



海洋石油工程环境

水文分析计算

石油工业出版社

海洋石油工程环境 水文分析计算

天津大学水文水力学教研室 编

石油工业出版社

内 容 摘 要

本书根据海洋石油工程建筑的需要,论述了直接影响海洋石油工程建筑物规划、设计、施工和营运的海洋环境条件——风、海浪、潮汐、海流、海冰、泥沙、风暴潮和海啸的物理特征、计算方法及其在海洋石油工程设计中的应用,并附有相应的供计算使用的图表及电算源程序。本书可供海洋石油工程、港口工程的设计、科研人员使用,还可作为工科大学海洋工程专业、港口工程专业教学参考书。

海洋石油工程环境

水文分析计算

天津大学水文水力学教研室 编

石油工业出版社出版

(北京安定门内外馆东后街甲36号)

轻工出版社印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本 16¹/₂印张 1插图 439千字 印1—1,900

1983年4月北京第1版 1983年4月北京第1次印刷

书号, 15037·2368 定价, 2.05元

前 言

在我国辽阔的海域里，蕴藏着丰富的油气资源。北起渤海之滨，南达南沙群岛，由近岸的浅滩到数百米水深的开阔海域，埋藏着深厚的含油气地层和良好的储油构造。为了把这些油气资源开发出来，并输送到岸上，需要建造各种类型的海洋工程建筑物，例如钻井平台、采油平台、输油管线、储油罐、油轮系泊设备、油码头等。这些建筑物大多造价昂贵，体积庞大，结构繁杂。它们将在未来几十年的使用期间内，经常遭受海洋动力因素的直接作用。要使建筑物在各种恶劣的海况下都站得稳、立得牢，就必须对直接影响海洋工程建筑物安全的海洋动力因素——海上大风、海浪、潮汐、海流、海冰、泥沙运动、风暴潮、海啸等自然现象有充分的认识，并从中总结出有助于海洋石油工程规划、设计、施工、营运的规律和数据，使工程建筑在保证安全、降低造价、使用方便、结构合理等各方面，都具有科学的依据。

为此，本书介绍了各种海洋动力因素特征值的计算方法，它们对海洋工程建筑物的作用，以及相应的计算图表和电子计算机计算源程序，并附有相应的算例。同时，以一定篇幅对海洋动力因素形成和发展的机制，以及有关的一些理论问题进行说明，并简要介绍了各种动力因素的观测方法和观测资料的分析整理方法。为了使工程技术人员对我国各海域的状况有所了解，书中对海洋动力因素在各海区的地理分布也作了简单描述。此外，本书在介绍国内外常用计算方法的同时，也列举了近年来结合我国海洋石油工程的生产和科研任务取得的部分成果以及某些方面的见解。

海洋石油工程建筑物的设计标准，是工程设计中的重要问题。设计标准偏高或偏低，对建筑物的造价和安全影响甚大。鉴于我

国目前尚无海洋石油工程建筑物的设计规范，书中仅介绍了国外有关钻井船规范的设计标准和国内港口工程建筑的规定以供参考。

本书第一章全面介绍了海上大风的成因机制、分类以及风速的长期分布规律，此外，还对皮尔逊三型分布、韦布尔分布和三点频率计算法结合风速多年分布的实例，进行了说明。本章对海洋石油工程建筑物稳定风压、脉动风压的计算方法以及我们为了编制“海洋钻井船规范”工作的需要而进行的海上风压研究成果，也分别作了介绍。

第二章从风浪初生状态开始，论述了海浪的生成、发展过程和预报方法，并对波谱理论作了简单介绍。此外，对设计波浪标准和波浪长期分布规律也作了说明。本章还介绍了我们在海浪长期分布规律及计算方法方面近年来的一些研究成果。

第三章从流体力学的角度描述了海浪和波浪力的问题，介绍了随机波有关波力的研究，并对我们在海浪对孤立墩柱、海上油罐等工程建筑物作用力方面的研究成果作了说明。

第四至六章分别对潮汐、海流、海冰的特征及其对海洋石油工程建筑物的影响进行说明。

第七章除了介绍海啸和风暴潮的成因及其计算方法外，还对近年来广泛用于自然现象规律性研究的数学工具——双重筛选逐步回归的计算原理作了说明。

第八章论述了与海洋石油工程有关的泥沙运动规律和计算方法，并介绍了我们在这方面的一些研究成果。

第九章为海洋工程水文常用的计算程序，如双重筛选逐步回归程序、多功能的相关分析、频率分析计算程序、波谱计算程序等。

本书第一、五章由王超编写，二、七章由刘德辅编写，第三章由赵耀南编写，第四、八章由杨秉正编写，第六章由陈根福编写。有关计算程序和双重筛选，由马逢时编写。全书由刘德辅主编。

目 录

第一章 风	(1)
§ 1-1 风和气压.....	(2)
§ 1-2 世界风带和影响我国海域的主要风系.....	(10)
§ 1-3 风的观测.....	(15)
§ 1-4 台风区内的气压分布和中心附近最大风速的计算.....	(16)
§ 1-5 常风向, 强风向, 大风日数和风玫瑰图.....	(20)
§ 1-6 最大风速的多年分布规律.....	(23)
§ 1-7 海洋石油工程建筑物的设计风速.....	(36)
§ 1-8 风压计算.....	(45)
§ 1-9 我国各海区的基本风压.....	(55)
第二章 海浪	(60)
§ 2-1 海浪的成长.....	(60)
§ 2-2 海浪能量的来源与消耗.....	(67)
§ 2-3 海浪观测.....	(73)
§ 2-4 海浪要素的统计分布规律.....	(76)
§ 2-5 我国各海域大浪分布规律.....	(83)
§ 2-6 海洋石油工程建筑物的设计波浪标准.....	(84)
§ 2-7 海浪谱理论概述.....	(87)
§ 2-8 由风的资料推算波浪要素.....	(104)
§ 2-9 海洋石油工程建筑中多年一遇设计波浪的推算.....	(112)
第三章 作用在海洋石油工程建筑物上的波浪力	(123)
§ 3-1 液体运动的连续性方程和运动方程.....	(124)
§ 3-2 波高微小的进行波.....	(129)
§ 3-3 波的叠加.....	(148)
§ 3-4 有限振幅的进行波.....	(152)
§ 3-5 作用在孤立式建筑物上的波浪力.....	(173)
§ 3-6 不规则波对孤立式墩和柱的作用.....	(220)
第四章 潮汐	(240)
§ 4-1 影响潮汐变化的天文因素.....	(241)
§ 4-2 潮汐现象和特征潮位.....	(244)
§ 4-3 引潮力和潮汐成因.....	(253)
§ 4-4 潮位观测.....	(265)

§ 4-5	潮汐预报	(267)
§ 4-6	我国沿海的潮汐	(273)
§ 4-7	海洋石油工程建筑物设计潮位的标准	(280)
§ 4-3	设计潮位的推求	(281)
第五章	海流	(300)
§ 5-1	海流的形成、分类及其基本理论	(300)
§ 5-2	海洋环流模式	(316)
§ 5-3	浅海陆架海流系统	(322)
§ 5-4	海流的观测与资料整理	(333)
§ 5-5	海洋石油工程建筑设计中近岸海流特征值的计算	(342)
§ 5-6	海洋石油工程建筑物所受海流作用力的计算	(345)
第六章	海冰	(349)
§ 6-1	海冰研究的意义及海冰的分类	(349)
§ 6-2	我国渤海和黄海北部的冰情	(353)
§ 6-3	海冰观测	(362)
§ 6-4	海冰的形成及预报	(366)
§ 6-5	海冰对海洋石油工程建筑物作用力的计算	(376)
第七章	海啸和风暴潮	(396)
§ 7-1	海啸	(396)
§ 7-2	风暴潮	(403)
§ 7-3	关于“双重筛选逐步回归”问题的介绍	(413)
第八章	泥沙运动	(420)
§ 8-1	我国海岸类型	(421)
§ 8-2	海岸泥沙运动	(427)
§ 8-3	海岸带泥沙运动的调查和输沙率的测验	(441)
§ 8-4	沙质海岸沿岸输沙率的估算	(456)
§ 8-5	关于海洋石油工程建筑物基础的底部淘刷问题	(462)
第九章	有关的计算程序	(467)
§ 9-1	回归计算	(467)
§ 9-2	多年分布规律的计算	(474)
§ 9-3	海浪频谱分析	(487)
§ 9-4	双重逐步回归计算	(490)
附录		(500)
各章参考文献		(520)

第一章 风

风是我们常见的一种自然现象，它与人类的生活、生产有密切关系。风可以被人们掌握、利用，但同时又是一种带破坏性作用的因素。历史上风给人类带来巨大灾难的记载是屡见不鲜的。例如，1975年10月5日，台风经过日本时，风速67.8米/秒，东京市43%的电线杆倾倒或折损，八丈岛约60%的房屋被破坏，连设计风速为60米/秒的铁塔也因此倒塌。1965年11月1日，在英国约克郡的费尔桥，有三个高达百米的冷却塔在大风中倒塌，引起有关工程界很大震动。据分析，倒塌的原因是设计中风压取值较英国风荷载规范中的规定低24%。此后，英国风压计算中风速的取值方法也作了相应变化，由原来采用的1分钟平均风速改为3秒钟平均风速。

我国位于亚洲东部，濒临太平洋，是世界上著名的季风国家之一；又是强大的太平洋台风途经的地方。特别是我国东南沿海各省和台湾省，每年都不同程度地受到台风的影响。

由于各种类型的海上石油工程建筑物，如钻井船、平台、高耸的井架以及海上油罐等设备，却将直接位于风力作用之下，而一次强大的风暴和它所引起的巨浪又往往是海上建筑物遭到破坏的主要原因之一，因此近几十年来，关于风力对建筑物作用的研究已引起国内外有关科学工作者普遍的重视，而且风力的计算已列为海上石油工程建筑物设计中不可缺少的条件。此外，为利用良好天气进行施工作业以及钻井船的拖航等，也必须了解工作海区的大风规律及特点，并通过分析强风向、常风向、统计大风日数、绘制风玫瑰图等方法，进一步掌握风对建筑物的影响。

§1-1 风和气压

一、气压的意义、单位和海平面气压场

大气作用于地球表面单位面积上的力，叫作大气压力，简称气压。气压的单位可以用与气压相平衡的水银柱高度来表示，又可以用力的单位来表示。由于当温度为 0°C 时、纬度 45° 的海平面气压为760毫米水银柱高（即标准大气压），那么经过换算，可以得出，一个标准大气压相当于每平方厘米受到1013231达因的力。为了使用方便，又规定每平方厘米受1000000达因的力为1巴，受1000达因的力为一毫巴，所以一个标准大气压力就等于1013毫巴。从而得出毫米（mm）水银柱高与毫巴（mb）两单位之间的换算关系如下：

$$1\text{mm} \approx \frac{4}{3}\text{mb}; \quad 1\text{mb} \approx \frac{3}{4}\text{mm}$$

目前已有准确的换算表可供换算使用。

气压是时间和空间的函数，地球表面的气压分布是不均匀的。对于某一较大地区范围内某一具体时间的气压分布特点，可以用绘制海平面等压线的方法来表示。所谓等压线，就是把瞬时气压观测值相等的各个点联成的线。海平面等压线图能表明海平面上当时气压的分布，即当时的海平面气压场。

海平面气压场可包括以下9种主要形式，即低压（具有封闭的等压线，且其中心部分气压较周围低的区域）；高压（具有封闭的等压线，且其中心部分气压较周围高的区域）；低压槽（由低压区域向较高气压方向伸延出来的舌状部分）；高压脊（由高压区域向较低气压方向伸延出来的舌状部分）；低压带（在两个高压之间气压较低的区域）；高压带（与低压带相反，为在两个低压之间气压较高的区域）；副低压（在低压外围的槽中所形成的小低压）；副高压（在高压外围的脊中形成的小高压）及鞍形区（两个低压和高压交叉分布之间的区域）等。如图1-1所示。

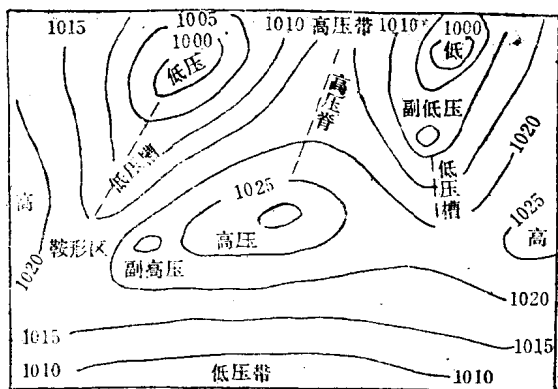


图 1-1 各种形式的海平面等压线

二、风向、风速和风力等级表

由于气压在水平方向上分布的不均匀性而产生的空气从高压区向低压区的运动称为风。在相同的日照条件下，由于不同的地形、地面性质、地表面覆盖层等因素的影响，以及太阳辐射穿过大气层到达地面时能量的大小，使气温产生了一定的水平差异，温度高的地方空气膨胀，温度低的地方空气收缩。由于空气密度的变化而发生气压的变化。同时空气运动的结果又往往造成在某一地区有大量空气流入或流出，当流入大于流出时，该地区气压亦呈上升趋势；反之气压则下降。

根据风产生的原因可知，在相同的距离内，气压差愈大风速也相应愈大；气压差愈小风速也愈小。在海平面等压线图上，两相邻任意等压线的差是一个定值，一般为 5mb 或 2.5mb。所以等压线的密集程度，表示了单位距离内气压差的大小。等压线愈密，风速也愈大。

风的特征是用风向和风速两个量来表示的。风速是空气在单位时间内所流过的距离，单位一般采用米/秒或公里/时。为了便于使用，又可根据风速的大小划分为 13 个风级。称为蒲福 (Beaufort) 风级表。后人又将其补充了 5 级，成为现在通用的风级

表 1-1

风 级 表

风级	风名	海面浪高 米		海面状况	海面征象	陆面征象	相当风速		
		一般	最高				海里/时	公里/时	米/秒
0	无风	/	/	平如镜	海面象镜子一样平静(无浪)	静,烟直上	<1	<1	0~0.2
1	无风	0.1	0.1	微波	海面有波纹,但还没有白色波顶	烟能表示风向,但风标不能转动	1~3	1~5	0.3~1.5
2	轻风	0.2	0.3	小波	波浪纹虽小,但已明显,波顶透明像玻璃,但不碎	人面感觉有风,树叶有微响,风向标能转动	4~6	6~11	1.6~3.3
3	微风	0.3	1.0		波较大,波顶开始分裂,泡沫有光,间或见到白色波浪	树叶及微枝摇动不息,旌旗开展	7~10	12~19	3.4~5.4
4	和风	1.0	1.5	轻浪	小浪,波长较大,往前卷的白碎浪较多,有间断的呼啸声	能吹起地面灰尘和纸张,树的小枝摇动	11~16	20~28	5.5~7.9
5	清风	2.0	2.5	中浪	中浪,波浪相当大,白碎浪很多,呼啸声不断,间或有浪花溅起	有叶的小树摇摆,内陆的水面有小波	17~21	29~38	8.0~10.7
6	强风	3.0	4.0	大浪	开始成大浪,波浪白沫飞布海面,呼啸声大作,(可能有少数浪花溅起)	大树枝摇摆,电线呼呼有声,举伞困难	22~27	39~49	10.8~13.8

续表

风级	风名	海面浪高 米		海面状况	海面征象	陆面征象	相当风速		
		一般	最高				海里/时	公里/时	米/秒
7	疾风	4.0	5.5	巨浪	海面像由波浪堆积而成, 碎浪的白泡沫开始成纤维状, 随风吹散, 飞过几个波顶	全树摇动, 大树弯下, 迎风步行感觉不便	28~33	50~61	13.9~17.1
8	大风	5.5	7.5	狂浪	中高浪, 波长更大, 随风吹起的纤维状更明显, 呼啸声更大	可摧毁树木, 人向前行, 感觉阻力甚大	34~40	62~74	17.2~20.7
9	烈风	7.0	10.0		高浪, 泡沫纤维更为浓密, 海浪卷翻, 泡沫可能影响能见度	烟囱及平房顶可能受到损坏, 小屋遭受破坏	41~47	75~88	20.8~24.4
10	狂风	9.0	12.5	涛	大高浪, 波浪成长形突出, 纤维状泡沫更为浓密, 并成片状, 海浪颠簸好像撞击, 浪花飞起带白色, 能见度受影响	陆上少见, 有时可将树木拔起, 或将建筑物吹毁	48~55	89~102	24.5~28.4
11	暴风	11.0	16.0	非凡现象	特高浪, 中小型的船在海上有时可能波浪所蔽, 波浪边缘被风吹起泡沫, 能见度受影响	陆上少见, 有则必有重大损毁	56~63	103~117	28.5~32.6

续表

风级	风名	海面浪高 米		海面状况	海面征象	陆面征象	相当风速		
		一般	最高				海里/时	公里/时	米/秒
12	飓风	14.0	/		空气中充满泡沫和浪花,海面因浪花的飞起成白色状态,能见度剧烈降低	陆上极少,其摧毁力极大	64~71	118~133	32.7~33.9
13							72~80	134~149	37.0~41.4
14							81~89	150~166	41.5~43.1
15							90~99	167~183	43.2~50.9
16							100~108	184~201	51.0~53.0
17							109~118	202~220	56.1~61.2

表(表1-1)。但此表仍然不能包括全部自然界中所出现的风,例如龙卷风等等,其风速可达100~200米/秒,但发生的范围很小,也比较少见。

风向是指风的来向。在气象上用16个方位来表示。即N(北)、NNE(东北偏北)、NE(东北)、ENE(东北偏东)、E(东)、ESE(东南偏东)、SE(东南)、SSE(东南偏南)、S(南)、SSW(西南偏南)、SW(西南)、WSW(西南偏西)、W(西)、WNW(西北偏西)、NW(西北)、NNW(西北偏北)。如图1-2所示。

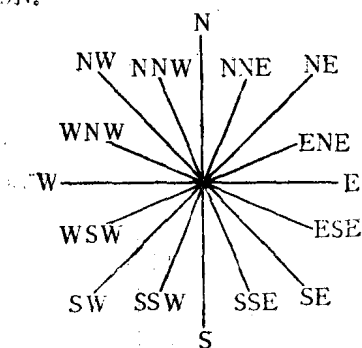


图 1-2 风向方位图

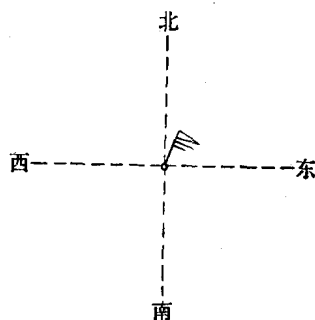


图 1-3 天气图上的风向风速

天气图上记载了每个台站的风向风速值,并以风向矢杆及其尾部的风速标记表示。风向矢杆为长约0.6~0.8厘米的矢线,其一端与表示测站位置的站圈相连,且矢线从站圈向外,所指的风向就是风的来向,另一端与风速标记相连。风速标记分为长划(0.4厘米长)、短划(0.2厘米长)和小旗三种。分别代表风速4米/秒、2米/秒和20米/秒。如图1-3所示,某站风向为NNE,风速为26米/秒。

三、根据海面气压场计算海面风速的方法

没有气象站的地区和绝大部分海面区域都没有直接的风速观测,但可根据海平面气压场中等压线的分布,计算出地转风速,

再经过订正，得到海平面风速。

地转风速

$$U_g = \frac{1}{2 \rho \omega \sin \varphi} \frac{\Delta p}{\Delta n} \quad (1-1)$$

式中 ρ 为空气密度，当气温为 0°C ，气压为 1013.3mb 时， $\rho = 1.26 \times 10^{-3}\text{克/厘米}^3$ ； ω 为地球自转角速度。 $\omega = 7.29 \times 10^{-5}$ 弧度/秒； $\frac{\Delta p}{\Delta n}$ 为气压梯度； Δp 为两等压线之间的气压差； Δn 为与此相对应的等压线之间的距离（以当地纬距为单位）。

由于在地转风公式的推导过程中，假定等压线平直，且地面摩擦力可忽略不计，而实际上只有在距地面 $500 \sim 1000$ 米以上的高空才能将摩擦力忽略不计，因此利用式 1-1 计算近地面层风速时必须进行订正，此订正值主要取决于大气的稳定度。即大气垂

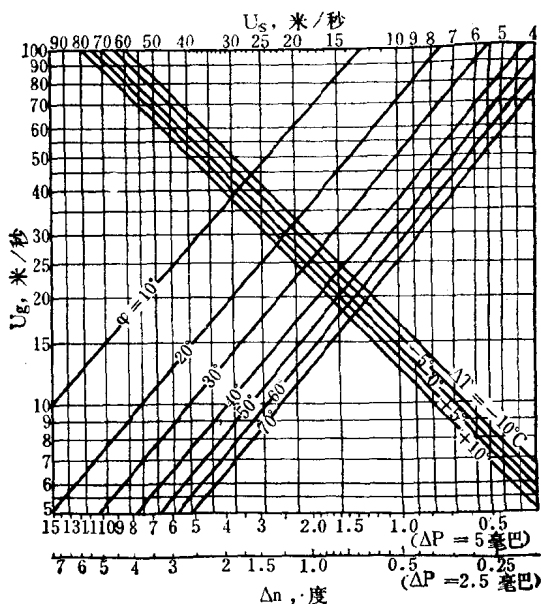


图 1-4 风速查算图

直对流的程度。使大气发生垂直运动的因素固然很多，但运动发生后能否继续发展下去，则取决于大气的垂直温度分布。故于海洋上，水温与气温的差异对大气垂直运动影响很大。根据我国海区资料分析的结果，可得水、气温差 ΔT (以 $^{\circ}\text{C}$ 为单位)，地转风速 U_g 与海面风速 U 之间的关系为：

$$U_s = (0.01\Delta T + 0.70)U_g \quad (1-2)$$

为了便于使用，根据式 (1-1)、(1-2) 绘制成如图1-4所示的查算图。

图中下横轴为等压线间隔 (分别对应 Δp 为 5mb 或 2.5mb)，以纬距为单位；纵轴为地转风速 U_g (米/秒)；上横轴为海平面风速 U (米/秒)；图中一簇斜直线代表等纬度 φ 值线；另一簇斜直线为等水、气温差 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ 线。若已知 Δn 、 φ 及 ΔT ，则自

表 1-2 中国各海区表层水温表 ($^{\circ}\text{C}$)

海 区	经 纬 度		月 份											
	东 经	北 纬	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二
渤海及 黄海北部	119~125	37~41	3	2	4	9	13	19	21	24	22	19	12	10
黄海南部	119~125	31~37	8	7	7	12	14	20	24	28	24	20	18	12
东 海	121~125	29~31	13	13	13	15	18	22	27	29	27	23	20	16
	120~125	27~29	17	16	17	19	22	22	27	29	27	24	22	19
	119~125	25~27	19	18	19	21	24	26	28	29	27	25	24	20
台湾海峡	116~121	23~25	17	16	18	21	24	26	27	28	27	26	23	19
	121~125	23~25	23	23	23	24	27	28	29	29	28	26	25	23
	113~121	21~23	20	20	21	24	24	28	28	29	28	26	24	21
	121~125	21~23	24	23	24	26	28	28	28	29	28	27	26	24
南 海	106~125	15~21	24	24	25	27	29	29	29	29	29	28	26	25

下横轴的 Δn 处,引垂直线向上与对应的等 φ 值线相交,自交点引水平线与对应的等 ΔT 线相交,再自交点引垂直线向上与上横轴相交,读取交点数值,即为海平面风速值。

查图时所需的 ΔT 值,可由表1-2中查出表层水温,再由天气图中实测气温值相减而得。

§1-2 世界风带和影响我国海域的主要风系

一、大气环流和世界风带

地球上大气总的流动状况称为大气环流。如图1-5所示,由于地球自西向东自转的结果,使气流在自赤道向极地的运动过程中发生偏转(南半球向左,北半球向右),并带有自西向东移动的倾向。在南、北纬 30° 附近,由于纬度圈缩小,空气堆积而下沉,形成副热带高压带。而由副热带流向极地的气流,在南、北纬约 60° 附近,与来自极地的气流汇会而上升,又形成副极地低压带。

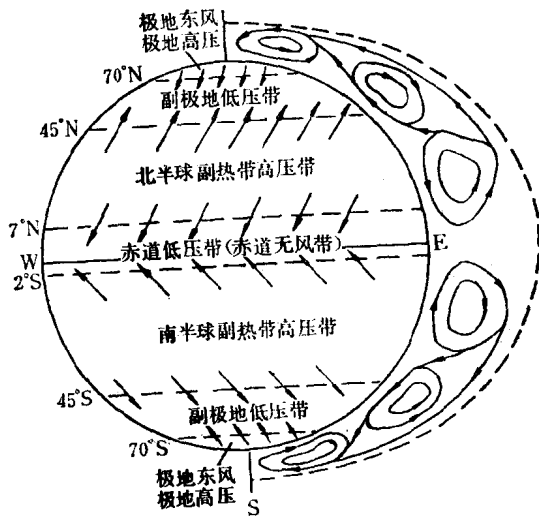


图 1-5 大气流动总趋势图