

潮汐和潮流的分析和预报

*CHAO XI
HE CHAO LIU
DE FEN XI
HE YUBAO*

海洋出版社

潮汐和潮流的分析和预报

方国洪 郑文振 著
陈宗镛 王 骥

海 洋 出 版 社

1986年·北京

内 容 简 介

本书共分十五章，是作者们结合三十多年来从事潮汐和潮流研究工作和具体应用的成果写成的。内容上具有一定的特色，侧重于有效的新方法，同时也比较全面地介绍了国内外现有的方法。

第一章叙述了两千多年来国内外潮汐研究发展史以及潮汐潮流现象，第二章对引潮力及其各种展开式进行了系统的推导，并对引潮势、平衡潮和辐射势进行论述，第三章至第五章较全面地论述了潮汐和潮流调和常数的计算，系统地介绍了长期、中期和短期的各种分析计算方法，第六章和第七章分别介绍了潮汐谱分析和潮汐特征值的计算，第八、九章叙述海平面和深度基准面的应用和计算，第十、十一章介绍了潮汐和潮流的预报方法和应用问题，第十二、十三章论述了潮波运动和数值计算方法，第十四章论述了大洋潮汐的理论、分布和特点，第十五章介绍了固体潮理论值计算的三种方法。

本书可供海洋工作者从事理论研究和实际工作之用，也可供军事院校、科研、交通、水电、能源、航海、水产、盐业、测量和港工建设等有关部门科学技术人员参考和应用。

责任编辑：王小南

责任校对：刘兴昌

潮汐和潮流的分析和预报

方国洪 郑文振 著
陈宗镛 王 骥

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街1号）
新华书店北京发行所发行 国防科工委印刷厂印刷
开本：787×1092 1/16 印张：30 1/8 字数：740千字
1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷
印数：900册

统一书号：13193·0607 定价：8.90元

版权所有·不得翻印

前 言

解放后，由于党和国家的重视和有关部门的密切配合，以及从事潮汐和潮流工作的全体同志们的努力，使潮汐潮流工作的研究和应用得到了迅速的发展和提高。

潮汐潮流研究与国防建设、航运交通、海洋资源开发、能源利用、环境保护、海港建设和海岸防护等关系很密切；而潮汐学又是物理海洋学中的重要分科之一，所以美、英、苏、日等海洋国家对潮汐潮流的理论研究和分析预报都很重视。

近二十年来，由于电子计算机在潮汐潮流工作中的应用，使国际上潮汐潮流分析预报工作的面貌有了很大的变化。首先，它能以极快地速度得出分析和预报的结果；其次是使计算方法的设计摆脱了繁重的计算量的限制，而把注意力集中在如何提高分析和预报的准确度上；同时它使潮汐潮流的数值解法蓬勃发展起来，为大面的潮汐和潮流的计算和预报提供便利条件。

我国潮汐潮流工作者经过多年的努力，不但在应用国际先进方法的过程中积累了丰富的经验，而且提出一些具有一定特色的方法。为适应我国四个现代化建设的迫切需要，当前总结国内外的先进经验对于今后进一步发展我国的海洋科学是很有意义的。

潮汐学是一门与天文学、数学、物理学和流体力学密切相关的综合性学科，因此，本书中所引用的符号很多，且其中许多符号在不同的章节有不同的含义。如 g 通常表示重力，但在潮汐分析和预报中却代表格林威治迟角； u 在调和分析和预报中代表交点订正角，但在潮流中却代表北分量。象这些符号，在潮汐文献中大多是习惯沿用下来的，有的是临时采用的，希望读者注意。

本书中的一些附表或表中的数值计算工作，是由杨景飞、于庆武、张锦文和焦宗风同志帮助计算的。书中的绘图工作是由刘天华、张金生、张秀良、许培全和张增辉同志完成的。作者对他们表示衷心的感谢。

本书各章（或节）的作者在目录中分别署名。限于我们水平，书中难免有许多缺点和错误，希望读者提出批评和指正。

作 者

1980年6月

目 录

第一章 潮汐研究简史和潮汐潮流现象	郑文振 (1)
§1.1 潮汐研究简史.....	(1)
§1.2 潮汐现象.....	(7)
§1.3 潮汐的类型.....	(9)
§1.4 不等现象.....	(11)
§1.5 潮流现象.....	(15)
§1.6 高潮和低潮与转流的关系.....	(17)
§1.7 潮流的垂直分布.....	(18)
第二章 引潮力及其展开	方国洪 (21)
§2.1 有关的天文学基本知识.....	(21)
§2.2 引潮力.....	(26)
§2.3 引潮力的第一展开式.....	(30)
§2.4 引潮力的第二展开式.....	(33)
§2.5 引潮力的第三展开式.....	(36)
§2.6 引潮力的第四展开式.....	(46)
§2.7 引潮势和平衡潮.....	(52)
§2.8 辐射势.....	(55)
第三章 调和常数的计算·长期观测的分析	(58)
§3.1 实际潮汐分潮和分潮的调和常数.....	(58)
§3.2 潮流的调和常数和椭圆要素.....	(63)
§3.3 最小二乘法及其在潮汐分析中的应用.....	(67)
§3.4 潮汐分潮的选取与观测记录的时间间隔及观测时段长度的关系.....	(75)
§3.5 交点因子和交点订正角.....	(83)
§3.6 观测数据的平滑、间断记录的处理和不合理数据的舍弃.....	(88)
§3.7 对一年观测记录做调和分析的实际步骤.....	(93)
§3.8 多年观测记录的分析,不同来源分潮的分离.....	(96)
第四章 中期观测资料的分析	(101)
§4.1 中期观测资料分析的电子计算机方法.....	王 骥 (101)
§4.2 达尔文调和分析法原理.....	郑文振 (108)
§4.3 达尔文调和分析法实例.....	(112)
§4.4 一个月观测资料分析的半图表法.....	王 骥 (130)
第五章 短期观测的分析	方国洪 (161)
§5.1 准调和分潮.....	(161)
§5.2 潮族的分离.....	(168)

§5.3	用不引入差比关系方法计算调和常数	(175)
§5.4	用引入差比关系的方法计算调和常数	(183)
§5.5	直接最小二乘法	(192)
第六章	潮汐谱分析	陈宗鏞 (201)
§6.1	概述	(201)
§6.2	频谱分析的若干基本知识	(201)
§6.3	傅里叶分析	(208)
§6.4	杜德森谱分析	(209)
§6.5	浅水潮汐的充分分析	(211)
§6.6	响应分析(感应分析)	(212)
第七章	潮汐特征值的计算方法	王 驥 (216)
§7.1	潮汐特征值	(216)
§7.2	规则半日潮港潮汐特征值的计算	(218)
§7.3	不规则半日潮港和不规则日潮港潮汐特征值的计算	(224)
§7.4	规则日潮港潮汐特征值的计算	(232)
§7.5	计算实例	(233)
§7.6	潮位频率分布的统计和计算方法	(249)
§7.7	乘潮水位频率分布的统计和计算方法	(254)
第八章	海平面	郑文振 (268)
§8.1	平均海平面	(268)
§8.2	精确的平均海平面所需观测年数	(268)
§8.3	用最小二乘法求平均海平面	(270)
§8.4	平均海平面的变化	(272)
§8.5	平均海平面在长期地震预报中的应用	(276)
§8.6	验潮站的有效距离	(277)
第九章	海图深度基准面	(282)
§9.1	各国所采用的海图深度基准面	(282)
§9.2	可能最低潮面(理论深度基准面)和最高潮面的计算	(283)
§9.3	近最低潮面	王 驥 (296)
第十章	潮汐和潮流的预报	(319)
§10.1	主港潮汐预报的调和方法	(319)
§10.2	浅水潮汐预报方法	(324)
§10.3	附港潮汐推算的比较法	(330)
§10.4	由高、低潮求任意时潮高的方法	(335)
§10.5	潮流预报的调和方法	(342)
§10.6	半日潮流图	郑文振 (344)
§10.7	潮流的永久性大面预报方法	王 驥 (347)
第十一章	潮汐和潮流的应用	郑文振 (359)
§11.1	潮汐潮流的应用	(359)

§11.2	航海用潮汐(潮流)推算法	(360)
§11.3	平均高潮间隙和潮高改正表的应用	(364)
§11.4	简单推算半日潮汐(潮流)方法	(365)
§11.5	大潮流速换算任意日流速的原理和表的编制	(366)
第十二章	潮波运动	陈宗鏞 (369)
§12.1	概述	(369)
§12.2	潮波运动	(370)
§12.3	协振潮波	(372)
§12.4	考虑摩擦的潮波运动	(377)
§12.5	海湾副振动	(381)
§12.6	潮汐摩擦与潮能消耗	(382)
§12.7	浅水潮波	方国洪 (383)
第十三章	潮波数值计算	(388)
§13.1	概述	陈宗鏞 (390)
§13.2	边值方法	(390)
§13.3	初值方法的两个显有限差分格式	方国洪 (392)
§13.4	初值方法的一个隐有限差分格式	(402)
§13.5	有限元法	陈宗鏞 (405)
第十四章	世界海洋的潮汐	(407)
§14.1	概述	(407)
§14.2	经典大洋潮汐理论	(408)
§14.3	大洋潮波分布图	(410)
§14.4	近年来的大洋潮波数值模拟	(413)
§14.5	关于海洋潮汐成因的探讨	(420)
§14.6	世界海洋潮汐的主要特点	(421)
第十五章	固体潮理论值的计算	郑文振 (422)
§15.1	理论值计算第一方法	(422)
§15.2	理论值计算第二方法	(425)
§15.3	理论值计算第三方法	(426)
附表		
附表1.	基本天文数据	(431)
附表2.	引潮力的杜德森展开式	(432)
附表3.	辐射势分量	(439)
附表4a.	主要分潮表	(440)
附表4b.	基本分潮的 f , u 计算式	(443)
附表5.	1901—2100年1月1日格林威治零时基本天文元素值	(444)
附表6a.	各月1日零时对1月1日零时的基本天文元素校正值	(446)
附表6b.	各日零时对1日零时的基本天文元素校正值	(447)
附表6c.	一天各时刻对零时的基本天文元素校正值	(447)

附表7a.	1901—2100年1月1日格林威治零时基本分潮的 <i>f</i> 值	(448)
附表7b.	1901—2100年1月1日格林威治零时基本分潮的 <i>u</i> 值	(452)
附表8.	潮流椭圆要素计算用表	(456)
附表9.	由 <i>N</i> 查出 <i>I, v, ξ, v'</i> 与2 <i>v''</i> 各值	(469)
附表10.	$3.84\left(\frac{1}{\rho}\right)^3$ 和 $3.71\left(\frac{1}{\rho}\right)^3$ 之值	(471)
参考文献		(472)

第一章 潮汐研究简史和潮汐潮流现象

§1.1 潮汐研究简史

潮汐现象与人类有着密切的联系，它对人类从事海上生产和军事活动都有很大的影响，尤其是居住在沿海的人民，这种体会就更加清楚和深刻。人类对潮汐的认识已有悠久历史，有文字记载可追溯到两千多年以前，在劳动人民长期实践经验的基础上，通过科学家们不断进行观测和总结提高，对于潮汐的研究取得了较大的进展，发展到现在的水平。

一、我国古代对潮汐的认识和研究

我国古代人民对潮汐现象的了解和兴趣比欧洲人早，而且有较深刻的认识。我国近海沿岸的潮汐现象相当显著，浙江、福建、山东、江苏沿海和长江口附近的潮差较大，钱塘江的涌潮，闻名于世，且这些海岸的潮汐大多数是较有规则的半日潮港，人们较容易认识和掌握它的变化规律。我国很早就采用夏历(阴阳历)，就是一般人所谓农历¹⁾，它为我国古代人民观测推算潮汐提供了依据。我国古时就知农历八月十八日为钱塘江的观潮佳节。而在欧洲的地中海潮汐较微弱，因而未能引起当时人们的注意。

我国古代的人们就注意了潮汐现象，把潮汐比喻为地球的脉搏；地球的呼吸等。

随着人们对自然现象认识的提高，对潮汐现象的认识也由浅入深，由表及里，逐渐对潮汐规律和成因有了较正确的认识，了解到它与农历和月亮、太阳的关系。

公元前二世纪，西汉枚乘(卒于公元前140年，江苏淮阴人)著《七发》，从这篇文章可看出他已经知道农历八月之望的时候，能够看到十分壮观的海潮。

东汉科学家王充(公元27—约97年，浙江上虞人)所著的《论衡》，先批驳了伍子胥死后冤魂驱波逐浪怒吼而形成钱塘江涌潮的迷信故事，然后写道：“涛之起也，随月盛衰，小大满损不齐同。”他第一次清楚地指出潮汐对月亮依赖关系的科学论断，这是潮汐史上的重大发现。

和王充同时代的华信，在公元84年至87年间任钱塘江地区的地方官，他组织建造了坚固的钱塘江海堤，这是我国劳动人民预防自然灾害的先例。

三国时，吴国科学家杨泉在《物理论》中写道：“月，水之精，潮有大小，月有盈亏。”他以月属水之精华，把潮汐的大小与月亮的盈亏相联系。

东晋葛洪(约284—364年，江苏句容人)在《抱朴子》中说：“潮者，据朝来也；汐者，据夕至也。”清楚地指明了一天有两次潮的现象。他还说：“涛水者潮。取物多者其力盛，来远者其势大。今浙水从东来，地广道远，乍入狭处，陵山触岸，从直赴曲，其势不泄，故隆崇

1) 阴阳历是很重视月相盈亏的变化，月是符合阴历月的天数，又照顾寒暑节气的历法，年是符合阳历年的天数，所以叫做阴阳历。

涌起而为涛。俗人云：涛是子胥所为，妄也。”他指出“涛”就是潮。且较正确地部分解释了钱塘江涌潮是因海潮从外海传来经过狭浅的江口造成水势迅猛堆积而形成的。然后指出伍子胥冤魂激起涌潮的传说是荒谬的。

唐时河北省景县人封演，天宝（742—755年）末进士，在他著的《见闻记》中写道：“余少居淮海，日夕观潮，大抵每日两潮，昼夜各一。假如月出潮以平明，二日、三日渐晚，至月半则月初早潮翻为夜潮，夜潮翻为早潮矣。如是渐转至月半之早潮复为夜潮，月半之夜潮复为早潮。凡一月旋转一匝，周而复始，虽月有小大，魄有盈亏，而潮常应之，无毫厘之失。月，阴精也，水，阴气也，潜相感致，体于盈缩也。”

封演通过对潮汐的长期观测，精确地得出每一太阴月的高潮时的逐日变化，潮汐的时间与月相没有毫厘之失的密切关系。并且指出了月亮与潮汐现象之间存在着相互作用的关系，表现出海水有涨落的变化。

窦叔蒙是唐朝宝应（762年）、大历（766—779）年间（公元八世纪的中后期）科学家，浙东人。他的《海涛志》据欧阳修《集古录》所载，在北宋时，其文已不多见。现只见传抄引用，这是从清代俞思谦的《海潮辑说，1781年》中引出窦氏的论涛数和论涛时的主要内容：

“论涛数 涛之潮汐，并月而生，日异月同，盖有常数矣。盈于朔望，消于朏魄，虚于上下弦。……积日二千八百九十九万二千六百六十四，积涛五千六百二万一千九百四十四也。”¹⁾

论涛时 涛时之法，图而列之。上致月朔、朏、上弦、盈、望、虚、下弦、魄、晦。以潮汐所生，斜而络之，以为定式，循环周始，乃见其统体焉，亦其纲领也。”

窦叔蒙在潮汐次数的讨论方面，指出了海上的潮汐，是由月亮的运行而产生的，每天的涨落潮时间是不相同的，每月的潮汐是相同的，所以有一定的规律性。大潮发生在朔（初一）望（十五），朔望后三日以后就逐渐减小了，小潮发生在上下弦时候。由他说出的日数与潮汐次数的关系，我们可以算出高潮至下一次高潮时的平均时间间隔为12时25分14.02秒，下一天的高潮时约平均推迟时间是50分28.03秒，这两个数字与我们现在通用的12时25分和50分是一致的。这样，窦氏的一个平均太阴日为24.8411207时（等于24时50分28.03秒）与现代计算的数值24.8412024时（24时50分28.33秒），是十分接近的。在1200多年以前就能计算得如此精确，实属很难想象，由此可看出窦氏对潮汐的观测和研究水平是很高的。

关于高（低）潮时刻的推算方法，窦氏提出了每个朔望月的“图表法”，是我们迄今所能收集到的世界上最早的有关潮汐预报方法的文献，比欧洲最早的大英博物馆所藏的手稿所载明的“伦敦桥潮候表”时间（十三世纪）约早四百多年。

从晚唐时卢肇的《海潮赋》（850年）里知道，当时已经使用了《涛志》，相当于现在的潮汐表，列出高潮和低潮的时间。他在《海潮赋》中写道：“夫潮之生，因乎日也，其盈其虚，系乎月也。”和“海潮之生兮自日，而太阴裁其大小也。”卢肇认为太阳是潮汐产生的原因。由现代的科学知道，潮汐的产生原因，月亮的作用是主要因素，太阳作用次之，所以太阳与潮汐是有关系的。卢肇把产生潮汐的次要因素说了《海潮赋》中的类似论点，受到了后人的驳斥，可能是由于主次原因颠倒所致。

张君房是宋代湖北安陆县人，景德年间（1004—1007年）进士，曾任钱塘（今杭州）知

1) $(28\ 992\ 664 \times 24) + 56\ 021\ 944 = 12.42056034\text{时} = 12\text{时}25\text{分}14.02\text{秒}$ 。

县。清代俞思谦的《海潮辑说》中有关张君房《潮说》中的主要内容有：

“唐大历（766—779年）中，浙东窦叔蒙撰《海涛志》凡六章，详覆于潮，最得其旨。诸家依约而言，皆不适其妙也。然多假立过当之法（谓以朔望譬诸相将之类），敷致臆述之言（谓积涛五千六百二万一千九百四十四之类），远不探月之宫分（月一日行十三度差，而一月一周天，潮即随之而应之），近不识日之辰刻（凡潮一日行三刻三十六分三秒忽，差二日半行一时，一月一周辰位，与月之行度相准），……”

今循窦氏之法，以图列之，月则分宫布度，潮则著辰定刻，各为其说。行天者以十二宫为准，泛地者以一百刻为法。……”

由上面的材料看出，张君房对窦叔蒙的《海涛志》的评价。张君房首先肯定了窦氏对潮汐的详细研究，并指出后来研究潮汐的人虽然按照窦氏的观点论述，但却没有真正懂得其要领。

同时张君房还指出《海涛志》中也有一些不当之处（如以朔望譬为将相之类）和臆断的推测（如累积高（低）潮次数为五千六百二万一千九百四十四之类）。这里须指出 窦氏的累积高（低）潮次数与积日的计算问题经验算是很精确的，所以张君房在这一点上的说法是不对的。

窦叔蒙说：“日月差互，月差十三度，日差迟月，故涛不及期。”张君房发展了窦氏的观点，明确写出：“凡潮一日行三刻三十六分三秒忽，差二日半行一时，一月一周辰位，与月之行度相准。”张氏第一个提出了具体时间数据，潮汐每隔一天推迟三刻三十六分三秒多，也就是每天高潮时推迟48.4分钟多（我国古时是用一日以12个时辰共有100刻，而不是现在的96刻，所以古时一刻约等于现在的14.4分， $3.363 \times 14.4 = 48.4$ 分），两天半约推迟二小时，一个朔望月便推迟24小时，所以每月初一的潮时大约相同，也就是每月同农历日期的潮汐约相同。

张君房改进了窦氏的每个朔望月的高（低）潮时的“图表法”，他提出了月相一栏横列按十二宫次度数来表明，潮时竖行按十二个时辰一百刻计算列出。这样可使时间更为具体和准确些。

北宋著名科学家燕肃（961—1040年），山东益都人，他在广西、广东和浙江任职期间，很重视潮汐的实际观测，在长达十年之久的观测中，得出了一些正确的结论，后来在浙江明州（今宁波）任内绘制了《海潮图》，并著有《海潮图论》。在《海潮图论》中提出了“潮汐随日而应月，依阴而附阳”的见解，这就找出了引起潮汐的两个主要的因素——月球和太阳。同时他还说道：“今起月朔夜半子时，潮平于地之子位四刻一十六分半，月离于日，在地之辰，次日移三刻七十二分，对月到之位，以日临之次，潮必应之。…以月临子午，潮必平矣。月在卯酉，汐必尽矣。或迟速消息又小异，而进退盈虚，终不失于时期矣。”燕肃的这段话指出宁波附近的潮汐情况：初一夜半子时（夜间11时至1时）开始，潮汐在子位4.165刻为高潮时（ $4.165 \times 14.4 = 60$ 分），也就是初一日的零时为宁波附近的高潮时，由于每隔一天月中天推迟了，在第二天要推迟三刻七十二分才达到月中天，所以潮汐也要推移3.72刻（ $3.72 \times 14.4 = 53.568$ 分），才为次日的高潮时，也就是宁波附近在初二日的高潮时为0时54分，初三日为1时47分。……当月球在子时（约在半夜）或午时（中午）接近中天时，一定会达到大潮高潮，当月球在卯时（约午前6时）或酉时（约午后6时）附近中天的时候，一定是小潮高潮。在时间上可能稍早一点或稍迟一些，但整个来说，潮汐的涨落和大小是不会错过时间

的。燕肃通过长期的潮汐实际观测，总结了经验和当时知识，对潮汐的成因和变化规律都作了较正确的论述。

余靖（1000—1064年）是北宋广东曲江人。他在东海、南海海边进行了长期的潮汐观测和研究，写出了《海潮图序》，现将其要点摘录如下：

“潮之涨退，海非增减，盖月之所临，则水往从之。……故月临卯酉，则水涨乎东西，月临子午，则潮平乎南北。彼竭此盈，往来不绝，皆系于月，不系于日。”

余靖指出潮汐虽有涨落，但海水是没有增减的，而是由于月亮的运行而使海水随之运动。…当月亮到达卯位（东方）或酉位（西方）时，海水相应地在东方和西方为高潮，月亮在子位或午位时，海水相应地在南北方为高潮。那边的潮水退落，这边的潮水涨高，来往循环不止，都与月亮的运行相关的。这段话成为后世论潮汐的名言。

北宋著名科学家沈括（1031—1095）撰的《梦溪笔谈》有下面的一段话：“予尝考其行节，每至月正临子午则潮生，候之万万无差。此以海上候之，得潮生之时，去海远，则须据地理增添时刻。”

沈括对潮汐作了大量的观测和研究，发现每当月亮上（下）中天时就达到高潮，如在海面上等到这个时刻，高潮就到来。离海远的地方，就必须按地点的不同而推迟高潮时间。

沈括是杭州人，杭州附近海域的高潮时就在月中天时刻附近，从此可以看出沈括总结的是杭州附近海域的潮汐情况。由于潮波传播溯江而上，离海越远时间越推迟。沈括晚年又居江苏镇江，镇江在长江口上游，潮波传播由长江口上溯镇江，镇江的高潮时的比长江口迟到8小时左右，沈括所说的“去海远，即须据地理增添时刻”是与实际潮波传播情形相符合的。根据沈括的这个经验，可以这样认为：现在的潮汐表中副卷的“潮时差”，它可以预报副港（次要港口）的潮汐，有相类似的。

由于杭州湾的高潮时在月中天附近，故也可认为“去海远，即须据地理增添时刻”这句话的“添时刻”与现今的“高潮间隙”的概念有相一致之处。

朱中有是南宋嘉定（1208—1224）间福建同安人，生卒年历不详，他少时生长在海滨，且往来钱塘江有五十年之久，在他的《潮赋》中驳斥了卢肇《海潮赋》中的一些错误论点，且对钱塘江涌潮的形成和过程作了详细的描述和深入的研究，对一个月潮汐的变化，八月和二月特大潮汐都作了较正确的叙述。他还指出：“盖遭遇巨风之顺，则推之而来，后浪拥前，故忽大而且久不退。…癸未九月二十七、八日，东北大风，庆元城外松江平地潮上二丈余。”这段话明确指出，如涨潮时遇巨风顺刮着，后浪推前浪，就使潮变大，且能使退潮时却不退。…在1223年农历九月二十七、八日，东北大风，宁波城外甬江平地潮汐上涨二丈余。朱中有已知道巨风对潮汐的影响很大，虽是小潮期间顺着的巨风也能使潮汐上涨二丈余。

综上所述，我国潮汐表编制的萌芽，显然早于西方，至少我国可追溯到八、九世纪。在唐代和宋代，我国对潮汐的认识水平是相当高的，对潮汐的研究达到了我国历史上的高峰，即在文艺复兴时期以前，我国在对潮汐的认识和实践方面都比欧洲人先进得多。

意大利著名物理学家、天文学家伽利略（1564—1642年）曾驳斥开普勒（1571—1630年）的月球影响潮汐说，竟说月球影响说是一种占星术学说，这是伽利略对潮汐的错误认识。直到牛顿（1642—1727年）的时代，用万有引力说明潮汐现象的理论才完成，并为大家所接受。…

二、潮汐科学发展的概略回顾

尽管中外古代科学家对潮汐现象有卓越的见解，但是第一个给出这个现象的科学解释，并奠定这个学科坚实的科学基础的是英国科学家牛顿，他发现了万有引力定律，并且用这个定律解释地球的潮汐现象，获得了巨大成功。在著作《自然哲学的数学原理》中，牛顿得出在某些理想的条件下，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，这就解释了为什么在地球上存在着潮汐现象以及为什么绝大部分地点一天有两个潮的现象，同时由于天体的偏离赤道，解释了日潮不等现象。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的距离的三次方成反比，由此算出月球的引潮力比太阳的引潮力大，解释了为什么实际的潮汐变化与月球运动有更密切的关系。由月球和太阳的位置关系可以解释大潮和小潮的现象等。

平衡潮学说解释了实际潮汐的许多最基本的现象，但是，实际海洋的情况远非如此简单，有许多现象与平衡潮是不符合的。牛顿当然也意识到平衡潮这样处理方法是粗糙的，他指出海水的惯性必然会引起平衡潮的改变。

把科学的潮汐理论向前大大推进进一步的是一个世纪之后的法国著名科学家拉普拉斯(1775, 1776)。他第一个用流体动力学的观点研究海洋中的潮汐，他所建立的描述潮汐运动的方程，至今仍是潮汐动力学的基本方程。当然他的方程被后人作了若干修改和补充，例如考虑了摩擦，地壳潮汐对海洋潮汐影响等等，但基本面貌并未改变。从他导出这个方程至今的二百年间，潮汐动力学的研究历史实质上都是设法求出这个方程在各种条件下的解。

拉普拉斯所研究的是最简单的情况。他假定地球完全为等深的海洋所包围，从而得到了微分方程的解。

拉普拉斯的功绩不仅在于建立了动力学的基础，而且对潮汐的分析也有巨大的贡献。他为了求解大洋潮汐，把潮汐分为半日潮、日潮和长周期潮三部分，实际上也就是把引潮力展开为在第二章将要给出的第一展开式。虽然他没有对引潮力作进一步展开，但已经指出，可以用余弦级数表示实际潮汐，有关的常数可以由观测值确定。这些概念实际上与后来的调和方法所依据的观点是一样的。

拉普拉斯之后的潮汐动力学大体上可以分成两个方向，一个是求解大洋潮汐，从而根本上解决潮汐的形成问题。本世纪六十年代以前，除了极个别的例外，都是把实际海洋的形状、深度等加以理想化而求其分析解，在这方面，19世纪的艾里(G. B. Airy, 1845)，霍夫(S. Hough, 1897, 1898)和本世纪的戈兹布拉夫(G. R. Goldsbrough, 1927, 1933)，杜德森和普劳德曼(A. T. Doodson and J. Proudman, 1936-1940)，朗格-希金斯(M. S. Longuet-Higgins, 1968, 1970)等都在求解简单形状大洋(如全球为海水所覆盖或以几条纬圈或子午线所围的海洋)的潮汐分布或特征频率方面作出了贡献。虽然所研究的海域是理想化的，但所得结果对于深入了解和解释实际大洋潮汐方面起到重要作用。

另一方面的工作是对较小尺度的海洋中潮波传播的研究。在这些研究中，科氏力被看作为常数，并允许采用直角坐标系。早在1879年，汤姆森(W. Thomson, 即后来的开尔文勋爵)研究了地转作用下无限恒深沟渠中的长波，得出了著名的开尔文波，二十世纪一十年代庞加勒(H. Poincaré)研究了更广泛的一类长波，稍后，泰勒(G. I. Taylor, 1920)得出了海湾和矩形海域中的潮波的解。陈宗镛(1965)、方国洪与王仁树(1966)及亨德肖特等

(M.C. Hendershott and A. Speranza, 1971) 以不同方式考虑了摩擦的影响对进一步了解边缘海的潮汐分布起着重要的作用。

在五十年代以前, 潮汐研究主要采用分析的方法, 自从电子计算机问世以后, 潮汐数值解法蓬勃发展起来, 并且成为潮汐研究中的一个重要的有力手段, 不过远在电子计算机出现以前, 在潮汐方面已经有人开始用数值方法求解微分方程了。最早可以追溯到本世纪一十年代的斯特尼克(R.V. Sterneck)和德范特(A. Defant), 那时他们给出了一维的潮汐方程的数值解法, 并且对一些狭长的海域进行了计算, 得到相当好的结果。二维潮汐数值计算始于汉森(W. Hansen, 1952), 那时他只用台式计算机对北海进行了计算。在电子计算机广泛应用之后, 由于数值计算允许考虑比较复杂的方程和边界状况, 用它来模拟实际的潮汐便要有效得多。六十年代末, 已经有许多人解算过实际大洋的潮汐。在前人许多成功和失败的经验基础上, 最近斯威德爾斯基(E.W. Schwiderski, 1980) 给出了大洋的相当良好的数值结果, 与实测比较, 偏差约在10厘米之内。对于边缘海或港湾、江河所进行的潮汐数值计算则更多, 并且能够得到相当良好的结果, 这些结果的准确度常常达到可以提供给实际应用的程度。我国自七十年代初以来, 方国洪、杨景飞等亦进行过这方面的工作, 取得一定的效果。随着大型计算机的利用, 数值计算将是大有可为的。

与潮汐动力学平行发展着的是潮汐的分析和预报。

在前面已经提到的中国古代在潮汐学上的成就, 那时所采用的方法都是将潮汐情况与天体运动直接建立相关关系, 后人把这类方法叫做非调和法。在国外, 最早运用非调和法的是英国的卢伯克(J. Lubbock, 1836)。在调和法出现之后, 这种方法就退居于次要的地位了。但是在我国民间, 由于农历与月球运动有密切关系, 非调和法却一直在应用着。

最早采用调和法分析和预报潮汐的是英国的汤姆森(即开尔文), 他在1868年设计了调和法, 并且在十九世纪七十年代发明了潮汐预报机。差不多在同一期间, 美国的费雷尔(W. Ferrel, 1874) 也独立地研究了调和法。

把调和法大大推向前进, 并使之有效地用于实际的是达尔文(G. Darwin, 1883—1886), 他把引潮力进一步进行调和展开, 得到了主要的潮汐分潮的频率, 并且设计了一套实用的分析方法, 他对各个主要潮汐分潮的命名至今仍在沿用。直到电子计算机应用于潮汐的前后, 他所给出的分析方法仍为许多国家所采用。稍后, 哈里斯(R.A. Harris, 1897—1907) 给出了许多有价值的公式和数据, 他还提出全球同潮时图的创造性见解。

杜德森(A.T. Doodson) 在进一步发展调和法方面有着突出的地位, 1921年他把引潮力进一步展开为纯调和的展开式, 引用了更精确的月球运动公式(称为布朗月理), 他计算的精度十分高。1928年, 他设计了一个非常巧妙的潮汐分析方法, 用尽量少的计算量可以得出60个分潮相当准确的调和常数, 这个方法常常被人们看作为一个标准方法并作为比较的依据。同时, 杜德森在解决潮汐分析和预报中的许多实际问题时, 作了大量的工作, 例如对中期(15天或29天)观测的分析, 短期(1或2天)观测的分析, 浅海港的高(低)潮分析等方面都提出了卓有成效的方法。除了杜德森之外, 还有许多学者得出了各具特色的分析方法, 其中有劳舍尔巴赫(H. Rauschelbach, 1924), 霍恩(W. Horn, 1948), 列柯拉泽(R. Lecolazet, 1956), 宫本(M. Miyazaki, 1958), 萨松斯(C.T. Suthons, 1959), 库尔美(G. Coulmy, 1961) 等。我国方国洪于1960年发展了杜德森的短期观测分析方法, 并用于我国潮流观测的分析(方国洪, 1974, 1976, 1981b)。

在电子计算机用于潮汐分析之前，科学家们都致力于减轻潮汐分析和预报的工作量，并且花了相当大的力气设计和制造机械的潮汐预报机。而电子计算机的应用则使潮汐学家们从计算的限制之下解放出来。他们可以不必花太多的精力考虑如何减少计算量，而主要致力于如何提高分析和预报的准确度。霍恩（1960年）大概是最早发表用电子计算机进行潮汐分析报告的潮汐学家。郑文振（1959）在《实用潮汐学》的第八章（应用潮汐调和常数推算潮汐表）和第十五章（潮流的预报）中都提出如采用电子计算机作潮汐潮流预报，则在极短时间就能作出多年的预报。中国国家海洋局海洋科技情报研究所中国科学院计算技术研究所的支持和协作下，于1964年前后开始用电子计算机分析和预报潮汐。

卡特赖特等（1971、1973）重新计算了引潮力的调和展开式，其结果和杜德森1921年的结果差别甚小。卡特赖特等（1963）还研究过利用傅里叶分析结果计算调和常数的方法，泽特勒等（B.D.Zetler and R.A.Cummings, 1967）和罗西特等（J.R.Rossiter and G.W.Lennon, 1968）则分别研究过浅海调和分潮，阿明（M.Amin, 1976）放弃了传统的交点因子的假设，对19年的观测资料进行了分析。国家海洋局海洋科技情报研究所王骥采用“相关法”预报浅海地区的潮汐，中国科学院海洋研究所方国洪、于克俊（1981）曾采用准调和浅海分潮表示潮汐的高频部分，预报浅海港口的潮汐，得出了较好的预报效果。

芒克（W.H.Munk）和卡特赖特于1966年提出了“响应法”，格罗夫斯等（G.W.Groves and R.W.Reynolds, 1975）对这个方法作了改进，此方法能够在一定程度上将不同原因引起的水位变化分离，因而在理论研究中特别有价值。

我国还对潮流预报应用进行了研究，缩减预报表篇幅，使多站多层的大面预报成为实际可能，编制了永久潮流预报图表集和潮流表等。

根据卡特赖特（1978）的统计，从牛顿时代到现在总共发表过3500多篇有关潮汐方面的文献。因此，实际上科学家们在潮汐方面的工作是大量的，远非简短回顾所能概括。

§1.2 潮汐现象

一、潮汐

地球上的海水，受到月球和太阳的作用产生的一种规律性的上升下降运动叫做**潮汐**。产生潮汐现象的主要原因是由于地球各点离月球和太阳的相对位置不同，因而各点所受到的引力也有所差异，这个差异便导致地球上海水的相对运动。这种引力差异叫做**引潮力**，由引潮力引起的海面升降叫做重力潮。另外，太阳辐射强度的周期性变化会引起气象条件的周期性变化，从而也能间接地引起海面的周期性升降，这叫做辐射潮。辐射潮通常比重力潮小得多。气象条件的非周期性的变化也能引起水位的非周期性升降，这种升降常称为增减水，当增减水系由风暴引起时称为风暴潮。潮汐运动完全决定于月球、太阳和地球的相对位置，而增减水则决定于天气条件。

在多数情况下，潮汐运动的平均周期为半天左右，每昼夜约有两次涨落运动，在我国古代，人们把白天上涨的称为潮，晚上上涨的称为汐，合称潮汐。现在已很少有人作这样的区分了，人们甚至简单地用“潮”字来代表潮汐现象。

引潮力和辐射强度的周期性变化也能引起地壳和大气中的潮汐运动，前者叫固体潮或地

潮，后者叫大气潮，而海中的潮汐就叫做海潮。由于海潮现象最容易为人们所观测到，与人类活动关系较密切，故如不特别指明，潮汐一词通常指的是海潮，本书所讨论对象主要也是海潮。

二、高潮和低潮

在潮汐升降的每一周期中，当海面涨至最高时，叫做高潮或满潮。当海面降至最低时，叫做低潮或干潮。

三、涨潮和落潮

从低潮到高潮的过程中，海面逐渐升涨为涨潮。自高潮至低潮，海面逐渐下落为落潮。

四、平潮和停潮

当潮汐达到高潮的时候，海面暂停升降，此时为平潮。在低潮暂停升降现象为停潮。平潮（停潮）时间的长短因地而异，几分钟或几十分钟，最长可达一、两小时以上。一般是取平潮（停潮）的中间时刻为高潮时（低潮时），但有些港口为了实用方便起见，也可以平潮（停潮）开始时为高（低）潮时。

五、潮差

相连的高潮与低潮的水位高度差，叫做潮差。潮差的大小因地因时而异。潮差的平均值，叫平均潮差。

六、涨潮时间和落潮时间

从低潮时至高潮时所经历的时间，叫涨潮时间。从高潮时至低潮时所经历的时间，叫落潮时间。

七、月中天

月球经过该地的子午线圈时刻，称当地月中天（或太阴中天），月球每天经子午线圈两次，离天顶较近的一次称为月上中天，离天顶较远的一次称为月下中天。

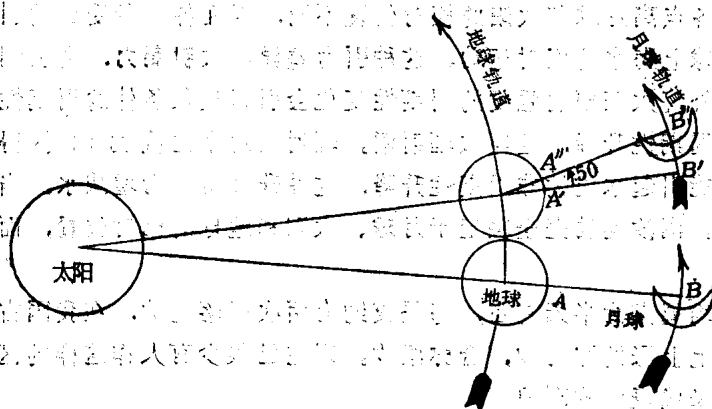


图1.1 月中天

地球绕太阳公转一周为一年，地球自转一周平均约需24时，月球绕地球公转一周需一月。如图1.1中，月球在B点时，地球上A点为月上中天，嗣后地球自转到A'点，但月球不在B'点，已经转到B''点，所以地球须再转到A''，才是第二次月上中天时，从A'至A''所需时间约50分钟，故从第一次月上中天时至第二

次月上中天时，就是一太阴日平均需时24时50分。既然今天的月上中天比昨天的月上中天时间迟50分钟，故今天的高潮（低潮）时就比昨天约迟50分钟，例如昨天高潮时为8时，则今天的高潮时便约为8时50分。

§1.3 潮汐的类型

上节提到，潮汐的周期一般是12小时25分，也就是半天左右，如某一港口的潮汐属于这种情况，称它为半日潮港。但是也有少数地区在大多数日子里每天只有一次高潮和低潮，即平均周期为24小时50分左右，这样的港口叫做日潮港。我国大多数港口是半日潮性质，但北部湾则是世界上少数的典型的日潮海区之一。还有些港口的潮汐情况则介于这两者之间，叫做混合潮港。实际上任何一个港口的潮汐变化中均包含有日周期的振动和半日振动两部分，这两部分振动的相对大小则决定潮汐类型。在实际应用中为了方便和统一，常常根据日分潮和半日分潮的振幅比划分潮汐类型。在下一章中将指出，在日分潮中最主要的是 K_1 和 O_1 两个分潮，在半日分潮最主要的是 M_2 分潮，在我国通常根据 K_1 和 O_1 两分潮的振幅之和对 M_2 分潮振幅之比值大小把潮汐划分成各种类型。

一、半日潮港

当主要的半日分潮的半潮差远大于日分潮的半潮差时，此海港便为半日潮。半日潮在每太阴日（24时50分）中有两次高潮和低潮，且两相邻高潮或低潮的时间间隔约为12时25分。

凡 $\frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} < 0.5$ 者，属于半日潮港，例如我国的厦门内港为 $\frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} = 0.23$ ，青岛为0.38，大沽为0.45，均为半日潮港。 $\frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}}$ 的比值越大，日潮不等现象越显著。有些港口的 $\frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}}$ 的比值虽然不大，可是该港的潮差较大，日潮不等也可能较大，如厦门当月赤纬最大时，低潮高不等可达1米左右，当夏、冬至附近的月赤纬最大的大潮时，低潮高不等可达1.5米左右。大沽的 $\frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}}$ 比值较大些，而潮差较厦门为小，日潮不等在夏、冬至附近的月赤纬最大的大潮时，低潮高不等也可达1.5米左右。

上面 H 为分潮的振幅（潮汐调和常数）， H_{M_2} 为主要太阴半日分潮 M_2 的振幅， H_{K_1} 为主要太阴太阳合成日分潮 K_1 的振幅， H_{O_1} 为主要太阴日分潮 O_1 的振幅， H_{S_2} 为主要太阳半日分潮 S_2 的振幅。

半日潮港尚可分为正规的半日潮港与非正规的半日浅海潮港。非正规的半日浅海潮港一般是在浅海或江河口，其主要特征是涨潮时间与落潮时间不相等，较常看到的是落潮时间比涨潮时间长的现象，例如我国的长江口下游和杭州湾的一些港口；也有一些港口的涨潮时间长于落潮时间，但这种类型的港口则为少数。