

# 多自由度大型装配工艺装备虚拟建模与仿真

## Virtual Modeling and Simulation of Large Assembly Equipment With Multi-DOFs

华中科技大学机械科学与工程学院 王峻峰 张青 李世其

**[摘要]** 多自由度大型装配工艺装备的结构和驱动形式复杂。通过分解大型工装的多自由度,引入运动构件层次结构对工装进行多自由度抽象建模,提出一种节点单元结构构建虚拟环境下的工装模型,并建立了适用于多自由度工装建模的模板;基于多自由度工装模型,通过实时交互指定虚拟环境中工装与装配对象的关系,实现工装和装配对象的组合运动仿真;开发了用于多自由度大型工装建模与仿真的通用平台,并以天车为例说明了大型工装建模与仿真的应用过程。

**关键词:** 多自由度 大型装配工装 建模 仿真

**[ABSTRACT]** The large assembly equipment with multi-DOFs always have complicated structure and driven form. By applying the freedom decomposition of large assembly equipment, a motion component with multi-level structures is proposed for abstract modeling of multi-DOFs assembly equipment. A node cell is realized to build the virtual models and a template is constructed for the modeling of this type of equipment. Based on the multi-DOFs model, integrated motion simulation of equipment and assembly object can be achieved through online specifying their relationship interactively. A common platform is developed for the large multi-DOFs assembly equipment modeling and simulation, and an overhead crane is used to demonstrate the methods.

**Keywords:** Multi-DOFs Large assembly equipment Modeling Simulation

在飞机的研制生产中,零件数量大,结构复杂,相互间存在协调关系,装配难度大<sup>[1]</sup>,需要大量的工艺装备<sup>[2]</sup>,其中以结构和驱动形式复杂的多自由度工艺装备为主,以保证装配的精度和效率。大型多自由度工艺装备在应用于飞机装配时需要根据现场条件和测试数据进行合理的操作和调整<sup>[3]</sup>,需在有限的三维装配空间中协调工装和装配部件的位置关系,以避免碰撞;当装配任务需多个工装协调完成时,任务复杂度高,规划难度大。因此,多自由度工装的建模和仿真对飞机装配过程具有重要的意义。

现有研究主要集中于单自由度工装<sup>[4-5]</sup>。如范秀敏等根据操作方式及自动化程度,把虚拟工具分成自动、半自动和手动工具,并建立装配工具库,实现了虚拟环境下使用各类工具对零件的装配过程<sup>[6]</sup>。朱洪敏等提出适合各类装配工具信息表达和操作的统一建模方法,给出适用于不同类型工具的一般操作方法<sup>[7]</sup>。商业化软件(如Delmia等)具有较成熟的工装建模和仿真功能,但其实现原理却鲜有文献。文献[8]研究了固定于某一工位上、能够完成特定操作的多自由度工具,描述了装配线上典型半自动及自动工具的实现方法和操作过程,并未提出通用的实现方法。Northeastern大学开发了一种用于天车操作仿真的虚拟环境<sup>[9]</sup>,华盛顿州立大学提出一种天车的仿真方法和天车零部件的交互式物理建模方法<sup>[10]</sup>,这些研究只针对天车建模,不具有通用性。

本文在分析大型工装的结构和运动形式基础上,引入运动构件层次结构,对工装进行多自由度抽象建模,在虚拟环境下提出一种节点单元结构构建多自由度工装模型,并建立适用于多自由度工装建模的模板;通过实时交互指定虚拟环境中工装与装配对象的关系,实现工装和装配对象的组合运动仿真;开发用于多自由度大型工装建模与仿真的通用平台。

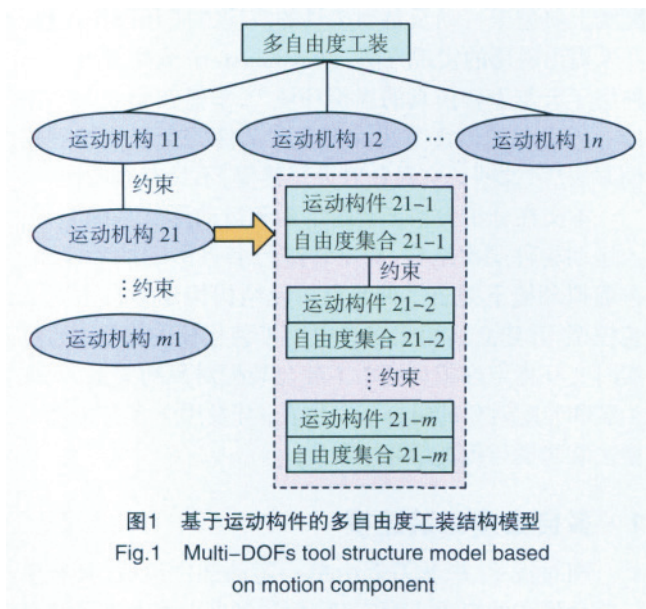
### 1 多自由度工装建模

相对扳手、螺丝刀等由单一运动部件组成,具有单一驱动形式的简单小型工装而言,多自由度大型工装是指尺寸大、由多个运动零部件构成、驱动形式多样、具有多个自由度的工装。多自由度大型工装种类繁多、功能和驱动形式多样,但在结构与运动形式上存在共性,它们均由一个或多个运动机构组成,每个运动机构包含一个或多个运动部件,由运动部件的协调联动形成整个运动机构的运动,实现工装的操作功能。在运动形式上,各运动部件具有一定自由度,一个装配任务需要多个运动机构按照一定的次序或并行运动,完成操作对象选择、操作对象固联、操作对象驱动和解除固联等过程。

本文采用面向对象思想,将多自由度工装作为完整对象,分析其组成结构和驱动形式。根据运动形式不同,首先将多自由度工装在结构上划分为具有独立运动形

式的运动机构,并将运动机构进一步划分为最小单位的运动构件,并确定各运动机构和底层构件之间的层次关系;由于运动机构具有自由度,自由度之间的层次关系可随之确定。通过该方法对多自由度工装进行统一建模和管理。

不同功能的多个运动机构通过约束固联在一起,有序地构成了完整的多自由度工装对象。在不受约束的情况下,每个运动构件具有6个自由度,由于构件之间的相互约束,部分自由度被限制。基于运动构件的多自由度工装结构形式如图1所示,多自由度工装由具有独立功能的一个或多个运动机构组成,而每个运动机构由一个或多个运动构件通过约束构成,每个运动构件具有一个或多个自由度,构成自由度集合。如运动机构21表示第二层的第一个运动机构,它是由运动构件21-1、运动构件21-2等通过约束构成的,相应运动构件具有自由度集合。每个层次可包含并行关系,如运动机构11与运动机构12。



根据属性的不同,本文将自由度分为固有自由度和派生自由度:

(1)固有自由度:指运动构件沿其质心 $O'$ 的平动自由度和绕通过质心轴的转动自由度,该自由度为功能自由度,用于完成该运动构件的主要功能。

(2)派生自由度:除固有自由度外,由于运动构件固联于其父节点之上,父节点的运动带动固联其下的各层子节点运动,各子节点也就具有了父节点在该方向的自由度,称为派生自由度。

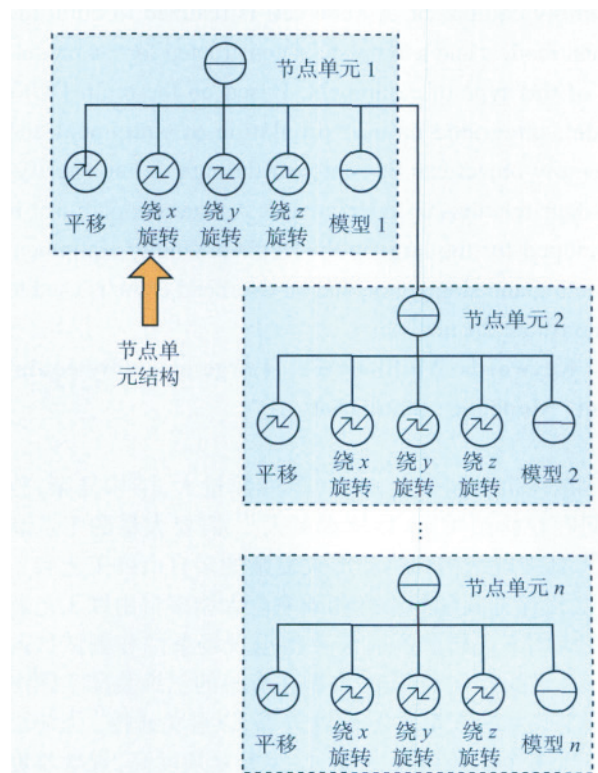
本文将固有自由度和派生自由度称为相对自由度,是相对世界坐标系运动构件所具有的自由度。通常相对自由度数量大于等于固有自由度数量。

在与操作对象的交互过程中,多自由工装与操作对象间存在自由度固联和运动协同。在与工装固联前,装配对象的自由度与其受约束情况有关;当工装与操作对象建立固联关系后,操作对象的被操作部分(若只有一个运动构件,被操作部分为操作对象整体)将与构成固联关系的运动构件形成整体,作为该运动构件的一部分,与其具有相同的自由度和运动形式。这样多自由度工装驱动操作对象,与其产生协同运动。当工装与装配对象的固联解除后,驱动关系解除,协同运动消失。

## 2 基于节点单元结构的多自由度工装模板

本文以面向对象的三维图形软件开发包 Open Inventor 6.0 为开发平台,根据 Open Inventor 的场景构建规则,提出一种节点单元结构,在虚拟环境下构建多自由度工装模型,并建立适用于所有多自由度工装建模的通用模板。

在 Open Inventor 中节点是构成场景的基本单元,节点间通过连接建立关系,通过向节点添加子节点创建具有层次关系的场景。由于执行渲染的遍历顺序为从场景根节点开始,从上到下、从左至右,因此场景图右侧或下侧节点会继承左侧或上面节点的遍历状态变量值。对于几何变换节点,各个几何变换会产生积聚效应,从而使各个变换互相组合形成最终的复合变换<sup>[11]</sup>。



运动构件是驱动多自由度工装运动的基本单元,由运动构件实体和平移、旋转自由度构成,可由 Open Inventor 分隔节点和几何变换节点描述,通过节点连接构成节点单元,以完整描述运动构件的结构和运动形式。由此,多自由度工装在组成结构上的运动构件结构与虚拟场景中的节点单元结构一一对应,数量相等。在层次关系上,二者一一对应,通过节点间的连接实现。由于所有的多自由度工装均可分解为运动构件层次结构,因此在虚拟环境下应用节点单元法构建工装模型具有通用性。

基于节点单元的多自由度工装模板如图 2 所示,每个虚线框内节点组结构表示一个节点单元。每个节点单元包括 6 个节点,根节点为 SoSeparator 属性节点单元  $i$ ,用于调入运动构件模型,继承前 4 个几何变换节点积累后的复合变换,形成其运动自由度;子节点依次为平移节点、绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  旋转节点和模型节点  $i$ ,其中平移节点和绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  旋转节点为几何变换属性节点,用于描述和控制模型的 6 个自由度,遍历顺序为从左至右,形成复合变换。

一个多自由度工装由  $n$  个节点单元通过节点间的连接,构成结构上的层次关系和运动形式上的继承关系。如图 2 所示,节点单元 2 作为节点单元 1 的子节点单元加入场景,一直到构成工装的  $n$  个运动构件均转化为节点单元调入场景,虚拟环境下多自由度工装模型构建完成。节点单元的遍历顺序为从上至下、从左至右,上节点单元影响下节点单元,左节点单元影响右节点单元,继而形成运动形式上的继承关系,如节点单元 2 继承节点单元 1 运动形式,产生派生自由度。

不同工装应用此模板只需根据运动构件分解和层次结构,构建虚拟场景的节点单元和层次,调入模型并定义各自由度,即可得到虚拟环境下具有层次关系、多个自由度的工装模型,模型信息和自由度信息被保存至本地数据文件。在利用工装来操作零部件对象时,首先选择多自由度工装节点单元和操作对象节点单元,建立二者联系。然后,接受平移或旋转数值作为输入,工装驱动操作对象产生协同运动。当装配对象运动至目标位置时,解除两节点单元关联,驱动关系解除,协同运动消失。

该模板稳定性、灵活性和可扩展性强,可构建多层次的复杂工装模型,实现虚拟场景中多自由度工装的统一建模和管理。

### 3 应用实例

在飞机等大型产品的装配过程中,天车是常用的吊装设备,本节以装配过程中天车的操作过程为例,对多自由度工装建模与装配仿真方法进行说明和验证。

#### 3.1 四自由度天车运动构件分解与虚拟建模

如图 3 (a) 所示,本文将天车抽象为一个运动机构,该运动机构包括桥架、小车和吊钩 3 个运动构件,其中支撑桥架的支柱固定,桥架和支柱之间定义一个移动副,由长度驱动,自由度集合  $\{d_1\}$ ; 小车和桥架之间定义一个移动副,由长度驱动,自由度集合  $\{d_2\}$ ; 吊钩和小车之间定义一个移动副和转动副,由长度和角度驱动,自由度集合  $\{d_3, d_4\}$ 。

各运动部件和自由度集合之间的层次关系如图 3 (b) 所示,桥架运动构件为父节点,小车运动构件为其

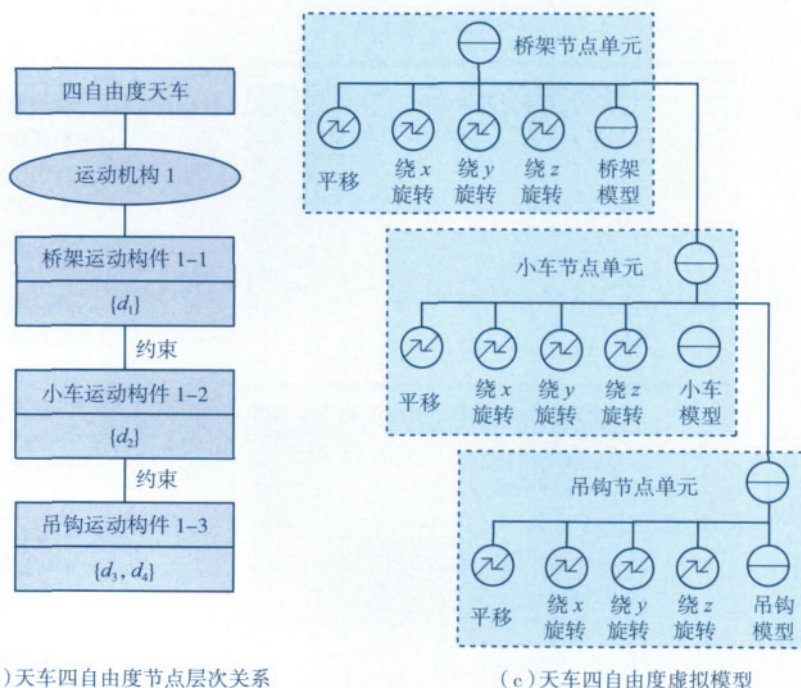
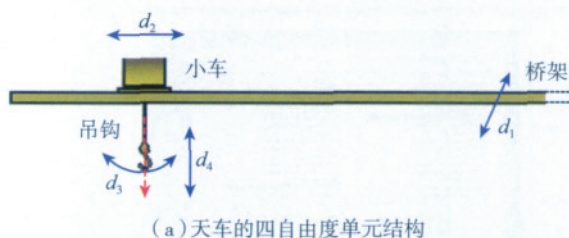


图3 四自由度天车层次结构分解与虚拟建模  
Fig.3 Motion hierarchy structure of four DOFs crane

子节点,并继承父节点的派生自由度集合 $\{d_1\}$ ;吊钩运动构件作为叶子节点,处于结构树底层,父节点为小车运动构件,吊钩运动构件继承派生自由度集合 $\{d_1, d_2\}$ 。

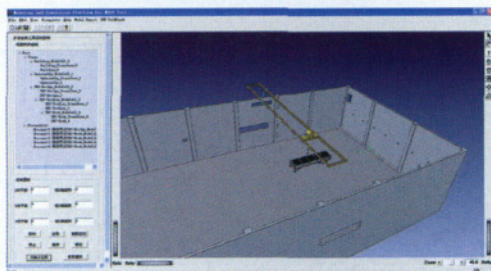
如图3(c)所示,应用多自由度工装模板,调入模型分别构建桥架节点单元、小车节点单元和吊钩节点单元;根据天车各运动构件的运动范围,定义各节点单元的4个几何变换节点。根据运动构件层次关系,将小车节点单元作为桥架节点单元的子节点调入场景,将吊钩节点单元作为小车节点单元子节点调入场景,构成四自由度天车的虚拟模型,下层节点单元继承上层节点单元运动形式,产生派生自由度。

### 3.2 四自由度天车操作过程虚拟仿真

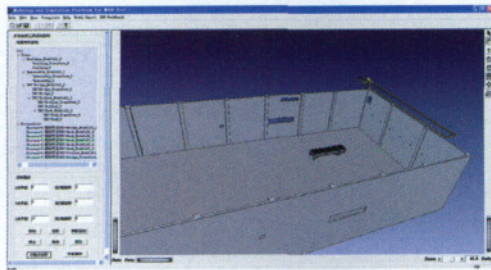
图4为天车在部件装配中的使用过程。首先,用户按照任务分解过程有序地选择界面左侧树状结构天车节点单元,输入其自由度方向的位移数值,使天车移动至装配对象处。然后,进入装配定位界面,选择天车所需运动的节点单元和待装配对象节点单元,实现二者的固联,如图4(a)所示。



(a) 天车运动构件与装配对象关系指定



(b) 天车与装配部件的协同运动



(c) 天车复位

图4 装配过程中四自由度天车的仿真

Fig.4 Simulation of four DOFs crane during assembly process

然后,确定装配对象移动的方向和位移,选择具有该方向自由度的节点单元并设置位移数值,使其带动子节点一起驱动待装配部件,实现工装和装配部件的协同运动,如图4(b)所示。

如选择小车和装配对象二者固联,输入 $x$ 方向位移,小车带动子节点吊钩一起驱动装配对象协同运动。当装配对象运动至终点时,使天车复位,如图4(c)所示。

## 4 结论

本文在对多自由度工装组成结构和运动形式进行分析的基础上,提出了多自由度工装的运动构件结构和层次模型,进而提出了一种在虚拟环境中应用节点单元结构来构建适用于所有多自由度工装建模的模板。基于该方法开发了用于多自由度大型工装建模与仿真的通用平台,以天车为例说明了装配过程中大型工装虚拟建模与仿真的应用过程,验证了本方法的可行性和有效性。通过对多自由度工装装配过程进行规划与仿真,工作人员可分析工装的操作空间是否足够,各运动机构、构件驱动次序是否合理等,从而对实际装配过程进行指导与检验。

## 参考文献

- [1] 黄良. 飞机制造工艺学. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [2] 范玉青. 飞机数字化装配技术综述. 航空制造技术, 2006(10):30-35.
- [3] 秦瑞祥, 邹冀华. 工业机器人在飞机数字化装配中的应用. 航空制造技术, 2010(23):104-108.
- [4] 曹鹏彬, 刘继红, 管强. 虚拟拆卸环境中工具的操作技术. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(4):454-458.
- [5] 吴燕. 虚拟环境下拆卸工具库的构建、管理与交互实现. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [6] 程免翀, 杨润党, 范秀敏. 装配工位仿真中虚拟工具的研究与应用. 中国机械工程, 2007, 18(19):2329-2333.
- [7] 朱洪敏, 武殿梁, 甄希金, 等. 面向交互操作的虚拟工具建模与操作技术. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1):57-63.
- [8] Wu D L, Zhu H M, Zhen X J, et al. Tools and equipment modelling for interactive assembling operating in a virtual environment. International Journal of Production Research, 2010: 1-26.
- [9] Wilson B H, Mourant R, Li M, et al. A virtual environment for training overhead crane operators: real-time implementation. IIE Transactions, 1998(30): 589-595.
- [10] Taylor F, Jayaram S, Jayaram U. Functionality to facilitate assembly of heavy machines in a virtual environment. Proceedings of DETC 2000: Design Engineering Technical Conferences, Maryland Baltimore, 2000(9): 10-13.
- [11] 阎锋欣, 侯增选, 张定华, 等. Open Inventor 程序设计从入门到精通. 北京: 清华大学出版社, 2007.

(责编 夏宛)