

# 基于设计结构矩阵的变型设计过程动态规划

高琦<sup>1,2</sup> 王昊<sup>1,2</sup> 伍英杰<sup>3</sup>

(1. 山东大学机械工程学院, 济南 250061; 2. 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061;

3. 沪东中华造船(集团)有限公司, 上海 200129)

**摘要:** 针对目前变型设计过程模型主要限制在零件级的粒度, 导致活动间关系赋值较为粗糙, 且往往需要遍历所有可能的设计过程, 时间长, 效率低, 不能满足产品设计过程中的动态变化等问题, 提出了一种基于设计结构矩阵的变型设计动态规划方法。依据建立的变型产品设计活动层次结构模型, 定义了参数级粒度的设计活动间约束关系及其优先级数值, 通过对虚拟活动的打包和分解操作, 实现复杂耦合条件下基于 DSM 的设计过程动态规划。以轴承产品设计过程为例, 验证了该方法的有效性。

**关键词:** 设计过程管理; 动态规划; 设计约束; 设计结构矩阵; 变型设计

**中图分类号:** TH122; TH166 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0390-09

## Dynamic Planning for Variant Design Process Based on Design Structure Matrix

GAO Qi<sup>1,2</sup> WANG Hao<sup>1,2</sup> WU Yingjie<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China

2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Ji'nan 250061, China

3. Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 200129, China)

**Abstract:** Existing models of variant design process were mostly built at part level, and activity relationship definition was coarsely grained. Design process planning had to traverse all of the possible design activities, which resulted in low design efficiency and bad dynamic adaptation. A dynamic planning method for variant design process based on design structure matrix (DSM) was presented. Firstly, the variant design activity hierarchy model was built, including product level, feature level and parameter level. According to the hierarchy model, the product design activities can be divided into six types. The constraint relationships and their priority values between design activities at each level were defined. Then, the concept of virtual activity was proposed considering that traditional DSM cannot deal with the dynamics of design process. By packaging and decomposition operations of virtual activities, dynamic planning of the design process under complex coupling condition was achieved based on DSM. The design process planning and execution were alternated with each other. With the selection of dynamic design activities, the design process planning was adjusted continuously so as to ensure optimal execution sequence of the design activities. Finally, the method presented was applied to develop the bearing design wizard. Compared with traditional methods, the method presented was easier to adapt to dynamic design process, and it improved process planning efficiency and shortened design time.

**Key words:** design process management; dynamic planning; design constraint; design structure matrix; variant design

## 引言

近年来, 在产品过程管理研究中, 国内外学

者主要采用图论、关键路径法(Critical path method, CPM)、规划评估技术(Program evaluation and review technique, PERT)、图解评审法(Graphical evaluation

and review technique, GERT) 以及设计结构矩阵 (Design structure matrix, DSM) 等理论与方法来构造设计过程模型<sup>[1]</sup>。其中 DSM<sup>[2]</sup> 模型可有效地处理各活动之间的关联关系, 为分析复杂的设计过程提供了简洁可视的形式, 因此很多学者把 DSM 应用到设计过程的建模和管理中。

但是, 目前国内外学者<sup>[3-7]</sup> 针对设计过程建模的研究还是停留在零件级粒度上, 对 DSM 单元格的赋值多采用四点刻度权重法或五点刻度权重法<sup>[8]</sup>, 对零部件联系强度间相对重要性的界限仍然没有很好地明确, 导致单元格赋值较为粗糙, 不利于进行更深层次的优化, 进而限制了设计效率的进一步提高。

文献[9]将产品变型设计类型分为横向布局结构变化和纵向布局结构变化两种, 前者主要指运用变更或添加模块的方法形成系列产品; 后者主要指产品功能参数的变化引起产品尺寸结构上的变化。目前国内外学者<sup>[10-11]</sup> 对变型设计中纵向布局结构变化研究较多, 而在研究横向布局结构变化时, 为了得到合适的设计活动过程模型一般要求遍历所有可能的设计过程, 时间长, 效率低, 无法满足产品设计过程中的动态变化, 在实际的设计过程中是不可行的。

本文面向变型产品横向局部结构的变化, 提出一种基于 DSM 的变型产品设计过程动态规划方法, 定义参数级粒度的设计约束关系优先级数值, 给出复杂耦合条件下设计过程规划策略, 最终得到优化的设计过程模型。

## 1 变型产品层次结构模型

有研究表明, 现代产品设计中 75% 的设计是变型设计<sup>[12]</sup>, 这里的变型设计是指在工作原理和功能结构基本不变的前提下, 对已有产品的结构、零部件、尺寸、材料等进行变更而形成新产品的一种设计方法, 是区别于创新设计而言的<sup>[13]</sup>。为支持参数级粒度的变型产品设计过程管理, 建立了图 1 所示的变型产品层级结构模型, 将变型产品分为产品层、特征层和参数层。

其中产品层以零件模型为最小粒度, 包括产品、部件、零件 3 种类型设计元素, 如活塞杆、底座等; 特征层主要包含构成产品零件的几何特征, 如止动槽、内孔等; 参数层包含部件、零件或特征所属的相关参数, 如公称直径、板厚、内径等。

不同类型的设计元素对应着不同类型的设计活动, 因此将变型产品层次结构模型中的不同设计元素映射成为相应的设计活动, 就可以得到产品设计活动层次模型, 如图 2 所示。

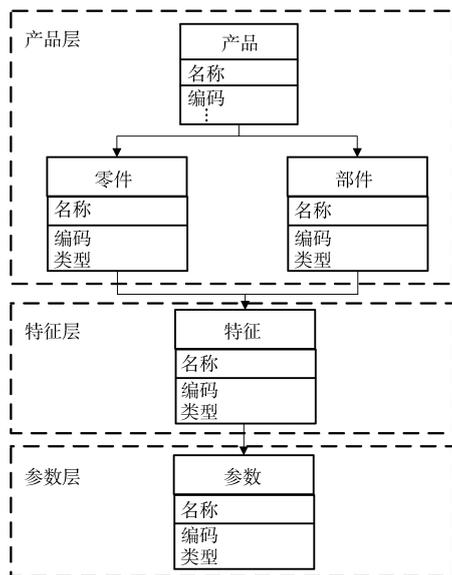


图 1 变型产品层次结构模型

Fig. 1 Variant product hierarchy model

对变型设计而言, 根据设计活动层次模型可以将产品设计活动划分为 6 种类型:

(1) 装配任务: 指部件和产品的装配活动, 如图 2 中的 A 和 C。

(2) 零件建模: 指零件的建模活动, 通常可以分为多个特征建模子活动, 如图 2 的 P1、P2。

(3) 零件选型: 指设计过程中零件型号或类别的选取, 如图 2 中的 P4 与 P5 的选型。零件选型的结果使得零部件集合发生变化而引起设计过程的变化, 其前置活动是零件选型所需参数的计算或推理过程。

(4) 特征建模: 指零件特征的建模活动, 如图 2 中的 F1。特征建模活动可以分为两种类型, 一种是基于模板的创建, 另一种是自由建模。前者通常拥有一个给出确定几何特征、参数集以及完整特征与参数关系的模板; 后者通常没有固定的几何形状, 需要设计人员根据设计需求灵活处理。

(5) 特征选型: 指零件特征的选取工作, 如图 2 中的 F2 与 F3 的选型。与零件选型活动类似, 其前置活动是特征选型所需参数的计算或推理活动。

(6) 参数推理或计算: 指参数的计算活动或者借助一些企业或国家标准等完成的推理过程, 如图 2 中的 Pa11。参数集中涉及到的参数不仅指零部件的结构参数还包括一些中间值如相关系数、工作载荷等。

本文主要研究在产品的横向变型设计过程中, 由于产品配置结构的变化如零件选型和特征选型而导致的设计活动及其顺序的动态性变化, 这就要求在描述变型产品设计活动模型时应尽可能覆盖这一产品可能包含的各种零件和特征, 因此本文所述方

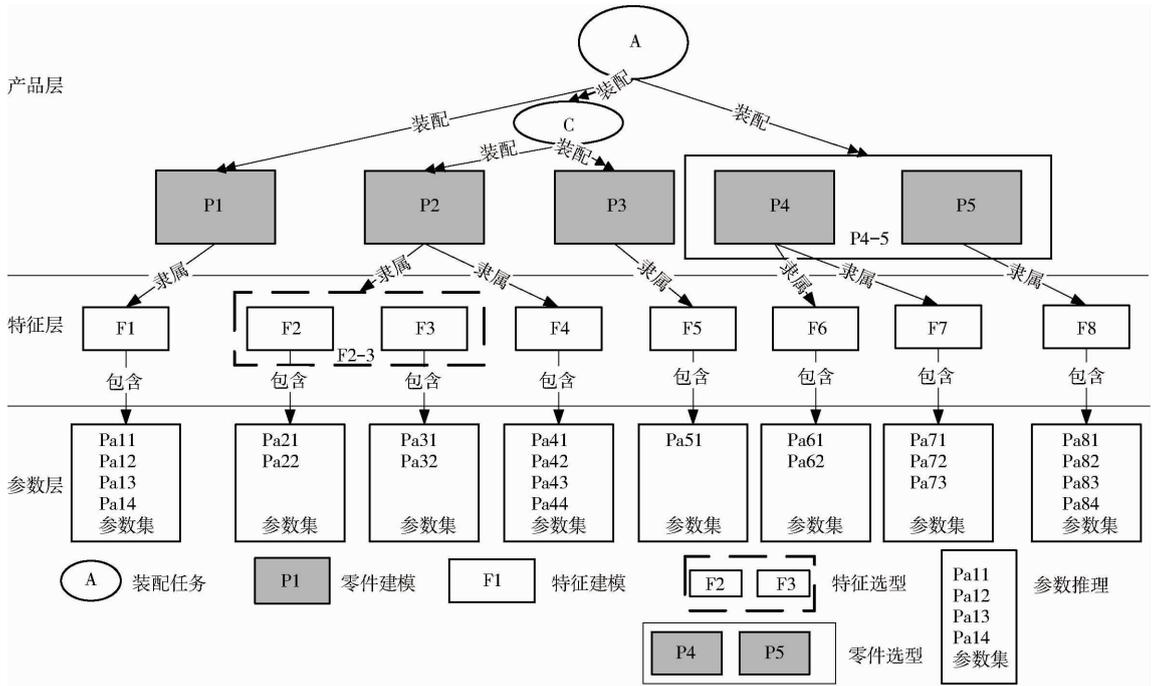


图2 变型设计活动层次模型

Fig.2 Variant design activity hierarchy model

法更加适合于系列化产品的变型设计过程。

## 2 设计元素间的约束关系

在Steward定义的DSM中,用矩阵的行列元素表示设计过程中的活动,用矩阵的非对角线单元格来表示对应的行列元素之间的联系,用矩阵单元相对于对角线的上下位置来描述对应行列元素之间联系的方向<sup>[14]</sup>。在产品的设计过程中,涉及到大量的设计活动以及活动的关系,这种关系可以通过约束的方式表达出来,为此本文引入设计约束的概念。设计约束反映了产品设计参数之间的依赖性,体现了产品开发过程中各层次、各功能活动间对应的产品结构中各种参数的依存关系<sup>[15]</sup>。从设计约束的角度来讲,一个工程设计问题就是在一系列设计规定的规定下,为各设计参数寻找适合的值来满足这些设计约束,因此很多学者将设计问题看作约束满足问题(Constraint satisfaction problem, CSP)<sup>[16-17]</sup>。

在变型设计过程中,根据设计过程输入、输出元素在空间、能量、信息、物料之间的联系<sup>[18-20]</sup>,可以将设计约束分为函数约束关系、几何约束关系、规则约束关系、分解约束关系4种类型,如表1所示。

函数约束关系为各参数间的定量表示,如各种距离、曲率半径等;几何约束关系是指对产品结构的定性表示,主要用来表征特征间的相对位置信息,如对称、平行等关系,主要体现在特征层的各特征之间;规则约束关系主要指需要查取相关标准或者由

表1 变型设计约束关系

Tab.1 Variant design constraint relation

设计约束类型	输入信息	输出信息	优先级数值
函数约束关系	参数	参数	1
几何约束关系	特征	特征	2
规则约束关系	特征、参数	参数	1
		函数约束关系	2
		几何约束关系	2
		规则约束关系	2
分解约束关系	参数、零部件	特征配置信息	3
		零部件配置信息	4
分解约束关系	参数、零部件	特征、产品	4

if..., then...才能表达的关系;分解关系主要表达对象间的从属地位,反映了对象间的分解结构,对应设计活动层次分解模型。

根据以上所述的设计活动中约束关系的定义,自上而下遍历产品设计活动层次模型,便可得到附加了设计约束的设计活动层级结构模型,如图3所示。

设计约束中的优先级数值越大,表明两个设计活动之间的依赖性越强,此时的设计活动将优先被满足,即高优先级的设计约束在决定设计元素所对应设计活动的前后置关系时发挥主导作用。

## 3 设计过程动态规划方法

由变型设计的6种活动类型可知,在变型产品设计过程中由于工艺改进、需求调整、设计环境变化等原因会引起产品的配置结构的变化。这种动态性

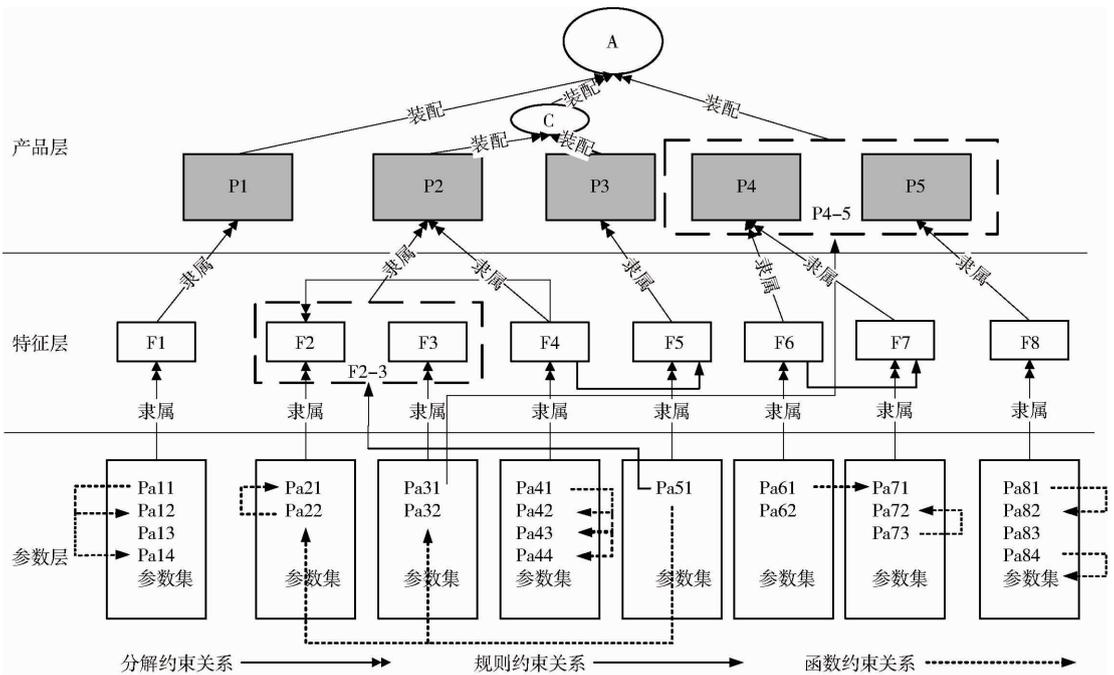


图 3 附加设计约束的设计活动层次模型

Fig. 3 Design activity hierarchy model with additional design constraints

主要表现为产品零件选型和特征选型活动,而传统的 DSM 并不能反映因为这种动态性而引起的设计任务的变化。因此,本文提出虚拟活动的概念,通过对虚拟活动的打包和分解操作来实现基于 DSM 的变型产品设计活动过程的动态规划。

根据产品变型设计中设计元素变化的特性,动态设计活动如图 3 中的 P4 和 P5,它往往会影响到后续活动执行路径。而对 P3、F5 这类静态设计活动而言,并不会对后续设计活动的执行顺序产生影响,因此可以考虑将动态设计活动打包成一个虚拟的设计活动。如图 4 所示, A2、A3 及其后续活动为设计活动过程中两条可选的活动路径,二者的实际执行路径主要由 A1 中的参数计算或推理过程决定,而 DSM 是无法表现这种动态分支过程结构的,因此将 A2、A3 及其后续活动打包成虚拟设计活动 A2-3。

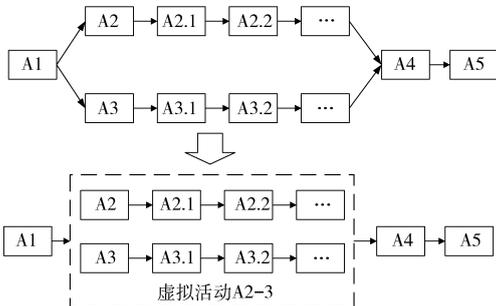


图 4 虚拟活动的打包

Fig. 4 Virtual activity package

将图 3 中每一个设计活动映射为 DSM 的行列元素,得到初始 DSM,如图 5 所示。映射规则如下:

(1) 如果 DSM 单元格对应的设计活动间存在

设计约束,根据优先级数值对相应的单元格进行赋值。

(2) 零件建模类活动不映射为 DSM 行列元素,只映射对应的特征建模活动。

(3) 零件选型和特征选型类活动的下级元素不进行遍历与映射,只将其映射为一个虚拟设计活动。

(4) 对于虚拟活动映射对应设计元素,取包含的所有下层设计活动的设计约束中优先级最大的作为单元格赋值。

初始DSM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	1		4					4	4				4		4
F1	2			4	4	4									
Pa11	3														
Pa12	4			1											
Pa13	5														
Pa14	6			1											
F2-3	7														3
F4	8						2								
Pa41	9														
Pa42	10								1						
Pa43	11									1					
Pa44	12										1				
F5	13							2							
Pa51	14														
P4-5	15														

图 5 初始 DSM

Fig. 5 Initial DSM

由于在初始 DSM 中还存在着多个虚拟设计活动,如 F2-3、P4-5 等,因此需要采用 DSM 动态规划的方法逐一对它们分解才能得到完整、可执行的产品设计活动过程。使用 DSM 进行动态规划的步骤如下:

(1) 对初始 DSM 矩阵进行划分和撕裂操作,得

到初始产品设计活动过程模型 M,如图 6 所示。

M		3	5	9	14	4	6	7	10	11	12	2	8	15	13	1
Pa11	3															
Pa13	5															
Pa41	9															
Pa51	14															
Pa12	4	1														
Pa14	6	1														
F2-3	7		3													
Pa42	10		1													
Pa43	11		1													
Pa44	12		1													
F1	2	4	4		4	4										
F4	8		4				2	4	4	4						
P4-5	15			3			3									
F5	13			4							2					
A	1						4			4	4	4	4			

图 6 初始产品设计活动过程模型 M

Fig. 6 Initial product design activity process model M

(2)根据初始产品设计活动过程模型 M 中行列元素排列顺序依次执行设计任务,当遇到虚拟设计活动对应的行列元素时,根据设计需求或约束关系进行相应的零件或特征选型,选型的过程对应着 DSM 中行列元素的分解或单元格取值调整的过程,得到后续矩阵 M1。如图 7 所示,参数 Pa51 决定了在 F2-3 特征选型过程中选择特征 F3。

M1		3	5	9	14	4	6	16	17	7	10	11	12	2	8	15	13	1
Pa11	3																	
Pa13	5																	
Pa41	9																	
Pa51	14																	
Pa12	4	1																
Pa14	6	1																
Pa31	16																	
Pa32	17			1														
F3	7					4	4											
Pa42	10			1														
Pa43	11			1														
Pa44	12			1														
F1	2	4	4		4	4												
F4	8		4					4	4	4								
P4-5	15			4			3											
F5	13										2							
A	1							4			4	4	4	4				

图 7 后续矩阵 M1

Fig. 7 Following matrix M1

(3)对 M1 进行划分和撕裂操作,得到产品设计活动过程模型 M1.1,如图 8 所示。

(4)按照 M1.1 中行列元素排列顺序遍历对应后续矩阵,当遇到虚拟活动时仍然进行行列元素的分解或单元格取值调整等操作,然后对得到的后续矩阵进行划分和撕裂操作,如此逐层分解与遍历,直至遍历完后续矩阵所有行列元素,便得到一个完整的变型设计任务的设计活动执行过程模型。如图 9 所示,如果参数 Pa31 决定 P4-5 零件选型时选择零件 P5,这时经过划分和撕裂操作后便得到最终的设计活动过程模型 M2。

在实际的操作过程中,根据不同的产品配置或者规则条件,进行相应的零件选型或特征选型,

M1.1		3	5	9	14	16	4	6	17	10	11	12	15	7	2	8	13	1
Pa11	3																	
Pa13	5																	
Pa41	9																	
Pa51	14																	
Pa31	16																	
Pa12	4	1																
Pa14	6	1																
Pa32	17			1														
Pa42	10			1														
Pa43	11			1														
Pa44	12			1														
P4-5	15				3													
F3	7					4			4									
F1	2	4	4					4	4									
F4	8		4							4	4	4						
F5	13			4												2		
A	1												4	4	4	4	4	

图 8 设计活动过程模型 M1.1

Fig. 8 Design activity process model M1.1

M2		3	5	9	14	16	4	6	17	10	11	12	18	19	20	21	15	7	2	8	13	1	
Pa11	3																						
Pa13	5																						
Pa41	9																						
Pa51	14																						
Pa31	16																						
Pa12	4	1																					
Pa14	6	1																					
Pa32	17			1																			
Pa42	10			1																			
Pa43	11			1																			
Pa44	12			1																			
Pa81	18												1										
Pa82	19													1									
Pa83	20														1								
Pa84	21															1							
F8	15												1	1	1	1							
F3	7					4			4														
F1	2	4	4					4	4														
F4	8		4							4	4	4											
F5	13			4																	2		
A	1																			4	4	4	4

图 9 最终的设计活动过程模型

Fig. 9 Final design activity process model

然后将对应的虚拟设计活动进行逐一的分解,便得到在实际的产品配置或规则条件下的产品变型设计的优化过程 DSM。因此,本方法不需要遍历所有可能的设计过程,缩短了设计时间,提高了设计效率。

### 4 应用实例

以深沟球轴承为例,其产品结构主要分为外圈、内圈、保持架、钢球、防尘盖等几个主要部件,如图 10 所示。在轴承设计的实际过程中,涉及元素、参考手册、经验公式等众多数据 400 多个,另外设计元素间设计约束关系复杂,一些关键参数的变换往往会引起设计过程的动态变化,因此对目前的大多数

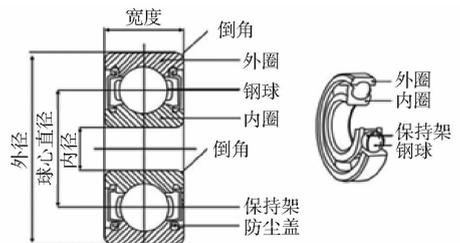


图 10 深沟球轴承结构图

Fig. 10 Structure of deep groove ball bearing

轴承设计和制造厂家来说设计工作耗时费力,且经常发生设计过程反复和迭代的情况。

设计约束的参数级设计过程动态规划方法。深沟球轴承作为典型的变型产品,其产品层次结构模型如图11所示。

以单列深沟球轴承的设计过程为例,说明基于

图11所示。

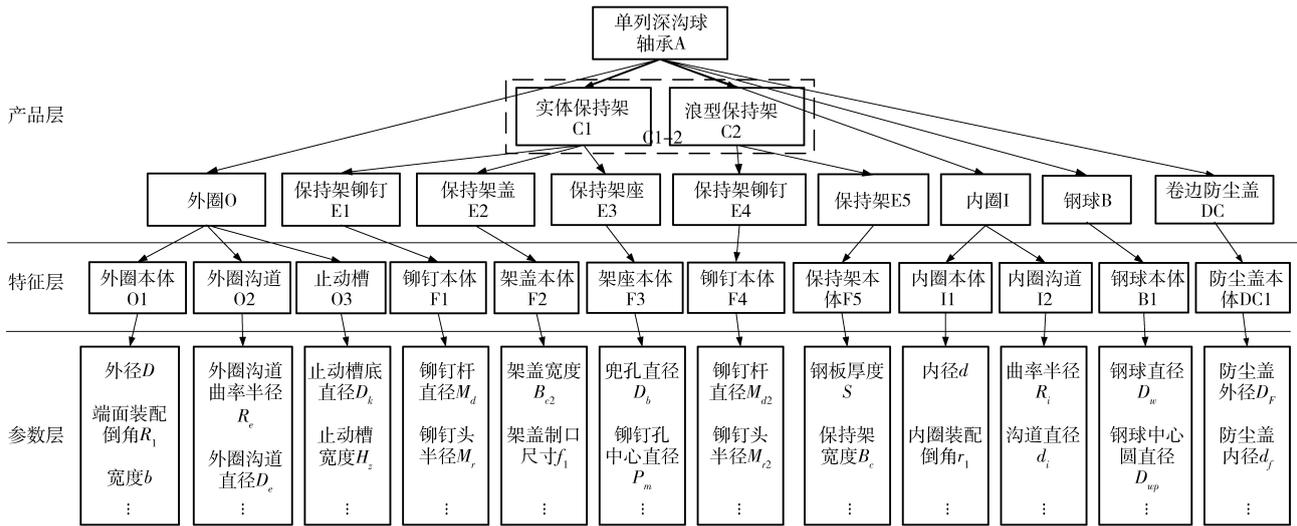


图11 深沟球轴承层次结构模型

Fig. 11 Deep groove ball bearing hierarchy model

轴承的设计主要是根据设计手册、资料以及设计经验公式等完成众多参数层的计算和推理,以及部分零件选型工作,因此需要明确其结构设计的全

部参数获取模型。这里选取零件选型任务为C1(实体保持架)时,参数级设计过程的设计约束情况,如表2所示。

表2 深沟球轴承(选取实体保持架)的参数设计实例

Tab.2 Example of design parameters for deep groove ball bearing model

编号	设计参数	设计任务	公式
#01	外径 $D$	外圈本体	需求输入
#02	外圈端面装配倒角 $R_1$	外圈本体	(查表) 国标轴承设计手册, 由#01 确定
#03	外圈端面非装配倒角 $R_2$	外圈本体	(查表) 国标轴承设计手册, 由#01 确定
#04	外圈宽度 $b$	外圈本体	需求输入
#05	外圈沟道曲率半径 $R_c$	外圈沟道	(查表) 企业标准, 由#29 $D_w$ 确定
#06	外圈沟道直径 $D_e$	外圈沟道	(公式) $D_e = d_i + 2D_w + u$ , 由#29、#27 确定
#07	外圈沟道挡边直径 $D_2$	外圈沟道	(公式) $D_2 = D_e - K_d D_w$ , 由#29、#06 确定
#08	止动槽底直径 $D_k$	止动槽	(条件) if (轴承类型), then $f(D)$ , 由#01 确定
#09	止动槽宽度 $H_z$	止动槽	(条件) if (轴承类型), then $f(D)$ , 由#01 确定
#10	止动槽至基准端面的距离 $H_w$	止动槽	(条件) if (轴承类型), then $f(D)$ , 由#01 确定
#11	铆钉杆直径 $M_d$	铆钉本体	(查表) 企业标准, 由#29 确定
#12	铆钉头半径 $M_r$	铆钉本体	(查表) 企业标准, 由#29 确定
#13	铆钉头长度 $M_e$	铆钉本体	(条件) if ( $M_d \leq 3.1$ ), then $\{0.3\}$ ; else $\{0.5\}$ , 由#11 确定
#14	铆钉杆有效长度 $M_e$	铆钉本体	(查表) 企业标准, 由#29 确定
#15	保持架盖宽度 $B_{c2}$	架盖本体	(公式) $B_{c2} = 0.45b - K_1$ , 由#04 确定
#16	保持架盖制口尺寸 $f_1$	架盖本体	(公式) $f_1 = D_2 - 0.7D_w$ , 由#29、#07 确定
#17	保持架盖制口凹下部分深度 $f_2$	架盖本体	(查表) 企业标准, 由#16 确定
#18	保持架兜孔直径 $D_b$	架座本体	(公式) $D_b = D_w$ , 由#29 确定
#19	铆钉孔中心直径 $P_m$	架座本体	(条件) if ( $d \leq 100$ ), then $P_m = D_{wp}$ , 由#23、#30 确定
#20	两兜孔中心间距 $m_1$	架座本体	(公式) $m_1 = D_2 \sin(\pi/Z)$ , 由#07、#31 确定
#21	铆钉孔中心间距 $m_2$	架座本体	(公式) $m_2 = P_m \sin(\pi/Z)$ , 由#19、#31 确定
#22	铆钉孔中心与兜孔中心间距 $m_3$	架座本体	(公式) $m_3 = P_m \sin(\pi/(2Z))$ , 由#19、#31 确定
#23	内径 $d$	内圈本体	需求输入
#24	内圈装配倒角 $r_1$	内圈本体	(查表) 国标轴承设计手册, 由#23 确定
#25	内圈非装配倒角 $r_2$	内圈本体	(查表) 国标轴承设计手册, 由#23 确定
#26	内圈沟道曲率半径 $R_i$	内圈沟道	(公式) $R_i = D_w$ , 由#29 确定

续表 2

编号	设计参数	设计任务	公式
#27	内圈沟道直径 $d_i$	内圈沟道	(公式) $d_i = D_{wp} - D_w$ , 由#29、#30 确定
#28	内圈挡边直径 $d_2$	内圈沟道	(公式) $d_2 = d_i + K_d D_w$ , 由#27、#29 确定
#29	钢球直径 $D_w$	钢球本体	(条件) $K_{\min}(D - d) < D_w < K_{\max}(D - d)$ , (查表) 国标轴承设计手册, 由#23、#01 确定
#30	钢球中心圆直径 $D_{wp}$	钢球本体	(公式) $D_{wp} = 0.5075(D + d)$ , 由#23、#01 确定
#31	钢球个数 $Z$	钢球本体	(经验公式) $Z = 195 / (2 \arcsin(D_w / D_{wp}) 180 / \pi) + 0.5$ , 由#29、#30 确定
#32	防尘盖外径 $D_F$	防尘盖本体	(公式) $D_F = D_2 + 2\Delta m_2 - \Delta F$ , 其中 $\Delta m_2$ 、 $\Delta F$ 由#01 确定, 即 $D_F$ 由#01、#07 确定
#33	防尘盖内径 $d_f$	防尘盖本体	(公式) $d_f = d_2 + 0.4$ , 由#28 确定
#34	防尘盖钢板厚度 $S_F$	防尘盖本体	(查表) 企业标准, 由#01 确定
#35	卷边圆弧半径 $R_F$	防尘盖本体	(公式) $R_F = 0.75b_1 - S_F$ , 其中 $b_1$ 由#01 确定, 即 $D_F$ 由#01、#34 确定
#36	卷边宽度 $B_F$	防尘盖本体	(公式) $B_F = 2.678b_1$ , 由#01 确定

其中多数的设计参数的值可以通过函数约束关系和规则约束关系得到, 其中需要公式计算得到的参数 17 个; 需要根据条件或规则得到的参数 6 个; 需要根据国家或企业标准查得的参数 10 个, 根据需求输入的参数有 3 个。将这些约束关系挖掘出来并加以管理, 有利于降低设计过程中对经验的依赖。

根据本文定义的设计活动间的约束关系, 自上而下地遍历设计活动层次模型将图 11 中的每个设计活动映射为 DSM 的行列元素, 得到初始 DSM 如图 12 所示, 并完成划分及撕裂操作得到图 13 所示的初始设计活动过程模型 M。

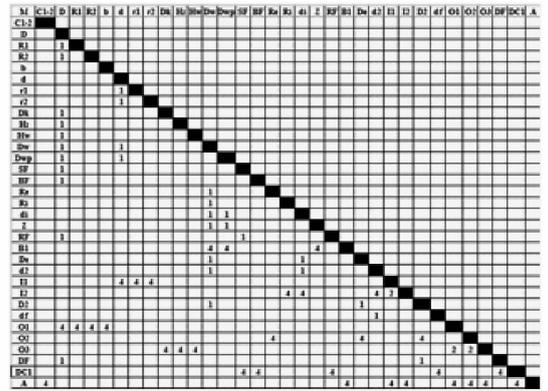


图 13 初始设计活动过程模型 M

Fig. 13 Initial design activity process model M

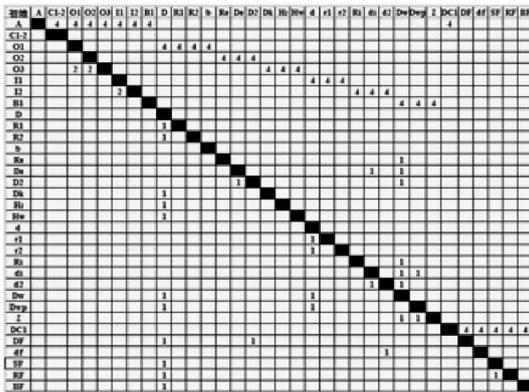


图 12 初始 DSM

Fig. 12 Initial DSM

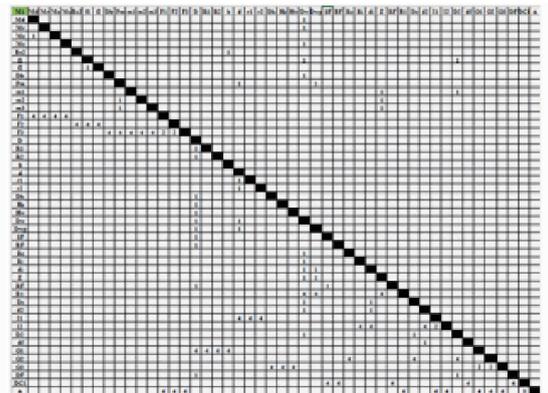


图 14 后续矩阵 M1

Fig. 14 Following matrix M1

由于初始设计活动过程模型 M 中还存在虚拟活动 C1-2。需要根据设计需求或约束关系, 对 C1-2 进行进一步分解才能完成 DSM 的动态重构, 在本文中, 零件选型时选择 C1 实体保持架, 即将 C1-2 分解得到 F1、F2、F3 特征建模任务以及对应的参数计算或推理活动, 得到后续矩阵 M1, 如图 14 所示。对后续矩阵 M1 进行划分、撕裂操作得到最终的设计活动过程模型 M1.1, 如图 15 所示。

为了实现对设计过程的动态规划, 提高对规划过程的自动辅助支持程度, 便于企业快速完成轴承

设计过程, 基于本文所述的设计方法, 为该国内大型的轴承设计和制造企业创建了相关的轴承产品设计向导。首先根据企业轴承设计资料, 建立产品层次结构模型, 以及轴承设计所需的设计标准、材料表、标准件库等, 在此基础上定义设计元素间约束关系, 相关系统界面如图 16、17 所示。

在完成基本的设计数据的录入和维护工作后, 进行轴承设计向导导航界面的设计与后台相关数据及应用程序调用代码的编制, 其中设计过程建模、虚拟活动的打包以及分析计算等环节在向导后台完

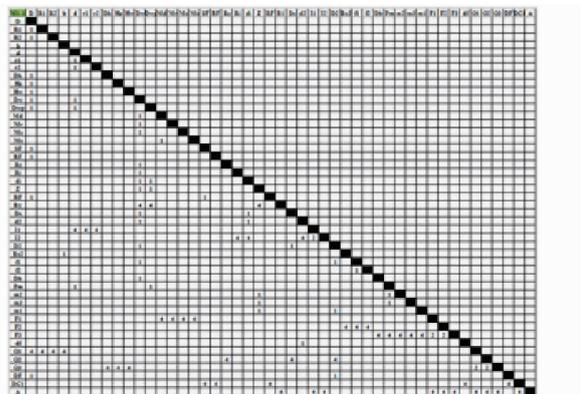


图 15 最终的设计活动过程模型 M1.1  
Fig. 15 Final design activity process model M1.1

并完成工程图的创建,如图 18、19 所示。



图 18 轴承设计向导界面示例  
Fig. 18 Design wizard interface



图 19 根据设计参数完成工程图创建  
Fig. 19 Creation of construction drawing according to design parameters

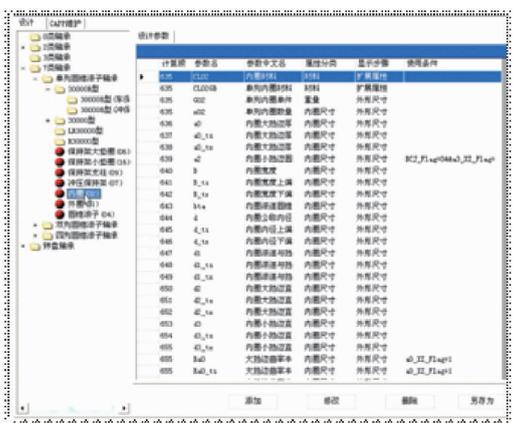


图 16 某类轴承产品层次结构模型的维护  
Fig. 16 Maintenance of hierarchy model of bearing product

实践表明,设计人员运用设计向导进行轴承的设计工作,设计周期从 3 个工作日缩短到 3 h,产品设计向导对设计效率提高的效果非常显著。

### 5 结束语

在变型产品参数级设计活动模型的基础上,定义了设计过程约束关系及相应的优先级数值,同时引入虚拟活动的概念,建立了动态设计活动过程模型,采用“过程规划与执行交替进行”的动态规划策略,根据设计的阶段性进展,不断调整活动的规划,从而保证了设计过程动态变化时执行顺序的最优。相对于原有的依靠经验的产品开发方式而言,依靠程序的过程向导和自动计算等功能,设计效率得到大幅提高。实践证明,该方法有助于设计向导工具的构建,提高了设计过程中数据维护的便利性,同时降低了对设计人员经验的要求。

### 参 考 文 献

- 1 BROWNING T R. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2001, 48(3): 292-306.
- 2 冯国奇,王成恩. 基于设计结构矩阵的产品设计过程管理[J]. 信息与控制, 2005(4): 470-475.  
FENG Guoqi, WANG Cheng'en. Product design process management based on design structure matrix [J]. Information and Control, 2005(4): 470-475. (in Chinese)
- 3 刘电霆,周德俭. 基于区间数设计结构矩阵的任务分解与重组[J]. 机械设计与研究, 2009(6): 7-9.  
LIU Dianting, ZHOU Dejian. Task decomposition & recombination design structure matrix based on interval number [J]. Machine

- Design and Research, 2009(6): 7-9. (in Chinese)
- 4 李靓,武健伟,石浩然. 基于 DSM 的耦合模块划分方法的研究[J]. 机械设计与制造, 2008(8): 223-225.  
LI Jing, WU Jianwei, SHI Haoran. Research on the improved DSM arithmetic for coupling task order programming [J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(8): 223-225. (in Chinese)
- 5 SMITH S, YEN C C. Green product design through product modularization using atomic theory [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(6): 790-798.
- 6 ALGEDDAWY T, ELMARAGHY H. Optimum granularity level of modular product design architecture [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013, 62(1): 151-154.
- 7 范志君,姜兆亮,李智. 基于性能满意度的产品配置与变型设计范围界定算法[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 198-204. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20120836&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120836&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.036.  
FAN Zhijun, JIANG Zhaoliang, LI Zhi. Product configuration and variant design's scope definition algorithm based on customers' performance satisfaction [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 198-204. (in Chinese)
- 8 SHARMAN D M, YASSINE A A. Characterizing complex product architectures [J]. Systems Engineering, 2004, 7(1): 35-60.
- 9 齐从谦,贾伟新. 支持变型设计的装配模型建库方法研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 38-42.  
QI Congqian, JIA Weixin. Research on assembly modelling for product variant design [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(1): 38-42. (in Chinese)
- 10 WANG A, KOC B, NAGI R. Complex assembly variant design in agile manufacturing. Part I: system architecture and assembly modeling methodology [J]. IIE Transactions, 2007, 37(1): 17-33.
- 11 徐新胜,李丹,严天宏,等. 尺寸约束冲突延迟方法及其在变型设计中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(2): 254-260.  
XU Xincheng, LI Dan, YAN Tianhong, et al. Dimension constraint conflicts delayed methods and its applications in variant design [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2012, 18(2): 254-260. (in Chinese)
- 12 PAHL G, BEITZ W. Engineering design: a systematic approach [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- 13 石浩然,武健伟,李靓,等. 设计知识集成的过程管理方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(3): 527-535.  
SHI Haoran, WU Jianwei, LI Jing, et al. Process management approach with design knowledge integration [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(3): 527-535. (in Chinese)
- 14 STEWARD D V. The design structure system: a method for managing the design of complex systems [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 1981, EM-28(3): 71-74.
- 15 陈庭贵,琚春华. 基于设计结构矩阵的任务规划新方法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(7): 1366-1373.  
CHEN Tinggui, JU Chunhua. New task scheduling method based on design structure matrix [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(7): 1366-1373. (in Chinese)
- 16 OSTROSI E, HAXHIAJ L, FUKUDA S. Fuzzy modelling of consensus during design conflict resolution [J]. Research in Engineering Design, 2012, 23(1): 53-70.
- 17 ALLISON J T, PAPALAMBROS P Y. Consistency constraint allocation in augmented lagrangian coordination [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2010, 132(7): 917-926.
- 18 YASSINE A, DAN B. Four complex problems in concurrent engineering and the design structure matrix method [J]. Acoustics, Speech, and Signal Processing Newsletter IEEE, 2003, 11(3): 165-176.
- 19 SOSA M E, EPPINGER S D, ROWLES C M. The misalignment of product architecture and organizational structure in complex product development [J]. Management Science, 2004, 50(12): 1674-1689.
- 20 SERED Y, REICH Y. Standardization and modularization driven by minimizing overall process effort [J]. Computer-Aided Design, 2003, 38(5): 405-416.