

AIRPLANE PROPELLERS

螺旋槳理論

英·葛勞渥著



新華書店發行



螺旋槳理論

AIRPLANE PROPELLERS

英·葛勞渥著 徐華舫譯

新華書店發行



書號：0646

螺旋槳理論 (Airplane Propellers)

著者：英·葛勞渥 (H. Glauert)

譯者：徐 華 勳

發行者：新華書店

印刷者：新華印刷廠北京第一廠
(阜成門外北德門外大街)

1—5,000[京] 一九五〇年十二月初版

杜朗 (Durand) 序

最早的螺旋槳理論要追溯到芮金 (Rankine) 和傅勞特 (Win. Froude) 的開創工作，後者的理論更由另一位傅勞特 (R.E. Froude) 加以發揚。很自然地，那些文章所討論的都是輪船上用的螺旋槳。當然，螺旋槳在水中和在空氣中工作，在基本理論上是沒有差別的，所以在論飛機螺旋槳的理論時，芮金和傅勞特的早期研究，便成了討論的自然的邏輯的歷史起點。

本書的作者，在第一章概說之後，第二章裏便引述芮金—傅勞特的軸向動量論，結果得出理想效率的公式。第三章接着是更周密的動量論，第四章則更精密地討論了螺旋槳的效率。

然後轉入較近的發展，第五章是討論由德爾傑維基 (Drzewiecki) 所導倡的葉素論。第六章是建築在有限翼展的機翼論上的渦流論，這個機翼論是過去二十年內浦朗佗 (Prandtl) 及其學派的成果。然後在第七章裏討論最高效率的螺旋槳，及其實現的條件。

再下面是很重要的一章，身翼的干擾問題，那裏討論了機身和機翼對螺旋槳性能的影響。第九章是螺旋槳的實驗方法，包括風洞干涉，尺度影響及流體壓縮性的影響。

第十章裏討論了直昇機旋翼的一般理論，在這一支學問上，本書作者是個先驅者。接下去，第十一章討論風車和風扇的理論，特別是二者在航空方面的應用。終結的第十二章概略地討論了與螺旋槳有關的幾個特殊問題，包括縱列槳，在氣流呈渦流環狀態下工作的螺旋槳，飛機側滑和縱擺時的影響，以及螺旋槳後的洗流等問題。

全世界的航空界以最深沉的哀悼，聞知本書作者於一九三四年八月四日意外逝世的消息。多年來，在理論氣動力學上他是一個卓著的，貢獻極多的人。他的死使本書的序言不得不由本人來執筆。同時，本書的出版也無法由原作者作最後的校讀，在這一點上我要特別感謝兩位校讀者，原作者的夫人及麥克金農—伍德（R. Mc Kinnon—Wood）先生，兩位對於本書作者的工作一向是很熟悉的。伍德先生多年來擔任英國皇家航空研究院（R.A.E.）的空氣動力學部主任。還要提一下的是，作者應本人的請求，在原稿送出付印之前，曾重看過一遍，並稍作修改，他的初稿寫成日期則稍早。所以，我相信如果作者在出版時還活在世上，最後經過他自己校讀一過的話，本書的樣子也不會有什麼重大的改變。

杜 朗（W. F. Durand）

符 號

下表是本書中所採用的各主要符號。凡是沒有列在表裏的，不是因為它太為人所熟知，無需註解，便是偶爾一用，用時附有解釋。至於一個符號兩用的時候，總是用在兩個不同的問題上，不致攪混的。

x	徑向座標= r/R
x	速比 $\Omega r/V$
C	風洞剖面的面積
c	弦長
D	螺旋槳直徑
H	螺旋槳槳距
r	徑向距離
s	渦面間的間隔(第七章第四節)
S	螺旋槳槳盤面積
B_1	尾流的剖面面積
α	衝角
γ	$\tan^{-1}(C_D/C_L)$
ϕ	W 與迴旋面之間所成的角
θ	葉角，通常自迴旋面量起
u	通過槳盤的軸向流速

u_1	尾流中最後的軸向流速
u_2	尾流外的流速
v	徑向流速
w	切線方向的流速(第六章第三節)
w	總誘導速度
W	葉素與流體之間的相對速度
V	飛機的前進速度
J	V/nD
Ω	螺旋槳的角速度
ω	誘導角速度
K	葉素上的環流
p	壓力
p'	葉素所產生的壓力增加
H_0	原來氣流中的總壓力頭
E	動能
T	拉力
Q	扭矩(即力矩)
P	動力
L	舉力
D	阻力
A	展弦比
C_D	阻力係數
C_T	拉力係數
C_Q	扭矩係數
C_P	動力係數
T_C	特殊的拉力係數
Q_C	特殊的扭矩係數
τ	特殊的拉力係數(第九章)
k_D	特殊的阻力係數(第十二章第三節)
C_N	垂直分力的係數
δ	$C_D/2$ 的平均值

- η 效率
- a 軸向流速的干涉數
- a' 迴轉流速的干涉數
- b 軸向滑流數
- σ 螺旋槳的“實度”全部槳葉實有面積與槳盤面積之比或 $Bc/2\pi r$
- B 槳的葉數
- k 特殊比值(第七章第一節)
- λ “特殊比值” $= V/\Omega R$
- n 每秒轉數
- M 優劣數(第十章)
- N_c, N_v 特定的比數(第九章)
- q 特定的比數(第三章第二節)
- A, B, C 特定的常數(第八章(3.6)式)
- F, G, H 特定的函數(第八章(5.7), (5.8)式)
- F, f 特定的因數(第十二章第四節)
- b, k 特定的係數(第八章(5.6)式)
- α 特殊的比值(第九章(2.9)式)
- λ 特殊的速比(第六章(4.3)式)
- δ 將 C_D 變為無限展弦比時的修正因子(第五章第五節)
- μ 表 $u/\Omega R$
- σ 特殊的比值(第九章(2.9)式)
- τ 將 α 變為無限展弦比時的修正因子(第五章第五節)
- τ 特殊的因數(第六章(6.15)式)
- ν 動黏性係數
- ρ 密度

目 錄

第一章 空氣螺旋理論.....	1
1.導言—— 2.無積次係數—— 3.螺旋槳設計—— 4.螺旋槳理論的發展	
第二章 軸向動量論.....	15
1.芮金—傅勞特理論—— 2.動量方程式—— 3.螺旋槳的理想效率	
第三章 周密的動量論.....	26
1.一般關係式—— 2.恒值環流—— 3.近似解法—— 4.最小能量耗失—— 5.恒值效率	
第四章 螺旋槳效率.....	40
1.能量方程式—— 2.近似解法—— 3.螺旋槳效率—— 4.數字的結果	
第五章 葉素論.....	53
1.粗陋的葉素論—— 2.葉素的效率—— 3.槳葉互擾—— 4.螺旋槳的渦流系—— 5.誘導速度—— 6.翼剖面性能—— 7.多翼干涉—— 8.翼列—— 9.翼列中的翼剖面性能	
第六章 渦流論.....	74
1.槳葉—— 2.能量與動量—— 3.螺旋槳性能—— 4.渦流	

論的應用—— 5.實度與槳距的影響—— 6.近似解法——

7.槳葉的有效展弦比

第七章 最高效率的螺旋槳 99

1.最少能量耗失—— 2.負荷不大的螺旋槳—— 3.翼型阻力的影響—— 4.葉數的影響—— 5.浦朗佗公式的應用

第八章 機身和機翼的干擾 120

1.螺旋槳性能—— 2.槳身干擾—— 3.視似拉力及視似阻力的分析—— 4.實驗結果—— 5.視似拉力及效率—— 6.機身後面的螺旋槳—— 7.螺旋槳和機翼的互擾

第九章 螺旋槳的實驗研究法 147

1.實驗方法—— 2.風洞的干擾—— 3.拉力及扭矩分佈—— 4.尺度影響—— 5.壓縮性的影響

第十章 直昇機旋翼 166

1.導言—— 2.理想直昇機—— 3.翼型阻力的影響—— 4.葉素論—— 5.前進運動—— 6.葉根固定的旋翼—— 7.葉角作周期變化的旋翼

第十一章 風車與風扇 184

1.風車的種類—— 2.理想風車—— 3.風車性能—— 4.產生壓力的風車—— 5.風車式風速計—— 6.風扇

第十二章 螺旋槳的幾個零星問題 204

1.縱列螺旋槳—— 2.槳葉滯壓後的螺旋槳—— 3.扭矩為零時的阻力—— 4.渦流圈下工作的螺旋槳—— 5.側滑和縱擺的影響—— 6.螺旋槳後的下洗流

第一章 空氣螺旋理論

1. 導言 飛機的推進力通常用一個或多個螺旋槳供給，螺旋槳所產生的拉力，在飛機平飛時對消機翼及機身各部份的阻力；當飛機斜爬上升時，則螺旋槳還得對消飛機重力在飛行方向的分力。螺旋槳在空中的運動是由兩種速度合成的：槳葉繞槳軸的旋轉速度 ω 及飛機的前進速度 V ，後者差不多和槳軸的方向一致。槳葉所受的氣動力產生一個與槳軸方向一致的拉力，及一個繞槳軸的力矩。這個力矩必須由帶動槳的發動機產生的軸扭矩抵消，而拉力則供給飛機在空中前進所必需的推進力。因為發動機所供給的動力即螺旋槳自發動機吸收的能量是 ωQ ，而拉力所作的有用功是 VT ，所以槳的推進效率是

$$\eta = \frac{VT}{\omega Q} \quad (1.1)$$

螺旋槳只是空氣螺旋中的一種。空氣螺旋這個總稱，可有如下
的定義：凡是有徑向葉片的機構，設計來使它在對空氣作相對運動時，葉片繞其軸旋轉的，都稱作空氣螺旋。有各種不同目的的空氣螺旋。主要的種類有：

(1)螺旋槳 是一種作推進用的空氣螺旋，設計的目的在於使用一定的軸動力 $\mathcal{Q}Q$ ，能給出高額的推進動力 VT 。

(2)風車 是一種利用它和空氣作軸向相對運動時從空氣裏吸收動力的空氣螺旋。有兩種不同的風車必須分辨：一種是裝在飛機上的風車，它的阻力很關重要，它所遭遇到的軸向風速相當的高；另一種是安裝在地面上的風車，它的阻力大小無關緊要，它所遭遇到的風速也相當的低。

(3)風扇 是一種用來產生一定量氣流的空氣螺旋。

(4)風速計 是一種由它的迴轉率來測定軸向相對風速的空氣螺旋。

上述這些空氣螺旋工作時，通常軸都是和空氣的流動方向一致的。可是飛機所用的螺旋槳是固定在飛機上的，它的軸僅在某一個衝角上是和飛機的運動方向完全一致的，改用其他的衝角時，相對風速就對槳軸斜了一個小角度；所以一種考慮完全的螺旋槳理論必須包括這種小傾斜對螺旋槳性能所產生的影響。此外，還有一兩種空氣螺旋其正常的運動方向就不和它的軸一致。這裏包括直昇機的旋翼——一個由發動機帶動使之產生懸浮力的空氣螺旋；還有風磨式飛機的旋翼，那是一種無動力帶動，僅靠流動空氣的作用力自轉以產生懸浮力的空氣螺旋。甚至氣象學家所用的杯形風速計，也可以當作一種特殊的空氣螺旋看；順便提一下，在飛機上有時也用杯形風速計以吸取動力，而不用普通的風車。

在研究空氣螺旋一般的理論時，把重心放在推進螺旋或螺旋槳上比較合適些。不論那種用途的空氣螺旋，理論方面都走的同一條路線，所以下面預備詳述螺旋槳的理論，然後考慮作各種特殊用途時所必須有的修改。

一個螺旋槳通常有幾個平均分佈的相同槳葉，由發動機供給軸扭矩，帶動它們作均勻的旋轉。每個槳葉的任一剖面都是一個機

翼剖面，每一個槳葉的狹條元素在空中行進時都和機翼的翼素一樣的能產生舉力及阻力。這些舉力和阻力合起來成為槳的拉力及扭矩。這兩種力對空氣的作用是使空氣產生所謂螺旋槳滑流，滑流包括一切通過槳葉所掃過的圓面的空氣，這部分空氣的運動會為拉力及扭矩的反作用所改變。事實上拉力是由於螺旋槳給了滑流以向後的動量而產生的，同樣的，扭矩則是由於螺旋槳給了滑流以迴轉的運動而產生的。拉力的直接作用是增加槳盤後面的空氣壓力，減低槳盤前面的壓力：所以空氣是被吸向槳盤的，然後由槳葉所產生的壓力向後推去。最大的軸向流速要在很遠的後面才能實現，但在槳盤之前軸向流速已經有了一些增加。由於軸向流速是逐漸增加的，所以滑流由槳盤經過向後去，其直徑逐漸縮小，空氣流

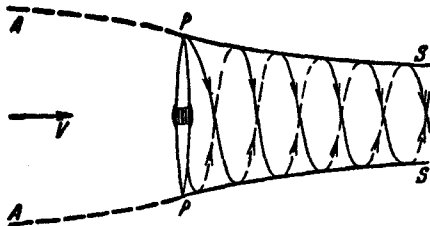


圖 1.

動的樣子可用圖 1 來表示。圖中 PP 代表槳盤，PS 是收縮中的滑流邊界，這裏空氣同時還作着迴轉運動，AP 是向槳盤衝來的空氣柱的邊界。

圖 1 代表一個螺旋槳的正常工作情况，改變槳的前進速度 V ，可以得到許多別種式樣的氣流。圖 2 表示一個空氣螺旋可能遭遇的一整套完全的工作情况[●]；這裏假定槳固定在空間不動，空氣以速度 V 向槳吹來。左邊是前，圖中的(b)代表正常工作情況。風速 V 增加，螺旋槳的拉力減少，終於於拉力變成了一個向後的阻力：這時滑流就成 (a) 那種樣子，在槳盤的後面逐漸擴大，螺旋槳則先成

● 第一篇討論這一整套工作情况的文章出現在美國國家航空諮詢委員會的技術報告(NACA Tech. Report)第29號上(1919)，作者G. De Bothezat。

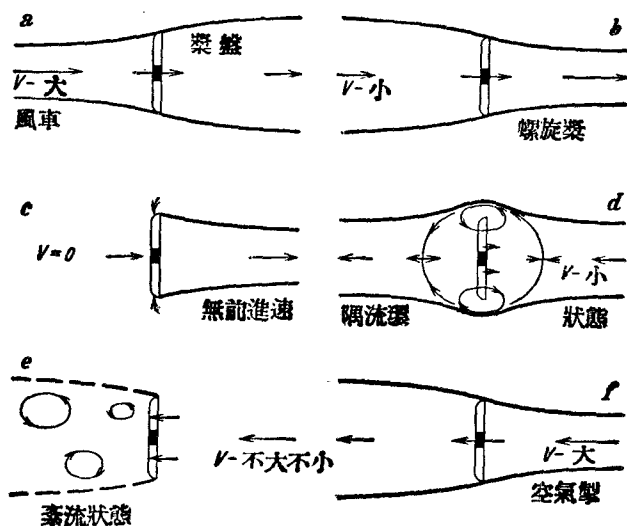


圖 2.

爲一種掣動器，後又成爲一個風車。(c)代表無前進速度的情況，可以看作(b)種正常情況中的一個極端，但當風速自槳後向前吹時，却產生了一種完全不同的運動，這時就有如(d)所示的渦流環產生了。後面來的風速再大時氣流就成了(e)的樣子，終至成爲(f)狀。前者代表螺旋槳產生一種混亂尾流的情況，後者則回復到了(a)的情況，祇不過是風向倒了一下罷了。呈渦流環狀的氣流，勞克(C. N. H. Lock)曾做過試驗，試驗並且完全肯定了圖2上所提到的各種情況。

2. 無積次係數 螺旋槳的拉力 T 及扭矩 Q 可以表示成爲軸向風速 V ，單位時間內的轉數 n ，以及槳直徑 D 的函數；而槳的工作情況則可以用每轉一次前進的距離 $\frac{V}{n}$ 來標明。但螺旋槳的性能以無積

● 英國航空研究委員會(A. R. C.)的「報告與備忘」(Report and Memorandum)第1167號，1928。

次的係數表示頗多方便。這樣，工作情況便需要用進距直徑比來標明了

$$J = \frac{V}{\pi D} \quad (2.1)$$

拉力及扭矩以無積次係數表示為

$$\left. \begin{aligned} C_T &= \frac{T}{\rho n^2 D^4} \\ C_Q &= \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

ρ 是流體的質量密度。有時將扭矩 Q 換成槳所吸收的動力 P ，更有用些，其無積次係數則為

$$C_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (2.3)$$

因為動力 P 等於 $2\pi nQ$ ，所以動力係數與扭力係數有下列的關係

$$C_P = 2\pi C_Q$$

最後，螺旋槳的效率是

$$\eta = \frac{VT}{P} = J \frac{C_T}{C_P} \quad (2.4)$$

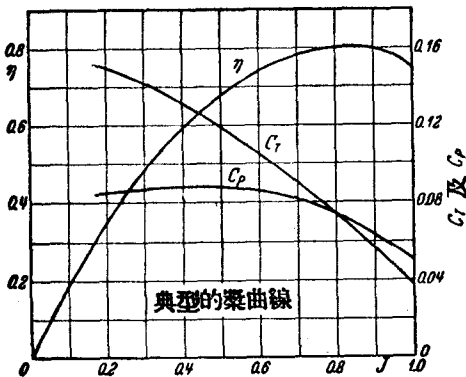


圖 3.

上面這一套無積次的係數，不論採用那種單位其值都是一樣的，要緊的是必須採用一致的一種單位系統。例如用平常的工程單位，那末拉力是磅，直徑呎，時間秒，於是速度是每秒呎，動力每秒呎磅，密度是斯勒[●]每立方呎。圖3

● 斯勒是一個質量單位，一磅的力作用在一斯勒的質量上，產生一每秒每秒呎的加速度。

是一組典型的拉力係數 C_T ，動力係數 C_P 及效率的曲線，其變數是進距直徑比 J 。

還有許多別種樣子的無積次係數曾被各個不同的作者採用過，有人用角速 ω 而不用 n ，採用前進速度 V 以代替 nD ，槳盤面積 $\pi D^2/4$ 以代替 D^2 。前面所提的是一套標準的無積次係數，這是由經驗裏得出來作計算使用最方便的一套係數，但是在講理論的時候，下面的一套係數則較為合宜：

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{V}{\omega R} \\ T_c &= \frac{T}{\pi R^2 \rho \omega^2 R^2} \\ Q_c &= \frac{Q}{\pi R^2 \rho \omega^2 R^3} = \frac{P}{\pi R^2 \rho \omega^3 R^3} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

這裏 ω 是螺旋槳的角速度， R 是槳半徑，因此 ωR 就是槳葉尖端的旋轉線速度。在這一套係數裏 λ 是前進速度 V 與葉尖端速度 ωR 的比，可以叫它螺旋槳的速比；而扭矩係數則與動力係數完全一樣。螺旋槳的效率是

$$\eta = \frac{\lambda T_c}{Q_c} \quad (2.6)$$

這一套係數將用在下面展開理論，一切結果都將以這套係數來表示。要改到標準係數去很容易，祇要用下面的關係式就行了：

$$\left. \begin{aligned} J &= \pi \lambda = 3.14 \lambda \\ C_T &= \frac{\pi^3}{4} T_c = 7.75 T_c \\ C_Q &= \frac{\pi^3}{8} Q_c = 3.88 Q_c \\ C_P &= \frac{\pi^4}{4} Q_c = 24.35 Q_c \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

在討論這些無積次係數時，假定這些特性係數僅僅是一個變

數 J 或 λ 的函數，但是用積次分析法●來分析螺旋槳的話，可以證明這些係數同時還是運動的雷諾數的函數，也是槳尖速與音速之比的函數。雷氏數表示螺旋槳的大小或速度與流體黏性關係的作用。這數可以用 $\lambda R^2/\nu$ 來表示， ν 是流體的動黏度係數。經驗指明這個所謂“尺度影響”在正常的工作情況下是並不重要的，祇當螺旋槳接近了它的臨界角或拉力非常小時，才可能有顯著的重要性。另一個數——槳尖速 ωR 與音速之比表示空氣的壓縮性對螺旋槳性能的影響，這個影響對於慢轉的槳是不重要的，但越轉得快，槳尖速越接近音速，則愈重要。理論對於這兩個因素的作用還未能很好地處理，必需完全依靠特殊的實驗去考察它們的重要性。

3. 螺旋槳設計 在規定代表螺旋槳性能的諸無積次係數時，唯一用到的幾何尺寸是槳的直徑 D ，或是半徑 R ，但要說明一個螺旋槳，則還必需說明它的葉數， B ，以及槳葉的幾何形狀。除了整個槳葉有傾斜，或葉緣後彎之外，一個槳葉可以用下面的幾點來說明：

(1) 在任何一個徑距， r 處的剖面所用的是哪一種翼型，以及翼型沿槳葉的變化情況。

(2) 槳葉的平面形狀，或是說弦長沿槳葉的變化情形。

(3) 葉角，或是說，各剖面的弦與槳盤面所成的傾斜角。

螺旋槳上所用的翼剖面往往較機翼上所用的為厚，而且有一種趨勢，喜歡用平底面的翼型。槳尖上的翼剖面通常最薄，往槳

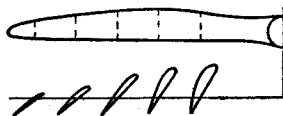


圖 4.

根走逐漸加厚，最後與槳轂合而為一（現在的金屬槳，各槳葉單獨製造，槳轂另是一個單位，將各槳葉的根包合成一支螺旋槳——譯註）。圖 4 表示一個

● 見本全集第一編第四章以及第八編第一章第三節。譯按，本全書由杜朗主編，共分二十編由當時的二十四位世界權威執筆寫成。書名“Aerodynamic Theory”。