

5
7

模型飞机的螺旋桨

目 录

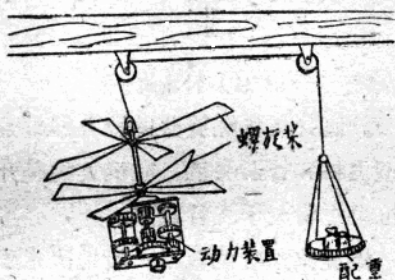
前 言	1
第一章 螺旋桨的工作原理和几何特性	4
第一节 螺旋桨的运动特性	4
第二节 拉力、功率和效率	10
第三节 桨叶的几何特性	15
第二章 模型飞机螺旋桨的分类	26
第一节 等距螺旋桨和不等距螺旋桨	26
第二节 变距螺旋桨和定距螺旋桨	33
第三章 桨叶的设计和按样板 制作螺旋桨的方法	38
第一节 活塞式发动机的螺旋桨	39
第二节 橡筋模型飞机的螺旋桨	51
結束語	57

本書由吳从先同志編写，經刘明道、朱宝
流和黃永良等同志校閱。

前言

1754年，罗曼罗索夫为了证明比空气重的机械能够在空气中飞行，他成功地表演了自己设计和制造的一架直升模型飞机（图1）。在这个小飞行器上安装了象船桨那样的桨叶，当钟表的发条带动桨叶旋转起来的时候，这架小直升飞机就载着它的“货载”——一把沉重的短剑升空了。

虽然罗曼罗索夫的直升模型飞机被认为是世界上的第一架直升飞机，但是早在1400年左右



图（1） 罗曼罗索夫的直升机。

（明朝时代）我们的祖先就已经发明了这样的飞行器，这便是一直流传到今天的儿童玩具——竹蜻蜓；见图2。

构造十分简单的竹蜻蜓是这样做成的：取一片狭长的薄竹片在灯火上烘烤，使它的两端相反方面扭转，然后在中间鑽一孔紧紧地插上一根圆轴，这就成了。用双手手掌搓动圆轴，竹蜻蜓的叶片就绕着轴转动起来。如果使劲一搓立即放开双手，那末竹蜻蜓就迅速旋转而升上天空。

应该说，竹蜻蜓是世界上最早的螺旋桨和直升飞机，它

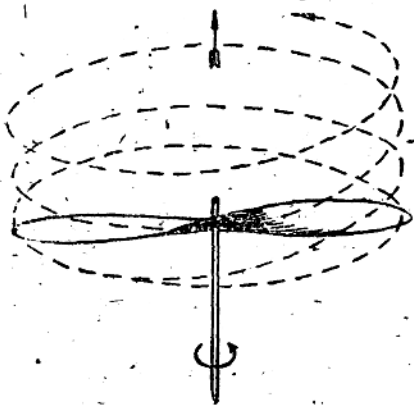


图 (2) 竹蜻蜓

轉动的时候产生一个力量把自己拉上天空。

现代飞机的螺旋桨的基本工作原理和竹蜻蜓完全一样，也是在它旋轉的时候产生拉力来带动飞机前进的。

一般的飞机在平飞或在很小的爬升角之下飞行时，螺旋桨的拉力，約等于飞行重量的十分

之一。直升飞机螺旋桨的拉力經常是大于飞行重量的。至于模型飞机和普通飞机，在很大的爬升角之下飞行时，所需要的拉力也将大于飞行重量。

螺旋桨桨叶的数目一般地决定于发动机功率的大小；功

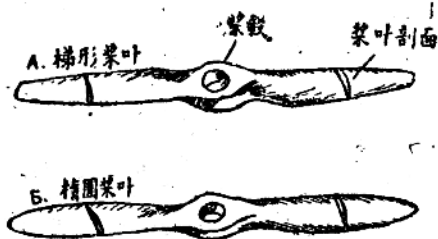
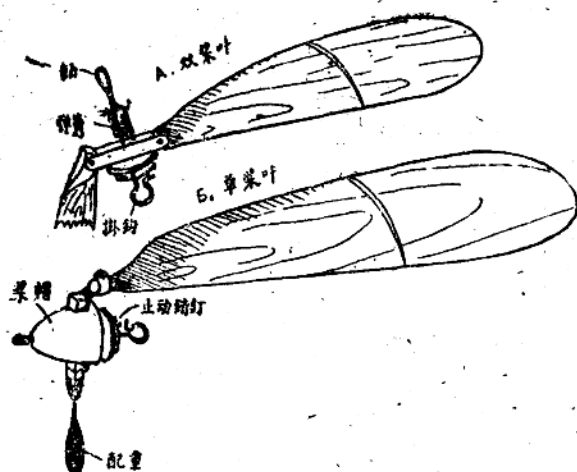


图 (3) 活塞式发动机模型飞机的螺旋桨



图(4) 橡筋模型飞机的收折式螺旋桨

A. 双桨叶 B. 单桨叶

率强大的发动机能带动的桨叶数也较多。一般真飞机上的螺旋桨具有二至四叶桨叶，直升飞机螺旋桨桨叶数目可以更多，而且桨叶很长，至于在模型飞机上，螺旋桨一般都是两叶的，在一些橡筋模型飞机上还使用单叶螺旋桨。参看图3和图4。

怎样的螺旋桨才算好的螺旋桨呢？如何设计和制作出这样的螺旋桨来呢？这正是我们所要研究的问题。

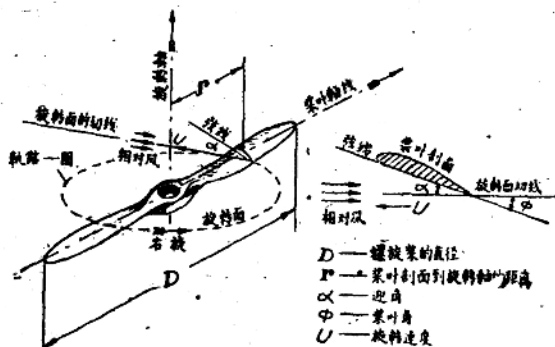
第一章

螺旋桨的工作原理和几何特性

螺旋桨在空气中运动时象机翼在空气中运动一样，因此就有空气动力作用在上面。根据螺旋桨和空气之间的运动特性，我们就会明白螺旋桨的工作原理，以及螺旋桨为什么需要做成它现在的这种几何形状，这样我们才知道怎样设计、制造和改进自己的螺旋桨。

第一节 螺旋桨的运动特性

当飞机停在原地不动，或者把发动机固定在试车台上工作时，安装在上面的螺旋桨就只能在原地旋转。这时桨叶的每一个剖面的运动轨迹都是圆弧，圆心都在旋转轴上，圆的半径就是桨叶剖面到旋转轴的距离 r 。在图5中不难看出：



图(5) 螺旋桨在原地旋转时的运动特性。

在桨叶每旋轉一圈的同一時間內，距离旋轉軸远近不等的各个剖面所走的路程（即圓周的长度）是不相等的，越接近桨叶两端（距离旋轉軸越远）的剖面所走的路程越长，因此它的旋轉速度 U （沿着圓周的切綫）就愈大。

桨叶剖面的弦綫与旋轉速度之間的夹角中称为螺旋桨的桨叶角。

在飞行中，桨叶随同飞机以同样的飞行速度 V 前进着。所以每一个桨叶剖面在飞行中不仅有着各不相同的旋轉速度 U ，而且具有同样的前进速度 V ，也就是說桨叶剖面是在一面旋轉一面前进的。因此，它的运动軌跡是在某一圓柱面上的螺旋綫，这一圓柱的半径就是桨叶剖面到旋轉軸的距离 r 。参看图 6。

桨叶剖面沿螺旋綫軌跡运动的速度 W 可以这样求得：以 U 与 V 作为平行四边形的两条邻边（因为 U 与 V 垂直，故为一矩形），四边形的对角綫即为 W 。

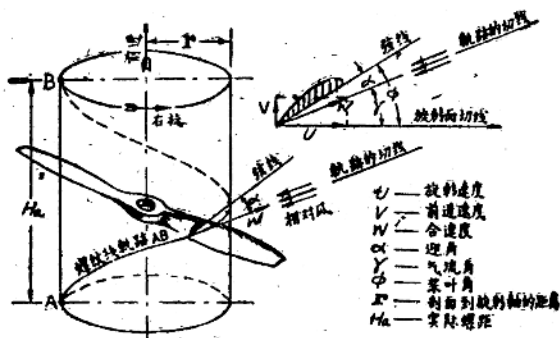


图 (6) 螺旋桨在飞行中的运动特性。

W 与 U 之间的夹角 r (也就是螺旋线的切线与旋转面的切线之间的夹角)称为气流角。桨叶剖面以速度 W 在空气中运动时,相对地说来,就有与 W 大小相等、方向相反的相对风吹向桨叶剖面。在图 6 中不难看出:越接近桨叶两端(即距离旋转轴越远)的桨叶剖面,其运动速度 W 就越大,亦即相对风速越大;但气流角 r 却越小。

相对风与桨叶剖面弦线之间的夹角 α 叫做桨叶迎角(象机翼迎角的定义一样)。从图 6 中看出, 桨叶迎角 $\alpha = \Phi - r$ 。当螺旋桨在原地旋转时,前进速度 $V = 0$, 相对风速就与旋转速度 U 大小相等方向相反,这时, 气流角 $r = 0^\circ$, 所以这时的桨叶迎角 α 即等于桨叶角 Φ 。在飞行中气流角大于零,所以迎角小于桨叶角。

图 6 中,沿螺旋轨迹运动的桨叶剖面在旋转一整圈前后的位置以 A 与 B 两点来表示。桨叶每转一圈,各个剖面沿旋转轴线方向(可以近似地看作是飞行方向)前进的路程 H_a 称为螺旋桨的实际螺距。图 6 中所示的圆柱体就是以实际螺距 H_a 作为它的高度画出的。

设实际螺距为 H_a [公尺], 螺旋桨转速为 n [转/秒], 飞行速度为 V [公尺/秒]。按定义实际螺距

$$H_a = \frac{V}{n} \text{ [公尺]}$$

(因为速度 V 表示每秒桨叶剖面随飞机前进的路程,在这一秒钟之内桨叶转了 n 圈。所以用 n 去除 V 所得的商就是每一转前进的路程,即实际螺距。

〔例题一〕 设一竞速模型飞机的飞行速度为每小时 220 公里,螺

旋桨轉速为每分鐘 17500 轉，求 H_a 。

〔解〕在上面求实际螺距的公式中，速度的单位为〔公尺/秒〕，轉速为〔轉/秒〕。因此，在代入公式以前应先把题目中給定的速度和轉速的单位与公式中所要求的单位統一，即

$$V = \frac{220}{3.6} = 61.1 \text{ [公尺/秒]}$$

(每秒/公尺的速度相当于每小时 3.6 公里)

$$n_s = \frac{17500}{60} = 292 \text{ [轉/秒]}$$

(每秒一轉即每分鐘 60 轉)

由此，实际螺距

$$H_a = \frac{V}{n_s} = \frac{61.6}{292} = 0.210 \text{ [公尺]}$$

或 210 [公厘]

知道了实际螺距之后，可以很方便地求得桨叶各个剖面处的气流角，而不需要去对每一个剖面作出以 U 与 V 为两邻边的平行四边形。

在討論这个問題以前，讓我們先来講一件另外的事情——如果我們在一张长方形的硬紙上画一条对角綫，然后，把这张紙卷成一个圓筒，結果就会在圓筒柱面上出现一条螺紋綫。如果把圓筒柱面再展开成为一个平面时，柱面上的螺紋綫又变成平面上的直綫了。从图 7 中可以看到：柱面上的螺紋綫与圓柱橫断面之間的夹角 τ 也就是平面上对角綫 AB 与底边 AD 的夹角，而 AD 的长度就等于圓柱橫断面的圓周长度 $2\pi r$ ，矩形平面的另一边长就是圓柱体的高度 H_a 。

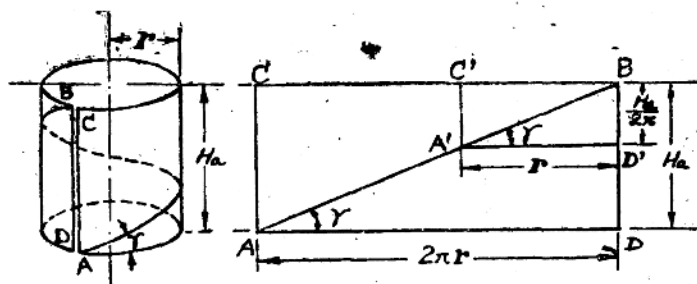


图 (7) 柱面上螺旋线的展开

从图中还可以看到：以 Γ 为底边和 $\frac{H_a}{2\pi}$ 为另一边所作出的小矩形的对角线 $A'B$ 与底边 $A'D'$ 所夹的角度也是 γ 。现在，比较图 6 与图 7 就可看出：气流角 γ 就是以 Γ （桨叶剖面到旋转轴的距离）为底边， $\frac{H_a}{2\pi}$ 为高所作出的直角三角形的斜边与底边之间的夹角。

〔例题二〕在例题〔一〕中，设螺旋桨的直径为 185 公厘，试求出 $0.25R$ 、 $0.50R$ 、 $0.75R$ 三个桨叶剖面处的气流角。（ R 为桨叶半径。）

〔解〕桨叶半径

$$R = \frac{D}{2} = \frac{185}{2} = 92.5 \text{ [公厘]}$$

各剖面至旋转轴的距离 Γ 分别为

$$\Gamma_{0.25R} = 0.25 \times 92.5 = 23.10 \text{ [公厘]}$$

$$\Gamma_{0.50R} = 0.50 \times 92.5 = 46.25 \text{ ["]}$$

$$\Gamma_{0.75R} = 0.75 \times 92.5 = 69.30 \text{ ["]}$$

由例题〔一〕得知实际螺距

$$H_a = 210 \text{ [公厘]}$$

由此得

$$\frac{H_a}{2\pi} = \frac{210}{6.28} = 33.5 \text{ [公厘]}$$

然后作出底边 r 不等，而高 $\frac{H_a}{2\pi}$ 相同的直角三角形，它们的斜边与各底边之间的夹角即为三个桨叶剖面处的气流角 γ 。

从图中用量角器量得气流角

$$\gamma_{0.25R} = 57^\circ$$

$$\gamma_{0.50R} = 37^\circ$$

$$\gamma_{0.75R} = 27^\circ$$

$$\gamma_R = 21^\circ$$

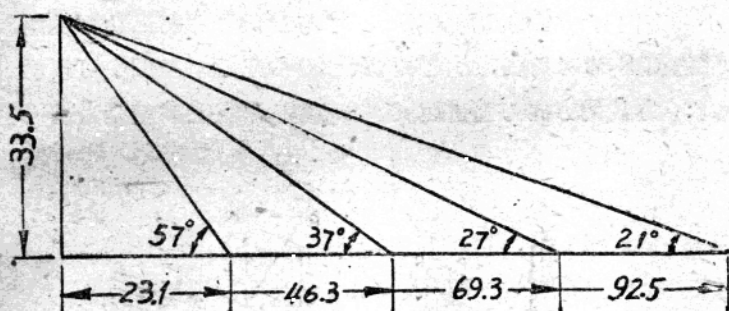


图 (8) 桨叶各个剖面处的气流角

〔习题一〕设一自由飞模型飞机在飞行时的螺旋桨转速为 9000 转/分，飞行速度为 9.5 公尺/秒，螺旋桨直径 230 公厘。试求 $0.3R$ 、 $0.6R$ 、 $0.9R$ 三个桨叶剖面处的气流角。

实际螺距和气流角的计算在螺旋桨的初步设计中将要用到。

知道了螺旋桨桨叶在其工作中的运动特性之后就不难理

解它的工作原理了。

第二节 拉力、功率和效率

截取一小段桨叶来看，它与一段机翼相似。相对风以某一迎角吹向这一小段桨叶时，作用在它上面总的空气动力 R 与作用在机翼上的一样，是与相对风倾斜着的，参看图 9。力学告诉我们：作用在物体上的一个力可以用另外两个适当的力来代替而不改变物体受力后的状态。现在我们用这样两个力来代替 R ，其中 P 平行于旋转轴线而 Q 与 P 垂直，即 P 与前进速度 V 平行而 Q 与旋转速度 U 平行。 P 、 Q 与 R 的大小和方向有一定的几何关系—— P 与 Q 为一平行四边形的两邻边而 R 为对角线，力的方向如图 9 中所示。从图中可以看到：力 P 的方向与前进速度 V 一致，事实上 P 就是带动飞

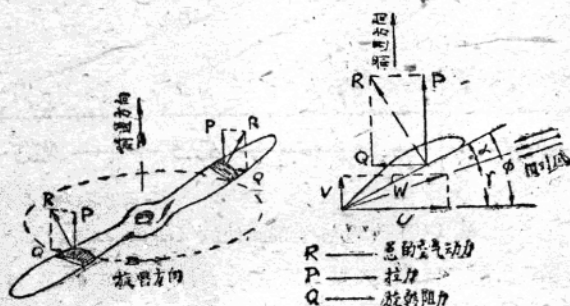


图 (9) 作用在桨叶上的空气动力

机前进的力，所以叫做拉力。整个螺旋桨所产生的拉力，就是每一段桨叶上拉力 P 的总和。作用在每一小段桨叶上的另一个力 Q 的方向与旋转速度 U 相反，它起着阻止旋转运动的

作用，所以被叫做旋轉阻力。

为了克服旋轉阻力使桨叶繼續不停止地旋轉，就需要有发动机(或橡筋束)来带动螺旋桨旋轉，螺旋桨在其工作中需要发动机(或橡筋束)供給的功率，称为螺旋桨的需用功率。与此同时，螺旋桨的拉力也在对飞机做功，拉力与飞行速度的乘积就是每一秒鐘之內拉力所做的功，称为螺旋桨的可用功率(可以供給飞机的功率)。可用功率与需用功率的比值叫做效率。和所有的机器一样，螺旋桨在其工作中也有种种損失，所以它的可用功率总是小于需用功率的。因此，螺旋桨的效率总小于1。模型飞机螺旋桨的效率約在0.50~0.87的很大範圍內，效率是評定螺旋桨好坏的标准。

要提高效率就必须使作用在桨叶上的拉力很大而旋轉阻力却很小，或者說，使拉力 P 和旋轉阻力 Q 的比值最大(正如机翼要求升阻比最大一样)。在图9中可以看出：当总的空气动力 R 的大小和方向改变时，拉力 P 和旋轉阻力 Q 的大小就也不同，而总的空气动力 R 又随迎角 α 而改变，因此拉力 P 与旋轉阻力 Q 的比值就象升阻比一样将随迎角不同而改变，只有在某一个迎角之下才能得到最大的比值。这一迎角可以近似地看作是桨叶剖面翼型的最有利迎角 $\alpha_{H.B.}$ 。在沒有翼型的資料时，对于平凸翼型可以取 $\alpha_{H.B.} = 2^\circ \sim 4^\circ$ ；而凹凸翼型則取 $4^\circ \sim 6^\circ$ 。模型飞机螺旋桨桨叶剖面一般只采用这种两翼型。平凸翼型通常用在活塞式发动机的螺旋桨上，而凹凸翼型大都用在橡筋螺旋桨上。

为了提高效率必須使桨叶各个剖面都在最有利迎角下工作，如何做到这一点呢？

在图 6 中我們已經看到桨叶迎角

$$\alpha = \Phi - \gamma$$

式中 Φ 为桨叶角, γ 为气流角。我們知道, 越到桨尖气流角 γ 越小, 而且桨根附近的剖面 and 桨尖剖面处气流角相差很大, 也就是气流角沿着桨叶从桨根到桨尖是在逐漸减小。由于各个剖面的翼型不同, 各个剖面的最有利迎角也可能不同, 但相差也很小。因此我們可以近似地将各个剖面翼型的最有利迎角看作相等。这样就不难想象, 各个剖面的桨叶角和气流角有着密切关系。也就是說, 必須把桨叶角 Φ 做得越到桨尖也越小才能够保持 $(\Phi - \gamma)$ 不改变且等于最有利迎角 $\alpha_{H.B.}$ 。由于桨叶角由桨根到桨尖在逐漸的减小, 桨叶各个剖面的弦綫就都不是平行的。也就是說: 桨叶是扭轉的。

在正确地扭轉的桨叶上, 各剖面的桨叶角應該是:

$$\Phi = \gamma + \alpha_{H.B.}$$

在这里我們順便提出一件值得注意的事情, 刚才講过, 使桨叶的每一个剖面都在最有利的迎角之下工作是提高螺旋桨效率的重要措施, 現在我們来比較一下, 看看接近桨尖处和接近桨根处的两个桨叶剖面, 这两个剖面都在最有利迎角之下工作, 会不会效率都一样高呢? 在图 19 中画出了在 $0.30R$ 处的一个桨叶剖面 and $0.75R$ 处的一个剖面的工作情况。由于气流角 $\gamma_1 > \gamma_2$, 故桨叶角 $\Phi_1 > \Phi_2$, 假定两个剖面都在同一最有利迎角下工作 (即 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{H.B.}$), 空气动力 R_1 与相对风 W_1 之間的夹角等于 R_2 与 W_2 之間的夹角。但是, 因为桨叶角 $\Phi_1 > \Phi_2$, 空气动力与螺旋桨軸綫之間的夹角却不相等。从图中可以看到: 以拉力 P 和旋轉阻力 Q 来代替 R

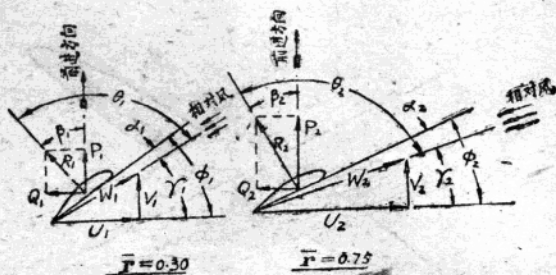


图 (10) 在同一有利迎角下工作的桨叶剖面，桨叶角大效率低。

的时候就会发现：桨叶角越大的剖面处拉力与旋转阻力的比值将越小（图中 $\frac{P_1}{Q_1} < \frac{P_2}{Q_2}$ ），故效率越低。在比较 $0.30R$ 和 $0.75R$ 两个剖面后，就得出这样的结论：虽然各个剖面都在最有利迎角之下工作，但越靠近桨根的剖面效率越低。由于靠近桨根处的桨叶效率不高，所以干脆不需要它产生拉力但愿它的旋转阻力最小。为了达到这一目的，就用一个锥形的整流罩从桨根到 $0.15R \sim 0.20R$ 处的桨叶剖面全放进整流罩内，见图11。这一部份桨叶虽不再产生拉力，但同时旋转阻力也减低到最小程度（只有微小的整流罩与空气摩擦所造成的阻力），因而使整个螺旋桨转得更快，而那些没有被放进整流罩内的桨叶部分由于转速加快而增加的拉力足以弥补放入整流罩内这一部分桨叶损失的拉力。

事实证明装有整流罩的螺旋桨效率是有所提高的。

〔例题三〕 在例题〔二〕中，设桨叶剖面所采用的翼型的最有利迎角 $\alpha_{H.B} = 2^\circ$ ，试求各剖面的桨叶角。

〔解〕 在例题〔二〕中已求得各剖面的气流角 $\gamma_1 = 57^\circ, \gamma_2 = 37^\circ$ ，

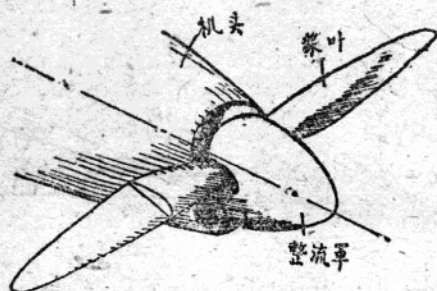


图 (11) 螺旋桨整流罩

$\gamma_3 = 27^\circ$ 和 $\gamma_4 = 21^\circ$ 。利用公式 $\Phi = \gamma + \alpha_{H.B.}$ ，所以各剖面的桨叶角 $\Phi_1 = 59^\circ$ ， $\Phi_2 = 39^\circ$ ， $\Phi_3 = 29^\circ$ ， $\Phi_4 = 23^\circ$ 。

各剖面桨叶角如图 12 中所示。

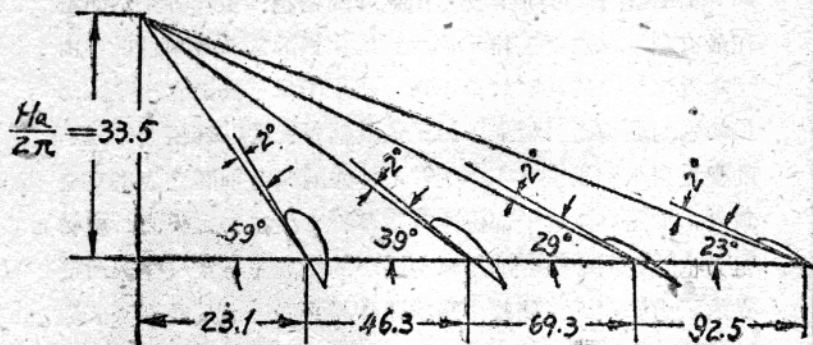


图 (12) 桨叶各个剖面的桨叶角

使桨叶正确的扭曲是提高螺旋桨效率的重要措施。然而螺旋桨几何形状的合理选择也是十分重要的。下面我们就来，讨论这一问题。

〔习题二〕——在习题一中，设桨叶剖面最有利迎角为 3° ，试求各个

剖面的桨叶角，

第三节 桨叶的几何特性

(一) 螺旋桨的直径 D

螺旋桨直径的大小对于它的空气动力特性有很大的影响。在维持转速不变的条件下，直径越大拉力也越大，但同时需用功率也越大。另一方面，对于给定的发动机或橡筋束，直径的增大会显著地降低转速，而减小直径就会使转速大大地提高。

一般 1.5~2.5c.c. 活塞式发动机的自由飞模型飞机螺旋桨直径在 200~250 公厘的范围之内，对于竞速模型则为 140~190 公厘，橡筋模型螺旋桨直径约为机翼翼展的 $\frac{1}{3}$ 到 $\frac{1}{2}$

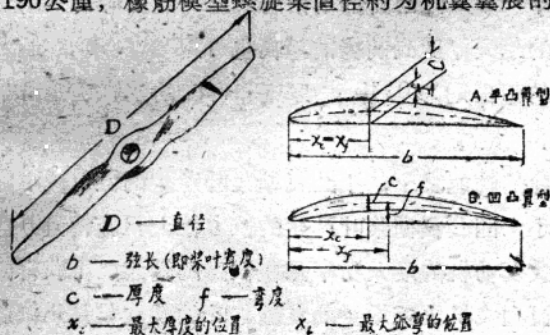


图 (13) 桨叶剖面的几何特性

左右。

螺旋桨直径过大或过小都是不适宜的。关于如何选择螺旋桨直径的问题将在第三章中再去讨论。

螺旋桨的直径大小不但直接影响它的空气动力特性和发动机（或橡筋束）的工作，同时也影响了螺旋桨的其他几何