



ISSN 0577-6686
CODEN CHHKA2

机械工程学报[®]

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING



CMES 中国机械工程学会主办

半月刊 | **11** / 2012
第 48 卷

ISSN 0577-6686



9 770577 668125

11 >

本刊荣获

- ★ 首届“国家期刊奖”(1999年)
- ★ 第二届“国家期刊奖”(2003年)
- ★ 第三届“国家期刊奖”(2005年)
- ★ “中国期刊方阵”双高期刊
- ★ 中国科协精品科技期刊工程项目资助期刊
- ★ 国家自然科学基金委员会资助
- ★ 第二届中国出版政府奖期刊奖

机械工程学报

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

2012年第48卷第11期 6月5日出版

Vol.48 No.11 Published on June 5, 2012

(半月刊, 1953年创刊)

(Semimonthly, started in 1953)

版权所有: ©2012 Journal of Mechanical Engineering

主管: 中国科学技术协会

主办: 中国机械工程学会

编辑出版: 《机械工程学报》编辑部

编辑部地址: 北京百万庄大街22号(100037)

主编: 宋天虎

常务副主编: 王淑芹

编辑部主任:

副主编: 郑小光

责任编辑: 岑伟

电话: (010)88379907

传真: (010)88379504

DOI: 10.3901/JME

http://www.cjmenet.com.cn

E-mail: jme@cmes.org

cjme@263.net

印刷: 北京机工印刷厂

国内发行: 北京报刊发行局

订购处: 全国各地邮局

Responsible Department:

China Association for Science and Technology

Sponsored by:

Chinese Mechanical Engineering Society

Edited and Published by:

Editorial Office of JOURNAL OF
MECHANICAL ENGINEERING

Address:

22 Baiwanzhuang Dajie, Beijing 100037, China

Chief Editor: Song Tianhu

Executive Chief Editor: Wang Shuqin

Deputy Chief Editor: Zheng Xiaoguang

Tel: 0086-10-88379907

Fax: 0086-10-88379504

DOI: 10.3901/JME

http://www.cjmenet.com.cn

E-mail: jme@cmes.org

cjme@263.net

Distributed Abroad by:

China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing, China)

Code: M201

《机械工程学报》董事会

董事长:

宋天虎(中国机械工程学会)

副董事长:

王文斌(机械工业信息研究院)

董事:

王田苗

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院)

王庆丰

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室)

王时龙(重庆大学机械传动国家重点实验室)

王祖温(大连海事大学)

王润孝(西北工业大学)

邓宗全(哈尔滨工业大学)

仪垂杰(青岛理工大学)

刘宏民(燕山大学)

吕明(太原理工大学)

孙汉旭(北京邮电大学自动化学院)

闫献国(太原科技大学)

严新平(武汉理工大学)

何存富(北京工业大学)

张义民(东北大学机械工程与自动化学院)

张宪民(华南理工大学机械工程学院)

李大勇(哈尔滨理工大学)

李圣怡

(国防科技大学机电工程与自动化学院)

李杨民(澳门大学)

李剑峰(山东大学)

李荣彬(香港理工大学)

李荣德(沈阳工业大学)

杨兆军(吉林大学)

邵新宇(华中科技大学机械科学与工程学院)

季林红(清华大学精密仪器与机械学系)

姚振强(上海交通大学机械与动力工程学院)

胡燕平(湖南科技大学)

赵韩(合肥工业大学)

项昌乐(北京理工大学)

徐西鹏(华侨大学)

徐金梧(北京科技大学)

袁寿其(江苏大学)

贾振元(大连理工大学机械工程学院)

郭隐彪(厦门大学)

高健(广东工业大学)

梅雪松(西安交通大学机械工程学院)

黄田(天津大学机械工程学院)

黄明辉(中南大学机电工程学院)

黄洪钟(电子科技大学机械电子工程学院)

葛世荣(中国矿业大学)

韩旭(湖南大学机械与运载工程学院)

谭援强(湘潭大学机械工程学院)

檀润华(河北工业大学)

ISSN 0577-6686

CN11-2187/TH

国内邮发代号: 2-362 国外发行代号: M201

国内定价: 35元/期, 840元/年

机械工程学报

JIXIE GONGCHENG XUEBAO

2012年第48卷第11期 6月5日出版

目次

※※※ 创新设计专栏 ※※※

- 机械功能对称的概念体系及其应用 冯培恩 曾令斌 邱清盈等 (1)
- 基于技术进化理论的破坏性创新预测与实现模型 孙建广 檀润华 江屏 (11)
- 异构模块组合耦合分析的完全关联矩阵 陈羽 滕弘飞 (21)
- 面向功能创新的功能进化、组合与失效研究 曹国忠 郭海霞 檀润华等 (29)
- 专利设计知识的创新性评估方法及其在创新设计中的应用 邱清盈 薛驰 冯培恩等 (39)
- 基于功能裁剪的专利规避设计 江屏 罗平亚 孙建广等 (46)
- 模块化产品族演进创新方法研究 侯亮 王浩伦 穆瑞等 (55)
- 基于 TRIZ 的可拆卸联接改进设计 刘志峰 胡迪 高洋等 (65)
- 集成 TRIZ 的产品生态设计方法研究 刘征 潘凯 顾新建 (72)
- TRIZ 辅助功能周期确立方法 张鹏 檀润华 (78)
- 基于复杂网络与公理设计的产品平台设计方法 刘曦泽 祁国宁 纪杨建等 (86)
- 基于公理设计和设计关联矩阵的产品平台设计新方法 肖人彬 程贤福 陈诚等 (94)
- 基于相似性与结构敏感性分析的产品平台设计过程模型 张换高 赵文燕 江屏等 (104)

机械学

机构学及机器人

- 虚拟轴机床并联机构的自适应动态滑模运动控制 高国琴 郑海滨 (119)
- 基于蛇形魔方机构分析的模块化可重构机构理论 丁希仑 吕胜男 (126)
- 基于非瞬时支链位形设计的并联机构内部奇异消除方法 刘延斌 李志松 韩建海 (136)

机械动力学

- 高速主轴系统静止及运转状态下动力学特性对比分析 孙伟 汪博 闻邦椿 (146)
- 调制式永磁齿轮气隙磁场及转矩分析计算 葛研军 聂重阳 辛强 (153)
- 二维声学数值计算的径向插值有限元法 夏百战 于德介 姚凌云 (159)
- 甚低频拖曳天线的稳态动力学研究 郑小洪 侯志强 韩维等 (166)

制造科学与技术

制造工艺与装备

- 基于数值仿真技术的单颗磨粒切削机理 言兰 姜峰 融亦鸣 (172)
- 大口径轴对称非球面气囊抛光进动运动建模及控制 潘日 王振忠 郭隐彪等 (183)
- 基于 Hermite 插值的复杂光学曲面车削加工路径规划 王兴盛 康敏 (191)

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

Vol.48 No.11 June 2012

CONTENTS

- Research on Mechanical Function Symmetry Architecture and Its Application
..... FENG Peien ZENG Lingbin QIU Qingying et al (1)
- Model for Roadmapping Disruptive Innovation Based on Technology Evolution Theory
..... SUN Jianguang TAN Runhua JIANG Ping (11)
- Comprehensive Dependency Matrix for Heterogeneous Modular Combination
Coupling Analysis..... CHEN Yu TENG Hongfei (21)
- Research on Function Evolution, Combination and Failure Mode for Product Function Innovation
..... CAO Guozhong GUO Haixia TAN Runhua et al (29)
- Novelty Evaluation Method of Patent Design Knowledge and Its Application in Creative Design
..... QIU Qingying XUE Chi FENG Peien et al (39)
- Method about Patent Design Around Based on Function Trimming
..... JIANG Ping LUO Pingya SUN Jianguang et al (46)
- Research on the Evolution & Innovation for Modular Product Family
..... HOU Liang WANG Haolun MU Rui et al (55)
- TRIZ Based Revised Design for Disassembly of Joint Structure
..... LIU Zhifeng HU Di GAO Yang et al (65)
- Research on Product Ecological Design Method Integrating TRIZ
..... LIU Zheng PAN Kai GU Xinjian (72)
- Method of Establish Functional Period Assisted by TRIZ
..... ZHANG Peng TAN Runhua (78)
- Product Platform Design Method Based on Complex Network and Axiomatic Design
..... LIU Xize QI Guoning JI Yangjian et al (86)
- New Approach to Product Platform Design Based on Axiomatic Design
and Design Relationship Matrix..... XIAO Renbin CHENG Xianfu CHEN Cheng et al (94)
- Product Platform Design Process Model Based on Similarity
and Structural Sensitivity Analysis.....ZHANG Huangao ZHAO Wenyan JIANG Ping et al (104)
- Adaptive Dynamic Sliding Mode Motion Control for the Parallel Mechanism of
Virtual Axis Machine Tool.....GAO Guoqin ZHENG Haibin (119)
- Reconfiguration Theory of Modular Reconfigurable Mechanism Based on
Analysis of Snake Cube.....DING Xilun LÜ Shengnan (126)
- (下转封三)

DOI: 10.3901/JME.2012.11.104

基于相似性与结构敏感性分析的产品平台设计过程模型*

张换高¹ 赵文燕² 江屏¹ 檀润华¹ 李国平³

(1. 河北工业大学河北省制造业创新方法工程技术研究中心 天津 300130;

2. 河北工业大学管理学院 天津 300130;

3. 中煤集团张家口煤矿机械有限公司 张家口 075025)

摘要: 建立结构合理的产品平台是实现企业多样化效率和效益的重要途径。从设计角度把产品平台分为概念平台和实体平台,前者组成了产品族创新的核心资源,后者集合了企业产品的核心元件。提出了基于相似性分析与结构敏感性分析的产品平台设计过程模型,并对其中关键环节所涉及的通用化设计规则和方法进行了着重分析。应用该过程模型可以为企业建立更具柔性的层级产品平台架构,设计过程可以分为两个阶段:首先通过功能和概念结构相似性分析以及通用化设计建立产品概念平台;然后通过实体结构对需求变化的敏感性分析和通用化设计建立产品实体平台。最后该模型用于某企业的铠装刮板输送机产品平台的设计。

关键词: 产品概念平台 产品实体平台 相似性 结构敏感性 通用化

中图分类号: TH122

Product Platform Design Process Model Based on Similarity and Structural Sensitivity Analysis

ZHANG Huangao¹ ZHAO Wenyan² JIANG Ping¹ TAN Runhua¹ LI Guoping³

(1. Manufacturing Innovation Methods Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

2. School of Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

3. China Coal Zhangjiakou Coal Mining Machinery Co. Ltd., Zhangjiakou 075025)

Abstract: Building a product platform with rational structure is a good way for a company to obtain variety efficiently and effectively. From the aspect of design the product platform can be divided into conceptual platform and entity platform, the former forms the core resource for innovation of product family, and the latter gathers the core components for variants production. A process model for product platform design based on similarity and structural sensitivity analysis is put forward, as a solution of one of key steps, the rules and approaches for commonality design is put emphasis on. By use of that process model a more flexible product platform with hierarchy architecture can be built. According to that model the design process is separated into two phases. First, the product conceptual platform is designed based on similarity analysis and commonality design on function and conceptual structure units. Second, the product entity platform is designed based on sensitivity analysis for entity units to the changes of customer requirements. As an illustration, the process model is used for product platform design of armored face conveyer of a company.

Key words: Product conceptual platform Product entity platform Similarity Structural sensitivity Commonality

0 前言

创新是产品在动态、多变的市场中保持活力和

竞争力的基本手段,但是创新导致的产品多样化的成本和效率是企业始终面临的重要问题之一,建立合理高效的产品平台是提高企业多样化效率和效益的重要途径之一。

文献中对产品平台的定义很多, MUFFATTO等^[1]将其分为狭义和广义:狭义定义是面向生产的,平台定义为通用实体(零部件或模块);广义定义的

* 国家自然科学基金(70972050, 51105128)、科技部创新专项(2010IM020100, 2011IM010200)和河北省科技支撑计划(10240116D)资助项目。
20110811 收到初稿, 20120109 收到修改稿

范围更广,包括通用的子系统、参数、信息和知识以及供应链等。产品平台内涵是目标产品族所涉及的通用元素的集合。本文从设计角度把产品平台定义为一组相似产品的通用结构元素以及元素间关系或接口组成的通用架构或结构。按照产品平台设计

的不同阶段可以分为概念平台和实体平台:概念平台是指一组相似产品通用的功能和概念结构以及接口组成的通用架构;产品实体平台是指一组相似产品通用实体零部件或装配体组成的通用结构。

待设计的产品平台需要支持的产品的总和称为该平台的目标产品族,包括已有的和基于需求预测的产品。作为目标产品族设计与创新的基础和资源,产品平台的结构决定了平台衍生产品的能力,称为平台能力。一方面平台能力体现在衍生产品的功能能力上,即产品族的功能能力,这是在建立产品平台之初通过产品族定位确定的,受平台概念设计的性能极限约束;另一方面平台能力体现为产品平台衍生产品的数量以及它们之间的差异性,决定于平台结构的开放性、柔性和稳健性。产品平台设计的目的就是实现产品平台的平台能力。

1 产品平台设计概述

1.1 产品平台与模块化设计

产品平台作为其产品族的基体,通过添加、去除、替换部分模块或局部模块比例变化衍生新产品。因此产品平台要求具有模块化结构,但是产品平台又不等同于模块化设计。

模块化设计是在保证接口一致性的前提下通过开发模块的不同版本开发模块化产品族^[2]。其产品族结构具有较大开放性,其对模块内部结构修改的不确定性直接影响着产品的设计和生产,对形成生产批量是不利的。

在模块化产品或模块化产品族基础上,通过对部分模块进行通用化和标准化,建立模块化产品平台。基于模块化产品平台的产品创新主要是以平台为设计资源的外部模块的创新。模块化产品、模块化产品族和模块化平台产品族的关系如图1所示。

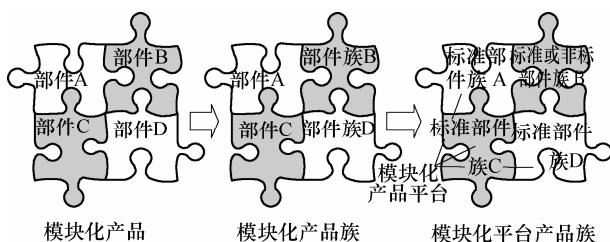


图1 模块化产品、模块化产品族和模块化平台产品族

模块化是实现模块化产品平台设计的关键使能技术之一,模块化方法可以用于平台设计过程中模块的划分。

1.2 产品平台设计方法概述

从文献看产品平台可以分为两类:参数化平台和模块化平台^[3]。每种平台都有不同研究者提出的相应的平台设计方法。从平台设计的角度来说,主要有三种方法:基于目标规划的方法、基于相似性分析与聚类的方法和基于敏感性分析的方法。

1.2.1 基于目标规划的方法

把平台设计问题归结为目标产品族的参数规划问题,通过一定方式规划产品平台在一定时期内所支持的产品的能力目标,规划过程一般以目标产品的性能或成本为优化目标。典型的是MEYER等^[4]提出的合成设计方法。

DAI等^[5]以已有产品设计变量为变量,以通用参数集为约束空间,建立了产品平台优化模型,用于确定平台变量及其优化值。

基于目标规划的方法致力于解决产品平台通用性和变体个性的折中问题^[6],其关键是目标函数的设计。该方法仅是一种参数规划或已有参量选择的方法,缺乏衍生产品设计过程中所需的平台元素间的拓扑关系信息。

1.2.2 基于相似性分析与聚类的方法

基于相似性分析与聚类的方法主要是以一组相似产品为研究对象,通过分析产品间功能、结构或其他方面的相似性,提取能够通用的部分建立模块化产品平台的方法。

HÖLTTÄ-OTTO等^[7]提出了基于系统树图的模块化平台设计的方法,是在比较产品间输入与输出值相似性基础上进行产品聚类,根据聚类结果建立系统树图,然后在不同相似层次上进行平台设计和划分,每个层次的产品平台的设计都是提取类内的通用元素得到的。OTTO等^[8-9]提出了基于产品族功能结构和模块性矩阵进行模块化平台设计的方法,该方法缺乏对通用化设计的进一步分析。SIDDIQUE^[10]开发了产品族推理系统(Product family reasoning system, PFRS),以图论和图文法为数学工具表达产品信息,通过相似性分析获取产品平台以及产品族约束。HUANG等^[11]提出了一种基于相似性计算的产品平台确定方法。TSENG等^[12]提出面向大规模定制设计(Design for mass customization, DFMC)的概念,强调建立通用的产品族架构,并用需求表达功能,用技术参数表达行为,建立了基于功能—行为—结构模型的平台聚类方法。秦红斌等^[13]提出一个平台体系结构的分层构造框架以及一种基于图论的聚类分析方法来获取平台

参数。檀润华等^[14-17]提出了通过相似性分析和聚类自底向上的产品平台设计方法。

基于相似性分析与聚类的产品平台设计方法主要是建立在已有产品结构基础上的,尤其是基于结构分解的方法,能够建立从功能到结构的通用结构/模块,对设计和生产都比较有利,但是由于缺乏考虑需求变化对产品结构的影响,因此部件或模块通用的可能性和合理性都无法保证。

1.2.3 基于敏感性分析的产品平台设计方法

SIMPSON 等^[18-19]基于稳健设计原理提出产品平台概念开发方法(Product platform concept exploration method, PPCEM),通过建立产品数学模型并利用计算机模拟计算产品性能对需求变化的敏感性得到稳健的控制参数和可缩放参数(比例因子),并以此作为参数化平台。

MATIN 等^[20]提出了面向多样性设计(Design for variety, DFV)方法,该方法通过定性分析已有产品零部件或模块对需求的变化是否敏感,建立由对需求变化不敏感的零部件或模块组成的产品平台。HSIAO 等^[21]提出利用 QFD 研究需求对每个零部件设计的影响,用邻接矩阵研究零部件之间的关系,根据联系紧密程度聚合为模块,确定不变的模块为产品平台。相似方法同样被 PARK 等^[22]用来开发产品平台。DAI 等^[23]提出了在参数敏感性分析基础上的聚类设计产品平台的方法。赵文燕等^[24]提出了一种基于敏感性分析的产品平台设计推理方法。

在概念设计阶段,基本任务是功能的实现,对参数要求往往并不具体,因此基于敏感性分析的方法对概念设计阶段产生的原理解通用性分析效果并不明显。综合两方面要求提出了基于相似性和结构敏感性分析的产品平台设计方法,建立以概念平台和实体平台为框架的企业产品平台架构。

2 基于相似性与结构敏感性分析的产品平台设计过程

2.1 基于相似性分析的产品概念平台设计过程模型

产品平台是建立在已有产品基础上的,由于每个产品的功能和结构都是存在的,平台概念设计就是通过相似性分析确定在未来一定时期内能够满足客户需求的目标产品族通用功能和通用概念结构。其设计过程如图 2 中点画线框内部分所示,具体步骤如下所述。

(1) 目标产品族用户需求分析。用户需求是用户对目标事物的一种期望和要求,是对目标事物具有某方面属性或特征必要性的理解和认知。用户需求可以分为功能性需求和非功能性需求两大类。功能性需求声明系统或系统元件必须能够执行的功能;非功能需求是除了功能需求之外的需求。不同产品对功能性需求是不同的,非功能性需求则具有一定共性,如可靠性、质量、成本等。

平台设计需要进行用户需求预测以保证平台的稳定性。用户需求预测可以分为新用户的预测和现有需求进化的预测两类。新用户是同类产品新的潜在用户,包括不同地域、不同年龄、性别的人群,不同的企业用户等。现有用户需求进化是指用户对产品的要求随着时间的变化有不断提高的趋势。要充分挖掘这些新老用户对目标产品的意愿要求,把这些要求转化成对产品功能和性能(包括物理性能指标、质量、外观等)上的具体要求,通过分析和预测确定目标产品族的功能能力。

(2) 产品概念结构分解与功能分解。产品分解的主要目的是为了分析产品的功能结构以及功能与概念结构间的对应关系,因此可以采用基于流的方法和拆件运行法^[8],分析流上的构件或部件的功能,这样便于建立已有产品的功能结构。

(3) 功能相似性分析。通过产品概念结构分解和功能分解,可以得到已有产品的功能结构,按照产品功能结构的异同把产品进行归类,得到 n 种功能结构不同的产品。根据第一步用户需求预测的结果,分析当前产品及其衍生产品在未来市场的获利能力,作为产品平台设计的一项重要依据:产品平台应该优先支持那些预期获利能力强的产品。某产品的预期获利能力可以根据式(1)进行计算

$$P = \zeta p SC \quad (1)$$

式中, P 为获利能力, p 为预期平均利润率, S 为预期销量, C 为某产品平均成本, ζ 为修正因子,用于考虑不确定性造成的偏差。

分析企业不同产品(按照功能结构划分)的预期获利能力,设有 n 种产品,其中获利能力最高的是第 k 种产品,则该产品重要性赋值为 1,其余产品如第 i 个产品重要性赋值为

$$\omega_i = P_i / P_k \quad (2)$$

产品重要性权重也可以用层次分析法通过分析各产品相对重要性来获得。

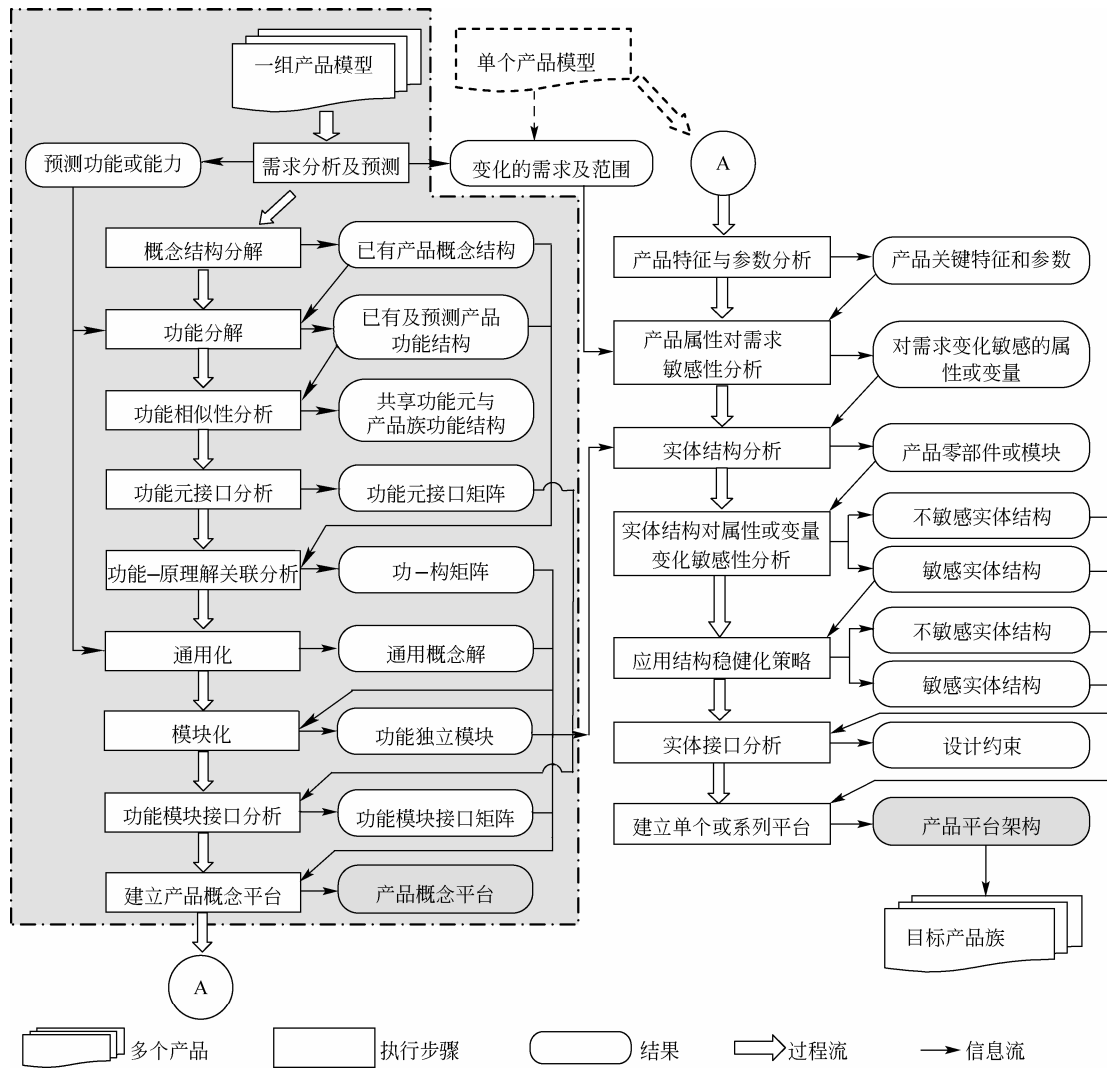


图2 基于相似性和结构敏感性分析的产品平台设计过程模型

通过对目标产品族功能分解得到目标产品族的所有功能元。然后以每个功能元为一个坐标，按照一定次序组成一个矢量，该矢量赋值后就是某一具体产品。矢量元素为0或1，“1”表示该产品中包含对应功能元，“0”则相反。

根据产品预测结果，分析产品的功能结构，然后组成产品-功能矩阵。矩阵中每一行表示一个产品的功能组成，每一列表示包含该功能元的所有产品。如式(3)中矩阵表示目标产品族有 m 种产品，共有 n 个功能元

$$\mathbf{M}_{PF} = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & \cdots & F_n \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

计算以下两个系数

$$\rho_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (4)$$

式中， ρ_i 表示产品 P_i 包含的功能元的数量，代表系统复杂程度； λ_j^ω 表示功能元 F_j 加权共享因子

$$\lambda_j^\omega = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i x_{ij}}{\sum_{i=1}^m \omega_i} \quad (5)$$

设定 λ_j^ω 阈值为 λ_0^ω 。把 $\lambda_j^\omega \geq \lambda_0^\omega$ 的功能元确定为平台功能元。

如式(6)，按照 λ 值从大到小顺序对矩阵 \mathbf{M}_{PF} 的列重新排列得到矩阵 $\mathbf{M}_{PF\lambda}$ ，依据规定的 λ_0^ω 对矩阵进行横向分割(画一竖线)，左侧各列就是平台功能元与产品间相关性矩阵 $\mathbf{M}_{PF\lambda 1}$ ，右侧为个性功能元与产品间相关性矩阵 $\mathbf{M}_{PF\lambda 2}$

$$M_{PF\lambda} = \begin{matrix} & F_1^c & F_2^c & F_3^c & \cdots & F_q^c & F_1^u & F_2^u & F_3^u & \cdots & F_r^u \\ P_1 & \left(\begin{array}{cccc|cccc} x'_{11} & x'_{12} & x'_{13} & \cdots & x'_{1q} & x''_{11} & x''_{12} & x''_{13} & \cdots & x''_{1r} \\ x'_{21} & x'_{22} & x'_{23} & \cdots & x'_{2q} & x''_{21} & x''_{22} & x''_{23} & \cdots & x''_{2r} \\ x'_{31} & x'_{32} & x'_{33} & \cdots & x'_{3q} & x''_{31} & x''_{32} & x''_{33} & \cdots & x''_{3r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_{m1} & x'_{m2} & x'_{m3} & \cdots & x'_{mq} & x''_{m1} & x''_{m2} & x''_{m3} & \cdots & x''_{mr} \end{array} \right) \end{matrix} \quad (6)$$

式中, $F_1^c, F_2^c, \dots, F_q^c$ 的平台因素共享因子 $\lambda_i^{oc} \geq \lambda_0^o$, 是组成平台的功能元, $F_1^u, F_2^u, \dots, F_r^u$ 的平台因素共享因子 $\lambda_i^{ou} < \lambda_0^o$, 不属于平台, 而属于个性功能元。

(4) 功能元之间的接口分析。功能元之间的接口就是功能元之间通过流建立的联系, 可以通过目标产品族功能结构表示, 也可以通过功能元之间关系矩阵 M_{FF} 来表示, 且

$$M_{FF} = \begin{matrix} & F_1^c & F_2^c & F_3^c & \cdots & F_q^c & F_1^u & F_2^u & F_3^u & \cdots & F_r^u & E \\ F_1^c & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1q} & c'_{11} & c'_{12} & c'_{13} & \cdots & c'_{1r} & o_{1e}^c \\ F_2^c & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2q} & c'_{21} & c'_{22} & c'_{23} & \cdots & c'_{2r} & o_{2e}^c \\ F_3^c & a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3q} & c'_{31} & c'_{32} & c'_{33} & \cdots & c'_{3r} & o_{3e}^c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F_q^c & c_{q1} & c_{q2} & c_{q3} & \cdots & c_{qq} & c'_{q1} & c'_{q2} & c'_{q3} & \cdots & c'_{qr} & o_{qe}^c \\ F_1^u & c_{11} & c_{12} & c_{13} & \cdots & c_{1q} & b_{11} & b_{12} & b_{13} & \cdots & b_{1r} & o_{1e}^u \\ F_2^u & c_{21} & c_{22} & c_{23} & \cdots & c_{2q} & b_{21} & b_{22} & b_{23} & \cdots & b_{2r} & o_{2e}^u \\ F_3^u & c_{31} & c_{32} & c_{33} & \cdots & c_{3q} & b_{31} & b_{32} & b_{33} & \cdots & b_{3r} & o_{3e}^u \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F_r^u & c_{r1} & c_{r2} & c_{r3} & \cdots & c_{rq} & b_{r1} & b_{r2} & b_{r3} & \cdots & b_{rr} & o_{re}^u \\ E & o_{e1}^c & o_{e2}^c & o_{e3}^c & \cdots & o_{eq}^c & o_{e1}^u & o_{e2}^u & o_{e3}^u & \cdots & o_{er}^u & 0 \end{matrix} \quad (7)$$

式中, E 代表为系统提供输入或系统输出的环境, 即为系统边界。除去系统环境部分, 矩阵 M_{FF} 可以分为四个区 A 、 B 、 C 、 C' , 其中 A 区表示通用功能元之间通过流建立的联系, 即为概念平台的内部接口; B 为已有产品个性功能元之间通过流建立的联系; C 表示个性功能元对通用功能元的输入流, C' 表示通用功能元到个性功能元的输出流。 C 与 C' 扩展组成平台的外部接口。

当两个功能元之间有流相连时, 矩阵 M_{FF} 元素赋值为 1(也可以按照流的相对重要性赋值), 反之赋值为 0。计算矩阵 M_{FF} 的行和 μ_i 与列和 ν_j , μ_i 表示功能元 F_i 对其他功能元影响的程度; ν_j 表示功能元 F_j 受其他功能元影响的程度。 μ_i 与 ν_j 决定着对应功能元通用化优先级。

(5) 建立各功能元与概念结构的关联矩阵。根据步骤(2)分析得到的各产品概念结构, 建立目标产品族功能元与概念结构之间的关系矩阵

$$M_{FT} = \begin{matrix} & T_1 & T_2 & T_3 & \cdots & T_t \\ F_1^c & \left(\begin{array}{cccc|c} t_{11} & t_{12} & t_{13} & \cdots & t_{1t} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & \cdots & t_{2t} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & \cdots & t_{3t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{q1} & t_{q2} & t_{q3} & \cdots & t_{qt} \\ t_{11}^* & t_{12}^* & t_{13}^* & \cdots & t_{1t}^* \\ t_{21}^* & t_{22}^* & t_{23}^* & \cdots & t_{2t}^* \\ t_{31}^* & t_{32}^* & t_{33}^* & \cdots & t_{3t}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{r1}^* & t_{r2}^* & t_{r3}^* & \cdots & t_{rt}^* \end{array} \right) & \begin{matrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \vdots \\ \tau_q \\ \tau_1^* \\ \tau_2^* \\ \tau_3^* \\ \vdots \\ \tau_r^* \end{matrix} \\ \varepsilon_1 & \varepsilon_2 & \varepsilon_3 & \cdots & \varepsilon_t \end{matrix} \quad (8)$$

$$t_{ij} \text{ (或 } t_{ij}^*) = \begin{cases} 1 & T_j \text{ 参与实现功能元 } F_i^c \text{ (或 } F_i^u) \\ 0 & T_j \text{ 不参与实现功能元 } F_i^c \text{ (或 } F_i^u) \end{cases}$$

计算矩阵的行和与列和

$$\tau_i = \sum_{j=1}^t t_{ij} \quad \tau_i^* = \sum_{j=1}^t t_{ij}^* \quad \varepsilon_j = \sum_{i=1}^q t_{ij} + \sum_{i=1}^r t_{ij}^*$$

式中, τ_i 表示参与实现功能元 F_i^c (或 F_i^u) 的原理解的数量。 ε_j 表示原理解 T_j 参与实现的功能元数量。

(6) 原理解通用化。产品平台设计的目的是为了实现通用元素最大化, 分析矩阵 M_{FT} , 确定每个功能元与原理解的对应关系, 进行原理解通用化, 目的是减少概念结构数量, 在满足设计约束的前提下用尽可能少的概念解实现产品变体, 降低目标产品族的结构复杂性。

(7) 技术模块化。按照通用化结果重新构建矩阵 M_{FT} , 然后可以进行模块化分析。从不同的角度, 模块有不同的定义, 相应的模块化过程也有不同的方法。建立产品平台是为了使产品组成元素的通用化, 因此对于平台建立过程中的模块化, 应以有利于通用性提高和利于产品设计开发的角度进行。以功能(组)和原理解(组)的一一对应关系为指标建立的模块符合公理设计中提出的独立性原则, 更易通过增加、删除和替换模块来实现产品的快速开发。因此建立产品概念平台过程中的模块化更应侧重产品功能与结构的对应关系, 以便后续衍生产品的开发。分析功能与结构的对应关系可以通过分析式(8)中矩阵 M_{FT} 来实现。按照 KUSIAK^[25] 提出的方法把矩阵进行处理, 有如下几种情况。

1) 与概念结构存在一一对应关系的功能元为一个模块。式(9)中 T_4 与 F_5^c 对应关系为一一对应, 即功能元 F_5^c 就是一个独立模块。

$$\mathbf{M}_{FF} = \begin{matrix} F_1^c \\ F_2^c \\ F_3^c \\ F_4^c \\ F_5^c \\ F_1^u \\ F_2^u \end{matrix} \begin{pmatrix} & T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 & T_6 & T_7 \\ & 1 & & & & & & \\ & & 1 & & & & & \\ & & & 1 & & & & \\ & & & & 1 & & & \\ & & & & & 1 & & \\ & 1 & & & & & & \\ & & & & & & & 1 \end{pmatrix} = \begin{matrix} F_5^c \\ F_1^c \\ F_3^c \\ F_2^c \\ F_4^c \\ F_1^u \\ F_2^u \end{matrix} \begin{pmatrix} & T_4 & T_2 & T_5 & T_3 & T_7 & T_6 & T_1 \\ & 1 & & & & & & \\ & & 1 & & & & & \\ & & & 1 & & & & \\ & & & & 1 & & & \\ & & & & & 1 & & \\ & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

2) 通过把矩阵整理,能够集中在对角线附近的通用功能元组合与个性功能元组合分别组成模块。即模块中原理组合只与对应的功能组合相关,反之亦然。如式(9)中 T_2 和 T_5 与 F_1^c 和 F_3^c 对应关系在矩阵中整理后集中在对角线上,因此 F_1^c 和 F_3^c 可以组成模块。

3) 若无法组成独立模块而组成有耦合的模块时,则把耦合部分作为设计约束考虑。

(8) 技术模块接口分析。模块化分析之后,根据建立的模块和由步骤(4)得到的功能元接口矩阵,对组成模块的功能元按照模块化后结果分组排列,就得到模块接口矩阵。模块接口矩阵能够体现产品平台内部接口(通用功能元组成的平台模块间接口),也能体现产品平台的外部接口(平台模块与个性模块间流的输入输出关系和类型)。产品平台模块接口尤其是外部接口是基于平台的产品开发的主要依据和资源。

(9) 概念平台的建立。综合平台模块和个性模块以及它们之间的接口矩阵,还有模块化过程中形成的设计约束就得到目标产品族的通用产品概念架构,该通用产品架构就是目标产品族的概念平台。

2.2 基于敏感性分析的产品实体平台设计过程模型

产品概念平台设计确定了产品族通用的概念结构,但同一概念结构可以产生尺寸或精度不同的大量零件。产品实体平台设计的任务是确定目标产品族能够共用的实体零部件(或实体模块)以及这些零部件(或实体模块)间的关系。为了建立实体平台,首先分析引起产品不能采用相同零部件或模块的因素,然后分析受这些变化因素影响的零部件或模块,其余零部件或模块就是不变的,即为通用的零部件或模块。具体过程如图2阴影区域之外部分所示。产品实体平台设计具体步骤如下。

(1) 确定用户需求中变化或不确定的因素。用户需求的变化主要体现在两个方面。

1) 横向变化。需求的横向变化是指产品从初始市场向多个市场转变过程中因市场不同而产生的需求差异性,如新市场对产品的工作能力(输出量、精

度等)提出的新要求。由于不同的人群对同一产品的功能要求及要求的侧重点不同,从而造成了需求侧重点随着地域、人群的不同而变化,形成细分市场,导致了产品的多样性。

2) 纵向变化。随着时间的推移,同一客户群对同一产品的要求有不断提高的趋势,这是产品需要不断改进、推陈出新的内在驱动力。

无论需求纵向变化还是横向变化,产品平台设计前都要确定需求变化的范围,以便平台能够支持预定范围内的产品变化。对于已建立的概念平台,主要是确定其功能能力;对于单个产品模型,主要是对该产品模型的功能能力和市场潜力进行评估,确定一定时期内产品模型不变。

(2) 确定目标产品族的关键特征或设计参数。目标产品族的关键特征参数是描述产品功能或功能能力所必需的参数,是判断产品族中两个产品功能能力异同的依据。目标产品族的关键设计参数是描述产品主要结构所需的尺寸参数。产品实体结构是由产品参数来表达的:表达产品总体特性的参数称为总体参数,表达局部结构的参数称为局部参数。产品关键特征或设计参数以总体参数为关键参数,因为正是总体参数决定了满足客户需求的主要的产品特性。目标产品族的关键特征或设计参数都是设计产品时所必须考虑的,正是这些参数及其所赋值的变化才形成了产品的多样性。

(3) 特征或设计参数对需求变化的敏感性分析。产品特征或设计参数是描述产品所必需的参数,每个参数都对应于或部分对应于某项用户需求,而每个客户需求又都有一组相关的特性来满足。

按照产品特征和设计参数值的值域特征,参数可以分为三类:二元参数、离散参数和连续参数^[26]。

目标产品族某参数的值域是根据产品当前已有产品和预测产品的参数值确定。首先确定已有产品和预测产品的参数值,然后确定参数变化形式,最后确定参数的值域:①若参数为二元参数,则值域为“0与1”,“有与无”等;②若参数为离散的,则进行聚类,确定可以接受的聚类的中心和邻域半径,分析用聚类中心替代各邻域内参数值的可行性,如果可行则参数值域为聚类的中心值,反之若不能完全替代,则可以看作参数值是在各邻域内连续变化;③若参数值分布比较密集,且不易聚类时,可看作参数是连续变化的。

当确定产品参数的值域后,分析在其取值范围内,参数对需求变化的敏感程度,因为很多复杂工程系统都是耦合系统,一个设计参数可以影响多个需求。当特定需求在未来的变化趋势不确定时,很难改变系统以满足需求目标。设目标产品族的参数集 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_m\}$, 客户需求集 $R = \{R_1, R_2,$

$\dots, R_i\}$, 则对产品参数进行敏感性分析可以应用以下敏感性矩阵

$$A_{CR} = \begin{matrix} & m_1 & m_2 & m_3 & \dots & m_m \\ \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_l \end{matrix} & \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & \dots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & \dots & y_{2m} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & \dots & y_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{l1} & y_{l2} & y_{l3} & \dots & y_{lm} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (10)$$

式中, y_{ij} 称为参数 m_j 对需求 R_i 的敏感性系数, $y_{ij} = \partial m_j / \partial R_i$ 。

当 m_j 与 R_i 关系式不易确定时

$$y_{ij} = \kappa \quad (11)$$

式中, κ 按照 m_j 对 R_i 变化的敏感性(随变的剧烈程度)取值, 如表 1 所示。

表 1 κ 的取值

变化剧烈	中等变化	变化很小	不变化
5	3	1	0

求矩阵 A_{CR} 的行和与列和

$$\zeta_i = \sum_{j=1}^m y_{ij} \quad \chi_j = \sum_{i=1}^l y_{ij} \quad (12)$$

对矩阵 A_{CR} 分析以下内容。

- 1) 确定所有对需求变化不敏感($\chi_j=0$)的参数, 这些参数对后续产品族的设计不产生影响。
- 2) 把参数按照 χ_j 从大到小排序, 排在前面的几个参数是对需求变化敏感性最强的参数。分析这些参数, 如果参数能够离散化(聚类)为系列值, 则对参数进行系列化; 如果不能离散为系列值, 则尽量缩小其值域范围。
- 3) 对所有敏感参数的取值进行分析, 确定所有能够在系列内取值的参数, 组成离散参数集合 $M'' = \{m'_1, m'_2, \dots, m'_d\}$, 则 $M'' \subseteq M$ 。
- 4) 确定无法系列化的敏感参数, 这些参数在设计时取值无法预先确定, 只能根据具体的客户需求或在其他某些参数确定之后才能够确定, 这些敏感参数组成一个集合 $M' = \{m'_1, m'_2, \dots, m'_s\}$, 则 $M' \subseteq M$ 。

(4) 产品实体结构对参数变化的敏感性分析。产品结构是由产品参数来表达的, 由参数表达的结构为概念结构, 一旦对所有参数赋值, 就得到了产品实体结构。利用步骤(3)得到的无法系列化的敏感参数的集合 $M' = \{m'_1, m'_2, \dots, m'_s\}$, 分析由概念结构转变为实体结构过程中, 参数值的变化对转变结果

的影响, 即分析敏感参数的参数值变化导致哪些实体(零部件、装配体或实体模块)的变化。如果建立了产品概念平台, 进行敏感性分析时则采用概念平台中的模块作为初始敏感性分析的对象, 分析方法类似上一步。设目标产品族概念结构(或概念平台的模块)集合 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_t\}$, 实体结构对参数变化的敏感性可以通过实体结构的敏感性矩阵来分析

$$A_{TM'} = \begin{matrix} & T_1 & T_2 & T_3 & \dots & T_t \\ \begin{matrix} m'_1 \\ m'_2 \\ m'_3 \\ \vdots \\ m'_s \end{matrix} & \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & \dots & z_{1t} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & \dots & z_{2t} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & \dots & z_{3t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{s1} & z_{s2} & z_{s3} & \dots & z_{st} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (13)$$

式中, z_{ij} 称为实体 T_i 对参数 m'_i 变化的敏感性系数。

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & m'_i \text{ 取值的变化引起实体 } T_j \text{ 变化} \\ 0 & m'_i \text{ 取值的变化不引起实体 } T_j \text{ 变化} \end{cases} \quad (14)$$

求矩阵 $A_{TM'}$ 的行和与列和

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^t z_{ij} \quad \beta_j = \sum_{i=1}^s z_{ij} \quad (15)$$

式中 α_i ——参数 m'_i 对产品实体影响的程度

β_j ——实体 T_j 受参数影响的程度

(5) 产品实体结构通用化设计。产品实体结构通用化就是使产品实体结构不随需求变化而变化, 在目标产品族中是通用的。产品实体结构本质上就是产品概念结构实例化的结果, 对实体结构进行通用化实际上是以产品结构通用为目标的产品结构和参数的优化。应用后文中提出的通用化设计方法进行产品结构通用化设计之后, 得到最终的通用实体单元(零部件、装配体或实体模块)和变化的实体单元。通用实体单元作为平台元素构建实体平台, 变化的实体单元作为个性化元素用于衍生产品变体。

(6) 实体空间关联分析, 确定变体设计约束。通用实体结构与变化的实体结构间的连接关系要求建立标准的连接接口。对于实体零件间的连接主要是空间连接关系, 建立空间关联矩阵表达平台元素间及其与个性元素间的空间关联关系。

设最终得到的通用实体元素集合 $T^c = \{T_1^c, T_2^c, \dots, T_m^c\}$, 变化的个性元素集合 $T^u = \{T_1^u, T_2^u, \dots, T_n^u\}$, 则目标产品族空间关联矩阵

$$A_{TT} = \begin{matrix} T_1^c & T_2^c & T_3^c & \cdots & T_m^c & T_1^u & T_2^u & T_3^u & \cdots & T_n^u \\ \left(\begin{matrix} 0 \\ c_{21} \\ c_{31} & c_{32} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & c_{m2} & \cdots \\ u_{11} & u_{12} & u_{13} & & u_{1m} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & & u_{2m} & o_{21} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & & u_{3m} & o_{21} & o_{32} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & u_{n3} & \cdots & u_{nm} & o_{21} & o_{21} & o_{n3} & \cdots \end{matrix} \right) \end{matrix} \quad (16)$$

式中 c_{ij} ——平台内部接口连接结构代号
 u_{ij} ——平台外部接口连接结构代号
 o_{ij} ——个性元素间连接结构代号

不同实体间连接形式是不同的，接口的具体形式和由接口形成的设计约束需要根据目标产品族的具体接口结构来确定。这些接口尤其是与平台相关的接口应该进行标准化。

组成接口的实体或表面称为接口元素，一定的接口方式一般具有确定的接口元素，相互连接的实体通过各自的接口元素组成接口。因此一个接口元素本质上是对另一个接口元素的规定，这种规定就形成了设计约束。对于常用机械连接形式，接口元素的特征往往是容易定义的。

另外，标准化的零件相互连接也会形成对其余零件设计的约束，如形成的空间约束对零部件尺寸的限制。所有这些设计约束都是对待设计对象接口部分或整体设计结构形式、某方向尺寸的规定。根据平台各实体及接口元素可以产生平台及个性实体部分的设计约束，形成产品族设计的约束。

(7) 建立实体平台。根据步骤(4)、(5)分析的结果，可以得到对需求变化不敏感的实体零部件或模块，这些实体零部件或模块不随需求变化而变化，是在一定范围内通用的实体。这些通用实体以及接口组成的通用结构就组成产品实体平台。经过以上平台分析过程得到一个或一系列实体平台，这些实体平台共享一个概念平台，具有相同或相似的概念结构，但这些实体平台在尺寸、精度和材料等方面是不同的。

2.3 层次性产品平台架构设计过程模型

产品平台的核心思想就是把产品间的相似性转化为合理的通用性，通过通用最大化实现产品经济性的快速开发。概念平台的建立是为了实现相似产

品间由通用功能和原理解组成的概念结构的最大化，支持产品的快速设计；产品实体平台是为了实现相似产品间通用零部件或实体模块最大化，以支持产品的批量生产。产品概念平台设计过程主要是分析功能和原理结构的相似性，是基于相似性分析和聚类的方法，而产品实体平台分析过程主要是进行物理结构稳健性分析，是一种基于结构敏感性分析的方法。

对企业而言，概念平台和实体平台的概念并不一定存在，但是企业产品开发过程中经常采用的“借用”设计方式本身就是对平台原则的贯彻，只是这种借用多着眼于当前产品，而没有主动扩大这种“借用”的范围，以使这种“借用”更加合理和优化。

对于一般企业，产品技术的确定就意味着可以建立概念平台，然后根据需求对概念结构实例化过程中参数值变化以及参数值对实体结构的影响建立实体平台。因此企业中概念平台和实体平台可以共存。它们设计的过程也可以合并成为一个完整的企业产品平台设计过程，如图 2 所示。

图 2 描述的产品平台设计过程综合了相似性和结构敏感性分析的过程。经过以上分析过程，产品平台设计的结果是一个层次性的产品平台架构，如图 3 所示。

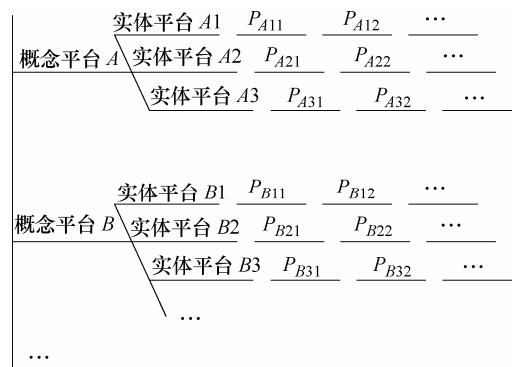


图 3 层次型产品平台架构

图 3 中 P_{A1i} 是指由实体平台 A1 衍生的产品变体，其余产品变体分别属于各自的实体平台。图 3 中实体平台 A_i 是基于同一个概念平台 A 设计的，这些平台包含的概念结构是相同的，只是实体结构有差异。

3 产品结构通用化设计规则和方法

产品结构通用化就是产品结构不随需求变化而变化，是在目标产品族中通用的。产品平台设计过

程中要进行产品结构通用化设计,按照前述设计过程,产品通用化设计分两个阶段:原理解通用化和实体通用化。

3.1 原理解通用化设计规则

原理解通用化按照以下规则进行。

规则一:对其余功能元影响较大的功能元的概念结构(μ 较大)应优先通用化。

在目标产品族功能结构中,对其余功能元影响较大(μ 较大)的功能元有两种情况:①功能元具有较大通用性($\lambda_j^o \geq \lambda_0^o$),其概念结构不唯一,会导致系统的功能实现的程度和形式有差别,对其余部分的设计造成影响,因此应按照通用化规则二进行通用化;②功能元通用性较差($\lambda_j^o < \lambda_0^o$),为了减小其对其余部分影响,也应将其概念结构固定下来,减少对其余部分影响。

规则二:原理解不唯一的功能元应按照概念解的功能能力相近的规则进行合并。

在目标产品族中,如果某功能元有较大通用性($\lambda_j^o \geq \lambda_0^o$)且概念解不唯一($\tau > 1$),会最终造成产品概念和实体结构的多样性。除非这种多样性成本对产品成本和交货期影响不大,如采购件,否则应进行通用化,按照功能能力相近的规则减少概念解数量。

规则三:包容规则。实现复杂功能(多个功能元组合或多输入/多输出的功能元)的原理解在一定条件下可替代实现的功能元为其子集的原理解;对于实现相同功能的原理解,在成本允许的前提下可以优先采用功能能力高的。

如图 4a 和图 4b 所示两个功能元输入和输出的能量和物料相同,但图 4a 表示的功能元还有信号的输入和输出,因此图 4b 表示的功能元可看作是图 4a 所示功能元的子集,在成本允许和其他约束不变的前提下,图 4a 可以替代图 4b。图 4c、4d 所示两个功能元输入和输出信号相同,但图 4c 表示的功能元具有反馈环节,因此图 4c 所示功能元是比图 4d 所示功能元更复杂的系统,在成本允许和其他约束不变的情况下,图 4c 可以替代图 4d。如果目标产品族中大部分产品都是复杂功能元,只有少部分是简单功能元,则基于产品平台的产品族中可以使用复杂功能元替代简单功能元。

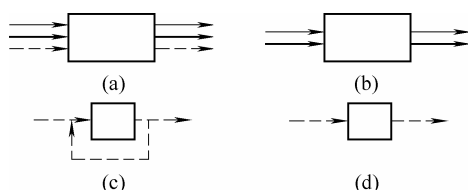


图 4 复杂功能元与简单功能元

规则四:实现通用功能元的原理解应尽可能独立于(不参与实现)个性功能元。实现通用功能的原理解单独或参与实现个性功能,会使产品族复杂性提高,因此个性功能元应尽量由专门原理解(组合)来实现。

3.2 产品实体通用化设计方法

3.2.1 参数取值方法

(1) 定值参数取值方法:①参数取平均值,这种方法是最常使用的方法,用于参数离散程度比较小的情况;②参数取小值,用于取小为优的情况,如功耗;③参数取大值,用于取大偏好的情况,如效率;④参数取优值,用于在优值一定邻域内不敏感和优值比较容易确定的情况。

(2) 连续参数值域聚集方法:①值域取交集,用于连续变化参数在目标产品族中各产品间存在交集的情况;②值域取并集,用于离散参数或两两交集为空的连续变化参数的值域确定;③子集先取交集,结果再取并集,用于存在两两交集不为空集,但全体交集为空集的情况。

图 5a 中参数 m 分别在三个已有产品和平台中的取值, $m_1 = \{[a_1, b_1]\}$, $m_2 = \{[a_2, b_2]\}$, $m_3 = \{[a_3, b_3]\}$, 因为 $\cap m_i \neq \emptyset$, 则产品平台参数 $m = \{\cap m_i, i=1,2,3\} = \{[a_2, b_3]\}$ 。

图 5b 中参数 m' 分别在三个已有产品和平台中的取值, $m'_1 = \{[a'_1, b'_1]\}$, $m'_2 = \{[a'_2, b'_2]\}$, $m'_3 = \{[a'_3, b'_3]\}$, 因为 $m'_i \cap m'_j = \emptyset$, 所以产品平台参数 $m' = \{m'_1 \cup m'_2 \cup m'_3\} = \{[a'_1, b'_1], [a'_2, b'_2], [a'_3, b'_3]\}$ 。

图 5c 中参数 m'' 分别在三个已有产品和平台中的取值, $m''_1 = \{[a''_1, b''_1]\}$, $m''_2 = \{[a''_2, b''_2]\}$, $m''_3 = \{[a''_3, b''_3]\}$, 因为存在 $m''_i \cap m''_j \neq \emptyset$, 则产品平台参数 $m'' = \{\cup (m''_i \cap m''_j), i \neq j\} = \{[a''_2, b''_1], [a''_3, b''_2]\}$ 。

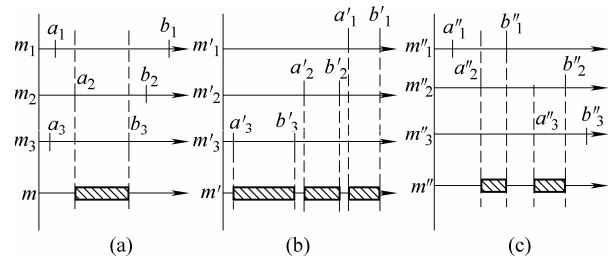


图 5 连续参数值域聚集方法

定值参数方法用于某平台参数能够固定为某个值时,参数值域聚集方法用于参数值不能取为确定值时。

3.2.2 局部化方法

对敏感参数(变量)变化敏感的实体结构进一步分解,分析分解后各子实体对变化的敏感性,对敏

感的子实体继续使用结构通用化方法。

设引起某实体 T_i 变化的参数集合为 $M_i' = \{m_1^i, m_2^i, \dots, m_n^i\}$ ，实体 T_i 可以分为子实体集合 $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_m^i\}$ ，则子实体敏感性矩阵

$$A_{T_i M_i'} = \begin{matrix} & T_1^i & T_2^i & T_3^i & \dots & T_m^i \\ \begin{matrix} m_1^i \\ m_2^i \\ m_3^i \\ \vdots \\ m_n^i \end{matrix} & \begin{pmatrix} z_{11}^i & z_{12}^i & z_{13}^i & \dots & z_{1m}^i \\ z_{21}^i & z_{22}^i & z_{23}^i & \dots & z_{2m}^i \\ z_{31}^i & z_{32}^i & z_{33}^i & \dots & z_{3m}^i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1}^i & z_{n2}^i & z_{n3}^i & \dots & z_{nm}^i \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (17)$$

式中， z_{ij}^i 的取值与前述 z_{ij} 的取值原则相同，即

$$z_{ij}^i = \begin{cases} 1 & m_i^i \text{ 取值的变化引起实体 } T_j^i \text{ 变化} \\ 0 & m_i^i \text{ 取值的变化不引起实体 } T_j^i \text{ 变化} \end{cases} \quad (18)$$

变化局部化后可以采用空间分离的方法，把变化的部分分离出去，作为变型部分来处理，而通用部分就成为平台元素，并与分离出去的部分保留一定接口。如果实体不易分离，变化局部化后，后续工艺处理也比较容易。按照 EUN^[27] 的柔性平台设计理论，变化局部化后的实体可以看作是易于变型的柔性元件。

图 6 中的二级齿轮减速器，当传动比发生变化时，往往只改变其中一对齿轮的齿数，而轴及其他零部件都不变，这就是局部化方法。

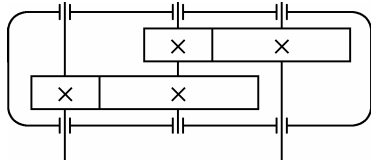


图 6 齿轮减速器示意图

3.2.3 柔性化通用化方法

(1) 采用柔性件。对于参数连续变化或可分为几级变化的，可以采用柔性件实现，如调谐装置、阀门调节等，对于在工作状态下实现参数变化的，一般应该设计为柔性件，以便于使用过程中随时人工或自动进行调节。同样在多个产品中一定范围内变化的参数也可以通过柔性件来实现。如变速装置中常用的无级变速装置、调频电动机，底座螺旋调节装置等。

(2) 采用柔性装配关系。柔性装配关系是指用相同的实体通过改变相互连接位置而装配成空间实体尺寸不同的部件。例如机械设计中常用的改变杆机构杆长的方法、工作台 T 形槽设计、可调节长短的桌腿、拉杆天线、自行车车座调节等都是柔性装配关系的范例。

3.2.4 变化转移方法

综合分析敏感实体与相关联的其他实体间的关系，通过把变化转移到其他变化成本更低的实体上降低通用化的成本，如图 7 所示。

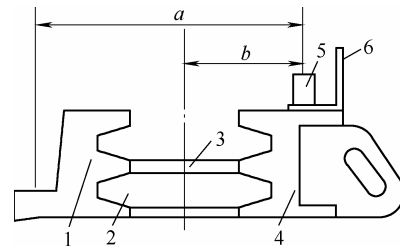


图 7 刮板输送机中部槽

1. 铲板槽帮 2. 底板 3. 中板 4. 挡板槽帮 5. 轨座 6. 角板

刮板输送机中部槽设计过程中由于配套采煤机的跨距 a 不同导致输送机槽宽随之改变，从而导致槽帮、中板和底板都要发生变化。为了减少变化，把变化转移到支座相对槽中线之间距离 b 的变化(装配关系变化)，从而实现变化的转移。

3.2.5 系列化方法

系列化方法是当参数变化范围较大，无法通过调节件或柔性结构实现时，把参数离散化为几个固定值或区间。对应不同的参数值有不同的实体来对应。系列化分为模块系列化和平台系列化两类。

(1) 模块系列化。若存在某个或某些系列化的参数，只影响某个或少数几个实体单元，则这个(些)实体单元要按照参数的系列值分别设计，这些系列化的实体单元应归为一个模块，同属于一个实体平台。例如同一直径的蝶阀的阀轴，由于管道压力不同，阀轴直径有一个系列值，这就是模块单元内系列化。

(2) 平台系列化。若存在某个或某些系列化参数影响产品中大部分实体结构，则这些实体结构也应按照系列化参数进行设计。当大部分实体结构系列化后，一般只有具有同系列参数的实体才能够装配，为了提高平台的通用性，应该按照系列化参数建立系列平台，在同系列平台内各个实体是通用的。例如阀门的管径不同，造成阀门的主要实体如阀体、阀板、阀座、阀轴都要改变，因此，对阀门实体建立平台应首先按照阀门管径建立系列平台。

4 铠装刮板输送机产品平台架构设计

铠装刮板输送机是煤矿采煤工作面的关键设备之一，其原理如图 8 所示，主要用于采煤工作面煤炭的输送。由于刮板输送机的设计受到采煤方式、

煤层状况、工作面布置和配套设备的约束，属于设计比较复杂的产品，一般为单件配套生产。

其中综采工作面刮板输送机功能结构如图9所示。以Z企业生产的刮板输送机为例进行分析。

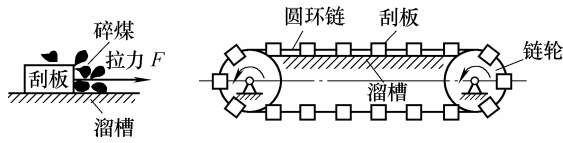


图8 刮板输送机原理解

按照采煤和卸料方式刮板输送机分为五类(表2)。

表2 各类刮板输送机对企业重要性权重

产品种类	综采工作面侧卸式刮板机	综采工作面端卸刮板输送机	后部刮板输送机	刨煤机用刮板输送机	普采工作面刮板输送机
代号	ZC	ZD	ZH	BC	PC
权重	1.0	0.7	0.5	0.3	0.2

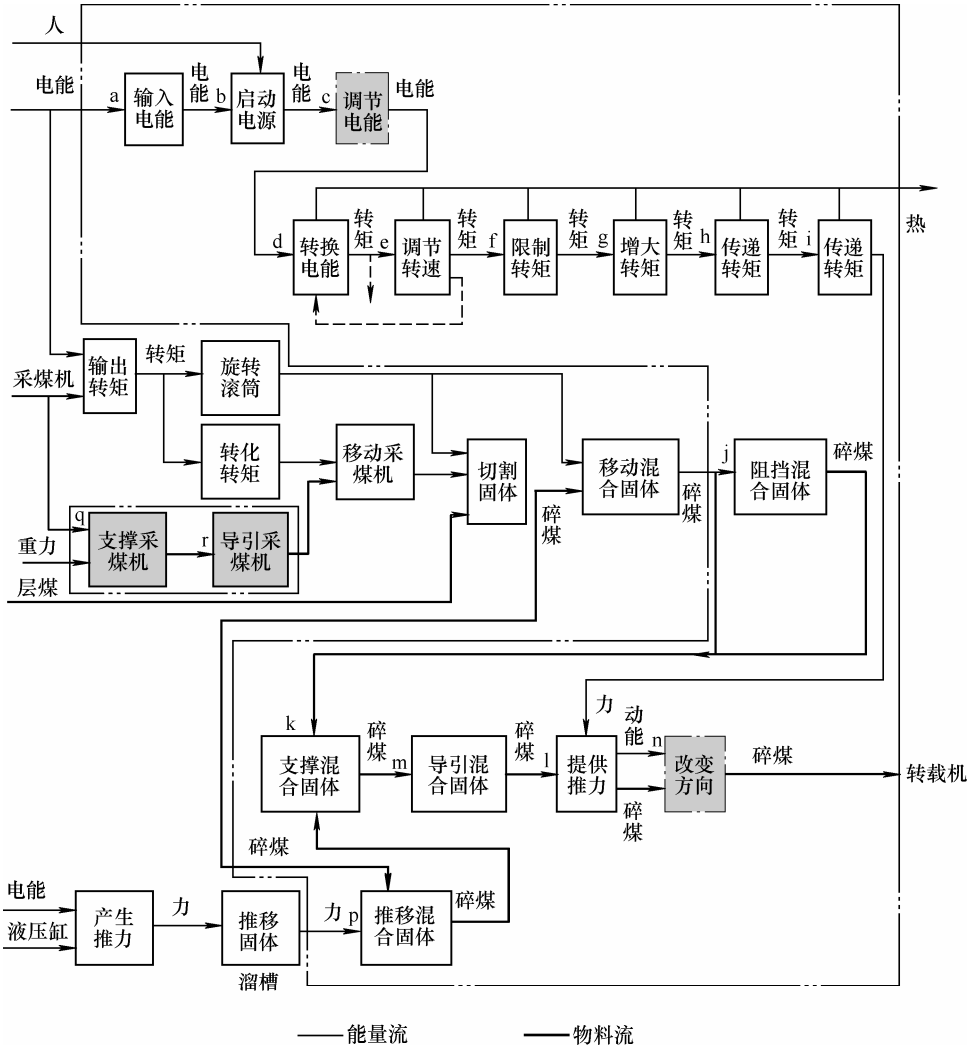


图9 综采工作面刮板输送机功能结构

4.1 刮板输送机概念平台设计

考虑国内煤炭企业综采刮板输送机应用情况以及企业产品销售历史和预期情况，设置产品重要性见表2。五类刮板输送机非通用功能元的加权共享因子 λ^o 如表3所示。

通过产品重要性分析发现综采工作面刮板输送

机对企业利润贡献最大，虽然部分功能元在其他类刮板输送机不通用，但通过计算平台共享因子 λ^o (表3)，设定阈值 $\lambda_0^o=0.6$ ，这些功能元可以作为平台设计的主要对象。刮板输送机功能元对应的概念结构及其编号如表4所示。建立功能概念结构矩阵并整理成对角阵形式如图10所示。

表 3 刮板输送机非完全通用功能元

类型代号	权重 ω	支撑采煤机	导引采煤机	支撑刨煤机	导引刨煤机	工况监控	改变煤流方向(犁煤板)	转载输送(转载机机尾)
ZC	1.0	1.0	1			1*	1	1 ^Δ
ZD	0.8	1	1			1 ^Δ		
ZH	0.5					1*	1	1
BC	0.3			1	1	1 ^Δ	1 ^Δ	1 ^Δ
PC	0.2							
加权列和 v_j		1.8	1.8	0.3	0.3	2.6	1.8	1.8
共享因子 $\lambda_j^{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^5 \omega_i x_{ij}}{\sum_{i=1}^5 \omega_i}$		0.64	0.64	0.11	0.11	0.93	0.64	0.64

注：元素“1”表示对应类型刮板输送机存在对应功能元；“1*”表示对应类型刮板输送机部分基型存在对应功能元；“1^Δ”表示对应类型刮板输送机有存在对应功能元的趋势。

表 4 刮板输送机功能元对应的概念结构及其代号

概念结构	单速电动机	双速电动机	变频电动机	液力耦合器	阀控液力耦合器	摩擦限矩器	三级定轴齿轮减速器	行星减速器	齿轮联轴器
代号	D1	D2	D3	E1	E2	E3	G1	G2	H1
概念结构	内花键连接	单链链轮组件	边双链链轮组件	中双链链轮组件	单链刮板链	中双链刮板链	边双链刮板链	中部槽	开天窗槽
代号	H2	I1	I2	I3	L1	L2	L3	K1	K2
概念结构	调节槽	过渡槽	变线抬高槽	铲板	挡板	线缆槽	推移耳	犁煤板	伸缩机尾
代号	K3	K4	K5	P1	J1	Y1	P2	N1	U1
概念结构	闸盘紧链器	液压马达紧链器	转载机机尾	销轨组件	电(液)控制系统	哑铃组件	大环	槽间螺栓	
代号	U2	U3	W1	R1	V1	X1	X2	X3	

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	m	p	x	q	r	j	y	l	n	u	v	w	s	t
D1				1																				
D2			1	1	1																			
D3			1	1	1		1																	
E1					1	1																		
E2					1	1															1			
E3							1																	
G1								1																
G2								1																
H1									1															
H2									1															
I1										1														
I2										1														
I3											1													
K1												1	1	1	1	1	1	1 ⁰					1	1
K2												1	1	1	1	1	1	1 ⁰					1	1
K3												1	1	1	1	1	1	1 ⁰					1	1
K4												1	1	1	1	1	1	1 ⁰						
K5												1	1	1	1	1	1	1 ⁰					1	1
P1												1	1	1	1	1	1	1 ⁰					1	1
P2												1	1	1	1	1	1	1 ⁰						
X1												1	1	1	1	1	1	1 ⁰						
X2												1	1	1	1	1	1	1 ⁰						
X3												1	1	1	1	1	1	1 ⁰						
R1												1	1	1	1	1	1	1 ⁰						
J1																	1	1	1	1	1	1	1	1
Y1																		1	1	1	1	1	1	1
L1																			1	1	1	1	1	1
L2																				1	1	1	1	1
L3																					1	1	1	1
N1																						1	1	1
U1																							1	1
U2																								1
U3																								1
W1																								1
V1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

图 10 刮板输送机功能概念结构矩阵(整理后)

图 10 中第一行为功能元代号，其中 x 为(槽间)连接功能，u 为紧链功能，y 为保护线缆功能，s 为支撑刨煤机，t 为导引刨煤机，v 为工总监测，w 为转载输送(转载机机尾)，其余代号对应功能元如图 9 所示。元素“1”表示对应功能元与概念结构直接相关，当采用变化转移设计(挡板槽帮与刮板输送机分离)后，矩阵中“1⁰”变为“0”。

通用性分析的部分结果是中双链代替单双链和边双链结构，槽间连接用哑铃连接。最终的概念平台如图 11 所示。图 11 中模块是根据图 10 中矩阵对角线上的阴影区域元素对刮板输送机进行模块划分的结果。

4.2 刮板输送机实体平台设计

分析刮板输送机需求变化，汇总如表 5 所示。刮板输送机需求的变化都会导致产品某些参数或属性的变化。刮板输送机主机主要参数如表 6 所示。主机参数对需求变化敏感性分析结果如图 12 所示。

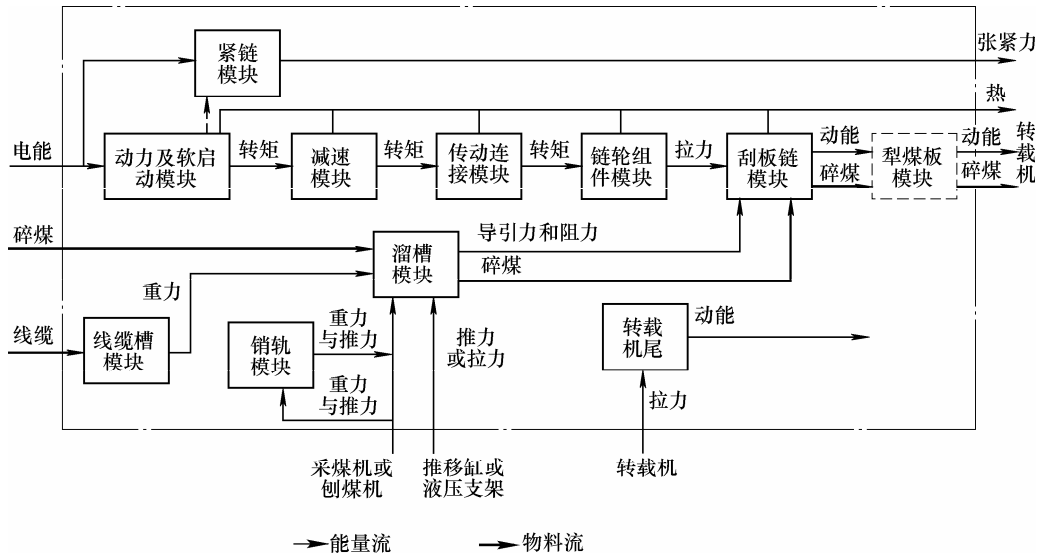


图 11 刮板输送机概念平台

表 5 刮板输送机的需求变化汇总

横向变化												
需求类型	采煤机械				液压支架					转载机		
	采煤方式	小时装煤量	左右跨距	两机不干涉	牵引方式	行走驱动力	推溜拉架力	推移端头	机架不干涉	端头支护	布置形式	机尾中心高
代号	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
纵向变化												
需求类型	地质状况				其他特殊零部件	工作能力					其他可靠性	
	工作面倾角	煤层硬度	矸石质量分数	底板硬度		铺设长度	总过煤量	小时运量	自动化程度	工总监测		
代号	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23	

表 6 刮板输送机主机关键特征参数及其代号

特征参数名称	安装位置	中部槽内宽	中部槽长度	链条规格	链条布置形式	销轨型式	销轨节距	槽间连接形式	卸载方式	驱动数量
代号	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9	m10

应用上述技术模块作为分析对象，分析这些技术模块在实例化过程中对参数变化的结构敏感性，分析如式(18)

$$A_{TM} = \begin{matrix} & T1 & T2 & T3 & T4 & T5 & T6 & T7 & T8 & T9 & T10 & T11 & \text{行和} \\ \begin{matrix} m1 \\ m2 \\ m3 \\ m4 \\ m5 \\ m6 \\ m7 \\ m8 \\ m9 \\ m10 \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccccccccccc} & & & & & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & & 6 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & & & & 1 & 1 & 1 & 9 \\ & & & & & 1 & 1 & 1 & & & & & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & & & & & 1 & & 7 \\ & & & 1 & 1 & 1 & & & & & & 1 & 4 \\ & & & & & & & & & 1 & & & 1 \\ & & & & & & & & 1 & & & & 1 \\ & & & & & & & & & & & & 1 \\ & & & & 1 & & & & & & & & 1 \\ & & & & & & & & & 1 & 1 & & 3 \\ 1 & 1 & & & & & & & & & & & 2 \end{array} \right] & \\ \text{列和} & 3 & 3 & 2 & 4 & 3 & 6 & 2 & 5 & 3 & 2 & 4 & \end{matrix} \quad (18)$$

由式(18)中的行和可知对产品结构影响最大的参数代号：m1(安装位置)、m2(中部槽内宽)、m4(链条规格)和 m5(链条布置形式)。受主机参数影响最大的参数代号：T4(链轮组件模块)、T6(溜槽模块)、T8(销轨模块)和 T11(紧链模块)。

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23	
m1																								
m2																							1	
m3																								
m4																								
m5																								
m6	1	1				1	1								1	1								
m7	1	1				1	1							1	1									
m8								1																
m9	1	1										1											1	
m10		1																				1	1	

图 12 主机参数对需求变化的敏感性分析

采用局部化策略把长度方向上的变化集中在过渡槽上，采用变化转移策略把中部槽宽度方向的变化集中到挡板槽帮上，把高度方向的变化集中到轨座上，采用系列化策略对刮板输送机按照槽宽、链

条规格和链条布置形式进行系列划分, 系列内零部件通用化程度相对传统系列划分方式更高。最后得到各系列通用零部件或子装配体, 分析零部件和子装配体之间的连接, 提取配置约束, 构建基于平台的产品配置特征库, 为产品族配置和创新提供基础信息平台。

5 结论

在日趋成熟的市场条件下, 企业面临着降低成本和创新产品的双重压力, 设计良好的产品平台作为产品开发的基础, 一方面可以通过提高部件的通用性降低成本, 另一方面可以作为企业进行产品创新的核心资源。为了更大程度上支持产品的设计创新和设计重用, 定义了产品概念平台和产品实体平台, 详细讨论了两种产品平台设计的过程和步骤以及涉及的关键问题, 并提出了产品结构通用化的原则和方法。

产品概念平台提供了新产品创新所必需的已有功能和原理解资源, 用于形成相同或相似功能的产品族。产品实体平台提供了新产品开发中预置的通用参数值, 是面向生产的产品平台, 用于生成系列化产品。两种平台共同搭建了企业产品平台层次性架构, 其设计过程模型可以指导企业进行企业产品平台的设计, 同时为企业建立通用高效的产品结构信息库提供一种产品数据分析和组织的方式。

参 考 文 献

- [1] MUFFATTO Moreno, ROVEDA Marco. Developing product platforms: Analysis of the development process[J]. *Technovation*, 2000, 20: 617-630.
- [2] JOSE Alberto, TOLLENAERE Michel. Modular and platform methods for product family design: Literature analysis[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2005, 16: 371-390.
- [3] JIAO Jianxin, SIMPSON T W, SIDDIQUE Zahed. Product family design and platform-based product development: A state-of-the-art review[J]. *J. Intell. Manuf.*, 2007, 18: 5-29.
- [4] MEYER M H, LEHNERD A P. The power of product platforms: Building value and cost leadership[M]. New York: Free Press, 1997.
- [5] DAI Zhihuang, SCOTT M J. Product platform design with consideration of uncertainty[C]// *Proceedings of Society of Automotive Engineers World Congress*. Warrendale, Pa., USA: SAE, 2005: 225-235.
- [6] ROBERTSON David, ULRICH Karl. Planning product platforms[J]. *Sloan Management Review*, 1998, 39(4): 19-31.
- [7] HÖLTTÄ-OTTO K, OTTO K N. Incorporating design effort complexity measures in product architectural design and assessment[J]. *Design Studies*, 2005, 26(5): 445-564.
- [8] OTTO K N, KRISTIN L W. 产品设计[M]. 齐春萍, 宫晓东, 张帆, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2005. OTTO K N, KRISTIN L W. *Product design: Techniques in reverse engineering and new product development*[M]. Translated by QI Chunping, GONG Xiaodong, ZHANG Fan, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [9] GONZALEZ-ZUGASTI J P, OTTO K N, BAKER J D. A method for architecting product platforms[J]. *Research in Engineering Design*, 2000(12): 61-72.
- [10] ZAHED Siddique. Common platform development: Design for variety [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2000.
- [11] HUANG George, SHENG Bin, GIDEON Halevi. Product platform identification and development for mass customization[J]. *CIRP Annals, Manufacturing Technology*, 2003, 52(1): 117-120.
- [12] JIAO Jianxin, TSENG MITCHELL M. Understanding product family for mass customization by developing commonality indexes[J]. *J. Eng. Design*, 2000, 11(3): 225-243.
- [13] 秦红斌, 肖人彬, 陈义保, 等. 面向公共产品平台通用化的聚类分析方法研究[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(4): 518-522, 529. QIN Hongbin, XIAO Renbin, CHEN Yibao, et al. Clustering analysis for planning product families supported by common platform[J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(4): 518-522, 529.
- [14] 江屏, 张换高, 陈子顺, 等. 基于公理设计的产品平台设计方法[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(10): 216-221. JIANG Ping, ZHANG Huangao, CHEN Zishun, et al. Product platform design method based on axiomatic design[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(10): 216-221.
- [15] 李国平, 赵海贤, 张换高, 等. 刮板输送机产品平台建立及配置方法研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(2): 241-247. LI Guoping, ZHAO Haixian, ZHANG Huangao, et al.

- Product configuration of armored face conveyor based on product platform[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14(2): 241-247.
- [16] 刘芳, 江屏, 张瑞红, 等. 基于自底向上法的功能相似产品平台设计[J]. *计算机集成制造系统*, 2005, 11(7): 947-952.
LIU Fang, JIANG Ping, ZHANG Ruihong, et al. Platform design of function similar products based on bottom-up method[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2005, 11(7): 947-952.
- [17] 马伟琴, 檀润华, 张瑞红. 基于自底向上过程的中药机械平台设计[J]. *中国机械工程*, 2004, 15(16): 1411-1414.
MA Weiqin, TAN Runhua, ZHANG Ruihong. Platform design of a Chinese traditional medicine machine based on bottom-up process[J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, 15(16): 1411-1414.
- [18] SIMPSON T W. Product platform design and optimization: Status and promise[C]// *American Society of Mechanical Engineers. ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Chicago, USA. 2003: 131-142.
- [19] SIMPSON T W, JONATHAN R A Maier, FARROKH Mistree. Product platform design: Method and application[J]. *Res. Eng. Design*, 2001(13): 2-22.
- [20] MARK V Martin, KOSUKE Ishii. Design for variety: Developing standardized and modularized product platform architectures[J]. *Research in Engineering Design*, 2002(13): 213-235.
- [21] SHIH-WEN Hsiao, ELIM Liu. A structural component-based approach for designing product family[J]. *Computers in Industry*, 2005(56): 13-28.
- [22] PARK Jalei, SHIN Dongmin, INSUN Park, et al. A product platform concept development method[J]. *Journal of Engineering Design*, 2008, 19(6): 515-532.
- [23] DAI Zhihuang, MICHAEL J Scott. Product platform design through sensitivity analysis and cluster analysis[J]. *J. Intell. Manuf.*, 2007(18): 97-113.
- [24] 赵文燕, 张换高, 何桢, 等. 基于敏感性分析的刮板输送机产品平台设计推理[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(22): 2694-2700.
ZHAO Wenyan, ZHANG Huangao, HE Zhen, et al. Reasoning process of product platform design for armored face conveyor based on sensitivity analysis[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(22): 2694-2700.
- [25] ANDREW Kusiak. *Engineering design: Product, processes and systems*[M]. New York, USA: Academic Press, 1999.
- [26] MICHAEL Blackenfelt. *Managing complexity by product modularisation*[D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2001.
- [27] SUH Eun Suk, OLIVIER L De Weck, CHANG D. Flexible product platforms: Framework and case study[J]. *Research in Engineering Design*, 2007, 18(2): 67-89.

作者简介: 张换高, 男, 1973 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为产品平台设计理论与创新方法。

E-mail: zhgzwy@hebut.edu.cn

赵文燕, 女, 1974 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为工业工程、质量管理。

E-mail: zwyzhg@hebut.edu.cn

江屏, 男, 1978 年出生, 博士。主要研究方向为公理设计和创新设计。

E-mail: jiangping@hebut.edu.cn

檀润华(通信作者), 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为产品设计理论和创新设计方法。

E-mail: rhtan@hebut.edu.cn

李国平, 男, 1964 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为煤矿机械设计。

E-mail: lgp@zmm.cn