

# 液体火箭发动机动态特性仿真技术研究进展

李元启, 刘红军, 徐浩海, 陈宏玉

(液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 仿真技术是研究液体火箭发动机动态特性的主要手段之一。总结了国内外液体火箭发动机动态特性仿真技术的研究进展, 将仿真技术的研究进展分为三个阶段: 专用仿真程序阶段、通用仿真软件阶段和多学科联合仿真阶段。对各个阶段的进展进行了总结和评述, 分析了各阶段仿真技术的主要特点。在总结研究进展的基础上, 对今后发动机动态特性仿真技术的发展方向提出了设想。

**关键词:** 研究进展; 液体火箭发动机; 动态特性; 仿真技术

**中图分类号:** V430-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2017)05-0001-06

## Research progress on numerical simulation technology of liquid rocket engine dynamic characteristics

LI Yuanqi, LIU Hongjun, XU Haohai, CHEN Hongyu

(Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The numerical simulation technology is one of the important methods to investigate the dynamic characteristics of liquid rocket engine (LRE). A review on numerical simulation technology of LRE dynamic characteristics is done in this paper. Development of the technology can be divided into three stages: special simulation program phase, general simulation software phase and multidisciplinary collaborate simulation phase. Key work of each developing phase is summarized and evaluated. Main characteristics of the simulation technology in each stage are analyzed. Based on summary of the research progress, the development direction of the future numerical simulation technology of LRE dynamic characteristics is proposed.

**Keywords:** research progress; liquid rocket engine; dynamic characteristic; simulation technology

## 0 引言

液体火箭发动机是一个包含诸多非稳态过程的、极其复杂的动力学系统。发动机的起动、关

机、调节控制等都涉及到系统动态特性的研究。在液体火箭发动机发展的初期, 受分析手段与计算机技术的制约, 对液体火箭发动机系统动态特性的研究主要依靠试验手段, 按照经验制定发动

收稿日期: 2016-11-13; 修回日期: 2017-01-22

基金项目: 装备预研基金项目 (61427040401162704007)

作者简介: 李元启 (1987—) 男, 博士生, 研究领域为液体火箭发动机系统动力学

机的控制方案,并对不同的控制方案进行发动机热试车,以获得发动系统动态特性。采用试验方法进行发动机动态特性研究耗费大量人力、财力、物力。此外,发动机的工作过程受诸多因素影响,仅依靠试验方法对各种影响因素及其组合进行分析非常困难。

与试验研究相比,计算机仿真技术不仅能够指导发动机设计、缩短研制周期、节约经费,而且具有良好的可控性、可观性、安全性、重复性和经济性等特点,已成为现有发动机系统方案改进和新型发动机系统研制的基础之一,逐渐成为发动机系统动态特性研究的主要手段。

本文总结了发动机动态特性仿真技术的发展历程,并将其划分为三个阶段:专用仿真程序阶段、通用仿真软件阶段和多学科联合仿真阶段。对各个阶段的特点进行了介绍,总结了仿真技术的关键问题,在此技术上提出了液体火箭发动机动态特性仿真技术未来的发展方向。

## 1 专用仿真程序阶段

发动机动态特性仿真是基于组件数学模型的。在发展初期,组件模型多采用守恒定律、经验关系式或经典力学的基本方程组建立,形式上通常为常微分方程或者代数方程。

美国空军火箭推进实验室的 Power 和 Butle 在准稳态假设的基础上对 Agena 火箭发动机的起动过程做了简单的仿真计算。其中管路模型采用了集中参数模型,泵的扬程采用了与转速相关的多项式函数<sup>[1]</sup>。Lewis 研究中心 Meyer 和 Maul 应用向前神经网络建立了主燃烧室压力、涡轮出口温度、高压燃料泵出口压力参数模型,用标准向后传播算法来训练网络出口压力参数模型,对航天飞机主发动 SSME 的起动特性进行了研究<sup>[2]</sup>。日本国家空间实验室的 A. Kanmuri 先后针对 LE-5 和 LE-7<sup>[3]</sup> 发动机设计了动态过程仿真程序。将整个发动机系统简化为推进剂充填系统,忽略了点火过程,认为燃烧仅仅依赖于燃烧室的混合比。采用了准稳态的假设来处理动态过程。在单个时间步内,首先对泵出口和主燃烧室喷管喉部流量进行平衡计算,然后计算燃烧室冷却壁面的

温度变化和涡轮泵转速和流经泵的流量,最后计算泵的压力损失。然后进行时间推进直至计算至需要的时间。通过这种假设方法研究了发动机的起动特性,分析了其重要影响因素。Baudart 等设计了动态过程仿真程序,针对 HM7B 发动机起发动机过程中,主燃烧室点火时出现的可靠性和能量不足问题进行了分析研究提出了解决方案<sup>[4]</sup>。我国新一代运载火箭用液氧/煤油发动机的研制过程中,也开展了大量动态特性仿真工作<sup>[5-6]</sup>。

这一阶段的仿真需要根据发动机系统组成,将组件对应的模型方程联立,并建立组件之间的数据传递关系,编制仿真程序进行求解分析,由于不同发动机的系统组成和循环方式不尽相同,因此这一阶段的仿真工作具有典型的“一机一程序”的特点,其优点是程序结构紧凑、运算速度快。但对于复杂系统而言,采用这种方法建立其仿真模型将是一件十分困难的工作。由于发动机系统各组件之间相互耦联,参数相互制约,对系统每个环节的修改都可能导致整个仿真程序的修改,工作量大,程序的通用性差。因此难以广泛应用,妨碍了计算机仿真技术对发动机系统进行深入地分析和研究。

## 2 通用仿真软件阶段

将液体火箭发动机的常用组件进行整理划分,分别建立其数学模型,并打包成独立的程序模块。在独立程序模块的基础上,可设计出通用仿真软件,通用性软件汇集了液体火箭发动机的常用组件,并可以根据要求进行组件模块的扩充。在仿真时,根据发动机系统构成将组件模块进行排列组合,通过流量、压力、温度及转速等参数建立组件间的联系关系。即可快速便捷的针对不同发动机系统进行动态特性仿真建模。

这一阶段的代表性软件主要是美国普惠公司(Pratt&Whitney)为 NASA 马歇尔太空飞行中心(Marshall Space Flight Center)研制的火箭发动机瞬态仿真器 ROCETS<sup>[7]</sup>(ROcket Engine Transient Simulation System)。ROCETS 软件包中包含了组成发动机系统的基本组件模型,包含了泵模型、

涡轮、预燃室、主燃烧室、喷管、管路、阀门、阻尼器模型以及传热模型和低温介质模型等。可以满足绝大多数循环类型发动机的仿真要求。Binder 利用 ROCETS 提供的模型库建立了 RL 10A-3-3A 发动机的动态模型, 并得到了实验结果的验证<sup>[8]</sup>。

ROCETS 虽然具有一定的通用性, 但是操作界面和组件连接方式都较为复杂。Randolph F Follett 博士对 ROCETS 进行了二次开发, 将界面和数据结构都进行了极大地优化而开发出 ESAY5x 软件<sup>[9]</sup>, EASY5x 具有直观的图形界面, 用户能够轻松构建仿真模型。图 1 为 ESAY5x 软件的仿真界面。

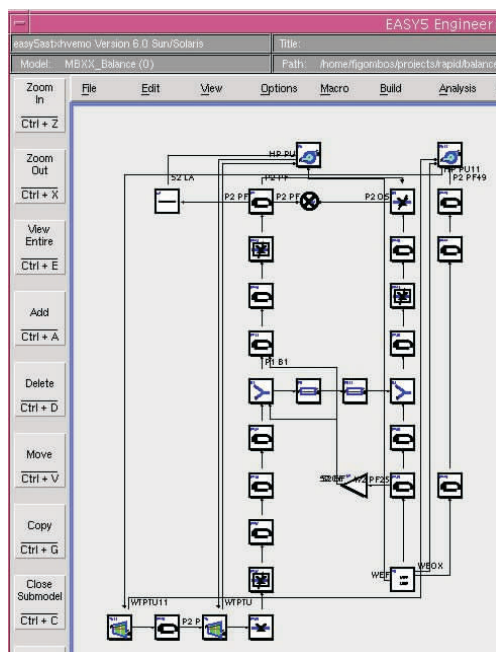


图 1 ESAY5x/ROCETS 仿真界面

Fig. 1 Simulation interface of ESAY5x/ROCETS

法国类似的软件 CARINS<sup>[10]</sup>采用 FORTRAN 语言编写, 包含了用户图形界面、模型库和模型自动生成器 (AMG), 用户在软件界面上搭建其发动机系统, 定义数据或者加入额外的方程和公式, 根据用户的输入, 软件可以自动生成仿真程序并进行求解。图 2 为该软件仿真界面。

日本 JAXA 角田空间推进中心 (Kakuda Space Propulsion Center) 在 2001 年开发了一款类

似的软件 REDS (Rocket Engine Dynamic Simulator)<sup>[11]</sup>, REDS 采用 FORTRAN77 语言编写, 同样包含了各种常用组件模型和材料物性数据库。并可通过 MPI 可以直接在多台计算机上实现并行计算。利用 REDS, 日本在 LE-7A 发动机的设计中成功分析了其启动和关机动态特性, 确定了其启动关机时序。

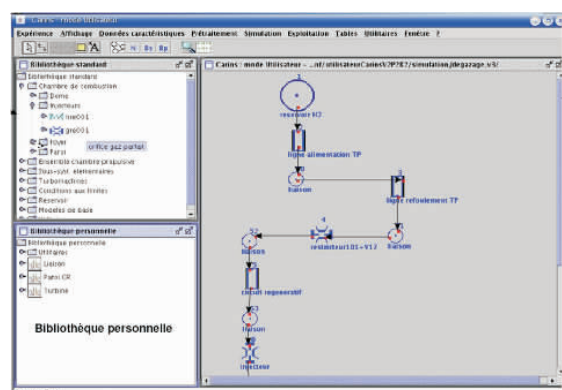


图 2 CARINS 仿真界面

Fig. 2 Simulation interface of CARINS

在商用的微分方程求解软件上进行二次开发省去了数学求解的工作, 可以将工作全部放在组件模型的开发上。西班牙 EAI 公司 EcosimPro 是一款一维多学科系统仿真工具, 能够对任何可以表示成微分代数方程或者常微分方程的动态系统以及离散事件进行建模。并且内置了数学、控制、电气、热及机械等多个学科的专业元件库。欧洲航天局 ESA 和 EAI 公司在该软件的基础上合作开发了航天推进系统仿真模块 ESPSS (European Space Propulsion System Simulation), 并成功应用于多种发动机动态过程的仿真建模上<sup>[12-14]</sup>。图 3 是该软件的仿真界面。

法国 Imagine 公司推出的 AMESim 也是一款类似的软件, 其采用基于物理模型的图形化建模方式, 具有丰富的通用标准元件库, 该软件也大量用在了发动机系统仿真和组件仿真上<sup>[15-18]</sup>。

国内的国防科大、北航及西安航天动力研究所等单位都开发了各自的通用仿真软件。刘昆、黄敏超等人在自身关于管路的有限元状态模型的基础上, 将组成发动机系统的典型元件划分为 21 个

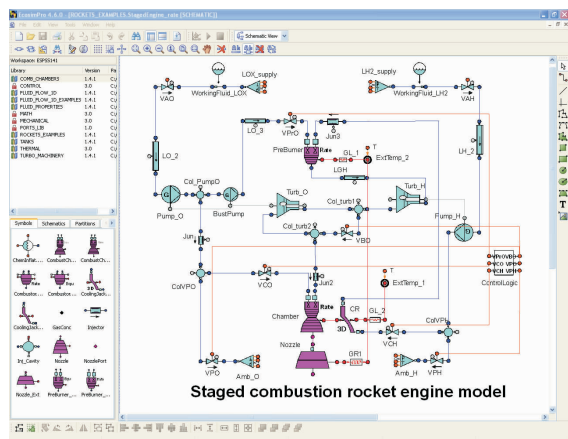


图3 EcosimPro/ESPSS 仿真界面

Fig. 3 Simulation software interface of EcosimPro/ESPSS

模块,并对不同组件开发成数学模型库。采用 C++ 语言编写了模块化仿真软件 LRETMMSS<sup>[19-21]</sup> (The Modularization Modeling and Simulation Software for Transient of liquid Propellant Rocket Engines),利用该软件建立了某型号液氢液氧补燃发动机半系统模型<sup>[22]</sup>。张黎辉等人利用 C++ 语言开发了类似的通用仿真软件<sup>[23]</sup>,并在 MFC 文档视图结构的基础上实现了可视化建模。类似的还有刘红军、吕鹏翮及肖立明等人的工作<sup>[24-26]</sup>。

MWorks 基于多领域统一建模规范的 Modelica 语言,内置了大量标准元件库,陈宏玉在该平台上建立了适用于液体火箭发动机的详细的组件模型库 RocketEngine<sup>[27]</sup>,包括了 6 大类组件 32 类小元件,其中管路模型更是包含了完全的一维分布参数模型,采用谱方法编写了管路的一维求解程序。并利用此模型库对我国液氧煤油发动机单机、多机并联、地面、飞行等多种状态的启动和关机过程进行了仿真,并经过了试车数据的验证<sup>[28]</sup>。该软件的仿真界面如图 4 所示。

从仿真技术的特点来看,成为一款通用性的发动机动态过程仿真软件必须具备以下几个必要条件:

- 1) 具备良好的图形界面,使用户与计算机的交互工作可以友好的进行;
- 2) 具备完整的发动机组件模型库以及模型之间的连接接口,可以迅速的根据发动机系统组成搭建整机的仿真模型;

3) 仿真软件具备数学模型生成和求解能力,能够根据图形界面上连接好的模型生成求解方程组,并且内置求解器,对生成的方程组进行求解。

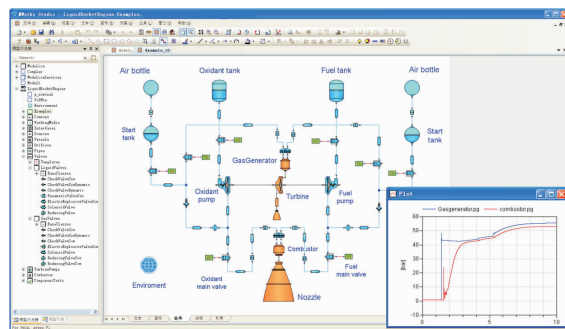


图4 MWorks/RocketEngine 仿真界面

Fig. 4 Simulation interface of MWorks/RocketEngine

### 3 多学科联合仿真阶段

通用性仿真软件无疑是发动机动态过程仿真技术的巨大进步,但是究其根本还是停留在 0 维或者至多 1 维的系统动力学范畴。仿真精度较低,无法对发动机组件的详细工作过程进行描述。美国的推进系统数值仿真 NPSS (Numerical Propulsion System Simulation) 计划<sup>[29-30]</sup>在这一方面进步较大。

NPSS 属于 NASA 的高性能计算和通信计划 (HPCC),由美国 NASA Glenn 研究中心负责,联合工业界、学校和其他政府机构共同参与。该计划于 2010 年前后完成全部研究内容,整个研究周期超过 20 年 (1989 年~2010 年),是美国在数值仿真技术领域投资最多、规模最大、历时最长的研究项目。

NPSS 由仿真环境 (SE)、工程应用模块 (EM)、高性能计算平台 (HPCP) 三部分组成。这三个组成部分中,工程应用模块是基础,包括各种级别 (从 0 维到 3 维)、各部件/系统 (总体性能、进气道、压缩系统、燃烧室、涡轮、排气系统、控制系统、机械系统等) 及各学科 (气动、传热、燃烧、控制、结构、强度、制造、经济性) 的工程仿真模块。高性能计算平台,即大规模、异构、分布式、远程网络计算环境,由中



心服务器、工作站集群、用户终端及远程高速网络设备等组成。仿真环境包括面向对象的可扩展的结构化构架、应用及开发工具组、各种支持库(数据库、模型库、工具库等)和相关的标准。图5为其仿真界面。

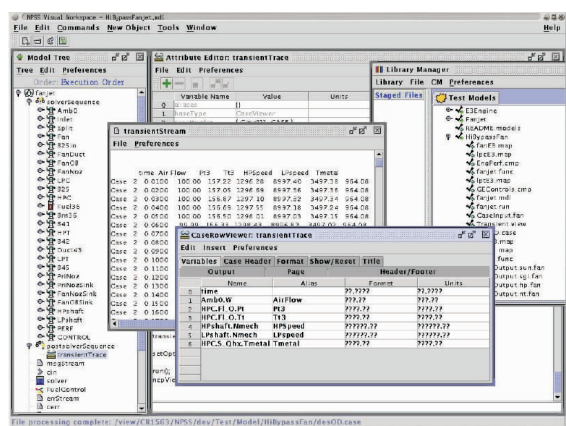


图5 NPSS 仿真界面

Fig. 5 Simulation interface of NPSS

NPSS 的研究目标是以高性能计算平台为基础,以经过验证的推进系统各部件、系统及学科的工程模块为核心,对推进系统的性能、稳定性、费用、寿命及取证等进行快速的、可支付得起的数值仿真计算,所使用的模型涉及到流体力学、传热、燃烧、结构强度、材料、控制、制造和经济等多学科领域。形成航空航天推进系统“数字试车台”,实现全球任何用户在24小时内完成发动机任何级别和综合程度(包括发动机部件和整机系统)的数值仿真,并得到可用于工程分析的处理结果。并最终实现推进系统/飞行器的一体化综合仿真。

## 4 发展趋势与展望

从液体火箭发动机动态过程仿真技术发展的三个阶段来看,总结仿真技术的发展趋势如下:

1) 模型库和数据库的不断完善。液体火箭发动机组件较多,各个组件往往还有几种不同的型式。为提高仿真软件的通用性,势必要不断补充各类组件模型;另外各种推进剂、工质的物理化学性质等基础数据也必须逐渐补充完善到软件的数据库中,不断提高仿真软件的适应性。

2) 多学科联合仿真。将现有的流体力学、传热、燃烧、结构强度等学科的仿真技术进行整合,建立联合仿真平台对发动机的工作过程进行详细的仿真,甚至实现三维“数字热试车”将是未来一段时间内液体火箭发动机仿真技术的发展方向。

3) 仿真平台的拓展应用。管路、泵、燃烧室等组件在其他行业中也有所应用,如航空、能源、化工等。其模型具有一定相似性,因此将液体火箭发动机动态特性仿真软件推广应用到其他工业领域也是其未来的发展方向之一。

## 5 结束语

液体火箭发动机动态特性仿真是发动机研制工作中的一项重要内容。通过对仿真技术的发展进行了回顾和综述,本文认为,仿真技术的发展经历了三个主要阶段:专用仿真程序阶段、通用仿真软件阶段和多学科联合仿真阶段。简要介绍了各个发展阶段的典型工作和主要特点,在此基础上梳理了仿真技术未来的发展趋势。

## 参考文献:

- [1] POWELL M F, BUTLER P T. Ground test simulation of rocket engine start transients: AIAA 75-1273 [R]. USA: AIAA, 1975.
- [2] MEYER C M, MAUL W A. The application of neural networks to the SSME startup transient: NASA CR-187138 [R]. USA: NASA, 1991.
- [3] KANMURI A, KANDA T, WAKAMATSU Y, et al. Transient analysis of LOX/LH<sub>2</sub> rocket engine (LE-7): AIAA 89-2736 [R]. USA: AIAA, 1989.
- [4] BAUDART P A, DUTHOIT V, HARLAY J C. Numerical simulation of cryotechnic rocket engine ignition: AIAA 91-2290 [R]. USA: AIAA, 1991.
- [5] 徐浩海. 液氧煤油补燃发动机起动过程研究[D]. 西安:中国航天科技集团公司第六研究院第十一研究所, 2003.
- [6] 杨永强. 液氧煤油补燃发动机强迫起动过程研究[D]. 西安:中国航天科技集团公司六院11所, 2005.
- [7] MASON J R, SOUTHWICK R D. Large liquid rocket engine transient performance simulation system final report: NASA-CR-184099 [R]. USA: NASA, 1991.

- [8] BINDER M P. An RL 10A-3-3A rocket engine model using the rocket engine transient simulator(ROCETS) software; AIAA 93-2357 [R]. USA: AIAA, 1993.
- [9] FOLLETT R F, TAYLOR R P. Liquid rocket propulsion dynamic flow modeling using the ROCETS engineering modules in the EASY5x environment; AIAA 93-2599 [R]. USA: AIAA, 1993.
- [10] ORDONNEAU G, ALBANO G, MASSE J. CARINS: A future versatile and flexible tool for engine transient prediction [C]// Proceedings of 4th International Conference on Launcher Technology. Liege Belgium: [s. n.], 2002: 111-120.
- [11] YAMANISHI N, KIMURA T, TAKAHASHI M, et al. Transient analysis of the LE-7A rocket engine using the rocket engine dynamic simulator (REDS); AIAA 2004-3850 [R]. USA: AIAA, 2004.
- [12] ISSELHORST A. HM7B simulation with ESPSS tool on Ariane 5 ESC-A upper stage; AIAA 2010-7047 [R]. USA: AIAA, 2010.
- [13] DI MATTEO F, DE ROSA M, ONOFRIX M. Start-up transient simulation of a liquid rocket engine; AIAA 2011-6032 [R]. USA: AIAA, 2011.
- [14] DI MATTEO F, DE ROSA M. Steady state library for liquid rocket engine cycle design; AIAA 2011-6033 [R]. USA: AIAA, 2011.
- [15] 潘辉, 张黎辉. AMESim 软件在液体火箭发动机系统动态仿真上的应用[J]. 火箭推进, 2011, 37(3): 6-11.
- PAN Hui, ZHANG Lihui. Application of AMESim in dynamic characteristic simulation of liquid rocket engine system [J]. Journal of rocket propulsion, 2011, 37(3): 6-11.
- [16] 李锦江. 一种低温发动机系统动态仿真的快捷方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2012(1): 13-17.
- [17] 晏政, 刘泽军, 程玉强, 等. 航天器推进系统模块化建模方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(4): 28-32.
- [18] 尤裕荣, 赵双龙, 吴宝元, 等. 基于 AMESim 的冲压发动机燃油调节器动态特性仿真[J]. 火箭推进, 2010, 36(4): 12-15.
- YOU Yurong, ZHAO Shuanglong, WU Baoyuan. A simulation on dynamic characteristics of ramjet fuel regulator based on AMESim [J]. Journal of rocket propulsion, 2010, 36(4): 12-15.
- [19] 黄敏超, 王新建, 王楠. 补燃循环液体火箭发动机启动过程的模块化仿真[J]. 推进技术, 2001, 22(2): 101-103.
- [20] 樊忠泽, 黄敏超, 余勇, 等. 空间推进系统工作过程的模块化建模[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(2): 29-33.
- [21] 魏鹏飞, 吴建军, 刘洪刚, 等. 液体火箭发动机一种通用模块化仿真方法[J]. 推进技术, 2005, 26(2): 147-150.
- [22] 刘昆, 张育林, 程谋森. 液体火箭发动机系统瞬变过程模块化建模与仿真[J]. 推进技术, 2003, 24(5): 401-405.
- [23] 张黎辉, 李伟, 段娜. 液体火箭发动机模块化通用仿真[J]. 航空动力学报, 2011, 26(3): 687-691.
- [24] 刘红军. 补燃循环发动机静态特性与动态响应特性研究[D]. 西安: 航天工业总公司第十一研究所, 1998.
- [25] 吕鹏翔. 液体火箭发动机工作过程数值仿真[J]. 火箭推进, 2004, 30(5): 10-17.
- LÜ Pengxuan. Numerical simulation of operation process of liquid rocket engine [J]. Journal of rocket propulsion, 2004, 30(5): 10-17.
- [26] 肖立明, 罗巧军. 膨胀循环发动机起动过程研究[J]. 火箭推进, 2007, 33(1): 7-11.
- XIAO Liming, LUO Qiaojun. Investigation on start-up process of expander cycle liquid propellant rocket engine [J]. Journal of rocket propulsion, 2007, 33(1): 7-11.
- [27] HONGYU C, HONGJUN L, LIU H. A tool for simulation and analysis of space propulsion systems transient performance [C]// 6th CSA-IAA Conference. Shanghai, China: CSA, 2015: 211-216.
- [28] 陈宏玉, 刘红军, 陈建华. 补燃循环发动机强迫起动过程[J]. 航空动力学报, 2015, 30(12): 3010-3016.
- [29] LYTLE J K. The numerical propulsion system simulation: an overview; NASA/TM- 2000-209915 [R]. USA: NASA, 2000.
- [30] FOLLEN G, AUBUCHON M. Numerical zooming between a NPSS engine system simulation and a one-dimensional high compressor analysis code; NASA/TM-2000-209913 [R]. USA: NASA, 2000.

(编辑:马 杰)