

虚拟装配技术研究现状 及其发展

Survey of Virtual Assembly and Its Perspective

哈尔滨工业大学机电学院 李建广 夏平均



李建广

工学博士,教授,博士生导师。主要从事 CAD/CAM、数字化加工与装配技术、数控加工、加工误差建模和补偿等方面的研究,完成了国家“863”、国防科工委、总装备部等多个课题的研究工作,承担和参与了与工艺参数优化有关的项目 2 项,获国家级教学成果奖二等奖 1 项,黑龙江省高等学校优秀教学成果一等奖 1 项、中国高校科学技术进步二等奖 1 项。目前承担本校本科生和研究生 CAD/CAM 和数字化制造等方面的教学工作。

虚拟装配技术已成为数字化制造技术在制造业中研究和应用的典范,针对复杂产品利用该技术可优化产品设计,避免或减少物理模型的制作,缩短开发周期,降低成本,从而实现产品的并行开发,提高装配质量和效率,改善产品的售后服务。

虚拟装配是近十几年兴起的虚拟制造技术研究的重要方向之一,它从产品装配的视角出发,以提高全生命周期的产品及其相关过程设计的质量为目标,综合利用计算机辅助设计技术、虚拟现实技术、计算机建模与仿真技术、信息技术等,建立一个具有较强真实感的虚拟环境,设计者可在虚拟环境中交互式地进行产品设计、装配操作和规划、检验和评价产品的装配性能,并制定合理的装配方案。

虚拟装配技术已成为数字化制造技术在制造业中研究和应用的典范,针对复杂产品利用该技术可优化产品设计,避免或减少物理模型的制

作,缩短开发周期,降低成本,从而实现产品的并行开发,提高装配质量和效率,改善产品的售后服务。虚拟装配在航空航天、汽车、船舶、工程机械等领域的复杂产品设计及其装配工艺规划具有重要的意义,受到国内外的普遍关注。

虚拟装配技术的 研究概况

虚拟装配以产品及其零部件的三维实体模型为基础,借助虚拟现实技术在计算机上仿真装配操作的全过程,进行装配操作及其相关特性的分析,实现产品的装配规划和评价,制定合理的装配方案。一般情况下,

虚拟装配是指在计算机上所进行的零部件模型“装配”，虚拟现实环境无关紧要，只是表现手段不同而已。虚拟装配主要实现2个层次的映射，即底层的产品数字化模型映射产品物理模型，顶层的装配过程仿真映射真实的装配过程。底层的映射避免了产品模型的物理实现，同时使得工程分析、装配仿真成为可能；顶层的映射使得产品装配规划、仿真验证及评价成为可能^[1]。

虚拟装配的研究始于1995年，美国的华盛顿州立大学和NIST联合最早进行了虚拟装配研究，开发了虚拟装配设计环境(Virtual Assembly Design Environment, VADE)^[2]。VADE通过建立一个用于装配规划和评价的虚拟环境来探索产品装配过程中应用虚拟现实技术的可能性，设计人员在产品设计初期便可并行考虑产品装/拆相关环节，避免相应的设计缺陷。VADE实现了与参数化CAD系统(如Pro/Engineer)的数据共享，能进行产品结构树、零部件实体模型从CAD的自动转换，通过捕捉CAD环境下的装配约束信息实现零部件装配顺序和装配路径规划，并为零部件的设计改进提供反馈信息。

VADE原型系统的开发标志着虚拟现实技术在装配领域的成功应用，具有里程碑意义。紧随其后，德国、英国、加拿大、希腊、意大利等多所国外高校和研究机构都开展了虚拟装配的研究。国内有关虚拟装配的研究起步于20世纪90年代末期，发展速度比较快，取得了不少研究成果。

按照国内外研究目的和实现功能的不同，虚拟装配的研究大体上围绕产品的设计、装配工艺的规划、装配系统规划和装配性能分析4个方面进行。因此，虚拟装配可分为以产品设计为中心的虚拟装配、以工艺规划为中心的虚拟装配、以制造系统规

划为中心的虚拟装配和以虚拟原型为中心的虚拟装配4类。

(1)以产品设计为中心的虚拟装配。在产品设计过程中，虚拟装配技术主要用于2个方面：一是基于虚拟装配的产品设计，二是基于虚拟装配的产品结构优化。

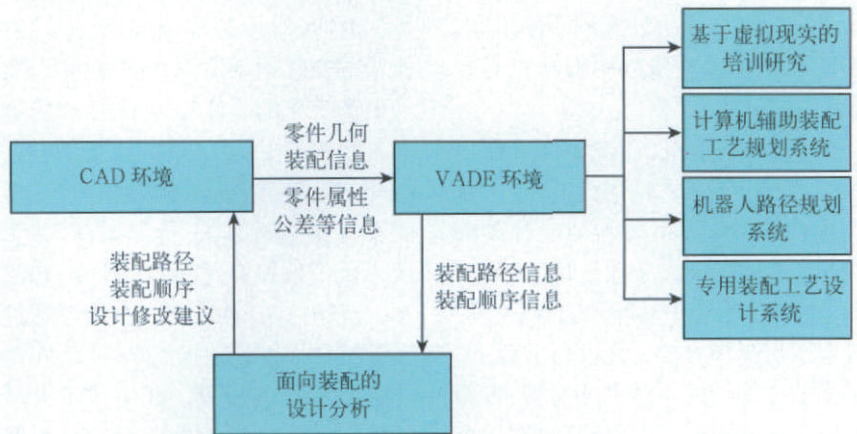
在产品设计中，基于虚拟装配的设计实质上是一种基于TOP-DOWN的CAD技术，可以实现零件和装配体的混合设计^[3]。它首先根据功能要求进行概念设计，确定关键设计参数，然后进行结构设计，根据子功能分解为子装配体并确定各子装配体间的配合关系，形成设计约束。根据确定的设计约束，可将子装配体作为子任务进行分解，可实现并行协同和相关参数的设计。

基于虚拟装配的产品结构优化是为了更好地帮助设计人员进行与装配有关的设计决策，以提高产品的可装配性，是虚拟环境下对产品的计算机数据模型进行装配关系分析的一项计算机辅助设计技术^[4]。它结合面向装配设计(Design For Assembly, DFA)的理论和方法，基本任务就是从设计原理方案出发，在各种因素制约下寻求装配结构的最优解，拟定装配草图。它以产品可装配性的全面改善为目的，通过模拟试装和定量分析，找出零部件结构设计中不适合装配或装配性能不好的结构

特征，进行设计修改^[5]。

(2)以工艺规划为中心的虚拟装配。针对产品的装配工艺设计问题，基于产品信息模型和装配资源模型，借助计算机仿真技术进行产品的装配工艺设计，获得可行且较优的装配工艺方案^[6]。以工艺规划为中心的虚拟装配的主要研究内容是装配作业与过程规划，包括装配或拆卸顺序的规划、装配路径的规划、工艺路线的制定、操作空间的干涉验证、工艺卡片和文档的生成等内容。以工艺规划为中心的虚拟装配，具有高逼真度的操作仿真，在虚拟装配中实施对象、操作过程以及所用的工装工具，均与生产实际情况高度吻合，可以生动直观地反映产品装配的真实过程，为装配工艺的规划提供可靠的验证和优化手段。此外，以工艺规划为中心的虚拟装配系统可进一步用于装配培训和现场示教^[7-8]。

(3)以制造系统规划为中心的虚拟装配。针对车间柔性装配制造系统的规划，基于产品的信息模型、装配工艺和装配资源模型，利用计算机仿真技术进行柔性装配制造系统的设计、仿真和分析^[9]，主要研究内容包括柔性装配系统建模、生产规模与生产周期分析、资源分配、装配车间布置、装配生产线平衡分析、自动化装配操作误差诊断与预测^[10]、装配单元装配操作控制及其仿真^[11]等，为柔性



VADE应用结构示意图^[2]

装配系统的设计与调整、协同操作与控制提供支持。

(4) 以虚拟原型为中心的虚拟装配。虚拟原型是利用计算机建模和仿真系统在一定程度上对产品的外形、功能和性能进行模拟,以产生与物理样机具有可比性的效果来检验和评价产品特性。虚拟装配和虚拟原型技术的结合,可以有效地分析零件的设计公差及其加工与装配过程中的误差^[12]对产品装配性能的影响,为产品的精度分析、公差优化设计等提供可视化手段。

虚拟装配技术的研究现状

虚拟装配技术的发展和与应用与虚拟现实技术、计算机技术、人工智能技术、网络技术、产品设计等多学科领域的发展紧密相关,在总体上国内外学者还是围绕虚拟装配核心技术、虚拟装配环境和虚拟装配应用系统3方面展开研究。

1 虚拟装配核心技术

虚拟装配的核心技术是开发虚拟装配应用系统时必须解决的重要共性技术,涉及零部件建模、装配序列规划及优化、可行装配路径规划、装配合理性评价、决策支持、装配误差分析等内容。

(1) 零部件建模。由于虚拟现实软件建模能力的限制,CAD系统仍是虚拟装配中零部件模型建立的主要手段。根据系统开发的手段不同,虚拟装配中模型建立的方法也有较大的差异。

• CAD模型。虚拟装配应用系统直接基于CAD系统开发,可以直接应用CAD系统的功能和零部件的CAD模型。文献[13]在Pro/Engineer系统中对叶片的装配过程进行了仿真和分析。直接利用CAD模型的虚拟装配系统易于实现,零件和装配体的建模、装配仿真可在一个系统下进行^[3],操作简单,但操作仿真

的真实感和可靠性受到限制,主要用于产品的设计阶段。

• 转换的CAD模型。利用虚拟现实软件开发的虚拟装配系统,需要将CAD零部件模型及其相关信息转换后导入到虚拟环境,实现交互操作。例如,美国的VADE从Pro/Engineer系统中提取产品结构树信息、装配约束信息以及零部件几何信息,实现CAD系统和虚拟装配系统的自动转换。新加坡南洋理工大学研究了CAD和VR之间的集成方法,开发了基于CAD紧密连接的虚拟装配环境。国内上海交通大学CIMS研究所实现了Unigraphics与虚拟现实系统之间的集成;北京理工大学实现了Pro/Engineer系统和虚拟现实系统之间的集成。哈尔滨工业大学也通过模型转换实现了从SolidWorks、Pro/Engineer系统到虚拟装配系统的输入。

• VRML模型。为了实现基于Internet协同虚拟装配,VRML模型受到了关注。清华大学的协同虚拟装配系统采用了VRML模型^[4]。

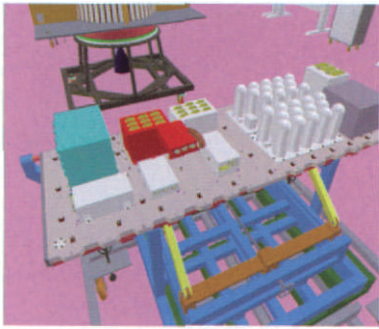
(2) 装配/拆卸规划技术。工艺设计人员根据经验、知识在虚拟装配环境中交互地对产品的三维模型进行试装/拆卸,规划零部件装配/拆卸顺序,记录并检查装配/拆卸路径,验证工装夹具的工作空间并确定装配/拆卸操作方法,验证装配、拆卸方案,最终得到合理的装配方案。VADE在虚拟装配环境下,通过约束下的交互运动仿真和碰撞检查,实现装配工艺的验证和规划、维修验证等。德国的IAO开发的虚拟装配系统^[15],在产品的设计阶段基于虚拟现实交互地进行装配、拆卸操作,并实现人机工效评价,预测装配时间和成本。英国的Heriot-Watt大学通过装配特征识别规划拆卸顺序^[16],实现了装配顺序的规划。华中理工大学开发了基于虚拟原型的装配序列规划及评价系统VPASPE,借助于虚拟

拆卸产生初始装配序列,应用几何推理方法生成可行装配序列^[17]。浙江大学研究了基于语义识别的虚拟装配操作,从而实现直观自然的人机交互装配与拆卸操作。哈尔滨工业大学建立了基于几何约束的虚拟装配环境,在该环境中根据经验和知识进行交互式拆卸,定义优先约束表来表达零件间的优先约束关系,应用优化算法规划出初始优化的装配顺序,再在虚拟环境下进行仿真、评价,进一步优化。

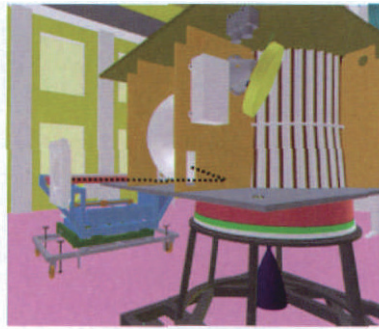
(3) 装配规划优化技术。在虚拟装配环境中,可通过仿真对预定的装配规划进行验证,借助优化算法搜索装配顺序,通过确量化指标进行评价,最终实现对装配规划的优化。华中科技大学的VPASPE在虚拟原型的基础上,通过人机交互提取装配专家知识,对自动生成的装配顺序进行评价^[17],并利用蚁群算法搜索和优化装配顺序^[18]。哈尔滨工业大学应用优化算法规划出初始优化的装配顺序,在虚拟环境下进行仿真、评价,再应用优化算法进一步优化,多次循环,最终获得优化的装配方案。

(4) 交互操作。在虚拟装配中,零部件模型的交互操作通过碰撞检测和动作的类型来实现,碰撞检测也用于装配路径的验证,其效率和可靠性影响虚拟装配操作的效果。如Iowa State University利用波音公司的VPS系统进行虚拟装配中的碰撞检测和交互^[19]。德国的Bonn大学研究了虚拟装配中多输入系统交互控制技术^[20],如语音和手势识别等,可实现模型在约束下的运动和精确定位。

(5) 装配过程中的人因分析。通过虚拟现实技术,开发人员可以在产品开发阶段就对产品装配过程中涉及的人机因素(如装配所需时间、装配操作的舒适程度、安全性)进行分析。例如,采用虚拟现实技术对人工装配中操作者的装配力与装配姿态



(a) 虚拟装配操作



(b) 装配路径规划

卫星虚拟装配系统示例

进行定量评估,并分析装配所需的最大装配力以及每个装配循环过程中的平均装配力^[21],以避免装配工人的疲劳;利用人机工程学模型分析装配工位空间布局对人操作强度的影响^[22],以设计出最优的装配工位。商业化的软件系统(如 Tecnomatix 和 Delmia)均集成了人因分析功能。

2 虚拟装配环境

虚拟装配的环境决定了虚拟装配应用系统的规模、投资、功能,针对不同的应用,虚拟装配的环境各有不同。概括起来虚拟装配环境的研究可分为以下几类:

(1) 基于 CAD 平台的虚拟装配系统。通过对 CAD 系统的开发实现虚拟装配的功能,如文献 [13] 基于 Pro/Engineer 系统叶片的装配过程进行仿真和分析。该类系统具有强的模型编辑能力,但仿真的真实感和可靠性较差。

(2) 基于通用虚拟现实开发系统的桌面虚拟装配系统。虚拟装配系统的开发基于通用的虚拟现实开发系统(如 WKT、Vega、PTC Division Mockup 等),可以连接一些虚拟现实的输入/输出设备,具有一定的三维立体和交互效果。哈尔滨工业大学利用 VC++ 和 PTC Division Mockup 开发了卫星虚拟装配系统,在虚拟环境下进行装配过程交互规划,最后生成装配工艺文档。

(3) 大规模的虚拟现实系统。该虚拟装配环境功能强大,沉浸感强。

浙江大学的 CAD&CG 国家重点实验室研究了大规模虚拟现实环境(如 CAVE)下复杂产品的装配工艺规划的显示优化问题,以提高交互的实时性^[23]。葡萄牙的 CCG 公司开发了 ITS(Immersive Training System)虚拟系统,用于装配培训^[18]。

3 虚拟装配应用系统

在虚拟装配技术的研究过程中,针对不同的应用开发了多种虚拟装配原型系统,代表性的系统简介如下:

(1) VADE^[2]。该系统的研究始于 1995 年,是第一个具有代表性的虚拟装配系统,其目的是通过建立一个用于装配规划和评价的虚拟环境来验证产品装配过程中应用虚拟现实技术的可能性。

(2) UVAVU^[24]。1997 年,英国的 Heriot-Watt 大学开发了虚拟装配规划系统 UVAVU。基于当时力反馈设备以及跟踪设备的局限性,采用了“接近捕捉”和“碰撞捕捉”的精确定位方法。

(3) JIGPRO^[25]。JIGPRO 系统是 1999 年美国 Wichita 州立大学开发了基于虚拟现实的产品装配及夹具设计系统,能够将 CAD 系统中设计的产品零部件和夹具模型、虚拟手模型以及人体模型导入虚拟环境中,进行装配过程仿真,确保产品装配工夹具设计具有良好的装配性能与人机性能。

(4) 虚拟装配工作单元^[26]。希腊

的 Patras 大学在 2000 年开发了虚拟装配工作单元,以螺旋桨装配为例,对影响装配时间的因素(如装配者的力量、工作单元布局等)进行了分析评价,通过建立的半经验式的时间模型,可对装配过程中的人机因素进行定性评价和定量估计。

(5) MIVS(Multi-modal Immersive Virtual Assembly System)^[23]。2002 年浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室建立了 MIVS,用于装配工艺规划和装配过程评价,并可生成装配工艺文档。

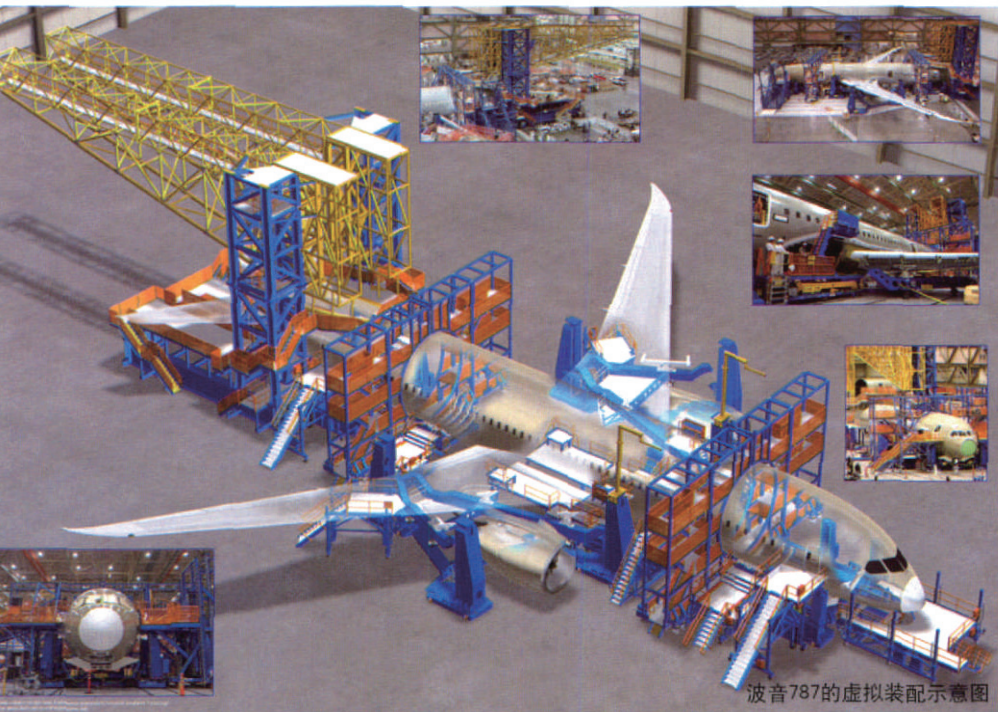
(6) VASS(virtual assembly support system)^[27]。清华大学开发的 VASS 为设计师和装配工程师提供了一个产品的可装配性/可拆卸性仿真和评价系统。该系统可实现装配顺序规划、工具规划、装配路径规划、装配过程仿真,最终生成装配文档。

(7) PAA(Personal Active Assistant)^[28]。该系统是 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 系统利用 CAD 工具来有效提高对象识别能力,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 可用来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。

(8) 涡轮泵三维数字化装配工艺系统^[29]。2005 年哈尔滨工业大学基于 SolidWorks 开发了“涡轮泵三维数字化装配工艺系统”。该系统采用几何推理和人工知识相结合的方法进行装配顺序规划,可在微机上实现三维环境下产品装配的交互工艺规划及仿真,并可指导现场装配。

目前研究存在的主要问题

虽然虚拟装配技术具有广阔的



波音787的虚拟装配示意图

应用前景,国内外研究也取得了很大的进展,但是虚拟装配技术的各种理论和方法还不成熟,大多数研究及其成果处于预研或试用阶段,距实际工程应用还有较大距离,在技术方面主要存在以下问题:

(1) 缺乏规范化的共享开发平台。在国内外的研究方面虽然已形成了“百家争鸣”的局面,但没有出现“百花齐放”,由于缺乏规范化的公共开发平台,各家应用系统或原型系统开发时重复性的工作较多。

(2) 建模能力弱。目前,虚拟装配系统的模型需要 CAD 系统准备,模型修改能力弱,在产品的并行设计中应用困难。

(3) 装配工艺规划复杂。装配工艺规划是一个经验性很强的活动,需要大量的经验和知识,缺乏装配过程的智能引导和优化。

(4) 交互操作可靠性和灵活性有待提高。由于基于碰撞检测的交互操作是一个多输入、大计算量的过程,输入系统的灵敏性、碰撞检测的计算效率等因素都影响交互操作的可靠性。

(5) 功能需进一步增强。虚拟装

配系统除了工艺规划和装配过程仿真外,还应具备如装配力变形分析、工装夹具的设计、装配质量预测、装配人员工效分析等功能。

(6) 开放性和集成能力弱。由于虚拟装配系统开发的方法、环境差别较大,与其他系统集成和数据交换的能力弱,制约了虚拟装配系统的开发与与现有其他系统的集成。

虚拟装配技术研究的 发展趋势

虚拟装配技术是一项多学科交叉的综合技术,涉及的各项技术仍在不断的发展之中,将来的发展方向主要体现在如下几方面:

(1) 开放性的系统框架。虚拟装配系统的开发涉及到支撑技术、数据库、虚拟现实、用户界面等多方面的技术,需要构架虚拟装配系统的结构框架,规划支持技术群、统一的模型信息结构、功能实现和系统集成接口等,从而通过信息和技术共享、系统集成,较快地开发出工程应用系统。

(2) 基于网络的虚拟装配。随着产品复杂性增加,不同企业之间的协同和交互成为产品开发的主要形式。

装配作为产品功能的最终体现的环节,其工艺设计、分析、规划、验证更需要若干团队人员的协同参与,基于网络的虚拟装配必将为产品的开发提供强有力的支持。

(3) 模型交换接口。建立 CAD 与虚拟装配系统模型交换的标准接口,制定 CAD 模型的数据提取和表达、信息的存储和管理等方面的统一标准和规范,为虚拟装配系统的应用提供必要的几何信息、特征信息和约束。

(4) 智能化的装配方案设计。对结构复杂的产品而言,由于装配工艺本身的复杂性,仅依靠人的经验知识进行搭积木式组装而获得的可能只是一种可行的装配方案,而不一定是优化的装配方案,而且具有一定的不确定性。集思广益,全面考虑,虚拟装配系统可以交互地利用专家系统智能化地进行装配方案的设计,并且对之进行仿真和评价。

(5) 装配质量分析。目前,在产品设计和虚拟装配中,通常以理想的零件模型为基础,没有考虑实际的加工和装配环境对零件形状和尺寸精度的影响,可能导致实际生产出来的零件装配性能不能满足要求。在虚拟装配中,可以设定零件的形状和尺寸、定位误差等,预测装配精度,也可以通过分析装配过程零件变形的影响,评价装配工艺,从而更全面地为产品设计和生产提供支持。

(6) 基于虚拟装配的管路、线缆布局。在复杂产品中(如飞机、船舶、火箭发动机等),由于空间和结构的限制,各种刚性管路和柔性线缆等交错缠杂在一起,给设计和装配操作带来很大困难,虚拟装配技术可以为管路、线缆布局设计提供有效的支持。

本文有参考文献 29 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 金卯)