



文章编号: 1000-8608(2009)06-0849-05

# 液压集成块装配过程仿真系统关键技术研究

曹宇宁\*, 张宏, 田树军, 王永安

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为检验和比较液压集成块的设计结果,设计了液压集成块装配过程仿真系统.该系统在三维装配环境下,采用基于特征体素的参数化造型方法完成装配单元的实体模型表达;深入研究了装配路径的规划算法,根据液压集成块的特点,提出应用优化的启发式搜索算法A\*进行装配路径规划;采用基于空间约束关系的坐标驱动技术实现液压集成块装配过程仿真;通过实例展示装配过程,验证了装配过程仿真系统的实用性和有效性.

**关键词:** 液压集成块;装配过程;动态仿真

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A

## 0 引言

液压集成块作为集成式液压系统的主要单元,其设计的关键在于如何获得一个较优的外部布局和内部布孔的集成方案<sup>[1]</sup>.由于系统组成的多样性及集成块设计过程的复杂性,仅能在外部布局不干涉的基本条件下,得到较优的设计方案,而外部元件的操作方便性及美观等因素很难纳入到集成块的优化设计中;不能保证实际装配过程中,零件之间有足够得装配工具操作空间、不出现碰撞与干涉.为设计和选择最佳方案,本文提出将虚拟装配技术应用到液压集成块的设计中,开发虚拟装配过程仿真系统,直观展示装配过程中零部件的运动形态和空间位置关系,检验元件布局的协调性以及装配工艺的合理性等,尽可能在设计阶段验证与改善产品的可装配性,发现问题,为设计系统提供反馈信息.

## 1 液压集成块装配过程仿真系统总体结构

以液压集成块优化设计为基础,针对集成块的结构特征和装配特性,开发了液压集成块虚拟装配过程仿真系统.该系统首先依据大连理工大学液压技术课题组开发的液压集成块智能优化设

计系统<sup>[2]</sup>的设计方案数据,结合液压元件及标准件参数化数据库,建立集成块全方位装配模型;其次进行装配规划、虚拟环境下零件装配仿真和装配体碰撞干涉检验等工作;最后得到仿真系统的反馈信息,并判断设计结果是否符合装配工艺要求.系统总体结构如图1所示.

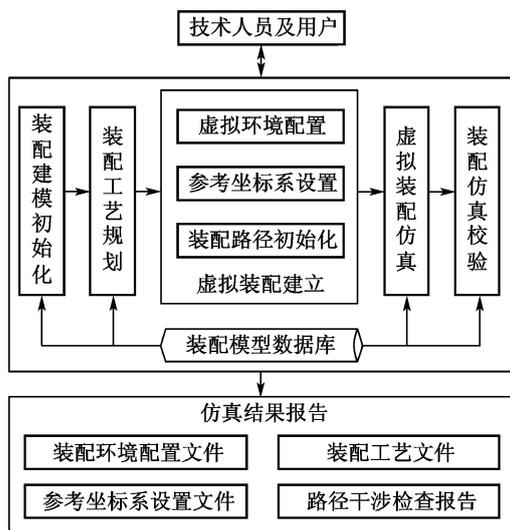


图1 液压集成块装配过程仿真系统总体结构

Fig. 1 General structure of HMB assembly process simulation system

收稿日期: 2007-10-15; 修回日期: 2009-07-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375023).

作者简介: 曹宇宁\*(1983-),男,博士生,E-mail: caoyuning@sina.com;田树军(1951-),男,教授,博士生导师.

## 2 液压集成块装配过程仿真关键技术研究

### 2.1 建立装配模型

针对虚拟装配设计对装配模型的要求,以已有的特征建模方法为基础,提出一种适合装配过程动态仿真的面向对象的建模方法,该方法对模型的实用信息进行了扩展,满足了装配环境对装配信息的需求.模型包括实体信息和装配关系信息.各零部件实体单元之间通过装配关系信息紧密联系在一起,组成完整的集成块装配模型.

#### (1) 实体信息

将实体分为块体、标准件、液压元件以及装配工具四类,各类实体特征均包括工程特征及形状特征.

① 工程特征.块体和标准件的工程特征主要包括重量与材质等信息.装配工具的工程特征主要包括操作对象信息及工具类型等信息.液压元件的工程特征则分为技术数据和装配信息.技术数据包括工作压力、开启压力、流量及重量等信息;装配信息用来记录液压元件的密封件与联结件的选择信息.

② 形状特征.采用参数化造型方法建立集成块体、标准件实体以及装配工具实体.对液压元件类实体,定义特征体素为能够表达零件局部结构形状特征的基本实体,将液压元件实体模型的建立看做是由不同的特征体素通过一定的约束关系装配形成.由于很多液压元件的局部特征基本不变,只是部分控制尺寸会发生改变,如电磁铁、手轮及通油孔等,可以归结为专用特征.为此将特征体素分为基本特征体素类、专用特征体素类及修形特征体素类,通过体素约束类中的空间位置信息、空间姿态信息及特征体素间的布尔运算关系表达一个完整的元件模型.通过以上分析,以液压元件类为例,对装配模型的实体建模的层次分析如图 2 所示.

通过选择特征体素、完整表达相关信息即可建立实体模型.该方法可以迅速组建一定规模的模型库;并且能够进行模型结构的局部快速调整设计和产品快速试制定型.

#### (2) 装配关系信息

装配关系是建立零部件之间约束的关键<sup>[3]</sup>.装配元件位置和姿态信息的准确描述是正确模拟产品装、拆过程的关键.一般包括装配体中零部件

之间的位置关系、联接关系和配合约束关系.

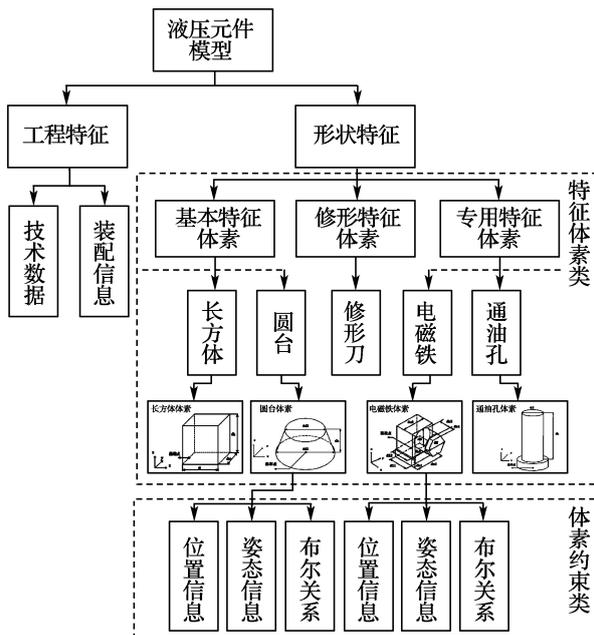


图 2 液压元件实体建模层次

Fig. 2 Modeling hierarchy of hydraulic component

装配单元在虚拟装配环境下的位姿信息通过对该装配单元的基准坐标系进行 6 元组描述,就可以全面地表示该装配单元在虚拟安装环境中的位置和方向.

(ModelX, ModelY, ModelZ; Angle\_X, Angle\_Y, Angle\_Z)

ModelX、ModelY、ModelZ 分别为装配单元的基点在虚拟安装环境坐标系中的 X 坐标、Y 坐标、Z 坐标;Angle\_X、Angle\_Y、Angle\_Z 分别为装配单元的基准坐标系在装配环境坐标系中绕 X、Y、Z 轴偏角.

本系统中主要的联接关系为各个零部件及阀门与集成块体间螺纹联接、焊接等联接方式;主要配合关系为静态配合,装配单元间主要约束形式为贴合、对齐、定向和插入.

### 2.2 装配规划

为保证装配质量和效率,必须对装配过程进行正确、有效的描述,因此需要进行装配规划.装配规划技术是在虚拟装配建模基础上,首先对零部件的装配序列进行推理,然后对装配路径进行规划.

#### (1) 装配序列规划

液压集成块除下表面外其余 5 个面均可以放置液压元件,下表面则为禁忌安装面,所以装配序

列规划的自由性较大,因此本文提出了一种面向虚拟装配的产品装配顺序规划方法.该方法通过建立装配层次模型,并在此基础上生成装配体的层次树结构,最后实现装配顺序的分层规划.

液压集成块装配体的结构具有层次性,由装配单元组合而成.装配单元既可以是单独的零件,如阀件、联结件等,也可以是子装配体,如叠加阀子装配体、板式阀子装配体等.装配模型的层次树结构如图3所示.层次模型以装配单元为研究对象,体现了实际形成装配体的主要装配序列.生成装配顺序的具体算法为

**Step 1** 根据广度优先进行搜索,确定形成各级装配节点的装配单元,如装配体A由子装配体A1、A2及零件A3装配形成,子装配体A11由零件A111、A112、A113装配形成;

**Step 2** 确定形成装配节点的装配单元的装配顺序,如确定形成装配体A21的装配单元为装配顺序A211、A212、A213;

**Step 3** 由装配层次模型的底层开始,逐层向根节点逼近,递归形成装配体的装配顺序.

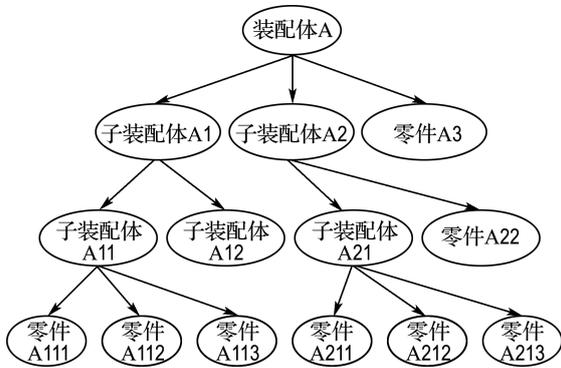


图3 装配层次树结构

Fig. 3 Hierarchical tree structure

## (2) 装配路径规划

装配路径规划就是要在一定的时间范围之内,寻找一条从起始点开始、由连接一系列节点的轨迹段组成的可行路径,在满足装配约束的条件下使轨迹代价函数尽可能小.液压集成块的装配独立于集成式液压系统,选择一个合理的、无碰撞的装配路径,能够节省装配时间、明显提高装配效率.相比位姿空间法、可视图法及人工势场法等三维空间下的装配路径规划方法,启发式搜索算法A\*具有建模方法简单、无局限性及计算量小等优点.计算机软、硬件技术的发展使快速干涉计算成为可能<sup>[4]</sup>,故本文采用空间规划与A\*搜索算法

相结合的方式,在装配约束下成功地进行液压集成块虚拟装配的装配路径规划.A\*算法基本思想是先将规划空间表示成网格形式,然后通过预先设定的代价函数寻找最小轨迹代价.其启发代价函数为

$$f'(n) = g'(n) + h'(n)$$

式中: $f'(n)$ 为估价函数; $h'(n)$ 为节点 $n$ 到目标点的最短路径的启发值,该启发值通常取做起点与节点之间的欧氏距离; $g'(n)$ 为起点到节点 $n$ 的轨迹代价,且有

$$g'(n) = g'_0(n) + g'_1(n)$$

$g'_0(n)$ 是父节点的轨迹代价值, $g'_1(n)$ 是从父节点到该节点的轨迹代价.

### ① 规划空间的划分

通过适当的网格对规划空间进行合理的划分是实施A\*算法的基础.根据液压集成块的装配特点,由相关约束条件确定网格大小,并根据当前装配单元位姿与目标节点处装配单元位姿,得到节点扩展的优先和禁忌方向.在三维规划空间中,每个网格取做一小立方体,设其边长为 $l$ ,则步长范围为 $[l, \sqrt{3}l]$ .当运动体从一个网格进入相邻网格时,限定最大拐弯角为 $45^\circ$ ,则每一初始位置对应于下一可行位置的范围至多包括9个相邻网格(见图4).

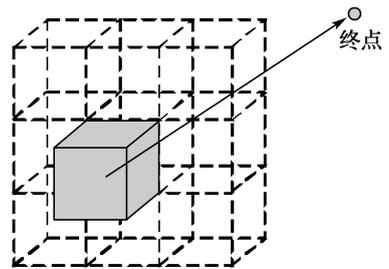


图4 节点扩展方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of node-expanding method

设 $L$ 为进行装配路径规划的区域长度,从运动体的当前位置 $q_0(x_0, y_0, z_0)$ 开始,将距 $q_0$ 的距离不超过 $L$ 的规划区域按上述方法进行划分,得到 $n$ 个网格单元,每个网格单元中取最小代价节点作为搜索空间的待选节点.这样,当运动体从一个网格进入相邻网格时,所有的优先可行节点不超过9个,从而大大缩小了搜索空间的规模.

### ② 节点扩展

由于构造规划空间的过程已考虑约束条件,在扩展当前节点的有效后继子节点时,从当前位

置出发,在最小步长、最大拐弯角之内能够到达的可行节点不超过 9 个,只需依次判断当前节点与这些可行后继节点的连线是否满足区域长度约束及扩展方向约束.如果满足,则作为有效的后继子节点,否则舍弃.

### ③算法步骤

搜索过程中设置 open 和 close 两个表,open 表记录所有已扩展而未考察的节点,close 表记录已搜索过的节点.算法流程如下:

**Step 1** 调整装配单元初始位姿,并将初始位姿节点放入到 open 表中;

**Step 2** 如果 open 表为空,转到 Step9;

**Step 3** 取出 open 表中第一个搜索节点;

**Step 4** 如果当前点是目标,算法成功,结束;

**Step 5** 将装配单元移动到这个节点上,判断是否与其他装配单元干涉,如果干涉,装配单元退回,将当前节点从 open 表中删除,转到 Step2;

**Step 6** 将当前节点放入到 close 表中;

**Step 7** 判断节点扩展方向是否与运动方向一致,如果不一致,变换坐标系使一致;

**Step 8** 判断有无优先或禁忌方向并依此扩展当前节点,计算各节点代价,将新产生的节点放入到 open 表,更新启发值,并对 open 表排序,转到 Step2;

**Step 9** 如果 close 表为空,算法失败,跳出,否则转到 Step10;

**Step 10** 取出 close 表中第一个搜索节点,将装配单元移动到该节点上,并做旋转,转到 Step8.

算法通过调整装配单元初始位姿和为节点扩展提供优先及禁忌方向两项措施,避免扩展一些不可能成功的子节点,有效地减少搜索空间;通过采用可变节点扩展步长,提高规划效率.其中 Step7 采用坐标变换,既可以提高算法效率,又可得到一条相对转折次数较少的曲线;Step10 为针对装配单元只能通过旋转通过狭小区域的情况所提出的改进措施.

在虚拟装配中,实时地检测装配单元的位姿和目标节点处位姿的偏差,当该偏差小于装配路径规划的区域长度时,系统自动将装配单元的位

姿调整到最终的装配位姿.

## 2.3 虚拟装配过程动态仿真

液压集成块装配仿真能实时显示集成块上各个零部件的运动,直观展示装配过程中零部件的运动形态和空间位置关系,并能即时调用相应三维装配工具模型判断是否存在足够装配空间,从而完整地演示集成块装配全过程.在虚拟环境中建立液压集成块装配模型实体、进行装配规划后,采用基于空间约束关系的坐标驱动技术进行装配过程动态仿真.基于空间约束关系的坐标驱动技术,即求出约束作用下待装零部件的位姿变换矩阵,并对其进行位姿变换,使零部件调整到受约束的位姿状态.通过分析装配过程中零件的运动,验证装配过程的可行性和评价装配过程中的人机因素,并对初始路径及其关键点位姿进行实时交互修改与调整,达到验证与改进产品整体装配性能的目的.

实现液压集成块装配仿真的基本思路是:首先计算集成块上每个装配元件在每个时间点上的位置和姿态信息,然后在时间场景数据结构中,保存时间点上发生变化的阀类元件以及零部件的状态(位置、姿态和显示属性)信息(图 5 是“更新时间”数据结构的示意图),最后根据这些更新时间数据结构信息以一定的时间间隔,不断地重新绘制集成块场景图.

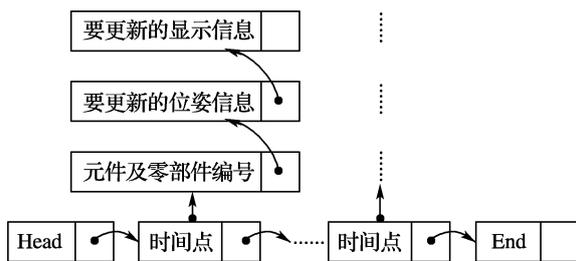


图 5 “更新-时间”数据结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of data structure for “time-update”

## 3 装配过程仿真系统应用实例

基于以上技术,在 MDT (AutoCAD Mechanical Desktop) 环境下,以 Visual C++6.0 为编译工具,用 ObjectARX 作为二次开发工具,开发了虚拟装配过程仿真系统.本文以一个设计方案为例,该方案中包含一个含 103 个孔的集成

块、19个主要元件及相关联接件和密封件。首先调用系统的装配模型实体创建功能,装配仿真开始时,依装配序列调用该子装配体中的装配单元模型,并在按装配路径中位姿节点进行虚拟装配过程仿真。图6为该液压集成块的虚拟装配过程及结果展示。以装配过程中最后一个子装配体为例进行说明,即图6(a)中箭头所示装配单元及其联接件。该元件所在面为上表面,初始位姿为  $P_0(300, 0, 326; 0, 0, 0)$ , 目标位姿为  $P_1(176, 226, 32; 0, 0, 0)$ 。以5为路径规划空间网格边长进行装配路径规划,得到装配路径,共包含位姿节点76个,途中避开可能干涉元件(包括块体)共5个。装配开始时,每隔30ms,装配单元即调整到下一节点位姿,同时进行场景重绘,形成连续的装配过程展示。

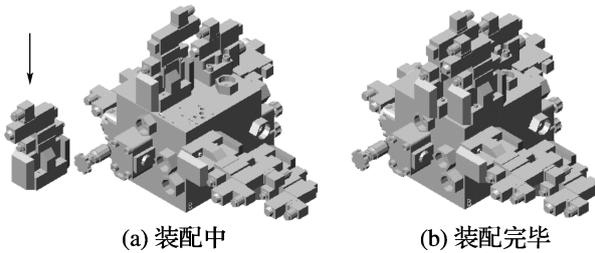


图6 液压集成块虚拟装配过程

Fig. 6 Assembly process simulation of HMB

## 4 结 语

本文从系统结构、关键技术及实例分析等方面验证了虚拟装配技术在液压集成块工程设计领域中的实用价值及可行性。系统能够从装配角度得到装配工艺、元件外部布局可能存在的问题等反馈信息以便及时调整设计,达到提高设计质量和减小设计人员工作量的效能;同时由于虚拟环境特有的多通道感知性,在装配过程中可充分利用操作者的经验和知识。随着进一步研究,建立装配评价体系,使系统在虚拟环境中可感知和可视化进行各种装配工艺方案的比较,对实际的装配过程具有更为重要的指导意义。

## 参 考 文 献:

- [1] 李 利. 液压集成块智能优化设计理论与方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2002
- [2] 田树军, 李 利, 冯 毅. 基于计算智能的液压集成块优化设计[J]. 中国机械工程, 2003, **17**:1492-1495
- [3] 严隽琪, 范秀敏, 马登哲, 等. 虚拟制造的理论、技术基础与实践[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2003
- [4] 田立中, 付宜利, 马玉林, 等. 装配路径规划中基于动态坐标的  $A^*$  搜索算法[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2002, **8**(4):316-319

## Research on key technology of hydraulic manifold block assembly process simulation system

CAO Yu-ning\*, ZHANG Hong, TIAN Shu-jun, WANG Yong-an

( Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** In order to check and compare different design results of hydraulic manifold block (HMB), an HMB assembly process simulation system is designed. In virtual 3D assembly environment, the parametric modeling method based on the feature element is adopted to describe the entities of the assembly unit. After the deep research on the assembly path planning algorithm, an optimal heuristic search algorithm based on  $A^*$  is proposed to adapt the feature of HMB. At last, the simulation of HMB's assembly is realized by using the technology of axis driving under spatial constraint. A demonstration example is also exhibited for verifying the proposed method and the experimental results demonstrate the practicability and effectiveness of the system.

**Key words:** hydraulic manifold block (HMB); assembly process; dynamic simulation