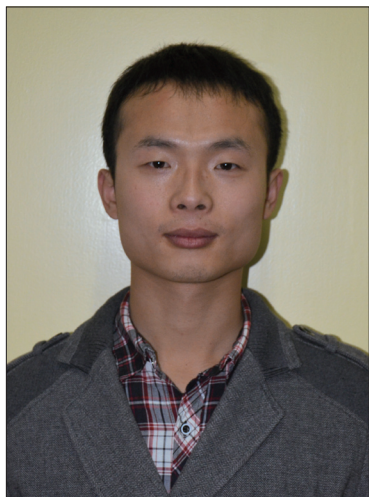


虚拟装配技术研究

Research on Virtual Assembly Technology

空军工程大学防空反导学院 韩 勇 王 洁 程永强 丁尔启



韩 勇

空军工程大学防空反导学院硕士研究生,研究方向为发射系统总体与仿真技术。

据统计^[1],产品的装配费用占整个生产成本的30%~50%乃至更高,这种比例在航空制造业中更高。随着技术的发展,装备开始向着大型化、复杂化、智能化发展。大型复杂装备集机械、电子和液压系统于一体,其整体装备由数以万计的部件组成。因此,它对产品的装配工艺以及设计效率都有极高的要求。

在传统的装配中,装配是依据实物模型来完成的,但是因为装备的日趋复杂,这种工程便显得尤其浩大。

虚拟现实技术已经在现代制造业中掀起了一场革命,作为其主要组成部分的虚拟装配技术必将得到更为广泛的应用。虚拟装配技术作为装配技术的一种新概念,为产品的研制提供了全新的途径,在现代制造业中运用虚拟装配技术已经成为一种必然的趋势。

同时,一旦装备过程中出现任何微小的错误,都可能导致装配甚至设计的改变。这样不仅使得效率低下,也使得装配成本极高。虚拟装配技术随着计算机技术发展起来的一种新技术,它是虚拟制造技术的重要组成部分,它的出现大大缩短了产品的设计开发周期、降低了成本、提高产品的质量。随着科技的发展以及对于装备要求的不断提高,虚拟装配技术开始成为装备开发中至关重要的环节。

虚拟装配的概念

虚拟装配是随着虚拟现实(Virtual Reality)技术的逐步成熟而提出的, Jaron Lanier 于1989年正式提出了虚拟现实的概念:“虚拟现实是综合利用计算机系统和各种特殊软、硬件来产生一种可以替代现实世界的仿真环境,这个环境从用户感官角度来说是真实和可信的”^[2]。虚拟

现实技术一经提出便得到了广泛的应用,尤其是在大型复杂装备中的应用更为普遍。虚拟装配是VR技术中最能发挥优势的领域。装配的复杂性高,人参与的工作量大,装配操作随意性强,装配规划及评价都需要人的智能参与。因此,虚拟装配技术成为VR技术在制造业中的焦点,典型的虚拟装配系统的组成如图1所示。

虚拟装配的实质是在计算机上进行产品的装配仿真,这也是产品的数字化设计过程。虚拟装配主要分为以设计为中心的虚拟装配、以过程为中心的虚拟装配以及以仿真为中心的虚拟装配。

1 以设计为中心的虚拟装配

以设计为中心的虚拟装配是将产品三维数字化定义应用于产品研发过程中,结合产品研制的具体情况,突出以设计为中心的思想^[3-5],这

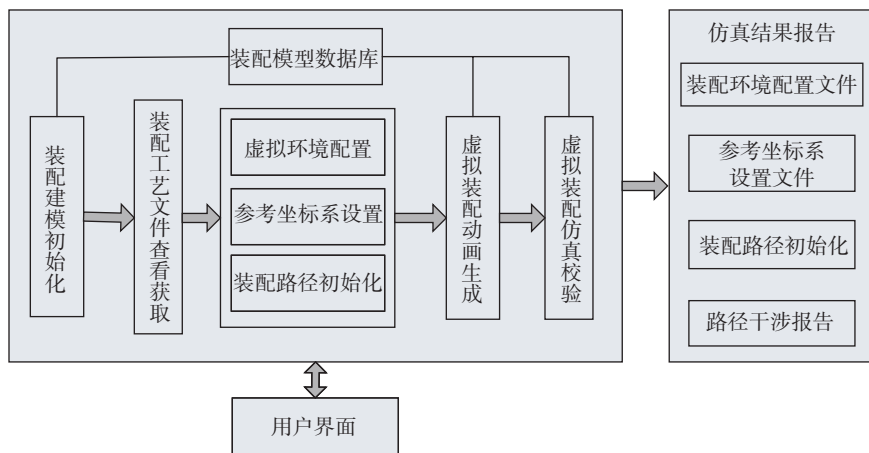


图1 虚拟装配系统组成原理图

表现在以下 3 个层面。

(1) 面向装配的设计：大型复杂设备的研制过程是一项复杂的跨学科、跨部门的系统工程，需要在产品研制初期即设计阶段进行总体的协调。主要是对产品协同工作进程的可行性与合理性进行分析，并且进行产品主体结构物理装配方案评价。面向装配的设计方法，即在设计初期把产品设计过程与制造装配过程有机结合，从设计的角度来保证产品的可装配性。引入面向产品装配过程的设计思想使设计的产品具有良好的结构，能高效地进行物理装配，使得在产品研制初期设计部门与制造部门之间能够更有效地协同工作。

(2) 自顶向下的装配建模：自顶向下装配建模是指在装配工作上下文中，根据产品设计方案和各部件间约束关系建立新组件和几何件，并将几何件加入新组件的方法。在建模过程中，每个零件的构建都是在装配环境中进行的，先在装配中建立几何模型，然后产生新组件，并把几何模型加入到新组件中。它允许设计者在高层产品设计发生变化时自动更新低层零部件的设计。由于产品的总体参数、产品的包络空间、零部件的布置与定位等主要参数都在装配的高层定义，而详细设计在零部件的底层构建，因此，通过设定产品的高层几何定义和约束，使得详细设计可

以在概念设计完成之前开始实施，使产品设计并行开展。产品设计应按照市场或客户的需求展开，他们对产品的需求决定了一些关键的产品参数，而这些参数必须合并到高级产品设计的初期设计布局中，形成所有下游设计活动的基础。图 2 即为自顶向下装配建模的流程。

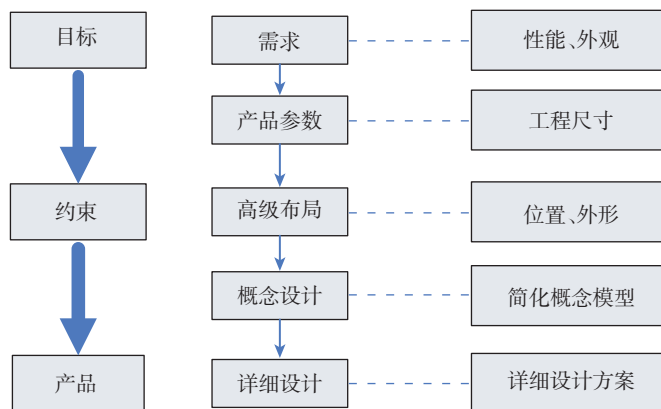


图2 自顶向下装配建模的流程

(3) 基于可再制造和再装配的设计：在产品过程中加强可再制造拆解及装配性设计，能够显著提高废旧装备再制造时的拆装能力，提高其可再制造性。再制造的拆装要求能够尽可能减少产品接头的数量和类型，减少产品的拆装深度，避免使用永久性的接头，并考虑接头的拆装时间和效率等。在设计中，若使用卡式接头、模块化零件、插入式接头等，也要考虑造成拆装中对零件损坏

的因素和问题。因此，在进行易于拆装的产品设计时，要对产品的再制造性进行综合考虑。同时，也使得以产品为中心的设计思想得以体现在每个协同工作的部门。

2 以过程控制为中心的虚拟装配

以过程控制为中心就是在虚拟装配过程中实现对产品总设计进程的控制以及控制过程的管理。(1) 实现对产品总体设计进程的控制：在数字化产品开发过程中结合产品研制特点，人为地将虚拟装配技术应用于产品设计的过程并将其划分为 3 个阶段：总体设计阶段、装配设计阶段和详细设计阶段。通过对 3 个设计阶段的控制实现对产品总体设计进程的控制。(2) 过程控制管理：过程模型包含了产品开发的过程描述、过程内部相互关系和过程间的协作等方面内容。通过对过程产品模型的有效管理实现对工程研制过程

中各种产品设计结果和加工工艺等产品相关信息的管理，从而实现优化产品开发过程的目的。

3 以仿真为中心的虚拟装配

以仿真为中心的虚拟装配是指在产品装配设计模型中融入仿真技术并以此来评估和优化装配过程，其主要目标是评价产品的可装配性。优化装配过程的目的是使产品能适应具体情况合理划分成装配单元，使装配单元能并行地进行装配；可装配性评

价主要是评价产品装配的相对难易程度,计算装配费用并以此决定产品设计是否需要修改。

虚拟装配关键技术

1 装配建模技术

产品装配建模是面向装配设计的重要环节,其实质在于如何在计算机内有效地表达装配体内在和外在的关系。模型的优劣直接影响到设计系统后续工作的效率,故而建立一个集成度高、信息完善的装配模型具有重要的意义。虚拟装配建模技术是指用来开发虚拟装配系统中各种模型的所有技术和方法。主要包括产品、过程及生产系统建模技术、虚拟公司建模技术、虚拟制造环境与现实制造环境之间结构、功能等映射关系的管理、维护、监控的更新问题及基于开放式并行处理环境下的虚拟制造开放式体系结构的研究^[6]。

2 装配模型库技术

装配模型库技术就是在装配过程中实现装配零件的标准化以及零件库的生成。通过模型库的建立可以实现产品再设计以及再装配的快速进行,完成产品设计的实时更新,也利于设计思想在产品生产、设计中更好地体现出来。同时,也可以使得零件标准化,装配过程清晰化^[7]。

3 装配规划技术

装配规划包括装配顺序规划和装配路径规划。装配顺序规划(ASP)的目标是设计出能把零件装配成产品且满足约束条件(如几何、工艺、

工具等)的顺序。装配路径规划(APP)的目标是在装配建模和装配顺序规划的基础上,利用装配信息进行路径分析,判断并得出合理的装配运动路径。装配顺序规划和装配路径规划为装配仿真提供了显示数据,装配仿真利用这些数据将设计好的装配过程以三维动画的方式呈现出来,从而方便进行设计规划结果的验证与评估^[8]。

4 虚拟拆装技术

虚拟拆装技术包括虚拟拆卸技术和虚拟装配技术2个方面。基于虚拟现实的虚拟拆装技术在新产品开发、产品的维护以及操作培训方面具有独特的作用。在交互式虚拟拆装环境中,用户使用各类交互设备(数据手套、位置跟踪器、鼠标/键盘、力反馈操作设备等)对产品的零部件进行各类拆装操作。系统提供实时的碰撞检测、拆装约束处理、拆装路径与序列处理等功能,从而使得用户能够对产品的可拆装性进行分析、对产品零部件拆装序列进行验证和规划、对操作人员进行培训等。拆装结束后,系统能够记录拆装过程的所有信息,并生成评审报告、视频录像等供随后的分析使用^[9]。

5 碰撞检测技术

碰撞检测技术可分为静态碰撞检测、伪动态碰撞检测和动态碰撞检测3类。虚拟装配工艺设计中的碰撞检测主要采用伪动态碰撞检测技术。国内外对这种碰撞检测技术进行了大量深入研究,并做出了许多富

有成效的工作,提出了空间分解法和层次包围盒法两类主流算法^[10-11]。

空间分解法将空间分解成体积相等的小单元格,每一时刻各几何物体对象处于一个或多个单元格之中。这样,几何物体间的碰撞检测问题就转化为包含该物体的单元格之间的碰撞检测问题。层次包围盒法是日前虚拟装配工艺设计技术中应用比较广泛的一类碰撞检测方法。它是利用体积略大而形状简单的包围盒把复杂的几何物体包裹起来,在进行碰撞检测时首先进行包围盒之间的相交测试(如果包围盒相交),再进行几何物体之间的精确的碰撞检测。

6 装配环境构建技术

虚拟装配环境构建是虚拟装配系统实现的关键技术之一,也是进行装配分析与规划的重要基础。环境构建的主要工作是构建三维可视化的模型展示与交互环境,从而提供基本的仿真和管理服务,帮助和引导人们在这个环境中进行装配仿真以及产品设计。因此它必须同时具备可视性、交互性、相似性、开放性等特点。

装配环境的构建主要应从CAD系统与数字化装配系统之间的信息集成、装配关键技术的应用以及图形图像的输出等方面进行考虑^[12]。图3即为虚拟装配环境构建技术的框架图。

国内外研究应用现状

国外发达国家于20世纪90年代中前期就开始了虚拟装配技术的研究,并且取得了丰硕的成果,尤其是在工业和军事的应用上更是取得了突破性的进展。近年来,国内一些重点大学和科研机构也开展了虚拟装配技术的研究,虽然起步较晚,但也取得了许多成果。

1 国外研究现状

国外虚拟装配技术的研究起步较早,且政府及工业界对其支持力度比较大,加之研究的基础条件较好,

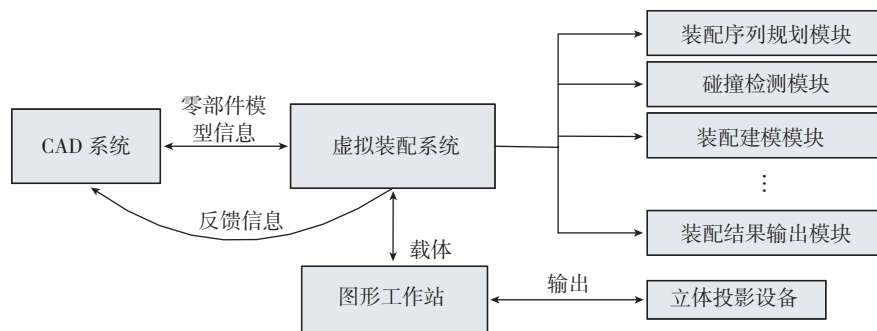


图3 虚拟装配环境构建框架图

因此发展势头相当迅猛。尤其是以美国为代表的西方发达国家在虚拟装配技术的研究以及应用都取得了很大的成就^[13-16]。

美国华盛顿州立大学与美国国家标准技术研究所合作开发研制了一个称为“虚拟装配设计环境”(VADE)的虚拟装配设计系统,目前该系统已经发展成熟并且成功开发了第二套原型系统。VADE系统是一个基于虚拟现实技术的工程应用,它允许设计者评价、分析和设计产品的装配流程。该系统主要目的是实现商业CAD系统和沉浸式的虚拟现实技术之间的紧密连接。利用这个系统,设计人员可以在设计工作的初期便可考虑有关装配和拆卸的问题,从而避免了装配设计方面的缺陷。在这个系统中,设计人员首先将在CAD系统建立的零件模型导入虚拟装配系统,然后在虚拟装配系统中直

流行的各种CAD模型,并能以多种形式输出装配工艺规划结果。目前,Archimedes系统已经被成功的应用于多家企业。

2000年,希腊Patras大学的Chyrssolouds等开发了虚拟装配工作单元VAWC,并以快艇的螺旋桨装配为例,对装配过程中的人机因素进行定性评价与定量评估。在VAWC系统中,操作者从传送带上拾取虚拟零件,通过装配工夹具安装并固定虚拟零件。在此过程中,系统根据操作者性别、体重、姿势等因素定量估计完成装配所需操作力、能量消耗及时间。

2005年意大利Bologna大学开发了基于CAD的装配规划与验证系统(PAA)。PAA系统的主要组成部分包括计算单元、微型相机、无线连接卡和便携式显示设备。该系统实现了CAD装配系统和增强现实系统之间的集成,可以有效提高对象识别能力,

它允许设计者在虚拟环境中通过直接三维操作或简单的自然语言命令与系统交互,利用标准的机械零件构造复杂的装配体。在这一系统中,物体间可匹配性的知识用于支持诸如装配、拆卸、子装配件的旋转等各种操作。

2 国内研究现状

近年来,国内高校以及科研院所开始积极的进行有关虚拟装配的课题与项目开发,并取得了大量的研究成果^[17-19]。

清华大学结合虚拟装配规划课题研制了一种装配仿真系统ASMLS,该系统可有效验证装配工艺规划结果,在一定程度上改进和完善装配工艺。在此基础上生动直观的进行产品的虚拟装配,提供虚拟装配序列规划及评价等功能。

浙江大学CAD&CG国家重点实验室在基于虚拟现实的CAD方法研究中,提出通过“用户引导的拆卸”进行拆卸过程仿真,得到零、部件的拆卸顺序和拆卸路径,从而确定产品的装配序列。并在此基础上,在四面投影虚拟环境CAVE中开发了完全沉浸式虚拟装配原型系统IVAS。在IVAS中,装配规划人员可以通过直接三维操作选择零部件并进行拆卸规划,系统通过实时碰撞检测机制自动保证拆卸过程的有效性。

海军工程大学船舶与动力学院开发了一套基于VC++和OpenGL的大型机械装置虚拟教学训练系统,提出了一种桌面式虚拟仿真训练教学系统的开发方案,详细介绍了该系统的结构设计和实现途径;利用I-DEAS建立了机械仿真三维实体几何模型,经格式转换、多边形删减和接口编程解决了机械CAD实体模型向视觉仿真表面模型的转换并被系统读入的问题;直接利用底层图形语言OpenGL对场景进行实时驱动和人机交互控制,实现了虚拟拆卸功能,并加入了基于最优拆卸序列的拆

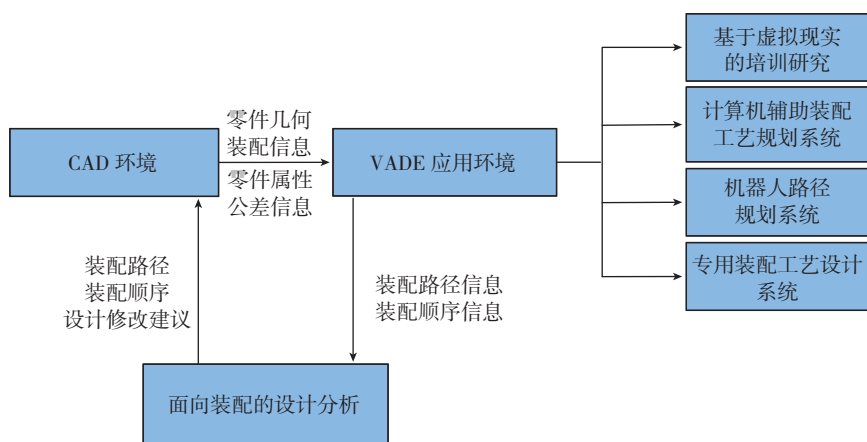


图4 VADE系统应用结构示意图

接操作虚拟零件进行装配,有关产品的可装配性得到检验,同时也获得了许多有关产品的设计和制造工艺。图4为VADE系统应用结构示意图。

美国Sandia国家实验室开发了一个名为Archimedes的用于生产优化和检查装配工艺的交互式装配规划系统。它允许用户定义工艺约束,自动生成装配工艺并判断是否满足约束条件,还可以按照用户提供的指标优化装配工艺。它可以使

生成优化装配序列和产生装配操作指令;而基于增强现实的装配评价工具允许装配设计人员和装配操作人员之间的直接交互,指导操作人员的装配。PAA可用于对复杂的装配过程进行指导,或者对混合样机的装配可行性、成本和装配规划等进行评估。

德国Bielefeld大学的B.Jung等基于构造工具的概念建立了一个虚拟装配系统CODY。该系统是一个基于知识的、三维交互式虚拟装配系

卸模式;联合 OpenGL 和 VC++ 编程实现了机械机构的运动仿真和交互式浏览;提出了通过建立装配约束关系来简化对虚拟拆装中碰撞检测的编程实现。

3 应用现状

虚拟装配技术已经在制造行业中体现了其强大的生产力,以波音公司为代表的公司在虚拟装配技术的应用上都获得了巨大的成功^[20-23]。

美国波音飞机公司在波音 777 飞机的设计过程中,依赖三维数字化设计与综合设计队伍(238 个 Team)的有效实施,保证飞机设计、装配、测试以及试飞均在计算机上完成。通过虚拟装配技术在各个环节的应用,确保了组成波音飞机的 4 万个零件能恰到好处地装配在一起,使其开发周期从 8 年缩短到 5 年并节省了大量的资金。在研制 X-32 战斗机过程中,当零件汇聚到 JSF 方案验证机总装地——加利福尼亚州帕姆戴尔时,运用虚拟装配技术的通用支架已经彻底取代了传统的支架。同样,在波音 787 的研制开发中,虚拟装配技术也被广泛采用。

美国政府与加拿大普拉特·惠特尼公司签署了一份高达 48 亿美元合同中,普拉特·惠特尼公司开发了一个可以通过无线 mo-cap 和头盔式 VR 显示器以及数据手套进行交互设计的 vicon 虚拟装配环境,美国洛克希德·马丁公司将它运用在了 F-35 战斗机设计中,并且取得了良好的效果。而且在 F-35 的研发过程中虚拟装配技术同样得到了非常广泛的应用,并且也取得了巨大的效益。

在国内,中国商飞上海飞机制造厂在 ARJ21 支线飞机的总装配工艺中实施了虚拟装配技术。通过虚拟装配环境的建立、装配过程的仿真以及装配工艺的规划,完成了 ARJ21 的研制,且大大缩短了开发时间。

中航工业昌飞公司在飞机型号的研制过程中,大力运用虚拟装配技

术,将达索公司的三维工艺设计工具 CATIA、DELMIA 软件实现了三维外形建模、结构设计、结构件的数字化定义和主要飞机系统的虚拟装配,建立了直升机虚拟装配系统。

发展趋势

虚拟装配技术作为虚拟制造技术的一个重要组成部分,在工业生产以及军事应用上开始占据着越来越重要的作用。从国外虚拟装配技术的研究现状与应用情况可以看出,虚拟装配技术的发展趋势主要体现在以下几个方面。

(1) 系统集成以及接口的标准化。目前科研单位开发的虚拟装配系统都是根据自己研究的对象来定制 CAD 接口的。因此在信息转换,数据的表达和处理等方面都没有统一的标准和规范。而且,大部分虚拟装配系统都采用 CAD 系统进行零件设计。所以建立 CAD 标准接口以完成对 CAD 零件模型数据的统一转换和信息集成是一个重要的发展方向。

(2) 虚拟装配环境的可视化。虚拟装配技术在工业领域应用的成功程度取决于它对真实世界模拟的仿真程度。目前的虚拟装配系统都以理想的另建模型为基础,没有考虑具体的加工和拆装环境对零件形状精度和尺寸误差的影响。因此对于仿真环境的可视化将成为它未来需要重点关注的地方。

(3) 虚拟装配智能导航技术。在虚拟环境中,由于触觉反馈的缺乏、位置跟踪精度低,操作者难以有效地进行零件的精确定位。通过在虚拟装配过程中实现装配智能化控制,系统便可以根据需要绘制出运动曲线来指导装配,从而大大提高装配的效率以及精度。

(4) 虚拟装配序列智能规划技术。装配序列规划是装配工艺规划的核心内容,目前的研究主要是在装

配信息模型的基础上,用推理算法推出可行的装配序列。但是随着装配体零件数目的增加,装配序列关系也开始成几何关系递增,因此新技术新方法(如人工智能等)便成为其发展的关键。

(5) 网络协同化。随着产品复杂性的增加,不同企业之间的协同和交互成为产品开发的主要形式。装配的质量在并行工程中最终体现在团队的协作和资源的共享。

(6) 提供完善的评估、验证功能。目前大多数虚拟装配系统只是提供了初步的装配评估与验证功能,对影响装配质量的因素,如装配精度、装配变形等无法进行评估和验证。因此,提供完善的评估、验证功能是虚拟装配技术在今后需要重点解决的问题。

结束语

虚拟现实技术已经在现代制造业中掀起了一场革命,作为其主要组成部分的虚拟装配技术必将得到更为广泛的应用。虚拟装配技术作为装配技术的一种新概念,为产品的研制提供了全新的途径,在现代制造业中运用虚拟装配技术已经成为一种必然的趋势。

以美国为代表的发达国家在虚拟装配技术的应用上已经取得了重大成就,而且目前国外军工制造业信息技术发展迅速,美国将先进制造技术列入国防关键技术计划和国防科技发展战略,日本、德国制订了相应的智能制造系统计划和工业基础技术研究计划。在国内,由于虚拟装配技术才刚刚起步,还远远落后于发达国家,所以对虚拟装配技术的研究以及运用必须进一步的加强。

本文共有参考文献 23 篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)