




卫星姿态控制 动态模拟技术

董云峰 陈士明 苏建敏 胡迪 著



科学出版社

www.sciencep.com



卫星姿态控制 动态模拟技术

王长庚 王长庚 王长庚 王长庚 王长庚



中国宇航出版社
CHINA UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS PRESS

卫星姿态控制动态模拟技术

董云峰 陈士明 苏建敏 胡迪 著

科学出版社

北京

前 言

卫星姿态控制动态模拟器是由软硬件部件模拟器按真实卫星的组成与结构所集成的模拟器,它运行在软件模拟出的空间环境中,展示卫星各部分的工作情况和相互协作关系。它有不同方式的软硬件接口,可以充当系统或部分系统的替代角色,是方案设计与验证、星载计算机软件调试、敏感器与执行机构部件检测、系统故障复现与故障分析等多种工作的工具,更重要的是,它定义了一种在团队里封装和共享知识的规范,形成了一种协作模式。

董云峰在 1994~1997 年借调到香港亚太通讯卫星有限公司工作期间,使用了美国休斯(Hughes)公司 HS-376 动态模拟器,接受了 HS-601 动态模拟器使用培训,参与了美国劳拉(Loral)公司 LS-1300 动态模拟器的监造工作,参加了 HS-701 动态模拟器功能设计研讨会。1998 年返回北京航空航天大学工作后,一直对卫星动态模拟器的研制工作念念不忘,重点针对卫星姿态控制分系统开始进行技术积累。

在卫星姿态控制动态模拟器的研制和积累过程中,得到北京航空航天大学宇航学院 211 和 985 建设经费的支持,相关课题的研究还先后得到中国科学院空间中心、清华大学、航天东方红卫星有限公司、中国空间技术研究院总体部、北京国科环宇空间技术有限公司的支持。赵光恒、陈非凡、孙国江、张晓敏、孙礼朋及其团队对形成本书所用的技术规范起了指导和决定性作用。

卫星姿态控制动态模拟器的研制凝聚了许多人的知识和努力,陆续参与了研制工作的包括北京航空航天大学孟庆春教授、满庆丰教授、黄海教授、董长虹副教授、王海涌副教授的团队。

除了苏建敏、陈士明、胡迪外,张振军、高小波、丁同瑞、郭巍、林振华、刘育强、孙乐丰、王皓、刘飞、熊小平、段传辉、范猛、马俊、赵文、邓武东等参与了卫星姿态控制动态模拟器的研制和本书的撰写、录入、制图、校对等工作。

卫星姿态控制动态模拟器的研制涉及知识面广,技术发展迅速,而作者水平有限,书中难免存在疏漏,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 卫星动态模拟器介绍	1
1.1 卫星动态模拟器概念	1
1.2 卫星动态模拟器发展历程	1
1.2.1 服务于卫星操作员培训的动态模拟器	2
1.2.2 与真实部件连接的动态模拟器	2
1.2.3 与卫星研制同步的动态模拟器	2
1.2.4 普及且具有人性化演示操作界面的动态模拟器	3
1.3 动态模拟器工作原理	3
1.3.1 飞行动力学模拟	3
1.3.2 部件的电信接口模拟	3
1.3.3 敏感器飞行工况性能测试	3
1.3.4 执行机构飞行工况性能测试	4
1.3.5 可维护性与可扩展性	4
1.4 动态模拟器组成	4
1.4.1 卫星姿态控制系统模拟器	4
1.4.2 飞行环境与运动模拟器	4
1.4.3 卫星基础子系统模拟器	5
1.4.4 运行监测与管理系统	6
1.5 动态模拟器结构与工作模式分析	6
1.5.1 单机非实时确定性执行逻辑全数字仿真	6
1.5.2 全数字分布式实时仿真	7
1.5.3 电信接口分布式实时仿真	7
1.5.4 基于转台的硬件在回路分布式实时仿真	10
1.6 动态模拟器的仿真模型.....	11
1.6.1 原理模型.....	11
1.6.2 电信接口模型	12
1.6.3 误差模型.....	12

1.6.4	失效模型	12
1.7	动态模拟器应用场景	13
1.7.1	方案可行性论证	13
1.7.2	方案演示验证	14
1.7.3	系统性能分析	14
1.7.4	产品测试与验收	14
1.7.5	操作人员培训与演练	15
1.7.6	故障重现与分析	15
1.8	动态模拟器相关知识	16
1.8.1	动态模拟器科学知识	16
1.8.2	动态模拟器技术知识	16
1.8.3	动态模拟器工程知识	17
第2章	动态模拟器研制工具与方法	18
2.1	动态模拟器耦合性分析方法	18
2.2	动态模拟器系统层次分解	19
2.2.1	仿真运行平台分类及应用	19
2.2.2	应用软件的层次结构	20
2.3	实时分布式仿真的同步技术	21
2.3.1	分布式仿真的时间分辨率	21
2.3.2	动态模拟器的数据计算能力与传输能力需求	22
2.3.3	数据传输总线	23
2.3.4	计算机的数据计算与通讯能力	25
2.3.5	嵌入式系统数据计算与通讯能力	26
2.3.6	同步技术与方式	27
2.3.7	动态模拟器不同工作模式下的时间分辨率	28
2.4	开发研制工具及开发平台	29
2.4.1	开发研制工具及开发平台要求	29
2.4.2	常用的仪器和设备	29
2.4.3	嵌入式系统开发板	33
2.4.4	电路板研制工具	38
2.4.5	软件集成开发工具	41
2.4.6	Visual SourceSafe 源代码共享工具	46
2.5	跨平台源代码级移植技术	48

2.5.1	代码移植所涉及的专业人员	48
2.5.2	一致的任务处理流程	48
2.5.3	一致的系统接口函数	50
2.5.4	一致的编程风格	54
2.6	系统测试验证流程	57
2.6.1	运行平台的测试验证	57
2.6.2	数学模型的正确性检测	59
2.6.3	分布式运行正确性检测	59
2.6.4	电信接口一致性检测	60
2.6.5	转台控制与测量精度检测	62
第3章	部件运行平台研制	64
3.1	系统接口函数定义	64
3.1.1	CAN 接口函数	64
3.1.2	1553B 接口函数	64
3.1.3	串口 UART 接口函数	66
3.1.4	数模转换 AD/DA 接口函数	66
3.1.5	数字通道 DI/DO 接口函数	66
3.1.6	占空比 PWM 接口函数	67
3.1.7	串行移位主动发送数据接口函数	67
3.1.8	串行移位被动发送数据接口函数	67
3.1.9	通用 RTI 接口	68
3.2	Windows 应用程序开发与调试	70
3.2.1	线程和信号处理	70
3.2.2	定时器模拟程序	72
3.2.3	CAN 卡设备驱动程序	73
3.2.4	反射内存网设备驱动程序	75
3.2.5	PC104-1553B 卡设备驱动程序	78
3.2.6	PCI-1553B 卡设备驱动程序	80
3.2.7	数模转换设备驱动程序	84
3.2.8	计数器设备驱动程序	85
3.2.9	UDP 输入输出	85
3.3	VxWorks 应用程序开发与调试	87
3.3.1	任务和信号处理	87

3.3.2	定时器模拟程序	88
3.3.3	串口设备驱动程序	89
3.3.4	CAN 卡设备驱动程序	90
3.3.5	反射内存卡设备驱动程序	93
3.3.6	PC104-1553B 卡设备驱动程序	94
3.3.7	PCI-1553B 卡设备驱动程序	96
3.3.8	数模转换设备驱动程序	96
3.3.9	计数器设备驱动程序	97
3.3.10	UDP 输入输出	98
3.4	模拟传输接口	98
3.4.1	内存映射文件模拟反射内存网	98
3.4.2	UDP 模拟串口	101
3.4.3	UDP 模拟 CAN 总线	101
3.4.4	UDP 模拟 1553B 总线	102
3.4.5	UDP 模拟串行移位	103
3.4.6	UDP 模拟 RTI 接口	104
3.4.7	RTI 模拟串口	106
3.4.8	RTI 模拟 CAN 总线	106
3.4.9	RTI 模拟 1553B 总线	107
3.4.10	RTI 模拟串行移位接口	108
3.5	工控机硬件平台	109
3.5.1	工控机的打开与关闭	109
3.5.2	扩展板卡	109
3.5.3	电压调整电路	111
3.6	F51 芯片单板机平台	112
3.6.1	F51 芯片简介	112
3.6.2	工作原理	113
3.6.3	PCB 板研制	114
3.6.4	串口驱动函数开发	117
3.6.5	CAN 总线驱动函数	118
3.6.6	定时器驱动函数	118
3.6.7	AD/DA 驱动函数	119
3.6.8	串行移位接口驱动函数	119

3.7	ARM7 单板机平台	120
3.7.1	平台总体设计	120
3.7.2	CPU 工作电路设计	121
3.7.3	总线接口设计	125
3.7.4	数字量接口设计	127
3.7.5	PCB 板研制	129
3.7.6	初始化函数	133
3.7.7	CAN 驱动函数	134
3.7.8	串口通信驱动函数	136
3.7.9	数字量输入输出驱动函数	137
3.7.10	PWM 驱动函数	139
3.7.11	AD/DA 软件接口	140
3.8	SPARC 芯片单板机平台	144
3.8.1	硬件平台总体设计	144
3.8.2	CPU 芯片核心工作电路设计	145
3.8.3	部扩展存储器	146
3.8.4	下载与调试口设计	150
3.8.5	供电电路设计	150
3.8.6	PCB 板研制	150
3.8.7	系统函数开发	152
3.9	单板机标准外扩接口	153
3.9.1	外扩 422 接口	153
3.9.2	外扩 CAN 接口	155
3.9.3	外扩 1553B 接口	158
3.9.4	数字信号电压调整电路	162
3.9.5	12 位 AD 与 10 位 DA 转换电路	163
3.9.6	16 位 AD/DA 转换电路	166
3.10	FPGA 同步设备	171
3.11	集群嵌入式板卡监测配置管理	176
3.11.1	监测配置系统结构	176
3.11.2	监测配置卡的硬件设计	177
3.11.3	监测配置箱的硬件设计	179
3.11.4	监测配置系统的软件协议	181

3.12	运动控制卡编程	183
3.13	运动学转台	192
3.13.1	单自由度转台	192
3.13.2	二自由度转台	195
3.13.3	三自由度平动台	198
3.14	动力学转台	201
3.14.1	单自由度气浮转台	201
3.14.2	三自由度气浮台	201
第4章	星载计算机模拟器数学模型	203
4.1	数学层模块	203
4.1.1	矢量点积计算模块	203
4.1.2	矢量叉积计算模块	203
4.1.3	矢量模计算模块	203
4.1.4	矩阵相乘计算模块	204
4.1.5	矩阵转置计算模块	204
4.1.6	矩阵转置后相乘计算模块	204
4.1.7	欧拉角求坐标转换矩阵模块	204
4.1.8	坐标转换矩阵求欧拉角模块	205
4.1.9	工程数据转至生数据模块	205
4.1.10	生数据转至工程数据模块	205
4.1.11	符号函数模块	206
4.1.12	限幅函数模块	206
4.2	力学层模块	206
4.2.1	惯性坐标系到轨道坐标系的转换矩阵计算模块	206
4.2.2	轨道角速度计算模块	207
4.2.3	双矢量定姿算法	207
4.2.4	天体位置计算	208
4.2.5	地磁场计算	209
4.3	通用算法层模块	210
4.3.1	注入轨道参数推算	211
4.3.2	角速度积分计算姿态角模块	212
4.3.3	地球敏感器太阳敏感器联合确定偏航角模块	213
4.3.4	滚动俯仰轴陀螺漂移标定模块	214

4.3.5	偏航轴陀螺漂移标定模块	214
4.3.6	推力器继电器型控制算法	215
4.3.7	推力器相平面控制算法	216
4.3.8	反作用轮控制算法	219
4.4	布局相关算法层模块	219
4.4.1	推力器点火逻辑算法	219
4.4.2	金字塔构型反作用轮控制逻辑算法	220
4.5	飞行控制模式实体	221
4.5.1	太阳捕获	222
4.5.2	地球捕获	223
4.5.3	正常对地定向模式	225
4.5.4	位置保持	227
第5章	部件模拟器	229
5.1	部件模拟器种类	229
5.1.1	原理一致模拟器	229
5.1.2	电信号一致模拟器	230
5.2	设备组与接插件	231
5.2.1	陀螺	231
5.2.2	太阳敏感器	233
5.2.3	地球敏感器	235
5.2.4	推力器	238
5.2.5	反作用轮	241
5.2.6	磁力矩器	244
5.2.7	太阳帆板	246
5.3	陀螺模拟器	250
5.3.1	原理模型	250
5.3.2	电信接口模型	250
5.3.3	误差模型	251
5.3.4	失效模型	251
5.3.5	数据处理流程	252
5.3.6	F51 单板机实现	252
5.4	太阳敏感器模拟器	252
5.4.1	原理模型	253

5.4.2	电信接口	253
5.4.3	误差模型	254
5.4.4	失效模型	254
5.4.5	数据处理流程	255
5.4.6	F51 单板机实现	255
5.5	地球敏感器模拟器	256
5.5.1	原理模型	256
5.5.2	电信接口	256
5.5.3	误差模型	257
5.5.4	失效模型	257
5.5.5	数据处理流程	258
5.5.6	F51 单板机实现	258
5.6	推力器模拟器	259
5.6.1	原理模型	259
5.6.2	电信接口	259
5.6.3	误差模型	259
5.6.4	失效模型	260
5.6.5	数据处理流程	260
5.6.6	F51 单板机实现	260
5.7	反作用轮模拟器	261
5.7.1	原理模型	261
5.7.2	电信接口	262
5.7.3	误差模型	262
5.7.4	失效模型	263
5.7.5	数据处理流程	263
5.7.6	F51 单板机实现	263
5.8	磁力矩器模拟器	264
5.8.1	原理模型	265
5.8.2	电信接口	265
5.8.3	误差模型	265
5.8.4	失效模型	265
5.8.5	数据处理流程	265
5.8.6	F51 单板机实现	266

5.9 帆板驱动机构模拟器	266
5.9.1 原理模型	266
5.9.2 电信接口	267
5.9.3 误差模型	267
5.9.4 失效模型	268
5.9.5 F51 单板机实现	268
5.10 遥测遥控子系统模拟器	269
5.10.1 工作原理	269
5.10.2 单板机实现	269
5.11 供电子系统模拟器	272
5.11.1 工作原理	272
5.11.2 电信接口	272
5.11.3 采购部件	272
第 6 章 卫星动力学模型与计算方法	275
6.1 坐标系与坐标转换	275
6.1.1 坐标系的定义	275
6.1.2 惯性坐标系到地理坐标系的转换矩阵	275
6.1.3 惯性坐标系到轨道坐标系的转换矩阵	276
6.1.4 惯性坐标系到本体坐标系的转换矩阵	276
6.1.5 惯性坐标系到当地水平坐标系的转换矩阵	276
6.1.6 气流坐标系到本体坐标系的转换矩阵	277
6.2 卫星轨道描述及变换	277
6.2.1 卫星轨道描述	277
6.2.2 直角坐标分量转为轨道根数	278
6.2.3 直角坐标分量转为退化的轨道根数	279
6.2.4 轨道根数转为直角坐标	280
6.2.5 退化的轨道根数转为直角坐标	281
6.2.6 直角坐标分量到地理坐标分量	281
6.2.7 地理坐标分量到直角坐标分量	282
6.3 卫星姿态描述及变换	283
6.3.1 卫星姿态描述	283
6.3.2 欧拉角与坐标转换矩阵的转换	284
6.3.3 四元数与坐标转换矩阵的转换	284

6.3.4	欧拉角与四元数的转换	286
6.4	时间和历法	286
6.4.1	世界时	286
6.4.2	原子时和力学时	286
6.4.3	力学时与世界时的转换	287
6.4.4	北京时间与世界时的转换	287
6.4.5	公历和儒略日	287
6.4.6	由公历求儒略日	287
6.4.7	由儒略日求公历	288
6.4.8	标准历元起儒略世纪数的计算	288
6.5	地球相关模型	289
6.5.1	格林尼治赤经	289
6.5.2	引力计算	289
6.5.3	磁场计算	291
6.5.4	大气密度计算	294
6.6	天体位置计算	296
6.6.1	太阳位置近似公式计算	296
6.6.2	月球位置近似公式计算	296
6.6.3	JPL 星历表插值计算	297
6.7	卫星轨道与姿态运动	301
6.7.1	轨道动力学方程	301
6.7.2	姿态动力学方程	301
6.7.3	力和力矩的计算	304
6.7.4	微分方程组数值解法	305
6.8	测试与验证	307
6.8.1	二体轨道检测微分方程解算精度	307
6.8.2	静止卫星	308
6.8.3	动量矩守恒	309
6.8.4	重力梯度稳定	310
6.8.5	气动力矩稳定	311
6.8.6	仿真环境的计算结果与天文年历的比对	313
6.8.7	与 STK 的对比	315

第 7 章 运行监测与管理系统	317
7.1 数据归档分析程序	317
7.1.1 数据表	317
7.1.2 数据视图	320
7.1.3 数据曲线	322
7.2 遥测解码程序	325
7.2.1 遥测数据表	325
7.2.2 遥测数据视图	326
7.2.3 内存数据库	328
7.2.4 遥测数据处理流程	331
7.3 自然人机交互界面技术	333
7.3.1 遥控指令生成程序	333
7.3.2 基于 OSG 的三维显示系统	334
7.3.3 基于 LabVIEW 的二维监视系统	340
7.3.4 数据手套控制命令输入	344
7.3.5 有限词汇语音识别控制命令输入	346
参考文献	349

第 1 章 卫星动态模拟器介绍

1.1 卫星动态模拟器概念

卫星动态模拟器(dynamic satellite simulator)是由软硬件部件按真实卫星的组成与结构所集成的一颗卫星。其硬件部件主要由成本相对较低的敏感器、控制器、执行机构部件模拟器构成,也可以采用真实部件。这颗卫星运行在软件模拟出的空间环境中,与真实卫星的模式与参数保持一致,对卫星的各个子系统及其部件进行动态模拟,展示卫星系统的工作情况,揭示各系统的工作原理和相互间的协作关系。

动态模拟器可以充当系统或部分系统的替代角色,是方案设计与演示验证、星载计算机软件调试、敏感器与执行机构部件检测、系统故障复现与故障分析等多种工作的工具。

动态模拟器在部件级上与真实卫星一一对应。对每一个部件,应建立原理模型、电信接口模型、误差模型和失效模型,反映出部件的工作原理、使用时的电信接口、部件的性能和可靠性特征。

卫星动态模拟器有很强的可伸缩性和扩展性。它有多种运行模式,既可以运行在笔记本电脑中进行全数字仿真,完成新部件数学模型的调试,也可以分布在多个房间内进行全系统半实物仿真,完成系统验证。使用者可以在最易于开发调试的模式下研制完善四种模型,然后通过对源代码重新编译的方式移植到其他模式下使用。源代码级的可移植性是动态模拟器与普通的数字仿真和半实物仿真的主要区别。

动态模拟器运行在室内环境,可靠性要求低,一般也没有功率、尺寸和重量限制,因此可以选用高集成度的工业级或商用级的元器件,并利用软件、可编程逻辑器件等工具实现部件功能,突出成本优势。

动态模拟器不仅是工具,由于它本身存储和传播了知识,而且也是一种工作方式,是一个单位或团队在完成研制任务的前提下追求人力、物力及时间耗费最小的过程中凝练成的产物。

1.2 卫星动态模拟器发展历程

商品化的卫星动态模拟器的发展可分为四代,按其最有代表性的特征归纳如下。

1.2.1 服务于卫星操作员培训的动态模拟器

第一代卫星动态模拟器由卫星静态模拟器发展而来,主要是模拟卫星遥测遥控和测距系统以便与地面测控系统构成完整的回路。模拟器完全由计算机软件组成,规模不大,其动态范围仅包括简化的姿态运动学模型,程序的研制采用面向过程的设计方法,主要用于培训地面操作人员。休斯公司的 HS-376 动态模拟器是其中的代表,这大约是 20 世纪 80 年代的技术。

1.2.2 与真实部件连接的动态模拟器

第二代卫星动态模拟器在功能和规模上远远超过第一代。动态部分包括完整的动力学和热学模型及星载计算机处理仿真,精细度达到了部件级水平。其结构上有一定的收缩性,可以和一些特定的硬件相连以增加逼真度,如通过 1553B 总线连接星载计算机模拟器和动力学与部件模拟器。除了培训,它还可用于方案论证和故障分析。休斯公司的 HS-601 和劳拉公司的 LS-1300 动态模拟器就是其中的代表,这大约是 20 世纪 80 年代末 90 年代初采用的技术。

第二代卫星动态模拟器的主要问题是由于程序的研制继承了第一代面向过程的设计方法,软件程序规模的急剧膨胀给系统的维护造成了极大的困难,可以继承的一些源代码是按旧的语言标准书写的,一个程序员熟悉系统就需要很长时间,改进系统可能要花费更多的时间。这样系统就失去了再发展的能力。

与此同时,数字化技术在卫星研制中得到广泛应用,事实上从 HS-601 开始卫星已具有星载信息处理子系统(satellite control electronics, SCE)。数字化技术也使卫星厂商和部件厂商分离。由于大量的硬件模块可以直接采购,卫星厂商的主要技术体现在软件上,HS-601 在竞标时就向用户提供经过上天飞行验证的软件模块清单,以显示其系统的可靠性。

1.2.3 与卫星研制同步的动态模拟器

第三代卫星动态模拟器与第二代的主要区别是研制思路与生产技术发生了质的变化。最根本的变化在于它采用了系统工程技术协调动态模拟器与卫星的研制,基本上达到了二者同步进行,动态模拟器不仅是卫星使用者的工具,更演变为卫星研制者的工具,特别是星上软件的调试工具。第三代卫星模拟器采用了当时最先进的计算机技术,通过板卡模拟电信接口,部件可以在软件、硬件模拟器和真实设备三个层面上互相替换。使用者可以根据自己的情况定制动态模拟器的组成方式。1997 年 HS-701 卫星动态模拟器开始了最初的尝试。自此,动态模拟器有了按飞行工况验收部件厂商提供产品的新功能。

第三代卫星动态模拟器的主要问题是成本和研制维护周期影响了仿真的逼真