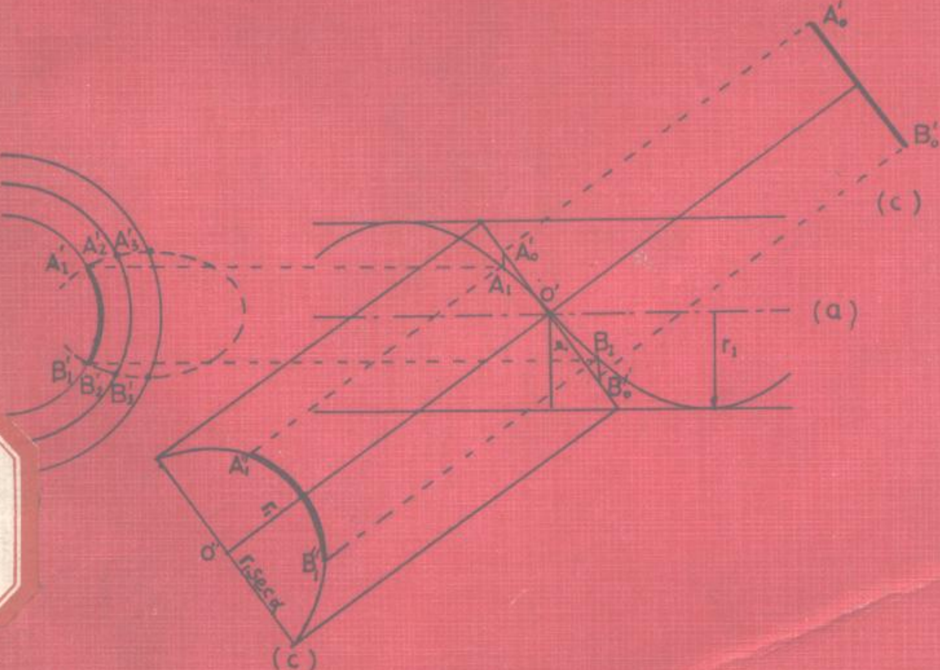
螺槳設計

白海雲 著



中華民國六十五年十二月一日一版

螺槳設計

定價：新台幣120元

[redacted]

編著者：白海雲
發行人：王志康
出版登記證：局版台業字第〇四一〇號
出版者：興業圖書股份有限公司
打字者：郁成打字排版印刷公司
地址：台北市南京東路三段109巷14號
發行所：興業圖書股份有限公司
地址：台南市勝利路一一八號
郵政劃撥南字 31573 號
印刷者：永輝彩藝印製廠
地址：台北市環河南街二段128巷68弄26號
團體訂購另有優待 電話 53253 號

前 言

螺槳設計方法一般可分爲兩種；螺槳系方法及計算方法。

將一系列螺槳；不同的螺葉數、展開面積、葉厚比、螺距比及螺轂比等作有系統之組合，作單獨試驗，便可得到各個螺槳之特性，繪於一平面圖上，即可顯示無窮個螺槳之特性，在設計螺槳時我們必先知道客觀之條件；如馬力和推力、大軸轉速、前進速度、直徑及伴流係數等，然後在螺槳系列中尋求符合此條件之螺槳，再經强度及空蝕之計算便可完成設計。

客觀的條件已知後，先由螺槳系列方法尋求最佳之螺槳直徑，然後由柯來孟（Kramer）圖表決定理想螺槳效率。再選擇適當之流力角以符合螺槳之推力常數，最後由空蝕圖及强度計算以決定螺葉之截面，並加以修正便可完成計算設計。

螺槳系之方法比較簡單迅速，但計算方法則能獲得更近理想之螺槳，唯設計經驗亦佔一相當重要之地位。

筆者謹識　1976.9

目　　錄

I 螺槳幾何

使用斜面可獲機械利益，佔空間較少的斜面便是螺旋面，所以螺旋面也可以起重，螺旋槳的構想便是如此。不管使用什麼方法來設計螺槳，最後多需一圖形表示之，也需要一立體螺槳之觀念。在平面上表現一立體之實物，則需要不同投影面。投影面的選擇並無嚴格的限制，但以簡單而又能表現出其實體爲原則。

由於螺旋槳在一複雜的情況下運轉及其條件之限制，所以難以使用簡單的方程式表示其外形及截面。雖然如此，但在基本原則上仍可找出一些規律。此處對於螺旋槳之外形將作一有系統之分析，以建立一基本觀念。

1-1 緒　言

推進器（propeller）乃將機械馬力轉換爲推進馬力之工具，卽

機械馬力—→推進器—→推進馬力

此推進馬力用來克服船舶在海上航行時所遇到的阻力；如摩擦阻力，興波阻力及空氣阻力等。

目前船舶所採用之推進裝置多是螺旋式的，所以我們名之曰螺旋槳（Marine screw propeller），或簡稱螺槳。螺槳使用於船舶，早在十七世紀便開始問世。螺槳之原則依據並不困難，乃出於螺旋前進的觀念。例如有一螺絲釘，以外力令其在介質中旋轉，則螺絲釘便可以前進。圖1-1是一個三螺線型泵（Triple screw pump），如果我們把這個泵裝在船上，海水由進口吸入，獲得能量後排出，由於動量之變化，船體便可得到推力。在十七世紀的時候，英國人便開始將此觀念應用到船舶上。到了十九世紀，螺槳之設計才有突破性之變化。圖1-2便是當時一個英國農夫史

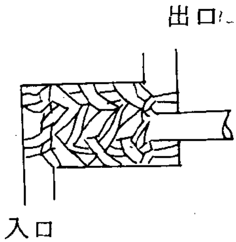


圖 1-1

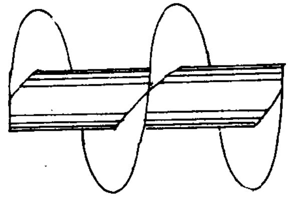


圖 1-2

密斯(Pettit smith) 所設計之螺槳;它是一個迴旋兩週的螺旋面,也是一種螺旋前進的構想。在試俥的時候,該螺旋面部分被碰落,由此意外,反而使試俥之速度增高。由今之環流理論分析之,完整連續之螺旋面,其環流値甚小,不易產生昇力。所以自從一八三六年以後,螺槳之發展趨於葉片形,與現在所使用之螺槳相似。

船舶使用之動力比以往更大,由動力轉換爲推力之比例則愈大愈好,所以當我們設計螺槳時一定要考慮到螺槳的效率。何種幾何形狀之螺槳其效率最佳?此乃在進行設計時一個非常重要的問題。

動力愈大,螺槳之高壓面與低壓面間之壓力差也越大,因此常有冷沸發生(Cold boiling) 。冷沸就是在常溫下液體之沸騰現象,產生蒸汽泡,所以又稱之爲空蝕(Cavitation)。高負荷及高速運轉之螺槳,往往帶來空蝕的煩惱。空蝕不但使螺槳之效率降低,而且當汽泡破裂時損害螺葉,良好的螺槳必不致有此現象。

此外,有關俥葉的強度,振動等都是螺槳設計時的重要問題。螺葉厚,效率就降低,在足夠的強度下,螺葉是愈薄愈好。螺葉數愈少,越不易動力平衡,同時每個螺葉的負荷也大,干擾力也大,產生振動的機會增加。

優異的螺槳設計必得面面俱到,這些問題都將在以後之章節中討論之。

1-2 螺　　線

有一直角三角形,對邊所夾之角爲 α ,我們定名爲螺距角(Pitch angle),直角三角形之斜邊稱之爲螺距線(Pitch datam line)。另有一圓柱,半徑爲 r ,圓柱之軸與 z 軸重合,見圖 1-3,圓柱所在座標系之 xy 面稱爲基本面(Datum plane) 。如將三角形之底邊放在基本面上,然後令其繞 z 軸迴旋,則螺距線在圓柱之表面交出一空間曲線,此空

間曲線即謂螺線（Helical line）。直角三角形繞 z 軸迴轉一週螺距線所行進之距離謂之螺距（Pitch），由圖 1-3，螺線之方程式由下式表示之。

$$x = r\cos\theta \quad (1\text{-}1a)$$
$$y = r\sin\theta \quad (1\text{-}1b)$$
$$z = r\theta\tan\alpha = \frac{p\theta}{2\pi} \quad (1\text{-}1c)$$

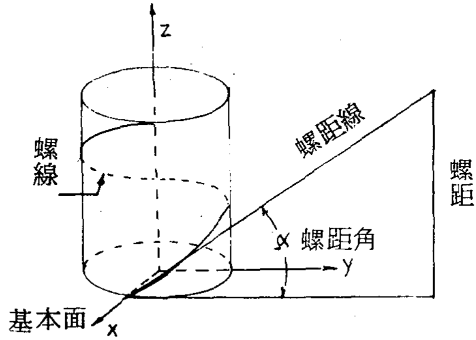


圖 1-3

式中 p 表示螺距。當螺距角一定時，如已知 r 及 θ，便可求得螺線上任一點之座標，又螺線在諸座標面上之投影可由（1-1）式獲得。

當 $z=0$ 時，乃螺線在基本面（xy 面）上之投影，在（1-1）式中令 $z=0$ 得

$$x = r\cos\theta \qquad (1\text{-}2a)$$
$$y = r\sin\theta \qquad (1\text{-}2b)$$

或 $x^2+y^2=r^2$，由此可知，螺線在基本面上之投影爲一圓，半徑是 r。

當 $x=0$ 時，乃螺線在座標面 yz 上之投影，在（1-1）式中令 $x=0$ 得

$$y = r\sin\theta \qquad (1\text{-}3a)$$
$$z = r\theta\tan\alpha \qquad (1\text{-}3b)$$

在（1-3）式中消去 θ，可得座標 y 與 z 之間的關係。

$$y = r\sin\left(\frac{z}{r\tan\alpha}\right) \qquad (1\text{-}4)$$

（1-4）式爲一正弦曲線，當 $\dfrac{z}{r\tan\alpha}=\dfrac{\pi}{2}$ 時，y 有最大值，見圖 1-4 也就是當 $z=\dfrac{\pi}{2}r\tan\alpha$ 時，$y=r$。又 $z=0$ 或 $z=\pi r\tan\alpha$ 時，$y=0$

當 $y=0$ 時，乃螺線在座標面 xz 上之投影，在（1-1）式中，

令 $y=0$ 得，

$$x = r\cos\theta \qquad (1\text{-}5a)$$
$$z = r\theta\tan\alpha \qquad (1\text{-}5b)$$

由(1-5)式中消去 θ，則有

$$x = r\cos\left(\frac{z}{r\tan\alpha}\right) \qquad (1\text{-}6)$$

螺線在座標面 xz 上之投影為一餘弦曲線，其週期與在 yz 面上所投影者相同，見圖1-5。

以上所討論者是將直角三角形環繞一個半徑固定的圓柱所得之曲線，如果將一個螺距角一定之直角三角形分別環繞同軸而半徑不等之圓柱上，則可得一組螺線，此螺線組之方程式可參考圖1-6並由下式表示之。

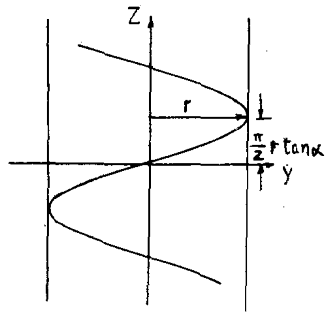


圖 1-4

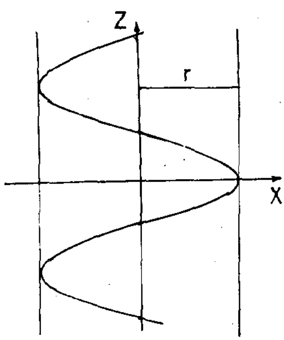


圖 1-5

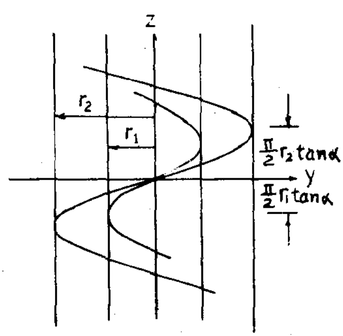


圖 1-6

$$x_i = r_i\cos\theta \qquad (1\text{-}7a)$$
$$y_i = r_i\sin\theta \qquad (1\text{-}7b)$$
$$z_i = r_i\theta\tan\alpha \qquad (1\text{-}7c)$$

將此螺線組分別投影在 xy 面，xz 面及 yz 面上得

$$x_i^2 + y_i^2 = r_i^2 \tag{1-8a}$$

$$y_i = r_i \sin\left(\frac{z}{r\tan\alpha}\right) \tag{1-8b}$$

$$x_i = r_i \cos\left(\frac{z}{r\tan\alpha}\right) \tag{1-8c}$$

在 yz 面上投影如圖1-6所示。由圖觀察，$z_1 = \frac{\pi}{2} r_1 \tan\alpha$ 時，$y_1 = r_1$，當 $z_2 = \frac{\pi}{2} r_2 \tan\alpha$ 時，$y_2 = r_2$，……，連接 (y_1, z_1)，(y_2, z_2)……等，在 yz 面上可描出一軌跡，此軌跡方程式之求法如下：

在 yz 面上，螺線之投影為

$$y = r\sin\left(\frac{z}{r\tan\alpha}\right) \tag{1-4}$$

當 $z = \frac{\pi}{2} r\tan\alpha$ 時，$y = r$，在(1-4)式中將 r 消去，便得 (y_1, z_1) (y_2, z_2)……連線之軌跡，即

$$z = \left(\frac{\pi}{2}\tan\alpha\right) y \tag{1-9}$$

由(1-9)式觀之，當螺距線為直線時，該線迴旋時與 yz 面交點之連線仍為直線，但交點連線之斜率為螺距線斜率之 $\frac{\pi}{2}$ 倍。

根據以上之分析，可得兩個定義如下：

螺距線與通過 z 軸任一平面之交點，其連線稱為斜度線（Rake datum line）。如(1-9)式。

斜度線與基本面間之夾角稱為斜度角（Rake angle）。

例 1.(a)假如斜度角為零，螺距角 α 與迴旋時所繞之圓柱半徑有何關係？

由(1-9)式，當斜度角為零時，表示 z = 常數，$y = r$，

所以 $r\tan\alpha$ = 常數，乃斜度角為零之條件。

(b)如已知螺距線為一拋物線，如 $z = \sqrt{y}$，其斜度線為何？

先將拋物線 $z = \sqrt{y}$ 繪出，見圖1-7。當 $y = r_1\theta$ 時，$z_1 = \sqrt{r_1\theta}$ $y = r_2\theta$，$z_2 = \sqrt{r_2\theta}$。拋物線 $z = \sqrt{y}$ 迴旋任一半徑 y 之圓柱，與通過 z 軸平面交點之座標則為$\left(r_1 \sqrt{\frac{\pi}{2} r_1}\right)$，$\left(r_2, \sqrt{\frac{\pi}{2} r_2}\right)$……所以斜度線的方程式是 $z = \sqrt{\frac{\pi}{2} y}$

由於以上之分析，可知斜度線與螺距線相同；螺距線是直線，斜度線也是直線，螺距線是曲線，斜度線也是曲線。但要注意者，此處所謂之斜度線是由同一螺距線迴旋不同之圓柱體，由 x 軸開始，在 yz 面所交之斜度線，實際上斜度線多由不同的螺距線與通過 z 軸平面交點之連線。

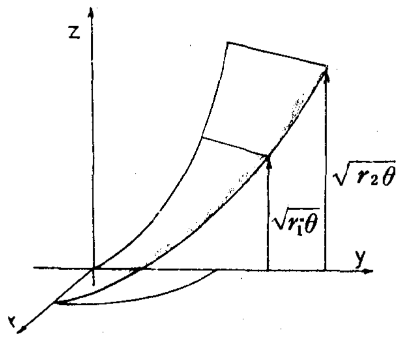


圖 1-7

1-3 螺旋面與俥葉面

有一空間曲面，通過所有之螺線，此面稱爲螺旋面 (Helical surface)。見圖 1-8。假如在 x 軸上，取一定長度之線段 OA，令 OA 平行 xy 面且繞 z 軸以等角速度旋轉，同時 O 點沿 z 軸等速行進，則直線 OA

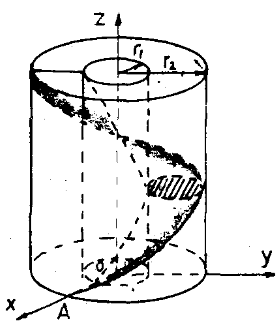


圖 1-8

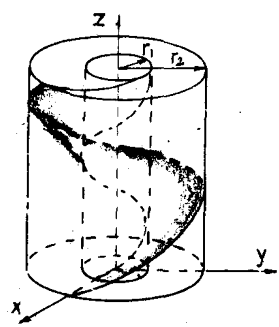


圖 1-9

在空間所掃過之面也是一螺旋面。螺旋面很像一迴旋之山路，也像一長齒之螺絲面。假如令螺旋面在某介質中繞 z 軸轉動，則介質與螺旋面便有相對的運動。通過 z 軸之任一平面，與螺旋面之交線就是斜度線。斜度線與 z 軸垂直，此螺旋面稱爲徑向等螺距 (Radially constant pitch)。凡是徑向等螺距之螺絲，當其在介質中轉動時，螺旋面上各點無相對之位移。在理想的情況下，螺旋面上僅受均勻的外力。徑向螺距不等時，螺絲旋轉一周時，斜度線上各點之進行距離是半徑 r 的函數，見圖 1-9。在此情

況下，螺旋面上各點發生相對之位移，所以在該面上受有不均勻的外力。

俥葉（Blade）（或稱螺葉）便是由螺旋面上剪下來的一片，見圖1-8中之陰影部分。實際上，俥葉並非一幾何面，而是有相當厚度的，此處之螺旋面可以用來作爲標準以決定俥葉之截面。其外形如何，將在以後之章節中討論之。

俥葉在旋轉時有一面承受較大之壓力，例如船舶在前進時由船尾可見的一面便是，此面稱之爲高壓面（High pressure side），又稱推力面（Driving face）或葉面（Face）。相反的一面常稱爲葉背（Back），因爲該面所受之壓力較低，所以又稱爲低壓面（Low pressure side）。高壓面與半徑爲常數的圓柱相交之線便是螺距線。當螺距線爲直線時，在高壓面上半徑爲常數之各點有相同之螺距，此種情形稱之爲周向等螺距（Circumferential constant pitch），否則稱爲周向變螺距（Circumferential varible pitch）。葉面與葉背之形狀與昇力（Lift force）及空蝕有關，這些問題將在以後的章節中分析之。

例 2 (a) 有一螺距線，可用方程式 $z = y^2$ 表示之，其周向螺距之變率爲何？

螺線伸展在一平面上便是螺距線，所以周向螺距之變率便是螺距線斜率（Slope）之變率，由此得周向螺距之變率爲

$$\frac{d^2 z}{d y^2} = 2$$

假如有一人沿路面 $z = y^2$ 向上爬行，見路面斜率之變化爲兩個單位。

(b) 有一流域（Flow field）爲一正弦曲線之旋轉體，$z = A|\sin y|$，A 爲常數，$-\frac{D_B}{2} \leq |y| \leq \frac{\pi}{2}$，見圖1-10。如有一俥葉爲薄面之螺槳在此流域中轉動，欲使此螺槳在旋轉時所受之動力情況與在眞空中相同時，該螺槳之周向螺距必爲常數，大小符合流速，徑向之螺距之變化與正弦曲線 $A\sin y$ 一致。在此情況下僅能

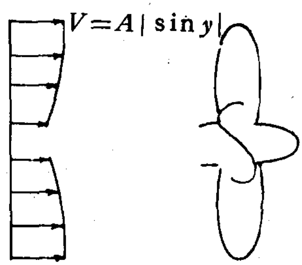


圖 1-10

均勻的運轉，螺槳不產生推力。

1-4 投影面、展開面及伸張面

在螺旋面上（Helicoidal surface）決定螺葉之外形之後，將之投影在基本面上（Datum plane），所見之形狀稱爲投影面（Projected area），如圖1-11b便是。

有一半徑爲r_1之螺線，見圖1-11a，俥葉在該半徑之寬度爲A_1B_1，將其投影在基本面上則得$A_1'B_1'$，$A_1'B_1'$爲圓r_1之上的一段弧長，設在半徑爲r_2，r_3……螺旋面上之葉寬分別爲A_2B_2，A_3B_3……（此等各點並未在圖1-11中示出，讀者可比照r_1之螺線自行繪製），將其投影在基本面上，分別獲得$A_2'B_2'$，$A_3'B_3'$，然後連接A_1'，A_2'，A_3'……B_3'，B_2'，B_1'，此即爲俥葉之投影面，根據以上所述，$A_1'B_1'$，$A_2'B_2'$……並非A_1B_1，A_2B_2……之眞實長度，因爲螺線並不與基本面平行，要見一線段之眞實長度或形狀，必得正視方能得到。

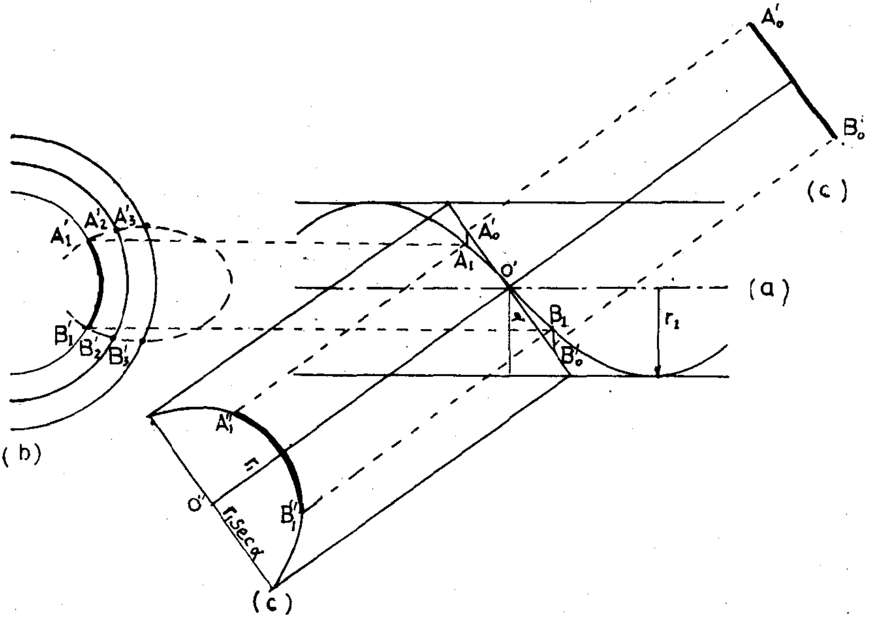


圖 1-11

將俥葉之外形投影在經過O'點（圖1-11a）之諸擺面上（Oscillating planes）所得者便是俥葉之眞實形狀，圖1-11c中之$A_1''B_1''$便是A_1B_1之實際樣子，如此投影所得之俥葉面稱之爲展開面（Developed area）。

展開面之獲得可依據圖1-11分析之，經過O'之任一擺面與圓柱之交線爲一橢圓，橢圓之短軸爲r_1，長軸爲$r_1\sec\alpha$。以O''爲中心，首先以短軸r_1，長軸$r_1\sec\alpha$繪一橢圓，見圖1-11c，通過A_1，B_1繪擺面之法線交橢圓於$A_1''\ B_1''$，此$A_1''\ B_1''$即爲A_1B_1之眞實形狀。將A_2B_2，A_3B_3……（1-11圖中未示出者）分別投影到橢圓r_2，$r_2\sec\alpha_2$，r_3，$r_3\sec\alpha_3$……（圖1-11中亦表示出，但與A_1B_1所投影之橢圓相似）上，可得$A_2''\ B_2''$，$A_3''\ B_3''$……然後連接$A_1''\ A_2''\ A_3''$……$B_3''\ B_2''\ B_1''$便是俥葉的展開面。

經過O'點之諸擺面，其螺距角α不一定相等，所以通過諸擺面之法線也不一定平行，除非螺距角α爲一常數。當螺距角不爲常數時，先將俥葉在螺線上之外形投影在各擺面上，再將這些擺面繞橢圓之短軸旋轉適當之角度，務使各擺面能平行或重合。

將俥葉在擺面上之投影$A_1''\ B_1''$，$A_2''\ B_2''$……等拉爲直線，再連接各端點所得之外形即爲伸張面（Expanded area），見圖1-11d。製作法如下：在圖1-11a中，經螺線上A_1B_1兩點平行基本面作直線，交擺面於$A_0'\ B_0'$，$A_0'\ B_0'$即爲螺距線上與螺線上A_1B_1同高之兩點，所以相當將橢圓上之兩點$A_1''\ B_1''$拉爲直線。以相同的方法可以繪製其他各點，然後連接各端點便是螺槳之伸張面，此伸張面並非眞實面，大於投影面與展開面。

螺槳之各投影面乃諸螺距線或螺線在基本面及擺面上的正視形狀，空間曲線的曲率半徑可由公式

$$R=\frac{(\dot{x}^2+\dot{y}^2+\dot{z}^2)^{3/2}}{\sqrt{\begin{vmatrix}\dot{y} & \dot{z}\\ \ddot{y} & \ddot{z}\end{vmatrix}^2+\begin{vmatrix}\dot{z} & \dot{x}\\ \ddot{z} & \ddot{x}\end{vmatrix}^2+\begin{vmatrix}\dot{x} & \dot{y}\\ \ddot{x} & \ddot{y}\end{vmatrix}^2}} \tag{1-10}$$

表示之，將(1-1)式代入(1-10)式得螺線之曲率半徑爲$\dfrac{r}{\cos^2\alpha}$，又平面上一曲線之曲率（K）可由公式

$$K = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}} \tag{1-11}$$

表示之，經過螺線之擺面與圓柱之交線爲一橢圓，方程式爲

$x = r\sec\alpha\cos\theta$，$y = r\sin\theta$，將此式代入（1-11）式得曲率半徑

$$R = \frac{1}{K} = \frac{r(\sec^2\alpha\sin^2\theta + \cos^2\theta)^{3/2}}{\sec\alpha}$$

當 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 時，$R = \frac{r}{\cos^2\alpha}$ 。

由此可知螺線上一點之曲率半徑與該點之擺面所交圓柱上橢圓之曲率半徑相同，以該點之曲率半徑爲半徑，繪一圓弧，見圖1-12 。在一較小的範圍內，也就是圖中P點附近，圓弧與橢圓弧非常靠近，所以我們在作圖時常以圓弧代替橢圓弧。

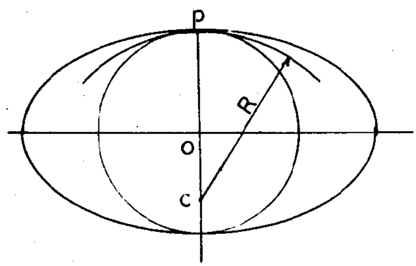


圖 1-12

1-5 螺槳之各部名稱及定義

爲了便於說明及分析，必得將螺槳之有關部位與觀念先予規定或下定義。

葉　尖（Tip）

　　俥葉上之一點，距螺槳旋轉軸最遠者。

直　徑（Screw Diameter）D.

　　當螺槳以其軸旋轉時，其葉尖所掃圓之直徑，見圖1-13 。

右旋螺槳（Right-hand screw）

　　自船尾向前看，當船體前進時，螺槳之旋轉爲順時針者。反之，稱爲左旋螺槳（Left-hand screw）。

外旋螺槳（Outward turning）

　　自船尾向前看，雙螺槳之船，當前時其右螺槳右旋，左螺槳左旋。反之稱爲內旋螺槳（Inward turning）。

螺　距（Pitch）H.

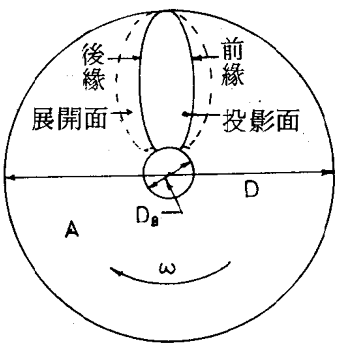


圖 1-13

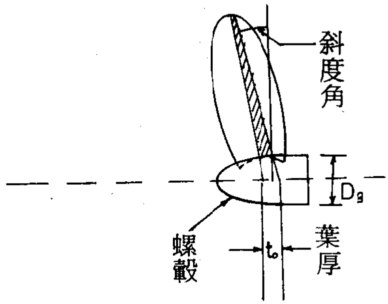


圖 1-14

螺槳旋轉一周時，其在軸向之幾何前進距離謂之螺距。同一螺槳之螺距多爲半徑的函數，所以螺距常以圖形表示之，或說明在某半徑所得之螺距。

螺距比（ Pitch ratio ）P.

螺距與直徑之比，即 $p=\dfrac{H}{D}$ 謂之螺距比。螺距比爲一純數字，與所採用之長度無關。一般拖船之螺距比在 0.55 左右，快速商船可達 1.0，又快艇者甚致到達 2.0。

螺　轂（ Boss or Hub ）

按裝俥葉的地方，見圖 1-14 。

螺轂直徑（ Boss Diameter）. D_B

指螺轂之直徑，見圖 1-14 。

螺轂直徑比（ Boss diameter ratio ）d_B .

螺轂直徑與螺槳直徑之比，即 $d_B=\dfrac{D_B}{D}$，此乃一純數字，與使用之單位無關。一般情況下，d_B 之值在 0.2 左右。

直徑比（ Diameter ratio ）d

直徑與螺距之比，即 $d=\dfrac{D}{H}$ 謂之直徑比。所以 $d=\dfrac{1}{p}$，乃螺距比之倒數，爲一純數字。

圓盤面積（ Disc area ），A