

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.02.001

## 高速直升机发展现状、趋势与对策

吴希明

(中航工业直升机设计研究所, 景德镇, 333001)

**摘要:**根据高速直升机的技术特征和构型特点,将高速直升机分为复合式、倾转式及停转式 3 种类型。在梳理 3 类高速直升机技术发展历程的基础上,分析了国外高速直升机的型号与技术发展规律。根据当前中国的直升机技术水平,提出了实现中国高速直升机跨越式发展的建议和措施。

**关键词:**高速直升机;当前现状;发展趋势;对策

**中图分类号:**V275<sup>+</sup>.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2615(2015)02-0173-07

## Current Status, Development Trend and Countermeasure for High-Speed Rotorcraft

Wu Ximing

(AVIC China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen, 333001, China)

**Abstract:**Based on the technology features and configuration characteristics, the high-speed rotorcraft can be classified as the compound helicopter, the tilt-rotor/wing rotorcraft, and the rotor/wing-interchanging rotorcraft. After studying the technology development of three categories of the high-speed rotorcraft, the developing direction and trend are analyzed. Furthermore, combined with the current status of high-speed rotorcraft in China, recommendations and measures are proposed to improve the development level of high-speed rotorcraft in China.

**Key words:** high-speed rotorcraft; current status; development trend; countermeasure

直升机是人类研制的仿生机械中最成功的发明之一,以其突出的悬停、低空低速和良好的机动性能,在各国经济建设、人们日常生活及现代战争中发挥了不可替代的重要作用<sup>[1]</sup>。然而,常规的单旋翼带尾桨直升机受自身构型的影响,在大速度平飞时前行桨叶接近声速,后行桨叶出现回流区,带来旋翼升力降低、阻力及功率需求激增,因此,常规构型直升机的最大速度与航程等性能指标难以提升,飞行效率受到诸多限制。表 1 给出了早期直升机到现代直升机的速度范围,可以看出目前

常规构型直升机的最大平飞速度接近 310 km/h,要突破 350 km/h (桨尖马赫数超过 0.92) 的平飞速度仍然十分困难。

经历几十年的发展,虽然直升机取得了长足的进步,但世界各国一直在探索突破直升机速度限制的新构型和新概念,研究提升直升机速度的不同方法和途径<sup>[2]</sup>。尤其近年来,随着 X2, X3 等新构型技术验证机连续突破直升机的速度限制,以 400 km/h 以上的高速为典型特征的下一代直升机“呼之欲出”,高速直升机技术已成为新一代直升机

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)(2012AA112201)资助项目。

**收稿日期:**2015-03-15; **修订日期:**2015-03-30

**作者简介:**吴希明,男,研究员,博士生导师,国务院特殊津贴专家、中航工业直升机总设计师、中航工业旋翼飞行器设计首席专家、“直十”及“直十九”武装直升机总设计师。曾获“新世纪百万人才工程国家级人才”及“中航工业中青年自主创新领军人才”等称号。主要研究方向:先进重型直升机设计技术和高速旋翼飞行器设计技术等。

**通信作者:**吴希明, E-mail: ximwu@vip.sina.com。

装备和产品的技术制高点,世界各国在相应领域的技术竞争也到达了白热化阶段。

本文针对高速直升机技术特征和构型特点,将高速直升机分为复合、倾转及停转3类,并梳理了3类高速的技术发展历程,分析了国外高速直升机的典型发展规律,在此基础上提出实现中国高速直

升机跨越发展的建议和措施。

## 1 高速直升机分类

根据高速直升机的构型特征、技术特点、飞行与操纵原理,可将高速直升机分为:复合式、倾转式和停转式,见图1。

表1 不同时期典型直升机速度

Tab.1 Helicopter velocity of typical models in different periods

第一代直升机		第二代直升机		第三代直升机		第四代直升机	
型号	速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	型号	速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	型号	速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	型号	速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )
贝尔-47	169	S-61	250	UH-60	296	RAH-66	306
米-4	210	贝尔-209	227	AH-60	296	S-92	290
FW-61	123	米-6	300	SA-365	296	NH90	298
S-51	165	BO-105	245	卡-50	300	EH-101	292



图1 高速直升机分类

Fig.1 Classification of high-speed rotorcraft

复合式高速直升机是在常规旋翼/ABC旋翼的基础上,通过配置辅助推进或升力装置实现高速飞行。如X3型即是通过短翼实现前飞时为旋翼卸载,并依赖辅助螺旋桨推进实现高速前飞。复合式高速直升机的最大特点是:旋翼在飞行包线内的功能变化相对较小,确保其低空低速性能和近地面机动能力不低于常规构型直升机,同时实现了较高的平飞速度。缺点是:未从根本上改变高速飞行前后行桨叶气流不对称的问题,直升机的振动问题突出,最大平飞速度很难超过500 km/h。根据国外数据统计,复合式高速直升机的类型最多,占50%以上。

倾转式高速直升机通过转换旋翼功能实现高速飞行,即利用倾转机构实现其主要的气动部件在旋翼与螺旋桨之间转换,从而实现悬停、低速飞行和垂直飞行时以直升机模式飞行,高速时以螺旋桨飞机模式前飞,从而兼顾低速与高速飞行性能。倾转式高速直升机兼顾了直升机与螺旋桨定翼机的

特点,具有“跨界”特征。倾转式高速直升机可实现更高的平飞速度(500~600 km/h),具有振动小、噪声低、经济性好的优点,但近地面机动能力比复合式要低,飞行控制系统和动力传动系统更为复杂。

停转式高速直升机是通过控制气动部件在低速和高速状态的运行方式,实现兼顾低高速飞行的目的。即低速状态旋翼旋转以提供气动力,高速状态桨叶停转(S-72, X-50A)或者收缩(盘翼旋翼机),以定翼机方式提供气动力。停转类是一种较新颖的高速直升机,兼顾了直升机的特点,并通过喷气发动机等可实现更高速度的飞行;缺点是旋翼系统要兼顾旋转和固定/收缩状态,气动效率较低,飞行控制系统更为复杂。

## 2 高速直升机研究进展

### 2.1 复合式

早在20世纪40年代常规构型直升机投入应

用开始,人们就开始探索提高直升机飞行速度的各种可能方案。例如,在 1936 年实现试飞的德国人安东·弗兰特纳设计的试验机“弗兰特纳”F1 185,是目前有据可查的最早的复合式直升机,其特点是在常规构型直升机的机头安装了提供推力的螺旋桨。

目前较成功的复合式高速旋翼机构型有空客直升机公司的 X3 构型和美国西科斯基公司的 X2 构型,见图 2,3。X3 构型复合式高速旋翼机解决了因“旋翼前倾导致阻力大,升力不够”而限制飞行速度的问题,并通过降低旋翼速度来推迟大速度前飞时前行侧激波的出现,巡航速度最高达到了 430 km/h,显著高于常规直升机。但是旋翼转速的降低会引起后行侧剖面速度减小,为满足升力平衡需要增加迎角,后行侧桨叶易出现失速;并且机翼的存在会导致横滚转动惯量变大,横滚机动能力下降,无法满足武装直升机机动作战使用要求。



(a) 复合式高速直升机X3



(b) “高速鹰” X-49A

图 2 复合式直升机

Fig. 2 Compound helicopter

西科斯基公司 X2 构型的主要特点是采用 ABC 旋翼(即前行桨叶概念),基于共轴刚性反转的旋翼系统,保证了直升机固有的悬停和低速性能,在高速状态,后行桨叶被卸载,前行桨叶的升力能力得到最大程度的利用。X2 构型复合式高速直升机发展之初,暴露了振动载荷大、操纵难、桨毂阻力大、高速经济性差等缺点,经过近 40 年的技术发

展,振动水平已由最初的 0.3 降到了目前的 0.1 以下<sup>[3]</sup>。解决了纵向操纵不足的问题,操纵功效达到普通直升机的 3 倍,桨毂阻力由全机的 50% 持续降低,最大巡航速度达到了 463 km/h。目前,西科斯基公司的 S-97 复合式高速直升机已进入型号研制阶段<sup>[4-5]</sup>。



(a) 西科斯基X2



(b) S-97 “掠食者”

图 3 ABC 旋翼复合式直升机

Fig. 3 Compound helicopter with ABC rotor

## 2.2 倾转式

国外倾转旋翼机技术的发展可分为 3 个阶段<sup>[6]</sup>。第一个阶段从 20 世纪 50 年代到 1977 年完成 XV-15 的试飞验证,通过艰难探索,从飞行原理的角度验证了“倾转旋翼”概念的可行性和优越性,见图 4。期间,共有 8 种倾转旋翼机进行了飞行试验,包括倾转机翼和倾转旋翼两种形式。

第二阶段为批量装备阶段。20 世纪 80 年代美国的贝尔和波音共同研制第二代倾转旋翼机 V-22,该机巡航速度为 463 km/h,有效作战半径为 722 km,并在 2002 年定型装备部队,见图 5。2007 年,V-22 正式进入伊拉克战场执行实战任务,至 2013 年底,美军在本土及海外共部署超过了 300 架。民用方面,6 T 级、9 座的民用型倾转旋翼机 BA609 完成适航取证累积飞行时间已超过了 200 h,AUGUSTA 公司预计在 2016 年左右可完成适航取证工作。以“鱼鹰”进入“全速生产”阶段并逐步装备为标志,倾转旋翼机技术已趋于成熟。



(a) X-22



(b) XV-15

图4 艰难探索阶段倾转旋翼机 X-22 及 XV-15

Fig. 4 X-22 and XV-15



(a) V-22



(b) BA609

图5 倾转旋翼机 V-22 及 BA609

Fig. 5 V-22 and BA609

目前处于第三阶段,即发展阶段。美国和欧洲正在发展第3代倾转旋翼机,见图6。其中,贝尔直升机公司在美国陆军“联合多用途旋翼机

(JMR)”项目中推出了下一代倾转旋翼机 V-280 的研究计划。V-280 在 V-22 倾转旋翼机的基础上进行了技术升级,提升了低速飞行的机动性,并进一步提高运输效率和航程,是具备运输型和攻击型的倾转旋翼机平台。波音公司在美国国防部的“垂直起降试验飞机(VTOL X-Plane)”项目中提出了“幽灵雨燕”(Phantom Swift)倾转旋翼机方案<sup>[7]</sup>。欧洲直升机公司联合实施了总质量为 10 T 级、20 座的“埃瑞卡(ERICA)”倾转旋翼机研究方案,并向欧洲第五框架研究计划寻求经费支持,该方案旨在进一步提升倾转旋翼机的效率。



(a) V-280



(b) “幽灵雨燕”



(c) ERICA

图6 持续发展阶段倾转旋翼机方案

Fig. 6 V-280, Phantom Swift and ERICA

### 2.3 停转式

可停转旋翼直升机也拥有旋翼和固定翼两种飞行模式,主要形式有旋翼锁式和盘翼式。旋翼锁定式最大的特征就是有一副既可以高速旋转作为旋翼,又可以锁定作为固定翼的主旋翼。以旋翼模式飞行时,旋翼的高速旋转使得其能够像普通直升机一样垂直起降和低速飞行;当旋翼锁定作为固定翼时,飞机以固定翼模式飞行,彻底解除了旋翼旋

转引起的气流不对称对直升机飞行速度的限制,从而能够进行高速飞行。美国 X-50A“蜻蜓(Dragonfly)”鸭式旋翼/机翼飞行器是可停转旋翼直升机的最新发展代表,见图 7,其特点是具有较大尺寸的鸭翼和水平尾翼,去除尾桨,在过渡飞行时鸭翼和水平尾翼提供平飞所需升力从而使得旋翼/机翼完全卸载并停转锁定。这种独特的布局给飞行控制带来了很大挑战,导致其首架验证机直到 2003 年底才首飞,比原计划拖后了一年多,然而 2 次短暂的悬停试飞后就因为此类布局固有的交叉耦合控制问题而坠毁。第二架试验机对功率控制和飞行控制进行了针对性的改进后,于 2005 年 11 月进行首飞,2006 年 4 月再次坠毁,坠毁原因是飞行控制系统在低速时的控制权限不够。此次事故使 X-50A“蜻蜓”项目陷入了无机可用的境地并直接导致当年项目终止<sup>[8]</sup>。



(a) 正视图



(b) 俯视图

图 7 “蜻蜓”研究机

Fig. 7 Dragonfly

另一种可停转旋翼直升机采用蒲扇带有曲度的盘翼作为高速前飞的升力面,见图 8。翼盘上装有若干片能沿径向伸出和缩入的桨叶。因为这些桨叶的位置在外侧,具有较高的圆周速度,因此能产生足够大的升力,实现垂直起降和悬停。大速度时转为飞机模式,小桨叶缩进翼盘中,盘翼停转,并产生升力。

从现阶段技术发展水平看,停转类直升机如果



(a) 桨叶伸出



(b) 桨叶收藏

图 8 盘翼式停转直升机

Fig. 8 Rotor/wing-interchanging rotorcraft

完全摆脱常规直升机设计和限制要素,将性能追求到极致仍是不太现实的<sup>[9-10]</sup>。但不可否认,停转类直升机仍是直升机未来发展的一大方向。

### 3 高速直升机发展规律分析

#### 3.1 军方或政府支持是成功研制的基础

自 20 世纪 30 年代以来,国外先后出现了 38 种较有影响力的高速直升机构型,其中只有 5 种与军方或政府拨款无关<sup>[11]</sup>。高速新构型直升机往往意味着大量新技术的应用,大量资金和人力资源的聚集,完全依靠直升机公司自身的研发经费往往力不从心,因此,获得国家的支持对于高速直升机项目来说至关重要。以 V-22“鱼鹰”为例,倾转旋翼机研发难度最大、风险最高的工作是倾转旋翼机原理验证:美国用 18 年时间,4 架原型机坠毁,30 名人员生命的代价促使倾转旋翼技术走向成熟<sup>[12]</sup>。美国国防部对 V-22 的总预算约是 505 亿美元,而研制费用近 160 亿美元。贝尔直升机公司是世界上主要的军民用直升机生产商,曾一度主导民用中轻型直升机市场,但倾转旋翼机技术的研发耗费了贝尔大部分的人力、技术和资金资源,使得其在民用直升机上的投入较少,为筹措资金进行新型民用直升机研发和推广,2012 年贝尔公司不得不出售 BA609 倾转旋翼机项目。

#### 3.2 型号发展必须以用户需求为前提

高速直升机作为一种武器装备,技术成功并不能保证型号成功,符合军事需求和市场需要才是成功的基础。2004 年 2 月 23 日,美国国防部宣布取

消始于1983年、已经耗资69亿美元、拟投资380亿美元的RAH-66武装侦察直升机项目。取消的原因除了进度滞后,耗费超资以外,最主要的原因还是军事需求发生了变化。从战略需求看,RAH-66的研制始于1983年,当时仍是美苏对峙的冷战时期,RAH-66战技指标乃是针对欧洲大陆下美苏可能发生的热点地区设计,而在当前反恐为急务的情况下花巨资研发这种先进武器已无太大意义。从战术需求看,先进的无人机基本上能完成RAH-66担负的作战侦察任务。无人机的快速发展是迫使其下马的另一个重要原因。

倾转旋翼机发展过程中XC-142也经历了“怀才不遇”的状况。1959年美国陆海空三军开始寻求一种具有更远航程和更高速度的直升机,产生了三军联合的XC-142计划。1964年9月29日首架原型机首飞。在XC-142A项目期间,共飞行了420 h。空军对XC-142进行了大量的测试,包括空运,空投,在沙漠、山地和航母环境下使用,搜索救援任务,以及装载机动车辆等,期间创造了694 km/h的最大飞行速度,这一飞行速度至今仍是可查的旋翼类直升机最大速度。最后,由于可能的操纵和抗风能力问题,该项目被终止。诸多未进入批量生产的新构型验证了高速度乃至技术先进性不是型号成功的必然,唯有需求才是牵引型号发展最重要的因素。即使V-22的发展也是一波三折,最终开展研制是在于其能更大程度地满足军事需求(1990年被授予美国国家航空协会的柯利尔奖,据称可以满足32项以上多军种任务需求),这使得它是目前唯一进入装备体系的高速直升机。

### 3.3 高速直升机是军用直升机发展的未来

军用直升机是联合作战体系中低空和超低空环节不可或缺的,在现代战争中发挥着越来越重要的作用。美军和欧洲根据近年来持续的局部战争经验,陆续提出了未来新一代军用直升机的技术发展规划,如:美国启动的用于替代当前主战攻击型直升机AH-64和运输型直升机UH-60的“联合多任务旋翼机(JMR)”发展计划,于2014年8月向“贝尔”团队和“西科斯基/波音”联合团队授出JMR研制合同,并对多任务旋翼机提出了400 km/h以上的速度能力需求;西科斯基公司已于2012年初宣布研发巡航速度超过400 km/h的高速直升机S-97、贝尔则主推速度超过500 km/h的新一代倾转旋翼机V-280“勇士”,以竞标JMR项目(预计市场规模不低于1 000亿美元)。同时,美国和欧洲认为,重型旋翼机是未来快速反应部队

的核心组成,美军提出的下一代战区运输旋翼机计划中,除了要求飞行器具备垂直起降特性之外,还将航程要求提升到3 000 km以上,为此,2014年美国国防部预先研究计划局(DARPA)提出“垂直起降试验飞机(VTOL X飞机)”项目,要求实现有效载荷大于总重40%的基础上实现300~400节(556~741 km/h)的最高巡航速度。当前的直升机装备发展现状表明:以高飞行速度(大于400 km/h)为典型特征的新一代(第五代)旋翼机技术已经成为当前直升机技术领域发展的制高点。

## 4 中国高速直升机发展措施与对策

对于中国而言,随着世界多极化和经济全球化的不断发展,地缘政治和局势错综复杂,恐怖主义活动出现新的动向,安全形势面临多元化、综合化的威胁。为应对现实威胁,我军正加快实施战略转型,陆军提出由“区域防卫”向“全域机动”转变,海军提出由“近海防御”向“远海防卫”转变,空军提出“空天一体、攻防兼备”的发展战略,而以高速为特点的第五代旋翼机在我军战略转型中将发挥不可替代的作用。在各军事大国大力推进第五代旋翼机技术发展的关键时期,中国高速直升机要获得快速、跨越式发展,就必须采取切实有效的措施,解决制约高速直升机发展的诸多因素,通过切实可行的技术创新途径加以实现。

### 4.1 加强高速新构型直升机基础研究

既要深化“需求牵引”,也要强化科技推动,既要学习借鉴,又要自主创新。为保证高速新构型直升机长期持续的蓬勃发展,关键是切实抓好基础研究。

(1) 重视与高速直升机长远发展和持续健康发展密切相关的关键技术及基础技术发展,培育和提升下一代军用直升机基础资源的共享能力。加强高速直升机战略性基础研究,开展高科技、新概念、新构型飞行原理、操纵机理、动力传动探索研究,提高自主创新能力,建设完善的技术研发体系。

(2) 抓住直升机最具特色的翼型开发和设计,实现翼型族和新构型技术的系统集成验证,支撑中国先进高速直升机装备的研制。旋翼翼型是构成直升机旋翼外形的基本元素,旋翼翼型的性能直接决定了旋翼的气动效率和机动能力,而高气动效率、高机动能力的旋翼是新一代直升机发展的必然趋势。通过先进翼型设计基础问题的渐次递进研究,设计出满足新一代高速直升机技术要求的旋翼先进翼型系列,摆脱长期受制于人的局面,实现中

国直升机气动设计自主创新能力跨越式发展。

#### 4.2 发展具有中国特色的高速直升机构型

目前世界上比较成功的高速直升机构型主要是倾转旋翼(机翼)和共轴刚性旋翼复合式两种,这两种构型具有不同的技术特点和优势,适用于不同的任务模式。共轴刚性旋翼高速直升机充分保留了直升机低速段的低桨盘载荷和近地机动能力,倾转旋翼机则倾向于追求大速度段的速度和经济性,从而拥有更大的巡航速度和航程。共轴刚性旋翼高速直升机适合战场优势专用武装型,倾转旋翼机适用于广域快速反应作战和垂直运输。在研究国外成功的高速直升机构型基础上,更要深入探索和发展能够同时保有低速机动能力和大速度远航程巡航能力的自主高速直升机构型。倾转旋翼机之所以近地机动能力较弱,主要是因为桨盘载荷过高。四旋翼倾转旋翼机则可以在不改变旋翼直径的情况下,显著降低桨盘载荷,同时随着控制系统的快速进步,低速复杂飞行控制更易实现,从而使四旋翼倾转旋翼机更具常规直升机近地机动能力,使用更方便。四倾转旋翼机在保有两倾转广域快速机动能力的同时又具备常规直升机的近地各向机动能力,可在作战半径约 800 km 的范围内快速机动的同时,持续贴地/海执行常规直升机的各项任务。

#### 4.3 开展有效的国际合作,加速中国高速直升机发展

借鉴“对法”、“对俄”等国际合作的成功经验,开展转包生产、项目合作、技术合作等方式的国际合作,充分利用国际资源提高技术、管理水平、技术创新能力,实现中国高速直升机快速发展。欧洲直升机近 20 年得到了较大的发展,有些技术已与美国不相上下。俄罗斯在直升机某些领域也具有世界先进水平。技术合作可进行多头合作,寻求最大的技术收益。以倾转旋翼机为例,鉴于阿古斯塔韦斯特兰公司在民用倾转旋翼机方面的领导和几乎垄断地位,可以尝试寻求双方都感兴趣的切入点积极参与国际分工或开展对等合作。

## 5 结束语

相对世界直升机同行,中国直升机工业目前逐渐由“望其项背”向“同台竞技”转变。为应对高科技加速发展的特点,在常规跟进的同时更需另辟蹊径,实现“弯道超车”,方能真正走向世界直升机先

进行列,相信通过中国直升机工程技术人员的不懈努力,中国的高速直升机必将翱翔于国门内外。

**致谢:**本文引用了中航工业直升机设计研究所诸多参考资料,在文中无法一一列出,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] 倪先平. 直升机手册[M]. 北京:航空工业出版社, 2003.
- [2] 李栋, 冯婷. 比直升机更为经济和安全的新型旋翼机[J]. 航空知识, 2005(4): 22-23.
- [3] Walsh D, Weiner S, Arifian K, et al. High airspeed testing of the Sikorsky X2 technology™ demonstrator[C]// the 67th Annual Forum Proceedings—American Helicopter Society. Virginia Beach, VA: American Helicopter Society, Inc, 2011.
- [4] Marina Malenic. Sikorsky says S-97 to be considered for armed scout[J]. Jane's Defence Weekly, 2012. 1. 13.
- [5] Caitilin Lee. Sikorsky starts S-97 Raider final assembly[J]. Jane's Defence Weekly, 2013. 9. 27.
- [6] Houston S S. The gyrodyne—A forgotten high performer[J]. Journal of the American helicopter society, 2007, 52(4): 382-391.
- [7] Gareth Jennings, Richard Scott. DARPA launches VTOL X-Plane programme to improve helicopter performance[J]. Jane's Defence Weekly, 2013. 12. 18.
- [8] X-50A“蜻蜓”继续试飞[J]. 无人机, 2004(3): 31.
- [9] Jehangir R. Development of an attitude control system for a large scale multicopter VTOL aircraft [C]//the AHS 70th Annual Forum. Montreal, Canada: the American Helicopter Society, Inc, 2014.
- [10] Vengalattore T. Explorations of novel powerplant architectures for hybrid electric helicopters [C]//the AHS 70th Annual Forum. Montreal Canada: the American Helicopter Society, Inc, 2014.
- [11] Ferguson K, Thomson D. A performance analysis of compound helicopter configurations [C]//the AHS 70th Annual Forum. Montreal Canada: the American Helicopter Society, Inc, 2014.
- [12] Shubert M, Sisterman S, Wainwright W. Terrain following radar development and qualification in the CV-22 Osprey [C]// the AHS 64th Annual Forum [S.l.]: American Helicopter Society, Inc, 2008: 619.