

快速响应空间体系与应用

高永明 吴钰飞 等著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

快速响应空间体系与应用

高永明 吴钰飞 廖育荣 潘 清
焦文英 耿云海 董正宏 张锦绣 著
牛亚峰 张学波 张海波

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统介绍了快速响应空间体系与应用的基本理论与建模方法,内容主要包括快速响应空间体系应用的领域,快速响应空间体系能力需求,快速响应空间体系总体结构设计,快速响应空间轨道与星座设计,快速响应空间技术体系,快速响应空间体系结构建模,快速响应空间体系应用过程建模,快速响应空间体系效能评估建模与仿真分析等。

本书可供相关院校的研究生和本科生,从事航天装备论证、设计与研制的技术人员,以及应用航天装备的部队官兵等参阅。

图书在版编目(CIP)数据

快速响应空间体系与应用 / 高永明等著. —北京:
国防工业出版社, 2011.2
ISBN 978-7-118-07290-7

I. ①快... II. ①高... III. ①快速响应-空间科学-研究 IV. ①V1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 027886 号

※

国防工业出版社 出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 9 1/8 字数 226 千字
2011 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

序

1957年苏联成功发射第一颗人造地球卫星,开创了人类活动进入空间的新纪元。半个世纪以来,空间以其特有的资源和莫测的深邃吸引着各国投入力量进行开发和探索,建立了各种空间应用系统,通过载人航天、探月登月和各种科学探测卫星,大大推进和拓展了对宇宙的认识。当今,空间系统是人类生产、生活须臾不能离开的重要支撑,航天能力和空间技术已成为我们这一时代的标志和一个国家综合国力的重要体现。

以对地观测、通信、导航为代表的各种应用卫星系统具有不受国界限制的全球信息能力,卫星系统是各国拓展全球能力和军事能力的重要手段,航天力量与海陆空力量的融合是赢得高技术战争胜利的重要保障。因此,空间已成为国际军事竞争的战略制高点,空间系统的安全已成为国家安全的重要组成部分。

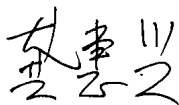
一个国家的空间能力主要包括三个方面:进入空间、应用空间和控制空间。进入空间是基础,应用空间是目的,为了保障空间系统正常工作,还必须具有应对异常情况的能力。

目前,在固定基地用运载火箭发射空间飞行器的方式虽仍占主导地位,但存在发射费用高、射前准备时间长、无机动能力的不足,特别是当发射设施受到破坏将无法进入空间。所以近年来各空间大国注重发展车载、舰载和机载的机动发射技术,并同时降低发射费用和缩短发射准备时间。在空间飞行器方面,利用在卫星及载荷小型化

取得的技术进展,研制功能相对简化的轻小型卫星,以迅速弥补应用卫星系统功能的缺失或根据需要执行特定使命的飞行任务。

我很高兴看到“快速响应空间”系列著作与大家见面。该书较为系统地阐述了快速响应空间体系与应用的基本理论、快速响应空间体系结构设计、快速响应空间体系应用过程及效能评估建模等内容,适合从事军事航天理论研究的相关人员阅读,也可作为科研院所相关专业研究人员的参考书。

我国对“快速响应空间”理论和技术的研究还刚刚起步,它对航天器、运载器、发射场、测控网和指挥信息系统都提出了新的技术要求。比如,适合机动发射的高效固体火箭、大载荷能力的飞机和空中发射技术、模块化标准化卫星技术、星箭一体化技术、快速测试发射技术、应急测控技术以及地面指挥信息系统和任务划技术等,都需要取得进一步的突破和试验验证。相信在我国航天人的共同努力下,我国必将实现空间快速响应能力,为维护国家利益做出更大贡献。



2009年12月7日

前 言

快速响应空间(Operationally Responsive Space, ORS)是航天体系建设与应用的新概念。它立足于快速满足战役与战术需求,通过快速发射或重构空间系统,为战场指挥官提供快速进入和利用空间的能力,确保及时满足其临时提出的紧急需求。快速响应空间体系面向战役战术任务,直接为战场指挥员提供服务,强调指挥应用灵活方便,实现整个空间体系的快速响应性和实效性。ORS 是美国国防部正在实施的空间转型政策的重要内容。其基本思想是快速产生和维持空间优势,使空间系统具有根据战场需要、按照指挥官要求执行作战任务的能力。美军认为 ORS 是一个包括快速响应空间航天器、运载器和基础设施的整体,必须采用新的发展模式,通过国防部 ORS 办公室进行统一规划、协调发展,形成体系能力,才能实现快速响应空间能力。快速响应空间体系涉及快速响应空间航天器、快速响应空间运载器、快速发射与测控系统、指挥与应用系统等多个系统,实现空间体系的快速响应与各系统密切相关,只有成体系建设与应用才能发挥整体合力,形成整体的快速响应空间能力。

快速响应空间概念目前处于探索阶段,快速响应空间体系与应用是快速响应空间研究的热点。快速响应空间体系结构设计、应用过程及效能评估的建模与仿真是快速响应空间体系与应用研

究的重要内容。本书从快速响应空间体系设计与应用的角度,提出了一套进行快速响应空间体系结构设计、应用过程建模与体系效能评估的方法,力求为设计与应用快速响应空间体系提供理论与方法参考。

本书共分为 10 章。第 1 章阐述快速响应空间体系的概念、特点及组成,简要介绍快速响应空间体系发展与应用现状以及体系结构设计及效能评估研究现状。第 2 章分析快速响应空间体系的应用领域、应用过程以及能力需求。第 3 章研究快速响应空间体系总体结构设计方法。第 4 章对快速响应空间体系空间部分的主要结构形式进行设计研究。第 5 章介绍快速响应空间的技术体系。第 6 章建立快速响应空间体系总体结构的静态与动态模型。第 7 章建立快速响应空间体系应用过程的逻辑模型和动态模型。第 8 章研究基于 MAS 建模仿真的快速响应空间体系效能评估方法,并建立相应的 Agent 模型。第 9 章在分析快速响应空间体系典型应用模式的基础上,进行基于 MAS 的快速响应空间体系效能评估仿真实现与结果分析。第 10 章在对全书工作进行总结的基础上,展望快速响应空间体系与应用研究的下一步工作。

本书第 1 章、第 2 章由高永明、吴钰飞、潘清执笔,第 3 章、第 4 章由廖育荣、吴钰飞、耿云海执笔,第 5 章由张锦绣、牛亚峰执笔,第 6 章由吴钰飞、张学波执笔,第 7 章由张海波、董正宏执笔,第 8 章 ~ 第 10 章由吴钰飞、焦文英、高永明执笔。全书由高永明拟定大纲和统稿。

在本书的撰写过程中,我们参阅了国内外许多专家学者的文章和专著,不少专家审阅了本书部分或全部章节的内容,在此谨向他们

一并致谢。另外,曹喜滨、陈有荣、蔡业泉、冯书兴、蔡远文、赵继广、赵新国、于小红、廖学军、陈浩光、秦大国、曹延华、罗小明、阎慧等专家学者对本书提出了许多建设性的宝贵意见,在此谨向他们表示衷心感谢!

由于认识浅薄,本书在撰写过程中难免有疏漏和不足之处,敬请同行专家和读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 快速响应空间体系	1
1.1.1 快速响应空间体系的概念与特点	1
1.1.2 快速响应空间体系与常规航天装备体系的关系	2
1.1.3 快速响应空间体系的组成	3
1.2 快速响应空间体系发展与应用研究现状	7
1.2.1 快速响应空间体系发展现状	7
1.2.2 快速响应空间体系应用研究现状	15
1.3 体系结构设计 with 效能评估研究现状	16
1.3.1 体系结构设计研究现状	16
1.3.2 体系效能评估研究现状	24
第2章 快速响应空间体系应用与能力需求分析	31
2.1 快速响应空间体系应用领域分析	31
2.1.1 快速响应空间体系的应用领域与任务目标	31
2.1.2 快速响应空间体系应用领域的分类	32
2.2 快速响应空间体系应用过程分析	33
2.2.1 快速响应空间体系应用过程的概念与特点	33
2.2.2 快速响应空间体系应用过程的组成要素	35
2.3 快速响应空间体系能力需求分析	45

2.3.1 基于 QFD 的快速响应空间体系能力需求 分析过程.....	45
2.3.2 快速响应空间体系能力需求的提出.....	48
2.3.3 快速响应空间体系能力需求质量屋.....	51
2.4 小结	53
第 3 章 快速响应空间体系总体结构设计	54
3.1 快速响应空间体系总体结构设计原则与思路	55
3.1.1 快速响应空间体系总体结构设计原则.....	55
3.1.2 快速响应空间体系总体结构设计思路.....	56
3.2 快速响应空间体系总体结构设计方法	57
3.2.1 作战体系结构设计方法.....	58
3.2.2 系统体系结构设计方法.....	58
3.3 快速响应空间体系总体结构设计	65
3.3.1 作战体系结构设计.....	65
3.3.2 功能要求向系统组成映射.....	66
3.3.3 系统组成方案与交互关系设计.....	69
3.4 小结	73
第 4 章 快速响应空间体系空间部分结构设计	74
4.1 单个整体式航天器的快速响应轨道设计	74
4.1.1 快速响应轨道的概念与特点.....	75
4.1.2 对地侦察快速响应轨道设计.....	75
4.1.3 快速响应轨道选择策略.....	81
4.2 多个整体式航天器的星座设计	83
4.2.1 快速响应侦察星座的任务需求.....	83
4.2.2 快速响应侦察星座设计优化模型.....	84
4.2.3 分层遗传算法设计.....	86

4.2.4	算例仿真	92
4.3	典型新概念结构及设计思路分析	94
4.3.1	星簇结构	95
4.3.2	自由飞行分离模块化结构	97
4.4	小结	100
第5章	快速响应空间技术体系	101
5.1	快速响应空间技术体系总体结构	101
5.2	快速响应空间航天器技术	103
5.2.1	标准化技术	103
5.2.2	模块化技术	103
5.2.3	即插即用技术	105
5.2.4	自主运行技术	106
5.2.5	微小型化、轻量化技术	107
5.2.6	太阳帆板灵活展开技术	109
5.2.7	快速AIT技术	109
5.3	快速响应空间运载器技术	112
5.3.1	长期存储技术	112
5.3.2	星箭接口技术	112
5.4	快速响应空间支撑技术	113
5.4.1	快速机动发射技术	113
5.4.2	快速指挥与应用技术	114
5.5	小结	115
第6章	快速响应空间体系结构建模	116
6.1	快速响应空间体系总体结构静态建模	116
6.1.1	体系结构建模语言的比较	116
6.1.2	SysML图形及其对体系结构模型的支持	117

6.1.3	基于 SysML 的快速响应空间体系总体 结构静态模型	120
6.2	基于赋时 CPN 的快速响应空间体系总体结构 动态模型	128
6.2.1	赋时 CPN 的相关定义	128
6.2.2	基于赋时 CPN 的快速响应空间体系总体 结构建模	129
6.2.3	仿真分析	133
6.3	小结	139
第 7 章	快速响应空间体系应用过程建模	140
7.1	快速响应空间体系应用过程建模理论	140
7.1.1	快速响应空间体系应用过程建模的概念 与目的	140
7.1.2	快速响应空间体系应用过程建模的要素	142
7.1.3	快速响应空间体系应用过程建模方法分析	143
7.2	基于工作流网的快速响应空间体系应用过程逻辑 模型	145
7.2.1	工作流网的相关概念	146
7.2.2	快速响应空间体系应用过程逻辑模型的 构建	147
7.2.3	快速响应空间体系应用过程逻辑模型的 验证	156
7.3	基于 HTCPN 的快速响应空间体系应用过程动态 模型	161
7.3.1	快速响应空间体系应用过程动态模型构建	161
7.3.2	仿真分析	176
7.4	小结	185

第 8 章	快速响应空间体系效能评估建模	186
8.1	快速响应空间体系效能评估理论	186
8.1.1	快速响应空间体系效能的概念与评估步骤	186
8.1.2	快速响应空间体系效能指标的确定原则 与方法	187
8.1.3	快速响应空间体系效能指标	188
8.1.4	快速响应空间体系效能评估思路	190
8.2	基于 MAS 建模仿真的基本理论	191
8.2.1	基于 MAS 建模仿真的概念	191
8.2.2	Agent 的结构	192
8.2.3	MAS 的通信模式	194
8.2.4	MAS 的协作方法	195
8.2.5	基于 MAS 建模仿真的步骤	195
8.3	基于 MAS 的快速响应空间体系效能评估总体框架	196
8.3.1	基于 MAS 的快速响应空间体系结构分析	196
8.3.2	快速响应空间体系 MAS 系统中 Agent 结构	199
8.3.3	快速响应空间体系 MAS 的协作方法	200
8.4	快速响应空间体系 MAS 系统中 Agent 模型	202
8.4.1	Agent 属性描述	202
8.4.2	Agent 功能行为模型	203
8.4.3	Agent 交互模型	218
8.4.4	规则与决策模型	219
8.5	小结	221
第 9 章	快速响应空间体系应用模式与效能仿真分析	222
9.1	快速响应空间体系典型应用模式	222

9.1.1	快速补网发射模式	222
9.1.2	快速机动重构模式	225
9.1.3	典型应用模式的比较分析	226
9.2	快速响应空间体系效能评估仿真想定	229
9.3	快速响应空间体系效能评估仿真实现	231
9.3.1	仿真工具选择	231
9.3.2	AnyLogic 的建模仿真框架	234
9.3.3	基于 AnyLogic 的 Agent 仿真模型开发	235
9.4	快速响应空间体系效能评估仿真结果分析	241
9.4.1	效能指标评估结果	241
9.4.2	灵敏度分析	245
9.4.3	评估结果综合分析	255
9.5	小结	257
第 10 章	总结与展望	258
10.1	总结	258
10.2	下一步工作	259
参考文献		261

第1章 绪 论

1.1 快速响应空间体系

1.1.1 快速响应空间体系的概念与特点

快速响应空间体系是以满足特定用户(主要是战役战术用户)对空间能力的紧急需求为目标,由快速响应空间航天器、快速响应空间运载器、快速响应发射系统、指挥与应用系统组成的集合。

快速响应空间体系具有如下特点。

(1)体系结构的重组性。不同的用户对空间能力有不同的需求。“按需”提供空间能力要求快速响应空间体系能对数据产品和服务进行剪裁,提供特定用户所需要的信息。这就要求快速响应空间体系结构具有重组性。

(2)体系应用的时效性。快速响应空间体系主要是针对战役战术用户提出的紧急需求提供空间服务,其对快速响应空间体系提供服务的时效性要求比较高。因此,要求快速响应空间体系完成任务的响应时间应该在作战允许的时间范围内。

(3)体系功能的针对性。快速响应空间体系主要用于满足战役战术用户提出的临时需求,这类需求往往是针对特定区域或特定时段的,如用于提供对某个目标远程打击效果的照片以便决策是否需要进行下一波次打击等。满足这类需求往往要求快速响应空间体系在特定时段对特定区域提供高效能的服务,而并不注重所有覆盖范围和全部运行时间内都要提供高效能的服务。

1.1.2 快速响应空间体系与常规航天装备体系的关系

快速响应空间概念起源于美国。快速响应空间体系与常规航天装备体系的关系可以参考美国关于快速响应空间与常规“大空间”关系的分析。美空军太空司令部副司令克洛茨以空中舰队为例说明了快速响应空间与常规“大空间”的关系,主要包括以下两个方面^[29]。

(1)快速响应空间与常规“大空间”的关系类似于 C-130 与 C-17 的关系。常规空间系统灵活性和生存能力不足,需要利用快速响应空间对常规“大空间”进行补充,快速响应空间是对不可预测事件的防备措施,弥补空间能力的损失,并不取代“大空间”计划。

(2)快速响应空间是为“大空间”进行新技术和新方法试验的有效途径。

借鉴上述思想,将快速响应空间体系与常规航天装备体系的关系概括为以下三个方面。

(1)快速响应空间体系是常规航天装备体系的补充,而不是替代。当前,常规航天装备体系也在从战略应用向战役战术应用发展。快速响应空间体系以其灵活性和快速响应性的特点,主要用于常规航天装备体系无法满足战役战术应用需求时的紧急情况。快速响应空间体系是常规航天装备体系的补充,以弥补常规航天装备体系在快速反应性方面的不足。快速响应空间体系不能替代常规航天装备体系,而只是对其提供短期的快速补充。

(2)快速响应空间体系与常规航天装备体系存在交集。快速响应空间体系与常规航天装备体系存在交集,即快速响应空间体系中部分装备可以利用常规航天装备,快速响应空间装备应能与常规航天装备协同操作。

(3)发展快速响应空间体系有利于推动常规航天装备体系的发展。快速响应空间体系建设中所取得的关键技术成果及运行理念将

推动常规航天装备体系向提高效能、降低成本的方向发展^[8]。快速响应空间体系具有快速、灵活等特点,可利用快速响应空间体系进行常规航天装备技术试验,为常规航天装备体系的发展提供试验床。

1.1.3 快速响应空间体系的组成

快速响应空间体系是由空间部分、运载部分和地面支持部分构成的有机整体,如图 1.1 所示。

1. 空间部分

空间部分是快速响应空间体系中直接为战场指挥员提供空间服务的部分,主要包括各种快速响应空间航天器,如整体式快速响应空间航天器和星簇结构等。同时,空间部分既可以是单个快速响应空间航天器,也可以是多个快速响应空间航天器组成的星座。

快速响应空间航天器是指在接到任务需求后能在较短时间内投入服务状态的空间飞行器。与常规空间飞行器相比,快速响应空间航天器具有如下特点:第一,一般采用微小卫星平台,重量轻、体积小,既能实现快速发射,也便于一箭多星发射或利用大型卫星发射火箭的剩余能量进行搭载发射;第二,一般采用模块化通用平台和有效载荷,可以根据任务需求灵活组装,适应性强;第三,针对有限战术目的,平台和载荷的复杂程度减小,成本降低,使用灵活;第四,研制周期短,能满足快速响应的要求;第五,有效载荷形成系列化、仓储化,能按需装载,满足应急需求;第六,为了在入轨后尽快投入应用,快速响应空间航天器具有一定的自主在轨检测能力。

快速响应空间航天器的关键技术主要包括模块化通用卫星平台技术、模块化标准化有效载荷技术、快速响应轨道选择技术、即插即用技术、在轨快速测试技术、长期存储技术和在轨自主运行技术等。其中,快速响应轨道是指满足快速响应空间任务的轨道,一般具有轨道响应时间短、可达性好、覆盖能力强等特点,通常包括适合于快速