

# 人造地球卫星 轨道力学

刘林 编著

高等教育出版社

(京) 112号

## 内 容 提 要

本书是作者根据其近三十年来在南京大学天文系讲授有关课程所编写的讲义和从事科研工作所积累的资料写成。全书从天体力学的角度详细阐述了人造地球卫星入轨后的轨道及其变化规律。主要内容包括：时空参考系，二体问题，初轨计算，摄动运动方程，地球形状摄动与平均根数法，奇点问题，变换理论及其应用，日、月摄动，光压摄动，大气阻力摄动，后牛顿效应，坐标系摄动，中间轨道理论，轨道改进以及有摄星历表计算中的数值方法简介，并附有一些重要数据和习题。

本书可作为天体力学，一般力学，飞行力学，测量等专业的高年级大学生和研究生的教材，也可作为有关科技人员的参考书。

本书责任编辑 杨祥

## 人造地球卫星轨道力学

刘林 编著

\*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 19.75 字数 470 000

1992年8月第1版 1992年8月第1次印刷

印数 0001—1 484

ISBN7-04-003395-X/O·1038

定价 12.20 元

## 前 言

人造地球卫星的飞行一般分为三个阶段,即发射段,轨道飞行段和返航段(卫星回收时的再入大气层飞行或陨落段)。发射段和返航段的运动,涉及地球引力,气动力和火箭推力(即反冲力),属于火箭飞行力学讨论的范畴。而轨道飞行段则是一个典型的天体力学问题。《人造地球卫星轨道力学》这本书,就是从天体力学的角度来详细阐述人造地球卫星入轨后的轨道及其变化规律。在这一飞行段中,卫星主要受地心引力作用,其它力学因素相对而言较小,所研究的内容也就是通常所讲的人造地球卫星轨道在受摄情况下的变化规律。

卫星在这一飞行段,既然主要是受地心引力的作用,其轨道就可近似地视为一椭圆。但在地球形状(包括形状非球形的不规则性和内部密度分布的不均匀性两种因素),日、月引力,太阳辐射压力(简称光压)以及气动力(主要是大气阻力)等力学因素的影响下,卫星的实际轨道是很复杂的,简单地说就是一个变化的椭圆。引起这种轨道变化的因素正是天体力学中所讨论的摄动。因此,从某种意义上讲,也可以说轨道力学就是轨道摄动理论。

人造地球卫星在地心引力和各种摄动因素的作用下,相应的运动方程极其复杂,无法给出严格解。人们常将这类问题处理成一个受摄二体问题,即人造卫星在运动中所受到的作用力被分成两个部分:第一部分是地球被处理成密度分布均匀的球体所对应的地心引力,这是主要部分。另一部分即作用在人造卫星上的所有其它摄动力,相对前者这是较小的部分。只考虑主要部分时,构成两个质点的动力系统,称为二体问题,该问题对应的运动方程是

可积的，早已彻底解决，给出卫星绕地球的运动轨道是一不变椭圆。而同时考虑第二部分时，则构成一个受摄二体问题，上述椭圆轨道将发生摄动变化。这是一复杂的动力系统，对应的运动方程不可积；但却可化为一小参数方程，从而采用各种近似方法获得一定精度意义下的轨道解。当然，如果仅仅需要卫星在某一时刻的位置和速度，那么采用数值方法直接给出方程的离散解即可，其精度往往能得到充分的保证。但是，更重要的是需要了解卫星的运动规律，特别是在各种摄动力影响下轨道的变化特征，即使采用数值方法，也往往需要了解这一点。因此，必须采用分析方法来构造小参数方程的解，从而获得卫星轨道的变化规律，对于某些问题（如书中要介绍的奇点问题等），有时还需要采用定性方法给出一些基本规律。所有这些，正是轨道力学的主要内容。

作为一本教材，还是以基本知识、比较成熟的理论和典型方法以及有待解决的问题和发展趋势作为其主要内容为宜。为此，全书安排了如下几个部分：

1. 人造卫星轨道的基础知识，即第一章到第三章，主要内容是二体问题。

2. 针对人造卫星在运行中所受到的各种摄动力，介绍目前比较成熟而有效的几种分析方法以及所获得的主要结果，从第四章到第十二章都是这一内容，占了本书的大部分篇幅。关于数值方法，在附录中作了适当介绍。

3. 第十四章是介绍人卫工作中最重要的一个内容——多资料精确定轨问题，即轨道改进。

除上述内容外，在第十三章中介绍了一个探索性课题——中间轨道理论；在附录中列出了一些常用公式和重要数据，以供读者参考或在实际工作中引用；最后还汇编了各章的习题，供初学者作为加深理解书中内容的辅助材料。

本书面对具有基础数学和力学知识的大学高年级学生和有关科技工作者，要求读者掌握微积分、线性代数、常微分方程、概率统计和理论力学(包括分析力学)等领域的基础知识，并了解球面天文的一些主要概念。

书中公式和符号较多，同一符号在不同公式中可能有不同含义，另外，为了语言上的需要，同一量在不同之处可能有不同名称(如向量与矢量)，请读者注意。

朱文耀、赵德滋、章圣泮、黄斌和廖新浩等同志，曾先后与作者在教学和科研工作上进行过合作，为本书的编著打下了良好的基础。李琪正同志曾为本书很多重要公式进行过仔细的校对，南京大学天文系天体力学教研室、紫金山天文台人卫室和西安卫星测控中心的很多同志也曾为此书(包括有关教材)的编写提出过不少宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢。

编著者

1989年10月17日

# 目 录

|  |     |
|--|-----|
| 前言   | 1   |
| 第一章 绪论   | 1   |
| § 1.1 计算单位   | 1   |
| § 1.2 时间系统   | 2   |
| § 1.3 坐标系  | 7   |
| § 1.4 卫星的空间坐标  | 22  |
| 第二章 二体问题   | 25  |
| § 2.1 二体问题的六个积分  | 26  |
| § 2.2 椭圆运动的一些常用关系式                                     | 30  |
| § 2.3 椭圆运动的展开式   | 35  |
| § 2.4 一些函数的平均值   | 41  |
| § 2.5 星历表计算  | 45  |
| 第三章 初轨计算   | 47  |
| § 3.1 由位置向量和速度向量确定相应的轨道根数                              | 48  |
| § 3.2 $r(t)$ 和 $\dot{r}(t)$ 对 $r_0$ 和 $\dot{r}_0$ 的展开式 | 49  |
| § 3.3 改进的拉普拉斯方法  | 54  |
| § 3.4 根据观测直接确定卫星轨道半长径 $a$                              | 58  |
| § 3.5 固定 $a$ 值的巴日诺夫(Баженков)方法                        | 61  |
| § 3.6 其它定轨方法   | 72  |
| 第四章 摄动运动方程及其解法轮廓                                       | 79  |
| § 4.1 人造地球卫星运动的受力分析                                    | 79  |
| § 4.2 常数变易法——摄动运动方程的建立                                 | 84  |
| § 4.3 摄动运动方程的各种形式                                      | 91  |
| § 4.4 摄动运动方程的级数解                                       | 99  |
| § 4.5 摄动力的取舍问题   | 102 |
| 第五章 地球形状摄动与平均根数法                                       | 104 |
| § 5.1 地球引力场的位函数  | 104 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| § 5.2      | 平均根数法.....  | 115 |
| § 5.3      | 主要带谐项( $J_2, J_3$ 和 $J_4$ )的摄动解.....                    | 120 |
| § 5.4      | 能量积分的利用——半半径 $a$ 的二阶周期项的推导.....                         | 146 |
| § 5.5      | 交点周期与恒星周期的转换关系.....                                     | 153 |
| § 5.6      | 二阶带谐项 $J_n(n \geq 3)$ 的摄动解.....                         | 158 |
| § 5.7      | 主要田谐项( $J_{2,2}$ )的摄动解.....                             | 166 |
| § 5.8      | 一般田谐项 $J_{n,m}(n \geq 2, m = 1, 2, \dots, n)$ 的摄动解..... | 176 |
| § 5.9      | 地球引力场位函数展开式的取项问题.....                                   | 182 |
| § 5.10     | 地球自转变形问题.....   | 188 |
| <b>第六章</b> | <b>奇点问题及其解决方法</b> .....                                 | 191 |
| § 6.1      | 奇点问题概况.....   | 191 |
| § 6.2      | 通约奇点附近的运动性态.....  | 195 |
| § 6.3      | 消除通约奇点的拟平均根数法.....                                      | 201 |
| § 6.4      | 同时消除 $e=0$ 和通约奇点的摄动计算方法.....                            | 206 |
| § 6.5      | 同时消除两类奇点的摄动计算方法.....                                    | 231 |
| <b>第七章</b> | <b>变换理论在轨道力学中的应用</b> .....                              | 235 |
| § 7.1      | 正则运动方程.....   | 235 |
| § 7.2      | 相空间与正则变换.....   | 239 |
| § 7.3      | 隐函数定义的正则变换.....   | 248 |
| § 7.4      | 显函数定义的正则变换——Lie 变换.....                                 | 253 |
| § 7.5      | 哈密顿-雅可比方法及常用正则共轭变量的引入.....                              | 261 |
| § 7.6      | Zeipel 方法.....  | 272 |
| § 7.7      | Hori-Deprit 方法.....                                     | 292 |
| § 7.8      | 无奇点形式的变换方法.....   | 301 |
| § 7.9      | 一般变换方法.....   | 314 |
| <b>第八章</b> | <b>日月摄动</b> .....                                       | 334 |
| § 8.1      | 动力模型和日月位置的近似计算.....                                     | 335 |
| § 8.2      | 日月摄动函数的根数形式.....  | 343 |
| § 8.3      | 日月摄动解.....  | 350 |
| § 8.4      | 适用于任意偏心率的日月摄动计算公式.....                                  | 356 |
| § 8.5      | 地球扁率的间接摄动.....  | 360 |
| § 8.6      | 潮汐摄动.....   | 363 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| <b>第九章 太阳光压摄动</b> .....            | 369 |
| § 9.1 光压摄动的数学模型.....               | 370 |
| § 9.2 光压摄动的基本方程.....               | 372 |
| § 9.3 光压摄动解.....                   | 374 |
| § 9.4 适用于任意偏心率的太阳光压摄动计算公式.....     | 377 |
| § 9.5 地影问题.....                    | 381 |
| § 9.6 地球反照辐射压摄动问题.....             | 386 |
| <b>第十章 大气阻力摄动</b> .....            | 389 |
| § 10.1 气动力及其有关问题.....              | 389 |
| § 10.2 大气模式与大气密度分布的近似表达式.....      | 391 |
| § 10.3 大气阻力摄动的基本方程.....            | 395 |
| § 10.4 大气阻力摄动解.....                | 408 |
| § 10.5 用无奇点变量表达的大气阻力摄动计算公式.....    | 421 |
| § 10.6 联合摄动问题.....                 | 427 |
| <b>第十一章 坐标系摄动</b> .....            | 430 |
| § 11.1 坐标系摄动问题的提出.....             | 430 |
| § 11.2 几种地心系中卫星轨道根数之间的关系.....      | 431 |
| § 11.3 历元地心惯性系中的附加摄动.....          | 434 |
| § 11.4 轨道坐标系中的附加摄动.....            | 439 |
| <b>第十二章 后牛顿效应</b> .....            | 454 |
| § 12.1 动力模型.....                   | 454 |
| § 12.2 考虑后牛顿效应的二体问题.....           | 458 |
| § 12.3 后牛顿效应下的摄动解.....             | 463 |
| <b>第十三章 中间轨道理论</b> .....           | 469 |
| § 13.1 非球形地球引力场中卫星运动的积分问题.....     | 469 |
| § 13.2 几类中间轨道.....                 | 473 |
| § 13.3 Vinti型和 Аксенов型中间轨道的解..... | 478 |
| § 13.4 中间轨道摄动法.....                | 499 |
| <b>第十四章 轨道改进</b> .....             | 505 |
| § 14.1 问题的提法.....                  | 505 |
| § 14.2 最小二乘估计.....                 | 509 |



|        |                         |     |
|--------|-------------------------|-----|
| § 14.3 | 非线性系统的最小二乘估计——轨道改进····· | 517 |
| § 14.4 | 轨道改进中的几组基本关系式·····      | 521 |
| § 14.5 | 轨道改进中的若干问题·····         | 537 |
| 附录 I   | 小推力摄动问题·····            | 541 |
| 附录 II  | 数值方法简介·····             | 543 |
| 附录 III | 常用公式和一些基本数据·····        | 564 |
| 附录 IV  | 习题·····                 | 613 |

# 第一章 绪 论

讨论一个力学问题，首先涉及到的就是时空坐标系的选择问题，在人卫定轨精度的要求日益增高的情况下，坐标系的选择问题显得更加突出。本书当然没有必要对这一问题作详尽的阐述，只是对那些与人造地球卫星运动有直接关系的内容作一简略的介绍。读者如有需要，可翻阅有关书籍和文章。

## § 1.1 计算单位

为了计算和公式表达的方便，选取适当的计算单位是必要的。众所周知，在常用的克、厘米、秒单位系统中，引力常数值为

$$G = 6.672 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}^2, \quad (1.1)$$

这种单位在大尺度问题中，用起来显然是不方便的。在讨论太阳系中大行星和小行星的运动时，常采用太阳质量、天文单位( $\text{AU} = 1.49597870 \times 10^{11} \text{ m}$ )和平太阳日作为基本单位，那么引力常数将变为

$$G = 2.95912908 \times 10^{-4} \quad (1.2)$$

如果为了公式表达方便，让引力常数  $G=1$ ，则相应的时间单位应取作

$$T = 58.1324409 \text{ 平太阳日}. \quad (1.3)$$

根据人卫工作的习惯用法，选取地球质量  $M$  和地球参考椭球体的赤道半径  $a_e$  分别作为质量单位和长度单位，而时间单位  $T$  则为导出单位，它将使该单位系统中，引力常数  $G=1$ 。

如果采用国际大地测量及地球物理联合会 1967 年建立的国

际大地参考系，相应的参考椭球体的基本数据为

$$a_e = 6378160 \text{ m}, GM = 398603 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{s}^2, \quad (1.4)$$

这是 1984 年以前编历工作中所采用的常数。GM 是地心引力常数，它在单位选取中代替地球质量  $M = 5.974 \times 10^{27} \text{ g}$ 。为使  $G=1$ ，时间导出单位将是

$$\begin{aligned} T &= \left( \frac{a_e^3}{GM} \right)^{1/2} = 806.8129 \text{ s} \\ &= 13.44688 \text{ min.} \end{aligned} \quad (1.5)$$

因为这是导出单位，在计算工作中，有效数字可根据问题的实际需要多取几位，或直接引用(1.5)式的计算公式部分，由计算机给出  $T$  单位。另外，参考椭球体亦可另行选择，只需根据力学原理，使计算单位与所讨论的问题自洽即可。例如，从 1984 年起的编历工作中， $a_e$  和  $GM$  值已改为

$$a_e = 6378140 \text{ m}, GM = 398600.5 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{s}^2 \quad (1.6)$$

这对应新的参考椭球体，与此相应的的时间导出单位就变为

$$\begin{aligned} T &= 806.8116 \text{ s} \\ &= 13.44686 \text{ min.} \end{aligned} \quad (1.7)$$

## § 1.2 时间系统

就运动而言，需要的是一种均匀的时间尺度。过去，这种均匀的时间尺度是以地球自转为基准的。由于地球自转的不均匀性和测量精度的不断提高，上述均匀时间尺度已不适应；但由于种种原因，又必须将时间与地球自转相协调，这就导致了时间系统的复杂化。

现行的时间系统基本上分为四种：恒星时，世界时，历书时和原子时。前两种都是根据地球自转测定的，历书时则是根据地球、月亮和行星的运动来测定的，而原子时是以原子的电磁振荡作为

标准的。下面将对这些时间系统作一简单介绍。

### 1. 恒星时 (ST)

春分点连续两次过中天的时间间隔称为一“恒星日”。那么，恒星时就是春分点的时角，它的数值  $S$  等于上中天恒星的赤经  $\alpha$ ，即

$$S = \alpha, \quad (1.8)$$

这是经度为  $\lambda$  的地方恒星时。与世界时密切相关的格林尼治恒星时  $S_0$  由下式给出：

$$S_0 = S - \lambda, \quad (1.9)$$

经度  $\lambda$  规定向东计量。格林尼治恒星时又有真恒星时（或称视恒星时）GAST 与平恒星时 GMST 之分。既然恒星时是由地球自转时角所确定的时间，那么地球自转的不均匀性就可通过它与均匀时间尺度的差别来测定。

格林尼治恒星时主要是在空间坐标系的转换中用到，有关内容将在下一节中介绍。

### 2. 世界时 (UT)

与恒星时相同，世界时也是根据地球自转测定的时间，它以平太阳日为单位，1/86400 平太阳日为秒长。事实上，测定太阳的精度远低于测定恒星的精度，因此，世界时是通过恒星观测测定的恒星时再根据两种时间的定义转换而给出的。

根据天文观测直接测定的世界时，记为 UT0，它对应于瞬时极的子午圈。加上引起测站子午圈位置变化的地极移动（即地球自转轴在地球体内的移动）修正，就得到对应于平均极的子午圈的世界时，记为 UT1，即

$$UT1 = UT0 + \Delta\lambda, \quad (1.10)$$

$\Delta\lambda$  是极移改正量。

由于地球自转的不均匀性，UT1 并不是均匀的时间尺度。而地球自转不均匀性呈现三种特性：长期慢变化（每百年使日长增

加 1.6 毫秒), 周期变化(主要是季节变化, 一年里日长约有 0.001 的变化; 除此之外, 还有一些影响较小的周期变化) 和不规则变化。这三种变化不易修正, 只有周年变化(即上述周期变化的主要部分) 可用根据多年实测结果给出的经验公式进行改正, 改正值记为  $\Delta T_s$ , 由此引进世界时 UT2:

$$UT2 = UT1 + \Delta T_s. \quad (1.11)$$

相对地说, 这是一个比较均匀的时间尺度。但它仍包含着地球自转的长期变化和不规则变化, 特别是不规则变化, 其物理机制尚不清楚, 至今无法改正。

周期项  $\Delta T_s$  的振幅并不大, 而 UT1 又直接与地球瞬时位置相联系, 因此, 对于一般人卫工作, 就可用 UT1 作为统一的时间系统; 而对于高精度的要求, 即使 UT2 也不能满足, 必须寻求更均匀的时间尺度。

### 3. 历书时(ET)

由于世界时不能作为均匀的时间尺度, 经数次天文会议讨论决定, 从 1960 年起曾引入一种以太阳系内天体公转为基准的均匀时间系统, 称为历书时(ET), 1960 年到 1967 年期间, 它是世界公认的计时标准。

历书时的定义是: 1900 年 1 月 0 日历书时  $12^h$  瞬刻的回归年长度的  $31556925.9747$  分之一为一历书秒; 起算历元为 1900 年初太阳平黄经等于  $279^\circ 41' 48''.04$  的时刻, 也就是纽康(Newcomb) 原先选定的 1900 年 1 月 0 日格林尼治平午的时刻, 现在把它作为 1900 年 1 月 0 日历书时  $12^h$ 。

历书时是一种由力学定律确定的均匀时间, 它是太阳、月亮和行星运动理论中的独立变量, 同时也是这些基本历表的时间引数。某一时刻的历书时可以通过对太阳、月亮或行星的观测来得到, 而最有效的方法是观测月亮。但对建立一个均匀时间尺度而

言，其观测精度仍嫌不够，而且要得到这样的时间又很缓慢。因此，1967年后，计时标准转向原子时，它有更高的精度，而且随时可以直接求得。不过在这期间，历书时仍然作为一个天文常数被保留下来。从1984年开始，历书时才完全被原子时所代替。

#### 4. 国际原子时(TAI)

这是一种标准频率。1967年10月，第十三届国际计量大会决定引入新的秒长定义，即铯原子 $\text{Cs}^{133}$ 基态的两能级间跃迁辐射的9192631770周所经历的时间作为一秒的长度，称为国际单位秒(SI)。由这种时间单位确定的时间系统称为国际原子时(TAI)。取1958年1月0日的UT2 0时为起算点，这是希望在起始历元有 $\text{TAI}=\text{UT}2$ 。但事后通过美、英、瑞士等国多台原子钟比对发现，并没有达到此目的，实际上是

$$(\text{TAI}-\text{UT}2)_{1958.0} = -0^{\text{m}}0039, \quad (1.12)$$

这就是国际原子时的起始时刻。

随着原子时的引入和某些具体问题的要求，又出现下列两种时间系统。

#### 5. 协调世界时(UTC)

用原子钟控制时号发播可得到稳定的时号。但由于原子时秒长比世界时秒长略短，世界时时刻将日益落后于原子时；而有很多问题却涉及到计算地球的瞬时位置，这又需要UT1。因此，为了避免发播的原子时与世界时产生过大的偏离，实际的时号发播是寻求TAI与UT1之间的一种协调，称为协调世界时(UTC)。

UTC是一种均匀时号，它依据原子时，却又参考世界时。从1972年起，UTC用原子时秒长发播，但要求它与UT1之差不超过 $0^{\text{s}}.9$ 。为达到此目的，必须调整UTC的整秒数，规定只在1月1日或7月1日将原子钟拨慢1秒，这就是所谓闰秒。在引用UTC时必须注意这一点。

## 6. 动力学时——地球动力学时(TDT)和质心动力学时(TDB)

从 1984 年起, 历书时正式被下述力学时所取代。

因原子时 TAI 是在地心参考系中定义的具有国际单位制秒长的坐标时间基准, 它就可以作为动力学中所要求的均匀时间尺度。由此引入一种地球动力学时 (TDT), 它与原子时 TAI 的关系为

$$\text{TDT} = \text{TAI} + 32^{\text{s}}.184. \quad (1.13)$$

这一关系是根据 1977 年 1 月 1 日  $00^{\text{h}}00^{\text{m}}00^{\text{s}}$  (TAI) 对应 TDT 为 1977 年 1 月 1 日  $1^{\text{d}}0003725$  而来, 此起始历元的差别就是该时刻历书时与原子时的差别。这样定义起始历元就便于用 TDT 系统代替 ET 系统。显然, TDT 是地心时空标架的坐标时, 用作视地心历表的独立变量。在人造地球卫星动力学中, 它就是一种均匀时间尺度, 相应的运动方程即用它作为自变量, 通常以  $t$  表示。

除此之外, 还定义一种质心动力学时 TDB, 即太阳系质心时空标架的坐标时。它是一种抽象、均匀的时间尺度, 月球、太阳和行星的历表都是以 TDB 为独立变量的, 岁差、章动的计算公式也是依据该时间尺度的。

上述两种动力学时的差别 TDB-TDT 是由相对论效应引起的, 它们之间的转换关系正在讨论中, 文[1]曾给出了它们之间的一种转换公式, 其中最大的一项为

$$1^{\text{s}}.658 \times 10^{-8} \sin E,$$

$E$  是地月系质心绕日轨道的偏近点角。

除上述时间系统外, 在计算中常常会遇到历元的取法以及几种年的长度问题, 这里顺便作一介绍。一种是贝塞耳 (Bessel) 年, 或称假年, 其长度为平回归年的长度, 即  $365.2421988$  平太阳日。常用的贝塞耳历元, 是指太阳平黄经等于  $280^{\circ}$  的时刻, 例如 1950.0, 并不是 1950 年 1 月 1 日 0 时, 而是 1949 年 12 月 31 日  $22^{\text{h}}09^{\text{m}}42^{\text{s}}$  (世界时), 相应的儒略 (Julian) 日为 2433282.4234。另一种是儒

略年，其长度为 365.25 平太阳日；儒略历元就是指真正的年初，例如 1950.0，即 1950 年 1 月 1 日 0 时。显然，引用儒略年较为方便，因此，从 1984 年起，贝塞耳年被儒略年所代替。两种历元之间的对应关系列于表 1.1。

表 1.1

| 贝塞耳历元       | 儒略历元        | 儒略日          |
|-------------|-------------|--------------|
| 1900.0      | 1900.000858 | 2415020.3135 |
| 1950.0      | 1949.999790 | 2433282.4234 |
| 2000.0      | 1999.998722 | 2451544.5333 |
| 1899.999142 | 1900.0      | 2415020.0    |
| 1950.000210 | 1950.0      | 2433282.5    |
| 2000.001278 | 2000.0      | 2451545.0    |

为了方便，常用修改的儒略日 (MJD)，定义为

$$\text{MJD} = \text{JD} - 2400000.5, \quad (1.14)$$

例如 J 1950.0 的  $\text{MJD} = 33282.0$ 。

与上述两种年的长度对应的回归世纪 (即 100 年) 和儒略世纪的长度分别为 36524.22 平太阳日和 36525 平太阳日。

### § 1.3 坐标系统

空间坐标系的复杂性主要是由岁差章动和地极移动引起的。

定义一个空间坐标系应包含三个要素：坐标原点，参考平面 ( $xy$  平面) 和参考平面上的主方向 ( $x$  轴方向)。对于人卫工作而言，所涉及到的主要是地心坐标系和站心坐标系，它们的坐标原点分别为地心和测站，这一点并无问题。但参考平面及其主方向的选择，将会受到岁差章动和地极移动的影响。

日、月和大行星对地球非球形部分的吸引，会产生两种效应。一是作为刚体平动的力的效应，主要是月球对地球扁球部分的作



用, 将引起一种地球扁率间接摄动. 另一种就是作为刚体定点转动的力矩效应, 使地球像陀螺那样, 出现进动与章动, 即自转轴在空间摆动, 这就是岁差章动. 由于岁差章动, 地球赤道面亦随着时间在空间摆动; 另外, 由地球内部和表面物质运动引起的地球自转轴在其内部的移动(极移), 都将影响坐标系中参考平面的选取问题.

基于上述原因, 根据不同要求, 就出现了各种空间坐标系统. 下面介绍人卫工作中所遇到的几种空间坐标系以及它们之间的转换关系.

### 1. 六种地心坐标系和两种站心坐标系

这几种坐标系的定义见表 1.2. 人造地球卫星绕着地球转动, 其瞬时轨道面是通过地球质量中心(简称地心)的, 因此在研究人卫运动规律时, 很自然地要引进地心坐标系. 但是, 在人造卫星上天前, 人们只能依靠传统的大地测量方法给出所谓的参考椭球体, 其中心并不是地心. 而人造卫星上天后, 用卫星动力测地方法才

表 1.2 各种坐标系的定义

| 坐标系      | 原点 | 参考平面                | $x$ 轴方向           | 位置矢量    |
|----------|----|---------------------|-------------------|---------|
| 历元地心惯性系  | 地心 | 历元平赤道               | 指向该历元的平春分点        | $R$     |
| 瞬时平赤道地心系 | 地心 | 瞬时平赤道               | 指向瞬时平春分点          | $r_x$   |
| 瞬时真赤道地心系 | 地心 | 瞬时真赤道               | 指向瞬时真春分点          | $r_T$   |
| 轨道坐标系    | 地心 | 瞬时真赤道               | 指向某历元的平春分点        | $r$     |
| 准地固坐标系   | 地心 | 瞬时真赤道               | 参考平面与格林尼治子午面的交线方向 | $r_T'$  |
| 地固坐标系    | 地心 | 与地心和CIO连线正交之平面      | 参考平面与格林尼治子午面的交线方向 | $r'$    |
| 站心赤道坐标系  | 站心 | 与地固坐标系的参考平面平行       | 指向瞬时真春分点          | $\rho'$ |
| 站心地平坐标系  | 站心 | 过测站观测点与地球参考椭球体相切的平面 | 参考平面中朝北的方向        | $\rho$  |