



国防科技著作精品译丛



Springer

Satellite Orbits

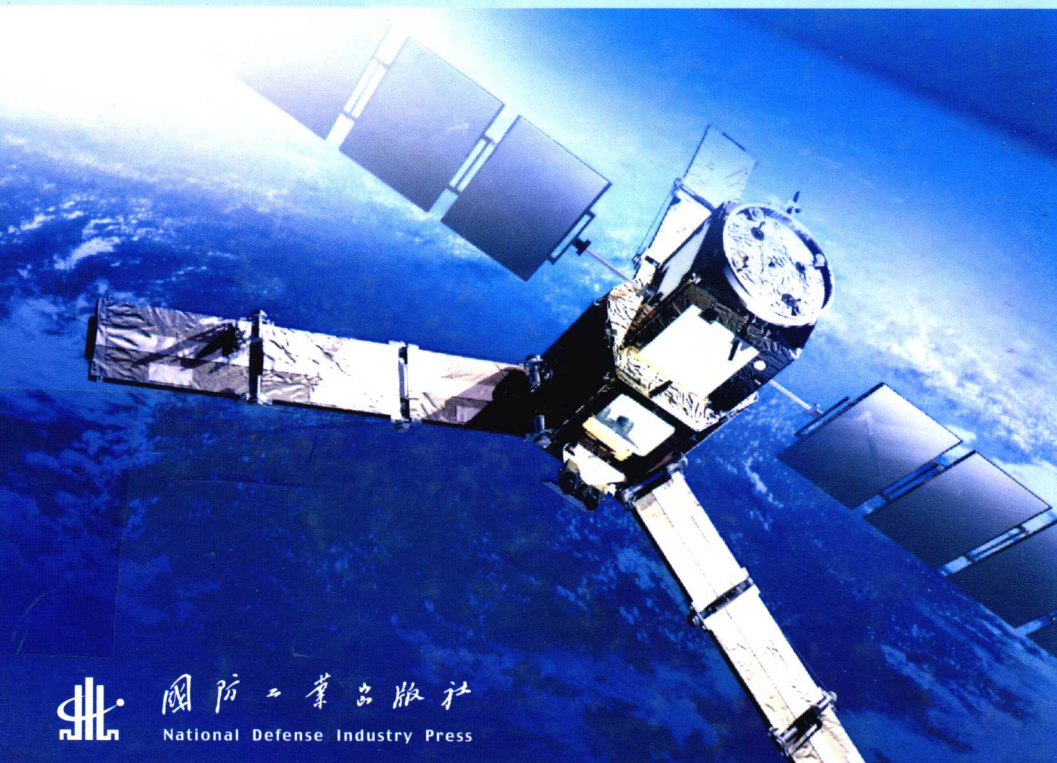
Models, Methods and Applications

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

National Defense Industry Press

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

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

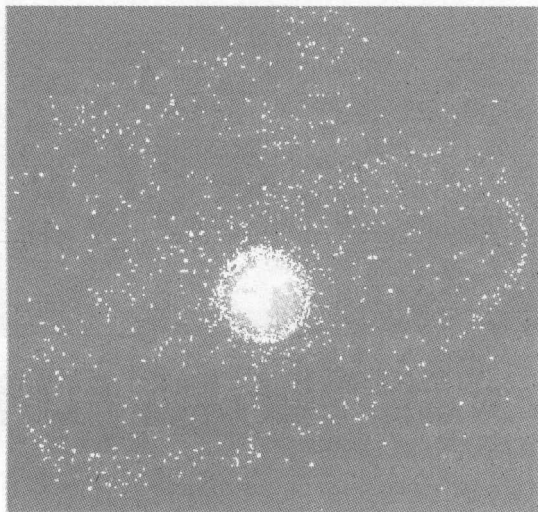


图 1.1 这是一张在轨卫星和空间碎片的快照,就像一群蚊子在围着灯泡跳舞。大多数空间目标都运行在高度低于 1500 km 的低轨上。除此之外,很多卫星都聚集在高度约为 36000 km 的地球静止轨道附近。北半球的卫星云主要包括导航和科学卫星(照片由 ESA/ESOC 友情提供)

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。

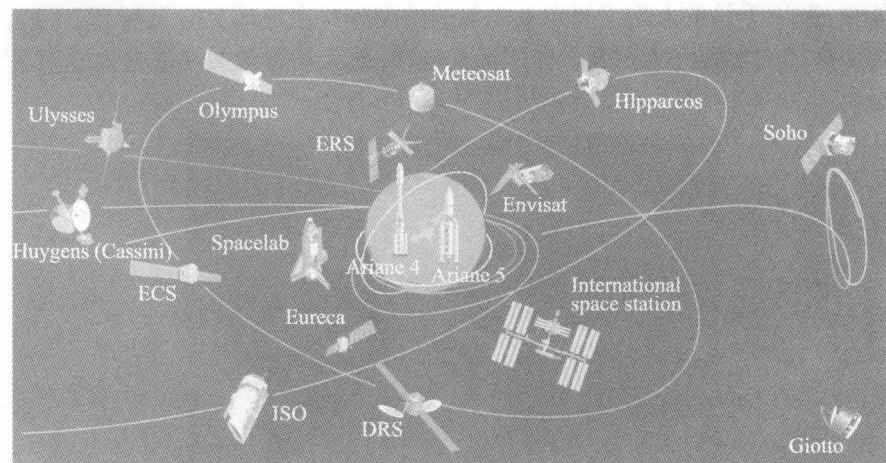


图 1.2 欧空局 (ESA) 的空间任务一览: 载人及微重力 (空间站, 空间实验室, EURECA), 地球观测 (ERS, Meteosat, Envisat), 无线电通信 (Olympus, ECS, DRS) 和科学 (Hipparcos, ISO)。照片由 ESA 提供

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

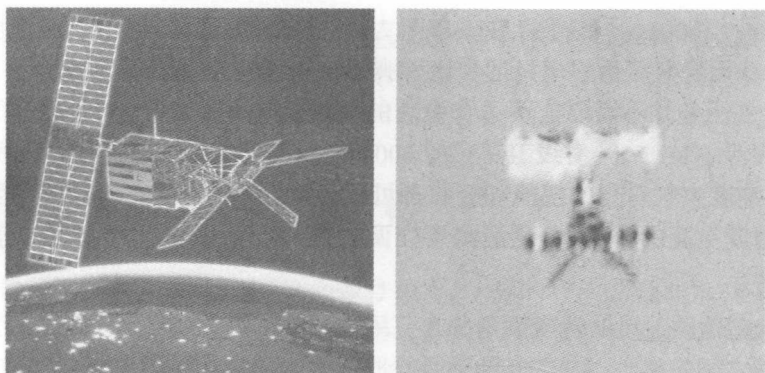


图 1.3 左图: 某艺术家拍摄的 ERS-1 遥感卫星 (ESA 提供) 右图: 1998 年 5 月 6 日, 法国 Spot-4 卫星在尼日尔 Tenere 沙漠上空 41 km 处在轨拍摄的图片 (CNES 提供)

此, 卫星穿过赤道的平地方时每一圈都相同 (例如升交点上午 10 点), 这样可以为图像数据获取提供最合适、可重复的照明条件。

通过选择合适的轨道高度, 可以进一步获得和地球自转共振的轨道周期。例如, 在 900 km 高度, 卫星每天刚好运行 14 圈, 在此周期条件下, 对地面的遥感测量可以一遍又一遍地重复。为了避免地面覆盖的缝隙, 需要合理选择地球自转和卫星轨道周期的比例。以 ERS 系列卫星轨道为例, 它们在 3 天内共飞行了 43 周, 导致赤道上的地面轨迹空隙大约 1000 km。为了保持遥感卫星的轨道特性, 必须对其轨道半长轴进行定期调整, 以补偿大气阻力引起的轨道衰减。

1.1.3 地球静止卫星轨道

1945 年, 即第一颗人造地球卫星 (SPUTNIK 1) 发射 10 多年前, Arthur C. Clarke 在地外中继 (Extra-Terrestrial Relays) 杂志发表的文章中就提出地球静止卫星的想法 (Clark, 1945)。甚至更早时期, K.E. Tsiolkovsky (1918) 和 H. Noodung (1929) 指出位于赤道上方 35800 km 高度的卫星会有与地球自转一致的轨道周期。这两个作者当时可能还没有意识到他们的思想在未来的意义。

从 1963 年的第一个地球静止卫星 —— Syncom 2 开始, 1964 年通过 Syncom 3 转播东京奥运会, 地球静止卫星快速成为空间商业应用的基础。今天有大约 300 颗有效卫星在地球静止轨道运行, 为各种远程通信活动提供了平台。地球静止轨道带的特性以及相应空间资源有限导致了为有关国家或机构划分各自经度区域的国际法律条例的诞生。指定窗口经度的变化

范围一般为 $\pm 0.1^\circ$ ，以避免受临近卫星的信号干扰（乃至物理碰撞）。为此需要定期进行位置保持。典型的位置保持控制每周一次，用来抵消日、地和月球引力摄动，以避免卫星远离指定的区域 (Scoop 1983, 1994)。

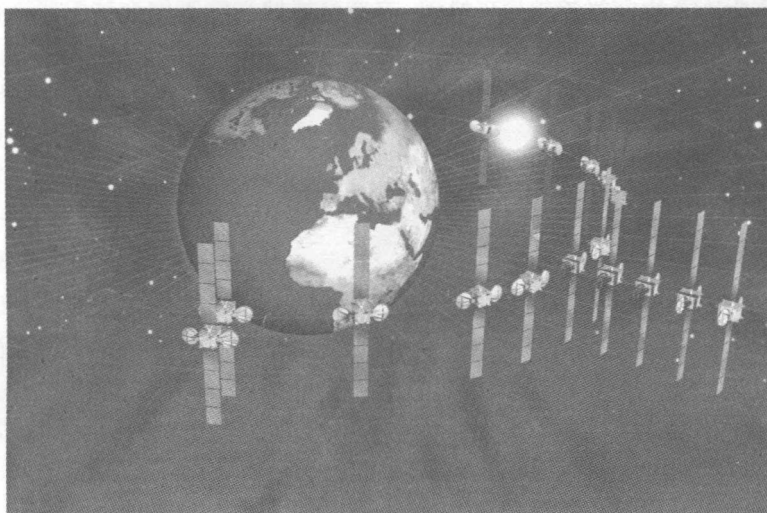


图 1.4 由欧洲通信组织控制的地球静止轨道卫星 (Eutelsat) 的轨道位置 (照片由 Eutelsat 友情提供)

功能日益强大的卫星只能部分满足不断增长的通信需求, 这导致单控制窗口多星共位的出现。目前, 7 颗 ASTRA 卫星正有效控制东经 19.2° 、经度和纬度范围为 $\pm 0.1^\circ \times \pm 0.1^\circ$ 大小的空间里运行, 用户只需一个天线就可以接收不断增多的电视和广播节目。

除了用于远程通信, 地球静止轨道对 Goes 和 Meteosat 之类的气象卫星也有益处。一个地球静止卫星可以提供几乎半个地球的覆盖, 虽然分辨率较低, 但是对全球气象的研究很有用。最后, 地球静止轨道卫星作为传统卫星导航系统的补充越显重要。例如, 欧洲 EGNOS 系统, 利用搭载在 Inmarsat III 卫星上的辅助导航载荷为用户提供 GPS 系统的实时修正, 可以提高现有导航精度和可靠性, 满足飞机高精度着陆的需求。

美国跟踪与数据中继卫星系统 (TDRSS) 体现了地球静止轨道卫星更为特殊的应用。它使航天飞机和低轨卫星之间的持续通信成为可能。此外, 它能提供全弧段覆盖的观测数据。如果采用传统地面站, 由于视场限制则不可能做到这一点。

1.1.4 大椭圆轨道

为了让一颗卫星进入地球静止轨道,首先要将该卫星发射到一个椭圆转移轨道上去,之后再通过抬高近地点将其轨道变圆。这里,大椭圆轨道主要作为一个中间过渡轨道。然而,有意选择偏心轨道作为航天器运行轨道还有一些其他应用。

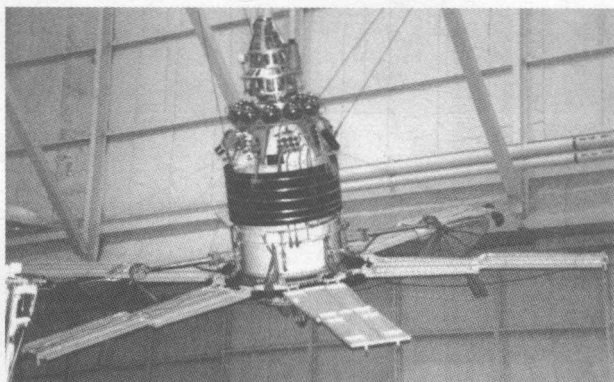


图 1.5 自 1965 年起,Molniya 卫星给苏联以及西方国家提供电话通信及电视节目。照片由 Karl D.Dodenhoff, USAF Museum 提供

在这些应用当中,俄罗斯卫星 Moliya 和 Tundra 是最常见的。考虑到地球静止轨道卫星无法保证位于极区用户的可视性,苏联用全新理念对通信卫星轨道进行了设计。这类卫星位于轨道周期为 12h 的同步轨道上,轨道高度为 $1000 \times 40000\text{km}$,倾角约为 63.4° 。远地点,即距离地球最远的点,定点于北半球上空,这样可以使卫星在其大部分轨道处都具有很高的速度,从而能提供很好的可视度。当卫星快速通过近地点时,仅仅会在短短几小时内与用户失去联系。失去联系的这一间隙可以被一个备份卫星弥补,该备份卫星采用相同的,经过适当旋转的轨道。尽管实现这种通信设计理念需要很多卫星,但是它为极区国家的通信提供了一种合适而且经济的解决办法。

大椭圆轨道的第二种应用主要用于科学应用。为了探测地球磁场和日地相互作用,航天器轨道需要覆盖地心距离直到 15 个或 20 个地球半径的范围。相关任务有美欧合作的 ISEE-1 卫星,其远地点高度有 140000km ,或者 ESA Cluster 任务中的 4 颗卫星均在大椭圆轨道上以四面体结构飞行 (Schoenmaekers 1991)。

1.1.5 星座

星座由多颗卫星组成, 这些卫星沿着类似但是经过适当平移或旋转的轨道绕地球运行。一个很著名的例子即全球定位系统 (GPS), 通过测量至少 4 颗 GPS 卫星所发射的测距信号, 用户可以精确确定他们的位置。全部运行的 GPS 系统包括有 24 颗卫星, 分布在 6 个轨道面上, 每个轨道面的倾角为 55° , 高度为 20200 km。同一轨道面上有 4 颗卫星, 每颗卫星之间相位相差 90° 。同样, 3 个轨道面的升交点赤经相差 120° 。这一结构确保至少有 6 颗卫星始终可以被地球上除了极区外的任何位置所观测到。由于轨道周期为 12 h, 星座构型相对于地球每天 (恒星日) 重复两次。GLONASS (俄罗斯的与美国 GPS 相对应的系统) 采用相似的星座, 包含 24 颗卫星, 平均分布在 3 个轨道面上, 轨道倾角为 64.8° (Ivanov & Salishev 1992), 轨道高度为 19100 km, 轨道周期为 11.25 h, 略短于 GPS 卫星的轨道周期。

在过去 10 年内, 人们已经意识到低轨卫星星座用于全球移动通信的巨大潜力。相对需要大型用户天线的地球静止轨道卫星, 只用一个手持电话就能建立与低轨卫星的通信, 因为这种信号路径更短。任何一个地方至少有一颗卫星可见。利用卫星链路, 电话可以传送到世界各地的其他移动电话用户或者相应的地面网络终端。在 IRIDIUM 之后, 一个轨道高度为 700 km 的由 66 颗卫星组成的星座在 1999 年开始投入运行 (图 1.6, Pizzicaroli 1998)。还有其他一些星座也被设计出来并被部分实现, 例如由 48 颗卫星组成、轨道高度为 1414 km (图 1.7) 的 Globalstar 星座, 由 10 颗卫星组成、轨道高度为 10400 km ICO 星座, 以及由 288 颗卫星组成、轨

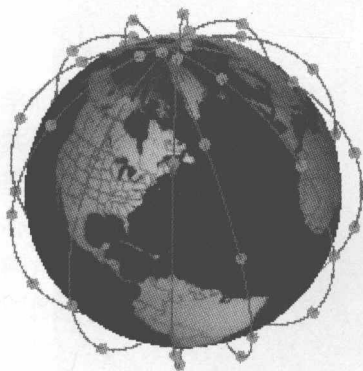


图 1.6 IRIDIUM 星座 (图片由 Sa Vi, The Geometry Center, Univ of Minnesota 提供)

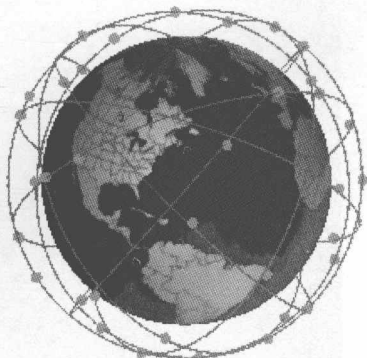


图 1.7 Globalstar 星座 (图片由 Sa Vi, The Geometry Center, Univ of Minnesota 提供)