

“十三五”国家重点图书



湖北省学术著作  
Hubei Special Funds for  
Academic Publications 出版专项资金

海洋测绘丛书

# 海洋潮汐与水位控制

许军 暴景阳 于彩霞 阳凡林 著

Oceanic  
Surveying And Mapping



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



**许军** 男，1981年生，江苏盐城人，博士，毕业于海军大连舰艇学院海洋测绘系，现为山东科技大学副教授，硕士生导师。主要从事海洋潮汐、水位控制、精密潮汐模型与深度基准面模型构建等方面的研究与教学工作。主持国家级、省部级科研项目5项；以第一作者发表学术论文20多篇，出版专著2部；获得国家科技进步二等奖1项，省部级（或行业）科技奖励3项。

“十三五”国家重点图书



海洋测绘丛书

# 海洋潮汐与水位控制

许军 暴景阳 于彩霞 阳凡林 著

# Oceanic Surveying And Mapping



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

海洋潮汐与水位控制/许军等著. —武汉:武汉大学出版社,2020.10  
海洋测绘丛书  
“十三五”国家重点图书 湖北省学术著作出版专项资金资助项目  
ISBN 978-7-307-21556-6

I.海… II.许… III. ①潮汐变化—研究 ②水位变化—研究  
IV.①P731.34 ②P641

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 091135 号

责任编辑:杨晓露 责任校对:汪欣怡 版式设计:马 佳

---

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮箱:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北恒泰印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:12 字数:285千字 插页:1

版次:2020年10月第1版 2020年10月第1次印刷

ISBN 978-7-307-21556-6 定价:36.00元

---

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

## 学术委员会

主任委员 宁津生

委员 (以姓氏笔画为序)

宁津生 姚庆国 李建成 李朋德 杨元喜 杨宏山  
陈永奇 陈俊勇 周成虎 欧吉坤 金翔龙 翟国君

## 编委会

主任 姚庆国

副主任 李建成 卢秀山 翟国君

委员 (以姓氏笔画为序)

于胜文 王瑞富 冯建国 卢秀山 田 淳 石 波  
艾 波 姚庆国 刘焱雄 孙 林 许 军 阳凡林  
吴永亭 张汉德 张立华 张安民 张志华 张 杰  
李建成 李英成 杨 鲲 陈永奇 周丰年 周兴华  
欧阳永忠 罗孝文 胡兴树 赵建虎 党亚民 桑 金  
高宗军 曹丛华 章传银 翟国君 暴景阳 薛树强

# 序

现代科技发展水平，已经具备了大规模开发利用海洋的基本条件；21世纪，是人类开发和利用海洋的世纪。在《全国海洋经济发展规划》中，全国海洋经济增长目标是：到2020年海洋产业增加值占国内生产总值的20%以上，并逐步形成6~8个海洋主体功能区域板块；未来10年，我国将大力培育海洋新兴和高端产业。

我国海洋战略的进程持续深入。为进一步深化中国与东盟以及亚非各国的合作关系，优化外部环境，2013年10月，习近平总书记提出建设“21世纪海上丝绸之路”。李克强总理在2014年政府工作报告中指出，抓紧规划建设“丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”；在2015年3月国务院常务会议上强调，要顺应“互联网+”的发展趋势，促进新一代信息技术与现代制造业、生产性服务业等的融合创新。海洋测绘地理信息技术，将培育海洋地理信息产业新的增长点，作为“互联网+”体系的重要组成部分，正在加速对接“一带一路”，为“一带一路”工程助力。

海洋测绘是提供海岸带、海底地形、海底底质、海面地形、海洋导航、海底地壳等海洋地理环境动态数据的主要手段；是研究、开发和利用海洋的基础性、过程性和保障性工作；是国家海洋经济发展的需要、海洋权益维护的需要、海洋环境保护的需要、海洋防灾减灾的需要、海洋科学研究的需要。

我国是海洋大国，海洋国土面积约300万平方千米，大陆海岸线约1.8万千米，岛屿1万多个；海洋测绘历史“欠账”很多，未来海洋基础测绘工作任务繁重，对海洋测绘技术有巨大的需求。我国大陆水域辽阔，1平方千米以上的湖泊有2700多个，面积9万多平方千米；截至2008年年底，全国有8.6万个水库；流域面积大于100平方千米的河流有5万余条，内河航道通航里程达12万千米以上；随着我国地理国情监测工作的全面展开，对于海洋测绘科技的需求日趋显著。

与发达国家相比，我国海洋测绘技术存在一定的不足：(1)海洋测绘人才培养没有建制，科技研究机构稀少，各类研究人才匮乏；(2)海洋测绘基础设施比较薄弱，新型测绘技术广泛应用缓慢；(3)水下定位与导航精度不能满足深海资源开发的需要；(4)海洋专题制图技术落后；(5)海洋测绘软硬件装备依赖进口；(6)海洋测绘标准与检测体系不健全。

特别是海洋测绘科技著作严重缺乏，阻碍了我国海洋测绘科技水平的整体提升，加重了从事海洋测绘科学研究等的工程技术人员在掌握专门系统知识方面的困难，从而延缓了海洋开发进程。海洋测绘科技著作的严重缺乏，对海洋测绘科技水平发展和高层次人才培养进程的影响已形成了恶性循环，改变这种不利现状已到了刻不容缓的地步。

与发达国家相比，我国海洋测绘方面的工作起步较晚；相对于陆地测绘来说，我国海

洋测绘技术比较落后，缺少专业、系统的教育丛书，相关书籍要么缺乏，要么已出版 20 年以上，远不能满足海洋测绘专门技术发展的需要。海洋测绘技术综合性强，它与陆地测绘学密切相关，还与水声学、物理海洋学、导航学、海洋制图、水文学、地质、地球物理、计算机、通信、电子等多学科交叉，学科内涵深厚、外延广阔，必须系统研究、阐述和总结，才能一窥全貌。

基于海洋测绘著作的现状和社会需求，山东科技大学联合从事海洋测绘教育、科研和工程技术领域的专家学者，共同编著这套《海洋测绘丛书》。丛书定位为海洋测绘基础性和技术性专业著作，以期作为工程技术参考书、本科生和研究生教学参考书。丛书既有海洋测量基础理论与基础技术，又有海洋工程测量专门技术与方法；从实用性角度出发，丛书还涉及了海岸带测量、海岛礁测量等综合性技术。丛书的研究、编纂和出版，是国内外海洋测绘学科首创，深具学术价值和实用价值。丛书的出版，将提升我国海洋测绘发展水平，提高海洋测绘人才培养能力；为海洋资源利用、规划和监测提供强有力的基础性支撑，将有力促进国家海权掌控技术的发展；具有重大的社会效益和经济效益。

《海洋测绘丛书》学术委员会

2016 年 10 月 1 日

# 前 言

水深测量(水下地形测量、水下地貌测量等)是海洋活动与开发的基础,包括定位、测深与水位控制三个方面的工作。随着全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)技术与精密数字单波束测深仪、多波束测深系统以及涌浪仪、姿态传感器等的发展与应用,定位与测深方面的问题可认为已基本解决,或者说,这类问题的解决主要取决于仪器与配套技术的发展。水位控制在水深测量中的重要作用越来越凸显出来,主要体现在:一是水位控制的组织实施受人为因素影响很大,如验潮站的布设设计、水位改正方法选择等;二是中国近海是世界上潮汐变化最复杂的海域之一,潮差较大,实现高精度水位控制的难度相对较大。而目前普遍缺乏该方面的技术人才,这与教材或参考著作通常都侧重于海洋潮汐学理论或海域垂直基准理论等有关。

本书从海道测量对水位控制的应用需求出发,力求构建较完善的理论与技术方法体系,并在基础理论与技术方法间达到一种平衡:海洋潮汐基础理论部分是以理解海洋潮汐规律与分潮概念为目标,省略海洋潮汐学中关注的引潮力(势)展开方面的理论推导;在潮汐调和理论部分,按水位数据时长从长至短的顺序组织安排,以便于理解;在基准面确定部分,更侧重于技术方法的假设条件、应用背景等的论述,基础理论起解释作用;在水位改正方法部分,侧重于各种水位改正方法的分析,在理解其本质理论依据的基础上,再论述其应用问题。

本书作者一直从事水位控制的理论与技术方法方面的研究与教学,本书内容综合了作者的理解与实践经验,但限于水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2019年12月于大连

# 目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 海洋潮汐与水深测量的关系	1
§ 1.2 水位控制的工作内容	2
§ 1.3 本书的体系结构	2
第 2 章 海洋潮汐基础理论	3
§ 2.1 潮汐现象	3
§ 2.2 日、地、月的相对运动	4
2.2.1 天球的基本概念	4
2.2.2 太阳的运动和时间	6
2.2.3 月球的运动	8
2.2.4 天体间的公转	10
§ 2.3 引潮力与引潮势	11
2.3.1 引潮力	11
2.3.2 引潮势	12
§ 2.4 平衡潮理论	14
2.4.1 潮汐现象的解释	14
2.4.2 引潮力(势)的展开与分潮概念	18
§ 2.5 平衡潮与实际潮汐现象的关系	23
§ 2.6 实际潮汐分潮及其调和常数	25
2.6.1 调和常数的概念	25
2.6.2 气象分潮与浅水分潮	27
第 3 章 水位观测及潮汐分析与预报	28
§ 3.1 水位观测	28
3.1.1 验潮站的分类	28
3.1.2 水位观测方法	29
§ 3.2 水位的组成	34
3.2.1 天文潮位的表示	34
3.2.2 余水位的定义及其时空特征	35
§ 3.3 调和与分析最小二乘法的基本原理	37

3.3.1 基本原理	37
3.3.2 时间系统	38
§ 3.4 分潮选取与观测时间间隔及时间长度的关系	38
3.4.1 观测时间间隔的要求	39
3.4.2 时间长度的影响	40
§ 3.5 长期调和分析	42
3.5.1 交点订正	43
3.5.2 计算步骤详解	47
§ 3.6 引入差比关系的中期调和分析	49
3.6.1 中期调和分析的原理	49
3.6.2 计算步骤详解	50
3.6.3 调和常数的差分订正	51
§ 3.7 潮汐预报	53
3.7.1 潮位预报	53
3.7.2 高低潮预报	54
§ 3.8 潮汐类型与潮汐类型数	55
<b>第4章 垂直基准面的确定</b>	<b>57</b>
§ 4.1 垂直基准面的相对关系	57
§ 4.2 平均海面的确定	60
4.2.1 平均海面的定义	60
4.2.2 平均海面的稳定性	60
4.2.3 平均海面的传递	62
§ 4.3 深度基准面的确定	68
4.3.1 深度基准面的定义	69
4.3.2 深度基准面的稳定性	71
4.3.3 深度基准面的传递	73
§ 4.4 平均大潮高潮面的确定	79
4.4.1 平均大潮高潮面的定义	79
4.4.2 平均大潮高潮面的稳定性与传递	81
4.4.3 海岸线的定义	82
<b>第5章 水位改正数的计算</b>	<b>84</b>
§ 5.1 水位数据预处理	84
5.1.1 粗差探测与数据修复	84
5.1.2 零点漂移探测与修正	86
5.1.3 滤波	87
5.1.4 预处理步骤汇总	89

§ 5.2 传统水位改正方法	89
5.2.1 三角分区(带)法	90
5.2.2 时差法	93
5.2.3 最小二乘拟合法	97
§ 5.3 基于潮汐模型与余水位监控的水位改正法	99
5.3.1 基本原理	99
5.3.2 潮汐模型与潮汐动力学理论	100
5.3.3 中国近海的精密潮汐模型	101
§ 5.4 虚拟站技术	107
§ 5.5 基于 GNSS 技术的水位改正法	108
5.5.1 基本原理	108
5.5.2 应用条件	109
<b>第 6 章 潮汐特征值的计算</b>	<b>110</b>
§ 6.1 潮汐特征值	110
6.1.1 潮高类参数	110
6.1.2 时间类参数	111
6.1.3 与潮汐类型的关系	112
§ 6.2 潮汐非调和分析	112
6.2.1 潮龄	113
6.2.2 规则半日潮	113
6.2.3 不规则半日潮	115
6.2.4 不规则日潮	118
6.2.5 规则日潮	119
§ 6.3 累积频率的统计	120
6.3.1 累积频率	120
6.3.2 潮位、高潮与低潮累积频率	121
§ 6.4 乘潮水位频率的统计	123
6.4.1 乘潮水位	123
6.4.2 频率分布的统计	124
<b>第 7 章 水位控制的组织实施</b>	<b>126</b>
§ 7.1 基本步骤及其要求概述	126
§ 7.2 设计论证的方法	128
7.2.1 传统水位改正方法的实施条件及评估	128
7.2.2 基于潮汐模型与余水位监控法的实施条件及评估	131
§ 7.3 精度评估方法	136
7.3.1 平均海面传递的精度评估	136

7.3.2 深度基准面传递的精度评估 .....	137
7.3.3 水位改正数计算的精度评估 .....	139
<b>参考文献</b> .....	143
<b>附录</b> .....	146
附录 A 分潮信息 .....	146
A.1 杜德逊展开的分潮信息 .....	146
A.2 长期调和分析的分潮信息 .....	159
A.3 中期调和分析的分潮信息 .....	163
附录 B 水位数据的多项式拟合内插 .....	165
附录 C 中国大陆沿岸海域的潮汐变化特征 .....	165
C.1 主要分潮潮波图 .....	166
C.2 潮汐类型数分布 .....	177

# 第 1 章 绪 论

## § 1.1 海洋潮汐与水深测量的关系

从以出版航海图为主要目的的海道测量至以获取水域基础空间地理信息为目的的水下地形测量，水深测量一直是海洋测量的核心工作。测深平台一般为船，测深技术从测深杆和测深锤的单点测量、单波束回声测深仪的线状测量，发展到多波束测深系统的全覆盖面状测量，测量的精度、效率与自动化程度越来越高。在沿海浅水区，以飞机作为平台的激光测深系统也已逐渐获得应用，可快速采集大范围的水深数据。

如图 1.1 所示，因海洋潮汐现象的存在，海面随时间呈现规律性的升降变化，故各测深平台以及测深技术获得的水深都是受海洋潮汐影响的。与时间相关的瞬时海面至海底的深度，称为瞬时水深。在同一地点，在不同时刻测得的深度是不同的。从水深成果的表达角度而言，水深的表示应基于某种稳定的基准面，使得同一点不同时间的观测成果对应于统一意义的稳定水深。传统上选择深度基准面作为稳定水深的起算基准面。

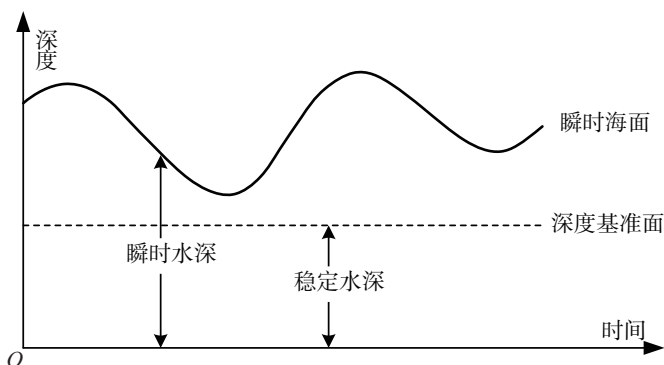


图 1.1 海洋潮汐对水深测量值的影响

由图 1.1 可知，水深测量期间需要在测区设立验潮站点，观测记录海面随时间的升降，以及按一定的算法确定深度基准面在垂直方向上的位置。对于每个瞬时水深，测深时刻瞬时海面在深度基准面上的高度称为水位改正数或潮汐改正数，由水位改正数将瞬时水深改正为稳定水深。计算水位改正数的过程，称为水位改正、潮汐改正或水位控制。

中国近海，特别是渤海与黄海是世界上潮汐变化最复杂的典型海域之一，具有潮差普遍较大、空间上差异较大的特点。“潮差大”意味着海面的升降幅度大、潮汐的影响大；

“空间上差异大”是指海域上相距不远的两点，海面升降变化之间存在较大差异，意味着站点的代表范围较小，可能需要布设多个验潮站点。因此，海洋潮汐对沿岸水深测量具有不可忽略的影响，相应的水位改正正是水深测量中重要的改正项之一。

## § 1.2 水位控制的工作内容

水位控制的主要目的是通过利用验潮站的水位观测数据，计算出每个测深点处在测深时刻相对于参考面的水位，将该水位值订正至瞬时水深以消除海洋潮汐的影响。其主要任务可概括为：通过利用、布设验潮站，建立水位控制站(网)，或利用海区已有潮汐相关参数，为测量区域提供平均海面、深度基准面等参考面信息，为水深测量和相关地形要素测量提供水位改正数。主要工作内容可简要描述如下：

(1) 依据测区的潮汐变化复杂程度，选择验潮站的布设地点，结合长期验潮站，构建水位控制站(网)。

(2) 在布设站点实施验潮，通过验潮设备监测并记录瞬时海面随时间的升降变化，获得的数据称为水位数据或验潮数据。验潮应至少包含水深测量的时段。

(3) 对水位数据实施必要的预处理后，计算验潮站处的平均海面(水位的平均位置)、深度基准面(某种最低潮意义的基准面，海图标注水深通常都以该面作为起算面)等参考面的位置，并将水位数据的起算面转换至深度基准面。

(4) 采用瞬时海面的空间插值方法(水位改正方法)，由验潮站(网)的水位内插出每个测深点处在测深时刻的水位，即水位改正数。

## § 1.3 本书的体系结构

本书从海道测量对水位控制的应用需求出发，科学组织海洋潮汐基本理论、海域基准面确定、水位改正数计算以及实施组织方法等知识框架，力求构建相对完备的水位控制理论和技术方法体系。

第1章简要介绍了水位控制在水深测量中的作用以及基本的工作内容。

第2章简述了海洋潮汐的基础理论，旨在理解海洋潮汐的基本规律、掌握以分潮为核心的基本概念。

第3章介绍了水位观测的常用方法，重点是潮汐调和分析的基本原理，按水位数据时长从长至短的顺序阐述了长期调和分析与中期调和的原理、方法以及详细步骤。

第4章全面阐述了确定垂直基准面的原理与技术方法，对平均海面、深度基准面与平均大潮高潮面，分别从其定义、稳定性与传递技术等三个方面进行了论述。

第5章介绍了水位数据的预处理，重点阐述了各水位改正方法的原理，包括三角分区(带)法、时差法与最小二乘拟合法等传统水位改正方法以及基于潮汐模型与余水位监控法、基于GNSS技术的水位改正法等现代水位改正方法。

第6章给出了常用的潮汐特征值的定义，基于便于编程实现的目的，整理给出了潮汐特征值的计算公式。

第7章从工程实施的角度阐述了技术设计论证与精度评估等的方法与要点。

## 第 2 章 海洋潮汐基础理论

### § 2.1 潮汐现象

潮汐是指地球上海水的一种规律性上升下降运动。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，我国古代把白天上涨的称为潮，晚上上涨的称为汐，合称潮汐。图 2.1 为某处一昼夜内的海面(水位)升降变化曲线。

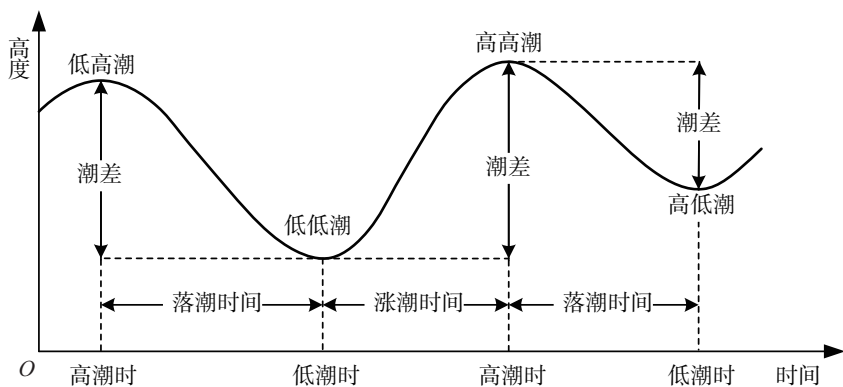


图 2.1 潮汐基本名词示意

#### 1. 高潮与低潮

当海面上涨至局部最高时，称为高潮 (high water, HW)；而海面下降至局部最低时，称为低潮 (low water, LW)。在多数情况下，一昼夜会出现两次高潮与两次低潮，为了区分，其中相对较高的一次高潮、低潮分别称为高高潮 (higher high water, HHW) 与高低潮 (higher low water, HLW)，而相对较低的一次高潮、低潮分别称为低高潮 (lower high water, LHW) 与低低潮 (lower low water, LLW)。

#### 2. 平潮与停潮

当海面达到高潮时，通常会出现海面暂停升降的现象，称为平潮；而在低潮暂停升降的现象，称为停潮。平潮与停潮的时间长短因地而异，几分钟或几十分钟，最长可达一两个小时以上。一般取平潮(停潮)的中间时刻记为高潮时(低潮时)。

#### 3. 涨潮与落潮

从低潮到高潮的过程中，海面逐渐上涨，称为涨潮。自高潮至低潮，海面逐渐下落，

称为落潮。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. 潮差与周期

相邻的高潮和低潮之间的海面高度差，称为潮差(range of tide)。潮差的大小因地而异，潮差的平均值，称为平均潮差。两个相邻高潮或两个相邻低潮之间的时间间隔，称为周期(period)。周期因地而异，我国大部分沿岸海域的周期平均值是12小时25分钟。

## § 2.2 日、地、月的相对运动

通过对潮汐现象的长期观测(图2.2为某站点1个月的水位变化)，人们发现：一方面，水位的升降十分复杂，每天高潮(低潮)的高度、高潮时(低潮时)、涨潮(落潮)时间、潮差与周期等都不同；另一方面，水位的升降呈现一定的规律性，而且我国古代劳动人民早已发现这种规律与月球之间有密切的关系，并据此设计了推算水位变化的算法。随着自然科学的发展，人们进一步认识到海洋潮汐现象是随着太阳、地球、月球的相对位置变化而变化的。因此，要了解潮汐的成因及其变化规律，就必须先了解日、地、月相对运动有关的天文知识。

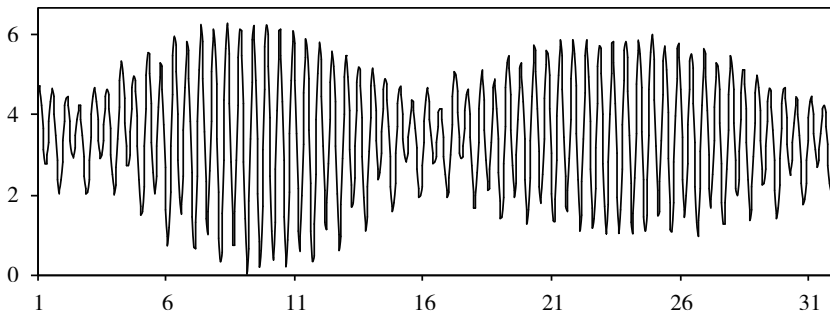


图 2.2 某站点 1 个月的水位变化

大地测量相关的著作通常会对日、地、月相对运动及时间系统作较全面的介绍，本节将只简要介绍与潮汐密切相关的天文知识。

### 2.2.1 天球的基本概念

#### 2.2.1.1 天球及若干基本点和圈

天球是指以地球为中心，半径为任意长度的一个假想球体。将太阳、月球等天体的位置投影至天球上，仅以方位来表达天体的位置及天体之间的关系，此时各天体的运动都将呈现为以地球为中心的圆周运动。实际上，地球并不是宇宙的中心。但夜晚观察天体时，会觉得天穹好像是一个以观察者为中心的巨大半球，各天体在球面上运动。若假设观察者处于地球中心，天球则是对这种感观的自然描述。以图2.3所示，介绍天球的一些基本概念。

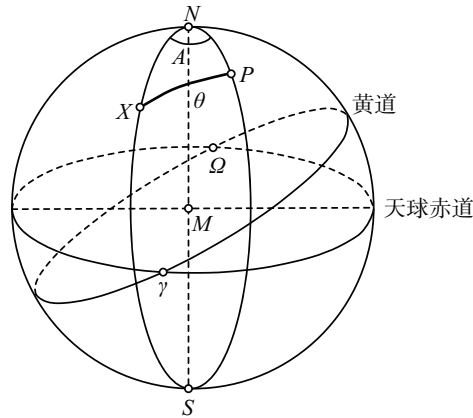


图 2.3 天球的概念示意

**天轴与天极：**地球自转轴的延伸直线，称为天轴；天轴与天球的交点，称为天极，其中  $N$  为北天极， $S$  为南天极。所有天体的周日视运动都是绕天轴和天极旋转的。

**天球赤道面与天赤道：**通过天球中心(地球质心)与天轴垂直的平面，称为天球赤道面，与天球相交的大圆，称为天赤道。天极和天赤道就好像是地球扩展后，地球两极和赤道在天球上的投影。

**天顶与天顶距：**通过天球中心与观测点的直线，与天球相交于两点，其中，在观察者头顶的交点，称为天顶，而和天顶正相对的另一个交点位于观测者脚下，称为天底。或者说，天顶是由天球中心指向观测点的直线与天球的交点，对于天体则是该天体在天球上的投影。天顶与天体在天球上的投影之间的角距离，称为观测点与该天体间的天顶距。如图 2.3 所示， $P$ 、 $X$  分别为地球上某观察点的天顶与某天体在天球上的投影， $\theta$  为两者间的天顶距。

**天球子午面与子午圈：**包含天轴并通过天球上任一点的平面，称为天球子午面；该平面与天球相交的大圆，称为天球子午圈。

**上中天与下中天：**若天体位于观测点所在天球子午面，当天体离天顶较近时，称为上中天；而当天体离天底较近时，称为下中天。需注意的是：上中天时天顶距不一定为  $0^\circ$ ，下中天时天顶距不一定为  $180^\circ$ 。

**时圈与时角：**通过天轴的平面与天球相交的半个大圆，称为时圈。两个时圈之间的夹角，称为时角。如图 2.3 所示， $NXS$ 、 $NPS$  分别为天体  $X$ 、观察点  $P$  对应的时圈， $A$  为  $X$  对于  $P$  的时角。

**黄道与春分点：**地球绕太阳公转的运行轨道是椭圆。若以地球作为静止观测点，则观测到太阳是沿椭圆轨道相对运转的。这个椭圆轨道面与天球相交的大圆，称为黄道。黄道面与天球赤道面不相重合，其交角称为黄赤交角，等于  $23^\circ 17'$ 。太阳的视位置在黄道上移动，由南向北穿过天赤道的交点，称为春分点，如图 2.3 中的  $\gamma$ 。而由北向南穿过的交点，称为秋分点，如图 2.3 中的  $\Omega$ 。黄道最北面与最南面的点，分别称为夏至点和冬