

第 1 章 潮汐、潮流现象

§ 1.1 绪 言

牛顿 (1687) 首先应用万有引力定律解释了地球的潮汐现象, 在他的《自然哲学的数学原理》中, 牛顿得出在假设的理想条件下, 天体引力会使地球上的海洋表面形成一个平衡潮面, 这个面在对着和背着天体的点形成高潮。这解释了地球上大部分海域一天之中有两个高潮和两个低潮的现象。同时解释了由于天体偏离赤道, 造成潮汐日不等现象。他还指出, 潮差的大小与天体的质量成正比, 而与天体到地球距离的三次方成反比, 由此说明了月球引潮力比太阳引潮力大, 地球的潮汐主要是由月球引起的。

将潮汐理论进一步向前发展的是拉普拉斯 (1775—1776), 他提出了潮汐动力学理论, 且引入地球偏转力, 对几种理想的全球海洋进行求解。

拉普拉斯的理论被后人作了若干修改和发展, 例如考虑了摩擦效应以及地潮对海洋潮汐的影响等, 但其基本理论未变。拉普拉斯之后, 艾里 (Airy G. B., 1845) 杜德逊和普劳德曼 (Doodson A. T. and Proudman J., 1936—1940) 等都 对理想形状的大洋求得了潮汐的分布, 这对深入了解和解释大洋潮汐起到了重要作用。

汤姆森 (Thomson W., 1879) 研究了地转作用下无限长等深沟渠中的长波, 得出了著名的开尔文波。泰勒 (Taylor G. I., 1920) 得出了海湾和矩形海域中潮波的解。陈宗镛 (1965)、方国洪等 (1966) 以不同的方式考虑了摩擦对潮波的影响, 解释了无潮点偏向左岸的成因。

对潮波微分方程求解解析解时, 只能将海区形状简单化以解决求解方程的困难。但这样做不能得到符合实际的潮波分布。为了克服这一缺点, 20 世纪 50 年代开始了潮波微分方程的数值解。汉森 (Hansen W., 1952) 首先开展了二维潮波数值计算。电子计算机问世以后, 潮波数值计算蓬勃发展起来。通过潮波数值计算可以充分掌握海区的潮汐、潮流的分布变化规律, 甚至达到了潮汐、潮流数值预报的程度。

通过潮波微分方程的解析解和数值解了解海区的潮汐、潮流情况，而通过对某一港口的实测潮汐资料进行调和与分析，以达到预报潮汐的目的。汤姆森（即开尔文 1868 年首先设计了调和的方法。达尔文（ Darwin G. ,1883—1886 ）发展了调和的方法，对平衡潮进行了调和展开，得到了主要分潮的频率，设计了调和与分析方法，他对各主要分潮的命名至今仍在使用。杜德逊（ Doodson A. T. , 1921 ）对引潮势进一步展开为纯调和分潮，引用了月球运动的 Brown 系数和 Newcomb 表，使引潮势展开的结果更为精确。1928 年，他设计了依据一年潮汐资料用于手工计算相对简单的分析 60 个分潮的分析方法，同时提出了 15 天、29 天、1 天或 2 天潮汐资料的分析方法。方国洪于 1960 年发展了杜德森短期观测的分析方法，对引潮势进行了准调和展开，提出了潮汐分析和预报的准调和分潮方法（1974,1976,1981），为我国的潮流、潮汐分析预报工作作出了重要贡献。随着电子计算机的应用，现在对 1 月、1 年、19 年潮汐资料的分析能够更快地完成，分析的分潮数目更多更合理，能够相当精确地预报潮汐。

芒克（ Munk W. H. ）和卡特赖特（ Cartwright D. E. ）于 1966 年提出了潮汐响应分析法。响应法不必事先规定存在何种频率的振动，就能客观地分析出各种可能的振动，可以在一定程度上将频率相同而来源不同的各种振动分离开。虽然这种方法用于潮汐预报太麻烦，但对于潮汐的研究有其特殊的价值。

月球和太阳引潮力不仅能够引起海洋潮汐，还能引起地面倾斜潮汐、重力潮汐以及地球应变潮汐，后三者通称为固体潮或简称体潮。海洋潮汐对固体潮还存在着负荷效应，其影响是相当明显的。许厚泽、毛伟建（1988）在研究大洋潮汐对中国大陆的负荷效应时，依据大洋潮波图求出地球各点对单位质量负荷的响应函数，即格林函数，然后利用格林函数对不规则的负荷作褶积分，从而得到负荷潮。计算表明，对倾斜潮的影响达到甚至超过体潮的影响，对重力潮可以达到体潮的 5% 应变潮的 50%。黄祖珂、陈宗镛（1992）依据固体潮观测站一年逐时的倾斜潮资料利用响应分析将倾斜引力潮（体潮）和倾斜负荷潮分离开，表明海洋潮汐对沿海地面倾斜的负荷效应达到了体潮的量级，对内陆的影响较小，但能达到内陆很远的地方。虽然国内有专门的机构和学者研究固体潮，但是海洋潮汐和固体潮之间的相互作用研究，需要所有的潮汐工作者共同努力。有报道称，当海洋潮汐出现天文大潮，特别是其与风暴潮同时出现时容易引起固体潮的异常变化，有可能诱发地震。

在近代我国的潮汐研究和教学中，郑文振（1959）的《实用潮汐学》、陈宗镛（1980）的《潮汐学》和方国洪等（1986）合著的《潮汐和潮流的分析和预报》等专著发挥了重要作用。

§ 1.2 潮汐现象

海水受到月球和太阳引潮力的作用产生规律性的上升下降运动。这种海面的升降现象叫做海洋潮汐。海洋潮汐的周期大约为半天或一天。海洋潮汐还具有半月、月、年、18.61年等长周期变化。由引潮力引起的潮汐称为引力潮。另外，太阳热辐射的周期性变化会引起气象的周期性变化，从而间接地引起海面的周期性升降运动，这叫做太阳辐射潮。太阳辐射潮通常比引力潮小得多，但是在海面的年周期变化过程中太阳辐射潮起着主要作用。另外，风、气压等气象因子还能引起海面的增减水现象。

引潮力的周期性变化能够引起地面倾斜、重力以及地球应力的潮汐变化，它们分别称为倾斜潮汐、重力潮汐和应变潮汐，总称为固体潮。海洋潮汐与固体潮汐之间存在明显的相互作用。

2.1 验潮概况

通过潮汐观测（验潮）获取潮汐资料。我国设有若干长期验潮站，进行长期连续观测。为了完成海道测量、港口建设等项目，还设立了大量的短期验潮站，只进行短期的验潮。

如图 1.2.1 所示，短期验潮站可以设立水尺进行人工观测。每个验潮站均确定自己的水尺零点（水位零点），作为水位的起始面。水尺零点的位置相对来说是任取的，一般在低潮线之下的某一高度上。各站的水尺零点不在同一水平上。水尺零点一经确定，不能随意变动，以便保持资料的连续性和完整性。再设立永久水准点或临时水准点，通过测量水尺零点与水准点之间的高度差来确定水尺零点的位置并检查其是否变动。当潮差较大，一根水尺不够用时，可以设立数根水尺，不同时段在不同的水尺上读数，但最后均应归化至该站的水尺零点上。

长期验潮站建有验潮井，采用验潮仪进行自记观测。井壁设有管孔与井外海水相通，使井内的水面与海面同步升降，而又能消掉海浪的影响。井内外各设有水尺以检验井内外的水位是否一致和验潮仪的水尺零点是否变动。

现在我国已经使用电子仪器进行验潮，例如安得拉水位仪能够自动地记录置于其上水柱压力的变化，从而换算成潮汐资料。这种自记水位仪能够消除海浪的影响，但也需要设立水尺以检验仪器零点（水尺零点）的位置及其变动情况。

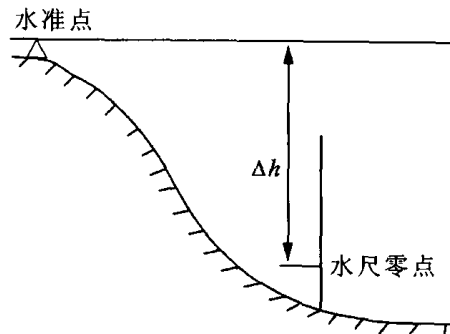


图 1.2.1 验潮站示意图

依据每月的验潮资料整理成潮汐月报表，记录每天 24 h 的潮位值、高低潮的潮时和潮高以及有关的潮汐特征值。

1.2.2 潮汐名词

1. 高潮和低潮

在海面升降的一个潮周期中，海面上升到最高时称为高潮，海面下降到最低时称为低潮。

2. 平潮和停潮

当海面达到高潮的时候，海面暂时停止升降的现象称为平潮。在低潮时海面暂时停止升降的现象称为停潮。平潮和停潮的时间长短因地而异，有几分钟或几十分钟，最长可达一二个小时。一般取平潮（停潮）的中间时刻为高潮时（低潮时）其对应的潮位高度称为高潮高（低潮高）。

3. 涨潮和落潮

从低潮到高潮，海面逐渐上升称为涨潮；自高潮至低潮，海面逐渐下降为落潮。从低潮时至高潮时所经历的时间，称为涨潮时间；从高潮时至低潮时所经历的时间，称为落潮时间。

4. 高高潮、低高潮、低低潮、高低潮

一天之中的两个高潮和两个低潮中，高的高潮为高高潮，低的高潮为低高潮，低的低潮为低低潮，高的低潮为高低潮。

5. 潮差

相邻的高潮与低潮之潮位高度差为潮差。潮差的平均值是平均潮差。月平均潮差等于月平均高潮高与月平均低潮高之差。

6. 日潮不等

一天之中两次高潮高不相等，或两次低潮高不相等的现象叫日潮不等现象。

7. 高、低潮间隙

从月中天到高潮时的时间间隔叫做高潮间隙，从月中天到低潮时的时间间隔叫做低潮间隙。其平均值是平均高（低）潮间隙。高（低）潮间隙因地而异，而且同一地点的高（低）潮间隙也随月相的变化而略有差异。对半日潮海区，平均高潮间隙在 0~12 h 25 min 之间变化。

§ 1.3 潮汐类型

依据各海区高、低潮的变化情况将潮汐变化分为以下几种类型。潮汐类型也称为潮汐性质。

1. 正规半日潮

这种类型的潮汐在一个太阴日 (24 h 50 min) 内有两次高潮和两次低潮，潮汐日不等现象不明显，且相邻两个高潮（低潮）的时间间隔（周期）约为 12 h 25 min。图 1.3.1 的(A)图是坎门 1998年 3月 1日至 3月 31日的潮汐变化过程图，该站属于正规半日潮类型。

在浅水和江河口海域，潮波在传播过程中由于受到浅水效应的作用而变形，普遍会出现涨潮时间短、落潮时间长的现象，而且浅水分潮具有明显的量值。如果是在半日潮海区，随着 H_{M_1}/H_{M_2} 比值的增加，涨、落潮时间差会变大，如果 $H_{M_1}/H_{M_2} > 0.5$ ，则在一太阴日中就可能出四次高潮和四次低潮的现象。浅水效应明显的半日潮类型属于非正规的半日浅海潮类型。

2. 不正规半日潮混合潮

在一太阴日内有两次高潮和两次低潮，但相邻的两高潮（低潮）高度不相等，而且涨潮时间与落潮时间也不相等，这种潮汐日不等现象还每天变化。图 1.3.1 的(B)图属不正规半日潮类型。

3. 不正规日潮混合潮

如图 1.3.1 的(C)图所示，此种类型的潮汐在一月之中的部分日子里，每天出现一次高潮、一次低潮的现象。

不正规半日潮和不正规日潮通常为混合潮类型。

4. 正规日潮

在一个月的大多数日子里，一天之内只有一次高潮和一次低潮，少数日子里有两次高潮和两次低潮。

实际工作中依据潮汐调和常数来计算（见 § 9.1），与上面的规定基本相符。

在图 1.3.1 及图 1.3.2 中 (A),(B),(C),(D) 显示出坎门、龙口、三亚、涠洲四个港口的潮汐类型分别为正规半日潮、不正规半日潮、不正规日潮和正规日潮。

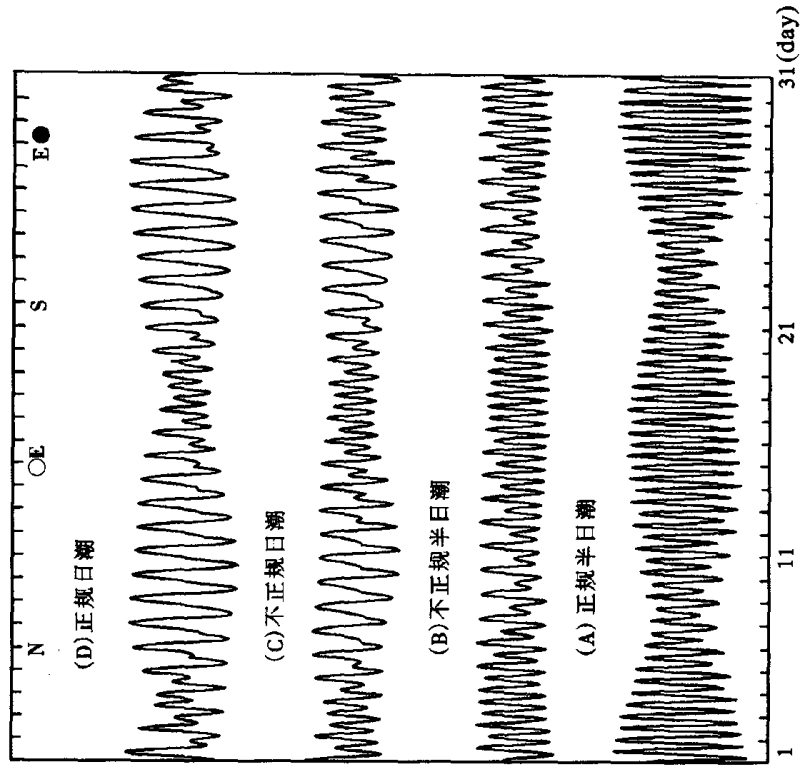


图1.3.1 潮汐变化过程图 (1998年3月1日~31日)

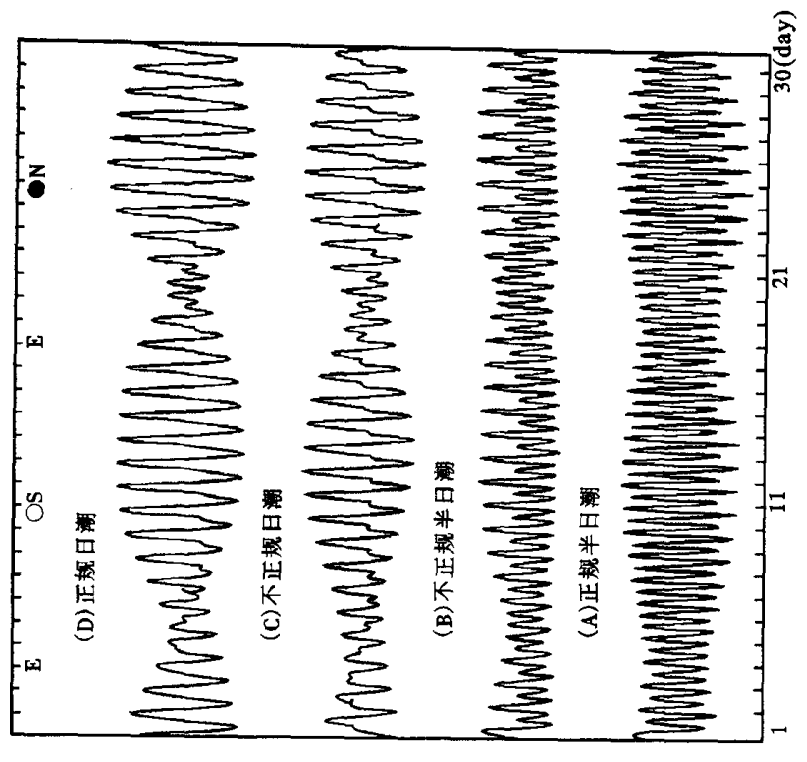


图1.3.2 潮汐变化过程图 (1998年6月1日~30日)

§ 1.4 潮汐随月相和赤纬的变化

1.4.1 大潮和小潮

在一个朔望月(29.5306天)中,当朔或望时,月球和太阳的引潮力方向一致,半日潮海区产生的潮差最大,称为大潮。上、下弦月时,月、日引潮力的方向相反,产生的潮差最小,称为小潮。从图1.3.1和图1.3.2的A,B图来看,在半日潮海区一个朔望月出现两次朔望大潮和两次小潮。实际的海洋潮汐,大潮发生在朔、望后二三天(见图1.3.1)。从朔、望到发生大潮的时间间隔为半日潮龄。

1.4.2 回归潮和分点潮

在一回归年(365.2422天)中,太阳于春分和秋分两次经过赤道上空,太阳赤纬等于零度。于夏至和冬至太阳赤纬分别达到北赤纬最大和南赤纬最大。在一回归月(27.32158天)内,月球两次位于赤道上空,月赤纬等于零度。当月球达到北赤纬最大后,再经过半个回归月达到南赤纬最大。由于回归月与朔望月的长度不相等,每月达到北、南最大赤纬的日期是不同的。

当月球位于赤道上空时,由月球引起的潮汐,其潮汐日不等现象很不明显。随着赤纬的增大,日不等现象越来越明显,当月球达到最大赤纬时,日不等现象最明显,此时一天之中的两个高潮(低潮)的高度相差最大。在一年之中由于太阳引起的潮汐部分,于春分和秋分时日不等现象不明显,而当夏至和冬至时日不等现象最明显。图1.3.1为1998年3月的潮汐变化图,它很少受到太阳赤纬的影响,而主要受月球赤纬变化的影响。图中N,S分别表示月球达到北、南最大赤纬的时刻,在之后的几天里,日潮区每天只有一次高潮和一次低潮。图中E表示月球赤纬等于零度的时刻,在之后的几天里一天有两次高潮和两次低潮。即便是在半日潮区的A港中,月球赤纬最大时也有较明显的日不等现象。图1.3.2是1998年6月的潮汐变化图,它同时受到月球和太阳赤纬的影响,C,D两港一天只有一次高潮和一次低潮的天数更多,A港也具有明显的日不等现象。

对于日潮海区,一回归月内有两次回归大潮和两次小潮。大潮发生在月球北、南最大赤纬之后二三天的时间里,这段时间间隔为日潮龄。

月球位于赤道附近,一天之中两个高潮(低潮)的高度大约相等,此时的潮汐叫分点潮。

月相及月、日赤纬的变化使得潮汐的变化极为复杂。

§ 1.5 中国沿海的潮汐特点

中国近海的潮波主要是由太平洋传入的，月、日引潮力直接在中国近海引起的潮汐很小。

潮波由太平洋传入东中国海，在地形和科氏力的作用下，半日分潮波在黄、渤海形成了 4 个绕无潮点按逆时针方向旋转的潮波系统（见 § 7.5）。无潮点分别位于秦皇岛外、旧黄河口岸边、成山头外以及苏北外海。从无潮点向外潮汐的振幅逐渐增大。日分潮波在黄海南部及渤海海峡各有一个无潮点。

东中国海以半日潮波为主，日分潮波较小。

1.5.1 潮汐类型的分布

渤海大部分海域为不正规半日潮类型，只有在秦皇岛外、旧黄河口外无潮点区为正规日潮，向外依次为不正规日潮和不正规半日潮，渤海海峡为正规半日潮。

黄海以正规半日潮为主，整个黄海沿岸，只有丹东港、威海至成山角再到靖海角为不正规半日潮。黄海的半日分潮无潮点附近为不正规日潮和不正规半日潮。

东海主要为正规半日潮海区，只有杭州湾南部、宁波以及舟山岛的西岸和南岸为不正规半日潮。台湾海峡的北部和中部为正规半日潮，南部为不正规半日潮和不正规日潮。

南海以不正规日潮为主。汕头至海门以东，珠江口至雷州半岛东岸，海南岛东北部为不正规半日潮。海门湾至三都澳、东沙岛、海南岛铜鼓嘴至莺歌嘴，雷州半岛北段以及西沙、南沙群岛为不正规日潮。神泉至甲子、感恩角至新盈港、雷州半岛南段、广西沿岸为正规日潮区。^[36]

1.5.2 高潮间隙的变化

从月上（下）中天到发生高潮的时间间隔为高潮间隙。在半日潮海区，平均高潮间隙 $= g_{M_2} / \sigma_{M_2}$ 式中 g_{M_2} 为 M_2 分潮的迟角 $\sigma_{M_2} = 28.984 \text{ }^\circ/\text{h}$ 为 M_2 分潮的角速度。黄、渤海以半日分潮为主， M_2 分潮波的波峰线在一周期（12 h 25 min）内绕无潮点按逆时针方向旋转一周。由于波峰线到达的时刻是高潮发生的时刻，在黄海发生高潮的时间由朝鲜半岛南端开始，向北逐渐延迟。群山的平均高潮间隙为 3 h 9 min 仁川为 4 h 47 min 辽宁省的大鹿岛为 8 h 19 min，大连为 10 h 2 min 烟台为 10 h 6 min 成山头为 11 h 58 min 在北黄海高潮间隙完成了一个周期的变化。从山东半岛的南岸至苏北沿岸发生高潮的时间逐渐延迟。在渤海发生高潮的时间从辽宁省的南端开始，以逆时针方向沿着渤海

岸边呈逐渐增加的趋势，高潮间隙在渤海沿岸完成了两个周期的变化。在浙江南部和福建省，从北往南发生高潮的时间逐渐延迟，高潮间隙逐渐增加。在广东沿岸，发生高潮的时间（指分点潮而言）从东往西逐渐延迟。

1.5.3 潮差分布

我国沿海潮差分布总的趋势是东海最大，黄、渤海次之，南海最小^[36]。

渤海沿岸的平均潮差为 0.70~2.71 m，最大潮差为 2.45~4.37 m。秦皇岛和旧黄河口位于半日分潮无潮点区，潮差最小。

黄海沿岸的平均潮差为 0.79~3.71 m 最大潮差为 1.81~9.28 m。辽宁省南岸自旅顺向鸭绿江口潮差逐渐增大，丹东港平均潮差为 2.49 m 最大潮差为 4.46 m，朝鲜半岛的西岸潮差更大。山东半岛沿岸自烟台向成山角潮差逐渐减小。从成山角向南，再沿山东半岛向西至连云港，潮差逐渐增大。从连云港向南至射阳河口附近潮差又逐渐减小，向南又逐渐增大，到小羊口潮差最大，最大潮差 8 m 以上，吕泗为 7.20 m。

东海的潮差普遍较大，平均潮差为 1.65~5.54 m 最大潮差为 3.16~8.87 m。长江口附近潮差较小，杭州湾潮差最大，平均潮差为 5.54 m，澉浦最大潮差为 8.87 m。浙江宁波以南潮差由北向南逐渐增大，至福建三都澳潮差达最大，平均潮差为 5.35 m 再向南潮差又逐渐减少 至东山平均潮差为 2.29 m。

南海潮差较小，平均潮差为 0.73~2.48 m。汕头至湛江潮差由东向西逐渐增大 平均潮差为 0.90~2.17 m。海南岛以清澜为最小，平均潮差为 0.73 m。北部湾沿岸潮差由南往北逐渐增大，湾顶最大，石头埠的平均潮差为 2.54 m。西沙的平均潮差为 0.89 m 南沙为 1.51 m 左右。

1.5.4 江河口潮汐

我国入海的江河较多，较大的有鸭绿江、辽河、海河、黄河、长江、钱塘江、闽江、珠江等。由于受到洪水、流量、河床等因素的影响，江河的潮汐不同于海洋潮汐。

表 1.5.1 列出了钱塘江和长江的河口潮汐。杭州湾的地形呈喇叭形，湾口宽湾内窄，潮波进入湾内由于海湾逐渐变窄变浅，潮波能量集中使得潮差逐渐变大，至澉浦平均潮差达到 5.66 m。再往湾里，由于海湾急剧变窄变浅，潮波能量消耗太多使得潮差变小，至海宁平均潮差只有 2.38 m 七堡仅为 0.37 m。河口潮的涨潮时间短，落潮时间长，而且越往上游相差越大。杭州湾口的乍浦，平均涨潮时间为 5 h 24 min，平均落潮时间为 7 h 24 min 而海宁 平均涨潮时间仅为 2 h 2 min 平均落潮时间则为 10 h 23 min。从湾口至上游发生高潮的时间也逐渐延迟了。

杭州湾具有世界闻名的涌潮现象。潮波从东海传入杭州湾后，由于杭州湾特定的海底地形的影响，使得本来是连续的潮波波面产生了不连续面。在海宁观潮，当海面缓慢地降低到最低潮位时，见到一条上下翻滚的一二米高的垂直涌潮带吼鸣着从东方奔腾而来，水位突然升高 1 m 多，之后海面再较快地升高，2 h 后达到高潮再缓慢地下降，等待第 2 次涌潮的到来。

潮波从东海传入长江后，能传到上游很远的地方，长江口三条港的平均潮差为 3.11 m，南京为 0.45 m，远离长江口的芜湖也有 0.20 m 的平均潮差。潮汐能影响到芜湖，海水并不能到达芜湖。从长江口至芜湖，平均涨潮时间从 4 h 51 min 缩短为 3 h 48 min，平均落潮时间从 7 h 34 min 增加为 8 h 36 min。三条港的平均高潮间隙为 12 h 17 min，到堡镇为下一潮周期的 0 h 17 min，增加了 25 min。从三条港至芜湖，平均高潮间隙增加了 13 h 23 min，就是说潮波波峰从长江口传播到芜湖要经历 13 多个小时。

表 1.5.1 江、河的潮汐沿程变化统计表

河名	潮汐站名	平均潮差 (m)	最大潮差 (m)	平均涨潮历时		平均落潮历时		平均高潮间隙	
				h	min	h	min	h	min
钱塘江	乍浦	4.67	7.15	05	24	07	02	00	44
	澉浦	5.66	8.87	05	32	06	54	01	23
	尖山	5.44	5.73	03	44	08	42	01	34
	海宁	2.38		02	02	10	23	02	21
	七堡	0.37		01	59	10	22	04	25
	闸口	0.36		01	46	10	38	05	02
	窄溪	0.33		02	26	09	53		
长江	三条港	3.11	5.50	04	51	07	34	12	17
	堡镇	2.59	4.67	04	48	07	38	00	17
	高桥	2.42	4.39	04	44	07	41	00	07
	徐六泾	1.97	3.77	04	07	08	18	02	29
	天生港	1.90	3.62	04	01	08	21	03	41
	江阴	1.66	3.16	03	25	09	00	04	26
	镇江	0.95	2.14	03	15	09	10		
	南京	0.45	1.38	03	45	08	40		
	马鞍山	0.33	1.23	03	48	08	37	11	58
	芜湖	0.20	1.03	03	48	08	36	00	50

注 摘自文献 [36]

§ 1.6 潮流现象

海水在月球和太阳引潮力的作用下，除了能够产生潮汐现象外，还能产生周期性的水平运动，这种现象叫潮流。

海水的流动不仅有周期性的潮流，还有非周期性的风海流、密度流等海流。实际的潮流观测中所测的流向、流速是潮流和海流的总体。

潮流的流向是指海水流去的方向，向北流为 0° 向东为 90° 向南为 180° 向西为 270° 。流速以 cm/s , m/s , n mile/h 节为单位。

潮流以流向的变化可划分为旋转式和往复式两种。

1.6.1 旋转式潮流

在开阔的海域，潮流流向一般呈现旋转式变化。它不是指水质点的旋转，而是指不同时刻在同一地点潮流流向的旋转。北半球潮波在科氏力和海底地形的作用下波峰线一般呈逆时针方向旋转，而潮流流向可能呈逆时针方向旋转，也可能呈顺时针方向旋转。例如渤海湾及辽东湾潮流呈逆时针方向旋转，而渤海中部潮流呈顺时针方向旋转。

图 1.6.1 绘出了渤海中部偏北一点 1999 年 9 月 22 日 4 时至 15 时逐时的潮流矢量图 (图中记为 0, 1, ..., 11)，显示该点潮流呈顺时针方向旋转。半日潮流海区 平均在 $12\text{ h } 25\text{ min}$ 内旋转一周 流速也具有周期性的变化。一周内 流速两次达到最大流速，其流向大体相反，两次最小流速的方向也大体相反。对海区的特定地点，每天的最大流速方向大体一致，但其流速具有长周期的变化。

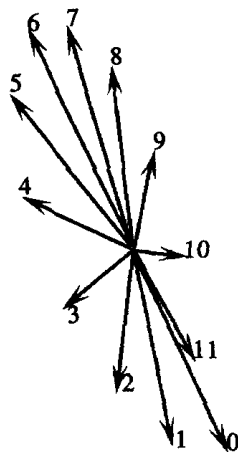


图 1.6.1 旋转流



图 1.6.2 往复流

1.6.2 往复式潮流

往复式潮流也称来往式潮流。在海峡、水道或狭窄的海湾内，受地形的影响，潮流不能旋转，而只能呈现往复式的变化形式。在半月潮流海区，半个周期（平均 6 h 12.5 min）内，潮流大体上向一个方向流动，而在另外半个周期内，潮流向相反的方向流动。潮流流速呈周期性的变化，一周期内两次达到最大流速。在两次潮流转向的时刻，流速很小，甚至流速为零，此时称为转流或憩流。图 1.6.2 是渤海海峡中部一点在一周期内的潮流变化图，大体上表现为往复流。

1.6.3 高、低潮与转流和最大潮流的关系

对于驻波变化形式的海湾区域，从低潮至高潮的涨潮期间，潮流向湾内流动。海面升至半潮面时，潮流流速达到最大。海面位于高潮和低潮时，流速为零，为转流时刻。从高潮至低潮的落潮期间，潮流向湾外流动，海面落至半潮面时，向湾外流动的流速达到最大。图 1.6.3 是通过潮流数值预报得到的辽东湾中部在一个潮周期内的潮位、流向、流速曲线图。从中可以看出，海面达到高潮和低潮时，流速很小，为转流时刻。海面处于涨潮中间时，潮流向辽东湾内流动，此时流速达到最大。落潮期间潮流向湾外流动，在落潮中间时刻潮流达到最大。

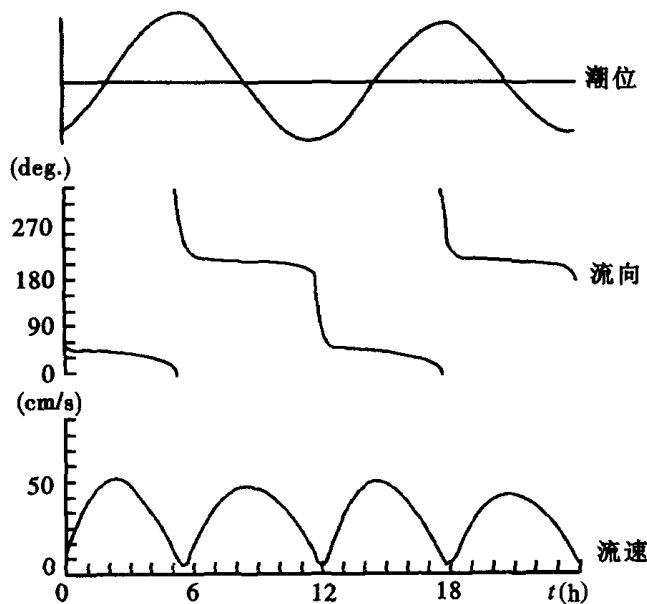


图 1.6.3 驻波海区的潮位、流向、流速曲线图

在前进波海区，海面位于半潮面之上时，潮流流向与潮波传播方向一致，为涨潮流。当海面达到高潮时，涨潮流流速最大。海面位于半潮面之下时，流向与潮波传播方向相反，为落潮流。海面达到低潮时，落潮流速最大。图 1.6.4 为辽东湾外东部一点的潮位、流向、流速曲线图。图中显示，该站的潮流流向随时间而增加，属顺时针方向旋转流。高、低潮之后 1 h 左右流速达到最大。

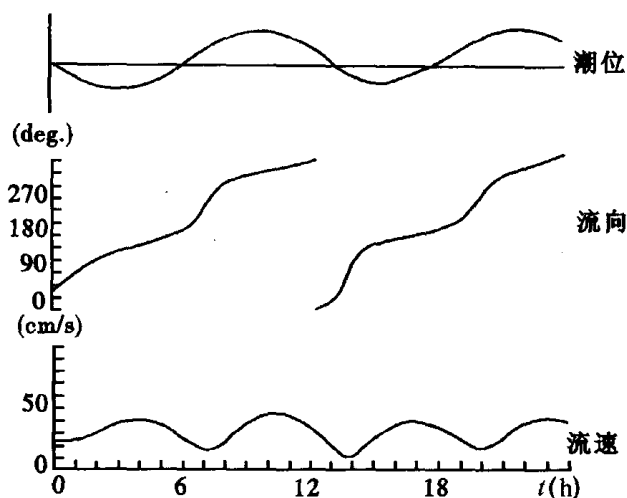


图 1.6.4 前进波海区的潮位、流向、流速曲线图

1.6.4 潮流类型

与潮汐分类的方法类似，潮流依据变化情况分为正规半日潮流、不正规半日潮流、不正规日潮流和正规日潮流 4 种潮流类型。图 1.6.5 和图 1.6.6 分别是 A、B 两站 1998 年 3 月和 6 月的北 (N)、东 (E) 分量的流速变化图。A 站是正规半日潮流 ($\frac{W_{K_1} + W_{O_1}}{W_{M_2}} = 0.30$)，B 站是不正规半日潮流 ($\frac{W_{K_1} + W_{O_1}}{W_{M_2}} = 0.65$)，式中的 W 是分潮流的平均最大流速。对正规半日潮流海区，一太阴日内发生两个周期的变化，出现两次最大涨、落潮流。两次最大涨 (落) 潮流的流速差别很小。而不正规半日潮流虽然在一太阴日内也有两次最大涨、落潮流，但潮流的日不等现象比较明显。不正规日潮流和正规日潮流依据一月之中每天出现一次涨、落潮流和二次涨、落潮流的天数来确定。

如图 1.6.5 和图 1.6.6 所示，半日潮流海区，在望 (○) 和朔 (●) 之后二三天出现大潮潮流，上、下弦过后出现小潮潮流，月球北赤纬最大 (N) 和月球南赤纬最大 (S) 之后几天潮流日不等现象最明显。月球赤纬为 0° 时，潮流的日不等现象最不明显。图 1.6.6 显示，6 月份太阳的赤纬最大，因此 6 月的潮流日不等

现象更为明显。在日潮流海区，回归大潮期间潮流最强。

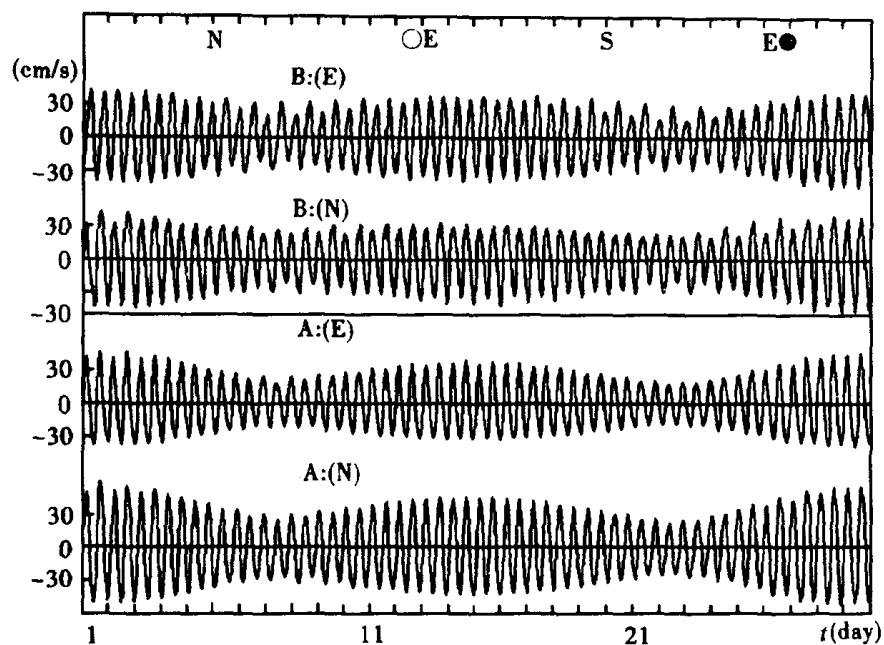


图 1.6.5 潮流北 (N)、东 (E) 分量曲线图 (1998 年 3 月)

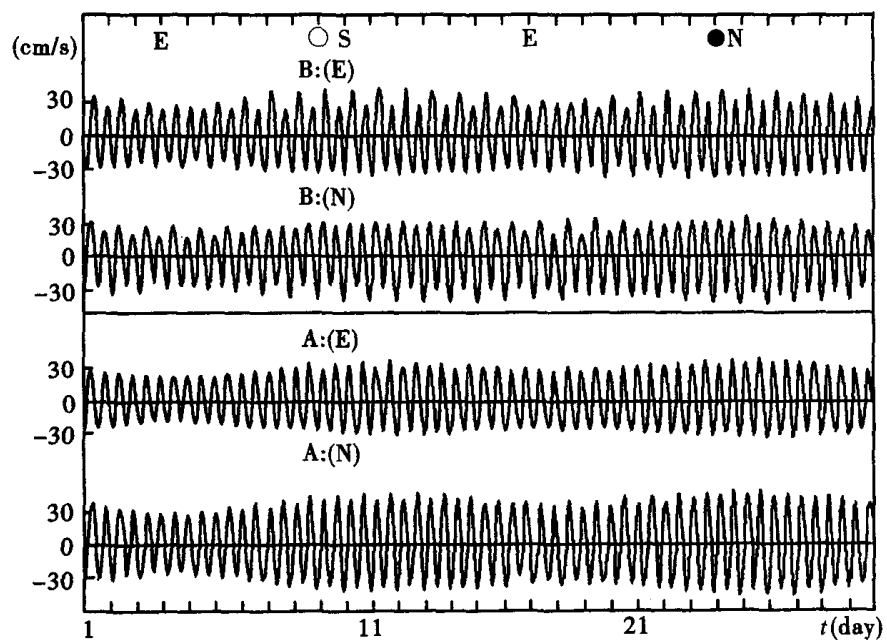


图 1.6.6 潮流北 (N)、东 (E) 分量曲线图 (1998 年 6 月)

渤海的辽东湾、渤海湾、莱州湾的西部为正规半日潮流，渤海中部为不正规半日潮流。而渤海大部分海区的潮汐为不正规半日潮。黄海北部及南黄海、东海沿岸为正规半日潮流，南海多为日潮流海区。

在渤海的秦皇岛外、旧黄河口外以及成山头外海域，虽然潮汐为正规日潮和不正规日潮类型，但潮流为正规半日潮流。而在烟台附近海域，情况恰恰相反，潮汐为正规半日潮，潮流却为正规日潮流和不正规日潮流，这是由于当地的潮波特性造成的，它的产生原因将在第 7 章讨论。

第 2 章 引 潮 力

本章讨论引潮力的产生原因及其计算，介绍一般天文常识^[52]和月、日运行轨道参量的计算。

§ 2.1 天文常识

太阳是太阳系的中心天体，离地球 1.5×10^8 km。太阳的半径等于地球半径的 109 倍 质量等于地球的 33 万倍。地球是太阳系的一个行星，同其他行星一样绕太阳转动。地球是接近球形的，略扁，赤道半径 6 378 km 极半径约短 21 km。

环绕太阳转动的较大的行星有 9 个，按照离太阳的远近，从近到远依次是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星。两头的比较小，中间比较大。最大的是木星，半径等于地球的 11 倍 地球在 9 个行星中位居第 5。行星绕太阳转动的轨道是椭圆，但接近于正圆形，只有水星和冥王星的轨道比较扁一些。行星的轨道几乎都是在同一平面上。

月球是地球惟一的卫星，它离地球只有 3.8×10^5 km 它的半径只有地球的 1/4。

太阳系所在的星系叫银河系，它包括 10^{11} 个以上的恒星，还有许多云雾状的星云。银河系的恒星和星云集中在一个扁扁圆圆的体积内，它的长径为 10^5 光年 短径为 10^4 光年。太阳位于离边缘约 23 000 光年 离中心约 27 000 光年的地方。因而我们观测天空各个方向的星数不一样多，沿着银河系对称面朝各个方向望去，显得星星特别多，像一条银河。银河系以外还有许许多多的星系，它们共同组成了一个称为总星系的巨大星系集团。总星系仍是有限的，有边界的。宇宙中包含有许许多多的总星系。

2.1.1 天球、黄道和白道

1. 天球

人们观察天空时，发现天空像一个巨大的半球。仰望星空时，感觉到在我

们头上高耸着一个半球形的圆顶，在它上面布满了无数闪闪发光的星星。由于所有的天体离我们太远了，我们的眼睛无法分辨它们的远近，感觉到它们都位于遥远的同一距离假想的球面上，人们将这一假想的球面称为天球，作为研究天体的视位置和视运动的辅助工具。由于天体的视位置是人们对于天体的视线在假想球面上的投影，所以这个假想球面的半径长度对我们来说无关紧要，因此天球可以描述为以适当点（例如地心）为球心、以任意长为半径的上面分布着我们所讨论天体的球面。

以地球中心作为天球中心，这样的天球被称为地心天球。在地心天球中将地轴无限延长与天球相交的两个点分别为北天极和南天极。将地球赤道面无限扩展与天球相交的大圆称为天赤道。通过天球中心和观测点作一连线无限延长与天球相交的两个点，一个恰好在观测者的头顶上，该点称为天顶，和天顶正相对的另一个交点位于观测者的脚下，称为天底。

2. 黄道

地球在一年中绕太阳公转一周，运动轨道是椭圆。如果以地球作为静止点，观测到太阳在一年之中沿椭圆轨道相对运转一周，将这个轨道面无限扩展与天球相交的大圆称为黄道。如图 2.1.1 所示，黄道面与天赤道面不相重合，两者的夹角为 $23^{\circ}27'$ ，太阳的视位置在黄道上运行，由南向北穿过天赤道的交点叫春分点 (Υ)，由北往南穿过的交点叫秋分点，黄道最北和最南面的点叫夏至点和冬至点。

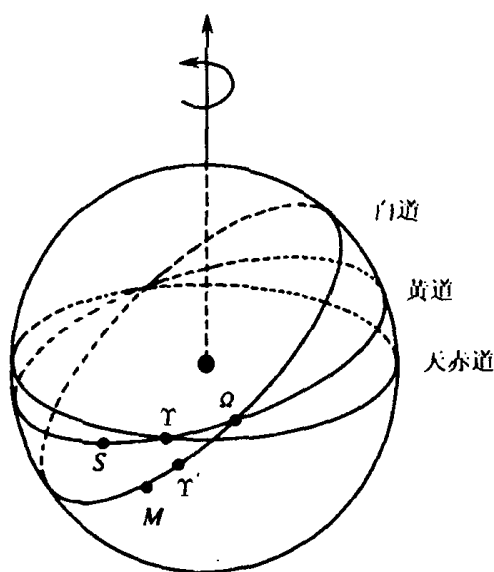


图 2.1.1 黄道与白道

3. 白道

月球绕地球运转的轨道是椭圆，将这个椭圆面无限扩展与天球相交的大圆称为白道。白道与黄道的交角在 $4^{\circ}57'$ 到 $5^{\circ}19'$ 之间变化，平均为 $5^{\circ}9'$ 。月球从黄道的南面向北穿过黄道的交点叫升交点 (Ω)，从北向南穿过黄道的点叫降交点。升(降)交点的位置是变化的，以 18.61 年的周期向西退行一周。当升交点与春分点重合时，白赤交角 (I) 等于黄赤交角 (ω) 加上黄白交角 (i) 约为 $23^{\circ}27' + 5^{\circ}9' = 28^{\circ}36'$ ，当升交点与秋分点重合时，白赤交角约等于 $23^{\circ}27' - 5^{\circ}9' = 18^{\circ}18'$ 。