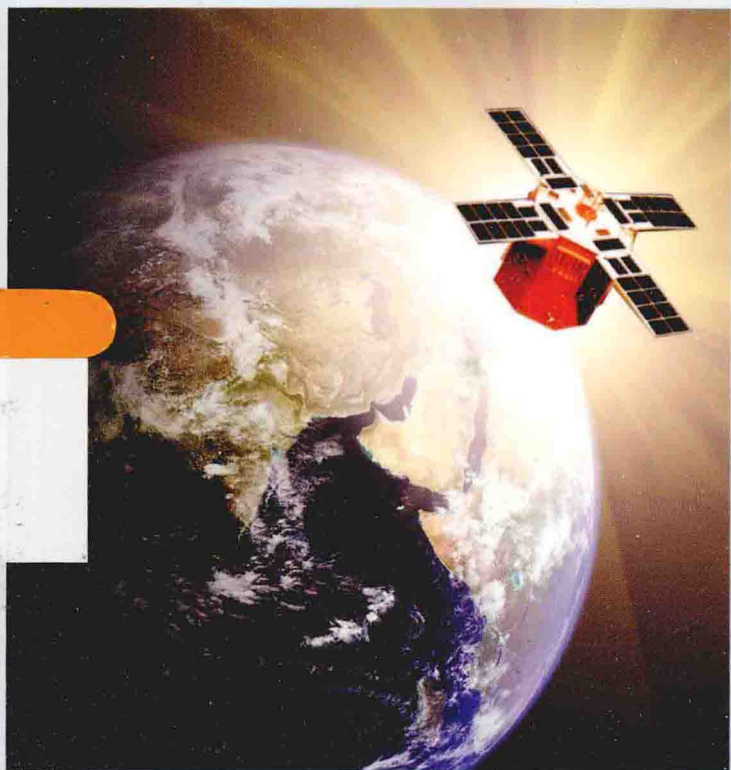


中国科学院国家天文台 天文学系列

人造卫星与空间 碎片的轨道和探测

吴连大 著



第2版



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS



中国科学院国家天文台·天文学系列

人造卫星与空间碎片的轨道和探测

(第2版)

吴连大 著



中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

人造卫星与空间碎片的轨道和探测/吴连大著. —2 版.
—北京: 中国科学技术出版社, 2012.7
(中国科学院国家天文台·天文学系列)
ISBN 978 - 7 - 5046 - 6132 - 6

I. ①人… II. ①吴… III. ①人造卫星 - 卫星轨道
②太空垃圾 - 探测 IV. ①P173.1②X738
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 154384 号

责任编辑 赵 晖 夏凤金
封面设计 付小鹏
责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社
发 行 科学普及出版社发行部
地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮 编 100081
发行电话 010 - 62173865
传 真 010 - 62179148
投稿电话 010 - 62103182
网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm×1092mm 1/16
字 数 500 千字
印 张 29.5
版 次 2012 年 7 月第 2 版
印 次 2012 年 7 月第 1 次印刷
印 刷 北京金信诺印刷有限公司

书 号 ISBN 978 - 7 - 5046 - 6132 - 6/P · 159
定 价 58.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)
本社图书贴有防伪标志, 未贴为盗版

中国科学院国家天文台·天文学系列

《中国科学院国家天文台基本天文学
及其应用系列丛书》编委会

主 编：叶叔华

副主编：韩延本

编 委：（按姓氏拼音顺序排列）

韩天芑 李志安 冒 蔚 吴连大

萧耐园 徐家岩 杨福民

《中国科学院国家天文台基本天文学 及其应用系列丛书》序

由中国科学院国家天文台支持的天文专业书出版工作，将改变当前天文专业书籍非常缺乏的局面。天文专业门类颇多，按原来的分类：天体物理、天体力学、天体测量已不太合适。近年来，国际天文学联合会已将其专业委员会分属 11 个分部，其中的历表、天体力学与动力天文学、天体测量、地球自转、时间五个专业委员会归属于基本天文学分部。在天文专业书出版工作中，我们把以上领域归总为“基本天文学及其应用”系列。

20 世纪以来，基本天文学的各个分支都在观测精度上有了数量级的提高，与天体物理、地球科学和空间科学的有关研究形成学科交叉，并且拓展了多种应用。

以地球自转为例，当前采用的射电、激光、GPS、卫星测高等技术，已经可以监测到地球上厘米甚至毫米级的运动，包括地壳形态变化和海平面变化。地球自转变化是地球整体角动量变化的体现，自必牵涉到地球的核、幔、地壳、海洋、大气各圈层的物质运动及其相互作用，与地球科学和空间科学关系十分密切，其技术与研究方法，适用于对月球和行星的探测。高精度的观测，既对天空和地面的参考系以及有关的天文常数、历表和时间系统提出更高的要求，又为它们的改进提供了前所未有的高精度观测数据。在人造卫星和飞船的精密定轨以及其在有关的对地观测的应用上，都少不了天体力学的工作，从而推进了高精度的天体力学发展。

新兴的天文地球动力学是从地球自转研究发展而来的分支，是用空间技术对地观测，研究地球的整体运动以及其各圈层的相互作用，是基本天文学与地球科学，空间科学的交叉。

同样，时间原来全属天文学范畴，原子频率标准出现之后，时间已成为计量科学与基本天文学的交叉学科。地面上的导航定位，原来是整个基本天文学各个分支(即历表、天体力学与动力天文学、天体测量、地球自转、时间)的综合应用。采用卫星技术之后，空基导航定位系统，如 GPS 和欧盟即将投入的伽利略系统，各方面使用很广泛而且很成功的技

术集成，是基本天文学与空基技术的结合。

正在酝酿中的天基导航定位系统，将采用脉冲星作为天然的高精度空间钟，从而把导航定位的精度和安全性提得更高。这就需要有脉冲星的结构和物理性质等的天体物理研究，以及更精确的太阳系行星历表来提供脉冲到达地球的时刻。总之，一项新技术的实现往往要求学科交叉并从而推动它的发展。

天体测量是为天文的各项研究提供天体位置、距离速度等基本数据的分支，并且为地球科学、空间科学提供应用。近年来，空间和地面的观测设备，往往同时提供天体的位置、距离、光度、光谱、视向速度等的测定，成为天文学研究的更为完备的基本数据。天体测量就在恒星、银河系、星系以及太阳系外的行星系统搜索研究中，与有关的天体物理研究交叉发展。已经工作多年的天体测量卫星依巴谷以及哈勃望远镜中的天体测量设备，给天文学提供了前所未有的基本数据。今后的天体测量卫星 Gaia，还将提供上亿颗恒星的庞大数据库，空间天体测量为天文学研究开阔了新的境界。

“基本天文学及其应用”系列丛书，将为天文学、地球科学、空间科学领域的读者(研究生和专业人员)提供详尽的参考。本系列将为读者提供有关学科的阐述和最新的资料。

叶叔华

2006年2月

内 容 提 要

本书以无奇点根数的平均根数法为主线，介绍人造卫星各种摄动函数的展开，给出准到二阶的半分析的卫星运动理论，介绍各种初轨计算方法、轨道改进的稳健估计方法、卫星轨道的应用和空间目标编目定轨方法。在空间碎片探测方面，介绍空间碎片的实时天文定位方法和空间目标的天基探测原理和方法。可供从事天文、测绘、航天和空间碎片探测研究的科研、教育工作者参考。

感 谢

在本书即将出版之际，我首先要感谢南京大学天文系的易照华老师，孙义燧老师，朱耀鑫老师，黄天衣老师，是他们在学校的教导，使我走上了专研天体力学之路，我还要特别感谢刘林老师对我工作的不断指导，才有今天这本专著的出版。我还要感谢我的紫金山天文台的同事，包括童傅，张家祥，黄坤仪，顾继明，王昌彬等，这本专著的许多内容，包括半分析方法和大气模型的建模，是我们大家共同研究完成的，我还要特别感谢我的同学贾沛璋，书中有关初轨计算和稳健估计的章节，是我和他一起研究的成果。感谢紫金山天文台王传晋，顾光德，裴元自和翁天祥等同志，在空间目标探测方面的有益的讨论。

在本书成稿过程中，我要感谢我们室组的赵长印，他通读了全部书稿，提出了许多改进的意见。我还要感谢张伟，熊建宁，汪宏波，平一鼎，张晓祥等人校验了书中的公式或提供了书中的材料，我还要特别感谢上海天文台的金文敬老师对第二章写作的指导，紫金山天文台的李广宇，付燕宁，邓雪梅等同志也为此提供了资料，并进行了许多有益的讨论。

最后，我要特别感谢叶叔华院士和易照华老师为本书写了序言，感谢韩延本研究员为本书出版付出的努力。感谢国家天文台对本书出版的支持。

作者 吴连大
2011年2月9日

序

人造卫星上天，接着空间天文学建立，使天文学发展进入了一个新时代。天文学诞生以来，共经历了四次飞跃发展：古代天文学主要研究天体在空中的视位置变化及其应用，是经典天体测量学内容；17世纪创立了牛顿力学，由此建立起天体（主要是太阳系）的运动和形状理论，即天体力学，使天文学从研究天体的视运动深化为研究真运动，这是第一次飞跃；19世纪中期，天体物理学诞生，使天文学从研究天体的机械运动深化到研究天体的物理本质，这是天文学发展的第二次飞跃；20世纪40年代，射电天文学出现，使人们能观测天体的微波辐射，开阔了眼界，实现了天文学发展的第三次飞跃；空间天文学建立是第四次飞跃，实现大气层外观测，可接收天体各种波段的辐射。

人造卫星出现还建立起航天科学和技术，它的迅猛发展也促进了大批其他学科和技术的进步；航天器已成为很多学科的实验室或技术工具。50多年来，各国共发射4000余次；近地空间出现了大量人造天体：包括航天器、运载火箭、附件、丢弃物和碎片等。根据美国NASA的统计，到2009年6月为止，大于10厘米的目标有14000多；至于大于1厘米的估计有几十万。这种情况不但给航天器发射造成麻烦，还随时威胁地面安全。因此，对这些空间目标进行跟踪观测，掌握它们的轨道变化、予以编目，就成为迫切的大课题。

《人造卫星与空间碎片的轨道和探测》一书是人造卫星轨道理论和探测的专著，也是此课题的专著。作者吴连大于1964年在南京大学天文系毕业后，就到紫金山天文台参加人造卫星的观测、轨道研究、预报和应用研究工作。1994~2004年曾担任中国科学院人造卫星观测研究中心主任。这本专著也就是他和同事们从事多年理论工作和实践经验的结晶。书中理论上自成系统，起点较低，只要有高等数学和球面天文学知识就可阅读。全书共10章加上辅助计算的几个附录；前4章是自成系统的天体力学、天体测量学、卫星动力学方面的基础知识，因

限于篇幅，很多公式只列出结果，推导过程可参阅所引文献。第 5~9 章是本书的中心内容，也是作者和同事们多年工作的实践结果；其中还有些他们的创新点，例如“参考矢量法”，“稳健估计法”，“半分析方法”，“摄动函数的无奇点展开和计算”，“空间目标的天基探测”等。值得提出的是，这些内容是我看到的国内外文献中，讨论得最深刻和全面的。这也是本书的特色。

本书可作为天文学（特别是天体力学和天体测量学）、航天科学、大地测量学的科研和教学工作者的参考书，也可作为高年级本科生或研究生的教材。

我国的天文学和航天科学近年来进展很快，预计今后会有更快发展。但愿本书出版能对此发展起到推动作用。

易照华

2011 年 1 月于南京大学

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 空间目标的分类	1
1.2 空间目标的大小和数量	2
1.3 空间目标的星等	3
1.4 空间目标的分布	4
1.5 空间碎片的轨道问题	6
1.6 空间碎片轨道计算的特点	7
1.7 空间碎片观测对探测系统需求	8
1.8 本专著的章节内容	9
第 2 章 天体测量基础	10
2.1 天体测量的基本概念	10
2.2 球面三角基本公式	13
2.3 坐标系统	14
2.4 时间系统	18
2.5 常用坐标系之间的转换	22
2.6 星表	35
2.7 天文定位	36
第 3 章 天体力学基础	42
3.1 人造卫星的运动方程	42
3.2 二体问题的积分	42
3.3 克普勒根数的定义	43
3.4 二体问题的基本关系	44
3.5 人造卫星的摄动运动方程	61
3.6 运动方程的奇点和无奇点根数	62
3.7 星历表计算	68
第 4 章 卫星动力学	77
4.1 动力学模型	77
4.2 平均根数法的基本原理	88
4.3 摄动函数的展开	91

4.4	摄动方程的解	120
第5章	初轨计算	158
5.1	光学资料初轨计算的基本方程	158
5.2	初轨根数的计算	161
5.3	近圆轨道目标的初轨计算方法	163
5.4	经典 Laplace 方法	164
5.5	六参数初轨计算方法	165
5.6	三参数初轨计算方法	167
5.7	二参数初轨计算方法	171
5.8	接近最佳精度的初轨算法	177
5.9	雷达和多普勒测速资料的初轨计算	186
5.10	小结	190
第6章	轨道计算和精密预报	192
6.1	人造卫星的轨道计算	192
6.2	观测预报	213
6.3	卫星陨落期预报	224
第7章	空间目标的编目	229
7.1	空间目标编目的定义和目的	229
7.2	空间目标编目的分类	231
7.3	编目定轨	232
7.4	数据关联	250
7.5	空间目标编目的基本流程	253
7.6	新目标发现的几个需要注意的问题	258
7.7	几种特殊情况	260
7.8	空间目标编目方法的今后研究	261
第8章	空间目标的探测	264
8.1	空间目标探测设备	264
8.2	空间目标的地基雷达观测	264
8.3	空间目标的光电观测	266
8.4	空间目标的天基探测原理	293
第9章	人造卫星轨道的应用	315
9.1	高层大气模型的测定	315

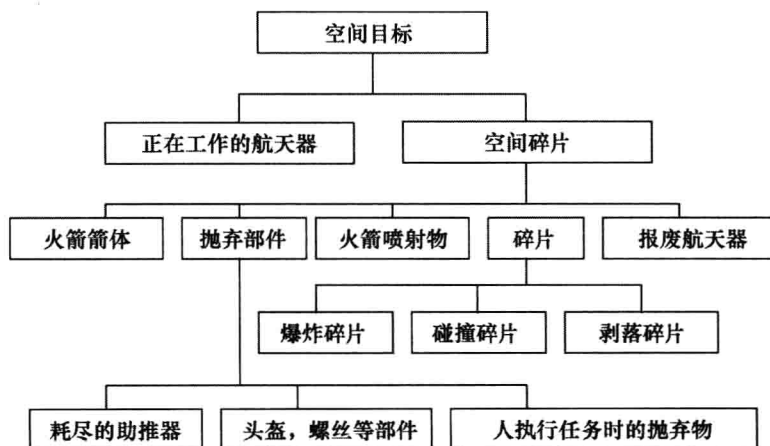
9.2	空间碎片的碰撞预警	325
9.3	GTO 末级的减缓	332
第 10 章	特殊函数及计算方法	339
10.1	特殊函数	339
10.2	插值和数值微商	355
10.3	高次方程和超越方程的解	361
10.4	数值积分	363
10.5	常微分方程的数值解	367
10.6	最小二乘法及误差分析	377
附 录		383
附录 A	IAU2000 岁差章动模型	383
附录 B	JGM-3 地球引力场模式	401
附录 C	日月坐标计算程序	420
附录 D	大气模型计算程序	423
附录 E	便查表	437
附录 F	平均值系数表	453

第 1 章 引 言

第一颗人造卫星上天已经有 50 多年了，现在在轨的空间目标已经超过 14000 个，人造卫星的轨道和探测的研究内容大大丰富，单颗卫星的定轨和预报，变成了众多目标的卫星编目，初轨计算扩展为目标关联和 UCT（没有与轨道关联的数据，下同）处理，人造卫星的地面观测，已变成天地一体化的观测，空间碎片的碰撞预警，又提出了许多研究课题……《人造卫星与空间碎片的轨道和探测》一书就是在这样的背景下开始编写的。

1.1 空间目标的分类

空间目标，包括在轨工作航天器和空间碎片。空间碎片是人类遗留在空间的废弃物，包括完成任务的火箭箭体和卫星本体、火箭的喷射物、在执行航天任务过程中的抛弃物、空间目标碰撞产生的碎片等，空间目标的组成如下。



1.2 空间目标的大小和数量

50 多年来,世界各国进行的空间发射已经超过 4000 次,送入空间并曾经被跟踪观测的目标超过 26000 个,大约还有 1/2 仍遗留在空间沿轨道飞行。目前可跟踪的空间目标(观测设备能观测到、能测定轨道的空间碎片)已超过 14000 个(含新发现的碎片),其中只有 6%是仍在工作的航天器,其余均为空间碎片,现在能跟踪的碎片大小可达 5cm,但是,在编目库中的碎片,仍然是近地空间碎片 10cm,同步碎片 1m。尺度小的空间碎片数量则要大得多,直径大于 1cm 的空间碎片数量超过了 11 万个,有人甚至说有 40 万个,总质量超过 450 万 kg。空间碎片和航天器的撞击速度,或者空间碎片之间的撞击速度在 1~15.5km/s 之间。

图 1.1 是 NASA 2009 年 6 月提供的空间目标数量增长图,图中可见,那时空间目标总数已达 14000 个。其中,有效载荷只有 3000 多个,运载火箭只有 1000 多个,航天发射有关的碎片有 1000 多个,由碰撞和爆炸产生的碎片已达 7000 多个,也就是说,空间碎片已占在轨空间目标的 2/3。也许,再过几年,这一比例还要增加。

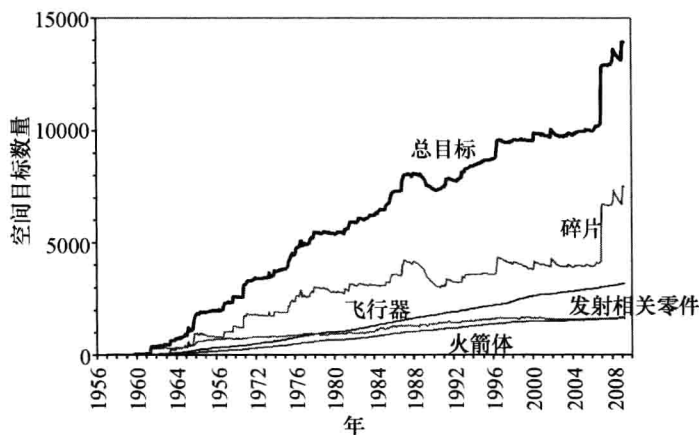


图 1.1 空间目标年增长情况

因此,研究人造卫星的轨道和探测,必须包括空间碎片,必须十分重视空间碎片的特点。

1.3 空间目标的星等

空间目标的星等，可用下式计算：

$$m = A + 2.5 \lg \rho^2 - 2.5 \lg (L \times D) + \Delta m(\sigma) + \text{大气消光} \quad (1.1)$$

其中，A 为常数，如果假定卫星表面为漫反射系数，A 取值为 2.5~2.9；

ρ 为目标到测站的距离，以 100km 为单位；

L 为卫星的长度（米）；

D 为卫星底面直径（米）；

$\Delta m(\sigma) = -2.5 \lg [\sin \sigma + (\pi - \sigma) \cos \sigma]$ 为相位系数

由于空间目标的表面特性和卫星姿态均不清楚，A 的取值不能给定，因此，空间目标的星等只能估算，不能严格给定。为了使读者对人造卫星的亮度有一个直观概念，表 1.1 举例给出了一些亮目标的形体大小，以及目标在仰角为 40° 时的估算星等范围（对应于位相好的最亮星等和对应于位相差的最暗星等），在估算时，略去大气消光，A 取值 2.5。

表 1.1 空间亮目标的轨道和亮度

Catalogue	Name	ID	i	Hp	Ha	$L \times D = S$	仰角= 40° 的星等	
03019	Cosmos 185 r	67104B	64.0	213	219	$6.0 \times 2.0 = 12.0$	2.50	4.89
04813	Cosmos 389	70113A	81.1	400	418	$5.0 \times 1.5 = 7.5$	4.36	6.74
10582	Cosmos 975 r	78004B	81.2	447	489	$2.8 \times 2.6 = 7.3$	4.67	7.06
10967	Seasat	78064A	108.0	746	756	$21.0 \times 1.5 = 31.5$	4.06	6.45
10973	Cosmos 1025	78067A	82.5	453	465	$6.0 \times 2.0 = 12.0$	4.09	6.47
11601	Cosmos 1143 r	79093B	81.2	444	478	$2.8 \times 2.6 = 7.3$	4.64	7.03
19650	Cosmos 1980 r	88102B	71.0	831	845	$10.4 \times 3.9 = 40.6$	4.01	6.40
20390	Cosmos 2053 r	89100B	73.5	325	342	$7.4 \times 2.4 = 17.8$	3.00	5.38
20580	HST	90037B	28.5	574	583	$13.3 \times 4.3 = 57.2$	2.87	5.26
20625	Cosmos 2082 r	90046B	71.0	835	850	$10.4 \times 3.9 = 40.6$	4.02	6.41
20638	Rosat	90049A	53.0	461	472	$4.8 \times 2.3 = 11.0$	4.22	6.60
21701	UARS	91063B	57.0	547	569	$9.8 \times 4.6 = 45.1$	3.06	5.44
22566	Cosmos 2237 r	93016B	71.0	839	843	$10.4 \times 3.9 = 40.6$	4.02	6.40
23343	Resurs 1-3 r	94074B	97.7	633	656	$10.4 \times 3.9 = 40.6$	3.47	5.86
23608	Helios 1A r	95033D	98.3	604	631	$9.9 \times 2.6 = 25.7$	3.88	6.26
23705	Cosmos 2322 r	95058B	71.0	826	856	$10.4 \times 3.9 = 40.6$	4.02	6.40
25063	TRMM	97074A	35.0	398	406	$5.0 \times 4.0 = 20.0$	3.26	5.65
25407	Cosmos 2360 r	98045B	71.0	831	846	$10.4 \times 3.9 = 40.6$	4.01	6.40
25544	ISS	98067A	51.6	390	398	$20.0 \times 10.0 = 200.0$	.72	3.10

(续表)

Catalogue	Name	ID	i	Hp	Ha	$L \times D = S$	仰角=40° 的星等	
25860	Okean-O	99039A	97.9	642	657	$6.0 \times 3.0 = 18.0$	4.37	6.76
25861	Okean-O r	99039B	97.9	633	644	$10.4 \times 3.9 = 40.6$	3.45	5.84
25979	Helios 1B r	99064C	98.2	620	630	$8.0 \times 3.0 = 24.0$	3.98	6.36
26070	Cosmos 2369 r	00006B	71.0	823	856	$10.4 \times 3.9 = 40.6$	4.01	6.40
26873	Koronas F	01032A	82.5	442	453	$5.0 \times 2.0 = 10.0$	4.24	6.62
26874	Koronas F r	01032B	82.5	470	493	$7.4 \times 2.4 = 17.8$	3.76	6.15
27386	ENVISAT	02009A	98.5	773	789	$6.0 \times 2.0 = 12.0$	5.19	7.57
27387	ENVISATAr5 r	02009B	98.5	741	802	$10.0 \times 2.5 = 25.0$	4.37	6.75
27424	Aqua	02022A	98.2	691	707	$8.0 \times 4.0 = 32.0$	3.90	6.28
21147	Lacrosse 2	91017A	68.0	644	647	$18.0 \times 4.5 = 81.0$	2.72	5.11
23728	KH-11	95066A	97.9	400	833	$15.0 \times 3.0 = 45.0$	3.27	5.65

1.4 空间目标的分布

据统计, 到 2009 年 5 月, 在轨目标总数 14271 个, 其中, 有效载荷 3445 个, 火箭 1857 个, 空间碎片 8969 个。已知轨道的 13620 个, 轨道高度、倾角和 RCS (雷达散射截面积, 下同) 分布如表 1.2, 偏心率分布如图 1.2, 倾角分布如图 1.3。

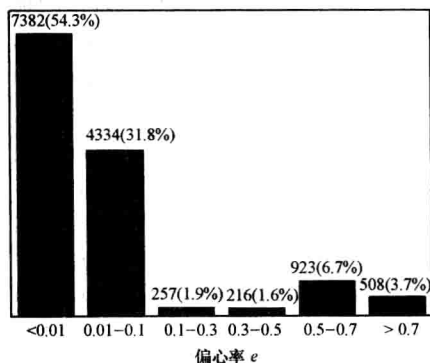


图 1.2 空间目标的偏心率分布

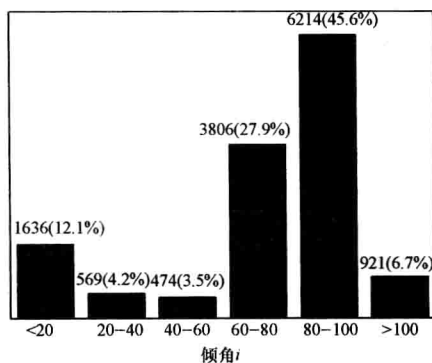


图 1.3 空间目标的倾角分布

从以上图表可以看出, 在轨空间目标的分布特点有:

1) 在轨空间目标主要是近地目标, 有 10000 多个, 另外有同步轨道的目标 1000 多个, 同步卫星的转移轨道和 GPS 卫星的转移轨道碎片 1000 多个, GPS 目标近 300 个。