# 2．什么是地面参考系？地面参考系是惯性参考系吗？

通常情况下，在讨论地面上物体的运动时，都以地面为参考系。这里的“地面”，指的是地球表面附近小范围内的地面。地球绕地轴自转，地面参考系严格来说不是惯性参考系。但讨论地面上物体的运动时，由于运动的范围很小，所涉及的地面可以看作平面；所经历的时间很短，这段时间内地面上各点的运动可以看作匀速运动，因此可以将地面参考系近似看作惯性参考系。

对于诸如发射卫星等问题，地面参考系一般不能看作一惯性参考系，而地心参考系则可以近似看作惯性参考系。

高中物理教学从运动学开始，而描述物体的运动，首先就要确定参考系。对于中学生来说，若不加特别说明，通常都是选择地面参考系。

## 一、什么是地面参考系？

赵凯华、罗蔚茵的《新概念物理教程·力学》中写道：实验证明，地球不是一个精确的惯性系。但由于它旋转得较慢，只要我们所讨论的问题不是像大气或海洋环流那类牵涉空间范围较大、时间间隔较长的过程，固定在地面上的参考系可看作近似程度相当好的惯性系……当前若不加特别声明，我们就把固着在地面上的参考系当作惯性系，称之为基本参考系。

可以明确下面两点：①地面参考系就是“固着在地面上的参考系”。②只要我们讨论的问题不是“那类牵涉空间范围较大、时间间隔较长的过程”，地面参考系“可看作近似程度相当好的惯性系”，或者反过来说，如果我们讨论的是“那类牵涉空间范围较大、时间间隔较长的过程”，地面参考系就不能看作“近似程度相当好的惯性系”。

在中学物理教学中，参考系的选择就是按照这个思路进行的，凡没有特别说明的，都默认为选择地面参考系。

在选择地面参考系讨论问题时，下面几点是默认的：①实际的地面是高低起伏的，但地面上各点都相对静止，可以将地面上任意一点作为坐标系的原点。②地面就是水平面，它与竖直方向垂直。③相对地面做匀速直线运动的参考系，也同样是“近似程度相当好的惯性系”。

## 二、讨论地球卫星的运转、发射等问题时应选择地心参考系

当我们讨论地球卫星的运转、发射等问题时，不能选择地面参考系，原因是这类问题属于牵涉空间范围较大、经历时间较长的过程。以发射地球卫星的过程为例，卫星最终要环绕地球转动，涉及的空间范围至少包括整个地球，经历的时间也比较长，在这个过程中，地面上各点的运动已经不能近似看作匀速直线运动了，而是绕地轴的转动，因此这时的地面参考系就不能看作惯性参考系了。

但该运动过程涉及的空间范围，相对于地球绕太阳公转的轨道而言仍是很小的；所经历的时间，相对于地球公转的周期也是很短的。在这个过程中，地心只绕太阳转动了很小的角度，完全可以近似认为地心在做匀速直线运动，因此地心参考系仍然是近似程度很高的惯性参考系。

三个宇宙速度都是相对地心的速度，其原因就是在求解时选择了地心参考系。

## 三，引起争议的问题

**例 1** 从地面上 A 点发射一颗质量为 *m* 的近地轨道地球卫星，至少要消耗多少能量？

设地面上 A 点随地球自转的速度为 *v*A，近地卫星绕地球转动的速度为 *v*1，忽略卫星势能的变化，其动能的增量即为所求。但结果有下面两种：

解答 1．Δ*E*1 = *m*（*v*12 – *v*A2）；

解答 2：Δ*E*2 = *m*（*v*1 – *v*A）2。

解答 1 中的 *m*（*v*12 – *v*A2）是卫星在发射前随地球自转及发射后绕地球转动时相对于地心参考系的动能增量。解答 2 中的 （*v*1 – *v*A）是以发射点处的地面为参考系所得的近地轨道卫星的速度，*m*（*v*1 – *v*A）2是以发射点处的地面为参考系所得的动能的增量。按照我们前面所说的，发射卫星的问题应该选择地心参考系，则解答 1 正确。

但赞成解答 2 的人不认同这种说法，其中有些人认为，发射卫星是在地面上 A 点进行的，因此应该选择 A 点处的地面参考系，但他们忽略了这个问题涉及的空间范围是很大的，发射卫星的地点分布在地球表面广阔的区域，不同地点绕地轴旋转的速度各不相同，这时“地面参考系”已经不能再看作惯性参考系了。

另外有些人则提出了下面的反驳意见：根据动能定理，物体动能的增量等于外力对物体所做的功，因此上面两种解答结果都只是外力（发射火箭的推力）对卫星所做的功，它的数值的确与参考系的选择有关。卫星在地面上发射，可以把卫星与地球看作相互作用的两个物体，两个物体在相互作用的过程中，一对相互作用力所做的总功，等于该系统动能的增量，而它是与参考系的选择无关的量，解答 1 的结果只是相互作用中一个力做功的结果，因此是没有意义的，而解答 2 的结果是一对力做功的结果，它与参考系的选择无关，我们选择地面的 A 点为参考系，只是为了简便，因此只有解答 2 的结果才是正确的。

这里犯下的错误是把两个质点相互作用的结论搬到卫星发射过程中来！卫星的发射是靠火箭向后喷气的反冲作用完成的，某极短时间内喷出的气体（以下简称尾气）d*m* 与火箭的其他部分（包括卫星、火箭的壳体以及未燃烧的燃料）是相互作用的两个物体，其中尾气带走了绝大部分的能量。这些尾气喷射到大气中，会与大气相互作用，大气又会与地球相互作用，最终这些能量都将会变成内能而散失掉。此时如果把地球（色括大气以及喷出的尾气）当作质点对待，是不正确的。

应该说，本题的设问是值得商榷的，发射卫星过程中消耗多少能量，对于中学生来说是无法回答的问题，只能问卫星增加多少能量，解答过程应选择地心参考系，从而解答 1 是正确的。

**例 2** 分别在地面上的 A 点和 B 点，发射质量都是 *m* 的近地卫星，设 A 点和 B 点绕地心转动的线速度分别是 *v*A 和 *v*B（*v*A > *v*B），第一宇宙速度为 *v*1。问：在哪里发射卫星比较节省能量？至少能省多少？

解法 1：选择地面参考系：

在 A 点发射质量是 *m* 的近地卫星，卫星增加的动能 Δ*E*kA = *m*（*v*1 – *v*A）2；

在 B 点发射质量是 *m* 的近地卫星，卫星增加的动能 Δ*E*kB = *m*（*v*1 – *v*B）2。

由于 *v*A > *v*B，因此 Δ*E*kB > Δ*E*kA，可见在 A 点发射节省能量。二者之差 Δ*E* = Δ*E*kB − Δ*E*kA。

对解法 1 的质疑：上面的解法中，Δ*E*kA 与 Δ*E*kB 分别是以 A 点处的地面和 B 点处的地面为参考系而得出的结论，既然是由两个不同参考系得的结果，怎么能比较大小呢？更谈不上相减求其差值了。

解法 2：选择地心参考系，运用动能定理。

在 A 点发射质量是 *m* 的近地卫星，卫星增加的动能 Δ*E*kA = *m*（*v*12 – *v*A2）。

在 B 点发射质量是 *m* 的近地卫星，卫星增加的动能 Δ*E*kB = *m*（*v*12 – *v*B2）。

由于 *v*A > *v*B，因此 Δ*E*kB > Δ*E*kA，可见在 A 点发射节省能量。二者之差 Δ*E* = Δ*E*kB − Δ*E*kA = *m*（*v*A2 – *v*B2），在解法 2 中，Δ*E*kA 与 Δ*E*kB 选择的是同一个参考系，二者之差就等于节省的能量。

## 四、其他相关问题

### 1．我们常把地球同步卫星称为静止卫星，这是选择什么参考系呢？

地球同步卫星之所以被称为静止卫星，是因为站在地面上的人看来，它的位置是静止不动的，而地面上的人是随地球自转的，这时卫星处于相对地心转动的非惯性参考系中。在该非惯性参考系中，卫星受到地球引力和惯性离心力两个力的作用而处于平衡状态。但中学不讲非惯性系，也不涉及惯性力，因此不能把卫星看作“静止”的物体来处理，而是选择地心参考系，卫星由于受到地球引力而产生加速度，此加速度即为绕地球做圆周运动的向心加速度。

### 2．重力与地球引力是什么关系？

中学物理教科书上说：重力是由于地球吸引而产生的力。言外之意就是重力不是地球吸引力，那么，它们二者间是什么关系呢？

用细线把重球悬挂起来（悬挂点是固定在地面上的），地球上的人把静止时细线的方向称为竖直方向，细线拉力的大小就等于重球所受重力的大小。如果没有地球的自转，则重力的方向指向地心，细线拉力的大小等于地球对重球引力的大小。但由于地球的自转，细线的方向要偏离地心的方向，细线拉力的大小也不等于地球对重球引力的大小。也就是说，重力与地球引力之所以有差别，完全是受地球自转的影响。

由于地球自转，地面参考系（实际上是人所在处的地面）不再是惯性参考系，而是转动的非惯性系，重力实际上是地球引力与惯性离心力的合力。图 1 是在地面参考系（转动的非惯性系）中重力与地球引力关系的示意图，其中地球引力 *F*引 = *G* ，方向指向地心 O，惯性离心力的大小 *F*惯 = *mω*2*r*，式中 *ω* 为地球自转的角速度，*r* 为该处绕地轴转动的半径，方向垂直于地轴向外，二者的合力即为重力 *G* = *mg*，方向竖直向下，拴重球的细线的拉力 *F*拉 与 *G* 平衡。

*F*拉

*F*惯

*F*引

*G*

O

*R*

*r*

图 1 从地面参考系看重力与地球引力

图 2 是在地心参考系（惯性系）中重力与地球引力关系的示意图，其中重球只受 *F*引 与细线拉力 *F*拉 两个力的作用，它们的合力即为向心力 *F*向心 = *mω*2*r*，重力 *G* 可以认为是地球引力 *F*引 的一个分力，其另一个分力就是 *F*向心。

*F*拉

*F*向心

*F*引

*G*

O

*R*

*r*

图 2 从地心参考系看重力与地球引力

### 3．重力有反作用力吗？

如果我们强调重力不是地球引力，不管说它是地球引力与惯性离心力的合力，还是说它是地球引力的一个分力，重力都没有反作用力。但在讨论地面附近小范围内物体的运动问题时，我们选用地面参考系，并且把它作为惯性系对待，这实际上就忽略了地球自转带来的影响，从而可以认为重力近似等于地球引力（物体所处位置的纬度越高，近似程度越好；在南北极点上，若忽略其他运动因素，即可认为重力等于地球引力），此时说“物体所受的重力的反作用力是物体吸引地球的力”才可以认为是正确的。