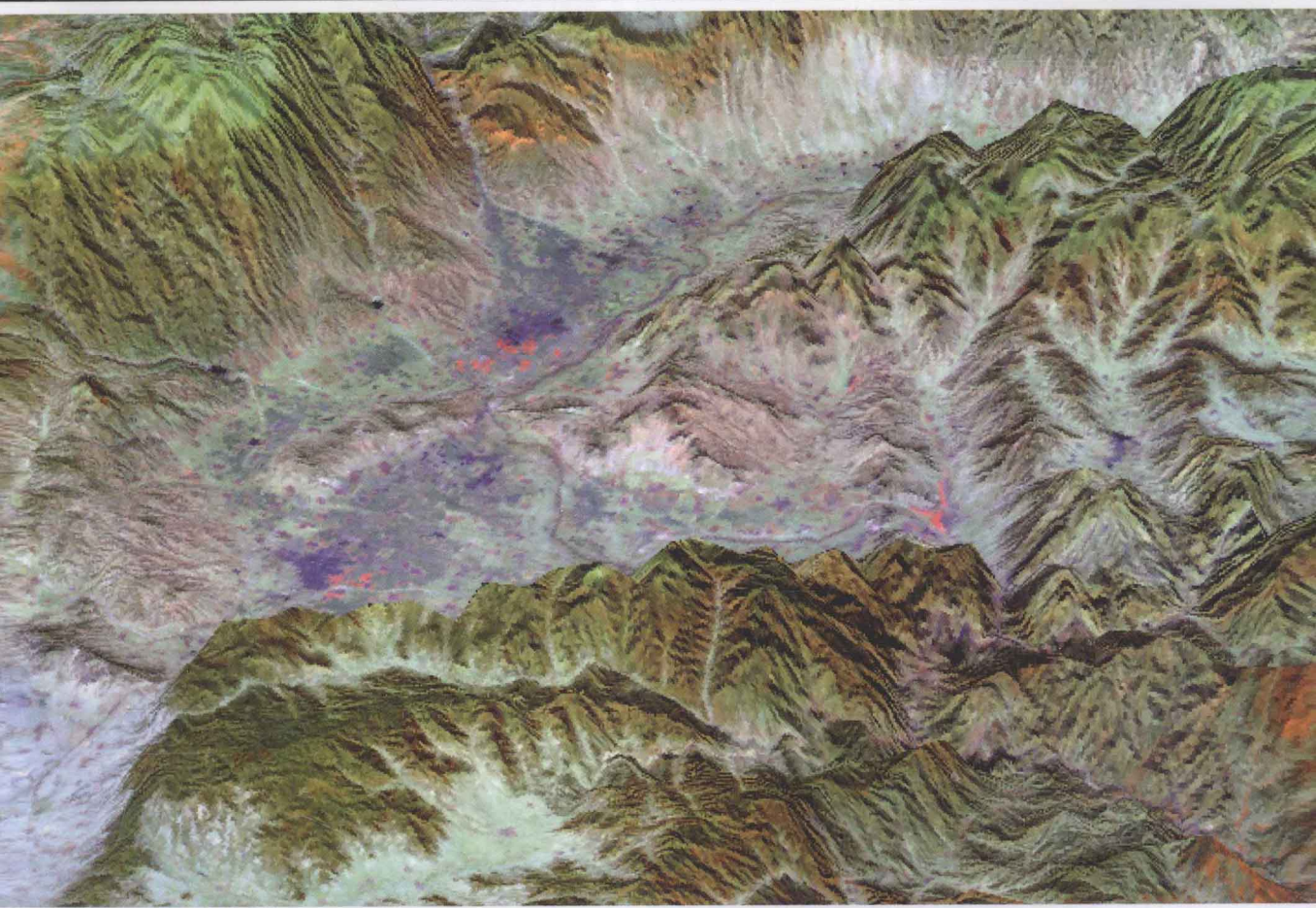


21

地壳构造与地壳应力文集

中国地震局地壳应力研究所 编



地震出版社

地壳构造与地壳应力文集

(21)

中国地震局地壳应力研究所 编

地震出版社

2009

图书在版编目 (CIP) 数据

地壳构造与地壳应力文集 (21) / 中国地震局地壳应力研究所编.

—北京: 地震出版社, 2009.6

ISBN 978-7-5028-3496-8

I. 地… II. 中… III. ①地壳构造-文集②构造地应力-文集 IV. P313.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 021941 号

地震版 XT200800187

内 容 提 要

本书为中国地震局地壳应力研究所连续性学术论文集的第 21 集。全书包括地学基本理论研究、地壳应力-应变、形变观测技术与方法研究、水库诱发地震、遥感地质、滑坡、地面沉降等地质灾害监测方面的内容。

本书可供地球动力学研究、地应力测量理论及应用、地震监测预报、工程地质、石油地质等领域的人员及有关大专院校的师生阅读。

地壳构造与地壳应力文集 (21)

中国地震局地壳应力研究所 编

责任编辑: 薛广盈

特邀编辑: 张宝红

责任校对: 孙铁磊

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

发行部: 68423031 68467993

门市部: 68467991

总编室: 68462709 68423029

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

邮编: 100081

传真: 88421706

传真: 68467991

传真: 68467972

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

版(印)次: 2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 211 千字

印张: 8.25

印数: 001 ~ 500

书号: ISBN 978-7-5028-3496-8/P (4117)

定价: 20.00 元

版权所有, 翻印必究

(图书出版印装问题, 本社负责调换)

目 录

地球公转自转与地壳动力学·····	安 欧 (1)
龙门山构造带的演化历史及构造样式综述·····	黄学猛 谢富仁 (16)
断层位移测量方法在地震预测和预报工作中的作用	
——以大灰厂断层位移测点为例 ·····	高忠宁 焦青 (30)
压磁应力计测量地应力相对变化结果讨论·····	黄相宁 王连捷 葛丽明 (40)
钻孔质量综合检测系统·····	陈征 欧阳祖熙 张均 李涛 吴立恒 周昊 (58)
用优势应力分量逼近方法反演分析某水电站地下厂房区地应力状态	
·····	米琦 杨树新 周俊 (63)
水库诱发地震讨论及其动力学机制分析·····	王秋月 朱守彪 (73)
北京市地面沉降自动化监测系统软件设计	
·····	范良龙 李宏 刘爱春 罗勇 周毅 贾三满 (85)
采用多项式拟合修正法提高 CCD 垂线仪的测量精度	
·····	董建业 张世中 刘凤秋 熊玉珍 (93)
基于 OpenGL 的海底 DEM 构建 ·····	焦孟梅 张景发 孙中昶 颜蕊 (99)
FLAC ^{3D} 程序及其在滑坡稳定性评价中的应用 ·····	魏学勇 欧阳祖熙 周昊 (106)
枇杷坪古滑坡活动分区及坡面位移特征探讨 ·····	韩文心 (114)
MapInfo 集成开发在三峡库区滑坡地质灾害信息系统中的应用	
·····	魏学勇 欧阳祖熙 周昊 (122)

Contents

Earth's Revolution, Rotation and Crustal Dynamics	An Ou (15)
Review of the Evolutionary History and Tectonic Style of the Longmenshan Tectonic Belt	Huang Xuemeng Xie Furen (28)
The Role of Fault Displacement Measurements in Earthquake Prediction and Forecasting – A Case Study of the Dahuichang Fault Displacement Observation Site	Gao Zhongning Jiao Qing (39)
A Discussion on the Relative Variation of Crustal Stress Measured by Piezomagnetic Stress Gauge	Huang Xiangning Wang Lianjie Ge Liming (57)
A Comprehensive Inspection System of Borehole Quality	Chen Zheng Ouyang Zuxi Zhang Jun Li Tao Wu Liheng Zhou Hao (62)
Inversion for Underground Stress State at a Hydropower Station by Preferential Stress Comp- onent regression method	Mi Qi Yang Shuxin Zhou Jun (71)
A Discussion on Reservoir Induced Earthquakes and Their Dynamic Mechanism	Wang Qiuyue Zhu Shoubiao (84)
Design of Software Used in Land Subsidence Monitoring System in Beijing	Fan Lianglong Li Hong Liu Aichun Luo Yong Zhou Yi Jia Sanman (92)
A Method to Increase Precision of CZ – CCD Plumb Coordinometer with Residual Error Simul- ation by Polynomial	Dong Jianye Zhang Shizhong Liu Fengqiu Xiong Yuzhen (98)
DEM Construction of the Seabed Based on OpenGL	Jiao Mengmei Zhang Jingfa Sun Zhongchang Yan Rui (104)
The FLAC ^{3D} Program and Its Application in the Stability Analysis of Landslide	Wei Xueyong Ouyang Zuxi Zhou Hao (113)
A Discussion on the Activity Regionalization and Surface Displacement Characteristics of the Pipaping Paleo – landslide	Han Wenxin (121)
The Application of MapInfo Integrated Development in the Landslide Geographic Information System in the Three Gorge Reservoir Area.....	Wei Xueyong Ouyang Zuxi Zhou Hao (128)

地球公转自转与地壳动力学

安 欧

(中国地震局地壳应力研究所 北京 100085)

摘 要 经典力学是有相对性的,但在地球公转自转力学和地壳构造动力学的研究中有一定可用性。地球的公转和自转是地壳构造应力的天体力源,在此力学体系中的岩体力学基本方程还须做重要改进或重建。

一、经典力学的相对性

1. 经典力学运动参考系

(1) 牛顿定律所指的物体严格地说是质点,其体积比运动空间小得多,不计形状和连通,不考虑平移和转动,是对实物的质量作集中处理的近似简化。因而天体也可简化为质点。

(2) 质点存在的形态是时间和空间,描述其存在时间和空间的坐标系是与不变形参考系连在一起的数学抽象,用之描述质点相对于它的时空状态。

(3) 质点的静止和运动是指相对于所选定坐标系而言。其位置相对于坐标系在改变,为质点相对此坐标系在运动;其位置相对于坐标系不变,为质点相对此坐标系在静止。对不同的坐标系,同一质点的静动状态可以不同,因为坐标系也在作各种运动。

2. 牛顿运动定律是惯性系定律

牛顿运动定律:① 物体的自由状态是静止或等速直线运动,以保持其惯性;② 物体受力则得与力同向正比于力的加速度,而改变原有运动状态,比例系数是物体的惯性质量;③ 物体主动作用于他物体,他物体给其一等值反向的反作用——惯性力,以倾向保持原有状态的惯性。

(1) 牛顿第一运动定律所指的运动是“相对绝对空间的绝对运动”,此绝对空间被设定为“与外界无关,永远同一,固定不动”,即不受外界任何影响,永远是同一个而不变,保持绝对静止。这是牛顿第一运动定律成立的系统,为惯性系。此定律也因此而称惯性定律。第二运动定律在惯性系中也成立,因为第一运动定律是第二运动定律在受力为零因而加速度也为零时的特殊情况。第三运动定律主动作用与反作用中所指的反作用,是维持原运动状态的惯性作用。因而牛顿运动定律只对惯性系才正确;而且质点运动速度须比光速小得多;质点所代表的须是宏观物体。即不是对所有参考系都成立,对非惯性系、质点运动速度接近光速、微观物体的运动,牛顿运动定律则不正确。此定律的设定条件,限定了其应用范围,而不是在任何情况到处都正确。

(2) 牛顿第一运动定律设定了静止与等速直线运动有相同性质,质点对作等速直线运动坐标系的运动与对静止坐标系的运动一样,因而对惯性系作等速直线运动的系统也是惯性系。同一质点对不同惯性系,仅有速度差,加速度相同。质点在静止坐标系中的加速

度, 在各惯性系中同样发生, 因而作等速直线运动惯性系的运动亦为惯性运动。

(3) 对惯性系作加速运动的系统为非惯性系, 牛顿运动定律在其中不成立。视地球近似为惯性系, 则在地球坐标系中牛顿运动定律近似适用, 与地球连在一起随地球作转动的坐标系为非惯性系。

(4) 牛顿运动定律所设定的惯性系至今没有找到。为在小范围内应用此定律, 取相对较大的范围为绝对空间, 作近似惯性系。不待说, 在这种近似惯性系中应用牛顿运动定律所得出的结果, 只能是近似的, 其近似程度视所取“绝对空间”的合理性而定。

3. 太阳系是近似惯性系

(1) 太阳质量只是行星中最大的木星的 1047 倍, 是各行星总质量的 740 倍。

(2) 地球公转轨道半径为 $149.7 \times 10^6 \text{ km}$, 只是太阳直径 $1.391 \times 10^6 \text{ km}$ 的 108 倍。

(3) 太阳系的质心以约 18 km/s 的速度向武仙座中的一点作等速直线运动。若视武仙座为惯性系, 由于武仙座在宇宙中也非绝对空间, 也在变化着和运动着, 因而太阳系也只能是相对的近似惯性系。这样的惯性系在设定上就有了相对的近似性, 而且这时行星绕日运动轨道便不是平面椭圆了, 而是以太阳系质心向武仙座中一点移动的轨道为轴线的椭圆螺旋曲线。

4. 开普勒定律是近似定律

开普勒定律: ① 行星呈质点沿以太阳为焦点的平面椭圆轨道运动; ② 太阳到行星向径扫过的面积速度相等; ③ 行星绕日运动周期平方与距日平均距离立方成正比。

(1) 行星运动是以太阳系为坐标系, 太阳系本身是近似惯性系。

(2) 万有引力是行星绕日运动的动力, 是通过太阳与行星质心的有心力。由于太阳质量比行星质量大得多, 使太阳与行星间引力比各行星间引力大得多, 因而视行星绕日运动近似为在太阳引力场中的运动, 开普勒第一定律认定行星沿以太阳为焦点的平面椭圆轨道运动, 其他几乎与其共面向公转自转各行星对其引力算作摄动 (М. Н. Вентцель, 1962)。

(3) 自然界物体的运动都有阻力和摩擦力而耗散能量, 因而引力场只是近似保守场。当运动阻力和摩擦力足够大时, 则为耗散场。行星是在太阳引力场中运动的, 这种动力大背景也并非严格保守场。

(4) 开普勒第三定律中的“距日平均距离”, 在计算中取的是行星椭圆轨道半径 (周培源, 1952)。

经典力学与相对论的差别主要是在物体运动速度极大时才显现出来。经典力学不能解释的现象有很多, 但在太阳系和地球上以及对巨型地块的应用条件下, 由于运动速度比光速小很多, 在不与经典力学设定的条件相距太远时结果还是有一定可用性的 (周培源, 1952)。在处理具体问题时, 随设定条件与实际情况差别的不同, 结果的近似程度也随之而变, 在这些设定条件中有的还可人为选择以提高结果的近似性。

二、地球公转力学状态

质量大小可成比例的二质点, 都在以其共同质心为中心的万有引力场中, 各自沿以其共同质心为焦点的平面椭圆轨道作有心力运动。行星绕日运动应属此类运动。由于太阳质

量为地球质量的 3.3×10^5 倍，近日点向径为 $147 \times 10^6 \text{ km}$ ，远日点向径为 $152 \times 10^6 \text{ km}$ ，故描述地球绕日运动，可近似取日心坐标系。在太阳系内，只有太阳及各行星相互间作用的内力，系外天体对太阳系的外力作用很小，可略而不计(周培源，1952)。于是由开普勒第一、第二定律知：地球公转是在太阳引力场中，作为一个质点沿以太阳为焦点的平面椭圆轨道运动；运动的动力只有日地万有引力和地球公转惯性力，以维持沿平面椭圆轨道的运动，这种力学状态是在地球作为天体于其形成时就造成了的，之后一直延续了下来。

按开普勒第二定律，地球呈质点绕日作平面椭圆轨道运动中，其向径单位时间扫过的面积相等，因而是变速平面曲线运动(图 1a)。质点沿平面曲线作变速运动的速度 v 是沿曲线切线方向，大小和方向随处改变。质点在 P 点的速度

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

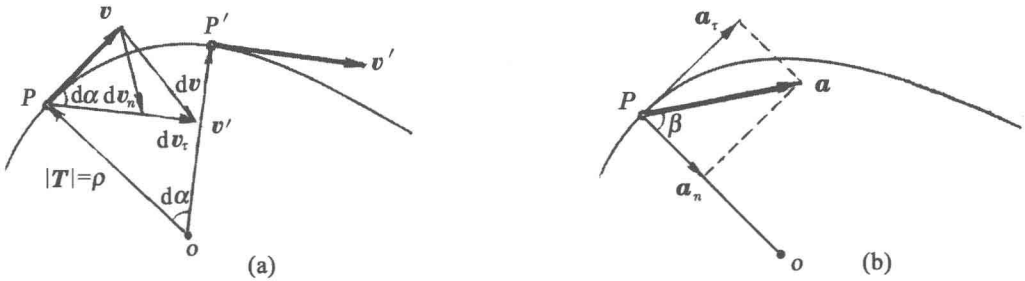


图 1 质点沿平面曲线运动的速度向量分解(a)和加速度向量分解(b)

加速度

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv_n + dv_\tau}{dt} = \frac{dv_n}{dt} + \frac{dv_\tau}{dt} = a_n + a_\tau$$

式中， dv_n 表示质点速度在法向的变化； a_n 为法向加速度，方向指向曲线 P 点的曲率中心，又称向心加速度； ρ 为 P 点曲率半径，指向曲率中心 O ； dv_τ 表示质点速度在切向的变化； a_τ 为切向加速度，方向在 P 点切向指向质点运动方向。

当曲线 P, P' 点无限接近时，由于 $d\alpha$ 微小，视 $dv_n = v d\alpha$ ， $dr = \rho d\alpha$ ，则

$$a_n = \frac{dv_n}{dt} = v \frac{d\alpha}{dt} = v \frac{d\alpha}{dr} \frac{dr}{dt} = v \frac{1}{\rho} v = \frac{v^2}{\rho}$$

$$a_\tau = \frac{dv_\tau}{dt}$$

因 a_n 与 a_τ 正交(图 1b)，质点总加速度

$$a = \frac{dv}{dt} = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$$

其方向与曲率半径成角 β ，

$$\tan \beta = \frac{a_\tau}{a_n}$$

在匀速曲线运动段, $a_r = 0$, 速度只改变方向, 则

$$a = a_n = \frac{v^2}{\rho} \quad (1)$$

按牛顿第二运动定律, a 的方向即质点质量力 ma 的方向, 则有关系

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F}$$

两点内乘

$$\cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} dt = \cdot d\mathbf{r}$$

得

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} dt = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$$

即

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} m \left(\frac{d\mathbf{r}}{dt} \right)^2 \right] dt = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$$

则有

$$d\left(\frac{1}{2} m v^2\right) = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} \quad (2)$$

式(2)说明: 质量 m 质点动能的微分等于作用力的微分功。即质点动能的增量, 等于外力 $\mathbf{F}$ 使其位置改变 $d\mathbf{r}$ 所做的功 $\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$; 据牛顿第三运动定律, 质点同时要给施力体以 $-\mathbf{F}$, 并做功 $-\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$, 则式(2)又说明, 质点动能的减量, 等于质点向外施力 $-\mathbf{F}$ 使受力体位置改变 $d\mathbf{r}$ 所做的功 $-\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$ 。即施力体做功与质点做功符号相反, 当施力体做功为正, 则质点做功为负; 当施力体做功为负, 则质点做功为正。功本身的正负则取决于 $\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$ 的符号, $\mathbf{F}$ 与 $d\mathbf{r}$ 同向或成锐角时功为正。两者反向或成钝角时功为负。

对质量为 M 、质心为 C 的质点组(组合体、变形体、刚体), 式(2)表示为

$$d\left(\frac{1}{2} M v_c^2\right) = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} \quad (2')$$

式中, v_c 为质点组质心速度; $\mathbf{r}_c$ 为质点组质心向径。质点组从位置 1 运动到位置 2 的动能分别为 E_1, E_2 , 外力功为 A , 则式(2')有积分形式

$$E_2 - E_1 = A \quad (3)$$

式(3)说明: 质点组动能改变量等于外力功。此处只论及质点组的平移, 其转动留待地球自转部分讨论。于是其动能为移动动能, 则在点 1, 2 的动能改变量

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{1}{2} M (v_{c2}^2 - v_{c1}^2)$$

功为移动功

$$A = \int_1^2 \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}_c = \int_1^2 F dr_c \cos(F, dr_c)$$

地球质量非均匀分布, 被力学参量突变界面分成地核、地幔、地壳三部分, 其质量依次为 $M_{\text{核}} = 188 \times 10^{22} \text{ kg}$, $M_{\text{幔}} = 405 \times 10^{22} \text{ kg}$, $M_{\text{壳}} = 5 \times 10^{22} \text{ kg}$ 。三者在地球绕日公转中,

可有两种基本状态：

1. 界面牢固连结

地核、地幔、地壳在地球绕日运动中牢固连结为一个整体。由于三者的质心都是球心，质心的几何位置重合，而组成一个组合体。按质心定理，质心的运动可视为一个质点的运动，因而只有移动；外力作用于质点组的质心，并唯一地影响质心的运动；三者在运动过程中形体并不分离，三个质心在绕日运动中相互之间保持重合的固定关系而成为一个点；三者都以共同质心的速度 v_c 运动；由式(3)知它们共同做功。此时，地球是作为一个质点在绕日运动。但组成地球的地核、地幔、地壳各有自己的动能 $E_{核} = \frac{1}{2}M_{核} v_c^2$, $E_{幔} = \frac{1}{2}M_{幔} v_c^2$, $E_{壳} = \frac{1}{2}M_{壳} v_c^2$ 。地球质心在近日点和远日点的速度 $v_{c近} = 30.27 \text{ km/s}$, $v_{c远} = 29.72 \text{ km/s}$, 则得地核、地幔、地壳在近日点和远日点的移动动能 E 及其在此二点值之差 ΔE , 列于表 1。其中

$$\Delta E_{核} = \frac{1}{2}M_{核}(v_{c近}^2 - v_{c远}^2)$$
$$\Delta E_{幔} = \frac{1}{2}M_{幔}(v_{c近}^2 - v_{c远}^2)$$
$$\Delta E_{壳} = \frac{1}{2}M_{壳}(v_{c近}^2 - v_{c远}^2)$$

表 1 地核、地幔、地壳在近日点和远日点的移动动能和质量力及其在此二点的差值

主 体	位 置	$E/(10^{28}\text{J})$	$\Delta E/(10^{28}\text{J})$	$Ma_c/(10^{22}\text{N})$	$\Delta(Ma_c)/(10^{19}\text{N})$
地 核	近日点	86130	3102	1.194	43
	远日点	83028		1.151	
地 幔	近日点	185547	6683	2.572	93
	远日点	178864		2.479	
地 壳	近日点	2291	83	0.033	2
	远日点	2208		0.031	

由于在近日点和远日点地球质心处于匀速状态, $a_{cr} = 0$, 故 $a_c = a_{cn} = \frac{v_c^2}{\rho}$, 则由式(1)得地核、地幔、地壳的质量力

$$M_j a_c = M_j \frac{v_c^2}{\rho} \Big|_{j=\text{核、幔、壳}} \tag{4}$$

式中，曲率半径 ρ 取地球在近日点的向径 $147.1 \times 10^6 \text{ km}$ 。求得地核、地幔、地壳在近日点和远日点的 Ma_c 及其差 $\Delta(Ma_c)$ 值列于表 1。从表 1 可知：地核、地幔、地壳的移动动能和质量力，都相差巨大；其中以地幔的移动动能和质量力为最大，其值从近日点到远日点的改变也最大，这是地球在公转中活动的能动性最强的部分。

2. 界面相互滑动

地核、地幔、地壳在地球绕日运动中三者沿其间低强度层或滑动层相互滑动。由于三者动能和质量力的差异，在共同绕日运动中相互间沿界面发生剪切变形或剪切滑动。这种

滑动一旦发生, 三者的质心将出现分离而调整地球的质量分布, 三者质心的运动速度也因之而出现差异。此时它们从轨道上的点 1 到点 2 动能的改变量变为

$$\frac{1}{2}M_j(v_{jc2}^2 - v_{jc1}^2) = \int_1^2 \mathbf{F}_j \cdot d\mathbf{r}_{jc} \Big|_{j=\text{核、幔、壳}} \quad (4')$$

此时地核、地幔、地壳组成了一个地球组合体在绕日运动, 这个组合体可相互滑动, 所受的力还是太阳引力和地球公转惯性力。式(4')说明: 当外力对此组合体做功, 则三者动能增加; 当此三者动能降低, 则各自做功; 动能改变量大者, 做功量也大, 造成较大的位移。由于地核、地幔、地壳的质量和质心速度 v_c 出现差异, 由式(4)知, 也造成它们向心和切向加速度因之总加速度 a 的不同, 使质量力 Ma 出现差异。较大的位移和较大的质量力之差, 可造成它们相互间的左右错位前后压张作用。

上述两种基本状态区别的关键, 在于质量有巨大差别的地核、地幔、地壳在绕日运动中, 是连结为一个整体, 还是沿相互间界面滑动而在绕日的共同运动中出现相互间的歧动, 使得高动能体和高质量力者的高能动性或超前运动, 对其上下层沿低强度界面发生剪切错动, 造成地球整体的变形和高能动部分的偏心。可见, 此种现象发生的条件是: ①地球内存在低强度层; ②被低强度层分开的部分有质量差异。据此, 在地球公转中地壳内被裂缝分开的高动能、高质量力地块的超前运动, 也会对左右两侧的低质量地块发生水平剪切错动, 对前面的低质量地块作水平挤压, 与后面的地块之间发生水平拉张作用。地幔的偏心还会引起地壳的升降运动。这种作用都会造成地壳中在地球形成时被吸引到一起的各小天体之间的原始缝隙的再活动, 并在后来沉积覆盖层中继续向上发展, 形成地壳乃至上地幔中继承性大断裂带的不断活动。

三、地球自转力学状态

质点组绕过质心 C 的自转轴 N 的转动动能

$$W = \sum \frac{1}{2}M_j v_j^2 = \sum \frac{1}{2}M_j r_j^2 \omega^2 = \frac{\omega^2}{2} \sum M_j r_j^2 = \frac{\omega^2}{2} M r^2 = \frac{1}{2} I \omega^2 \Big|_{j=n} \quad (5)$$

式中, M 是质点组质量; ω 是质点组角速度; r 是质点组对 N 轴的惯性半径, 表示质点组质量集中点对 N 轴惯性矩恰等于质点组对 N 轴惯性矩时, 质量集中点与 N 轴的距离; I 是质点组的轴惯性矩, 其值越大储能越多。

质点组从自转状态 1 转动到 2 时, 转动动能的改变量

$$W_2 - W_1 = \frac{1}{2} I (\omega_2^2 - \omega_1^2)$$

质点组转动微分功

$$dT = \mathbf{F}_\tau \cdot d\mathbf{r} = \mathbf{F}_\tau \cdot r d\theta = D \cdot d\theta$$

积分形式为

$$T = D \cdot \theta$$

D 为质点组对 N 轴的力矩和, θ 为转角。

据质点组转动动能定理

$$W_2 - W_1 = T$$

则有

$$\frac{1}{2}I(\omega_2^2 - \omega_1^2) = D \cdot \theta$$

此式表明：质点组转动动能增加，则力矩做功为正，方向与转动同向；质点组转动动能减小，则力矩做功为负，方向与转动反向。之所以取转动动能的改变为主动变化量，是因为地球作为天体从形成时起就已构成了在此种能量支配下的自转状态，并一直持续了下来。地球的此种自转状态，是由地球内部物质分布的改变，按“车阀机制”自行调节的（李四光，1972）。此机制自行主动调节 I 的大小，由之使地球时快时慢地自转着。

据质点组动量矩定理：质点组对一轴的动量矩对时间的导数等于外力对此轴的力矩和

$$\frac{d}{dt} \sum \mathbf{r}_j \times M_j \mathbf{v}_j = \mathbf{D}_j \Big|_{j=n}$$

积分形式为

$$I(\omega_{t_2} - \omega_{t_1}) = \int_{t_1}^{t_2} D dt \quad \text{或} \quad I \cdot \epsilon = D \quad (6)$$

式中，质点组动量矩 $I\omega$ 表示质点组绕轴转动的强弱程度； ϵ 为角加速度。式(6)说明：① 质点组转动时动量矩随时间改变；② 质点组动量矩的改变由外力矩引起；③ 和力矩转向与角加速度转向一致；④ 若角加速度为零，则和力矩亦为零，质点组作匀速自转；⑤ 在同样角加速度下，惯性矩 I 大的质点和力矩也大，惯性矩小的质点和力矩也小。可见，惯性矩表示质点组转动惯性的强弱，是质点组转动惯性的量度，为质点组转动的一个重要力学参量，故又称转动惯量。当外力通过质点组的质心时，因为对过质心转轴的力矩和为零，则式(6)右边为零，即质点组对过质心转轴的动量矩不变，得

$$I\omega = \text{恒量}$$

此式表明：当质量 M_j 的分布距转轴 N 远时， I 变大，则角速度 ω 变小；当质量 M_j 的分布距转轴 N 近时， I 变小，则 ω 变大。于是，当地球自转加快时，惯性离心力随之增大，使地球扁率变大，高密度岩浆从深部外溢， I 随之增大。但由上式知，此种后果又使地球自转速度减慢，于是惯性离心力减小，扁率又变小，且在重力分异作用下使重物质下沉， I 随之减小。但由上式知，这又使 ω 增大，如此自动控制自转速度，时快时慢地变化（李四光，1972）。

(1) 圆球壳的惯性矩。

质量为 M ，半径为 R 的圆球壳，对中心 C 的惯性矩

$$I_c = MR^2$$

对中心 C 的惯性半径

$$r_c = R$$

由于对称，则对以中心 C 为原点的各坐标轴的惯性矩

$$I_x = I_y = I_z = I$$

按惯性矩定理：质点组对一点的惯性矩等于过此点三个正交轴惯性矩和之半，于是有

$$I_c = \frac{1}{2}(I_x + I_y + I_z) = \frac{3}{2}I$$

则对过中心任一轴的惯性矩

$$I = \frac{2}{3}I_c = \frac{2}{3}MR^2$$

轴惯性半径

$$r = \sqrt{\frac{2}{3}}R$$

(2) 圆球体的惯性矩。

质量为 M ，半径为 R 的圆球体，密度

$$\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3M}{4\pi R^3}$$

其中，半径为 S ，厚 dS ，质量为 m 的同心圆球壳对中心 C 的惯性矩

$$dI_c = mS^2 = \rho \cdot 4\pi S^2 dS \cdot S^2 = 4\pi\rho S^4 dS$$

则圆球体对中心 C 的惯性矩

$$I_c = 4\pi\rho \int_0^R S^4 dS = \frac{4}{5}\pi\rho R^5 = \frac{4}{5}\pi \frac{3M}{4\pi R^3} R^5 = \frac{3}{5}MR^2$$

对中心 C 的惯性半径

$$r_c = \sqrt{\frac{3}{5}}R$$

圆球体对以中心 C 为原点的三个坐标轴的惯性矩，由于对称，得

$$I_x = I_y = I_z = I$$

又

$$I_c = \frac{1}{2}(I_x + I_y + I_z) = \frac{3}{2}I$$

则圆球体对任一径向轴的惯性矩

$$I = \frac{2}{3}I_c = \frac{2}{3} \cdot \frac{3}{5}MR^2 = \frac{2}{5}MR^2$$

轴惯性半径

$$r = \sqrt{\frac{2}{5}}R$$

地核质量为 188×10^{22} kg，半径为 3571 km；地幔质量为 405×10^{22} kg，内、外半径为 3571 km，6336 km，质量集中壳半径为 5310 km；地壳质量为 5×10^{22} kg，内、外半径为 6336 km，6371 km，质量集中壳半径为 6353 km。求得地核、地幔、地壳对地球自转轴的惯性矩为

$$I_{\text{核}} = \frac{2}{5} M_{\text{核}} \cdot R_{\text{核}}^2 = \frac{2}{5} \times 188 \times 10^{22} \times 3571^2 \text{ kg} \cdot \text{km}^2 = 9590 \times 10^{27} \text{ kg} \cdot \text{km}^2$$

$$I_{\text{幔}} = \frac{2}{3} M_{\text{幔}} \cdot R_{\text{幔质}}^2 = \frac{2}{3} \times 405 \times 10^{22} \times 5310^2 \text{ kg} \cdot \text{km}^2 = 7613 \times 10^{28} \text{ kg} \cdot \text{km}^2$$

$$I_{\text{壳}} = \frac{2}{3} M_{\text{壳}} \cdot R_{\text{壳质}}^2 = \frac{2}{3} \times 5 \times 10^{22} \times 6353^2 \text{ kg} \cdot \text{km}^2 = 1345 \times 10^{27} \text{ kg} \cdot \text{km}^2$$

$R_{\text{幔质}}$, $R_{\text{壳质}}$ 是地幔、地壳质量集中圆球壳的半径。此结果说明：① 地核、地幔、地壳惯性矩大小的顺序是 $I_{\text{幔}} > I_{\text{核}} > I_{\text{壳}}$ ，惯性矩最大者是地幔，地壳最小；② 地球的自转惯性主要由深部控制，深部自转加快则全随之加快，深部自转减慢则全随之减慢。

将地核、地幔、地壳的惯性矩代入式(5)，求得三者的自转动能

$$W_{\text{核}} = \frac{1}{2} I_{\text{核}} \cdot \omega^2 = 4795 \times 10^{27} \omega^2 \text{ kg} \cdot \text{km}^2$$

$$W_{\text{幔}} = \frac{1}{2} I_{\text{幔}} \cdot \omega^2 = 3807 \times 10^{28} \omega^2 \text{ kg} \cdot \text{km}^2$$

$$W_{\text{壳}} = \frac{1}{2} I_{\text{壳}} \cdot \omega^2 = 673 \times 10^{27} \omega^2 \text{ kg} \cdot \text{km}^2$$

则知其自转动能大小的顺序，也是 $W_{\text{幔}} > W_{\text{核}} > W_{\text{壳}}$ 。由式(6)知，其动量矩以及力矩和，也是地幔的大于地核，地核的大于地壳。它们各自的变化量也是如此。

综合之，地球自转中能动性最大的部分在地幔，对地壳来说是来自下部被低强度层与其分开的高密度高质量部分；地壳和地核对地幔的主动转动作用，由于滞后而有相对的反作用；这种高质量体之间的作用，无论表述为能量还是力，都是巨大的；这种产生于自转的作用，主要表现在水平东西方向，加速时自西向东，减速时自东向西。

地球绕自转轴以角速度 ω 匀速自转时，地壳中质量为 m 的块体上作用有两种质量力，一是方向指向地心的地心引力

$$Q = k \frac{Mm}{R^2}$$

式中， k 为引力常数； M 为地球质量； R 为块体与地心距离；此处的 m 是引力质量。 Q 力随 m 增加而增大，随深度增加因 R 减小也增大；二是方向垂直地球自转轴的惯性离心力(图2)

$$F = ma_n = mx\omega^2 = m\omega^2 R \cos\phi$$

式中， a_n 为离心加速度； x 为块体与地球自转轴距离； ϕ 为块体地理纬度；此处的 m 是惯性质量。 F 在径向的分力

$$n = F \cos\phi = m\omega^2 R \cos^2\phi$$

F 指向赤道的径向水平分力

$$\begin{aligned} t &= F \sin\phi = m\omega^2 x \sin\phi \\ &= m\omega^2 R \sin\phi \cos\phi \end{aligned} \quad (7)$$

Q 与 F 的向量和为块体重力 $G = mg$ ，随 Q 和

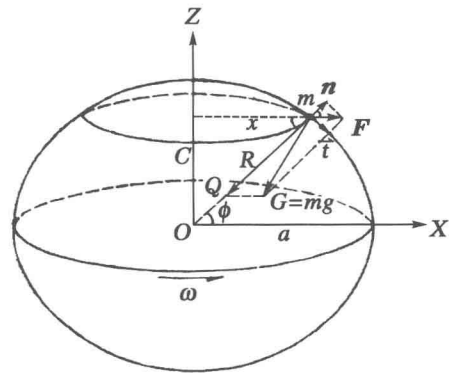


图2 地球自转中地心引力和惯性离心力的关系

F 的大小而变, g 为块体所在纬度的重力加速度。可见, 块体的 m 增大, 则 t 线性增大; R 增大, t 也线性增大。

地球变速自转中, 块体还有一指向地球自转方向的纬向切线加速度 a_r , 因之还有一纬向水平力

$$\tau = ma_r = mx\varepsilon = m\varepsilon R \cos\phi$$

作用于其上。 ε 为地球自转角加速度。可见, 块体的 m 增大, 则 τ 线性增大; x 增大则 τ 亦线性增大。

综上所述, 块体上的作用力, 有地心引力 Q 、自转径向惯性力 n 、纬向水平力 t 和径向水平力 τ 。径向有 Q 和 n 的作用, 两者反向, 故径向质量力的合力为 $(Q - n)$, 由于 n 随深度增加而减小, Q 随深度增加而增大, 则此合力随深度增加而增大; 水平方向有径向指向赤道的 t 和纬向以指向地球自转方向为正的 τ , 此二水平方向质量力的大小随 m 、 ω 、 ε 的增加而增大, 随深度增加而减小。

四、构造应力天体力源

1. 前述小结

(1) 太阳系是近似惯性系, 牛顿定律是惯性系定律, 开普勒定律是近似定律。牛顿的运动定律和引力定律是经典力学的基础。经典力学的相对性所设定的条件规定了其使用范围, 使用中必须符合理论建立时设定条件的限制, 不能任意推广和超出其可用范围。

(2) 地球绕日公转是变速运动, 受地球向径改变和向径面积速度相等及惯性力变化的影响。地球自转是变速运转, 转速用质量分布自行调节。

(3) 地球绕日公转遵从移动动能定理, 自转遵从转动动能定理和动量矩守恒定理。

(4) 运动动力, 对太阳系来说, 外系天体对其作用力可忽略不计; 对地球来说, 外力有太阳引力和地球形成时就已存在并继承下来的惯性力, 其他行星引力很小则作为摄动处理。日地距离不断改变, 使日地引力不断变化。地球自转加速度大小和方向不断改变, 使地壳中地块的惯性离心力不断变化, 向心力也随之而变。

(5) 地球在近日点与远日点向径差最大, 为 $(152.1 - 147.1) \times 10^6 \text{ km}$, 因而在此二点的日地引力差也最大。地球在近日点与远日点的速度差最大, 为 $(30.27 - 29.72) \text{ km/s}$, 因而在此二点的惯性力差也最大。

(6) 地球被密度分布、低强度层或滑动层分为地核、地幔、地壳三部分。三部分中的惯性、动能、惯性力最大者分布在壳下, 以地幔的为最大, 是地球内部物质运动能动性最大的部位。地壳中高密度高质量的地块, 如大洋地块, 平均密度为 3.79 g/cm^3 , 是地壳运动中的高能动性部位。

(7) 地球形状、地表地形、密度分布、断裂构造, 都是影响地壳中质量力分布的重要因素, 因而也都影响构造应力场。

(8) 水平质量力 t 随深度增加而减小, 其质量是惯性质量。铅直质量力 Q 随深度增加而增大, 其质量是引力质量。爱得瓦斯证明, 牛顿第二运动定律中的惯性质量与万有引力定律中的引力质量之比仅差 5×10^{-9} 。故可认为两者是一个量; 爱因斯坦的引力理论也证

明,二质量为同一物理量的不同表现,惯性质量即引力质量(周培源,1952)。由于习惯上已用 G 代替 Q ,于是地块水平与铅直二质量力 t 与 Q 之比

$$\frac{t}{Q} \doteq \frac{t}{G} = \frac{\omega^2 R}{g} \sin\phi \cos\phi = \frac{1}{289} \sin\phi \cos\phi \quad (8)$$

2. 质量力转为面积力

地块由于存在万有引力和惯性力,使地块与地块之间相互作用,在体内相应而生的面积力为应力。其中,造成岩体构造变形和断裂的剪应力,才是岩体构造运动的直接原因(安欧,1992)。它不是质量力,不是引力和惯性力。但天体运动中的引力和惯性力所造成的地块之间的质量力作用,是地块中应力场形成的天体力源,对地块中应力场的形成可起到边界载荷作用或影响边界条件。由于它不是岩体中的构造应力,因而须要把质量力先转变为面积力,才可能成为岩体构造运动的动力,造成岩体的构造变形和断裂。

把地块之间的质量力转变为体内的面积力时,要考虑地壳中已存在的断裂构造、密度分布、地表地形和地球形状。因为地球上从其形成以来就密布断裂,把地壳切成块体,浮动在底部低强度或滑动层之上;密度不均,相差较大,大陆平均为 2.7 g/cm^3 ,大洋平均为 3.7 g/cm^3 ;地表不平,陆上有几千米的高山,海洋深达 9 km ;地球整体也非圆球形,在椭球形基础上还有局部形状差异。因而,在此过程中,不能再把地球设定为连续、均质、平整的圆球。因为这种不合实际的简化假设,会使求得的构造应力由于把客体过分几何规整化而十分微小并与实测结果不符,也会在建立平衡方程时由于视地壳连续均质取用了微体素的体积力并作三阶小量处理掉,而脱离地壳实际的复杂情况。

(1) 构造断裂和岩体密度。

地球作为一个天体,从形成时起,相互吸引旋转俘获到一起的各小天体之间就有原始缝隙。后来高处风化剥蚀到低处沉积成平原。在这些后成平原形成过程中,下部缝隙仍在活动并向上裂开,使后来沉积层中的断裂走向、形态和组成逐渐随地球公转自转而规则化,形成了走向与纬线有一定关系、力学性质组成规则、整体成各种型式的构造体系。其中,以全球性的把地壳切断至低强度滑动层的平行纬向深大断裂带为巨,它们水平规模宏伟,横穿陆地大洋,深度切断地壳,甚至入上地幔,走向东西平行,间距大多相近,如同木星光环的形态一样横亘于地壳中,把地壳切成纬向条块,分布于上地幔之上(李四光,1972)。

全球纬向深大断裂带间距为 $1000 \sim 2000 \text{ km}$,取以此间距为南北向长、深 1 km ,南北端横截面为单位面积的水平岩体 V_h ,密度为 2.8 g/cm^3 ,质量 $m_h = (1 \sim 2)10^5 \times 2.8 \text{ kg}$ 。

地表 1 km 深,水平横截面为单位面积的铅直岩体 V_v ,密度由地表的 2.4 g/cm^3 到 1 km 深的 2.8 g/cm^3 平均取为 2.6 g/cm^3 ,则此铅直岩体的质量 $m_v = 10^2 \times 2.6 \text{ kg}$ 。

由式(6)知, V_h 对其低纬度端围岩造成的水平惯性力

$$t = m_h \omega^2 R \sin\phi \cos\phi$$

V_v 对其下部岩体造成的铅直重力

$$G = m_v g$$

则 1 km 深的 t 对其低纬度端围岩造成的水平惯性应力 σ_{t1} 与 1 km 深的 G 对其下部岩体造成的铅直重应力 σ_{G1} 之比,引入式(7)后,为

$$\frac{\sigma_{t1}}{\sigma_{G1}} = \frac{m_h}{m_v} \cdot \frac{\omega^2 R}{g} \sin\phi \cos\phi = \frac{(1 \sim 2)10^5 \times 2.8}{10^2 \times 2.6} \cdot \frac{3.39}{980.24} \sin\phi \cos\phi = (3.7 \sim 7.5) \sin\phi \cos\phi$$

5 km 深的 t 造成的 σ_{ts} 与 5 km 深的 G 造成的 σ_{GS} 之比, 由于 5 km 深的岩体 V_h 的密度取为 3.3 g/cm^3 , 5 km 深的岩体 V_v 的密度从上到下为 $2.8 \sim 3.3 \text{ g/cm}^3$ 平均取为 2.9 g/cm^3 , 则为

$$\frac{\sigma_{ts}}{\sigma_{GS}} = \frac{m_h}{m_v} \cdot \frac{\omega^2 R}{g} \sin\phi \cos\phi = \frac{(1 \sim 2)10^5 \times 3.3}{5 \times 10^2 \times 2.9} \cdot \frac{1}{289} \sin\phi \cos\phi = (0.8 \sim 1.6) \sin\phi \cos\phi$$

地壳全球 5 km 深实测的水平与铅直平均应力之比

$$\frac{\sigma_{hs}}{\sigma_{vs}} = \frac{120 \text{ MPa}}{95 \text{ MPa}} = 1.3$$

上述数据说明, 地壳浅层水平应力最大值大于同深铅直应力, 浅层水平应力由于岩体密度随深度增加因而也随深度增加而增大; 但由于铅直应力随深度增加较快, 至 5 km 深则铅直应力可大于水平应力最大值。这表示了构造和岩体密度对水平和铅直应力分布关系的影响。此外, 大陆地壳平均密度为 2.7 g/cm^3 , 大洋地壳平均密度为 3.7 g/cm^3 , 这对水平和铅直应力分布也有重要影响。

(2) 地表地形和地球形状。

地形的高差影响质量分布, 因而也影响惯性力和引力的分布。图 3 中, 在计算水平长度为 x 两端横截面 S 为单位面积的水平岩体 A 对相邻地块 B 的水平惯性力 t 时, 求岩体 A 的质量 m_h 中, 应加上高差 Δ 的影响, 而为

$$m_h = x \times 1 \times (1 + \Delta) \rho$$

ρ 为岩体密度。

计算深部铅直压力时, 习惯上是取深度 D 处下端横截面 S 为单位面积的铅直岩柱体对下部的铅直重力。据此, 则水平面 $(h - h)$ 上 a 处铅直岩柱体的质量

$$m_v = 1 \times 1 \times (D + \Delta) \bar{\rho}_a$$

$\bar{\rho}_a$ 为 a 处铅直岩柱体的平均密度。而在 b 处同一水平面 $(h - h)$ 上铅直岩柱体的质量则为

$$m_v = 1 \times 1 \times D \bar{\rho}_b$$

地表质量 m 岩体所受地心引力 Q , 习惯上已取为 G , 则

$$Q \approx G = mg$$

而法向离心力

$$n = m\omega^2 R \cos^2 \phi$$

则得向心力为

$$Q - n = Q - m\omega^2 R \cos^2 \phi = Q \left(1 - \frac{\omega^2 R}{g} \cos^2 \phi \right) = Q \left(1 - \frac{1}{289} \cos^2 \phi \right)$$

由于地球是椭球体, 福利斯证明上式因此而变为

$$Q - n = \left(1 - \frac{1}{191} \cos^2 \phi \right)$$

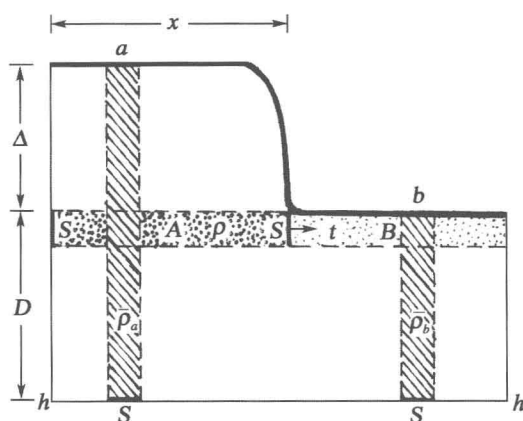


图3 地形高差对水平和铅直质量力的影响