



中国航天技术进展丛书

吴燕生 总主编

数字化航天器系统工程设计

于登云 李志等著



 中国宇航出版社



中国航天技术发展丛书

吴燕生 总主编

数字化航天器系统工程设计

于登云 李志 等著



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

数字化航天器系统工程设计 / 于登云等著. -- 北京 :
中国宇航出版社, 2018. 9

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1536 - 4

I. ①数… II. ①于… III. ①数字化—航天器—系统
设计 IV. ①V423

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 230932 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 河北画中画印刷科技有限公司

版次 2018 年 9 月第 1 版
2018 年 9 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 20.25

字数 492 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1536 - 4

定价 88.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

《中国航天技术进展丛书》 编委会

总主编 吴燕生

副总主编 包为民

委 员 (按姓氏音序排列)

邓宁丰	侯 晓	姜 杰	李得天	李 锋
李 明	李艳华	李仲平	刘竹生	鲁 宇
沈 清	谭永华	王 巍	王晓军	谢天怀
徐洪青	叶培建	于登云	张柏楠	张卫东

总 序

中国航天事业创建60年来，走出了一条具有中国特色的发展之路，实现了空间技术、空间应用和空间科学三大领域的快速发展，取得了“两弹一星”、载人航天、月球探测、北斗导航、高分辨率对地观测等辉煌成就。航天科技工业作为我国科技创新的代表，是我国综合实力特别是高科技发展实力的集中体现，在我国经济建设和社会发展中发挥着重要作用。

作为我国航天科技工业发展的主导力量，中国航天科技集团公司不仅在航天工程研制方面取得了辉煌成就，也在航天技术研究方面取得了巨大进展，对推进我国由航天大国向航天强国迈进起到了积极作用。在中国航天事业创建60周年之际，为了全面展示航天技术研究成果，系统梳理航天技术发展脉络，迎接新形势下在理论、技术和工程方面的严峻挑战，中国航天科技集团公司组织技术专家，编写了《中国航天技术进展丛书》。

这套丛书是完整概括中国航天技术进展、具有自主知识产权的精品书系，全面覆盖中国航天科技工业体系所涉及的主体专业，包括总体技术、推进技术、导航制导与控制技术、计算机技术、电子与通信技术、遥感技术、材料与制造技术、环境工程、测试技术、空气动力学、航天医学以及其他航天技术。丛书具有以下作用：总结航天技术成果，形成具有系统性、创新性、前瞻性的航天技术文献体系；优化航天技术架构，强化航天学科融合，促进航天学术交流；引领航天技术发展，为航天型号工程提供技术支撑。

雄关漫道真如铁，而今迈步从头越。“十三五”期间，中国航天事业迎来了更多的发展机遇。这套切合航天工程需求、覆盖关键技术领域的丛书，是中国航天人对航天技术发展脉络的总结提炼，对学科前沿发展趋势的探索思考，体现了中国航天人不忘初心、不断前行的执着追求。期望广大航天科技人员积极参与丛书编写、切实推进丛书应用，使之在中国航天事业发展中发挥应有的作用。

雷凡培

2016年12月

前 言

随着我国经济和国防建设的不断发展，对空间技术的需求迅速增长，用户对航天器的研制工作提出了更高的要求。航天器的复杂程度和高新技术含量不断提高，技术与经济风险也在不断加大，我国航天器总体设计方法和手段已经成为制约航天器总体水平的主要因素。数字化航天器设计是以计算机网络为载体，以数字化模型为基础，将多学科优化作为协调控制机制的先进设计方法。数字化航天器设计模型的复用与并行协同设计机制，保证了航天器总体与分系统之间以及各分系统之间设计模型和数据的一致性，减少了设计差错。设计人员能够直接从数据库中调用已有的设计方案以及成熟设备和分系统模型，对其进行适应性修改，快速满足新的航天器方案设计要求，缩短了方案设计的周期。设计资源数据库的应用，极大提高了设计人员的工作效率，减少了重复性工作，提高了相关设计资源的使用效率。数字化航天器的设计模型与仿真模型之间存在映射关系，可从航天器设计模型中提取仿真分析相关的模型与参数直接应用于仿真实验，保证了设计与仿真之间模型和数据的一致性，使得仿真验证工作更为有效。

国外尤其是美、俄、欧洲等的航天机构和宇航公司将基于模型的数字化航天器设计与仿真手段广泛应用于航天器设计，对提高航天器的设计水平起到了非常重要的作用。为了缩短与国际先进水平之间的差距，将多年的航天器研制工程实践中取得的大量经验和成果进行分析、提炼和应用，同时考虑航天器新概念、新系统和新技术研究对数字化设计、仿真验证、集成试验等的实际需求，配合航天器研制流程改进，本书作者及其研究团队历经十年完成了“数字化航天器设计与仿真柔性平台系统”开发，并在我国神舟飞船和月球探测器等多个复杂航天器设计中得到了成功应用，取得了显著的经济效益和社会效益。该科研成果解决了大型、复杂航天器系统的设计与仿真一体化、柔性化、并行协同的技术难题，设计先进，功能齐全，工作运行稳定，适应性强，效益显著，综合性能属国内领先，达到国际先进水平。

全书分为6章：第1章概述了数字化航天器设计研究背景、概念内涵、技术特征、基本流程和主要关键技术，对国外相关技术发展状况进行了综述；第2章阐述了数字化航天器设计环境的功能和组成，对数字化航天器协同设计管理与支持系统、柔性仿真管理与控

制及可视化系统进行了比较详细的介绍；第3章和第4章分别介绍了数字化航天器总体和平台分系统的设计和仿真模型；第5章给出了数字化航天器设计的应用实例；第6章从需求牵引、技术推动和应用推广方面对数字化航天器设计技术发展进行了展望。

本书是国内首次系统论述数字化航天器设计技术的著作，写作过程中得到了长期从事航天器总体设计工作的院士、总师的指导和帮助，得到了“数字化航天器设计与仿真柔性平台系统”研发团队的鼎力支持，在此谨向他们表示衷心的感谢。

数字化航天器设计技术尚处在快速发展时期，本书是对作者及其研发团队科研成果的系统总结和提炼。希望通过本书，能够对数字化航天器设计与仿真技术发展和推广应用起到积极作用，并为从事数字化航天器设计与仿真研究工作的科技人员提供参考。鉴于作者时间和水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 数字化航天器系统工程设计基础	1
1.1 航天器总体设计基本要求	1
1.2 数字化航天器系统工程设计研究背景	3
1.3 数字化航天器设计概念内涵	5
1.4 数字化航天器设计技术特征	6
1.5 数字化航天器设计基本流程	8
1.6 数字化航天器设计主要关键技术	10
1.6.1 数字化航天器协同设计技术	11
1.6.2 数字化航天器建模与验模技术	11
1.6.3 数字化航天器柔性仿真技术	11
1.7 航天器飞行力学基础知识	12
1.7.1 时间系统	12
1.7.2 常用坐标系定义	13
1.7.3 常用坐标系转换	18
1.7.4 航天器轨道运动受力模型	20
1.7.5 航天器轨道描述及摄动方程	23
1.7.6 航天器光照条件计算模型	24
1.7.7 航天器测控条件计算模型	27
1.7.8 发射准备时间计算模型	29
1.8 本章小结	30
第 2 章 数字化航天器设计环境	31
2.1 数字化航天器设计环境功能描述	31
2.2 数字化航天器设计环境组成	33
2.3 数字化航天器协同设计支持系统	37

2.3.1	设计团队管理模块	37
2.3.2	设计项目管理模块	38
2.3.3	设计流程管理与控制模块	39
2.3.4	设计资源库管理模块	40
2.3.5	设计方案库管理模块	41
2.4	数字化航天器协同设计节点软件	41
2.4.1	总体设计节点	42
2.4.2	飞行方案设计节点	43
2.4.3	构型与布局设计节点	46
2.4.4	电源系统设计节点	47
2.4.5	结构系统设计节点	47
2.4.6	机构系统设计节点	48
2.4.7	控制系统设计节点	49
2.4.8	测控系统设计节点	49
2.4.9	热控系统设计节点	50
2.5	数字化航天器柔性仿真管理软件	51
2.5.1	仿真实定编辑模块	51
2.5.2	仿真模型库管理模块	51
2.5.3	仿真实定库管理模块	53
2.5.4	仿真实验库管理模块	54
2.5.5	仿真节点管理模块	55
2.5.6	仿真过程回放模块	56
2.5.7	仿真结果分析评估模块	57
2.6	数字化航天器仿真执行控制软件	58
2.6.1	仿真模式设定模块	59
2.6.2	仿真实验加载模块	59
2.6.3	仿真实验初始化模块	59
2.6.4	仿真运行控制模块	59
2.6.5	仿真数据交换模块	62
2.6.6	仿真数据采集模块	64
2.6.7	仿真过程监视模块	64
2.7	数字化航天器仿真可视化软件	65

2.7.1 数字化航天器仿真可视化配置软件	65
2.7.2 数字化航天器飞行状态可视化软件	66
2.7.3 数字化航天器工作状态可视化软件	67
2.8 本章小结	68
第3章 数字化航天器总体设计模型	70
3.1 数字化航天器总体设计模型特征	70
3.2 数字化航天器总体设计模型结构	72
3.3 航天器总体设计优化模型	78
3.3.1 航天器总体设计变量	78
3.3.2 总体设计优化目标	80
3.3.3 航天器优化设计约束	81
3.3.4 航天器优化设计模型	82
3.3.5 航天器优化设计软件	87
3.4 航天器飞行规划模型	93
3.4.1 轨道转移变轨策略模型	94
3.4.2 轨道交会近程导引策略	95
3.4.3 轨道位置保持策略	99
3.4.4 飞行任务规划软件	99
3.5 航天器构型布局设计模型	103
3.5.1 航天器三维模型库	104
3.5.2 布局优化设计模型	106
3.5.3 航天器动力学分析模型	110
3.5.4 构型布局设计流程	111
3.6 航天器飞行仿真模型	116
3.6.1 轨道动力学仿真模型	117
3.6.2 相对轨道测量仿真模型	118
3.6.3 轨道转移控制仿真模型	121
3.6.4 轨道交会近程导引仿真模型	122
3.6.5 姿态动力学仿真模型	127
3.6.6 多体系统动力学仿真模型	131
3.6.7 飞行仿真评估模型	137
3.7 本章小结	139

第 4 章 数字化航天器平台设计模型	140
4.1 航天器结构分系统设计模型	140
4.1.1 航天器结构分系统设计任务	140
4.1.2 航天器结构分系统设计流程	140
4.1.3 航天器结构分系统设计模型组成	142
4.1.4 数字化航天器结构分系统设计实现	143
4.2 航天器机构分系统设计模型	148
4.2.1 航天器机构分系统设计任务	148
4.2.2 航天器机构分系统设计流程	148
4.2.3 航天器机构分系统设计模型组成	150
4.2.4 数字化航天器机构分系统设计实现	152
4.3 航天器热控分系统设计模型	158
4.3.1 航天器热控分系统设计任务	158
4.3.2 航天器热控分系统设计流程	159
4.3.3 航天器热控分系统设计模型组成	161
4.3.4 数字化航天器热控分系统设计实现	163
4.4 航天器控制分系统设计模型	171
4.4.1 航天器控制分系统设计任务	171
4.4.2 航天器控制分系统设计流程	171
4.4.3 航天器控制分系统设计模型组成	171
4.4.4 数字化航天器控制分系统设计实现	176
4.5 航天器电源分系统设计模型	180
4.5.1 航天器电源分系统设计任务	180
4.5.2 航天器电源分系统设计流程	181
4.5.3 航天器电源分系统设计模型组成	182
4.5.4 数字化航天器电源分系统设计实现	189
4.6 航天器测控分系统设计模型	196
4.6.1 航天器测控分系统设计任务	196
4.6.2 航天器测控分系统设计流程	196
4.6.3 航天器测控分系统设计模型组成	198
4.6.4 数字化航天器测控分系统设计实现	204
4.7 航天器数管分系统设计模型	211

4.7.1	航天器数管分系统设计任务	211
4.7.2	航天器数管分系统设计流程	212
4.7.3	航天器数管分系统设计模型组成	214
4.7.4	数字化航天器数管分系统设计实现	215
4.8	本章小结	221
第5章	数字化航天器设计应用	222
5.1	用例总体概述	222
5.2	总体设计要求	224
5.2.1	项目建立	224
5.2.2	设计过程	224
5.2.3	设计输入	225
5.2.4	设计输出	225
5.3	轨道设计及飞行规划	232
5.3.1	获取轨道设计总体要求	232
5.3.2	轨道设计工作陈述	233
5.3.3	待命轨道设计	233
5.3.4	目标轨道特性分析	235
5.3.5	轨道转移策略规划	237
5.3.6	轨道保持稳定飞行	239
5.3.7	轨道交会近程导引策略规划	240
5.3.8	伴飞位置保持策略规划	242
5.3.9	逼近飞行制导策略规划	244
5.3.10	总速度增量和燃料消耗估算	245
5.3.11	飞行仿真任务提交与报告自动生成	245
5.4	总体构型设计	247
5.4.1	获取构型设计总体要求	247
5.4.2	总体构型设计任务分析	248
5.4.3	整星坐标系定义	249
5.4.4	结构构型设计	250
5.5	结构分系统设计	251
5.5.1	获取结构设计总体要求	251
5.5.2	结构分系统设计任务分析	253

5.5.3	结构分系统架构设计	253
5.5.4	结构传力路径设计	255
5.5.5	结构分系统设计分析	256
5.5.6	结构分系统设计综合	256
5.6	机构分系统设计	257
5.6.1	获取机构设计总体要求	257
5.6.2	机构分系统设计任务分析	258
5.6.3	机构分系统架构设计	258
5.6.4	机构分系统设计分析	260
5.6.5	机构分系统设计综合	260
5.7	热控分系统设计	261
5.7.1	获取热控设计总体要求	261
5.7.2	热控分系统设计任务分析	262
5.7.3	热控分系统架构设计	263
5.7.4	热控分系统设计分析	266
5.7.5	热控分系统设计综合	268
5.8	电源分系统设计	269
5.8.1	获取电源设计总体要求	269
5.8.2	电源分系统设计任务分析	270
5.8.3	电源分系统架构设计	271
5.8.4	电源分系统设计综合	275
5.9	控制分系统设计	276
5.9.1	获取控制设计总体要求	276
5.9.2	控制分系统设计任务分析	277
5.9.3	控制分系统架构设计	279
5.9.4	控制分系统设计分析	280
5.9.5	控制分系统设计综合	282
5.10	测控分系统设计	284
5.10.1	获取测控设计总体要求	284
5.10.2	测控分系统设计任务分析	285
5.10.3	测控分系统架构设计	286
5.10.4	测控分系统设计分析	288

5.10.5 测控分系统设计综合	290
5.11 全系统仿真	293
5.11.1 飞行过程仿真	293
5.11.2 飞行器动力学与控制仿真	296
5.11.3 飞行器机构动力学仿真	297
5.11.4 飞行器供配电仿真	298
5.11.5 飞行器外热流及整星温度场仿真	299
5.11.6 飞行器测控链路仿真	300
5.11.7 飞行器数据存储与传输仿真	301
5.11.8 飞行器数管工作状态仿真	302
5.12 本章小结	303
第 6 章 数字化航天器设计发展展望	304
6.1 加强数字化设计数据管理, 提高技术状态控制水平	304
6.2 持续推进数字化设计深度, 支持宇航产品智能制造	305
6.3 在轨服务与维护技术发展, 将催生新型航天器技术体系	305
6.4 大数据和云计算综合运用, 推动软件定义航天器发展	306
参考文献	307

第1章 数字化航天器系统工程设计基础

1.1 航天器总体设计基本要求

设计是为了创制某一产品进行构思和描述这一构思结果的过程。工程设计是指应用科学规律,通过分析、综合和创造思维将设计要求转化为一组完整描述产品参数的活动过程。航天器总体设计或称航天器系统工程设计是指,以航天器为对象按照系统工程方法开展的所有系统设计活动,它是系统科学和工程设计交叉的产物。

本书所述航天器是指长期在空间轨道飞行和在地外天体表面长期工作的各类卫星、飞船和深空探测器等。它是一个复杂系统,由相互联系、相互依赖、相互制约、相互作用的若干要素组成,是具有特定整体功能的集合体,具有集合性、层次性、相关性、目的性、动态性和适应性等基本特征。航天器按基本功能划分,可分为有效载荷和平台系统两大部分,有效载荷是直接执行特定任务的分系统,平台系统是为有效载荷发挥正常效能提供支持和保证的其他各分系统的总称。任务不同,航天器平台系统构成也不尽相同,共性分系统包括结构与机构分系统、供配电分系统、姿态与轨道控制分系统、测控分系统、数据管理分系统、热控分系统等。

航天器研制采用系统工程的方法,由以下七个基本步骤构成:辨识环境、确立目标、评价指标、系统综合、系统分析、系统优化和决策实施。在工程实际中,以上方法步骤可能要反复迭代多次。在系统工程中存在两个相互作用的基本过程:一是实现目标系统的工程技术过程,二是对工程技术过程的控制过程。具体到航天器工程,则是航天器设计、制造、试验等过程和航天器项目管理过程。目前我国航天器研制一般经历六个阶段,即需求分析阶段、可行性论证阶段、方案设计阶段、初样研制阶段、正样研制阶段和在轨运行阶段。

航天器总体设计的任务是在规定的研制周期和研制成本的情况下,以用户要求为依据,将航天器工程其他系统(运载火箭、发射场、地面测控与通信和应用系统等)经选择和确认的各系统间接口作为约束条件,确定航天器系统构成、分配性能指标、明确分系统间接口、给出分系统设计的要求。航天器总体设计基本任务为:

- 1) 将用户需求转化为由若干分系统组成的系统和系统的功能与性能参数,并满足工程其他系统的约束要求;

- 2) 将系统功能和性能参数分解到各个分系统中,经过分析和协调保证各种功能的、物理的和程序的接口相互兼容;

- 3) 提出分系统解决方案,确定分系统组成及其部组件技术状态,分析分系统完成总体技术要求的能力和程度,提出与其他分系统的接口要求;

4) 提出产品保证要求,完成可靠性、可维修性、安全性、电磁兼容性 & 软件等保证大纲及规范。

航天器总体设计按照深入程度可以分为航天器系统概念设计、总体方案论证和总体方案设计等阶段。

航天器系统概念设计的目的是发现和确定新的需求、分析该需求能否得到满足,确定可能的技术实现途径。工作内容主要包括对任务进行分析、确定工程系统构成、选择任务轨道或星座、提出航天器方案设想、协调航天器设计的约束条件,进行关键技术分析,制定航天器研制计划、进行费用效益与风险分析等。

航天器总体方案论证的目的是确定航天器系统的必要性与可行性,为航天器转入工程研制提供决策依据。工作内容主要包括确定系统需求,提出满足系统需求的航天器总体方案并进行方案优选,进行航天器构型设计,论证分系统组成并进行方案选择,对关键技术攻关项目及其保障条件进行分析,提出系统验证与实施计划。

航天器总体方案设计的目的是选定和设计航天器总体方案,分析和确定总体参数,提出各种接口要求,工作内容包括进一步确定系统需求,确定总体方案、总体参数与飞行程序,确定与运载火箭、发射场、地面测控站、地面应用系统的接口,确定分系统组成及技术要求,完成关键技术攻关,完成轨道或星座设计,完成构型与布局设计,完成整星动力学分析、热分析和电磁兼容性分析,确定航天器研制技术流程、计划流程和产品保证流程,制定可靠性、可维修性、安全性、电磁兼容性 & 试验验证等保证大纲及规范。

在航天器总体设计中,要将航天器若干分系统有机结合在一起,对每个分系统的技术要求都要首先从实现整个系统技术协调的观点考虑,依据任务要求来选择方案,然后对各分系统提出技术要求,由分系统具体实现。由于航天器总体设计必须考虑大量设计因素,这些设计因素之间存在着补偿、替代和制约机制,是相互紧密耦合在一起的。总体设计就是要通过各分系统的相互作用、配合和协调获得总体最优或最合理可行的方案。因此,在总体设计中要采用科学方法和技术手段,通过对定义、规划、研究、设计、仿真、试验及鉴定等迭代过程的运用,将任务要求转化成对系统性能参数和系统配置的描述;综合各相关的技术参数,并保证各种接口的兼容性,使整个系统的技术状态及其设计方案得以优化;将可靠性、可维修性、安全性、生存性、人的因素以及其他有关因素综合考虑到整个工程中去,以期满足技术性能和费用、进度的目标要求。

航天器总体设计技术是一项多学科多专业交叉与综合的系统工程技术,在航天器研制和应用中占有重要地位,其技术水平不但对提高航天器总体水平、缩短研制周期、节省研制经费起着重要作用,而且直接关系到航天器总体性能及其总体技术指标的先进性、可靠性、安全性和航天器在轨工作寿命。

为完成航天器的总体设计工作,应遵循以下基本设计原则:

(1) 以用户需求为导向

航天器总体设计必须以用户需求即任务要求为依据,开展航天器系统设计活动,保证最终研制出的航天器产品能够满足用户的使用要求。除满足特定的使用要求及性能指标要

求外,还要满足用户提出的研制周期和成本的要求。

(2) 确保系统整体最优

航天器系统由相互关联的分系统组成,各分系统又是由众多的子系统、设备及零部件组成的。航天器所具备的特有的功能和性能并不是通过各分系统功能的简单叠加获得,而是由各组成部分之间相互联系、相互作用和相互协调而形成的。因此,在航天器总体设计中,要防止脱离整体功能和性能而追求局部高性能或迁就局部低性能;要避免把系统分解和综合的技术协调做成简单的加减,而要根据相互联系、相互作用和相互协调的关系,进行科学的分析和计算来进行分解和综合;要使系统设计和技术协调达到整体最优的效果,即以最小的代价,最有效地利用技术成果,进行最佳组合,达到所要求的系统功能和性能。

(3) 各层次系统协调一致

航天器系统的另一个性质就是它的层次性。航天器系统属于航天工程系统的重要组成部分,与其关联的系统还包括运载火箭系统、发射场系统、测控系统 and 应用系统。航天器系统设计要满足其他系统对它的限制和要求,航天器总体设计方案的改变,会影响到工程系统中其他系统设计方案,因此,在开展航天器总体设计前,一定要明确与工程其他系统之间的接口关系。

航天器由若干分系统组成,分系统之间通过相互联系、相互协调和相互作用实现航天器的各项功能和性能。某一分系统方案的改变,同样会影响其他相关分系统方案,最终导致航天器总体指标的变化。反之,航天器某一功能或指标的变化,会影响到一个或多个分系统的方案。因此,在航天器总体设计中,一定要保证各分系统之间的协调性和一致性。

(4) 在充分继承的基础上创新

航天技术是20世纪50年代发展起来的新技术,随着相关技术、工艺、材料等水平的不断提高,在航天器设计中进行创新,可提高航天器总体性能。但是,航天器特殊运行环境要求高可靠性,必须建立在充分继承的基础上。因此,必须在充分继承的基础上创新,才能实现既具有较高品质又具有较高的可靠性和良好经济性的航天器设计。

(5) 追求整体效益最大化

为了获得较高的效益,航天器总体设计要通过优化的方法,将成熟技术和新技术进行最佳组合,保证可靠性,缩短研制周期,降低研制成本,达到用户对航天器功能和性能的要求。

1.2 数字化航天器系统工程设计研究背景

随着我国经济和国防建设的不断发展,空间技术面临着大好的发展机遇,同时也面临着技术复杂、任务重、时间紧的严峻挑战。能否抓住机遇,好、快、省地完成航天器的研制工作,满足国防建设和国民经济发展对空间技术日益增长的需求,已经成为关系到我国空间事业前途和命运的重大问题。