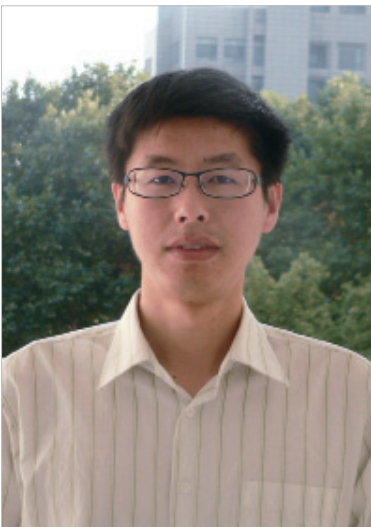


# 大型飞机虚拟装配技术

Virtual Assembly Technology for Large Aircraft

南京航空航天大学航空宇航学院 王念东  
同济大学航空航天与力学学院 刘毅  
成都飞机设计研究所 李文正



王念东

南京航空航天大学飞行器设计专业在读博士研究生。作为主要研究人员,先后完成了国家高技术863计划领域“总体协调三维电子样机开发”和“复合材料构件自动铺放技术”等课题,目前正在进行某863计划的子课题“沉浸式飞行器虚拟设计支撑平台”的研究与开发工作。

随着 CAD/CAE/CAM/PDM 等技术的迅速发展以及与制造业的相互促进,先进的数字化设计、制造和管理技术正逐步取代传统的手工方式,极大地提高了产品的创新设计能力。

利用虚拟装配技术,设计者能够在更真实、自然的环境下实现大型飞机总体布置与协调,完成装配过程模拟,维修性、测试性仿真,尽早发现设计缺陷,达到缩短开发周期、提高设计质量和降低成本的目的。

经过 100 多年的发展,飞机作为大型复杂装备已经得到国内外学术界和工业界的认可,而作为大型复杂机电系统的大型飞机综合体现了当今科学技术的成就,代表着航空技术最系统、最全面、最复杂和最先进的水平。

大型飞机设计制造已经成为制造业的核心和衡量一个国家制造业是否发达的重要标志以及国家竞争力的制高点。其中飞机装配由于产品形状复杂、零件以及连接件数量多,其劳动量占飞机制造总劳动量的一半左右甚至更多,所以在整个设计制造过程中飞机装配技术是一项难度大、涉及学科领域多的综合性集成技术,它在很大程度上决定了飞机的最终质量、制造成本和周期。

基于数字化技术的设计模式,在飞机设计的早期就能够及时地发现装配问题,从而达到缩短开发周期、提高设计质量和降低成本的目的。

## 虚拟装配技术在大型飞机研制中的作用

飞机设计是一个多学科协同、反复迭代、逐次逼近的过程。飞机设计中,论证和方案阶段虽然只占总研制工作量或费用的 20% ~ 30%,但对飞机设计方案的技术可行程度却占 70% ~ 80%。大型飞机构成复杂,除结构和动力装置外,还包括空调、自动飞行、通讯、电源、飞行操纵、燃油、液压、起落架、导航、气动、氧气等系统;组成零部件多,如 777 飞机由 300 万个零部件组成,这使得方案阶段的飞机总体布置不仅工作量大,而且受到结构空间的限制和多学科耦合的影响,在根据舒适性和经济性要求保证客舱和货舱空间后,系统/设备的布置空间十分紧张;同时,总体布置中还要考虑可装配性、维修性、测试性等要求。为避免设计缺陷向下游传递,尽早发现设计缺陷就显得

十分重要和迫切。目前,国内外飞机设计制造企业广泛应用数字化预装配技术,这样在设计阶段就能及时地发现产品装配、系统/设备布置等方面存在的问题,尽可能地避免设计缺陷。

数字化预装配技术是在CAD平台产品数字化定义的基础上,利用计算机技术模拟产品的装配过程,达到在零件进行加工前就进行配合检查的目的,主要用于在研制过程中及时进行装配干涉检查、装配及拆卸工艺路径规划等。

目前,以鼠标、键盘和二维屏幕为主要交互工具的人机界面以及在设计过程方面存在的局限性影响了数字化预装配技术的进一步发展,例如数字化预装配过程通过约束定位或者鼠标拖动将零部件直接装配到位,忽略了装配的中间过程,必然会遗漏很多装配细节,难以确定装配过程中是否有足够的人手以及装配工具的操作空间。于是将虚拟现实与产品设计相结合的虚拟装配技术就应运而生了,工作人员可以在沉浸式的环境中以更加逼真、自然的方式来模拟装配过程,进行可装配性设计。

虚拟装配通常是指将虚拟现实技术与已经高度发展的CAD技术有机结合,使得设计人员在沉浸式虚拟环境中通过直接三维操作对产品模型进行管理,以直观、自然的方式表达设计概念,并通过视觉、听觉与触觉的反馈来感知产品模型的几何属性、物理属性与行为表现。虚拟装配能够更加真实地模拟产品装配过程,发现更多的装配问题,避免更多的设计缺陷。

### 国内外研究现状

由于虚拟现实环境较高的实时性、沉浸感等要求,传统的虚拟装配系统大都将在CATIA、ProE、UG等商用CAD系统中建立的3D模型转化为面片模型,再导入虚拟环

境,然后在虚拟环境中以这个模型为基础定义交互行为。采用这种方法已经取得了很多成果,尤其是在飞机、汽车领域中的一些大型系统,例如vicon系统的虚拟环境,它在美国F-35战斗机设计和训练的应用中取得了良好的效果。国内浙江大学、华中科技大学、上海交通大学以及北京理工大学等都对此进行了深入研究,但其局限性越来越多地表现出来:

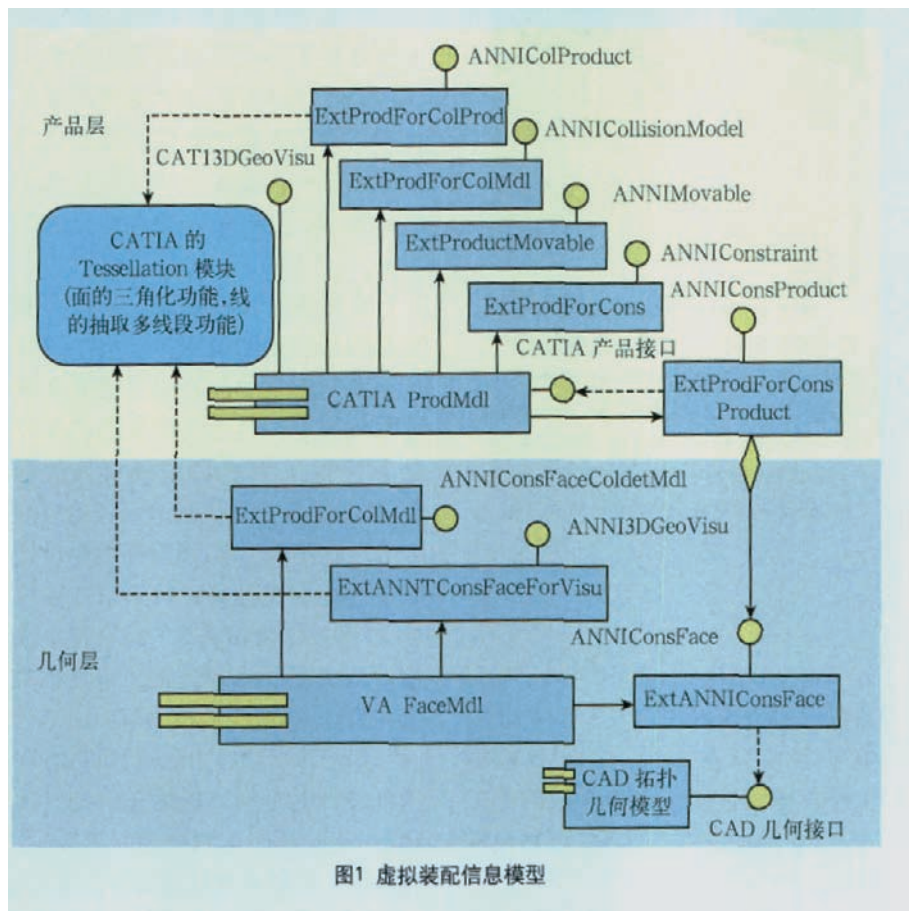
(1) 模型从CAD系统到虚拟装配系统的转化过程中会丢失拓扑信息、约束信息和参数信息等数据,对于丢失的大量信息还需要重建;

(2) 如果要修改模型必须返回到CAD系统中,再把修改好的模型导入虚拟装配系统中做进一步的操作。

一个很典型的例子就是达索系统公司(Dassault Systemes)的Delmia,在Delmia V5以前,由于与CATIA之间底层数据不统一,使得在CATIA中建立的模型还要做大

量的工作才能转化为Delmia能够接受的模型,这些工作需要花费大量的时间,后来达索系统公司将Delmia底层改写,采用和CATIA V5一致的数据模型,实现了与CATIA的完全集成,极大地提高了工作效率,也赢得了更多的用户群。

1999年,法国达索系统公司和Fakespace公司合作,采用“在CAD中增加VR功能”的技术路线,将VR集成到CATIA V5内核中,实现CAD系统对虚拟现实交互的支持。其优点为:系统开发过程中可以充分继承和利用现有成熟稳定的CAD技术,同时减少VR系统与CAD系统之间的信息转换。不过这种开发路线也需要解决很多问题,主要是与虚拟设备集成以及原始3D CAD模型的实时显示效率,使模型的显示刷新不影响虚拟交互效率。作为达索系统的合作伙伴,Immersion公司也实现了将虚拟设备引入到达索系统的V5产品中,与



# 磨粒流—— 数控去毛刺、抛光、表面处理系统

## ■ 汽车工业零部件



## ■ 刀具行业

## ■ 航空航天领域



中国区授权代理

Champion®  
精品机械有限公司

广告索引号 08-062

地址: 北京海淀区知春路1号学院国际大厦1605A室(100083)  
电话: 010-51660816 Fax: 010-82337720  
http://www.champion.com.cn Email: chambj@champion.com.cn

V5 产品紧密集成。

鉴于 CATIA 已经成为航空、汽车等领域普遍采用的设计工具,以 CATIA/CAA 为基础,采取“在 CAD 中增加 VR 功能”的技术路线,集成、改进成熟稳定的 ColDet 碰撞检测算法开放源开发虚拟装配系统,能够减少虚拟装配系统与 CAD 系统之间的信息转换,降低系统开发难度,实现集成的工作环境,并使系统看上去与原 CAD 系统毫无区别,使设计者能够更快地熟悉工作界面。

## 虚拟装配系统关键技术

### 1 虚拟装配信息模型

建立产品装配模型的目的是为了面向装配的产品设计提供信息来源和存取机制。装配模型不仅要处理设计系统的输入信息,还应能处理设计过程的中间信息和结果信息,因此装配信息模型应随设计过程的推进而逐渐丰富和完善,原则上需要支持产品生命周期中与装配相关的所有活动和过程(即面向装配的设计),包括产品定义、生产规划和过程仿真中与装配相关的各个过程,它是虚拟装配系统的核心支撑技术之一。

为了保证产品信息的完整性以及虚拟装配操作的要求,传统的虚拟装配系统在转化商用 CAD 的信息模型时,采用层次信息模型将所有虚拟装配相关信息映射起来重构产品模型,为了避免这种虚拟装配系统与 CAD 系统之间的信息转换与重构,基于 CATIA V5 二次开发环境 CAA (Component Application Architecture),利用接口扩展 CATIA 产品信息模型,建立虚拟装配信息模型(如图 1 所示),使设计者能够直接在虚拟装配环境中操作 CAD 模型,对于传统 CAD 的鼠标、键盘操作结果也能够直接反映到虚拟装配环境中来,达到虚拟装配系统与 CAD 系统的紧密集成,使得虚拟装配系统成为 CAD 系统的一部分。

图 1 给出了虚拟装配信息模型的部分重要信息和接口,主要由两部分构成,产品层通过扩展 CATIA 产品模型组件构成虚拟装配产品树,几何层主要以面信息为基础向虚拟装配提供服务。

在上述模型中,产品层实现 ANNICollisionModel、ANNIColProduct、ANNIConstraint、ANNIMovable、ANNIConsProduct 等接口。ANNICollisionModel 接口服务于产品间的碰撞检测,靠调用碰撞检测模块中的功能实现;ANNIColProduct 接口为碰撞检测模块提供初始化信息,如三角面片信息、产品标识信息等;ANNIConstraint 接口管理产品约束信息,例如加入约束,减少约束以及进行约束与产品自由度的转换等功能;ANNIMovable 接口实现设置产品位置的功能,在 ExtProductMovable 扩展类实现过程中利用 ANNIConstraint 接口获得产品自由度信息,并调用约束管理模块中的方法实现产品运动导航功能。

模型中的几何层主要由面模型组件构成,实现 ANNIConsFace、ANNIConsFaceColdetMdl 和 ANNI3DGeoVisu 等接口。其中,ANNIConsFace 接口是基类接口,对于不同类型的面模型接口都从这个接口继承,主要用于获取各种面的几何信息;ANNIConsFaceColdetMdl 接口主要用于面之间的碰撞检测;ANNI3DGeoVisu 接口提供面的临时显示信息,虚拟交互过程中高亮显示约束相关的面,给予用户视觉上的提示,方便用户做出正确的判断。

由于与 CAD 系统的紧密集成,虚拟装配信息模型实现过程中可以充分利用 CAD 本身的功能,用最少的实现就可以满足信息的完整性要求;模型非常容易扩展,需要模型支持新的装配功能时,只需定义新的接

口扩展组件,而不会破坏原有模型;同时,利用良好的接口定义,也能够方便地将虚拟装配系统移植到其他

高虚拟装配系统的交互效率。为了尽量减少碰撞检测次数,可以先采用空间剖分法对虚拟场景进行区域划

分,虚拟手或操作的零部件只与相关区域零部件进行碰撞检测,再应用层次包围盒碰撞检测算法进行碰撞检测。

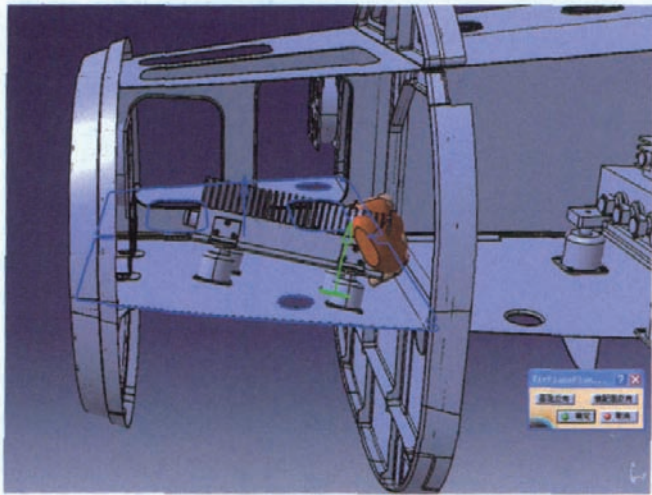


图2 约束识别

分,虚拟手或操作的零部件只与相关区域零部件进行碰撞检测,再应用层次包围盒碰撞检测算法进行碰撞检测。

### 3 约束管理

约束管理主要包括自由度分析、运动导航、约束识别和约束满足等几个部分,也是虚拟装配的关

键技术之一,通过约束管理达到零部件精确定位的目的。

自由度分析可以确定装配体的可旋转自由度和可平移自由度;设计者通过头盔显示器能够观察到零部件需要向什么方位移动,但是由于不存在真实的零部件限制设计者手的运动,设计者手的运动仍然会偏离装配体的可旋转自由度和可平移自由度,这时只能通过软件(运动导航算法)来限制虚拟场景中虚拟手和装配体的移动,使得零部件能够在要求的自由度下运动;当装配体和装配基体发

生碰撞后,通过约束识别确定有效约束,经过约束满足运算确定装配体位置。约束识别如图2所示,其规则如下:  
(1)产品面对(Face Pair)的优先级。  
越不常用的面优先级别越高,例如圆柱面的优先级高于平面的优先级,考虑螺栓的装配时,通常应该先进行圆柱面之间对齐,再进行平面之间的贴合。当然,用户也可以自定义各个产品面对的优先级。

(2)几何位置匹配。

只有当两个面达到一定的接近程度时才能继续进行约束识别,例如只有当圆柱面和圆柱面轴之间的角

的CAD系统中。

### 2 碰撞检测算法

碰撞检测是虚拟装配环境中的重要组成部分,实时性与精确性是碰撞检测的两个因素。如果碰撞检测的计算时间过长,会造成显示不流畅、物体的移动严重滞后等现象的发生。碰撞检测的精确性也是一个非常重要的指标,手的抓取动作就需要精确的检测,抓取动作的失真将影响系统的真实感,而且容易产生误抓等现象。

CAD系统一般都提供了碰撞检测功能,但其实时性无法满足虚拟装配的要求,目前已经有很多开源的、效率很高并且成熟的专门用于虚拟现实的碰撞检测算法,例如Coldet, RAPID, OPCODE等,可以通过改进开放源算法,将其集成进虚拟装配系统,而不必再花费大量时间、精力从底层研究碰撞检测算法。

这些开放源算法都只是仅仅针对单纯碰撞检测问题(两个几何体之间碰撞检测)而编写的一系列函数与类。作为虚拟装配系统,不仅要考虑底层(几何上)碰撞检测问题,而且还要从上层(产品层)考虑如何提高碰撞检测效率,从而最大限度地提

高虚拟装配系统的交互效率。为了尽量减少碰撞检测次数,可以先采用空间剖分法对虚拟场景进行区域划

分,虚拟手或操作的零部件只与相关区域零部件进行碰撞检测,再应用层次包围盒碰撞检测算法进行碰撞检测。

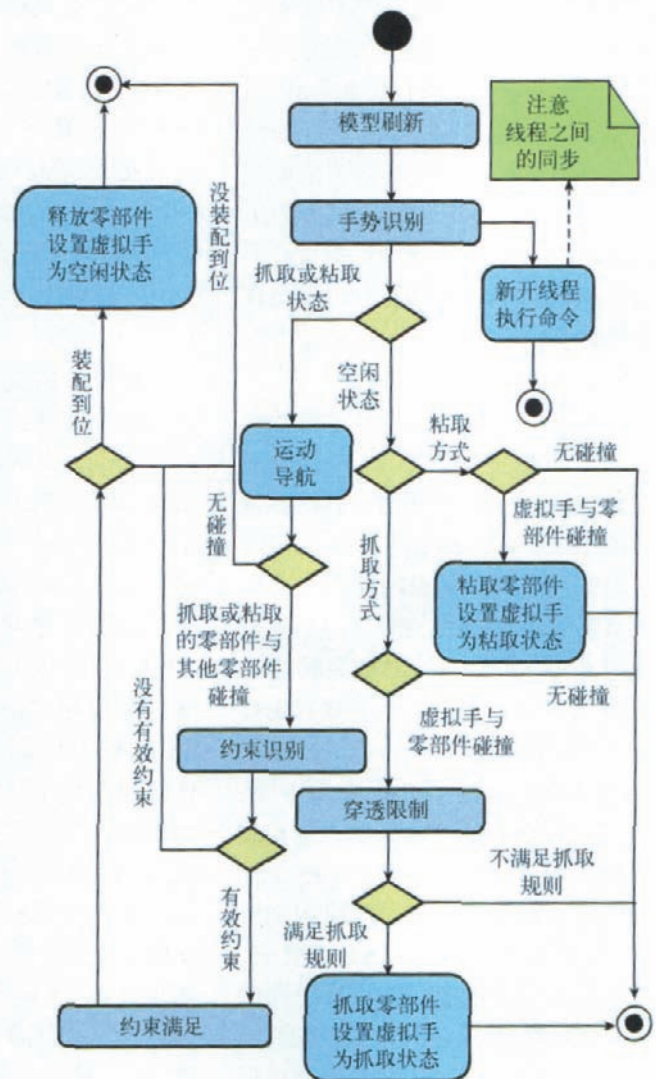


图3 虚拟手状态控制

度在一定范围内时才有效,范围可由用户自定义。

### (3) 约束参数匹配。

例如圆柱面和圆柱面半径之间的差值在一定范围内才能继续进行约束识别。

### (4) 是否过约束。

通过自由度分析来判断。

## 4 虚拟手操作

虚拟手是通过数据手套进行驱动的,将连接在手套上的位置跟踪器以及数据手套上传感器的数据转化为虚拟场景中虚拟手的变换矩阵,对于系统每一帧刷新,根据变换矩阵来驱动虚拟手。

虚拟手是虚拟装配环境中实现交互的主要工具,主要有抓取、粘取(手碰到产品即表示抓住)、拖动、释放产品和触发命令等作用。通过它,设计者可以感知是否有足够的空间将零部件恰当地装配到位,口盖开得合适不合适等问题。虚拟手粘取操作简单快速,但缺乏真实感,而抓取

操作更为复杂,不过真实感强。图3给出了虚拟手在虚拟装配环境中活动的部分流程:

(1) 通过虚拟设备获得数据刷新虚拟场景,主要根据虚拟手和它所抓住零部件的位置进行刷新;

(2) 利用手势识别功能,若存在手势命令,新开一个线程执行命令,要注意保持线程间的同步,主程序继续向下运行;

(3) 若虚拟手处于空闲状态(没有抓取或粘取到零部件),根据虚拟手抓取零部件的方式,是否与零部件发生碰撞以及抓取规则等判断是否抓住或者粘住零部件并设置相应虚拟手状态,最后结束任务并等待下一帧的刷新;

(4) 若虚拟手抓住或者粘住了某零部件,首先根据运动导航确定被抓住零部件位置,再判断其是否和其它零部件发生碰撞。如果没碰撞,结束这次任务,等待下一帧刷新;如果碰撞了,识别是否有有效的约束产

生。如果没有,结束任务;如果有,根据约束满足确定被抓住零部件的位置。若零部件的所有自由度被限制则表明装配到位,虚拟手释放零部件,结束任务;若还有可运动的自由度,结束任务,而如果设计者认为装配到此就可以了,也可以通过手势来释放零部件并改变虚拟手状态。

### 4.1 抓取条件的满足

虚拟手的抓取是个非常复杂的活动,手关节众多,各个手指用各种不同的配合都能够达到抓取的目的,要想完全模拟手的抓取动作是非常困难的,从抓取姿态的真实性、自然性和实时性等方面综合考虑出发,采取如下的抓取规则:

(1) 必须有两个或两个以上的手指与物体相接触,其中一个为大拇指;

(2) 任意两个接触面(其中有一个是与大拇指接触的面)法矢之间的夹角至少有一个大于某个预定义的临界角度。本文采用的是被抓物



## 德国SPRENGER机械、电动式装配/推削用压机

Maschinenbau  
Entwicklungen

德国SPRENGER机械、电动式装配/推削用压机经40多年专业设计和不断改进,现已广泛应用于各类机械的装配,如压进、推出轴筒、套类零件等。

同时也可使用推进型拉刀来洁净高效地制作各类花键槽。

特点

- ★ 高压力
- ★ 操作简单
- ★ 长行程
- ★ 可靠安全
- ★ 坚固设计
- ★ 节省空间
- ★ 高效装配



T5-M01  
电动式压机



T3、T5  
机械式压机

广告索引号 08-070



中国总代理 上海德物机械有限公司 地址: 上海市中山北路2130号万千大厦2001室 电话: 021-52914389 52919640 传真: 021-52917086  
 电邮: sales@dimoral.com 网址: http://www.dimoral.com/

体上分别与两根手指发生碰撞的三角片的法向量之间的夹角,临界角为 $90^{\circ}$ 。

同时满足这两个条件时,表明虚拟手抓住了零部件,虚拟手从空闲状态变为抓取状态。

规则(2)能够减少误抓现象,由于计算任意两个接触面法矢时采取的是相关三角片的法向量,因此该规则能够适应任何复杂形体的抓取,同时由于规则(1)的限制,可以节省大量的计算时间,提高效率。

目前,关于虚拟手抓取的研究仍然不够成熟,很难完全模拟手的自然抓取动作,虚拟装配交互过程中更多地采用粘取的方法。

#### 4.2 手势识别

在虚拟装配过程中,用户是带着数据手套的,很难用鼠标触发命令,利用手势触发命令是一种有效的解决途径。

手势识别方法主要分为两类:基于数据手套的方法和基于图象处理的方法,这两类方法都可以可靠地对手势进行识别。基于图象处理方法对于手的运动空间有一定限制,需要专门的照相机和瞄准线,且只能用于单用户虚拟环境;而基于数据手套的方法则没有这些限制。

基于数据手套方法的手势识别

需要预先定义一套手势指令模版(如确认、取消、平移和旋转场景手势等),系统在每个事件循环过程中,通过数据手套接口采集用户手指的弯曲程度以及运动位置,与手势指令模版中的手势匹配,比较两者之间的相似度,在可容许范围内确定当前手势。

#### 5 沉浸式立体显示

现实世界中,三维对象在人的左右眼视网膜上形成并不完全相同的两副图像,使人们产生三维立体感觉。虚拟装配系统一个很基本也是非常重要的功能就是为设计者提供沉浸式的立体显示效果,让设计者在视觉上感知产品模型的几何属性、物理属性与行为表现等信息。如图4所示,本文通过CATIA的CATI3DGeoVisu接口获得CATIA产品模型显示信息,生成两副具有不同视点的CATIA场景,利用双输出显示卡的水平跨越功能将这两副CATIA场景分别送入头盔显示器左右两个屏幕,设计者带上头盔显示器,双眼就会分别看到具有不同视点的两副图像,从而感受立体显示效果。

对于太复杂的场景会影响虚拟装配效率,但是设计阶段的场景一般不会太复杂,通常都是将产品划分为

具有一定功能的不同部分,采用局部场景,例如一架飞机全机数字样机,在HP xw8000(内存3GB,3D LABS Wildcat III 6110(128MB)显示卡)图形工作站上虽然显示仍然比较流畅,但由于还要做虚拟装配的其它工作,比如碰撞检测、约束识别等,虚拟装配效率仍然不高,而采用飞机的前机身数字样机或者更加简化的模型就能够满足虚拟装配的交互要求。

图4是某飞机前机身部分模型,虚拟场景中三角形面片总数为11885,顶点总数为120294,在普通微机工作站(P4 3.0GHz,2GB内存,NVIDIA Quadro4 380XGL(64MB)显示卡)上运行,显示非常流畅,完全能够满足虚拟装配的要求。

#### 结束语

在头盔显示器、位置跟踪器和数据手套等虚拟设备的基础上,利用CATIA V5R14及其二次开发环境CAA和Immersion Virtual Hand SDK Version 2.9等建立虚拟装配系统,实现虚拟装配平台与CAD平台的紧密集成,保证产品数据的一致性,避免传统虚拟装配系统与CAD系统之间的信息转换,使设计者在虚拟装配系统中直接操作3D CAD模型,设计分析、验证、评估和修改等任务能够直接在CAD系统中实施,虚拟装配系统成为CAD系统的一部分。利用虚拟装配技术,设计者能够在更真实、自然的环境下实现大型飞机总体布置与协调,完成装配过程模拟,维修性、测试性仿真,尽早发现设计缺陷,达到缩短开发周期、提高设计质量和降低成本的目的。

由于虚拟设备硬件等限制,比如数据手套没有重力、摩擦力感受等,还不能够模拟所有的实际装配过程,但随着技术的发展,会逐步实现对现实世界所有装配过程的完全模拟。

(责编 未艾)

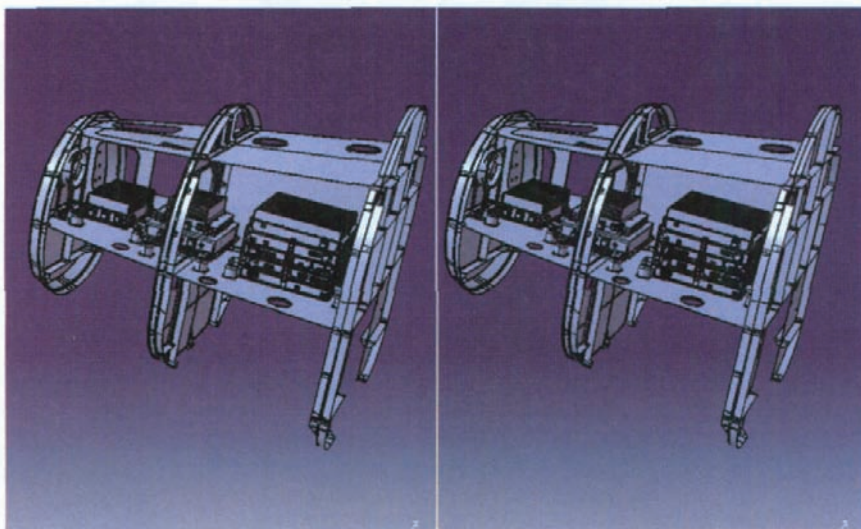


图4 立体显示左右图像对