



国防科技著作精品译丛



Springer

Satellite Orbits

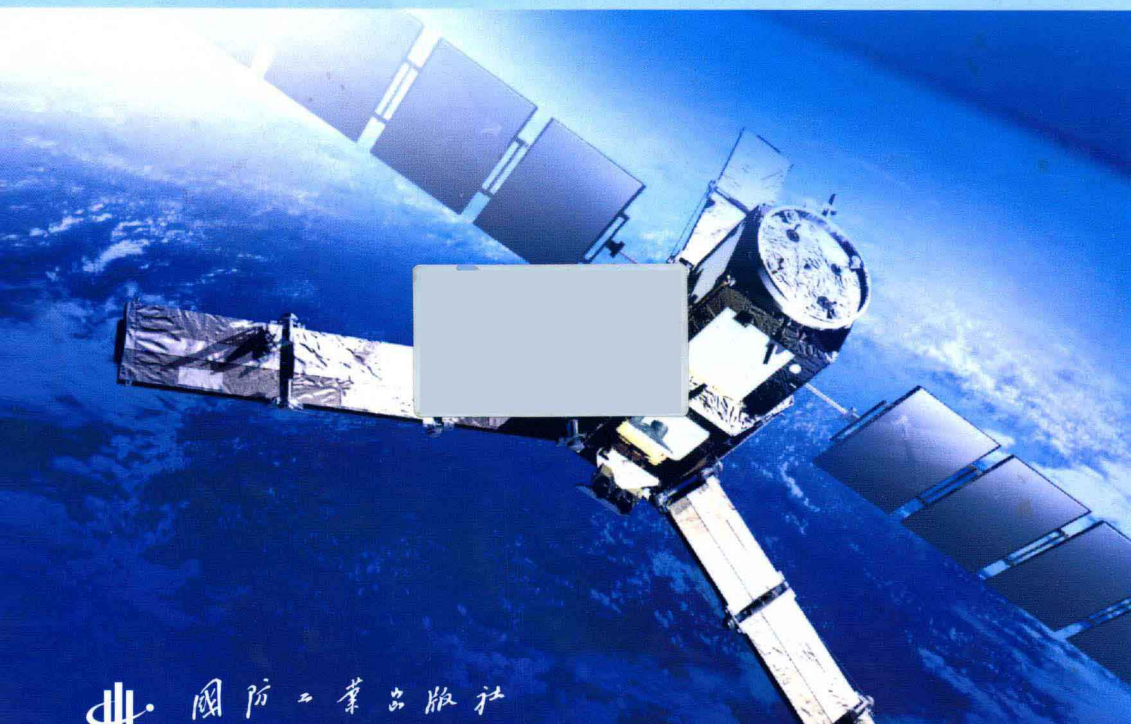
Models, Methods and Applications

卫星轨道

——模型、方法和应用

【德】Oliver Montenbruck, Eberhard Gill 著

王家松 祝开建 胡小工 译



国防工业出版社

卫星轨道

——模型、方法和应用

Satellite Orbits: Models, Methods and Applications

[德] Oliver Montenbruck, Eberhard Gill 著
王家松 祝开建 胡小工 译

 国防工业出版社
National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军 -2010 -112 号

图书在版编目 (CIP) 数据

卫星轨道——模型、方法和应用/ (德) 门斯布吕克 (Montenbruck, O.), (德) 吉尔 (Gill, E.) 著; 王家松, 祝开建, 胡小工译. — 北京: 国防工业出版社, 2012.4
书名原文: Satellite Orbits: Models, Methods and Applications
ISBN 978-7-118-07971-5

I. ①卫… II. ①门… ②吉… ③王… ④祝… ⑤胡… III. ①卫星轨道 IV. ①V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第026340号

Translation from the English language edition:
Satellite Orbits: Models, Methods and Applications by Oliver Montenbruck; Eberhard Gill
Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2000
Springer is a part of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved
版权所有, 侵权必究。

卫星轨道——模型、方法和应用

[德] Oliver Montenbruck, Eberhard Gill 著 王家松 祝开建 胡小工 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京奥鑫印刷厂

开 本 700 × 1000 1/16

印 张 23 1/4

字 数 390 千字

版 印 次 2012 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—4000 册

定 价 118.00 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

译者的话

我国航天事业正在进入一个快速发展时期,载人航天工程、二代导航工程、高分辨率对地观测工程、嫦娥和深空探测工程正稳步推进。为了更好地学习、借鉴国外的研究成果,为我国航天工程服务。我们翻译了《卫星轨道——模型、方法和应用》(Satellite Orbit—Models、Methods and Applications)。

《卫星轨道——模型、方法和应用》是一本很好的轨道教科书,该书的原著者是从事卫星测控的国际知名轨道专家,该书的特点是将轨道确定理论与实践应用有机地结合在一起,源于理论但紧贴实际,简单实用,易于理解消化吸收。该书从天体力学基本方法开始,详尽介绍了航天器动力学模型、测量模型、数值积分、参数估计和误差分析等,可为从事航天测控、卫星导航、卫星测地、空间科学应用的工程师和学者提供有益的参考。

全书由宇航动力学国家重点实验室王家松、祝开建翻译,上海天文台胡小工对全书进行了审校。翻译过程中,我们得到了中国西安卫星测控中心和宇航动力学国家重点实验室领导的大力支持,中国西安卫星测控中心轨道室同行也参与了部分章节的翻译和校对。南京大学刘林教授、英国纽卡斯尔大学张强、中国西安卫星测控中心肇刚、侯鹰、朱民才、余培军、张荣之、王西京和吴功友等也提出了宝贵意见,译者深表感谢!

限于译者水平,加之仓促付梓,错误之处难免,恳请读者指正。

译者

2011年9月于西安

原版序

《卫星轨道——模型、方法和应用》是一本指导读者学习卫星轨道确定与预报理论和实践知识的综合性教科书。从轨道力学的基本原理开始,它详细介绍了基本力模型和卫星精密跟踪方法及其数学处理。本书详尽描述了大量目前用于卫星轨道计算的数值算法,着重介绍了数值积分和参数估计。此书适应范围很广,既可以作为航天飞行力学方面高年级本科生或研究生的教程,又可以为航海、测地学以及空间科学的专业人士提供参考。另外,我们希望这本书对正在发展壮大的卫星工程师和操作员队伍更深地理解飞行动力学也能有所帮助。

我们意识到关于轨道确定方法、模型和工具的资料要么散布在浩瀚的科技出版物中,要么隐藏在大众无法接触的软件注释中,这也使我们萌生了撰写这本书的念头。经过在航天动力学和卫星操作领域工作多年,我们试图能够紧密联系日常工作中出现的问题和困难,重点关注轨道确定的实践操作方面。但是对基础物理方面的兴趣激发我们仍然从基本原理开始提出论题,而不希望将这本书变成一本仅仅是关于航天器轨道计算的“食谱”。

随着地面和星载计算机能力的提高以及对精度的不断追求,分析法摄动理论的需求已经被对运动方程的纯数值解法所代替。我们重点描述可以应用于卫星轨道数值改进和预报的模型和方法。关于轨道设计、长期轨道演化和轨道衰减的知识这里没有特别阐述,尽管我们提供了相关的基础知识。另一方面,测地卫星任务已经达到了空前的位置精度水平,这需要用

到非常复杂的力模型和观测模型, 虽然这里也没有详加探讨, 但还是给出了相关背景知识的参考文献, 这样读者可以轻松地接触这些专业领域。

本书每一章都附有习题, 主要是现有材料的额外练习, 或者是实践应用的补充论述。我们可能会突出基本的物理模型或者算法, 而不是依赖于纯数学参考实例。在很多情况下, 这些习题会有提示答案和数值结果。它们要么由书中的公式直接推导, 要么基于示例的计算机程序给出。

本书随书附带一个 CD 光盘, 包括针对所有示例程序和应用的 C++ 源程序及相关数据文件。这些软件依赖一个超强的航天动力学库建立, 并以源码形式提供。为简便起见, 我们把此库限制在基本模型, 但是强调透明编程和代码注释。这样可以很清楚地理解代码, 并且为读者拓展软件铺平了道路。在非商业目的下整个软件包的自由使用权包括修改权是许可的。鼓励读者、学生和讲师, 将其应用于今后的学习和新项目开发中去。我们假设读者熟悉计算机程序, 但是即使是缺乏经验的读者也可以把库函数当做黑盒子来使用。C++ 程序语言现在已被广为使用, 并且在大量的不同计算机平台和操作系统上都可以使用, 这里所有的源程序都是用这种语言编写的。

我们要感谢 Springer-Verlag 提供的热忱合作和在出版此书过程中给予的关心。同时, 我们还要把感谢送给所有的朋友和同事们, 感谢他们在修改手稿和测试程序时提供的所有思想、建议和其他帮助, 他们对此书的完成起了重要作用。应用程序中所需的实时任务数据由 GPS/MET 项目和哥达德空间飞行中心 (GSFC) 的飞行动力学分析部友情提供。还有大量的机构和个人给本书提供了图片, 在此也表示深深的谢意。

Oliver Montenbruck and Eberhard Gill
奥利弗·蒙特布鲁克和埃伯哈特·吉尔
2000 年 5 月

航天动力学常数

参量	数值	参考与注释
时间		
MJD (J2000)	51544.5	IAU 1976, (Seidelmann 1992)
TT-TAI	32.184 s	IAU 1991, (Seidelmann 1992)
GPS-TAI	−19 s	Hoffmann-Wellenhof 等 (1997)
通用		
c	299792458 m/s	IAU 1976, (Seidelmann 1992)
G	$6.673 \cdot 10^{-20} \text{ km}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$	Cohen & Taylor 1987
地球		
$GM_{\oplus}$	398600.441 <u>5</u> km^3/s^2	JGM-3
J_2	0.0010826 <u>3</u>	JGM-3
$R_{\oplus}$	6378.137 km	WGS-84 (NIMA 1997)
f	1/298.257223563	WGS-84 (NIMA 1997)
$\omega_{\oplus}$	$0.7292115 \cdot 10^{-4} \text{ rad/s}$	Moritz 1980
太阳		
$GM_{\odot}$	$1.3271244018 \cdot 10^{11} \text{ km}^3/\text{s}^2$	DE405 (Standish 1998)
AU	149597870.691km	DE405 (Standish 1998)
$R_{\odot}$	$6.96 \cdot 10^5 \text{ km}$	seidelmann 1992
$P_{\odot}$	$4.560 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2$	IERS 1996 (McCarthy 1996)
月球		
GM_M	4902.801 <u>1</u> km^3/s^2	DE405 (Standish 1998)
a_M	384400 km	Seidelmann 1992
R_M	1738 km	Seidelmann 1992
卫星		
r_{GEO}	42164 km	轨道周期 23 ^h 56 ^m 04 ^s
v_{GEO}	3.075 km/s	
r_{GPS}	26561 km	轨道周期 11 ^h 58 ^m 02 ^s
v_{GPS}	3.874 km/s	
r_{LEO}	6678 ... 7878 km	轨道高度 300 ... 1500 km
v_{LEO}	7.726 ... 7.113 km/s	
注: 带下划线的数字为原始数据进行有效位数截取的结果。DE405 星历常数参考 TDB 时间系统。		

目录

第 1 章	100 分钟环绕地球	1
1.1	卫星轨道的相关资料	2
1.1.1	低轨卫星轨道	2
1.1.2	遥感卫星的轨道	3
1.1.3	地球静止卫星轨道	4
1.1.4	大椭圆轨道	6
1.1.5	星座	7
1.2	空间导航	8
1.2.1	跟踪系统	8
1.2.2	已有的成果	10
第 2 章	航天动力学简介	13
2.1	二体问题的一般特性	14
2.1.1	平面运动和面积定律	14
2.1.2	轨道形状	15
2.1.3	能量积分	17
2.2	无摄轨道预报	19
2.2.1	开普勒方程和与时间相关的运动	19
2.2.2	开普勒方程求解	21
2.2.3	空间轨道	22

2.2.4	位置和速度至轨道根数.	25
2.2.5	无奇点根数.	27
2.3	地基卫星观测.	30
2.3.1	卫星地面轨迹.	30
2.3.2	卫星在地平坐标系的运动.	33
2.4	初轨确定.	36
2.4.1	基于两组位置矢量的轨道确定.	37
2.4.2	由三组角度数据进行轨道确定.	40
	习题.	43
第 3 章	力学模型.	49
3.1	引言.	49
3.2	重力势.	51
3.2.1	球谐函数扩展.	52
3.2.2	一些特殊的重力场系数.	54
3.2.3	引力场模型.	57
3.2.4	递归公式.	61
3.2.5	加速度.	63
3.3	日月引力.	64
3.3.1	摄动加速度.	64
3.3.2	低精度日月坐标.	66
3.3.3	切比雪夫近似.	69
3.3.4	JPL 星历.	71
3.4	太阳辐射压.	73
3.4.1	蚀条件.	75
3.4.2	阴影函数.	77
3.5	大气阻力.	79
3.5.1	上层大气.	81
3.5.2	Harris-Priester 密度模型.	84
3.5.3	Jacchia 1971 密度模型.	86
3.5.4	上层大气密度模型比较.	94
3.5.5	太阳和地磁指数预报.	97

3.6	推力	98
3.7	精密模型	101
3.7.1	地球辐射压	101
3.7.2	地球潮汐	102
3.7.3	相对论效应	104
3.7.4	经验力	106
	习题	107
第 4 章 数值积分		111
4.1	龙格 — 库塔方法	112
4.1.1	引言	112
4.1.2	一般龙格 — 库塔公式	114
4.1.3	步长控制	117
4.1.4	龙格 — 库塔 — Nyström 方法	117
4.1.5	连续方法	121
4.1.6	龙格 — 库塔方法的比较	123
4.2	多步法	126
4.2.1	引言	127
4.2.2	Adams–Bashforth 方法	128
4.2.3	Adams–Moulton 方法和预报 — 改正方法	131
4.2.4	插值	134
4.2.5	变阶和变步长方法	135
4.2.6	Stoermer–Cowell 方法	137
4.2.7	Gauss–Jackson 或二次和方法	138
4.2.8	多步法的比较	140
4.3	外插法	141
4.3.1	中点准则	141
4.3.2	外插	142
4.3.3	外插法的比较	143
4.4	比较	145
	习题	147

第 5 章 时间和参考系	150
5.1 时间	150
5.1.1 历书时 (ET)	153
5.1.2 原子时	153
5.1.3 相对论时间尺度	155
5.1.4 恒星时和世界时	158
5.2 天球参考系和地球参考系	162
5.3 岁差和章动	164
5.3.1 日月扭矩和地球自转轴运动	164
5.3.2 岁差导致的坐标变化	166
5.3.3 章动	170
5.4 地球自转和极移	173
5.4.1 绕天体历书极的自转	173
5.4.2 欧拉自由进动	174
5.4.3 极移的观测和外插	175
5.4.4 与国际参考极 (IRP) 之间的转换	177
5.5 大地基准面	178
习题	182
第 6 章 卫星跟踪与观测模型	185
6.1 跟踪系统	185
6.1.1 雷达跟踪	185
6.1.2 激光跟踪	194
6.1.3 全球定位系统	195
6.2 跟踪数据模型	200
6.2.1 发射机和接收机运动	200
6.2.2 测角	201
6.2.3 测距	205
6.2.4 多普勒测量	207
6.2.5 GPS 测量	209
6.3 介质改正	210
6.3.1 辐射与大气的相互作用	210
6.3.2 对流层折射	212

6.3.3 电离层折射	216
习题	219
第 7 章 线性化	224
7.1 二体问题状态转移矩阵	225
7.1.1 轨道根数转移矩阵	226
7.1.2 笛卡儿坐标对开普勒根数的偏导数	227
7.1.3 开普勒根数对笛卡儿坐标的偏导数	229
7.1.4 状态转移矩阵及其逆	230
7.2 变分方程	231
7.2.1 状态转移矩阵的微分方程	231
7.2.2 敏感矩阵的微分方程	232
7.2.3 变分方程的形式和求解	233
7.2.4 状态转移矩阵求逆	234
7.3 加速度的偏导数	235
7.3.1 重力势	235
7.3.2 质点摄动	239
7.3.3 太阳辐射压	240
7.3.4 大气阻力	240
7.3.5 推力	241
7.4 观测量对状态矢量的偏导数	242
7.5 观测量对测量模型参数的偏导数	243
7.6 差商近似	244
习题	246
第 8 章 轨道确定和参数估计	248
8.1 加权最小二乘估计	249
8.1.1 线性化和法化方程	251
8.1.2 加权	252
8.1.3 统计学解释	253
8.1.4 考虑参数	256
8.1.5 具有先验信息的估计	257

8.2	最小二乘问题的数值解	259
8.2.1	QR 分解	259
8.2.2	Householder 变换	261
8.2.3	Givens 旋转	263
8.2.4	奇异值分解	265
8.3	卡尔曼滤波	267
8.3.1	最小二乘估计递推公式	268
8.3.2	序贯估计	270
8.3.3	扩展卡尔曼滤波	272
8.3.4	因式分解法	273
8.3.5	过程噪声	275
8.4	批处理估计和序贯估计的比较	276
	习题	278
第 9 章	应用	282
9.1	轨道确定误差分析	282
9.1.1	线性轨道模型	283
9.1.2	考虑协方差分析	286
9.1.3	GEODA 程序	288
9.1.4	算例	289
9.2	实时轨道确定	291
9.2.1	模型与滤波算法设计	292
9.2.2	RTOD 程序	294
9.2.3	算例分析	296
9.3	中继卫星轨道确定	300
9.3.1	数学模型	300
9.3.2	TDRSOD 程序	301
9.3.3	算例分析	303
附录 A		307
A.1	历法计算	307
A.1.1	日历日期到约简儒略日的转换	309
A.1.2	约简儒略日到日历日期的转换	310

A.2	GPS 轨道模型	311
A.2.1	历书星历模型	312
A.2.2	广播星历模型	314
附录 B		317
B.1	互联网	317
B.2	附赠光盘	318
B.2.1	内容	318
B.2.2	系统需求	319
B.2.3	运行程序	319
B.2.4	编译链接	320
B.2.5	库函数索引	322
符号列表		327
参考文献		336

第 1 章

100 分钟环绕地球

虽然第一个人造航天器是 1957 年发射升空的, 但是人类在此之前的两个世纪就已经开始了卫星轨道的研究。从牛顿的万有引力定律开始, 科学家不断地研究、改进描述地球唯一自然卫星——月球运动的分析理论。如今, 数以千计的人造卫星以及无数的空间碎片在地球上空飞行 (图 1.1)。类似天体力学研究太阳系天体的运动规律, 航天动力学关注的是人造卫星

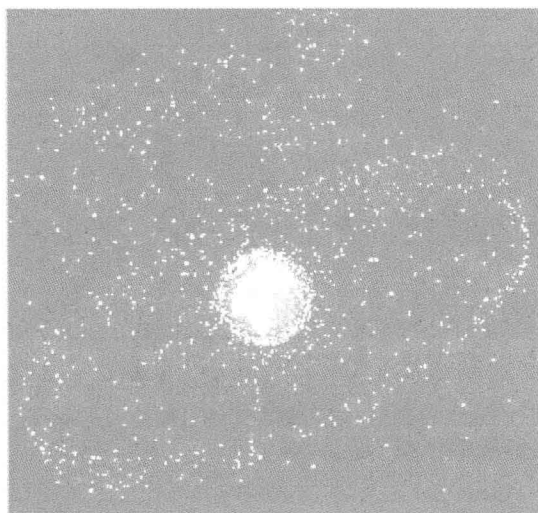


图 1.1 这是一张在轨卫星和空间碎片的快照, 就像一群蚊子在围着灯泡跳舞。大多数空间目标都运行在高度低于 1500 km 的低轨上。除此之外, 很多卫星都聚集在高度约为 36000 km 的地球静止轨道附近。北半球的卫星云主要包括导航和科学卫星 (照片由 ESA/ESOC 友情提供)

轨道及控制的数学和物理描述。这里, 轨道这个术语指的是本质上呈周期性的卫星轨迹, 不考虑飞离地球引力范围驶向行星际的航天器特殊情况。

1.1 卫星轨道的相关资料

除了人类想要征服空间的永恒梦想之外, 还有很多其他非常有说服力的理由促使我们发射卫星到太空中去 (图 1.2)。卫星是获取高层大气或者进行地球磁场实际测量的唯一途径。在轨天文望远镜在各个电磁波频段都能提供一个天空未污染过的、衍射极限下的图像。按道理来说, 要想大规模地收集地球陆地、海洋和大气的图像必须远离地球。同样, 卫星可以持续与地球上许多地区同时保持联系, 从而形成全球电话、数据网络以及电视视频传输的基础。最后, 现在的导航卫星星座可以在全球范围提供精确定位以及飞行器导航服务。

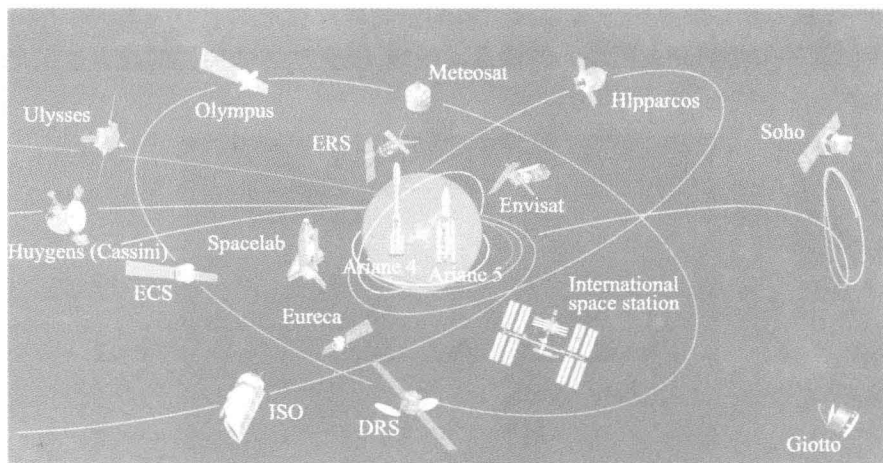


图 1.2 欧空局 (ESA) 的空间任务一览: 载人及微重力 (空间站, 空间实验室, EURECA), 地球观测 (ERS, Meteosat, Envisat), 无线电通信 (Olympus, ECS, DRS) 和科学 (Hipparcos, ISO)。照片由 ESA 提供

1.1.1 低轨卫星轨道

由于上述应用及目前运载火箭的技术 (商业) 限制, 现有卫星的轨道具有某些共性。大多数卫星都发射到近圆轨道上, 轨道高度为

300 km ~ 1500 km。由于存在大气阻力, 在此高度以下的卫星轨道将快速衰减, 从而导致更低轨道只适合短期弹道任务或主动段轨迹飞行。另一方面, 很多任务并不需要或不适合更高的轨道。空间天文台 (如哈勃空间望远镜或者 XMM X- 射线卫星) 在 600 km 的高度就能对整个宇宙一览无遗, 此高度大气对光的扭曲和吸收都可以忽略。遥感卫星在较低的高度能获得精度更高的分辨率, 最后需要强调的是, 更高的轨道需要推力更强的运载器。

众多低轨卫星的轨道倾角分布范围广泛。轨道倾角指的是轨道平面和赤道面之间的夹角, 往往由发射场的地理纬度决定。利用地球自转, 向东发射卫星可以获得最大的轨道速度。轨道平面决定于瞬时惯性位置和速度矢量, 其倾角等于航天器与运载火箭分离点的地理纬度。倾角的任何一点变化 —— 无论变大还是变小 —— 都需要不同的发射方向以及相应的燃料损耗。

1.1.2 遥感卫星的轨道

不考虑发射场的限制, 把航天器发射到大倾角的极轨道上有明显的优势, 因为极轨卫星的地面覆盖率最大。遥感卫星主要用来获取各光谱带的地球高分辨率图像 (Kramer 1996)。既包括光学频率 (可见光和红外), 也包括无线电频率 (雷达)。后者光谱带不受云和天气的影响, 能畅通无阻地进行观测。民用卫星及传感器 (SPOT, Landsat, MOMS-2P) 提供的全色图像分辨率约为 5 m ~ 10 m, 而多光谱传感器分辨率约为 10 m ~ 30 m。欧洲 ERS 卫星在 750 km 的高度所获得的 SAR (合成孔径雷达) 图像分辨率大约为 20 m 左右。

除了全球或接近全球覆盖, 选择遥感卫星的轨道还有其他要求。地面轨迹必须重复而且没有间隙, 这样地球上的每一处都可以一遍又一遍地拍摄到。很明显, 轨道应该是圆形, 这样可以使航天器在同一区域上空重复拍摄图像的高度保持一致。此外, 同样的照明条件是比较和分析不同区域图像的先决条件。幸运的是, 一组特定轨道可以同时满足这些必要条件, 即太阳同步回归轨道。

由于地球扁率导致轨道平面的长期进动。对于轨道倾角为 $97^{\circ} \sim 102^{\circ}$ 并且相应高度在 500 km ~ 1500 km 之间的轨道, 轨道平面在赤道上的交点线以几乎每天 1° 的速度顺时针移动。这个值和太阳沿着赤道的平均视运动相匹配, 从而导致轨道平面和太阳投影方向保持 (近似) 相对固定。因