

“十三五”国家重点出版物出版规划项目



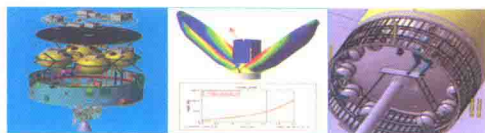
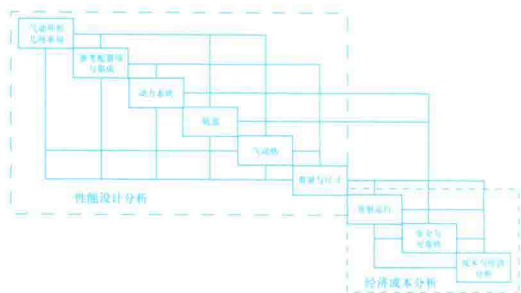
载人航天出版工程

总主编：周建平

总策划：邓宁丰

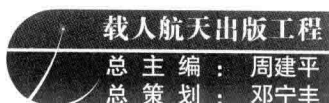
运载火箭数字化工程

张卫东 李少阳 郑宇 等 编著



中国宇航出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目



总主编：周建平
总策划：邓宁丰

运载火箭数字化工程

张卫东 李少阳 郑宇 等 编著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

运载火箭数字化工程 / 张卫东等编著. -- 北京:
中国宇航出版社, 2017. 5

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1322 - 3

I. ①运… II. ①张… III. ①运载火箭—研究 IV.

①V475.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 118487 号

责任编辑 侯丽平

封面设计 宇星文化

出版
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号

邮编 100830

(010)60286808

(010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)60286888

(010)68371900

(010)60286887

(010)60286804(传真)

零售店 读者服务部

(010)68371105

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2017 年 5 月第 1 版

2017 年 5 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230

开本 1/32

印张 18

彩插 12 面

字数 518 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1322 - 3

定价 218.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

《载人航天出版工程》总序

中国载人航天工程自1992年立项以来，已经走过了20多年的发展历程。经过载人航天工程全体研制人员的锐意创新、刻苦攻关、顽强拼搏，共发射了10艘神舟飞船和1个目标飞行器，完成了从无人飞行到载人飞行、从一人一天到多人多天、从舱内实验到出舱活动、从自动交会对接到人控交会对接、从单船飞行到组合体飞行等一系列技术跨越，拥有了可靠的载人天地往返运输的能力，实现了中华民族的千年飞天梦想，使中国成为世界上第三个独立掌握载人航天技术的国家。我国载人航天工程作为高科技领域最具代表性的科技实践活动之一，承载了中国人民期盼国家富强、民族复兴的伟大梦想，彰显了中华民族探索未知世界、发现科学真理的不懈追求，体现了不畏艰辛、大力协同的精神风貌。航天梦是中国梦的重要组成部分，载人航天事业的成就，充分展示了伟大的中国道路、中国精神、中国力量，坚定了全国各族人民实现中华民族伟大复兴中国梦的决心和信心。

载人航天工程是十分复杂的大系统工程，既有赖于国家的整体科学技术发展水平，也起到了影响、促进和推动着科学技术进步的重要作用。载人航天技术的发展，涉及系统工程管理，自动控制技术，计算机技术，动力技术，材料和结构技术，环控生保技术，通信、遥感及测控技术，以及天文学、物理学、化学、生命科学、力学、地球科学和空间科学等诸多科学技术领域。在我国综合国力不断增强的今天，载人航天工程对促进中国科学技术的发展起到了积极的推动作用，是中国建设创新型国家的标志性工程之一。

我国航天事业已经进入了承前启后、继往开来、加速发展的关键时期。我国载人航天工程已经完成了三步走战略的第一步和第二

步第一阶段的研制和飞行任务，突破了载人天地往返、空间出舱和空间交会对接技术，建立了比较完善的载人航天研发技术体系，形成了完整配套的研制、生产、试验能力。现在，我们正在进行空间站工程的研制工作。2020年前后，我国将建造由20吨级舱段为基本模块构成的空间站，这将使我国载人航天工程进入一个新的发展阶段。建造具有中国特色和时代特征的中国空间站，和平开发和利用太空，为人类文明发展和进步做出新的贡献，是我们航天人肩负的责任和历史使命。要实现这一宏伟目标，无论是在科学技术方面，还是在工程组织方面，都对我们提出了新的挑战。

以图书为代表的文献资料既是载人航天工程的经验总结，也是后续任务研发的重要支撑。为了顺利实施这项国家重大科技工程，实现我国载人航天三步走的战略目标，我们必须充分总结实践成果，并充分借鉴国际同行的经验，形成具有系统性、前瞻性和实用性的，具有中国特色的理论与实践相结合的载人航天工程知识文献体系。

《载人航天出版工程》的编辑和出版就是要致力于建设这样的知识文献体系。书目的选择是在广泛听取参与我国载人航天工程的各专业领域的专家意见和建议的基础上确定的，其中专著内容涉及我国载人航天科研生产的最新技术成果，译著源于世界著名的出版机构，力图反映载人航天工程相关技术领域的当前水平和发展方向。

《载人航天出版工程》凝结了国内外载人航天专家学者的智慧和成果，具有较强的工程实用性和技术前瞻性，既可作为从事载人航天工程科研、生产、试验工作的参考用书，亦可供相关专业领域人员学习借鉴。期望这套丛书有助于载人航天工程的顺利实施，有利于中国航天事业的进一步发展，有益于航天科技领域的人才培养，为促进航天科技发展、建设创新型国家做出贡献。



2013年10月

序

进入 21 世纪，世界各国的航天活动呈现出蓬勃发展的新态势，空间已成为人类在新世纪积极开发与探索的重要领域。同时航天技术的发展与军事应用联系紧密，相互促进，航天科技的实力不仅体现了综合国力，也具有极其重要的政治意义。我国的航天事业近年来也处于繁荣、快速发展的时期，特别是天宫二号与神舟十一号载人飞船交会对接任务获得圆满成功、跟踪和数据中继卫星的发射、卫星导航系统建设取得标志性进展，以及民用测绘卫星成功发射，标志我国航天科技空间活动踏上了新的征程。未来五年，我国将加强航天工业基础能力建设，超前部署前沿技术研究，继续实施载人航天、月球探测、新一代运载火箭等航天重大科技工程等，进一步提升我国航天事业和工业的发展水平。而运载火箭作为航天基础运输工具，是所有空天计划得以实现的基础保障。

运载火箭系统繁多、工程浩大、涉及学科繁杂、制造工艺难度高，是典型的高度集成的复杂装备产品。面对新形势下运载火箭研制技术难度高、任务重、时间紧的局面，如果还应用传统的研制模式和技术手段，是无法适应新形势的需求的。数字化技术及其工具手段，能有效提高研制效率，为确保型号可靠性、解决影响运载火箭研制周期的问题提供一条行之有效的道路。

本著作以航天工程基础保障的运载火箭为载体，将数字化建模技术、数字化设计技术、数字化仿真技术、数字化工艺与制造技术、数字化协同管理以及支撑运作的平台技术等综合性地融入运载火箭研制的业务全过程，从而形成了数字化工程较为完整的技术体系和

基于行业应用的实例化典型案例。这些成果既突显了复杂航天产品高、精、尖的行业特点，又彰显出信息技术强大的渗透力。

本著作凝练了新一代运载火箭数字化研制过程中的创新成果和实践经验，为航天型号后续的数字化工作和发展提供支持；同时，为我国创新驱动的工业发展发挥积极作用。

林忠钦

2016年11月

前 言

2015年9月20日长征六号运载火箭一箭二十星的成功发射，标志着我国新一代运载火箭开始投入应用，同时原有成熟的火箭型号也承担着高密度发射的任务。航天任务的快速增加，以及众多不同的飞行目的的需求，对运载火箭的设计、制造、试验等所采用的技术方法和组织模式提出了新的挑战。通过学习研究欧美航空航天企业先进的研制模式，借助于快速发展的计算机、软件、数据库、网络等技术所形成的信息化、数字化技术手段与能力，在新一代运载火箭的研制中尝试开展数字化协同研制，初步形成了一定的数字化研制能力和研制模式，进一步提升了型号的研制效率，控制了研制质量。

对于运载火箭等复杂航空航天装备的数字化研制技术，所涉及的专业学科非常多，形成了各种各样的应用方法和模式。我们认为有两种数字化研制模式是具有里程碑意义的，一是美国波音公司从20世纪90年代开始，为了研制波音777等新型飞机，应用PDM实现三维CAD设计和受控，组建了IPT设计制造协同工作组，牵头研究推动了MBD技术发展，为实现基于三维模型的设计制造一体化打下了重要基础；二是1994年NASA的喷气推进实验室（JPL）组建了多学科并行协同论证中心，不同专业学科的专家集中在同一环境内开展多学科并行协同的研究论证，借助于网络、软件、语音、视频、数据存储共享等技术，实现了航天任务的评估与方案优化论证的“快、好、省”。众多装备制造业通过学习研究此类数字化技术模式，逐步形成了研制规范、积累了专业知识、拓展了应用领域、促

进了型号产品的创新和发展。

随着新一代运载火箭的研制及发射成功,有必要对研制过程中基于数字化技术的工作模式,积累的知识、经验甚至教训等进行分析总结,以期在未来新的航天型号研制中,信息化、数字化技术能发挥更大的作用,产生更大的效益。本书是在学习研究国内外同行数字化技术的基础上,以我们承担新一代运载火箭的数字化研制为主要工作实践,分别从数字化设计、仿真分析、工艺制造、试验管理,以及数字化支撑平台技术这几方面进行了总结论述,同时对知识工程的应用也进行了概述。本书可供从事运载火箭及飞行器数字化研制的工程技术人员,以及高校相关专业的师生参考。

全书共10章,第1章概论,对航天型号数字化技术的研制历程进行了概述,介绍了国内外航天型号数字化技术的建设应用现状,由李少阳编写;第2章运载火箭的系统组成与研制流程,介绍了运载火箭的发展历程,概述了火箭数字化研制流程,由张卫东、刘靖华编写;第3章数字化设计技术,介绍了自顶向下设计方法,以及结构件、管路、电缆的数字化设计方法,由吴辉、郑宇、秦英明、陈鸣亮、王金童编写;第4章基于模型的运载火箭设计技术,对MBD技术方法在火箭结构件设计中的应用进行了系统介绍,由张卫东、郑宇、吴辉、陈若飞编写;第5章数字化仿真技术,对仿真体系建设、力学仿真、人机工程仿真等方面进行了介绍,由刘靖华、毛玉明、唐玉花编写;第6章数字化工艺与制造技术,对三维数字化工艺、数字化加工制造、制造资源计划管理、制造执行系统等方面进行了介绍,由程辉、郑宇、王炜编写;第7章数字化协同设计平台技术,对数字化协同设计平台技术、基于CMII的型号产品工程变更控制技术、图文档生命周期管理技术、跨厂所的数据会签发放技术、协同设计平台应用等方面进行了介绍,由郑宇、陈若飞编写;第8章多学科协同仿真平台技术,从仿真平台的概念及主要内容、仿真平台应用案例、运载火箭总体多学科协同仿真分析平台应用等

方面进行了介绍，由张卫东、李少阳、刘靖华、杨浩强编写；第9章试验数字化管理技术，从数字化试验的概念及主要内容、国内外航空航天试验数字化案例、运载火箭试验数字化平台应用等方面进行了介绍，由李少阳、李峰编写；第10章知识工程系统的应用探索，从知识工程基础理论、主流知识管理软件系统、运载火箭知识工程体系应用探索等方面进行介绍，由郑宇、李少阳编写。

由于编者水平、经验有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2016年10月



图 5-42 助推器 I-III 方向一阶弯曲模态修正结果 (P197)

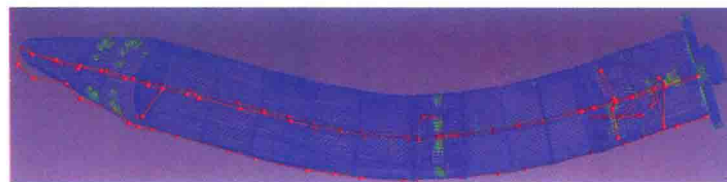


图 5-43 助推器 II-IV 方向一阶弯曲模态修正结果 (P197)

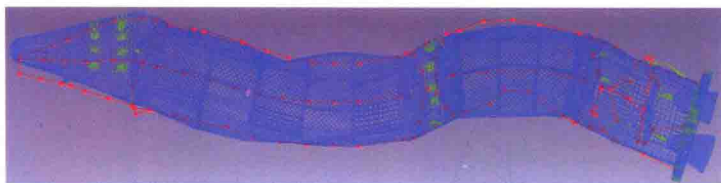


图 5-44 助推器 I-III 方向二阶弯曲模态修正结果 (P197)

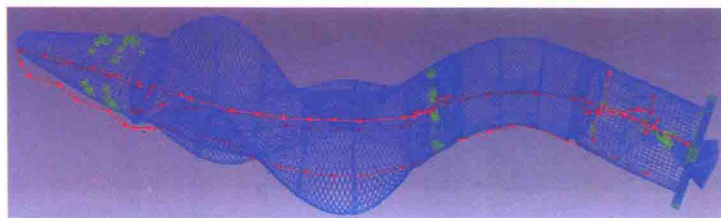


图 5-45 助推器 II-IV 方向二阶弯曲模态修正结果 (P198)

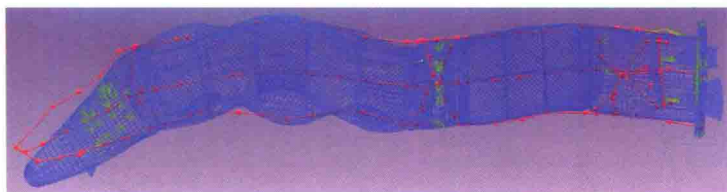


图 5-46 助推器 I-III 方向三阶弯曲模式修正结果 (P198)

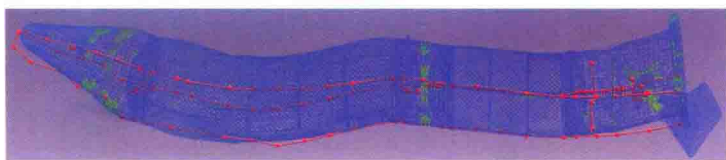


图 5-47 助推器 II-IV 方向三阶弯曲模式修正结果 (P198)



图 5-48 助推器一阶纵向模态修正结果 (P198)

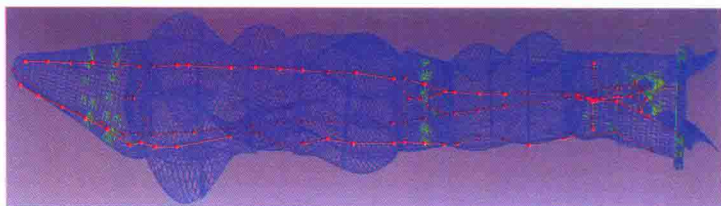


图 5-49 助推器一阶扭转模态修正结果 (P198)

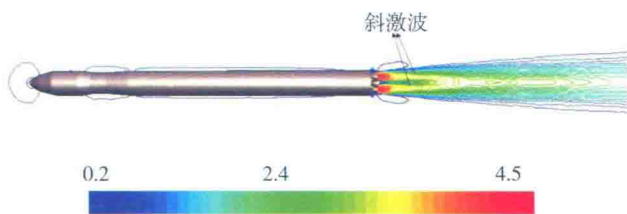


图 5-72 某火箭一级飞行状态喷流
压力场分布 (P222)

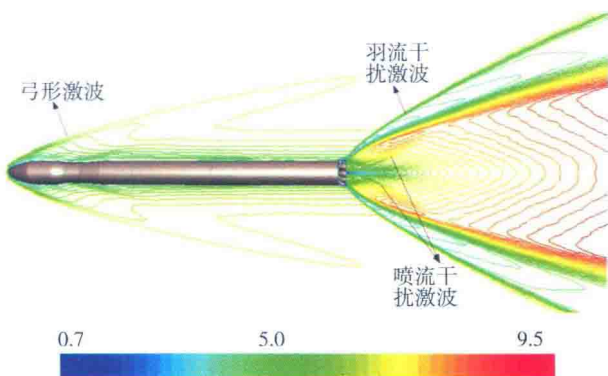


图 5-73 某火箭一级飞行状态喷流
温度场分布 (P222)

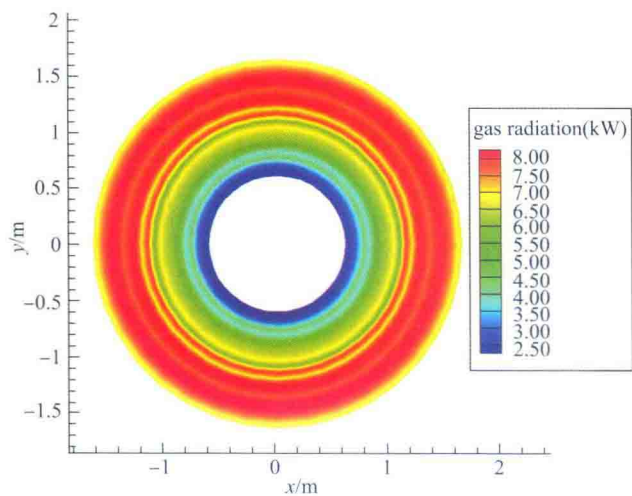


图 5-74 某火箭一级飞行状态底部热流分布 (P223)

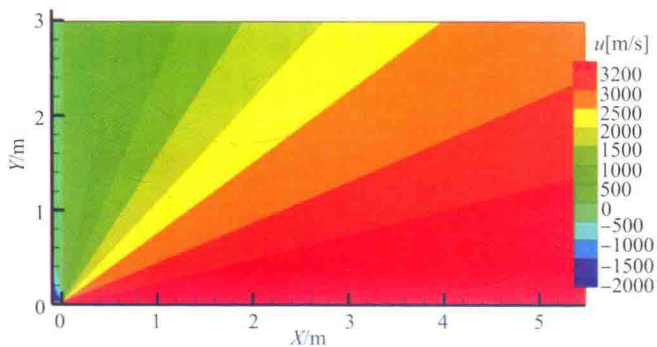


图 5-75 某高空发动机羽流速度分布 (P223)

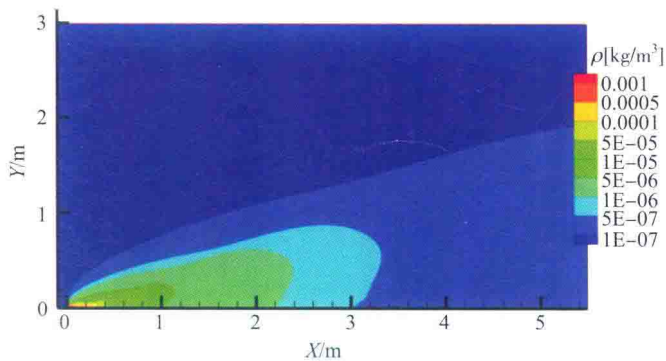


图 5-76 某高空发动机羽流场温度分布 (P224)

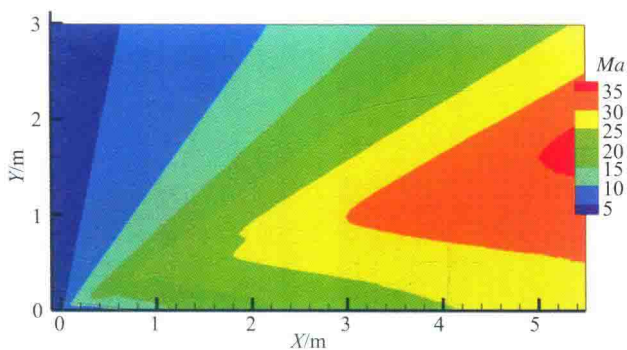


图 5-77 某高空发动机羽流马赫数分布 (P224)