



人造卫星的照相观测和  
资料处理

黄坤仪 秦道 著  
科学出版社

# 人造卫星的照相观测 和资料处理

黄坤仪 秦道著

科学出版社

1982

## 内 容 简 介

人造卫星的照相观测,是卫星地面跟踪系统的重要组成部分,而数据处理又是利用这种观测资料的重要手段。本书从研究卫星视运动特性出发,前四章比较系统地介绍卫星照相机观测的方法和技术,着重介绍了仪器的调整、测试和应用。第五、六两章介绍了必不可少的资料处理的预备知识。从第七章起重点介绍资料处理的天文方法,最后讨论卫星照相观测的误差分析。

本书可供天文工作者、人造卫星工作者、测绘工作者参考使用。

## 人造卫星的照相观测和资料处理

黄坤仪 秦 道 著

责任编辑 夏墨英

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1982年9月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1982年9月第一次印刷 印张: 11 1/4

印数: 0001—1,820 字数: 256,000

统一书号: 13031 · 1986

本社书号: 2703 · 13—5

定 价: 1.80 元

## 前 言

人造卫星的照相观测，是卫星地面跟踪系统的重要组成部分。由于人卫照相机是以星空为背景拍摄卫星，采用相对定位方法，能够达到很高的精度，因此，它特别适用于测定地面站坐标、地球引力场和地球高层大气，研究卫星运动的细微变化以及其他天文与地球物理课题。早在50年代末期，美国施密松天文台就研制了一批大型的贝克-纳恩人卫照相机，建立了全球第一个卫星照相观测系统，其观测成果突出地表现为建立了“施密松标准地球”。今天，全世界拥有数以百计的卫星照相观测站，观测数量已超过百万，在空间研究工作中起着重大的作用。

60年代以来，卫星激光测距和卫星多普勒测速的技术发展很快，精度越来越高。但是，这两种新兴的方法，测量的是卫星和观测站的相对距离以及距离变率，卫星空间定向还得依靠照相观测。此外，卫星照相观测不受卫星上装备的限制，既能观测由太阳光照亮的被动卫星，也能观测闪光卫星；既能观测地面高度为几百公里的近地卫星，也能观测距离为几万公里的远地卫星。看来，在相当长一段时间内，照相观测仍然是卫星地面观测的重要方法之一。

人造卫星的照相观测向天体测量学提出了许多新课题。问题的复杂性主要是在于卫星快速的视运动和亮度的暗弱，使它具有不同于经典照相天体测量或航空摄影测量的新特点。现代技术的发展，电子计算机的应用和现代数学方法的引入，使得卫星照相观测成为一门新的严密的测量科学。

本书从研究卫星视运动特性出发，前面四章比较系统地介绍卫星照相观测的方法和技术，重点在于介绍仪器的调整、测试和使用。五、六两章介绍必不可少的资料处理的预备知识——坐标系统和多变量误差分析。从第七章开始，重点介绍资料处理的天文方法，其中包括照相天体测量的基本内容；对于测量学界惯用的摄影测量方法也详加介绍。最后，讨论了卫星照相观测的误差分析。在讨论中，我们尽量使它适合实际工作的需要，读者可以根据书中介绍的方法和公式，直接编制电子计算机上适用的程序。

多年来，紫金山天文台人造卫星室和国内各有关天文台站从事卫星照相观测和研究，积累了丰富的资料和经验，本书就是在这些工作的基础上写成的。1967年曾写出初稿，1978年写出第二稿。参加过这些编写工作的除我们两人外，还有黄楚珊同志。在定稿过程中，我们对本书作了较大的修改和补充（其中第三章主要由顾光德同志编写和修改）。本书可供卫星照相观测、火箭弹道照相观测、天体测量、卫星测地以及卫星观测、预报和轨道理论工作者及有关人员参考。

由于我们水平有限，在内容选择和章节安排上一定有不当之处，甚至可能会有错误，希望读者批评指正。

在本书编写过程中，曾得到各有关单位的热情支持。朱期潮、张瑞华、程炎明、冯和生、仇步章、胡宁生、武志贤、吴连大、周雄、王永保和凌荣福等同志给予许多帮助，提出了许多宝贵意见；陈亚珠和陈士泉同志协助绘制了书中所有的插图。在此，向他们致以衷心感谢。

著 者

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第一章 人造卫星的视运动特性 .....           | 1   |
| § 1.1 人造卫星的视运动轨迹 .....         | 1   |
| § 1.2 人造卫星的视运动角速度和角加速度 .....   | 14  |
| § 1.3 人造卫星的亮度 .....            | 18  |
| § 1.4 人卫照相机的基本要求 .....         | 30  |
| 第二章 人卫照相机的光学系统 .....           | 32  |
| § 2.1 目视望远镜的光学参数 .....         | 32  |
| § 2.2 人卫照相机的光学参数 .....         | 37  |
| § 2.3 照相机的光学象差及其克服办法 .....     | 49  |
| § 2.4 几种常用的人卫照相机的光学类型 .....    | 53  |
| § 2.5 照相机光学性能的研究和光学参数的测定 ..... | 58  |
| § 2.6 施密特型照相机光学系统的调整 .....     | 68  |
| 第三章 人卫照相机的时间记录系统 .....         | 73  |
| § 3.1 卫星痕迹测量标志的获得 .....        | 74  |
| § 3.2 时间记录方法 .....             | 85  |
| § 3.3 快门迟滞误差及其测试方法 .....       | 89  |
| 第四章 人卫照相机的跟踪系统 .....           | 95  |
| § 4.1 固定地平式机架及其调整 .....        | 96  |
| § 4.2 固定赤道式机架及其调整 .....        | 98  |
| § 4.3 三轴式机架及其调整 .....          | 103 |
| § 4.4 四轴式机架及其调整 .....          | 107 |
| § 4.5 人卫照相机的工作模式 .....         | 113 |
| § 4.6 程序跟踪简介 .....             | 116 |
| 第五章 卫星照相观测常用的坐标系统 .....        | 118 |

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| § 5.1 | 坐标系统简介                 | 118 |
| § 5.2 | 天球坐标系、恒星坐标系和轨道坐标系之间的转化 | 131 |
| § 5.3 | 时间及其计算                 | 139 |
| § 5.4 | 恒星坐标系到地球坐标系的转化         | 150 |
| 第六章   | 多变量误差分析和最小二乘法          | 153 |
| § 6.1 | 随机数据及其分布               | 153 |
| § 6.2 | 子样值和统计量估计              | 170 |
| § 6.3 | 误差传播定理                 | 177 |
| § 6.4 | 最小二乘法                  | 183 |
| 第七章   | 照相天体测量方法               | 192 |
| § 7.1 | 底片与星空,理想坐标和天球坐标的关系     | 192 |
| § 7.2 | 量度坐标与理想坐标的关系           | 199 |
| § 7.3 | 底片常数法                  | 202 |
| § 7.4 | 人造卫星虚拟点的量度坐标、天球坐标及其协方差 | 208 |
| § 7.5 | 依数法                    | 211 |
| § 7.6 | 内插法                    | 219 |
| 第八章   | 影响卫星定位各种因素的讨论          | 230 |
| § 8.1 | 内部因素的影响及其改正            | 230 |
| § 8.2 | 大气折射对人造卫星照相定位结果的影响     | 239 |
| § 8.3 | 光行差及其对卫星照相定位的影响        | 251 |
| § 8.4 | 卫星光行差影响的改正             | 259 |
| § 8.5 | 卫星相位差和周日运动改正           | 261 |
| § 8.6 | 各种改正的统一处理方法            | 264 |
| 第九章   | 人卫底片处理的进行              | 267 |
| § 9.1 | 对星图、查星表和定标星的选择         | 267 |
| § 9.2 | 坐标量度仪                  | 270 |
| § 9.3 | 定标星和卫星错误点的剔除           | 278 |
| § 9.4 | 利用电子计算机自动找星简介          | 280 |
| § 9.5 | 底片处理计算实例               | 283 |
| 第十章   | 摄影测量方法                 | 295 |

|        |                            |     |
|--------|----------------------------|-----|
| § 10.1 | 内外方位元素、天球坐标和量度坐标的关系 .....  | 295 |
| § 10.2 | 量度坐标的改正及内外方位元素近似值的计算 ..... | 299 |
| § 10.3 | 卫星天球坐标的计算 .....            | 305 |
| § 10.4 | 摄影测量法的协方差计算 .....          | 313 |
| 第十一章   | 人造卫星照相观测的误差分析 .....        | 320 |
| § 11.1 | 底片测量、大气抖动和乳剂位移的误差 .....    | 322 |
| § 11.2 | 偶然误差对定位结果的影响 .....         | 328 |
| § 11.3 | 以星表位置估计观测的精度 .....         | 336 |
| § 11.4 | 一圈内部符合度 .....              | 337 |
| § 11.5 | 观测站外符合精度 .....             | 342 |
| 附录     | 各国人卫照相机一览表 .....           | 345 |



# 第一章 人造卫星的视运动特性

人造卫星照相观测和目视光学观测一样，必须满足所谓光学可见条件，即：(1) 卫星要飞过观测地的地平面以上；(2) 观测地的天光应足够黑暗；(3) 卫星要被阳光照亮。此外，人造卫星照相观测还有它的特殊条件。由于大部分卫星是一种暗弱的移动目标，要把它们拍摄下来，并精确地确定它们的位置和相应的时刻，还必须比较深入地了解卫星在天球上的视运动轨迹、视角速度、视角加速度以及它们的亮度，由此确定人卫照相机的基本要求，制定合适的观测方法。因此，本书首先介绍人造卫星的视运动特性。

## § 1.1 人造卫星的视运动轨迹

大家知道，对于遥远的恒星来说，它的周日运动视轨迹主要是地球绕轴自转的反映，因此表现为以天极为极的大圆弧（赤道）和小圆弧（纬圈）。时角的变化速度为  $15''/s$ 。我们的祖先在长期天文观测实践中，根据恒星周日运动视轨迹的特性，很早就制成精美的二轴赤道式机架，如现今陈列于南京紫金山天文台的古天文仪器——浑仪和简仪。只要令仪器绕极轴旋转，以补偿地球的周日自转，就能很好地跟踪恒星，这种原理一直沿用到现代。采用二轴赤道式机架，可以方便地实现几十分钟、甚至几小时的恒星照相。利用照相底片的累积性，一架口径只有四十公分的望远镜可以拍下暗达 15 等的恒星。

人造卫星每天要绕地球转十多圈，它们的地面高度一般为几百公里到几千公里，小于甚至于远远小于地球半径，视差现象显著；再加上地球自转，地球非球形摄动以及大气阻尼等因素所造成的卫星空间轨道的变化，这就使得卫星的视轨迹十分复杂。可以想象，一个能够完全模拟卫星视运动的跟踪机构也一定非常复杂。因此，寻找一种既能很好地模拟卫星视运动，而其结构又易于实现的跟踪机构就显得十分必要了。这个问题的几何实质就是如何寻找一些简单的初等曲线来逼近卫星的真实视轨迹。

本节我们从分析人造卫星视轨迹入手，讨论天球上大圆弧和小圆弧对卫星视轨迹的逼近问题（大圆弧逼近的具体实现是利用三轴式跟踪机架，小圆弧逼近的具体实现是利用四轴式跟踪机架，我们将于第四章进行讨论。），以使读者对当前流行的人卫跟踪照相机跟踪机架的主要类型——三轴式和四轴式机架的优缺点有比较清楚的概念。

## 1. 圆轨道卫星的视轨迹

我们研究最简单的情况，设卫星的空间轨道是圆形，并略去地球自转等影响。进一步的分析表明，由此得出的基本结论富有普遍的意义。

设卫星空间轨道平面为  $P$  平面；过观测者  $O$  作一平面  $P'$  平行于  $P$ ；过观测者  $O$ 、地心  $E$  和卫星视最高点  $S_0$  作一个平面  $M$ ，则  $M$  垂直于  $P$  和  $P'$  两平面。以观测者为原点建立右手直角坐标系  $\xi_0, \eta_0, \zeta_0$ ； $\zeta_0$  轴垂直于  $P'$  平面，沿轨道正法向； $\xi_0$  轴沿  $M$  平面与  $P'$  平面的交线，指向  $S_0$  在  $P'$  上的投影点，如图 1.1。

设卫星地心距为  $r$ ，观测者  $O$  与轨道面的地心张角为  $\theta$ ，卫星在某时刻的位置与最高点的角距为  $f$ ，并以地球半径  $R$

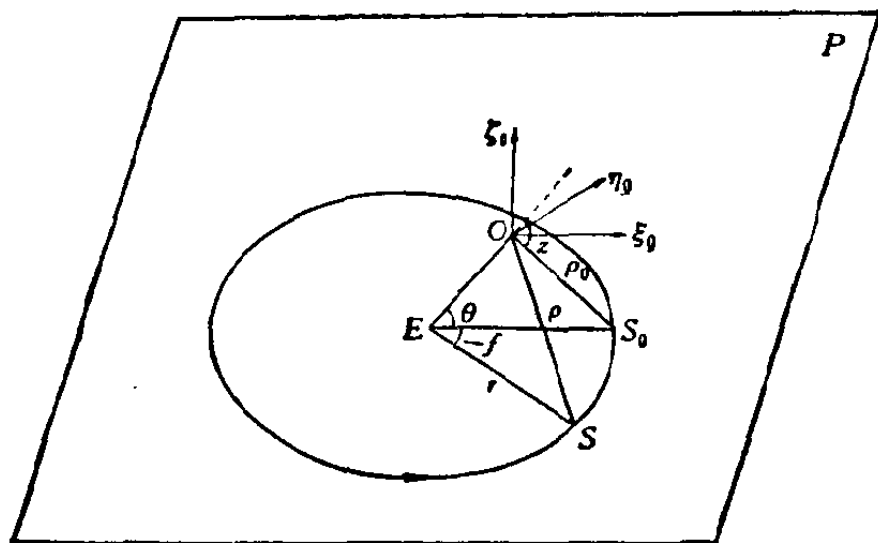


图 1.1

作为长度单位,则卫星在  $\xi_0, \eta_0, \zeta_0$  坐标系中的坐标可表为

$$\left. \begin{aligned} \xi_0 &= r \cos f - \cos \theta \\ \eta_0 &= r \sin f \\ \zeta_0 &= -\sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

从上式可见,视轨迹对  $\zeta_0 \xi_0$  平面(即  $M$  平面)对称. 因此,仪器的轨道极轴总是在  $\zeta_0 \xi_0$  平面内. 再建立一个仪器坐标系  $\xi, \eta, \zeta$ , 使  $\zeta$  轴和仪器的轨道极轴重合, 它可由  $\xi_0, \eta_0, \zeta_0$  系统绕  $\eta_0$  轴转  $\psi$  角而成:

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_0 \\ \eta_0 \\ \zeta_0 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

或写成

$$\left. \begin{aligned} \xi &= r \cos f \cos \psi - \cos(\theta + \psi) \\ \eta &= r \sin f \\ \zeta &= r \cos f \sin \psi - \sin(\theta + \psi) \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

在仪器坐标系中引进球坐标  $\rho, \alpha, \delta$ ,  $\rho$  为卫星斜距,  $\alpha$  为仪器轨道经度,  $\delta$  为仪器轨道纬度. 它们与直角坐标系  $\xi, \eta, \zeta$  的关系有

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \rho \cos \delta \cos \alpha \\ \eta &= \rho \cos \delta \sin \alpha \\ \zeta &= \rho \sin \delta \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

从(1.3)和(1.4)式可得

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{r \sin f}{r \cos f \cos \psi - \cos(\theta + \psi)} \\ \sin \delta &= \frac{r \sin \psi \cos f - \sin(\theta + \psi)}{\sqrt{1 + r^2 - 2r \cos \theta \cos f}} \\ \rho &= \sqrt{1 + r^2 - 2r \cos \theta \cos f} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

对一定的卫星及一定的观测者来说,  $r$  与  $\theta$  是常数,  $\psi$  由仪器的安置状态决定, 故亦为常数. (1.3), (1.5) 两式中只含一个参变量  $f$ , 对圆轨道来说,

$$f = n(t - t_0) \quad (1.6)$$

其中,  $n$  为卫星地心角速度,  $t_0$  为卫星过最高点时刻. 因此, (1.5) 式就是卫星视轨迹对时间的参数方程.

将(1.5)式对时间  $t$  或  $f$  微分, 就可得到仪器轨道经度和仪器轨道纬度随时间变化的关系式

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\alpha}{df} &= \frac{r \cos^2 \alpha [r \cos \psi - \cos(\theta + \psi) \cos f]}{[r \cos \psi \cos f - \cos(\theta + \psi)]^2} \\ \frac{d^2\alpha}{df^2} &= \frac{d\alpha}{df} \left\{ \left[ \frac{\cos(\psi + \theta)}{r \cos \psi - \cos(\psi + \theta) \cos f} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{2r \cos \psi}{r \cos f \cos \psi - \cos(\theta + \psi)} \right] \right. \\ &\quad \left. \times \sin f - 2 \operatorname{tg} \alpha \left( \frac{d\alpha}{df} \right) \right\} \\ \frac{d\delta}{df} &= \frac{-r \sin f}{\rho^3 \cos \delta} [(1 + r^2 - r \cos \theta \cos f) \sin \psi \\ &\quad - \sin(\psi + \theta) \cos \theta] \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

$$\frac{d^2\delta}{df^2} = \operatorname{tg} \delta \left( \frac{d\delta}{df} \right)^2 + \sec \delta \frac{d^2 \sin \delta}{df^2}$$

$$\frac{d^2 \sin \delta}{df^2} = \frac{-r}{\rho^3} \left\{ [\sin \psi (1 + r^2 - r \cos \theta \cos f) - \sin (\psi + \theta) \cos \theta] \times \left[ \cos f - \frac{3r \cos \theta \sin^2 f}{\rho} \right] + r \cos \theta \sin \psi \sin^2 f \right\}$$

从(1.7)中第三式可见, 当  $f=0$  时, 不管  $r, \theta, \psi$  等于什么值,  $\frac{d\delta}{df}$  总等于零, 这与前面提到的视轨迹对  $\zeta\xi$  平面对称相一致。

分析(1.5)与(1.7)式可见, 当  $f$  不大时,  $\delta$  的变化是缓慢的, 这就提示我们可以用仪器纬度圈作为卫星视轨迹的近似。这样的模拟方案在机械实践上还是易于办到的, 它和赤道式天文望远镜不同之处在于, 极轴不是固定地指向天极, 而是能指向天空的任意方向。

## 2. 大圆弧最高点吻切逼近

现在, 我们讨论大圆弧逼近卫星视轨迹的误差。从观测实际出发, 主要讨论  $\delta$  方向的误差及速度, 前者使卫星偏离视场中心, 后者使仪器只沿  $\alpha$  方向跟踪卫星的星象拖长。为简明起见, 我们仅讨论大圆弧最高点吻切逼近。

大圆弧最高点吻切逼近的意思就是让卫星在最高点时通过仪器赤道, 即令仪器坐标系的  $\xi$  轴指向  $OS_0$  方向。  $O\xi_0$  和  $OS_0$  的交角等于  $Z_0 - \theta$  (见图 1.1), 所以, 仪器极轴的方位角与卫星最高点的方位角相差  $180^\circ$ , 高度等于卫星过最高点时的天顶距, 仪器坐标系对于  $\xi_0, \eta_0, \zeta_0$  坐标系的旋转角  $\psi$  为

$$\psi = Z_0 - \theta \quad (1.8)$$

另外,在卫星最高点,  $f=0$ ,  $\delta=0$ , 代入(1.5)式得

$$\left. \begin{aligned} r \sin \psi &= \sin(\theta + \psi) \\ \text{或 } \operatorname{tg} \psi &= \frac{\sin \theta}{r - \cos \theta} \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

把(1.8)式代入,有

$$r \sin \psi = \sin Z_0 = \sin(\theta + \psi) \quad (1.10)$$

从图 1.1 中三角形  $OES_0$  的边和角的关系,也可得出同样的关系式.

由于  $f=0$  时,  $\frac{d\delta}{df}$  自然等于零,因此,仪器赤道与视轨迹在最高点是相切吻合的.

将(1.10)代入(1.5)和(1.7)第三式,可得

$$\sin \delta = \sin Z_0 (\cos f - 1) / \rho \quad (1.11)$$

$$\frac{d\delta}{df} = -\sin Z_0 \sin f [1 + r^2 - r \cos \theta (1 + \cos f)] / \rho^3 \cos \delta \quad (1.12)$$

从(1.11)式可知,  $\delta$  是  $f$  的偶函数,  $\delta \leq 0$ ; 在  $f=0$  时达极大,  $\delta=0$ . 随着  $|f|$  的增加,  $\delta$  单调地远离零点. 这也就是说,卫星只有在最高点处于仪器赤道;当卫星远离最高点时,它就单调地离开仪器赤道,偏向仪器球坐标的南半球. 如果我们限于讨论卫星地平高度  $h$  在十度以上的那一部分视轨迹,那么显然在最低点  $h=10^\circ$  处,  $|\delta|$  最大,即卫星偏离视场中心最远. 表 1.1 列出了大圆弧相切逼近在  $h=10^\circ$  处  $\delta$  的值.

从表 1.1 可见,对于一定高度的卫星来说,  $\delta$  对  $Z_0$  的变化不是单调的,它开始时随  $Z_0$  的增大而增加,在  $Z_0$  处于  $50^\circ-60^\circ$  间某值时达极大,后随着  $Z_0$  的继续增大而减小. 我们可以这样来认识这种现象;当  $Z_0$  甚小时,观测者处于轨道面不远处,卫星轨道面与仪器赤道面的交角  $\psi$  甚小,卫星视轨

表 1.1 大圆弧相切逼近在  $h_0=10^\circ$  的  $\delta$  值

| $Z_0$      | $H$   |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | 200   | 300   | 500   | 800   | 1000  | 3000  | 5000  | 7000  | 10000 |
| 30         | 1.7   | 2.3   | 3.1   | 4.0   | 4.5   | 6.2   | 6.4   | 6.1   | 5.6   |
| 45         | 2.3   | 3.1   | 4.2   | 5.3   | 5.9   | 7.9   | 8.0   | 7.7   | 7.1   |
| 60         | 2.5   | 3.3   | 4.4   | 5.4   | 5.9   | 7.5   | 7.5   | 7.2   | 6.7   |
| 75         | 1.4   | 1.8   | 2.2   | 2.5   | 2.6   | 3.0   | 3.0   | 2.9   | 2.7   |
| $\delta_M$ | 2.6   | 3.4   | 4.5   | 5.7   | 6.2   | 8.1   | 8.2   | 7.8   | 7.2   |
| $Z_{0M}$   | 57.79 | 56.70 | 55.19 | 53.77 | 53.05 | 50.34 | 49.80 | 49.77 | 50.05 |

迹的曲率和卫星的  $\delta$  也就较小。随着  $Z_0$  的增大, 卫星轨道面与仪器赤道面的交角  $\psi$  也就增大, 卫星视轨迹的曲率和  $\delta$  也相应增大。但是, 随着  $Z_0$  的增大, 可见弧段则逐渐减短; 当  $Z_0$  大于  $60^\circ$  以后, 这种减短尤为迅速, 以使  $\delta$  相应减小。表 1.1 的底部列出了各种不同高度的卫星所取的  $\delta$  的极值及达极值时所对应的  $Z_0$ 。观察  $\delta$  的极值, 发现它随卫星高度的变化也不是单调的; 当卫星的地面高度等于三千公里到五千公里时,  $\delta$  出现最大值。这可解释为, 随着卫星高度的增加, 可见弧段迅速增加,  $\delta$  值也随之迅速增大; 但当卫星高度增加到五千公里以上, 大到可与地球半径相比时, 随着卫星高度的增加, 视差现象迅速减小, 因此  $\delta$  也就随着减小; 卫星趋于无穷远时, 可以认为视轨迹与空间轨道一致, 因此卫星视轨迹就是大圆弧。当卫星地面高度  $H=4200$  公里,  $Z_0=49^\circ.95$  时,  $\delta$  极大, 达到  $\delta_M=-8^\circ.193$ 。也就是说, 如果在视轨迹最高点, 卫星处于视场中心, 则转到地平高度  $h_0=10^\circ$  处, 卫星已偏出视场中心达八度之多, 这已经远远超出现代人卫照相机拍照的视场。一般说来, 在  $\delta$  方向的视场只有  $\pm 2^\circ.5$  左右; 况且我们也不能拍在底片边上, 以致没有定标星包围着目标。

表 1.2 大圆弧相切逼近的  $\delta$  值(以  $Z_0=60^\circ$  为例)

| $n$ | $H$  |      |      |      |      |      |       |
|-----|------|------|------|------|------|------|-------|
|     | 200  | 300  | 500  | 1000 | 3000 | 5000 | 10000 |
| 1   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     |
| 2   | 0°15 | 0.18 | 0.22 | 0.26 | 0.28 | 0.26 | 0.22  |
| 3   | 0.52 | 0.65 | 0.81 | 0.98 | 1.08 | 1.03 | 0.87  |
| 4   | 1.00 | 1.27 | 1.61 | 2.02 | 2.30 | 2.22 | 1.91  |
| 5   | 1.51 | 1.94 | 2.51 | 3.25 | 3.84 | 3.75 | 3.26  |
| 6   | 2.03 | 2.62 | 3.45 | 4.55 | 5.58 | 5.53 | 4.87  |
| 7   | 2.54 | 3.31 | 4.39 | 5.90 | 7.45 | 7.47 | 6.66  |

表 1.3 大圆弧相切逼近的  $\delta$  平均值

| $Z_0$ | $H$ |     |     |     |      |      |      |      |       |
|-------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------|
|       | 200 | 300 | 500 | 800 | 1000 | 3000 | 5000 | 7000 | 10000 |
| 30    | 0.9 | 1.1 | 1.5 | 2.0 | 2.2  | 2.8  | 2.8  | 2.7  | 2.4   |
| 45    | 1.1 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 2.7  | 3.5  | 3.5  | 3.3  | 3.0   |
| 60    | 1.2 | 1.5 | 2.0 | 2.4 | 2.6  | 3.2  | 3.1  | 3.0  | 2.7   |
| 75    | 0.6 | 0.7 | 0.9 | 1.0 | 1.1  | 1.2  | 1.2  | 1.1  | 1.1   |

表 1.4 大圆弧相切逼近的  $\frac{d\delta}{dt}$  值 ( $Z_0=60^\circ$ ) (以角分/秒为单位)

| $n$ | $H$ |     |     |      |      |      |       |
|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-------|
|     | 200 | 300 | 500 | 1000 | 3000 | 5000 | 10000 |
| 1   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0     |
| 2   | 1.0 | 0.9 | 0.8 | 0.6  | 0.3  | 0.2  | 0.1   |
| 3   | 1.6 | 1.5 | 1.3 | 1.0  | 0.5  | 0.3  | 0.1   |
| 4   | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.3  | 0.7  | 0.4  | 0.2   |
| 5   | 1.9 | 1.8 | 1.7 | 1.4  | 0.8  | 0.5  | 0.2   |
| 6   | 1.9 | 1.8 | 1.7 | 1.5  | 0.9  | 0.5  | 0.2   |
| 7   | 1.9 | 1.8 | 1.7 | 1.5  | 0.9  | 0.6  | 0.3   |



表 1.5 大圆弧相切逼近的  $\frac{d\delta}{dt}$  平均值(角分/秒)

| $Z_0$ | $H$ |     |     |     |      |      |      |      |       |
|-------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------|
|       | 200 | 300 | 500 | 800 | 1000 | 3000 | 5000 | 7000 | 10000 |
| 30    | 1.0 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.7  | 0.4  | 0.3  | 0.2  | 0.1   |
| 45    | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 1.0  | 0.6  | 0.4  | 0.3  | 0.1   |
| 60    | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.2 | 1.1  | 0.6  | 0.4  | 0.3  | 0.2   |
| 75    | 1.3 | 1.2 | 1.0 | 0.9 | 0.8  | 0.4  | 0.3  | 0.2  | 0.1   |

表 1.2 以  $Z_0=60^\circ$  为例, 列出大圆弧相切逼近视弧段各点的  $\delta$  值。把全弧段等时均匀分成 12 等分, 序号  $n=1$  表示最高点,  $n=7$  表示最低点, 即  $h_0=10^\circ$  的点。除  $n=1$  外, 每边六点, 共十三点。表 1.3 以此十三点进行平均, 求得各种卫星地面高度和最高点天顶距的  $\delta$  平均值。表 1.4 以  $Z_0=60^\circ$  为例, 列出大圆弧相切逼近的  $\frac{d\delta}{dt}$  值, 表 1.5 列出  $\frac{d\delta}{dt}$  的平均值。

从表中可见, 利用大圆弧逼近人造卫星视轨迹时的位置误差  $\delta$  和垂直分速度  $\frac{d\delta}{dt}$  均较大。例如, 由表 1.2 可见, 如果要求位置偏离视场中心小于一度, 则只能在最高点附近三分之一弧长范围内进行观测。从表 1.4 又可见, 对于地面高度低于一千公里的卫星, 离开最高点  $\frac{1}{3}$  甚至  $\frac{1}{6}$  视弧长, 和跟踪方向垂直的分速度就可能超过每秒一角分。因此, 要实现全弧段的观测, 就必须改变极轴的方向, 采取分段逼近的方法。但是近地卫星通过观测站上空时间短, 改变极轴方向常感困难。如要实现数字式全弧段程序跟踪, 第一轴和第二轴也得进行程序控制, 使程控机构更加复杂。综合上述情况, 三轴式大圆弧跟踪常只适用于最高点附近  $\alpha=\pm 30^\circ$  范围内