



航天测量船海上测控技术丛书

航天器轨道确定的 单位矢量法

主编 茅永兴



国防工业出版社

National Defense Industry Press

航天测量船海上测控技术丛书

航天器轨道确定的 单位矢量法

主编 茅永兴



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

航天器轨道确定的单位矢量法 / 茅永兴主编. —北京:
国防工业出版社, 2009. 1

(航天测量船海上测控技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 05917 - 5

I. 航... II. 茅... III. 航天器轨道—测量—研究 IV.
V556. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 129225 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 13 ½ 字数 387 千字

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 42.00 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

《航天测量船海上测控技术丛书》 编审委员会

主任委员 简仕龙

副主任委员 郭裕芳 张忠华

委 员 周朝猛 陈一兵 席震东 费加兵
程宇锋 朱伟康 姜 良 董 杰
赵文华

秘 书 徐一新 陈小进 张 伟

《航天器轨道确定的单位矢量法》

编 写 组

主 编 茅 永 兴

编著者 茅 永 兴 何 晶

序

在我国航天事业走过半个世纪、取得举世瞩目的巨大成就之际,我国的航天远洋测控事业也经历了 30 年的风风雨雨。

30 年来,从事航天远洋测控事业的广大科技人员,自力更生,严谨求实,开拓创新,团结奋斗,自行设计、研制建造了 6 艘“远望”号测量船,先后 50 多次远征太平洋、印度洋、大西洋,圆满完成了 60 余次各类航天器发射的海上测控任务,为我国航天事业的发展做出了重大贡献,成为我国航天测控网不可缺少的重要组成部分。

回顾 30 年来走过的建设与发展道路,我国航天远洋测控技术水平逐步提高,试验能力不断增强,在圆满完成各类航天器发射海上测控任务的同时,取得了一个又一个的跨越;几代工程技术人员投入毕生的精力与智慧,付出辛勤的劳动与汗水,积累了丰富的实践经验,建立了比较完善的航天远洋测控试验体系,并取得了丰硕的科技成果。为了系统、全面地总结航天远洋测控理论和实践成果,培养和造就年轻人才,巩固和推进航天远洋测控事业又好又快发展,值此 30 周年之际,编写一套《航天测量船海上测控技术丛书》,具有十分重要的意义。

这套丛书共 8 册,包括《航天测量船海上测控技术概论》、《航天测量船测控通信设备船摇稳定技术》、《航天测量船船姿船位测量技术》、《航天器轨道确定的单位矢量法》、《航天测量船船姿数据处理方法》、《航天测量船气象保障技术》、《航天测量船航海保障技术》和《航天测量船测控通信设备标校与校飞技术》。丛书系统、全面地介绍了航天测量船海上测控通信和航海气象保障的理论基础、相关技术和最

新成果,注重分析测量船完成航天远洋测控任务特有的技术体制、技术途径和技术环节,既概略介绍了一般基础理论和航天远洋测控全貌,又着重讨论了具有海上测控特色的技术内容,具有系统全面、侧重技术、体现特色、注重实用的特点。

丛书的使用对象是从事各类航天器测控包括海上测控事业的广大工程技术人员和科技管理人员。希望这套丛书能够对广大读者了解和掌握航天海上测控技术起到实际的指导作用,不断提高海上测控科研试验技术水平,促进航天远洋测控事业人才培养工作,为推进我国航天事业又好又快发展发挥有益的作用。

沈号骏

二〇〇八年二月廿八日

前 言

航天器轨道确定的单位矢量法是中国卫星海上测控部与中国科学院紫金山天文台 20 年来的合作研究成果,是一种介于线性与非线性之间的半非线性测轨方法。通过 20 年的不断研究,由起初的无摄单位矢量法(UVM1),逐步发展到有摄单位矢量法(PUVM1)、改进的无摄单位矢量法(UVM2)、改进的有摄单位矢量法(PUVM2),使得航天器轨道确定的单位矢量法成为一种系列算法。PUVM2 综合了前三种方法的关键技术和优点,成为一种既适用于小偏心率轨道又适用于大偏心率轨道,既适用于短弧段的初轨计算又适用于长弧段、多站、多圈的轨道改进,是一种定轨精度高、适用范围广、计算速度快的工程实用定轨方法。

本书还介绍了轨道确定的单位矢量法在低测角精度测轨数据中的推广应用这一最新研究成果,同时对单位矢量法在常值系统差求解、轨道约束的 EMBET 自校准方法中的推广应用进行了探讨,提出了今后需要深入研究的课题。

本书在中国卫星海上测控部张玉祥高工编著的《人造卫星测轨方法》一书基础上,参考了紫金山天文台陆本魁研究员和南京大学刘林教授的有关文献资料,结合作者近年来的最新研究成果编写而成的,力求理论与工程实践相结合,突出工程实际应用。全书共分 6 章:第 1 章、第 2 章、第 4 章介绍了航天器轨道方面的基础知识,包括时间系统、坐标系统、二体问题和航天器受力分析以及摄动力;第 3 章介绍了各种初轨计算方法,重点介绍了初轨计算的单位矢量法;第 5 章介绍了轨道改进的基本原理和改进的有摄单位矢量法;第 6 章对单位矢量

法在常值系统差求解方法中的应用进行了探讨。其中,第1章、第4章和6.3节由何晶同志编著,其余章节由茅永兴同志编著。

在本书的编写过程中,陆本魁研究员、张玉祥高工等老一代专家学者以及马静远研究员、掌静副研究员等同志为本书的编写工作提出了很多宝贵的建设性意见,对书中部分关键的公式进行了推导复核,特别是张玉祥高工和陆本魁研究员在百忙中抽出时间担任本书的主审和外审,在此一并表示感谢。

由于编著者水平有限,错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

2008年2月于江苏江阴

内 容 简 介

本书主要介绍航天器轨道确定的原理和方法,重点介绍半非线性测轨方法——轨道确定的单位矢量法的基本原理及相关公式,力求工程实用性;同时对目前尚未很好得到解决的测控设备系统差求解问题进行了探讨,这也是给相关工程技术人员和学者提出了工程应用性的研究课题。全书共分6章,内容包括绪论、二体问题、初轨计算的单位矢量法、航天器运动的受力分析及摄动力、改进的有摄单位矢量法、单位矢量法在常值系统差求解方法中的应用探讨。

本书可作为从事航天器测控、轨道预报和空间目标监测等专业的工程技术人员的参考书,也可作为高等院校相关专业的教学参考书。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 引论	1
1.1.2 定轨方法的分类	2
1.2 计算单位和常数	2
1.3 时间和坐标系	4
1.3.1 有关时间和坐标系的一些基本概念	4
1.3.2 时间系统	8
1.3.3 时间系统间的相互转换	17
1.3.4 坐标系	23
1.3.5 各坐标系之间的转换	29
1.4 航天器位置的空间表示	42
1.4.1 测站位置在轨道坐标系中的表示	43
1.4.2 航天器位置在轨道坐标系中的表示	44
1.5 实时定轨的特点和基本要求	45
第 2 章 二体问题	48
2.1 二体问题的航天器动力学方程	48
2.2 微分方程的解——六个积分表达式	51
2.2.1 动量矩积分(或称面积积分)	51
2.2.2 运动平面内的轨道积分	54
2.2.3 能量积分(活力积分)	60
2.2.4 第六个积分(开普勒方程)	63
2.3 椭圆运动的基本关系式	65
2.3.1 椭圆运动中各量之间的几何关系	66

2.3.2	位置矢量 $\mathbf{r}$ 和速度矢量 $\dot{\mathbf{r}}$ 的表达式	66
2.4	星历表计算	69
2.4.1	开普勒方程解算方法	70
2.4.2	航天器位置与速度的计算	79
2.4.3	航天器视位置及其他有关量的计算	82
2.5	其他常用公式	84
第3章	初轨计算的单位矢量法	92
3.1	由位置矢量和速度矢量计算轨道根数	93
3.1.1	计算六个开普勒根数的一般方法	93
3.1.2	适用于小偏心率的方法	97
3.1.3	适用于小倾角的方法	100
3.1.4	适用于小偏心率和小倾角的方法	102
3.2	表示 t 时刻 $\mathbf{r}$ 和 $\dot{\mathbf{r}}$ 的 f, g 方法	105
3.2.1	$\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}$ 对 $\mathbf{r}_0, \dot{\mathbf{r}}_0$ 的级数展开	105
3.2.2	f, g, f', g' 的封闭型表达式	111
3.3	几种传统的初轨计算方法简介	115
3.3.1	拉普拉斯方法	115
3.3.2	高斯方法	123
3.3.3	测角、测距、测速混合测轨数据初轨计算方法	136
3.3.4	多站同步测量数据的初轨计算方法	141
3.4	轨道计算中的单位矢量系统	149
3.4.1	i, j, k 单位矢量系统	149
3.4.2	Ω, Ω_1, k 单位矢量系统	150
3.4.3	Ω, Ω', W 单位矢量系统	150
3.4.4	P, Q, W 单位矢量系统	151
3.4.5	S, T, W 单位矢量系统	151
3.4.6	U, N, W 单位矢量系统	152
3.4.7	$\rho^*, \alpha^*, \delta^*$ 单位矢量系统(赤道坐标系)	153
3.4.8	R^*, S^*, φ^* 单位矢量系统	153

3.4.9	ρ^* 、 h^* 、 A^* 单位矢量系统(地平坐标系)	154
3.5	初轨计算的单位矢量法	155
3.5.1	传统初轨计算方法存在的缺陷	155
3.5.2	初轨计算的单位矢量法基本原理和 特点	157
3.5.3	初轨计算的无摄单位矢量法	157
3.5.4	初轨计算的有摄单位矢量法	167
3.5.5	初轨计算的改进无摄单位矢量法	169
3.6	初轨计算的单位矢量法的进一步推广	171
3.7	工程应用时值得注意的几个问题	177
第4章	航天器运动的受力分析及摄动力	184
4.1	航天器运动的受力分析	185
4.2	摄动运动方程及其基本解法	190
4.2.1	摄动运动方程的建立	190
4.2.2	摄动运动方程的几种表达形式	194
4.2.3	摄动运动方程的奇点问题及其处理 方法	200
4.2.4	摄动运动方程的基本解法	206
4.2.5	平均根数法	211
4.3	地球形状摄动	219
4.3.1	地球引力场的位函数	219
4.3.2	主要带谐项(J_2, J_3, J_4)的一阶解	223
4.4	大气阻力摄动	238
4.4.1	关于地球大气密度	239
4.4.2	大气密度分布的近似表达式	240
4.4.3	大气阻力摄动方程	243
4.4.4	大气阻力摄动的一阶解 σ_{22}	248
4.5	日月摄动	274
4.5.1	日月摄动函数	275
4.5.2	日月摄动的一阶解	279

4.6	太阳光压摄动	295
4.6.1	光压摄动方程	296
4.6.2	光压摄动的一阶解	299
第5章	改进的有摄单位矢量法	309
5.1	微分轨道改进的基本原理	309
5.2	观测数据对状态矢量 $\mathbf{r}$ 、 $\dot{\mathbf{r}}$ 的偏导数	312
5.3	状态矢量 $\mathbf{r}$ 、 $\dot{\mathbf{r}}$ 对瞬时根数 σ 的偏导数	318
5.4	瞬时根数 σ 对待估状态量 $\mathbf{x}$ 的偏导数	331
5.5	轨道改进的计算步骤	339
5.6	改进的有摄单位矢量法	352
5.6.1	基本原理	352
5.6.2	$\mathbf{r}_e$ 和 $\dot{\mathbf{r}}_e$ 对 $\bar{n}_0^{(m)}$ 的偏导数	359
5.6.3	改进的有摄单位矢量法的计算步骤	365
5.7	改进的有摄单位矢量法的推广	376
5.7.1	预备公式	376
5.7.2	单测距数据时轨道改进的条件方程	378
5.7.3	单测速数据时轨道改进的条件方程	380
5.7.4	仅有测距测速数据时轨道改进的条件方程	383
5.8	改进的有摄单位矢量法在工程应用中应注意 的几个问题	384
第6章	单位矢量法在常值系统误差求解方法中的应用探讨	390
6.1	测量与误差	390
6.1.1	误差的定义与分类	390
6.1.2	误差估计方法	391
6.1.3	无线电测量设备的误差分析	392
6.2	单位矢量法在基于轨道约束的误差模型最佳弹道 估计中的应用探讨	393
6.2.1	EMBT 自校准技术	394
6.2.2	测量元素为 ρ 、 A 、 h 时的轨道约束 EMBT 自校准公式	397

6.2.3 单位矢量法在基于轨道约束的 EMBET 方法中的 应用探讨	404
6.3 常值系统误差求解在轨道确定的单位矢量法中的 应用探讨	409
参考文献	415

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

1.1.1 引论

探索、研究、开发和利用地球大气层外宇宙空间及地球以外的天体是人类的梦想。1957 年 10 月 4 日苏联第一颗人造地球卫星的发射成功,揭开了人类航天史的新篇章。50 年来,航天技术迅速发展,航天器(包括各类卫星、飞船、航天飞机、探测器等)的应用也越来越广泛,对航天器轨道动力学的研究提出了越来越高的要求。特别是对航天器的高精度控制的需要,对定轨精度的要求越来越高,同时对轨道确定的实时性要求也越来越高。也正是工程上要求的不断提高,促使航天器轨道动力学(特别是轨道确定方法)不断发展,日臻完善,定轨精度不断提高。

从 1984 年我国第一颗地球同步静止试验通信卫星(“东方红”二号)工程起,我国对航天器的测控从陆上拓展到了海上,由陆上固定站单一测控发展到陆上固定站、(车载)移动站和海上测量船的综合测控,航天测量船承担了我国大量航天器发射任务的发射段(海上部分)及入轨段、转移轨道段(或运行段)的测控任务。几代“远望”人在轨道跟踪测量技术和轨道动力学研究领域作出了不懈的努力,与中国科学院紫金山天文台的科技人员一起共同研究、开发了轨道确定的单位矢量系列算法(UVM1、PUVM1、UVM2、PUVM2),以适应航天测控任务的不同需要,满足了各型号工程对海上测定轨精度日益提高的要求。该系列算法是在传统的拉普拉斯方法的基础上发展起来的。

1.1.2 定轨方法的分类

对于定轨方法的分类,从不同的角度有不同的分类。根据测轨数据量的多少(短弧段、单圈、多圈)以及定轨精度要求的不同,可以分为初轨确定和轨道改进两类;根据动力学方程的解算方法的不同,目前常用的有分析方法、数值方法和半分析半数值方法等;根据统计学模型的不同,目前常用的有序贯处理方法和批处理方法。轨道确定的单位矢量系列算法属于批处理分析方法,是一种半非线性测轨方法,其中UVM1、PUVM1、UVM2适用于初轨计算,PUVM2既适用于初轨计算,又适用于轨道改进。

航天测量船承担的任务主要有两类:一类是航天器发射阶段(包含入轨段)对运载火箭和航天器的测控任务;另一类是航天器入轨后转移轨道段或运行段对航天器的测控任务。当然,对于载人航天工程,还承担了载人航天器返回阶段的测控任务。对于航天器发射的入轨段以及运行段的近地点变轨段(远地点变轨段通常变轨后的测控时间较长)测控,一般可用于轨道计算的外测数据量很少,通常只有几十秒至几分钟,因此只能使用初轨计算方法;对于转移轨道段或运行段测控,通常测控时间相对较长(如地球同步卫星转移轨道远地点测控,其连续测控时间达数小时,甚至十多个小时;而对于近地轨道航天器的测控以及大椭圆轨道航天器的近地点段的测控,单弧段测控时间也只有数分钟至十多分钟,但只要不变轨,多段、多圈、多站数据是可以联合使用的),传统的初轨确定方法很难满足定轨精度要求,有时甚至出现不收敛而无法定出轨道的现象,只能采用轨道改进方法。当然,对于单弧段或单圈的测轨数据,尽管使用的方法是轨道改进方法,但从计算结果上看,它还是属于初轨。

1.2 计算单位和常数

在本书所论述的动力学问题中,必然要涉及到质量、长度和时间以及它们采用的单位。对于不同的时空尺度,采用不同的计算单位是很