

文章编号: 1000-8055(2007)04-0619-06

基于算法组件动态组合的固体火箭发动机计算机辅助设计/ 计算机仿真(SRMCAD/ CS)

何允钦, 梁国柱

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘 要: 提出了一种新的软件模型: 根据发动机设计人员的设计/ 仿真任务动态地组合算法组件得到所需的设计/ 仿真算法, 模型可以灵活地胜任发动机设计领域变化多样的设计/ 仿真计算任务, 并且可以使整个软件系统具有很好的扩展性. 该研究意图在于创建一个规范、开放的算法组件接口体系, 在此基础上建立一个可重用、可扩展的算法组件库和一个算法组件动态组合机制, 从而将设计人员编制设计/ 仿真算法的任务转变成利用已有算法组件动态地组合出所需的设计/ 仿真算法. 该模型让设计人员在设计/ 仿真工作中重用算法组件库中已有的算法成果, 同时又保持了设计人员的自主性, 使设计人员的工作变得更加容易和高效.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 固体火箭发动机; 计算机辅助设计; 计算机仿真; 动态组合; 重用

中图分类号: V435

文献标识码: A

Study on solid rocket motor computer aided design/ computer simulation(SRMCAD/ CS) system based on dynamic combination of arithmetic components

HE Yun-qin, LIANG Guo-zhu

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A new software model was developed to obtain the desired design/ simulation arithmetic by combining arithmetic components dynamically according to rocket motor designers' design/ simulation tasks. This software model could be used to finish a variety of SRMCAD/ CS tasks while offering excellent expandability for software system. The purpose of this research is to create a standard and open arithmetic component interface system, whereby a reusable, expandable arithmetic components library and a combined arithmetic components mechanism could be established. In this way, the designers' tasks of compiling design/ simulation arithmetic can be turned to combine dynamically into a desired one using the existing arithmetic components. This software model enables the designers to reuse the existing arithmetic in the arithmetic component library, while maintaining the liberty of designers for easier and efficient work.

Key words: aerospace propulsion system; solid rocket motor (SRM); computer aided design (CAD); computer simulation (CS); combine dynamically; reuse

收稿日期: 2006-06-30; 修订日期: 2006-12-08

作者简介: 何允钦(1980-), 男, 湖南永州人, 北京航空航天大学宇航学院博士生, 研究方向: 固体火箭发动机计算机辅助设计与计算机仿真技术. E-mail: heyunqin80@sohu.com

固体火箭发动机计算机辅助设计/计算机仿真(简称 SRMCAD/CS)技术在上个世纪 80 年代已经首先在美国和法国得到了成功的应用^[1,2],最近美国的伊利诺伊大学在固体火箭发动机全系统仿真和流场仿真方面做了较系统深入的研究^[3,4],国内的各高校和研究院所也开展了较多的研究和开发工作^[5-11].但是,从国内的各种 SRMCAD/CS 相关的技术应用来看,目前的状况仍不理想:首先,已存在的 SRMCAD/CS 软件大都只是面向各自特定的设计/仿真任务或者发动机结构的,相同功能的设计/仿真算法在多个软件中被多次重复地实现,算法实现没有被重用;其次,由于软件的用途大都是针对特定设计/仿真任务而研发的,软件中所包含的设计/仿真算法的处理流程大都是使用硬编码来实现的,因此除了事先设定好的计算任务,很难胜任发动机设计人员实际工作中变化多样的设计/仿真计算任务;最后,发动机的设计/仿真技术仍处于不断地发展之中,新的模型和算法会不断地引入,而目前的软件没有很好地考虑软件的扩展性需要.

本文分析了目前国内 SRMCAD/CS 技术的应用现状,探讨了它们的成功和不足,并且站在整个 SRMCAD/CS 技术应用和发展的立场上,提出建立一个规范、开放的 SRMCAD/CS 算法组件接口体系,并在此基础上建立一个 SRMCAD/CS 的算法组件库,以便于发动机设计人员重用.基于算法组件接口体系,本文还提出了建立一个可以动态地组合算法组件的机制,它能很好地解决固体火箭发动机设计/仿真领域中任务变化多样所导致的算法重用问题,同时也解决了软件系统扩展的问题,给发动机设计人员创造一个自主、容易、高效和易于不断更新扩展的设计/仿真环境.

1 SRMCAD/CS 技术应用现状分析

1.1 设计/仿真算法

固体火箭发动机设计/仿真是一个比较复杂的研究领域,包含了大量的机械力学、流体力学、优化设计、计算流体力学、热力学和传热学等学科的抽象模型和相关算法.目前国内的 SRMCAD/CS 软件,从其需要解决的设计/仿真问题来看可以分为两类:针对整个发动机的较通用的固体火箭发动机设计/仿真软件;针对特定设计问题或者特定发动机部件的设计/仿真软件.这些软件涉及了固体火箭发动机设计的方方面面,并且对于特定的设计/仿真问题都可以计算出满意的结果,这

说明目前国内的 SRMCAD/CS 技术应用在算法方面已经比较成熟,当然,随着专业技术的发展,算法本身还会不断地发展,所以,相应的软件系统也需要不断地扩展和更新.

1.2 软件的实用性

目前国内的固体火箭发动机设计/仿真软件数目和种类均较多,但是从实用性角度来看,仍然不能灵活地满足发动机设计人员实际工程设计/仿真任务的需要.

首先,软件中的设计/仿真算法和控制流程被硬编码在软件中,使得发动机设计/仿真软件硬编码的算法处理流程被强加给了发动机设计人员,但是这个过程很有可能不完全符合发动机设计人员的具体工程任务需求,因为发动机设计过程是复杂、灵活、易变的,而且包含具体设计人员的工程经验,不存在一个规范、统一设计过程;其次,算法之间不能协作地完成设计任务,发动机设计是一个综合的过程,设计过程中需要结合使用各种设计/仿真算法,目前已存在的发动机设计/仿真软件大都只专注于特定的设计问题,而没有考虑到与别的设计/仿真软件之间的协作计算问题,因而造就了大量的“信息孤岛”.上述两个缺陷是目前国内固体火箭发动机设计/仿真软件难以获得广泛推广使用的根本原因.

1.3 软件的可扩展性和算法的可重用性

SRMCAD/CS 包含了数目较多的、种类较多的、交织在一起的设计/仿真算法,并且计算算法还会随着发动机设计/仿真技术的不断发展而改进和扩展,这就要求 SRMCAD/CS 软件系统也必须具有较好的扩展性,而目前国内的 SRMCAD/CS 软件系统大都只是针对特定的设计/仿真任务而编制实现,没有事先从整个发动机设计/仿真的大背景上来考虑软件扩展性的要求,这使得软件系统以后的扩展工作很难进行.

不同的发动机设计人员在设计/仿真工作中需要综合使用不同的设计/仿真算法,这导致完成不同设计/仿真计算任务的软件被独立实现,相同的算法也因此不同的设计/仿真软件中被多次重复地实现,这大大地增加了发动机设计人员的工作量.事实上,大部分算法是可以在不同的设计/仿真任务中重用的,如果发动机设计人员可以在自己的设计/仿真任务中重用已有的算法实现,可以大大地提高自己的设计效率,也可能提高自己的设计水平(继承已有算法的设计水平).

从发动机设计人员工程应用的角度来看,软件系统的扩展性和算法的重用性是 SRMCAD/CS 软件系统的客观需要,是与发动机技术不断发展的状况和发动机设计人员的工作性质(设计/仿真任务的灵活多变)相一致的。

2 动态组合设计/仿真算法的软件模型

本章探讨了固体火箭发动机设计/仿真的根本复杂性^[12]问题,它也是软件系统扩展和算法重用的最大障碍。本章的最后提出了一个新的软件模型(动态地组合算法)来解决这个问题。

2.1 固体火箭发动机设计/仿真概览

固体火箭发动机是一个复杂的机械体,从设计/仿真上可概括为:多种推力类型(单推力、双推力等)、多种药柱类型、多种燃烧室形式、多种喷管类型、多种点火器类型、多种燃烧室与点火装置连接形式、多种燃烧室与喷管连接形式等等。在实际设计/仿真中,可以由上述多种发动机构件组成数十种不同的发动机方案,随着技术的发展,发动机的类型还会逐渐增加。发动机设计人员在实际任务中具体选择哪种类型要根据任务的需要来决定,很难事先对所有可能的组合方式都提供相应的设计/仿真算法,随着发动机技术的发展,设计/仿真算法还会不断发展。实际的设计/仿真过程是一个迭代的、设计人员参与决策的一个过程,既包含了大量的数学算法也包含了大量设计人员的实际工程经验,具体的设计流程和具体的设计/仿真任务和设计人员的实际工程经验关系密切,因此,很难事先给出一个规范、统一的流程。

2.2 固体火箭发动机设计人员的工作流程

固体火箭发动机的设计/仿真过程是一个协作的过程,不同的发动机设计人员会被分配不同的设计/仿真任务,但是不同的设计/仿真任务之间又有着互相制约的关系。每个设计人员完成设计/仿真任务的过程可以描述为:首先,分析设计/仿真任务;然后,编制设计/仿真算法;接着,将设计/仿真的要求和限制性条件以及设计人员的工程经验作为算法输入;最后,启动算法进行计算得到设计结果,如果结果满意则停止,否则,重新开始上面的过程。

图 1 是设计人员的工作流程图。

从图 1 可以看出,设计人员的设计/仿真过程

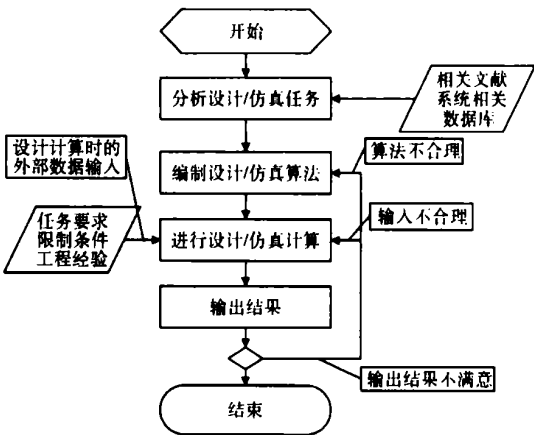


图 1 发动机设计人员工作流程图
Fig. 1 Working process diagram of solid rocket motor designer

既要满足设计/仿真任务的要求以及各种限制性条件,又需要根据设计人员的工程经验做出决策,最后还要使用一定的算法来获取结果,整个过程是一个迭代和调整的过程。

2.3 动态组合算法的软件模型

根据上一小节的论述,对于发动机设计人员,设计/仿真任务和限制性条件以及他们的工程经验都是事先确定的,设计/仿真难点是为了完成设计/仿真计算所要实现的设计/仿真算法,它完全由实际的设计/仿真任务决定。事实上,随着 CAD/CS 技术在固体火箭发动机设计领域的应用,国内外在固体火箭发动机 CAD/CS 的算法研究方面已经很成熟,设计人员完全可以套用这些已经被实践验证过的经典算法。要求每个设计人员都根据自己的任务要求来实现自己的设计/仿真算法显然是一个既费时又费力的过程。既然大部分算法都是现成的,为什么不将它们一次实现,而在以后的设计/仿真计算中重用呢?我们完全可以先建立一个比较全面而基础的算法集合,再建立一个算法组合机制,使得发动机设计人员只要从算法集合中选择出设计/仿真任务所需要的若干个设计/仿真算法,然后组合出可以完成设计/仿真任务的算法。当然,根据设计/仿真任务的具体要求,设计人员也可以加入自己的算法,然后和从算法集合中选择出来的算法一同组合来得到最终的设计/仿真算法。总之,发动机设计人员需要的是一个存在大量可重用设计/仿真算法,并易于扩展和灵活地适应设计人员需求的固体火箭发动机设计/仿真软件。该软件模型如图 2 所示。

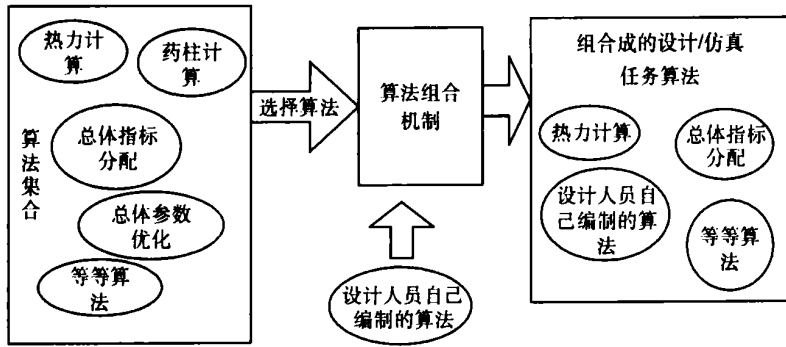


图 2 动态地组合成设计/ 仿真任务算法

Fig. 2 Select arithmetic from arithmetic set and combine them dynamically according to specific design/ simulation task

图 2 表示设计人员从算法集合中选择了热力计算、总体指标分配等算法,并且加入了设计人员自己的编制的算法,这些算法被组合在一起成为具体设计/ 仿真计算任务的算法,这种模型既可以满足算法的重用,又可以灵活地适应设计人员变化多样的工作需求。

3 基于算法组件动态组合的 SRM-CAD/ CS 系统

固体火箭发动机设计/ 仿真的根本复杂性决定了很难事先确定所有可能的工程任务所需的设计/ 仿真算法和处理流程,它通常要由设计人员具体的工程任务和自身的工程经验来临时决定,并且发动机技术本身也在不断地发展之中,相应的算法也在不断地扩展和更新,这些都给软件的实用性、重用性和扩展性带来了一系列的问题。但是,面向对象软件方法技术为这些问题提供了现成的架构模型和解决途径。

3.1 算法组件接口和算法组件

图 2 描述了算法组件动态组合的 SRMCAD/ CS 系统的模型,面向对象方法技术所倡导的组件技术和接口技术为该模型实现提供了基础,可以采用组件的方式来封装各种设计/ 仿真算法,并且称之为算法组件,采用接口来暴露算法组件中的算法,并称之为算法组件接口。算法组件是算法组件接口的实现同时也是算法的载体,它可以独立地发布、扩展和升级。算法组件接口可以将算法的实现和外界隔离并同时将算法组件中的算法规范地暴露出去。算法组件接口在语义上表现为职责,它是从具体功能实现中抽象和分离出来的,因此,一个算法组件接口可以有多个实现。比如,热力计算是软件系统中的一个职责,它可以作为一个接

口被提炼出来,可以有化学平衡常数法和布林克莱法等多个实现。

算法组件接口和算法组件是算法重用的基础,也是整个软件系统扩展性的基础,它还为将论述的动态组合机制提供了必要的基础。

3.2 算法组件接口体系和算法组件库

SRMCAD/ CS 包括大量的设计/ 仿真算法,为了算法的最大程度重用和系统将来的易扩展性,应该按照面向对象的原则对 SRMCAD/ CS 系统所使用的各种计算算法进行抽象和归纳,抽象和归纳后将得到对应于各种功能算法的算法组件接口,并且这些接口之间还存在大量的关联或者使用关系。用 UML^[13] 图可以表示如图 3。

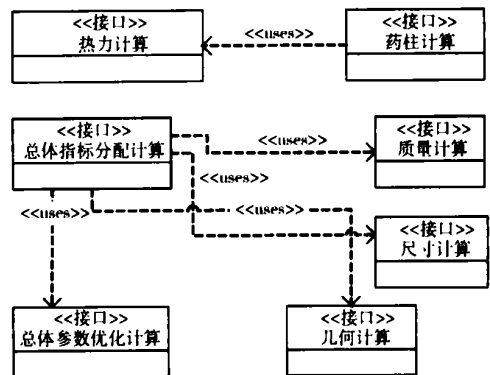


图 3 算法组件接口和它们之间的关系

Fig. 3 Interfaces of arithmetic components and their relations

这些接口和接口之间的关系组成了 SRMCAD/ CS 系统的算法组件接口体系(图 3 只列出了第一个原型系统的算法组件接口体系,它会随着软件系统的迭代开发^[13] 而进一步扩展和完善)。接口体系对 SRMCAD/ CS 相关的算法进行

了抽象和归纳,反映了系统中各个算法之间的关系,为进一步实现算法组件提供了方向和目标。

算法组件接口体系具有开放性,严格遵守接口体系的规范,发动机设计人员可以实现接口体系中存在的算法组件接口,用自己实现的算法组件来替代算法组件库(可重用算法组件的集合)中已有的算法组件。发动机设计人员也可以对接口体系进行扩展,加入自定义的算法组件接口。

算法组件接口体系中接口的实现就是各种算法组件,比如:热力计算组件,总体参数优化组件,药柱计算组件,总体指标分配等,这些算法组件的集合就是算法组件库,它是 SRMCAD/CS 系统进行设计/仿真计算的基础,也是设计人员算法重用的基础。

采用将算法组件化的方法,主要是考虑到 SRMCAD/CS 系统本身是一个不断发展的系统,算法组件化可以便于整个系统的扩展和升级,并加强了系统的模块化特征,使得整个系统结构层次清晰更便于理解、维护和扩展。

3.3 算法组件动态组合机制

算法组件动态组合机制是一个算法组件的“粘合”机制,通过该机制发动机设计人员可以把所需要的算法组件(来自于算法组件库或设计人员)组合起来得到工程所需要的设计/仿真算法。算法组件动态组合机制包括算法组件配置机制和算法组件配置信息解析机制。通过算法组件配置机制,发动机设计人员可以从算法组件库中选择自己所需要的算法组件(或者设计人员自己实现的算法组件),并配置好各组件计算过程中的数据传递,所有这些信息都保存在设计人员指定的配置文件中。算法组件配置信息解析机制对配置文件中的信息进行解析执行,解析执行就是控制各算法组件按照设计人员在配置文件中配置的规则进行计算,并在计算过程中进行算法组件间的数据传递。通过算法组件动态组合机制,算法组件的选择,算法组件间的协作计算,计算过程中算法组件之间的数据传递规则都可由设计人员根据工程任务需要来配置,从而实现了算法的重用和设计/仿真算法的动态定制,自然也就解决了发动机设计/仿真领域中难以给出一个规范、统一的流程的问题。

图 4 是算法组件动态组合机制的一个示例。

图中发动机设计人员根据实际设计/仿真任务的需要,从算法组件库中选择出需要的算法组

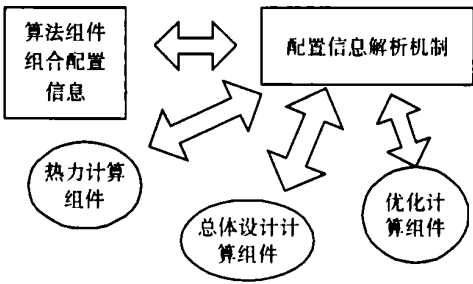


图 4 算法组件动态组合机制示例

Fig. 4 An example of the dynamical combination mechanism of arithmetic components

件,即,热力计算组件、总体设计计算组件和优化设计计算组件,然后将它们之间的数据交换配置好,并设置好各个模块的初始条件,这些信息被保存为配置信息。最后配置信息解析机制对配置信息解析执行,对各个算法组件进行实例化并按照预先配置好的数据传递关系和算法组件间的依赖关系来驱动各个算法组件进行计算和数据交换。

3.4 SRMCAD/CS 原型系统架构

目前已经完成上述软件模型的第一个 SRMCAD/CS 原型系统,这是一个比较初级的系统,只包含了一些最基本的功能和模块,更多的功能将在以后的迭代开发中进一步地设计和实现。原型系统的整个架构大致如图 5 所示。

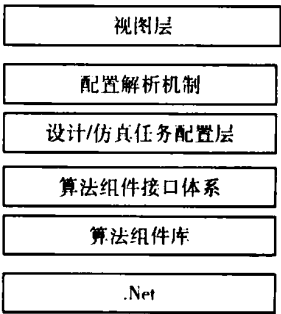


图 5 SRMCAD/CS 原型系统架构

Fig. 5 Architecture of SRMCAD/CS prototype system

整个架构分为六层,最底层是 .Net^[14],.Net 是 Windows 操作系统上最新的应用程序开发框架和平台,是面向对象方法技术发展的产物,它支持很多最新的面向对象软件技术和技术规范,比如:规范的类型系统、组件、反射、垃圾收集、XML(可扩展标记语言)等,它们是整个 SRMCAD/CS 系统的底层基础,使用这些技术和规范可以大大地节约开发时间和降低开发难度。算法组件库建立在 .Net 平台基础上,它使用了 .Net 提供的组件

机制,是供发动机设计人员重用算法而建立起来的算法组件集合,它是对算法组件接口体系中接口的实现,也是整个软件功能的基础。从专业上来看,它是固体火箭发动机设计/仿真技术的精华,所以该软件系统最终是否实用完全取决于算法组件库中的算法组件功能和算法组件的封装质量。算法组件库中的算法组件是可以不断地扩充的,并且整个系统不需要重新编译链接,这就是采用组件化的方式来封装算法的根本原因。算法组件接口体系是进行算法组件组合的基础,它为组合算法组件提供了规范和规则,同时它又将算法组件的具体实现和外界对算法组件的访问解耦,方便了系统将来的扩展。设计/仿真任务配置层保存了发动机设计人员对设计/仿真任务的配置信息,包括接口选择,算法组件选择,算法组件间的协作计算流程,数据传递等配置信息。配置解析机制的功能就是将设计/仿真任务配置层的配置信息解析执行以便完成目标设计/仿真计算任务。视图层为设计人员选择算法组件,配置设计/仿真算法,并且执行设计/仿真计算和查看计算结果提供使用界面。这种分层系统架构,便于系统的功能解耦和功能重用,也给系统开发的分工带来了方便。

原型系统的实现中使用了大量的 .Net 平台所提供的技术支持。算法组件接口体系在规范上遵从 .Net 平台的类型系统和相关的规范,设计/仿真任务配置层的实现使用了 XML 相关的规范和技术,配置解析机制使用了 .Net 的反射机制和 XML 的相关技术。

已经实现的第一个原型系统,虽然比较初级,但是证明了动态组合算法的方案是可行的,只要在该原型系统的基础上继续迭代开发,不断地追加新的功能,最终可以得到一个全面、灵活、实用、易扩展的 SRMCAD/CS 系统。

4 结 论

本文所阐述的软件模型和体系,其主要目的是提高发动机设计人员的工作效率,满足固体发动机设计/仿真中变化多样的业务需求以及 SRMCAD/CS 系统本身不断扩展更新的需要。算法组件的重用可以让发动机设计人员在二进制级别重用已有的算法成果,省却编程实现算法的时间,提高了工作效率。算法组件动态组合机制给予了发动机设计人员极大的自主性和灵活性,使发动机设计人员可以选择任务所需的算法组件,动态地组合出工程任务所需的设计/仿真算法,这可

以很好地适应 SRMCAD/CS 领域中变化多样的业务需求。算法组件接口体系站在 SRMCAD/CS 的大背景下对算法按照面向对象的原则进行职责划分和功能解耦,使得整个算法体系高内聚、低耦合,同时满足了系统扩展的需要。

参考文献:

- [1] Roys G P. User's manual for solid propulsion optimization code[R]. AD-A 108224, 1981.
- [2] Jacques L, Legagneux D. Computer aided preliminary design of ARIANE 5 SRM[R]. AIAA 87-1738.
- [3] Dick W A, Heath M T, Fiedler R A. Integrated 3-D simulation of solid propellant rockets[R]. AIAA 2001-3949.
- [4] Alavilli P V S, Tafti D, Najjar F. The development of an advanced solid-rocket flow simulation program ROCFLO[R]. AIAA 2000-0824.
- [5] 梁国柱, 张卫华, 郭红杰, 等. 固体火箭发动机集成方案设计系统 SRMCAD[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(3): 18-21.
LIANG Guozhu, ZHANG Weihua, GUO Hongjie, et al. Brief introduction of solid rocket motor integrated conceptual design system SRMCAD[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2003, 26(3): 18-21.
- [6] 张延伟, 梁国柱, 张卫华. 基于 Pro/Engineer 的固体火箭发动机装药 CAD 系统实现[A]. 固体火箭推进技术学术会议论文集(发动机分册)[C]. 上海: 中国宇航学会固体火箭推进专业委员会第二十一届年会, 2004.
- [7] 鲍福廷, 郭大庆, 赵飞, 等. 固体火箭发动机喷管集成设计分析技术研究[A]. 固体火箭推进技术学术会议论文集(发动机分册)[C]. 上海: 中国宇航学会固体火箭推进专业委员会第二十一届年会, 2004.
- [8] 王建儒, 刘霞生, 陈林泉. 固体火箭发动机喷管热结构 CAD[A]. 固体火箭推进技术学术会议论文集(发动机分册)[C]. 湖南张家界: 中国宇航学会固体火箭推进专业委员会第二十届年会, 2003.
- [9] 徐伟, 梁国柱. 固体火箭发动机喷管应变应力场计算与软件开发[A]. 中国宇航学会 2005 年固体火箭推进第 22 届年会论文集(发动机分册)[C]. 四川成都: 2005.
- [10] 鲍福廷, 蔡体敏. 固体火箭发动机集成初步设计 CAD 系统研究[J]. 西北工业大学学报, 2001, 19(4): 498-501.
BAO Futing, CAI Timin. Some progress in development of Chinese in tegrated preliminary CAD design of solid rocket motors[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2001, 19(4): 498-501.
- [11] 鲍福廷, 李逢春. 固体发动机装药 CAD[J]. 固体火箭技术, 1994, (3): 1-7.
BAO Futing, LI Fengchun. Computer aided design of propellant grains for solid rocket motors[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1994, (3): 1-7.
- [12] Brooks F. 人月神话[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [13] Larman C. Applying UML and Patterns[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [14] Chappell D. Understanding .Net[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.