



航 / 天 / 动 / 力 / 学 / 研 / 究 / 丛 / 书

# RENDEZVOUS AND DOCKING

# 交会对接



航天飞行动力学技术重点实验室 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

《航天动力学研究》丛书

# 交会对接

## Rendezvous and Docking

航天飞行动力学技术重点实验室 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

《航天动力学研究》丛书汇集了航天飞行动力学技术重点实验室在航天动力学领域开展科研试验、预先研究、学术交流、对外合作过程中所产生出的优秀成果。本书为丛书第二辑,以“交会对接”为主题,共收录21 篇论文,来源于神舟系列载人航天任务,尤其是我国首次交会对接任务,以及实验室与中科院空间科学与应用研究中心、西北工业大学航天学院、中国人民解放军装备学院、总参气象水文局、北京跟踪与通信技术研究所等合作开展的研究项目,内容涵盖载人航天的轨道确定及力学模型、轨道控制技术、轨道预报、碰撞规避技术等方面的理论分析结果和工程应用成果。

本书可供从事航天动力学技术研究的科研人员使用,也适合高校航天相关专业研究生使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

交会对接/航天飞行动力学技术重点实验室编著.

—北京:国防工业出版社,2012.4

(航天动力学研究丛书)

ISBN 978-7-118-08033-9

I. ①交... II. ①航... III. ①交会对接 IV.

①V526

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第050640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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 889×1194 1/16 印张 8 $\frac{3}{4}$  字数 253千字

2012年4月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价40.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 《航天动力学研究》丛书编审委员会

名誉主任 沈荣骏(院士)

主任 陈宏敏

副主任 麻永平 童斌

顾问 李济生(院士) 余梦伦(院士) 魏奉思(院士)

于起峰(院士) 李泽椿(院士) 吴一戎(院士)

陈炳忠 隋起胜 周建平 吴伟仁 刘林

秘书长 贺军

委员(按姓氏笔画排序)

万卫星(院士) 王赤 王飞雪 王劲松 平劲松

朱民才 李广云 李革非 张继贤 罗建军 周建华

房建成 孟桥 赵长印 胡军 胡松杰 皇甫堪

袁建平 郭树人 曹喜滨 葛林林(澳大利亚) 董光亮

韩崇昭 谢剑锋 廖新浩 濮祖荫

## 《航天动力学研究》丛书编辑委员会

主 编 唐歌实  
主 任 周 率  
编 辑 李 黎 刘荟萃 韩松涛  
李 颀 曹建峰 陈 略  
编 务 李 正 李刘强 裴绍彬

# 序 言

航天动力学是研究航天器和运载器在飞行中所受的力及其在力作用下的运动的学科。航天动力学是我国航天事业发展的一个重要支撑学科,随着载人航天、月球探测、交会对接和深空探测等航天任务的展开,我国的航天动力学研究取得了一个又一个的成就,也遇到了越来越多的挑战。航天动力学是一个需要持续推动、不懈探索的学术领域,需要广大航天科技工作者承担起历史赋予的使命,夯实基础,脚踏实地,开拓创新,推动我国的航天事业向着世界科技高峰不断攀登。

《航天动力学研究》丛书将提炼航天飞行动力学技术重点实验室在航天动力学领域开展科研试验、预先研究、学术交流、对外合作等活动过程中的优秀成果,以论文、研究报告等形式进行展示交流,这是该实验室在开放交流方面走出的十分重要的一步。该丛书拟设置十个专题:深空探测轨道测定与控制,交会对接,轨道与姿态动力学,深空探测信号处理,视觉导航与遥操作,航天任务规划与控制,空间天气航天应用,精密定轨,火星探测,小卫星探测与轨道测定。

《航天动力学研究》丛书的陆续出版,将为航天动力学领域的研究人员提供良好的展示与交流平台,并将大力促进科学研究成果尽快向我国航天工程应用的转化。它不仅是航天领域最新工程任务和科研技术进展的直播窗口,也是相关专业科技工作者学术工作的展示舞台,同时还是国内外科研机构相互学习的交流基地。

祖国航天事业的蓬勃发展赋予了我们光荣而艰巨的历史重任,希望《航天动力学研究》丛书能够推动航天动力学领域的发展,为祖国的航天事业做出贡献。

沈崇骏

2011年10月1日

# 前 言

2011年11月3日凌晨1时36分,已在轨运行541圈的天宫一号目标飞行器与运行30圈的神舟八号飞船在距离地面343km的轨道上实现了我国航天史上的首次空间交会对接。这次完美的“太空约会”标志着我国在突破和掌握空间交会对接技术上迈出了重要一步。

空间交会对接是继载人航天器发射并返回技术、空间出舱活动技术之后,载人航天的三大基本技术之一。它包括空间交会和空间对接两部分。空间交会是指两个或多个航天器在轨道上按预定的时间和位置以大致为零的相对速度相会,空间对接是指两个或多个飞行器相会后在结构上连成一个整体。空间交会对接是大型航天器在轨组装、轨道平台和空间站的补给、在轨空间站的航天员替换、航天器在轨维修、航天器回收、在月球和行星返回任务中在轨飞行器与着陆器的连接等任务的关键。

迄今为止,全世界共计进行了300多次空间交会对接活动,但只有美国和苏联/俄罗斯掌握了完整的空间交会对接技术。“天宫”与“神八”的太空“牵手”,以及后续的载人交会对接,意味着中国将成为继美国、俄罗斯后,第三个独立掌握航天交会对接技术的国家。

交会对接不论在理论上还是在技术实现上都相当复杂,涉及航天器测控、航天器自主导航、雷达成像、无线通信等多个学科。首次交会对接任务的圆满实施,体现了我国航天科技人员在相关领域所取得的科技成果和成就,是中华民族“问天之旅”新的里程碑。

北京航天飞行控制中心是我国的载人航天及深空探测飞行控制中心,承担交会对接飞控任务。航天飞行动力学技术重点实验室在任务中担纲解决精密定轨、精确控制、飞行任务规划等关键技术难题。交会对接任务重点在飞控、关键在飞控、难点也在飞控,其飞行控制具有如下特点:一、对航天器定轨预报技术提出新的挑战:天宫一号调相控制需要长期轨道预报,空间天气变化物理机制的复杂性,三轴对地飞行和连续偏航飞行的姿态变化,使得精确轨道预报难度极大;同时飞船远距离导引需频繁控制,导致定轨弧段短,使得定轨预报的精度很难提高;而且太阳活动高年的临近,对载人飞船这样典型的低轨道航天器轨道预报精度影响明显。二、轨道控制精度要求高,应急处置风险大:神舟八号远距离导引控制精度要求高,微小的控制误差可能导致导引终点精度很差,直接影响交会对接任务;并且飞船的姿态控制对轨道的影响还有许多很难准确预知的因素。三、双目标协同控制难度大:天宫一号、神舟八号协同飞行,两个航天器发射窗口相互关联,轨道面相互约束,太阳光照条件与地面测控条件相互制约等。针对这一系列关键技术难题,实验室开展了系统的预先研究和技术攻关,取得了系列成果并在任务中成功应用。

因此,《航天动力学研究》丛书第二辑即开展关于“交会对接”的专题研究,希望可以成为我国首次空间交会对接的成果展示窗口,促进科技人员间的相互交流和进一步的合作研究,促进相关技术发展。

航天飞行动力学技术重点实验室

2012年2月1日

# 目 录

高层大气密度模式的发展现状及其在载人航天工程中的应用 .....	唐歌实,周率,陈光明,等(1)
Analysis of Atmospheric Density Models Based on Orbit Decay .....	Li Xie, Zhou Lv, Tang Geshe, et al(9)
空间天气对载人飞船定轨预报精度的影响分析 .....	周率,唐歌实,李颀,等(13)
基于实时观测数据的大气密度模式修正及定轨预报验证 .....	苗娟,李颀,刘四清,等(19)
应用于载人航天的高层大气密度模型分析 .....	陈丽华,周率,孙凌峰,等(27)
中高层大气模型研究进展与初步研究 .....	李正,唐歌实,周率,等(32)
基于天基测量的飞船联合定轨精度分析 .....	王彦荣,魏小莹,何雨帆(40)
轨道机动模型在航天测控中的应用研究 .....	张宇,陈明,段建锋,等(46)
基于 Gauss-Jackson 时间正则化的解析变步长积分算法分析 .....	王健,张宇,马传令,等(54)
交会对接地面导引精度分析研究 .....	李革非,陈莉丹(60)
自主交会对接相对导航系统半物理仿真实验 .....	张仁勇,罗建军,马卫华(68)
航天器交会对接制导仿真模型研究 .....	刘涛,谢剑薇,颜华,等(75)
航天器轨道控制技术分析研究 .....	关鹏,王明迪(80)
引入姿态误差的中继预报研究 .....	刘勇,颜华,华莹(89)
轨道预报方法研究及任务验证 .....	颜华,刘勇(93)
空间目标碰撞预警规避系统设计 .....	李翠兰,唐歌实,胡松杰(99)
基于“当前”统计模型的机动目标跟踪 UKF 算法 .....	华莹(105)
深空交会对接任务中的同波束测量技术研究 .....	陈略,唐歌实,胡松杰,等(111)
一种有效的低仰角对流层折射修正算法 .....	段成林,马传令(117)
一种基于规则的航天任务智能规划方法 .....	周彬,陈险峰(121)
空间交会对接航天器发射窗口分析 .....	王宏,刘世勇(127)



# CONTENTS

Development and Application of Atmosphere Density Models in Manned Spaceflight Engineering .....	Tang Geshe, Zhou Lv, Chen Guangming, et al. (1)
Analysis of Atmospheric Density Models Based on Orbit Decay .....	Li Xie, Zhou Lv, Tang Geshe, et al. (9)
Influence of Space Weather on Orbit Determination and Prediction Precision of the Manned Spacecraft .....	Zhou Lv, Tang Geshe, Li Xie, et al. (13)
Atmospheric Density Calibration and Forecast Verification of the Orbit Determination Using the Real-time Satellite Observation .....	Miao Juan, Li Xie, Liu Siqing, et al. (19)
Analysis on Atmosphere Density Models of the Manned Spaceflight .....	Chen Lihua, Zhou Lv, Sun Lingfeng, et al. (27)
Thermospheric Density Models: Development and Primary Study .....	Li Zheng, Tang Geshe, Zhou Lv, et al. (32)
Precision Analysis of Orbit Determination for Spacecraft Based on TDRS .....	Wang Yanrong, Wei Xiaoying, He Yufan (40)
Orbit Engination Model Application and Research in Spaceflight Task .....	Zhang Yu, Chen Ming, Duan Jianfeng, et al. (46)
An Analytic Variable-step Integration Algorithm and Analysis Based on Gauss-Jackson Time Regularization .....	Wang Jian, Zhang Yu, Ma Chuanling, et al. (54)
The Analysis of Ground-based Far-range Guidance Endpoint Deviation .....	Li Gefei, Chen Lidan (60)
Hardware-in-the-Loop Simulation Experiment of Relative Navigation System for Autonomous Rendezvous and Docking .....	Zhang Renyong, Luo Jianjun, Ma Weihua (68)
Study of Spacecraft Rendezvous and Docking-guided Simulation Model .....	Liu Tao, Xie Jianwei, Yan Hua, et al. (75)
An Overview of Orbital Maneuver of Spacecraft .....	Guan Peng, Wang Mingdi (80)
Relay Track Forecast in View of Attitude Error .....	Liu Yong, Yan Hua, Hua Ying (89)
Methods Study of Orbit Satellite Prediction and Validation in Space Mission .....	Yan Hua, Liu Yong (93)
Collision Warning and Avoidance System Design for Space Objects .....	Li Cuilan, Tang Geshe, Hu Songjie (99)
A Maneuvering Target Tracking UKF Algorithm Based on the “Courrent” Statistical Model .....	Hua Ying (105)
Research on the Technology of Same Beam Interferometry in Space Rendezvous and Docking .....	Chen Lue, Tang Geshe, Hu Songjie, et al. (111)
A Fast and Efficient Algorithm of Tropospheric Refraction Correction at Low Elevation .....	Duan Chenglin, Ma Chuanling (117)
Advanced Planning and Scheduling Initiative Using Artificial Intelligence Resolution in Space Domain .....	Zhou Bin, Chen Xianfeng (121)
Analysis of the Launch Window for Spacecrafts in Space Rendezvous and Docking Mission .....	Wang Hong, Liu Shiyong (127)

# 高层大气密度模式的发展现状 及其在载人航天工程中的应用

唐歌实<sup>1,2</sup>, 周率<sup>1,2</sup>, 陈光明<sup>3</sup>, 李颀<sup>1,2</sup>

(1. 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094; 2. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094;

3. 中科院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

**摘要:** 高层大气阻力是低轨卫星轨道的主要扰动源, 高层大气密度模式误差是轨道预报的主要误差源, 因此, 高层大气密度模式的研究对提高载人航天轨道预报精度有着重要的意义。本文详细介绍了高层大气密度模式几十年的建立发展历程, 对模式的构建、精度及其在载人航天工程中的应用进行了详细分析, 并简要介绍了模式的改进方法。随着第 24 太阳活动周峰年的临近, 太阳活动和地磁活动都逐渐增强, 这会使得现有密度模式的误差进一步增大, 给即将开展的交会对接任务带来一定影响, 也使得大气密度模式成为载人航天空间站以及后续载人登月工程一个重要的研究内容。因此, 应该大力加强高层大气密度模式的研究。

**关键词:** 高层大气密度; 模式; 载人航天; 发展

## 1 引言

高层大气阻力对于低轨卫星的轨道和寿命有着严重影响, 大气阻力是低轨卫星轨道的主要扰动源, 因此, 卫星设计、轨道确定、预报和调整都需要准确的大气密度参数, 对高层大气密度的研究有着重要的应用价值。

我国自 1992 年启动载人航天这一重大工程以来, 已成功实施了四次无人和三次载人航天飞行任务。通过采用高精度的时间与坐标系统, 增加天基测控手段, 改进相应的测定轨技术等, 使我国近地航天器定轨精度突破了百米量级, 取得了重大进展。后续载人航天任务将继续开展目标飞行器与飞船的空间交会对接以及载人空间站计划, 对定轨和轨道预报精度提出了更高要求。而大气密度模式不准确带来的大气阻力摄动的误差, 是影响低轨航天器轨道预报精度最主要的误差源。而我国当前在航天测控中采用的高层大气密度模式都是国外 20 世纪七八十年代公开发布的模式, 随着第 24 太阳活动周峰年的临近, 模型的精度会大大降低; 同时航天活动的发展, 对轨道精度的要求越来越

高。开展密度模型和阻力模型精细化研究, 是提高近地航天器轨道精度需要研究的重要内容。

然而, 高层大气受多种因素共同影响, 变化十分复杂, 目前人们对其机理尚未完全掌握。在此背景下, 尽管大气密度模式经历了 30 多年发展, 但模式精度始终没有本质性的提高, 尤其是太阳地磁活动扰动期间, 密度偏差往往可以超过密度值本身。随着第 24 太阳活动周峰年的临近, 太阳活动和地磁活动都逐渐增强, 这一方面会引起高层大气密度增加, 另外, 还将引起高层大气密度扰动活动的增多。密度的增加会导致卫星阻力增大, 而高层大气密度扰动活动的增强会引起密度模式误差增大, 并将进一步带来轨道预报误差的增大。

本文将对高层大气密度模式的发展历史和现状进行详细回顾, 对密度模式在航天中的应用进行仔细分析, 对密度模式改进的方法进行初步探讨。

## 2 模式的发展

### 2.1 经验模式

自从 1957 年 Sputnik 卫星上天以来, 人们发现卫星轨道存在着由高层大气阻力引起的扰动, 自此开始

了高层大气密度的研究,并着手建立大气密度模式。

大气密度模式经历了逐步发展的过程,模式基本为半经验模式,分为只随高度变化的一维模式和同时考虑高度、经度、纬度、季节、周日等因素的三维模式,包括标准大气和参考大气。

早期的大气密度模式只考虑了大气密度随地面高度的变化,是球对称、标高为常数的一维大气模式;这类模式可以称为“一维大气密度模式”,常用的有指数模式,该模式假定大气密度随高度按指数率下降,大气密度取决于密度标高,而密度标高可根据外层温度由大气表查得(例如 1972 年 COSPAR 国际参考大气表),外层大气的温度由太阳 10.7cm 辐射流量和地磁活动指数计算;这种模式一般只能在对计算精度要求不高的情况下使用。

后来发展起来的很多模式不仅考虑了大气密度随高度的变化,还考虑了大气密度随季节、纬度、地磁活动和太阳活动的变化,以及周日变化和其他周期性的变化,这类模式称为“三维大气密度模式”。许多实验证明,所有这些大气密度的变化都是通过使大气温度发生变化引起的,即温度的垂直分布决定了大气密度的垂直分布。因此,在各种大气模式中往往用高层大气的温度作为大气密度的表征。1000 km 以上的高层大气温度称为“顶层温度”,顶层温度与太阳的 F10.7 射电流量有很好的线性相关性,所以一般用 F10.7 指数的变化来反映顶层温度和大气密度的变化。另外,磁暴期间有很强的磁层能量由高纬地区注入高层大气,引起高层大气温度和密度的变化,地磁活动引起的高层大气密度变化一般幅度较大,持续时间较短,因此在大气模式中还常常利用 Ap 或 Kp 指数来表征磁层能量的输入。

标准大气一般表示在中等太阳活动条件下,从地球表面到 1000km 高度中纬区域理想化的稳态地球大气平均状态的剖面。代表模式包括:美国标准大气 1962、美国标准大气增补 1966 和美国标准大气 1976。由于表示大气平均状态的标准大气不能满足使用要求,在定轨预报时多采用参考大气。代表模式包括:CIRA(国际参考大气)系列、Jacchia 系列、DTM 系列和 MSIS 系列等。

在 20 世纪 70 年代前后建立的多种半经验三维大气密度模式中,最著名的为 Jacchia 1970(J70)模式以及其改进版 Jacchia 1971(J71)模式,该模式假定高层大气处于扩散平衡态,并满足理想气体状态方程,密度剖面受到大气温度的控制,该模式将大气密度表示成关于时间、高度、纬度、经度、太阳辐射通量和地磁活动指数等参量的函数关系式,太阳活动指数通常使用 F107 指数,而地磁指数通常采用 Ap 指数。

在此后的 40 年里,一方面卫星轨道数据逐渐增加,另一方面,人们利用质谱仪和加速度计的观测直接获取高层大气密度信息。随着大气密度探测数据不断丰富和迅速增加,研究者们分别利用不同的数据源建立了多种经验模式,如 Jacchia-77、DTM-94、DTM-2000、MET、MSIS-86、MSIS-90 和 NRLM-SISE-00 等模式。虽然这些模式大大丰富了人们对大气密度变化规律的认识,然而令人困惑的是,与 J71 模式相比,这些模式的精度并没有显著的改善,均方根误差始终处于 15%~20% 之间;尽管人们不断地使用更多精度更高的数据对模式参数进行改进,但“15%”的误差似乎成为大气模式“精度的极限”,参见图 1。

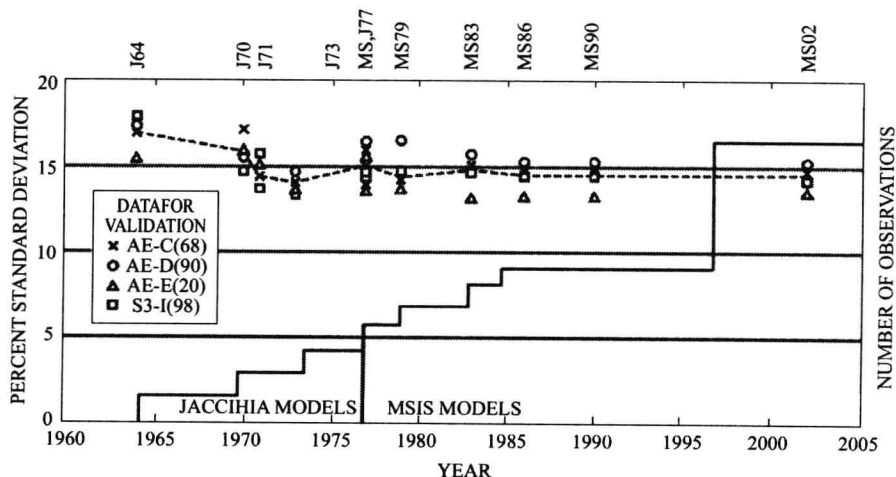


图 1 高层大气密度经验模式误差随时间的变化

(实线表示建模所用数据的数量,数据点表示卫星数据与模式的均方根误差,虚线表示模式与数据的平均均方根误差)

国外已经有研究者开始寻找制约模式精度的瓶颈。从本质上分析,由于 90km 高度以上高层大气变化机制非常复杂,建模数据的精度也有限,无论哪种模式都不能保证在任何情况下总能稳定地表征大气密度的实际变化。进一步分析模式误差的原因,一个可能的因素就是太阳辐射指数。现有的大气模式都采用太阳 10.7cm 辐射流量 F10.7,但事实上这种波长的辐射基本不对大气加热;相反地,那些对大气有加热效应的辐射在穿过大气层的过程中被吸收了,地面上测量不到,因此只能借用 F10.7 指数间接地描述太阳辐射对大气的加热程度。另外,在使用 MSIS 系列基于统计的中性大气模式过程中,一些学者发现 MSIS 系列模式可以较好地描述长时间太阳 EUV 辐射带来的高层大气密度变化情况,但低估了短时下强磁暴造成的大气密度变化。而强磁暴期间,由于高能带电粒子沉降引起的动力学加热和源于磁层的电场耗散引起的焦耳加热,造成极盖区和极光带高层大气强增温,并驱动大尺度风体系,通过风场进行热传输,形成全球范围的高层大气温度增加,进而在短时间内引起高层大气密度和成分的大扰动。综合来看,受建模机制和样本分布的限制,几乎所有的模式在刻画局部大气的细节变化时都存在明显不足。图 1 给出了常用大气密度模式的均方根误差,由图可知这些模式都存在着 15% 左右的偏差。从实测数据与模式的对比研究来看,目前的模式还存在不少缺陷。

## 2.2 数值模式

数值模式是利用一套闭合的流体力学微分方程组来描述大气的状态,中性大气的模式常常与电离层模式相互嵌套。

早在 20 世纪 60 年代,科学家们就开始研究对高层大气的模拟问题,如 Cole (1962),最早建立的全球模式是 Kohl - King 模式(1967)该模式在计算时仅仅考虑了压强分布作为动量源(采用的是当时从卫星数据推导出的半经验热层密度模式),计算也是采用相当简化的 Navier - Stokes 完备方程。早期的模式仅仅是二维的,只能模拟热层稳态下的风场和温度场,还无法模拟热层的时变响应以及热层对能量输入扰动的响应,尤其是不能模拟对地磁扰动的时变响应。到 20 世纪 80 年代,科学家在二维模式的基础上,开始研

究热层时变三维模式。科学家们采用不同的方法来解决热层的运动方程,因此也建立了不同的热层模式。在国际上有较大影响模式的主要有两个系列:英国伦敦大学开发的 UCL 模式 (Fuller - Rowell and Rees, 1980) 和美国国家大气研究中心的 NCAR - TIGCM 模式 (Roble and Ridley, 1994)。

随着几十年数值模式的发展,数值模式已经逐渐成熟,开始应用于空间天气预报业务。数值模式更加全面地考虑了高层大气的变化机制和物理内涵,在描述磁暴等特殊扰动事件时具有一定的优势,然而其计算量非常大,需要专门的机器来运行,另外,边界条件也需要实测数据的引入,因此,该类模式一般用于理论研究和特殊事件分析,目前还没有看到用于卫星轨道预报业务方面的报道。

## 2.3 模式改进方法

近些年来,卫星定轨业务的需求迫使研究者寻求大气密度模式改进的方法。在提高模式精度方面,主要有指数融合、动态改进和数据同化三种途径。

指数融合,是指将大气模式的输入参数中的某些表征太阳活动、地磁活动的指数替换为等效的一个或多个指数以提高模式精度的方法。比如,有学者将 E10.7 指数替代 F10.7 指数为模式的输入,发现在 F10.7 指数小于 160 的情况下,可以有效地提高模式的精度。美国空军司令部太空分析中心的研究者则利用多个指数建立了 JB2006 (Bowman 等, 2008)、JB2008 (Bowman 和 Tobiska, 2008) 模式。JB2006 模式是在 CIRA72 模式 (Jacchia, 1972) 的基础上,采用了 3 种太阳活动指数来代替传统的 F107 指数建模,使得模式精度明显改善,在 400km 高度,地磁活动平静期的模式均方根误差由 16% 降到 10%。JB2008 模式则是在 JB2006 模式的基础上,再次增加了新的太阳活动指数 Y10.7,并且采用了新的地磁指数 Dst。

动态改进的方法是利用实时数据和准实时的密度数据对现有模式参数进行修正。其中密度数据既包括利用卫星探测仪器直接观测到的数据,还包括利用加速度计和轨道演化资料反演得到的密度数据。欧空局 Doornbos 等在 2010 年利用 GRACE 卫星的大气密度数据对 NRLMSISE00 模式进行实时修正,模式预测精度有明显提高,在磁暴期精度提高可达 10%,如图 2 所示,标准偏差由 25% 减小到 15%。

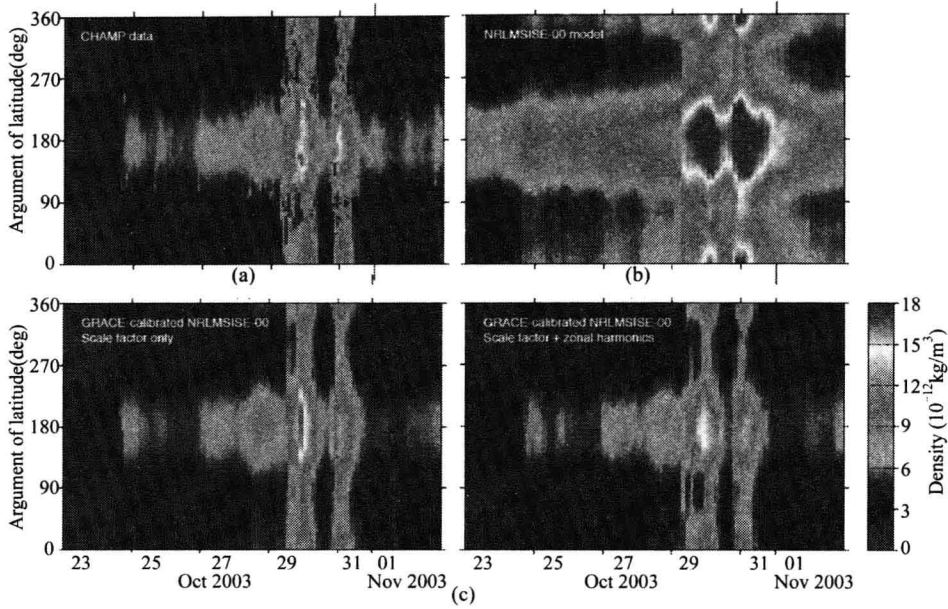


图2 2003年10月份一次大磁暴期间CHAMP卫星数据与修正模式的比较

(a) CHAMP 卫星的密度观测数据; (b) NRLMSISE00 模式的计算结果;  
(c) 利用 GRACE 卫星测量的密度数据对 NRLMSISE00 模式修正后的结果。

在实际定轨应用中,国内沿用国外公开发布的大气密度模式。但对改进模式应用于定轨预报,则刚处于起步阶段。紫金山天文台在20世纪90年代中期在DTM模式基础上开展过大气密度模式动态测定的研究工作,获得了与当时国际上最新模式(MSIS90)相当的精度;北京航天飞行控制中心与中科院空间中心以及紫金山天文台合作,开展了利用实测大气密度数据修正大气密度模式用于轨道预报的分析工作,发现利用实测大气密度数据能有效提高轨道预报精度。

数据同化方法是在大气数值预报中使用的成熟方法,是在统计方法(包括非线性最小二乘拟合、Kalman滤波等方法)或者变分方法的基础上,将观测数据同化到模式中去,让模式对大气的状态有最优估计,以提高模式的精度。

### 3 大气密度模式在载人航天工程中的应用

#### 3.1 大气密度模式在载人航天工程中应用的现状

载人飞船运行轨道高度在200km~400km范围内,在此轨道高度大气阻尼的影响较为显著。飞船

摄动量级分析如表1所列。

表1 飞船摄动量级统计表

摄动项	地球非球形	大气阻力	日月引力	太阳光压
摄动量级	约 $10^{-3}$	$10^{-5} \sim 10^{-6}$	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	约 $10^{-8}$

在上述考虑的摄动因素中,保守力(地球非球形引力、日月引力)均能够精确计算,对于大气阻力和太阳光压这两类耗散力,太阳光压对低轨航天器影响较小,且长期累积效应不明显(见表1)。因此,大气阻力是载人飞船最主要的耗散力,准确考虑飞船的大气摄动十分关键。

轨道计算与预报中一般采用经验大气模式计算大气密度。自1970年以来,人们通过处理各种类型的资料建立了很多著名的大气模式,如Jacchia系列、DTM系列,MSIS系列,这些模式在卫星的定轨和预报工作中发挥着重要作用。但由于高层大气变化非常复杂,而且建模资料的精度与时空分辨率有限,使得模式的精度普遍不高,目前还没有哪一个模式能够对高层大气进行全面、精确的刻画。

### 3.2 对轨道确定的影响

由于大气阻力与航天器的表面材料特性、航天器结构及姿态等因素密切相关,因此属于表面力的范畴。大气阻力加速度如下:

$$\mathbf{a}_{\text{drag}} = -\frac{1}{2}\rho\left(\frac{C_d A}{m}\right)\mathbf{v}_r\mathbf{v}_r \quad (1)$$

式中: $\rho$  为大气密度; $m$  为航天器质量; $C_d$  为阻尼系数; $\mathbf{v}_r$  为航天器相对大气的速度矢量; $A$  为航天器在速度方向的截面积。由式(1)可见,大气密度是计算飞船阻力的一个关键因子。密度模式的误差将直接代入阻力加速度计算,进而影响载人飞船的定轨预报精度。因此,要提高大气阻尼摄动模式的精度,一方面要获取精确的弹道系数( $C_d A/m$ ),另一方面还要有精确的大气密度值。

在精密定轨领域,大气阻尼摄动模式精度的改进一般是通过在定轨过程解算弹道系数,来吸收弹道系数偏差和大气密度误差引起的阻尼摄动误差的平均效应,但这种方式对大气密度误差的不规则变化引起的大气阻尼摄动误差则几乎无能为力;而且这种单一的参数解算一般也需要一定的观测条件支持,很难通过短弧段的数据得到一个好的结果。

在载人航天工程中一般采用经验的大气密度模式,较为常用的主要包括 Jacchia 系列、DTM 系列和 MSIS 系列。由于人们对高层大气变化的物理机制机理尚未完全了解,上述常用的大气密度模式主要是根据卫星阻力资料、质谱仪资料、地面非相干散射雷达资料以及火箭直接测量的资料拟合得到的经验模式,因此各模式之间存在一定差异。对 500 km 以下高度的低轨道航天器,目前的大气密度模式在太阳活动平静期至少有 15% 的误差;而在磁暴期间,密度偏差甚至可以超过 100%。

图 3 为神舟二号和神舟四号任务留轨期间,实测大气密度与 MSIS 模式计算结果比较。其中 2001 年 2 月 16 日为小扰动( $A_p$  日均值约 30),2003 年 2 月 21 日为较强地磁扰动, $A_p$  日均值达到了 300 左右。小扰动时(图(a))误差在 50% 左右,较强地磁

扰动时(图(b))误差达到约 100%。可见,在空间活动较为活跃的时期,大气密度模式存在明显的误差。

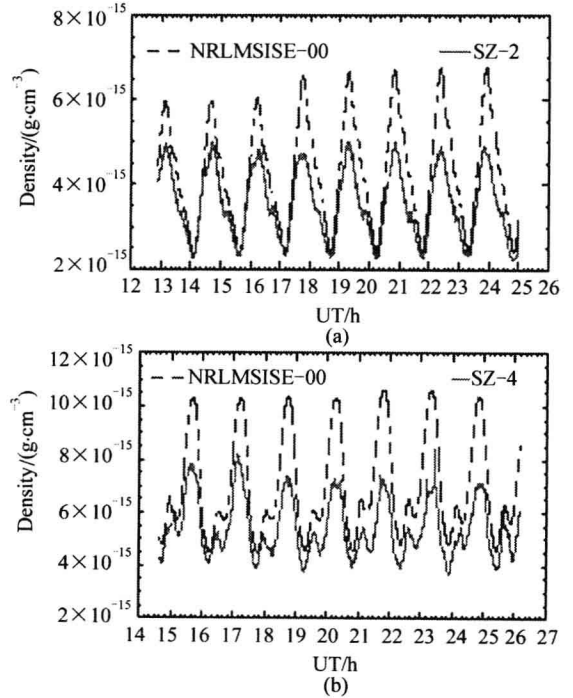


图3 神舟飞船留轨期间实测大气密度与模式计算结果的比较

(a) 2001年2月16日;(b)2003年2月21日。

现有研究和统计数据表明,在我国已经完成的七次载人航天飞行任务中,高层大气密度直接影响轨道确定和预报的精度,并且这种影响在太阳活动期与平静期存在明显的定轨差异(如图4所示)。图4给出了神舟任务实施过程中,不同空间环境条件下的定轨精度。在神舟四号任务期间,大气环境较差(处于弱扰动期);而在神舟七号任务期间,大气环境则非常平稳(太阳活动平静期);对比图4中间的一条偏差曲线可见,神舟四号飞船的迹向轨道偏差(图左)在 100m 范围内,而神舟七号飞船的迹向轨道偏差(图右)则在 50m 以内,由图4定轨残差可以看出,二者的整体偏差达到 1 倍左右。表明在太阳活动峰值年份,大气密度影响的轨道预报等测控技术问题将成为影响载人航天任务效果甚至成败的关键因素之一。

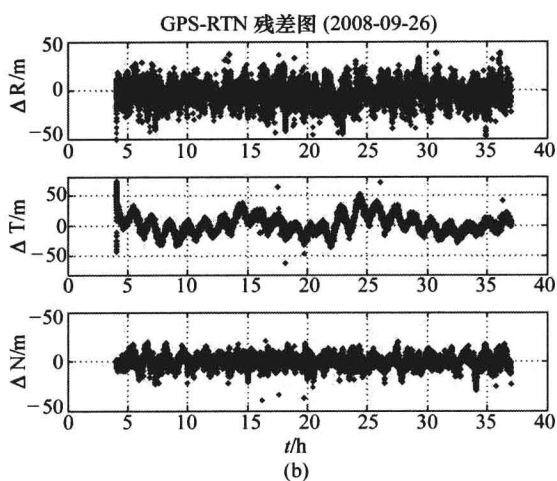
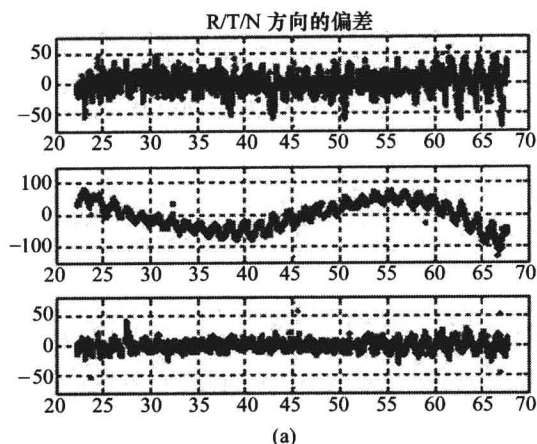


图4 不同空间环境条件下定轨精度比较  
(a) 神舟四号;(b) 神舟七号。

### 3.3 对轨道预报的影响

在轨道预报中,由于没有弧段约束来解算参数,只能用大气密度模式和力模型来保障轨道预报精度,因此大气密度模式的精度是影响轨道预报精度的一个重要因素。图5分别给出了大气模式偏差10%、20%、50%和100%对轨道预报精度的影响。由图可见,对应不同的大气密度模式误差,24h的轨道预报偏差分别达到2500m、5000m、12500m、25000m左右。

### 3.4 国外航天工程中应用的大气密度模式

目前在精密定轨领域,国外普遍采用的大气密度模式主要有:Jacchia系列、DTM系列以及MSIS系列。因为大气密度模式不能精确地反映高层大气的动力学变化,大气阻力成为影响轨道预报精度的

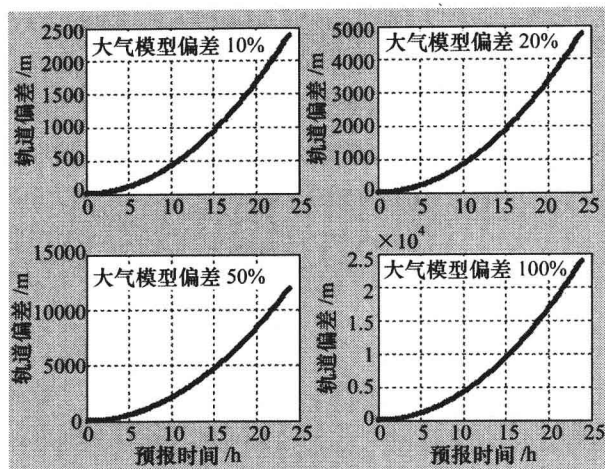


图5 不同大气模式偏差对轨道预报精度的影响

最主要误差源,且该误差在轨道预报中随时间平方发散。由于大气密度模式本身至少存在15%左右的误差,因此将显著降低轨道预报精度。为提高轨道预报精度,国外持续开展着高层大气模式的研究,通过增加新的观测资料、改进建模方法,不断发展出新的大气模式。

近年来国外有研究者注意到,现行的太阳辐射和地磁指数(F10.7和Ap)可能是制约模式精度的瓶颈。美国Tobiska、Bowman等人用E10.7和Dst取代之,并以Jacchia71模式为基础构建了JB2006、JB2008大气模式,据国外文献报道,这两个模式在400km处平静地磁条件下模式精度首次达到10%,是近年来大气模式研究一个较大的突破。此外,(2002年8月美国空军空间作战实验室(Air Force Space Battle lab)历时18个月,利用一系列低轨定标卫星的阻力数据,建立了近实时的高精度卫星阻力模式(High Accuracy Satellite Drag Model)(代码未公开),旨在建立一个“大气模式短期动态修正模式”,利用美国的空间监视网的数据对大气模式进行修正,并用于3天内的全球大气短期预报,从而提高卫星轨道的预报精度。该计划放弃了对大气模式精度在长时间跨度上的改进,转而对近期的实测资料对短期内的大气进行修正,使其满足跟踪、编目、甚至战时的需要。HASDM模式通过定标卫星的阻力数据,利用动力学大气定标DCA(Dynamic Calibration Atmosphere)算法估计大气密度的周日变化及半周日变化,并将大气密度修正表示为纬度、地方时以及高度的函数。此外,HASDM利用时间序列

预报滤波器将太阳极紫外辐射指数(E10.7)、地磁指数( $A_p$ )与DCA密度修正参数结合起来,从而得到较为完备的修正模式。HASDM模式使定轨误差(rms)降低约32%,预报1天的误差降低约25%。

## 4 总结与探讨

高层大气受多种因素共同影响,变化十分复杂,目前人们对其机理尚未完全掌握。尽管大气密度模式经历了40多年发展,但模式精度始终没有实质性的提高,大气密度模式误差已经成为制约近地航天器轨道预报精度的“瓶颈”问题。

过去大气模式研究主要围绕长期资料、全球大气建模,旨在描述高层大气的平均状态及大尺度变化,而对大气的局部特征和短期变化规律的刻画还很不充分,这是制约模式精度提高的关键所在。

随着第24太阳活动周峰年的临近,太阳活动明显增强,地磁扰动时间逐渐增多,低轨道大气环境的扰动愈加频繁激烈,大气密度模式的误差也将逐渐增大,尤其在地磁扰动期间,大气密度模式的误差会对轨道预报的精度带来严重影响。

作为“载人航天”二期工程第一阶段的航天器空间交会对接任务,计划于2011年至2013年实施,此时将处于第24太阳活动周的上升期和峰值年份。我国自主的载人空间站工程计划于2020年实施,其轨道高度340km~400km、倾角40余度,设计运行8~10年,将经历下一个太阳活动周期的整个峰年及谷年,届时将对轨道预报精度提出更高的要求。

高层大气密度模式是制约低轨航天器轨道预报精度的最主要因素,交会对接任务、后续载人航天空间站计划及载人登月工程均对300km~400km高度的轨道预报有很高的要求,而这些卫星由于面积质量比很大,大气阻力的影响十分严重,急需建立该轨道高度高精度的高层大气密度模式。

国外的科研人员已经开展了很多改进高层大

气密度模式的研究工作,并取得了很好的效果。而当前,我国在高层大气密度模式研发和修正方面的研究还很缺乏,在卫星定轨和预报业务中主要采用国外既有的模式,其精度不高。因此,应该大力加强大气密度模式的专项研究。

## 参考文献

- [1] Cole K D. Joule heating of the upper atmosphere. *Aust. J. Phys.*, 1962(15): 223-235.
- [2] Kohl and King. Atmospheric winds between 100 and 700 km and their effects on the ionosphere, *J. Atoms. Terr. Phys.*, 29, 1045-1062, 1967.
- [3] Jacchia L G. Atmospheric models in the region from 110 to 2000 km, in Stickland, A. C. (ed.) CIRA, 1972. Akademie-Verlag, Berlin.
- [4] PICONE J M, HEDIN A E, DRAB D P, et al. Enhanced empirical models of the thermosphere, *Physics and Chemistry of the Earth Part C*. 2000, 25(5-6), 531-542.
- [5] Marcos F. New satellite drag modeling capabilities. 44th. AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 6, AIAA 2006-470, Reno, Nevada. 9-12 January 2006.
- [6] Tobiska W K. E10.7 use for global atmospheric density forecasting in 2001, AIAA/AAS Astrodynamic Specialist Conference and Exhibit 5-8 August 2002, Monterey, California.
- [7] Storz M F, Bruce R. Bowman and Major James I. Branson, High Accuracy Satellite Drag Model (HASDM), AIAA/AAS Astrodynamic Specialist Conference and Exhibit 5-8 August 2002, Monterey, California.
- [8] Bowman B R, Tobiskab W K, Marcosc F A, et al. The JB2006 empirical thermospheric density model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 2008, 70, 774-793.
- [9] Jacchia L G. New static models of the thermosphere and exosphere with empirical temperature profiles. *Smithsonian Astrophysical Observatory Special Report* 313, 1970.
- [10] Berger C, Biancale R, et al. Improvement of the empirical thermospheric model DTM: DTM-94-comparative review on various temporal variations and prospects in space geodesy applications. *Journal of Geodesy*, 1998, (72): 161-178.
- [11] Roble R G, Ridley E C. A thermosphere-ionosphere-mesosphere-electrodynamics general circulation model (TIME-GCM): Equinox solar cycle minimum simulations (30-500km). *Geophys. Res. Letters*, 1994(21): 417-420.
- [12] Vetter J R. Fifty years of Orbit Determination; Development of Modern Astrodynamic Methods[J], Johns Hopkins APL Technical Digest, 2007, Vol27(3): 239-252.



- [13] 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京: 解放军出版社, 1995.
- [14] 李济生. 航天器轨道确定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [15] 朱民才, 唐歌实. 载人航天轨道确定、轨道控制及任务规划[M]: 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [16] 汪宏波. 星载加速仪在高层大气研究中的应用[D]. 南京: 中科院紫金山天文台, 2009.
- [17] 刘林, 张强, 廖新浩. 人工精密定轨中的算法问题[M]. 北京: 中

国科学(A辑), 1998, 28(9): 848-856.

### 作者简介

唐歌实, 1969年出生, 四川内江人, 研究员, 航天飞行动力学技术重点实验室主任。主要研究方向为航天测控、精密定轨及深空探测测定轨等。

E-mail: afdl\_bacc@163.com Tel: 010-66363130

## Development and Application of Atmosphere Density Models in Manned Spaceflight Engineering

Tang Geshi<sup>1,2</sup>, Zhou Lv<sup>1,2</sup>, Chen Guangming<sup>3</sup>, Li Xie<sup>1,2</sup>

(1. Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics Laboratory, Beijing 100094;

2. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094;

3. Center for Space Environment Research and Forecast, Beijing 100190)

**Abstract:** The atmosphere resistance is the main disturbance of LEO satellites and mostly orbit prediction error come from the error of atmosphere density models, so it is important to improve the prediction precision by researching the models. The development history of the models in several decades are particularly introduced in the paper for their establishment, precision, application in manned spaceflight engineering and gave the improving methods briefly. The activities of the Sun and geomagnetism are gradually enhanced with the coming of peak year of the Sun's 24th activity circle and the error of models will get bigger accordingly to affect the ongoing rendezvous and docking missions as well as the following manned space station and manned lunar landing engineering. So the research on atmosphere density models become essential for manned spaceflight engineering.

**Key words:** Atmosphere density; Model; Manned spaceflight; Development