

卫星大地测量方法

库特·阿诺尔德 著

测绘出版社

卫星大地测量方法

库特·阿诺尔德 著

武汉测绘学院^译
《卫星大地测量方法》翻译组

测绘出版社

1980

内 容 提 要

本书叙述了人造卫星运动的理论, 人造卫星的观测方法, 观测仪器以及观测成果的整理; 较系统地介绍了卫星大地测量的整个内容。

本书着重阐述了卫星大地测量的几何应用和动力应用。几何法以维塞拉方法为基础, 动力法是从卫星轨道的摄动中, 确定地球引力场球函数的系数以及确定测站绝对坐标的方法和结果。

本书可供研制人造地球卫星、从事天文-大地测量和地球物理等工作人员阅读和参考。

KURT ARNOLD
Methoden der Satellitengeodäsie
AKADEMIE-VERLAG · BERLIN, 1970.

卫星大地测量方法

库特·阿诺尔德 著
武汉测绘学院
《卫星大地测量方法》翻译组译

*

测绘出版社出版
武汉测绘学院教材出版科印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本850×1168毫米1/32·印张 8 1/2 ·字数 220 千字
1980年3月第一版·1980年3月第一次印刷
印数1—4,000册·定价1.60元
统一书号: 15039·新74

译 者 的 話

天文、大地及重力测量方法，由于受着自然条件和其它因素的限制，难以解决全球的大地测量问题。人造地球卫星的出现，为解决大地测量问题开辟了新的途径。

我们本着“洋为中用”的目的，选译了这本《卫星大地测量方法》，供生产、科研和教学部门的同志们参考。

本书比较完整而系统地介绍了卫星大地测量的整个内容。第一章是绪论。第二章到第四章对人造地球卫星的运动理论进行了归纳；同时又以古在由秀、默森和考拉三种方法作为摄动理论的基础，讨论了卫星运动的摄动。另外还引出了卫星运动的各种摄动（地球引力场、日月引力效应、大气阻力以及太阳辐射压等影响）。第五章介绍了人造地球卫星的观测方法和仪口，给出了应用于大地测量的卫星数据以及被动卫星亮度的计算公式。第六、七两章讨论了天文和大地坐标系统、化算方法和摄影观测成果的整理；扼要地介绍了卫星轨道要素的确定，卫星星历表的计算和卫星的可见度。第八、九两章是本书的核心问题，前者阐述了卫星大地测量的几何应用，它以维塞拉方法为基础，叙述目前所采用的几种宇宙大地测量方法和结果。后者阐述了卫星大地测量的动力应用，即从卫星轨道的摄动中，确定地球引力场球函数的系数以及确定测站绝对坐标的方法和结果。目前已很明显地看出，在地球形状及其外部引力场的研究中，要想取得较好的结果，必须联合应用地面测量（天文、大地和重力测量）和卫星观测资料。关于这方面的问题，在第九、十两章中也作了论述。卫星大地测量与地球物理有着密切的关系，我们固然要研究地球物理因素对卫星运动的影响，但是将卫星大地测量的结果，进行地球物

理的解释，也是值得注意的问题，第十一章就对这个问题作了阐述。

本书是按原德文本翻译的，在校对译文的过程中，还参照了该书的俄译本。关于译文中所加的参考文献注（在方括号内加参考文献的号码）已作了部分删简。另外，原书中有个别错误，我们已在译文中加以改正。

本书由夏坚白 赵纯敏 高时浏 翻译

并由夏坚白 管泽霖 宋成骅 校订

由于译者水平有限，译文中难免有错误之处，希望读者批评指正。

縮 写 符 号

| | |
|-------------|-----------------|
| A, B, C | 地球的主惯性矩 |
| A | 卫星的平均横截面 |
| A | 方位角, 从北起算, 向右旋转 |
| C_D | 摩擦系数 |
| C_{lm} | 球函数系数 |
| D | 天顶大气消光 |
| E | 偏近点角 |
| G | 地球表面上重力的总平均值 |
| H | 标高度 |
| I | 月球轨道的倾角 |
| I | 贝塞尔函数 |
| I_0 | 太阳常数 |
| J_l | l 阶带球函数系数 |
| K | 系数 (辐射压) |
| L | 纬度的幅角 |
| M | 地球质量 |
| M | 平近点角 |
| N | 大地水准面起伏 |
| Q | 地球表面上的控制点 (测站) |
| R | 测站到地球重心的距离 |
| R_E | 平均地球椭球的长半轴 |
| \bar{R}_E | 平均地球椭球的短半轴 |
| R_s | 卫星的半径 |
| S | 卫星的位置 |
| S_{lm} | 球函数系数 |

| | |
|-----------------------|--|
| T | 摄动位 |
| T | 卫星的周期 |
| U | 正常位 |
| V | 引力位 |
| \bar{V} | 对 V 展开的球对称主项 |
| W | 重力位 |
| X, Y, Z | 与地球体联接坐标系中的测站坐标。 Z 轴指向平极， $X-Z$ 平面是格林尼治子午面。 |
| X', Y', Z' | 固定于地球的坐标系。 $X'-Y'$ 面为测站的水平面； X' 轴指向东， Y' 轴指向北， Z' 轴指向天顶。 |
| Z | 天顶距 |
| a | 卫星轨道的长半轴 |
| $a_{\text{月}}$ | 月亮绕地球的轨道的长半轴 |
| b | 卫星轨道的短半轴 |
| c | 光速 |
| c^* | 吸收系数 |
| e | 轨道椭圆的偏心率 |
| f | 焦距 |
| f | 地球的扁率 |
| f | 频率 |
| \bar{f} | $\bar{f} = \sin^2 i$ |
| f^* | 地球赤道的扁率 |
| Δg | 重力异常 |
| $[\Delta g]_q$ | 面积 Fq 的重力异常平均值 |
| Δg_{F} | 空间异常 |
| g | 相邻测站间的单位矢量 |
| h | 海拔高，高度角 |
| i | 轨道倾角 |

| | |
|---------------------------|----------------------|
| $i_{\text{月}}$ | 月亮轨道的倾角 |
| j | $j = \sqrt{-1}$ |
| k | 引力常数 |
| m | 卫星的质量 |
| $m_{\text{月}}$ | 月亮的质量 |
| m | 亮度(星等、等级) |
| n | 卫星的角速度 |
| \bar{n} | 卫星角速度的平均值 |
| \mathbf{n} | 法线矢量 |
| $n_{\text{月}}$ | 月亮的角速度 |
| $n_{\text{日}}$ | 太阳的角速度 |
| p | 轨道椭圆的参数 |
| p | 卫星的相位角 |
| p | 平差时的权 |
| p_1, p_2, p_3 | 积分常数 |
| q_1, q_2, q_3 | 积分常数 |
| r | 卫星到地球重心的距离 |
| r^* | 天文折射 |
| $r_{\text{月}}$ | 月亮的地心径向矢量 |
| s | 测站到卫星的距离 |
| t | 时间 |
| t | 太阳辐射压引起的加速度 |
| s_1, s_2, s_3 | 太阳的地心坐标 |
| $\frac{\underline{v}}{v}$ | 卫星的轨道速度 |
| v | 偶然误差 |
| v_l, v_q | 卫星迹线的纵向误差和横向误差 |
| $x, y, z;$ | |
| x_s, y_s, z_s | 在空间天文坐标系统中的卫星坐标 |
| x^0, y^0, z^0 | 历元 1950,0 系统中的卫星空间坐标 |

| | |
|--|---|
| x', y', z' | 开始观测卫星轨道的那一瞬间 ($t = T'$), 真天文系统中的卫星空间坐标 |
| x'', y'', z'' | 可变瞬间 $t = T''$ 的真天文系统中的卫星空间坐标 |
| x''', y''', z''' | 卫星空间坐标; z''' 轴垂直于卫星轨道面, x''' 轴指向升交点 |
| x'''' , y'''' , z'''' | 卫星空间坐标, z'''' 轴垂直于卫星轨道, x'''' 轴指向近地点 |
| $x_{\text{月}}, y_{\text{月}}, z_{\text{月}}$ | 月亮的地心坐标 |
| $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ | 象片坐标 |
| $\bar{x}', \bar{y}', \bar{z}'$ | 正切坐标 |
| $\bar{x}^*, \bar{y}^*, \bar{z}^*$ | 象面的坐标系统 (\bar{y}^* 轴水平) |
| Γ | 系数 |
| Θ | 恒星时 |
| Ω | 升交点 |
| α | 赤经 |
| γ | 正常重力 |
| γ_E | 赤道上的正常重力 |
| $\gamma_{1m}^C, \gamma_{1m}^S, \gamma_q$ | 系数 |
| δ | 赤纬 |
| ξ | 大地水准面的高度 |
| ϑ | 密度 |
| λ | 由格林尼治向东的地理经度 |
| $\bar{\lambda}$ | 太阳相位差 = 日 - 夜 - 效应 |
| σ | 单位球面 |
| φ' | 地理纬度 |
| φ | 地心纬度 |
| φ^* | $\sin \varphi^* = e$ |
| ω_E | 地球自转的角速度 |

| | |
|------------------------------------|---------------------|
| ω | 近地点幅角 |
| ψ | S 和 Q 这两点间的球面距离 |
| ξ, η | 垂线偏差 |
| ξ, η | 卫星在轨道平面内的坐标 |
| $\bar{\xi}, \bar{\eta}, \bar{\xi}$ | 系数 |
| τ | R_E/r |
| κ | 大气的吸收系数 |
| ε | 黄赤交角 |

目 录

| | |
|---|-----------|
| 缩写符号..... | 1 |
| 第一章 绪 论 | 1 |
| 1.1 参考文献 | 9 |
| 第二章 二体问题 | 10 |
| 2.1. 轨道要素和克普勒定律..... | 10 |
| 2.2. 取决于轨道要素的卫星空间坐标..... | 16 |
| 2.3. 取决于熄火时位置矢量和速度矢量的卫星 空间坐标..... | 19 |
| 2.4. 二体问题的级数展开..... | 21 |
| 2.5. 参考文献..... | 25 |
| 第三章 引力场引起的轨道摄动 | 26 |
| 3.1. 摄动加速度..... | 26 |
| 3.2. 拉格朗日摄动方程..... | 28 |
| 3.3. 高斯形式的拉格朗日摄动方程..... | 31 |
| 3.4. 小偏心率摄动方程..... | 33 |
| 3.5. 运动方程的数值积分..... | 35 |
| 3.6. 按轨道要素展开的摄动位..... | 36 |
| 3.7. 分析积分..... | 41 |
| 3.8. 长期、长周期和短周期摄动..... | 42 |
| 3.9. 二阶摄动..... | 51 |
| 3.10. 二阶球函数引起的短周期摄动..... | 53 |
| 3.11. 取决于地面重力异常的轨道摄动..... | 55 |
| 3.12. 参考文献..... | 59 |
| 第四章 日、月引力, 大气阻力和太阳辐射压所引 起的轨道摄动 | 60 |
| 4.1. 日、月引力所引起的轨道摄动..... | 60 |

| | | |
|------------|-----------------------------|------------|
| 4.2. | 大气阻力对轨道摄动的影响 | 65 |
| 4.3. | 太阳辐射压所引起的轨道摄动 | 76 |
| 4.4. | 地球的固体潮所引起的轨道摄动 | 78 |
| 4.5. | 参考文献 | 79 |
| 第五章 | 观测方法 | 81 |
| 5.1. | 卫星摄影观测 | 81 |
| 5.2. | 多普勒观测 | 87 |
| 5.3. | 塞可尔测量 | 90 |
| 5.4. | 激光观测 | 91 |
| 5.5. | 专用卫星 | 93 |
| 5.6. | 卫星的亮度 | 97 |
| 5.7. | 参考文献 | 101 |
| 第六章 | 坐标系统、时间系统、化算方法、星历表计算 | 102 |
| 6.1. | 坐标系统 | 102 |
| 6.2. | 化算方法, 恒星坐标 | 108 |
| 6.3. | 折射对恒星坐标的影响 | 109 |
| 6.4. | 切向坐标 | 111 |
| 6.5. | 光学系统的畸变 | 113 |
| 6.6. | 仿射变换方程 | 113 |
| 6.7. | 卫星位置的计算 | 114 |
| 6.8. | 光程 | 115 |
| 6.9. | 视差折射 (火箭折射) | 116 |
| 6.10. | 卫星相位的改正 | 118 |
| 6.11. | 透视 (摄影测量) 变换公式 | 119 |
| 6.12. | 在两个测站上同步观测时, 卫星位置的几何学可见度条件 | 125 |
| 6.13. | 同步观测 | 126 |
| 6.14. | 星历表计算, 在一个测站上卫星可见度的条件 | 127 |

| | |
|---|------------|
| 6.15. 参考文献 | 138 |
| 第七章 轨道要素的确定 | 139 |
| 7.1. 求定轨道要素的第一次近似值 | 139 |
| 7.2. 卫星方向测量的误差方程式 | 140 |
| 7.3. 距离测量和多普勒测量的误差方程 | 149 |
| 7.4. 参考文献 | 149 |
| 第八章 几何卫星大地测量 (维塞拉恒星三角测量, 宇宙三角测量) | 151 |
| 8.1. 在两个测站上的同步观测 | 151 |
| 8.1.1. 基本的数学关系式, 误差方程, 平差 | 151 |
| 8.1.2. 误差理论 | 158 |
| 8.1.3. 维塞拉方法的实际应用 | 162 |
| 8.1.4. 测站间单位矢量的空间网平差 | 164 |
| 8.2. 在三个和更多测站上的同步观测 | 168 |
| 8.2.1. 基本原则 | 168 |
| 8.2.2. 宇宙三角测量的误差方程 | 170 |
| 8.2.3. 误差理论 | 172 |
| 8.2.4. 宇宙三角测量的一个特例 | 174 |
| 8.2.5. 卫星坐标的消去法 | 175 |
| 8.2.6. 在二个、三个和更多个测站上同步观测的组合系统 | 175 |
| 8.2.7. 实际应用 | 176 |
| 8.3. 测站到卫星的距离计算。三边测量、三球测量 | 177 |
| 8.3.1. 误差方程 | 177 |
| 8.3.2. 三球测量 (空间弧交会, 三球交会) | 177 |
| 8.3.3. 距离和方向的综合测量 | 179 |
| 8.3.4. 借四个测站的同步测距来测定比例尺 | 179 |
| 8.3.5. 用光电测距导线来测定比例尺 | 180 |

| | | |
|-------------|--------------------------|------------|
| 8.4. | 世界大地测量系统 | 181 |
| 8.5. | 参考文献 | 186 |
| 第九章 | 动力学的卫星大地测量 (轨道方法) | 187 |
| 9.1. | 绪论 | 187 |
| 9.2. | 确定带球函数的方法 | 188 |
| 9.3. | 古在由秀的带球函数的数字值 | 193 |
| 9.4. | 确定田和扇球函数的误差方程式 | 197 |
| 9.5. | 共振 | 199 |
| 9.6. | 确定田和扇球函数的法方程式 | 200 |
| 9.7. | 确定比例尺 | 204 |
| 9.8. | 用位的展开式来确定大地水准面和重力异常 | 205 |
| 9.9. | 数字结果 | 206 |
| 9.9.1. | 光学观测 | 207 |
| 9.9.2. | 多普勒观测 | 209 |
| 9.9.3. | 卫星观测和地面重力异常的联合平差 | 210 |
| 9.10. | 按照重力异常来表示重力场 | 211 |
| 9.11. | 关于轨道方法的研究 | 214 |
| 9.12. | 360 度弧 | 217 |
| 9.13. | 24小时卫星 | 222 |
| 9.14. | 宇宙数据和地面数据的综合应用 | 225 |
| 9.15. | 参考文献 | 233 |
| 第十章 | 三角测量与卫星观测站系统的联接 | 234 |
| 第十一章 | 卫星大地测量成果的说明 | 238 |
| 11.1. | 地球扁率、赤道的椭圆率和地球的梨形 | 238 |
| 11.2. | 卫星大地水准面与均衡大地水准面的比较 | 241 |
| 11.3. | 地壳流体静力层的异常 | 242 |
| 11.4. | 平均地球椭球的长半轴 | 253 |

第 一 章

緒 论

近几年来人造地球卫星的观测，对于大地测量来说，具有重要意义。然而，在大地测量中观测行星及其卫星，以及月亮并不是新问题。

很早以前，人们就已观测四个明亮的木卫进入木星阴影，以求定地理经度差。也就是在两个彼此相距遥远的观测站上确定某一木卫的卫食时刻。如果人们在这两个测站上通过观测恒星而确定了各自的真地方时，那末由木卫的观测所求得的两点间的地方时之差就是两个测站间的经度差。为了估算这种经度测定的精度，可以认为地球自转一周为 86,400 秒。因此，当地球周长为 40,000 公里时，一秒大约相当于 460 米。所以如果时间观测误差为一秒，那么在赤道上所引起的东西方向内点位误差大约为半公里。在较高纬度上，由于子午线的收敛，这种误差就要乘以纬度的余弦，因此，误差就变小一些。

近几十年来，用现代方法进行的月掩星观测在原理上已经比较接近于卫星大地测量方法。如果我们观测恒星在月面后的消失，当月亮的中点和直径为已知时，那么就获得一条关于观测点位置的定位线。因为关于月亮的地形知道得还相当少，以致成为一个很大的误差来源，为了减少这种误差影响，建议这样选择两个测站，使两站上可以看到恒星被月缘的同一位置所掩盖。如果其中一个测站位置为已知，而另一个测站为未知，那末我们就可按此方法获得关于第二个测站位置相对于第一测站的定位线。如果两个观测站彼此相距只有几百公里，那末利用此法时，即恒星总是在同一位置消失在月面后，能达到地面上 ± 20 米的精度。

但是如果我们想跨越几千公里的长距离，那末最高精度也要降到大约± 120 米，这是由于月亮的天平动使又一个误差来源起作用。只有进一步丰富关于月亮的地形知识，才能对此有所弥补 (Hirose) [6]。

奥基夫 (O'Keefe) 和安德森 (Anderson) [8] 通过类似的观测导得了平均地球椭球的长半轴 $R_E = 6\,378\,448$ 米。

日食时观测太阳镰刀，也可以导致类似的大地测量应用的可能性。因此，近几十年来，为大地测量目的进行了多次日食观察。这类观察有 1927 年的巴纳希维茨 [Banachiewicz]，1945 年的邦斯多道夫 [Bonsdorff]，1947 年的希尔冯南 [Hirvonen] 和库卡麦基 [Kukkamäki] 以及 1948 年日本在达姆巴拉 [Dambara] 等日食观察队 [4]。这里不拟深入研究这种方法和详细叙述这些观察队，但是可以肯定，可能达到的定位线的精度约 120 米至 300 米，并在此容许误差范围内和其它方法符合得很好。

人们只有在进一步研究月亮的地形之后才能期望由日食观察得到更好的结果。

贝罗特 [Berroth]、霍夫曼 [Hoffmann] [2] 和穆勒 [Mueller] [7] 对这些方法本身作了详细的叙述。

赫尔默特 [Helmert] [5] 曾由月亮的轨道运动求得平均地球椭球的长半轴的数值。这个方法在原则上是以下述考虑为根据的。由月亮围绕地球的近似圆形运动可以导出作用于月亮上的离心力。这个离心力一定等于地球对月亮的引力。因此我们得知地球在月亮轨道范围内的万有引力。我们知道地球在外层空间的万有引力是和离地心距离的平方成反比而递减，所以可由月亮的轨道运动、月亮离地球的距离和地球的自转运动求地面的重力。如果我们假定这样获得的地面重力值等于利用摆和重力仪所测得的地面观测值，那末就获得所求的关系。这个关系除了含有平均地球椭球的长半轴 R_E 之外，还有月亮视差、地面的平均重力加速度和月亮角速度。因此由这个关系可以用另外三个参数来确定 R_E 。

赫尔默特按两个不同方案得到了 $R_E = 6\,378\,830$ 米和 $6\,381\,460$ 米；后来的研究得到 $6\,378\,743$ 米和 $6\,378\,343$ 米，见赫尔默特、约尔丹-埃格特 [Jordan-Eggert]

人们也曾尝试由月亮围绕地球的轨道运动求地球的扁率；因为地球的扁率引起月亮的经度和纬度有周期性的摄动，这是拉普拉斯早已指出过的，经纬度摄动的幅度都约为 $8''$ 。经度的摄动与月亮轨道升交点的经度的正弦成正例，而纬度的摄动则与月亮的经度的正弦成比例。幅度是随地球重力场的二阶带球函数成线性变化，由此可计算平均地球椭球的扁率。拉普拉斯于 1802 年由经度摄动和纬度摄动求出了地球扁率

$$f = 1 : 305.05$$

和

$$f = 1 : 304.6$$

赫尔默特于 1884 年通过平差得到了当时的最好数值：

$$f = 1 : 297.8 \pm 2.2$$

即使这一数值的中误差还是很大，但它是一个与现代的结果颇相一致的数值。

人们易于看出，上述方法虽然重要而且也有价值，但并不能满足所有的要求。与此相反，卫星大地测量的方法不仅可以得到精确得多的结果，而且还开辟了更为广阔的新的发展途径。其原因在于，人造地球卫星比之例如月亮距观测者要近得多。当地球到月亮的平均距离约为 $384\,400$ 公里时， $0.''01$ 的观测误差就在地球上造成点的线性位移达 20 米。相反，观测人造地球卫星的优点在于，观测目标大约只有 1000 公里远， $1''$ 的观测误差只引起点的位移约 5 米。

观测月亮的时候，顾及其地形总会遇到困难，而人造地球卫星就没有这一缺点，因为在大地测量观测时可以把人造卫星看作点状的天体，只有直径为 30 米到 40 米的大型气球卫星才有必要根据相位角归算到几何中点，而这是易于以适当的精度进行的。