变化，其中包括表型因素或参数值都可能发生变化，若  $C_{PP-PRE(present)}$  表示当前时间点的种群表型型， $C_{PP-PRE(past)}$  表示前一时间点的表型型，则表型型变化表示为

如图 3 所示，在产品进化中，市场对产品的期望是一个关键因素，对产品进化产生重大影响。市场期望一般表现为对产品的综合感受，其中部分参数不能用确定的定量数据表示，如产品外形、服务等。因此，可采用模糊综合评判法进行表达。

设产品当前表型参数名集  $M_{PI-PRE(present)} = (m_{pi-pre_1}, m_{pi-pre_2}, \dots, m_{pi-pre_m})$ ，表型参数重要度集  $W_{PI-PRE} = (w_{pi-pre_1}, w_{pi-pre_2}, \dots, w_{pi-pre_m})$ ，评定集  $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ ，评价因素集  $F = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ ，若获取  $i$  个评价样本，则可获得隶属度矩阵  $R$  为

$$R = \begin{matrix} & e_1 & e_2 & \dots & e_n \\ m_{pi-pre_1} & \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{1m} & r_{2m} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \\ m_{pi-pre_2} & \\ \vdots & \\ m_{pi-pre_m} & \end{matrix}$$

则某产品的综合评价值为

$$\mu = F(W_{PI-PRE(present)} R)$$

亦可将产品当前表型参数集分为多个方向模块进行评价，表示为多子集，如

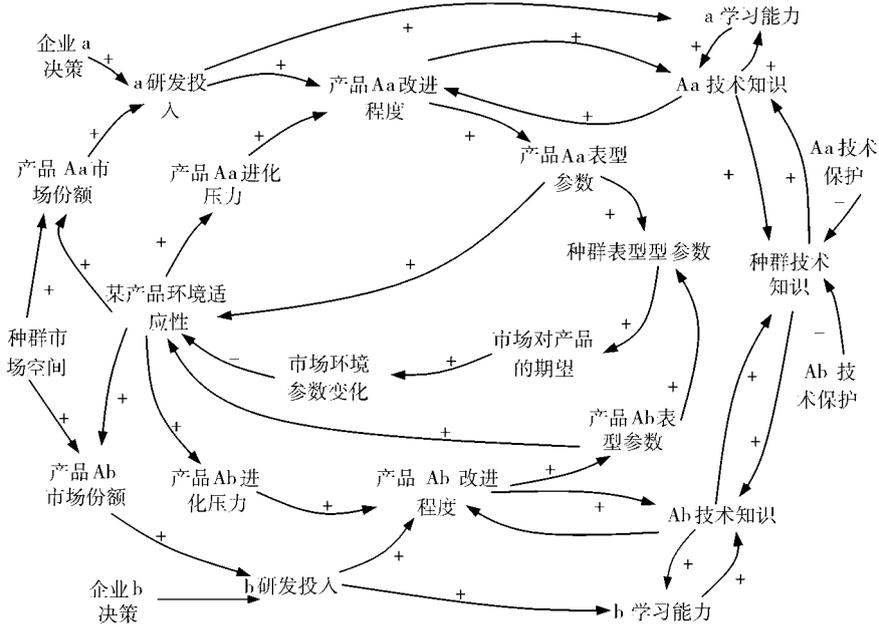


图3 种群 A 协同进化因果关系(关键)

Fig.3 Key of coevolution causality graph of population A

$$M_{PI-PRE(present)} = \{M_1(m_{pi-pre_1}, m_{pi-pre_2}), M_2(m_{pi-pre_3}, \dots, m_{pi-pre_i}), \dots, M_q(m_{pi-pre_j}, \dots, m_{pi-pre_m})\}$$

采用最大隶属度原则评价产品在各子方向的表现,  $\gamma_E(M_i)$  表示  $M_i$  对  $E$  的隶属度。

$$e_1 = \frac{\gamma_{e_1}(M_1)}{M_1} + \frac{\gamma_{e_1}(M_2)}{M_2} + \dots + \frac{\gamma_{e_1}(M_m)}{M_m}$$

$$\vdots$$

$$e_n = \frac{\gamma_{e_n}(M_1)}{M_1} + \frac{\gamma_{e_n}(M_2)}{M_2} + \dots + \frac{\gamma_{e_n}(M_q)}{M_q}$$

$\gamma_{e_i}(M_i) = \max \{ \gamma_{e_1}(M_1), \gamma_{e_2}(M_1), \dots, \gamma_{e_n}(M_1) \}$ , 则认为产品在  $M_i$  方向相对隶属于评价等级  $e_i$ , 产品对应的评价结果表示为

$$\Pi = \{ \gamma_{e_1}(M_1), \gamma_{e_1}(M_2), \dots, \gamma_{e_1}(M_q) \}$$

根据对多种产品长时间的表型参数和市场需求数据分析,表明市场对产品的期望一般只会上升,不会降低。假设时间点  $time_1 < time_2 < \dots < time_n$ , 则产品的综合性能  $\mu(time_1) \leq \mu(time_2) < \dots < \mu(time_n)$ 。

### 2.2 合作作用分析

合作是指不同产品之间有共同的利害关系,按照一定的结构获取和分配利益。

例如:某群落内,产品 A、B、C 和 D 组成了产品链,产品 A 的关键部件为 B 和 C,产品 B 的关键部件为 D;A 的关键生产设备为 E。假设不考虑同类产品间竞争,合作关系作用示例的因果关系如图 4 所示。产品链中,下端产品 D 进化将促进上端产品 B 进化,B、C 进化可带来 A 的进化;A 产品进化将对

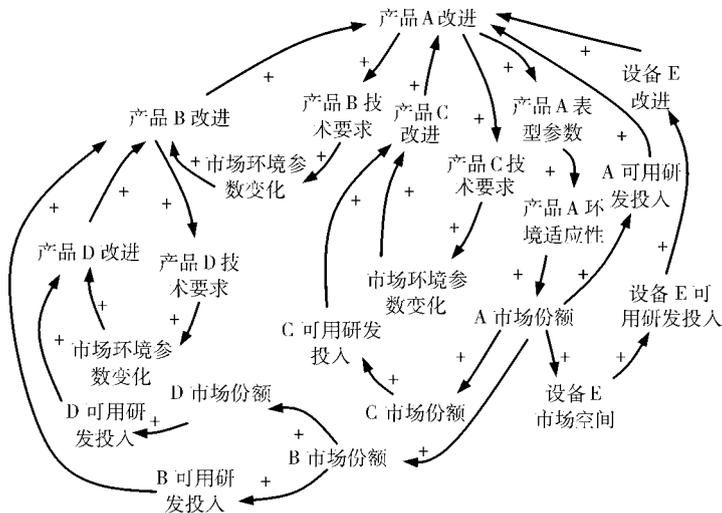


图4 群落内合作产品协同进化因果关系(关键)

Fig.4 Key of coevolution causality graph of collaborative product in community

下端产品提出技术要求,驱动下端产品进化;同时,产品 A 进化使得产品的市场适应度提高,获得更大的市场空间,合作关系的各产品按照一定的原则分配利益,使得可用研发投入增加,促进产品进化。

### 2.3 限制和促进作用分析

限制因素是指环境对产品的达标要求或者供给限制等。如法律法规、技术标准、资源稀缺等。限制条件会对产品提出要求,促使产品进化。例如:产品的生产或使用对环境造成负面影响,相关部门将出台相应的法律对其进行限制,从而迫使产品进化。如产品所需的某资源稀缺,造成该资源使用成本上升,导致产品成本上升,迫使企业通过改进设计、寻找替代稀缺资源等,进化产品。限制因素对进化作用示例的因果关系如图 5 和图 6 所示。

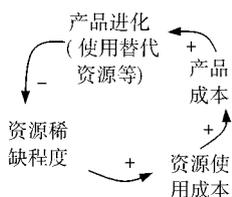


图 5 资源限制因果关系图(部分)

Fig. 5 Parts of causality graph of resource limitation

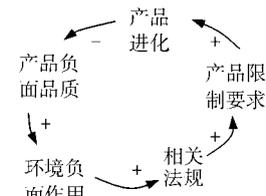


图 6 法规限制因果关系图(部分)

Fig. 6 Parts of causality graph of regulations limitation

促进因素是指环境中对于产品具有正向作用的各种资源,如科技进步等。各类科学技术的发展,可以带来直接的产品相关技术进步,亦可促使研究、设计等技术的进步,同时技术发展为技术本身的进步提供了更好的平台。促进因素对产品进化作用示例的因果关系如图 8 所示。

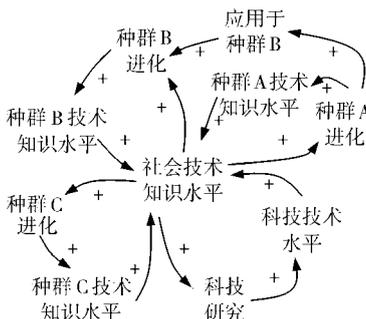


图 7 技术发展对产品进化作用的因果关系(部分)

Fig. 7 Parts of causality graph of technology development effect

### 2.4 环境作用的可变性

2.1 ~ 2.3 节描述的各种关系将共同作用于产品,产品在此环境中遵循“适者生存”规则,环境变化后产品或进化生存或退出市场。

环境具有动态变化特性,在产品生命周期中,环境因素对产品的作用程度和方式都是变化的。主要表现为:①不同环境因素对产品的作用力并不是等价的,若其中部分是起决定性作用的,这些因素称为主导因素。随着环境的变化,非主导因素可能变为主导因素,反之亦然。②由于信息、物质等的传递需要一定的时间,环境因素变化到其对产品产生影响存在时差,环境因素的作用具有一定的延迟性,如新技术、跨领域技术应用的时间延迟。③环境因素对产品的作用程度或作用时间具有一定的概率性。如某新技术出现后,企业需捕获到该信号,解读后才能作用于产品,而技术或应用技术企业影响力等的不同,都将影响技术应用的时间或范围,基本因果关系如图 8 所示。

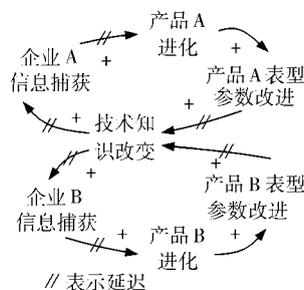


图 8 环境作用延迟的因果关系(部分)

Fig. 8 Parts of causality graph of environment effect delay

因此,企业若能快速有效地捕捉关键环境因素,并准确地解读环境信息,进化产品,就能提高该产品的环境适应度,把握市场先机,获得更多的竞争优势。

### 3 应用示例

陆上电动漩涡式清水自吸水泵由电动机、水泵、密封件 3 部分组成。近年来,因为技术的发展和市场需求增加,泵类企业发展迅速,行业内竞争激烈。为了更好地生存和发展,企业需及时准确地把握产品环境,合理改进产品,提高产品的环境适应性。以浙江省某企业 A 的陆上漩涡清水电动机配套自吸泵为例,简述产品进化分析过程。

首先,获取产品的基本信息,建立产品表型参数模型,划分产品种群。

陆上漩涡清水电动机配套自吸泵(EZXB)产品个体表型参数集为  $M_{PI-PRE_{EZXB}} = (m_{FR}, m_{HD}, m_{RS}, m_{EF}, m_{MP}, m_{NPSH}, m_{SHD}, m_{PT}, m_{PW}, m_{SH}, m_{PS}, m_{PP}, m_{SE}) =$

(流量,扬程,转速,效率,配套功率,气蚀余量,自吸高度,自吸时间,泵质量,特性,外形,价格,服务)。其中,外形为目标客户的综合评价;服务指标集  $SE - F = (s_{se-f1}, s_{se-f2}, s_{se-f3}, s_{se-f4}, s_{se-f5}) = (\text{配件服务, 发货管理, 维修及退换货处理, 服务资料, 服务响应速度})$ , 指标的权重向量  $SE - W = (s_{se-w1}, s_{se-w2}, s_{se-w3}, s_{se-w4}, s_{se-w5})$ , 每个服务指标评定集  $SE - E = (\text{好, 较好, 一般, 差})$ ,  $SE$  为综合评定值。产品表型参数一级指标分为 4 个方向模块进行评价,  $W_{PI-PRE_{EZXB}} = (W_1, W_2, W_3, W_4) = (\text{性能, 特性, 附加性能, 价格})$ , 性能模块  $W_1 = (m_{FR}, m_{HD}, m_{RS}, m_{EF}, m_{MP}, m_{NPSH}, m_{SHD}, m_{PT})$ , 特性要求模块  $W_2 = (m_{SH})$ , 附加性能模块  $W_3 = (m_{PW}, m_{PS}, m_{SE})$ , 价格模块  $W_4 = (m_{PP})$ , 其中, 性能和特性指标有达标要求。企业 EZXB 系列中某一型号为 1WZB-35 的自吸泵的表型参数表示为

$$C_{PI-PRE_{EZXB}(1WZB-35)} = \begin{bmatrix} m_{FR} & 2 & (0.4, 0.16) \\ m_{HD} & 15 & (0.4, 0.18) \\ m_{RS} & 2850 & (0.4, 0.08) \\ m_{EF} & 26 & (0.4, 0.15) \\ m_{MP} & 0.37 & (0.4, 0.1) \\ m_{NPSH} & 2.8 & (0.4, 0.1) \\ m_{SHD} & 3.5 & (0.4, 0.15) \\ m_{PT} & 100 & (0.4, 0.17) \\ m_{PW} & 2.5 & (0.2, 0.08) \\ m_{SH} & \text{铸铁, 不防腐} & (0.1, 1) \\ m_{PS} & \text{较好} & (0.2, 0.17) \\ m_{PP} & 300 & (0.3, 1) \\ m_{SE} & 80 & (0.2, 0.17) \end{bmatrix}$$

其中, 矩阵中括号内第 1 个数字为 1 级权重指标, 第 2 个为 2 级权重指标。

EZXB 的种群表型型参数集为

$$M_{PP-PRE_{EZXB}} = (m_{FR}, m_{HD}, m_{RS}, m_{EF}, m_{MP}, m_{NPSH}, m_{SHD}, m_{PT})$$

$$C_{PP-PRE_{EZXB}} = \begin{bmatrix} m_{FR} & 2 \sim 200 \\ m_{HD} & 8 \sim 100 \\ m_{RS} & 1\ 450 \sim 2\ 900 \\ m_{EF} & 26 \sim 75 \\ m_{MP} & 0.25 \sim 45 \\ m_{NPSH} & 2.5 \sim 6.5 \\ m_{SHD} & 3 \sim 5 \\ m_{PT} & 100 \sim 250 \end{bmatrix}$$

通过对产品的技术分析, 产品群落, 包括 EZXB、电动机、塑料、玻璃钢或铝合金等种群。

然后, 进行产品生态环境分析, 建立产品生态环境模型。

产品生态环境系统非常复杂, 需简化系统, 去掉冗余, 并关注当前主导因素, 逐步修正的系统。第一步, 根据产品个体、种群和群落等信息, 以及非产品环境的分析, 建立相关对象集, 包括合作和竞争企业对象集, 相关单位和技术关系如图 9 和图 10 所示, 分析提取产品可能的促进和限制因素。第二步, 通过当前 ( $t_4$ ) 及之前  $t_4 > t_3 > t_2 > t_1$ , 多个周期的  $Pro - E_{EZXB}$  数据分析, 采用 Anylogic 等软件对其进行仿真分析, 建立竞争企业、合作单位集和技术集, 建立各单位、技术与市场参数的映射关系, 并回归, 建立当前的  $Pro - E_{EZXB}$  模型。从当前环境中获取相关信息, 输入到  $Pro - E_{EZXB}$  模型中, 基于当前和预测市场的数据, 分析产品当前和未来预测市场的适应性, 判断产品的市场适应度。其中, 产品的市场适应度, 可用某时间点产品表型参数与市场对产品期望之间的差值 ( $DIF$ ) 来表示,  $DIF_{1WZB-35}(t_i) = ((\gamma_{E(1WZB-35)}(W_1) - \gamma_{E(EZXB)}(W_1)), \dots, (\gamma_{E(1WZB-35)}(W_4) - \gamma_{E(EZXB)}(W_4)))$ 。企业 A 的产品表型与市场期望部分参数值的变化曲线如图 11 所示。在图上显示的部分参数 (部分) 可知, 企业在  $m_{EF}$  和  $m_{PW}$  2 个参数低于市场预期。

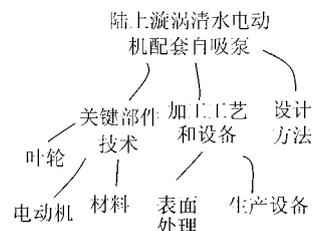


图 9 技术关系 (部分)

Fig.9 Parts of technology relation



图 10 单位关系 (部分)

Fig.10 Parts of related units

最后, 根据分析结果, 结合企业的目标市场定位和实际条件等, 对进化方向进行技术和经济等可行性分析, 选择合理的进化方向。

### 4 结论

(1) 对比了自然生态系统和产品环境系统之间

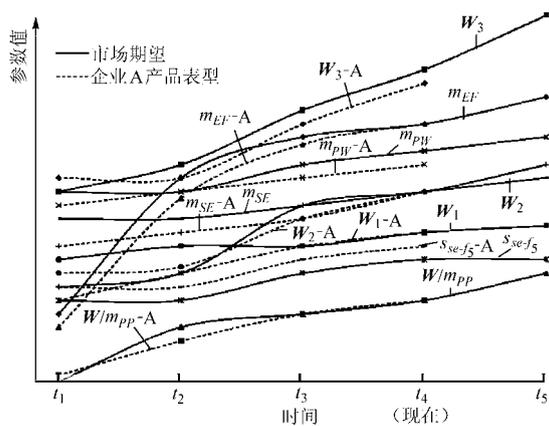


图 11 产品表型参数值与市场期望参数平均值曲线(部分)

Fig. 11 Parts of time curve of product phenotypic value and market expected average

的特性,表明两者之间具有相似特性。

(2)基于两者的相似性,引用自然生态系统的相关理论,建立了由产品个体、产品种群、产品群落和非产品环境因子等因素组成的产品及其环境的生态环境系统概念框架。

(3)提出了产品与其环境因素之间的几种关键作用关系,应用系统动力学方法分析了这些关系对产品进化作用的因果关系;并基于模糊综合评判法构建了进化的关键因素——产品的市场期望的表达模型。

### 参 考 文 献

- John S Gero, Vladimir Kazakov. A genetic engineering extension to genetic algorithms [J]. *Evolutionary Systems*, 2001, 9(1): 71 ~ 92.
- 冯培恩,陈泳,张帅,等. 基于产品基因的概念设计[J]. *机械工程学报*, 2002,38(10): 1 ~ 6.  
Feng Peien, Chen Yong, Zhang Shuai, et al. Product gene based conceptual design [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002,38(10): 1 ~ 6. (in Chinese)
- Huang Kezheng, Chen Hongwu, Wang Yandong, et al. Product genetic engineering[M] // ElMaraghy H A, ElMaraghy W H. *Advances in Design*, Springer, 2006: 121 ~ 132.
- 陈洪武,许哲,曹守启,等. 产品基因生长型设计研究[J]. *工程图学学报*, 2009,30(3): 13 ~ 21.  
Chen Hongwu, Xu Zhe, Cao Shouqi, et al. Research on product gene growth design [J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2009,30(3): 13 ~ 21. (in Chinese)
- 台立钢,钟廷修. 产品实例种群及产品基因研究[J]. *上海交通大学学报*, 2007,41(9): 1 465 ~ 1 469.  
Tai Ligang, Zhong Tingxiu. Research on population of product cases and product gene [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007,41(9): 1 465 ~ 1 469. (in Chinese)
- 徐新胜,程鑫. 基于直接进化理论的产品族结构自适应方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2010,16(3): 469 ~ 475.  
Xu Xinsheng, Cheng Xin. Self-adaptive methods of product family architecture based on directed evolution theory [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010,16(3): 469 ~ 475. (in Chinese)
- 何斌,冯培恩,潘双夏. 基于产品生态学的概念设计研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2007,13(7): 1 249 ~ 1 254.  
He Bin, Feng Peien, Pan Shuangxia. Conceptual design based on product ecological model [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007,13(7): 1 249 ~ 1 254. (in Chinese)
- Francis E H, Tay J Gu. A methodology for evolutionary product design [J]. *Engineering with Computers*, 2003,19(2 ~ 3): 160 ~ 173.
- 陈泳,冯培恩,潘双夏,等. 基于共生进化原理的功能结构设计[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(6): 19 ~ 24.  
Chen Yong, Feng Peien, Pan Shuangxia, et al. Functional structure desing model based on the symbiotic evolutionary theory [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(6): 19 ~ 24. (in Chinese)
- 麻广林,李彦,黄振勇,等. 进化驱动型产品创新设计方法研究[J]. *计算机集成制造系统*,2009,15(5):849 ~ 857.  
Ma Guanglin, Li Yan, Huang Zhenyong, et al. Product innovative design method based on evolution-drive model [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*,2009,15(5):849 ~ 857. (in Chinese)