

是悬停在空中的旋翼飞行器，它们的机翼在获得升力的同时，机翼与气流之间也在发生相对运动。并且固定翼飞机与旋翼飞行器的机翼剖面形状是相似的，如图 1.3.1 所示，因此它们产生升力的原理也是相同的。

固定翼飞机和旋翼飞行器的飞行离不开空气，正是机翼与空气的相互作用让它们获得了升力。空气在流过机翼的过程中会发生哪些现象？升力又是怎么产生的？接下来通过实验探究空气动力学现象。

1.3.1 附壁效应

附壁效应是指气流或水流会附着在弯曲物体的外表面，从而偏离原来运动方向的一种流动现象，这个现象是亨利·科恩达 (Henri Coandă) 发现的，亨利·科恩达是罗马尼亚的发明家和空气动力学家，人们为了纪念这位科学家，把这种效应称为科恩达效应。例如，在使用杯子、碗、酒瓶等容器倾倒液体时，在倾角不大的情况下，液体容易沿着容器的外壁流动，如图 1.3.2 所示。将横着的圆柱形水杯逐渐靠近正在向下流动的自来水，原本竖直下落的水流开始沿着水杯弯曲的外壁流动，如图 1.3.3 所示，这些都是液体的附壁效应。

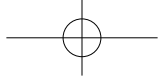


图 1.3.2 倾倒液体



图 1.3.3 水流的附壁效应

水流的附壁效应往往比气流的附壁效应更明显，以图 1.3.3 为例，在空气中竖直向下流动的自来水会紧贴水杯弯曲的外表面流动，其主要原因是水与杯子之间存在着吸附力，并且水流的表面也有很强的张力，在这两个力量的共同作用下，把水“拉向”了水杯的外表面，可以理解为水流是被水杯吸过去的。



◎ 试一试

打开自来水龙头，自来水缓缓流下，将勺子用细绳悬挂竖起并向水流靠近，用勺子的背面去接触水流，如图 1.3.4 所示，在这个实验中除了可以看到水流的附壁效应，你还能观察到什么？



图 1.3.4 用勺子靠近水流

实验探究：空气的附壁效应——隔空吹蜡烛

实验器材：圆柱形杯子、蜡烛、点火器。

实验过程

将点燃的蜡烛立在桌面上，然后在蜡烛的正前方放置一个玻璃杯，玻璃杯需要高于火焰的高度。在与蜡烛火焰差不多高度的位置，隔着玻璃杯向蜡烛的方向轻轻吹一会儿，如图 1.3.5 所示。看看火焰有什么变化。由于实验中用到了明火，请在成人指导下进行实验，实验时注意安全。

实验现象

隔着杯子吹蜡烛时，蜡烛的火焰会熄灭。这是因为吹出的气流虽然被玻璃杯阻挡，但由于科恩达效应，气流会沿着圆柱形玻璃杯的外壁流动并到达火焰的位置，如图 1.3.6 所示，从而吹灭蜡烛。



图 1.3.5 隔空吹蜡烛

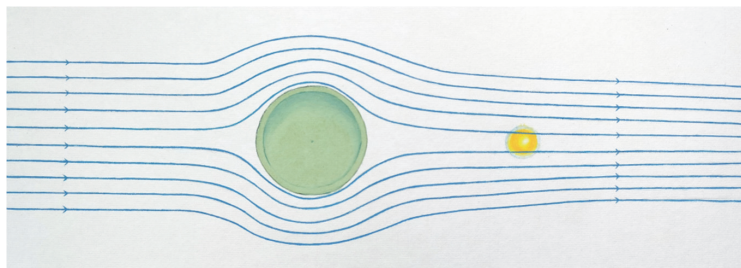
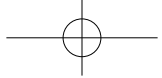


图 1.3.6 流经玻璃杯外壁的气流示意图

在隔空吹蜡烛的实验中，当气流刚到达玻璃杯外壁时，气流将沿着玻璃杯外壁的左右两侧流动，由于空气具有黏性，气流在经过玻璃杯表面时会不断带走玻璃杯表面附近的空气，在图 1.3.7 所示的示意图中，空气的黏性将会让气流带走深蓝色区域的空气，玻璃杯的表面就会形成低压区，在大气压的作用下，气流被大气压压向玻璃杯表面，如图 1.3.8 所示，从而让气流沿玻璃杯表面流动，这就是流动空气的附壁效应形成的原因。

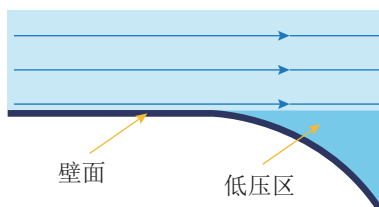


图 1.3.7 玻璃杯表面低压区示意图

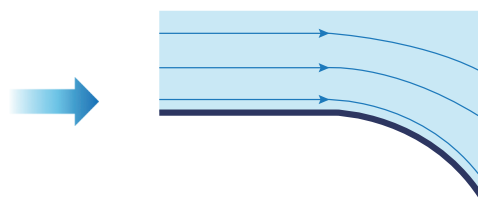


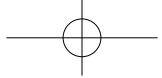
图 1.3.8 气流弯向低压区

试一试

在隔空吹蜡烛的实验中，如果用一个长方体盒子来代替玻璃杯的位置，隔着玻璃杯向蜡烛的方向轻轻吹一会儿。看看火焰有什么变化。并解释其中原因。长方体的盒子可以是牙膏盒或其他类似形状盒子，盒子的高度要大于火焰的高度，如果是纸盒或塑料盒，可以用铝箔纸将盒子包裹起来，避免盒子被蜡烛点燃。

1.3.2 伯努利原理

丹尼尔·伯努利是瑞士的数学家、物理学家。1726 年，伯努利通过无数次实验，发现流速与压强存在这样的关系：无论是气体还是液体，流体的流速越大，压强越小；流体的流速越小，压强越大。为纪念这位科学家，人们把这一发现称为“伯努利原理”。



◎ 试一试

(1) “警察”舱身橡筋动力飞机模型自带起落架，可尝试将模型从平整的地面上滑跑起飞。

(2) 清洗橡筋，给橡筋添加适量的润滑剂，通过一边拉伸一边缠绕的方式来增加橡筋的缠绕转数，比一比，谁的模型在天上飞的时间更久。为了让模型拥有更多的留空时间，还有哪些改进方法？

3.4 “轻骑士”橡筋动力飞机模型

如图 3.4.1 所示，“轻骑士”橡筋动力飞机模型采用细长的杆身设计，在减重的同时，也极大地减小了飞行阻力，模型的总质量约为 30g，机翼安装角约为 3.5° 。机身采用空心圆管，橡筋置于圆管内，可更好地保护橡筋。模型的翼展为 52cm，机长为 43cm，最长飞行时间可达 60s，如果遇到上升气流，可飞行 60s 以上，模型的制作无须粘贴，机翼可更换，利于维修和改进，是一架滑翔性能卓越的橡筋动力飞机模型。

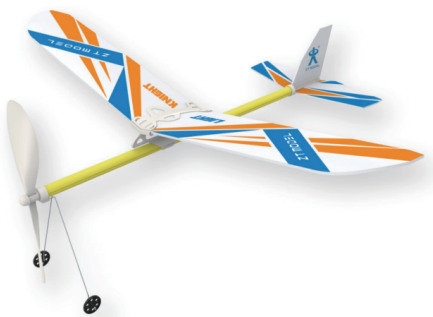
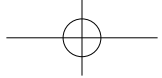


图 3.4.1 “轻骑士”橡筋动力飞机模型

3.4.1 机翼改进设计——“好扭”

1. 爬升不稳定现象

橡筋动力飞机模型在爬升初期，橡筋动力非常大，模型很容易出现过大幅度爬升至减速低头，甚至拉翻，为此，之前的解决方法是将方向舵微微右偏，



让模型右盘旋爬升。但在实际的飞行中，尤其是大动力飞行时，若方向舵向右的偏移量较小，大动力放飞时模型仍可能会以大角度爬升至减速低头或拉翻；若进一步加大方向舵的右偏角，虽能够在爬升初期实现右盘旋飞行，避免了过大角度爬升和拉翻现象，但这时候的飞行很容易出现右盘旋不上升，甚至右盘旋下坠，调试难度大，整体表现为模型的右盘旋半径小，右机翼倾斜明显，模型爬升缓慢，上升不够高，不利于模型的滑翔，造成滑翔时间短。这是因为仅通过添加方向舵的右偏角来实现模型的右转弯会产生一个副作用，会使飞行中的模型的右机翼越来越低，从而导致模型右盘旋不上升或下坠。所以，仅通过调整方向舵的方法来克服模型爬升初期的不稳定是非常困难的。

2. 正扭转右翼翼尖——“好扭”

为了有效解决模型爬升不稳定的问题，让模型更易于调整，增强模型对气流的适应性，可以给模型的右机翼添加“好扭”设计。简单的做法就是在已设计好翼型的右翼翼尖位置进行微小的正扭转（或左翼尖微微反向扭转），即右翼翼尖前缘向上、后缘向下扭转，如图 3.4.2 所示，也可以同时将右翼翼尖正扭转和左翼翼尖反向扭转，但这种左右机翼同时扭转的调整难度大，而常采用的是只将右翼翼尖进行正扭转，让左翼翼尖和右翼翼尖相对的扭转角度在 5° 以内，宜小不宜大。

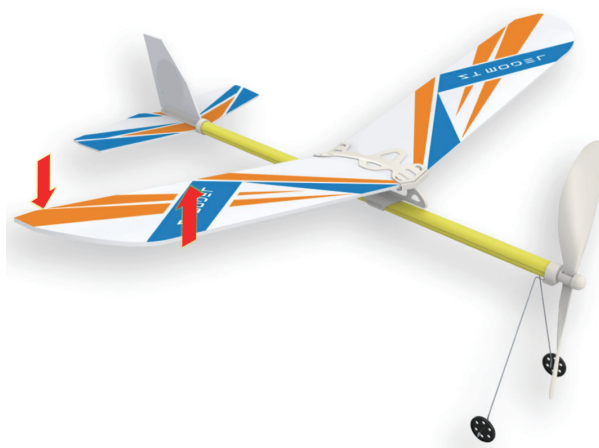
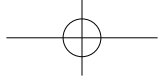


图 3.4.2 扭转机翼

对于橡筋动力飞机模型，机翼“好扭”的具体设计方法是将模型的机头正



对着自己，右手持机身，左手轻轻抓住右翼翼尖部位，然后稍稍将机翼前缘向上、后缘向下扭转至一定角度并保持位置不变，等几秒钟后松开手再对比左翼，观察扭转角度是否适宜。若不足，需再次用同样的方法进行扭转，直至满足需要为止。为了准确判定机翼是否扭转至合适的角度，如图 3.4.3 所示，在距离右翼后缘 $\frac{1}{3}$ 翼弦位置（蓝色线）和后缘 $\frac{1}{2}$ 翼弦位置（红色线）分别用线段做标记，翼尖扭转好之后，正视模型并将模型逐渐低头，对比观察左翼尖和右翼尖的前缘位置，当左翼前缘刚好遮住后缘时，右翼尖的前缘正好投影在标记的蓝色线和红色线之间，其中红色虚线为前缘遮住的部分。

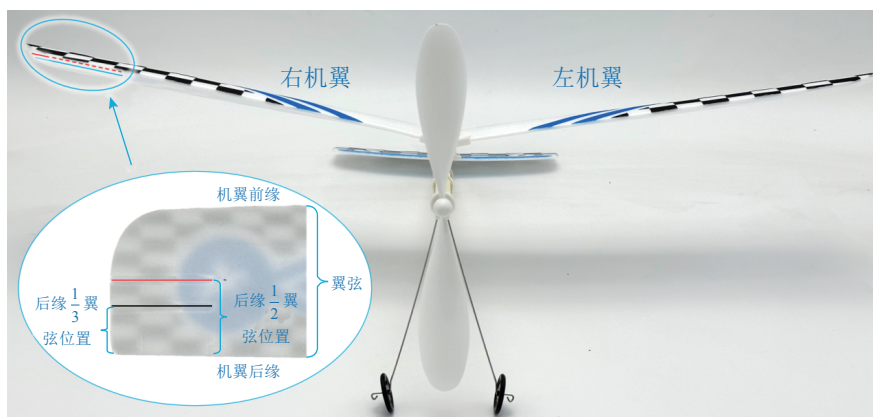


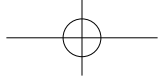
图 3.4.3 扭转右翼翼尖

由于手工设计翼型很难保证左右机翼的绝对对称，使得模型的首飞状态难以确定，而“好扭”的设计恰恰是有意让机翼不对称，更有利于判断模型的首飞状态，大大提高了模型第一次试飞的成功率。

3. “好扭”的作用

由于右翼翼尖发生了扭转，右翼翼尖部位的安装角比机翼其他部位的安装角大，模型在飞行中，机翼失速就会有先有后。当模型以大迎角飞行时，尤其是放飞的爬升初期，模型以大角度爬升，右翼翼尖部分迎角最大，也就会最先出现失速。此时右翼翼尖总升力急剧减小，阻力骤增，右机翼向下倾斜，所以，此时模型就会出现右转弯飞行。

机翼的“好扭”设计对橡筋动力飞机模型的大动力飞行非常有利。在爬升初期，模型的橡筋动力非常大，模型以较大迎角飞行，在机翼各部分接近失速时，



右翼尖部分最先失速，右机翼的总升力减小，阻力增加，模型迅速进入右盘旋飞行状态，避免了模型的拉翻。

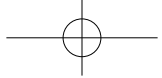
到了爬升的中后期，橡筋动力有所下降，模型的爬升角减小，飞行的迎角也减小，飞行速度降低，在整个机翼都不会出现失速的情况下，比较而言，由于右翼翼尖迎角最大，整个右翼升力大于左翼升力，模型有向左滚转的趋势，即机翼有左倾趋势，从而在一定程度上抵消了模型由于右盘旋带来右翼下倾的问题，增强了模型右盘旋飞行的稳定性。也正因为如此，机翼的“好扭”设计必须联合方向舵（方向舵向右偏移），在这二者的共同作用下，模型才能达到右盘旋爬升和右盘旋滑翔的状态。

在有风环境下飞行，添加“好扭”的模型更容易适应气流的变化。具有“好扭”的模型，在空中右盘旋飞行的过程中，当遇到上升气流时，模型的迎角增加，右翼翼尖先失速（右翼其他部分未失速），右翼升力减小，阻力增加，模型右转偏急，盘旋半径减小，这时模型将待在上升气流中，并随着上升气流一直向上盘旋飞行，可以看到模型以小半径在上升气流区域内盘旋飞行。当模型遇到向下的气流时，情况正好与上升气流中的情况相反，右翼升力大于左翼升力，模型的盘旋半径加大，甚至直线飞行，这将更有利于模型快速离开下沉气流区域，提高模型的留空时间。

具有“好扭”的模型更有利于波状改出，例如，飞行中的模型遇到外界气流干扰进入波状飞行时，模型逐渐抬头，机翼迎角增加，由于“好扭”的影响，右翼翼尖升力增加更为缓慢，阻力增加更快，而左翼升力增加更快，阻力增加较慢；增大了模型的右转趋势，使得模型的盘旋半径减小，有利于波状飞行的改出，尽可能避免出现波状飞行。

4. “好扭”飞行的调试

若“好扭”设计得刚刚好，而方向舵的右偏角较小，则会出现模型右盘旋爬升，在无动力滑翔时出现左盘旋飞行。若在平时训练中遇到这样的飞行轨迹，可以适当加大方向舵的右偏角，然后再试飞，直至模型在整个飞行中都是右盘旋。若是比赛中出现这样的飞行轨迹，只要模型能够右盘旋迅速爬升到预期的高度，在无动力滑翔时又能慢慢地平稳滑翔，就说明模型已经基本调试好，一般不需要再进行调整。至于模型无动力滑翔是左盘旋还是右盘旋并不重要，这是因为比赛制作和试飞的时间短，一般不会有充足的时间，而且模型调试不确定的因



素很多，若调试不好，极有可能导致本来可以飞起来的模型，调试之后又飞不起来了。

若“好扭”设计得偏小，则“好扭”的作用难以表现出来，方向舵右偏角适中，则模型在大动力飞行时很容易出现大角度爬升至减速低头或拉翻，难以获得右盘旋爬升的飞行姿态。

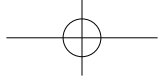
若“好扭”设计得稍微偏大一些，方向舵右偏角适中，则模型在爬升盘旋的第一圈内，由于右翼翼尖过早失速，阻力增加明显，模型右转弯过急，右翼升力下降，会出现右盘旋不上升甚至飞行高度下降，但第一圈盘旋飞行之后，模型又能正常右盘旋爬升飞行，当进入无动力滑翔时，模型往往会出现左盘旋飞行。这样的爬升轨迹和姿态是“好扭”设计偏大的标志，针对这样的飞行状态，可以适当减小翼尖“好扭”扭转的角度，通过再次试飞和反复调试，直至模型能够正常飞行。

若“好扭”设计过大，在爬升初期，右翼尖失速严重，阻力急剧增加，右机翼过度向下倾斜，盘旋半径急剧减小，极容易出现右盘旋下坠。若模型没有坠落，而是右盘旋不上升，且能够继续飞行，到了爬升的中后期，过大的“好扭”会让右翼尖始终处于失速状态，模型机翼将会一直右倾并以小半径右盘旋低空飞行，很快就会落到地面。

对于任何一架橡筋动力飞机模型，方向舵右偏角过大都会让模型在爬升时出现右盘旋上升缓慢，或右盘旋不上升，或右盘旋下坠的情况。方向舵右偏角越大，飞行姿态越遭。

总之，为了提高橡筋动力飞机模型调试的成功率，减少调试时间，首先必须认真按设计要求进行制作，并仔细检查模型整体的完整度、左右的对称性以及机翼翼型、重心位置的正确性，同时给方向舵添加一个微小的右偏角，右偏角宜小不宜大。然后进行“好扭”设计，将右翼翼尖扭曲到标记的位置，在调整试飞的过程中，仔细观察模型的飞行姿态和轨迹，然后做出正确判断和调整，通常试飞和调试二三次，模型就可以成功飞行并达到一个较高水平的状态。若模型制作精良、放飞经验丰富，一般可做到刚制作好的一架模型在第一次试飞时就可以达到极高的放飞水平，最多再通过一次调整，试飞第二次即可成功飞行。

若模型制作不够精良，例如，翼型没有设计好、左右机翼对称性不好、整个尾翼发生倾斜（相对机翼）、水平尾翼晃动等，这类模型的试飞调整难度将



非常大。有的模型会出现方向舵已经偏向左侧，但模型仍然右盘旋不上升，右盘旋半径较小，这时候需要重新调整模型的各部分，包括翼型的重新设计，同时还需要进一步调整重心（重心前移）或升降舵（升降舵上调），必要时再次加大方向舵的左偏角。

“好扭”设计也存在不足之处，“好扭”设计是对模型右翼翼尖进行扭曲，这就造成了飞行中模型的机翼各处迎角不同，右翼翼尖扭转区域的迎角大，机翼其他地方的迎角小，即在任何时候，整个机翼都不可能在理想的迎角下工作，机翼的空气动力性能降低。机翼扭曲得越大，翼尖迎角与机翼其他位置的迎角偏差越大，空气动力性能降低越多，从这个角度来看，在改进模型的设计时，“好扭”设计也是易小不宜大，只要能够满足模型的正常飞行即可。

3.4.2 模型制作

器材准备：“轻骑士”橡筋动力飞机模型、双面胶、透明胶带、润滑剂（蓖麻油）、中性皂、刻度尺、中性笔、钳子、进口橡筋。

1. 机翼翼型设计

在机翼有图案的一面画上两条辅助线，如图 3.4.4 所示，其中黑色辅助线在压痕上，绿色辅助线在机翼前缘与黑线之间的中间位置。然后将机翼反过来至无图案的一面，在右副翼的右侧画一条竖的虚线，测量虚线位置的翼弦长为 7.5cm，再以虚线为边界线画两条“好扭”的参考线，如图 3.4.5 所示。参考线分别在距离右翼翼尖后缘 2.5cm 的位置（后缘 $\frac{1}{3}$ 翼弦位置）和后缘 3.75cm 的位置（后缘 $\frac{1}{2}$ 翼弦位置），最后分别沿着两条辅助线将机翼弯曲来制作翼型。



图 3.4.4 在机翼上画两条辅助线

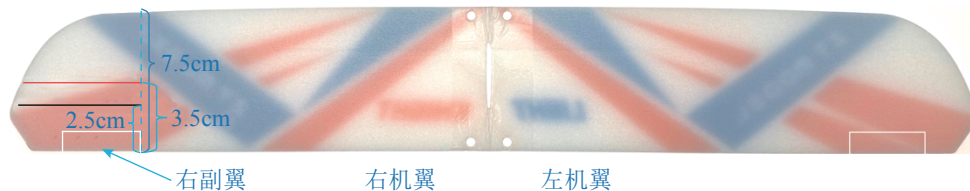
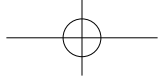


图 3.4.5 “好扭”参考线

“轻骑士”橡筋动力飞机模型的机翼属于薄翼，观察之前学过的各种翼型上弧线的形状，机翼前缘弯曲度较大，机翼后缘接近直线，机翼翼型设计的弧度可参考图 3.4.6，也可以按翼台的弧度设计翼型。

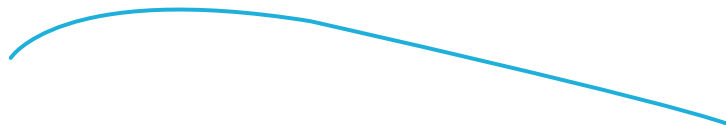


图 3.4.6 薄翼上弧线形状

2. 安装翼台

将翼台套入圆管（机身）中，如图 3.4.7 所示，安装时注意翼台的前后，翼台高的一端在前，低的一端在后，移动翼台使翼台前端距离圆管前端 9.5cm，并在该位置的机身上做标记。

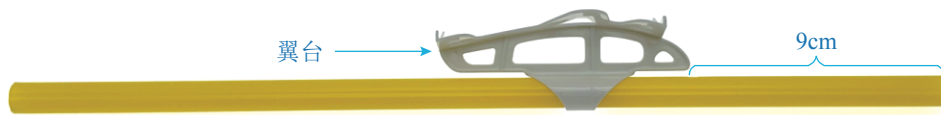


图 3.4.7 安装翼台

若翼台距离机头较近，模型在滑翔时容易出现波状飞行；若翼台距离机头较远，模型滑翔时下沉速度快，当多次出现以上现象，说明翼台的位置不合理，需要重新调整翼台的位置，直至模型能够缓慢地无动力平稳滑翔。

3. 制作橡筋

“轻骑士”橡筋动力飞机模型采用“1mm×3mm”的粗橡筋，橡筋质量约为 3.8g，长度约为 120～130cm，先检查橡筋完好无损，边缘光滑无裂痕，也无毛刺。然后将其两端对齐并系上橡筋结，橡筋绕两圈，如图 3.4.8 所示。