

# 工程水文学

曾杭



# 第六章 海浪

- 第一节 海浪要素和分类
- 第二节 风况基础知识
- 第三节 海浪观测
- 第四节 海浪要素统计规律
- 第五节 海浪谱基础知识
- 第六节 根据海浪观测推算设计波浪
- 第七节 根据气象资料推算风浪尺度
- 第八节 波浪浅水变形





SEU



- 渤海的面积大约有7.8万平方公里  
黄海面积约为40万平方公里  
东海面积约为77万平方公里  
南海面积330万平方公里
- 渤海与黄海的分界线--辽东半岛南端老铁山角经庙日群岛至山东半岛北端蓬莱角的连线
- 黄海与东海的分界线--长江口北角至济州岛西南角的连线
- 东海与南海的分界线--广东南澳岛与台湾岛南端的鹅銮鼻连线



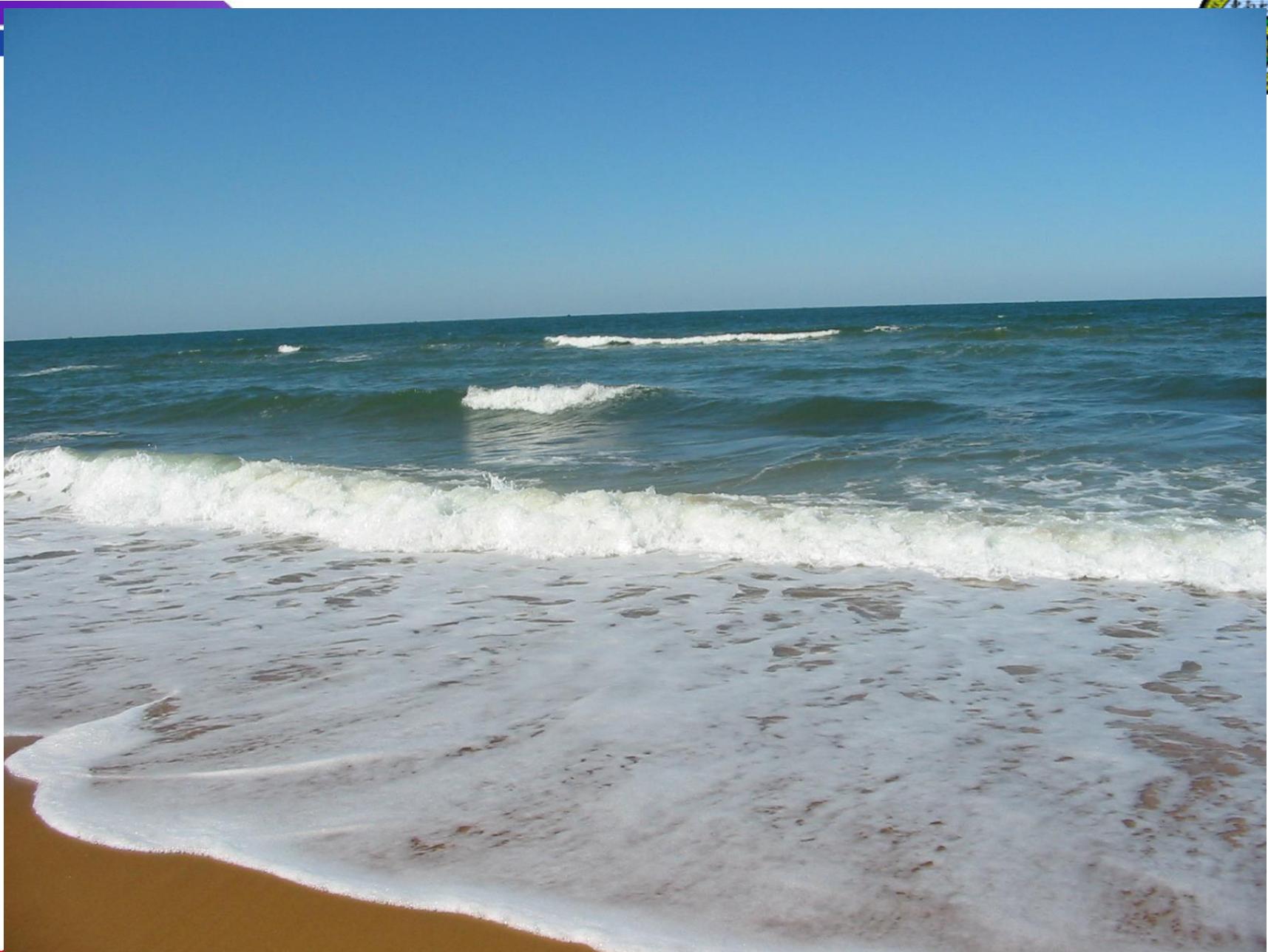
SEU



SEU

SEU

7



SEU





SEU



# 第一节 海浪要素和分类

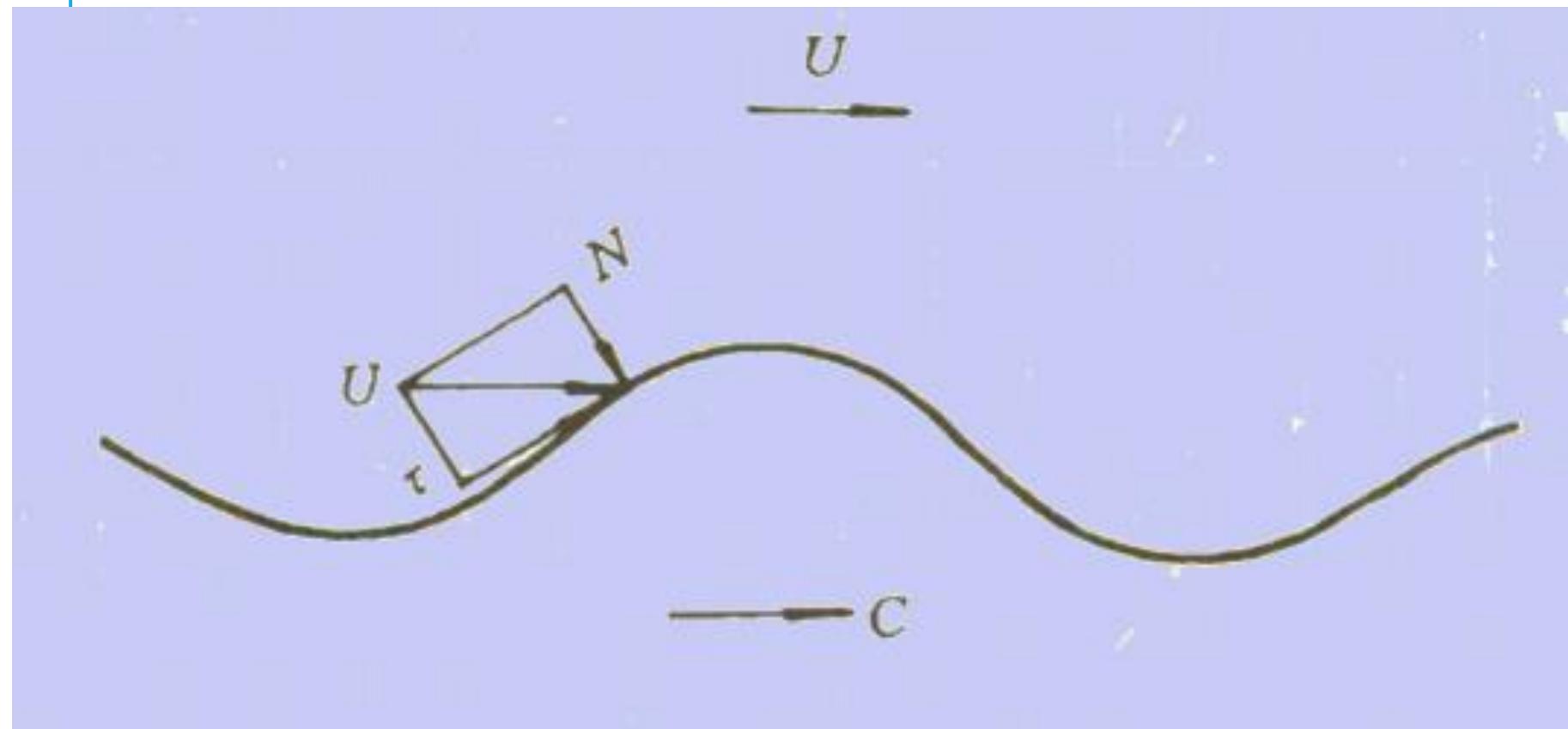
- 海洋中的波浪是海水运动形式之一，它的产生是外力、重力与海水表面张力共同作用的结果。
- 引起海水波动的外力因素很多，如风、大气压力的变化、天体的引潮力、海底地震以及人为引起的船体运动等。由这些因素引起的海水波动，其周期可在极宽的范围内变化，如潮波的周期为半天至1天，海啸的周期为几十分钟，风浪的周期为几秒钟，而海水表面张力波的周期则不足1s。
- 本章将主要论述由风引起的重力波，它是风浪、涌浪和近岸波浪的总称。
- 风浪主要是指在风直接作用下产生的波浪；涌浪指风停止、转向或离开风区传播至无风水域的波浪；涌浪传播到浅水区，由于受到水深和地形变化的影响，发生变形，出现波浪的折射、绕射和破碎而形成近岸波浪。



- 一、风浪的生成、发展和衰减的机理
- 1、风浪形成理论
- 粘性力作用
- 根据流体力学的观点，空气和海水两种不同介质流体互相接触并发生相对运动时，则在其分界面上，由于两者相互作用，就会形成界面波。以空气运动（风）为主，主要是风作用于海水表面时，界面波就是风浪。
- 风浪成长的机理是把风对水面的作用力分为两个分力：风与水面间的切应力 $\tau$ 和风作用在波浪迎风面上的法向正压力 $N$



SEU





- 
- 风与水面间的切应力 $\tau$ 与风速 $U$ 成正比，因为水质点主要在原地作振荡运动，波速是位相速度，故 $\tau$ 与波速 $C$ 无关。风作用在波浪迎风面上的法向正压力 $N$ 使波浪的迎风面和背风面形成压力差（无风时波面两侧压力均等），故其大小与风速 $U$ 和波速 $C$ 之差 $(U-C)$ 成正比。
- 换言之，风通过与水质点之间的摩擦力及波浪迎风面和背风面的压力差对水质点作功，将风的能量传给海水而构成风浪成长的动力。



- 起风初期，海面上波浪很小，即在风速 $U$ 大于波速 $C$ 的整个期间，由于切应力 $\tau$ 和正压力 $N$ 两种力的同时作用，风将能量不断传给水体，使波浪不断发展，波高和波长不断增大。
- 随着波浪尺度的增长，波速 $C$ 也相应加大，致使水体内由于摩擦而消耗的能量也不断加大。当波速接近风速时，**风仅在切应力的作用下继续将能量传给水体**，已不通过正压力传给海水以能量，而当 $C > U$ 时，空气将阻碍波形前进，反而要消耗波浪的能量。
- 故总的输入能量是随波速的逐步加大而逐渐减小的。**当能量的输入等于能量的消耗时，波浪则不再发展而趋于稳定**，形成在某风速条件下所能形成的最大波浪。



- 风停止后，海水无新能量输入，一部分波能向四周传播扩散，另一部分波能不断消耗于水体内部的分子粘滞性和紊动粘滞性影响。此外，空气阻力、海底摩擦和渗透也消耗波浪的部分能量，促使波浪逐渐衰减，直至最后消亡。



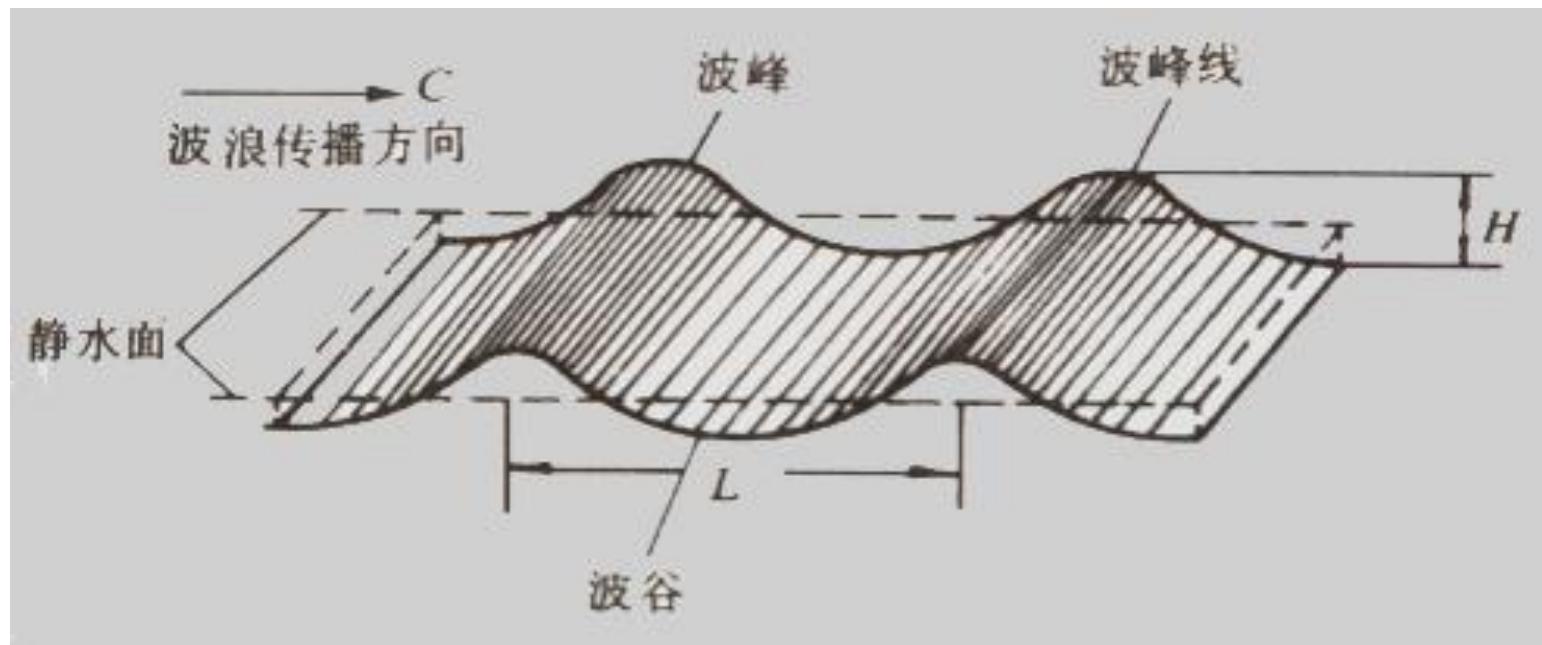
- 风浪成长过程的这种解释是比较粗略的，例如，风对水面的切应力与风速 $U$ 的关系在开始阶段（水面保持平静时）和风浪产生后（水面为波动时）并不相同，同样，正压力 $N$ 与风速——波速的关系（ $U-C$ ）在不同波浪尺度时也有变化。此外，这种解释完全忽略了波动水体对气流的反作用等，但由于这种解释较为简便，目前仍被广泛应用。
- 总之，波浪的生成、发展和衰减取决于水体能量的摄取和消耗之间的数量关系，当能量输入大于支出时，风浪将成长发展；反之，波浪将趋于衰减直至消亡。



- 2、风场三要素
- 风浪的成长与发展过程与下列三主要因素有关：风速 $U$ ，以米／秒 ( $m/s$ ) 计；风作用于水面的持续时间 $t$ ，简称风时，单位以小时 (h) 计；风作用海域水面主要范围，风区长度 $F$ ，简称风距，单位以公里 (km) 或米 (m) 计。
- 风浪成长与传播过程中还同海域的地形、水深条件和海流影响等有关，使风浪场更加错综复杂。但是，最关键的是前三者，故将**风速、风时和风距（风距 $F$ 指风的吹程）**称为**风场三要素**。



- 二、海浪要素
- 虽然海浪的剖面形状复杂，但人们常把它理想化为如图6-1所示的规则剖面，并以各种波浪要素来表征其特性。





各波浪要素的定义如下：

- 波峰：波浪剖面高出静水面的部份，其最高点称为波峰顶。
- 波谷：波浪剖面低于静水面的部份，其最低点称为波谷底。
- 波峰线：垂直波浪传播方向上各波峰顶的连线。
- 波向线：与波峰线正交的线，即波浪传播方向。
- 波高：相邻波峰顶和波谷底之间的垂直距离，通常以 $H$ 表示，单位以米（m）计。在我国台湾海峡曾记录到波高达15m的巨浪。



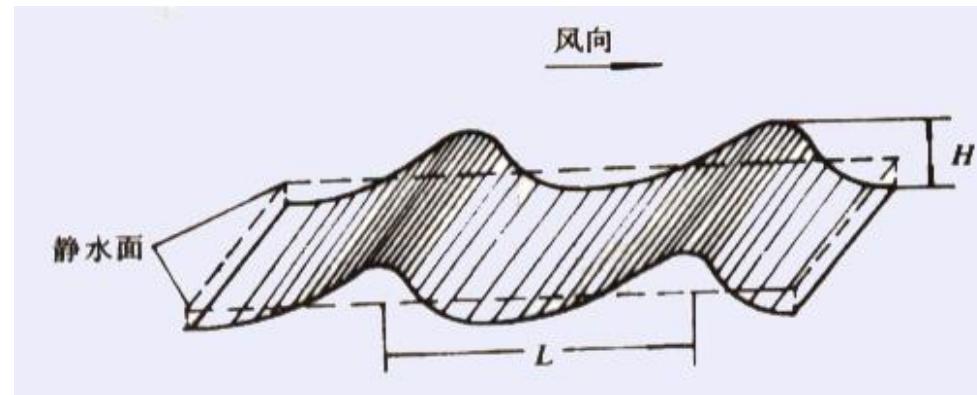
- 波长：两相邻波峰顶（或波谷底）之间的水平距离，通常以L表示，单位以米（m）计。海浪的波长可达上百米，而潮波的波长则可达数公里。
- 周期：波浪起伏一次所需的时间，或相邻两波峰顶通过空间固定点所经历的时间间隔，通常以T表示，单位以秒（s）计。在我国沿海波浪周期一般为4~8s，曾记录到周期为20s的长浪。
- 波陡：波高与波长之比，通常以δ表示，即 $\delta=H/L$ 。海洋上常见的波陡范围在 $1/10 \sim 1/30$ 之间。波陡的倒数称为波坦。
- 波速：波形移动的速度，通常以C表示，它等于波长除以周期，即 $C=L/T$ ，单位以米／秒（m/s）计。



### 三、海浪分类

海浪可以按各种不同的标准进行分类：

- 1、强制波、自由波和混合浪
- 强制波指引起波浪的扰动力连续作用于水面，波动性质依赖于扰动力性质的波动。在风直接作用下产生的风浪就是一种强制波，“其外形相对于垂直轴是不对称的，见图6-2，波浪的背风面较迎风面为陡。





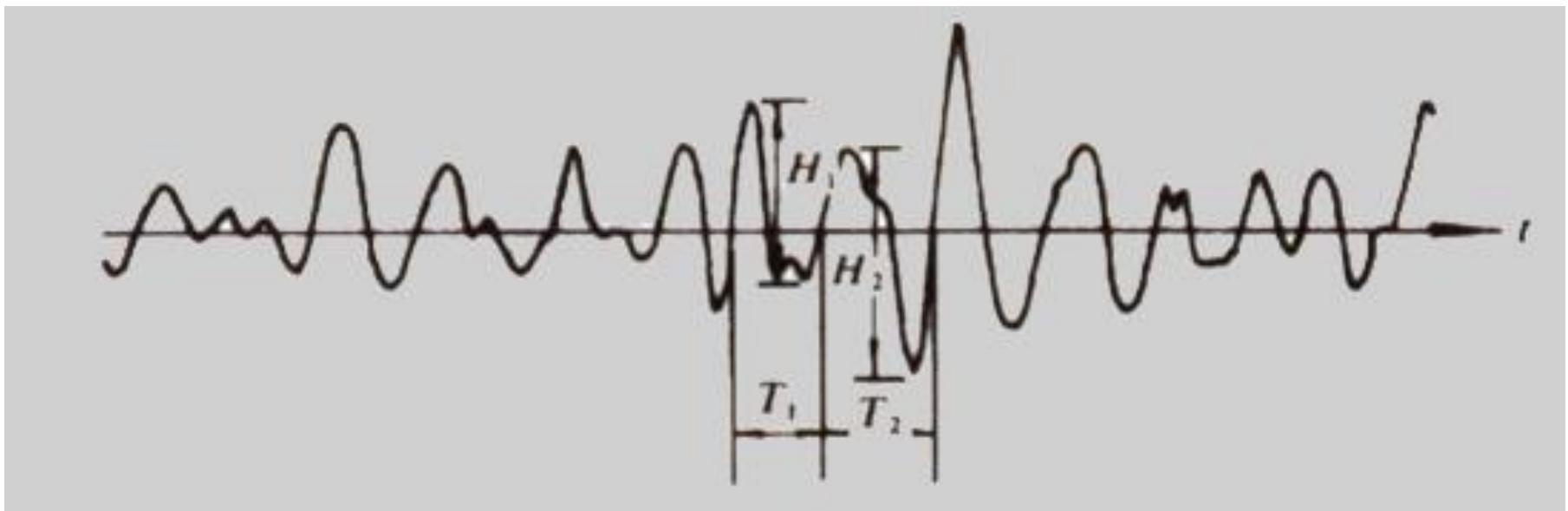
- 自由波指扰动力消失后在重力作用下继续传播的波浪，其性质已不完全依赖于原有的扰动力。如风停止后海面上继续存在的波浪或离开风区传播至无风水域上的涌浪就是一种自由波。涌浪的外形比较规则，波面光滑。
- 海面上还经常遇到风浪与风区外传播来的涌浪相迭加而成的波浪，称为混合浪。



- 2、毛细波、重力波和长周期波
- 按使海水水质点在运动过程中恢复到平衡位置的复原力的性质对波浪进行分类。复原力以表面张力为主时称为毛细波或表面张力波，如海面上刚起风，或风力很小时海面上出现的微小皱曲的涟波就是毛细波，其周期常小于1s。当波浪尺度较大时，水质点恢复平衡位置的力主要是重力，这种波浪称为重力波，如风浪、涌浪、地震波以及船行波等。
- 长周期波主要指日、月引力造成的潮波，还包括大洋涌浪、海湾风壅振荡等周期较长的波动，其复原力是重力及科氏力。



- 3、不规则波和规则波
- 海面上接踵而来的各个波浪的波浪要素是不断变化的，它是一种不规则的随机现象，这样的波浪称为不规则波，如图6-3所示为海面上一段实际的测波记录。
- 为了便于研究波浪运动，人们将实际的不规则海浪系列用一个理想的各个波的波浪要素均相等的波浪系列来代替，这种理想的波浪称为规则波，如实验室内用人工方法产生的规则波。海上涌浪也接近规则波。





- 4、长峰波和短峰波
- 在海面上可清楚地看到一个个接踵而来的波峰和波谷，波峰线是一些很长的，几乎互相平行的直线时，这种波浪称为长峰波或二维波。
- 涌浪就是一种长峰波。而在大风作用下，波峰线难以辨别，波峰和波谷如棋盘格般交替出现，这种波浪称为短峰波或三维波。
- 风浪通常为短峰波



- 5、前进波和驻波
- 海面上形成的波峰线向前或向岸传播的波浪称为前进波。驻波（或称立波）是波形不向前传播，波峰和波谷在原地作周期性升降的波浪，它是前进波遇到海岸陡崖或直墙式建筑物后反射回去与前进波相互干涉的结果，此时驻波的波高是前进波的2倍。



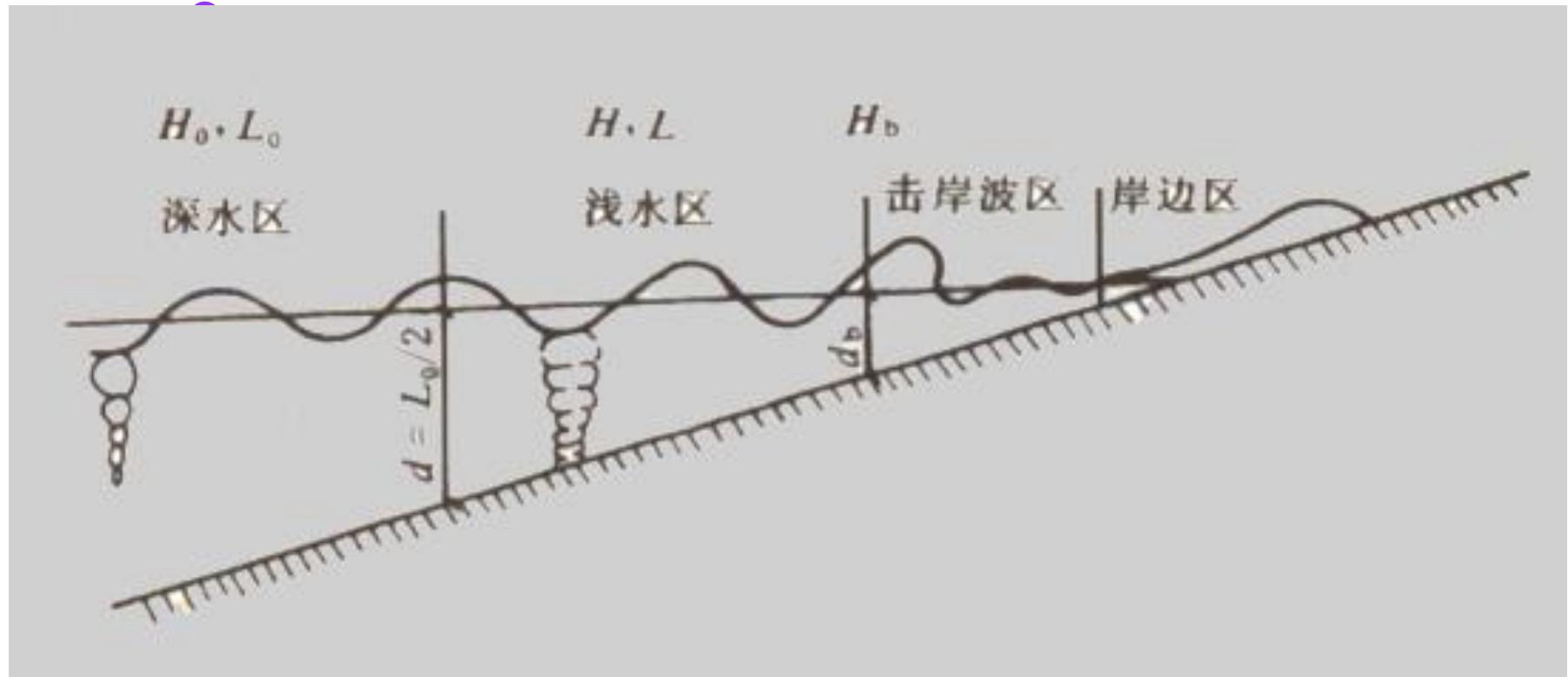
- 6、深水前进波和浅水前进波
- 在水深 $d$ 大于半波长的水域中传播的波浪称为深水前进波（简称深水波）。深水波不受海底的影响，其水质点运动轨迹接近于圆形，且波动主要集中于海面以下一定深度的水层内，又常称为短波。
- 当深水波传至水深 $d$ 小于半波长的水域时，称为浅水前进波（简称浅水波）。浅水波受海底摩擦的影响，水质点运动轨迹接近于椭圆，且水深相对于波长较小，故又称长波。



- 7、振荡波和推移波
- 在一个波周期内，水质点运动的轨迹是封闭的或接近于封闭，即水质点仅在原地作振荡运动，这种波动称为振荡波。
- 而在一个波周期内，水质点有明显位移，称为推移波。
- 浅水波传向近岸，发生变形，波陡增大，直至波浪破碎，而破碎后继续向岸推进，形成击岸波，并多次破碎，都属于推移波。
- 击岸波最后一次破碎后形成击岸水流。



- 根据波浪行近海岸时的变化，对于坡度较缓的海滩，近岸水域按不同水深可大致划分为四个区域，即深水区、浅水区、击岸波区及岸边区，如图6-4所示。
- 事实上，由于波浪的不规则性，确切地划分各个区域的分界位置是不可能的，图6-4所示仅是根据理想规则波确定的。
- 图中 $d_b$ 表示波浪破碎处水深，对应的波高称为破碎波高，以 $H_b$ 表示。





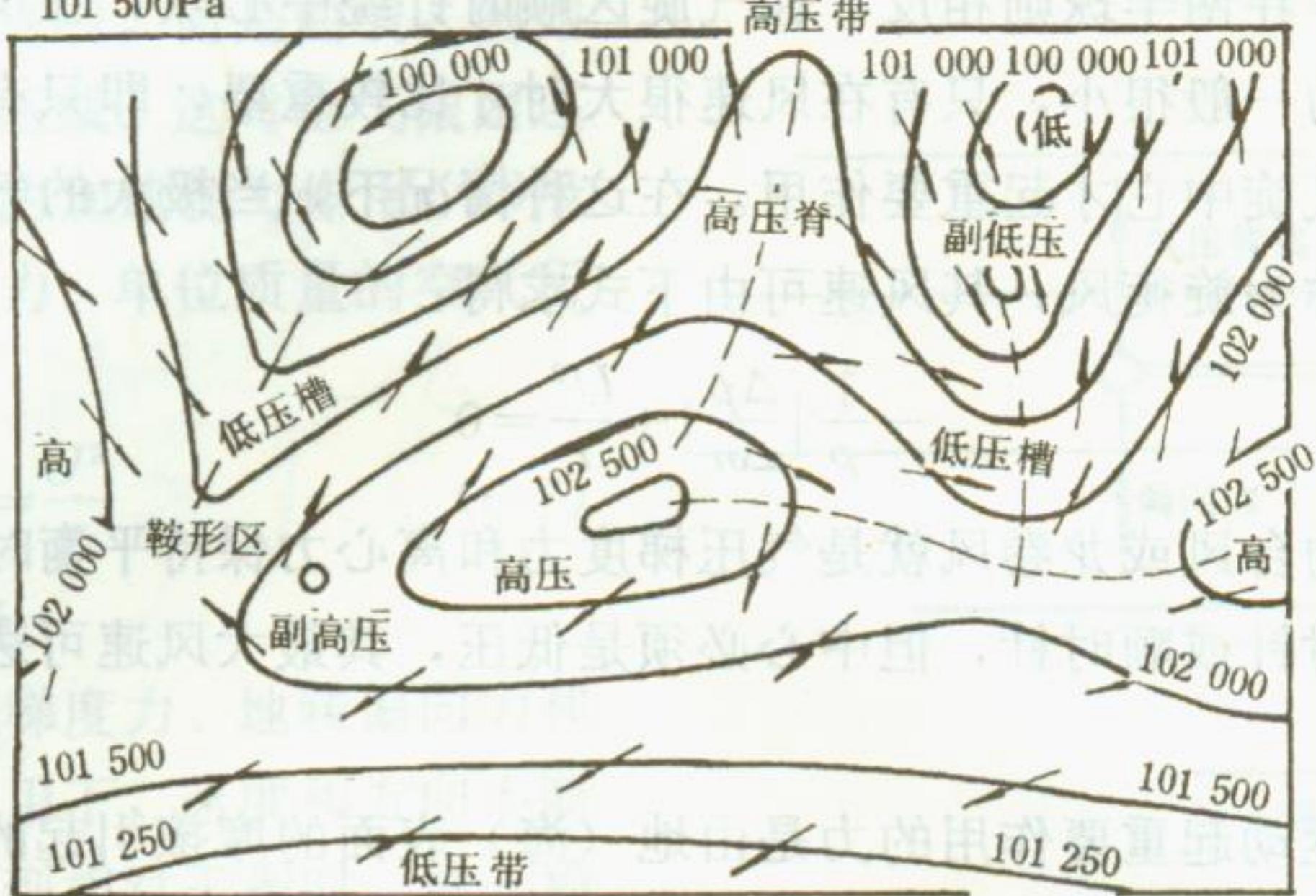
## 第二节 风况基础知识

- 一、风的形成及类型
- 地球南北两极与赤道之间存在的温差为驱动地球大气环流提供所需的能源。在热能向动能转换产生大气运动的过程中，必定包含大气的水平及上下升降运动。大气运动的主要原因是水平和垂直方向上气压差的存在。
- 主要是空气在水平方向上的气压差形成的水平运动，称为风，因此气压随时间和空间的分布及其变化就成为分析风速、风向及其变化必须掌握的资料，从而也是研究海浪的形成及其变化的基础。



- 空气运动的主要原因是水平气压梯度的存在和维持，而控制近地面空气水平运动（风）的因素有四个：即作用在空气微团上的气压梯度力、地球自转形成的地转偏向力，即科氏力、离心力和摩擦力。
- 包围在地球表面的大气是有重量的，气压就是大气作用于地球表面单位面积上的力。气压的单位是帕（Pa）。

101 500Pa





- 各种力对空气运动所起的作用在不同场合有着主次之分，在自由大气中，摩擦力可以不计，地转风和梯度风就成为空气水平运动的主要形式。
- 在贴近地、海面的摩擦层内，摩擦力又起着主要作用。
- 对于大范围的空气运动来说，离心力可以忽略不计，风速取决于气压梯度力和地转偏向力。
- 对于赤道附近的低纬度地区和尺度很小的气旋来说，地转偏向力可以忽略，这时地、海面风速主要取决于梯度力、离心力和摩擦力。



## 二、我国近海风况特点

- 由于气团发源地不同，全球各个地带的风况各异，我国近海风况的特点主要表现为：季风、寒潮大风和台风。
- 1、季风
- 由于海陆间热力差异为主导因素，随着季节变化而引起高、低压中心和风带的移动，形成冬、夏两季盛行方向几乎相反的风，夏季由海向陆吹，冬季由陆向海吹，称为季风。
  -



- 我国是世界上著名的季风国家之一，每年10月至次年3月盛行偏北风，6月以后盛行偏南风，4、5月和8、9月为季风转换季节。
- 冬季渤海和黄海多西、西北和北风，占60%；东海多北和东北风；南海多东北和东风，占88%左右。夏季多为东南、南和西南风，渤海、黄海占50%左右；东海、南海占56%左右。



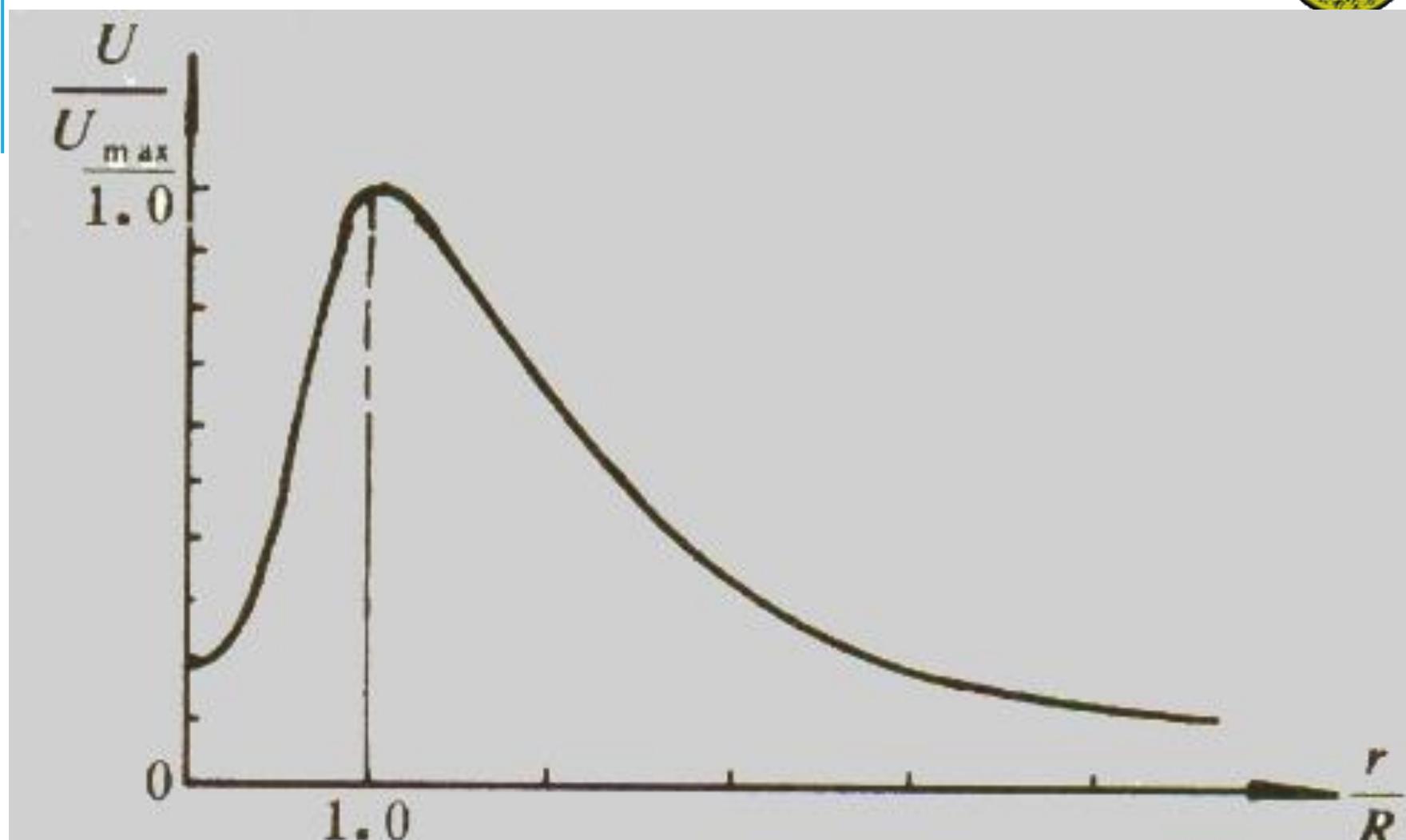
- 2、寒潮大风
- 中央气象台规定：冷空气入侵后，气温在24h内降低10°C以上，且最低气温降至5°C以下，称为寒潮，它是我国冬季主要的天气过程之一，一般持续3~5天。寒潮路径较稳定，它发源于极地，经西伯利亚，主要从偏西方向进入我国，风力可达8~9级，阵风10~11级。寒潮大风在一些迎风的海岸，如山东莱洲湾易引起增水现象（风暴潮），工程设计中应特别注意。
- 我国特别冷的原因



- 3、台风
- 台风就是热带气旋，它起源于赤道南北纬度 $5^{\circ} \sim 20^{\circ}$  的海洋面上，以太平洋最多，约占56%，尤以西太平洋更多，占36%以上。中央气象台把热带气旋按中心最大风力分为四级：中心风力8级以下称为热带低压；8~9级称为热带风暴；10~11级称为强热带风暴；12级及以上称为台风。
- 台风直径约600~1000km，台风区内等压线分布近似圆形，中心气压可降至90000Pa以下，气压梯度一般为15~16Pa/km，地面最大风速可达50~60m/s，台风中心移动速度约10~50km/h。台风多出现在7~10月。台风路径很复杂，很难找到两个路径完全相同的台风，对我国沿海而言，归纳起来主要分为西行台风、登陆台风和转向台风。



- 台风还有一个特征，即在台风中心有一个眼区，称为台风眼，在这里风势突然减小，甚至无风，云消雨散，气压则降至最低点。
- 台风眼直径大小不一，自 $10\sim40\text{km}$ 不等。由于有台风眼的存在，台风最大风速不出现在中心，而出现在离中心某一距离 $R$ 为半径的圆周上。图6-10即为台风区内风速分布的示意图，图中坐标原点表示台风中心， $U$ 为距离中心任意意 $r$ 处的风速， $U_{\max}$ 为最大风速， $R$ 即为自台风中心至出现 $U_{\max}$ 处的距离，称为最大风速半径。





- 台风是我国沿海主要的严重灾害性天气，主要表现为狂风与暴雨袭击和增水引起的灾害。我国沿海各省都曾受台风侵袭，造成严重破坏，特别是福建、广东、海南、台湾省受影响最大，它是海港工程设计中需特别注意的灾害性天气系统。（1、建筑物安全，2、安全作业）
- 视频资料



### 三、风况观测

- 风的特征常用风速和风向两个量来表示。风速是空气在单位时间内所流过的水平距离，单位一般用米／秒 (m／s) 、公里／时 (km／h) 或海哩／时 (nmile／h) 表示。风向指风吹来的方向，一般用16个方位表示。16个方位与度数的换算关系见表6-2，无风时用C表示。由于风场是一随时间变化的过程，其瞬时变化还具有显著的脉动特性，因此测定风况需要观测一段时间内的风速和风向并确定其平均值，有时还需瞬时最大值。



- 海里，有时以一个双音节单字里代表，符号为nm，是一个于航海使用的长度单位，相等于国际单位制1,852米。
- “海里”传统上定义为围绕地球一圈的一角分(一圈等于360度，1度等于60分，故1海里的长度是子午线长度两倍 $\div 360 \div 60$ )。它可从航海图中，以子午线的上纬度的改变来量度。
- 1929年在摩纳哥的International Extraordinary Hydrographic Conference，定义了1海里为1,852米。在此之前，不同国家地区对1海里的定稍有不同，如英国在1970年前的1海里为6,080英尺，相当于1,853.184米，而美国以前1海里为6,080.2英尺，相当于1,853.249米。



- 航海上，每小时1海里的速度叫做1“节”。(Kn) 以前是船员测船速的，每走1海里，船员就在放下的绳子上打一个节，以后就用节做船速的单位。
- 1节 (kn) = 1海里/小时 =  $(1852/3600)$  m/s 是速度单位  
1海里 (n mile) = 1852m 是长度单位，1节等于每小时 1 海里，也就是每小时行驶1.852千米（公里）
- 陆上的车辆和空中的飞机，以及江河船舶，其速度计量单位多用千米（公里）/小时，而海船（包括军舰）的速度单位却称作“节”。



- “节”的代号是英文“Knot”的词头，采用“Kn”表示。1节等于每小时1海里，也就是每小时行驶1.852千米（公里）。航海上计量短距离的单位是“链”，1链等于1/10海里，代号是英文“Cable”的词头，用“Cab”。
- 中国承认这一标准，用代号“M”表示。
- 此外，舰船上锚链分段制造和使用标志长度单位也用“节”通常规定锚链长度27.5米为1节；中国舰艇的使用标志以20米为1节。
- 现代海船的测速仪已非常先进，有的随时可以数字显示，“抛绳计节”早已成为历史，但“节”作为海船航速单位仍被沿用。



# 十六方位与度数换算表表6-2

方位	度数	方位	度数
N (北)	$348.9^\circ \sim 11.3^\circ$	S (南)	$168.9^\circ \sim 191.3^\circ$
NNE (北东北)	$11.4^\circ \sim 33.8^\circ$	SSW (南西南)	$191.4^\circ \sim 213.8^\circ$
NE (东北)	$33.9^\circ \sim 56.3^\circ$	SW (西南)	$213.9^\circ \sim 236.3^\circ$
ENE (东东北)	$56.4^\circ \sim 78.8^\circ$	WSW (西西南)	$236.4^\circ \sim 258.8^\circ$
E (东)	$78.9^\circ \sim 101.3^\circ$	W (西)	$258.9^\circ \sim 218.3^\circ$
ESE (东东南)	$101.4^\circ \sim 123.8^\circ$	WNW (西西北)	$281.4^\circ \sim 303.8^\circ$
SE (东南)	$123.9^\circ \sim 146.3^\circ$	NW (西北)	$303.9^\circ \sim 326.3^\circ$
SSE (南东南)	$146.4^\circ \sim 168.8^\circ$	NNW (北西北)	$326.4^\circ \sim 348.8^\circ$



- 在陆地上，测风站应设置在空旷、不受建筑物影响的地点。在我国风况观测一般采用自动记录的电接式风向风速仪。该仪器由风速感应器、风向感应器、指示器和记录器组成，感应器安装在室外桅杆上。从记录器的记录纸带上可读取任意10min的平均风速和风向，指示器给出瞬时风速和风向。水文气象台站报表上的测风记录多为用指示器测得的2min平均值。
- 为补充沿海观测站的不足，国家海洋站要求在沿海航行的我国的船舶每天4次定时将所在海域的水文气象资料向岸上台站报告。在海上当无风速仪时，常利用海面特征目测风速，风向则用罗盘测定。目测的风速用蒲福风级表表示，见表6-3，表中按风速大小将风分为12级，并说明相应的海面特征。后来发明的测风仪器测出自然界存在风速大于12级的风况，并将风级扩展到17级。



# 风力等级表表6-3

风级	风名	相当风速		海面征求	海面浪高(m)		海面状况
		Nmile/h	m/s		一般	最高	
0	无风	小于1	0~0.2	海面如镜	/	/	如镜
1	软风	1~3	0.3~1.5	海面有波纹，但还没有白色的波顶	0.1	0.1	微波
2	轻风	4~6	1.6~3.3	波纹虽小，但已明显，波枯透明象玻璃，但不碎	0.2	0.3	小浪
3	微风	7~10	3.4~5.4	波较大，波顶开始分裂，泡沫有光，间或见到白色波浪	0.6	1.0	小浪
4	和风	11~16	5.5~7.9	小浪，波长较大，往前卷的白碎浪较多，有间断呼啸声	1.0	1.5	轻浪
5	清风	17~21	8.0~10.7	白碎浪很多，呼啸声不断，间或有浪花溅起，中浪	2.0	2.5	中浪
6	强风	22~27	10.8~13.8	开始成大浪，波浪白沫飞布海面，呼啸声大作	3.0	4.0	大浪
7	疾风	28~33	13.9~17.1	海面象由波浪堆积而成，碎波的白泡沫开始成纤维状，随风吹散飞过几个波顶	4.0	5.5	巨浪
8	大风	34~40	17.2~20.7	中高浪，波长更大，随风吹起的纤维状更明显，呼啸声大作	5.5	7.5	狂浪
9	烈风	41~47	20.8~24.4	海浪卷翻，泡沫可能影响能见度，高浪	7.0	10.0	狂涛
10	狂风	48~55	24.5~28.4	大高浪，海浪颠簸好象追击，浪花飞起白色，能见度受影响	9.0	12.5	狂涛
11	暴风	56~63	28.5~32.5	特高浪，中小型的船在海上有时可能被波浪所蔽，波顶边缘被风吹成泡沫，能见度低	11.5	16.0	非凡现象
12	飓风	64~71	32.7~36.9	空气中充满泡沫和浪花，海面成白色状态，能见度剧烈降低	14.0	/	
13		72~80	37.0~41.4				
14		81~89	41.5~46.1				
15		90~99	46.2~50.9				
16		100~108	51.0~56.0				
17		109~118	56.1~61.2				



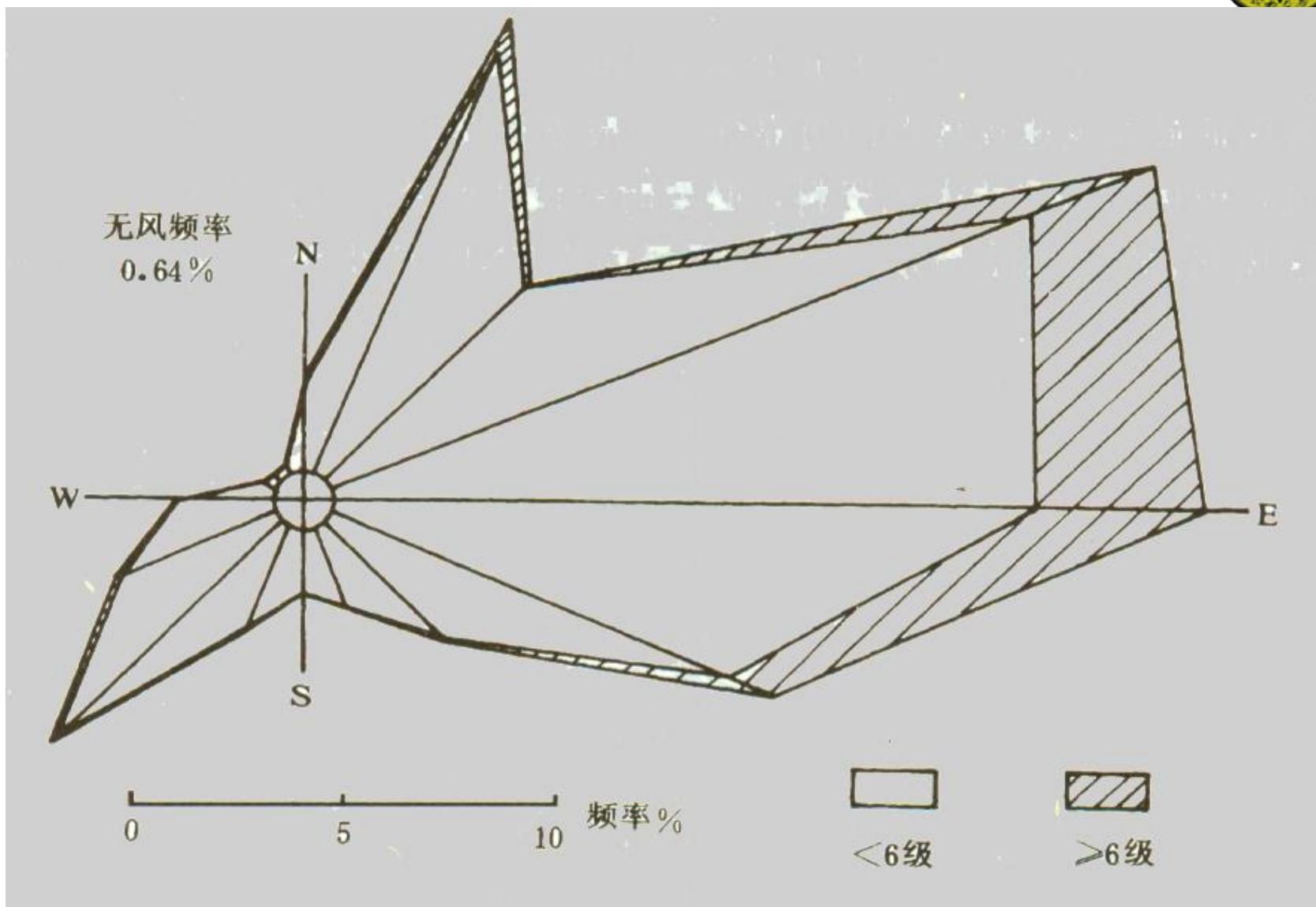
- 在地面天气图上，各台站某时的实测风速、风向以符号标明，见图6-5。图中符号 “” 表示台站位置，指向台站的竖线表示风向，与竖线垂直的每一长线段代表 $4\text{m/s}$ 风速，短线段代表 $2\text{m/s}$ ，如 “” 表示风速为 $6\text{m/s}$ ，风向为北风，三角形代表 $20\text{m/s}$ ，如 “” 表示东北风，风速 $24\text{m/s}$ 。
- 测风所得的记录经分析整理后还需填入各类报表中，工程设计上常需查阅的是月报表。需指出的是：国家气象局所属气象站的月报表是每日四次定时（北京时02、08、14、20）整编的，而国家海洋局所属水文站的测风与波浪观测同步，虽然也是每日四次，但时间为白天的08、11、14、17时，其原因主要受目前所使用的测波仪功能的限制。



- 四、测风资料的整理
- 在收集到气象台站或水文站的测风资料后，为供工程规划设计使用，需经统计整理后，绘制成各种风况图，因其图形似花朵，又称风况玫瑰图。
- 所谓风况图是指用来表达风的时间段、风速、风向和出现频率四个量的分布情况图。风况图一般按16个方位绘制。四个量有各种不同的组合方式，而且一幅风况图内也常常不能表达出这四个量的全部情况，所以常接工程需要分别绘制各种形式的风况图，其中最常见的有以下两种。



- 1、风向频率玫瑰图
- 将收集到的多年测风资料（每日四次）分方向统计后，用百分数表示出各风向的出现频率，并以一定比例绘在极坐标上。零级风（无风）可用一个以无风频率为半径，以极坐标原点为圆心的空心圆表示，或直接用数字标出。可按需要绘制全年的、某一季度或某月的风向频率玫瑰图，以满足统计港口作业或工程施工天数的需要。气象上季节的划分以3~5月为春季，6~8月为夏季，9~11月为秋季，12~2月为冬季。





- 为在风向频率玫瑰图上同时反映出各级风的出现频率，统计风向时分风级进行。见表6-4，然后将表中各向大于等于某级风（通常以6级风为界）的次数相加，并以全部观测次数除之，在图上用斜线划分出来，见图6-11。
- 为绘制较为可靠的风向频率玫瑰图，一般需要有1~3年的资料，或挑选出具有代表性的若干年份的资料。
- 由风向频率玫瑰图可判断出该地区某时段内出现频率最高的风向，即常风向以及大风的风向，如图6-11所示，表明某地区常风向为ENE及E，同时也是大风风向。

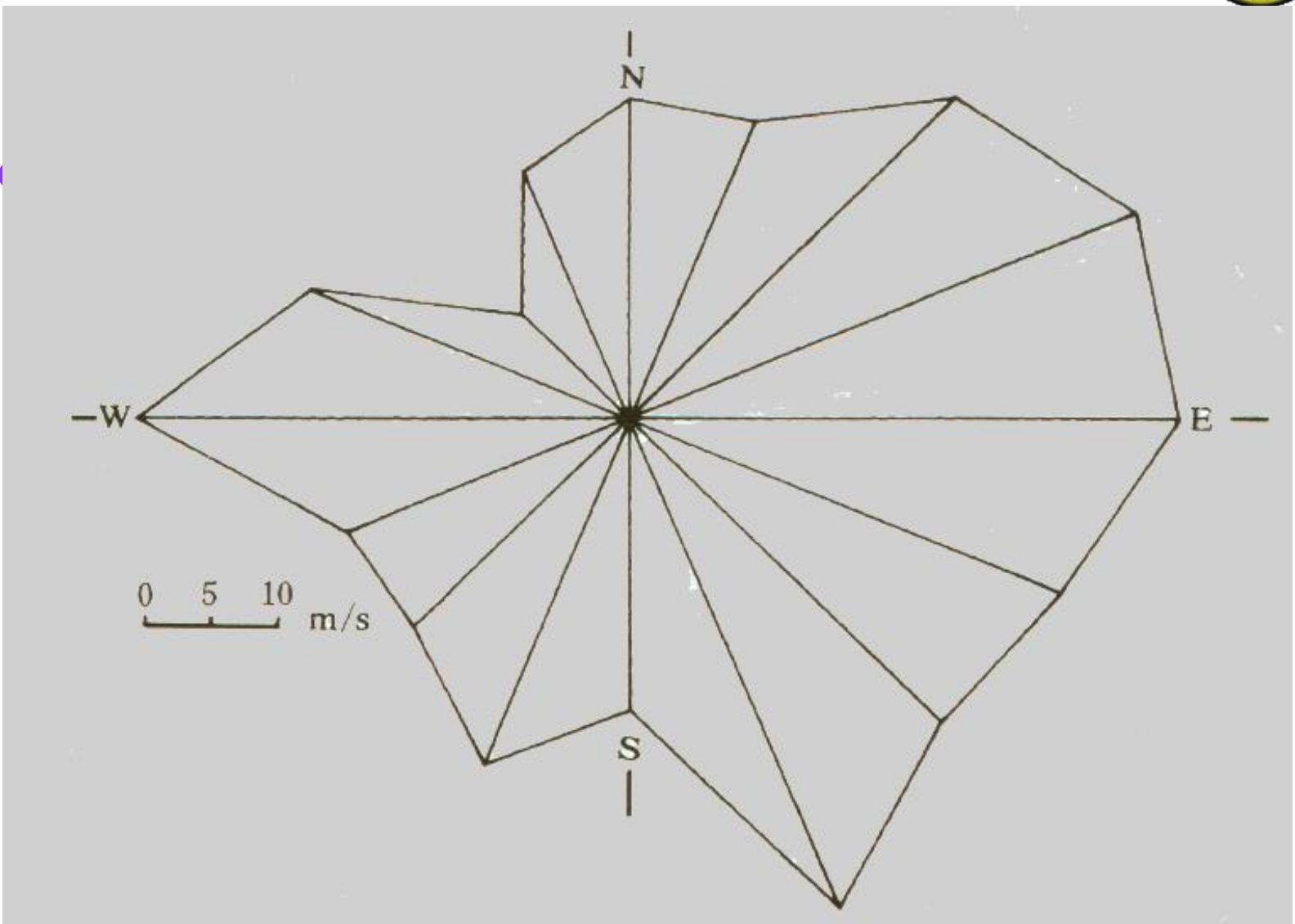


风向	次数			总次数	≥6级次数	≥6级频率 (%)	≥8级频率 (%)	总频率 (%)
	0~5级	6~7级	≥8级					
	0.1~10.7m/s	10.8~17.1m/s	≥17.2m/s					
N	91	8		99	8	0.18		2.26
NNE	48	39		525	39	0.89		11.99
NE	292	5		297	5	0.11		6.78
ENE	779	137	3	919	140	3.20	0.07	20.98
E	728	170	3	901	173	3.95	0.07	20.57
ESE	446	49	3	498	52	1.19	0.07	11.37
SE	173	2	1	176	3	0.07	0.02	4.02
SSE	94	2		96	2	0.05		2.19
S	70	1		71	1	0.02		1.62
SSW	121	2		123	2	0.05		2.81
SW	324	8		332	8	0.18		7.58
WSW	172	5	1	178	6	0.14	0.02	4.06
W	97	3		100	3	0.07		2.28
WN W	17			17				0.39
NW	6			6				0.14
NNW	11	1	1	13	2	0.05	0.02	0.30
C				28		10.14		0.64
<u>Σ</u>				4380	444		0.27	100.00

SEU



- 2、最大风速玫瑰图
- 从多年的观测资料中找出各个方向上多年内的最大风速，以一定比例绘于极坐标上而成，见图6-12。为保证最大风速玫瑰图的可靠性，一般需查阅20~30年的测风记录，特别要重视历史上出现过，但可能漏测的大风资料，必要时应设法弥补。由最大风速玫瑰图可判断当地风力最大的强风向，如图6-12所示，该地区强风向为ENE、E及SSE，最大风速都达到40m/s。





- 
- 由于风速在时间上和空间上的变化是很大的，因此风速的取值在时距上和高度上应有一个统一的标准。我国海港工程技术规范规定：对于波浪推算采用的标准是海面上10m高度处2min风速的平均值；对于港口建筑物设计采用的标准是海面上10m高度处10min风速的平均值。当所取得的资料不符合这些标准时，就需要进行风速的高度换算和时距换算。



# 风速高度换算表表6-5

风速仪离地面高度 (m)	$K_z$	风速仪离地面高度 (m)	$K_z$
5.0	1.14	12.5	0.96
5.5	1.12	13.0	0.96
6.0	1.10	13.5	0.95
6.5	1.08	14.0	0.95
7.0	1.07	14.5	0.94
7.5	1.05	15.0	0.94
8.0	1.04	15.5	0.93
8.5	1.03	16.0	0.93
9.0	1.02	16.5	0.92
9.5	1.01	17.0	0.92
10.0	1.00	17.5	0.91
10.5	0.99	18.0	0.91
11.0	0.98	18.5	0.90
11.5	0.98	19.0	0.90
12.0	0.97	20.0	0.89



# 海、陆风速换算系数表6-6

海面或海岛距海岸距离(km)	海上与沿海陆上风速比值K
2以内	<1.1
2~30	1.10~1.14
30~50	1.14~1.23
50~100	1.23~1.30
100以外	根据实测或调查资料确定

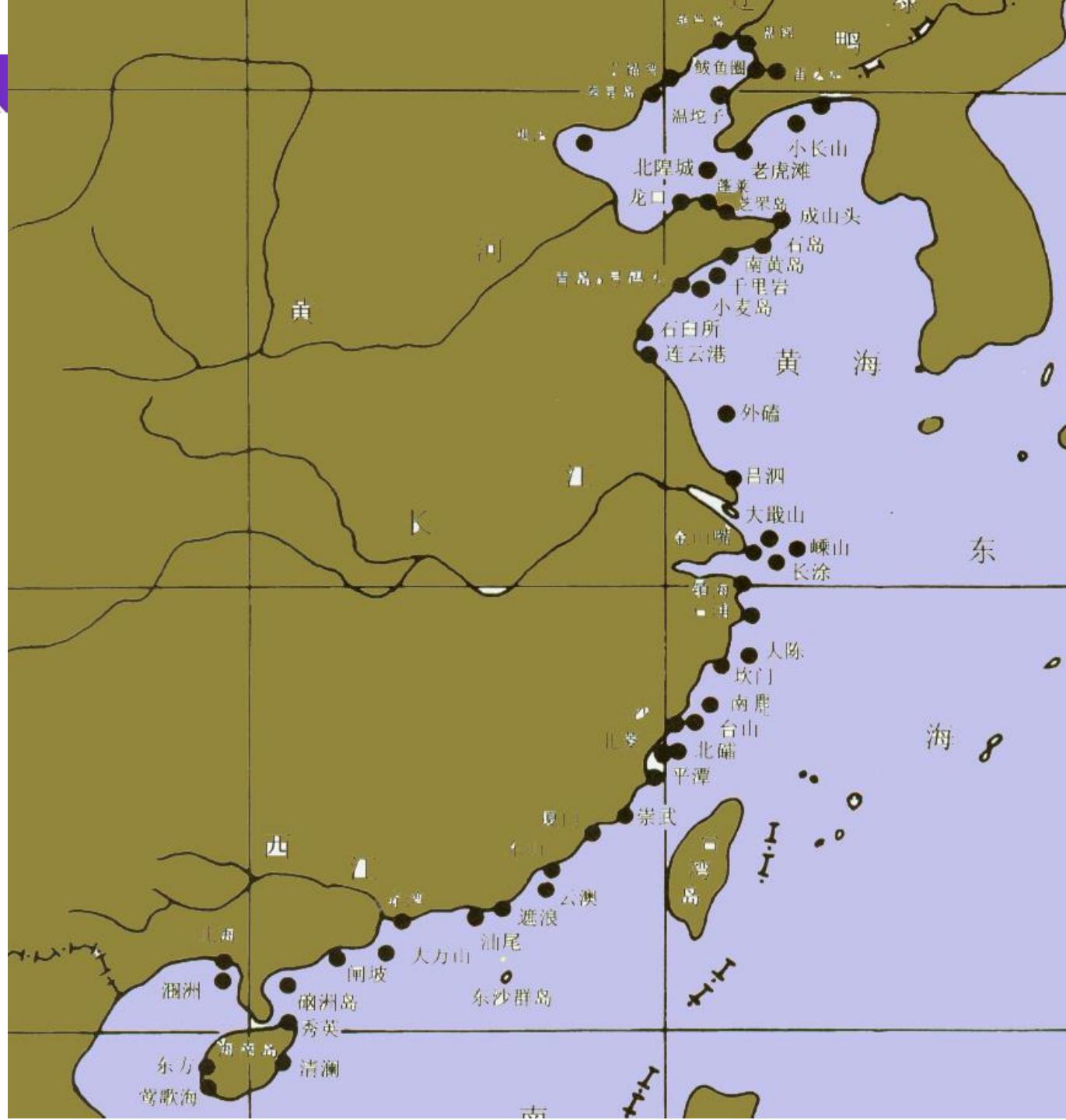


- 2、风速的时距换算
- 即使在气压场很稳定的情况下，风速也是不稳定的，具有很大的脉动性，因此风速的取值常用在一定时间间隔内的平均值来代表，该指定的时间间隔称为时距。
- 在我国的工程设计中，常用的时距有 $\bar{U}_{10}$ 和 $\bar{U}_2$ 两种，相应的风速分别称为时距10min的平均风速 $\bar{U}_{10}$ 和时距2min的平均风速 $\bar{U}_2$ ，前者用于风荷载计算，后者用于波浪推算。



# 第三节 海浪观测

- 一、波浪观测的方法
- 为了掌握筑港地区的波浪状况，最可靠的办法是进行现场观测。60年代以来，为了适应建设的需要，国家海洋局在沿海各地陆续建立了一系列海洋水文气象观测台、站，进行系统的观测以积累资料，图6-13即为我国沿海海洋水文站的分布图。另外，在筑港地区现场，根据需要也设立了不少临时观测站，以补充国家台站的不足。





- 波浪观测的项目和要求我国国家海洋局颁布的“海滨观测规范”规定：海浪观测的项目有海况、波型、波向、波高和周期。同时观测风速、风向和水深。
- 海况是指在风力作用下海面外貌特征，共分为十级，根据图、表与海面对照确定，见表



海况等级	海面征状
0	海面光滑如镜，或仅有涌浪存在。
1	波纹或涌浪和波纹同时存在。
2	波浪很小，波峰开始破裂，浪花不呈白色而呈玻璃色。
3	波浪不大，但很触目，波峰破裂，其中有些地方形成白色浪花——白浪。
4	波浪具有明显的形状，到处形成白浪。
5	出现高大的波峰，浪花占了波峰上很大的面积，风开始削去波峰上的浪花。
6	波峰上被风削去的浪花，开始沿着波浪斜面伸长成带状，有时波峰出现风暴波的长波形状。
7	风削去的浪花带布满了波浪斜面，并且有些地方到达波谷，波峰上布满了浪花层。
8	稠密的浪花布满了波浪斜面，海面变成白色，只有波谷内某些地方没有浪花。
9	整个海面布满了稠密的浪花，空气中充满了水滴和飞沫，能见度显著降低。



- 波型指波浪形态，分风浪、涌浪和混合浪三类。风浪在记录表中记为F；涌浪记为U；混合浪以风浪为主时记为F／U，以涌浪为主时记为U／F；风、涌浪并存，相差不大时记为FU；无浪时记为C或空白。
- 波向和风向一样，指波浪的来向，用16个方位记录，见表6-2。当海面有浪，但浪向难以辨别时，记为\*。风浪和涌浪并存时，需对两者的波向分别观测记录。



# 波高观测

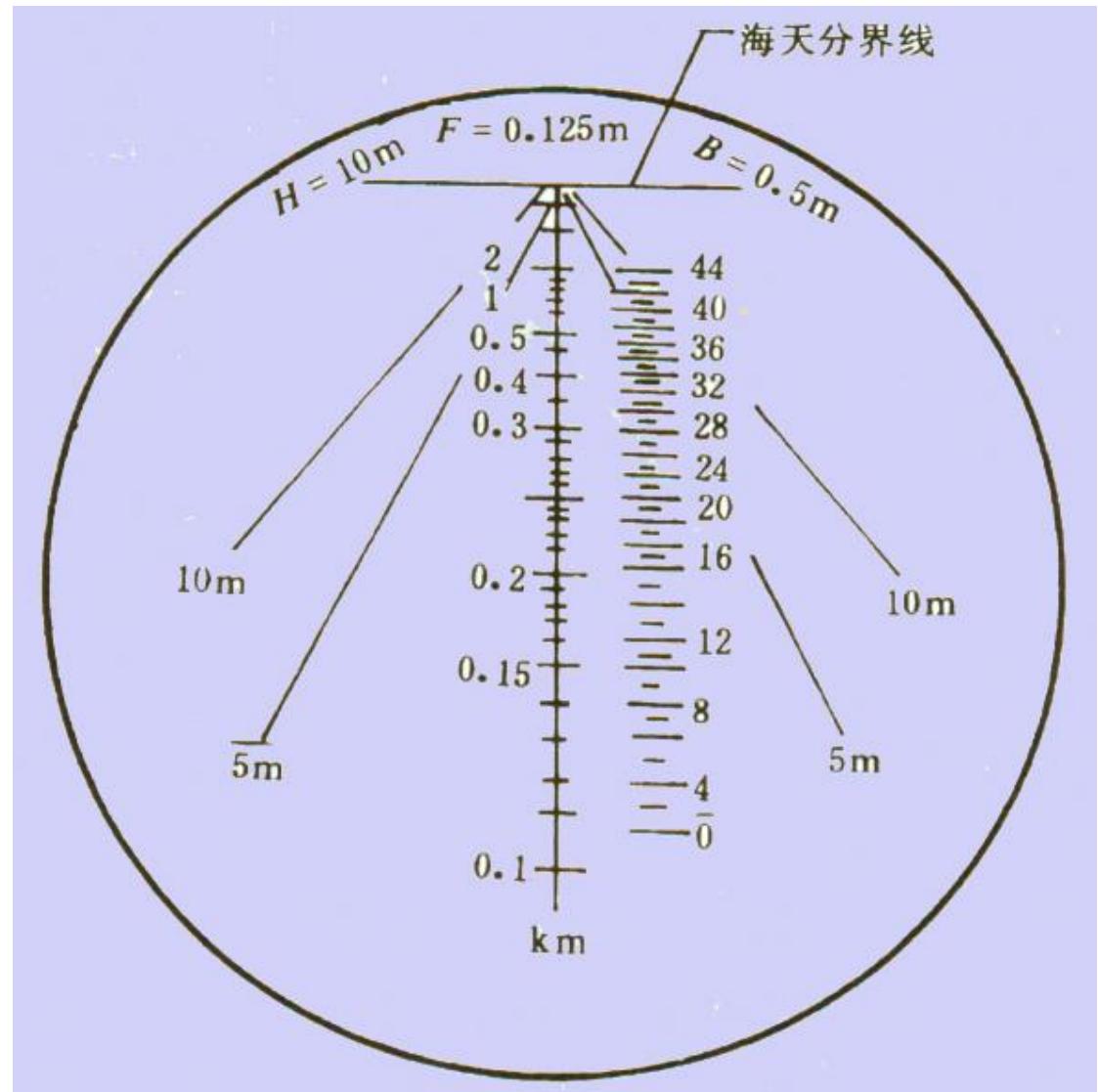
- 规范规定：应首先进行波浪周期的观测，分3次连续进行。每次用秒表测出10个连续波（即11个波峰顶）经过一固定点（即测波浮筒顶端）的时间，用30除以3次观测得的时间之和，则得平均周期，单位为秒（s），精确到0.1s。取上述算出的平均周期的100倍，作为该次波高的观测时间长度，然后在该时间段内，观测记录下15~20个大波波高，从中选出10个最大者加以平均，得平均值，记为  $H_{\frac{1}{10}}$ ，单位为（m），精确到0.1m，最后从这10个波中选出最大值记录下来。



- 测波仪的种类很多，根据其工作原理大致可分为：岸用光学测波议、压力式测波仪、声学测波仪、测波杆、船舷测波仪、遥测重力测波仪以及还未形成标准产品的激光测波仪等。我们着重介绍国内各台站最早开始使用，且至今仍在沿用的目测岸用光学测波仪、技术先进连续自记的遥测重力测波仪以及压力式测波仪。



## ● 1、岸用光学测波仪





SEU

SEU

70



- 观测方法：设置在岸坡上的岸用光学测波仪由配有透视网格的单筒望远镜和带有水准仪的分度盘组成，透视网格见图6-14。透视网格正中垂线为测距标尺，以km表示；B为波高标尺， $B=0.5$ 指每格代表0.5m；H=10m指要求仪器的光学轴高程离海平面的设置高度为10m；上端根线为海天分界线；F为物镜焦距；斜线供测漂流速用。



- 测波浮筒设置在水深足够且海面开阔的海滨地区。浮筒与岸上测波仪的水平距离一般应为仪器所要求的设置高度的20倍左右。我国生产的岸用测波仪有3种，其设置高度分别为10m、20m和40m。浮筒顶上有的还安装照明灯，可定时点亮供晚间观测。
- 观测时，浮筒跳动一次的时间间隔就是周期。浮筒杆顶端在波高标尺上的跳动格数乘以波标尺B值就是波高；使视线平行于波峰线，转动90°后，即为波向线，由罗盘读取波向。



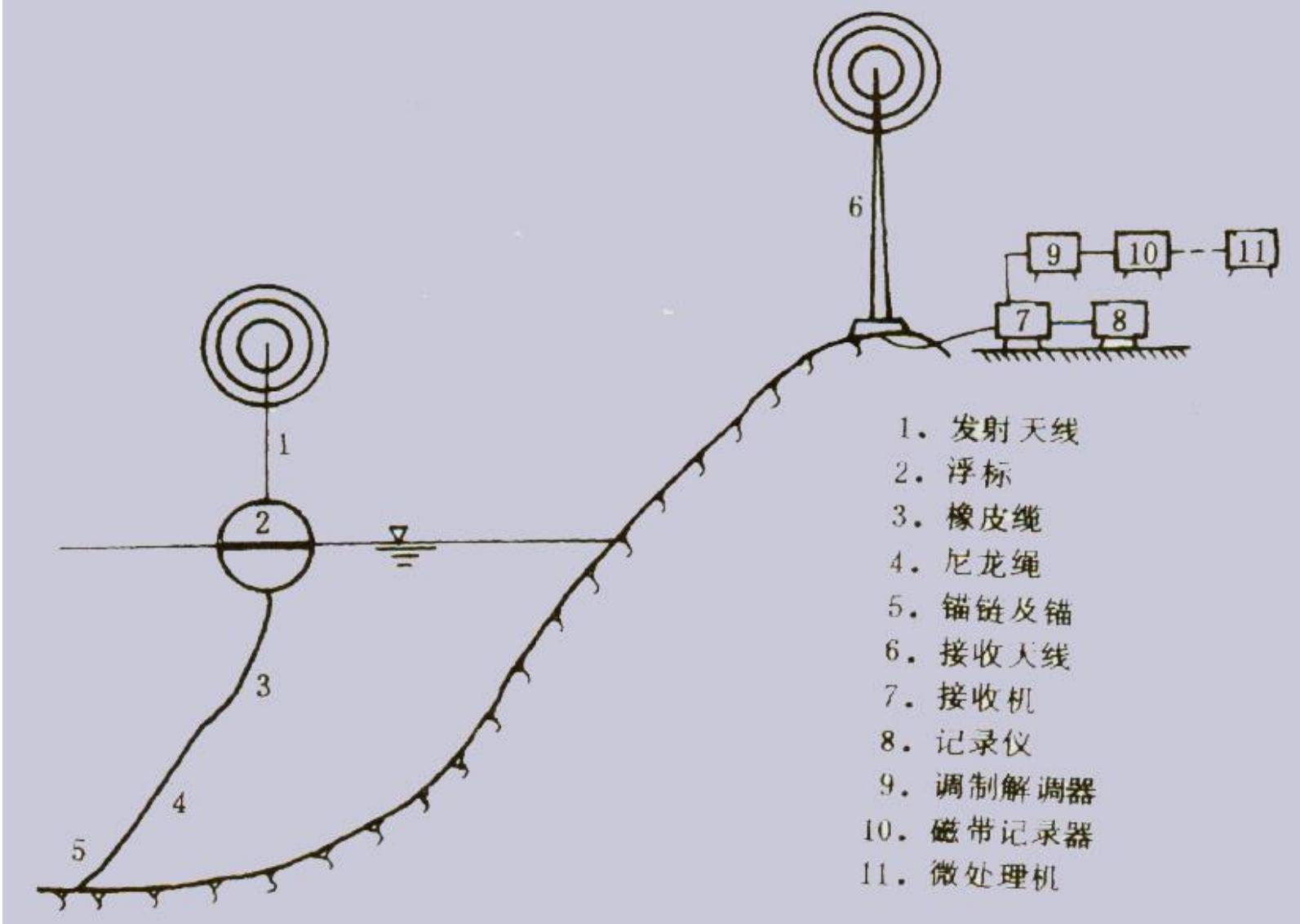
- 岸用光学测波仪每天4次定时（北京时08、11、14、17）进行观测，如大浪出现在夜间或雾天就可能漏测，这是该类仪器最大的缺点之一。其次，海上表层海流和风都能使测波浮筒发生偏移，从而影响测量精度。但该类仪器结构简单、操作方便、价格低廉，我国沿岸台站30余年的波浪资料基本上都是用它观测的，因此应对它有所了解，利于正确使用观测记录。



- 2、遥测重力测波仪
- 遥测重力测波仪是60年代逐渐发展起来的新型测波仪器，它分为船用和浮标用两类。浮标用的重力测波仪又称测波浮标，国外在海洋调查中已普遍采用，其典型产品有荷兰的“波浪骑士”测波浮标和美国恩迪科956型遥控测波仪等。  
○ 我国研制的SBFI-I型近海遥测波浪仪也已投入使用。



- 这类仪器由海上、陆上两大部分组成。海上部份主要是浮标主体和弹性的锚系系统，它包括浮标体。加速度计、闪光灯、电子线路、组合电池、发射天线及锚系等，统称为发射系统。陆上部份由接收天线、接收机、鉴频器、时控电路、记录仪、调制解调器、磁带式磁盘记录器及附属的后处理系统，如计算机等组成，图6-15为其结构组成示意图。





- 遥测波浪仪的工作原理是利用测量波面水质点运动的加速度的办法来实现测量波高的，它利用安装在浮标内或浮标下的重力加速度计来反映海面水质点的运动。海面质点（浮标）在不同的时刻具有不同的重力加速度，为此只需把测得的反映重力加速度大小的频率信号经过二次电路积分，就可获得相应的波浪高度信号。积分器输出的相应于波高的电压信号，输入到压控振荡器，从而得到相应于波高的频率输出，并作为调制信号来调制发射机载波，再通过发射天线把信号发到岸站。陆上接收机收到波浪信号，再把频率信号转换回到电压值，由记录仪描绘出波浪曲线图形，波浪信号同时输给收录机记录在磁盘或磁带上。磁盘或磁带通过回放，经解调和模数转换后成为数字量输入到计算机里进行各种处理分析。后处理系统主要包括微处理机、打印机、绘图仪等，作业时可以进行现场实时处理，也可以事后磁盘磁带回放处理。



- 美国恩迪科956型测波仪除测量波高和周期外，还能测出波向，这是其它测波浮标所不具备的。
- 遥控测波仪的工作方式是由时钟控制定时记录，如每3h、4h或6h记录一次，每次15~30min，视机种不同而异，亦可根据需要，启动机器进行连续记录。
- 这类测波仪测量的最大波高可达20~30m，遥控距离10~50km不等，是光学测波仪无法比拟的。浮标内蓄电池工作寿命可达6~10个月。
- 测波输出资料除波形曲线外，经微处理机处理后还给出波浪的各种特征值，如平均波高  $\bar{H}$  、平均周期  $\bar{T}$  、最大波高  $H_{max}$  、最大周期  $T_{max}$  等及波浪频率谱以至方向谱等。



- 3、压力式测波仪
- 压力式测波仪的基本原理是利用海面波动时所形成的不同的水柱压力差来测定波高的。
- 这类仪器的特点是采用差动式压力变换器。在它的一侧感受总的静水压力，其对各种周期性的波动由低通过滤器滤去，而另一侧则感受总的水住压力加上波浪压力，两者之差即为波浪信息，该信息与由潮汐变化、大气压力变化等所引起的水柱变化无关。仪器采用硅半导体应变计式传感器，电子设备中采用集成电路，压力传感器由一个充满油的膜盒与水隔离，故不受阻塞、生物污损及泥沙淤积影响。压力传感器可装在海底以上0~60m各种水深处，可嵌装在结构物上，也可系于缆绳上，但波浪感应压力随水深增加而衰减，故仪器最大安置水深不宜过深，以不超过15m为宜。  
。

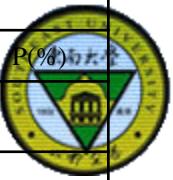


- 这种测波仪在国内外开始大量应用，且已有典型的商品化产品，如美国InterOcean公司的系列产品WG／7500型等。该类测波仪因传感器位于水下，无活动部件，故仪器的平均无故障工作时间比其它仪器高，缺点是无法记录波向。这类仪器的另一个缺点是波浪中的高频短波会随着传感器设置水深的增加而更多地被滤掉。

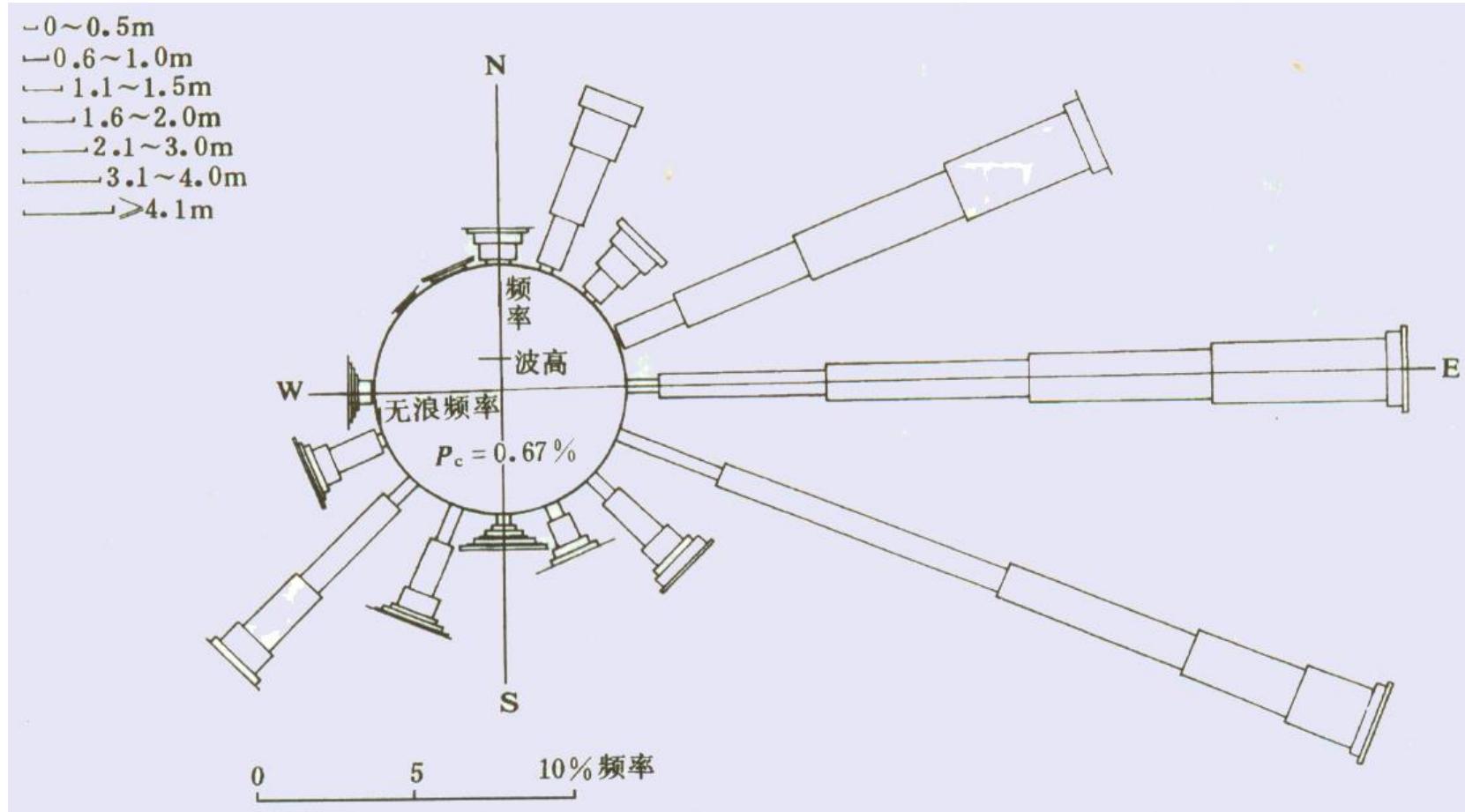


- 二、海浪资料的整理
- 报表中的“周期”指平均周期；“波高”指连续100个波中，按波高从大至小排列，前10个大波的平均值；而“最大波高”指100个波高中的最大值，使用时应特别注意。
- 表示某海区各向各级波浪出现频率及其大小的图称为波浪玫瑰图。为绘制波浪玫瑰图应对海区多年的波浪观测资料进行统计整理，先将波高或周期分级，一般波高可每间隔0.5~1.0m为一级，周期每间隔1s为一级，然后从月报表中统计各向各级波高或周期的出现次数，并除以统计期间的总观测次数，即得频率。
- 为得到可靠的波浪玫瑰图，一般需1~3年的连续资料，或选择有代表性的典型年份的资料，见表6-9，表中m为出现次数；P为频率以%计。

波向	0.0~0.5m		0.6~1.0m		1.1~1.5m		1.6~2.0m		2.1~3.0m		3.1~4.0m		≥4.1m	
	m	P(%)	m	P(%)										
N	1	0.02	7	0.16	21	0.48	15	0.35	7	0.16	1	0.02		
NNE	10	0.23	69	1.59	99	2.29	56	1.29	27	0.62				
NE	6	0.14	34	0.79	36	0.83	23	0.53	9	0.21				
ENE	5	0.12	90	2.08	183	4.23	227	5.24	183	4.23	23	0.53	1	0.02
E	45	1.04	230	5.31	276	6.37	250	5.77	237	5.47	22	0.51	5	0.12
ESE	152	3.51	413	8.54	273	6.30	157	3.63	96	2.22	15	0.35	4	0.09
SE	37	0.85	83	1.92	31	0.72	9	0.12	16	0.37	3	0.07		
SSE	23	0.53	37	0.85	13	0.30	6	0.14	1	0.02			1	0.02
S	15	0.35	18	0.18	7	0.16	1	0.02	5	0.12	1	0.02	3	0.07
SSW	53	1.22	77	1.78	28	0.65	5	0.12	7	0.16	1	0.02	1	0.02
SW	43	0.99	163	3.76	105	2.42	35	0.81	11	0.25	1	0.02		
WSW	8	0.18	67	1.55	22	0.51	10	0.23	3	0.07	3	0.07		
W	3	0.07	20	0.46	4	0.09	4	0.09	2	0.05	1	0.02		
WNW														
NW			1	0.02	1	0.02								
NNW					4	0.09	1	0.02			1	0.02		
C	29	0.67												
Σ	430		1307		1103		799		604		72		15	
总次数n=4320														



## ● 波高玫瑰图

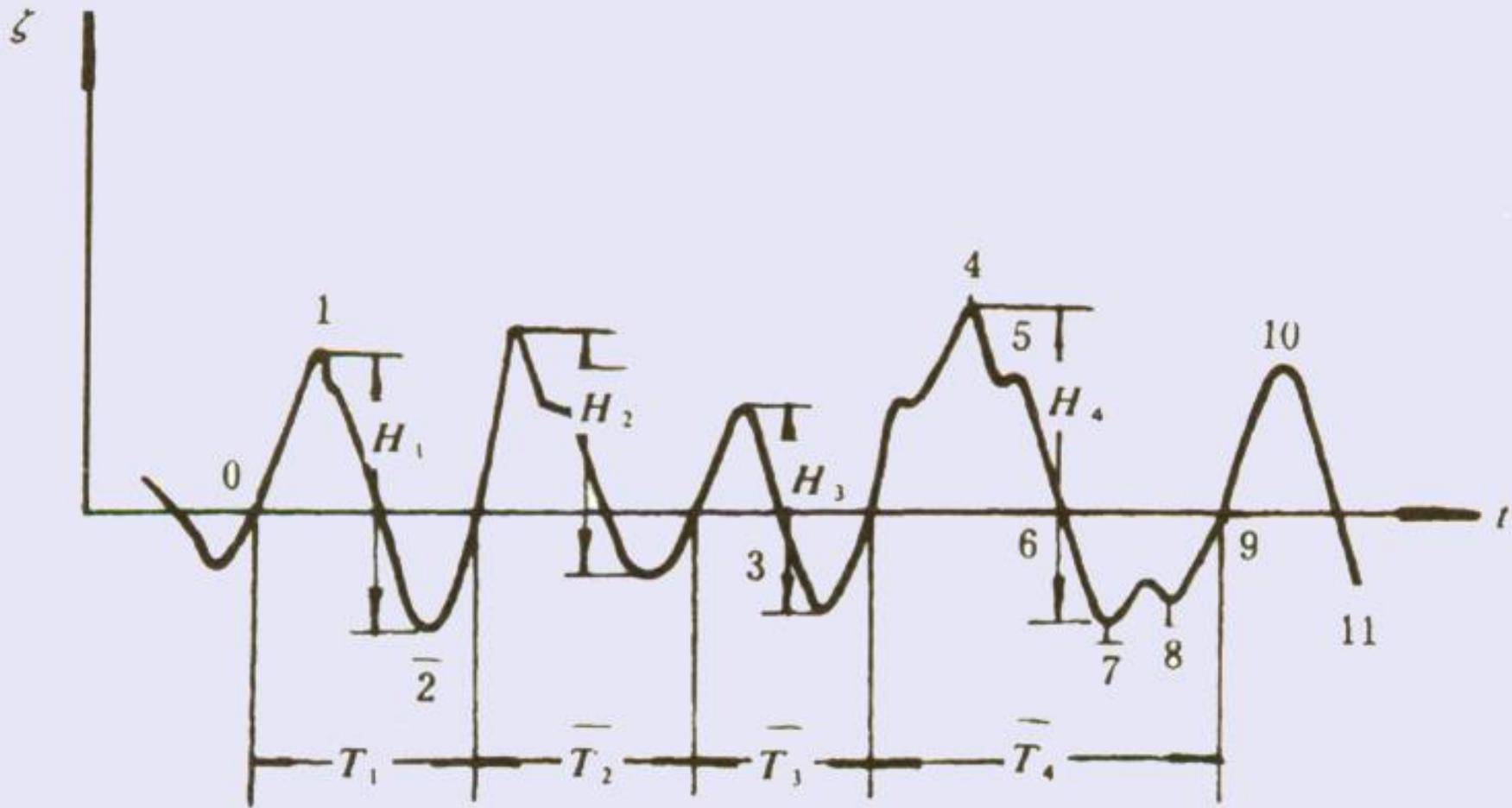




# 第四节 海浪要素统计规律

## 一、固定点波高和周期的统计分布

- 如果用连续自动记录的遥测重力测波仪进行波浪观察，则可以记录到海面上某固定点波面随时间变化的过程线，见图6-17，它显然不同于规则波，而是一个复杂的不规则波波列，因此需要对它另外给出波浪要素的定义。图6-17中横轴表示时间，同时也代表静水面，纵轴代表波面相对于静水面的垂直位移。波面自上而下跨过横轴的交点称为下跨零点（例如3、6点），而自下而上跨过横轴的交点称为上跨零点（例如0、9点）。相邻的两个上跨零点（可跨零点）间的时间间隔称为周期，由此依次读取的各个周期是不等的，其平均值称为平均周期。在一个周期内取波面的最高点作为波峰顶（例如4点），同样，波面的最低点作为波谷底（例如7点），而5、8点不能作为波峰顶、波谷底，峰顶与谷底之间的垂直距离定义为波高，显然由此依次读取的各个波高也是不等的，其平均值称为平均波高。统计表明，无论采用上跨零点或下跨零点定义波高和周期，其平均值是基本相同的。





- 如在某一固定时刻，沿波浪传播方向（波向线）取波面的垂直剖面，得波面随位置变化的曲线。同样用上跨零点法可依次读取波长，并计算出平均波长  $\bar{L}$ 。实测资料的分析结果表明，不规则波的平均周期  $\bar{T}$ 与平均波长  $\bar{L}$  的关系已不同于规则波的式6-1和式6-2，它们之间的关系可近似用下式表示

$$\bar{L} = k \left( \frac{g \bar{T}^2}{2\pi} \right)$$

- 系数k，根据充分成长的劳曼谱可推得  $k=2/3$



- 表6-10为我国沿海某站实际观测记录按上跨零点法取值后得到的连续100个波的波浪系列实例。从该表可以看出，在一个波浪系列中，各个波浪不仅大小各不相同，而且它们的出现次序也是无序偶然的。如果在这场风浪中（风浪处于定常稳定状态下）再连续读取100个波，则这个波列波高和周期的次序和大小和上一个波列又有所不同，但它们所反映的是同一海浪状态，因此，在一个波浪系列中，波浪的大小分布具有偶然性，亦即可以看作一随机事件。



H(m)	T(s)								
2.0	9.2	1.3	5.3	0.8	4.5	0.6	11.4	2.1	9.2
3.0	6.6	3.2	7.3	2.5	6.6	1.4	6.6	2.7	9.8
2.5	6.6	5.3	6.8	4.1	7.3	1.6	5.6	3.2	8.6
3.1	6.9	3.3	6.9	3.8	6.9	1.1	5.3	1.9	5.6
1.6	8.6	1.5	8.3	1.7	6.9	1.6	8.3	0.2	4.1
1.9	7.1	1.2	8.6	1.0	5.3	2.1	6.0	1.4	7.9
2.2	5.4	1.9	6.6	2.	5.8	1.1	23.0	2.1	5.6
3.3	7.1	1.5	5.6	1.8	5.8	3.0	6.9	3.3	6.6
3.0	6.6	3.1	6.6	2.0	9.4	2.6	6.9	2.2	7.9
4.9	7.5	1.8	6.4	1.8	8.3	1.7	8.8	2.1	6.4
1.6	8.1	1.4	4.5	1.3	9.6	1.5	4.5	1.6	7.5
1.5	8.1	1.8	5.8	1.3	6.8	3.9	7.1	1.3	8.3
0.9	4.3	1.8	6.2	1.5	5.4	3.0	8.1	2.4	7.5
1.1	5.4	1.5	4.3	1.0	4.1	2.4	16.1	3.7	7.3
3.1	7.5	4.3	6.6	2.0	5.8	3.3	6.2	3.8	6.4
3.2	6.8	4.8	7.1	1.4	7.5	2.0	6.4	2.4	6.2
2.3	6.6	4.1	6.9	0.3	3.6	1.1	6.2	2.6	7.3
1.2	4.5	3.9	6.6	1.3	10.5	2.5	5.8	1.3	4.3
1.5	4.9	2.9	6.4	2.0	8.4	2.1	5.3	2.2	6.8
2.7	6.2	0.7	4.1	2.0	8.1	3.5	7.1	3.3	8.1



- 如第四章所述，对于随机事件可采用数理统计的方法研究其规律。此时，波列中各个大小不同的波高或周期就是随机事件中的随机变量，而风浪处于稳定状态过程中所有的波高或周期就是总体，从中任意取出的连续的100个波就是样本。我们将通过对样本的研究来估计总体的变化规律。
- 反映随机事件规律的第一个特征值是样本的平均值，表6-10波列的平均波高或平均周期按下式计算

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i, \bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$$



- 式中:  $N$ ——所取样本总个数。本例中 $N=100$ , 平均波高 $=2.2m$ , 平均波高反映了波列总体的大小, 例如根据两场风浪的记录计算出的平均波高不同。显然平均波高大的那场波浪比平均波高小的那场波浪为大。
- 为研究波高或周期大小的分布规律, 必须绘制频率直方图。为此计算各波高的比值, 即为波高的模比系数 $K_i$ , 显然平均波高的模比系数等于1.0。

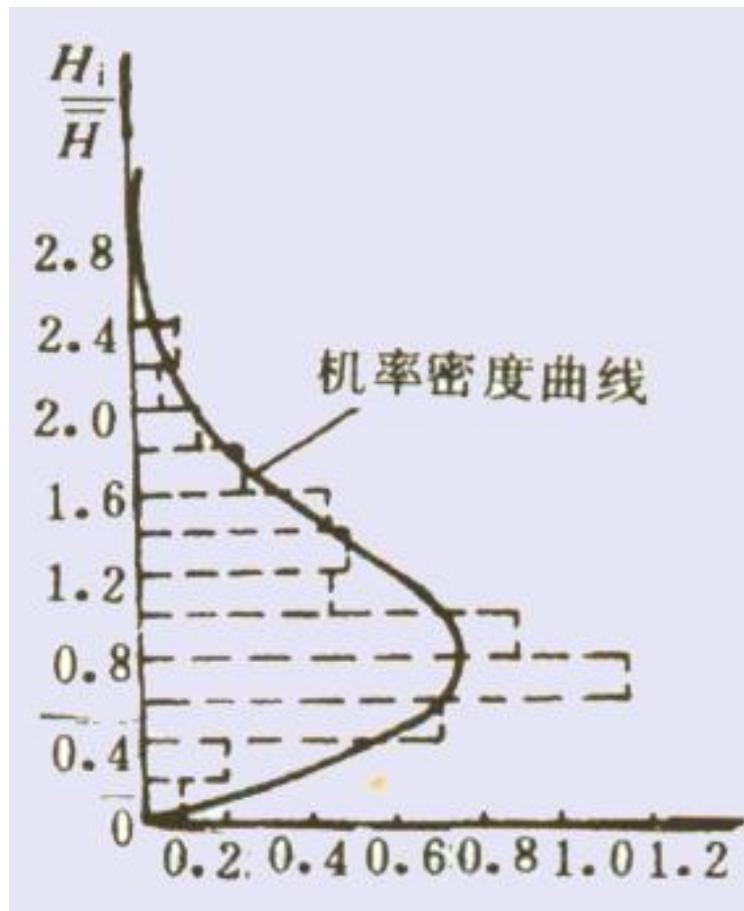


- 为研究波高或周期大小的分布规律，必须绘制频率直方图。为此计算各波高的比值  $H_i / \bar{H}$ ，即为波高的模比系数  $K_i$
- 为绘制频率直方图，以适当的间距（即组距） $\Delta H / \bar{H}$ ，将波列分成若干组，计算出各间距上、下限对应的波高，统计各组波高的出现次数  $n_i$ ，见表中第3栏，将  $n_i$  除以总次数  $N$ ，得各组波高出现的区间频率
- 由第4栏可见，各组波高出现的频率不同，在模比系数等于 1.0，即平均波高附近出现的波高次数多，而在两端出现频率较小。

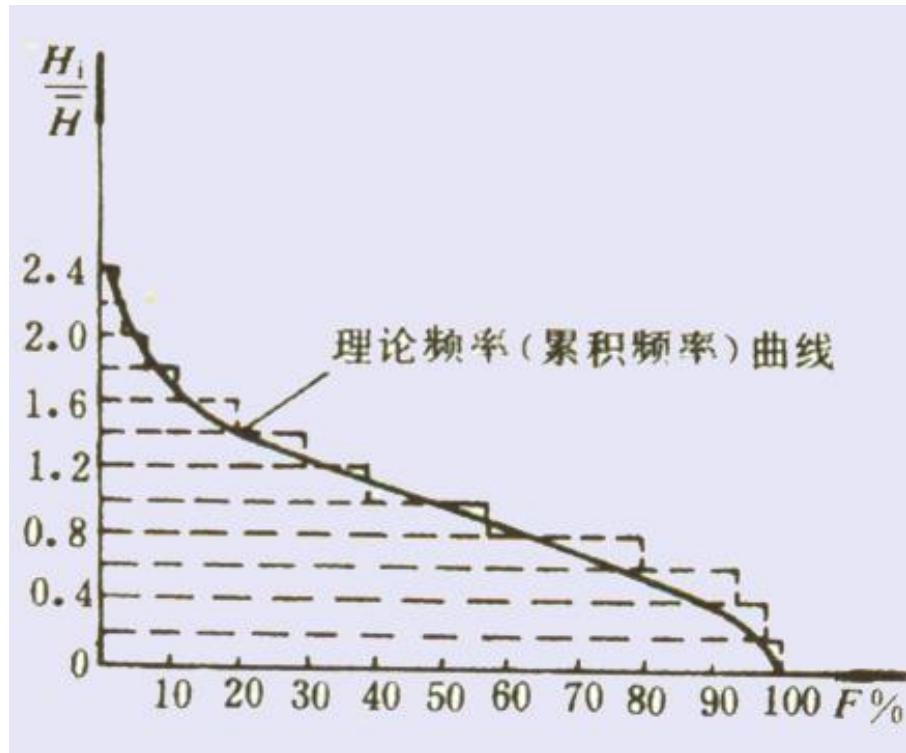


波高模比系数	波高分组 $H_i$	出现次数 $n_i$	区间频率 $f_i$		累积次数 $\sum n_i$	累积频率F (%)
1	2	3	4	5	6	7
2.4~2.2	$5.3 \geq H > 4.8$	2	0.02	0.10	2	2
2.2~2.0	$4.8 \geq H > 4.4$	1	0.01	0.05	3	3
2.0~1.8	$4.4 \geq H > 4.0$	3	0.03	0.15	6	6
1.8~1.6	$4.0 \geq H > 3.5$	5	0.05	0.25	11	11
1.6~1.4	$3.5 \geq H > 3.1$	9	0.09	0.45	20	20
1.4~1.2	$3.1 \geq H > 2.6$	10	0.10	0.50	30	30
1.2~1.0	$2.6 \geq H > 2.2$	9	0.09	0.45	39	39
1.0~0.8	$2.2 \geq H > 1.8$	18	0.18	0.90	57	57
0.8~0.6	$1.8 \geq H > 1.3$	23	0.23	1.15	80	80
0.6~0.4	$1.3 \geq H > 0.9$	14	0.14	0.70	94	94
0.4~0.2	$0.9 \geq H > 0.4$	4	0.04	0.20	98	98
0.2~0.0	$0.4 \geq H > 0.0$	2	0.02	0.10	100	100
		100	1.0			

- 以模比系数为纵坐标，平均频率为横坐标，绘出图6-18a)所示的波高平均频率直方图。显然，图上各个矩形的面积就是各组的区间频率 $f_i$ ，且各面积之和为1.0。当组距接近于无限小时，直方图趋于曲线，该曲线与纵轴包围的面积就是1.0，此时横坐标转化为频率密度，而曲线即为频率密度曲线。波高频率密度曲线的特点是“两头小、中间大”，即平均值附近的波高出现机会最多。



- 在工程设计中，通常要求知道波列中大于等于某一波高的机会，即某一波高的累积频率，或要求知道给定某一累积频率的波高值。
- 按表中第1及第7栏则可绘出波高的经验累积频率图，当组距接近无限小时，得累积频率曲线，见图





- 经验表明，取用连续的100~150个波进行统计就已能充分准确地反映波浪的统计性质，这些波经历的时间约为10~20min。如果取的波数太少，则不能保证样本的代表性，使统计结果不稳定；反之，波数取得太多太长，又不能保证波浪处于稳定的定常状态，即不能保证采样的一致性，从而影响成果的可靠住。



- 二、固定点波高和周期的理论分布函数
- 海洋上空的风暴大小千变万化，因而海浪的尺度也各不相同，初视之下，似无规律可循。但是大量波浪观测资料的统计分析表明，无论海浪多大，其波列的频率分布特性却极其相近。因此，人们着手从理论上研究海浪的分布规律，  
● 1、波高与波长的理论分布函数
- 海上某固定点的波面方程可写为

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \zeta_n = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\omega_n t + \varepsilon_n)$$



- 概率论中的李雅普诺夫定理说明：如果某随机变量是大量独立互不依赖的一系列量值很小的随机变量的总和，那么不论它们各自的分布规律如何，它们之和的分布规律总是服从正态分布。因此波面的概率密度函数可写为

$$f(\zeta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2\sigma^2}\right)$$



$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \bar{a}$$

$$H = 2a \quad \bar{H} = 2\bar{a}$$

•  $f(H) = \frac{\pi}{2} \frac{H}{\bar{H}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right]$

$$\bar{H}/d = H^*$$

$$F(H) = \exp\left[-\frac{\pi}{4(1+H^*/\sqrt{2\pi})} \cdot \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^{\frac{2}{1-H^*}}\right]$$

$$H_F/\bar{H} = \left(\frac{4}{\pi} \left(1 + \frac{H^*}{\sqrt{2\pi}}\right) \ln \frac{1}{F}\right)^{\frac{1-H^*}{2}}$$



F%	0 (深水)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5 (破碎)
0.5	2.597	2.403	2.213	2.029	1.854	1.687
1	2.421	2.256	2.092	1.932	1.777	1.628
2	2.232	2.096	1.960	1.825	1.692	1.563
5	1.953	1.859	1.762	1.662	1.562	1.463
10	1.712	1.651	1.586	1.516	1.444	1.369
20	1.432	1.406	1.374	1.337	1.296	1.252
30	1.238	1.233	1.223	1.208	1.188	1.164
40	1.080	1.091	1.097	1.098	1.095	1.088
50	0.939	0.962	0.981	0.996	1.007	1.014
60	0.806	0.839	0.868	0.895	0.919	0.940
70	0.674	0.713	0.752	0.789	0.825	0.859
80	0.533	0.578	0.623	0.670	0.717	0.764
90	0.366	0.412	0.462	0.515	0.572	0.633
95	0.256	0.298	0.346	0.400	0.461	0.529



- 表6-10中100个连续波中最大一个波，其累积频率相当于1%，其值为5.3m，与理论计算值一致。
- 表6-10深水波列进入 $d=20m$ 的浅水区后，其平均波高已由2.2m降为2.06m，试求该水深处的 $H_{1\%}$ 及 $H_{5\%}$ 。



- 三、两种特征波及其相互关系
- 海面上的海浪状态通常用波浪要素作为特征量来描述。在各个波浪要素中波高是最重要的，但是如上所述，海面上的波浪，其波高是大小不等的，因此当我们说某场海浪的波高是多少时，应指明该波高在统计意义上的含义，这就是所谓特征波高。
- 反映海浪大小的另一个重要波要素是周期，同样，当说明周期的大小时，也应该指明其统计含义，即特征周期。特征波高与特征周期统称特征波。



- 1、特征波高的两种表示方法
- 目前特征波高有两种表示方法。一种是在波列中选取某一累积频率对应的波高作为特征波高，即 $H_{F\%}$ ，如 $H_{1\%}$ 、 $H_5\%$ 等。这种特征波高反映出某给定波高值在波列中出现的可能性，如 $H_{1\%}$ 表示在波列中大于等于该波高的出现概率为1%，以此类推。
- 如上所述，波高服从一定的分布规律，如已知波列中任一累积频率的波高，就可换算成任意所要求的累积频率波高，如表6-12所示。
- 平均波高  $\bar{H}$  是各种累积分率波高间的换算媒介，所以它是一种最常用的特征波高。



- 另一种方法是以所谓部分大波的平均波高作为特征波高，其含意为：将波列中的波高由大到小依次排列，其中最大的P部分波高的平均值就称为P部分大波的平均波高，记为  $H_p$ 。例如连续1000个波中最大的100个波，或连续100个波中最大的10个波的平均波高称为  $\frac{1}{10}$  大波的平均波高，记为  $H_{\frac{1}{10}}$ ，该波高又称为显著波高；又如波列中最大的  $\frac{1}{3}$  大波的平均值，记为  $H_{\frac{1}{3}}$ ，该波高又称为有效波高。

$$H_{\frac{1}{10}} = \frac{10}{N} \sum_{i=1}^{\frac{N}{10}} H_i \text{ 或 } H_{\frac{1}{3}} = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{\frac{N}{3}} H_i$$



- 回顾第三节中使用岸用光学测波仪目测记录波浪时，波高的记录值是在波周期100倍的时间段内读取15~20个明显较大的波高，然后从中取出10个最大值，求其平均值而得，该值在统计上的含意相当于  $H_{\frac{1}{10}}$ ，而不是平均波高，因此在使用这些由岸用光学测波仪观测记录下的“波高”值时应特别注意。



- 2、两种特征波高的相互关系
- 既然波高服从一定的分布规律，因此各种部分大波的平均波高之间及它们与累积频率波高之间应有一定的关系，
- 

$$\frac{H_P}{\bar{H}} = \frac{H_F}{\bar{H}} + \frac{1}{F} [1 - erf(\ln \frac{1}{F})^{\frac{1}{2}}]$$

$$H_{1\%} = 2.2 \times 2.421 = 5.3m$$

$$H_{\frac{1}{10}} > H_{10\%}$$

$$H_{\frac{1}{10}} = 4.3m$$

$$H_{5\%} = 2.2 \times 1.953 = 4.3m$$

$$H_{\frac{1}{3}} > H_{33\%}$$

$$H_{\frac{1}{3}} = 3.4m$$

$$H_{10\%} = 2.2 \times 1.74 = 3.8m$$

$$H_{30\%} = 2.2 \times 1.238 = 2.72m$$



p	$H/d$	0 (深水)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5(破碎)
1/100	2.662	2.444	2.239	2.045	1.864	1.693	
1/50	2.490	2.301	2.121	1.950	1.789	1.636	
1/20	2.241	2.092	1.949	1.811	1.679	1.552	
1/10	2.031	1.915	1.801	1.690	1.582	1.477	
1/5	1.795	1.713	1.630	1.548	1.467	1.386	
3/10	1.641	1.578	1.515	1.452	1.388	1.324	
1/3	1.598	1.540	1.483	1.424	1.366	1.306	
2/5	1.520	1.473	1.424	1.375	1.323	1.272	
1/2	1.418	1.382	1.346	1.307	1.269	1.227	
3/5	1.327	1.302	1.274	1.246	1.215	1.184	
7/10	1.243	1.226	1.207	1.186	1.165	1.142	
4/5	1.163	1.153	1.141	1.129	1.115	1.101	
9/10	1.084	1.080	1.075	1.069	1.063	1.056	
100/100	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	



- 例：表6-10所示深水波列的 $H^* = 2.2\text{m}$ ，查表6-14按 $H^* = \bar{H}/d = 0$ ，得 $H_{\frac{1}{10}} = 2.031 \times 2.2 = 4.5\text{m}$ ,  $H_{\frac{1}{3}} = 1.598 \times 2.2 = 3.5\text{m}$ ，可见计算结果与表6-10的统计值是基本一致的。
- 比较表6-14与表6-12，可见  $H_{\frac{1}{10}}$  相当于累积频率4%的波高  $H_{4\%}$ ，而  $H_{\frac{1}{3}}$  大致相当于累积频率为13%的  $H_{13\%}$ ，即

$$H_{\frac{1}{100}} \square H_{0.4\%}$$

$$H_{\frac{1}{10}} \square H_{4\%}$$

$$H_{\frac{1}{3}} \square H_{13\%}$$

- 有了以上两表，当已知波列中任一个特征波高  $H_F$  (或  $H_p$ )，就可换算任意其它的  $H_p$  (或  $H_F$ )，而平均波高  $\bar{H}$  是一个转换媒介。



- 四、我国海港工程设计波浪的波列累积频率标准
- 1、设计波浪标准
- 所谓设计波浪这一名称泛指在海港工程设计中，在设计各类建筑物和它们的各个部分时所选用的波浪要素。对于不同的设计项目，可以采用不同的设计波浪标准。因为港口工程造价很高，所以在选取设计波浪时，既要考虑到长期使用中可能出现的不利情况，保证建筑物的安全，又要符合经济节约的原则。
- 设计波浪的标准包括两个方面：
- 1) 设计波浪的重现期标准；
- 2) 设计波浪的波列累积频率标准。



- 设计波浪的重现期是指某一特定的波列平均多少年出现一次，它代表波浪要素的长期（以几十年计）统计分布规律。设计波浪的重现期标准主要反映建筑物的使用年限和重要性。**指定重现期标准的设计波浪的推算方法将在本章第六节叙述。**
- 设计波浪的波列累积频率标准指的是设计波浪要素在实际海面上不规则波列中的出现概率，它代表波浪要素的短期（以十几分钟计）统计分布规律。在该统计期间，可以认为海面处于定常状态，或者说波浪要素的平均状态不随时间而改变。设计波浪的累积频率标准主要反映波浪对不同类型建筑物的不同作用性质。



- 2、我国海港工程设计波浪的波列累积频率标准
- 为了简化实际工作，在设计时常将实际海面上的不规则波用一个相当的规则波波列来取代，并以该不规则波波列中某一具有代表意义的特征波的波浪要素作为此相当规则波波列中的波浪要素。这个具有代表意义的特征波应该根据一定的标准从不规则波列中选取某一累积频率的波高。这个标准就是设计波浪的波列累积频率标准。
- 我国港口工程技术规范中规定：设计波浪的波高应根据不同的建筑物类型采用不同的波高累积频率标准，见表



建筑物型式	部位	计算内容	波高累积频率F%
直墙式和墩柱式	上部结构、墙身或 桩基 基床和护底块石	强度和稳定性 稳定性	1 5
斜坡式	胸墙或堤顶方块	强度和稳定性	1
	护面块石或块体	稳定性	13*
	护底块石	稳定性	13



- 五、我国沿岸海域波况的特点
- 根据海洋观测站资料的统计，我国沿岸海域，除南沙群岛以外，年平均波高（ $H_{\frac{1}{10}}$  的年平均值）总的趋势是由北向南递增。渤海沿岸大致为0.3~0.6m，渤海海峡、山东半岛南部和苏浙一带沿岸大致为0.6~1.2m；两广沿岸大致为1.0m；海南岛和北部湾北部沿岸为0.6~0.8m；西沙海域为1.4m
  -



- 各海区各季节波浪的大小分布也是不同的。北方海域冬季波浪较大，如渤海海峡冬季平均波高可达1.7m，居全国各海区同期之首。春季各海区平均波高都较小。夏、秋季南方海域平均波高较北方大，西沙海区约为1.4m，两广、福建、浙江沿岸为1.0~1.3m，其它海区大致在0.6~0.9m。



- 我国沿海的大浪受台风与寒潮大风的影响十分明显，最大波高（指 $H_{1\%}$ ）的分布：冬季在寒潮大风作用下，北方沿海波浪较大；夏天东南沿海受台风影响，南方沿海波浪较大。最大波高超过10m与平均周期10s以上的大浪多出现在开敞的东海。例如，1986年8月27日用海洋遥测浮标测得我国近海最大波高达18.2m的巨浪（见中国重大自然灾害及减灾对策（分论）1993），其次浙江嵊山海洋站也曾观测到最大波高17m和周期19.8s的大浪。表6-16为中国沿海最大波浪的分布统计。表中所列波高和周期均为各观测站观测到的历史上之最大值，但并非同一场波浪的对应值。