# 28．星体运动与天文观测中如何选取参考系？

人类生活在地球表面，早期的天文观测都是以地面为参考系，后来人们知道了地球在自转，同时绕太阳公转，于是有了地心和日心参考系。

什么是一天、一个月、一年？什么是阳历、阴历、农历？其实这些都与参考系有关。

## 一、早期人们都以地面为参考系

人类自古就生活在地球表面，古代尚处于“地心说”时代，那时人们还不知道地球是球体，“天圆地方”代表着那时人们对天地的认识。早期人们都以为自己所处的地面是不动的，不自觉地都选择地面参考系，那时的天文观测也都以地面为参考系，确切地说，是以观察者自己所在的那一小块地面为参考系。人们看到太阳、月亮和所有的星辰都是东升西落，人们定义从日中（中午 12 点时刻）到下次日中为一天，从月圆到下次月圆为一个月，从日照最长到下次日照最长为一年。以太阳绕地球的运动周期为基础的历法，称为阳历，现在使用的公历就是阳历；以看到的月亮形状的变化周期（月相）为基础的历法，称为阴历；我们的农历有人称为阴历，其实它是阴阳历，即以月相计月，大月 30 天，小月 29 天，但仍以太阳计年，因此有着非常复杂的闰月安排，一般不易掌握。

人们把看到的相对位置不变的星星称为恒星。我们肉哏观测恒星，是分不出远近的，因此看到的星空是一张平面图。把众多的恒星的相对位置都画到一张图上，就像悬挂在天顶上的一张球面图，称为天球。天球上的星图是人类视觉观察到的恒星的位置在天球上的投影。太阳一年中在天球中的位置连线是一条闭合曲线，称为黄道。把黄道分为二十四份，即为二十四节气。

还有一些星星在天球中的位置不固定，在不断变化，称为行星，如金星、火星、木星、土星等。

所有这些，都是以地面为参考系的观测结果。

现在人们已经明白，宇宙里没有绝对静止的物体，我们居住的地球一方面在自转，另一方面围绕太阳在公转，而太阳则带领着太阳系众多行星和卫星一起绕银河系中心转动，银河系也并非静止……因此宇宙没有中心。

当我们讨论地球自转时，是以地心为参考系的，简称地心系。当我们讨论地球公转时，是以太阳中心为参考系的，简称日心系。

## 二、一昼夜时间里地球自转多少度？

一般人的回答是 360°。但仔细思考，却发现有问题：我们定义一天的时间是从地面参考系出发的，即以某次太阳到达上中天位置到下次太阳到达上中天位置为一天，而在这一天时间里，地球绕太阳的公转也在进行，转过的角度大约为 1°（精确点说，为每天 3600 / 365.25，即 0.985 626° / 天），图 1 是地球绕太阳公转并且自转的示意图，图中画出的那条经线是地球上中午 12 时所对应的，即从该位置看，太阳处于上中天位置，经过一昼夜时间，地球绕太阳转过了角度 *θ*（为了明显，图中有意把角度 *θ* 放大了），地球上标注的那条经线绕地轴转过了一周另加 *θ*，即实际转过了约 361°。有一句广告词，“361 度，多一度热爱。”从物理角度说，改为“361 度，24 小时全热爱。”似乎更为贴切。

地

地

*θ*

日

图 1 地球公转加自转示意图

地球自转的周期 *T* 应该稍小于 24 h，计算一下：

*T*自转 = 24 h÷（1 + ）= 23.934 471 h，即为 23 小时 56 分 4.1 秒。

图 2 所示是太阳、地球与月球三者关系的示意图。某时刻日、地、月三者在一条直线上，并且地球居中，这时看到的是满月，即月圆时刻（如果月球在图示的这个平面上，将出现月全食或月环食，而一般情况下它们并不在同一个平面上，因此地面上的人看到的是满月）。经过农历一个月时间，地球绕太阳公转转过了 *θ* 角，再次出现满月，月球绕地球的公转转过一整圈另加 *θ* 角，*θ* 角的数值大约是圆周角的 ，即 *θ* ≈ = 30°，因此，月球绕地球公转的周期约为 27.3 天，而从满月到下次满月，即农历一个月的时间约为 29.5 天，这就是农历大月 30 天、小月 29 天的原因。

日

图 2 从月圆到下次月圆

月

*θ*

*θ*

地

## 三、地球静止卫星对谁静止？

在赤道平面上空与地球自转相同角速度运转的卫星，称为地球静止卫星，这仍是在地面参考系中说的，即地面上的人看来，该卫星是静止在高空的。

在我们要定量计算该卫星的轨道高度时，必须改换为地心参考系，这是因为我们必须从受力与加速度的关系入手，即要应用牛顿第二定律，而牛顿运动定律只适用于惯性参考系。卫星绕地球转动，运动轨迹是圆形，运动的空间范围很大，地面参考系已经不能再视为惯性参考系，而地心参考系可视为近似程度很高的惯性参考系。因此需选择地心参考系，具体计算过程如下：

设该卫星圆形轨道距离地面高度为 *h*，地球半径为 *R*，地球质量为 *M*，卫星质量为 *m*，地球自转角速度为 *ω*，根据牛顿第二定律有 *G*= *mω*2(*R* + *h*)，解得

*h* = − *R*

代入相应数据可得 *h* ≈ 3.6×104 km。

要注意的是，在地心参考系中，该卫星并非静止，而是做圆周运动，它的轨道平面与地球赤道平面相同，运动方向及运动的角速度都与地球自转的角速度相同，即 *ω* = ，*T* 为地球自转的周期，它等于 23 h 56 min 4.1 s，我们用 *T* = 24 h 进行计算只是一种近似，在要求不高的情况下（例如解答物理习题）是可以的，而在需要精确计算时是不允许这样近似的，例如，卫星设计师在计算卫星的运行情况时，如果按 *T* = 24 h 进行，那么卫星每天将偏离大约 1°，这样就不是“静止卫星”了。

与此相关的问题是宇宙速度的计算，具体推导计算过程如下：

（1）第一宇宙速度 *v*1，即在低地轨道上环绕地球做匀速圆周运动时的速度

设地球半径为 *R*，卫星质量为 *m*，由于轨道距离地面的高度与地球半径相比较很小，粗略计算时可以忽略而认为轨道半径就等于 R，把地球对卫星的引力近似看作它的重力，根据牛顿第二定律有

*mg* = *m*

解得 *v*1 = ≈ 7.9 km/s。

（2）第二宇宙速度 *v*2，即能脱离地球引力所需的最小发射速度

设地球质量为 *M*，半径为 *R*，卫星质量为 *m*，设发射卫星的过程分两步：①用火箭把卫星从地面发射场加速到 *v*2；②卫星靠惯性继续飞行，直到距离地球无穷远处。在这个过程中，需克服地球引力做功，所做的功等于它增加的引力势能，根据动能定理，极限情况是

*W* = − *G* = 0 − *mv*22

解出 *v*2 = ≈ 11.2 km/s。

（3）第三宇宙速度 *v*3，即能脱离太阳引力所需的最小发射速度

如果从太阳表面发射卫星，使它能脱离太阳的引力，发射所需的最小速度为 *v*对日，与上面推导第二宇宙速度的理由相同，*v*对日 = ≈ 42.2 km/s。

现在是在地球表面发射，由于地球已有绕太阳公转的速度 *v*地对日 = 29.8 km/s，因此在地球表面发射能脱离太阳引力所需的对地心的速度 *v*ʹ =（42.2 − 29.8）km/s = 12.4 km/s。

根据动能定理，卫星需克服地球引力做功

*W* = − *G* = *mv*ʹ2 − *mv*32

解得 *v*3 = ≈ km/ s ≈ 16.7 km/s。

不难看出，推导第一宇宙速度应用了牛顿第二定律，推导第二宇宙速度应用了动能定理，而牛顿运动定律以及由它推导得出的动量定理、动能定理等，都只适用于惯性参考系，对于发射卫星这类空间范围较大、经历时间较长的过程，地面参考系不是惯性参考系，地心参考系才是近似程度较好的惯性参考系。推导第三宇宙速度的过程中，由于要脱离太阳的引力范围，所以要选择日心参考系计算在太阳表面友射所需的速度 *v*对日，但最终仍要转换到地心参考系上来分析。因此，得出的三个宇宙速度都是相对地心的速度。