

我可以不同意你的观点，但我将用生命捍卫你发表观点的权利。

——伏尔泰

## 第一章 基本知识

人类赖以生存的地球，不仅给人们提供了吃、穿、住的基本生活条件，同时也给人类留下了一本毕生探索的大自然书籍。人们在地球上劳作、休憩，闲暇时学会了思考，于是，探讨、认识自然的本质就一直以来成为人类进步的必要活动之一。

地球孕育了人类社会，使人类产生了思想和认识，从而出现了主观臆断。当人的主观臆断不断地被大自然本身以及人类自身在改造大自然的社会实践证实和证伪时，人类社会就出现了进步，科学与伪科学得以区分。当大自然及人类对它的改造活动无法证实人们的想法时，神话得以流传。

方法论的出现，是人类认识自然的又一大贡献。这样，人们探索自然的方式、方法被划分成不同的领域和门类，地球科学只是其中之一。

地球科学在于揭示地球本身、人与地球、其他天体对地球影响等的基本规律。

了解人类在与地球相互作用中形成的认识和方法，是本章的主要任务。

### 第一节 地球是复杂系统

人类栖居的地球是一个巨大的复杂系统，这种复杂性表现在许多方面：地球的组成结构、地球历史的演变、生物的组成与变迁、地壳运动的形成与发展、地球的运动与受力、人类认识了解地球的科学知识等。

从一般地学角度出发，地球由地核、地幔、岩石圈、大气圈、水圈、生物圈构成。而将太阳及其照射到地球的阳光等看成地球系统以外的东西。以前人们对地球的研究，建立在狭义的这种地球系统上，并且从这些独立的各组成部分，发展了许多专门学科。

近年来，人们开始意识到必须将这些组成部分综合起来作为一个整体进行研究。

地球动力学是地球科学中的一门高度概括、推理、理论性强的学科，它所涉及的问题是地球科学中最基本的问题。100多年来，人们对地球动力学问题进行了不懈的大量的探索，取得了一定的进展，但对某些基本问题却一直不能很好地解决，如地球的动力学方程问题，虽然在大气、海洋动力学方面，出现了某些专著，但所研究的内容大都脱离不出就事论事，其原因也就是因为地球是一个复杂系统。

正确认识地球复杂系统，建立合理而健全的地球动力分析体系是地球动力学最基本的理论前提。本书所选取的理论分析体系，是将地球球面质点的受力和运动状态的改变，与地球所属的太阳系、银河系紧密相连，以地球的运转轨道为公因素，针对地球转动速度非爱因斯坦相对论基本范畴，建立起地球球面质点的受力分析体系，将地球球面质点的运动放在复杂系统内考虑，进行球面质点的数学推理、物理分析、地质地理特征对照，从而总

结出影响地球物质发生运动的作用力（胀缩力、强中纬力、潮汐力等）。

## 第二节 时间和空间

人们要想描述一件事、一类物、一种状态、一个过程、一幕情景等，都离不开时间和空间这两个要素。

绝对的时间和空间应是彼此完全相互独立的，不然我们不能加以区别。然而，在某种意义上，时间和空间却又紧密相关，正如牛顿所说：“我们不可能设想物体存在于空间而根本没有时间，或存在于一有限时间内而‘不在任何地方’”。

在一定条件下，时间和空间可以相互转化。我们可以用时间来表示空间，如地震勘探中的时间剖面；也可以用空间来延续时间，如天文观察星象。

地质工作者们通常使用的时间是在目前以前，其时间是通过空间所记载的事件、物质的影射而获得。所使用的空间大多是由实物构成，或者位于地下或者充满想像。

### 一、时间

牛顿认为时间是绝对的，与任何物理客体和事件无关而流逝着，他说：“绝对、真正、和数学的时间是自在的，与任何外在的东西无关，它均一地流逝着，又称为持续。”用牛顿自己的话说，他并不企图给时间或空间下定义。

哲学上将时间定义为：时间是物质运动的存在形式。是物质运动过程的持续性和接续的秩序。具有客观性和无限性。是一维的，总是朝着一个方向流逝，一去不复返，用一个量即可完全度量。它和运动着的物质不可分离，和空间也不可分离。

数学上将时间定义为一段有起点和终点的持续过程或这个持续过程的某一点。如：地球公转一周的时间是 365 天；刚才最后一响，是北京时间 12 点整。

地学上的时间由标准化石、含放射性元素标本、标准剖面确定，采用的单位一般为“10<sup>4</sup>a”、“Ma”、世、纪、代、宙。

时间不依人的意志为转移，没有人能够催快或推慢时间的进程，时间的流逝在整个宇宙中是划一的，对你、我、他、其他星球都是相等的。

时间和空间又是可以相互转化的。有时，人们要运用时间来描述空间，有经验的地质、地球物理学家常常只需通过时间剖面 and 等时间图就可以知道地下地质构造等空间问题。有时，人们要通过空间来反映时间，如人们通过太阳光影的移动了解时间，采用沙漏与水桶水流影射时间。

绝对的时间和相对的时间是不同的。中国早就有一句古话：“天上一天等于地上一百年”。爱因斯坦在发展他的狭义相对论时揭露了经典概念中时间的一些重要局限性。

日常生活中和其他非异常高速环境中所使用的时间是相同的。

时间可以通过物理学、化学、生物学过程加以测定和证实。

时间可以通过数学、地学、考古等手段来表述。

笛卡儿解析几何学的奠基，使人们可以将时间用线段来表示，并用来分析事物随时间变化的基本特性。

时间是用来描述物质运动过程与状态的一个关键参数。

## 二、空间

牛顿认为空间也是绝对的、永存的，并且不依赖于是否有任何物质充填其中或在其中运动，他说：“绝对空间自身与任何外在的东西无关，永远保持着不变和不动。”

哲学上将空间定义为：空间是物质运动的存在形式；是物质存在的广延性和并存的秩序，具有客观性和无限性；是三维的，任何物体都有长、宽、高，同其他物体的位置关系只能是上、下、左、右、前、后，用三个量可完全量度。它和运动着的物质不可分离，和空间也不可分离。

数学上和物理上的空间往往是某种不动的三维模架，可以把物体放置在它里面，物体在其中运动而不会在物体和空间之间产生任何相互作用。

地质学上的空间常常是多维的，如最新的四维地震勘探，以及地质学家们通过一块岩石指出它的形成时代、古生物、水体活动、气候变迁、构造运动、与邻区产生的物质交代等。

空间有时又是相对的。其相对性不仅体现在爱因斯坦相对论中，如一个长度一定的物体在特定速度条件下发生了长度的改变；而且还体现在日常生活与工作中，同一电视荧屏在不同角度的人眼中，面积大小不同，因而所占空间不同。再如石油地震资料的数字处理，当选取的速度、偏移距等参数不同时，地下的某个水平的或者倾斜的层面可以展现出千姿百态。

可感触的空间是可测的，不可测的空间是可想像和可比拟的。

宇宙中的每一物体都存在于空间和时间中的一个特定点。

一个运动的物体在时间过程中经历着连续的位置变化。

分析研究地球球面质点的受力与运动，离不开时间和空间这两个基本要素。

## 三、参照系与坐标系

虽然时间和空间是描述物体运动的两个重要参数，但是，仅凭它们是不足以说明物体在空间的位置随时间的变动情况的，这种描述只具有相对意义。

参照系和坐标系是描述物体运动的又一组基本要素。参照系是描述物体运动的基本条件，坐标系是描述物体运动的一般手段。

### 1. 参照系

研究物体间的相对位置变化时，必须事先选定某一个物体，以便确定其他物体相对于这一物体的位置变化。一般地，称这一事先被选定的物体为参照体，把以参照体为中心建立起来的空间关系，称为参照系。

选择合适的参照系不仅可以简化物体运动的机械模式，而且便于探索运动规律。相反，选择了不合理或者错误的参照系，只会造成复杂的机械模式和混乱的认识。人类历史上的“地心说”是一个典型的错误的参照系的选择，所造成的悲哀和遗憾是无法弥补的。现代社会里，有些人有时也会犯类似的错误，如有人总想在地球本身寻找地壳构造运动的驱动力，即是参照系的选择错误。

参照系可分为惯性参照系和非惯性参照系。一切惯性参照系都是等效的，可以相互转换。

有时对于同一物体在不同条件下的运动分析，可以选用不同的参照系。

本书中，在分析地球球面质点的运动规律时，分别采用了以地球、太阳、银核为参照体的不同参照系。

## 2. 坐标系

研究物体运动位置的改变和研究目标位置的改变，需要首先将目标（常常抽象为点）定位。通常，人们将确定一点位置的有次序的一组数，称为这个点的坐标，而将用来确定坐标与点之间对应关系的参考系，称为坐标系。

坐标系是形与数结合的基础。利用坐标系讨论问题的方法就是坐标法。

在参照系选定后，一般选择参照体作为坐标系的原点建立坐标系，将被研究对象置于坐标系中讨论其相对位置的变化。

人们常用的几种坐标系有：仿射坐标系、直角坐标系、极坐标系。

空间里的仿射坐标系是由空间里的一点与三个不共面的向量构成的。仿射坐标系可以是平面的，也可以是空间的，还可以推广到高维情况。

给仿射坐标系一定的约束条件——使坐标轴之间的夹角都是直角，则仿射坐标系转变成成为直角坐标系。

仿射坐标系所形成的结论，在直角坐标系内同样成立；反之，在直角坐标系内成立的结论，在仿射坐标系内不一定成立。

极坐标系也是非常重要的一种坐标系，一些绕定点不断变化角度的运动，如果能放在极坐标系内分析，往往会出现异常简单的数理模式，使分析结论一目了然。

极坐标是这样的一种坐标：在欧几里得平面内，以参照体作为定点  $O$ （有时为  $F$ ），一般给定向右方向作为正方向、以单位向量引射线  $Ox$ ， $O$  点称为极点， $Ox$  称为极轴，就构成了一个极坐标系。对于极坐标系内任意一点  $S$ ，其极坐标一般记为  $S(r, \theta)$ ， $r$ 、 $\theta$  分别称为点  $S$  的极径和极角。在极坐标中点与坐标之间不具备一一对应关系，只有在主值区间里，点与坐标一一对应。

坐标系的选取是人为的，根据不同情况选取适当坐标系，会给解决问题带来方便。

由于坐标的性质和坐标系之间的相对位置关系，可以建立坐标变换方程，从而完成坐标变换。

如果在平面上给出两组曲线，使得平面上任意一点都是分别由这两组曲线中的一条曲线相交的交点，就可以通过将这两组曲线分别编号，取两组曲线的编码作为所有交点的坐标。这样的坐标通常称为曲纹坐标或曲线坐标。

仿射坐标、直角坐标、极坐标都是曲纹坐标的特殊情况。地球上的地理坐标是由经线和纬线组成的一种曲纹坐标。

## 四、矢量与矢量运算

为了表达思维，人类创造发明了语言、文字、图形图像、音乐等。

人们用语言表达概念，用不同的词语描述不同的景物，使丰富多彩的自然规律能够被彼此相互清晰而方便地理解和思考。为了使复杂系统中各种参照系内物体随时间变化产生的空间位置关系的改变，能够准确而简洁地被表述，一些新词和法则不断地被人们创造出来。矢量和矢量运算即是这种性质的产物之一。

## 1. 矢量

当人们发现自然界中大量存在一种大小和方向同时随时间或位置变化的量时，矢量一词诞生了。矢量所描述的是既有方向又有大小的量。矢量又称向量。

尽管矢量是既有大小和方向的量，但并不是自然界中所有的既有大小和方向的量都是矢量。

有大小而无方向的量，人们称为标量，矢量的数值就是标量。

虽然一个矢量可以指的是由某一特定点所确定的量，但矢量却是无需限定位置的。即使两个矢量所量度的是在不同时间和不同空间位置的物理量，它们仍然是可以比较的。

位移是矢量，速度是矢量，角速度是矢量，作用力也是矢量。

判断一个量是否是矢量的两个条件：它必须满足矢量相加的平行四边形法则；它必须具有与坐标系的选择无关的一个数值和一个方向。

## 2. 矢量运算

矢量运算分矢量加法和矢量乘积、矢量微商。这里只将本书中将要用到的部分作简单介绍。

### 2.1 矢量加法

矢量的加法符合平行四边形法则。即将一矢量  $a$  平移到尾端与另一矢量  $a$  的首端重合。然后从  $a$  矢量的尾端到  $b$  矢量的首端画一矢量，所得矢量即为矢量  $a$  与  $b$  的和  $a + b$ 。

矢量加法遵从交换律，即： $a + b = b + a$ 。

矢量加法遵从结合律，即： $a + (b + c) = (a + b) + c$ 。

标量乘矢量遵从分配律，即： $\kappa (a + b) = \kappa a + \kappa b$ 。

### 2.2 矢量乘积

物理学中矢量的乘法分为两种，一种叫“点乘”，其乘积是标量，故又称“标积”；一种叫“叉乘”，其乘积在很多场合下是矢量，故又称“矢积”。

$a$  和  $b$  的标积被称为一个数，是  $a$  的数值乘以  $b$  的数值，再乘以两者夹角的余弦。用符号表示为：

$$a \cdot b = ab \cos(a, b)$$

在标积的定义中不涉及坐标系。

标积满足交换律，即： $a \cdot b = b \cdot a$ 。

一个数被一个矢量除是一种毫无意义的、不确定的运算，所以，标积乘法没有逆运算。即：如果  $a \cdot x = b$ ，则  $x$  没有惟一的解。

矢量的标积在很多方面得到应用，如：余弦定律、平面的方程、电磁波中的电矢量和磁矢量、功率、单位时间内扫过的体积等。本书中应用了矢量标积的余弦定律。

两个矢量的叉乘在物理学中也有广泛的应用，矢积  $a \times b$  在某种限定意义下是矢量，这个矢量的方向垂直于  $a$  和  $b$  的平面，而数值为  $ab \sin(a, b)$ 。

判断矢积方向的方法被约定为右手螺旋法则，即：以展开的右手四指的指尖指向作为前一矢量的方向，顺着两矢量的最小夹角方向，将四指指尖转向后一矢量，卷曲四指，那么，大拇指的指向为两矢量矢积的方向。

交换两矢量的位置，其矢积结果大小相等，方向相反，即： $a \times b = -b \times a$ 。

矢积不满足交换律。

矢积遵从分配律, 即:  $a \times (b + c) = a \times b + a \times c$ 。

矢积的应用表现在: 平行四边形面积、平行六面体的体积、正弦定律、力矩、磁场中带电粒子所受的力等计算上。

### 2.3 矢量微商

如果矢量  $r$  能被看成是标量  $t$  这一变量的函数(矢量函数), 则在不同的时刻  $t_1$ 、 $t_2$ , 矢量  $r(t_2)$ 、 $r(t_1)$  之差  $\Delta r$  也是一个矢量,

$$\Delta r = r(t_2) - r(t_1)$$

对于  $\Delta r$  与两时刻的时间差  $\Delta t = t_2 - t_1$  之比值  $\frac{\Delta r}{\Delta t}$ , 可以看成是数值为  $\Delta r$  数值的  $\frac{1}{\Delta t}$  的共线矢量。

当  $\Delta t \rightarrow 0$  时,  $\frac{\Delta r}{\Delta t}$  趋近于矢量  $\frac{dr}{dt}$ ,

$$\frac{dr}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t}$$

矢量  $\frac{dr}{dt}$  称为矢量  $r$  的时间微商, 即人们常称的速度矢量, 它是质点位置随时间的变化率。

根据微商的定义和级数展开方法等数学变换, 可得, 当  $\Delta t \rightarrow 0$  时

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dr}{dt} \hat{r} + r \frac{d\hat{r}}{dt}$$

式中,  $\frac{d\hat{r}}{dt}$  表示单位矢量方向的变化率。该式是取标量  $a(t)$  和矢量  $b(t)$  的乘积的微商所依从的普遍法则

$$\frac{d}{dt} ab = \frac{dr}{dt} b + a \frac{db}{dt}$$

的一个实例, 说明速度的变化表现在两方面, 一是方向的改变, 一是大小的改变。

在本书中我们要用到速度的表达式转换, 所以在此将另一种形式的速度表达式一并介绍, 其中利用的是径向单位矢量  $\hat{r}$  和垂直于它的称为  $\hat{\theta}$  的单位矢量。

随着  $\Delta t \rightarrow 0$  时, 从而  $\Delta\theta$  也相应地趋于零,  $\Delta\hat{r}$  的数值

$$|\Delta\hat{r}| = |\hat{r}| \Delta\theta = \Delta\theta \quad (|\hat{r}| = 1)$$

于是, 矢量  $\Delta\hat{r}$  和比值  $\frac{\Delta\hat{r}}{\Delta t}$  各自变为

$$\Delta\hat{r} = \Delta\theta \hat{\theta}, \quad \frac{\Delta\hat{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \hat{\theta}$$

取  $\Delta t \rightarrow 0$  的极限, 得矢量  $\hat{r}$  的时间微商

$$\frac{d\hat{r}}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \hat{\theta}$$

于是, 速度的表达式可以表示成

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dr}{dt} \hat{r} + r \frac{d\theta}{dt} \hat{\theta}$$

在圆周运动或轨道近于圆的运动中, 上式等号右端的第一项等于或近似等于零。

在本书中，我们采用的表示方式为

$$r = \frac{dr}{dt}$$

## 五、点与质点

讨论物体的运动与受力需要牵涉到物体所在的位置及其表示，当然，实在地或者形象地将物体表示出来是完全可以的，但是，为了描述的方便和应用的需要，人们往往采用形而上的方法，用点将物体定位，用质点代表物体。

### 1. 点

物理学中的点，借用了几何学上的概念：点是指没有长、宽、厚，只有位置，不可分割的图形。

### 2. 质点

质点是指具有一定质量而几何尺寸可以忽略不计的物体。这是经典力学的一个从实体中抽象出来的力学简化模型，在客观世界中质点是不存在的。

在一个力学问题中，能不能把一个物体看作一个质点，这取决于物体的尺寸和那些对于所研究的问题具有最重要意义的空间尺度（运动区域的大小）相比是否足够小；同时还取决于所研究的运动特性。当一个物体的尺寸大小同该问题中所讨论的有关尺寸相比可以忽略不计，因而并不引起显著的误差时，就可把这个物体简化为一个质点。

同一物体在一个力学问题中可以当作质点，而在另一个力学问题中却不能。例如地球，在研究它绕太阳的运动时，由于地球的半径比它和太阳之间的距离小得多，可以把它看成质点。但在研究地球的自转时，就不能再把它看成质点。

### 3. 球面质点

当物体的运动受球面控制，并且被分析物体可被视为质点时，我们称该质点为球面质点。

## 第三节 力与运动

力是物体间的相互作用结果，运动是物质的存在形式和固有属性。力与运动是维持物质存在不可分割的一对矛盾体，力是产生物体运动状态改变的原因，而物体运动状态的改变却又可以产生作用力，物体的运动离不开作用力的作用，作用力的不同导致物体运动形式和特征的不同。

本书所述地球的动力，即是基于力与运动的哲学观念，通过分析研究地球、太阳、银核三者之间的轨道运动变化特征，而获得的地球球面质点所受到的作用力。

### 一、自然界中的已知力

所有的力都来自不同物体间的相互作用。

在物体之间只存在少数几种基本不同的相互作用力：引力、电磁力、核力。

#### 1. 引力

引力是由于物体的质量而在物体之间产生的作用力。引力存在于引力场中，它是一个

质点与其他质点或物体之间的相互作用。在开普勒第三定律的基础上，牛顿看到，引力的相互作用必然意味着力与施加吸引作用的物体的质量呈正比，同它与被吸引的质量呈正比一样。一对在引力相互作用下的粒子，作用于其中任何一个的力的大小为：

$$F = - G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

这就是著名的万有引力公式。式中， $G$  是要由实验求取的常数； $m_1$  和  $m_2$  是粒子的质量； $r$  是从一个粒子的中心到另一个粒子中心的距离。

引力只在牵涉到具有天文尺度的物体时重要。

## 2. 电磁力

几乎所有物体最终都依赖于电磁力的相互作用。电磁力是由于静止的或运动的电荷而产生的。

库仑定律说：一个静止的带电粒子要吸引或排斥另一静止的带电粒子，力的大小与电荷的乘积呈正比，与它们之间的距离的平方呈反比，方向沿着两粒子的连线。作用力的表达式为：

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

与万有引力的形式完全一样，式中， $q_1$ 、 $q_2$  为带电粒子所带电荷；常数  $k$  为  $9 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ 。

与引力相比，电力的强度是巨大的。

运动着的带电粒子之间所存在的相互作用力称为磁力，它与电荷的速度有关，而且总是在垂直于带电粒子运动的方向而作用于带电粒子上。

电磁力存在于电磁场中。

## 3. 核力

核力只在原子核的距离内重要。

尽管与库仑力和万有引力相比核力最大，但在讨论牛顿力学时，核力是没有地位的。

在后面章节里将要讨论的几种力（胀缩力、强中纬力、潮汐力），由于分析对象和分析体系属于引力范畴，处于引力场中，所以，按照前述划分办法，应列入引力类。

## 4. 本书所获作用力

牛顿在创立力学方面的成就在于发展了作用于一物体的力与物体运动的改变之间的定量关系，他宣称力学的主要任务是从观测到的运动去推知力。

根据地球上普遍存在的地质现象，建立地球质点的运动分析体系，我们得到了导致地球发生周期性膨胀与收缩的胀缩力；根据地球球面质点在随着地球转动过程中，其与地心的距离和与太阳或银核的距离随着时间的变化而变化的特性，建立地球球面质点的受力运动分析体系，我们获得了存在于地球球面质点上的强中纬力与潮汐力（不是以往由万有引力发展成的“引潮力”，是本书的原创理论）。

由于本书重点就是论述这三种作用力，因而在此不作进一步展开。

## 5. 其他

在前人的研究成果中，有一种力存在着与本书所述的强中纬力相近但又明显不同的作用力，即科里奥利力。另外，本书中还将用到物体间的接触力。

### 5.1 科里奥利力

地球上做相对运动的物体一般都要受科里奥利力的作用。尽管它不易被人们察觉，但对于一些作用时间较长的运动过程，其影响尤为明显。科里奥利力已成功用于弹道分析、卫星溅落、信风分析及河流冲刷分析。

科里奥利力由科里奥利（G.G. Coriolis）在 1835 年从水车研究成果的发展中得出。用公式表示为：

$$F = -2m(\omega \times v_r)$$

理论证明了科里奥利力的大小和方向与转动系统的角速度  $\omega$ 、旋转方向、以及相对速度  $v_r$  的大小和方向有关。作用在运动质点的科里奥利力与  $\omega$  和  $v_r$  两者都垂直。在北半球，科里奥利力导致运动质点偏向运动方向的右侧，在南半球则相反。科里奥利力能产生偏离的有效部分与纬度有关，随着纬度的增大而增大，在两极具有极大值，而在赤道为零。

科里奥利效应产生于转动状态中运动的质点，不运动的质点没有科里奥利效应。运动状态持续时间越长，偏离效应越显著。到目前为止，这种效应除了在空间运动的质点可作有误差的定量解释外，在地面及地下运动的质点只能作定性解释。

### 5.2 接触力

在力学的许多应用问题中，常常要谈到接触力，例如板块在地幔层上的压力就是这种力。分析起来一切接触力归根到底都是场力。在我们所讨论的问题中，只简单考虑接触力是一种力。

## 二、加速运动

物体运动速度随时间的改变而变化的运动，称为加速运动。

加速度是速度对时间的一阶微商，即：

$$\text{加速度 } a = \frac{d}{dt} \left( \frac{dr}{dt} \right)$$

所以，加速度是径矢量  $r$  对时间的二阶微商，常写成：

$$\ddot{r} = \frac{d^2 r}{dt^2}$$

## 三、圆周运动

没有近似就没有科学的发展。在我们所讨论的问题内，有些需要近似到圆周运动取值，所以，了解和掌握圆周运动的特性是必要的。

质点在匀速圆周运动中，矢径  $r$ 、速度  $\dot{r}$ 、加速度  $\ddot{r}$  三者的变化关系见图 1-1。式中，

$$\begin{aligned} r &= r\hat{r} \\ \dot{r} &= r\omega\hat{\theta} \\ \ddot{r} &= -r\omega^2\hat{r} \end{aligned}$$

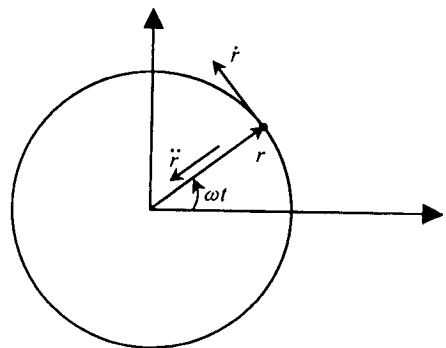


图 1-1 匀速圆周运动示意图

在匀速运动中， $r$  是恒量， $\omega$  是恒定角速度，单位矢量  $\rho$  以恒定速率转动。

## 第四节 关于椭圆

开普勒根据对火星的运动分析建立起“行星的轨道是一些简单的椭圆而不是复合的圆”这一命题，对于科学界来说无疑是一伟大的发现。

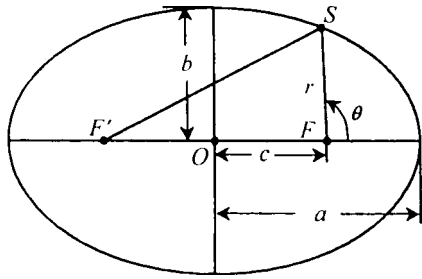


图 1-2 椭圆轨道示意

如图 1-2 所示，椭圆的长轴等于  $2a$ ，两焦点  $F$  和  $F'$  之间距离等于  $2c$ 。根据椭圆性质，在三角形  $F F' S$  中运用三角函数余弦定理，很容易获得

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta}$$

式中， $e$  为离心率，且  $e = c/a$ 。

显然，当以焦点  $F$  为极点，以  $FS$  为极径建立极坐标系时，上式即为椭圆的极坐标方程。

## 第五节 天球坐标系

确定地球上点的坐标需要用地理坐标系，确定天球上点的坐标需要用天球坐标系。构成天球坐标系的要素有：基圈、原点或主点、始圈或主圈、第一坐标、第二坐标。对于不同的基圈、主圈和主点，以及第二坐标所采用的不同度量方式，可以引出不同的天球坐标系，如地平坐标系、赤道坐标系、黄道坐标系、银道坐标系等。

鉴于本书所涉及的主体内容，这里仅选黄道坐标系作为引例。

在太阳系内研究天体的运动情况，常常使用黄道坐标系。

黄道面是指地球绕太阳公转的轨道平面，黄道面与天球相交的大圆称为黄道，在黄道坐标系中，黄道为基圈。黄道的两个几何极成为黄极，按照所处位置的不同，又分为北黄极、南黄极，北黄极为黄道坐标系的极。天球上与黄道平行的小圆称为黄纬圈，过黄极的大圆称为黄经圈。黄经圈为黄道坐标系的副圈，与黄道垂直。过地球的赤道面与天球的交线也称赤道，黄道与赤道的交角称为黄赤交角，黄赤交角等于  $23^{\circ}27'$ （见图 1-3）。

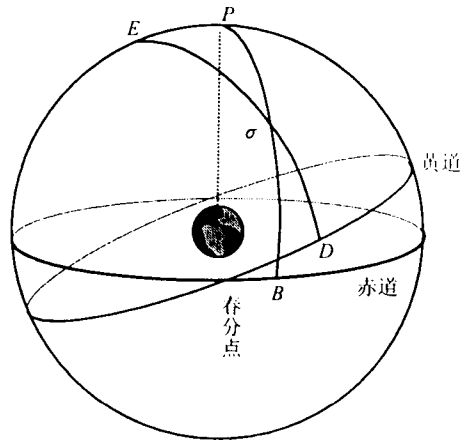


图 1-3 黄道坐标系示意图

天体  $\sigma$  的黄经圈与黄道交于  $D$  点，大圆弧  $\sigma D$  所对平面角是天体在黄道坐标系中的第一坐标，称为黄纬。由黄道向南、北黄极分别计算黄纬，从  $0^{\circ} \sim \pm 90^{\circ}$ ，在黄道以南的黄纬取为负值。太阳沿着黄道从赤道以南向北通过赤道的那一个交点称为春分点，另一个交点称为秋分点，黄道上与二分点等间距相隔的两点称为二至点，在赤道以北的点为夏至

点，在赤道以南的点为冬至点。过春分点的黄经圈和天体所在黄经圈之间的球面角，是天体黄道坐标系中的第二坐标，称为黄经。从春分点起沿黄道量度黄经，从  $0^\circ \sim 360^\circ$ ，天文学上黄经的量度方向是逆时针的，也就是从春分点向夏至点方向量度。黄道坐标系属于左旋坐标系。黄道坐标系的基圈和主圈随着旋转天球一起做周日运动，同第二赤道坐标系相似，天体的黄道坐标不会因观测时间和观测地点的不同发生变化。

### 参 考 文 献

- [1] 仓孝和 . 自然科学史简编 . 北京 : 北京出版社 , 1988
- [2] 陈占锋, 顾基发 . 地球系统的复杂性 [J]. 复杂性研究 [M]. 北京 : 科学出版社 , 1993. 257 ~ 265
- [3] 冯潮清, 赵愉深, 何浩法 . 矢量与张量分析 , 北京 : 国防工业出版社 , 1986
- [4] 刘全稳, 陈景山, 严宁珍等 . 油气质点运移探讨 [J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(1): 14 ~ 17
- [5] [美] A.P. 弗伦奇著 . 牛顿力学 (1) . 郭敦仁, 何成钧译 . 人民教育出版社 . 1978
- [6] 中国大百科全书编辑委员会 . 中国大百科全书 (物理学、数学) (光盘版) . 北京, 上海 : 中国大百科全书出版社
- [7] 李开泰, 黄艾香 . 张量分析及其应用 . 西安 : 西安交通大学出版社 , 1984
- [8] 中国大百科全书编辑委员会 . 中国大百科全书 (天文学学) , 北京, 上海 : 中国大百科全书出版社
- [9] 张惠民 . 地球科学概论 . 北京 : 气象出版社 , 1987. 76
- [10] C. Kittel, W. D. Knight, M. A. Ruderman. MECHANICS. *Berkeley Physics Course Vol. 1* . McGraw-Hill, 1973
- [11] H. Goldstein . CLASSICAL MECHANICS ( *Second edition* ) . Addison-Wesley Publishing Co. , 1980

物理学不是一种旁观者的娱乐，但要获得真正的洞察和理解——方  
程是从哪里来的？它们真正说些什么？——人们还必须考查其基本  
假设和现象。某些巨大的进展正是这样发生的。

——A.P. 弗伦奇（1971）

## 第二章 地球的胀缩力

无论是地球的收缩说、膨胀说、脉动说，还是大陆漂移说，都在驱动力问题上不能给人以可信的说服力。板块理论的驱动力机制，建立在地幔对流说上，也无一套完整严格的科学推理程序。地球动力学的研究者曾经认为放射性蜕变所产生的热能是驱动力的主要来源，也曾描述了板块的重力驱动机制等，但都因为各自面临的困难不比其他假说少，而不为人们普遍接受。

长期以来，探索球面陆块运动驱动力，一直是人们争相研究的课题之一，其相关学术论著不断问世。基于其可见、可感触的特点，所使用的研究方法几乎遍布各学科领域。

美国学者 D.L. 特科特等（1982）曾经研究了地球动力学在连续介质物理地质问题上的应用，讨论了理解板块构造和各种地质现象所必需的基本物理过程，用物理数学方法解释了地质学中的各种有关过程和机制。英国学者 A.E. 吉尔的《大气-海洋动力学》专著，用数学方法处理了大气-海洋系统的动力学问题（重点是大尺度运动），从物理本质上由浅入深地加以阐述。美国斯坦福大学 T.R. 凯恩从运动学原理出发，结合万有引力定律，讨论了宇宙飞船的动力学问题。法国学者 L. 利布特里（1982）在其《大地构造物理和地球动力学》一书中，结合当时最新的地球动力学资料（包括作者自己的独特见解），着重强调了地球物理和地质相结合的意义。吴珍汉（1997）在综合了国内外系列观测研究资料的基础上，论述了与地球旋转有关的各种重要地质构造与地球物理过程，系统剖析了全球构造运动的各种驱动力，评价了其动力学意义。

自 50Ma 陆-陆碰撞以来，印度次大陆和羌塘块体向特提斯喜马拉雅和拉萨块体地壳挤入的长度分别为 508km 和 429km（曾融生等，1995），不考虑塔里木块体和准噶尔块体的消减量，近千公里的长度是在印度洋上新生？还是消失？如果是增生，为什么增生的推力能大到使陆-陆相撞并被挤压成山，而不是陆-陆汇合后阻止增生继续？

国内外学者从各个方面的探讨，为推动地球科学的发展做出了不可磨灭的贡献。但迄今为止，仍然有诸多问题得不到解释，如：洋盆为什么会张开？板块在遇到相对反作用力后为什么还会褶皱成山？球面陆块驱动力的表达式是什么？

尽管国内外地学界对全球构造与地球动力学进行了长期不懈的研究工作，取得了令人瞩目的科研成果，但纵观全球地质动力研究历史，不难发现，绝大多数的学说创始人，不是局限在地壳活动本身，就是局限在地球自转运动变化上。天文地质学的出现，使地学研究者的目光开阔了很多，但关于地质驱动力的问题，还是没有一个好的说法。

通过本章的研究，我们将明白：洋盆张开是因为地球处在膨胀时期，地球的表面积增

大的缘故；山脉形成是因为地球处在收缩时期，地球表面积缩小而引起的。这都是因为地球本身所具有的胀缩力作用而引起的，地球的胀缩力驱动着地球体积的改变，从而引起地球表面积的改变。

胀缩力是由于地球随太阳系绕银核运行产生的一种具有周期性变化的力，它在一段时间内表现为膨胀力，而在另一段时间内则表现为压缩力。正是由于有了胀缩力的作用，才有了丰富多彩的地质史话，有了今天仍探索不止的地球膨胀、地球收缩、地球脉动现象。

牛顿力学的创立，无疑是人类科学史上的一大进展，它指导人们攻克了一道又一道难关。牛顿力学认为：力是产生物体运动状态改变的原因。研究物体的运动变化，即可获得导致物体运动的驱动力。所以，要想获得导致地球体积改变的驱动力——胀缩力，我们必须研究地球运动状态的变化。

## 第一节 地球在银河系中的位置

借助现代天文学的研究成果，不难得到：①地球位于太阳系；②太阳系位于银河系；地球的绕日公转轨道是椭圆，太阳的绕银核公转轨道也是椭圆。

地球是太阳系的九大行星之一，它是离太阳最近的第三颗行星（图 2-1）。地球大约有  $46 \times 10^8$  a 的历史，自形成以来，无论是地球的整体，还是它的大气、海洋、地壳或内部，都始终处于不断地变化和运动之中。在它的系列演化阶段，地球总是保持着一种动力学平衡状态。

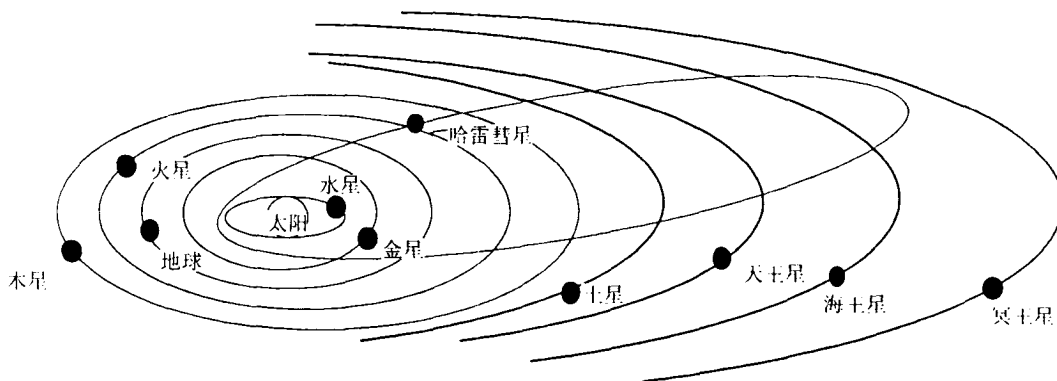


图 2-1 太阳系模式图

地球的自转和公转，使地球出现昼夜交替、四季变化和五带分区。地球的自转速度是不均匀的，有长周期变化、季节性变化和不规则变化，受其他天体的影响和自身内部物质的各种作用，地球要发生岁差、章动、极移和黄赤交角变化。

地球的公转轨道面称为黄道，黄道与赤道的交角约为  $23^{\circ}27'$ 。公转轨道的偏心率为 0.0167，公转周期为一恒星年。

地球与太阳系其他成员的基本运动特征参数见表 2-1。

太阳只是银河系中上千亿个恒星中的一个。太阳系既不在宇宙的中心，也不在银河系的中心。太阳带着整个太阳系做绕银核的椭圆转动，其轨道离心率约为 0.11 转动周期约

表 2-1 太阳系主要成员基本运动特征参数

行星	距离太阳 Mkm	公转周期	自转周期	赤道半径 km	相对质量 ( $m_{地球} = 1$ )	相对体积 ( $V_{地球} = 1$ )	相对密度 ( $\rho_{水} = 1$ )	公转轨道 偏心率
水星	57.9	87.97d	58.646d	2440	0.055	0.0558	5.46	0.206
金星	108.2	224.7d	243d ± 1d (逆)	6050	0.815	0.88	5.13	0.007
地球	149.6	365.26d	23h56min	6378	1	1	5.52	0.0167
火星	227.9	686.98d	24h37min	3395	0.108	0.15	4.15	0.093
木星	778.4	11.86a	9h50.5min	71400	317.9	1316	1.33	0.048
土星	1424	29.5a	10h14min	60000	95.18	745	0.70	0.055
天王星	2874	84a	10h49min	25900	14.63	65	1.24	0.05
海王星	4516	164.8a	22h	24750	17.22	57	1.66	0.01
冥王星	5911	248a	6d9h17min	2700	0.0024	0.0088	1.5	?

注：地球质量为  $5.976 \times 10^{27}$  g。表内数据为综合资料整理结果。

为 2.5 ~ 3 亿年。

银河系是一个透镜形的系统，直径约为 25kpc<sup>①</sup>，厚约 1 ~ 2kpc。其主体为银盘。银河系中心为一大质量核球，长轴长 4 ~ 5kpc，厚 4kpc。银河系为直径约 30kpc 的银晕笼罩。银河系质量为  $1.4 \times 10^{11}$  倍太阳质量，其中恒星约占 90%。

太阳在银道面以北约 8pc 处，距银心约 10kpc。

综合天文观测资料，银河中心方向（人马座）在银道坐标系的旧系统内的坐标为：

$$l^I = 327^\circ.69, \quad b^I = -1^\circ.40$$

由于银道坐标系和黄道坐标系都属于左旋坐标系，参考黄道坐标系中地球与太阳的关系，可以得到太阳系目前正处在运行轨道的近银核一端约 33°处（参见图 2-2、2-3）。

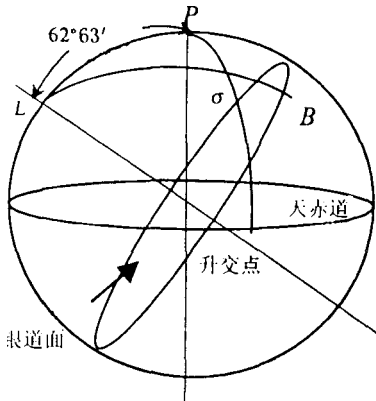


图 2-2 银道坐标系

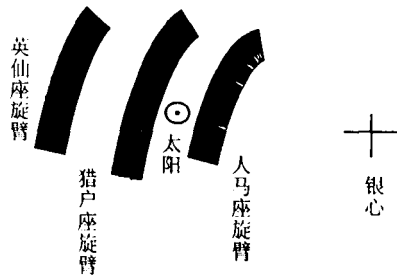


图 2-3 太阳与银心的位置关系

天文学上对太阳是绕过了近银点，还是准备绕过近银点目前还存在争议，从地质迹象来看，更趋近于支持前者。

① “千秒差距”为用于天文学中的长度单位，其符号为 kpc，1pc =  $3.0857 \times 10^{16}$  m。全书余同一编辑注。

## 第二节 地球的运动状态分析

太阳与地球或者其他行星的运动,都是椭圆运动。由椭圆的极坐标方程 参见图 2-4)

$$r = \frac{p}{1 + e \cdot \cos\theta} \quad (2-1)$$

求导,有:

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{p \cdot e \cdot \sin\theta}{(1 + e \cdot \cos\theta)^2}$$

$$\frac{dr}{dt} \cdot \frac{dt}{d\theta} = \frac{p \cdot e \cdot \sin\theta}{(1 + e \cdot \cos\theta)^2}$$

$\frac{dr}{dt}$  表示沿极径方向,  $r$  随时间  $t$

的变化率。

$\frac{d\theta}{dt}$  表示质点  $s$  对极点  $F$  的角速

度,可用  $\omega$  表示。

所以:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{p \cdot e \cdot \omega \cdot \sin\theta}{(1 + e \cdot \cos\theta)^2} \quad (2-2)$$

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{pe\omega^2(\cos\theta - e\cos^2\theta + 2e)}{(1 + e\cos\theta)^3} \quad (2-3)$$

设  $\frac{dr}{dt} = 0$ ,  $\frac{d^2 r}{dt^2} = 0$ , 得椭圆运动的特征点:

$$\text{由: } \frac{pe\omega \sin\theta}{(1 + e\cos\theta)^2} = 0$$

$$\text{有: } pe\omega \sin\theta = 0$$

得:

$$\begin{cases} \theta_1 = 2k\pi \\ \theta_2 = (2k + 1)\pi \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (2-4)$$

$$\text{由: } pe\omega^2 \frac{\cos\theta - e\cos^2\theta + 2e}{(1 + e\cos\theta)^3} = 0$$

$$\text{有: } \cos\theta = \frac{1 - \sqrt{1 + 8e^2}}{2e} \quad (0 < e < 1)$$

得:

$$\begin{cases} \theta_3 = 2k\pi + \arccos \frac{1 - \sqrt{1 + 8e^2}}{2e} \\ \theta_4 = 2k\pi - \arccos \frac{1 - \sqrt{1 + 8e^2}}{2e} \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2-5)$$

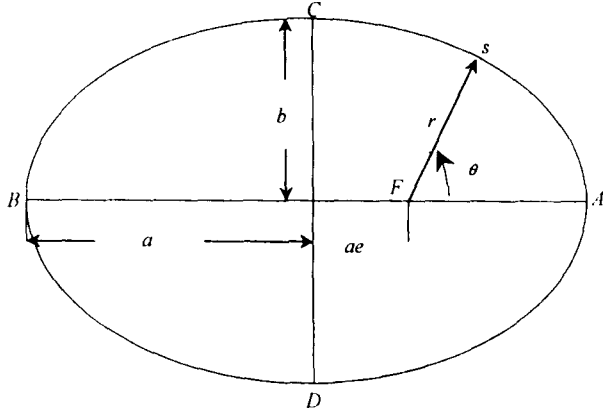


图 2-4 椭圆参数关系图

(2-4) 式和 (2-5) 式即为质点做椭圆运动时的四个特征点，亦即质点运行一周，要分别经过  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$  四个特征点，在这四个特征点，质点在径向的运动速度、加速度先后作等于零的变化。

### 第三节 地球受力分析

根据牛顿第二定律，物体所受之力等于物体质量与其具有的加速度的乘积。所以，地球在银河系中运动所受银核影响的作用力  $F$  为：

$$F = m \frac{pe\omega^2(\cos\theta - e\cos^2\theta + 2e)}{(1 + e\cos\theta)^3} \quad (2-6)$$

由 (2-6) 式，只要将地球质量  $m$  和式中其他参数之值代入，即得出地球在银河系中运动时，所受之力  $F$  与地球所处轨道极角  $\theta$  的函数关系。

据资料：太阳系离银核的平均距离约为 10kpc，约等于  $3\,085\,680\,000 \times 10^8 \text{ km}$ ，取地球绕银核轨道参数  $a = 3\,085\,680\,000 \times 10^8 \text{ km}$ ，轨道周长约为  $2\pi a$ 。

地球质量  $m = 5.976 \times 10^{24} \text{ kg}$ 。

椭圆轨道参数  $P = a(1 - e)^2$ 。

在椭圆运动中，质点的角速度  $\omega$  是个变量，这一点我们将在后面讨论，为了研究作用力的基本特性，这里先设定一个初值，采用质点完成椭圆运动一周的平均角速度。

$$\omega = \frac{2\pi}{2.5 \times 365 \times 24 \times 3600 \times 10^8} = 7.965 \times 10^{-16} / \text{s}。$$

式中使用的质点绕银核一周的时间为  $2.5 \times 10^8 \text{ a}$ 。

将  $P$ 、 $\omega$  及  $a$ 、 $e$ 、 $\pi$ 、 $m$  值代入 (2-6) 式化简得：

$$F = 1.156 \times 10^{19} \frac{100\cos\theta - 11\cos^2\theta + 22}{(100 + 11\cos\theta)^3} \text{ (N)}$$

由上式列表，考察  $\theta$  在  $[0^\circ, 360^\circ]$  变化时，地球所受之力  $F$  的变化情况（见表 2-2）：

表 2-2  $F$  与  $\theta$  的变化关系

$\theta / (^\circ)$	0	30	60	90	102.41	120	150	180	210	240	257.59	270	300	330	360
$\cos\theta$	1	0.866	0.5	0	-0.215	-0.5	-0.866	-1	-0.866	-0.5	-0.215	0	0.5	0.866	1
$A$	0.812	0.764	0.590	0.22	0	-0.364	-0.983	-1.262	-0.983	-0.364	0	0.22	0.590	0.764	0.812
$F/\text{N}$	0.938	0.883	0.682	0.254	0	-0.421	-1.136	-1.459	-1.136	-0.421	0	0.254	0.682	0.883	0.938

注：F 栏内所有值均  $\times 10^{15}$ 。

$$A = \frac{\cos\theta - e\cos^2\theta + 2e}{(1 + e\cos\theta)^2}$$

由表 2-2 作出一周内  $F$  与  $\theta$  的变化关系曲线（图 2-5）。

由图 2-5 可以明确以下几点。

(1) 一周之内，作用力要发生两次明显变化，一次为正，方向与极径一致；一次为负，方向与极径相反。也就是说，作用力作用于地球表现为两种方式，一种为正作用力，一种为负作用力。

(2) 负方向作用力作用的角度范围较小 ( $102^{\circ}25' \sim 257^{\circ}35'$ )，但作用力绝对极大值却大；正方向作用力作用的角度范围较大 ( $-102^{\circ}25' \sim 102^{\circ}25'$ )，但作用力绝对极大值却小。

(3) 由于极径方向为由银核指向太阳系的方向，所以，正作用力是沿法线方向指向地球而作用于地球，负作用力是沿地球法线方向指向银核而作用于地球。

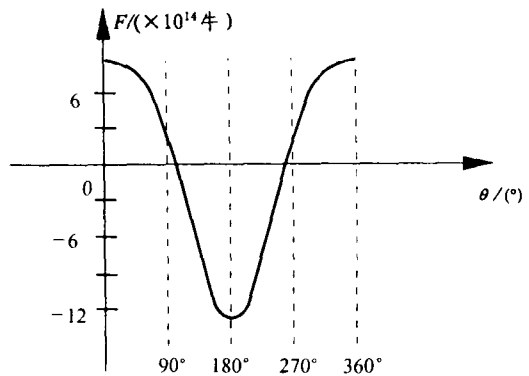


图 2-5 地球受力分析图

## 第四节 地球均匀承受膨胀力与压缩力

由于地球的自转、公转和太阳系的绕银核旋转，地球球面某一点在银河系中的运行轨迹是一条复螺旋的椭圆（如图 2-6）。

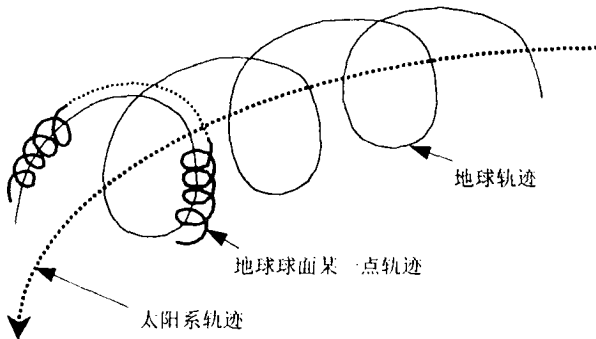


图 2-6 地球、太阳绕银核运行轨迹示意图

由于地球的以 24h 的周期自转，相对于地球绕银核  $2.5 \times 10^8$  a 来讲，银核对地球的作用力可以近似为均匀分布于地球球面各点。因而，地球所受银核施与作用力的方式可以近似如图 2-7 所示。

这样，正作用力使地球被压缩，负作用力则使地球膨胀。

也就是说，地球在随太阳系做绕银核运行一周的过程中，地球均匀承

受着压缩力和膨胀力的交替变化，地球要发生一次收缩变化和一次膨胀变化。

## 第五节 地球膨胀及脉动总趋势

由图 2-4、图 2-5 和图 2-7 可知，地球的收缩过程发生在椭圆轨道的近银核一端，具体在轨道极角范围的  $-102^{\circ}25' \sim 102^{\circ}25'$ ；而地球的膨胀过程发生在椭圆轨道的远银核一端，具体在轨道极角范围的  $102^{\circ}25' \sim 257^{\circ}35'$ 。

这样，不难得出：地球的压缩力作用时间长，但作用力的最大值却较小，而地球的膨胀力作用时间较短，但作用力的绝对最大值却较大。两者之间作用时间差可达 2.10Ma，而最大作用力绝对值之差可达  $4.79 \times 10^{13}$  N。

显然，构成地球的材料是一定的（忽略局部地区因温度改变导致地球化学成分改变而