

基于动态变迁图的卫星总装规划建模技术研究

Assembly Process Modeling Based on Dynamic Transition Graph for Satellite

西北工业大学机电学院 孙刚 余剑峰 李原

[摘要] 不同于一般机械产品装配的流程,卫星总装的过程是“拆”“装”操作相结合的,为了解决这一类特殊的非线性装配顺序规划问题,提出了一种基于动态变迁图的装配规划模型。该模型在静态有向连接图的基础上,通过逐层分析和验证可能的状态以动态变迁图为核心构建装配任务过程树,从而支持卫星所有几何可行的流程列表表达和装配场景再现。最后通过某型卫星舱段总装验证了该建模方法的有效性。

关键词: 装配建模 流程规划 动态变迁图 割集

[ABSTRACT] The final assembly process of satellites is quite different from the one of other mechanical products, which involves the disassembly-reassembly process of the semi-finished modules. This kind of non-linear assembly sequence planning cannot be solved by the widely used cut-set theory limited to linear problems, thus an approach called Dynamic Transition Graph (DTG) is proposed on the basis of analyzing and verifying possible assembly states hierarchically through matrix operations. Assembly task process multi-way tree combined with static liaison graph and DTG implies all the geometric feasible assembly sequences for the final assembly of satellite. Finally, the effectiveness of this method is verified by an example.

Keywords: Assembly modeling Process planning Dynamic transition graph Cut-set

现代卫星品种多、批量小、装配精度要求高、所需装配资源类型多、装配质量难以预测,工艺设计与现场实施过程反复迭代,因此,展开装配技术的研究具有重要的理论意义和实用价值。卫星在进行总装时所拿到的是经过一定部装后的半成品卫星,对已经初步装配过的半成品进行总装相当于在原有基础上进行二次装配,在总装过程中会遇到对各个舱段外板的拆卸和再安装、精密仪器的反复试装、关键工艺的模装等一系列的特殊装配工艺,相应的装配序列规划有别于一般产品,而良好的卫星信息建模是有效进行装配工艺的基础,从装配模型中提取出生成工艺设计所需要的信息以满足各种装

配约束^[1]。许多学者对卫星装配工艺设计进行过大量研究。

北京卫星环境工程研究所熊涛等^[2]通过推行工艺数字样机技术,构建卫星工艺数字样机并建成数字总装信息平台,实现了卫星总装工艺全过程的数字化。华中科技大学 Gao 等^[3]提出基于约束空间转换的虚拟装配建模方法,将装配过程看成是零件从自由空间到约束空间的转换,采用几何约束识别方法建立产品的装配模型,并通过几何约束管理实现零件在虚拟环境中的精确运动。哈尔滨工业大学的夏平均^[4]以虚拟装配软件 Division Mockup 为平台,将虚拟装配技术运用到卫星装配工艺规划中,以总体设计部门提供的卫星产品模型为基础,建立一个高度逼真的多模式(视觉、听觉、触觉等)虚拟装配工艺规划环境。

卫星的总装工艺结构主要分为:流程层、组册层、路线层^[5]。其中流程层为工艺结构的中间层,如果把若干个功能用途相近的流程节点分装成册则对应组册层的一个节点,若对某个流程层的节点进一步细分,则形成一条以工序(或工步)为基本单元的工艺路线,即工艺结构中的路线层,由此可以看出总装工艺结构中,流程层的划分对整个卫星总装起到承上启下的作用。本文提出了一种面向流程层规划的动态建模方法,模型由描述卫星工艺信息的静态连接图和反映卫星装配过程的动态变迁图构成。

1 面向工艺流程层的动态规划模型

面向工艺流程层的动态规划模型由静态连接图和动态变迁图构成,从初始状态逐层分析装配过程中可能出现的状态,并对可能出现的状态集进行可行性验证,最终获得以多叉树为表达形式的装配任务过程树。模型的主要结构如图 1 所示。

1.1 静态连接图

静态连接图主要由装配单元和装配关系 2 部分构成。运用有向图 $G=(V, E)$ 来表示装配单元之间的装配约束关系^[6]。其中节点 $V=\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 表示组成装配体的装配单元集合, $E=\{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\}$ 表示装配单元间的装配约束关系。有向连接图关联一个装配

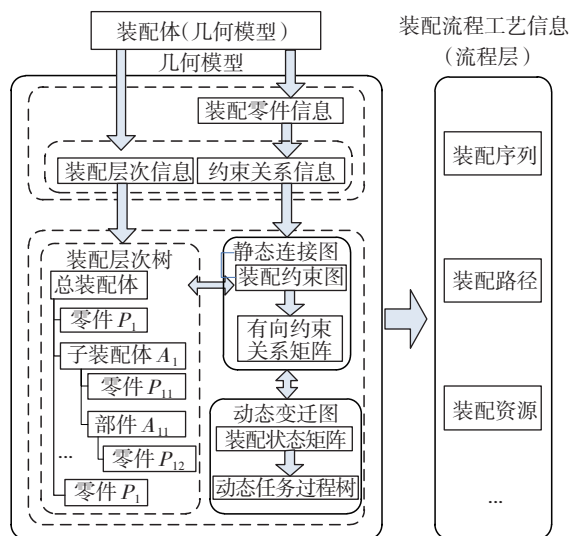


图1 模型结构关系
Fig.1 Model hierarchy

约束关系矩阵。如图2所示为某装配体,该装配体由零件 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 组成。

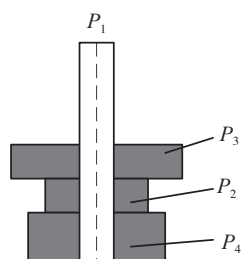


图2 装配体示意图
Fig.2 Diagram of sub-assembly

图3为装配体的静态连接图,其中图3(a)表示装配体所对应的装配约束图;图3(b)表示和有向图相关联的邻接矩阵。存储这个装配体对应的邻接矩阵使用2个数组,一个是一维数组,用来存储装配模型当中装配单元组成的节点及顺序;另一个是二维数组,用来存储装配模型当中节点之间的连接关系。如果有向图中两个节点有弧连接,则这两个节点在矩阵中所在的行和列对应的元素值为 ± 1 ;如果没有连接约束关系用0来表示;如果两零件有约束但无接触关系时用 $\pm k$ 表示。

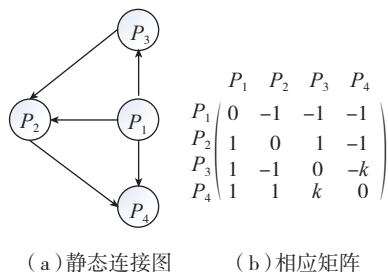


图3 装配体的静态连接图
Fig.3 Static liaison graph of sub-assembly

一维数组的构造方法是将总装模型的节点作为一维数组 $A[i]$ 的元素,其中 i 代表节点数,具体如表1所示。

表1 有向图中节点转化一维数组元素对照^[7]

装配零件	P_1	P_2	P_3	P_4
对应元素	$A[0]$	$A[1]$	$A[2]$	$A[3]$
节点编号	0	1	2	3

二维数组的构造方法是:

$$B[i][j]=\begin{cases} \pm 1 & (A[i] \text{ 与 } A[j] \text{ 之间有连接约束关系}) \\ 0 & (A[i] \text{ 与 } A[j] \text{ 没有连接约束关系}) \\ \pm k & (A[i] \text{ 与 } A[j] \text{ 之间有约束但无连接关系}) \end{cases},$$

式中, $i, j=0, 1, 2, \dots, N-1$, 其中 $B[i][j]$ 的对角线元素表示 $(A[i], A[i])$ 之间的关系,所以矩阵中对角线的元素全部为0。

1.2 动态变迁图

定义1 任务: 作用于同一对象的具有功能意义的一系列操作的组合^[8]。将装配过程顺序标识为 t , 任务类型为 g , 一个操作对象为 P 的任务记为 $\eta^g t(P)$, 这样分别记 $t(\eta)$ 为 η 的顺序标识符, 它随着装配任务的时间顺序逐步递增; $g(\eta)$ 为任务的类型; $P(\eta)$ 为装配的对象。建模过程任务类型主要包括零件装配任务 $\eta^A(P)$ 、零件拆卸任务 $\eta^B(P)$ 、子装配体装配任务 $\eta^C(P)$ 、子装配体拆卸任务 $\eta^D(P)$ 。这样划分是由于在卫星总装过程中涉及到大量的拆装混合的操作, 因此将拆卸专门作为任务的一种类型, 方便后续的工艺规划。

任务可以表示为:

<任务> ::= <序列标识> <任务类型> <任务对象> <任务时间> <任务时序约束链表>

<任务类型> ::= <零件装配> | <零件拆卸> | <子装配体装配> | <子装配体拆卸>

<任务对象> ::= <零件> | <子装配体> | <装配工具> | <装配夹具>

<任务时间> ::= <任务起始时间> <任务结束时间>

<任务时序约束链表> ::= <任务时序约束> <任务时序约束指针>

定义2 任务状态: 反映了在完成对应的装配任务后, 各个装配单元的安装情况。在装配任务过程树中, 一个叶节点对应唯一的任务状态, 由状态矩阵表示。状态矩阵是标准的单位矩阵, 对角线的元素对应于所有装配单元的状态, 1表示已安装, 0表示未安装或拆卸。如图4所示, 图中节点表示装配任务进行到第3步时, 图2中的 P_1 、 P_3 、 P_4 均已安装完成, 零件 P_2 可能被拆卸或未安装。

定义3 动态变迁图: 关联装配任务过程树节点的一

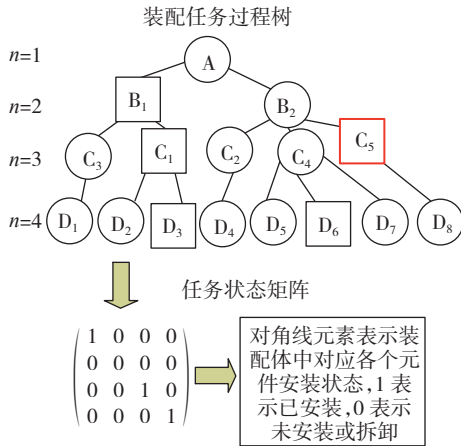


图4 装配任务过程树叶节点关联的状态矩阵
Fig.4 Status matrix correlated with leaf nodes

系列图组。通过对动态变迁图分析推导出下一步可能出现的状态,不仅将装配任务中可能的情况全部反映出来,还可以清晰表达出在卫星总装中拆装结合的组装方式。动态连接弧是连接动态变迁图中节点的有向线段。字母 E 来表示节点 v_i 与节点 v_j 构成的有序对 $e_k = \langle v_i, v_j \rangle$ 的集合, e_k 称为有向约束边,其状态属性对应的两种情况分别是 TRUE(真)和 FALSE(假),当属性为 TRUE 时在动态变迁图中表现为实线段,当属性为 FALSE 时在图中用虚线段表示。

在这里需要指出的是连接弧的状态属性会随着动态规划模型中任务的进行而发生改变。当总装开始时,由于待装配体是经过一定部装的半成品,它的初始状态体现在动态变迁图上是虚线关系弧和实线关系弧的混合。当装配结束后动态变迁图中所有连接弧都应变为实的有向线段,即连接弧的属性都变为真。虚的有向线段表示零件的拆卸关系,由于子装配体或零件必须有装配关系时才会有拆卸的必要,因此虚线段一定是由实线段转化而来,即不能对尚未确定时序关系的任务对象执行拆卸任务。

定义4 装配任务序列 $T^{S[8]}$: 将装配任务按照装配时间的先后顺序以序列逐步递增的方式进行线性组织。它不仅是任务时序约束的结果而且也是特殊的任务时序约束链,因为该约束链的起始点必须是装配的最开始任务,而终点则是装配中最后完成的任务。一个装配任务过程树包含有多少条装配任务序列就表示流程层有多少条可行性装配序列。以图4所示的装配体为例得到的一个装配任务序列为: $(\eta_1^A (P_2) \eta_2^A (P_4) \eta_3 (P_3) \eta_4^A (P_1))$ 。

装配任务过程树包含了装配中所有可行性方案,多叉树中每一个节点代表一个已完成的装配任务,如果任务的对象是子装配体用方形节点表示;如果任务的对象

是功能独立的零件用圆形节点表示(如图4所示),在图中方形节点 B_1, C_1, C_5, D_3, D_6 的任务对象都是子装配体,其余圆形节点的任务对象是功能独立的零件。

2 动态规划模型的建立

2.1 装配任务的可行性验证

装配任务过程树建立在装配任务可行性的基础上,多叉树中的每一个层级均有若干个任务节点,层级代表了任务的优先顺序,而节点则代表了可能的装配状态,因此得到状态节点的过程就是验证任务可行性的过程。在1.2节定义4的基础上,本文通过装配约束关系决定的阻碍干涉提出一种检验装配任务可行性的方法。

假设对于同一装配单元,装配过程中对它的安装和拆卸操作不能连续重复出现。

定义5: 在装配体 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ 中,已安装的零件集合 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ 中 k 表示已安装的零件数;未安装的零件集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_h\}$, $h = n - k$ 表示未安装的零件数。装配任务对象 p 包含的零件集合 $U = \{p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_h}\}$ 的可行性检验矩阵 B_u 的构造过程为:

- (1) 从装配体 P 静态连接图的邻接矩阵中取 $p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_h}$ 行,形成 L_u ;
- (2) 从矩阵 L_u 当中删除尚未安装的零件所在的列,得到可行性检验矩阵 B_u 。

装配任务可行性检验矩阵表达了准备安装的子装配体或零件,与其他零件之间的装配约束关系,装配任务的可行性主要通过矩阵 B_u 的检验加以确定。

当负元素出现在可行性检验矩阵 B_u 的某一行时,说明已装配的零件阻碍了装配任务对象的装配,该任务无法执行;当 B_u 的每一行均为非负元素时,该任务对象不受已装配零件的影响,该任务可以执行。

装配任务过程树的建立过程就是装配规划的过程,也是零件由未安装状态逐步转变为已安装状态的过程,树中的节点状态会通过动态变迁图及相应的关联矩阵表示出来。某个装配单元能否顺利安装,主要取决于其安装路径是否受到其余零件的影响,体现在可行性检验矩阵当中主要是该装配单元所在的行元素全部为非负,否则说明有已安装的装配单元阻碍现有零件的正常安装。如图5所示,在图4的装配状态下,将进行零件 P_2 的安装,由图3(b)的邻接矩阵中获得可行性检验矩阵 B_u :

$$B_u = P_2 \begin{pmatrix} P_1, P_2, P_3, P_4 \\ 1 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

图5 可行性检验矩阵

Fig.5 Feasibility test matrix

图5表明零件 P_4 阻碍 P_2 正常安装,所以装配 P_2 的任务不能执行,将执行零件拆卸任务 $\eta^B (P_4)$,相应的动

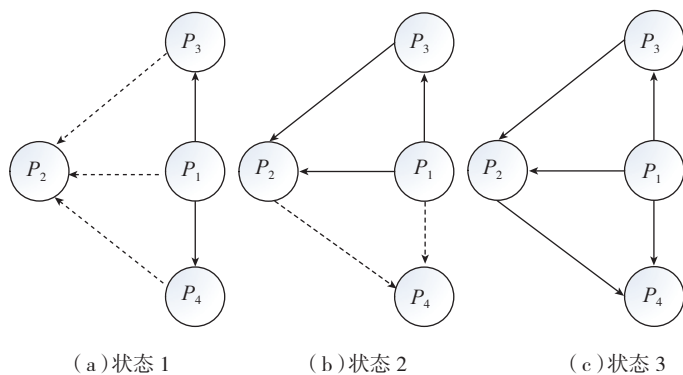


图6 拆卸 P_4 任务动态变迁图

Fig.6 Dynamic transition graph of disassembling P_4

态变迁图如图 6 所示。

进行可行性分析的作用有两方面：一方面,通过可行性分析可以将不符合实际情况的集合排除在外,减少待分析对象的容量,提高分析效率;另一方面,通过分析可以推导出下一层级可能出现的拆卸任务,以保证当前零件的顺利安装,若不拆卸某些装配单元装配任务将无法继续进行。当出现这种情况时首先拆卸掉阻碍它安装路径的装配单元,然后再对其进行安装。将拆卸某装配单元作为一潜在状态出现在当前状态的下一层级,通过不断分析后续可能的状态来建立动态规划模型。

2.2 动态规划模型的构造算法

动态规划模型的具体建立步骤如下:

(1) 根据该装配体的几何特性、装配特征构造出相应的静态连接图以及相关邻接关系矩阵。

(2) 根据装配体的初始状态建立装配任务过程树的根节点,得出相关联的任务状态矩阵,构建动态变迁图并进行连接弧的属性设定。

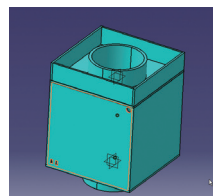
(3) 随机抽取一个根据上步分析出的待装配零件或子装配体,通过可行性检验矩阵验证该装配任务的可行性,如果通过验证则可以将其作为下一任务的任务对象,并且将完成任务后的状态作为当前状态的下一个状态。

(4) 如果在装配过程中有已完成的对象阻碍其装配路径,为了能够正确安装采用先拆后装的原则,首先拆卸掉阻碍其装配路径的已安装零件或子装配体,即执行拆卸任务 $\eta^b(P)$ 或 $\eta^d(P)$,并将完成拆卸任务后的状态作为当前状态的下一个潜在状态,对动态变迁图的连接弧属性进行更新。

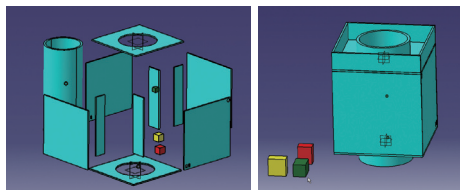
(5) 对该层次包含的所有任务的可行性加以验证,排除不可能的情况。循环执行步骤(3)~(5)直至装配体所有的零件全部装配完成为止。

动态规划模型以任务为基本单元,首先对任务进行分类将拆卸操作融入到流程的规划当中,其次运用可行性算法对模型每一层可能出现的任务进行验证,删除不

可行的任务,最后得到的装配任务过程树包含了装配过程中所有可行的状态。模型中的任意叶节点对应一个流程节点,通过叶节点相关联的动态变迁图与邻接矩阵可以还原装配体在装配过程中的真实状态,因此动态规划模型的建立过程也是支撑流程规划的过程。



(a) 服务舱段装配



(b) 服务舱段爆炸图 (c) 服务舱总装开始的状态

图7 服务舱总装实例

Fig.7 Final Assembly case of service Module

3 实例

选取某型卫星服务舱段的部分作为实例来验证上文中提到的算法,说明动态规划模型建立的具体过程(图 7)。在总装之前服务舱段所有外板与隔板已经装配完毕,其状态如图 7 (c) 所示,卫星的总装过程就是要在经过一定部装的半成品卫星上安装仪器设备完成二次装配。其建模过程如下:

(1) 首先根据该装配体的几何特性、装配特征构造出相应的静态模型。包括静态有向连接图(图 8)和相关邻接关系矩阵 F ,并根据舱段各安装单元的装配情况建立初始状态矩阵 T_0 。

(2) 状态初始化。设置当前根节点所在参数层 level=0,动态变迁图(图 9 (a))中 P_1 至 P_7 在总装开始前已经装配完毕,所以关系约束用实线弧表示, P_8 、 P_9 、

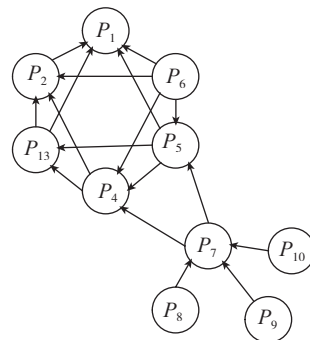


图8 静态有向连接图

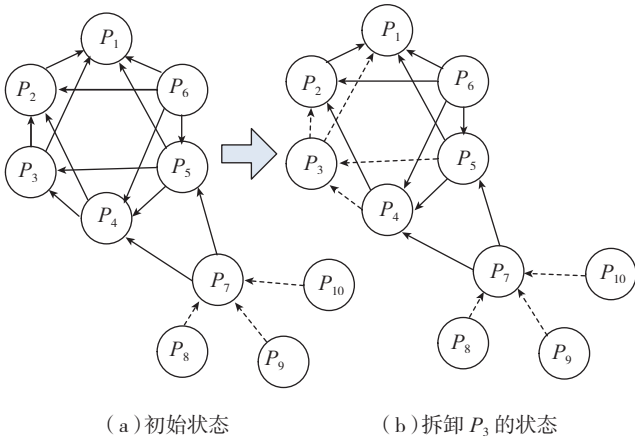
Fig.8 Static liaison graph

P_{10} 未装配, 所以用虚线弧表示其约束关系, 将矩阵 T_0 作为装配任务过程树的根节点。

可行性检验矩阵 B_0 为:

$$B_0 = \begin{pmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 \\ 0 & 0 & -k & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -k & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -k & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{matrix} P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \end{matrix}$$

(3) 对 2.2 节中步骤 (2) 生成的图 9 (a) 的虚线弧连接部分进行割集运算, 并对生成的割集可行性进行验证。在已经安装的装配单元中由于外板 P_3 阻碍 P_8 、 P_9 、 P_{10} 的安装路径, 所以在安装它们之前需要对外板 P_3 进行拆卸操作, 此时状态矩阵 T_1 中表示 P_3 状态的参数由 1 变为 0 且与外板 P_3 有关的弧线由实变虚见图 9 (b)。将拆卸 P_3 后的状态 T_1 作为 T_0 下一个可能状态并设当前节点所在参数层 level=1。



(a) 初始状态 (b) 拆卸 P_3 的状态
图9 服务舱段动态变迁图

Fig. 9 Dynamic transition graph of service module

(4) 安装通过割集运算得到的装配单元。设置状态层 level=2, 由于可能要安装的装配单元并不唯一, 所以根据依次生成可能的状态集 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} , 分别表示安装 P_8 、 P_9 、 P_{10} 。以此类推同样可以生成后面层级的状态。当 level=5 时模型构造完毕。其过程任务树包含了总装过程中 32 种可能出现的状态以及 6 条可行的总装序列 (见图 10), 分别为:

$$\begin{aligned} T_0 &\rightarrow T_1(-P_3) \rightarrow T_{21}(+P_8) \rightarrow T_{31}(+P_9) \rightarrow T_{42}(+P_{10}) \rightarrow T_{51}(+P_3), \\ T_0 &\rightarrow T_1(-P_3) \rightarrow T_{21}(+P_8) \rightarrow T_{33}(+P_{10}) \rightarrow T_{44}(+P_9) \rightarrow T_{52}(+P_3), \\ T_0 &\rightarrow T_1(-P_3) \rightarrow T_{22}(+P_9) \rightarrow T_{33}(+P_8) \rightarrow T_{44}(+P_{10}) \rightarrow T_{52}(+P_3), \\ T_0 &\rightarrow T_1(-P_3) \rightarrow T_{22}(+P_9) \rightarrow T_{36}(+P_{10}) \rightarrow T_{48}(+P_8) \rightarrow T_{54}(+P_3), \\ T_0 &\rightarrow T_1(-P_3) \rightarrow T_{23}(+P_{10}) \rightarrow T_{38}(+P_9) \rightarrow T_{410}(+P_8) \rightarrow T_{55}(+P_3), \\ T_0 &\rightarrow T_1(-P_3) \rightarrow T_{23}(+P_{10}) \rightarrow T_{39}(+P_8) \rightarrow T_{412}(+P_9) \rightarrow T_{56}(+P_3), \end{aligned}$$

其中, - 代表拆卸, + 代表安装。

4 结论

面向卫星工艺流程的动态规划模型具有以下优点:

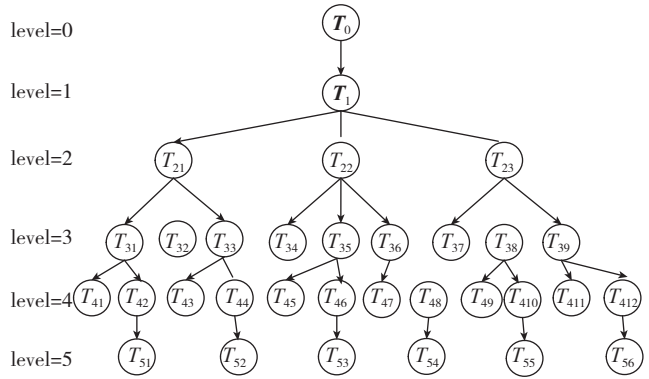


图10 服务舱装配过程任务树
Fig.10 Assembly task tree of service module

(1) 信息集成度高。装配任务过程树将上述相关信息集成到一个层次化的结构图当中, 条理清晰、层次分明, 不同层次的信息满足不同用途和目的。动态规划模型的任务层主要用于子装配体和零部件的组织和管理, 矩阵层的功能是关联动态变迁图和静态连接图, 将装配过程信息的变化及时反映在模型当中, 方便工艺人员对后续装配方案的可行性做出判断, 虚实连接弧的交替出现体现了卫星总装中“拆”、“装”操作相结合的特殊装配过程。

(2) 模型与装配场景图的联动满足了装配过程实时性的要求。动态规划模型采用由粗到精、逐层细化的思想, 针对不同的任务、不同层次的信息进行操作, 通过对装配任务过程树的计算将任务状态转化为实时场景图并反映在虚拟场景中, 工艺人员可以直观地进一步分析任务状态的稳定性、每一条任务链的工作量以实现流程层的优化。

参考文献

- [1] 李原, 余剑峰. 基于设计和装配过程的装配模型的研究. 西北工业大学学报, 2000, 11(4): 504-506.
- [2] 熊涛, 孙刚, 刘孟周. 数字化技术在卫星总装中的应用. 航天器环境工程, 2008, 25(1): 80-83.
- [3] Gao F, Chen L P, Zhou W, et al. Research on intelligence assembly modeling on virtual reality. Proceedings of the Sixth International Conference on CAD/CG. Shanghai: Wenhui Publishers, 1999: 1177-1182.
- [4] 夏平均. 基于虚拟现实的卫星装配工艺设计方法及其应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [5] 谢础, 贾玉红. 航空航天技术概论. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [6] Bourjault A. Contribution to a methodological approach of automated assembly//Automation Methodology in Manufacturing Industry. Paris. 1985: 50-82.
- [7] 欧阳君涛, 李原, 张开富. 基于分层有向图的装配顺序规划方法. 机械设计, 2007, 24(5): 27-29.
- [8] 刘振宇. 面向过程与历史的虚拟环境中产品装配建模理论, 方法及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.

(责编 亿霖)