

# 基于行车的 Fusion 虚拟装配系统的设计研究

龙鹏程, 刘松林, 吴宜灿

(中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**核装置体积大、结构复杂、装配精度高,为降低该类型装置的装配风险,节约装配成本,提出了一个以面向 PC 平台、支持大型复杂装置装配规划、训练、演示为主要目标的基于行车的虚拟装配系统(FVAS)。文中通过对三维场景交互、大模型实时碰撞检测、装配定位、装配过程记录、多视点漫游观察等虚拟装配主要技术环节的研究,利用面向对象的视景仿真开发包 Open Inventor,结合 VC++ 和商用 CAD 软件 Unigraphics,实现了 FVAS 的原型设计。该系统成功仿真了我国即将运行的先进超导托马克实验装置 EAST 的装配方案,并在先进的聚变驱动次临界堆 FDS-I 概念设计研究中得到应用。

**关键词:**虚拟装配;碰撞检测;虚拟漫游

**中图分类号:**TP391.9 **文献标识码:**A

## Preliminary Design of the Fusion Virtual Assembly System Based on Crane

LONG Peng - cheng, LIU Song - lin, WU Yi - can

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui 230031, China)

**ABSTRACT:**A preliminary design of the Fusion Virtual Assembly System (FVAS) has been presented to achieve the goal of assisting assembly planning, training and demonstration of large - scale complicated machines, such as nuclear systems, based on PC (Personal Computer) platform. The prototype of FVAS has been designed and implemented with Open Inventor, VC++ and UG, through the research of interaction with 3D scenes, collision detection between large - scale models, record of assembly processes, virtual roaming and other key sections of virtual assembly. And virtual assemblies of the Experimental Advanced Superconducting Tokamak device (EAST) and the fusion - driven sub - critical system (FDS - I) are successfully simulated on FVAS.

**KEYWORDS:**Virtual assembly; Collision detection; Virtual roaming

### 1 引言

核能系统装置,一般具有体积大、结构复杂、装配精度高、投资大、潜在风险高等特点,而且运行后装置大多处于放射性环境中。为缩短设计周期、降低成本与风险、提高质量,需要在实际装配之前,对其进行精确的装配规划。

目前,复杂装置的装配规划,对于工程人员来说,仍然十分困难。尽管 CAD(Computer - Aided Design) 系统可以通过显示产品装配体的方式,来帮助工程人员评价产品空间布局的合理性;但是,它们不支持装配过程的可视化和规划。

虚拟装配(Virtual Assembly, VA),作为虚拟现实技术(Virtual Reality, VR)与计算机仿真技术相结合的产物,集成了两者的优点,可以将平时难以直接操作的非常巨大、或

非常微小、或非常昂贵的机械装置以非常直观的方式展现在人们面前,并允许人们对其进行直接操作。它与传统的实物原型装配相比,具有装配周期短、成本低、风险小等特点。

最近几年虚拟装配技术受到广泛重视,发展很快,发展势头强劲,已取得了一些可喜的进展,出现了一系列各具特色的虚拟装配系统,如 VASS<sup>[1]</sup>,VDVAS<sup>[2]</sup>,以及 VRAS<sup>[3]</sup>等等。然而,这些研究都是针对基于虚拟手的小型零件装配而进行的,并未考虑到需要复杂装配工具(如行车)支持的大型复杂装置装配的特点。廖祝华等针对大型超导 Tokamak 实验装置(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)的三环(真空室、内冷屏、纵场)套装设计的 VAS 系统<sup>[4]</sup>,虽然支持 EAST 三环套装过程中的部件公差验证;但是,作为一个虚拟装配系统,它具有如下不足:缺乏部件目标位姿的识别机制;不支持部件的完整过程装配仿真;缺乏灵活方便的漫游机制。

基金项目:中科院知识创新工程项目

收稿日期:2006-03-02 修回日期:2006-03-16

基于上述研究成果,笔者设计了一个以聚变(Fusion)装置装配为实例的虚拟装配系统原型(Fusion Virtual Assembly System, FVAS),它以面向普通 PC 平台、支持大型复杂系统装配规划、训练、演示为主要目标。该系统通过建立虚拟装配环境,允许用户进入虚拟环境并与虚拟场景中的部件、装配工具等物体进行便捷交互,从而实现虚拟装配。本文将介绍 FVAS 的总体设计思想、系统框架、主要功能与特点、以及测试情况。

## 2 FVAS 总体设计与特点

### 2.1 总体设计与实现

FVAS 的开发采用了面向对象的技术和现代软件工程的方法,它是基于 Visual C++ 6.0, Open Inventor for Win32, Unigraphics API 开发的。FVAS 的系统框架如图 1 所示。

在虚拟装配之前,用户需要在 Unigraphics 环境中对装配环境(如厂房)、装配工具(如行车)、装配对象各部件进行单独建模;然后,利用 Unigraphics Assembly Package 将这些模型装配成装配体,以确定装配对象、装配工具与装配环境间关系,各部件间关系,以及各部件在装配体坐标系中的位置、姿态。这些 Unigraphics 几何文件,通过 FVAS 的模型转换模块,自动转换生成 FVAS 所需要的描述文件。这些描述文件中包含有各物体的两套模型信息:一套用于碰撞检测的精确模型(碰撞模型);另一套用于虚拟场景显示的简化模型(显示模型)。碰撞模型进入基于 Unigraphics API 开发的碰撞模型库;显示模型进入基于 Open Inventor API 开发的显示模型库。

FVAS 利用显示模型建立好虚拟环境后,用户可通过交互式装配、装配过程规划等接口与场景中的物体进行交互,以进行虚拟装配操作,实现装配规划、训练。

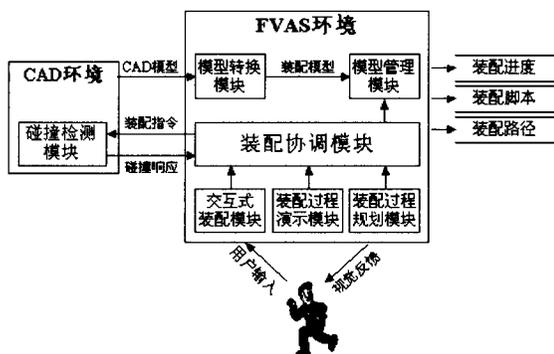


图 1 FVAS 系统框架图

### 2.2 系统框架

FVAS 主要由以下几大模块组成:

1) 模型转换模块:根据装配对象的 CAD 装配体模型,自动转换生成 FVAS 要求的装配对象描述文件。

2) 模型管理模块:管理虚拟场景中的各种模型;并负责

场景的相应更新操作。

3) 碰撞检测模块:实时检测场景中物体间的碰撞情况,保证装配操作不会引起物体间的穿透现象。

4) 装配协调模块:协调碰撞检测模块和模型管理模块,响应装配操作命令。

5) 交互式装配模块:提供用户交互式虚拟装配接口;接收用户输入信息,通知装配协调模块进行相应操作,以实现交互式虚拟装配操作;并生成装配脚本文件。

6) 装配过程规划模块:提供装配过程规划接口;并生成装配脚本文件。

7) 装配过程演示模块:解析装配脚本文件,实现装配过程的重现。

其中,模型管理模块、碰撞检测模块是系统的核心;交互式装配、装配过程规划、装配过程演示模块是系统提供给用户的三个接口;这三个接口模块通过装配协调模块与核心模块联系,以提供虚拟装配支持。

### 2.3 主要功能与特点

1) 自动装配建模:FVAS 建立虚拟环境时,需要的是装配对象各部件的三角面片模型。FVAS 具备从装配对象的 CAD 装配体模型中读取各种装配信息(如约束信息、几何信息等)并生成 FVAS 所支持的装配对象及其各部件描述文件的功能。

2) 交互式虚拟装配:交互式虚拟装配是虚拟装配系统的基本功能,可用来帮助装配人员熟悉装配方案。

3) 装配过程规划:装配过程规划提供接口,供用户来规划装配序列、装配路径,并生成相应装配脚本文件;可用来辅助装配工艺设计人员规划装配方案。

4) 装配过程记录与演示:在交互式装配、或装配过程规划时,FVAS 自动记录用户的各种装配操作(记录在装配脚本文件中)。一个装配进度对应一个装配脚本文件;然而,一个装配脚本文件由多个片断组成;一个片断对应装配进度的一次更新。如此设计的好处在于:装配过程演示时,用户可以任意选择起始片断。这使得装配过程演示十分灵活方便。

5) 部件目标位姿识别:在交互式装配过程中,FVAS 支持部件目标位姿的识别,并采用“近似定位”<sup>[5]</sup>的方法来调整部件到其目标位姿,也就是说,当部件运动到目标位置附近(位置偏移误差允许范围内),且其姿态也与目标姿态相近时(姿态偏移误差允许范围内),系统自动将当前部件调整到其目标位姿处,完成该部件的装配。只要给定合适的位置偏移误差、姿态偏移误差,这种方法不会影响装配精度,而且它具有易于实现、运算速度快等优点。

6) 实时碰撞检测:在虚拟仿真应用中,实时碰撞检测被认为是一个主要的计算瓶颈,对于面向 PC 平台的仿真应用来说,更是如此。虽然基于 VR - CAD 的碰撞检测方法<sup>[6]</sup>在速度方面已经具有一定优势,但它仍存在一些不足,例如:它没有考虑到装配过程中,用户一次只能操作一个部件,也就是说,当场景中有 n 个部件时,一次碰撞检测只要检测(n -

1) 对部件, 而它却检测了  $\frac{(n-1)n}{2}$  对部件。因此, 笔者对该方法进行了改进: 碰撞检测时, 只检测当前部件与其它部件间的碰撞情况; 用于碰撞检测的模型不需显示, 而对用于显示的模型进行简化。这进一步降低了碰撞检测的开销, 提高了系统的实时性。

7) 多视点观察自然真实: 在 FVAS 中, 用户的装配操作是通过碰撞检测、视觉反馈等信息来导航的。FVAS 采用了以视点(即, 虚拟人眼, 或摄像机)为中心的观察机制。用户通过控制视点移动、旋转, 可获得类似于人在虚拟场景中移动身体、旋转头部时所获得的观察效果。FVAS 通过引入多视点, 并支持视点间的快速切换, 使得用户可以很方便地获得目标场景的多角度视觉信息, 方便了用户的装配操作。

8) 支持子装配体操作: FVAS 系统中的虚拟场景由装配环境、装配工具、装配对象等组成。装配对象是虚拟环境的主体, 如何有效组织装配对象的部件信息, 是 FVAS 设计的一个关键部分。为支持子装配体(由若干个部件组成的集合)操作, 笔者引入了“组件”概念, 提出了如图 2 所示的组件场景结构, 其关键在于组件的定义: 一个子装配体对应一棵组件树, 子装配体由组件树的根节点(根组件)标识; 组件树的叶子节点为部件组件(仅包含一个部件), 中间节点为装配组件(由 1 个以上子组件组成); 用户只能操作根组件。这种结构支持: 将两个部件约束在一起形成一个子装配体; 对子装配体进行移动、旋转等操作。

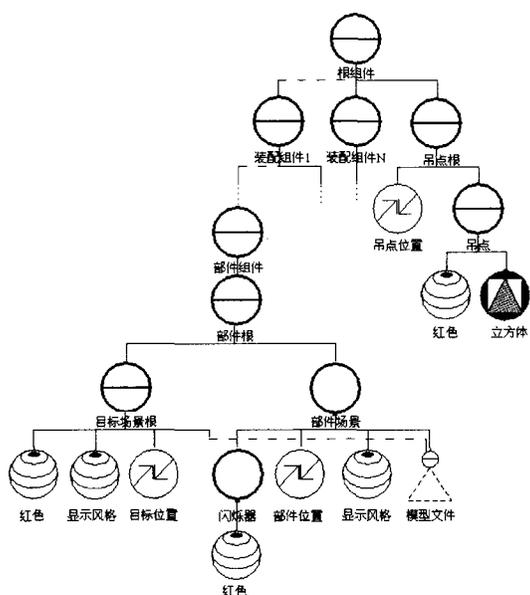


图 2 组件场景结构图

### 3 测试实例

为检验 FVAS 的可用性与实用性, 以及对核能系统等大型复杂系统虚拟装配的支持能力, 笔者采用一系列实际工程实例对该系统进行了测试。测试工作是在 CPU 为 Pentium IV

2.0 GHz、显卡为 Geforce IV 64 MB、内存为 768 MB 的 PC 机上进行的。这里笔者将简单介绍两个实例的测试情况: ① 中国即将建成的实验先进核聚变实验装置 EAST<sup>[7]</sup>; ② FDS 团队提出的尚处于概念设计阶段的聚变驱动次临界堆 FDS-I (Fusion - Driven Sub - critical System)<sup>[8]</sup>。

EAST 是一个工程实际问题, 它的体积大、结构复杂、装配精度要求高(在其关键的三环套装过程中, 部件间间隙只有 20mm)等特点, 要求在实际装配前进行精确的装配规划。在 FVAS 系统上, 参照 EAST 主机实物装置装配工艺<sup>[9]</sup>对 EAST 进行了交互式虚拟装配。测试结果表明: 系统的碰撞检测达到了实时性要求; 交互式装配过程很好地模拟了真实装配过程。图 3 所示即为进行三环(真空室、内冷屏、外冷屏)套装时发生碰撞的情形, 图中当前部件因与其他部件发生碰撞而红色闪烁显示。此外, 交互式装配产生的装配脚本, 检验了系统装配过程演示功能的灵活方便性。

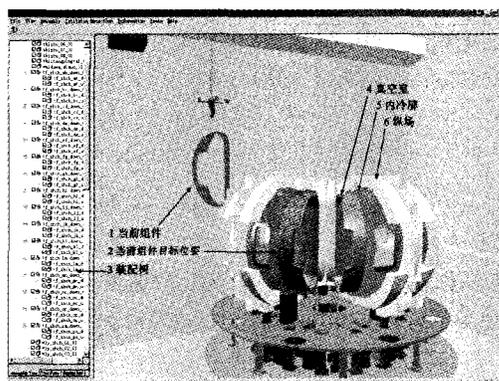


图 3 交互式装配 EAST 时发生碰撞的情形

FDS - I 与 EAST 相比, 它的体积更加巨大, 高约 16.5m, 直径约 18.6m, 而且尚处于概念设计阶段。对 FDS - I 进行的装配过程规划测试, 成功检验了装配过程规划接口的实用性, 进一步验证了系统的可用性与实用性。图 4 所示, 即为在 FVAS 上规划 FDS - I 装配过程时一部件装配路径显示的情形。

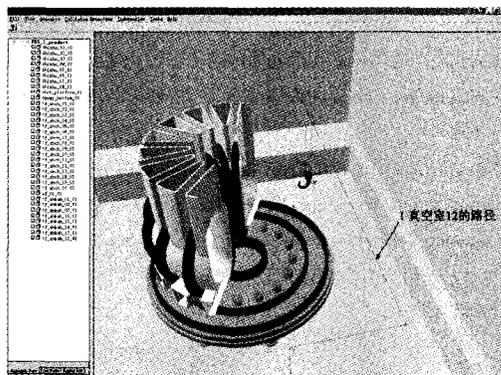


图 4 规划 FDS - I 装配过程时的路径显示

## 4 结束语

FVAS 系统提供了灵活方便的多视点漫游功能,支持交互式装配、装配过程规划、以及装配过程演示等功能,可以用来辅助装配规划、装配训练、以及装配演示。以 EAST、FDS-I 为实例的一系列测试工作,验证了该系统的可用性与实用性。

然而,FVAS 在模型设计修改、装配方案评价、以及物体重力等物理属性等方面的研究不够深入,有待进一步改进。

### 参考文献:

- [1] 曾理,等. 一个虚拟装配支持系统的实现[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(9): 1149 - 1153.
- [2] 万华根,等. VDVAS: 一个集成的虚拟设计与虚拟装配系统[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7A(1): 27 - 35.
- [3] 杨润党,等. 虚拟环境下产品装配技术的研究与实现[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(10): 1220 - 1224.
- [4] 廖祝华. 反应堆典型部件的装配和维护仿真关键技术研究[D]. 中科院等离子体物理研究所硕士学位论文, 2004. 42 - 53.
- [5] R G Dewar, I D Carpenter, J M Ritchie. Assembly planning in a virtual environment[C]. Portland International Conference on

Management and Technology, 1997. 664 - 667.

- [6] 刘松林,等. 基于 VR - CAD 的碰撞检测方法在 EAST 三环套装虚拟仿真中的应用[J]. 工程图学学报, 2005, 26(2): 46 - 49.
- [7] Y X Wan, et al.. HT - 7U Superconducting Tokamak: Physics design, engineering progress and schedule[C]. 19th IAEA Fusion Energy Conference, 2002. 14 - 19.
- [8] Y Wu, et al.. Conceptual design of the fusion - driven subcritical system FDS - I[J]. Fusion Engineering and Design, 2006, 81(8 - 14): 1305 - 1311.
- [9] Wu Songtao, et al.. The Procedure for Assembling the EAST Tokamak[J]. Plasma Science & Technology, 2005, 7(4): 2893 - 2896.



### [作者简介]

龙鹏程(1982.04 -),男(汉族),安徽人,硕士生,主要研究方向:装配仿真。

刘松林(1967.10 -),男(汉族),河北人,博士生,副研究员,主要研究方向:虚拟仿真。

吴宜灿(1964.10 -),男(汉族),安徽人,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向:先进核能系统相关设计研究。

(上接第 182 页)

优解域的搜索,可以保持多目标优化问题最优解集的多样性,算法除了具有很强的寻优能力,还可以更好地均匀覆盖 Pareto 前沿。实验结果表明,相比于其它同类多目标优化算法,本文算法得到的 Pareto 最优解集分布均匀,且收敛速度比较快,计算复杂度较低,能够更好地解决多目标优化问题。

### 参考文献:

- [1] H Mühlenbein and G Paa. From recombination of genes to the estimation of distributions I. Binary parameters[C]. Parallel Problem Solving from Nature - PPSN IV, 1996. 178 - 187.
- [2] M Pelikan, D E Goldberg and F Lobo. A survey of optimization by building and using probabilistic models[R]. IlliGAL Tech. Rep. 99018. , 1999.
- [3] M Pelikan, D E Goldberg and E Cantú - Paz. BOA: The Bayesian optimization algorithm[C]. Proc. Genetic and Evolutionary Computation Conf. (GECCO - 99), 1999, 1:525 - 532.
- [4] P Larra aga, R Etxeberria, J A Lozano and J M Pe a. Optimization by Learning and Simulation of Bayesian and Gaussian Networks[R]. Dept. Comput. Sci. Artific. Intell., Univ. Basque Country, Tech. Rep. EHUKZAA - IK - 4/99, 1999.
- [5] C M Fonseca, P J Fleming. Genetic algorithms for multiobjective optimization; formulation, discussion and generation[C]. Proceedings of the 5th International Conference

on Genetic Algorithms, 1993: 416 - 423.

- [6] J Horn, N Nafpliotis. Multiobjective optimization using the niched Pareto genetic algorithm[R]. USA: IlliGAL Report 93005, 1993.
- [7] N Srinivas, K Deb. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2 (3): 221 - 248.
- [8] E Zitzler, K Deb and L Thiele. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results[J]. Evolutionary Computation, 2000, 8 (2): 173 - 195.
- [9] Pareto V Cours D Economie Politique[M]. F Rouge, Lausanne, 1896, I and II.
- [10] O Duda, E Hart and G Stork. Pattern Classification(Second Edition)[M]. USA: John Wiley & Sons, Inc, 2001: 450 - 452.



### [作者简介]

钟润添(1974.2 -),男(汉族),广东惠州人,硕士研究生,主要研究方向为模式识别、智能信息处理。

龚海峰(1977.11 -),男(汉族),湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为模式识别、智能信息处理。

李斌(1970.2 -),男(汉族),安徽合肥人,副教授,主要研究方向为模式识别、智能信息处理。

庄镇泉(1938.3 -),男(汉族),福建漳州人,教授,博导,主要研究研究为模式识别、智能信息处理。