


Space Object Relative Navigation and
Filtering Technology

空间目标相对导航与 滤波技术

翟光 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

空间目标相对导航 与滤波技术

翟 光 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

空间目标相对导航与滤波技术涉及相对轨道动力学、测量传感器、导航滤波等关键技术。根据空间目标和测量任务的不同,相对测量与导航任务所采用的传感器、导航滤波算法等也不尽相同。航天器的相对动力学模型可以通过轨道动力学作差、一系列的坐标转换,最终得到追踪航天器轨道坐标系下的相对轨道动力学模型。航天器的相对运动会受到各种不确定性因素的影响,通常将不确定性因素视为噪声,并引入动力学模型和测量模型中。此时有必要引入滤波器,从而提高状态估计的精度。此外,本书对远程目标天基光学探测、轨道非合作机动目标追踪观测及补偿滤波、空间目标协同观测及相对导航和空间目标相对状态的约束滤波估计进行了详细的分析和探讨。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

空间目标相对导航与滤波技术 / 翟光著. —北京:北京理工大学出版社, 2020. 2

ISBN 978 - 7 - 5682 - 8134 - 8

I. ①空… II. ①翟… III. ①航天导航②航天器 - 滤波技术
IV. ①V556②V448. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 020365 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地大彩印有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 15.75

彩 插 / 3

字 数 / 274 千字

版 次 / 2020 年 2 月第 1 版 2020 年 2 月第 1 次印刷

定 价 / 68.00 元

责任编辑 / 张海丽

文案编辑 / 张海丽

责任校对 / 杜 枝

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

航天器的导航是指确定航天器相对某参考坐标系运动状态的过程，导航是航天器飞行控制的关键环节，导航信息的精度直接影响航天器执行任务的效能。对于通信、遥感、气象等传统航天器，导航的任务是确定航天器自身的轨道和姿态信息，以保证航天器以正确的姿态运行在正确的轨道上，习惯上将此类导航称为绝对导航。与航天器的绝对导航相对应，空间目标相对导航是指航天器确定自身相对某个目标航天器的相对运动状态的过程，其中包括相对位置和速度、相对姿态和姿态角速度，空间目标相对导航技术最初应用在空间交会对接任务中。近年来，随着空间操作、空间对抗、态势感知等新型空间任务的不断出现，空间目标相对导航技术的应用范围得到快速拓展，其技术发展态势也呈现出诸多新的特点。空间目标相对导航技术得到各航天大国的高度重视，已经成为航天领域的研究热点之一。

空间目标相对导航技术涉及相对轨道动力学、相对测量敏感器、相对导航滤波等多项关键技术，其中相对导航滤波是指利用相对测量信息对目标航天器的相对运动状态进行估计的过程，相对导航滤波能够解决测量敏感器无法直接获取目标相对运动状态的问题，同时能够有效抑制系统噪声，提高相对运动状态的输出精度。以卡尔曼滤波为代表的滤波估计技术，已经在空间目标相对导航任务当中得到广泛的应用。然而，随着空间非合作机动目标追踪、空间分布式航天器控制等新型任务的出现，传统滤波器的构架已经无法满足任务需求，空间相对导航技术面临着新的挑战。

本内容共分为 8 章：第 1 章介绍了空间目标相对导航的基本概念和技术特

点；第2章和第3章分别介绍了相对轨道动力学、导航滤波的基本原理和方法；第4章介绍了远程空间目标的光学探测识别技术；第5章和第6章研究了轨道机动非合作目标的相对导航滤波方法，第7章针对空间目标分布式观测需求，初步探讨了空间目标协同观测及导航方法；第8章结合当前航天器发动机常值推力的特点，研究了机动非合作目标的约束性滤波估计方法。

本书是作者近年来在空间目标相对导航领域内相关研究成果的总结，具有较好的实用性和针对性，可作为相关领域研究生及工程技术人员的参考。

由于空间目标相对导航技术发展迅速，因此本书难以对当前技术前沿进行全面深入的探讨，加之作者水平有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作 者
2019年8月

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 空间相对导航基本概念	003
1.2 空间相对导航系统的组成	004
1.2.1 系统构架	004
1.2.2 相对测量敏感器及其特点	005
1.3 测量数据的处理	007
1.3.1 图像的预处理及解算	007
1.3.2 数据的压缩	008
1.3.3 数据的平滑	008
1.4 相对导航滤波与估计	009
1.4.1 线性滤波估计方法	009
1.4.2 非线性滤波估计方法	010
1.4.3 稳健性滤波估计方法	011
1.5 空间目标的分类	012
1.5.1 合作目标	012
1.5.2 合作目标测量模式	013
1.5.3 非合作目标	014
1.5.4 非合作目标测量模式	014
1.6 空间相对导航技术应用领域	015

1.6.1	空间交会对接	015
1.6.2	编队飞行	018
1.6.3	在轨操作	021
1.6.4	空间目标监测	025
	参考文献	028
第2章	空间目标相对动力学分析	031
2.1	坐标系定义	033
2.1.1	常用坐标系	033
2.1.2	坐标系转换	034
2.2	航天器轨道摄动模型	035
2.2.1	轨道要素的摄动方程	035
2.2.2	轨道摄动因素分析	037
2.3	目标探测中的变轨机动	039
2.3.1	单脉冲变轨交会	039
2.3.2	圆轨道双脉冲霍曼变轨交会	041
2.4	目标相对轨道动力学	042
2.4.1	向量导数法则	042
2.4.2	代数法相对运动模型	043
2.4.3	线性化相对动力学	044
2.4.4	C-W 方程	045
2.4.5	T-H 方程	046
2.5	目标相对运动特性分析	050
2.5.1	目标相对运动周期条件	050
2.5.2	近圆轨道目标相对运动	051
2.5.3	椭圆轨道目标相对运动	051
2.5.4	仿真分析	052
2.6	椭圆轨道目标周期相对运动	054
2.6.1	目标轨迹径向-法向投影	056
2.6.2	目标轨迹径向-横向投影	057
2.6.3	目标轨迹横向-法向投影	058
2.6.4	仿真算例	060
2.7	目标周期相对运动特性	062
2.7.1	目标轨迹曲线的维数	063

2.7.2	空间自相交轨迹	064
2.8	目标观测轨迹的设计	065
2.8.1	跟飞观测轨迹	067
2.8.2	水平面直线观测轨迹	067
2.8.3	轨道面圆观测轨迹	069
2.8.4	水平面椭圆观测轨迹	070
2.8.5	轨道面绕飞观测轨迹	071
	参考文献	073
第3章	相对导航滤波及性能分析	077
3.1	滤波问题描述	079
3.2	贝叶斯估计理论	080
3.2.1	时间更新	080
3.2.2	量测更新	080
3.3	高斯滤波器	082
3.3.1	高斯滤波器框架	082
3.3.2	标准卡尔曼滤波	082
3.3.3	扩展卡尔曼滤波	085
3.3.4	无迹卡尔曼滤波	088
3.4	粒子滤波	092
3.4.1	蒙特卡罗方法	093
3.4.2	重要性采样	093
3.4.3	重采样步骤	094
3.4.4	重要性密度的选择	095
3.4.5	粒子滤波的基本框架	095
3.5	粒子滤波的改进	096
3.5.1	马尔可夫蒙特卡罗移动步骤	096
3.5.2	辅助变量粒子滤波	097
3.5.3	高斯粒子滤波和无迹高斯粒子滤波	098
3.5.4	滤波性能对比分析	099
3.6	空间相对导航算例仿真	102
3.6.1	高斯噪声算例仿真与分析	103
3.6.2	γ 噪声算例仿真与分析	108
3.6.3	闪烁噪声算例仿真与分析	110

3.6.4 滤波算法的比较与分析	114
参考文献	114
第4章 远程目标的天基光学探测	117
4.1 空间相机成像的数学模型	119
4.2 目标成像模型	120
4.2.1 目标亮度模型	120
4.2.2 目标拖尾特征	121
4.2.3 目标点特征的扩散	123
4.2.4 成像噪声模型	123
4.3 图像预处理	124
4.3.1 高斯平滑滤波	125
4.3.2 中值滤波	126
4.3.3 去除恒星背景	127
4.4 目标特征提取	128
4.4.1 边缘检测	129
4.4.2 Hough 变换检测拖尾目标	130
4.5 基于二阶中心矩的特征提取	132
4.5.1 边缘二阶中心矩	133
4.5.2 基于连通域的二阶中心矩描述	134
4.5.3 帧间匹配	136
4.6 ROI 预测提速	138
4.6.1 ROI 区域预测方法	138
4.6.2 ROI 提速方法验证	140
参考文献	144
第5章 轨道非合作机动目标追踪	147
5.1 未知机动及其影响分析	149
5.1.1 非合作机动目标的数学模型	149
5.1.2 未知机动的影响分析	150
5.2 稳健性相对导航滤波	151
5.2.1 衰减记忆滤波	151
5.2.2 扩维卡尔曼滤波算法	153
5.2.3 卡尔曼滤波算法的仿真对比分析	153

5.3	非合作机动目标的变结构滤波	162
5.3.1	机动检测器的设计	162
5.3.2	扩维参数自适应卡尔曼滤波跟踪算法流程	163
5.3.3	仿真分析	163
	参考文献	168
第6章	机动观测及补偿滤波	171
6.1	扰动观测器	173
6.2	扰动观测器的误差分析	175
6.3	基于扰动观测器的补偿卡尔曼滤波算法	179
6.3.1	补偿滤波算法误差的有界性分析	180
6.3.2	滤波参数对跟踪精度的影响	184
6.3.3	补偿滤波器的结构设计	185
6.3.4	结构设计中的量测数据压缩技术	185
6.4	仿真分析	187
6.4.1	补偿观测器的跟踪精度分析	187
6.4.2	引入结构设计的精度敏感性分析	192
	参考文献	193
第7章	空间目标协同观测及相对导航	197
7.1	协同观测及导航任务描述	199
7.2	协同导航的数学模型	200
7.2.1	动力学模型	200
7.2.2	协同测量模型	201
7.3	集中式滤波与定位	202
7.3.1	合作目标的集中式滤波定位	202
7.3.2	非合作目标的集中式滤波	204
7.4	分布式协同滤波	205
7.4.1	合作分布式协同滤波	205
7.4.2	合作分布式协同滤波性能分析	206
7.4.3	非合作分布式协同滤波	207
7.4.4	非合作分布式协同滤波性能分析	208
7.5	协同滤波仿真分析	211
7.5.1	非合作分布式协同滤波	211

空间目标相对导航与滤波技术

7.5.2 非合作分布式协同滤波	213
7.5.3 实时仿真实验结果	215
参考文献	216
第8章 目标相对状态的约束滤波估计	219
8.1 约束性滤波问题	221
8.2 含约束的目标动力学	222
8.3 建立无约束扩维卡尔曼滤波器	222
8.3.1 扩维系统	222
8.3.2 建立无约束扩维卡尔曼滤波	223
8.4 考虑范数约束的滤波估计	225
8.4.1 扩维性能指数	225
8.4.2 运动状态的约束估计	226
8.4.3 机动加速度的约束估计	227
8.5 性能分析	231
8.6 数值仿真与分析	232
8.6.1 动力学方程	233
8.6.2 目标的观测量	234
8.6.3 数值结果	235
参考文献	239

第 1 章 绪 论

交会对接、编队飞行、在轨服务、态势感知等新型空间任务的出现，不仅要求航天器具备自主定轨定姿的基本功能，还要求其具备目标相对测量与导航功能，能够准确地获得目标相对运动信息，满足任务中的相对位姿控制需求。空间目标相对测量与导航技术涉及相对轨道动力学、测量敏感器、导航滤波等关键技术。根据空间目标和测量任务的不同，相对测量与导航任务所采用的敏感器、导航滤波算

法等也不尽相同。近年来，空间目标相对测量与导航技术在空间站建设、空间目标抓捕、编队飞行等任务中进行了多次飞行试验，展现出了广阔的应用前景，因此得到了各航天大国的高度重视。

| 1.1 空间相对导航基本概念 |

导航是指确定运动体相对于某个参考坐标系的位置、速度、姿态和姿态角速度，从而为运动体的控制提供必要的状态反馈信息，导航信息的精度在很大程度上决定着运动体控制的品质。对于传统的通信、遥感、气象卫星，其导航的主要功能是获得航天器相对于惯性参考坐标系的轨道和姿态信息，以保证航天器以正确的姿态运行在正确的轨道上，习惯上将这一类航天器的导航称为绝对导航。

与绝对导航不同，空间相对导航是指确定两个轨道物体之间的相对位置、速度、姿态和姿态角速度，其参考坐标系往往位于其中的一个轨道物体上。例如，为了实现两个航天器的交会对接，就必须通过相对导航系统获得追踪航天器相对目标航天器的位置信息，以保证交会对接过程的控制精度。空间相对导航技术在交会对接、编队飞行、在轨服务、态势感知新型空间任务中发挥着重要作用，甚至在很大程度上决定着任务的成败。

| 1.2 空间相对导航系统的组成 |

1.2.1 系统构架

空间相对导航系统的构架需要根据具体的空间任务类型进行设计，任务类型不同会导致相对导航系统在软硬件配置上具有很大的区别。例如，若要完成空间交会对接任务，相对测量敏感器不仅需要具备目标相对位姿的测量功能，还应该具备对目标对接结构几何特征的识别功能。因此，这一类任务除了需要配置相对位姿测量敏感器外，还需要增加视觉相机，以保证准确识别对接机构的几何特征。对于空间态势感知任务，探测航天器多数情况下需要获得目标的图像，用于判断目标航天器的类别、功能和工作状态，此时则只需要配置光学相机即可。对于某些远程交会对接任务，在远程阶段还需要地面测控或高轨中继卫星的支持。此外，对于不同的任务，相对测量数据的处理软件系统也有明显差别。虽然不同的空间相对导航系统具有一定差别，但总体而言都由以下4部分组成：

(1) 星上相对测量敏感器。相对测量敏感器的主要功能是获得航天器间的相对位姿信息。相对测量敏感器的种类较多，能够获取的数据类型包括相对距离信息、方位信息、速度信息、姿态信息和姿态角速度信息等。对于某些合作类型的空间交会对接任务，相对测量敏感器往往分别布置在追踪航天器和目标航天器上，且两个航天器间具备星间链路。

(2) 星上相对导航计算机。相对导航计算机的主要功能是对相对测量敏感器获得的原始数据进行解算和处理，初步获得所需要的信息，在此基础上进一步进行导航滤波并获取最终的相对运动状态。此外，相对导航计算机还需要接收和处理外来的指令信息。

(3) 星上数据处理软件。星上数据处理软件系统构成相对测量数据处理的软件环境，主要包括图像处理、特征识别、相对状态解算和导航滤波等功能。此外，数据处理软件还具备任务管理及调度等功能。

(4) 地面支持系统。地面支持系统的主要功能是在任务某些阶段对追踪航天器和目标状态进行监测和干预，或者直接为两航天器提供相对导航信息。

1.2.2 相对测量敏感器及其特点

1. 微波雷达

在相对测量敏感器中，微波雷达是一类常见的设备。从20世纪60年代起至今，美国和苏联/俄罗斯多次成功使用微波交会雷达完成交会对接任务。微波交会雷达较适合中、远距离交会测量，针对合作、非合作目标均适用。在目标上安装应答机或反射器，将达到更远的工作范围。

微波雷达主要有两种工作模式：第一种是利用微波测距和比相测角法分别测量卫星间的距离和方位角，其中距离测量精度能达到毫米级；第二种则是通过在卫星上安装微波信号收发设备，测量航天器之间的伪距和载波相位值，解算其相对距离。微波测距又分为脉冲方式和相位方式两种。脉冲法测距又称为直接法测距，它是直接测定仪器间断发射的脉冲信号在被测距离上往返传播时间，从而求得距离的方法。脉冲式测距仪的优点是它的原理和仪器设计都很简单，测程远，功耗小，但精度低。相位方式又称为间接法测距，测定由仪器发出的正弦波信号在所测量的距离上往返传输所产生的相位变化（相位差），不需要直接测定电磁波往返传输的时间。根据相位差间接求得传播时间，从而求得所要测量的距离，该方法测量精度达到毫米级，但测量距离较短。

2. 差分全球定位系统

全球定位系统（Global Positioning System, GPS）不仅可以用于航天器的精确确定轨，而且可以用来确定两个航天器的相对位置，其主要工作原理是追踪航天器和目标航天器分别安装GPS接收机。两个航天器首先通过解算GPS信号分别获得各自在惯性坐标系内的位置，然后通过两个位置数据的差分计算，从而获得相对位置信息，这种相对定位模式称为差分GPS定位。差分GPS相对定位模式可以相互抵消系统的固有误差，从而获得更高的相对信息精度。按照工作方式的不同，差分GPS可分为伪距差分和载波相位两种方法，精度最高可达厘米级。由于GPS卫星位于中高轨道上，而地球静止轨道（Geostationary Earth Orbits, GEO）高于GPS卫星的轨道，因此差分GPS不适合静止轨道的相对测量任务。

差分GPS是一种合作目标条件下的相对导航方式。美国、欧洲及日本等国家和地区多次开展差分GPS在空间相对定位领域的应用研究。在欧洲的自动货运飞船（Automated Transfer Vehicle, ATV）项目中，ATV距离国际空间站

(International Spacestation, ISS) 约 12 km 时进入 ISS 的通信范围内。启动差分 GPS 工作, ATV 通过本地通信链路实时接收从 ISS 的 GPS 接收机发来的 GPS 数据, 通过差分计算最终得到两者的相对位置和速度信息。

3. 激光测距仪

激光测距仪的工作原理是: 首先通过自身携带的激光发生器发射激光束, 然后激光束被测目标进行反射, 激光测距仪通过接收反射的激光回波, 最后结合发射信息来确定目标相对于激光测距仪的距离。激光测距仪能够在几十米到几十千米的范围内测量两航天器的相对距离, 它具有体积和质量小, 测量精度较高, 受外界环境影响小等优点, 十分适合在空间交会任务中应用。激光测距仪能够同时测量目标的相对距离和视线角, 但是由于激光光束夹角较小且存在姿态偏差, 因此, 在目标初始捕获过程中, 激光光束可能无法照射目标。此外, 由于大多数航天器外表面装有热控包覆层, 所以当激光光束照射到目标表面后有可能发生镜面发射, 致使激光测距仪无法接收到激光回波, 因此采用单一激光测距仪是无法满足对目标的连续测量要求的。

4. 光学相机

光学成像测量是一种智能化的测量技术, 其测量系统主要包括光学相机和图像处理计算机。光学成像相机获得目标的信息较为丰富, 通过相应的图像处理与解算, 不仅可以获得目标的相对位姿信息, 还可以识别目标的几何特征。此外, 光学相机具有体积和质量小、功耗小、精度高等优点, 十分符合空间相对测量任务需求。光学相机在轨工作时易受轨道光照条件的影响: 当太阳光进入相机视场时, 会造成相机曝光过度而无法识别目标; 当目标进入地影区时, 可见光则无法发现目标。因此, 在工作过程中, 尽量选择在光照区进行, 同时要尽量避免逆光的情况发生。考虑到地影区的测量需求, 可以在平台上加装辅助照明设备。

光学相机的工作模式主要有两种, 其中一种是相对位姿测量模式, 该种模式主要用于对目标的近距离测量任务, 较为典型的是伪空间交会对接和空间机械臂伺服。在与目标交会对接的过程中, 光学相机通过对目标拍照并提取合作光标的几何特征, 采用多点透视成像 (Perspective N Points, PNP) 或光标匹配处理算法即可同时获得对接或抓捕接口的相对位姿信息。对于非合作目标, 光学相机在获得目标对接或抓捕接口的图像之后, 首先提取对接或抓捕接口的几何特征, 然后利用三维重构等方法处理, 最后得到目标接口的相对位姿信息。光学相机还可以采用单目、双目和多目工作方式。美国在 2007 年的“轨道快