

# 复杂结构零件的初始化设计知识模型构建

贾磊, 洪军, 邱志惠, 李宝童, 阎海红, 潘世翼

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 为了实现设计重用, 提出了一种面向复杂结构零件的初始化设计知识模型构建方法. 采用功能特征分解对复杂结构零件进行了从功能到其映射结构的逐层解析, 构建了功能结构设计矩阵, 研究了各级功能结构的设计流程规划方法. 以特征分解树为框架, 研究了面向对象的表示方法对各级功能结构设计支撑知识的模块化封装, 最终实现了初始化设计知识模型的构建. 应用结果表明, 在汽车发动机气缸体设计知识模型的构建中, 该方法可有效地实现对其设计知识的条理性重用.

**关键词:** 复杂结构零件; 知识模型; 设计重用; 特征分解树

**中图分类号:** TP182 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)07-0865-05

## Initialized Design Knowledge Model Constructing for Complex Structural Components

JIA Lei, HONG Jun, QIU Zhihui, LI Baotong, YAN Haihong, PAN Shiyi

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To achieve the design reuse of complex structural components, a method for the initialized design knowledge model is investigated. The defining scheme for functional feature partition is proposed via mapping function to the structural feature from top to bottom of the partition tree. The design process planning for functional structures at all levels is studied by constructing design matrix of functional structures. The modularized design knowledge representation for functional structures at all levels is also discussed with object-oriented method. The proposed method is applied to the design knowledge model of gasoline engine block to confirm the effectiveness for knowledge reuse.

**Keywords:** complex structural components; knowledge model; design reuse; functional feature partition

在现代工程领域中, 存在大量复杂结构零件, 如大型泵体、汽轮机组壳体、船用曲轴、航空发动机壳体、汽车发动机缸体与缸盖等. 这类零件的开发, 一般很难在短期内实现从无到有的创新, 要实现产品快速开发, 就必须在设计过程中积累和继承已有的设计知识. 因此, 构建复杂结构零件初始化设计知识模型, 是实现设计知识重用的有效手段.

在产品知识重用与知识模型构建方面, Brunetti 等<sup>[1]</sup>提出一种基于特征的知识表示框架,

用于实现产品概念设计知识模型的构建. Baxter 等<sup>[2]</sup>以产品设计流程为基本框架, 构建了一种基于特征集成案例研究、设计原理和知识的设计重用模型. 侯亮等<sup>[3]</sup>研究了基于柔性模块的面向对象知识库建模方法. 此外, 一些学者在模具、汽车车身、摩托车、电梯等不同的机械系统设计方面, 也对知识模型的构建技术进行了研究<sup>[4-7]</sup>. 在这些工作中, 主要研究了如何按模块进行产品设计知识封装, 但对于模块的划分与设计流程规划并没有论述, 特别是对于

复杂结构产品的知识模型构建,从零件角度进行内部结构模块化知识封装的研究还很少.为此,本文提出了一种基于功能特征分解的复杂结构零件初始化设计知识模型的构建方法,研究了以功能为划分依据的功能-结构交替映射模块划分方法——功能特征分解,以各级功能结构为单位,设计了由矩阵表达的复杂结构零件的流程规划.

## 1 复杂结构零件功能特征分解

如图1所示,图1a的设计目标明确,利于初始化正向设计,而图1b的情况则需要多个结构配合完成一个设计目标,为便于正向设计,可将其合并为一个结构,从而转化为图1a的情况.由于一个结构同时有多个设计目标,其设计意图很难理清,因此在初始化正向设计中应尽量避免图1c的情况.

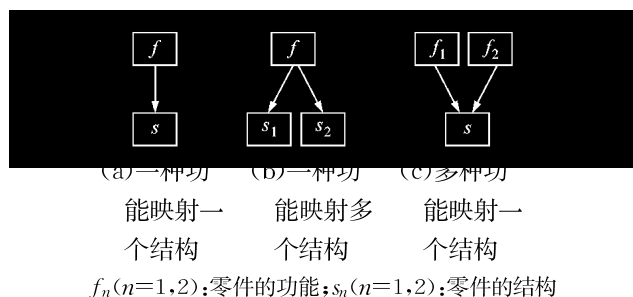


图1 3种不同的功能-结构映射

功能特征分解应遵循以下原则:①在对各级功能结构进行功能分析时,必须保证其映射结构与该功能相对应,而不是同一级多种功能的混合体;②进行同级功能结构边界划分时,必须保证功能结构的关联约束关系明确,无结构重叠区域;③各级功能设置都必须把握与其父功能的联系,以保证设计思想的连贯.

由以上原则可知,功能特征分解中功能-结构映射避免了图1c所示情况的出现.在此基础上,功能特征分解按照功能的重要性,以基本功能、辅助功能、其他功能3个档次对各级分解结构进行分析,逐层进行功能-结构映射,提取下一级分解结构,直至 $N$ 级功能结构对应不可分解功能.其中,底层功能结构称为功能特征,对应的分功能称为元功能,如图2所示.这种功能特征分解方法,可使复杂结构零件从设计意图的分解到结构特征的分解符合初始化正向设计的思维逻辑,从而避免了功能设计与结构划分之间的脱节.

以汽车发动机气缸体为例,通过对多款发动机结构设计知识的对比分析和总结,按照基本功能、辅

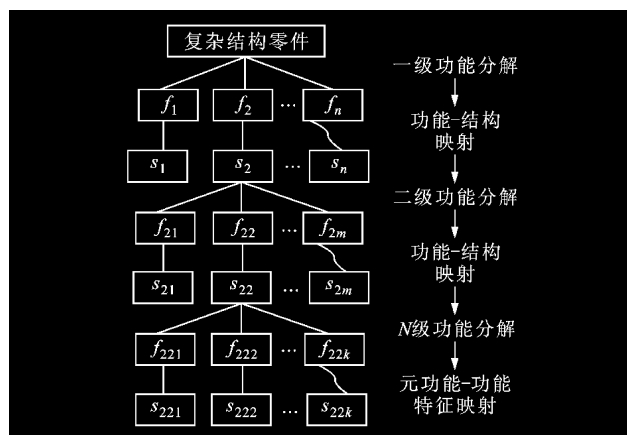


图2 复杂结构零件功能特征分解模型

助功能和其他功能,将气缸体划分为7种功能,然后对每个分功能进行结构提取,逐层交替分解映射,完成对复杂零件气缸体的功能特征分解.图3是气缸体功能特征分解的局部示例.

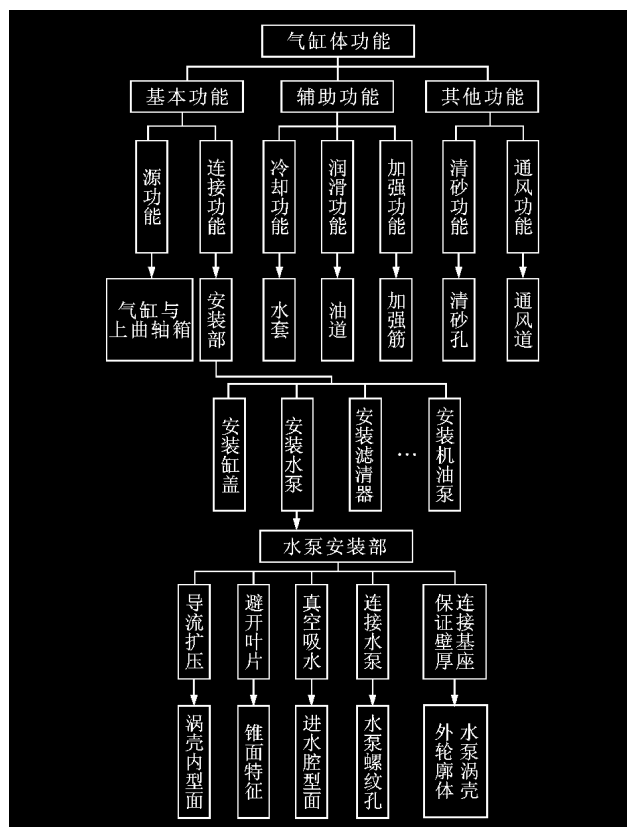


图3 汽车发动机气缸体功能特征分解

## 2 各级功能结构设计流程规划

当功能特征分解完成后,需要确定各级功能结构的设计顺序.为此,根据功能特征间的设计信息联系将其映射为矩阵,通过矩阵运算进行复杂结构零件的设计流程规划,实现数学方法的定量分析.

从功能特征分解树中可知,复杂结构零件的设计流程分为纵向流程和横向流程,其中纵向流程具有上下设计信息的继承性,由一级功能结构逐级向下设计,直到功能特征.对于每级功能结构自身的横向流程规划,则采用矩阵表达的运算方法.

例如,对于第  $N$  级功能结构,存在功能结构  $s_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ),将各功能结构间设计信息的联系映射为功能结构设计矩阵  $\mathbf{A}$ ,矩阵的第  $i$  行、第  $j$  列与  $s_i$  对应,即

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $s_i$  按其映射功能由基本功能  $\rightarrow$  辅助功能  $\rightarrow$  其他功能顺序编号,  $a_{ij}$  ( $i,j=1,2,\dots,n$ ) 表示功能结构  $s_j$  是否向功能结构  $s_i$  设计提供支持信息,1 为真,0 为假;  $a_{11} \sim a_{nn}$  表示功能结构的自身信息联系(规定为真).

由  $a_{ij}$  的意义可知,  $\mathbf{A}$  只描述功能结构两两之间的直接信息联系,不包括通过中间功能结构传递形成的间接信息联系,而对于功能结构设计流程规划,应当考虑包括直接与间接在内的所有信息联系.为此,需推导其对应的可达矩阵  $\mathbf{R}$ ,而  $\mathbf{R}=(\mathbf{A})^n$ .当  $\mathbf{R}$  确定后,将  $n$  维行向量  $\mathbf{a}=\{1,1,\dots,1\}$  与其相乘得到流程向量  $\mathbf{P}=\mathbf{aR}$ ,其结果中的分量值越大,表明对应编号功能结构对其他功能结构设计信息的支持就越大,将其从大到小排序,即可确定对应编号功能结构的设计流程.

有些同级功能结构间会出现需要相互提供设计信息支持的情况,即功能结构耦合,这是一种结构间设计约束与参数相互影响的静态耦合,可以通过合理的流程规划与封装,来实现功能结构的耦合设计.对于耦合功能结构的判别,计算  $\mathbf{R} \cap \mathbf{R}^T$ ,结果中相互相等的非零行向量(或列向量)所对应编号的功能结构就是耦合功能结构.

对于耦合功能结构成员的设计,主要采用同步设计,因此在对其  $N+1$  级功能结构流程规划时,应将  $N$  级耦合功能结构的子结构组合在一起同时规划.对于  $N$  级耦合功能结构  $\{s_i, s_j, \dots, s_k\}$ ,设其子结构成员数分别为  $m, n, \dots, q$ ,下一级功能结构设计的统一编号顺序为  $s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}; s_{j1}, s_{j2}, \dots, s_{jn}; \dots, s_{k1}, s_{k2}, \dots, s_{kq}$ ,然后按照前面的方法进行统一流程规划.对于  $N+1$  级设计结构矩阵中的非耦合功能结构,可按流程单独设计,而对于该矩阵中的耦合功能结构,则在下一级设计流程中继续组合规划,直至

功能特征层次.

以汽车发动机气缸体一级功能结构为例,其横向流程可以基本确定为{气缸与上曲轴箱,安装部} $\rightarrow$ {水套,油道,加强筋} $\rightarrow$ {清砂孔,通风道}.根据它们相互间的信息传递关系,按编号顺序可列出对应的功能结构设计矩阵及其可达矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{R} = (\mathbf{A})^7 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

计算  $\mathbf{R} \cap \mathbf{R}^T$ ,即

$$\mathbf{R} \cap \mathbf{R}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

发现式(4)中的第2~第4行(或列)相互相等,确定相应的结构设计耦合集为{安装部,水套,油道}.

计算  $\mathbf{P}=\{7,5,5,5,2,1,1\}$ ,按  $\mathbf{P}$  中分量值从大到小来确定对应编号的设计流程为气缸与上曲轴箱 $\rightarrow$ {安装部,水套,油道} $\rightarrow$ 加强筋 $\rightarrow$ 清砂孔 $\rightarrow$ 通风道.其中,耦合结构安装部、水套、油道在该层设计中同步设计.

### 3 各级功能结构的设计知识封装

对于复杂结构零件的各级功能结构,其内部的设计知识包括的设计参数和设计规则如下.

(1)设计参数包括性能参数与结构参数,其中结构参数又分为内部结构参数与关联结构参数.在内部结构参数中,根据经验知识直接选择的参数为决策参数,通过继承其他参数由公式计算推导的参数为计算参数.关联结构参数通过约束不等式综合内

部结构参数关系来确定。

(2)设计规则包括基本性能参数的确定规则与多层次结构形式与参数的确定规则,主要形式有比例公式、图表曲线、图形视图、多参数理论计算公式、关联参数约束不等式以及文字性经验规则等。

根据复杂结构零件各级功能结构设计知识的继承关系,建立面向各级功能结构的设计知识模型如图4所示。

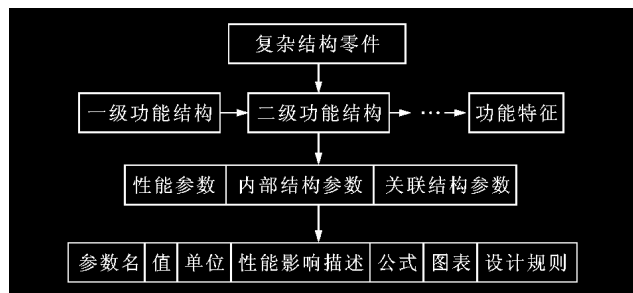


图4 复杂结构零件设计知识模型

各级功能结构的设计知识封装采用面向对象技术,面向对象技术具有模块性、继承性、封装性等特点<sup>[8]</sup>,与复杂结构零件按各级功能结构进行模块化设计知识封装的特性相匹配。面向对象技术中的类包含数据成员与成员函数两部分,并与各级功能结构设计知识的参数和规则分别相对应。为此,按照各级功能结构设计知识的构成特点,将类结构设计如下。

```

<类描述>::=类<功能结构名>
{
  <性能参数>::=<类型><参数>
  <内部结构参数>::=<类型><参数>
  <关联结构参数>::=<类型><参数>
  <设计规则>::=<规则名>(<设计参数>)
  {
    <规则公式>::=<设计参数表达式>
    <规则图表>::=<图表名><图表地址>
    <规则描述>::=<文本>
  }
}结束类

```

其中,对于前文判别的各级耦合功能结构,由于设计约束相互影响,设计参数互相参考,因此在保证其知识模型形式上相互独立的情况下,为实现耦合功能结构的设计,将设计知识统一封装,以实现设计信息的共享。将面向各级功能结构与功能特征的类头文件(类名.h)分别保存,按照设计流程逐个调用,实现对复杂结构零件的模块化知识重用。

## 4 实 例

采用复杂结构零件的功能特征分解、设计流程规划,以及知识封装方法,构建直列4缸汽车发动机零件气缸体的设计知识模型,将其结构划分为4个层次和252个功能特征模块,并逐层进行设计流程规划与模块化知识封装。对耦合功能结构的设计知识进行协调整理,得到了汽车发动机气缸体的设计知识模型准备文档与软件实现界面。

由表1可知,气缸体零件的特征层次关系、设计顺序、设计参数与设计规则(公式、文字、程序、图表)等设计知识,都得到了条理性整理封装,结果如图5所示。整个设计活动简单清晰,符合正向设计思路,有效地实现了对复杂零件设计知识的整理重用。

表1 部分直列4缸发动机气缸体的设计知识文档

| 流程编号 | 功能特征    | 映射功能                   | 设计参数                                       | 设计规则                                                             |
|------|---------|------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1    | 涡壳内型面特征 | 将流体集中导流,并将其部分动能扩压转变为静压 | 叶轮中心<br>( $x, y$ )<br><br>涡壳张度<br><br>涡壳型线 | 高度方向水套中部偏下,水平方向保证水套入口水压,适当减小与缸心轴线距离<br>查见水泵性能曲线<br>涡壳型线满足对数螺旋线方程 |
| 2    | 锥面特征    | 避开水泵叶片旋转轨迹             | 大径<br><br>小径<br><br>角度                     | 参照水泵叶轮内径<br>参照水泵叶轮输线内径<br>参照水泵叶轮斜度                               |

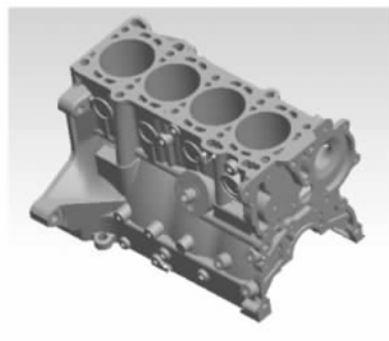


图5 发动机气缸体的设计实例

## 5 结 论

本文提出了一种复杂结构零件设计知识模型的构建方法,通过功能特征分解,实现了复杂结构零件初始化设计模块的合理划分. 本文将各级功能结构的设计信息联系采用矩阵表达运算,完成了对复杂结构零件各级功能结构的设计流程分析. 通过引入面向对象的表示方法,按参数与规则实现了对各级功能结构设计知识的封装.

### 参考文献:

- [1] BRUNETTI G, GOLOB B. A feature-based approach towards an integrated product model including conceptual design information[J]. Computer-Aided Design, 2000, 32(14): 877-887.
- [2] BAXTER D, GAO J, CASE K, et al. An engineering design knowledge reuse methodology using process modeling [J]. Research in Engineering Design, 2007, 18(1): 37-48.
- [3] 侯亮,唐任仲,徐燕申,等. 机械产品柔性模块化设计知识库系统的研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(1): 44-47.  
HOU Liang, TANG Renzhong, XU Yanshen, et al. Research on knowledge base system of flexible modular design for mechanical products [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2004, 38(1): 44-47.
- [4] 辛勇,简之荣. 基于知识的注塑模架设计系统的研究 [J]. 塑性工程学报, 2005, 12(6): 94-97.  
XIN Yong, JIAN Zhirong. Research of knowledge based injection moldbase design system [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(6): 94-97.
- [5] 李余兵,邢彦锋,郑丞,等. 车身装配概念设计专家系统 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41 (4): 525-531.  
LI Yubing, XING Yanfeng, ZHEN Cheng, et al. An expert system of auto-body conceptual assembly design [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41 (4): 525-531.
- [6] 杜静,何玉林,宋豫川. 知识工程技术在摩托车总体设计中的研究与应用[J]. 汽车工程, 2006, 28(3): 304-307.  
DU Jing, HE Yulin, SONG Yuchuan. The study and application of knowledge-based engineering technique in overall design of motorcycle [J]. Automotive Engineering, 2006, 28(3): 304-307.
- [7] 贾怀玉,金先龙,李治,等. 基于 KBE 的电梯智能设计系统 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16 (6): 861-868.  
JIA Huaiyu, JIN Xianlong, LI Zhi, et al. KBE based intelligent elevator design system [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16 (6): 861-868.
- [8] 王永庆. 人工智能原理与方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998: 105.

(编辑 管咏梅)