

高等學校教學用書

空氣螺旋槳

下 冊

В. Л. АЛЕКСАНДРОВ 著

王適存 王培生 彭炎午譯

高等教育出版社

高等學校教學用書



空 氣 螺 旋 槳

下 冊

B. Л. 亞歷山大洛夫 著
王璣存 王培生 彭炎午 譯

高等教育出版社

A decorative horizontal line with a repeating pattern of small, stylized floral or geometric motifs.

本書係根據蘇聯國立國防工業出版社 (Государственное издательство оборонной промышленности) 出版的亞歷山大洛夫 (В. Л. Александров) 所著“空氣螺旋槳” (Воздушные винты) 1951 年版譯出。原書經蘇聯高等教育部審定為航空學院教學參考書；也可供給飛機製造廠和航空發動機製造廠設計部門的工程技術人員作為設計螺旋槳的參考之用。

全書包括六個部份：螺旋槳的基本概論，螺旋槳的構造，螺旋槳空氣動力學，螺旋槳動力學，螺旋槳的製造，以及螺旋槳的使用。

中譯本分上下兩冊出版。

參加本書翻譯工作的有華東航空學院王適存、王培生、彭炎午等三位同志，參加校訂工作的為范緒箕同志。

空 氣 螺 旋 槳

下 冊

書號145(總140)

亞 歷 山 大 洛 夫 著

王 適 存 等 譯

高 等 教 育 出 版 社 出 版

北 京 瑞 興 廠 一 七 〇 號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

新 華 書 店 總 經 售

京 華 印 書 局 印 刷

北 京 南 新 華 街 甲 三 七 號

開本850×1092 1/28 印張7

一九五四年十月北京第一版

一九五四年十月北京第一次印刷

字數 153,000

印數 1—1,200

定價 11.000

下 冊 目 錄

第四部分 螺旋槳動力學

第十五章 螺旋槳動力學的一般知識	885
第一節 作用於螺旋槳上的力和力矩	335
第二節 螺旋槳的強度計算法	840
第十六章 作用於螺旋槳上的力和力矩的靜力情形	341
第一節 槳葉強度的簡單計算法	341
第二節 螺旋槳軸套的強度計算	851
第三節 彎距螺旋槳軸套橫樑的計算	352
第四節 螺旋槳靜力強度的實驗研究	372
第五節 在槳葉內由於陀螺力而來的應力	373
第十七章 作用於螺旋槳上的力和力矩的動力情形	377
第一節 螺旋槳的不穩定運動	377
第二節 螺旋槳槳葉的自然振動頻率的實驗測定	378
第三節 螺旋槳槳葉的動力強度的實驗測定	883
第十八章 螺旋槳行程的不均勻性	887
第一節 螺旋槳的顫動	887
第二節 螺旋槳不平衡度的各種類型	390
第三節 在飛行中飛機的迴轉對螺旋槳行程的均勻性的影響	397
第四節 傾斜氣流對螺旋槳行程的不均勻性的影響	400
第十九章 螺旋槳的調節	408
第一節 調節器的靜力學	408
第二節 調節器的動力學	409
第二十章 螺旋槳的噪音	417
第一節 聲音的物理特性	417
第二節 螺旋槳噪音的起源	420
第三節 螺旋槳噪音的減低	428

第五部分 螺旋槳生產的幾個問題

第二十一章 螺旋槳槳葉和軸套的生產簡述.....	425
第一節 螺旋槳生產的基本原則	425
第二節 木質單塊螺旋槳的製造	426
第三節 木質槳葉的製造	427
第四節 硬鋁槳葉的製造	430
第五節 螺旋槳軸套的製造	440
第六節 螺旋槳的裝配	444
第二十二章 螺旋槳的平衡.....	445
第一節 引起螺旋槳不平衡的原因	445
第二節 螺旋槳和槳葉的靜力平衡	454
第三節 螺旋槳的動力和空氣動力平衡	463

第六部分 螺旋槳的使用

第二十三章 螺旋槳及其設備的試驗	469
第一節 試驗用的螺旋槳的試驗	469
第二節 螺旋槳在試車台上的試驗	471
第三節 螺旋槳在飛機上的試驗	474
第四節 螺旋槳設備零件的試驗	484
第五節 螺旋槳在飛機上的平衡	487
第二十四章 螺旋槳在飛機上的使用	490
第一節 螺旋槳的運送	490
第二節 螺旋槳在飛機上的安裝和拆卸	491
第三節 變距螺旋槳的使用	496
附 錄.....	...
一 轉數乘方表	499
二 螺旋槳直徑乘方表	502
三 標準大氣表	504
四 PAΦ-6、克拉克-Y及Φ型的槳型坐標	505
五 螺旋槳 BИИ-61 И 的空氣動力特性曲線	506
六 關於槳軸在刀刃式平衡機床上的滾動	507
七 橢圓軸沿刀刃上的滾動	515
八 關於螺旋槳的一些主要文字符號	519

空氣螺旋槳

第四部分 螺旋槳動力學

第十五章 螺旋槳動力學的一般知識

第一節 作用於螺旋槳上的力和力矩

假定有一具沒有重量的螺旋槳，以均勻的角速繞着它本身的槳軸旋轉，並沿着槳軸作直線等速運動。在這種情況中，螺旋槳的槳軸上即受到一種恆定的螺旋力矩，而空氣動力則為其反作用力。這些力的傳遞，是通過槳葉和軸套的材料來達成的，而由於這個緣故，槳葉和軸套都將發生應力及變形。

上述的這種情況，完全是虛構的，並不能反映螺旋槳在工作時作用於它上面的力和力矩的實際情形。真實的螺旋槳是具有重量的，因此也具有質量；而當螺旋槳旋轉時，由於產生了離心加速度，所以還要產生離心力，這一離心力的大小，如所週知，是隨旋轉速度和螺旋槳的質量而定，在現代螺旋槳的轉速之下，產生的離心力極大，因此，在任何情況中，當討論螺旋槳上所作用的各種力時，都不應該將這一離心力略去不計。

其次，進一步假定：螺旋槳繞其槳軸的旋轉速度並不均勻。這可能是由於螺旋槳的扭轉力矩或者是空氣動力的反作用隨時間而改變的緣故，也可能是由於空氣動力與螺旋槳的彈性力之間的關係改變而使得這些力也改變的緣故。在這些情況中，我們就得出了一具不穩定運動的

螺旋槳；由於運動不穩定，又要產生一種慣性力，而這一力也應加以注意。

如果，在螺旋槳繞其槳軸的不均勻的旋轉上，再加以螺旋槳自身的不穩定運動，那末螺旋槳的運動情形將更為複雜。

本書這一部分的要旨，就是討論上述因螺旋槳的運動而引起的作用力，推求螺旋槳的材料由於這些力的作用而產生的各種應力，以及研究螺旋槳在這些情形中所發生的各種現象。換句話說，螺旋槳動力學所涉及的問題，包括：研究螺旋槳的強度，推求螺旋槳軸套機構上的作用力，研究螺旋槳工作的穩定性以及螺旋槳所發出的噪音等。

很顯明地，研究螺旋槳的不穩定運動比研究它的穩定運動要複雜得多。因此，在本章內，我們僅僅討論螺旋槳在穩定運動中的各種力和由於它們所引起的槳葉變形。至於不穩定運動，將在第十七章內再加討論。

於是，當螺旋槳均勻旋轉又以恆速沿槳軸方向作穩定直線運動時，螺旋槳上將受到各種空氣動力的作用，並產生有離心力。但是，在這些力中究竟有那些會造成變形呢？

空氣動力，為空氣對槳葉的作用的一種表現，它們作用在整個槳葉的表面上。將任一槳葉截面基素上作用着的表面合力用一矢量來表示，這一矢量是位於一個垂直於螺旋槳旋轉面及槳葉軸線的平面內。這裏假定：葉軸的位置是在螺旋槳旋轉面上。這一矢量在槳葉截面上的位置，即確定這槳葉截面的壓力中心，也就是說，空氣動力的矢量與槳型弦線的交點（參看圖 293）。這些矢量，沿整個槳葉以某種的形式在分佈着。

從材料力學的觀點來看，這種槳葉承受負荷的情形，可以看作是一根一端固定的樑，承受着一種如上述的矢量分佈的負荷。這種負荷使槳葉發生彎曲和扭轉，因而使葉軸離開它原來所在的螺旋槳旋轉面，並使槳葉截面繞其葉軸而扭轉。

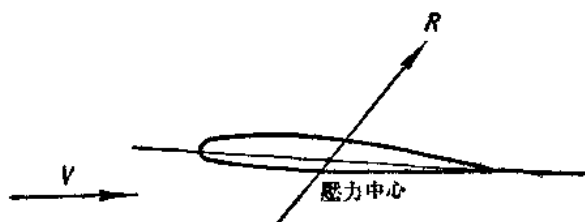


圖 239 槳型的壓力中心。

離心力是一種質量力，它的方向是從旋轉軸向外而同時又垂直於這旋轉軸。

現在來觀察從槳葉截面內所切取的任一基素（參看圖 240）。當螺旋槳旋轉時，在它裏面產生一種離心力，而它的矢量將通過旋轉軸並垂直於這旋轉軸。這一矢量，在螺旋槳旋轉面內，可分為平行於葉軸方向和垂直於葉軸方向的兩個分矢量。如果沿截面上對於每一槳葉基素都作出這樣一種矢量的分解，那末就可以得到沿截面而分佈的離心力的橫向分力圖，並且，構成這圖的所有的矢量，都位於垂直於螺旋槳旋轉

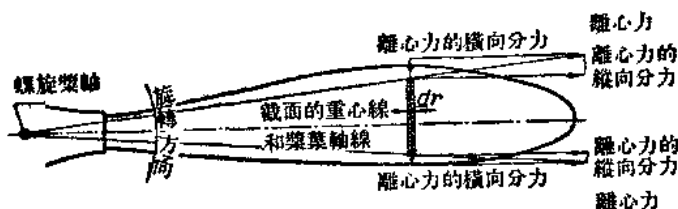


圖 240 分解槳葉基素的離心力成爲縱向分力及橫向分力。

軸的平面內。可以看出（參看圖 241），這分力的分佈圖是這樣的，當越過這一根同時作為槳葉截面重心線的槳葉軸線^①時，橫向分力就改變它們自己的方向。對於每一方向的這些橫向分力，可以找出一個合力，於是，所有這些分力的分佈圖的效應，就相等於一個力偶。力偶的大小，將沿着槳葉而變化。這些力所總合起來的力偶，將使槳葉發生扭

① 通常，在現代的螺旋槳上，各個截面的重心就位於槳葉軸線上。一般來說，這樣的重心分佈並非必要的。

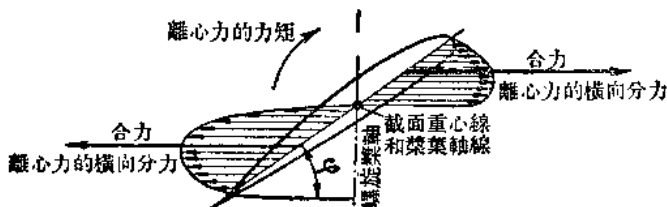


圖 241 在槳葉截面上，由於離心力而產生的力偶的分佈圖。
(這些力傾向於將槳葉轉變到較小的裝置角上。)

轉。這樣，離心力的橫向分力的力矩，將使槳葉向減小槳葉裝置角的方向扭轉。離心力的第二個分力，沿葉軸方向的分力，將使槳葉引伸，而且，這一引伸力是在平行於螺旋槳旋轉面的平面上。

我們已經知道：由於空氣動力的作用，能使葉軸發生彎曲，也就是說，如果葉軸原來是位於旋轉面內，那末，在起彎曲作用的空氣動力的影響之下，它將離開這一旋轉面。在這種情況下，起引伸作用的離心力就位於一個與彎曲後的葉軸成某一個角度的平面內（參看圖 242）。這些離心力在每一截面處又可分為平行於葉軸的分力和平行於螺旋槳旋轉軸的分力。第一種分力仍將使槳葉引伸，而第二種就造成與空氣動力相反的彎曲力矩。因此，在離心力的作用下，槳葉可被彎曲。

若將槳葉用一扭轉的薄片來代替，在它上面，沿薄片軸線作用有一

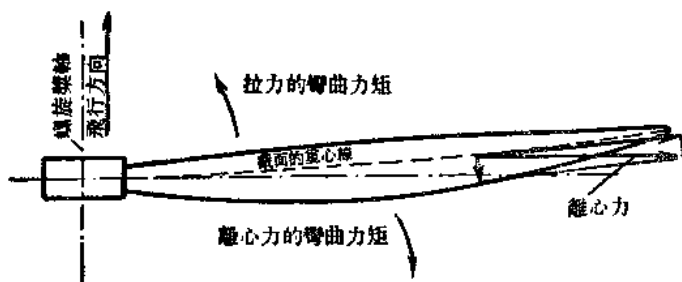


圖 242 在槳葉沿飛行方向前傾的情況下，由於造成相反彎曲力矩的離心力的關係，使槳葉上的拉力彎曲力矩的負荷減輕。

起引伸作用的離心力。這力將減小槳葉的扭轉。事實上，如果我們所討論的是一沿螺旋面而扭轉的薄片（參看圖 243），並在它的一個基素上施加一縱向力，那末，就可這力分爲相切於螺旋面的分力和垂直於螺旋面的分力。後面這一分力就將減小薄片的扭轉。在槳葉上的情形也是完全相同——在縱向離心力的作用下，槳葉的扭轉減小，也就是說，槳葉截面的裝置角增大。

這樣，在離心力的作用下，產生兩種槳葉的扭轉——在力偶的作用下，槳葉傾向於迴轉，並安頓在較小的裝置角上，而在縱向分力的作用下，槳葉的裝置角增大。但是，這兩種扭轉有原則上的差別。在第一種情況中，橫向力偶的產生，是由於在槳葉截面上作用着有許多不平行的力，將它們分解之後，要得出一些橫向力。

爲了制止槳葉因受這些力的作用而轉動，必須在其根端部分加上一個反作用力矩。在第二種情形中，我們就簡單地將縱向力再分爲一些分力：軸向力本身引起反作用，而它的分力不可能產生反作用，因爲已經有了反作用，所以其餘的力所給的總和爲零。因此，由縱向力得來的扭轉力矩是內部的一種力矩，並不使槳葉有任何的轉動，而僅僅使它變形；外界的反作用力矩不存在。所以，第一種扭轉力矩，在設計變距螺旋槳的機構時，必須加以考慮，而第二種扭轉力矩，僅在計算螺旋槳的

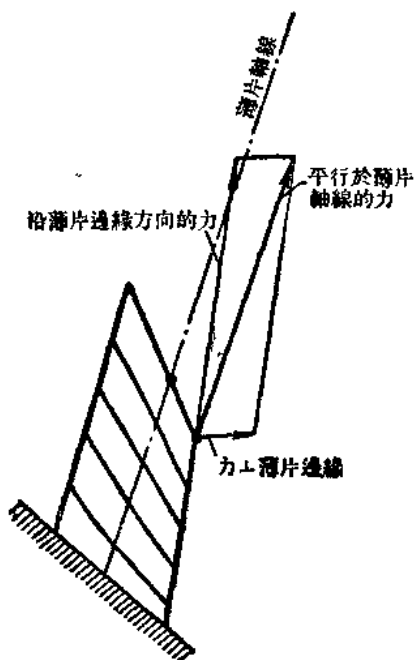


圖 243 扭轉薄片在平行於扭轉軸線的力的作用下減小扭轉的作用圖。

強度時，應加以考慮。必須指出：後面這一力矩較小，往往在計算時略去。

於是，可以這樣地說：空氣動力能使槳葉彎曲和扭轉，而離心力能使槳葉引伸、扭轉以及彎曲。

第二節 螺旋槳的強度計算法

在上節內，我們已經提到：在一般的情況下，螺旋槳及其槳葉的運動可能是不穩定的。尤其是當螺旋槳裝置在活塞式發動機上的時候，因為在這種發動機上，機軸上的力矩是變化的。螺旋槳的不穩定運動，大多數是帶有振動的性質，而且在相當高的頻率之下，振動的加速度可以很大，以及由這些振動而引起的各種力也可以非常之大。因此，裝置在活塞式發動機上的空氣螺旋槳，在實際使用中差不多所有的損壞都帶有材料疲乏的痕跡。所以，嚴格地說：計算螺旋槳的強度，必須從它的不穩定運動出發。但是，正如以後將要看到：動力的強度計算非常複雜；因此，往往採用一種簡化的計算方法，在這種方法中只考慮作用在螺旋槳上的力和力矩的靜力情形。為了更進一步簡化起見，凡是數值較小的力和力矩一概略去不計。這樣，就有兩種計算螺旋槳強度的方法——一種是以作用於螺旋槳上的力和力矩的動力情形為基礎的計算法，一種是以作用於螺旋槳上的力和力矩的靜力情形為基礎的計算法。前面這種方法是根據接近實際的情況出發的，而後面這種方法是比較虛構的，但是它卻比較簡單。

第十六章 作用於螺旋槳上的力和力矩 的靜力情形

第一節 槳葉強度的簡單計算法

計算與試驗證明：金屬槳葉的扭轉變形，或者所謂槳葉的扭轉，一般是不大的。因此，由於扭轉力矩而引起的應力也不很大，所以在螺旋槳強度的簡單計算中，槳葉的扭轉力矩可以不予考慮。那末，剩下的只有由於離心力以及空氣動力的彎曲力矩而引起的引伸應力。於是，總的應力可表示為一種由於離心力而引起的應力和一種由於空氣動力的彎曲力矩而引起的引伸應力。這樣：

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_x,$$

式中 σ_c —由於離心力而引起的引伸應力，而 σ_x —由於空氣動力的彎曲力矩而引起的引伸應力。

設有一質量基素 m ，離開旋轉軸的距離為 r ，並以角速 Ω 繞軸旋轉，則這一質量基素的離心力的公式為

$$P_c = m\Omega^2 r, \quad (240)$$

這一力是作用於質量基素 m 的重心上，而它的方向是沿着一根通過質量基素 m 的重心所作的垂直於旋轉軸線的垂線，而且方向自軸線向外緣。

今在槳葉任一半徑 r 處，取出一個槳葉基素 dm ，它的兩端截面之間的距離為 dr ；於是，這一基素的離心力為：

$$dP_c = \Omega^2 r \, dm. \quad (241)$$

基素的質量為：

$$dm = \frac{\gamma}{g} S dr,$$

式中 S — 槳葉截面面積，可用下式表示：

$$S = k_3 bc,$$

這裏 b — 槳葉寬度， c — 槳葉厚度， k_3 — 某一係數，視槳型的型式而定。

例如：

對於：克拉克 Y 的槳型 $k_3 = 0.725$

Φ 型的槳型 $k_3 = 0.70$

PAΦ-6 的槳型 $k_3 = 0.738$

將以上這些數值代入第(241)式，得出槳葉基素的離心力的公式為：

$$dP_c = \frac{1}{g} \gamma \Omega^2 k_3 b c r dr$$

或者

$$\frac{dP_c}{d\bar{r}} = \frac{\gamma}{g} \Omega^2 k_3 b c r.$$

如用抽象符號來表示，得出

$$\frac{dP_c}{d\bar{r}} = \frac{1}{4} \frac{\gamma}{g} k_3 \Omega^2 \bar{b}^2 \bar{c} \bar{r} D^4. \quad (242)$$

若以 $2\pi n$ ，代替角速 Ω ，則得：

$$dP_c = \frac{\gamma}{g} \pi^2 k_3 n^2 D^4 \bar{b}^2 \bar{c} \bar{r} d\bar{r}.$$

令

$$dK_c = \frac{\pi^2}{60^2} k_3 \bar{b}^2 \bar{c} \bar{r} d\bar{r}, \quad (243)$$

於是

$$\frac{dK_c}{d\bar{r}} = \frac{\pi^2}{60^2} k_3 \bar{b}^2 \bar{c} \bar{r}$$

並且

$$dP_c = dK_c \frac{\gamma}{g} n^2 D^4, \quad (244)$$

式中 n — 每分鐘的轉數。

數值 dK_c 可稱為槳葉基素的離心力係數。

圖 244 所示，為一典型的 $\frac{dK_c}{d\bar{r}}$ 對 $\bar{r}$ 的曲線。於是，數值 $\frac{dP_c}{d\bar{r}}$ 沿槳

葉的分佈也與此曲線相似；因為 $\frac{dP_c}{d\bar{r}}$ 可由 $\frac{dK_c}{d\bar{r}}$ 乘以 $\frac{\gamma}{g}n^2D^4$ 而求得。不應該忘記：圖 244 所示的曲線，就代表沿槳葉截面的這一與 $\frac{dK_c}{d\bar{r}}$ 成正比的離心力的數值變化。

按照第 (244) 式，可以求得作用於某一槳葉基素上的離心力的大小。爲了求得作用於某一截面上的離心力，必須將作用於這一截面至槳葉梢端之間的各個槳葉基素上的離心力總加起來。並且，很明顯地，如果所取的這些截面，是由槳葉梢端開始而趨近槳軸的話，那末，離心力將一直增大，這是因為對於每一截面上的離心力，還要加上隣近基素的

離心力的緣故。因此，可以預先推知，沿槳葉各個截面上的離心力的分佈，以近槳軸處爲最大（參看圖 245）。

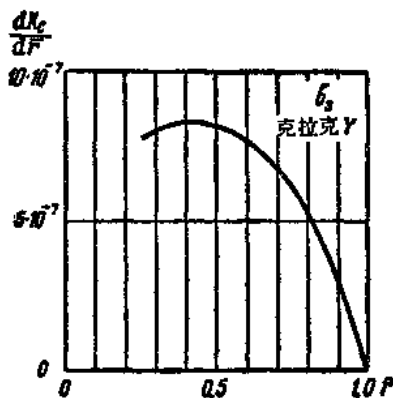


圖 244 離心力係數沿槳葉的分佈情形。



圖 245 離心力沿槳葉的分佈情形。

如將第(244)式積分起來，極限從任一截面 $\bar{r}_0$ 到槳葉梢端，則得：

$$P_c = \frac{\gamma}{g} n^2 D^4 \int_{\bar{r}_0}^1 dK_c.$$

令符號 K_c 表示 $\int_{\bar{r}_0}^1 dK_c$ ，並稱之爲槳葉截面的離心力係數。根據第(243)式， K_c 可用下列方式表示：

$$K_c = \frac{\pi^2 k_3}{60^2} \int_{\bar{r}_0}^1 \bar{b}^2 \bar{c} \bar{r} d\bar{r}. \quad (245)$$

可以看出：槳葉截面的離心力係數，依所取的這一截面的半徑，以及由係數 k_3 與沿半徑的寬度和厚度的分佈所表徵的截面型式而改變。對於一定的螺旋槳的槳葉來說，這一係數僅僅隨所取的截面的半徑 $\bar{r}_0$ 而改變。

在半徑為 $\bar{r}_0$ 的截面上的離心力可寫為：

$$P_c = K_c \frac{\gamma}{g} n^2 D^4, \quad (246)$$

數值 K_c 可按照第(245)式，用數字積分法求出。對於這些典型槳葉來講，沿槳葉的 K_c 值可以預先算出，於是，在確定離心力時，只要按照第(246)式作一簡單計算。圖 246 上，為一條沿槳葉的 K_c 值的典型曲線。下表所列，為幾種不同型式的槳葉在 $\bar{r}_0 = 0.25$ 處的 K_c 值。

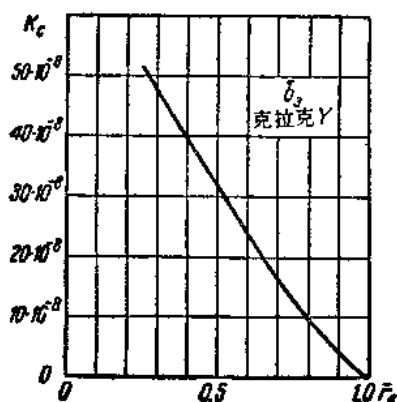


圖 246 沿槳葉(參看圖 72)的離心力係數 K_c 的變化。

$$\bar{b}_1: K_c = 34.3 \times 10^{-8}$$

$$\bar{b}_2: K_c = 41.1 \times 10^{-8}$$

$$\bar{b}_3: K_c = 52.6 \times 10^{-8}$$

$$\bar{b}_4: K_c = 60.9 \times 10^{-8}$$

$$\bar{b}_5: K_c = 71.0 \times 10^{-8}$$

由於離心力而引起的應力，可按照下式而求出：

$$\sigma_c = \frac{P_c}{S} = \frac{K_c}{k_3 \bar{b}^2 c} \frac{\gamma}{g} n^2 D^2. \quad (247)$$

圖 247 所示，為幾種沿槳葉的由離心力而引起的應力的典型分佈曲線。

今以簡化的形式來討論由空氣動力而引起的槳葉彎曲的情形。由於槳葉截面相對於它的兩根慣性主軸具有差別很大的剛度，所以，我們僅須研究相對於剛度為最小的主軸的彎曲。

槳葉上的空氣動力產生反作用力，而這些反作用力，就以一種與槳

軸平行的拉力的形式，以及一種位於螺旋槳旋轉面內的反作用力矩的形式表示出來（參看圖 248）。在離開槳軸距離為 r 的槳葉基素上，由於拉力而來的力矩，以符號 dM_p 來代表，而槳葉基素的反作用力矩——以 dM_q 來代表。合力矩為 dM_w ，而相對於最小剛度的主軸的力矩為 dM_x 。計算證明，在實際上，可以相當近似地假定：平均地沿半徑的 $dM_x = dM_p$ ，也就是說，槳葉基素的拉力可以取為槳葉的彎曲負荷。

從第十二章中得知，槳葉基素的拉力可表示為：

$$dP = d\alpha \rho n_s^2 D^4.$$

在半徑為 r_0 的截面內，由於半徑為 r 的槳葉基素的空氣動力而引起的彎曲力矩為：

$$dM_x = dP(r - r_0) = \rho n_s^2 D^4 (r - r_0) d\alpha \quad (248)$$

或者：

$$dM_x = \frac{1}{2} \rho n_s^2 D^5 (\bar{r} - \bar{r}_0) d\alpha, \quad (249)$$

在半徑為 r_0 的截面內的總彎曲力矩的大小，可從第 (249) 式的積分而

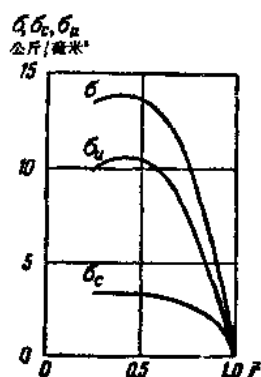


圖 247 螺旋槳在原地工作時沿槳葉的應力分佈：
 σ_n ——由於彎曲的應力，
 σ_c ——由於離心力的應力；
 σ ——合應力。

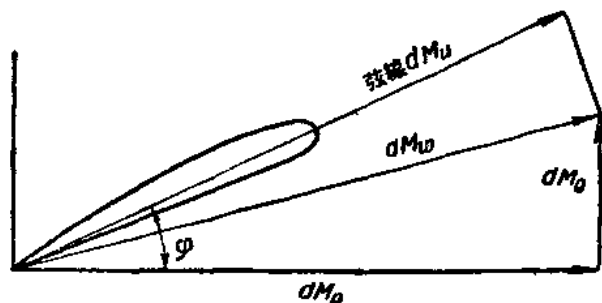


圖 248 在槳葉截面上的力矩矢量。

求得，積分的極限是自相對半徑為 $\bar{r}_0$ 處到槳葉梢端：

$$M_y = -\frac{1}{2} \rho n_s^2 D^5 \int_{\bar{r}_0}^1 \frac{d\alpha}{d\bar{r}} (\bar{r} - \bar{r}_0) d\bar{r}. \quad (250)$$

由此可知，彎曲力矩隨沿槳葉的拉力係數 $\frac{d\alpha}{d\bar{r}}$ 的分佈而改變。這種拉力的分佈，在做過槳葉空氣動力的檢驗計算以後，就可以求得。在螺旋槳設計的情形中，當進行螺旋槳的空氣動力計算時，它經常是已知的。檢驗的空氣動力計算，做起來非常複雜，但是在實用上，往往只能根據螺旋槳的空氣動力特性曲線圖查得拉力係數 α 和功率係數 β 來檢驗螺旋槳的強度。在這種情況中，可以採用下列的近似計算法。

現在來看看一螺旋槳的槳葉基素（參看圖 249），在這槳葉基素上，作用一昇力 dY ，其方向垂直於合速矢量 W 。這一昇力可表示為：

$$dY = \frac{1}{2} c_y \rho b W^2 d\bar{r} = \frac{1}{4} c_y \rho \bar{b} W^2 D^2 d\bar{r}.$$

合速 W 可從下式求得：

$$W^2 = V^2 + 4\pi^2 n_s^2 \bar{r}^2 = n_s^2 D^2 (\pi^2 \bar{r}^2 + \lambda^2). \quad (251)$$

這裏，速度 W 和 V 以米/秒計。

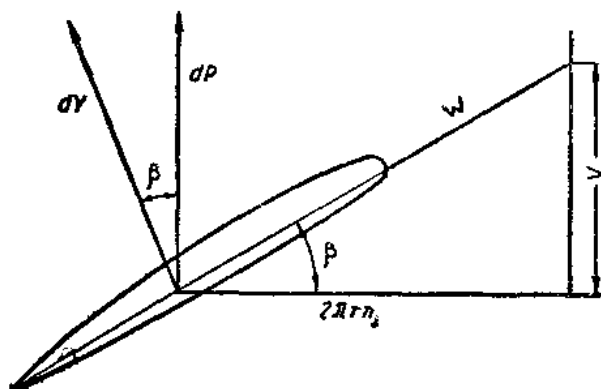


圖 249 槳葉基素上的空氣動力。