

前 言

近年来，垂直起落飞机越来越引起航空界的注意。在开始研究垂直起落飞机的时候，对其发展前途和是否能够采用有过各种各样的怀疑，现在由于航空发动机制造方面的成就，这些怀疑已经逐渐消逝。许多国家（其中包括苏联）用试验机为研制和使用这种飞机积累了一些经验。这样，在一定程度上就可以综合所得到的结果，并在此基础上提出设计垂直起落飞机和计算其主要参数的方法。

给读者介绍的这本著作，是作为总结和论述设计原理的一个尝试。

作者多年来一直注视垂直起落飞机的发展，并从事了这种飞机的飞行性能计算工作。

在编写本书时，参照了苏联和国外发表的理论研究和试验资料。

应该说明，本书并不包括垂直起落飞机的设计阶段和一些具体问题，诸如各个高度的最大平飞速度、爬升率、升限和航程计算等，因为这些问题与一般飞机没有本质上的区别。

本书包括垂直起落飞机的概论，并专门论述了它区别于一般飞机的特点。

垂直起落飞机概论一节，主要编写的是国外这种飞机的试验机结构和布局型式。

在涉及垂直起落飞机的特性方面，主要注意力是集中在

气动布局、动力装置（如推力发动机、升力发动机、组合式动力装置以及其它推进装置）重量特性、过渡飞行状态“垂直起飞——平飞”和“平飞——垂直着陆”）、操纵方法、机翼增升装置以及起落架结构特点。

其它章节是专门研究有关垂直起落飞机的草图设计问题。

经过审慎考虑之后，作者在气动力和螺桨理论中仅使用了大家都知道的一些公式，并未给出解释和推导，作者认为读者在这些方面有一定的基础。

作者在计算方法的叙述中，基本方针是采取原始参数近似算法，因为用这一方法可以对垂直起落飞机进行草图设计。

在本书中引证了一系列曲线图。根据这些曲线图可以相当精确的求出必要的计算数值，并且还可以对各种垂直起落飞机在选择主要参数时进行比较。

不能认为本书对提出的课题论述得很完善了，因为这是一种比较新型的飞机，而且垂直起落飞机的某些气动特性尚未获得充分的论据。

绪 论

近十几年来，世界各国特别重视航空运输工具的发展，这首先是因为它有一个基本特点——高速度，突出的表现在中程和远程的航线上。

无论是在今天，还是在不久的将来，在速度方面，还没有哪一种运输工具能与航空运输工具相媲美。

同时，航空运输工具的高速度不仅取决于航线上的飞行速度，而且与花费在辅助航运的时间（如往机场运送旅客或货物、从机场运送到指定地点、飞机沿机场滑向起飞线或由起飞线滑回机场以及其它等所花费的时间）也有关。

随着飞行速度的增加，一般飞机的起飞着陆速度要随之提高，这就意味着起飞着陆滑跑距离也要增长。因此，近代高速重型飞机所用的跑道长度加上必要的进场和滑行距离，目前已达到 4 公里以上。在居民点和工业中心附近，给这样的飞机建一个相当规模的机场（8~12 平方公里）就特别困难。

因此，飞机场离运输的起点和终点愈来愈远，辅助航运时间增加了，平均航运速度和平均飞行速度的差也随之增大。在中程航线上，当飞机的巡航速度增加 1 倍时，平均航运速度才提高 10~15 %。

此外，一般起飞着陆型式的飞机在发展上还存在着其它一系列困难。随着飞机起飞重量的增加，起落架轮胎的压力

也要相应的加大，这就需要建造特殊铺筑面的机场。修建这样的机场要消耗大量的材料和占用较长的时间，这是因为现代机场相当于一个极其昂贵而且是复杂的综合建筑物。由于必需建造这样的机场，因而降低了航空运输工具在国民经济中使用的效能。

因此，很自然地要求工程技术人员寻找缩短起飞着陆速度和滑跑距离的途径，而又不能对提高航线上的飞行速度加以任何严格限制。

近些年来，出现不少这样的方案，其中包括高效能的机翼增升装置，起飞助推器，着陆用的各种刹车装置（刹车机轮，使螺旋桨起反拉力作用的装置，气动刹车装置，涡轮喷气发动机的反推力装置等）。上述装置在实践中只有一部分被采用了，同时并成为现代高速飞机的不可分割的部件。但这还不能完全满足基本要求，即从根本上缩短起飞着陆速度和机场长度。

现在在国民经济中广泛地使用着直升机，它虽然没有上述那样多的缺点，但由于气动布局的特点，使它的巡航速度受到限制。这样，在中程和远程航线上仍然不能得到很高的平均航运速度。因此，很自然地要力图创造一种新型飞行器——垂直起落飞机，这种飞机有可能将一般飞机的高速性能和直升机的垂直起飞着陆结合起来。

目前有许多这种飞行器方案，根据这些方案研制出了战术技术性能相当好的各种型式的试验机，这在许多国家中引起了重视。

为了比较一下垂直起落飞机和传统的航空运输工具，即一般飞机和直升机，我们现在就来分析一下直升机、一般飞

机和垂直起落飞机的平均航运速度和航程的关系。

取航线平均飞行速度，直升机为 250 公里 / 小时，一般飞机和垂直起落飞机为 500，700，1000 公里 / 小时 取辅助航运时间，一般飞机为 3 小时，直升机和垂直起落飞机为 1 小时（考虑了可以在市内机场降落这样的一个因素），据初步计算结果，直升机和垂直起落飞机在航程为 100 公里以内的平均航运速度最大。航程超过 200~300 公里，从节省时间这点来说，采用具有 500~700 公里 / 小时巡航速度的螺旋桨垂直起落飞机更为有利。只有航程大于 2000~4000 公里时，采用一般飞机和采用快速的垂直起落飞机才是一样的。

如果考虑到，基本航运范围是在 300~1000 公里长度的航线上，研制这样航程的垂直起落飞机有其明显的现实意义。

目前，垂直起落运输机航程大体上为 500~1000 公里。按照飞机和发动机的现代技术水平，完全可以研制出在性能上超过直升机和一般飞机的垂直起落运输机。

我们现在引证一下国外文献发表的一些总的设想，来说明垂直起落飞机可能达到的飞行性能。

在将垂直起落飞机和一般飞机进行比较时，首先我们来谈一谈垂直起落飞机的重量特性问题。

翼载，对垂直起落飞机来说，可以选择得比一般飞机稍大些，这是因为垂直起落飞机的翼载不是根据起飞着陆条件来确定，而是由航程、设计高度上的机动性和过渡飞行状态来选择的。因此飞行重量相等时，垂直起落飞机的翼面积较小，这就有可能减轻垂直起落飞机的重量。

大多数的螺旋桨垂直起落飞机可能与一般飞机一样，在起

飞和着陆时进行滑跑，因此它要求具有普通结构型式的起落架。但垂直起落飞机与一般飞机相比，具有较大的推重比，并采用几乎沿整个翼展吹除螺桨滑流的高效能机翼增升装置，这样可以大大减小起飞着陆速度和距离，同时还可以简化起落架结构，并降低起落架的重量。

由于垂直起落飞机能够在面积不大的土机场迫降，因此可以少带储备燃料，而旅客机和运输机的储备燃料要占总燃料的 10~15%。这样也减轻了垂直起落飞机的总重。

上述使垂直起落飞机在部件和载荷方面减的重量，或多或少抵销了垂直起落飞机必需的一些附加装置的重量。

如果一般飞机和垂直起落飞机的起飞重量相等，垂直起落飞机垂直起飞时，通常具有较小的有效载荷。但在短距滑跑起飞时，它可以负担像一般飞机那样重的有效载荷。

放弃垂直起落，搞短距起落飞机，在一定程度上是一个折衷的工程方案，这可以回避垂直起落飞机的一些技术难点。

符 号

A —— 动能；功率随高度损失的系数 $\left(A = \frac{N_H}{N_0} \right)$ ；

b —— 翼弦；

b_{cp} —— 机翼平均气动力弦 (CAX)；

$b_{0.75}$ —— 半径 $r = 0.75 R$ 处桨叶截面的弦长；

c —— 截面厚度；

\bar{c} —— 截面相对厚度，等于 $\frac{c}{b}$ ；

c_e —— 耗油率 (公斤/马力·小时)；

c_R —— 机翼气动力合力系数，等于 $\frac{R}{qS}$ ；

c_r —— 耗油率 (公斤/公斤推力·小时)；

C_T —— 螺旋桨拉力系数，等于 $\frac{T}{\rho/2 \cdot \pi R^2 (\omega R)^2}$ ；

C_T' —— 相对于速度头的拉力系数，等于 $\frac{T}{qS}$ ；

D —— 升力螺旋桨或升力风扇的直径；

E —— 飞机的动量品质；

F —— 螺旋桨桨盘面积，等于 $\frac{\pi D^2}{4}$ ；

G —— 飞机重量；

G_0 —— 飞机起飞重量；

G_1 —— 飞行结束时的飞机重量；

- H —— 飞行高度；
 H_B —— 螺旋桨或风扇产生的纵向力；
 K —— 机翼升阻比；
 K_c —— 螺旋桨的速度系数；
 k —— 桨叶数目；飞机有效载荷；
 L —— 航程；
 $L_{взл}$ —— 起飞距离；
 $L_{пoc}$ —— 着陆距离；
 $L_{пп}$ —— 着陆滑跑距离；
 $L_{пaз}$ —— 飞机起飞滑跑距离；
 $M_{кр}$ —— 临界 M 数；
 m —— 内外涵涡轮喷气发动机的函道比；
 m_K —— 螺旋桨扭矩系数；
 N_B —— 旋转螺旋桨的需用功率；
 $N_{дв}$ —— 发动机功率；
 n —— 每分钟的转数；
 n_c —— 每秒钟的转数；
 p —— 螺旋桨或风扇的桨盘载荷，等于 $\frac{G}{F}$ ；
 $p_{кр}$ —— 翼载，等于 $\frac{G}{S}$ ；
 q —— 气流速度头或功载；
 R —— 作用在飞机上的气动力合力，或升力螺旋桨的最大半径；
 r —— 桨叶变动半径；
 \bar{r} —— 桨叶的相对半径，等于 $\frac{r}{R}$ ；

S —— 机翼面积；

T —— 飞机发动机的推力；

T_B —— 螺旋桨拉力或风扇沿其轴线的推力；

T_M —— 推力发动机推力；

T_n —— 升力发动机升力；

t —— 续航时间；

V —— 飞机飞行速度（相对空气）；

\bar{V} —— 相对速度，等于 $\frac{V}{\omega R}$ ；

V_1 —— 螺旋桨倾斜时，桨盘气流的平均速度；

v_1 —— 螺旋桨桨盘平均诱导速度；

v_{1B} —— 悬停状态时，螺旋桨桨盘平均诱导速度 —— 特性速度；

v_2 —— 螺旋桨滑流压缩截面的平均诱导速度；

X —— 阻力；

x_n —— 前缘到压力中心距离；

\bar{x}_n —— 压力中心无因次座标，等于 $-\frac{x_n}{b}$ ；

Y —— 升力；

z —— 升力螺旋桨或风扇数目；

α —— 机翼攻角；

α' —— 机翼迎风攻角（合成速度与翼弦夹角）；

α_B —— 螺旋桨攻角（飞行速度矢量与螺旋桨轴线夹角）；

γ —— 螺旋桨或风扇轴线相对翼弦的安装角；升力发动机相对垂直线的倾斜角；

δ —— 螺旋桨拉力纵向偏转角（螺旋桨拉力合力与螺旋桨轴线的夹角）；

η —— 螺旋桨效率；

η_0 —— 螺旋桨相对效率，等于 $0.5 \frac{C_T^{3/2}}{m_K}$ (悬停状态)；

θ —— 飞行速度矢量与水平线的夹角；

λ —— 机翼展弦比，等于 $\frac{l^2}{S}$ ；

λ_Φ —— 机身长细比，等于：
$$\frac{l_\Phi}{\sqrt{\frac{4}{\pi} S_\Phi}}$$
；

μ —— 飞机总推重比，等于 $\frac{\sum T}{G}$ ；

μ_n —— 升重比，等于 $\frac{\sum T_n}{G}$ ；

μ_M —— 巡航时推重比，等于 $\frac{\sum T_M}{G}$ ；

ξ —— 俯仰角；

ρ_H —— 高度 H 上的空气密度；

$\sigma_{0.75}$ —— 典型半径等于 $\frac{kb_{0.75}}{\pi R}$ 的螺旋桨实度；

φ —— 推进器推力矢量相对于轨迹的倾斜角；

$\Phi_{0.75}$ —— $\bar{r}=0.75$ 的桨叶安装角；

χ —— 推进器轴线相对水平线的倾斜角；机翼后掠角；

ω —— 旋转角速度；

ωR —— 桨叶叶尖圆周速度。

缩 写 语●

- СВВП——垂直起落飞机
- СКРП——短距起落飞机
- СУРП——超短距起落飞机
- ВПП——跑道
- ТРД——涡轮喷气发动机
- ТВД——涡轮螺桨发动机
- ГТД——燃气涡轮发动机
- ТВРД——涡轮风扇发动机
- ТВУ——涡轮风扇动力装置
- ДТРД——内外涵涡轮喷气发动机
- ПД——升力发动机
- МД——推力发动机
- ПМД——升推发动机
- СА——标准大气压
- САХ——机翼平均气动力弦
- СУ——动力装置
- ГА——民航
- СВ——高速螺桨
- СМВ——高速金属螺桨

● 文内下脚注可参考此缩写语。——校者注

第一部分 垂直起落飞机的 总体设计问题

第一章 垂直起落飞机简述

1. 概 述

首先让我们简单的来研究一下垂直起落飞机设计的一些特点。

目前，垂直起落飞机的型式与结构方案虽然种类繁多，但主要地取决于该机的用途。可惜，研制垂直起落飞机的经验还不多，许多型号只是研制了一两种原型机。垂直起落飞机许多设计、飞行动力学及结构问题仍然处在研究和探索阶段。

研制垂直起落飞机需要一个庞大的研究机构，从而不可避免地要花费大量的资金，这点在安排这样的任务时应当考虑到这一点。

设计垂直起落飞机也和设计其他任何一种飞行器一样，其基本任务就是合理地选择飞机型式、动力装置种类、发动机功率、推进器参数以及为保证飞行器达到给定飞行性能的主要参数。

与一般飞行器相比，垂直起落飞机上要装一系列的附加设备，这就必然降低了飞机的有效载重。此外，垂直起落飞机的特点不仅是以垂直状态起飞和着陆，而且还存在由平飞向垂直起落的过渡状态问题。

设计者还应考虑到垂直起落飞机在上述状态中的操纵特性以及对起飞重量增加和发动机推力（或功率）下降的巨大敏感性。

为了达到较大的航程或最大限度地运输有效载重，事先还应当考虑能否采用发动机加力的方法进行垂直起飞或短距滑跑起飞。

2. 分 类

垂直起飞和着陆时，升力产生的方法和空中飞行时推力产生的方法可作为垂直起落飞机的基本特征，根据这一特征可将垂直起落飞机分为螺旋桨型、风扇型、喷气型和组合型等几个型式，每一个型式按其所采用的升推装置的不同又可分为几类。

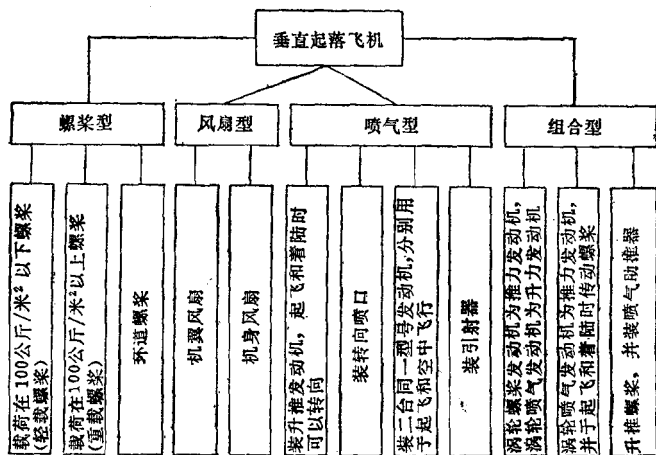


图 1.1 按照起飞和平飞时推力产生的方法而区分的垂直起落飞机分类图

图 1.1 上所提出的典型分类法可将大多数已完成设计的和已制成的垂直起落飞机划分成四大型和十二个类。以后我们在研究垂直起落飞机时，就采用这种分类法。

垂直起落飞机早期的原型机是按照飞机着陆时机身处于垂直姿态的型式制造的，近几年来，已经不采用这种型式了。这是由于在使用操作上存在着一定的困难，从平飞到下滑着陆的过渡状态非常复杂，同时在技术上还存在着一系列其它困难。因此，在图 1.1 的分类图上没有将这种型式列进去。

现代垂直起落飞机基本上是按照一般飞机制造的，而且垂直起飞和着陆都是在机身处于水平姿态下完成的。为此，在垂直起落飞机上采用了专门的动力装置，它可以利用螺旋桨、风扇和喷气推进器来产生垂直推力。上述几种推进器的轴线可以布置成垂直的，也可以布置成水平的，而在这后一种情况下，为了借向下偏转推进器所排出的气流获得垂直的分力还采用了专门的装置。

3. 垂直起落飞机简评及其分析

我们来分析一下现代垂直起落飞机中最典型的一些型式。

装螺旋桨升推装置的垂直起落飞机

螺旋桨型垂直起落飞机于起飞着陆时，拉力矢量需要在垂直平面内作 90° 角的偏转。

我们来分析一些典型的螺旋桨型垂直起落飞机。

美国的垂直起落飞机康维尔 XFV-1，其桨盘载荷高达 360 公斤/米^2 ，该机是采用改变机体本身在空间的姿态来实现向平飞的过渡。

图1.2所示为这种飞机在过渡状态中的几个典型姿态，正如在前面所说的，利用倾斜机身轴线的型式，并未得到推广。

人们对机身处于水平姿态的垂直起落飞机的兴趣要大得多。这种螺桨型飞行器同样具有较大的桨盘载荷。在起飞和着陆时，或者仅偏转螺桨或者是螺桨和机翼同时偏转。

图1.3所示是美国中等吨位的垂直起落运输——空降试验机 X-18 (该机起飞重量为 16.5 吨)；它装备了两台三叶共轴式螺桨，桨叶实度高达 $\sigma = 0.2$ 效率。这种实度的选定是参照了文献〔16〕发表的研究成果。X-18 飞机上，发动机安装在机翼内，在垂直起飞和着陆前随同机翼一齐偏转。

为了在起飞、着陆和过渡状态下实现对飞机的纵向操纵，在机身的尾部专门增添了一台涡轮喷气发动机，它所产生的喷气是输向一个能使气流向上或向下喷出的导向装置。

在垂直起飞状态下的横向和航向操纵是由偏转副翼和改变螺桨拉力来实现的。副翼位于螺桨的滑流之中。该机最大飞行速度为 400 公里/时。这种布局型式是很有前途的。按照这种布局，可以制造出起飞重量达 30~40 吨以上的重型垂直起落运输机，它可以运载重量达 10~12 吨不能分解的货物，而且速度还可以达到 750~800 公里/小时。目前波音公司和林塔姆可·沃特公司就已正在研制具有这种战术性能的垂直起落飞机方案^①。

寇蒂斯公司的重载螺桨垂直起落飞机 X-19 (图 1.4) 及某些轻载螺桨垂直起落飞机的设计，都是典型的轴线螺桨垂直起落飞机，这种垂直起落飞机起飞和着陆时只偏转螺桨。

① Elug-Review, 1966, VI, №6.

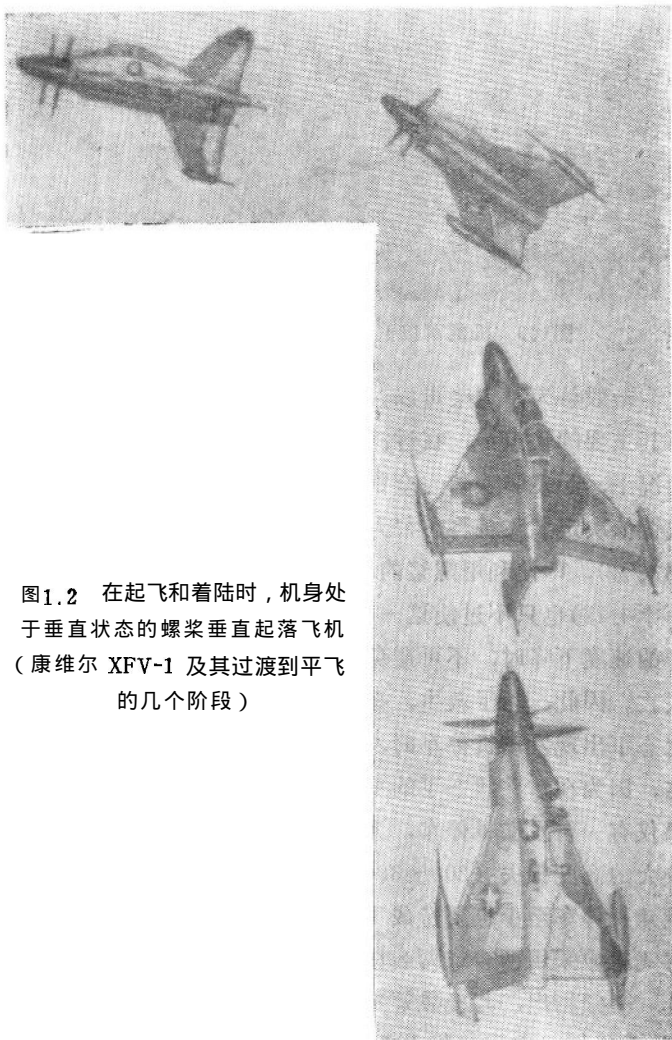


图1.2 在起飞和着陆时，机身处于垂直状态的螺旋桨垂直起落飞机（康维尔 XFV-1 及其过渡到平飞的几个阶段）