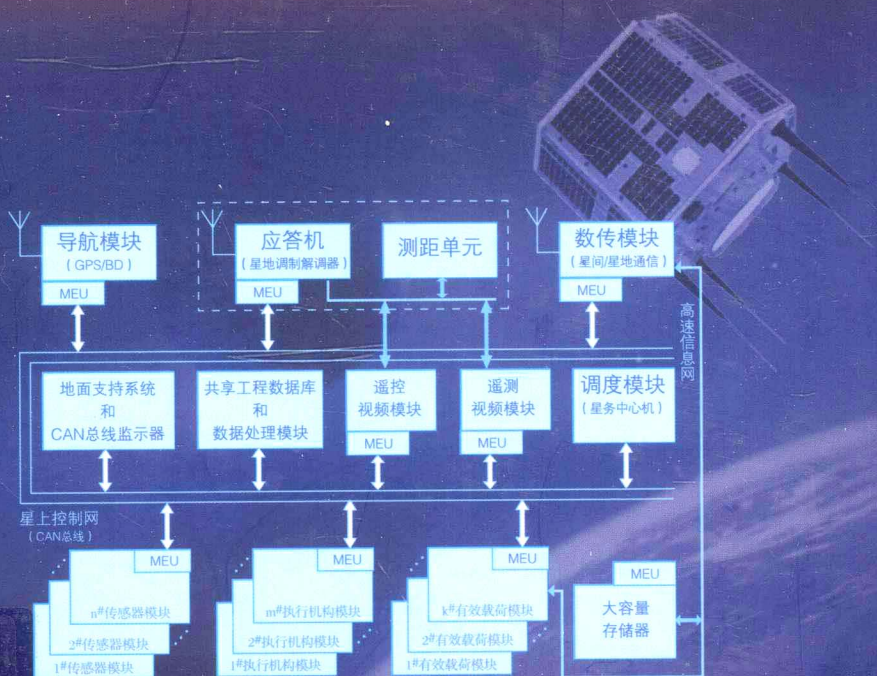




航天科技图书出版基金资助出版

小卫星星务管理技术

李孝同 施思寒 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

小卫星星务管理技术

李孝同 施思寒 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

小卫星星务管理技术/李孝同, 施思寒著. --北京:
中国宇航出版社, 2014. 9

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0794 - 9

I. ①小… II. ①李… ②施… III. ①人造卫星—管
理 IV. ①V474

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 206865 号

责任编辑 舒承东

封面设计 文道思

出 版
发 行

中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号
(010)68768548

邮 编 100830

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900
(010)68768541

(010)88530478(传真)
(010)68767294(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

北京宇航文苑
(010)62529336

承 印 北京画中画印刷有限公司

版 次 2014 年 9 月第 1 版

2014 年 9 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230

开 本 1/32

印 张 21.25

字 数 591 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0794 - 9

定 价 158.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次,资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站,点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址: <http://www.caphbook.com>

电话: (010) 68767205, 68768904

序 一

在我国卫星发展的过程中，小卫星开拓了一种与过去不同的卫星内部业务管理的方法，创建了一个新的平台服务系统，即小卫星星务系统，实现了卫星的信息共享和星内业务的统一管理。它使得卫星设计从顶层开始，就用四个标准文档规范了全星设备之间的信息接口，用它们来约束星上设备的设计、制造、验收、环境试验、在轨运行。小卫星星务系统在借鉴工业自动化技术的基础之上，充分考虑小卫星的技术特点，将遥测、遥控、程控、时统、设备操纵、任务调度、自主控制等多项卫星内部业务的管理集成于统一的系统之中，形成了一个小卫星的重要信息和决策中枢。星务系统采用内嵌有微计算机的可程控设备和星上网，实现多机分布式的小卫星综合自动化，体现了网络计算、大数据和智能化等多方面的优势，可以完成整星的运行管理、自主控制和信息处理。这是一条达到“快、好、省”地建造小卫星的技术途径。

自1996年以来，小卫星星务系统已经发展了近20年，在轨运行小卫星数量达30多颗。实践证明，星务系统技术已经发展成了一个通信、计算机、控制、管理等多学科融合的系统技术。目前国内虽然发表了大量学术论文和研究报告，但还没有系统论述小卫星星务系统技术的著作。本书针对小卫星星务系统的技术发展路线，对星务系统的第一代、第二代和第三代的技术进行了梳理和总结，全面反映了小卫星星务系统的技术内涵和发展方向。

第一作者从1966年开始从事卫星总体的设计工作，执笔起草了东方红一号卫星总体方案，参加了我国通信卫星的电源系统设计和

测试设备的研制工作，近十余年来主要从事小卫星的总体设计，是我国第一颗小卫星的星务系统的主任设计师，小卫星星务系统的开创者。第二作者是我国第一颗公益小卫星的星务系统的主任设计师。

本书融入了作者多年的研究成果和心得，内容丰富，工程设计知识面广，从卫星自动化、嵌入式和星上网、遥测、遥控、程控、自主管理、轨道服务管理、姿态控制管理、电源运行管理、在轨自主测试等领域对星务管理系统进行了全面阐述，并提出了小卫星星务系统的发展展望。

星务系统已在我国小卫星中得到大量应用和推广，然而，针对小卫星的星务管理技术的专著目前国内还是一个空白，相信本书的出版将弥补我国小卫星星务系统技术的理论基础，奠定小卫星发展的理论和技术的基石。

王希季

序 二

《小卫星星务管理技术》是作者及其团队在中国现代小卫星研制过程中，从星上信息系统体系创建、软件开发、接口协议到在轨管理和调试等一系列实践活动的总结。10 多年来在轨超过 100 星年的经验证明，该项技术在中国现代小卫星上的应用是成功的。

本书全面系统地记录了小卫星研制实践的脚步！实践五号卫星开发初期，用户及传统卫星各分系统研制单位，大家按惯性思维，争卫星的遥测、遥控资源，按传统的卫星研制方式根本不可能满足实践五号的三项任务要求，即完成科学试验卫星含有遥操作功能的二相功能流体液池试验、“921”载荷管理技术的试验验证以及推出中国第一个现代小卫星公用平台。作者在总结国内外卫星技术发展及其预先研究的基础上，创新性地提出了星务管理概念，建立星上信息系统的体系框架，改造星上单机设备，利用嵌入式技术，将 MEU 置入设备中，使得原来的单机具有简单智能（即遥测、遥控以及上网功能等），这在当时要没有领导和专家的支持是万万办不到的！

由于采取了这一框架，变原来的有限的遥测、遥控为可控资源，对智能设备来讲可以做到按需分配，为卫星在轨管理提供了充足的信息资源，使得小卫星率先实现故障探测、隔离与恢复（FDIR）技术，安全管理技术，健康管理技术等总体技术，并为在轨二次开发等作了资源准备。基于这个星务架构，小卫星得以从总体视角自顶向下开发、研制、生产、集成，同时为科研队伍的新人铺就了一条成长之路。10 多年的实践证明了“好、快、省”的原则，在研发过

程中，总体设计单位应牢牢掌控卫星资源，并进而为用户更好地服务。

采用星务管理技术的小卫星在为用户（载荷）服务方面，可以提供全方位的信息透明服务，无论是开关机控制还是辅助信息的提供都十分友好，并具有在轨二次开发的潜力。

作者及其研制团队按照现代服务业的职业要求，研制的小卫星好用、省心、好管，这要归功于星务管理系统采用了信息多路径、网上冗余、耐环境的容差容错设计等一系列新技术。

作者最后还对未来作出了展望，结合实验室的预研成果，探讨了快速制造及快速部署的工作设想。

我由衷地祝福本书的出版，并希望年轻一代的设计师站在新的起点上更上一层楼。

张永维

前 言

本书的目的是总结我国小卫星事务管理技术（简称星务技术）10多年的发展历程和创新内涵。目前，国内许多小卫星都是依据它，在星上建立了卫星事务管理系统（简称星务系统）。

星务技术具有极大的吸引力。它不但是用一般的自动化原理来阐述的符合逻辑的技术，而且还是从卫星“总体观”建造小卫星的易于实施的技术，它是一种支持开发者发挥创造能力，在卫星上引入各种新颖技术的技术。星务技术融合了信息技术的成果，依据飞行任务，设计卫星在轨运行信息管控的流程和各个有序的动作，然后再从整星全局需求安排硬件设置和调动其工作，从而提升卫星总体设计水准。星务技术从顶层设计开始，逐层向下，形成卫星信息总体，确保卫星顺畅快速地建造，确保卫星在轨和谐、有序、无竞争地运转，即使出现某些故障也能自主或集同地面专家的知识进行修复，或转为降级工作状态。这就表明，本书所属的技术领域与其说是电子技术类，不如说是卫星总体设计范畴，它试图从另一个思考的角度来说明卫星设计、建造、运行管理的内容和方法。这个角度强调卫星在轨的信息流，以及在轨的功能实施过程，至于构建卫星的物理架构、组成硬件设备等常规的卫星设计内容却放在附属的地位。后者是在前一方面设计完成之后，下达任务书由下一层面的单位研制或从“货架”上直接挑选。当然，对于小卫星来说，最好采用成熟的、货架的、高性能的卫星自动化产品组装，遵循“快、好、省”的技术途径，建立一个开放式的设计环境，即插即用。

这就是说，小卫星的星务系统是面向卫星嵌入式建造的应用、

面向卫星运行智能化管理和控制的应用。显然, 这些应用都需要创建一个基于软件的平台。这个平台可以服务于较广泛的卫星型号需求, 将高速度的建造和高性能的管理控制完美地结合在一起。软件平台再加上智能化的管理执行单元, 就构成了星务系统, 即星上信息物理系统, 它由计算、通信和控制部分组成。从而, 实现了星上的网络计算、大数据、智能化管理和控制。

第1章首先介绍了卫星自动化技术, 为的是要表明航天技术受到它的强有力的支撑, 应该把它放在相当重要的地位。卫星自动化技术是从常规自动化技术中引伸出来的, 同时也丰富了一般自动化技术。这一章还扼要地描述了星务管理系统的基本概念、内容和特点。我们创建星务系统, 在技术层面来说, 就是全面强化卫星自动化技术在卫星工程中的应用和推广, 提高其性能, 使其成为有高性能的产品。

第2、3章分别阐述建造星务系统的几项核心技术: 嵌入式技术、星上网和并行化处理。基于这几项技术, 建立了小卫星星务系统的体系结构, 也可以说是一种小卫星的综合电子系统的体系结构, 与卫星自动化产品一起建立星务系统的物质基础。它们为星务系统搭建了一个完美的舞台, 使其拥有一个“能充分表演的空间”, 充分发挥星务管理和控制的职责, 形成“共享一套设备、完成多项功能”的体系架构。

第4章阐述星务系统的遥测功能的技术实现, 它将传统卫星的遥测分系统虚拟化、软件化, 看似传统卫星的遥测分系统已经消失, 其实它依旧存在并且得到加强, 达到综合集成的目的。同时, 还阐述了对遥测功能运行的管理, 包括遥测数量、采集速率、数据源对象、数据时间同步、数据处理和压缩、数据存储和回放等, 解决了星上各设备对遥测数量需求的瓶颈, 也克服了星地操作的限制。其中提出的“统一遥测”技术是作者首创的, 它将卫星上使用的分包遥测和格式遥测集成在一起, 发挥各自的优越性, 成为当前我国小卫星用的主要的遥测数据格式。

第5章阐述星务系统的遥控功能的技术实现,它将传统卫星的开关指令控制扩展为带有参数的指令控制,形成复合型遥控指令系统,将遥控与遥调两项技术集成在一起,既增强了功能,又简化了设计。将单指令遥控变成多指令复合遥控,形成“一键操作”,即用一条指令实现多个动作顺序控制,大大简化了星地间的操作。作者还提出了“统一遥控”的概念,实现了卫星遥控向分包遥控的平稳过渡,无缝连接。

第6章阐述星务系统程序控制功能的技术实现和运行的管理。程序控制是卫星自动化的执行手段,也是星务管理的执行手段。程序控制包括绝对时间程控、事件程控、相对时间程控等。它的管理包括程控数据链的上注、排序整理、保护、发放等。程序控制是卫星自主控制的关键之一,所以本章将程序控制和自主控制合并在一起论述。自主控制就是卫星智能的管理加上程序控制的执行。

第7章阐述星务系统轨道运行数据服务的管理。卫星自主控制需要时间数据和轨道数据作为判断的依据,并且尽可能较长时间不需要地面的支持。为此,作者开发了一个轨道计算方法,适应于星上环境使用。它是基于“摄动力的离散化处理”和借助“非球形摄动力数据库”,推广 Encke 方法构建的一种轨道外推计算的方法。为了支持星上各设备平稳运作和提升应用水平,通过星上广播,对全星提供时间数据和轨道数据的服务。

第8章阐述星务系统姿态控制和运行数据服务的管理,实现姿态数据的共享。对于小卫星、微小卫星需要加快姿轨控的控制周期,本章提出了姿态网络控制技术,借助星上网实现姿态的实时控制。为此提出两种技术措施:一是将姿态确定和姿态控制分离;二是对星上网协议进行调整。

第9章阐述星务系统电源控制运行的管理,内容包括双向 DC/DC 为蓄电池充放电控制电路集成,太阳帆板最大功率点和对日定向极值控制等。作者还提出了全数字式太阳帆板电源控制器电路,集成化蓄电池模块和带供电信息管理的电源母线通用插座等概念。

第10章阐述星务系统载荷设备运行的管理。卫星飞行任务不同,星上载荷设备不同,为了卫星平台化,采用模块化思想,星务系统建立了以载荷下位机为中心的载荷管理机制。它作为卫星平台的代理,实现对载荷设备的管理和控制、对载荷工作所需附加数据的支持、对载荷数据的实时处理和传送。这样,不同的型号卫星,仅仅反映在载荷舱下位机的变动,可以用“一变应万变”来应对各类小卫星的研制。同时,载荷舱下位机也作为高速载荷数据总线的网关,对载荷数据调动和处理实现管控。从而,容易实现在轨的实时处置,提升卫星服务质量和性能。

第11章阐述在轨星载自主测试技术,通过分层架构的测试性方法,建立系统级和部组件级的自主测试环境,通过星上网进行系统级的自主测试和诊断,无需星上新添附加的测试设备。

第12章在星务系统的实践基础之上,试图将嵌入式技术概念推广到全星,提出一个新型体系结构的小卫星概念,并且与美国的即插即用卫星进行了比较,作为星务系统进一步发展的展望。

本书所论述的概念、机理和方法大多经过实践,也有些部分只是设想。即使实践过的,也可能不十分充分。作者只是希望读者可以从本书的字里行间看出星务技术开发中的“逐步、平稳、无缝”的过程和思想:如何从传统的星上设备运行环境无缝地改造到星上网络环境的过程,如何从当前的技术平稳地提升到新兴的技术的过程,和谐、稳定、大同是我国自古以来的思维方法,用之于设备建造中特别是总体设计中会带来许多的好处,可以保持卫星整体平稳、无竞争地正常运行,使得星上设备运行于一个宽松、易于配合的环境之中。

回顾星务技术的开发过程,作者首先要感激实践五号卫星的第一任总设计师总指挥张国富研究员、王希季院士,实践五号卫星的总设计师总指挥马兴瑞研究员,实践五号卫星项目办主任郑尚敏和张永维研究员,没有他们大力的支持,星务系统是不可能顺利发展的。此外,还要真诚感谢771所的康建文、张宏俊、潘海燕、张润

宁，539 厂的吴礼平，513 所的任泽亮、冯永等，是他们尽心尽力的工作，支持了星务系统的开发，使得这一项技术能顺利地成长壮大起来。同时，还要感激东方红卫星公司的李延东、袁仕耿、张德全、刘朋、伍保峰、陶志刚、李晴及其他同事们在实践星务系统中的贡献。最后真诚感谢东方红卫星公司 AIT 室的秘书李挺，她在为本书搜集资料和整理文稿中做了大量的工作。作者在写书时参考了许多文章，感激这些作者们传递给我们许多知识和信息。

由于星务技术出现时间不长，涉及的应用范围过广，再加上作者学识有限，书中难免错误和不足之处，请有识者批评指正。

李孝同

2014 年 9 月于北京

目 录

第 1 章 小卫星事务管理系统概论	1
1.1 卫星自动化技术	1
1.1.1 自动化技术的发展	1
1.1.2 卫星自动化技术的内容	6
1.1.3 卫星自动化系统的发展阶段	9
1.2 星务系统	15
1.2.1 星务系统的定义	15
1.2.2 星务系统的基本设计思想	16
1.2.3 星务系统发展阶段	19
1.2.4 星务系统的组成	24
1.2.5 星务系统的功能	28
1.2.6 星务系统的技术特点	29
1.2.7 星务系统的标准文件	36
第 2 章 星务系统的嵌入式技术	44
2.1 概述	44
2.1.1 嵌入式系统的基本概念	44
2.1.2 嵌入式系统的基本特点	46
2.1.3 嵌入式系统概念在小卫星的扩展	49
2.2 内嵌式系统硬件、MEU 建造	54
2.2.1 片上系统和 MCM	54
2.2.2 MEU 建造	56
2.2.3 内嵌式计算机的抗干扰技术	67
2.3 内嵌式系统软件及 MEU 配套软件	81
2.3.1 常用的嵌入式软件架构	81
2.3.2 DFH—OS for MEU 的系统概述	85
2.3.3 MEU 的应用程序	87

2.4 DFH—OS for MEU 的内核原理	116
2.4.1 任务管理	116
2.4.2 任务同步与通信	119
2.4.3 信号量	120
2.5 DFH—OS for MEU 的系统和用户资源配置	121
2.5.1 系统软件数据结构	121
2.5.2 系统底层硬件配置	125
2.6 DFH—OS for MEU 软件编程框架	128
2.6.1 编程框架概述	128
2.6.2 系统软件设计约定	130
2.6.3 用户任务创建	134
2.6.4 软件接口设计	136
2.6.5 用户任务扩展	138
2.6.6 软件在轨更新方式	139
2.7 系统提供的函数 API 接口 DFH—OS for MEU	144
2.7.1 中断服务函数接口	144
2.7.2 任务调度函数 API 接口	145
2.7.3 底层驱动函数 API 接口	147
第 3 章 小卫星的星上网技术	153
3.1 星上计算机网络	153
3.1.1 星上网的定义	153
3.1.2 星上网的组成	155
3.1.3 星上网的拓扑结构	156
3.1.4 星上网的体系架构	158
3.1.5 星上网的协议	159
3.1.6 星上载荷信息高速总线	162
3.1.7 星上用实时控制总线	167
3.2 星上现场总线	172
3.2.1 为什么要在小卫星上引入现场总线	172
3.2.2 现场总线定义	174
3.2.3 现场总线的优点	177
3.3 CAN 总线 (控制器局域网)	179
3.3.1 基本概念	179

3.3.2	报文传送	184
3.3.3	报文的正常处理	190
3.3.4	报文出错处理和故障界定	194
3.3.5	位定时要求	196
3.3.6	CAN 的修改	197
3.4	星上网应用层协议	199
3.4.1	应用层数据传送方法	199
3.4.2	应用层数据传送过程	208
3.4.3	星上网络连接图	209
第 4 章	遥测管理	211
4.1	小卫星星务系统的遥测技术	212
4.1.1	卫星无线电遥测系统的组成和工作原理	213
4.1.2	卫星遥测系统特点	215
4.1.3	小卫星遥测系统的进化	216
4.2	统一遥测	221
4.2.1	PCM 遥测	221
4.2.2	分包遥测	222
4.2.3	统一遥测	223
4.3	可控式遥测	232
4.3.1	可控遥测的涵义	232
4.3.2	可控遥测的内容	234
4.3.3	可控遥测的方法	235
4.4	虚拟遥测分系统	236
4.4.1	软件遥测概念	236
4.4.2	虚拟遥测分系统的工作过程	238
4.5	遥测功能设计	239
4.5.1	遥测工作内容	239
4.5.2	遥测缓冲区	241
4.5.3	遥测缓冲区指针变量表示法	244
4.5.4	遥测读写指针移位规则	245
4.5.5	实时遥测数据汇集管理和格式生成	249
4.5.6	存储遥测数据压缩处理, 延时遥测 (压缩存储遥 测) 功能	253

4.5.7	附加遥测数据汇集方法	254
4.5.8	载荷管理功能	255
4.5.9	地面测试辅助功能	255
4.6	遥测数据格式约定	256
4.6.1	说明	256
4.6.2	主要参数	256
4.6.3	遥测数据包格式	257
4.6.4	传送帧格式	258
4.6.5	遥测帧格式	259
4.6.6	遥测数据处理要求	260
4.6.7	遥测数据使用范例	262
第5章	遥控管理	265
5.1	遥控分系统的组成和工作原理	265
5.1.1	遥控分系统的组成	265
5.1.2	基本工作原理	269
5.1.3	小卫星遥控的特点	271
5.1.4	遥控体制	274
5.2	PCM 遥控	275
5.2.1	PCM 遥控数据流格式	275
5.2.2	PCM 遥控直接指令帧格式	277
5.2.3	PCM 遥控注入数据帧格式	278
5.2.4	PCM 遥控信息在星内的传送类型	280
5.3	分包遥控和统一遥控	290
5.3.1	统一遥控的信息组合	292
5.3.2	统一遥控的特点	298
5.4	差错控制和加密技术	306
5.4.1	统一遥控的差错控制	306
5.4.2	统一遥控的数据保护技术	312
5.5	虚拟遥控系统	322
5.6	遥控数据格式约定	323
5.6.1	卫星遥控指令说明	323
5.6.2	遥控指令的数据加载格式	324
5.6.3	直接指令	324