

# 直升机若干关键技术研究

褚世永

(中国航空工业发展研究中心,北京 100029)

[摘要] 近年来,直升机技术表现出跨代发展特征,以总体设计、旋翼系统、传动系统、涡轴发动机、材料和制造技术、航电技术和飞控技术为代表的各技术领域均有较大突破,部分成果已得到应用。同时,高速旋翼机和无人直升机技术领域的发展也呈现出加速态势,在不久的将来将为直升机带来革命性的变革。

关键词: 总体设计; 减震; 降噪; 高速旋翼机; 无人直升机

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.08.034



褚世永

中国航空工业发展研究中心高级工程师,长期从事国外直升机技术、型号和市场方面情报研究工作,参与了多个重点直升机型号立项论证和预研课题研究工作。

直升机是利用旋转机翼提供升力、推进力和操纵的能垂直起降的飞行器,其飞行原理、功能和用途均有别于固定翼飞机。直升机以其独特的垂直起降、空中悬停、向任意方向飞行、近地机动和野外适应能力强等特点,发挥着其他运输工具和飞行器不可替代的作用。

从1907年世界上第一架直升机

诞生至今,直升机技术始终在不断发展进步。近年来,直升机技术表现出跨代发展特征,各技术领域均有较大突破。当前,以NH90、AW101和CH-53K为代表的已经或即将投入使用的最新一代直升机所采用的标志性技术主要包括复合材料机身、无轴承/无铰或球柔性桨毂、多段高性能翼型和三维桨尖形状的桨叶、综合航电系统、电传飞控系统、健康与使用监控系统(HUMS)等。同时,一些更为先进的新构型、子系统及先进结构研究也取得很多成就,先进复合构型高速旋翼飞行器技术获得突破,距离产品成形已为时不远。

## 专用关键技术发展

直升机的专用关键技术主要包括总体设计技术、旋翼系统技术、传动系统技术和发动机技术,这些技术凸显了直升机的特色,直接决定了直升机的性能优劣。其中,作为“三大动部件”的旋翼系统、传动系统和发动机技术复杂、研制难度大;总体设计即围绕“三大动部件”展开,系统集成的复杂程度高。

(1) 总体设计技术。

随着直升机各专项技术、信息化技术及工程优化设计方法的发展

和成熟,直升机总体设计已从传统的面向性能设计转变为面向经济可承受性和质量设计,形成了针对客户需求的总体技术方案设计能力。在直升机研制过程中,多学科优化设计、全寿命周期费用设计、并行设计、鲁棒设计等总体设计方法已得到广泛应用。同时,随着综合设计软件的发展,直升机总体工程设计已拥有了良好的优化平台。未来,直升机总体设计将进一步向综合化、数字化方向发展,设计方法的综合程度将越来越高,涉及的学科也将越来越广,总体设计优化程度不断提高,推动全机性能水平和经济可承受性的提升<sup>[1]</sup>。

(2) 旋翼系统技术。

作为直升机升力、操纵力和推进力的主要提供单元,旋翼系统始终是直升机的核心技术领域,其技术先进性是衡量直升机技术水平的重要标志。为满足不断提升的直升机性能要求,近年来旋翼系统技术发展势头迅猛,悬停效率和升阻比已分别提高到0.78和10.5左右。旋翼技术进步主要体现在以下几个方面:

· 旋翼桨毂构型实现换代。球柔性桨毂和无轴承桨毂开始普遍应用,结构大幅简化、控制响应更快,新研及升级型号几乎都采用这两种桨毂。

· 一系列高性能先进翼型开始应用, 桨叶气动性能持续提升(图1)。如法国 ONERA 最新翼型 OA409 比 OA209 升力系数提高了 11%, 比早期常用的 NACA0012 提高了 33%。先进桨尖形状设计使旋翼气动效率进一步提升, 如英国开展的“英国试验桨叶计划”第四期(BERP IV), 就在第三期(BERP III)成果基础上进一步加大了桨尖部分弦长、后掠角和下反角, 并优化了三维形状。飞行试验结果表明, BERP IV 旋翼比 BERP III 的悬停需用功率减少 5%, 高温-高原巡航需用功率降低 10%~15%, 飞行包线扩展约 10%; 结构响应主动控制系统在 BERP IV 上得以应用, 试验表明振动水平降幅 70% 以上, 最高降幅达 87%<sup>[2]</sup>。

· 先进旋翼子系统技术取得进展, 如智能旋翼、伺服襟翼单片桨叶控制、优化转速旋翼技术<sup>[3]</sup>。其中, 优化转速旋翼技术在波音的无人直升机 A160 “蜂鸟” 上进行了验证, 大幅提高了航程和续航时间, 其作战半径超过 1852km, 续航时间大于 20h<sup>[4-5]</sup>。另外, 美国国防高级研究计划局(DARPA)在 2010 年启动了名为“任务自适应旋翼”(MAR)的新构型旋翼概念开发项目, 通过改变旋翼长度、后掠角、弦长、翼型弧度、桨尖形状、扭转角、刚度、转速以及其他参数, 以适应不同飞行状态, 实现有效载荷和航程的大幅增加。

### (3) 传动系统技术。

直升机先进传动系统的技术特点突出表现在高可靠性、高安全性、高效率、低成本和低噪声等方面。目前, AH-64D、NH90、AW101 等机型的主减速器大修间隔可达 3000h 以上, 主减速器传动(三级)效率超过 97.3%, 干运转能力可达 45min。同时, 国外在总体构型、系统可靠性、齿轮动态特性和行星传动效率、高重合度传动、推力圆柱滚子轴承、陶瓷轴承等方面开展了一系列研究工作,

部分成果已投入应用。如 AH-64E 传动系统运用了新型分扭传动技术和 NASA 格伦研究中心开发的面齿轮技术, 不仅没有增加整个系统的尺寸和重量, 而且提高了 25% 的传输功率, 额定功率由 2088kW 提升至 2536kW, 寿命也增加了 1 倍, 提升到 10000h<sup>[6]</sup>。

### (4) 涡轴发动机技术。

目前, 第四代涡轴发动机已得到广泛应用, 主要特点是普遍采用全权数字式电子控制系统, 总压比超过

14, 涡轮进口温度进一步提高, 寿命延长和可靠性大幅提高等。第四代涡轴发动机采用了许多新的结构和设计技术, 包括双级离心式压气机或多级超跨音速轴流加离心混合式压气机、回流环形燃烧室、空心气冷叶片和陶瓷材料, 并采用主动间隙控制技术缩小叶尖间隙, 进一步提高了燃气发生器的热力循环参数和部件效率(图2)。

这些新技术的应用, 使新型涡轴发动机的总压比达到 14~20, 涡轮前温度达到 1300~1500K; 耗油率达到 0.275kg/(kW·h) 水平, 普遍比第三代降低 8% 左右, 与活塞发动机相当; 典型产品单位功率达到 300kW/(kg/s), 比第三代提高超过 10%; 结构更加简单, 维修更加方便, 在外场只需简单支架和少量专用工具, 就可在短时间内完成维修工作; 普遍具有 10%~20% 的功率储备, 在轮廓尺寸不变的情况下, 可通过增加流量和涡轮进口温度进一步提高功率; 操纵性好, 发动机控制系统对功率变化适应性出色, 在应急情况下能够稳定安全地超负荷工作; 抗损伤能力更优, 确保发动机在恶劣的环境下能够安全工作。同时, 第四代涡轴发动机的单元体结构设计和低耗油率特征, 直接降低了全寿命周期费用。



(a) NH90 桨叶桨尖



(b) AW101 桨叶桨尖

图1 NH90和AW101桨叶桨尖

Fig.1 Blade tip of NH90 and AW101

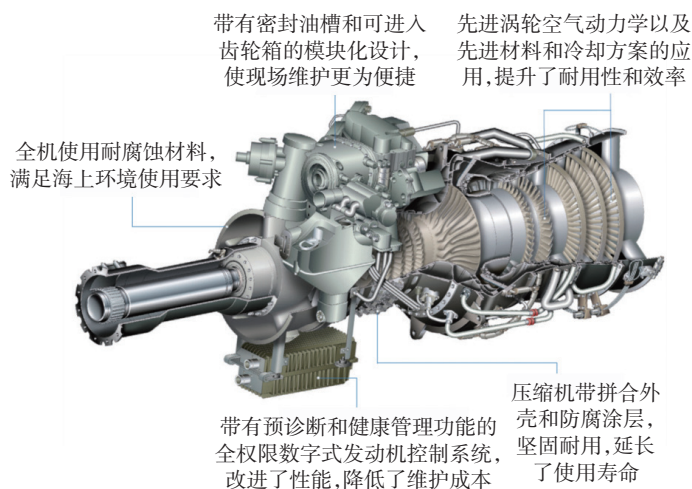


图2 装配CH-53K直升机的GE38发动机的外形及结构特点

Fig. 2 Figure and structure of GE38 turboshaft engine for CH-53K

从目前启动的先进研究计划看,未来涡轴发动机的发展趋势仍是通过开发各种先进技术来提高功重比、降低油耗,并增强对高温-高原等严苛使用环境的适应能力。下一代涡轴发动机可能在结构上采用革命性的设计,比如使用变转速动力涡轮并应用自适应结构等。未来的涡轴发动机结构会更加简单,仅需几个扳手就能进行拆卸,大幅降低维护时间和成本。

### 通用关键技术发展

除了上述几项专用关键技术外,航电、材料和飞行控制等通用技术的发展也对直升机产品飞行性能和任务能力的持续提升作出了重要贡献。

#### (1) 材料和制造技术。

先进直升机的复合材料使用范围正在迅速扩展,已从蒙皮等次要结构扩展到机身盒形龙骨梁、水平安定面等承力结构, NH90、AW101、S-97等型号都已开始使用全复合材料机身。同时,复合材料的使用也使旋翼桨叶寿命逐步提高,实现了无限寿命和视情维护,并为桨叶先进气动外形和动力学优化提供了条件。此外,先进制造技术也大幅提高了直升机性能,如英国 BERP IV项目对复合材料桨叶制造技术进行了研究,采用的4层抗褶皱铺层织物厚度是传统铺层织物的3倍,铺层时间大幅减少;采用的Z字型编制方法,材料用于后缘蒙皮时,桨叶损伤容限提高到传统单层纤维织物桨叶的4倍。

未来直升机,特别是高速旋翼机对结构重量、强度、制造成本、维护性能将提出更高要求,直升机复合材料应用比例将进一步提高,如旋翼桨毂、主减速器齿轮、机电系统等都可能实现复合材料化。随着石墨烯材料的发展,复合材料结构强度、重量等特性都将大幅提高,将促进复合材料应用范围扩展到旋翼桨毂、主旋翼轴等重要承力件上。

#### (2) 航电系统技术。

直升机航电技术正在经历突飞猛进的发展:高度综合化、模块化,全电子化玻璃座舱正取代传统仪表,如 AW101 座舱采用了“大图像”下视显示和虚拟座舱技术,大大增强了飞行员的战场态势感知能力;有源相控阵雷达将在直升机上得到应用,俄罗斯2011年开始研制加装有源相控阵雷达的卡-52K 舰载攻击直升机,雷达搜索距离增加约200km,通过改进雷达发射-接收模块制造工艺,质量从275kg减至80kg,雷达天线阵尺寸控制在600mm×400mm内;有人/无人机协同作战技术得到快速发展, AH-64E 已实现了四级无人机系统控制能力,除了能从无人机接收实时视频外,更能对无人机的飞行姿态进行控制,并控制无人机的传感器和武器等任务载荷,大幅提升 AH-64E 的态势感知和攻击能力,从而大大增强了生存力和作战效能。

#### (3) 飞控系统技术。

作为新一代直升机的典型特征,电传飞控系统的应用正在逐渐普及,全球首款采用电传飞控的民用直升机——贝尔525已于2015年7月成功完成首飞。同时,光传飞控系统技术也取得一些进展,2002年空客直升机公司与德国 DLR 在一架 EC135 上成功加装了光传飞控系统并完成首飞,该机目前作为 DLR 飞行试验平台,承担飞控、航电等技术验证工作。此外,自主飞行技术正在成为直升机飞控发展的一个重要方向。2013年,西科斯基公布了 Matrix 自动飞行技术,技术目标是飞行中完全去除人员控制,以软件采集状态数据和信息、进行处理并做出应对决策,该技术已开始在 S-76 上进行验证。

### 未来发展的重点技术领域

从产品的角度看,常规构型直升机(包括单旋翼带尾桨构型、纵列式双旋翼构型和共轴双旋翼构型)、高速旋翼机(包括倾转旋翼构型、带拉

力或推力桨的复合推力构型)和无人直升机“三足鼎立”的格局已经初步形成。未来一段时期内,它们都将在各自的技术领域寻求进一步发展。

#### (1) 常规构型直升机减振降噪技术。

随着市场对于常规构型直升机舒适性要求的不断提高,减振降噪已成为常规构型直升机未来发展的重点技术领域。目前,减振降噪的研究方向已从被动吸振逐渐转向主动减振,如结构响应主动控制、高阶谐波控制、单片桨叶控制、主动控制伺服襟翼等研究,并已取得明显效果。未来,对于舒适性、可靠性的高要求将推动减振降噪技术的不断成熟和转化,也将促进更为先进的减振降噪技术发展<sup>[7]</sup>。如空客2010年提出的“蓝色直升机”概念中,包含了“蓝色刀锋”(Blue Edge)低噪声桨叶技术(图3)和“蓝色脉冲”(Blue Pulse)主动控制技术。

“蓝色刀锋”是一种通过改进桨尖形状设计降低噪声的技术,利用减小的桨尖弦长来降低桨尖涡强度,利用非均匀的弦长分布和先前掠后掠的桨尖设计有效避免桨尖涡与桨叶平行干扰产生的噪声,利用先进翼型设计降低旋翼厚度噪声和载荷噪声,利用后掠的优化桨尖避免桨尖的气动分离<sup>[8]</sup>。

“蓝色脉冲”采用的是主动控制伺服襟翼技术,通过双襟翼特殊设计降低桨涡干扰噪声。双襟翼的周期运动改变桨叶的气流和运动,从而降低了直升机降落时的振动和噪声。

这两项技术在实验室环境下降



图3 空客H160直升机采用的“蓝色刀锋”桨叶

Fig.3 Blue edge blade on Airbus H160

噪效果达 4~7dB, 真实飞行环境也达到 3~4dB。

此外, 美国马里兰大学开发的智能旋翼试验表明, 智能旋翼在降低噪声水平方面有着更为高效的表现, 噪声降低达 50% 以上。DARPA 的“任务自适应旋翼”新构型旋翼概念开发项目中, 也提出了声学可探测距离降低 50%、振动降低 90% 等性能指标。

### (2) 高速旋翼机技术。

高速旋翼机技术近年取得较大突破: 倾转旋翼机早已在军用领域使用, 民用产品也将在未来几年内交付; 复合推力构型高速旋翼机技术趋于成熟。

2010 年西科斯基启动基于 X2 构型技术的 S-97 高速旋翼机研制, 2015 年 5 月完成首飞。空客直升机公司 X3 验证机飞行速度于 2013 年达到 472km/h, 旨在研制出一个高速旋翼机系列的美军“未来垂直起降飞行器”(FVL) 计划, 并计划 2017 年实现其先导验证项目——“联合多任务旋翼机技术验证机”(JMR TD) 的首飞, 2020 年前完成全部验证、评审和工程研制方案选择, 预计 2028 年前后交付使用。美国空军与陆军正在联合开展“联合未来战区运输机”(JFTL) 技术研究, 该机将具备垂直起降和短距起降能力, 并能够运输中型作战车辆, 且具备战略级别航程。美国军方和 NASA 还开展了运输机级别的高速旋翼机技术研究, 其中“亚声速旋翼机”研究项目(SRW), 为未来能搭载 90 名乘客、巡航速度 556km/h, 航程不低于 1852km 的旋翼机储备技术, 目前主要集中在构型优化、关键子系统技术研发, 2012 年已开始 1/20 缩比模型风洞试验<sup>[9]</sup>。

与此同时, 下一代高速旋翼机技术预研已陆续启动。DARPA 于 2013 年 2 月启动了“垂直起降试验飞机”项目, 于 2014 年 3 月开始竞标, 计划 2017 年首飞。验证机最大起飞重量 4500~5400kg, 技术可应用

1800~10800kg 间不同吨位平台上; 能承受 -0.5~2.0g 过载; 飞行速度能达到 556~741km/h; 悬停效率不低于 75%; 巡航状态升阻比不低于 10; 有效载重不低于总重的 40%, 商载不低于 12.5%。项目成果将为 FVL 等项目后的第二代高速旋翼机提供技术储备; 而欧洲也计划启动第二代高速旋翼机技术预研, 并可能优先考虑民用领域的应用<sup>[10]</sup>。

按照目前的研制计划, 集成应用高速旋翼机技术的新产品将在 2025 年前后投入使用, 并在 2030 年后开始广泛应用。

### (3) 无人直升机技术。

近年来, 无人直升机技术发展迅速。控制方面, 采用先进的飞行控制与组合导航技术, 智能化和自主控制能力稳步提高。MQ-8B“火力侦察兵”已达到美军方定义的自主控制等级第 4 级(机上航路再规划), 能实现不同海况和风速条件下的自动起飞和着舰; 美国海军陆战队已经启动“自主空中货运/投送系统”(AACUS) 项目, 期望前线士兵能通过简单的 iPad 界面操作无人直升机着陆, 计划在 2016 年下半年完成研制; 此外, 美军在 JMR TD 项目中提出了可选有人驾驶能力需求, 已开始在“黑鹰”上开展技术研究, 并于 2014 年初成功进行了地面遥控悬停飞行试验, 这项技术能在几乎所有现役直升机上应用。

新技术和新材料方面, 钛合金已广泛运用到无人直升机发动机叶片、旋翼轴和桨毂等部件上, 机体主结构采用玻璃纤维、碳纤维等增强型复合材料, 结合模块化设计使空机重量显著降低、结构寿命明显提高、维修性大大改善, 同时复合隐身技术也被用于降低全机的雷达和红外辐射特征; 新构型技术也将很快被应用到无人直升机上, DARPA 正在进行的“垂直起降试验飞机”项目就含无人高速旋翼机备选方案。

任务系统方面, 先进的小型化任务设备不断集成, MQ-8B 的 Ku 波段 APY-8“山猫”合成孔径雷达重 52kg, 在 10000m 高空成像分辨力为 100mm, 且具有地面动目标指示能力, “山猫”II 的重量已降到 39kg。

未来, 无人直升机将向“智能化、易操纵”、“长航时、高航程”、“大任务载荷”、“高隐身性能”和“高效新武器系统”等方向发展。

### 参考文献

- [1] PAPE A L, LIENARD C, BAILLY J. Active flow control for helicopters[J]. Journal Aerospace Lab, 2013, 6:1-11.
- [2] HARRISON R, STACEY S, HANSFORD B. Berp IV -the design, development and testing of an advanced rotor blade[C]. Montréal: The American Helicopter Society 64th Annual Forum, 2008.
- [3] BERSELLI G, VERTECHY R, VASSURA G. Smart actuation and sensing systems - recent advances and future challenges[M]. Washington: InTech, 2012:657-678.
- [4] LAU B H, OBRIECHT N, GASOW T, et al. Boeing-SMART test report for DARPA helicopter quieting program[R]. California: NASA Ames Research Center Moffett Field, 2009.
- [5] STRAUB F K, ANAND V R, BIRCHETTE T S, et al. SMART rotor development and wind tunnel test[C]. Hamburg: The 35th European Rotorcraft Forum, 2009:22-25.
- [6] LENSKI J W, VALCO M J. Advanced rotorcraft transmission (ART)program-Boeing helicopters status report[C]. California: 27th Joint Propulsion Conference, Sacramento, 1991:24-27.
- [7] SIMON F, HAASE T, UNRUH O, et al. Activities of European research laboratories regarding helicopter internal noise [J]. Journal Aerospace Lab, 2014(7):1-14.
- [8] RAUCH P, GERVAIS M, CRANGA P, et al. Blue edgetm: the design, development and testing of a new blade concept[C]. Virginia: The American Helicopter Society 67th Annual Forum, 2011.
- [9] JOHNSON W, YAMAUCHI G K, WATTS M E. NASA heavy lift rotorcraft systems investigation: America, NASA/TP-2005-213467[P]. 2005-12-01.

(下转第 50 页)