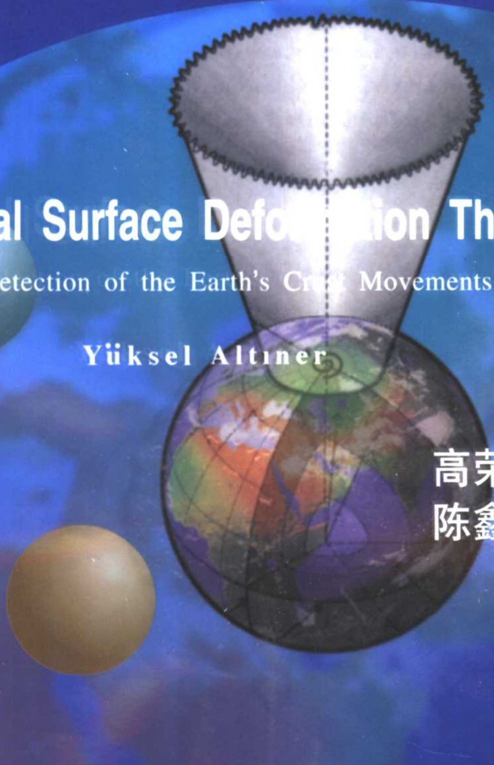
地表形变分析理论

——地壳运动监测

[德] 阿提内·约克塞尔



Analytical Surface Deformation Theory

—for Detection of the Earth's Crust Movements

Yüksel Altıner

高荣胜　李正媛／译
陈鑫连　刘序俨／校

地震出版社

地表形变分析理论

——地壳运动监测

［德］阿提内·约克塞尔

高荣胜　李正媛　译

陈鑫连　刘序俨　校

地震出版社

图书在版编目(CIP)数据

地壳形变分析理论 地壳运动监测/（德）约克塞尔著；高荣胜，李正媛译．北京：地震出版社，2001.7
ISBN 7-5028-1855-3

Ⅰ．地… Ⅱ．①约…②高…③李… Ⅲ．①地壳形变 应变分析②地壳运动 地震观测 Ⅳ．P315.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 19473 号

地表形变分析理论

——地壳运动监测

［德］阿提内·约克塞尔

高荣胜 李正媛 译
陈鑫连 刘序俨 校

责任编辑：马 兰
责任校对：张晓梅

出版发行：地震出版社
北京民族学院南路 9 号 邮编：100081
发行部：68423031 68467993 传真：68423031
门市部：68467991 传真：68467972
总编室：68462709 68423029 传真：68467972
E-mail：seis@ht.rol.cn.net
经销：全国各地新华书店
印刷：北京地大彩印厂

版（印）次：2001 年 7 月第一版 2001 年 7 月第一次印刷
开本：850×1168 1/32
字数：78 千字
印张：3
印数：001～600
书号：ISBN 7-5028-1855-3/P·1069（2395）
定价：10.00 元

著作权合同登记　图京：01－2000－2474

Analytical Surface Deformation Theory for Detection of the Earth's Crust Movements

Yüksel Altıner

Translation from the English language edition:
Analytical Surface Deformation Theory by Yüksel Altıner

序　　言

地球由于板块运动，日、月潮汐效应，大气、水文、海洋的负荷作用，区域性的地质过程以及旋转变化等，致使地壳上的各点都发生形变。建立在海底扩张速度、转换断层方位角和地震滑动向量基础上的全球板块运动模型，能够描述过去几百万年间的平均板块运动。但在应用全球板块运动模型研究现今地壳构造活动时，对于变化过程复杂的局部区域而言，则难以给出令人满意的描述结果。

在过去 20～25 年间，由于空间观测技术［甚长基线干涉测量（VLBI）、卫星激光测距（SLR）、全球定位系统（GPS）］的进步，应用在现今地表形变观测和板块构造活动方面的研究与日俱增。目前，采用这些观测方法，我们能够确定相距很远的两点间的相对运动，其观测精度已达到厘米至亚厘米量级。

应用上述空间技术所能达到的这种高精度观测结果，要求人们对现行的形变分析基础理论重新进行考虑，探讨这类分析理论构成了本书第二章的主题，在该章中还介绍了曲面的内蕴和外蕴形变分析方法；理论应用所涉及的地壳表面几何模拟以及观测方法详述于第三章；最后，第四章侧重于应用亚德里亚海地区的 CRODYN'94 和 CRODYN'96 二期 GPS 联测结果推求速度模型的解算法介绍，这里得到的是有条件的计算解，而不可作为完全

确定的结果，只有通过在这一地区进行更多期的GPS联测后，才有可能获得更为令人满意的结论。

我非常感谢萨格勒布州大地测量局（SGA）主任布白瑞尼尔·构兹克塔（Branimir Gojčeta）博士、萨格勒布大学大地测量学院教授克拉斯米尔·克拉克（Krešimir Čolic）博士、斯洛文尼亚联邦共和国卢布尔雅那市测绘局（SMA）局长艾利斯·塞立斯卡（Aleš Seliškar）博士等，支持在克罗地亚和斯洛文尼亚进行的GPS联测工作。另外，也感谢我的同事白兹纳·立白（Božena Lipej）博士（SMA）、萨格勒布大地测量局土地测量处负责人日拉柯·梅迪克（Zlatko Medić）博士和卢布尔雅那市测绘局土地测量处负责人杜山·米斯克威克（Dušan Misković）博士等对野外工作的帮助和指导。

本书中所引用的GPS资料是由德国法兰克福市联邦政府制图及大地测量局（BKG）协助收集，我特别要感谢贺门·西格（Hermann Seeger）教授和艾渥·瑞哈斯德（Ewald Reinhart）教授给予的支持；感谢波恩大学理论大地测量研究所西格夫瑞·汉斯（Siegfried Heitz）教授和波恩大学大地测量研究所柏土得·威特（Bertold Witte）教授进行的卓有成效的讨论。感谢美国麻省理工学院罗伯特·金（Robert King）博士和罗伯特·雷尼格（Robert Reilinger）博士阅读本书及对部分章节的评注及建议。

阿提内·约克塞尔

1999年8月于波恩

中文版序言

地震造成生命与财富的巨大损失，致使人类长期不懈地探讨这种灾害现象。在这一背景下，由于大洋中脊的发现而衍生出全新的理论观念，大洋中脊几乎被确认为是板块构造理论的起源。板块构造理论认为：岩石圈是由 14～16 块近似为刚性的板块组成，这些板块漂浮在流动的软流圈上，主要受上地幔的对流以及大洋中脊热磁物质外涌的驱动力作用而运动变化，地壳形变如伸张、褶皱作用、剪切等变化，则是这种运动能量释放作用的主要方式。大部分的地壳形变都发生在板块的边界；在边界内部，形变量并不显著或是具有区域特征。上述论述阐明了主要构造事件如：地震活动、火山形成等，沿板块边界发生的机理。

在过去 20 年中，许多世界范围的研究工作都应用了 GPS (Global Positioning System) 测量技术。对于地震预测问题，人们尤为关注的是：能否通过消除地区性的影响、模拟地壳的地表形变和应力变化状态获得解决。虽然，实际地壳的形变发生在三维空间里，但多数的研究确是在接近于水平面的二维形变场下进行的，而且，用于确定形变参数的观测点的运动，一般都依赖于基准。为了消除计算结果对于基准的依赖性，需要使用自由网平差计算出运动量，进而求得应变参数和独立的基准值。对于研究地球物理表面上的地壳形变而言，应用地表形变分析理论，可以避免上述不足。

译本进行了一些小的调整，更正了由 Springer-Verlag 出版社出版的原著中明显的字母输入错误。我要感谢高荣胜先生和李正媛女士将本书译成中文的建议及翻译工作，感谢地震出版社出版本书。

2000 年 1 月于波恩

Yüksel Altıner

译者说明

《地表形变分析理论——地壳运动监测》一书是阿提内·约克塞尔博士在大地测量方面的研究成果。

书中针对高精度空间观测技术（VLBI. SLR. GPS）获得的观测资料，提出，需要重新认识形变资料分析方法的理论基础问题。认为要使形变资料处理得到的地表内部几何面数据可用于建立物理或动态模型，必须考虑研究区域的地形构造问题，由此，便需要给出三维欧氏空间下地表曲面的一般表达式。

本书提出了表面形变分析的一种理论方法，应用这一理论，由 GPS 观测求得的亚德里亚海地区的运动速率，描述了该地区的地壳运动状况，给出了区域的形变和应变结果图示，探讨了现代大地测量观测结果用于地壳运动物理、力学模型建立中的有关问题，并附有大量的参考文献。可供从事大地测量、地球物理、构造物理、地震预报、天文等地球科学的科技工作者和高等院校有关专业的师生参考。

陈志遥同志也参加了本书的翻译工作，游新兆、苏新洲等同志指正了本书 GPS 相关术语的表达，在此表示诚恳的谢意。

目　　录

第 1 章　导论 ………………………………………………… (1)

第 2 章　形变理论 ………………………………………… (6)

§2.1　坐标系………………………………………………… (6)

§2.1.1　笛卡尔坐标系和曲线坐标系……………… (6)

§2.1.2　曲面法线坐标系………………………………… (7)

§2.2　三维形变……………………………………………… (9)

§2.2.1　初略说明………………………………………… (9)

§2.2.2　基本概念………………………………………… (9)

§2.2.2.1　等参数表示法………………………………… (9)

§2.2.2.2　拉格朗日表示法……………………………… (9)

§2.2.3　特殊形变测度…………………………………… (11)

§2.3　地表形变……………………………………………… (12)

§2.3.1　初略说明………………………………………… (12)

§2.3.2　地表内蕴形变…………………………………… (12)

§2.3.2.1　等参数表示法………………………………… (12)

§2.3.2.2　基于高斯曲面表达式的计算……………… (13)

§2.3.2.3　在外蕴曲面法线坐标系中的计算 ………………………………………………… (15)

§2.3.2.4　椭球坐标系中的计算……………………… (16)

§2.3.3　地表外蕴形变…………………………………… (18)

§2.3.3.1　基于高斯曲面表达式的计算……………… (18)

§2.3.3.2　在外蕴曲面法线坐标系中的计算 ………………………………………………… (23)

§2.3.3.3　椭球坐标系中的计算……………………… (26)

§2.3.4　应力与形变……………………………………… (26)

第3章　几何模式 ………………………………… (31)
§3.1　基本原理………………………………… (31)
§3.2　多项式内插法……………………………… (34)
§3.3　拟合推估内插法…………………………… (36)
§3.4　有限三角元法……………………………… (40)
§3.4.1　初略说明…………………………… (40)
§3.4.2　三角元计算法……………………… (40)
§3.4.3　离散形变测度……………………… (43)
§3.4.4　相邻三角元间弯曲变化的求解………… (44)

第4章　应　用 ………………………………… (46)
§4.1　地壳的形变………………………………… (46)
§4.2　大地测量结果在形变分析中的贡献………… (50)
§4.3　亚得里亚海地区的板块运动………………… (51)
§4.4　几何模型…………………………………… (54)
§4.4.1　内插方法的应用…………………… (54)
§4.4.2　图示法的解释……………………… (54)
§4.5　亚得里亚海地区的地表形变………………… (58)
§4.5.1　GPS观测 ………………………… (58)
§4.5.2　GPS数据的处理方法 …………… (60)
§4.5.3　数据处理…………………………… (60)
§4.5.4　数据质量的检验…………………… (61)
§4.5.5　多期观测成果……………………… (63)
§4.5.5.1　绝对坐标的解算结果………… (64)
§4.5.5.2　相对坐标的解算结果………… (65)
§4.5.6　地表内蕴形变……………………… (65)
§4.5.7　地表外蕴形变……………………… (66)
§4.5.8　亚得里亚海地区的图示…………… (68)
§4.6　结束语……………………………………… (75)

参考文献………………………………………… (76)

第1章　导　　论

大地测量学对地球科学所作的贡献是建立了地球表面几何学模型，它包括地球表面的内蕴和外蕴几何学的统计和随时间变化的表达式。一方面，“随时间变化的几何学”或地表形变是令人感兴趣的内容；另一方面，将其作为地球岩石圈物理模型的边界值也是十分重要的。

对地球表面局部地区所进行的大地测量形变分析，目前仅局限于估算水平面上的位移量，这些位移通常是以某一平均水平面内的笛卡尔坐标的变化值而导出的。因此，建立在笛卡尔坐标几何学基础上的形变理论被构思成为二维的，这种方法用于山区或者用于起伏变化较小的大范围地区，就无法满足形变分析的需要。

如若希望通过形变分析，获得建立物理或力学模型的有效原始资料，最为重要的是必须从数学模型上针对实际地球表面或地形结构予以研究，即：将地表表示为三维欧氏空间下的曲面，应用建立在适当坐标几何学基础上的微分几何学模型，就可以对地表形变的内蕴和外蕴几何学变化作出全面分析。因而，地表几何模型包括离散观测点位移观测量的表达式，以及建立在这种几何学基础上的地表构造的几何学设计。从物理观点看，观测点及观测系统应与地表的点位相联系，其数学表达式就是在与之相关的几何坐标系下给出。

理想的大地测量系统是由刚体或刚体系组合的物理系统所构成，系统中参数的测量精度和预估参数的估算精度均满足一定的量级范围。所谓预估参数主要是指由距离和方向观测量转换获得的坐标值，或以如全球定位系统（GPS）的方法等直接求得的坐

标值。

在各实测的观测周期内，由直接观测或由坐标转换计算所得的距离值，应满足一定精度的瞬时不变性要求，这是保证刚体点位系统假设得以成立的最为重要的条件。通常，在变形体作相对运动时，它们的距离随时间而变化，包括地表点位以及一些瞬时距离的变化，而各种新的形变理论的出发点正是基于描述这类长度或坐标的瞬时变化。

基于上述认识，最重要的是能够描述物体的表面形变，而这一点正是地区性大地测量形变分析的主要内容。在物理学中，尤其在刚体力学研究领域，不仅限于对于这类表面形变体的观测，与之相联系的几何边界值还可为完全解决质量连续的三维变形物体的动力学问题作出贡献（Heitz 1980～1983；Heitz and Stocker-Meier 1994）。为此，进行三维形变分析方法的探讨是必须的，且该方法成为许多变形研究的基本出发点，在多数情况下，无庸置疑地在大量的教科书中成为讨论的专门论题。在进行地表形变测量的工作当中，一般不必特别指明其本身的重要性，就应以三维空间体的观点进行物体的形变分析，因为：

- 地表形变可借助测量技术惟一确定。
- 通常地表形变作为物体随时间变形的一种定量表示，在未获得进一步的观测值并精密确定出三维连续物体的各特性时，也不可能彻底的解决动力学问题。

对于更为广泛的形变现象的探讨，也正是大地测量学研究中令人感兴趣的论题。首先值得一提的是全球性的称之为地球潮汐的问题，因为潮汐所产生的加速度，可能会造成地球表面的形变（Heitz 1980～1983；Melchior 1983），而从大地测量学或地球物理学的观点来看，地球潮汐问题也是重要的跨学科研究内容，可以归类于板块构造学模型下的地壳应力-变形关系的研究领域（Kersting and Welsch 1989；Miller 1992）。除了这类全球性或大尺度区域范围的研究工作外，在大地测量学的应用中，地区性

的地表形变分析工作，就像对地面建筑、机器和人体外表的研究一样（Caspary 1987；Reiking 1994；Bilajbegovic 1996），显得极为重要（Pelzer 1971；Koch 1988；Saler 1995；Altiuner 1996；Ghitău 1998）。

对于小范围的地表几何动态模型研究，是大地测量学应用研究的焦点，可以据此剖析引起形变的动力变化过程。因而，围绕这一主题所开展的分析研究工作，不仅局限在对坐标或距离变化的研究，作为本书的重点内容地表内蕴与外蕴形变分析理论，将在第 2、3 章中详细论述探讨，并与第 4 章中集中介绍的以 GPS 观测技术进行坐标解算的实例相映证。对上述理论既给出了在笛卡尔坐标系下相应的表示公式，也给出了地面直角坐标系下的相应公式，尤为重要的是，还给出了用于 GPS 测量的全球椭球坐标系统下的表达式。该系统是以地球质量中心为坐标原点，以地球自转轴为坐标轴的地心坐标系统，这样可以避免因所采用的基准面不同，而产生基准面间转换的相关问题。三维连续形变理论既是研究地表内蕴形变的基础，又应用在动力学或物理学基本模型的建立中。基于这两方面的因素，将在 § 2.2 的地表形变分析理论中首先介绍；而地区性形变与应力关系的研究将在 § 2.3.4 中逐一说明。

地表形变理论的大地测量应用着眼于建立地球表面几何学模型，这一问题将从离散观测点入手在 § 2.3 中讨论。设：

$$\{P\} \in \text{地表区域 } F \tag{1-1}$$

地表区域 F 内的 P 点已完成了两期 GPS 观测，对应的观测时刻分别为：

$$t \text{ 和 } \bar{t} \tag{1-2}$$

对于任一点 P，给出两期的三分量坐标为：

$$q^a := q^a(t), \qquad \bar{q}^a := q^a(\bar{t}), \qquad a \in \{1,2,3\} \tag{1-3}$$

q^a，$\bar{q}^a$ 一般为椭球坐标。由（1-3）式，可推导出位移坐标的形式为

$$z^{\alpha} := \bar{q}^{\alpha} - q^{\alpha} \tag{1-4}$$

上式表示由（1-1）式定义的待研究的地表区域 F 的位移场，通常以观测点 P 分布密集一些为好。需要注意的是，在区域 F 内，选择观测点的密度以及位移场表达式的准确度都不仅是高度变化的函数。即使对于相对平坦的区域，也需保持适当的观测点分布密度条件，以确定短距离的位移量。

顾及（1-2）、（1-3）式，$P_m - P_n$ 的线性拉伸（线应变）为：

$$q_{mn} := (\bar{s}_{mn} - s_{mn})/s_{mn} \tag{1-5}$$

线性拉伸可由相邻点对直接计算出来。在多数情况下，这种形变的基本测度是不能令人完全满意的，它是一种“参数无序集”，不能清晰地表示（1-1）式中 F 区域的内蕴形变特征，特别是它不用以对地表外蕴形变作出直接解释。此外，这种线性拉伸对深入研究地球上地壳的应力-形变的动力学特征仍然不是一种合适的方法，前面所提及的不完善之处，使线性拉伸测度不能用在地表形变分析理论中。地表形变分析理论在§2.3中将予以详细说明，其前提是离散观测点 $\{P\}$ 作为构成连续曲面上的元素。换言之，（1-3）式中的地表点位坐标 $q^{\alpha}(t)$，及（1-4）式中地表位移坐标 z^{α}，必须以地面坐标的解析函数 u^{α} 来表示，其中 $\alpha \in \{1, 2\}$：

$$\begin{aligned} q^{\alpha} &= q^{\alpha}(u^{\alpha}) \\ z^{\alpha} &= z^{\alpha}(u^{\alpha}) \end{aligned} \tag{1-6}$$

这种以内插函数或逼近函数形式的几何模型，通常具有下列两方面的意义。

- 为了保证内蕴和外蕴形变测度的分析计算具有惟一性，内插函数（1-6）式应该在整个内插区域内相对于 u^{α} 是连续可微的。 (1-7a)
- 相邻观测点之间的内插函数应该满足近似线性特征。 (1-7b)

内插函数或逼近函数的解算方式通常在应用数学及信息学中使用，这种解算方法已被运用多时，并且适用于变化量值较大时的数据处理过程（Zienkiewicz 1972；Abramowsk and Muller 1991；Cui et al. 1992）。在包括大地测量学的各技术领域中，都极为重视获得解析函数空间离散函数表达式（Moritz and Sünkel 1977；Reiking 1994）。这个问题一般应满足（1-7a）及（1-7b）式二个条件，在第 3 章中将详细讨论相关问题，而 § 3.4 中举出的一种特殊处理方法，是用有限三角元法或曲面三角测量法分割地表区域 F，而在每个三角形内部采用线性内插函数（1-6）式。这种内插函数是较为简易的样条函数，它应在三角形的边界上为连续函数，其函数的导数则可以不满足连续的条件。这样，满足条件（1-7a）便为完全满足条件（1-7b）所代替。这些论点将会对纯理论分析性的形变理论带来极大的冲击，因此有必要对离散形变测度进行定义。

第 4 章主要阐述观测技术基本原理，以及第 2、3 章中部分基本理论的应用，并以表格图解方式汇集、介绍亚得里亚海区域的观测作业与形变结果。

第 2 章　形变理论

§2.1　坐标系

§2.1.1　笛卡尔坐标系和曲线坐标系

在三维欧几里得几何空间下，用笛卡尔坐标表示为：

$$\text{在 } S \text{ 中的 } x_i\text{，在 } \bar{S} \text{ 中的 } \bar{x}_i \tag{2.1-1}$$

在三维欧几里得空间及二维黎曼几何空间引入下面概念，广义曲线坐标：

三维坐标：

$$q^a, a \in \{1,2,3\} \qquad \text{度量张量 } g_{ab} \tag{2.1-2a}$$

二维曲面坐标：

$$u^\alpha, \alpha \in \{1,2\} \qquad \text{度量张量 } f_{\alpha\beta} \tag{2.1-2b}$$

建立在这些系统基础上的坐标几何学是采用赫兹（Heitz，1988）的表示方式。在几何坐标系下，

由 $q^a \Leftrightarrow \bar{q}^a$ 进行坐标变换的广义微分方程为：

$$\begin{aligned} \bar{q}^c_{,ab} &= \Gamma^d_{ab}\bar{q}^c_{,d} - \bar{\Gamma}^c_{de}\bar{q}^d_{,a}\bar{q}^e_{,b} \\ \bar{q}^c_d &:= \partial\bar{q}^c / \partial q^d \end{aligned} \tag{2.1-3a}$$

这是一个重要的基本方程，笛卡尔坐标系与曲线坐标系间的变换：$q^a \Leftrightarrow x^i \equiv x_i$，可从上述的微分方程或带有方差和逆协方差的下述的导数方程求得：

导数方程为：

$$x^k_{,ab} = \Gamma^d_{ab} x^k_{,d}, \quad q^c_{,ij} = -\Gamma^c_{de} q^d_{,i} q^e_{,j} \tag{2.1-3b}$$

基底向量为：

$$x^k_{,d} = x_{k,d} := \partial x_{k.} / \partial q^d =: c_{k.d}, \qquad q^d_{,i} := \partial q^d / \partial x_{i.} =: c^d_{i.}; \tag{2.1-3c}$$

$\Gamma^d_{ab}=q^a$的克里斯托夫度量符号（Chritoffel Symbls）。

在曲面几何中，个别采用笛卡尔坐标系下的高斯曲面表达式：

$$x_{i.} = x_{i.}(u^a) \tag{2.1-4a}$$

而对特殊状况，则有：

$$u^\alpha =: x_{\alpha.}, \quad \alpha \in \{1,2\} \qquad x_{i.}(x_\alpha) = [x_{1.}, x_{2.}, x_{3.}(x_{\alpha.})] \tag{2.1-4b}$$

类似地，在曲线坐标系下有：

$$q^a = q^a(u^\alpha) \tag{2.1-5a}$$

并有特例：

$$q^\alpha =: u^\alpha, \quad \alpha \in \{1,2\} \qquad q^a(u^\alpha) = [u^1, u^2, q^3(u^\alpha)] \tag{2.1-5b}$$

§2.1.2 曲面法线坐标系

曲面法线坐标由赫兹（Heitz，1988）引入使用，基本空间和曲面的表达式如下：

外蕴曲面法线坐标系使用下式表示：

$$q^a = (u^1, u^2, q^3 \equiv H) = (u^\alpha, H) \tag{2.1-6a}$$

$$u^\alpha = \text{参考面的曲面坐标} \tag{2. 1-6b}$$

式中引用了度量张量 g_{ab} 与下述基底向量

$$c_{i.a} := \partial_{x_{i.}} / \partial q^a, \quad c^a_{i.} := \partial q^a / \partial x_{i.} \tag{2.1-6c}$$

由（2.1-5）式，高斯曲面可表示为：

$$q^a(u^\alpha) = [u^1, u^2, H(u^\alpha)] \tag{2.1-6d}$$

以下坐标系可作为外蕴曲面法线坐标系的一种重要特例。

地理椭球坐标系：

$$\text{参考面} = \text{旋转椭球面}$$

$$q^a = (\lambda, \phi, H) = (u^\alpha, H) \tag{2.1-7a}$$