

# 液体火箭发动机异构 CAD 三维模型 装配技术分析与应用

林 源,熊莉芳,胡海峰

(西安航天动力研究所,陕西 西安 710100)

**摘要** 针对某新型液体火箭发动机三维模型装配技术应用现状,不同三维建模工具之间数据格式互不兼容,不能相互调用,以及在产品数据管理系统中,异构 CAD 三维模型装配无法自动生成产品 BOM 结构,装配信息无法跨软件进行传递。对 Pro/E 与 NX 三维模型相互调用、异构三维模型装配、产品 BOM 结构自动生成、更改同步等问题进行了研究,采取轻量化模型 JT 和中间格式进行装配实现异构 CAD 三维模型的装配和管理,采用轻量化模型 JT 装配方法,既可以保证 JT 与三维模型的一致性,也可以实现装配 BOM 结构的自动生成和更新。采用 STEP 中间格式进行装配,解决了产品数据管理系统中对轻量化模型转换控制,降低了 CAD 集成环境下异构三维模型的装配要求,确保了 STEP 文件与三维模型的一致性,实现了异构 CAD 三维模型在统一环境下 BOM 结构的自动更新和发动机技术状态的管控。

**关键词** 液体火箭发动机;异构 CAD;BOM 结构;三维模型装配

**中图分类号** V434; TP391 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)02-0094-06

## Analysis and application of heterogeneous CAD 3D model assembly technology for liquid rocket engine

LIN Yuan, XIONG Lifang, HU Haifeng

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract** In view of the application status of liquid rocket engine 3D model assembly technology, the data formats of different 3D modeling tools are incompatible with each other and cannot be by called each other. In the management system of product data, the heterogeneous CAD 3D model assembly cannot automatically generate the product BOM structure, and the assembly information cannot be transmitted across software. The problems are studied in this paper, such as the study on the mutual transfer for Pro/E and NX 3D structure, the assembly of heterogeneous 3D structure, automatic generation of product BOM structure, and the synchronization of changes. The lightweight model JT and intermediate format are adopted to realize the assembly and management of heterogeneous CAD 3D models. Adopting the lightweight model JT assembly method can not only ensure the consistency between JT and 3D assembly model, but also realize the automatic generation and update of assembly BOM structure. The STEP intermediate

收稿日期:2021-10-13;修回日期:2022-02-13

作者简介:林源(1979—),男,硕士,高级工程师,研究领域为发动机数字化设计。

format is adopted for assembly, which solves the conversion control of lightweight models in the management system of product data, reduces the assembly requirements of heterogeneous 3D models in the CAD integrated environment, ensures the consistency between STEP files and 3D models, and achieves the automatic update of BOM structure of heterogeneous CAD 3D models and the control of engine technical status in the unified environment.

**Key words** liquid rocket engine; heterogeneous CAD; BOM structure; 3D model assembly

## 0 引言

在液体火箭发动机研制过程中,采用 CAD、PLM、ERP、MES 等信息化技术可以改进传统产品制造信息的表达模式,尤其是 MBD 技术的引入,将传统产品制造由二维图纸转变为三维设计模型。基于三维模型定义是将产品相关的属性定义、设计、工艺、制造等信息都定义在产品三维模型中的数字化设计方法,确保产品设计数据的正确性和唯一性<sup>[1]</sup>。采用基于 MBD 技术实现产品三维模型的定义,同时采用产品数据管理系统实现产品 BOM 结构信息的自动生成,设计信息模型化表达和工艺信息的结构化提取,实现液体火箭发动机全过程的数据管理,有效解决了产品设计和生产制造一体化问题。这一新型制造过程可以提高产品设计质量,降低发动机的研制成本,缩短研制周期<sup>[2]</sup>。

CAD 三维建模技术的引入,改进了产品信息表达手段,但是围绕不同的 CAD 建模工具,带来了三维建模工具和规范不统一等问题。根据目前三维建模技术应用现状,三维建模工具没有形成统一的建模规范,不同三维建模工具之间数据格式互不兼容,三维模型不能相互调用、装配,BOM 结构信息等也难以跨软件传递<sup>[3-4]</sup>。在产品数据管理方面,这种多 CAD 建模软件不仅带来了异构模型使用困难的问题,也造成产品技术状态难以管控,跨软件、跨部门以及跨地域协作效率低等问题<sup>[5]</sup>。以液体火箭发动机设计总装为例,整机装配包含 1 万多个零部件,总装三维模型大小超过 15 GB,整个三维建模过程非常复杂,涉及科室及厂所之间的协同<sup>[6]</sup>。在 Teamcenter 系统中,异构模型之间互相装配,产品 BOM 结构信息不能同步,需要耗费大量的人力进行三维模型重新转换及创建,不仅出错率高,还不利于产品技术状态的管控<sup>[7-8]</sup>。

为了解决异构 CAD 三维模型协同设计所面临的问题,实现异构三维模型之间的信息整合,提高产品协同设计效率,进行了基于 Teamcenter 液体火箭发动机异构 CAD 三维模型的装配技术研究,突破了多 CAD 三维模型信息的提取、面向协同设计集成框架、三维模型轻量化处理等关键技术,满足了异构 CAD 三维设计协同,实现产品 BOM 结构信息的自动更新以及零部件技术状态管控,实现跨软件平台、跨部门、跨地域产品协同设计<sup>[9]</sup>。

## 1 产品数据管理系统

产品数据管理系统是异构 CAD 三维模型装配的基础。异构 CAD 三维模型装配数据通过产品数据管理系统进行统一的管理和维护。管理数据主要包括异构 CAD 三维模型以及装配过程数据。异构 CAD 三维模型数据是产品数据管理系统中重要的产品数据对象,它包含了零部件属性信息、几何信息以及零部件之间的装配关系等。以 Teamcenter 为产品数据管理系统,NX8.5 和 Pro/E 4.0 为异构三维模型设计工具,底层数据库采用 Oracle11。零部件三维模型创建完成后,通过 NX 或 Pro/E 集成功能接口将三维模型导入 Teamcenter 系统中进行管理,系统可以自动提取零部件信息并生成产品 BOM 结构信息,实现 Teamcenter 与 Pro/E 和 NX 等异构 CAD 三维设计软件的集成,将 Teamcenter 数据存储和管理能力与 CAD 强大的三维建模集成在一起,确保产品研制数据的一致性和完整性<sup>[10-11]</sup>。

### 1.1 三维模型设计

三维模型设计是开展异构 CAD 三维模型装配的基础工作。首先需要制定三维设计模板、三维建模设计标准、三维标注规范等工作,然后根据产品设计方案进行三维建模和三维标注。三维模型创建完成后维护三维模型的属性信息,如表 1 所示。

表 1 三维模型属性信息  
Tab. 1 Attribute information title of 3D model

序号	参数符号	参数含义	序号	参数符号	参数含义
1	product_no	产品代号	10	product_form	产品形式
2	object_name	模型名称	11	maturity	成熟度
3	drawing_id	图号	12	product_grade	产品等级
4	material	材料名称	13	secret_level	密级
5	material_spec	材料规格	14	department	设计单位
6	standard	材料标准	15	mod_sign	更改标记
7	stage_mark	阶段标记	16	mod_listid	更改单号
8	routing	工艺路线	17	mod_person	更改人
9	product_type	零部件分类	18	mod_date	更改日期

1.2 异构 CAD 集成

Pro/E 集成设计将 Teamcenter 集成接口内嵌在 Pro/E 建模环境中,可以实现三维模型的创建、装配、签入、签出及属性更新等功能,实现产品 BOM 结构的自动生成和更新,并与 Teamcenter 系统进行信息同步更新<sup>[2]</sup>。在 Pro/E 与 Teamcenter 集成环境下保存 Pro/E 装配件时,自动根据 Pro/E 三维装配结构在 Teamcenter 中生成对应的产品 BOM 结构,设计修改三维模型重新保存后,产品 BOM 结构自动进行更新<sup>[12]</sup>。

NX 集成设计是将 NX 三维建模与数据管理系统的数据管理结合起来。首先数据管理系统启动 NX 集成建模环境进行三维模型设计,该功能可以快速进行三维设计模板调用、三维模型的创建和装配,三维模型装配过程记录了零部件之间的装配关系,同时实现对产品 BOM 结构的创建和更新,可以将信息保存到 Teamcenter 系统中,并自动生成产品 BOM 结构信息。

2 异构 CAD 模型装配

解决异构 CAD 三维模型装配问题,首先需要解决三维模型装配信息的统一。由于异构 CAD 三维模型的特征属性、几何、拓扑结构等存在差异,导致异构三维模型无法互相进行装配。异构三维模型装配首先需要有一个主导的 CAD 设计平台,异构模型中来自于该主导平台的模型称为当前模型,并非来自于该主导平台的模型称为外部模型<sup>[13]</sup>。显然,要

将外部模型装配到主装配体中,需要以标准交换格式作为媒介。在 Teamcenter 集成环境实现 NX 与 Pro/E 模型的三维模型装配,主要有以下两种模式。

1)轻量化模型装配。采取多种 CAD 同时支持的轻量化 JT 格式进行装配,即 NX 模型和 Pro/E 模型在保存时同时生成对应的 JT 文件,并进行装配<sup>[14]</sup>。轻量化模型是对三维模型进行转换,并且保留了三维模型装配关系和几何信息,层次性体现装配体的直属关系,每一层都记录了装配的信息。关系性体现了零部件的从属关系和不同零件之间的装配约束信息等。Pro/E 环境中装配 NX 模型时,就是采用了轻量化模型进行装配。

2)中间格式装配。中间格式转换是将发动机的三维模型转换成中间过渡格式,然后将过渡格式再转换成另一种三维设计工具格式的三维模型。例如,将 NX 文件转换成 STEP 文件,然后再转成 Pro/E 三维模型进行装配。

2.1 JT 格式装配

在 Teamcenter 集成设计环境中,采用轻量化模型 JT 格式文件进行三维模型装配,通过配置三维模型的集成接口,实现在 NX 和 Pro/E 环境中三维模型保存到 Teamcenter 系统时,同时保存 JT 格式文件,此时三维模型与 JT 文件版本保持一致。

2.1.1 Pro/E 异构装配

在 Pro/E 集成环境中进行三维模型装配时,打开 Pro/E 的三维模型,通过调用插入组件的方式,调用 Teamcenter 系统中的三维模型。需要装配的零部

组件为 NX 三维模型时,在 Teamcenter 插入装配组件的弹窗中不显示 NX 模型,只显示轻量化 JT 文件,通过装配 JT 的方式进行三维模型的装配<sup>[15-16]</sup>。三维模型装配完成后,通过 Pro/E 集成接口进行装配件的保存,Teamcenter 根据三维模型装配关系自动生成产品 BOM 结构信息,设计发生变更,BOM 结构信息自动更新。在 Teamcenter 中生成 BOM 时,接口可以自动将骨架等非装配结构进行排除,并且在同一装配下同一个零部件装配多个时,将会在 BOM 结构中进行合并,数量以级乘的形式进行显示<sup>[17]</sup>。

若执行装配操作的用户对 NX 零件在 Teamcenter 中有写权限,在保存时,会同步在该零部件下生成 Pro/E 三维模型,再次打开时,会调用之前生成的 Pro/E 三维模型;若无写权限,保存时无法在 NX 零件下生成 Pro/E 模型,再次打开三维模型时,直接调用轻量化 JT 模型。

2.1.2 NX 异构装配

在 NX 集成环境中打开 NX 三维模型,需要装配的零部组件为 Pro/E 三维模型时,通过装配的添加组件功能,在集成环境中打开 Pro/E 组件对象,选择对应的 JT 文件,完成装配操作<sup>[18]</sup>。同样,在 NX 集成环境中,三维模型装配完成,点击“保存”可自动根据装配结构在 Teamcenter 生成 BOM 结构,设计变更后,BOM 信息自动更新,在同一装配下同一个零部件装配多个时,将会在 BOM 中进行合并,数量

以级乘的形式进行显示。

若执行装配操作的用户对 Pro/E 零件在 Teamcenter 中有写权限,在保存时,会同步在该零组件下生成一个 NX 的零件图,再次打开时,会调用生成的 NX 模型;若无写权限,则保存时无法在 Pro/E 零件下生成 NX 模型,再次打开时,直接调用 JT 模型。通过采用异构 CAD 三维模型装配技术可以实现液体火箭发动机重要零部件的装配,如图 1 所示。



图 1 异构 CAD 三维模型装配

Fig.1 Heterogeneous CAD 3D model assembly

2.2 STEP 格式装配

2.2.1 STEP 格式转换

STEP 格式是三维模型数据交换的国际标准,Pro/E 与 NX 都支持 STEP 格式的转换,Pro/E 与 NX 转换 STEP 的特征保留情况如表 2 所示。

表 2 Pro/E 与 NX 转换 STEP 特征情况  
Tab.2 Conversion STEP feature for Pro/E and NX

Pro/E	转档 STEP	NX8	备注
单零件(实体/曲面)	← yes →	单零件(实体/曲面)	转换后无参数,可采用同步建模修改三维模型
装配组件	← yes →	装配组件	无装配约束关系,部件位置同转换前一致
Pro/E 转 NX 注释“缺失”	← yes / no →	NX 转 Pro/E 注释“正常”	注释不可编辑,转换后全部为曲线
三维模型 PMI 信息	← yes →	三维模型 PMI 信息	PMI 注释可编辑

2.2.2 STEP 格式装配

基于 Teamcenter 集成设计环境,采用 STEP 中间格式进行 NX 与 Pro/E 三维模型之间的互相装配、产品 BOM 结构自动生成。将 NX 和 Pro/E 三维模型转换为 STEP 中间格式,然后通过模型对象下新建 STEP 文件数据集的方式,手动将 STEP 文件上传至 Teamcenter,并挂在对应的零件下面。

Pro/E 装配 STEP 格式,手动从 Teamcenter 下载 NX 零件的 STEP 文件到本地,再使用 STEP 文件完成装配操作,使用 Teamcenter 集成菜单中的保存功能,将三维模型装配保存至 Teamcenter。Pro/E 使用 NX 零件的 STEP 文件进行装配后,在保存至 Teamcenter 的过程中会因为对 NX 零件无写权限而无法将 Pro/E 模型保存至 NX 零件下,但是可以在 Team-

center 中生成 BOM 结构关系。

NX 装配 STEP 格式,在 NX 环境装配时,手动从 Teamcenter 将 Pro/E 零件的 STEP 文件下载到本地。打开 NX 环境,使用 STEP 文件在本地完成装配操作并保存至本地,再打开 NX 集成环境,使用“装配导入至 Teamcenter”功能将装配保存至 Teamcenter。NX 使用 Pro/E 零件的 STEP 文件进行装配后,保存至 TC 的过程中,如果对 Pro/E 零件具有写权限,可以将 NX 模型保存至 Pro/E 零组件下,同时更新 BOM 结构关系。

2.3 三维模型变更

在同一 CAD 软件内部,零部件更改后,只要原先依赖的装配基准存在,可以实现自适应重新装配,这一特性称为自适应装配。对于异构 CAD 三

维模型,由于 CAD 软件的封闭性和互不兼容性,装配后的编辑、调整操作显然只能在之前的格式上进行,否则会丢失所有参数。因此,对子零部件进行任何更改之后,设计人员都需要重新执行格式转换和装配。由于格式转换过程中难以保证上次所使用的装配基准,很可能需要重新进行装配工作<sup>[19]</sup>。

由于模型在发生更改并重新保存之后,JT 文件会实时更新以保持与模型一致。因此,以 JT 为媒介的装配方法,当外部模型发生更改时,只需要打开当前模型进行编辑、调整操作;以 STEP 为媒介的装配方法,当外部模型发生更改时,需要打开当前模型重新执行格式转换、上传、装配和导入,具体自适应装配流程如图 2 所示。

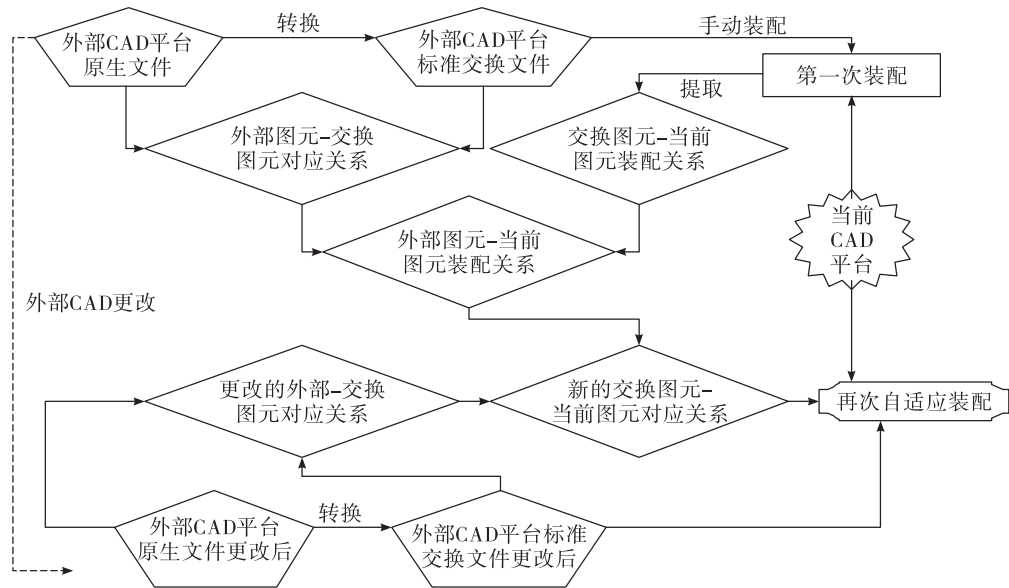


图 2 异构 CAD 模型自适应装配流程

Fig.2 Adaptive assembly process of heterogeneous CAD model

3 应用效果

基于 Teamcenter 异构 CAD 三维模型装配方法在某新型液体发动机研制过程中得到了广泛应用,通过采用轻量化模型和中间格式进行装配实现异构 CAD 三维模型的装配和管理,达到了以下应用效果。

1)能够自动生成和更新产品 BOM 结构化信息,零部件的变更能够自动更新到异构 CAD 三维模型装配中,并且能够从异构装配体的零部件自动链

接到实际三维模型进行编辑,建立了完整的 CAD 数据封装与更新机制<sup>[20]</sup>。

2)提出了异构 CAD 三维模型装配方法,通过该方法装配的三维模型不但保留了三维模型之间的装配关系,还保留了三维模型的几何信息,为后续工艺虚拟装配提供了必要的数据库。

3)异构 CAD 三维模型轻量化生成及浏览技术可实现对发动机整机三维模型的快速轻量化处理和可视化查看,以“一次轻量化,处处可使用”为目标,整合多种轻量化和快速查看技术,做到对复杂

三维模型的快速传输和查看。

4)建立了支持异构CAD三维模型装配协同设计平台,支持多CAD异构数据协同与共享,可对三维模型进行技术状态管控和变更管理,实现了某新型液体火箭发动机异构CAD三维模型BOM结构信息与产品数据管理系统整合共享。

## 4 结束语

通过对液体火箭发动机异构CAD三维模型装配技术的研究,基于MBD技术实现了发动机三维模型的属性定义,将传统产品制造由二维图纸转变为三维设计模型,并将产品相关的属性定义、设计、仿真等信息都定义在三维模型中,确保产品设计数据的正确性和唯一性。采用异构CAD三维模型轻量化格式进行零部件装配,在一定程度上,从产品数据管理和操作层次打破异构CAD三维设计软件兼容性的壁垒,构建异构CAD三维模型的统一装配环境,实现零组件标识与溯源、异构三维模型的自适应装配以及产品BOM结构化信息的整合。在统一环境下,实现异构CAD三维模型BOM结构信息的自动更新和同步,以及发动机产品技术状态管控和变更管理。满足了某新型液体火箭发动机跨软件平台、跨部门、跨地域协同研制要求,提高了产品设计质量,缩短了产品研制周期。

## 参考文献

- [1] 徐伟,姜丽红,蔡鸿明. 基于BOM的企业异构信息系统集成[J]. 东华大学学报(自然科学版),2012,38(5): 498-504.
- [2] 赵罡,郑湃,闫光荣,等. 一种基于复杂产品异构BOM的定制查询方法:CN102426587A[P]. 2012-04-25.
- [3] 魏然. 固体火箭发动机模板化设计与优化研究[D]. 西安:西北工业大学,2015.
- [4] 行开新,田凌. 支持异地协同设计的异构CAD虚拟装配系统[J]. 清华大学学报(自然科学版),2009,49(2): 226-231.
- [5] 刘巍. 异构CAD模型虚拟装配技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [6] KIM Y, LEE H, SAFDAR M, et al. Exchange of parametric assembly models based on neutral assembly constraints[J]. Concurrent Engineering,2019,27(4):285-294.
- [7] 王耀东,魏强,李学林,等. 基于特征参数化方法的异构CAD卫星三维协同布局设计[J]. 航天器工程,2018,27(4):28-33.
- [8] 宫潘威,时小磊,陶高周,等. CREO环境下三维模型及信息集成共享实现方法研究[J]. 机械设计与制造,2019(2):218-221.
- [9] 周培,刘敏,李莉,等. 一种基于Creo软件的三维零件模型版本比对系统:CN201711116288.9[P]. 2018-04-20.
- [10] 周培,刘铭,王腾,等. 基于几何配准的三维模型几何比对方法研究[J]. 图学学报,2016,37(4):483-490.
- [11] ZIENKIEWICZ J, TSIOTSIOS A, DAVISON A, et al. Monocular,real-time surface reconstruction using dynamic level of detail[C]//2016 Fourth International Conference on 3D Vision (3DV). Stanford,CA:IEEE,2016.
- [12] AKENINE-MO L T, HAINES E, HOFFMAN N. Real-time rendering[M]. Boca Raton,FL:A K Peters/CRC Press,2019.
- [13] KWON S, KIM B C, MUN D, et al. User-assisted integrated method for controlling level of detail of large-scale B-rep assembly models[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing,2018,31(9):881-892.
- [14] 邵晓东,陈锋,刘焕玲,等. 基于特征的异构CAD模型转换技术研究[J]. 中国机械工程,2007,18(1):60-64.
- [15] 王启富,杨磊,黄运保,等. 协同产品开发中的产品模型轻量化技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(1):108-113.
- [16] BRONSVOORT W F, BIDARRA R, NYIRENDA P J. Developments in feature modelling[J]. Computer-Aided Design and Applications,2006,3(5):655-664.
- [17] CHEN Z M, GAO S M, LI W D. An approach to incremental feature model conversion[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32 ( 1/2 ): 99-108.
- [18] 李广文,黄翔,李迎光,等. CAD装配模型质量的研究[J]. 中国制造业信息化,2004,33(1):96-98.
- [19] 秦红强,王猛,杨亚龙,等. 液体火箭发动机三维数字化协同设计研究[J]. 火箭推进,2016,42(3):76-80.
- [20] 胡海峰,刘芬,许婷,等. 液体火箭发动机协同设计平台关键技术[J]. 火箭推进,2020,46(4):82-89.
- QIN H Q, WANG M, YANG Y L, et al. Study on 3D digital collaborative design of liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion,2016,42(3):76-80.
- HU H F, LIU F, XU T, et al. Key technologies of collaborative design platform for liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion,2020,46(4):82-89.