



中国石油天然气总公司

院士文集

中国科学院院士

翁文波集

中国大百科全书出版社

图书在版编目(CIP)数据

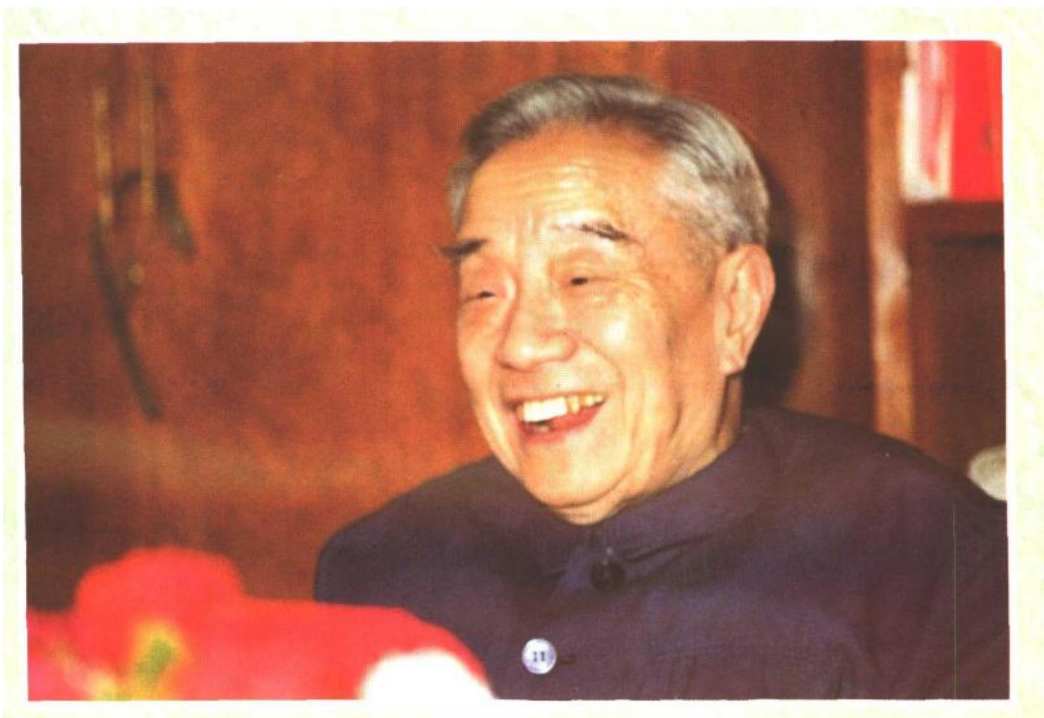
中国石油天然气总公司 院士文集:翁文波集/翁文波著.
北京:中国大百科全书出版社,1997.9
ISBN 7-5000-5863-2

I. 中… II. 翁… III. 石油工程-文集 IV. TE-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 18191 号

5

中国大百科全书出版社出版发行
(北京阜成门北大街 17 号 邮编 100037)
北京图文印刷厂印刷 新华书店总店北京发行所经销
开本 787×1092 1/16 印张 8.375 字数 150 千字
1997 年 9 月第 1 版 1997 年 9 月第 1 次印刷
定价:115.00 元



翁文波 1912年2月生于浙江宁波，1934年清华大学毕业。1939年获英国伦敦大学皇家学院博士学位。原任石油勘探开发科学研究院总工程师，是教授级高级工程师、博士生导师。当选为第五届、第六届、第七届全国政协委员；曾任国家天灾预测专业委员会主任。1980年当选为中国科学院学部委员（院士）；1994年11月病逝，终年82岁。

长期从事地球物理勘探和地震预测科学技术研究工作。发表了《中国按油气藏希望的区域划分》，与黄汲清、谢家荣共同编制了《中国含油气远景区划图》，把松辽盆地列为中国最有远景的油气聚集地区。参加了大庆石油会战，指导了大庆长垣地球物理勘探部署，为大庆油田的发现作出了重大贡献。1966年后，探索地震预测这一难度很大的科学领域。发表了《可公度性》、《预测论基础》、《关于地支纪历与预测》等专著，引起了国内外科学界的关注和赞誉。

多项成果获奖，其中获国家自然科学奖一等奖一次。

中国石油天然气总公司 院士文集

编辑委员会

顾 问 王 涛

主 任 周永康

副主任 马富才 吴耀文 史训知 李天相
金钟超

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁贵明	王显骢	石宝珩	刘宝和
朱秉刚	牟书令	沈平平	贡华章
陆基孟	张一伟	张友韬	张嗣伟
胡见义	徐世仁	高瑞祺	

序

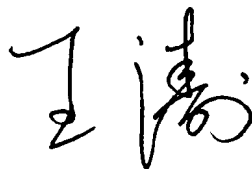
我衷心祝贺《中国石油天然气总公司 院士文集》出版发行。这套由中国石油天然气总公司系统的中国科学院、中国工程院 13 位院士撰写的文集，集中了我国石油科技理论精华，是一部反映我国石油科学技术发展的代表作。它的编辑出版，是中国石油天然气总公司重视科学技术的一个重要举措，在我国石油科技史中占有重要的地位。

新中国石油工业的发展史，是一部“两论”起家，努力创建具有中国特色的石油勘探开发理论与实践的科技发展史。众所周知，旧中国的石油工业极其弱小，解放初期全国石油产量仅 12 万吨，不及现今全国 8 小时的产量。50 年代中期，我国发现了克拉玛依油田，推动石油产量超过百万吨。60 年代，我国以大庆油田的发现和开发为标志，实现了石油自给。70 年代，渤海湾地区胜利、大港、辽河、华北、中原等油田的相继开发，推动我国原油产量在 1978 年达到 1 亿吨，跨入了世界石油大国的行列。这些年来，我国石油工业贯彻实施党中央、国务院确定的稳定东部，发展西部，油气并举，发展海上等战略方针，保持了东部地区产量的基本稳定，大庆油田在年产 5000 万吨以上连续稳产了 21 年。西部地区在新疆塔里木、吐-哈、准噶尔三大盆地取得了重大突破，开发建成了一批大型油田。在陕甘宁盆地、四川等地区新发现了一批大型气田。海洋石油形成了规模，继续保持了稳定发展。1996 年全国生产原油 1.57 亿吨，居世界第五位；生产天然气 201 亿立方米，居世界第 21 位。

这些成绩的取得，是我国广大石油职工在党的路线、方针、政策指引下，艰苦创业的结果，也包含了数十万石油科技工作者的创造性劳动。在我国石油工业艰苦创业、石油科学技术不断发展过程中，也造就了一大批理论造诣深、实践经验丰富、科研成果丰硕的石油专家、学者，两院院士就是其中的杰出代表。他们身上所体现出的热爱祖国、献身石油、勇于探索、百折不挠的精神是我们石油工业的精神财富，他们的理论与实践凝聚着建国几十年来石油科技的精华，代表了石油科技的总体水平。把两院院士们的理论著作和研究成果精选汇集出版，既是对前一历程的总结展示，又有利于后来者继承和发展。现在，13 位院士中，翁文波、童宪章、朱亚杰三位老先生业已作古，文集的出版也是对他们深深的怀念。

目前，我国石油勘探与开发工作更趋复杂和艰辛，石油工业的发展已更加依赖于石油科技的进步。在世界石油供需矛盾日趋尖锐、石油市场竞争日益激烈的

形势下，科技就是实力，谁掌握先进的科学技术，谁就是强者，谁就会赢得市场。我国石油科技工作者的历史责任重大，希望从事石油科技工作的同志们，认真地向院士们学习，努力掌握先进的科学技术，解决生产中的难题，把科技成果转化为现实的生产力，不断攀登新的高峰。祝愿我们的院士们在石油的二次创业中不断作出更多的新成果，祝愿我们石油系统涌现出更多的院士，出版更多的院士文集。

A handwritten signature in black ink, consisting of two characters: '王' (Wang) and '强' (Qiang), written in a cursive style.

一九九七年五月十五日

本书主要编辑、出版人员

总 编 辑	徐惟诚
社 长	单基夫
副总编辑	吴希曾
主任编辑	程力华

策 划	张友韬	孟 军
责任编辑	张友韬	
封面设计	高原	
责任印制	徐崇星	

目 录

序	(I)
地球形态的沧桑巨变	(1)
频率信息的保真 (1980)	(7 2)
可公度性 (1981)	(8 1)
论预测 (1982)	(8 5)
展望我国天然气工业 (1982)	(9 8)
信息代数 (1988)	(106)
认识和预测 (1990)	(111)
和青年们谈创新	(119)
编后	(123)

地球形态的沧桑巨变

地球的外部，有一层大气圈、一层水圈和一层岩圈。它们都有自己的形状和性质，并且也都有自己的运动方式。这三个圈的形状和运动组成地球的形态。地球的形态是在不断发展着的。

本文主要是讨论水圈与岩圈之间形状的差别和它在地质年代里变化的情况。

我们采用的研究方法有两个特点。第一，我们尽可能地把地球作为一个整体来研究，但不深入到每个地区局部的问题中去；第二，我们要把地球上发生过的复杂现象，分析为同一体系下的几个组成部分，对每一组成部分分别地进行研究。分析的方法是一种数学上常用的圆谐函数的分析，因为这种方法对于近似于圆球体的东西，用起来是很方便的。

一、地球的形态

地球的形态是由地球外部处于不同状态的大气圈、水圈和岩圈互相交错的综合表现。当然也应包括各圈的形状与状态。

地球外部所处的物理状态，是大家都清楚的。大气圈处于气体状态，水圈处于液体状态，而岩圈则处于固体状态。各圈的形状也是各不相同的，高空大气圈的形状，可能像是一粒悬挂的水珠，被前面的地球拖着跑。而大气圈的中下层，如对流层的上界，却是椭球形的，在两极高出海平面约 7~10 公里，而在赤道高出约 17 公里。水圈又是扁率接近于三百分之一的椭球体。至于岩圈，大体上是一个椭球，而有很不平滑的表面。一部分的岩圈高出海平面达 8882 米，成为我国西南的珠穆朗玛峰，而另一部分岩圈，凹下到海平面以下达 10830 米，成为菲律宾前面的海底深槽。岩圈与水圈的任何相对起伏，都对居住在地球上的人类有很大影响。

我们将地球外部今日所处的形态，分别地简述如下。

(一) 大气圈

地球上全部大气层的质量，估计为 5×10^{15} 吨。其中有一半集中在最低的 6 公里之内。

大气圈普通被分为三层。自地面到高 7~17 公里的一层叫对流层。对流层以

上到 80 公里左右叫同温层，再以上叫离子层。

对流层含有全部大气圈 79% 的物质，以及几乎全部的水蒸气。因之云雾雨雪的变化，都在对流层内发生。对流层里面的空气，在不断地运动着，风也在对流层内发生。同温层风的问题还没有研究清楚^①。

对流层的温度有很大的昼夜和季节性变化。并且平均每上升 100 米，温度降低 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$ 。在 10 公里高度上，气温只有 -50°C 上下。

同温层的特性，是含有臭氧 (O_3) 的成分。约在 40 公里高度臭氧含量最大。由于臭氧具有高度吸收紫外光的能力，被吸收的太阳辐射能使空气的温度上升。在 45 公里左右的高度，空气温度约为 $+15^{\circ}\text{C}$ ，到 80 公里，又下降到 -70°C ，造成一个温度极小带。大部流星在同温层内发光。

离子层的特性是包含着 E、F 导电性大的层，氧在离子层中，可以由分离独立的原子组成。在 200 公里高空，气体分子运动的速度，相当于 $600\sim 700^{\circ}\text{C}$ 的温度，但从苏联的两个人造卫星的情况看来，高空平均温度接近地面平均温度。

极光的呈现是离子层内发生的现象。

空气的成分中主要为氧与氮。这两种气体的发生被认为是与生物的活动有关。

关于高空的气压降低的情况，现在已掌握了一些资料^②，在海平面为 760 毫米的水银柱的大气压，在高 10 公里的空中已降到 210 毫米；到 50 公里高空，为 0.76 毫米；到 100 公里高空，为 0.0006 毫米；到 160 公里时，为 0.000002 毫米的水银柱。高空中的科学资料，由于火箭、人造卫星的发展，已日益为人所注意了。

在高空中，不但空气的化学成分有变，而且同位素的成分也有变化。如在 41.4 $\sim$ 58.5 公里高空，氮同位素 ($\text{N}^{28}/\text{N}^{29}$) 增加了约 4% (J. H. Mcquenn 1950)。

大气气压的变化也影响着岩圈的运动。浅震源地震的次数与季节和大气压变化是有关的。根据中亚细亚的一种资料，7 月份平均地震次数是 390 多次，但在一月份增加到 470 多次。大气压也有潮汐的变化^③。

(二) 水 圈

我们通常说“地球”的形状，实际上也就是水圈的形状。关于水圈的基本问题之一，就是它的形状。大家都知道地球的重力场与地球自转的离心力是决定水圈外形的最基本因素。平均海平面基本上也就是地球重力场与地球自转离心力动能的一个等势能面。从这一观点上就可看出，测地学与重力学是分不开的。

测量水圈面的外形，在了解它近于圆球体以后，一般地可以利用来自三方面

① В. В. Федынский, Метеоры, 74.

② J. L. Kulp, Advances in Geophysics, Vol. 2, 144, 1955.

③ S. Chapman 等 J. Atm. and Terr. phys 8 (1—2), 1—23, 1956.

的资料。第一是天文测地学的资料。我们观察星辰，确定地球上的经度与纬度，又可用测地学中的量度方法，确定两个不同经度或纬度中间的距离。在地球上很多地区，求出了每一度经度或纬度中间的距离，换算到海平面，就可作为推算水准面形状的一项资料。

第二方面的资料，是世界各地重力值，或简称为 g 。因为重力值是重力势能的垂直一次微分。当我们知道世界各地的 g 化到一个理想的面上时，就可得水圈形状与 g 中间的一种函数关系。假定水圈形状是一个旋转椭球体，那么这个椭球体的扁率，就可用克雷诺 (A. C. Clairaut) 公式或其他类似的公式，从各经度上 g 的变化推算出来。

第三方面可能采用的资料，是从月球（或人造卫星）的运动方面取得的。因为月球的运行，决定于地球的重力场，如地球的重力场不成圆球对称，这就会在月球的运动上多方面地反映出来。我们可用两种不同的方法来测定月球与地球的距离。一种方法，是在地球上距离较远的地点同时观察月球，那么可从平差角及观察点间的距离，求出月球的距离。普通用赤道半径对月球平均距离的夹角来表示，这一数量称为“视平差角”。另一种方法，是用重力值与月球绕地球的周期，求出地球引力与离心力的平衡距离，这也用同一方式表示出来，称为“动平差角”。从这二者的关系可得有关赤道半径与扁率的公式。

用旋转椭球来代表水准面的理论，在 19 世纪末已经在一定的基础上建立起来。克拉克 (A. R. Clark 1880) 求出的地球的扁率（也就是地球的赤道半径减二极半径之余数被除于赤道半径）为 $\alpha=1/293.5$ 。现代的数字，有布拉特 (Bullard 1948) 的 $\alpha=1/297.338\pm0.050$ （或然误差），捷弗利斯 (H. Jeffreys 1952) 的 $\alpha=1/297.299\pm0.071$ （标准误差）。苏联在大地测量和制图工作中，采用克拉索夫斯基的数字为 $\alpha=1/298.3$ 。

根据近来重力学的研究，地球的水准面并不是一个旋转体，也就是说，它在赤道面上各方向的半径也不是全等的，不过相差很小，不超过 300 米。这样的形状有时可用三轴椭球来代表。

地球的水准面，实际不会是光滑的椭球面，因为地球的重力场是受地壳面以下物质密度分布的影响，也受地壳起伏的影响。因之水准面的局部起伏是存在的，并且已可以用精密的测量工作测量出来，也可以部分地用重力测量推算出来。

关于水圈的第二个重要问题是水的运动。在大陆上，水受到重力、地球自转（贝尔定律：北半球的河流冲刷右岸）等作用。地下水的压力也受到大气压力变化的影响。

在海洋中一般地可按深度分为三个带。深度在 0~200 米之间的是扰动带，这一带内的水有昼夜及季节的变化，受到大气运动的影响。在 200~1300 米之间的是对流带。在对流带中的海水作区域性的对流，温度约为 1.3°C 左右。1300 米以

下是同温层，或平流带，温度接近于 0°C 。

水圈上部有潮汐涨落，在浅海中潮波增加。如在加拿大东岸的芬堤湾 (Fundy) 潮高可达 30 米，我国钱塘潮也可达 10 米^①。

根据泰勒 (G. Taylor 1919) 与捷弗利斯 (H. Jeffreys 1920, 1952) 的意见，浅海中的潮汐运动消耗了一定份量的能量 (1.1×10^{19} 尔格/秒)^②，会使地球的转速降低。捷弗利斯算出在 120000 年以前，每天的时间可能比现在长一秒钟。

海斯肯能 (W. Heiskanen 1922) 也得出海洋潮汐消耗能量的数字，其值比捷弗利斯的结果高三倍 (海斯根能数字为： 3.2×10^{19} 尔格/秒)。

巴里斯基 (Н. Н. Парииски 1955) 讨论了地球转速变化的三种因素。认为其中之一的长期变慢的因素 (вековое замедление) 可能是由潮汐阻力作用所引起，并认为海斯根能的数字是近似的。

水圈中潮汐作用会影响地球自转的速度。而地球自转的速度必将决定水圈所受到的离心力，所以我们可以理解水圈本身的运动，也影响着自己的形状，并且岩圈面的形状是在变的，在地质年代里大地水准面的扁率，也必然是在变的。

捷弗利斯引用了张伯伦 (1909) 的估计说^③：160000 万年以前，地球自转的速度较快，每昼夜的时间，只有今日的 84%，也就是说每日夜只有 20 小时多一些。并估计当时地球的扁率为：1/210。

捷弗利斯与张伯伦的说法，在说明地球水圈扁率在变这一点上是正确的。但这样简单的计算方法，明显地不能代表实际情况。因为影响地球自转速度的因素是很复杂的。其中主要的还是地球本身内部的变化。所以大地水准面的变化将会是复杂的，这将在下面再说到它。

(三) 弹粘性体的岩圈

我们已经知道，地球具有固体的性质，也具有液体的性质。在认识这一问题的过程中，我们是经过一番摸索的。

18 世纪的法国自然学家布风 (Counte de Buffon 1707~1788)，为了要解说地球扁率的问题，想象地球早期是液体，晚期是固体。他说^④：“当地球与行星形成时，地球是熔体，并在自转，它以赤道上升，两极下降的形态出现。其他的行星也同样地处于液体状态，也在自转，也与地球一样，在赤道部分涨起，而两极扁平。这种升降是与自转速度有关的。以木星为例，它比地球转得快，因之它的赤道更为凸出，两极更为低下。由观察得知二个半径之差为 1/13，而地球只有 1/

① 原田三夫 (许达年译述)，地球，83 页，1936。

② 尔格 (erg) = 10^{-7}J 。——编者

③ H. Jeffreys, The Earth, 310, 1952.

④ Mather & Mason, Source book in geology, 1939.

19 世纪中,在康德-拉普拉斯宇宙学说的影响下,地球被认为是一层硬壳包着受范性的内部的物体。也就是说内部是液体,而外壳则近于固体。这种想象的物体,后来被称为“牛顿体”。

在较近的年代里,由于地震研究的进步,这种“皮囊”式的地球学说,也不能解说地球的自然现象。许多地球物理家,借助于弹粘性体的理论来作解说。根据弹粘性体的理论,任何物质,同时具有弹性体(固体)的性质,也具有粘性体(液体)的性质。其中的规律如何,有多种说法,首先提出的一个理论,也是最著名的,是曼克斯威尔弹粘性体的理论(J. G. Butcher 1876)。此外也有其他的理论,并且得到应用。

根据弹粘性体的理论,每一种物体的粘度系数(η)被除于弹性系数(E),一般地是一个常数,这是一个重要的常数,被称为豫弛周期(период релаксации)常用符号“ τ ”来代表。

一般的弹粘性体的理论,都可以用一个公式表示出来^①。这一种公式,表示着物质的应力、形变,时间与物性系数的关系。曼克斯威尔的公式说明在比豫弛周期为短的时间内,应力的作用,使物体发生弹性体性质的形变;反之,在比豫弛周期为长的时间以后,应力的作用,使物体发生粘性体的形变。几种物质的豫弛周期见表 1。

曼克斯威尔式的弹粘性体的理论,可以在性质上解说一些物理现象。这些物理现象,如不用弹粘性体的理论,就不好解决。例如我们一般地认为是粘性(液)体的甘油,在传播高频的超音波时的音速,就服从于弹性体的公式^②(Raman d Venkateswaran 1939),而不服从液体的公式。可以解释为所用的超音波的周期为 0.64×10^{-10} 秒,而甘油的豫弛周期却为 35×10^{-10} 秒,即作用时间短于物质的豫弛周期,使物体表现出弹性体的性质。

又如水的豫弛周期约为 10^{-12} 秒,在周期为 10^{-18} 秒的 X 射线的作用中,确实观察到一定的晶体反映等等。

① 例如曼克斯威尔弹粘性的公式可以写作

$$\frac{de}{dt} = \frac{1}{E} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{\eta} p \text{ 或 } E \frac{de}{dt} = \frac{dp}{dt} + \frac{p}{\tau}$$

式中 p 代表应力, e 代表形变。

又如拉摩公式(J. Larmor)可以写作 $p = E \left(e + \tau \frac{de}{dt} \right)$ 。

② 纵波传播速度在液体中为 $V_1 = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ (式中 K 为压缩系数, ρ 为密度); 在固体中为

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \text{ (式中 } \mu \text{ 为切力系数)}。$$

表1 豫弛周期表

豫 弛 周 期		资 料 来 源*	粘度系数 η (泊)
水	10^{-12}s	(1)	0.01
甘油	$3.5 \times 10^{-10}\text{s}$	(1)	8
蓖麻油	$3.3 \times 10^{-9}\text{s}$	(4)	6.04
冰	10^3s	(2)	10^{13}
方解石(18°C)	10^5s (1 日)	(2)	10^{16}
地心核	10^5s (1 日)	(1)	—
岩盐(80°C)	10^6s (10 日)	(2)	10^{17}
岩盐(18°C)	10^7s (100 日)	(2)	10^{18}
地球平均	$5 \cdot 10^7\text{s}$ (1½年)	(4)	$10^{18} \sim 10^{22} **$
石膏	$10^8 \sim 10^9\text{s}$ (3~30 年)	(2)	
石灰岩	(Solcmhfcn) 10^{10}s (300 年)	(3)	
波罗的海地壳	(10000 年)	(假定在上升)	

* ①马格尼茨基 B. A. Магницкий 1953;

②顾登堡 B. Gutenberg 1951;

③Haskell;

④捷弗利斯 Jeffreys 1952。

** 根据顾登堡的计算地球地壳的粘度 10^2 , 由全球潮汐算得为 10^{18} , 由极点绕行算得为 10^{20} 。

又如一股以高速度射出的水流, 受到打击时, 水柱断裂的情况, 可以从快速照相中看出来, 和一条固体冰柱折断时相似。

岩石的豫弛周期, 一般在 1000~10000 年。地球中层的豫弛周期被初步地估计为 $10^2 \sim 10^3$ 年, 所以在地质年代里就有粘性体的反映。而对于周期为几秒几分的地震波而言, 却有弹性体的反映。在极点绕行的观察中, 一般周期约为 439 个太阳日, 这比地球中层的豫弛周期 ($10^2 \sim 10^3$ 年) 要短, 所以似乎具有弹性体的反应。在地壳运动中, 褶皱和断裂是两个对立的地质现象。当地壳运动的速度较大, 能在地壳的豫弛周期内使形变超过张力限度时, 就发生断裂, 不然就产生褶皱。

马格尼茨基 (B. A. Магницкий 1955) 采取一天作为地心核的豫弛周期, 并且根据他的计算可知地震横波通过地心核 3000 公里的距离, 其振幅即衰减了 10 到 100 倍, 也就是说基本上在阻尼作用中消失了。

弹粘性体的理论，虽然在广泛的基础上统一了固体和液体的物性，但它还不能解释弹性极限、拉力强度和断裂等问题；正如圆谐函数的分析，不适合直接用在在线型运动上一样。

弹粘性的理论帮助我们对很长时间内的运动过程有一概念。如我们不但要对很长时间的，并且还要对广大空间中所发生的运动过程有直接的概念，那只好做相似模型的试验了。但严格说来，全面的相似理论是提不出的，只有在一定的假定下才可提出相似标准。根据不同的假定，就有不同的相似标准。例如弗鲁德相似标准，假定地心引力对构造运动和模型所起的作用是相同的。此外还有列依诺尔斯、科沙、伊里尤申、柳斯齐赫等标准^①。相似模型试验不但对飞机和船只的设计、油气田开发设计有很大的用处，对地质力学的研究也会有很大的帮助的。

（四）地壳的均衡问题

地壳均衡问题，是 18 世纪以来在解说地球重力场观察资料中所提出的。

18 世纪中叶以前的地质家与地球物理学家认为地壳上的山岭，是密度与地壳相同的物质，堆在地壳的上面。在实质上就是认为地壳是一种刚体（不但是弹性体）。山岭的重量，没有能使地壳发生任何的形变。依照这样的想法，在大山脚下的一个静止的摆，将由于大山质量的吸引而偏向大山的方向。同样地，测量仪上水平仪的水泡也会受到偏向。这种偏向称为“铅直偏转”。

但从布格在 1749 年的实验以来 (Maskelyne 1774, Petit 1849) “铅直偏转”并不符于计算的数值。一般地说，这铅直偏转，与其说等于计算数值，还不如说近于零更切合实际一些。由于这些事实，使 18 世纪后期的科学家 (Boscovich 1755, Todhunter 1873) 认为山是由地壳中膨胀出来的，所以并没有额外的质量。在 1889 年出现了“地壳均衡”的名词。

艾里 (Airy 1855) 与柏拉脱 (Pratt 1859) 根据重力测量资料，相继地提出了数量上的解释，因之就产生了地壳均匀学说。艾里认为地壳上的山岭近似冰块浮在水上，其数量的关系，是阿基米德的定理。柏拉脱则认为地壳上的高低地形好像是从地壳内均一深度上膨胀起来的。因之高的地方膨胀得多，地壳的密度就小。海斯肯能 (W. Heiskanen 1924) 不同意以上的想法，认为地壳均衡的作用是集中地产生在一定深度的一个均衡面上，这个均衡面的深度，在美国为 50 公里，在阿尔卑斯山为 41 公里，在高加索为 77 公里。

1917 年，波微^②讨论了美国各地的重力值与地质均衡说的关系。他根据各种

① Н. С. Шнейерсон Тр. ин-та Геогр. геофиз. Ан. СССР (3), 1947.

Е. Н. Люстих, дан. СССР 64 (5), 1949.

М. Я. Алферьев, Гидромеханика, 1952.

② W. Bowie, U. S. G. and G. S. Spec. Publ. No. 40, 1917.

不同的均衡说的理论，计算出理论重力值与观察重力值的差别。这一差别被称为重力余数，他企图把重力余数作为试验一种理论正确性的尺度。就是说一个理论的重力余数越少，说明这一理论的根据越充足。根据波微的计算结果，不假定任何地壳均衡的因素时的平均余数（不计正负）为 21~111 个毫伽（毫伽是重力差的单位，为千分之一的厘米/秒²，约相当于地面重力值的百万分之一）。用海夫脱的一种地壳均衡说（Hayford 1909）所得的平均余数为 17~21 个毫伽。这一论文的发表，使一部分人得到一种印象，认为地壳均衡说已被证实了。

很明显的，这样的结论是不全面的。因为当时重力测量的误差，不会超过 3 个毫伽，但海夫脱地壳均衡说的平均余数还在 17~21 个毫伽之间，这正好说明地壳均衡说只有片面的正确性。

现在，地壳绝对均衡的学说已不被多数人所信奉了。顾登堡估计，由于地壳不处在完全的均匀状态中，地壳内存在着的应力为 10^9 达因每平方厘米，约相当于 1000 标准大气压。

苏联地球物理学家阿汉格爾斯基（1933）指出地壳均衡说的片面性，以及在思想方面消极的成分。

柳斯齐赫（Е. Н. Люстих 1955）指出在深海大洋上，布格重力异常（即不考虑地壳均衡因素的余数）在 +300~+400 毫伽之间，在平原与内陆海中，异常接近于零，在高原高山区域，可以下降到 -500 毫伽以下。这说明不考虑均衡因素的布格算法，与实际地球有很大出入。因之世界上大部分地区，是接近于平衡状态的（更正确地说，是在逐步地接近，或离开均衡状态的）。但这一平衡状态是不完全的。柳斯齐赫指出在实际解说重力观察的过程中，如考虑平衡的因素容易产生严重的错误。在高山区域，地壳所处的状态，一般地不完全符合于平衡条件。例如大高加索地区，地壳是与平衡状态相反的方向在隆起。在高加索西部地区，正相反，是在下沉的；但也是与平衡状态相反的方向在下沉。

有这样的一派学说，认为地壳因为要达到平衡，因之引起了造山运动。柳斯齐赫指出，这一学说是没有根据的。他认为地壳活动由地球内球能量的消耗所引起，并是地壳活动积极的一方面；而地壳的均衡仅扮演着被动的角色。地壳的升降运动受到阻碍后，一般会接近于均衡状态。

沉积岩的成岩过程，也可能是促使重力均衡的一个因素。弗吉阿奇^①根据俄罗斯地台上岩石密度的研究，认为在下沉地区岩层被压缩而增加密度，反之在隆起地区，岩层膨胀而减少密度。在浅成岩带中，下降区的沉积在沉积和压缩过程中，密度由 2.0 上升到 2.5；而在长期隆起区，由于物理化学的变化，密度反而减少。在稍深的中间变质带，下降区的岩石经过再结晶，使密度上升到 2.8；而在长

① Э. Э. 弗吉阿奇，Прикладная геофизика 12。

期隆起地区，岩石密度不变或极慢地减少。在内深变质带，下降地区的岩石密度分布在 2.7 到 3.5 之间；而在长期隆起区，岩石密度变化很慢。

（五）流动、物质分异与对流的可能性

无疑的，地壳下的物质是可以流动的。现在已被考虑到的有三种流动的形式，即：（1）局部流动；（2）物质分异；（3）对流。究竟以上三种形式，是否都存在，或者过去曾经存在过，现在还不能作出答案。至于各种流动的可能性，则是值得提一下的。

1. 局部流动

某些变质岩中所保留的流动的纹路，和沉积岩层的褶皱构造，都可以说明岩石曾经流动过。

在芬兰-斯堪的纳维亚地区，从 19 世纪以来（根据 1870~1940 资料），海上的水面标志说明大陆是在上升。上升速度的最大值，超过每世纪 1 米，（或每百万年 10 公里）。在地质意义上，这是很急剧的上升。在这一区附近的近代沉积中，也可看到沉积层面大都是斜的。在大的范围内，用化石作对比，还可以看出沉积层所形成的穹窿面。这也是近代岩圈面上升的证据。

这种上升运动，也可以用岩圈内部的流动来解释。

2. 物质分异

物质分异是指密度高的物质向地心方向集中，而密度轻的物质向地壳外表方向扩散的理想过程。

地壳面上岩石的密度只有 2.7~3.0 左右，而地球全部的密度约为 5.515，这可能部分地受到物质分异的影响。地壳上层的平均密度约为 2.7，而下层在 3.0 左右，这也可能是物质分异的结果。

我们还可注意到地球上的放射性元素，大部分集中在地壳外部。如全部地球内部含放射性物质的浓度与地壳的外部一样，那么地球内部就将有极大的热量，这就与实际观察到的发热量及其他自然现象是完全不相符合的。此外，在各种岩石中，我们已经看出花岗岩（代表地壳上层）中放射性元素的含量远比基性岩石（代表地壳下层）为多，如表 2 所示。据列文（1995）的估计，地壳中铀的含量比全球平均要高出 60 倍，钍高出 40 倍，钾高出 30 倍。

这样的分布情况，很难想像是地球形成时原始的分布状态。因之被想像为在地球形成之后，由于放射性物质与酸性岩石相亲的属性，而被重力分异出来的。

上述事实可以说明：地球可能是处于物质分异的过程中，或曾经发生过物质分异过程。

现代地质思想界的一种趋向，认为地球仍处于物质分异过程中，并且认为这一过程是岩圈运动的主要动力之一。