



国防科技图书出版基金

空间目标轨道数据应用

——碰撞预警与态势分析

陈磊 白显宗 梁彦刚 著

Orbital Data Applications for
Space Object

Conjunction Assessment and Situation Analysis



国防工业出版社



国防科技图书出版基金

空间目标轨道数据应用 ——碰撞预警与态势分析

Orbital Data Applications for Space Object
——Conjunction Assessment and Situation Analysis

陈 磊 白显宗 梁彦刚 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

空间目标轨道数据应用:碰撞预警与态势分析 / 陈磊,白显宗,梁彦刚著. —北京:国防工业出版社, 2015. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 09794 - 8

I. ①空... II. ①陈... ②白... ③梁... III. ①航天器轨道 - 数据处理 IV. ①V556.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 292544 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 710 × 1000 1/16 印张 19 1/4 字数 356 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 88.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作

需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

空间目标泛指在轨的航天器、火箭箭体、空间碎片等。相对于自然界产生的微流星体而言,空间目标均是由人类制造的。因此人类航天活动越频繁,产生的空间目标数量就越多,发生空间碰撞的可能性也越大。为此,美国国家空间政策在指导方针中专门单列一条,即维护空间环境,负责任地使用空间。在该条目的详细解释中:首先规定了美国政府为最大程度减少空间碎片,维护空间环境,使各方负责任、和平、安全地利用空间,所需担负的责任;其次强调推动制定空间碰撞预警措施。我国政府也在持续坚定地推行相关维护空间环境的政策与措施。

但是空间目标的增多是不可避免的,各项减缓措施只能使空间目标增长的速率减慢。碰撞预警与机动规避是航天大国必须要深入研究和有效实施的解决措施。而碰撞预警研究的基础是空间目标监视所获得的空间编目数据,包括空间目标的基本信息、轨道信息、特征信息。如何充分发挥数据的作用,全面深入地挖掘数据背后的信息,是提升碰撞预警能力的关键。更进一步,尽管每个空间目标严格按照轨道力学在轨运行,但大量空间目标的综合运动将是一种近似无序的运动,如何从大量编目数据中找到其内在规律,也是十分具有挑战性的问题。

空间目标轨道数据是空间编目数据的重要组成,其综合应用包括碰撞预警、轨道异常和空间事件检测、轨道误差分析和精度改进、空间碎片环境与流量分析等。利用轨道数据进行计算分析,可以获取空间目标当前及未来一段时间的空间位置、速度等信息。这不仅为了解空间目标分布奠定了基础,而且为在轨航天器碰撞预警与机动规避提供有力支撑。长时间积累的空间目标编目数据可以给出空间目标轨道的历史变化过程。对这类数据进行分析,可获取隐藏在轨道数据背后的一些规律,如航天器机动变轨事件、碎片流量变化特性等。这些规律的创新研究将拓展空间态势分析的深度和广度,提升掌握空间目标在轨特性的能力。

作者在空间目标轨道力学、碰撞预警和空间态势分析领域进行了多年研究工作,并于2010年出版了专著《空间目标轨道力学与误差分析》,从误差的角度,对空间目标在轨运行的轨道力学、定轨方法、误差特性及应用等方面进行了研究。本书在其基础上,进一步论述空间目标轨道数据在目标碰撞预警和空间态势分析中的应用及相关的理论与方法。全书共分为8章:第1章概要介绍空

间目标轨道数据的来源、类型与用途,重点介绍空间目标轨道数据在目标碰撞预警和空间态势分析中的应用情况;第2章对空间目标轨道预报误差进行综述,给出基于轨道模型的预报误差传播方法和基于相对运动理论的轨道误差分析方法;第3章基于历史轨道数据进行误差分析,介绍轨道预报误差的周期特性,并引入泊松级数进行误差拟合;第4章介绍空间目标接近分析中常用的解析方法和数值方法;第5章通过接近距离的分解,推导圆轨道情形和一般轨道情形下几种碰撞概率的显式表达式,将碰撞概率表示为接近距离或接近几何关系的显式函数,并分析显式表达式的误差和适用范围;第6章在碰撞概率显式表达式的基础上,对碰撞概率的灵敏度、最大碰撞概率、碰撞预警的漏警概率和虚警概率、考虑多因素的碰撞风险综合评估方法等问题进行深入研究;第7章给出几种基于历史轨道数据的轨道异常与空间事件检测方法,并对方法进行评估;第8章研究基于轨道数据的空间碎片环境与流量问题,并采用 TLE 作为数据源验证环境模型的正确性。

本书可供从事航天器动力学、航天器测控、空间目标监视、空间态势感知和空间碎片研究的工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业研究生的辅助教材。

本书是集体智慧的结晶。在本书的编著过程中,韩蕾、张涛涛、郝嘉、曹玉辉均付出了辛勤的工作,在此表示衷心的感谢。

由于作者的学识和水平有限,书中难免有错误和不妥之处,读者有何批评指正意见,请与作者联系(chenl@nudt.edu.cn),作者将不胜感谢。

陈磊 白显宗 梁彦刚

于长沙国防科技大学

2014 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数据来源——空间目标监视系统	3
1.1.1 空间目标监视	3
1.1.2 空间目标监视系统	4
1.1.3 国外空间目标监视网	6
1.2 数据类型——空间目标编目数据	7
1.2.1 空间编目数据基本信息	7
1.2.2 编目数据的轨道模型	8
1.2.3 美国发布的编目数据	9
1.3 数据用途——碰撞预警与态势分析	10
1.3.1 数据应用的方法	10
1.3.2 碰撞预警	12
1.3.2 态势分析	17
第 2 章 空间目标轨道预报误差传播	19
2.1 坐标系的定义	19
2.2 空间目标轨道预报误差综述	20
2.2.1 轨道预报误差的分类	20
2.2.2 基于轨道模型的误差外推	23
2.2.3 与高精度轨道预报结果对比	23
2.3 协方差分析描述函数法	24
2.3.1 线性系统协方差分析	24
2.3.2 非线性系统协方差分析	25
2.3.3 基于高斯分布的描述函数	26
2.3.4 协方差描述函数的轨道应用	29
2.4 基于相对运动理论的轨道误差分析	41
2.4.1 基于代数法模型的初始误差传播	42

2.4.2	基于几何法模型的近圆轨道误差相关特性分析	61
第3章	基于历史轨道数据的误差分析	69
3.1	基于历史轨道数据的误差分析与应用综述	69
3.1.1	基于历史数据的初始协方差分析	70
3.1.2	基于历史数据的协方差演化函数拟合	70
3.1.3	利用历史数据提高轨道长期预报精度	72
3.2	考虑周期特性的误差数据生成	73
3.2.1	空间目标的选择	73
3.2.2	误差数据的生成	73
3.3	误差数据的预处理	76
3.3.1	误差数据的二维分组	76
3.3.2	误差数据异常值检测	77
3.4	考虑周期特性的误差拟合函数形式的确定	78
3.4.1	轨道根数误差与轨道位置误差	78
3.4.2	C-W 方程的误差传播结果	79
3.4.3	泊松级数	81
3.5	误差系数矩阵的拟合	84
3.5.1	泊松级数的最小二乘拟合	84
3.5.2	泊松级数阶次的确定	85
3.6	结果与分析	86
3.6.1	位置误差的拟合结果	86
3.6.2	泊松系数矩阵的影响分析	87
3.6.3	美、俄碰撞卫星的误差分析	90
3.7	位置速度误差负相关特性的验证	91
第4章	空间目标接近分析	93
4.1	空间目标接近分析的解析方法	93
4.1.1	Hoots 方法	93
4.1.2	基于轨道长期项的碰撞检测算法	100
4.2	空间目标接近分析的数值方法	107
4.2.1	接近分析的 A-R 算法	107
4.2.2	接近分析的 A-N 算法	109

第5章 碰撞概率的计算方法	113
5.1 碰撞概率计算方法及简化	113
5.1.1 碰撞概率计算方法综述	113
5.1.2 碰撞概率计算方法的简化	117
5.2 圆轨道情形下碰撞概率的显式表达式	119
5.2.1 接近几何关系和接近距离的分解	119
5.2.2 误差协方差的转换和投影	121
5.2.3 碰撞概率的显式表达式	123
5.2.4 算例分析	124
5.3 一般轨道情形下碰撞概率的显式表达式	126
5.3.1 接近几何关系表示的碰撞概率显式表达式	127
5.3.2 接近距离的 N 、 T 、 W 分量表示的碰撞概率显式表达式	133
5.3.3 算例分析	137
5.4 适用圆轨道假设的偏心率范围	139
5.4.1 椭圆轨道的速度倾角和速度大小	139
5.4.2 速度倾角非零和速度大小不等的影响	141
5.4.3 椭圆轨道的综合影响	142
第6章 碰撞概率的应用研究	145
6.1 碰撞概率灵敏度分析	145
6.1.1 碰撞概率灵敏度的定义	146
6.1.2 基于显式表达式的碰撞概率灵敏度推导	146
6.1.3 算例分析	152
6.2 最大碰撞概率分析	158
6.2.1 误差椭球形状固定时的最大碰撞概率	159
6.2.2 误差椭球形状不定时的最大碰撞概率	162
6.2.3 特殊情况	167
6.2.4 算例分析	169
6.3 碰撞预警的漏警概率和虚警概率分析	171
6.3.1 碰撞预警的实质和误判	171
6.3.2 碰撞预警的安全区域和危险区域	172
6.3.3 漏警概率的计算	174
6.3.4 虚警概率的计算	176

6.4	碰撞风险综合评估方法	178
6.4.1	风险评估参数和品质评估参数	179
6.4.2	评估参数的隶属函数	180
6.4.3	评估参数的加权系数	182
6.4.4	算例分析	183
第7章	轨道异常与空间事件分析	185
7.1	概述	185
7.1.1	轨道异常与空间事件	185
7.1.2	基于历史数据的轨道异常分析方法	186
7.1.3	轨道异常检测方法的基本步骤	189
7.2	基于移动窗口曲线拟合的轨道异常检测	191
7.2.1	特征轨道根数的选择	191
7.2.2	偏差数据的生成	191
7.2.3	偏差数据的异常值检测方法	195
7.3	基于预报偏差的轨道异常检测	199
7.3.1	特征轨道根数的长期预报模型	200
7.3.2	偏差数据的生成和异常检测	201
7.3.3	算例分析	203
7.4	基于漂移率偏差的 GEO 目标轨道异常检测	205
7.4.1	特征轨道参数的选择和变化规律分析	206
7.4.2	漂移率偏差数据的生成	211
7.4.3	偏差数据的异常值检测	213
7.4.4	算例分析	216
7.5	轨道异常检测方法的评估	219
7.5.1	判别分析及误判概率	219
7.5.2	虚警概率	220
7.5.3	漏警概率	224
7.5.4	轨道精度需求	225
第8章	空间碎片环境与流量分析	227
8.1	空间碎片环境模型综述	227
8.2	空域划分方法	230
8.2.1	空域划分方法分类	231

8.2.2	等面积空域划分模型	232
8.2.3	等面积空域划分方案	234
8.3	空间碎片的空间密度	235
8.3.1	位置空间和轨道空间	236
8.3.2	空间密度的定义	236
8.3.3	空间单元编号及体积计算	237
8.3.4	空间密度函数	238
8.3.5	停留概率的计算	239
8.3.6	空间密度函数的简化	244
8.3.7	典型轨道区域的空间密度	245
8.4	空间碎片的速度分布	250
8.5	空间碎片的碰撞流量	252
8.5.1	碰撞流量的计算	252
8.5.2	典型目标轨道的碰撞流量计算	255
附录 A	T-H 方程状态转移矩阵的各元素	260
附录 B	C-W 方程计算得到的协方差矩阵表达式	263
附录 C	第 3 章部分结果图	265
附录 D	等面积空域划分方案	275
参考文献		280

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Data Source—Space Surveillance System	3
1.1.1 Space Object Surveillance	3
1.1.2 Space Surveillance System	4
1.1.3 Foreign Space Surveillance Nets	6
1.2 Data Type—Space Object Catalog Data	7
1.2.1 Basic Information of Space Catalog Data	7
1.2.2 Orbital Model of Catalog Data	8
1.2.3 U. S. Catalog Data	9
1.3 Data Application—Conjunction Assessment and Situational Analysis	10
1.3.1 Method of Data Application	10
1.3.2 Conjunction Assessment	12
1.3.2 Situational Analysis	17
Chapter 2 Orbital Prediction Error Propagation of Space Object	19
2.1 Definition of Coordinate Systems	19
2.2 Overview of Orbital Prediction Error	20
2.2.1 Category of Orbital Prediction Error	20
2.2.2 Model-Based Orbital Error Propagation	23
2.2.3 Comparison with High Precision Ephemeris	23
2.3 Covariance Analysis Describing Function Technique	24
2.3.1 Covariance Analysis of Linear System	24
2.3.2 Covariance Analysis of Nonlinear System	25
2.3.3 Gaussian Distribution-based Describing Function	26
2.3.4 CADET's Application on Orbit	29
2.4 Orbital Error Analysis Based on Relative Motion Theory	41

2.4.1	Initial Error Propagation Based on Algebraic Models	42
2.4.2	Correlation Characterization Based on Geometrical Model	61
Chapter 3	Orbital Error Analysis Based on Historical Data	69
3.1	Overview of Error Analysis and Application Based on Historical Data	69
3.1.1	Initial Covariance Analysis Based on Historical Data	70
3.1.2	Covariance Propagation Function Fitting Based on Historical Data	70
3.1.3	Promotion of Long-term Precision Using Historical Data	72
3.2	Generation of Residual Data Considering Periodicity	73
3.2.1	Selection of Space Objects	73
3.2.2	Generation of Residual Data	73
3.3	Residual Data Preprocessing	76
3.3.1	Residual Data's 2D Binning	76
3.3.2	Outlier Detection of Residual Data	77
3.4	Form of Fitting Function Considering Periodicity	78
3.4.1	Error of Orbital Elements and Positions	78
3.4.2	Error Propagation Results of C-W Equations	79
3.4.3	Poisson Series	81
3.5	Error Coefficient Matrix Fitting	84
3.5.1	Least Squares Fitting of Poisson Series	84
3.5.2	Determination of Poisson Series' Order	85
3.6	Results and Analysis	86
3.6.1	Fitting Result of Position Error	86
3.6.2	Effect of Poisson Coefficient Matrix	87
3.6.3	Error Analysis on U. S. -Russian Satellite Collision	90
3.7	Validation of Negative Corelation of Position and Velocity Error	91
Chapter 4	Close Approach Analysis Between Space Object	93
4.1	Analytical Methods to Determine Close Approach	93
4.1.1	Hoots's Method	93
4.1.2	Collision Detection Based on Secular Orbital Model	100
4.2	Numerical Methods to Determine Close Approach	107

4.2.1	A-R Algorithm	107
4.2.2	A-N Algorithm	109
Chapter 5 Calculation of Collision Probability		113
5.1	Calculation Method of Collision Probability and Simplification	113
5.1.1	Overview of Calculation Method of Collision Probability	113
5.1.2	Simplification of Calculation Method of Collision Probability	117
5.2	Explicit Expression of Collision Probability in Circular Orbit	119
5.2.1	Conjunction Geometry and Distance Analysis	119
5.2.2	Transformation and Projection of Error Covariance	121
5.2.3	Explicit Expression of Collision Probability	123
5.2.4	Examples	124
5.3	Explicit Expression of Collision Probability in General Orbit	126
5.3.1	Explicit Expression of P_c in terms of Conjunction Geometries	127
5.3.2	Explicit Expression of P_c in terms of NTW Components	133
5.3.3	Examples	137
5.4	Explicit Expression's Eccentricity Bound	139
5.4.1	Flight-path Angle and Velocity's magnitude of Eccentric Orbit	139
5.4.2	Effects of Non-zero Flight-path and Unequal Velocity	141
5.4.3	General Effects of Eccentric Orbit	142
Chapter 6 Application of Collision Probability		145
6.1	Sensitivity Analysis of Collision Probability	145
6.1.1	Definition of Sensitivity of Collision Probability	146
6.1.2	Sensitivity Analysis Based on Explicit Expression	146
6.1.3	Examples	152
6.2	Maximum Collision Probability Analysis	158
6.2.1	P_{cmax} in case of Fixed Error Ellipsoid Shape	159
6.2.2	P_{cmax} in case of Arbitrary Error Ellipsoid Shape	162
6.2.3	Special Case	167
6.2.4	Examples	169
6.3	Missing-and False-Alarm Analysis of Conjunction Assessment	171

6.3.1	Essential of Conjunction Assessment and Misjudgement	171
6.3.2	Safety-and Danger-Region of Conjunction Assessment	172
6.3.3	Calculation of Probability of Missing Alarm	174
6.3.4	Calculation of Probability of False Alarm	176
6.4	Comprehensive Assessment of Collision Risk	178
6.4.1	Risk-and Quality-Assessment Parameters	179
6.4.2	Membership Functions of Assessment Parameters	180
6.4.3	Weighting Coefficients of Assessment Parameters	182
6.4.4	Examples	183
Chapter 7	Orbital Anomaly and Space Events Analysis	185
7.1	Overview of Orbital Anomaly and Space Events	185
7.1.1	Orbital Anomaly and Space Events	185
7.1.2	Orbital Anomaly Detection Based on Historical Data	186
7.1.3	Basic Procedure of Detecting Orbit Anomaly	189
7.2	Orbital Anomaly Detection Based on Moving Window	
	Curve Fitting	191
7.2.1	Selection of Characteristic Orbit Parameters	191
7.2.2	Generation of Dispersion Data	191
7.2.3	Detection of Outliers in Dispersion Data	195
7.3	Orbital Anomaly Detection Based on Prediction Dispersion	199
7.3.1	Secular Model of Characteristic Orbit Parameters	200
7.3.2	Generation and Outlier Detection of Dispersion Data	201
7.3.3	Examples	203
7.4	GEO Orbit Anomaly Detection Based on Dispersion of	
	Drift Rate	205
7.4.1	Characteristic Orbit Parameters and Variation Law	206
7.4.2	Generation of Dispersion of Drift Rate	211
7.4.3	Detection of Outliers in Dispersion Data	213
7.4.4	Examples	216
7.5	Assessment of Detection Method of Orbital Anomaly	219
7.5.1	Discriminant Analysis and Misjudgement Probability	219
7.5.2	Probability of False Alarm	220