

装配过程快速仿真建模 服务平台*

Service Platform of Rapid Simulation Modeling for Assembly Process

北京航空航天大学机械工程及自动化学院先进制造技术与系统研究中心 朱怡心 乔立红



朱怡心

北京航空航天大学机械工程及自动化学院工业与制造系统工程系博士研究生,主要研究方向为数字化工艺设计、装配过程仿真及信息集成。

飞机产品结构复杂,协调环节多,精度要求高,工艺阶段多,需要综合考虑产品装配的精度、时间、成本和效率,使得装配工艺设计非常复杂。工艺过程设计中存在的问题会造成后续生产装配的时间周期变长,

为了解决制造企业装配工艺过程仿真所遇到的建模复杂、时间长及系统异构等问题,提高仿真建模的效率和可重用性,建立数据驱动的装配过程快速仿真建模服务平台是一种有效的方案。该平台采用基于服务的架构设计,通过定义装配过程仿真所需工艺信息模型和仿真模型控制,实现数据驱动的快速仿真建模。

成本升高,也将影响最终获得的产品精度。资料显示,如果在实际生产装配阶段才发现问题,整个费用将增加50%^[1]。所以,对设计的工艺过程进行分析和验证,对保证产品精度,减少生产装配中的错误,降低装配成本具有重要作用。计算机技术和仿真技术在工艺设计中的应用,可提供数字化工艺设计和仿真验证的手段,从而可有效提高工艺设计的水平和效率,已得到广泛的研究和应用。在装配工艺设计中,仿真工具可以对装配过程进行顺序仿真、装配路径干涉检查、装配公差分析和仿真、装配生产线物流和生产线能力平衡仿真、机构

运动仿真、以及装配变形仿真等。其中,将装配可行性、装配顺序、装配路径、装配公差分配及装配生产线能力平衡等工艺内容和工艺参数在计算机模拟环境中进行分析和验证,以保证这些内容和参数的正确性和可用性,是大多飞机制造企业针对飞机装配工艺过程需要进行仿真。但由于需要仿真验证的内容和参数多,因而需要涉及的仿真系统多,且仿真系统的使用一般都比较复杂,仿真模型需要具备专业知识的人员进行建模。例如,使用公差仿真软件3DCS,就需要建模人员能熟练操作三维CAD模型,理解特征的含义,具备国际最

* 国家自然科学基金(51075022)、预研项目及北京市教育委员会共建项目资助。

新的几何公差规范 GPS 的知识,同时,对各种统计分析工具和分布函数具有较深的认识和了解。此外,由于不同企业使用的仿真应用系统不尽相同,比如装配过程仿真软件有 DELMIA、EM Assembly;公差分析软件有 3DCS、eM-TolMate 等,车间物流仿真软件有 Plant Simulation、Quest 等。企业如果想更换仿真软件或者在企业间交流仿真知识时,由于软件不同,需要将相同功能的仿真模型在新的软件中重新构建,增加了时间和成本,降低了效率。

装配工艺过程仿真验证方法及分析

由于仿真对于装配工艺及后续生产的重要作用,学术界和工业界对仿真技术的研究和应用进行了大量的探索。美国国家标准技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)建立了国家先进制造测试平台(National Advanced Manufacturing Testbed, NAMT),进行虚拟制造的研究^[2]。在汽车行业,克莱斯勒公司在引进虚拟制造技术以后,新车型的开发时间由原来的 36 个月缩短为 24 个月^[3]。在航空制造业,国外以波音和空客为代表的工业界和学术界对利用仿真对装配工艺进行验证和优化做了大量研究和实践。通过利用数字化技术,建立飞机全机级的三维设计实体样机模型,在此基础上进行全机产品单元的数字化预装配;同时,考虑装配工艺与装配工装夹具等装配资源,以及人机工程学,采用数字化虚拟装配仿真系统进行全机级产品装配过程的数字化装配仿真模拟,解决装配过程的可行性、方便性和经济性。通过尽可能早地发现产品及产品制造过程可能存在的干涉与不协调问题,在实物产品开始生产前解决所有可能出现的设计和工艺缺陷,优化产品结构及装配工艺^[4-6]。

在国内,成飞公司利用达索的 DELMIA 软件,对数字化装配工艺仿真验证和优化进行了应用研究^[7],通过调用 PPR HUB 数据库中存储的工艺设计信息(如 MBOM、AO)和三维数模进行了装配仿真验证。通过装配过程仿真,及时地发现产品设计、工艺设计、工装设计存在的问题,有效地减少装配缺陷和产品的故障率,减少因装配干涉等问题而进行的重新设计和工程更改,并通过仿真录像使装配工人更容易理解装配工艺,减少了人为差错。在新产品开发方面,通过三维数字化装配工艺设计与仿真,减少了技术决策风险和技术协调成本。

目前对装配工艺仿真的探索和应用主要包括以下几个方向:

(1) 协同仿真验证方法。

通过建立不同仿真功能软件之间的信息集成与通信,实现对装配工艺全方位的验证。如美国洛克希德·马丁战术飞机系统小组(Lockheed Martin Tactical Aircraft Systems)和波音军工部(Boeing Military Company)于 1998 年联合开展的仿真评估验证环境(SAVE)项目,该项目通过对 F-22 某组件进行仿真,证明通过利用集成多种仿真工具,设计人员和工艺规划人员可以在产品设计阶段就精确地预测产品的成本,计划以及产品和工艺的可行性。通过仿真可以预测出产品实际生产中可能出现的错误,并显著地减少这些错误。此外,数字化工厂技术是协同仿真验证研究中较为成熟的技术^[8],由卡尔斯鲁厄大学 Worn. H 教授于 2000 年提出。在国外,数字化工厂技术已在航空航天、汽车、造船以及电子等行业得到应用,特别是在复杂产品制造企业取得了良好的效益,据统计^[9],采用数字化工厂技术后,企业能够减少 30% 产品上市时间;减少 65% 的设计修改;减少 40% 的生产工艺规划时间;提高

15% 生产产能;降低 13% 生产费用。Dong Liang 等^[10]研究了飞机装配工艺过程信息的表达方法,建立的飞机装配工艺过程的四级模型,利用过程描述语言 PSL 将工艺过程四级模型转换为中性的 XML 文件,在工艺系统和仿真系统之间共享过程数据,实现这两者的协同。Heming Zhang 等^[11]提出一种集成协同框架,实现了工艺数据在不同仿真系统中的共享。协同仿真验证方法的技术特点是:多软件协同,集成技术,并采用统一数据模型。主要缺点是建模周期长,成本较高。

(2) 虚拟仿真验证方法。

利用虚拟现实技术,让工艺人员在虚拟环境中对装配工艺进行验证。如美国国家标准技术局 NIST 与华盛顿大学联合开发的 VADE (Virtual Assembly Design Environment) 项目^[12]。国内也已开展了虚拟装配的研究,如浙江大学、清华大学、上海交大、西北工业大学、北京理工大学及北京航空航天大学等高校都开展了相关工作。浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室在四面投影虚拟环境 CAVE (Computer-Assisted Virtual Environment) 中开发了完全沉浸式虚拟装配原型系统 IVAS (Immersive Virtual Assembly System)。清华大学国家 CIMS 工程技术研究中心在商品化 CAD 软件 Pro/ENGINEER 基础上二次开发了一个工具软件系统——虚拟装配支持系统 VASS。上海交大开发了分布式虚拟装配系统 (DPVAE)^[13]。虚拟仿真验证方法的技术特点是:虚拟现实技术,数据手套和立体眼镜的使用。存在的问题是技术不成熟,成本高。

(3) 数据驱动的快速仿真验证方法。

美国联合技术研究中心的 Jeong 等^[14]基于仿真数据和仿真模型分离的原则提出了一种分析、设计及数据库驱动相结合的仿真模型自动生成

方法。该研究采用 IDEF1X 建立数据模型,将其转化成 Access 数据库格式,并根据该数据格式在仿真建模类库构建一个模型自动生成器。该方法使非仿真专业人员无须编程就能开发仿真模型,提高了建模效率。

NIST 的 Swee Leong 等^[15]提出了解决车间生产系统数据交互和共享的核心制造仿真模型(Core Manufacturing Simulation Data, CMSD),利用这个模型,车间制造软件如 MES、ERP 和 MPS 等可以实现与仿真环境 DES 的数据交互,通过集成数据驱动仿真软件快速建模。该方法已在 Volvo 的异构喷涂车间生产中得到验证。

Junfeng Wang 等^[16]提出一种数据驱动的生产建模和复杂生产线仿真方法,该方法利用 IDEF1x 方法建立了一个完整的生产线仿真数据模型,通过二次开发 Arena 的数据接口,将生产线仿真数据数据导入 Arena 并自动建立对应的模型,实现了包括物料运输系统的汽车生产线仿真的快速建模。

但现有的数据驱动的快速仿真建模的缺点主要有:(1)仿真模型与仿真软件耦合度高,无法实现平台无关;(2)仿真平台系统封闭,不便于调用其中的仿真数据,难以有效地利用仿真的结果;(3)多为针对特定的仿真软件和仿真功能,建模方法的扩展性不强。

因此,在装配工艺过程仿真验证领域存在的主要问题有:

- (1) 仿真模型复杂,建模周期长。
- (2) 异构仿真系统多,信息共享困难。
- (3) 仿真任务多样,缺乏统一的仿真模型建立方法。

装配过程快速仿真建模服务平台

为了解决制造企业装配工艺过程仿真所遇到的建模复杂、时间长及

系统异构等问题,提高仿真建模的效率和可重用性,建立数据驱动的装配过程快速仿真建模服务平台是一种有效的方案。该平台采用基于服务的架构设计,通过定义装配过程仿真所需工艺信息模型和仿真模型控制,实现数据驱动的快速仿真建模。

1 平台设计要求

为弥补目前在快速仿真建模研究中的不足,构建的装配过程快速仿真建模服务平台应该满足以下要求:

(1) 数据驱动:通过直接读入装配过程仿真所需数据的方式建立仿真模型,缩短仿真建模周期。

(2) 平台无关:通过定义与具体软件无关的仿真结构控制方法,实现仿真模型与具体仿真软件的分离,仿真模型的平台无关,增强了仿真模型的可重用性。

(3) 控制结构配置灵活:由于不同功能的仿真模型的结构不尽相同,为了适应各种可能的仿真模型结构控制,平台的仿真模型结构控制可以针对各种不同的情况和功能进行配置。

(4) 方便调用:作为装配工艺设计重要的一环,装配过程仿真信息必须能够被方便地调用。

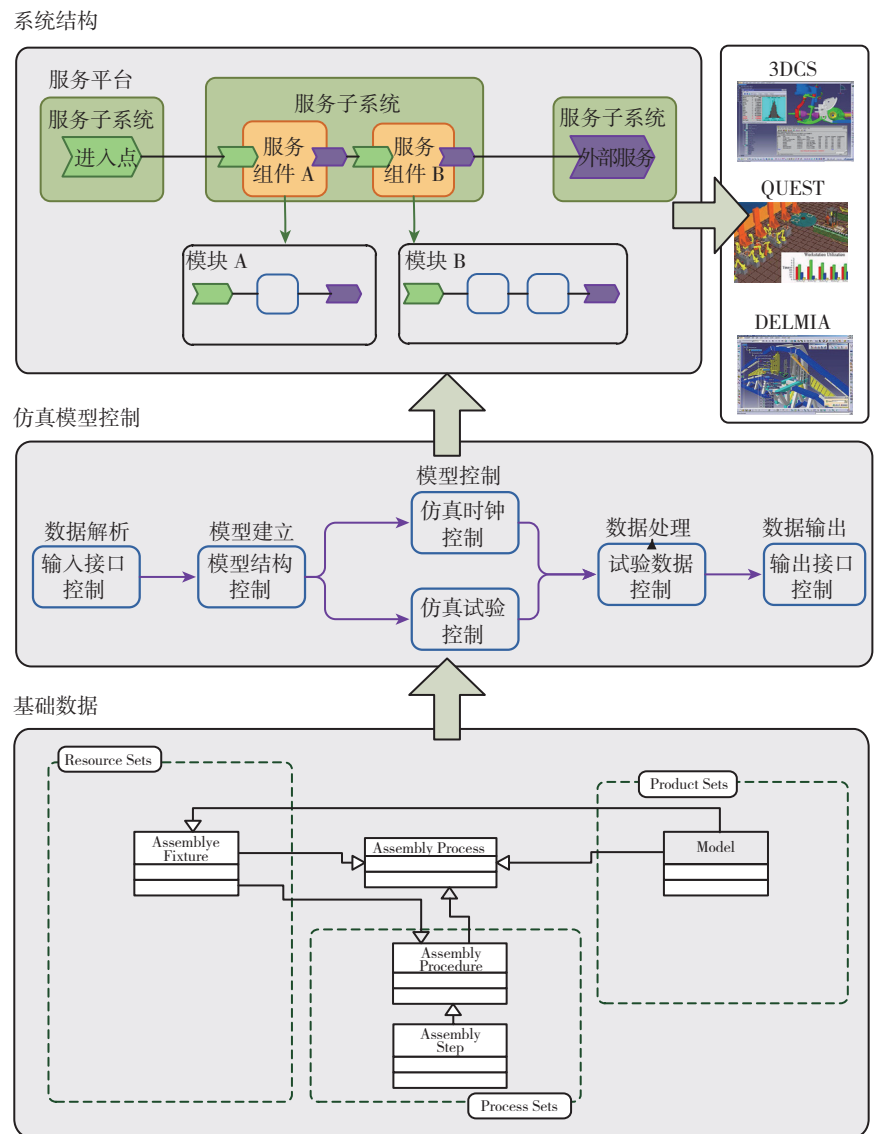


图1 装配过程快速仿真建模服务平台结构框架

(5) 扩展性强: 平台可以进行扩展以适应不同的仿真实验要求。

2 平台结构框架

根据平台设计要求, 装配过程快速仿真建模服务平台的结构框架可如图 1 所示。通过对装配过程仿真所需的装配工艺过程信息进行建模和结构化定义, 从而确保平台可以从装配工艺中提取足够的装配过程仿真所需工艺信息作为数据驱动的来源。在此基础上, 通过组件化设计和定义的仿真模型控制对数据进行解析, 建立仿真模型, 控制模型的仿真过程, 最后分析得到仿真的结果。由于整个过程都独立于具体的仿真软件进行, 从而可保证仿真模型的平台无关性。在系统结构上, 该框架采用服务组件架构 (Service Component Architecture, SCA) 技术, 利用服务组件的形式对各个功能模块进行建立, 保证了系统的可配置性和扩展性。

3 服务组件

快速仿真建模框架采用面向服务的思想, 利用服务组件构架 SCA 构建应用程序和系统模型, 不仅可使建模平台可配置和可扩展而且, 还扩展了以往用于实现服务的方法, 对其形成补充, 此外, SCA 构建于 Web 服务系列标准等开放标准之上。

如图 2 所示为服务组件构架的服务平台结构, 服务平台由若干个具有特定功能的子系统装配而成。每个子系统通过不同的服务组件配置而成, 而每个服务组件又通过模块的方式实现, 这种结构使得业务逻辑的配置以及功能的扩展具有更多的灵活性。

4 快速仿真建模的实现过程

利用装配过程快速仿真建模服务平台实现快速仿真建模的过程如图 3 所示。当系统在接收到装配过程仿真所需的工艺数据后, 对其进行解析, 根据数据内容建立仿真模型, 同时通过对仿真时钟和仿真实验的调整对整个仿真模型的仿真过程进

行控制, 仿真过程中产生的数据通过采集进行数据处理, 并最终通过输出接口输出为对装配工艺验证有用的数据。由于整个过程中都是由数据驱动, 同时, 模型仿真的整个流程都由计算机自动控制, 从而实现了快速仿真建模。

5 快速仿真建模服务平台构建与实施的关键技术

装配过程快速仿真建模服务平台的实现中有两项关键技术, 装配过程仿真信息建模技术和装配过程仿真控制流程及控制服务组件设计技术。前者将定义装配过程仿真中所需的工艺信息及其结构, 为快速仿真提供数据基础和驱动; 后者则将仿真模型的结构与具体的仿真软件分离, 实现仿真模型与平台无关, 提高

仿真模型的可重用性。

(1) 装配过程仿真信息建模。

装配工艺过程仿真所需信息按照其类型可以分为装配产品集、装配资源集和装配过程集三个部分。

装配产品集描述装配工艺中用产品几何进行描述的信息, 如装配单元划分、候选定位面及装配路径等信息。产品信息以装配特征为单元, 在产品设计模型的零件、约束、直线及面等几何元素上定义反映装配工艺要求的信息。本文按照装配工艺几何信息的类型将装配特征分为 3 种:

- 结构特征: 提供产品结构方面的信息和分析结果, 如装配可行方向、部件连接自由度、结构强度和承力面等, 这些信息将辅助装配工艺人

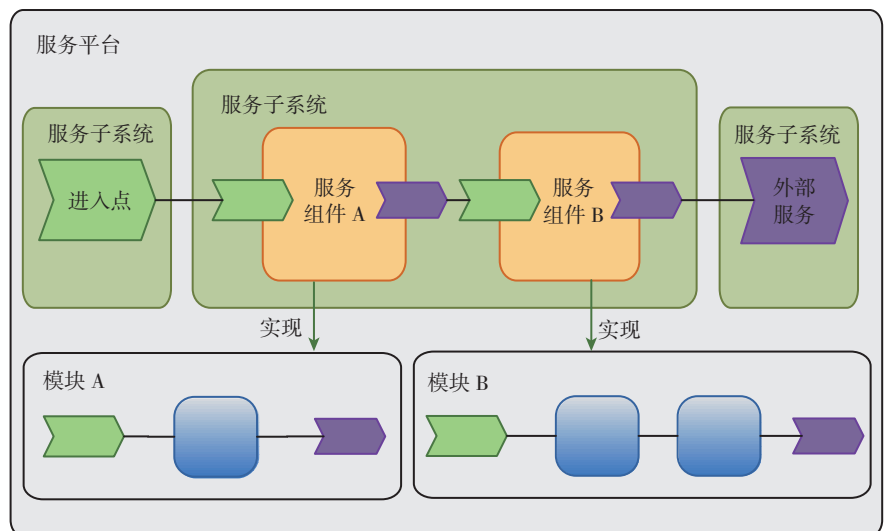


图2 服务组件构架示意图

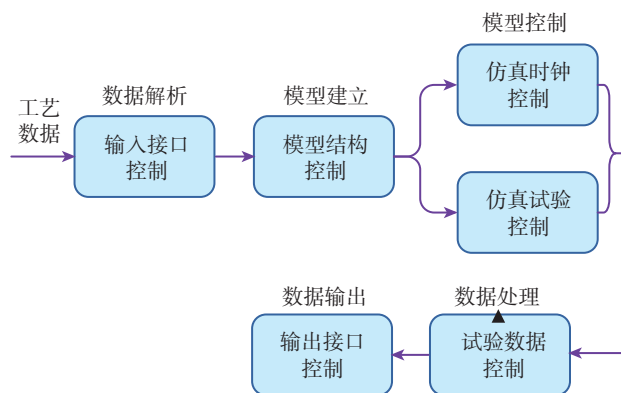


图3 快速仿真建模流程

员对装配顺序、装配单元划分以及装配工作出设计。

- 安装特征：提供产品工装设计的要求信息和设计结果信息，输入信息包括运输方式、候选基准定位面及候选装夹区域等，装配工艺设计人员根据这些信息对装配工装，定位方式和运输设备进行设计，从候选的定位面和装夹区域选择可行的方案并存储在安装特征中。

- 操作特征：提供产品装配中两个零件之间的装配操作关系信息，如装配起始位置、接触区域、配合类型、装配路径以及修配补偿等要求。

装配过程集描述装配工艺中的过程相关信息，包括工序信息、工步信息和对应的装配方法等信息。装配资源集描述装配过程中使用的装配资源，以装配工装为中心，包括工装的区域信息、状态参数、工装对应的装配设备和安装操作等信息。

图4为装配过程仿真所需工艺信息的UML模型。在模型中，装配工艺过程由产品模型、装配工序信息和工装资源共同组成，其中装配单元划分、装配协调信息由模型类中的

结构特征表达。工装信息由资源集中的工装类、工装模型以及此工装工位上的工序信息(即该工位的制造计划)共同表达。工序信息包括工步信息、对应的装配工装、装配方法和其对应的操作特征。

(2) 装配过程仿真控制流程及控制服务组件设计。

通过对装配过程仿真所需装配工艺过程信息进行定义，从给定装配工艺过程中提取装配过程仿真所需的工艺数据，为通过数据驱动方法建立仿真模型提供数据基础。但这样的仿真模型属于抽象模型，不能直接被具体的仿真软件所使用，为解决抽象模型向具体仿真软件的实际模型的转换问题，本文对抽象仿真模型与具体仿真软件中实际模型的相互关系进行分析，研究装配过程仿真结构控制方法；设计装配过程仿真控制流程及其相关的控制服务组件，实现装配过程仿真模型由抽象模型向具体软件中的实际模型的转化和运行控制。通过分析仿真控制中的共性功能，建立仿真运行控制模型，将仿真过程中诸如实验数据采集及仿真

时钟控制等功能抽象出来，最大限度地提高模型仿真控制的可用性，实现仿真建模与平台无关。如图5所示，通过归纳和分析，仿真模型的控制功能以及相互关系一般包括以下几类：

- 数据解析子系统：为系统的进入点，负责将输入仿真模型的数据转换为仿真模型可识别的格式，并以参数的形式赋予仿真模型；

- 数据输出子系统：发布为外部服务，当该服务被调用时，将仿真的运行数据、统计数据、分析数据等结果信息以中性文件的形式输出；

- 模型建立子系统：主要包括模型结构控制组件，该组件根据仿真数据对生产线仿真模型的框架描述，快速建立生产线仿真模型实例，包括仿真资源、运行逻辑以及模型的初始状态；

- 模型控制子系统，该子系统包括两个组件：其中，仿真时钟控制组件控制运行仿真的方式，一般分为等步长和不等步长两种；仿真试验控制组件对仿真试验的方式进行设计和控制，包括试验的具体结构，运行

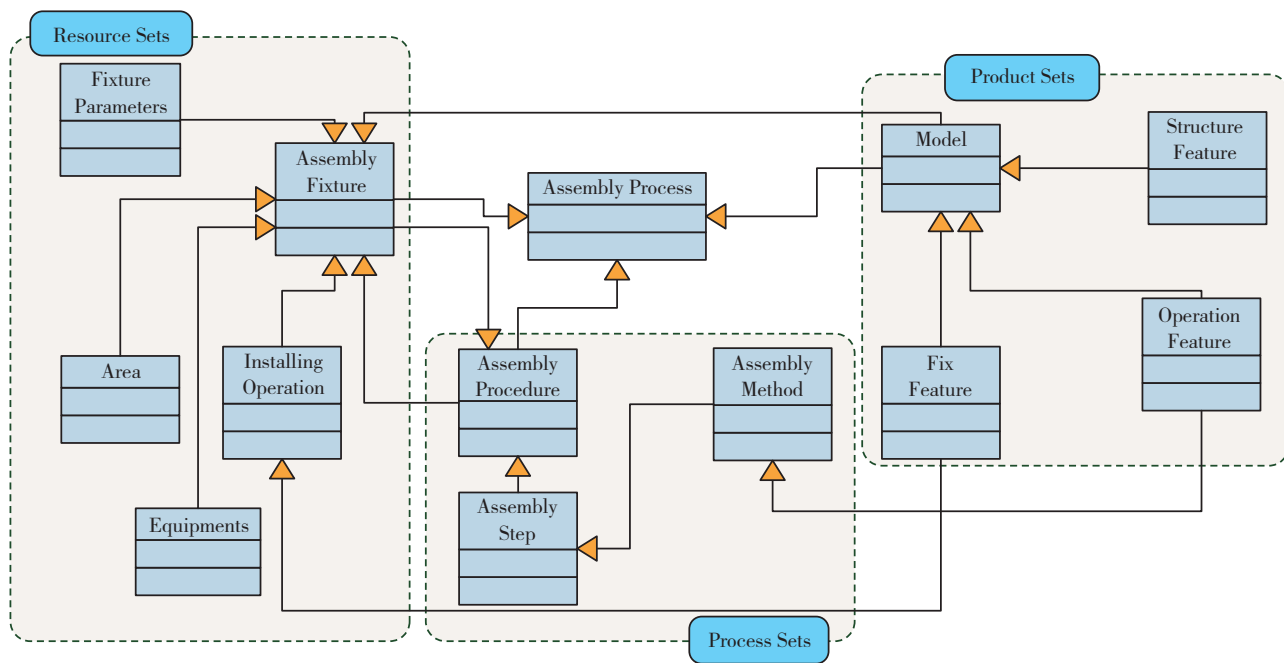


图4 装配过程仿真所需工艺信息的UML模型

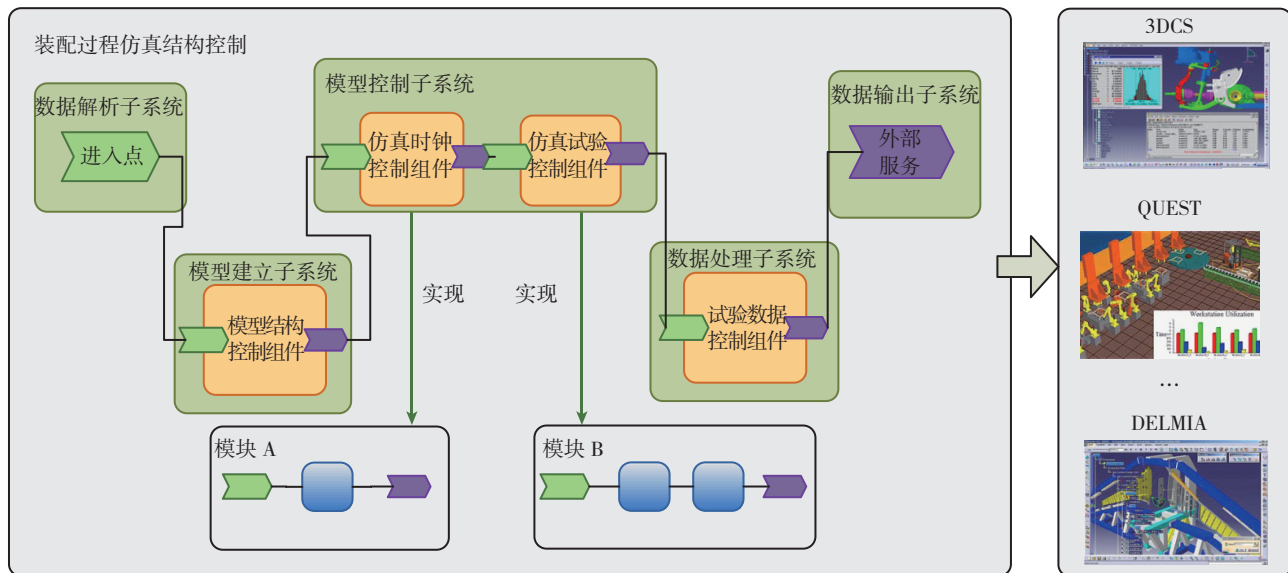


图5 装配过程仿真控制流程及控制服务组件设计

条件,运行流程以及运行模式的设计;

- 数据处理子系统: 主要包括实验数据控制组件,该组件通过对仿真中各个仿真实体的状态信息进行监控,收集与分析仿真实验数据。

结论

建立数据驱动机制的装配过程快速仿真建模服务平台,可提高装配过程仿真建模效率,降低仿真软件使用难度。采用 UML 对装配过程仿真所需工艺过程数据进行建模使所需数据及数据之间的关系能够被正确和完整地获取。仿真模型的控制结构独立于具体的仿真软件而单独定义,使仿真模型与具体仿真软件分离,保证了仿真模型的平台无关性,同时,该控制结构通过服务组件的形式定义,可以很方便地打散、重组、添加新的组件或者定义新的仿真控制流程,当仿真软件或者仿真任务发生改变时,便可方便地对仿真控制结构进行配置、扩展与重组。因而,该平台具有快速仿真建模,平台无关,配置灵活,扩展性强的特点,可适应各种不同的仿真软件和仿真任务,有效地提高了仿真技术在装配工艺设计

中应用的实用性。

参考文献

- [1] 王永. 复杂产品协同装配规划与优化[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2008.
- [2] National Institute of Standards and Technology. Guide to NIST-National Institute of Standards and Technology. Washington: U.S. Department of Commerce Technology Administration, 1998: 82.
- [3] 肖田元. 虚拟制造及其在轿车数字化工程中的应用. 系统仿真学报. 2002, 14(3):342-347.
- [4] Sudarsan R, Fennes S J, et al. A product information modeling framework for product lifecycle management. Computer-Aided Design, 2005, 37:1399-1411.
- [5] Thimm G, Lee S G, Ma Y S. Towards unified modelling of product life-cycles. Computers in Industry, 2006(57): 331-341.
- [6] Airbus. Common Digital Product Master Models Baseline. <http://www.enhanceproject.com/Products/tasks/wpld/WP1.htm>, 2003.
- [7] 毕利文, 唐晓东, 杨红宇. 飞机数字化装配工艺仿真技术. 航空制造技术, 2008(20):48-50.
- [8] Kuhn W. Digital factory-simulation enhancing the product and production engineering process//Proceeding of the 2006 Winter Simulation Conference, 2006: 1899-1906.
- [9] 张浩, 樊留群, 马玉敏. 数字化工厂

技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 2006.

- [10] Dong L, Li Y, Yu J F, et al. A cooperative method between assembly process planning and simulation for complex product. 2009 International Conference on Interoperability for Enterprise Software and Application China, 2009:163-166.
- [11] Zhang H, Wang H W, Chen D, et al. A model-driven approach to multidisciplinary collaborative simulation for virtual product development. Advanced Engineering Informatics, 2010, 24(2):167-179.
- [12] Jayaram S, Jayaram U, Wang Y, et al. VADE: A Virtual Assembly Design Environment. IEEE Computer Graphics and Applications, 1999,19(6): 44-50.
- [13] Wu D L, Zhen X J, Fan X M, et al. A virtual environment for complex products collaborative assembly operation simulation. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(3): 821-833.
- [14] Jeong K Y, Allan D. Integrated system design, analysis and database-driven simulation model generation//Proceedings of the 37th Annual Simulation Symposium. 2004: 80-85.
- [15] Leong S, Riddick F, Lee Y T, et al. Standard for: Core Manufacturing Simulation Data-UML Model, 2009.
- [16] Wang J F, Chang Q, Xiao G X, et al. Nan Wang, Shiqi Li. Data driven production modeling and simulation of complex automobile general assembly plant. Computers in Industry. 2011, 62: 765-775. (责编 良辰)