

文章编号: 1001 - 2486(2011)04 - 0019 - 05

面向多学科语义的运载火箭集成设计数据管理方法^{*}

肖 飞^{1,2}, 王东辉¹, 陈 敏¹, 张为华¹

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 西安通信学院, 陕西 西安 710000)

摘要:针对当前集成设计系统中多学科数据管理存在的不足,在分析运载火箭集成设计 workflow 数据特点基础上,提出了面向多学科语义的统一数据描述方法和数据的动态集成与调度策略,简化了集成设计中数据的描述和访问机制,分离了软件开发者与多学科用户的职责权限。通过在某型运载火箭集成设计系统中的应用,表明该方法可将流程处理与数据处理分离,能有效提升运载火箭集成设计系统的灵活性、扩展性和通用性。

关键词:数据集成;集成设计;多学科设计;运载火箭

中图分类号: 文献标识码:A

Multidisciplinary Semantic-oriented Data Management of Integrated Design for Vehicle

XIAO Fei, WANG Dong-hui, CHEN Min, ZHANG Wei-hua

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Xi'an Communications Institute, Xi'an 710000, China)

Abstract: Focusing on the shortage of multidisciplinary data management systems of current integrated design environment, a dynamic integration and scheduling strategies of data was built, using a unified multidisciplinary semantic-oriented data management method on the basis of the analysis of characteristics of data in launch vehicle design process. The application in an integrated design environment of a solid rocket vehicle proves that the multidisciplinary semantic-oriented method separates data dealing from processing dealing, and simplifies the data description and access. Consequently, the flexibility, expansibility and versatility of vehicle integration design environment are enhanced.

Key words: data integration; integrated design; multidisciplinary design; vehicle design

运载火箭总体设计过程是一个复杂多学科多用户协作的迭代过程,涉及大量多学科模型、应用程序和复杂的数据交互关系,且同一参数在不同设计小组之间的数据格式与描述方法不尽相同,极易导致数据传递错误,严重制约了运载火箭设计效率与自动化设计水平^[1]。随着信息技术的不断发展,集成化设计思想应运而生^[2],为解决以上问题带来了契机。其中,数据作为运载火箭集成设计系统的基础和支撑,其组织与管理方法一直是集成设计研究的关键问题之一,直接影响到运载火箭集成设计过程的正确、有序执行。

目前,集成设计过程中的数据管理一般是面向软件开发者^[4],因此在系统开发阶段需软件开发者与各学科领域用户频繁沟通,需充分了解运载火箭设计过程中各种设计活动内涵及数据交互

关系。在系统运行和维护阶段,仍然需要软件开发者参与操作。一旦所访问的数据源或集成设计过程中的设计环节有改变,仍需要由软件开发者干预才能使系统适应改变需求,无形中使软件开发者过多地介入多学科领域模型设计和运载火箭总体设计流程管理中,降低了多学科领域用户的自主性。因此,具备较高柔性的集成设计系统数据管理模式,首先需要分离用户和软件开发者的职责权限,减少两者间的相互干预。

本文提出一种面向多学科语义的统一 workflow 数据描述及数据的动态集成与调度策略。该方法将流程描述与数据描述、流程处理与数据处理分离,实现软件开发者与多学科用户的权责分离,简化集成设计数据的描述和访问机制,提升集成设计系统的灵活性、扩展性和通用性。

^{*} 收稿日期:2010-12-20

基金项目:国家 863 计划资助项目(2010AAX020108)

作者简介:肖飞(1981—),女,博士生。

1 面向多学科语义的集成设计数据描述

1.1 运载火箭集成设计过程相关数据分析

运载火箭集成设计过程中各项设计活动按照一定的顺序依次执行,按照 workflow 管理联盟 (Workflow Management Coalition, WfMC)^[5-7]对 workflow 的定义,运载火箭集成设计过程可以被定义为 workflow 的一种特例。则参照 WfMC 对 workflow 数据的定义,运载火箭集成设计过程中涉及的数据的集合是所有设计活动能够访问及处理的数据的总和,即 $WFD = \bigcup_{i=1}^n D_A(i)$ 。其中 WFD 表示集成设计 workflow 数据集, n 表示运载火箭设计流程中的活动数目, $D_A(i)$ 表示设计活动 $i(1 \leq i \leq n)$ 上的活动数据集。

从活动数据在集成设计 workflow 模型中的功能用途来看,活动 i 上的活动数据可划分为过程控制数据 $D_C(i)$ 、过程数据 $D_S(i)$ 和用户应用数据 $D_U(i)$ 三种, $D_A(i) = D_C(i) \cup D_S(i) \cup D_U(i)$ 。过程控制数据用于判断活动的状态和控制活动的逻辑;过程数据处于活动数据的中间层次,是活动的每个步骤所能处理的数据;用户应用数据指活动所使用的专业计算软件工具接口提供的数据。

1.2 运载火箭集成设计 workflow 数据描述策略

集成设计 workflow 数据描述策略如图 1 所示。根据数据功能及访问特点,将集成设计 workflow 数据划分为四层逻辑空间,分别是物理空间、逻辑空间、用户空间和语义空间。其中,用户空间是多学科领域设计人员实现数据集成关系和数据流描述的空间;逻辑空间是 workflow 系统解析数据集成关系,处理数据流转换的空间;物理空间是独立数据源数据的存储空间;语义空间则是存储用户应用数据和过程数据相互映射关系的空间。

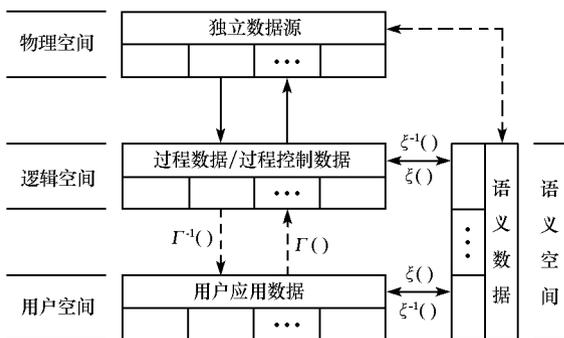


图 1 面向多学科语义的数据描述策略
Fig.1 The Multidisciplinary semantic-oriented data description strategy

(1) 用户空间数据描述

用户应用数据面向各学科领域用户,实现数据概念特性的描述,提供集成设计过程中学科模型和应用程序的访问接口数据。用户应用数据可以描述为一个四元组, $UD = \langle UDID, UDC, UDValue, UDIO, UDR \rangle$ 其中, UDC 为应用数据属性集合,由于运载火箭集成设计过程中各学科模型接口参数不一致特点,具体表现为参数名称和符号、参数值域和精度、参数物理量纲^[8-9]的不一致性,因此应用数据属性 $UDC = \{Name, Unit, Type\}$ 具体包括数据名称 $Name$, 类型 $Type$ 和物理量纲 $Unit$; $UDIO$ 描述应用数据接口属性; UDR 描述应用数据之间邻接关系的集合。

(2) 逻辑空间数据描述

逻辑数据直接参与运载火箭集成设计流程执行和控制,提供了集成设计过程推进所需的控制条件,以及设计活动之间交互所需的数据准备,可定义为五元组: $LD = \langle LDID, LDC, LDValue, LDD, LDR \rangle$ 。其中, $LDC = \{Name, Unit, Type\}$ 为逻辑数据属性的集合,包括数据名称 $Name$, 类型 $Type$ 和物理量纲 $Unit$; LDD 表示数据逻辑操作集合,包括读 R 和写 W 两种。

(3) 语义空间数据描述

语义空间内的数据语义空间独立于集成设计过程之外,不直接参加集成设计过程中的数据交互,而是向集成设计系统提供应用数据向逻辑数据的映射规范,语义数据可用一个三元组描述: $SD = \langle SDID, SDC, SDF \rangle$ 。其中 $SDC = \{Name, Unit, Type\}$ 为语义数据属性的集合,包括数据名称 $Name$, 类型 $Type$ 和物理量纲 $Unit$; $SDF = \{f_{su}, f_{sl}, f_{us}, f_{ul}\}$ 为语义数据和应用数据及逻辑数据之间的映射方法集合。其中, f_{su} 为应用数据到语义数据的映射; f_{sl} 为逻辑数据到语义数据的映射; $f_{us} = f_{su}^{-1}$ 为语义数据到应用数据的映射; $f_{ul} = f_{sl}^{-1}$ 为语义数据到逻辑数据的映射;为描述方便,在无具体指代时,映射函数集 SDF 中的元素均以 f_0 表示。假设数据 $ud_i \in UD, sd_j \in SD$,若 sd_j 的取值受到 ud_i 的影响,则称 sd_j 和 ud_i 之间存在映射关系,记为 $f_0: ud_i \rightarrow sd_j$,同理可描述其他类似映射关系。

(4) 物理空间数据描述

物理空间描述是对数据存储状态的描述,包含数据标识、存储名称、存储类型、值和操作权限等。

(5)集成设计数据在各空间的映射

图 1 所示面向多学科语义的集成数据描述策略中包含三类映射:用户空间到逻辑空间的映射设计 $\Gamma()$ 、用户空间到语义空间的映射 $\xi()$ 、逻辑空间到语义空间的映射 $\zeta()$ 。其中,数据集在用户空间和逻辑空间的映射 $\Gamma: UD \rightarrow LD$ 属于一一映射,即 $\forall ud_1, ud_2 \in UDATA, ld_1, ld_2 \in LDATA$, 存在 $\Gamma(ud_1) = ld_1, \Gamma(ud_2) = ld_2$, 若 $ld_1 = ld_2$, 必有 $ud_1 = ud_2$ 。

数据集的映射主要包括数据标识、数据属性、数据取值和数据操作类型的映射。具体映射方法如下:

①数据标识:逻辑空间中参与集成设计活动交互的数据是由用户空间数据映射而产生的,因此这部分数据的数据标识不需要单独生成,而是由用户空间中数据标识直接映射而来。

②数据属性:若数据 $ud \in UDATA$, 数据 $ld \in LDATA$, 数据 $sd \in SDATA$, ud 、 ld 和 sd 之间存在映射关系 $\Gamma(ud) = ld, \xi(ud) = sd$ 和 $\zeta(sd) = ld$, 则可建立用户数据属性集到逻辑数据属性集的映射, $\tau: UDC \rightarrow LDC, \tau(UDName) = LDName, \tau(UDType) = LDType$ 。由于在语义空间定义了数据属性的映射方法,用户数据到逻辑数据的映射并不是直接映射,而是 $\xi()$ 和 $\zeta()$ 的联合映射,即 $\Gamma = \xi \cdot \zeta$ 。

③数据操作类型:若数据 $ud \in UDATA$, 数据 $ld \in LDATA$, ud 和 ld 之间存在映射 $\Gamma(ld) = ud$, 则可建立用户数据接口属性集合 $UDIO$ 到逻辑数据操作集合 M 的映射, $\tau_{op}: UDIO \rightarrow M$, 其中, $\tau_{op}(I) = R, \tau_{op}(O) = W$ 。

④数据取值:若数据 $ud \in UDATA$, 数据 $ld \in LDATA$, 数据 $sd \in SDATA$, ud 、 ld 和 sd 之间存在映射关系 $\Gamma(ud) = ld, \xi(ud) = sd$ 和 $\zeta(sd) = ld$, 则可建立用户数据取值到逻辑数据取值的映射, $\tau_m: UDValue \rightarrow LDValue$ 。由于语义空间定义了用户数据与逻辑数据之间取值的相互映射方法,故 τ_m 可描述为: $\tau_m(UDValue) = SDF(LDValue)$ 。

1.3 运载火箭集成设计 workflow 数据静态模型

基于上述分析,建立运载火箭集成设计 workflow 数据实体关系模型如图 2 所示。在运载火箭集成设计 workflow 数据实体关系模型中,用参数表存储用户空间数据,语义表和映射表存储语义空间数据,数据流模型表和数据流实例表存储逻辑空间数据。

2 数据的动态集成与调度

2.1 设计数据的动态集成策略

面向多学科语义的数据动态集成策略如图 2 所示。学科用户通过用户界面所提供的数据集成工具,建立用户空间和语义空间的联系。集成设计系统通过应用程序的封装与发布实现用户数据、语义数据、逻辑数据和物理数据的映射,完成设计数据由用户空间向物理空间的映射,建立设计数据的语义空间模型,同时将设计数据及其空间映射关系保存至数据库。

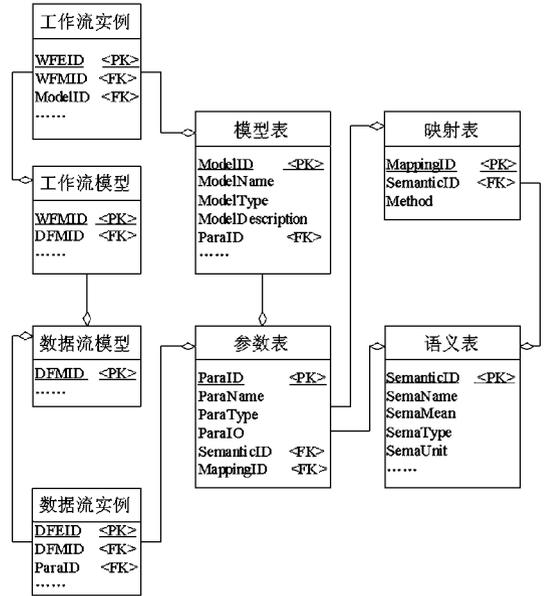


图 2 集成设计 workflow 数据 ER 图
Fig.2 The ER graph of workflow data

2.2 基于 workflow 的设计数据柔性调度

数据在 workflow 引擎调度下伴随 workflow 活动的有序执行产生数据流程实例,实现逻辑空间内数据的交互和物理空间数据的访问;同时,利用语义映射器实现逻辑空间和用户空间数据交互。图 3

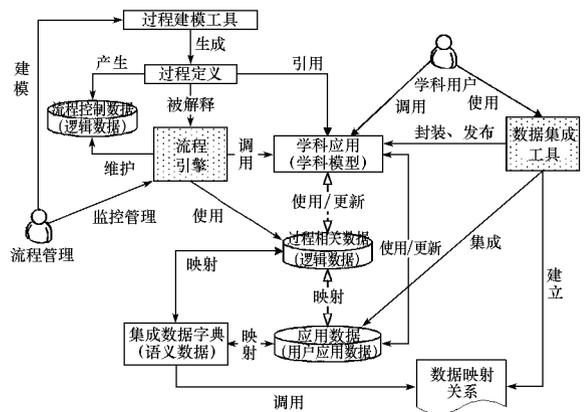


图 3 设计数据集成与调度策略
Fig.3 The data integration and scheduling strategy

所示数据调度过程,流程管理人员利用 workflow 管理系统提供的过程建模工具建立运载火箭集成设计过程模型,产生集成设计过程相关逻辑数据,利用 workflow 引擎实现逻辑数据的维护与访问; workflow 引擎调用学科应用时,不直接向该学科应用提供所需应用数据,而是提供学科应用相关逻辑数据,借助语义空间实现逻辑数据的映射,产生学科应用程序运行所需的应用数据。

2.3 算法描述

算法 1 Integrate_UData	算法 2 Prepare_Data	算法 3 Save_Data
输入:应用程序 ID 输出:应用程序接口参数表记录	输入:数据库存储参数 PValue 输出:用户应用参数 UValue	输入:用户应用程序输出参数 UValue 输出:数据库存储参数 PValue
Step 1 确定存储位置 Step 2 CreateID(i); GetSIDID();//生成逻辑数据 INSERTRecord();//新记录	Step 1 确定应用程序接口参数 ID Step 2 GetMethodID (); Method(MID, PValue); //将物理数据转换为用户数据	Step 1 确定应用程序 ID Step 2 GetMethodID();//获取映射 Method(MID, UValue); //将用户数据转换为物理数据
Step 3 State = SeekNextData();	Step 3 SeekNextData();	Step 3 SeekNextData();//查找下一接口

3 应用实例

以本文研究为核心技术,将面向多学科语义的统一数据管理及动态集成方法应用于某小型固体运载火箭集成设计平台原型系统(Integrated Design Environment of Vehicle, IDEV)中,开发了集成设计系统模型管理子平台(Model Management Sub-platform, MMSP)。

在小型固体运载火箭总体设计过程中,需要多学科设计人员共同参与设计,并且一次设计往往不能满足设计指标要求,需要进行多次设计迭代。因此,小型固体运载火箭设计过程涉及不同学科不同粒度的仿真模型,随着设计过程的推进,设计模块根据设计复杂度要求而不断更新,模块输入输出接口随之发生改变。在没有 MMSP 之前,IDEV 系统中的设计模块及模块间的数据交互需要软件开发人员在系统开发阶段就设计完成,软件使用过程中发生模块更改和增减等需求,必须通过软件开发人员介入修改系统框架来实现,造成 IDEV 系统框架僵化,使用极为不便。此模式下的 IDEV 系统开发,要求软件开发人员必须首先学习并熟知 IDEV 系统应用对象的设计流程及相关学科领域知识,造成人力资源的进一步浪费,不利于软件的发展及用户权责的分离。

MMSP 通过提供交互式图形化模型封装工具,实现多学科模型及接口的动态集成,如图 4、图 5 所示。软件开发人员无需事先熟悉用户的专业领域知识,实现了用户权责的分离。

图 4 中多学科用户通过模块树将弹道仿真程

(1)数据集成算法:主要由算法 Integrate_UData 组成,实现应用程序接口数据由用户空间向物理空间的映射。

(2)数据调度算法:主要由子算法准备活动输入数据和保存活动输出数据组成。其中 Prepare_Data 为 workflow 活动所执行的用户应用程序准备程序运行所需要的输入接口数据;Save_Data 将应用程序执行所输出的接口数据保存至数据库。具体算法描述如下:

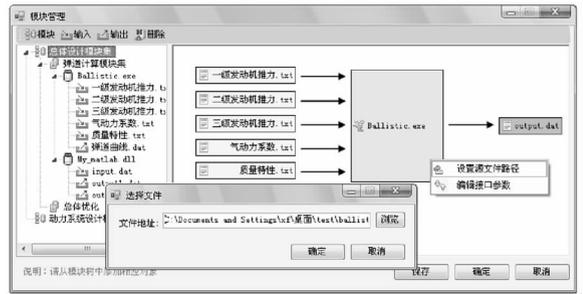


图 4 模型集成界面
Fig.4 Model integration interface

名称	专用名	单位	初值
length	火箭总长	mm	0
m0	起飞质量	kg	0
P0	起飞推力	kgf	0
F1	一级推力	kgf	0
I1	一级发动机总冲	s	0

图 5 模型接口参数集成界面
Fig.5 The integration of model interface data

序 ballistic.exe 集成到运载火箭集成设计系统中;通过模块接口关系定义了 ballistic.exe 的输入输出接口,分别包括 5 个文件:“一级发动机推力.txt”、“二级发动机推力.txt”、“三级发动机推力.txt”、“气动力系数.txt”和“质量特性.txt”。通过 MMSP 内置接口解析器,解析用户输入输出接口,如图 5 所示。

用户利用图 5 界面所提供的交互式工具,描述了运行 ballistic.exe 所需接口参数的名称、物理量纲和取值等,并定义了面向用户的应用程序接口参数与语义参数的映射关系。其中“名称”表示该参数为用户所认可的领域名,“专用名”表示该

参数在语义空间和逻辑空间唯一标识的名称。MMPS为每一个物理参数提供一套标准化定义,建立集成数据字典。

图4、图5的过程涉及数据库中的学科模型表、参数表和过程数据表中记录的更新。具体内容如下:

表名				过程数据表				
字段名	modelID	describe	app	LdataID	modelID	Value	SID	Source
值	M0005	弹道计算	//ballistic.exe	M005L001	M005	0	S023	M004L001
				M005L002	M005	0	S034	M003L005
表名				参数表				
字段名	UdataID	modelID	describe	Value	SID	SName	Unit	IO
值	M005U001	M005	length	0	S023	火箭总长	mm	I
	M005U0002	M005	m0	0	S034	起飞质量	kg	I

各数据表之间关系描述如下:

学科模型表.modelID = 逻辑数据表.modelID
 应用数据表.modelID = 应用数据表.modelID

逻辑数据表.SID = 应用数据表.SID

4 实例分析

运载火箭集成设计过程中,弹道仿真活动所需要的各级发动机推力参数来自于动力系统设计活动的输出。

在没有开发MMSP之前,IDEV系统中为实现学科模块间数据正确传递与交换,需要在系统开发阶段或学科模型应用程序开发阶段,事先指定ballistic.exe接口数据的来源路径和转换方法,即“弹道仿真.输入参数.‘一级发动机推力’=动力系统设计.输出参数.‘一级发动机推力’×单位转换函数()”。一旦集成设计过程中弹道仿真活动的前驱活动发生改变,或者该前驱活动所调用的学科模型应用程序结构发生改变,按照集成系统中设定的数据传输路径,则有可能出现无法找到数据源或数值量纲不一致等数据传输错误,造成集成设计过程运行失败。

采用MMSP实现应用程序数据接口的集成之后,ballistic.exe运行时只需指定需要获取的参数名即可,即“get(‘一级发动机推力’)”。集成设计系统不需要实现定义数据传输路径与转换方法,而是利用 workflow 引擎实现数据传输路径的柔性定制,利用集成数据字典定义学科模型参数的相互转换规则,从而有效分离了学科应用程序开发人员、设计流程建模人员和集成系统框架开发人员的职责。

5 结论

本文针对集成设计系统中 workflow 数据描述和

数据集成问题,在分析运载火箭集成设计数据特点基础上,提出面向多学科语义的四层空间数据描述策略,并基于该描述策略建立了数据动态集成与调度策略。实践证明:

(1)四层空间描述方法将集成设计数据描述划分为面向软件开发人员和面向多学科用户两个层面,有效实现了软件开发人员和用户的权责分离;

(2)基于语义映射的数据集成与调度机制,屏蔽了物理数据的改变对业务流程(即运载火箭设计流程)的影响,实现了流程处理和数据处理的分离;

(3)在语义空间建立标准化参数语义,有助于建立规范化的接口数据对象,从而实现软件系统的通用化(接口参数的规范化,是实现数据库结构、工作流系统的通用化的基础)。

面向多学科语义的统一数据管理策略,为 workflow 数据管理建立规范化的统一数据接口,实现了数据的动态集成与调度,为进一步数据流的自动匹配与调度研究提供了可能,下一步将就此问题深入展开研究。

参考文献:

- [1] Eck O, Schaefer D. A Semantic File System for Integrated Product Data Management [J]. Advanced Engineering Informatics, 2010 (8):5.
- [2] 陈敏. 导弹总体集成设计系统关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2008.
- [3] 谢列卫. 集成产品开发过程的理论、方法与应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2000.
- [4] 杨飞,尹宝林. 面向业务语义的统一 workflow 数据管理[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15 (6):1155 - 1164.
- [5] The Workflow Model[R]. Cohasset, Mass., USA: Workflow Management Coalition, WFMC - TC - 100B, 1995.
- [6] Terminology and Glossary [R]. Workflow Management Coalition, WFMC - TC - 1011, 1996.
- [7] 罗海滨,范玉顺,吴澄. 工作流数据的一致性保护框架[J]. 计算机集成制造系统, 2002, 8 (4): 320 - 325.
- [8] Sutton G P, Biblarz O. Rocket Propulsion Elements: An Introduction to the Engineering of Rock-ets[M]. Seventh Edition, 2000.
- [9] Missile Datcom User's Manual[R]. 1997 Fortran 90 Revision, 1998.