机械产品装配关系建模

王 波 唐晓青 耿如军

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191) (北京亚新科天纬油泵油嘴股份有限公司，北京 100071)

摘 要：针对机械产品装配结构和装配关系描述问题，提出了面向机械产品装配过程的“装配树”概念. 以设计装配图、产品结构树为基础，结合装配过程、装配层次结构和装配顺序特征构建了“装配树”模型，并解决了产品结构树的功能延伸和描述完备性问题. 在产品“功能-结构”映射关系明确的前提下，提出了以产品功能为中间转换载体的装配树层次结构建模思路，给出了“装配树”构建方法和步骤. 最后以某型柱塞式喷油泵泵油系部件装配树构建为例，验证了“装配树”概念的可行性和构建方法的可操作性.

关 键 词：机械产品；装配结构；装配关系；装配树

中图分类号：TH 122；TH 165^{+}.4

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)01-0071-06

Modeling for assembly structure in mechanical product

Wang Bo Tang Xiaoqing

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Geng Rujun

(Beijing ASIMCO Tianwei Oil Pump and Injector Company, Beijing 100071, China)

Abstract: The model of assembly tree was put forward to describe the assembly structure of mechanical products and their assembly relations. The assembly tree model can deal with the functional extension and strengthen the description of the product structure tree which was defined by the designer through assembly drawings. Product structure tree combined with the operations in assembly process, logic relations and other characteristics. The mathematical definition and modeling of assembly tree were proposed on the basis of its formalized description. The idea to take product function as the transforming carrier for the modeling of assembly tree, as well as the construction methodology and steps for assembly tree were also brought forward under the precondition that the mapping relationship between the product function and its structure was definite. The case in assembly process of a plunger injection pump was studied, and proved the assembly tree model feasible.

Key words: mechanical product; assembly structure; assembly relationship; assembly tree

目前机械制造企业进行装配过程设计时的输入主要是产品装配图和产品结构树，它们所能表达的主要信息是产品设计的层次组成关系、零部件间的逻辑信息和数量信息，而对于零部件在装配过程中的层次结构关系和顺序关系则不能给出[1]. 另一方面，产品结构树上的零部件层次关系并不能完全反映装配过程中的零部件层次结构关系，尤其是对于产品结构树中同一层次零部件较多情况下，考虑装配过程的零件层次结构和顺序关系就显得尤为必要. 国内外学者在产品装配模型研究方面提出了对装配体静态结构进行描述的图结构模型、树表达的层次结构模型和基于虚链结构的混合模型. 图结构模型的特点是关系表达较直观，但与产品的实际结构不一致，不能表达零件间的层次关系；层次模型是根据零部件层次关系以树的形式表达装配并组织产品，能体现设计

收稿日期：2008-12-16

作者简介：王 波(1981—)，男，四川南充人，博士生，wangbo@me.buaa.edu.cn.

意图和产品结构,但各零件之间装配关系的描述不够直观;虚链模型结合了图结构模型和层次模型的优点,以层次模型为基础,各子装配体零件间的装配关系通过虚链表达,这种表示结构一致性维护较困难[2].基于此,为解决产品结构树的功能延伸和描述完备性问题,本文在设计装配图和产品结构树的基础上,充分考虑到装配过程的动态性,提出了面向装配过程的机械产品"装配树"概念,建立了机械产品装配树模型,给出了构建装配树的方法和步骤.

1 装配树概念定义

从产品设计过程到装配工艺设计过程的问题可知,在产品设计到装配工艺设计过程中缺乏一个必要的过渡过程和一个必要的信息载体.过渡过程是产品设计层次结构到装配层次结构的转换过程,信息载体则能够全面反映产品装配层次结构、各装配体之间的装配关系和装配顺序."装配树"概念就是为了解决上述问题提出的一个新理念,其理念依据是产品装配过程,其信息输入是设计装配图和产品结构树.

定义 1 装配树是产品设计过程到装配过程的完备信息载体,包括3方面信息:①零部件装配过程层次结构信息;②同层次各装配体之间的装配关系信息;③同层次各装配体之间的装配顺序信息.

装配树概念提出的意义主要有3方面:①在产品结构树基础上集成了装配层次结构、装配关系和装配顺序信息,延伸了产品结构树的功能,解决了描述完备性问题;②最大限度地减少由于信息缺失而造成的装配工艺设计过程反复和协调,提高工作效率;③零部件的装配特征和装配关系以及装配顺序信息,为虚拟装配技术的研究与应用提供了基础信息支持[3].

2 装配树模型

2.1 中间装配体的概念和特点

在机械产品流水装配线上流转的不是一个功能完备或者结构完整的实体,而是为实现产品装配过程而存在的一种必要的动态过渡装配体,将这种过渡装配体称之为中间装配体.

中间装配体的主要特点如下:①在一条串行装配生产线上,中间装配体贯穿整个装配线的全过程,任意时刻、任意装配活动中,有且仅有一个中间装配体,即中间装配体数量 $T_i(t)\equiv 1$(i 为装配活动序号,$i=1,2,\cdots,n$;t 为任意时刻).②随着装配活动的持续进行,中间装配体上不断增加零部件,功能不断完善,最终转化为成品.因此,中间装配体具有相对时间 t 的增量特性.③基于特点②,在不同时刻、不同装配活动中,中间装配体的组成是不断变化的,需要进行必要区分.

2.2 装配树建模

2.2.1 数学定义

要建立装配树模型,需要对装配树的组成形式、组成元素及其约束条件进行基本数学定义如下.

1) 装配树是由一个根节点 P_d,n 个数据节点 d 及其之间的相互关系 R 组成的多元树($n\geqslant 1$,R 的数量 $N_R\geqslant 1$).数据节点在纵向上具有以中间装配体为装配过程主线的"线状树"结构特点,反映了产品装配过程零部件层次结构关系;同层次数据节点在横向上具有序列结构特点,反映了同层次装配体之间的装配顺序关系.一些较为通用的部件或组件如在多个不同的地方用到,为防止出现跨层次的网状混乱,在模型中不同层次出现同样的部件或组件采用不同的编号对其区别.

2) 对于任意数据节点 $d(d\in D)$,D 为数据节点集合,有 $T(d)\in H$,$T(d)$ 表示 d 的类型.

$$H=\{M,P,C,S\} \tag{1}$$

其中,M 表示中间装配体;P 表示零件;C 表示组件;S 表示部件.

3) 同一层次的数据节点中有且只有一个子节点,其它都是叶节点(节点是部、组件的可独立作为一棵子树亦具有该特点,即并行装配亦适合),即仅允许有且只有一个中间装配体节点.则各数据节点组合能够成为装配树的充分条件是:

$$\begin{aligned} P^n=\{d_i^n \mid & N_{T(d_i^n)=L}\geqslant 1, N_{T(d_i^n)=C}\geqslant 1,\\ & N_{T(d_i^n)=S}\geqslant 1, N_{T(d_i^n)=M}\geqslant 1 \wedge\\ & d_i^n\in D \wedge i,n,N\in \mathbf{N}\} \end{aligned} \tag{2}$$

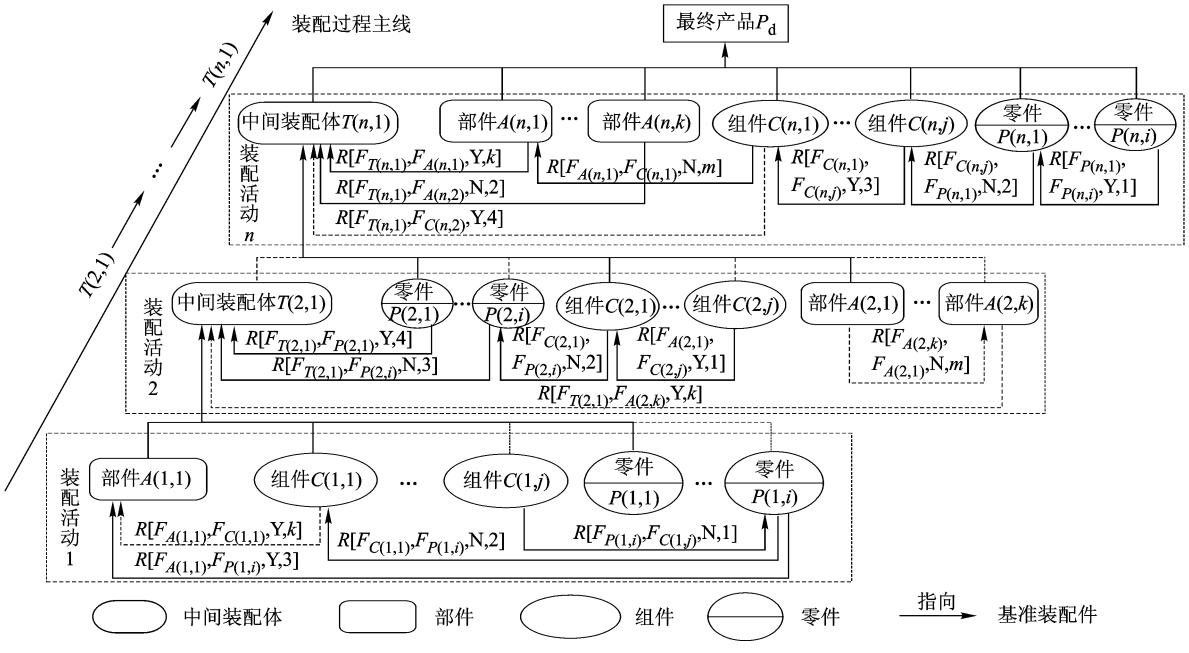
其中,P^n 表示装配树第 n 层的数据节点总和;d_i^n 表示装配树第 n 层的任意数据节点.

4) 每个节点关系 R 带有一个四元组$\langle a,b,c,d\rangle$.其中,a 表示装配关系中基准装配件参与装配的特征;b 表示另一个非基准装配件参与装配的特征;c 表示表征该装配关系的装配特征是否是装配关键特征;d 表示该装配关系在该层次装配结构中的实现顺序.

2.2.2 形式化模型

在形式化描述和数学定义基础上,以装配基本单元作为数据节点,描述节点的层次结构关系、同层次零部件之间的装配关系和装配顺序信息就

构成了装配树形式化模型,如图 1 所示.



$R[F_{T(n,1)},F_{A(n,1)},Y,k]$—中间装配体 $T(n,1)$与部件 $A(n,1)$的装配关系;$F_{T(n,1)}$—$T(n,1)$的装配特征;$F_{A(n,1)}$—$A(n,1)$的装配特征;Y—关键装配特征;N—一般装配特征;k∈**N**;依此类推.

图 1　装配树形式化模型

1) 装配过程零部件层次结构关系.

装配过程零部件层次结构关系实质就是在装配过程中的各零、部、组件和中间装配体之间的组成关系.其数学表达就是各零、部、组件和中间装配体之间组成关系的表达,如式(3)所示,L 即为层次结构关系的总和.

$$L=\begin{cases}P_d=\{M_n,P_n,C_n,S_n\}\\M_n=\{M_{n+1},P_{n+1},C_{n+1},S_{n+1}\}\\P_n=\{p_{n1},p_{n2},\cdots,p_{ni}\}\\C_n=\{c_{n1},c_{n2},\cdots,c_{nj}\}\\S_n=\{s_{n1},s_{n2},\cdots,s_{nk}\}\\c_{nj}=\{p_1^{nj},p_2^{nj},\cdots,p_p^{nj}\}\\s_{nk}=\{c^{nk},p^{nk}\}\\c^{nk}=\{c_1^{nk},c_2^{nk},\cdots,c_q^{nk}\}\\p^{nk}=\{p_1^{nk},p_2^{nk},\cdots,p_t^{nk}\}\\c_q^{nk}=\{p_{q1}^{nk},p_{q2}^{nk},\cdots,p_{qr}^{nk}\}\end{cases}\tag{3}$$

其中,$i,j,k,n,p,q,t,r\in\mathbf{N}$;$P_d$ 表示产品的根节点,即最终产品;M_n 表示任意层次结构的中间装配体,每一层次的中间装配体有且只有一个,特别的,当 $M_n=\varnothing$时,将不存在下一层的子装配体;P_n 表示任意层次结构中的零件集合;C_n 表示任意层次结构中的组件集合;S_n 表示任意层次结构中的部件集合;$p_{n1},p_{n2},\cdots,p_{ni}$表示 P_n 包含的所有零件;$c_{n1},c_{n2},\cdots,c_{nj}$表示 C_n 包含的所有组件;$s_{n1},s_{n2},\cdots,s_{nk}$表示 S_n 包含的所有部件;$p_1^{nj},p_2^{nj},\cdots,p_p^{nj}$表示 c_{nj}中包含的所有零件;c^{nk}表示 s_{nk}中包含的组件集合;p^{nk}表示 s_{nk}中包含的零件集合;$c_1^{nk},c_2^{nk},\cdots,c_q^{nk}$表示 c^{nk}包含的所有组件;$p_1^{nk},p_2^{nk},\cdots,p_t^{nk}$表示 p^{nk}包含的所有零件;$p_{q1}^{nk},p_{q2}^{nk},\cdots,p_{qr}^{nk}$表 c_q^{nk} 包含的所有零件.

2) 同层次各装配体装配关系.

同层次各装配体装配关系主要是表达 3 个方面的信息:①装配关系的对象,即参与装配关系的装配体特征;②装配关系的类型,即装配体之间是以何种形式组合在一起的;③确定装配关系是否是关键装配特性.如下式所示:

$$R_T=\begin{cases}R=\{R^i\}\\R^i=\{R_1^i,R_2^i,\cdots,R_m^i\}\\R_m^i=R_m^i[a,b,c,d]\end{cases}\tag{4}$$

其中,R 表示装配产品所有装配关系的集合;R^i 表示任意层次中所有装配体装配关系集合;$R_1^i,R_2^i,\cdots,R_m^i$ 表示任意层次装配关系 R^i 中所有装配关系;$R_m^i[a,b,c,d]$是任意层次装配关系 R^i 中的任意装配关系的具体表现形式;$i,m=1,2,\cdots,n$;$a,b\in D$,a 为装配基准;$c\in[Y,N]$,Y 表示关键,N 表示非关键;$d=1,2,\cdots,n$.

3) 同层次各装配体装配顺序.

各装配体装配顺序其实质就是各装配体之间装配关系在装配过程中的实现顺序,如式(5).

$$S_T=\begin{cases}S^i=\{R_m^i[b,d]\}\\R_m^i[b,d]=1,2,\cdots,N\end{cases}\tag{5}$$

其中，$i,m\in\mathbf{N}$；S^i 表示任意层次的装配顺序集合；$R^i_m[b,d]$表示任意层次的装配顺序集合 S^i 中的所有元素；$R^i_m[b,d]=1,2,\cdots,N$ 表示任意元素 $R^i_m[x,z]$的具体取值，其值代表了相应的装配体参与装配的特征 b 的装配顺序.

3 装配树构建方法

产品装配过程的本质就是按照一定逻辑层次结构和先后顺序逐步实现产品各种功能的过程. 基于该思想，提出装配树总体构建思路是：以产品功能为中间转换载体，实现装配层次结构树的构建；在装配层次结构树的基础上，通过不断地按层次分析，依据设计装配图判定同层次各节点间的装配关系；再根据装配工艺知识库判定同层次各节点间的装配顺序；最后生成完整的装配树.

3.1 构建装配层次结构树

在装配树构建之前，产品详细设计方案已经确定，那么产品“功能-结构”映射关系也就完全确定. 因此，可以利用结构设计阶段产生的“功能-结构”映射表作为中间转换载体，围绕以功能为中心进行装配层次结构树构建. 具体的构建流程图如图 2 所示.

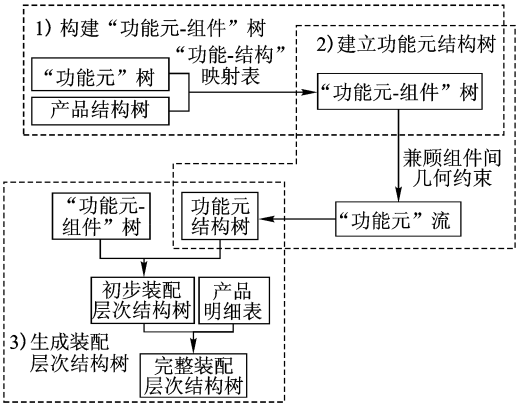


图 2 装配层次结构树构建过程

1) 构建“功能元-组件”树.

在功能设计阶段将总功能分解为各个子功能，子功能再往下分解，直到分解到有相应的组件支持其功能实现为止，这些由相应组件实现的最终功能就是功能元. 只要有相应的组件，不论组件多复杂，能支持其功能实现，即停止分解. 这里的组件粒度可粗可细，只要能够实现对功能的支持，它可以是一个部件，也可以是一个组件或零件. 功能元按粒度也可分为产品级、部件级、组件级功能元. 完整功能元树的构建应首先对产品功能进行产品级功能元分解，对支持其功能实现的组件是部件和组件的，再进行部件级和组件级的功能元分解，直至所有支持组件都是零件. “功能元”树的特点是所有叶节点都由功能元构成.

在建立完整的“功能元”树之后，再针对每一个功能元，对照产品结构树可以确定对应的一个支持其功能实现的组件（功能域到结构域的映射关系已定）. 该方法能有效保证装配过程完成后最终产品组成层次结构关系应与产品结构树的一致性，同时满足其组件支持功能元的唯一性. 通过该映射对应过程，形成“功能元-组件”树. 其“功能元-组件”树一般结构如图 3 所示.

2) 建立功能元结构树.

一般来讲，产品各项功能的实现具有一定的逻辑层次和先后顺序关系，这种关系的存在就是功能实现过程中的约束，这种约束关系应该在其功能逐步实现的装配过程中得到充分体现. 由于前面“功能元-组件”树已经建立，则在建立“功能元”流过程中同时需要兼顾到组件间的几何约束关系. 根据功能元之间的约束关系和逻辑关系，对“功能元”树各叶节点的功能元建立表征各个功能之间关系的“功能元”流图，如图 4 所示；将其逆时针 90°旋转，即可得到功能元结构树.

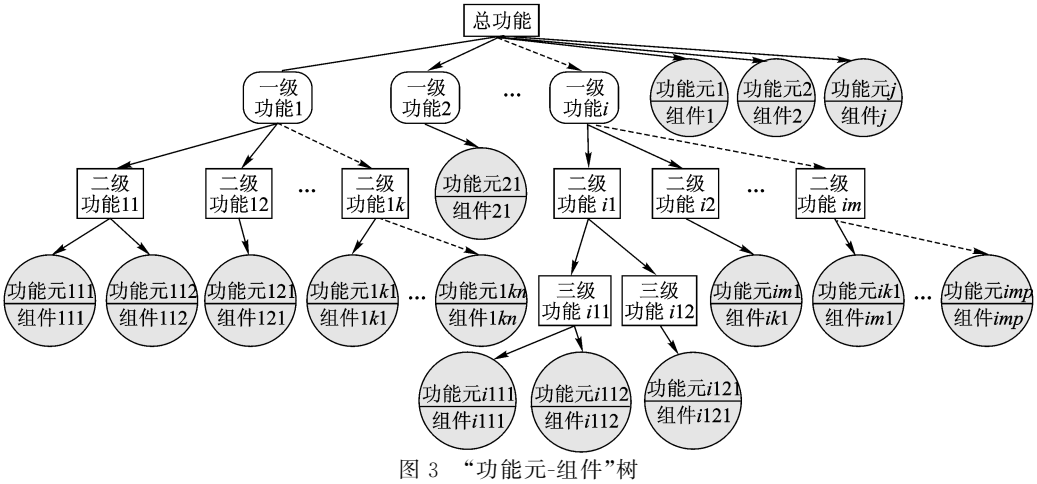


图 3 “功能元-组件”树

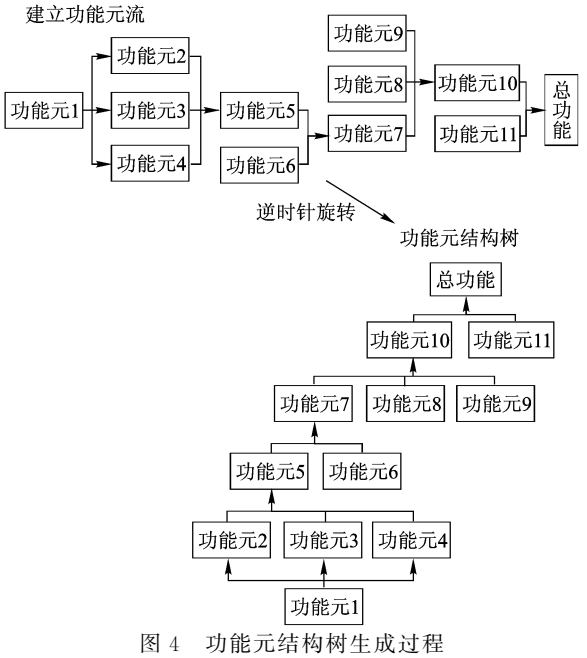


图 4　功能元结构树生成过程

3) 生成装配层次结构树.

首先对照“功能元-组件”树,在功能元结构树中对每个功能元用对应的支持组件将其替换,生成初步的装配结构树;之后根据产品明细表和部件、组件的子装配树,将树中部件、组件进一步细化,得到完整的装配层次结构树.

3.2　确定同层次装配体之间装配关系和关键装配特性

根据设计装配图所表达的装配体之间具有的装配特征和装配特征之间的装配关系,可以确定参与装配的特征及其装配关系. 每个企业由于其装配的具体产品不同,常见的装配关系也会有所不同,因此,应在实践中不断总结积累,形成相应知识,以供确定装配关系时参考.

在确定装配关系的同时,根据设计装配图的标注来确定关键装配特性. 如果装配图标明是关键装配特性,则记为“Y”,如果是一般装配特性,则记为“N”.

3.3　确定同层次装配体之间的装配顺序

通过对历史产品装配顺序的分析和总结,可以形成装配工艺顺序知识库,利用知识库采用产生式规则来确定各装配体之间的装配顺序. 因此,装配工艺顺序知识库是确定各装配体之间装配顺序的依据. 装配工艺顺序知识主要包括通用型和专门型两类知识[4].

1) 通用型知识. 通用型知识可分若干类知识,每一类知识都含有一定的优先系数,每个零件通过知识匹配后得出优先系数,然后按照累加的优先系数的大小来决定其相应装配顺序. 每类知识在生产实践中应不断地总结和积累,完善知识库. 表达规则如表 1 示例所示.

表 1　通用型知识规则表达示例

知识类型	基础优先系数	产生式规则	规则优先系数
精度保证性	4	IF 零件为装配基准 THEN 先装配	3
		IF 零件定位基准多的零件 THEN 先装配	3
		IF 装配精度高的零件 THEN 后装配	1
		⋮	⋮
状态稳定性	3	IF 装配关系较多的零件 THEN 先装配	3
		IF 组合面贴合配合零件 THEN 中间装配	2
		IF 单平面贴合配合零件 THEN 后装配	1
		⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮

2) 专门型知识. 专门型知识主要为连接件和基本件判定,以及其它专门知识. 连接件判定主要是连接零件之间装配顺序的判定;基本件判定主要是判定装配过程中作为起始装配或者基准的零部件. 表达规则如表 2 示例所示.

表 2　专门型知识规则表达示例

知识类型	产生式规则
连接件判定	IF 螺钉连接 THEN 装配顺序为被连接件、垫圈、螺钉
	IF 被连接件为定位件 THEN 定位件在其它被连接件前装配
	⋮
基本件判定	IF 底座、箱体、轴 THEN 一般为基础件(优先系数 3)
	IF 接触关系最多的零件 THEN 一般为基础件(优先系数 2)
	⋮
⋮	⋮

4　验证实例

应用装配树建模方法对柱塞式喷油泵泵油系部件装配进行建模[5],该部件设计装配图和产品结构树如图 5 和图 6 所示.

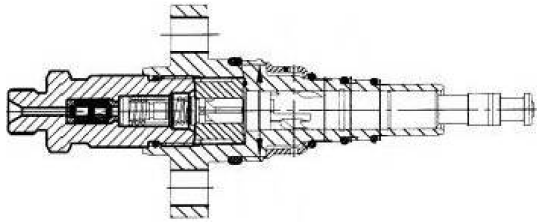


图 5　某型喷油泵泵油系部件设计装配图

4.1　构建装配层次结构树

1) 构建“功能元-组件”树. 通过对泵油系部件的功能进行逐层分解,直到所有功能有对应的组件实现其功能为止,即每个节点都是一个功能元,从而完成功能元树构建. 将产品结构树中支持每个功能元的组件与功能元相对应,形成“功能元-组件”树,如图 7 所示.

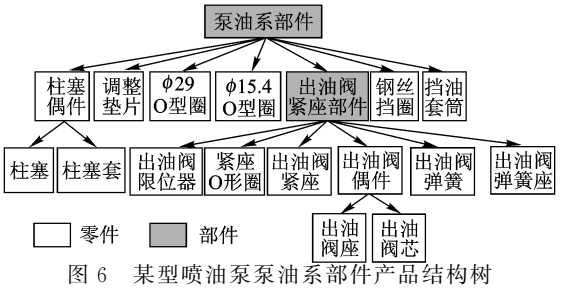


图6 某型喷油泵泵油系部件产品结构树

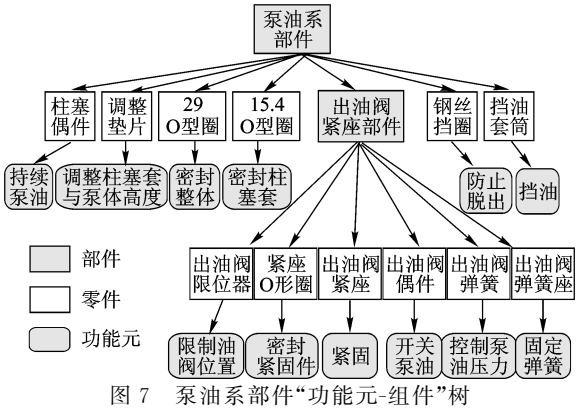


图7 泵油系部件“功能元-组件”树

2）建立功能元结构树. 根据各个功能元实现的逻辑层次关系和先后顺序对所有功能元建立功能元流. 然后将功能元流转换成功能元结构树. 最终形成的功能元结构树如图8所示.

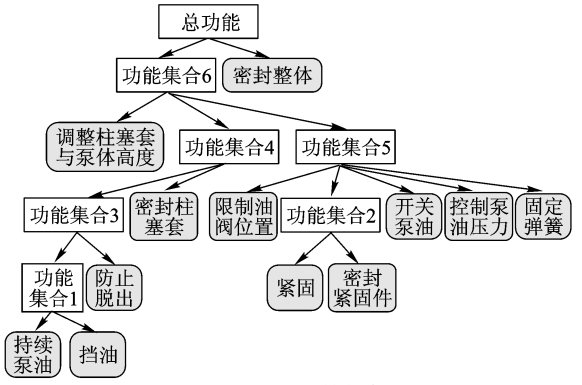


图8 功能元结构树

3）生成装配层次结构树. 根据功能元结构树确定的功能逻辑层次关系和“功能元-组件”树确定的功能元与组件的对应关系，可以建立装配层次结构树. 由于控制泵油这个功能相对独立，其对应的组件出油阀紧座部件可作为一个单独的部件出现.

4.2 确定同层次装配体之间装配关系和关键装配特性

根据设计装配图给出的信息，可以确定同层次装配体之间的装配特征和装配关系；根据装配图上对关键装配特性的标注，可以确定各个装配特性是否是关键特性.

4.3 确定同层次装配体之间的装配顺序

根据装配零部件之间的逻辑关系和几何关系，由装配工艺顺序知识库产生同层次装配体之间的装配顺序关系. 在装配层次结构树的基础上，综合上述装配特征和装配关系、关键装配特征信息以及装配顺序信息，最终形成信息完备的装配树，如图9所示.

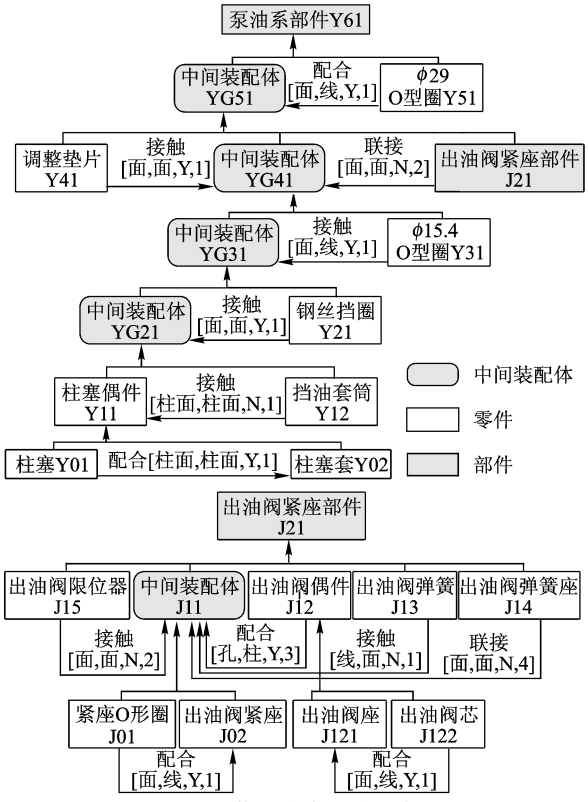


图9 信息完备的装配树

5 结束语

本文提出了面向机械装配过程的“装配树”概念，对装配树进行了数学定义和理论建模，在设计装配图和产品结构树基础上将装配层次结构、装配关系和装配顺序特征进行了合理集成，解决了产品结构树的功能延伸和信息描述完备性问题. 在设计方案确定的前提下，给出了以产品功能为中间转换载体的装配层次结构树构建方法和步骤，以及基于知识的零部件装配顺序产生式规则判定方法，形成了完整的机械产品装配关系建模方法. 最后，以柱塞式喷油泵泵油系部件装配树构建为例，验证了建模方法的可行性. 面向机械装配过程的“装配树”建模为提升产品装配设计质量提供了新的思路和可操作性的方法.

（下转第86页）