

导弹与航天丛书

卫星工程系列

卫星控制系统仿真技术

宇航出版社

卫星控制系统仿真技术

主 编 刘良栋

副 主 编 刘慎钊 孙承启

主编助理 王存恩

作 者	刘良栋	刘慎钊	孙承启	李铁寿
	孙宝祥	张洪华	吴光裕	胡 军
	郭树玲	李季苏	伏宝林	于锡武
	黄明宝	郭玉蛟	黄 欣	段晓东
	张新邦	赵玉清	林来兴	解永春

责任编辑 李之聪

宇航出版社

内 容 简 介

《卫星控制系统仿真技术》是《导弹与航天丛书》卫星工程系列中一本技术专著。本书全面介绍了卫星控制系统仿真的有关技术,内容包括概论、卫星控制技术基础、卫星控制系统数学模型、卫星仿真中的模型辨识技术、卫星控制系统数学仿真及计算机辅助设计、卫星控制系统半物理仿真、卫星控制系统全物理仿真、卫星运动仿真器、目标仿真器、仿真计算机、航天器交会对接仿真。

本书内容丰富,其中大部分内容是从事卫星控制系统仿真的工程实践总结,有很强的实用性,既可作为从事航天器控制系统设计及仿真的工程技术人员的工作参考书,也可作为高等院校相关专业高年级学生、研究生和教师的教学参考书。

卫星工程系列 卫星控制系统仿真技术

主 编:刘良栋
副 主 编:刘慎钊 孙承启
主编助理:王存恩
责任编辑:李之聪

*

宇航出版社出版发行

北京市和平里滨河路1号 邮政编码(100013)

发行部地址:北京市阜成路8号 邮政编码(100830)

北京京科印刷有限公司印刷

各地新华书店经销

*

开本:850×1168 1/32 印张:15.5 字数:416千字
2003年12月第1版第1次印刷 印数:1~1000册
ISBN 7-80144-688-7/V·077 定价:45.00元

尊
彈
子
航
天
丛
書

張
交
華

**《导弹与航天丛书》
编辑工作委员会**

名誉主任 宋 健 鲍克明

主 任 刘纪原

副 主 任 任新民 孙家栋

委 员	屠守锷	黄纬禄	梁守槃	陈怀瑾
	王 卫	权振世	谢昌年	赵厚君
	曹中俄	张新侠	高本辉	

办 公 室 宋兆武 史宗田 任长卿 孙淑艳

**《卫星工程》
系列编辑委员会**

主 任 孙家栋

副 主 任 戚发轫 杨嘉墀 屠善澄
 徐福祥 侯深渊(常务副主任)

委 员 林华宝 马兴瑞 李祖洪 邹广瑞
 陈宜元 范本尧 朱毅麟 马世俊
 黄本诚 陆道中 高慎斌 王金堂
 魏钟铨

办 公 室 陆道中 杨树仁 宋惠兰 居自强
 于 森

总 序

导弹与航天技术,是现代科学技术中发展最快的高新技术之一.导弹武器的出现,使军事思想和作战方式发生了重大变革:航天技术,把人类活动的领域扩展到太空,使人类认识自然和利用外层空间的能力发生了质的飞跃.

导弹与航天技术是一项复杂的系统工程,它应用了现代科学技术众多领域的最新成就,是科学技术与国家基础工业紧密结合的产物,是一个国家科学技术水平和工业水平的重要标志.

中国人民经过 30 年的努力,依靠自己的力量,勇于开拓,坚韧不拔,在经济和科学技术比较落后的条件下,走出了自己发展导弹和航天技术的道路,造就了一支能打硬仗的技术队伍,建立了具有相当规模和水平的导弹和航天工业体系,形成了遍布全国的科研、生产协作网.这是党中央独立自主、自力更生方针的伟大胜利,是全国各地区、各部门大力协同,组织社会主义大协作的丰硕成果.

30 年来,我国已有多种型号经历了研究、设计、生产、试验、装备、使用的全过程,装备了各种射程的战略和战术弹道导弹、各种类型的防空导弹和飞航导弹,用多种运载火箭发射了不同轨道和用途的人造卫星,这些都是我国导弹和航天工业的物质成果.这些重大成果对增强我国的国防实力,促进经济发展,带动科学进步,发挥了重要的作用.

我们不仅取得了丰硕的物质成果,而且积累了宝贵的实践经验.为了发展中国的导弹和航天事业,多少人投入毕生的精力,贡献了宝贵的智慧,付出了辛勤的劳动,备尝了失败的苦痛和成功的

欢欣.这些付出高昂代价取得的实际经验,难以只从书本上学来,也不能从外国买来,只能靠自己实践中总结.为了加速我国导弹和航天事业的发展,需要全面、系统地归纳以往研制过程中建立和应用的设计理论,总结其工程经验,用以指导今后的研制实践,并传授给导弹和航天事业一代又一代新生力量,使他们能在较高的起点上开始工作.为此,我们组织多年来从事导弹、人造卫星和运载火箭研制工作的专家和工程技术人员,编著了这套《导弹与航天丛书》.它以工程应用为主,力求体现工程的系统性、完整性和实用性,是我国导弹和航天技术队伍 30 年心血凝聚的精神成果,是多种专业技术工作者通力合作的产物.

作为一项系统工程,要求参加导弹和航天工程研制工作的各类技术人员,不仅精通自己的专业,而且充分理解相关专业的要求和特点,在统一的总体目标下,相互协调、密切配合地进行工作.因此,本《丛书》也是导弹和航天技术队伍各专业间以及和其他有关人员间进行技术交流的读物.

本《丛书》按液体弹道导弹与运载火箭(I)、固体弹道导弹(II)、防空导弹(III)、飞航导弹(IV)、卫星工程(V)等 5 个系列编排.各系列共用的固体推进技术(VI)和空气动力学(VII)两种专业编为专著,其他共用专业则纳入一个系列,并供其他系列选用.

本《丛书》的各级编委会、各卷册的主编、副主编及各章节的作者是一个庞大的科学技术人员群体,为了编写好这部大型丛书,编著人员在组织和技术工作上都付出了巨大劳动.期望这套《丛书》能帮助人们加深对于导弹和航天技术的了解,能促进中国的导弹和航天事业向更高的目标迈进.

《导弹与航天丛书》

编辑工作委员会

1987 年 8 月

《导弹与航天丛书》

卫星工程系列

序 言

卫星工程系列丛书是《导弹与航天丛书》的一个系列。

我国坚持自力更生、艰苦奋斗的方针,在人造卫星的研制工作中取得了举世瞩目的成就。1970年4月24日,中国第一颗人造地球卫星——“东方红一号”发射成功,卫星运行正常,跨入了空间大国的行列。至今,我国成功地研制和发射了30颗不同类型的人造卫星,其中包括当代最重要的三类应用卫星:高轨道的静止通信卫星、低轨道的返回式卫星和中轨道的遥感卫星,这些卫星应用于国民经济、国防建设、文化教育和科学研究的很多部门,取得了显著的社会和经济效益。

我国在研制人造卫星的工作中,开展了创造性的科研活动,积累了丰富的实践经验,形成了学科门类齐全的卫星工程知识体系。我们组织众多的工程技术专家编写本系列丛书的目的,在于将这些实践经验和理论知识进一步系统化和理论化,并适当地吸收国外先进的科学技术成果,使其形成一套航天技术专著,用于指导今后的卫星研制工作。本系列丛书共有19种技术专著,包括卫星工程概论、卫星分系统技术和专业技术,以及探空火箭设计,共计29分册。

本系列丛书的内容以人造卫星的研制技术为主,着重论述卫星工程技术方面的问题,并简要论及了许多相关学科的问题,使其具有完整性、系统性。某些分册涉及到载人飞船、空间站等其他类

航天器的工程技术问题,其中论述内容较多的两册,书名冠以航天器.本系列各种分册在内容上具有相对的独立性和系统性.

编纂卫星工程系列丛书尚无经验可循,我们的工作首次尝试,由于编著人员的知识水平和实践经验有限,书中不当之处在所难免,欢迎广大读者批评指正.

本系列丛书的编纂工作,得到很多单位领导、广大科技人员和宇航出版社很多同志的大力支持,在此致以衷心的感谢.

《导弹与航天丛书》

卫星工程系列编辑委员会

1991年6月

前 言

《卫星控制系统仿真技术》是《导弹与航天丛书》卫星工程系列中的一本技术专著,全书共分 11 章,内容包括概论、卫星控制技术基础、卫星控制系统数学模型、卫星仿真中的模型辨识技术、卫星控制系统数学仿真及计算机辅助设计、卫星控制系统半物理仿真、卫星控制系统全物理仿真、卫星运动仿真器、目标仿真器、仿真计算机、航天器交会对接仿真技术。

中国的卫星控制系统仿真起步于 20 世纪 60 年代,当时中国也刚刚开始设计和制造自己的人造地球卫星。为了对设计出来的控制系统方案进行验证,提出了卫星控制系统数学仿真、半物理仿真和全物理仿真的要求,于是开展了一系列的仿真方法研究和大型设备研制工作,并在以后几十年中,先后对已发射的各种型号卫星控制系统进行了大量的仿真试验,这些试验对卫星控制系统的研究与设计发挥了重要作用。

本书是作者们多年来工程实践的经验总结,内容丰富、全面,具有很强的实用性。限于水平,书中难免有不妥之处,敬请读者指正。

2003 年 2 月

目 录

第一章 概论	刘良栋 刘慎钊
1.1 仿真概念与特点	(1)
1.2 卫星控制系统仿真的分类和功能	(2)
1.2.1 数学仿真	(3)
1.2.2 半物理仿真	(4)
1.2.3 全物理仿真	(8)
1.3 系统仿真在卫星控制系统研制过程中的 作用	(10)
1.4 卫星控制系统仿真的可信度	(13)
1.5 卫星控制系统仿真的新发展	(14)
第二章 卫星控制技术基础	孙承启
2.1 概述	(17)
2.2 卫星的轨道确定和导航	(21)
2.3 卫星的轨道控制技术	(24)
2.3.1 轨道机动	(25)
2.3.2 轨道修正	(26)
2.3.3 返回和再入的制导与控制	(27)
2.3.4 交会和对接	(31)
2.4 卫星姿态测量的基本概念和姿态测量系统	(34)
2.4.1 姿态测量和姿态确定	(34)
2.4.2 姿态敏感器	(37)
2.4.3 典型的卫星姿态测量系统	(45)
2.5 卫星的姿态控制技术	(47)
2.5.1 姿态控制的方式	(47)

2.5.2 姿态控制执行机构	(50)
2.6 典型的卫星姿态控制系统	(54)
2.6.1 双旋稳定系统	(54)
2.6.2 喷气三轴姿态控制系统	(55)
2.6.3 动量交换式三轴姿态控制系统	(57)
2.6.4 全姿态捕获	(60)
2.6.5 轨道机动期间的姿态稳定	(62)
2.6.6 太阳帆板和天线指向控制	(64)

第三章 卫星控制系统数学模型

李铁寿 孙宝祥

3.1 概述	(69)
3.2 卫星动力学模型	(69)
3.2.1 动力学建模	(69)
3.2.2 卫星轨道动力学模型	(75)
3.2.3 卫星姿态动力学模型	(89)
3.2.4 环境力和力矩数学模型	(108)
3.3 姿态敏感器的数学模型	(116)
3.3.1 太阳敏感器	(119)
3.3.2 地球敏感器	(129)
3.3.3 恒星敏感器	(143)
3.3.4 惯性敏感器	(152)

第四章 卫星仿真中的模型辨识技术

张洪华 吴光裕

4.1 概述	(160)
4.2 卫星数学模型辨识的一些实用方法	(161)
4.2.1 频域辨识方法	(161)
4.2.2 时域辨识方法	(170)
4.3 带有挠性附件卫星的模型辨识	(177)
4.3.1 系统描述	(177)
4.3.2 在轨辨识的几个应用	(178)
4.4 噪声模型的辨识方法	(184)
4.4.1 数据采集	(185)

4.4.2 数据预处理	(185)
-------------------	-------

4.4.3 模型识别	(190)
------------------	-------

第五章 卫星控制系统数学仿真及计算机辅助设计

胡军 郭树玲

5.1 概述	(202)
--------------	-------

5.2 卫星控制系统数学仿真	(203)
----------------------	-------

5.2.1 数学仿真原理	(203)
--------------------	-------

5.2.2 数学仿真方法	(205)
--------------------	-------

5.2.3 采样控制系统仿真	(205)
----------------------	-------

5.2.4 卫星控制系统数学模型的特点及几种 典型非线性环节	(209)
---	-------

5.2.5 数值积分算法	(214)
--------------------	-------

5.2.6 稳定性分析与积分步长控制	(218)
--------------------------	-------

5.3 卫星控制系统的计算机辅助分析与设计	(224)
--------------------------------	-------

5.3.1 控制系统计算机辅助设计有关概念	(224)
--------------------------------	-------

5.3.2 卫星控制系统计算机辅助设计中的模型 描述方式	(228)
---------------------------------------	-------

5.3.3 卫星控制系统计算机辅助设计的实例	(234)
---------------------------------	-------

5.3.4 卫星控制系统计算机辅助设计软件	(239)
--------------------------------	-------

第六章 卫星控制系统半物理仿真

刘慎钊

6.1 概述	(241)
--------------	-------

6.2 动力学仿真	(242)
-----------------	-------

6.2.1 卫星轨道动力学仿真	(242)
-----------------------	-------

6.2.2 卫星姿态动力学仿真	(244)
-----------------------	-------

6.3 运动学仿真	(248)
-----------------	-------

6.3.1 用欧拉角描述的卫星姿态运动仿真	(249)
--------------------------------	-------

6.3.2 用四元数描述的卫星姿态运动仿真	
-----------------------	--

.....	(252)
6.4 硬件接入回路仿真	(253)
6.4.1 卫星半物理仿真类型	(253)
6.4.2 关于速率陀螺接入仿真回路的问题	(256)
6.4.3 关于地球敏感器接入回路的问题	(259)
6.4.4 关于太阳敏感器接入回路的问题	(261)
6.4.5 关于加速度计接入回路的问题	(264)
6.4.6 半物理仿真软件	(264)
6.5 卫星控制系统半物理仿真实例	(264)
6.5.1 三轴稳定地球静止轨道卫星控制系统 半物理仿真	(264)
6.5.2 自旋卫星主动章动阻尼控制系统半物理 仿真	(269)
6.5.3 低轨道三轴稳定卫星控制系统半物理 仿真	(275)
第七章 卫星控制系统全物理仿真	李季苏
7.1 概述	(280)
7.2 卫星控制系统全物理仿真的原理和方法	(282)
7.3 卫星控制系统全物理仿真的作用	(283)
7.4 全物理仿真系统的组成、主要设备及 技术要求	(286)
7.4.1 单轴气浮台全物理仿真系统	(286)
7.4.2 三轴气浮台全物理仿真系统	(289)
7.5 卫星控制系统全物理仿真试验实例	(290)
7.5.1 采用飞轮作为执行机构的卫星控制 系统全物理仿真	(291)
7.5.2 挠性结构卫星控制系统全物理仿真研究	(295)
7.5.3 多体卫星复合控制物理仿真试验技术	

研究	(298)
7.5.4 大型航天器单框架控制力矩陀螺系统	
仿真研究	(305)

第八章 卫星运动仿真器

伏宝林 于锡武 李季苏

8.1 概述	(311)
8.2 伺服转台	(312)
8.2.1 伺服转台的分类及机械台体结构	(312)
8.2.2 机电部件	(315)
8.2.3 三轴伺服转台控制系统	(325)
8.3 三轴伺服转台技术指标的测试	(330)
8.3.1 检测仪器及设备	(331)
8.3.2 检测方法	(332)
8.3.3 检测结果和检测周期	(348)
8.4 气浮台	(349)
8.4.1 卫星控制系统仿真试验对气浮台的要求	
.....	(349)
8.4.2 单轴气浮台	(350)
8.4.3 三轴气浮台	(355)

第九章 目标仿真器

黄明宝 郭玉蛟 黄欣 段晓东

9.1 概述	(365)
9.2 太阳仿真器	(367)
9.2.1 一般概念	(367)
9.2.2 真实太阳光辐照特征	(368)
9.2.3 在试验室内实现太阳仿真	(369)
9.2.4 仿真试验室太阳仿真器的工作原理、	
结构及特性	(370)
9.2.5 太阳仿真器的技术指标及测试	(373)
9.2.6 用于半物理和全物理仿真试验室的两种	
太阳仿真器	(374)
9.3 地球仿真器	(375)

9.3.1	一般概念	(375)
9.3.2	作为卫星姿态参考源的地球的特征	(377)
9.3.3	地球仿真的要求	(380)
9.3.4	地球仿真的方法	(383)
9.3.5	适用于高轨道地球敏感器的地球仿真器	(385)
9.3.6	适用于中低轨道地球敏感器的地球 仿真器	(391)
9.4	星仿真器	(395)
9.4.1	一般概念	(395)
9.4.2	作为卫星姿态参考源的恒星特征	(396)
9.4.3	恒星仿真	(399)
9.4.4	星仿真器的分类及功能	(408)
第十章	仿真计算机 张新邦 赵玉清	
10.1	概述	(415)
10.1.1	仿真计算机分类	(416)
10.1.2	仿真计算机性能要求分析	(416)
10.2	数字仿真计算机组成	(417)
10.2.1	数字计算机体系结构	(417)
10.2.2	实时操作系统	(421)
10.2.3	仿真计算机接口技术	(427)
10.3	仿真计算机的发展	(431)
10.3.1	模拟计算机	(432)
10.3.2	混合计算机	(432)
10.3.3	全数字仿真计算机	(432)
10.3.4	现代仿真系统中的计算机新技术	(438)
10.4	分布交互仿真(DIS)	(441)
10.4.1	DIS 的定义、组成及其技术特点	(441)
10.4.2	DIS 中的关键技术与相关技术	(443)
10.4.3	高级体系结构(HLA)	(446)