



未来直升机技术发展展望

中国航空工业第二集团公司 倪先平



倪先平

工学博士,中国航空工业第二集团公司副总工程师、研究员,南京航空航天大学兼职教授、博士生导师,航空科学技术奖评审委员会副主任,中国航空学会直升机专业委员会和可靠性专业委员会副主任委员。曾任中国直升机设计研究所所长、国家高新工程项目总设计师、国家重点预研课题旋翼原理样机总设计师。

32 航空制造技术·2008年第3期

直升机技术经历了四代发展,已经进入第五代。目前,早期妨碍直升机正常飞行的关键技术陆续得到解决,常规直升机技术已非常成熟,直升机已经成为航空飞行器大家族中不可或缺的重要成员。

自1907年11月13日法国工程师伯努·科尔尼实现世界上载人直升机的首次成功飞行以来,直升机的发展已经走过了100多年的历程。100多年以来,直升机技术经历了四代发展,已经进入第五代。目前,早期妨碍直升机正常飞行的关键技术陆续得到解决,常规直升机技术已非常成熟,直升机已经成为航空飞行器大家族中不可或缺的重要成员。安全、可靠、舒适、实用的直升机深受用户欢迎。在全球各地,在军用、民用各个领域得到极其广泛的应用。技术进步推动了直升机型号的成熟和应

用,而直升机型号的应用反过来又对直升机技术发展提出了更高的要求。从第一代直升机到第四代直升机,每一代新直升机的问世,都是直升机重要关键技术创新的结果。

直升机技术的发展

在实用直升机的早期发展过程中,存在六大关键技术问题:(1)垂直飞行的空气动力机理;(2)能提供足够动力的发动机;(3)发动机和机身的重量控制;(4)平衡旋翼的反扭矩;(5)合适的直升机稳定性和操纵性;(6)直升机的振动。1907年载人

直升机首飞成功后,各国工程师历经33年的艰苦努力,逐步解决了这六大问题,现代实用直升机才得以问世。

从1940年实用直升机问世到2008年近68年时间里,直升机技术有了飞速发展,影响直升机平稳飞行的许多关键技术逐步得到突破,新的成熟技术逐渐应用在直升机研制上,新的直升机构型不断出现。直升机经历了四代发展,已开始进入第五代时期。

(1) 第一代直升机(20世纪40年代初~50年代末期)。

这是实用直升机发展的初始阶段,前面所述直升机的六大关键技术问题在第一代直升机上基本得到解决。第一代直升机上安装了活塞式发动机,其旋翼桨毂是典型的金属铰链桨毂。旋翼桨叶用钢管、木材和帆布制作成,寿命很低。从气动方面来说,第一代直升机旋翼桨叶采用对称翼型。机身结构大都为钢管桁架式,也有一些为铝合金半硬壳式。采用机械式硬操纵。装载简单的机载设备。在总体性能方面,第一代直升机的最大平飞速度大约为200km/h,机身的振动水平高达0.2g,噪声高达110dB。典型的第二代直升机有美国贝尔公司的贝尔47、美国西科斯基公司的S-61和前苏联的米4等。

(2) 第二代直升机(20世纪60年代初~70年代中期)。

工作原理截然不同的涡轴发动机问世,并逐步取代活塞式发动机应用在第二代直升机上。旋翼系统桨叶用金属材料替代了木质和布质材料,桨叶翼型开始采用直升机专用非对称翼型,改善了旋翼的气动性能。机身结构大都采用铝合金金属薄壁结构;机载电子设备比第一代有所改进,采用初始集成的微电子电路仪表,非综合的单向数字数据总线等技术。在总体性能方面,第二代直升机

的最大平飞速度提高到250km/h,机身振动水平降低到0.15g,全机噪声水平降到大约100dB。典型的第二代直升机有前苏联的米8、原法国宇航公司的SA321等。

(3) 第三代直升机(20世纪70年代中期~80年代末)。

第三代直升机技术更为成熟,带有革命性的新技术不断出现并得到应用,具有很强的生命力。第三代直升机普遍安装第二代涡轮轴发动机。旋翼气动性能进一步改善,全复合材料桨叶的应用将桨叶的使用寿命提高到3600h以上。桨叶开始采用后掠和尖削形状的桨尖以及新的高性能直升机专用翼型。复合材料在第三代直升机机身结构上逐步得到应用。机载电子设备开始由独立分散的单个设备向综合化方向发展,采用集成电路的通信设备、自主导航设备和综合仪表。电子设备采用双向数据总线交联进行数据传输。在操纵和控制方面,逐步过渡到采用机械和电子混合操纵,自动增稳增控系统逐步得到普及应用。在总体性能方面,第三代直升机的最大平飞速度达到300km/h,机身振动水平降低到0.1g左右,全机的外部噪声水平达

90~95dB左右。典型的第三代直升机有法国欧直公司的SA365N1、英国原威斯特兰公司的“山猫”、美国波音公司的阿帕奇、美国西科斯基公司的黑鹰、俄罗斯米里设计局的米28和卡莫夫设计局的卡50等。

(4) 第四代直升机(20世纪90年代以来)。

第四代直升机上安装了第三代先进涡轮轴发动机。无轴承式旋翼开始在轻型直升机上得到应用,弹性铰式桨毂在不同吨位的直升机上得到普遍应用。旋翼桨叶在使用玻璃纤维的同时,开始大量使用碳纤维等先进复合材料。从气动方面来说,第四代直升机旋翼大都采用最新一代直升机专用翼型,桨尖形状呈三维变化,前缘抛物线形、桨尖下反等新颖形状在桨叶尖部得到普遍应用。机身结构中复合材料比例高达70%甚至80%以上。信息技术在直升机上得到普遍应用,直升机的航空电子系统正朝着高度综合化的方向发展。采用电传操纵来替代传统的机械式操纵系统,改善了直升机的操纵性。第四代直升机全机总体性能也有了较大的改善。直升机的最大平飞速度超过了315km/h,机身座舱



第三代典型直升机 AH-64

乘员座椅处的振动加速度降低到近 0.05g，直升机的外部噪声降低到接近 85dB。典型的第四代直升机有 RAH-66、NH-90 以及 S-92 等。

未来直升机的新构型

长期以来困扰直升机设计师们的问题，就是直升机的低飞行速度。气动、动力学和声学等各方面因素使常规直升机的飞行速度难以超越固定翼飞机。飞行速度低严重限制了直升机的使用和发展。突破这一技术关口的一条重要技术途径是直升机构型的革新。

1 倾转旋翼机

在直升机新构型中，目前最有发展前景的是倾转旋翼机。这种飞行器结合了直升机和固定翼飞机的优点，既保持了直升机能够向任意方向飞行的独特优点，又可以实现接近亚音速固定翼飞机的飞行速度，从而大大提高了旋翼类飞行器的使用效率。目前，世界上只有美国的贝尔公司掌握了倾转旋翼机的核心技术。前苏联和欧盟也进行了一些研究，但都没有进入到型号研制阶段。

贝尔公司从 20 世纪 70 年代初以来，一直坚持倾转旋翼机的研究。早期的研究机 XV-15 验证了倾转旋翼机的可行性并探索了其飞行包线。在 XV-15 验证机的基础上，贝尔公司于 20 世纪 80 年代初中期开始了 V-22 鱼鹰倾转旋翼机的研制。目前，V-22 已经完成了各种型号试飞验证工作，并交付美国海军使用。在 2006 年的英国范堡罗航展上，V-22 成为航展的一大亮点。贝

尔公司还和阿古斯塔威斯特朗公司合作研制民用型 BA-609 倾转旋翼机，目前正在进行紧张的飞行试验。贝尔公司还在进行四旋翼倾转旋翼机的概念研究，已经进行了初步的缩比模型风洞吹风试验，准备竞争美国陆军的重型起重直升机。倾转旋翼机的飞行速度比直升机大大提高，目前常规直升机的最大平飞速度只有 315km/h，V-22 达到 565km/h 时，直升机的最大实用升限一般低于 6km，V-22 倾转旋翼机的实用升限高达将近 8km。倾转旋翼机大大扩展了直升机的飞行包线，同时大大提高了直升机的运输效率。

2 X-2 新构型验证机

美国的西科斯基飞机公司正在致力于研究一种 X-2 新构型验证机，X-2 验证机采用上下两副共轴的双旋翼，桨叶根部刚性大于常规的旋翼桨叶，所以上下两副旋翼之间的间距比常规共轴式直升机小得多。在直升机尾梁后段设置一个推力螺旋桨，在高速前飞时为直升机提供推力。由于采用了先进的桨叶翼型、桨

叶气动优化设计、前行桨叶概念而减轻或消除了后行桨叶的失速现象，尾部螺旋桨增加了大速度飞行时的推力，X-2 先进概念直升机的巡航速度可达到 462km/h 左右。X-2 验证机上还综合了电传操纵，综合化的旋翼、推进器、发动机控制系统，主动振动控制等先进技术。西科斯基公司认为，X-2 验证机技术具有非常巨大的技术潜力，商用直升机、无人驾驶直升机、美国未来的高速联合重型升力直升机、联合重型起重直升机甚至高速攻击直升机等都可以应用 X-2 验证机的技术。

3 复合型直升机

另外一种有潜在发展前景的新构型是复合型直升机，和倾转旋翼机不同的是，它不是依靠旋翼倾转，而是利用独立的螺旋桨发动机或者涡轮喷气发动机，从而使直升机的飞行速度大大提高。复合式直升机的潜在优势具有非常大的吸引力，对这种构型直升机的研究工作近年来得到了较多的关注。比较典型的是，针对近几年来美国军方提出的新一代重

V-22 鱼鹰倾转旋翼机



型运输型直升机计划,美国有关研究机构提出了复合式直升机的方案。据介绍,要求该型直升机的巡航飞行速度达到 555km/h。

研究者将这种直升机称为联合垂直重型升力直升机,由机身后部装载货物,单旋翼,机身两侧对称布置两个气动优化设计的机翼,在高速飞行时,机翼可以为旋翼卸载。在机身两侧和尾梁上装有 3 台 F135 轴驱动升力风扇和推进单元体发动机,悬停飞行时,旋翼的动力和平衡反扭矩的动力均由这 3 台发动机提供。除了旋翼提供大部分升力之外,装在机身两侧的发动机和装在尾梁上的发动机可以分别通过推力矢量喷管或者升力风扇提供将近 1/2 的升力。前飞时,装在机身两侧的发动机尾喷管可以调整到水平位置,提供前飞的推力。通过采用这些新的设计措施,这种复合式直升机的巡航飞行速度可以满足 555km/h 的要求。

4 CHT 复合直升机

2004 年,美国的卡特航空有限公司提出一种慢速旋翼/复合直升机方案,参与美国陆军空中机动和运输项目 AMT 的竞争,称为卡特直升机运输 CHT。CHT 复合直升机的方案总体上和其他复合直升机方案差不多,有一副主旋翼,在机身两侧有展弦比较大的机翼,在每一个机翼上各吊装有一台涡轮螺桨发动机,旋翼的功率亦由这两台发动机提供。取消了尾桨,平衡反扭矩的功能由两台螺旋桨发动机的推力差来实现。在悬停和低速飞行状态,旋翼提供升力,当前飞速度增加到一定程度时,旋翼转速逐渐降低,升力逐渐过渡到由机翼来承担。直升机在由悬停到大速度前飞的过程中,旋翼将经历直升机模式飞行、旋翼机模式飞行和固定翼模式飞行等不同阶段。根据验证机的试飞和分析结论,CHT 复合直升机在 12km 高度的有效巡航速度可达 676km/h。

5 直升汽车

还有一种构型,将直升机的特点和汽车的特点结合起来,构造出所谓的直升汽车,这样可以通过结合汽车的安全性和直升机的飞跃障碍能力,扩展直升机或者汽车的应用范围。近几年,美国的 URBAN 航空有限公司利用几十年来发展的各种技术,提出了新的空中吉普设想。这种新的空中吉普名叫 X-鹰,它的外形看起来更像一台空中轿车。前后布置了两个涵道式旋翼,涵道内设计有导流片,采用两台涡轮轴发动机,尾部带有推进螺旋桨和安定面,还采用电传操纵系统、复合材料结构技术、抗坠毁设计以及关键系统冗余设计等技术。可以用于城市空中紧急救援、空中出租车、城市设施维护检修、近海运输等。还可以改装成战斗型、遥控型直升机。设计最大起飞重量为 4250kg,最大有效载重 750kg,最大飞行速度 185km/h,活动半径 185km。

未来直升机的旋翼系统

旋翼系统是直升机的关键系统,旋翼技术的发展是直升机技术发展永恒的旋律。

1 无轴承旋翼

从旋翼桨毂技术来说,结构简单、可靠性强、疲劳寿命长的无轴承式桨毂仍然是旋翼桨毂技术的发展方向。在现代的最新直升机上,虽然已经有无轴承旋翼投入使用,比如欧洲直升机公司的 EC135 直升机,但基本上应用在重量比较轻的直升机上,对于起飞重量在 4t 以上的直升机,无轴承旋翼还有一些技术问题需要解决。未来直升机的旋翼系统将其具备以下特点:

(1) 弹性轴承的新型桨毂将会继续得到深入研究,并在大型直升机上得到比较普遍的应用,桨毂主要部件将逐步采用复合材料。

(2) 对于旋翼的气动设计来说,

高性能的翼型研究和桨尖形状研究将是未来的方向,三维变化的桨尖形状将是未来旋翼桨尖形状的主流。

(3) 从结构设计上来说,采用高性能的新型复合材料,可以进一步提高桨叶的疲劳特性和制造工艺性。

2 智能式旋翼

在更远一点的未来,直升机将可能用上一种所谓的智能式旋翼,这种智能旋翼将使直升机的飞行性能、飞行控制、振动水平、噪声水平以及旋翼本身的疲劳性能、结构组成、重量特性得到极大的改善。

所谓智能旋翼,就是在旋翼结构中埋入智能材料作为传感器、作动器和控制器,同时将控制电路、逻辑电路、信号处理器以及功率放大器集成在旋翼结构中,可以自动感受旋翼或者机身的振动、噪声等特性,对旋翼有关参数进行适当调整,从而改善相应的性能;也可以根据飞行员的操纵指令改变旋翼的相关参数,从而改变直升机的飞行状态或有关性能。简单地说,就是利用智能材料技术、微电子技术、信息技术实现对旋翼的控制。

目前,在智能旋翼研究中得到广泛关注的一种构型是所谓的伺服襟翼桨叶。伺服襟翼桨叶借用了飞机机翼襟翼的概念,通过在桨叶典型剖面的后部或者前缘设置襟翼来改变桨叶的局部气动力,对桨叶轴线产生扭矩改变桨叶扭转角从而改变桨叶上的升力。

在各种电控智能旋翼方案中,最有可能得到实际应用的是桨叶扭转控制和伺服襟翼方案。

综合利用主动桨叶控制面控制技术、电信号控制技术、智能材料可以改变直升机旋翼的常规控制方式,取消现在在直升机上普遍应用的自动倾斜器、变距拉杆、液压助力器,从而大大降低操纵系统的复杂性、减轻直升机重量、提高直升机的可靠性和维护性。

未来直升机的机身结构

1 复合材料机身结构

第二代以前的(包括第二代)直升机,其机身结构仍广泛采用以铝合金为主的金属材料。到了第三代直升机,机身结构逐步开始采用玻璃纤维和碳纤维等复合材料,在机身材料上掀起了一场革命。复合材料用于直升机机体结构始于20世纪60年代,在1968年以前,复合材料主要用于次要结构。1968年首飞的BO-105直升机,除旋翼桨叶采用玻璃纤维以外,机体的后门、前后机身蒙皮以及发动机的整流罩也采用了玻璃纤维夹层结构,复合材料结构占直升机空重的13%(含旋翼桨叶)。1975年首飞的美国贝尔公司研制的AH-1G直升机的尾梁采用了复合材料夹层结构尾梁。20世纪80年代,几个主要的直升机供应商先后开展了全复合材料机身结构的研究,美国西科斯基公司的先进复合材料机身计划ACAP、波音公司的360型全复合材料纵列式直升机机身结构等研究,将复合材料机身结构的应用向前推进了一大步。

复合材料结构对直升机的总体性能有多方面的贡献:

(1) 重量方面的贡献,在直升机各部件和系统中,机身结构的重量占

全机空重的比例最高,一般要占到空重的25%左右,复合材料结构的重量比金属材料的轻很多,美国S-75复合材料机身结构和金属结构相比,可以减重24%。

(2) 机体疲劳寿命方面的贡献,复合材料的疲劳特性比金属材料好,裂纹扩展速度比金属材料慢,复合材料结构在疲劳问题比较突出的直升机上使用,可以显著提高直升机机身结构的疲劳寿命。

(3) 复合材料在恶劣的环境条件下对腐蚀的敏感性也比金属材料低,可以提高直升机机身结构的可靠性和可维护性。

(4) 复合材料结构如果采用合适的结构形式,可以具有比较高的吸能能力,在直升机机身抗坠毁设计中,复合材料结构的贡献不可忽略。

(5) 复合材料结构具有很好的无线电电磁特性,即具有良好的电磁波透波性,宽频带,低电磁能损耗,可以作为雷达等电子设备的整流罩,同时还具有比较好的雷达隐身性能,对于武装直升机来说,是一种非常有用的结构。

(6) 复合材料结构良好的制造工艺性,可以根据结构件的强度和刚度要求进行不同的铺层设计,制造复杂和大型的结构件,这也是复合材料结构在直升机领域得到快速应用的

一个重要原因。

原法国宇航公司20世纪70年代研制的SA365N/N1直升机是一种典型的第三代直升机,其机身结构应用了比较多的复合材料,其水平尾面、侧端板以及尾斜梁都是由复合材料制造的,在需要加强刚度的地方,如后机身、龙骨大梁的腹板、尾锥、地板、整流罩等,大量采用轻金属合金、碳纤维或者凯芙拉蒙皮,设计成NOMEX蜂窝夹层结构。其机体结构使用的复合材料大约占直升机空重的20%。

现代新型直升机的机身结构最主要的特点就是大量采用复合材料,一些典型的第四代直升机机身结构中复合材料比例已经高达80%以上,波音直升机公司甚至开展了全复合材料机身结构验证机的研究,可以预见,在不远的未来,采用全复合材料机身结构的直升机将投入到实际应用中。

2 智能机体结构

一种在技术上具有跨越性的新型智能机体结构正在出现,或许这正是未来直升机机身结构发展的主流方向。

所谓智能结构,就是在机身结构中嵌入传感器,实时监测机身结构由于机动飞行载荷超过允许包线、疲劳、应力腐蚀、环境影响或者是弹击等产生的损伤,确定损伤的准确部位,并且跟踪损伤的发展情况等。传感器探测到的信息由专门的微处理器进行处理,微处理器和带有结构完整性知识库的中央专家系统相连接,根据需要,可以向飞行机组和地勤人员提供结构当前状态的提示信息,为飞行员飞行决策和地面维护提供可靠的依据。

当然,前面所介绍的只是一种最简单的智能结构。智能结构还有很多名称,例如灵巧结构、自适应结构等。早期对智能结构的定义是,在结构本身中,包含有由智能材料制造的



应用较多复合材料的SA365 N1直升机

传感器、信号探测电路、识别器、控制器、必要的计算能力以及由智能材料制造的作动器,这样的结构就称为智能结构。现代对智能结构的定义更为简单明了,其行为和人的行为类似的结构,即所谓智能结构。从技术的发展来看,智能结构将被设计成可以评估结构的剩余强度系数以及剩余寿命,还可以根据有关判别标准和要求执行一些控制程序来阻滞裂纹的扩展。

我们这里仅涉及狭义的智能机身结构,实际上,在直升机的振动主动抑制技术中,应用的也应该是智能结构,只不过是主减速器的支撑结构而不是狭义上的机身结构而已。

未来的直升机飞行控制系统

飞行控制系统及机械操纵系统是直升机上的关键系统,飞行员操纵指令的执行、旋翼和尾桨桨叶安装角的改变都依赖于飞行控制系统和机械操纵系统的正常工作。

第一代和第二代直升机上采用的都是传统的机械操纵系统。机械操纵系统工作可靠,其主要不足是重量重,尺寸大,非线性问题比较突出,容易反向传递旋翼桨叶的弹性振动,引起驾驶杆偏移,严重时会产生诱发振荡,使直升机驾驶困难。

1 电传操纵系统

一种利用电信号来传递并执行驾驶员指令的电传操纵系统在 20 世纪 70 年代中期出现,这是飞行控制系统和操纵系统发展史上的一次重大革命。

由于电传操纵系统中的操纵指令和反馈完全通过电信号传送,所以

电传操纵系统最大的优点是可以在直升机上应用主动控制技术,所有其他自动飞行控制系统、姿态控制、高度与航迹控制系统以及进场着陆系统都能够通过电传操纵系统来控制。电传操纵系统可以改善直升机的飞



采用了电传操纵系统的NH-90直升机

行品质,使直升机在不牺牲稳定性的前提下,获得好的操纵性,进而获得比较好的机动性。

电传操纵系统可以减轻系统的重量,节省空间,使直升机的布置更为方便,为其他部件提供更为宽余的安装空间。电传操纵系统的可靠性比常规机械操纵系统高出 5 倍多,大大增加了直升机的安全性。另外,由于飞行关键部件的库存量大大减少,直升机操纵系统和飞行控制系统的采购成本以及使用维护成本大幅降低。

在第四代直升机上,电传操纵系统已经成为操纵系统的主流。NH-90 直升机是法国、德国、意大利和荷兰 4 个国家合作研制的,经过多方面的比较设计师们最终选择了电传操纵系统。

2 光传操纵系统

由于电传操纵系统仍然存在先天不足:容易受到电磁干扰影响,在雷电环境下不利于任务的顺利完成;电缆的数据传输率仍然偏低,影响到整个系统的工作效率。为了克服电

传操纵系统的不足,工程师们开发了光传操纵系统。用光导纤维代替电缆作为数据传输的介质,这是光传操纵和电传操纵系统的主要区别,相应的接头、信号传感器及信号处理软硬件等作相应更改。和电传操纵系统相比,光传操纵系统的主要优点在于不受电磁干扰影响,因此,可以在各种雷电等复杂气象条件下执行任务。

早期的光传系统也存在一些问题,如光缆刚性和脆性比较大,不易在小弯曲半径状态下布线,光缆接头复杂,不容易检查和更换并且价格比较贵等。经过 20 多年来的研究和改进,这些不足已经得到了克服,抗潮湿和耐高温性能也有了很大改善,这为光传操纵系统在第五代直升机上的实际应用铺平了道路。

(责编 金卯)