

# 广义模块化设计原理及方法\*

高卫国 徐燕申 陈永亮 章青  
(天津大学机械工程学院 天津 300072)

**摘要:** 针对传统模块化设计的局限性, 将参数化设计和变量化分析技术引入模块化设计, 提出广义模块化设计方法, 从而拓展模块化设计的应用领域, 使其既可用于系列分级特性比较明显的产品及其产品族的开发, 又可满足工况复杂、大载荷, 需要进行结构强度、刚度设计, 系列分级特性不明显的机械产品的开发设计。对广义模块化设计原理、广义产品平台、基于广义模块组合和基于广义产品平台的产品族规划方法进行系统阐述。最后以液压机广义模块化设计和产品族规划为例, 详细说明广义模块化设计的基本原理和方法。

**关键词:** 广义模块化设计 广义产品平台 产品族 参数化设计

**中图分类号:** TP391.7

## 0 前言

模块化设计作为可适应设计和大规模定制中的重要设计方法和核心技术, 通过功能模块的不同组合实现产品的用户化和定制化设计, 已广泛应用于机床、减速器、计算机、家电和家具等行业<sup>[1-2]</sup>。传统模块化设计强调模块的通用化、标准化和系列化, 一般适用于系列分级特性比较明显的产品及其产品族的开发; 对于工况复杂、大载荷, 需进行结构强度、刚度设计, 无明显系列化分级特性的机械产品, 如液压机械、起重机械和水力发电机组等, 难以应用传统的模块化设计方法<sup>[3]</sup>。

本文回顾了模块化设计理论的研究进展, 针对传统模块化设计的局限性, 将参数化设计和变量化分析技术引入模块化设计, 系统提出了广义模块化设计的概念, 拓展了模块化设计理论的应用领域。将基于广义模块组合和基于广义产品平台的产品族规划方法应用于各类产品的模块化设计, 最后以非定型产品大型液压机为例, 详细说明了广义模块化设计的基本原理和方法。

## 1 模块化设计回顾

### 1.1 模块化设计理论的研究状况

模块化设计<sup>[4]</sup>的概念在 20 世纪 50 年代由欧美一些国家正式提出, 随后得到越来越广泛的关注和研究。在模块化设计的概念定义、实现过程, 模块的划分与综合, 以及基于模块化设计的产品族规划与设计等方面都有诸

ULRICH 等<sup>[5]</sup>从设计学角度指出了影响模块化设计的基本因素: ①设计中功能域与物理结构域之间的对应程度影响模块化的程度。②产品物理结构间相互影响程度的最小化。SUH<sup>[6]</sup>从功能—设计参数映射的角度定义了模块化设计: 模块化设计是一种分析结果的产生, 以产品、过程和系统的形式表现, 并满足预定的需求, 其方法是选择适当的设计参数, 完成从功能需求域到设计参数域的映射。PAHL 等<sup>[4]</sup>认为模块化设计是完成从功能需求域到模块功能域的映射, 然后在考虑模块性能(如尺寸、重量等)基础上完成从模块功能域到模块结构域的映射, 并按照模块功能的不同, 在模块功能域和结构域进行了相应的模块分类定义。

在模块划分技术的研究方面, ERIXON 等<sup>[7]</sup>提出了子功能为独立模块的 11 个条件, 并以此作为模块划分的通用原则, 建立模块识别矩阵(MIM), 然后对各功能载体进行聚类。GU 等<sup>[8]</sup>提出了一种面向产品生命周期工程多目标(易于回收性、可升级、可重复用、重构等)的模块划分方法, 在进行功能结构分析时使用模糊数学中权重的概念, 为模块划分从定性转向定量提供了依据。STONE 等<sup>[9]</sup>提出了一种用于产品架构开发的功能模型量化建模方法, 将模型中各个子功能与能量流、物流和信号流相关联, 以客户需求程度为衡量尺度, 建立需求、功能数据库, 并将功能与需求的关系量化, 以此作为模块划分与模块发展的主要依据。

在模块组合技术的研究方面, TSAI 等<sup>[10]</sup>从并行工程的角度出发, 在考虑设计、加工和装配复杂性的情况下, 将功能按其在设计过程中的接口关系划分为不同类型的模块, 并从中选出最优模块, 然后根据模块中信息, 排定模块中各个功能的优先权, 作为规划设计的依据。O'GRADY 等<sup>[11]</sup>研究了分布

\* 国家自然科学基金资助项目(50275105)。20060725 收到初稿, 20070205 收到修改稿

协同的网络设计环境下模块的组合方法，通过一个面向对象模块化产品设计环境，可以将不同地区、不同模块制造商提供的模块快速组合成满足用户需求的模块化产品。模块接口的匹配是模块组合的重要条件，HILLSTROM<sup>[12]</sup>结合公理化设计原理和传统的DFMA(面向装配和制造的设计)方法进行了模块化设计的接口分析。

### 1.2 传统模块化设计方法的局限性

传统的模块化设计中模块划分是采用系列化标准中的优先数和优先系列方法进行的，产品系列分得越细，每个品种的数量就越少，设计和制造成本增加；系列分得越粗，企业生产就越简单，但用户购买的产品不是功能不足，就是功能冗余。大型、重型产品(如大型液压机，水力发电机等)，相邻一个优先数，其结构和价格差距很大。这些都与用户个性化需求产生矛盾。

另外，随着计算机技术的发展和在设计中的使用，参数化设计和变量化分析的方法在产品设计中得到广泛应用，而传统的模块化设计多是以固定尺寸系列划分的刚性模块为基础，与之不相适应。

## 2 广义模块化设计基本原理

### 2.1 基本概念

广义模块化设计：是以传统模块化设计基本理论为基础，引入参数化设计和变量化分析方法，通过对一系列产品进行功能分析并结合其在设计、制造、维护中的特点，划分并构造具有更大适应性的广义模块和广义产品平台，通过广义模块的组合或广义产品平台的衍生实现产品的快速设计。

广义模块：广义模块是具有特定功能的结构体，具有参数化的结构模型和接口特征。广义模块是功能、几何拓扑结构、结构参数、激励和响应等工程约束的函数，可以表达为

$$M_g = f(F, G, X, R) \quad (1)$$

式中  $F$  —— 广义模块的功能

$G$  —— 功能所对应的几何拓扑结构，是广义模块功能的载体，用参数化的结构模型来描述

$X$  —— 广义模块结构的驱动参数，即设计变量，包括几何参数和材料特性参数，广义模块结构参数的取值必须满足材料强度、结构刚度、制品精度要求等工程约束

$R$  —— 载荷等物理参数

### 2.2 广义模块的分类

广义模块是具有固定拓扑结构的参数化模块，包括柔性模块、虚拟柔性模块和柔性元结构。模块、广义模块、柔性模块、虚拟柔性模块及柔性元结构的关系如图1所示。模块是具有独立功能、独立结构的实体，模块间具有固定的接口。引入柔性模块使模块成为参数化结构，在一定范围可以变化结构大小；引入虚拟柔性模块使模块划分可在结构设计特征层进行，便于在CAD平台上进行结构的快速设计。



图1 广义模块化设计概念的拓展

柔性模块：参数化的广义模块，称为柔性模块。其相应的接口也是参数化的，称为柔性接口。一组确定的结构参数值可将柔性模块定制成刚性模块。柔性模块参数的取值受一定尺寸范围的约束，既不能破坏模块结构模型的拓扑结构，也不能超出模块规格的应用范围。与柔性模块相对应，拓扑结构和尺寸定制后的模块称为刚性模块。

图2所示为一机床龙门式立柱柔性模块的简化模型。其结构参数包括尺寸参数 $P_1 \sim P_5$ ，筋板个数 $N$ ，当参数取值不同时，便构成不同规格的立柱<sup>[13]</sup>。

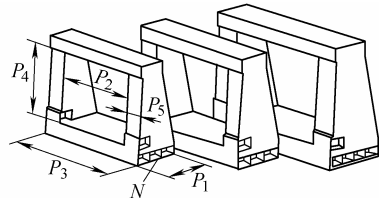


图2 柔性模块示意图

虚拟柔性模块：在一复杂结构实体(零件)中，其部分结构可能会在形式、参数等方面比较规范，并具有较为固定的分功能，可进一步划分为不同的功能模块，但结构上不能再分，仅具有CAD下分割的意义，可称作虚拟柔性模块。虚拟柔性模块之间要通过结构布尔运算连接，其接口称为虚拟接口。

图3所示为一种汽车覆盖件模具的模块划分示意图<sup>[14]</sup>。根据功能分析可初步将模具按其部件构成分为三个模块：上模、下模、压边圈。这些模块在结构上是一个整体，从制造的角度已不能再分，但根据其结构特点，将模块按功能进一步划分为两个子模块：模架子模块(形状规则，易于参数驱动)和专用型面子模块(结构复杂，不易于参数驱动)。通过虚拟模块的划分，通用模块(模架)可实现参数化，

在不同设计中共用, 便于实现汽车覆盖件模具的模块化快速设计。

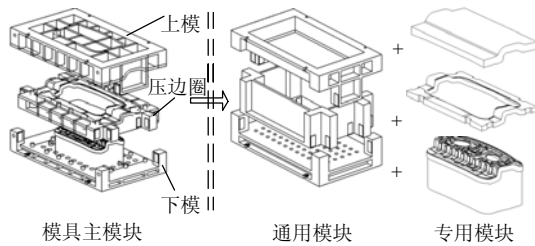


图3 虚拟模块示意图

**柔性元结构:** 从一复杂结构上分离出来的, 具有固定拓扑结构及接口形式的最简单的基本单元, 称为元结构。若将此基本结构单元用参数化模型表达, 能为不同尺寸系列的结构设计所选用, 则称为柔性元结构。

图4所示为机床床身及从床身框架提取的元结构<sup>[15]</sup>, 将元结构局部结构几何尺寸参数化, 利用参数化、变量化的方法进行几何建模, 通过有限元分析, 以确定元结构各结构参数的最佳比例关系, 使其具有优化的静、动态特性, 可有效指导结构设计。

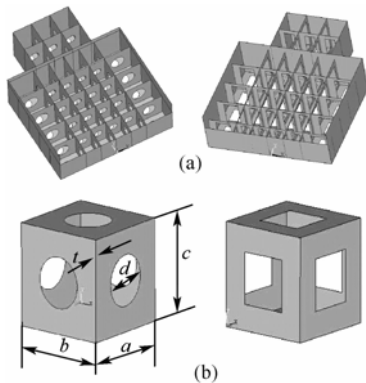


图4 机床床身及从床身框架提取的元结构

### 2.3 广义模块接口

柔性模块结构必然要求柔性接口, 柔性接口具有特定的拓扑形状和一组参数化的尺寸约束。

模块接口可表达为  $\langle T, b, A \rangle$ 。  $T$  表示接口的类型。接口类型的定义要考虑区分不同的接口面几何特征(形状)和连接特征(连接约束、连接形式)。  $b$  为一个布尔值, 若  $b=0$ , 则该接口为  $T$  型接口的目标端, 否则为基准端。  $A$  为一组接口参数  $A=\{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ 。模块间的可连接性可由此判定<sup>[13]</sup>。

### 2.4 广义模块的特征

广义模块化设计以广义模块为设计单元, 广义模块除具备一般模块的特征外, 还拥有一些新的特点: ①广义模块的独立性主要体现为功能独立性。由于引入了虚拟柔性模块的概念, 广义模块的划分

可在结构特征域内进行, 不再需要考虑结构的独立性。②广义模块的结构模型是具有一定几何拓扑结构的参数化模型。根据设计要求, 通过结构参数定制可生成具体结构, 称为模块实例, 模块实例等同于刚性模块。一个广义模块可对应于一族模块实例。

## 3 广义产品平台

### 3.1 产品平台

用来开发和生成一系列衍生产品的一组通用模块和接口, 称为产品平台, 它是指在一个特定的产品族中为所有产品所共享、由一个或多个功能模块构成的集合<sup>[16]</sup>。

一个产品族中可包括一个或多个产品平台, 其功能相似或相同, 但功能映射的结构模块可有多种, 包括不同的结构或尺寸规格的变化。一般来说, 产品平台是由产品族中最复杂的寿命长、变型少、设计制造质量可靠的一些模块组成。

### 3.2 广义产品平台

由一组广义模块组成的产品平台, 称为广义产品平台。在广义产品平台上增加或替换一组专用模块(专用模块可以是传统的刚性模块, 也可以是广义模块)而衍生出一系列产品的设计, 称为基于广义产品平台的广义模块化设计。

基于同一广义产品平台所衍生的一系列广义产品就构成了广义产品族。广义产品族是一组广义产品, 当对其参数化数据结构赋予确定值时, 便可唯一确定一个产品。

如图5所示, 由若干个广义模块组成的广义产品平台可进行平台的升级或变型。构成广义产品平台的广义模块是由生命周期较长、结构稳定的模块组成, 因此广义产品平台通常有一个结构稳定期。在广义产品平台升级时, 只需要更新部分模块, 其他模块可保持不变; 在广义产品平台变型时, 只需要在原有产品平台的基础上选择一个或几个模块进行变型。因此, 广义产品平台便于产品平台的升级和更新, 从而使产品拓展更加容易。

## 4 广义模块化产品族规划

面向产品族进行设计是一种以最小的开发、制造、服务成本获取最多产品品种的方法。面向产品族的设计要求用模块化设计方法构造模块系统, 通过组合来构造产品, 模块接口的标准化保证了模块的互换性, 从而易于实现产品的快速变型设计。

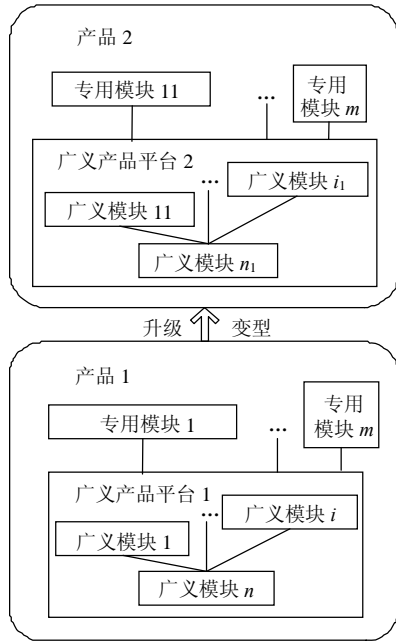


图5 广义产品平台的升级与变型

4.1 基于广义模块组合的产品族规划

若一产品族结构组成链中各结构部件拓扑形状不变，其模型可用一参数集来表达，组成链各部件间具有相对固定的拓扑形状接口，则该产品族可用广义模块化设计方法构建一广义模块化产品设计系统，广义模块化产品族的矩阵规划过程如图6所示。

产品矩阵将一类或多类产品，以其规格系列和

功能变化归入一个产品矩阵  $P$  中。矩阵  $P$  中的任一行表示相同规格，不同功能的变型产品；任一列表示相同功能，不同规格的系列产品。习惯上将第一列产品规划为基型产品，以便于模块化设计的进行。

矩阵  $M_f$  是基型产品的功能矩阵，为一个行矩阵，其功能划分的细致程度取决于产品复杂程度和批量大小。对于变型产品中的新增功能可添加到矩阵  $M_f$  中，从而构成整个产品族的功能矩阵。

矩阵  $M_{gs}$  为基型产品的广义结构模块矩阵，其中的结构模型均为参数化模型。矩阵中的每一列模型，根据模块尺寸系列划分的大小和模块的承载状况，邻近的模块可共用一个参数化模型，也可采用不同拓扑结构的模型。

矩阵  $\Psi$  为功能需求矩阵。可根据用户需求参数选择或定制不同功能的广义模块，经过定制的模块成为模块实例，等同于传统的刚性模块。在此意义上，传统的刚性模块成为广义模块的特例。广义模块化产品族中产品的广义模块定制方程如下

$$P_{gm}^T = \Psi \times M_{gs}^T \tag{2}$$

根据功能需求完成广义模块的定制后，再进行广义模块的实例化，并对实例化的产品模型进行整机有限元计算验证，便可得到广义模块化产品族  $P_{gm}$  中的任一产品。

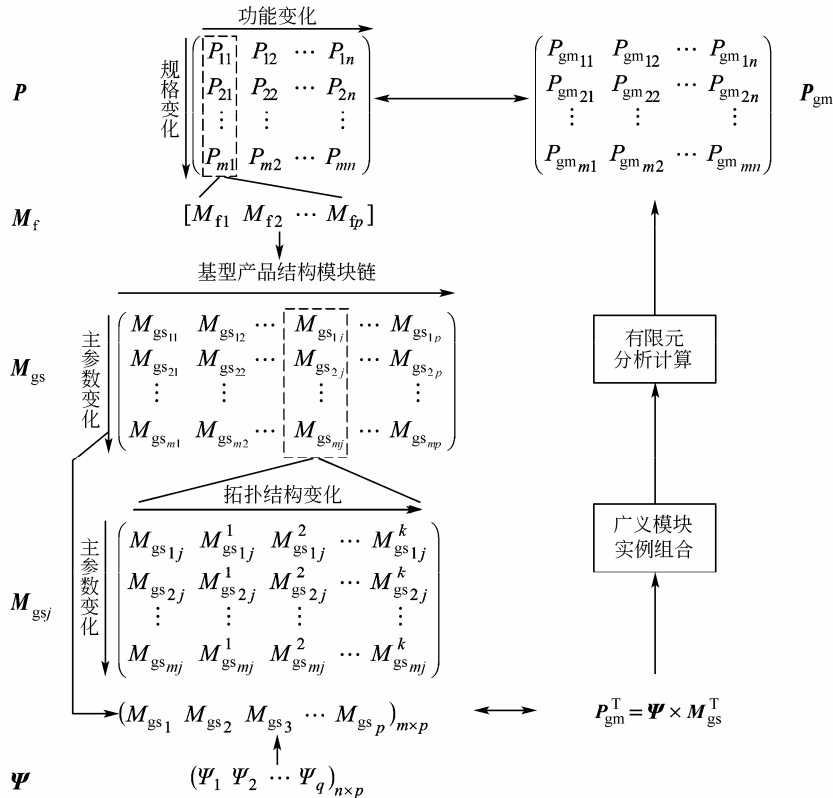


图6 基于广义模块组合的产品族矩阵规划

### 4.2 基于广义产品平台的产品族规划

图7所示为基于广义产品平台的产品族规划。与基于广义模块组合的产品族规划不同，将结构模块  $M_s$  分为主模块和专用模块两部分，通过参数化技术升华为广义结构模块  $M_{gs}$ ，广义主模块可组成广

义产品平台  $P_{gp}$ ，根据需求参数矩阵  $\Psi$ ，通过广义产品平台  $P_{gp}$ 、专用模块  $M_{sp}$  的组合，形成广义产品族矩阵  $P_{gm}$ 。

产品规划与新产品开发以广义产品平台为基础，通过增加、替换相应的专用模块来实现。

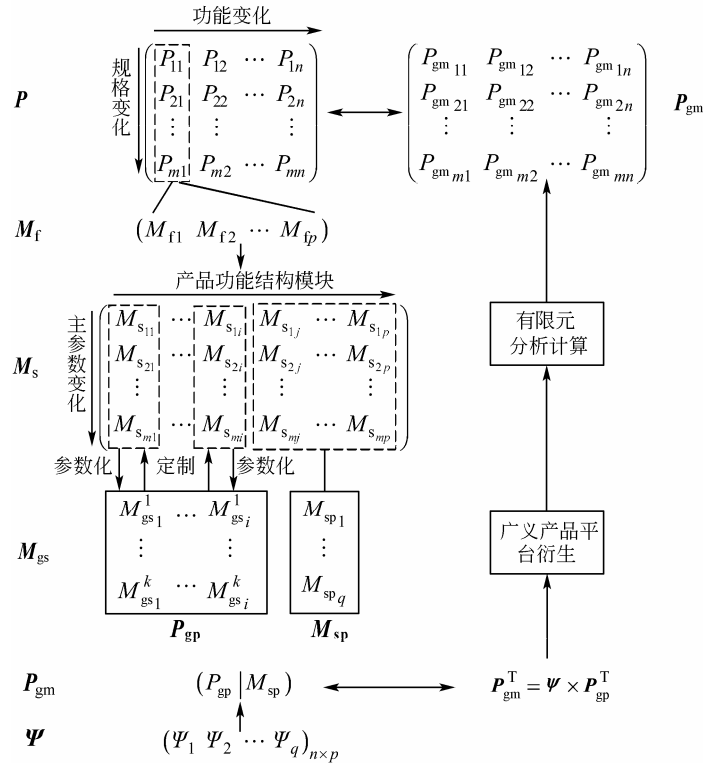


图7 基于广义产品平台的产品族矩阵规划

## 5 实例：液压机广义模块化设计

图8所示为某企业组合框架式液压机的主机结构模型，由于液压机是单件小批量产品，模块划分不宜过细，按照功能将其划分为上梁模块、立柱模块和下梁模块，上梁模块用于安装支撑工作油缸，下梁模块用于安装液压垫及工件等，立柱模块用于连接上梁和下梁模块。

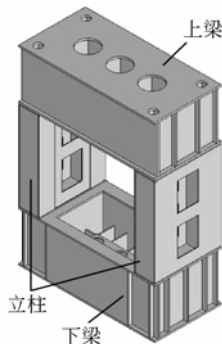


图8 组合框架式液压机主机结构模型

液压机公称压力(5~80 MN)是主功能参数，反

映了液压机的主要工作能力，且不同的公称压力通常对应不同的机身结构，故将公称压力设为纵系列参数。考虑到客户需求，选择工作台有效面积和油缸数量作为横系列参数。对公称压力参数相同的产品，其结构可随工作台面尺寸的变化(2~16 m<sup>2</sup>)而改变。而液压缸的数量由压力、尺寸和上梁空间决定。考虑到尽量将所有机型都能列入产品族表中，又不致使模型数量过多，选取公比  $i=2$  来构建产品族模型。组合框架式液压机的产品族规划如表所示。按表中的公称压力和工作台面积变化范围建立各柔性模块的参数化模型，并按其规格的平均值进行有限元变量优化分析，在可变化参数范围内，进行结构定制，并用 FEM 进行验证和结构修正。

图9所示为一公称压力为20 MN，台面为13 m<sup>2</sup>，油缸数量为3的组合框架式液压机模型的有限元分析结果(1/4对称模型)，其最大应力为140 MPa，最大变形为0.774 mm，满足许用应力160 MPa，许用变形0.9 mm的要求。对于公称压力15~30 MN，工作台面积10~14.5 m<sup>2</sup>范围内的三缸液压机亦可以此模型为基础，通过适当调整柔性模块的参数，

表 组合框架式液压机产品族规划表

面积 $A/m^2$	2		4		8		13		16	
	单缸	单缸	单缸	三缸	单缸	三缸	单缸	三缸	五缸	
压力 $F/MN$										
5	$\mu=0.5\sim 1.5$ $v=0.5\sim 1.5$ $K\leq 1.7$	$\mu=0.5\sim 1.5$ $v=0.75\sim 1.50$ $K\leq 1.7$	$\mu=0.5\sim 1.5$ $v=0.75\sim 1.25$ $K\leq 1.7$	—	—	—	—	—	—	—
10	—	$\mu=0.75\sim 1.5$ $v=0.75\sim 1.5$ $K\leq 1.7$	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.75\sim 1.25$ $K\leq 1.7$	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.75\sim 1.25$ $K>1.7$	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.75\sim 1.10$ $K\leq 1.7$	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.75\sim 1.10$ $K>1.7$	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.9\sim 1.1$ $K\leq 1.7$	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.9\sim 1.1$ $K>1.7$	—	—
20	—	—	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.75\sim 1.25$ $K\leq 1.7$	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.75\sim 1.25$ $K>1.7$	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.75\sim 1.10$ $K\leq 1.7$	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.75\sim 1.10$ $K>1.7$	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.9\sim 1.1$ $K\leq 1.7$	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.9\sim 1.1$ $K>1.7$	—	—
40	—	—	—	—	—	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.75\sim 1.10$ $K>1.7$	—	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.9\sim 1.1$ $K>1.7$	$\mu=0.75\sim 1.50$ $v=0.9\sim 1.1$ $K\leq 1.7$	—
63	—	—	—	—	—	$\mu=0.75\sim 1.25$ $v=0.75\sim 1.10$ $K>1.7$	—	$\mu=0.75\sim 1.25$ $v=0.9\sim 1.1$ $K>1.7$	$\mu=0.75\sim 1.25$ $v=0.9\sim 1.1$ $K\leq 1.7$	—
80	—	—	—	—	—	—	—	$\mu=0.9\sim 1.1$ $v=0.9\sim 1.1$ $K>1.7$	$\mu=0.9\sim 1.1$ $v=0.9\sim 1.1$ $K\leq 1.7$	—

注： $A$  为工作台有效面积； $F$  为公称压力； $K=l/b$ (有效长/有效宽)；公称压力范围  $\mu F$ ；工作台有效面积范围  $vA$ 。

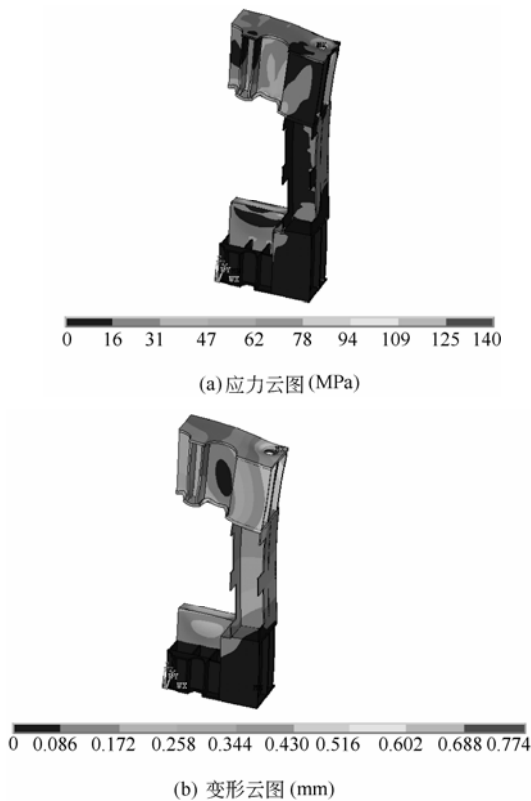


图9 某组合框架式液压机的有限元分析结果

并经过 CAE 验证,可快速完成客户化的产品定制设计,从而实现了非定型产品的广义模块化设计。

## 6 结论

广义模块化设计方法将参数化设计和变量化分析技术引入模块化设计,使得其既可满足规格和变形结构系列特性明显的产品模块化设计,亦可满足有结构优化要求、无明显系列化分级特性的机械产

品模块化设计的需要,拓展了模块化设计理论的应用领域。在此基础上,进一步阐述了基于广义模块组合和基于广义产品平台的产品族规划方法。最后以非固定型产品组合框架式液压机的广义模块化设计和产品族规划为例,详细说明了广义模块化设计的基本原理和方法。

## 参 考 文 献

- [1] 侯亮,唐任仲,徐燕申. 产品模块化设计理论、技术与应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 56-61.
- [2] GU P, HASHEMIAN M, NEE A Y C. Adaptable design[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2004, 53(2): 539-557.
- [3] 徐燕申,侯亮,张连洪,等. 液压机广义模块化设计原理及其应用[J]. 机械设计, 2001, 18(1): 1-3, 41.
- [4] PAHL G, BEITZ W. Engineering design—a systematic approach[M]. London: Springer-Verlag, 1996.
- [5] ULRICH K, TUNG K. Fundamentals of product Modularity[C]. ASME Design Engineering Division, 1991, 39: 73-79.
- [6] SUH N P. The principle of design[M]. Oxford: Oxford University Press, 1990.
- [7] ERIXON G, YXKULL V A, ARNSTROM A. Modularity—the basis for product and factory reengineering[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1996, 45(1): 1-4.
- [8] GU P, SOSALE S. Product modularization for life cycle engineering[J]. Robotics and Computer Integrated manufacturing, 1999, 15(5): 387-401.
- [9] STONE R B, WOOD K L, Crawford R H. Using quantitative functional models to develop product architec-

- ture[J]. *Design Studies*, 2000, 21(3): 239-260.
- [10] TSAI Y T, WANG K S. The development of modular-based design in considering technology complexity[J]. *European Journal of Operation Research*, 1999, 119(3): 692-703.
- [11] O'GRADY P, LIANG W Y. An Internet-based search formalism for design with modules[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1998, 35(1-2): 13-16.
- [12] HILLSTROM F. Applying axiomatic design to interface analysis in modular product development[C]. *ASME Design Engineering Division*, 1994, 69-2: 363-371.
- [13] 齐尔麦. 机械产品快速设计原理、方法、关键技术和软件工具研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [14] 郑青春. 汽车覆盖件模具快速响应设计的若干关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [15] 张学玲. 基于广义模块化设计的机械结构静、动态特性分析及优化设计[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [16] SIMPSON T W, MAIER J R A, MISTREE F. Product platform design: Method and application[J]. *Research in Engineering Design*, 2001, 13(1): 2-22.

## THEORY AND METHODOLOGY OF GENERALIZED MODULAR DESIGN

GAO Weiguo XU Yanshen  
 CHEN Yongliang ZHANG Qing  
 (School of Mechanical Engineering,  
 Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract:** Generalized modular design method is proposed to solve the limitation of traditional modular design. The application domains of modular design are extended because parametric design and variational analysis methods are introduced into generalized modular design. It can be applied for developing not only products and product family planning which have obvious hierarchy but also mechanical products with complex work conditions and heavy load, whose strength and rigidity design is necessary, and whose hierarchy is uncertain. The theory of generalized modular design, generalized product platform, product family planning based on combination of generalized modules and based on generalized product platform are systematically represented. At last, an example of generalized modular design and product family planning of hydraulic press machines is given to illustrate the theory and methodology of generalized modular design.

**Key words:** Generalized modular design

Generalized product platform Product family

Parametric design

作者简介: 高卫国, 男, 1974 年出生, 工学博士, 博士后。主要研究方向为 CAD/CAM、设计理论与方法、机械动力学等, 发表论文 10 篇。

E-mail: gaoweiguo1974@yahoo.com.cn