

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.02.001

复合式直升机技术发展分析

李建波

(南京航空航天大学直升机旋翼动力学国家级重点实验室,南京,210016)

摘要:首先根据旋翼技术的特点和复合推进方式的不同,将复合式直升机分成 5 个类别,分别对 5 类复合式直升机的发展历程做了扼要介绍。然后,通过技术成熟度与市场需求的发展分析,将复合式直升机的发展归纳为 5 个阶段,总结了国外复合式直升机的型号发展过程和规律。最后,结合国外发展复合直升机的经验,以及中国直升机技术水平、科研机制的特点,针对中国复合式直升机技术发展提出了一些建议。

关键词:复合式直升机;发展历程;技术成熟度;科研机制;直升机技术

中图分类号:V275.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2016)02-0149-10

Progress of Compound Helicopter Technology

Li Jianbo

(National Key Laboratory of Science and Technology on Rotorcraft Aeromechanics,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Compound helicopters are classified into five classes according to their rotor technologies and compound propulsion styles. In addition, the developments of the five classes of compound helicopters are briefly introduced, and it is divided into five stages based on technology readiness level and market demands. The developed patterns of overseas compound helicopters are summarized. Eventually, based on foreign experiences of compound helicopter development, domestic helicopter technological capacities and mechanisms in scientific research, some pieces of advice on domestic compound helicopter development are presented.

Key words: compound helicopters; developments; technology readiness level; mechanisms in scientific; helicopter technology

直升机自诞生以来,历经 80 多年的发展,以其突出的悬停、低空低速性能和良好的机动性能,在军民使用上都发挥了巨大作用。但是,由于其升力和前飞动力均来自于旋翼,受旋翼前行侧桨叶压缩性和后行侧桨叶失速特性的限制,其前飞速度无法与固定翼飞机相比。为了进一步提高飞行速度,拓

展直升机的任务性能,历史上曾经诞生过许多所谓“复合式直升机”的研究机型,但至今还没有一种成熟的、可以投入批量生产的机型。

目前关于“复合式直升机”的定义还比较宽泛。国际航空运输协会定义 E1 为纯直升机,E2 为复合式直升机,如图 1 所示。本文认为复合式直升机

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2015-10-01;**修订日期:**2016-01-01

作者简介:李建波,男,研究员,博士生导师,主要研究方向为旋翼飞行器总体设计以及无人直升机系统综合设计。曾获发明专利授权 2 项,受理 4 项,累计发表论文 40 余篇,获国防技术发明一等奖、教育部专利一等奖各一项。

通信作者:李建波,E-mail:ljb101@nuaa.edu.cn。

引用格式:李建波. 复合式直升机技术发展分析[J]. 南京航空航天大学学报,2016,48(2):149-158. Li Jianbo. Progress of compound helicopter technology[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016,48(2):149-158.

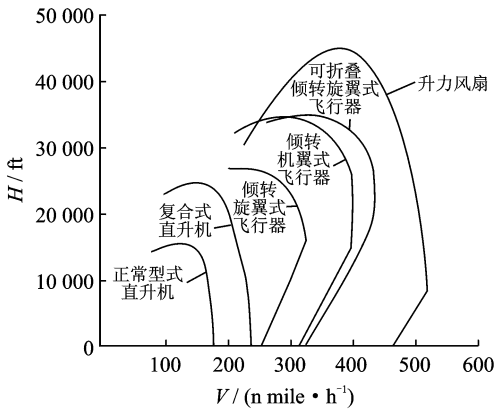


图1 各类垂直起降飞行器的飞行包线

Fig. 1 Flight envelope of rotor aircraft

首先要采用旋翼技术实现悬停和垂直飞行,其次其升力和前飞动力不完全依靠旋翼,即增加辅助推进装置(首先必须增加推进装置,其次可以进一步增加机翼,如只增加了机翼,所谓的有翼直升机,国际航空运输协会认为还是纯直升机,例如“米6”)。因此,复合式直升机不包括以固定翼飞机技术为基础,通过矢量推进装置实现垂直起降和悬停的直升飞机,也不包括没有悬停性能的自转旋翼机。自转旋翼飞机虽然不能归入复合式直升机范畴,但是其技术对复合式直升机设计具有支撑和参考价值,本文会有所涉及。倾转旋翼机悬停时是直升机模式,然后过渡到固定翼飞机模式前飞,因此它不是复合式直升机,而且国外的研究已经形成一个特征鲜明的分支,中国国内的相关研究也已经开展多年,本文将不再涉及论述。

1 复合式直升机类型

为了提高直升机飞行速度,从19世纪30年代起至今,德、法、英、苏(俄)、美等国家一直在复合式直升研究方面不断探索,研究试飞了众多构型的复合式直升机。这些复合式直升机可以从其所采用的旋翼技术及其复合推进方式的不同进行分类研究。

1.1 常规旋翼复合不同推进方式

最早的以常规旋翼复合推进器构成的复合式直升机是1936年首飞的德国佛兰特纳(Flettner) F1185^[1],如图2所示。它在直升机一侧增加了推进螺旋桨,在平衡反扭矩的同时提供前向推进动力。

与之构型相似的还有英国的“Gyrodyne”直升机^[2],如图3所示。它是由Cierva旋翼机公司研制的,于1947年12月首飞,在1948年取得了平均飞行速度124.3 mile/h的记录。

1954年前苏联卡莫夫公司开始研制了Ka-22直升机^[3],如图4所示,该复合直升机采用双旋翼

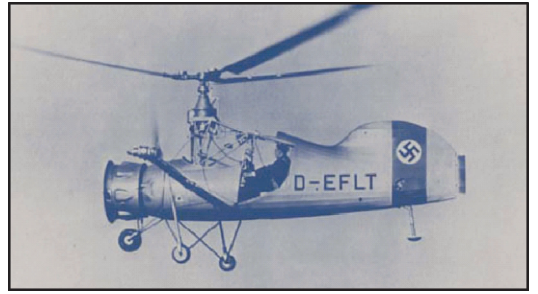


图2 F1185 复合式直升机

Fig. 2 F1185 compound helicopter

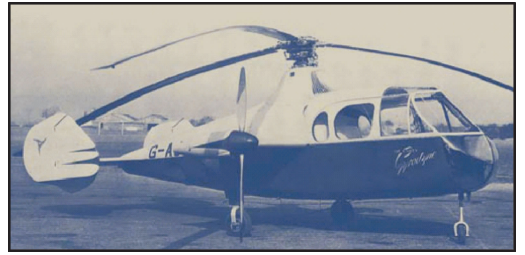


图3 Gyrodyne 复合式直升机

Fig. 3 Gyrodyne compound helicopter



图4 Ka-22 复合式直升机

Fig. 4 Ka-22 compound helicopter

横列布局,旋翼下方的发动机同时驱动推进螺旋桨,于1959年首飞,在1961年取得了221 mile/h的飞行记录,但是由于发动机需要同时给旋翼和螺旋桨提供动力,导致其动力传动技术过于复杂,试验和试飞中故障频出,致使前苏联国家航空技术委员会于1964年终止了Ka-22直升机的研发。

美国Gyrodyne公司在班迪克斯J型直升机两侧增加了两台螺旋桨推进器,形成了GCA-2A复合式直升机^[2],如图5所示,它是美国首架复合式直升机,于1949年底开始了首飞,后续又推出了GCA-5直升机,其设计时速为155 mile/h,但是只停留在概念论证和试验阶段。

美国皮尔凯斯(Piasecki)飞行器公司推出了FH-1“探路者”直升机^[2],如图6所示,该复合直升机在尾部增加涵道螺旋桨加气动舵面的复合推进器,同时还在机身两侧增加了机翼,于1962年1月进行了首飞,极限速度为170 mile/h。1964年5



图 5 GCA-2A 复合式直升机

Fig. 5 GCA-2A compound helicopter



图 6 “探路者”复合式直升机

Fig. 6 FH-1 compound helicopter



图 8 X-49A“速度鹰”复合式直升机

Fig. 8 X-49A compound helicopter



图 9 Bell 533 复合式直升机

Fig. 9 Bell 533 compound helicopter

月,美国推出了“陆军/海军联合开发项目”,皮尔凯斯飞行器公司接受了该项目的资助,同时作为“先进高速旋翼机技术”的一部分,“探路者”复合式直升机得以继续推进,而后又推出了 FH-1A“探路者二世”直升机^[4],于 1965 年 11 月进行了首飞,最大飞行速度提高到了 225 mile/h,如图 7 所示。进入 21 世纪,皮尔凯斯飞行器公司又推出了 X-49A“速度鹰”直升机^[5-6],如图 8 所示,其尾部的推进器采用了矢量推力涵道螺旋桨,于 2007 年 6 月开始了首飞,计划飞行速度为 230 mile/h。

美国贝尔公司在常规直升机的两侧各增加一台涡轮喷气发动机作为推进器,推出了 Bell 533 直升机^[7],如图 9 所示,并于 1962 年 8 月进行了首飞,空速达到了 173 mile/h。为了探索高速飞行时

可能遇到的各种问题,贝尔公司不断加大 Bell 533 直升机上喷气发动机的推力(最大推力达到了 3 300 lb),并且在机身两侧还增加了机翼,进行验证试飞,曾在 1969 年取得了 316 mile/h 的飞行记录。

卡曼公司也推出了类似构型的 SH-2“海妖”复合式直升机^[2],如图 10 所示。“海妖”直升机在采用喷气发动机推进器、增加机翼为旋翼卸载的同时,还采用了可收放式起落架,降低了高速飞行时的阻力。“海妖”直升机于 1963 年 11 月开始了飞行测试,飞行速度达到了 216 mile/h。卡曼公司通过对“海妖”直升机进行多次飞行测试,总结出复合



图 7 “探路者二世”复合式直升机

Fig. 7 FH-1A compound helicopter



图 10 “海妖”复合式直升机

Fig. 10 SH-2 compound helicopter

式直升机不能只以旋翼作为操纵面,应该增加副翼等操纵面与旋翼配合使用,以增强直升机的机动性。

在“陆军/海军联合开发项目”资助下,西科斯基公司对“海王”直升机进行了改型,拆除浮筒、改用可收放式起落架、加装两台喷气式发动机之后,推出了 S-61F(军方指定名称“NH-3A”)直升机^[8],如图 11 所示。S-61F 直升机于 1965 年 5 月进行了首飞,最大飞行速度达到了 410 km/h,但在 1969 年,军方停止了对该机型的资助,不久就停止了研制。



图 11 S-61F 复合式直升机

Fig. 11 S-61F compound helicopter

1965 年,西科斯基公司又在 S-61F 的基础上,通过采用转向尾桨提供前飞推力,推出了 S-66 复合式直升机,如图 12 所示。该直升机的尾桨在水平方向上可以进行 90°的转向、悬停及小速度飞行时平衡反扭矩,提供航向操纵,大速度前飞时,转向后。作为推进螺旋桨,旋翼反扭矩的平衡和航向操纵通过垂尾和方向舵实现。1969 年,通过增加机翼,西科斯基公司又推出了 S-67 复合式偏转尾桨直升机^[9-10],如图 13 所示。该机于 1970 年 8 月开始首飞,12 月就创造了飞行速度 355.49 km/h 的记录。由于 S-67 直升机没有得到美国军方的最终认可,一直是西科斯基自费研制项目,因此并没有进行投产。



图 12 S-66 复合式直升机

Fig. 12 S-66 compound helicopter



图 13 S-67 复合式直升机

Fig. 13 S-67 compound helicopter

进入 21 世纪,欧洲直升机公司意欲在世界速度最快直升机的行列争得一席之地,计划基于现有的先进技术研制一款高速直升机。欧洲直升机公司通过在常规直升机的两侧增加螺旋桨,提高前飞推进动力,以及平衡旋翼的反扭矩,推出了 X-3 复合式直升机^[11-12],如图 14 所示,并在 2010 年 6~9 月的飞行测试中,取得了飞行速度 472 km/h 的成绩。



图 14 X-3 复合式直升机

Fig. 14 X-3 compound helicopter

1.2 桨尖喷气旋翼复合不同推进方式

Wn 342^[3]是世界上第一架桨尖喷气式直升机,如图 15 所示,它在座舱尾部布置了螺旋桨推进器,采用了热气源驱动旋翼,于 1942 年 10 月开始首飞,但是效率较低,飞行速度始终没有突破 25~

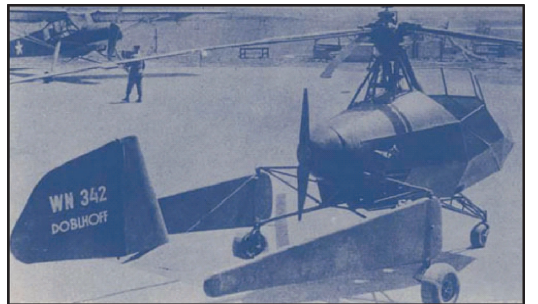


图 15 Wn 342 复合式直升机

Fig. 15 Wn 342 compound helicopter

30 mile/h,最大续航时间也只有 15 min。在二战末期,美国俘获了一架 Wn 342 直升机,通过测试发现,其悬停状态的油耗是常规直升机的 9 倍,因没有太大的工程应用价值而被搁置。

英国将“Gyrodyne”原型机改造成桨尖喷气驱动,推出了菲尔利“Gyrodyne”复合式直升机^[2],如图 16 所示。该型复合式直升机同样采用热气源驱动旋翼,于 1954 年 1 月开始首飞,到 1956 年为止,已完成近 200 次旋翼驱转到前飞自转的过程,但总的过程并不顺利,表明其技术难度较大。同时受战后经济的影响,该型直升机并没有得到政府的鼓励与资助,随后也停止了后续的研究。



图 16 菲尔利“Gyrodyne”复合式直升机

Fig. 16 Fairey's Gyrodyne compound helicopter

与菲尔利“Gyrodyne”直升机几乎同期研制的还有另一种叫作菲尔利“Rotodyne”^[2]的机型,如图 17 所示。菲尔利“Rotodyne”直升机同样采用热气源驱动旋翼,在高速前飞时旋翼自转,是当时世界上最大的旋翼飞行器,于 1957 年 11 月进行了飞行测试,并在 1959 年 1 月取得了 91 mile/h 的飞行记录。随着 1959 年菲尔利公司被韦斯特兰公司合并,由于缺乏政府的资助,韦斯特兰公司也停止了该项目。

法国于 1953 年 4 月试飞了 S. O. 1310 Farfadet 复合式直升机^[13],并且完成了悬停飞行,如图 18 所示。该型直升机同样以热气源驱动旋翼,在机身前部安置了螺旋,提供前进拉力,并于 12 月完



图 17 菲尔利“Rotodyne”复合式直升机

Fig. 17 Fairey's Rotodyne compound helicopter



图 18 S. O. 1310 Farfadet 复合式直升机

Fig. 18 S. O. 1310 Farfadet compound helicopter

成了前飞测试,最大飞行速度为 265 km/h。

20 世纪 50 年代,美国也开始了它的桨尖喷气驱动复合式直升机的研制,而后麦克唐纳公司就推出了用于探索研究用的 XV-1 直升机^[14-16],如图 19 所示,并且在 1956 年 10 月创造了 220 mile/h 的旋翼飞行器飞行记录,但是 XV-1 直升机的结构过于复杂,抵消了其超越常规直升机的技术优势,另外桨尖喷气装置带来的闪光及噪声等问题,使其作为军事装备使用受到很大制约,最终该项目也在 1957 年被取消。



图 19 XV-1 复合式直升机

Fig. 19 XV-1 compound helicopter

1.3 刚性旋翼复合不同推进方式

常规旋翼和自驱旋翼的桨毂没有明显改变,基本上是常规的铰接形式或两叶“跷跷板”形式。当直升机高速前飞时,需要降低旋翼的总距和转速,此时铰接式旋翼特别不利于保持旋翼系统的稳定性和整机的操稳特性,因此美国的几大直升机公司又推出了刚性旋翼搭配不同推进方式的复合式直升机。洛克希德公司推出了 XH-51A 验证机^[17-20],如图 20 所示,该验证机只在机身的一侧安装了一台 J60 喷气发动机,在 1964 年 9 月完成了首飞,在 1967 年创造了 302.6 mile/h 的旋翼飞行器非官方记录。但是 XH-51A 的 J60 发动机耗油量很高,所带燃油在最大飞行速度下仅能维持 20 min,经济性较差。



图 20 XH-51A 复合式直升机

Fig. 20 XH-51A compound helicopter

洛克希德公司针对“美国陆军先进控制火力支援系统项目”，推出了 AH-56A“夏延”刚性旋翼复合式直升机^[21-24]，如图 21 所示，与贝尔公司的 Bell 309 直升机及西科斯基公司的 S-67 直升机竞标。AH-56A 直升机于 1967 年 9 月首飞，达到了 253 mile/h 的极限飞行速度。但是美国陆军根据战场强开变化，于 1970 年又提出了新的武装直升机战术要求，并制定了“先进攻击直升机计划”。在该计划的指导下，美国陆军最终决定研制 AH-64“阿帕奇”直升机，而之前的 AH-56A、Bell 309 及 S-67 直升机都未能逃脱下马的命运。



图 21 AH-56A 复合式直升机

Fig. 21 AH-56A compound helicopter

为了验证“前行桨叶概念 (Advanced blade concept, ABC)”，由美国陆军与 NASA 共同出资，资助西科斯基公司推出了 S-69 (军方编号“XH-59A”)刚性旋翼复合直升机^[25-26]，如图 22 所示。



图 22 S-69 复合式直升机

Fig. 22 S-69 compound helicopter

该直升机在机身两侧各加装一台 J60-P-3A 喷气发动机作为推进装置，于 1973 年 7 月成功首飞，验证了“ABC”旋翼的可行性，并于 1980 年 8 月达到了 303 mile/h 的飞行速度。但是对于后续的改进费用，西科斯基公司不愿继续承担 (部分原因是当时西科斯基公司正同时开发 UH-60“黑鹰”、SH-60“海鹰”、CH-53E“超级种马”和民用型 S-76 直升机)，最后导致陆军未授予合同，因此 XH-59A 直升机没有投产。美国陆军在 1982 年推出了“轻型试验直升机计划”，西科斯基公司转而将注意力集中在该计划上，最终凭借 RAH-66“科曼奇”直升机赢得合同。2006 年，西科斯基公司再次启动了“ABC”旋翼复合式直升机的研制工作，将推进方式从原来的喷气推进改成了尾置螺旋桨推进，推出了 X2 刚性旋翼复合式直升机^[27-30]，如图 23 所示。该型直升机的最大设计飞行速度为 490 km/h，巡航速度为 460 km/h，并于 2006 年 8 月完成了首飞。



图 23 X2 复合式直升机

Fig. 23 X2 compound helicopter

为了竞标“联合多用途技术验证机计划”，西科斯基/波音联合研制了 SB-1“挑衅者”中型通用直升机验证机，作为该型验证机的先行者，西科斯基公司推出了 S-97“ABC”旋翼复合式直升机^[31-33]，如图 24 所示。其最大设计飞行速度为 480 km/h，并于 2015 年 5 月进行了首飞，而 SB-1“挑衅者”直升机预计于 2017 年首飞。



图 24 S-97 复合式直升机

Fig. 24 S-97 compound helicopter

1.4 刚性旋翼停转为固定机翼

1984 年，西科斯基公司在 S-72 直升机的基础

上推出了 S-72“X翼”直升机^[2],如图 25 所示。“X翼”为“停转旋翼”系统的简称,“X翼”的 4 片桨叶在悬停时能像常规旋翼一样靠旋转提供升力,在前飞时停止转动,作为固定翼使用,而 S-72“X翼”型直升机的推力由机身两侧的 TF34-GE-400A 发动机提供,其最大设计速度为 518 mile/h,但其从未离开过地面进行空中飞行。



图 25 S-72“X翼”复合式直升机

Fig. 25 S-72 "X-Wing" compound helicopter

波音公司也在 20 世纪 90 年代开始研制停转旋翼复合式直升机,推出了试验研究用的鸭式旋翼/机翼验证机^[34],如图 26 所示。该样机装备了一台涡扇发动机,直升机模式时通过桨尖喷气驱动旋翼提供升力,飞机模式下旋翼停止转动,作为机翼使用。该机研制过程也是历经坎坷,在测试直升机模式过渡到飞机模式过程中,发生过好几次坠毁事故,并最终于 2006 年停止了研制工作。



图 26 X-50A 鸭式旋翼/机翼验证机

Fig. 26 X-50A Canard rotor/wing

1.5 旋翼及圆盘机翼

旋翼机圆盘机翼方案是用带有曲度的盘翼作为高速前飞时的升力面,“盘翼”上装有能沿径向伸出和缩入的桨叶。在悬停及低速飞行时,盘翼与桨叶一起旋转,大速度时转为飞机模式,小桨叶缩进

“盘翼”中,盘翼停转,完全由圆盘形机翼产生升力,彻底消除前行桨叶激波和后行桨叶失速对前飞速度的限制,升力过渡通过调整转速、桨距和桨盘迎角来实现。典型的代表是美国 NASA 的阿姆斯研究中心提出的 M-85 方案样机^[35],如图 27 所示。该样机在尾部装有两台涡轮喷气发动机,提供前向推力,机身上方装有两片桨叶及一个圆盘机翼,M-85 的取名方式就反映了 NASA 的设计目标,即需要高空飞行达到 0.85 马赫数的飞行速度,但 M-85 目前仅有文字报道,未见真实照片。南京航空航天大学的高正教授与王焕瑾博士在 2003 年也提出了一种旋翼及机翼的复合直升机概念设计方案,即 RD15 无人直升机^[36],如图 28 所示。该设计方案以尾置螺旋桨作为推进装置,并且在风洞实验中完成了全机吹风试验,初步确定了总体参数。

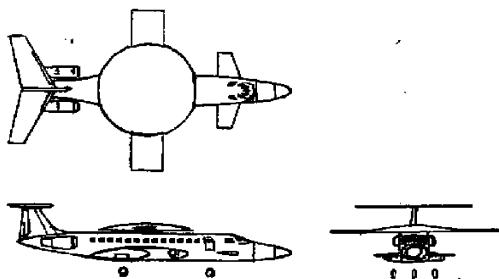


图 27 M-85 方案样机

Fig. 27 M-85 X-Plane



图 28 RD15 无人机

Fig. 28 RD15 unmanned vehicle

2 复合式直升机发展历程

任何装备的发展,都是以技术发展为依托、市场需求(包括军事需求和民用需求)为导向的,复合式直升机也不例外。本文根据技术成熟度、市场需求的不同将复合式直升机的发展划分为 5 个阶段。

2.1 发展的第一阶段(20 世纪 50 年代)

这一阶段是复合式直升机发展的起步阶段,复合式直升机的概念刚刚被提出,各国都争相推出自

己的复合式直升机,包括德国的 Flettner、Wn 342 直升机,英国的 Gyrodyne、菲尔利 Gyrodyne、菲尔利 Rotodyne 直升机,美国的 GCA-2A、麦克唐纳 XV-1 直升机,前苏联的 Ka-22 直升机等,呈现百花齐放的状态。这个阶段的复合式直升机发展主要以技术摸索为主,技术水平较低,到成为武器装备还有相当长的一段距离,因此没有明确的军事需求牵引。同时受战后经济的影响,各个国家也没有出台相应的中长期计划来鼓励和资助这些项目的发展,导致最后都以失败告终。

2.2 发展的第二阶段(20世纪60年代)

二战后十年,美国的经济和科技高速发展,复合式直升机的高速性能也开始受到了美国军方的关注,美国军方相继推出了“先进高速旋翼机技术资助计划”、“先进空中火力支援系统项目”等,试飞了多种复合式高速直升机,并在项目资助中引入竞争机制。因此美国各个航空公司相继推出了包括“探路者”、Bell 533、“海妖”、XH-51A、“探路者二世”、AH-56A 等复合式直升机,这个阶段的复合式直升机技术水平有了长足的发展,各型复合式直升机也在不断刷新旋翼飞行器的最大飞行速度。这一阶段完成的丰富试飞工作,也为后续的发展积累了大量的数据与宝贵经验。该阶段可以归纳为复合式直升机发展的前期,此时复合式直升机研究以美国一家独大,技术水平有了很大的提升,军事装备部门开始关注,但需求仍不够明确。

2.3 发展的第三阶段(20世纪70年代)

受越战的影响,战时反馈的战术需求信息对复合式直升机产生了较大的冲击,美国军方总结战场信息认为:直升机作为坦克“杀手”、补给运输的飞行平台,通常都在进行低空贴地飞行,抢占的也是一树之高的制空权,此时对直升机的高速性能需求不是很明显,因此将“陆军先进空中火力支援系统”项目资助的3个项目(AH-56A、S-67及Bell 309直升机)进行了对比试飞,最后决定同时取消对这3个项目的资助,转而制定了“先进攻击直升机计划”。该计划的目的是要为美国陆军提供一种全天候的攻击直升机,并可以用来对付敌人的装甲及其强化过的目标,受此计划的影响,美国陆军最后决定研制“阿帕奇”直升机。这个阶段复合式直升机的发展较为沉寂,西科斯基公司也暂停了S-69直升机的研发,但是“ABC旋翼”技术首次被提出,为后续的X2及S-97直升机的发展奠定了基础。

2.4 发展的第四阶段(20世纪80至90年代)

受越战结束、前苏联解体及冷战结束的影响,

在全世界范围内已经没有哪个国家能与美国进行全面的大规模战争,“先进攻击直升机计划”所设想的大规模坦克装甲对战不大可能出现,但是零星的小规模战争及冲突还会时有发生。在可能突发的信息非对称战争中,美国需要一种能进行侦查、空战以及火力压制的武装直升机,因此美国军方又提出了“轻型试验直升机计划”。该计划的目的是为美国军方提供一种全天候武装隐形侦查任务的直升机,最终美国耗资69亿美元,历时21年推出了“科曼奇”直升机。但就在“科曼奇”直升机服役不久,无人机在阿富汗和伊拉克战场上大显拳脚,整个美军装备发展思路开始转型,美国取消了“科曼奇”直升机项目,转而大力发展无人装备。虽然这个阶段的复合式直升机仍然没有受到美国军方的认可,但是复合式直升机技术还在持续发展,出现以S-72“X翼”和X-50A鸭式旋翼/机翼为代表的刚性停转旋翼/机翼直升机。

2.5 发展的第五阶段(20世纪90年代至今)

进入到21世纪,常规直升机的性能已经达到极限,装备使用部门急需一种能垂直起飞、快速达到指定地点的飞行器,这对武力的快速部署和海局舰载使用具有重要意义。在这种背景下,美国国防部推出了“未来垂直起飞计划”,欧洲也重新回到了复合式直升机研究的舞台,推出了自己的复合式直升机。经过近30年的沉寂,复合式直升机研究再度掀起了热潮。得益于前几个阶段的技术积累,美国和欧洲迅速推出了包括X-49A“速度鹰”、X2、S-97、X-3等一批技术成熟度较高的复合式直升机,并开始了相关的试飞研究工作,美国也有计划列装复合式直升机。

3 复合式直升机技术发展趋势

自驱旋翼(桨尖喷气)复合式直升机的优势是不需要平衡反扭矩的尾桨,降低了结构重量,但最大的问题是桨尖喷气装置技术复杂、效率低,采用冷气源几乎无法实现悬停;采用热气源,虽然可以实现悬停,但耗油率太高,只能在起飞着陆段使用。这些问题严重制约了该类型复合式直升机的发展,因此从20世纪60年代以后,自驱旋翼基本被放弃了。

以波音公司X-50A“蜻蜓”研究机为代表的刚性旋翼停转变固定翼方案,虽然也进入试飞阶段,但不久即发生多次坠毁。该类型复合式直升机采用了宽弦刚性可锁定的旋翼/机翼两用升力面,为了实现旋翼-机翼两用,其翼型前后缘对称,气动效率较低,悬停、前飞性能较差,而且旋翼停转,实现

升力转换的飞行控制难度大,也是该型复合式直升机发生多次坠毁事故的主要原因。特别是旋翼-机翼转换过程需要一定的时间,对应对战场复杂多变的环境不利,这些都使该型复合式直升机的实用性受到极大影响。

圆盘机翼和旋翼组合方案同样面临结构操纵复杂、气动效率低及实用性不强的困扰,因此到目前为止还是处于学术研究阶段,并没有进入到工业部门的考虑范围之内。

以“ABC旋翼”技术为代表的刚性旋翼复合式直升机已经成为美国发展复合式直升机的一个主流,从 XH-59A 到 X2,再到 S-97 直升机,技术研究历经近半个世纪,美国已经完成了该型复合式直升机的论证及预先研制,走到了计划列装前期的竞标阶段。但该类型复合式直升机同样存在一些问题有待解决,著名直升机专家 Prouty 曾专门撰文总结了采用“ABC旋翼”技术的 XH-59A 直升机存在的技术问题^[37],包括旋翼载荷大、桨毂阻力大、振动水平高及操纵难度大等。虽然西科斯基公司在 X2 上采用双桨毂气动整形、尾部推进螺旋桨、先进的振动主动抑制和电传操纵等技术,降低了结构复杂程度及油耗高等问题^[38],但载荷、振动等突出问题能否有效解决,Prouty 认为还需拭目以待。并且根据美国军方需求的调整,以及“未来垂直起飞计划”资助的不同方案之间的竞争,“ABC旋翼”式的复合式直升机是否最后能真正进入到列装阶段,还是个未知数。

通过在常规旋翼的基础上增加辅助推进装置与机翼构造的复合式直升机,成为复合式直升机的另一个发展主流,包括前期的 Bell533、“速度鹰”X-49A 直升机,以及近期欧洲直升机公司推出的 X-3 高速复合式直升机。这一类复合式直升机在结构复杂程度上要小于刚性旋翼复合式直升机,并且该类型复合式直升机在提高速度的同时,还提高了航程。据报道,“速度鹰”直升机的设计航程就和 F-18 战斗机相当,用作海军的搜索救援直升机十分合适。本文认为,提高直升机的最大飞行速度不等于提高了其巡航速度,更重要的是提高巡航速度。目前实现高速的最佳方案还是倾转旋翼机。因为倾转旋翼机以固定翼飞机模式巡航飞行,其巡航速度很容易达到 500 km/h 以上。

4 结束语

(1)虽然近 30 年以来,中国直升机技术有了长足发展,但是在自主研发能力上,与国外直升机先

进技术相比还有较大差距。特别是在复合式直升机技术方面,与国外历经半个世纪的探索研究和试飞经历相比,中国的技术研究和工程实践差距更大。中国科研工作者应当正视这一差距,做好中长期的规划,持续开展相关研究才有可能赶超国际先进水平。

(2)改革开放以来,在整个市场经济建设快速发展的背景下,中国直升机装备发展从单一的前苏联模式,向以美国为代表的西方模式转变。但是与美国相比,中国在科研体制和技术储备上仍有较大差距,研究和生产制造单位少、产业规模有限、结构单一、没有形成竞争机制,不利于促进竞争创新,也不可能多点开花,沿用美国的思路,重新走过他们经历的过程。因此为了缩短与国外先进技术水平之间的差距,在科研机制和体制上的改革创新也是当务之急。

(3)虽然可以发挥后发优势,在加速发展常规构型直升机技术,进一步完善现有的科研和工业体制的同时,及时跟进国际直升机研制的前沿热点,但是弯道超车实现直升机技术的跨越式发展,更需要加强需求的分析论证。针对中国具体的国土安防特点和未来战略发展规划,我们应该论证提出具体的、切实的需求,做好中长期规划,针对明确的需求,持续开展相关研究。复合式直升机装备的发展需要有较高的技术成熟度为依托和明确的需求为牵引,才能最终走向实际应用。

参考文献:

- [1] Nowarra H J. Die deutsche luftrüstung 1933-1945 [M]. Kaliningrad: Bernard & Graefe Press, 1993.
- [2] Robb R L. Hybrid helicopters: Compounding the quest for speed [J]. Vertiflite, 2006, 52(2):30-54.
- [3] Giorgio A. The Illustrated encyclopedia of helicopters [M]. New York: Bonanza Books Press, 1984.
- [4] Stephen H. U. S. Army Aircraft Since 1947 [M]. Atglen, PA: Schiffer Publishing Press, 1997.
- [5] Myers V R. Piasecki achieves first flight of the X-49A VTDP compound helicopter technology demonstrator [EB/OL]. <http://www.piasecki.com/pdfs/X-49AFirstFlight.pdf>, 2007-06-29.
- [6] Frank C. SpeedHawk—Phase I [J]. Vertiflite, 2007, 53(4):18-22.
- [7] Jay P S. Whirlybirds: A History of the U. S. Helicopter Pioneers [M]. Seattle: University of Washington Press, 1998.
- [8] Fradenburgh E A, Chuga G M. Flight program of the NH-3A research helicopter [J]. Journal of the American Helicopter Society, 1968, 13(1):44-62.

- [9] Yamakawa G M, Winn A L, Smith R B, et al. Attack helicopter evaluation, Blackhawk S-67 helicopter [R]. AD0771161, 1972.
- [10] Silva C, Yeo H, Johnson W. Design of a slowed rotor compound helicopter for future joint service missions[R]. US AMRDEC, No. 0704-0188, 2010.
- [11] Frank C. Paying for speed[J]. Vertiflite, 2014, 60(3):44-48.
- [12] George K. Airbus X3 Poised to Change the Helicopter Industry[EB/OL]. <https://www.yahoo.com/autos/s/airbus-x3-poised-change-helicopter-industry-video-193001050.html>, 2015-11-11.
- [13] Taylor J W R. Jane's pocket book of research and experimental aircraft [M]. London: Macdonald and Jane's Publishers Ltd, 1976.
- [14] Francillon R J. McDonnell Douglas aircraft since 1920: Volume II [M]. London: Putnam Press, 1997.
- [15] Hickey D H. Full scale wind tunnel tests of the longitudinal stability and control characteristics of the XV-1 convertiplane in the autorotating flight range [R]. NACA-RM-A55K21a, 1956.
- [16] Marks M D. Flight test development of the XV-1 convertiplane[J]. Journal of the American Helicopter Society, 1957, 2(1), DOI:10.4050/JAHS.2.55.
- [17] Crmz E S, Goremberg M B, Kerr A W. A flight envelope expansion study for the XH-51A compound helicopter[R]. AD8684282, 1971.
- [18] Lentine F P, Groth W P, Oglesby T H. Research in maneuverability of the the XH-51A compound helicopter [R]. Lockheed-California Company, No. 20894, 1968.
- [19] Sweers J E. In flight measurement and correlation with theory of blade airloads and responses on the XH-51A compound helicopter rotor[R]. Lockheed-California Company, No. 21072, 1968.
- [20] Donald R W. Extension of the high speed flight envelope of the XH-51A compound helicopter [R]. AD627372, 1965.
- [21] Landis T, Jenkins D R. Lockheed AH-56A Cheyenne [M]. Albury: Specialty Press, 2000.
- [22] John N J, John R B, Gary L B. Engineering evaluation AH-56A compound helicopter with advanced mechanical control system[R]. AD910262, 1973.
- [23] Floyd L D J, Gary L B, Randy D M. Army preliminary evaluation and research and development acceptance test AH-56A Cheyenne compound helicopter [R]. AD905910, 1973.
- [24] John N J. Attack helicopter evaluation AH-56A Cheyenne compound helicopter [R]. AD771914, 1972.
- [25] Rudell J. Advancing blade concept (ABC) technology demonstrator report[R]. USAAVRADCOM-TR-81-D-5, 1981.
- [26] Arents D N. An assessment of the hover performance of the XH-59A advancing blade concept demonstration helicopter[R]. USAAMRAL-TN-25, 1977.
- [27] Hirschberg M. Sikorsky pushes forward with X2 technology demonstrator [J]. Vertiflite, 2005, 51(3):12-14.
- [28] Frank C. ABC Revisited flight testing the X2 [J]. Vertiflite, 2009, 55(3):26-30.
- [29] Walsh D, Weiner S, Arifian K, Lawrence T. High airspeed testing of the Sikorsky X2 Technology demonstrator[C]// AHS International 67th Annual Forum Proceedings. Virginia: American Helicopter Society, 2011, 4(4):2999-3010.
- [30] Blackwell R, Millott T. Dynamics design characteristics of the Sikorsky X2 technology demonstrator aircraft[C]// AHS International 64th Annual Forum Proceedings. Alberta: AHS American Helicopter Society, 2008, 3(1):886-898.
- [31] Hirschberg M. X2, X3, S97 and X-49: The battle of the compounds is joined[J]. Vertiflite, 2010, 56(4):16-22.
- [32] Marina M. Sikorsky says S-97 to be considered for armed scout[N]. Jane's Defence Weekly, 2012-1-13.
- [33] Caitilin L. Sikorsky starts S-97 raider final assembly [N]. Jane's Defence Weekly, 2013-9-27.
- [34] Svoboda J, Charles R. Canard Rotor/Wing (CR/W) early history and X-50A Dragonfly design evolution [C]// AHS International 62th Annual Forum Proceedings. Fairfax VA: American Helicopter Society, 2006.
- [35] 文裕武, 稳澄清, 高正, 等. 现代直升机应用与发展 [M]. 北京:航空工业出版社, 2000.
- [36] 王焕瑾, 高正. 转换式高速直升机 RD15 方案 [J]. 航空学报, 2005, 26(1):36-39.
Wang Huanjin, Gao Zheng. The scheme of high speed helicopter RD15 [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(1):36-39.
- [37] Prouty R. Another look at the advancing blade concept [J]. Vertiflite, 2006, 52(2):18.
- [38] 吴希明. 高速直升机发展现状、趋势与对策 [J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(2):173-179.
Wu Ximing. Current status, development trend and countermeasure for high-speed rotorcraft [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(2):173-179.