

面向复杂机械设计的数字样机 模型驱动方法研究

朱文越¹, 刘伊华², 王永娟¹

(1.南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094; 2.中国兵器工业第208研究所, 北京 100081)

摘要:针对复杂机械产品研发过程中几何数字样机与性能数字样机模型转换时信息丢失的问题, 构建了数字样机的模型驱动体系架构, 并通过解析 STEP 文件的组成要素, 建立了基于数字样机的平台无关模型(platform independent model, PIM); 提出了基于模型驱动的平台到UG软件、到Adams软件、到Abaqus软件的平台相关模型(platform specific model, PSM)的转换方法; 基于异构软件接口和脚本语言, 开发了上述3个平台的模型驱动模块, 并进行了实例验证。结果表明, 应用模型驱动技术可实现机械数字样机专用软件之间模型信息的共享, 所开发的模型驱动模块能够快速进行仿真分析并及时输出结果。

关键词:复杂机械; 数字样机; 模型驱动; PIM; PSM

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2022)04-0901-08

数字样机是通过计算机仿真模型来代替产品, 以减少实际物理样机的试验, 国内众多学者针对复杂机械数字样机的构建展开研究。赵森森等^[1]建立了枪械闭锁机构的有限元模型, 并基于相关定律与理论对数据进行处理与分析, 得到了某自动步枪闭锁机构的疲劳强度; 张丽平^[2]建立某自动武器发射机构的动力学模型, 并在尺寸链约束的基础上, 不断改变关键结构的尺寸以完成优化设计。万毕乐等^[3]通过建立工艺数字样机完成了航天器功能与工艺属性的继承, 实现了在三维模型中展示装配、产品制造等信息。以上研究通过构建几何数字样机和性能数字样机对机械产品的关键机构进行可靠性验证及性能指标考核, 涉及不同的软件平台, 而在异构软件模型转换过程中, 信息丢失及特征失真的现象时有发生; 此外, 模型转换效率低, 转换文件格式不统一等问题, 也将严重阻碍机械产品研发过程中不同部门之间的协同^[4]。

复杂机械产品结构复杂, 零件繁多, 实现功能

多, 动作精度要求高, 涉及几何模型、仿真模型、软件代码等多领域, 传统的机械设计方法难以高效地管理研发过程中各阶段的模型信息及相关代码。因此, 应用模型驱动的思想指导机械产品研发, 可在数字样机模型与各软件平台之间建立联系, 保持转换过程中模型的一致性。

本文对复杂机械产品进行梳理与分析, 构建了复杂机械数字样机的模型驱动体系架构, 形成了模型层、平台层、软件层和数据层的分层结构^[5]。其中, 模型层基于状态模型、几何要素、结构要素3个维度构建复杂机械数字样机 PIM; 平台层通过制定转换规则, 应用相关辅助工具实现复杂机械数字样机的模型转换, 即 PIM 到目标平台 PSM 的转换; 软件层对数字样机模型驱动专用软件(UG、Adams、Abaqus)进行二次开发, 形成一种快速建模并及时输出分析结果的工具; 数据层主要存储复杂机械产品设计过程中各类模型文件, 并适时管理模型驱动体系建设过程中各类软件平台代码, 实现相关数据

收稿日期: 2021-11-01

基金项目: 基础科研项目(JCKY2018209A001)资助

作者简介: 朱文越(1997—), 南京理工大学硕士研究生, 主要从事现代机械设计理论与方法研究。

通信作者: 王永娟(1972—), 女, 南京理工大学教授, 主要从事机械 CAD/CAE/CAM/PDM/KBE 技术研究。

e-mail: chshuyi@njjust.edu.cn

的备份与恢复。

1 复杂机械数字样机 PIM 构建

机械数字样机通常包括几何数字样机、性能数字样机和工艺数字样机。目前,由于异构软件系统间的不可移植性,数字样机模型转换过程中,当上游的几何数字样机发生变化时,下游的性能数字样机也必须进行修改,这将严重浪费机械产品的模型资源,带来大量的重复性工作。本节将应用模型驱动的思想指导机械产品研发,通过机械数字样机 PIM 建立几何数字样机与仿真平台之间的映射关系,促使机械产品研发应用逻辑与底层变化相分离,实现自动更新性能数字样机模型信息和不同仿真平台的代码^[6-7]。

1.1 STEP 文件解析

STEP 文件是按照纯正文进行编码的顺序文件集合,作为 STEP 标准的产品数据交换形式之一,通过一种不依赖具体系统的中性表达机制,实现机械产品全生命周期数据的交换和共享。STEP 文件从结构上可分为头部段和数据段两部分,每部分都有固定的开始标志和结束标志。头部段涵盖了整个交换文件结构的相关信息,例如作者、单位、日期、软件版本等;数据段包括模型的几何数据信息与拓扑关系,而且支持颜色、装配、应用协议、软件属性等其他产品的非几何信息^[8]。

产品数据信息通过 STEP 文件数据段内的实体实例进行表达,每条实体实例具有标准化的语法结构,可分为 ID 号、关键字、属性值以及各类分割标识符 4 个部分^[9]。其中, ID 号是纯正的阿拉伯数字,并按照从小到大的顺序编码;关键字由大写的英文单词组合而成,与产品的具体信息存在一定的映射

关系,STEP 文件中部分实体实例的关键字如图 1 所示;属性值位于末尾,包含位置信息并将其他实体实例信息连接起来形成完整的模型信息树。

1.2 基于 STEP 文件的数字样机 PIM

PIM 的设计不需要考虑具体平台的实现技术,也不需要考虑仿真平台的代码运行情况,它是高度抽象的模型,依据产品需求描述数字样机的功能与结构,是模型驱动体系建设过程中承前启后的关键一步。

STEP 文件中模型实体的几何信息与拓扑关系基于边界表示法(B-rep)进行描述,并通过树状结构的方式将数据段内实体实例信息紧密连接在一起,信息树中的各层级(体层、面层、边层、点层)均存在相应的根节点、子节点,如图 2 所示。几何模型作为一个封闭的实体,最顶层的实体实例为 Closed shell,而最底层实体实例为 Cartesian point 和 Direction^[10]。

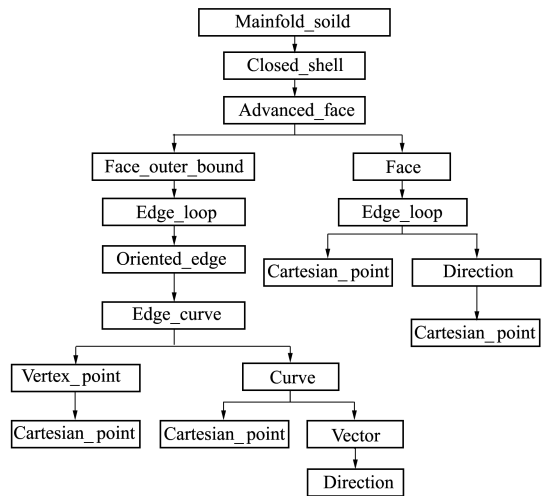


图 2 STEP 文件几何模型的实体信息表达

通过对 STEP 文件的解析发现,STEP 文件中的几何信息与拓扑关系作为数字样机最基础的数据,完整描述了机械数字样机的功能与结构,不仅是数字样机模型转换过程中不可缺少的组成部分,而且与数字样机专用软件平台的实现技术无关,符合数字样机 PIM 的构建条件。此外,STEP 文件中软件属性、应用协议等非几何信息针对不同平台发挥作用,可用于后续数字样机模型转换过程。

数字样机 PIM 基于克努特-莫里斯-普拉特算法(the Knuth-Morris-Pratt algorithm, KMP)实现,该算法通过在 next() 函数中添加字符串的匹配信息,尽可能减少模式串与主串的匹配次数,从而大大提

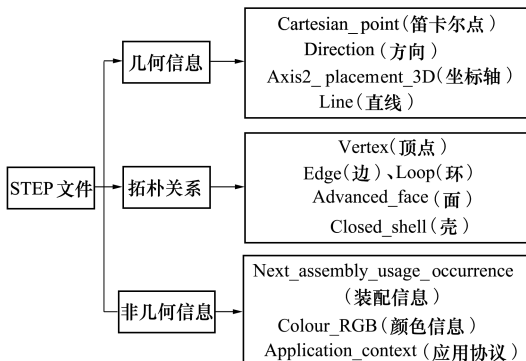


图 1 STEP 文件实体实例信息关键字

高了匹配速度,具体的算法流程如图 3 所示。

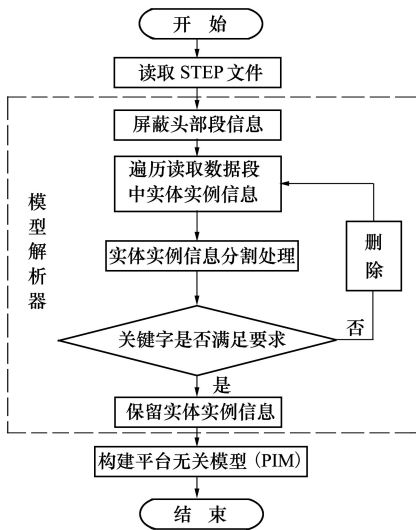


图 3 机械数字样机 PIM 建模流程

2 基于模型驱动的数字样机转换

基于模型驱动的数字样机模型转换指的是 PIM 到 PSM 的转换。此过程是模型驱动的核心,以 PIM 为源模型,借助具体平台的特有属性信息,依赖平台所提供的功能和服务,得到不同平台的 PSM,最终完成整个转换过程。PIM 到 PSM 的转换依据特定的规则进行,具体的转换方法有很多种,例如基于关系代数的转换方法、基于图形的转换方法等,上述方法均需采用相对应的转换工具,技术要求较高,转换难度较大。因此,本文选择直接的转换方法,通过各软件平台的应用程序接口实现 PIM 到目标平台 PSM 的自动转换,模型转换示意图如图 4 所示。

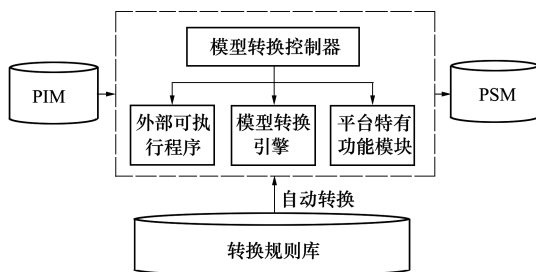


图 4 模型转换示意图

所提出的模型转换方法可适用于绝大多数几何样机与性能样机构建平台,可提高异构软件系统之间模型信息的可重用性,实现几何数字样机到性能数字样机的无损模型转换。下文仅以 UG 平台、

Adams 平台、Abaqus 平台为例,验证该方法的可行性及实用性。

2.1 数字样机 PIM 到 UG 平台 PSM 的转换

UG 平台作为重要的机械产品设计平台,可以描述机械产品的功能与结构并建立机械零件之间的装配关系。基于 UG 平台的 PSM 应在 PIM 的基础上融合 UG 平台所特有的属性信息,形成 UG 应用程序接口可以读取的 STEP 文件;然后,借助 UG 软件平台所开发的模型驱动模块添加模型的非几何信息,形成机械产品的几何数字样机。UG 平台的 PSM 所包含的信息如图 5 所示。

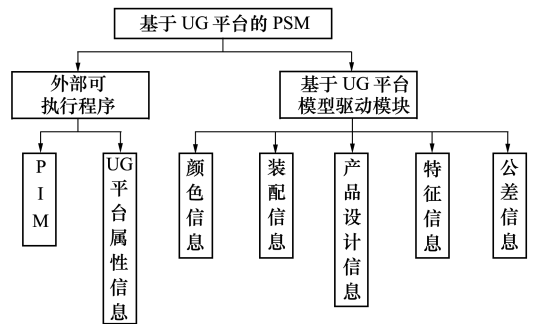


图 5 基于 UG 平台 PSM 的设计

基于 UG 平台 PSM 的建立需要借助 C/C++ 编程技术、UG 二次开发技术、Visual Studio 软件和 NX UG 软件,具体的转换实现流程如图 6 所示。

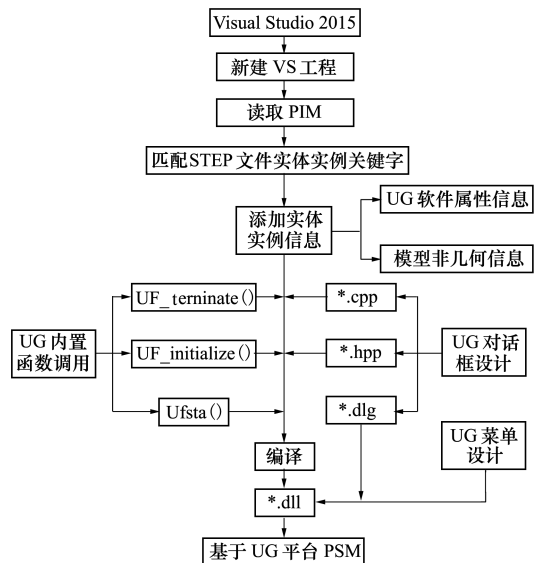


图 6 PIM 到 UG 平台 PSM 的转换实现流程

1) 外部可执行程序。基于关键字匹配机制编写程序,将 STEP 文件数据段内代表 UG 软件属性信

息添加至 PIM, 形成 UG 软件可以读取的 STEP 文件^[11]。

2) 模型转换引擎。基于 UG/Open API 模块中的 UF_PART_open 函数, 设置文件类型及文件路径后, 即可直接打开 UG 平台的 PSM, 便于后续开展三维设计、装配分析等^[12]。

3) 基于 UG 平台的模型驱动模块。该模块功能基于 C/C++ 编程语言实现。首先, 选择版本对应的 Visual Studio 软件与 UG 软件建立链接关系, 新建 NX12 Open Wizard 项目设定入口函数、项目属性及相关配置文件, 系统选择 ufstr 函数作为入口函数, 并选择生成动态链接库 *.dll; 然后, 基于 UG/Open Menu Script 语法规则编写 *.men 菜单文件并放置在 UG 二次开发目录启动文件夹 Startup 中, 基于 UG/Open UI Styler 设计对话框, 将生成的 *.dlg 对话框文件放置文件夹 Application 中, 将设计产生的 *.hpp 头文件与 *.cpp 源文件添加至 NX12 Open Wizard 工程目录; 最后, 设定 UF_terminate() 和 UF_initialize() 保证程序的初始化及结束进程, 此外, 在主程序中内嵌相关函数实现非几何信息的添加, 并使用 UG/Open API 模块中与 Menu Script 相关的 UF_MB 系列函数, 完成菜单、对话框与用户程序的关联^[13-14]。

2.2 数字样机 PIM 到 Adams 平台 PSM 的转换

Adams 平台作为机械产品研发过程重要的动力学仿真平台, 可实现机构的运动学仿真结果输出及机构的结构合理性和动作可靠性的结论输出。PIM 转换至满足 Adams 平台规约的 PSM, 首先需要添加 Adams 软件特有的属性信息, 形成满足 Adams 软件应用协议的 STEP 文件; 然后, 基于模型转换引擎传递几何模型至 Adams 平台; 最后, 基于 Adams 平台所开发的模型驱动模块添加动力学模型所需的相关信息, Adams 平台的 PSM 所包含的信息如图 7 所示。

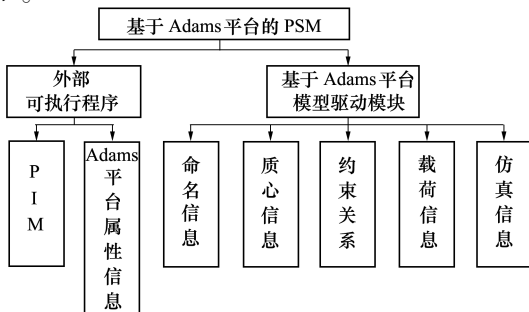


图 7 基于 Adams 平台 PSM 的设计

Adams 平台 PSM 的设计主要包括三部分: 外部可执行程序、模型转换引擎和模型驱动模块, 需要借助 windows 脚本编程技术、Adams 二次开发技术、Notepad++ 编程工具和 Adams View 软件, 具体实现流程如图 8 所示。

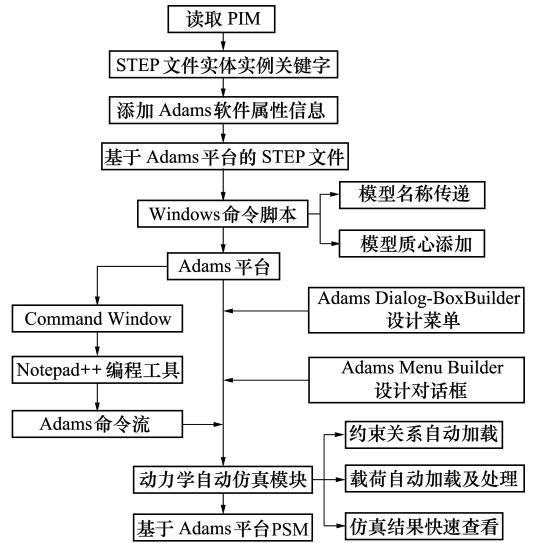


图 8 PIM 到 Adams 平台 PSM 的转换实现流程

1) 外部可执行程序。基于关键字匹配机制编写程序, 将 STEP 文件数据段内代表 Adams 软件属性信息添加至 PIM, 形成 Adams 软件可以读取的 STEP 文件。

2) 模型转换引擎。基于 Windows 命令脚本实现 STEP 文件自动导入 Adams 平台, 该模型转换引擎能够读取并传递 PIM 环境下已给定的模型命名信息, 实现零部件名称的一致性; 除此之外, 还能自动添加动力学模型的质心信息, 保证后续仿真的顺利进行^[15]。

3) 基于 Adams 平台的模型驱动模块。该模块的功能基于 Adams 命令流实现, 具体语法规则可查询 Adams CMD 本地帮助文档。首先, 利用 Adams 软件内置窗口 Command Window 录制相关操作的命令流形成脚本文件; 然后, 将脚本文件中的命令流添加至 Adams Menu Builder 设计的对话框中进行编译; 最后, 借助 Adams Dialog-Box Builder 设计菜单, 提高用户的可视化的同时完成与自定义对话框的交互, 并自动执行脚本文件的各项功能, 从而快速地完成整个动力学仿真过程, 得到求解结果^[16]。

所开发的模型驱动模块很好地解决了几何模型到动力学模型转换过程效率低下、信息丢失等问题,

同时该模块具有较高的普适性,即当上游的机械设计部门在整体模型装配拓扑关系不变的情况下对模型的尺寸进行修改或实施零部件的替换时,下游的动力学仿真部门依然可使用该系统快速进行动力学仿真,减少了大量的重复劳动,极大地提高了工作效率,降低了工作强度。

2.3 数字样机 PIM 到 Abaqus 平台 PSM 的转换

Abaqus 平台作为复杂机械产品研发过程重要的有限元仿真平台,实现机械产品主承力件的强度分析以及主运动件的疲劳分析。PIM 转换至满足 Abaqus 平台规约的 PSM,要求 PIM 添加 Abaqus 平台规定的软件特有属性信息形成满足 Abaqus 软件应用协议的 STEP 文件;然后,基于模型转换引擎传递几何模型至 Abaqus 平台;最后,基于 Abaqus 平台所开发的模型驱动模块添加有限元模型所需的相关信息, Aqus 平台的 PSM 所包含的信息如图 9 所示。

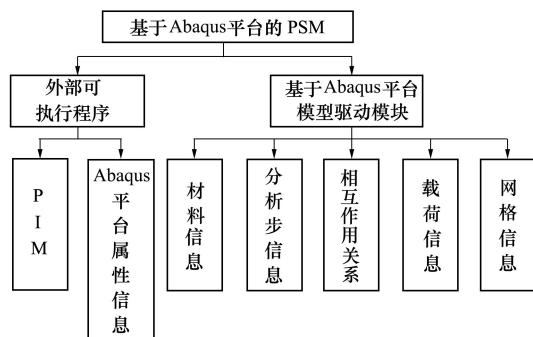


图 9 基于 Abaqus 平台 PSM 的设计

与 Adams 平台 PSM 的设计类似, Aqus 平台 PSM 的设计主要包括三部分:外部可执行程序、模型转换引擎和模型驱动模块,需要借助 Windows 脚本编程技术、Abaqus 二次开发技术、Notepad++ 编程工具和 Abaqus CAE 软件,具体实现流程如图 10 所示。

1) 外部可执行程序。基于关键字匹配机制编写程序,将 STEP 文件数据段内代表 Abaqus 软件属性信息添加至 PIM,形成 Abaqus 软件可以读取的 STEP 文件。

2) 模型转换引擎。该转换引擎实现 STEP 文件自动导入 Abaqus 平台,并能够根据 PIM 环境下的模型信息对 Abaqus 平台内的有限元模型进行修补,保证后续仿真的顺利进行。

3) 基于 Abaqus 平台的模型驱动模块。该模块

的功能基于 Abaqus/Python 脚本实现,具体语法规则可查询 Abaqus 软件的脚本手册 Abaqus Scripting Reference Manual。首先,利用 Abaqus 软件工作目录下.rpy 文件录制相关操作的脚本形成日志文件;然后借助 Windows 命令和 Abaqus 内置的脚本文件读取接口,即通过 Windows 命令中加入 Python 脚本文件的本机路径,自动执行日志文件的各项功能,从而快速地完成整个有限元分析过程,得到求解结果^[17]。

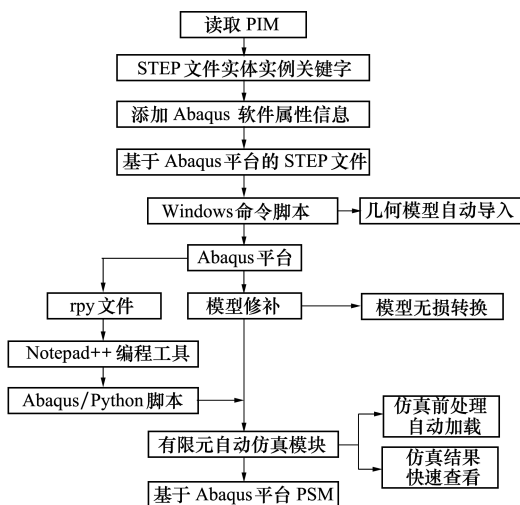


图 10 PIM 到 Abaqus 平台 PSM 的转换实现流程

所开发的模型驱动模块很好地解决了几何模型到有限元模型转换过程特征失真的问题,此外,由于 Abaqus/Python 脚本模块化、标准化的特点,当整体模型装配拓扑关系不变的情况下发生零件的修改或替换时,依然可通过该模块实现仿真前处理的自动加载及仿真结果的快速查看。

3 模型驱动模块的开发与实例验证

本文引入模型驱动的思想指导机械产品研发,通过分析数字样机模型驱动技术中 PIM 及 PSM 的具体内容及各软件平台的技术特点,采取直接的转换方式实现 PIM 到基于 UG、Adams、Abaqus 平台 PSM 的自动转换,完成了几何数字样机到性能数字样机的无损转换,形成了基于模型驱动的机械产品整体设计流程,如图 11 所示,并以典型的复杂机械产品——某枪械组件为例,验证了数字样机专用软件模型驱动模块的功能性能。

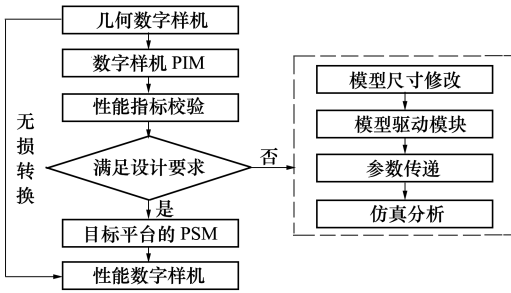


图 11 基于模型驱动的机械产品设计流程

1) PIM 到 Adams 平台 PSM 转换验证

基于前文所提到的模型转换方法可实现 PIM 到 Adams 平台 PSM 的自动转换。此外,为提升用户的操作体验及人机交互性,基于 UG 软件开发出相

应的菜单栏,如图 12 所示。在此基础上,以某型号枪械的抛壳机构为例进行验证,如图 13a)所示,抛壳机构顺利完成了抓壳、抱壳、抛壳等一系列动作。在保持抛壳机构整体装配关系不变的情况下对机匣的长度进行修改后,通过 Adams 平台的模型驱动模块可实现几何模型信息的完整传递及动力学仿真前处理的自动加载,实现快速仿真并及时输出分析结果,极大提高了研发效率,如图 13b)所示。

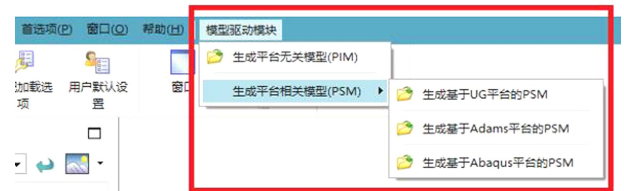


图 12 菜单及对话框设计

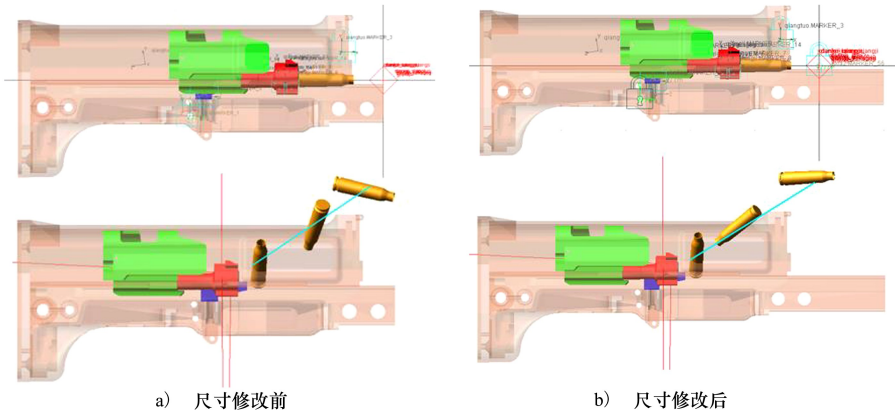


图 13 PIM 到 Adams 平台 PSM 转换验证

2) PIM 到 Abaqus 平台 PSM 转换验证

基于外部可执行程序、模型转换引擎可实现 PIM 到 Abaqus 平台 PSM 的自动转换,仅以某型号枪械的零件——枪管尺寸的模态分析为例进行验证。如图 14a)所示,对枪管进行了模态分析并得到

了枪管的前四阶模态云图;当枪管的尺寸发生变化时,即在不改变枪管的直径而增加其长度的情况下,依然可通过 Abaqus 平台的模型驱动模块进行有限元仿真并输出分析结果,分别如图 14b)所示。

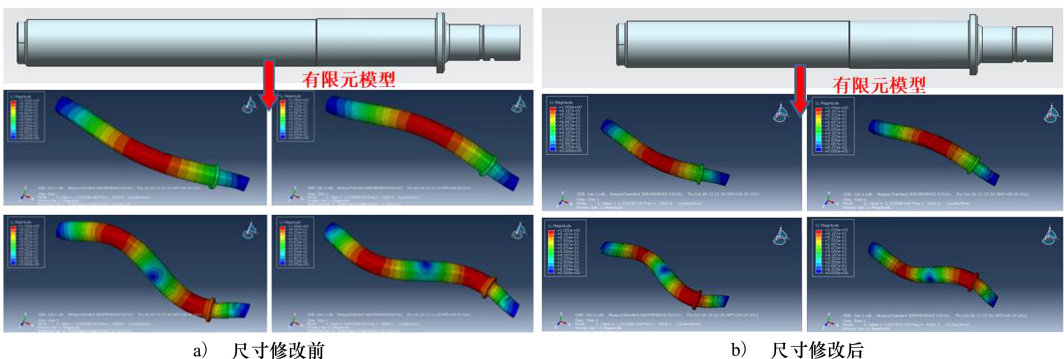


图 14 PIM 到 Abaqus 平台 PSM 转换验证

4 结 论

1) 本文将模型驱动思想引入机械产品设计,提出了一种基于模型驱动的复杂机械数字样机设计方法,形成了基于模型驱动的复杂机械设计流程,确保了从设计到仿真模型的一致性。

2) 通过解析 STEP 文件建立了数字化机械信息模型,在此基础上,构建了复杂机械数字样机的

PIM,提出了基于模型驱动的数字样机模型转换方法。

3) 研究并开发了机械数字样机专用软件的特有功能模块,并以典型复杂机械产品——某型号枪械组件为例进行了验证。应用表明,所开发相关软件的模型驱动模块可辅助设计人员快速完成机械产品的动力学仿真分析和有限元仿真分析,极大地缩短设计与仿真分析之间数据交换的时间,提高了机械产品的研发效率。

参考文献:

- [1] 赵森森,方俊.某自动步枪闭锁机构强度寿命分析[J].兵工自动化,2019,38(1):6-10
ZHAO Sensen, FANG Jun. Analysis of the strength and life of the locking mechanism of an automatic rifle[J]. Ordnance Industry Automation, 2019, 38(1): 6-10 (in Chinese)
- [2] 张丽平.自动武器发射机构运动可靠性分析与设计研究[D].南京:南京理工大学,2016
ZHANG Liping. Movement reliability analysis and design research of automatic weapon launching mechanism[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016 (in Chinese)
- [3] 万毕乐,贺文兴,陈畅宇.面向航天器总体装配的工艺数字样机可视化自动构建方法及系统[J].计算机集成制造系统,2018,24(6):1337-1344
WAN Bile, HE Wenxing, CHEN Changyu. Visualized automatic construction method and system of process digital prototype for spacecraft overall assembly[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 24(6): 1337-1344 (in Chinese)
- [4] FENG Qingqing, ZHOU Xionghui, LI Junjie. A hybrid and automated approach to adapt geometry model for CAD/CAE integration[J]. Engineering with Computers, 2020, 36: 543-563
- [5] 陈志刚,陈苏杭.基于数据模型驱动的舰载指控系统模型开发[J].舰艇电子工程,2019,39(3):21-24
CHEN Zhigang, CHEN Suhang. Development of shipborne command and control system model based on data model drive[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(3): 21-24 (in Chinese)
- [6] MELOUK Mostapha, RHAZALI Yassine, YOUSSEF Hadi. An approach for transforming CIM to PIM up to PSM in MDA[J]. Procedia Computer Science, 2020, 170: 869-874
- [7] RYBOLA Zdenek, RICHTA Karel. Transformation of special multiplicity constraints -comparison of possible realizations[C]// Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 2012: 1357-1364
- [8] 徐小定.基于STEP中性文件的特征信息提取与XML文档转换技术[D].郑州:河南工业大学,2013
XU Xiaoding. Technology of feature information extraction and XML document conversion based on STEP neutral file[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013 (in Chinese)
- [9] ALWSWASI Mazin, LVANOV Atanas. A novel and smart interactive feature recognition system for rotational parts using a STEP file[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104: 261-284
- [10] VENU Bitla, KOMMA Venkateswara Rao. STEP-based feature recognition from solid models having non-planar surfaces[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2017, 30(10): 1011-1028
- [11] 魏志芳,刘伟,兰轩,等.枪械回转式闭锁机构设计分析一体化软件设计与分析[J].兵工学报,2017,38(12):2337-2347
WEI Zhifang, LIU Wei, LAN Xuan, et al. Design and analysis of integrated software for design and analysis of rotary locking mechanism of firearms[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(12): 2337-2347 (in Chinese)
- [12] 陈妮,闫博,袁媛,等.微铣刀参数化设计系统研究[J].机械工程学报,2020,56(23):185-192
CHEN Ni, YAN Bo, YUAN Yuan, et al. Research on parametric design system of micro milling cutter[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(23): 185-192 (in Chinese)
- [13] LIU Han, LUO Guihuo, KUANG Xi, et al. Development of parametric modeling for the whole high bypass ratio turbofan engine based on secondary development of UG[C]//2017 2nd International Conference on Applied Mechanics and Mechatronics Engi-

neering

- [14] WEI Zhifang, HU Yechang, LU Wu, et al. Simulation-based construction of three-dimensional process model for punching cartridge cases[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2018, 27(2): 276-284
- [15] 黄书伟, 曹红松, 苑大威, 等. 基于 ADAMS 自动机动力学仿真快速建模技术研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2017, 38(3): 31-36
- HUANG Shuwei, CAO Hongsong, YUAN Dawei, et al. Research on fast modeling technology of automata dynamics simulation based on ADAMS[J]. Journal of Artillery Launching and Control, 2017, 38(3): 31-36 (in Chinese)
- [16] ZHANG Li, YE Jun, XU Juan, et al. Simulation analysis module of high-speed rail bearings based on secondary development in ADAMS[J]. Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing, 2013(3): 46-50
- [17] 黄韬, 马大为, 张震东. ABAQUS 二次开发在发射场坪参数化建模与分析中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(2): 134-138
- HUANG Tao, MA Dawei, ZHANG Zhendong. Application of ABAQUS secondary development in parametric modeling and analysis of launch site[J]. Firepower and Command Control, 2017, 42(2): 134-138 (in Chinese)

A complex machinery design-oriented digital prototype model driven method

ZHU Wenyue¹, LIU Yihua², WANG Yongjuan¹

(1.School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2.No.208 Research Institute of China Ordnance Industry, Beijing 100081, China)

Abstract: Because of information loss during the conversion between a geometric digital prototype and a performance digital prototype in developing a complex mechanical product, the model-driven architecture of a digital prototype was constructed. By analyzing the constituent elements of a STEP file, the platform independent model based on the digital prototype was established. The platform specific model conversion method from the model-driven platform independent model to the UG software, the Adams software and the Abaqus software was proposed. Based on the heterogeneous software interface and the scripting language, the model-driven modules of the above three types of software were developed and verified with numerical instances. The verification results show that the use of the model-driven method can share the model information on the special software for a mechanical digital prototype and that the model-driven modules thus developed can perform the quick simulation analysis and output its results in time.

Keywords: complex machinery; model driven method; digital prototype; platform specific model; platform independent model

引用格式: 朱文越, 刘伊华, 王永娟. 面向复杂机械设计的数字样机模型驱动方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(4): 901-908

ZHU Wenyue, LIU Yihua, WANG Yongjuan. A complex machinery design-oriented digital prototype model driven method [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(4): 901-908 (in Chinese)