



Key Technology of Transmission System and Rotor System of Helicopter

北京航空航天大学 陈 铭 徐冠峰 张 磊



陈 铭

博士,教授,博士生导师。毕业于北京航空航天大学飞行器设计专业。自1992年开始在北京航空航天大学从事直升机专业的教学和研究工作。曾担任“海鸥”无人驾驶直升机的副总设计师。自1999年开始从事小型无人直升机的研究开发工作,先后主持设计了M22、FH-1、FH-2小型共轴式无人直升机。在国内核心期刊和国内外学术会议发表文章20余篇。

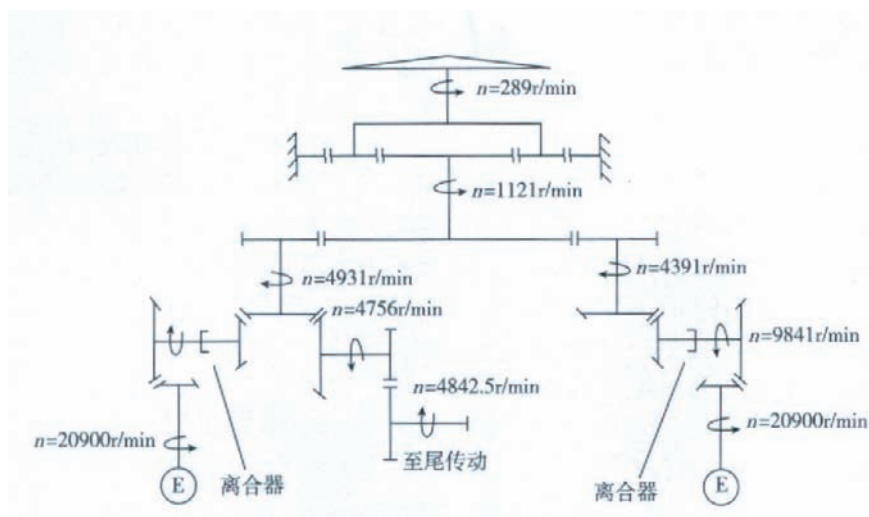
32 航空制造技术·2010年第16期

由于直升机的速度较低,一般最大速度不超过350km/h,机身的气动外形对飞行性能的影响相对固定翼飞机来说较弱。因此,有人说直升机气动特性主要是旋翼气动特性。就直升机本体技术而言,传动系统和旋翼系统是直升机最重要的关键部件,反映了直升机技术的本质和特征。

直升机是依靠旋翼作为升力和操纵机构的飞行器,其旋翼充当了固定翼飞机的机翼、副翼、升降舵和推进器的作用。根据反扭矩形式,直升机又可分为单旋翼带尾桨形式,共轴双旋翼,纵列式、横列式及倾转旋翼式。目前应用比较广泛的是单旋翼带尾桨形式直升机。直升机的旋转部件多,包括旋翼系统、操纵系统、主减速器、尾减速器、尾桨等部件。因此,整个直升机是在很多旋转系统及部件的协调运转中工作的。尤其是大旋翼,在飞行中一般处于非对称气

流中,除了旋转运动外,还有挥舞、摆振方面的运动,成为直升机振动的主要来源。直升机的关键技术主要体现在直升机的旋转部件的设计技术上。

对于固定翼飞机,由于在高速飞行中工作,其机翼、机身、尾翼的气动外形非常重要,影响到飞机的飞行性能和操稳特性。而对于直升机,其气动特性主要体现在旋翼桨叶的几何特性、翼型、旋翼转速、旋翼实度、桨盘载荷等参数。由于直升机的速度较低,一般最大速度不超过350km/h,



美国阿帕奇直升机传动系统原理图

机身的气动外形对飞行性能的影响相对固定翼飞机来说较弱。因此,有人说直升机气动特性主要是旋翼气动特性。就直升机本体技术而言,传动系统和旋翼系统是直升机最重要的关键部件,反映了直升机技术的本质和特征。

传动系统

直升机的发动机所提供的动力要经过传动系统才能到达旋翼,从而驱动旋翼旋转。对于一般的直升机来说,其作用是将发动机的功率和转速按一定比例传递到旋翼、尾桨和各附件。直升机性能在很大程度上取决于传动系统的性能,传动系统性能好坏将直接影响直升机的性能和可靠性。

1 传动系统的结构

直升机传动系统的典型构成为“三器两轴”,即:主减速器、尾减速器、中间减速器、动力传动轴和尾传动轴。现代直升机的发动机多为涡轮轴发动机,其输入转速较高,意大利的 A129 输入转速最高,为 27000r/min,所以要达到旋翼的设计转速必须经过主减速器减速。减速器的减速比一般比较大,例如美国武装直升机阿帕奇的总传动比为 72.4,“黑鹰”直升机的总传动比为 81。

直升机的主减速器传动一般为 3~4 级传动,黑鹰的主减速器分 3 级传动,第 1、2 级为螺旋锥齿轮传动,第 3 级为行星齿轮(5 个)传动,其位于主减底部,滚柱式超越离合器被设置在第 2 级;阿帕奇的主减速器分 4 级传动,第 1、2 级为螺旋锥齿轮传动,第 3 级为圆柱斜齿轮传动,第 4 级为行星齿轮(5 个)传动,斜撑式离合器设置在第 2 级;虎式直升机主减速器分 3 级传动,第 1 级为锥齿轮传动,第 2 级为圆柱斜齿轮传动,第 3 级为行星齿轮(6 个)传动,超越离合

器被设置在第 1 级;A129 的传动形式与阿帕奇相似。

2 直升机传动系统的特点

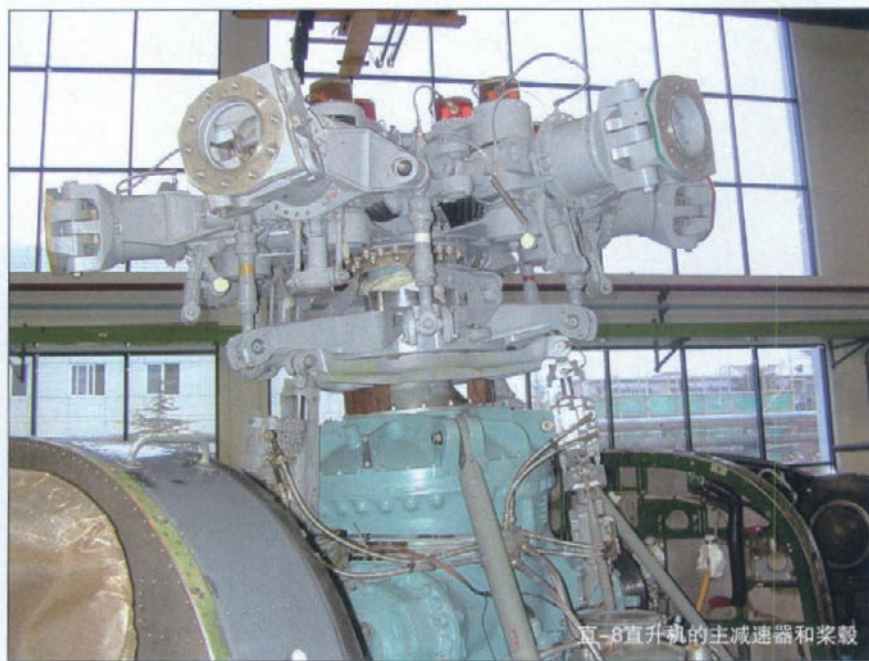
(1) 高的功率重量比。

直升机的传动系统相对于一般的减速传动系统而言具有更高的功率重量比,作为航空部件必须严格控制质量。即便如此,一般情况下主减速器仍占据直升机总质量的 1/7~1/9,所以为了进一步减轻重量必须采用结构优化、润滑系统优化和选用高强度比的材料等方法减轻重量,提高功率重量比。

(2) 高的生存能力。

直升机尤其是军用直升机将工作在复杂的战场条件下,减速箱被击中或过机动飞行引起的传动系统的故障都有可能使得润滑油泄露,所以必须保证减速器有一定的干运转能力,国外在这方面做的比较好的直升机有阿帕奇(主减速器的干运转能力为 1h)、意大利的专用武装直升机 A129(干运转能力为 30min)、虎式直升机(干运转能力为 30min)等。另外传动系统必须具有一定的抗坠毁性,保证在坠落时传动系统的零部件不进入驾驶舱。

(3) 高减速比、高效率、高可靠



性、良好的维护性。

直升机的发动机主要是涡轮轴发动机,其转速很高,但是桨叶的运转速度由于激波和失速的限制不会很高,所以减速比就会很大,减速级就会增加,这也是传动系统结构重量相对较大的原因。为了提高传动的效率减速齿轮一般采用斜齿,而为了提高传动的平稳性,更好的办法是采用人字齿。传动系统为单路承载方式,一旦发生故障将是灾难性的,这就要求传动系统必须具有很高的可靠性。直升机受空间和结构限制,维修较为困难,因此要求传动系统有良好的维修性。

(4) 载荷复杂、动力学问题突出、寿命要求高。

直升机的最突出的问题之一就是振动问题,来自发动机、旋翼以及尾桨的激振力相互叠加耦合,使得直升机的传动系统承受的载荷十分的复杂。不仅如此,在传动系统传动链中,各种不同转速的构件协同运转,发动机、旋翼系统与传动系统之间存在振动耦合。传动系统结构复杂,零部件数目较多,易发生故障和失效,且故障不易监测,维护性较差,要实现较长的使用寿命具有较大的难度。

(5) 润滑系统复杂。

近年来,对传动系统的性能指标和效率要求越来越高,导致系统温度提高,使得润滑系统的工作环境更加苛刻。由于重量限制和安全要求,润滑系统所有润滑油路均为内置,使主减速器结构极为紧凑;有的具有备份润滑系统;润滑油量也必须适当;为达到干运转要求,机匣内需设置油兜等结构;因此传动系统的润滑比一般比地面减速器更复杂,监测也困难。

(6) 涉及面广、基础性强。

传动系统研制涉及到机械学、材料与强度、摩擦与润滑、动力学、声学、流体力学、传热学等基础学科,目前,传动系统技术发展呈现各学科相

互渗透的态势,需要各基础学科研究的支持,因此提高传动系统研发水平,须从基础抓起。

3 发展趋势

随着新技术、新工艺、新材料的发展直升机传动系统也在不断变得改进,主要表现在以下几个方面:

(1) 分扭传动技术的应用,进一步发展的分扭传动技术具有高的传动比、可以减少传动级数、效率高、可靠性高、噪声小、利于减重等优点,特别适用于大功率减速器。

(2) 采用动静轴传动技术,分解旋翼轴的载荷,有利于零部件设计、减轻重量和提高可靠性。

(3) 采用高速离合器技术,提高可靠性,减轻重量。

(4) 主减速器多处采用了轴—轴承—齿轮一体化设计,提高了可靠性,同时减轻了主减速器的重量。

(5) 采用复合材料传动轴、复合材料机匣技术来减轻结构重量。

(6) 采用耐高温轴承、齿轮材料,提高了传动的寿命。

(7) 采用深度氮化甚至纳米技术以改变部件的表面特性,使部件的耐磨损性能提高,增加部件的使用寿命。

(8) 发展了更为有效的润滑方式,如环下润滑、离心甩油、多喷嘴喷射等。提高了滑油过滤精度,确保齿轮、轴承等转动部件摩擦副良好的润滑和冷却条件。

(9) 采用润滑油芯技术以及留

有适当的齿轮和轴承间隙保证直升机在没有润滑油的情况下的干运行能力,提高生存能力。

(10) 新概念、一体化设计:采用少或无冷却系统的传动系统设计;采用实时监控技术、无翻修寿命甚至无维护概念的传动系统设计;采用与直升机、发动机一体化设计的传动系统设计。

旋翼系统

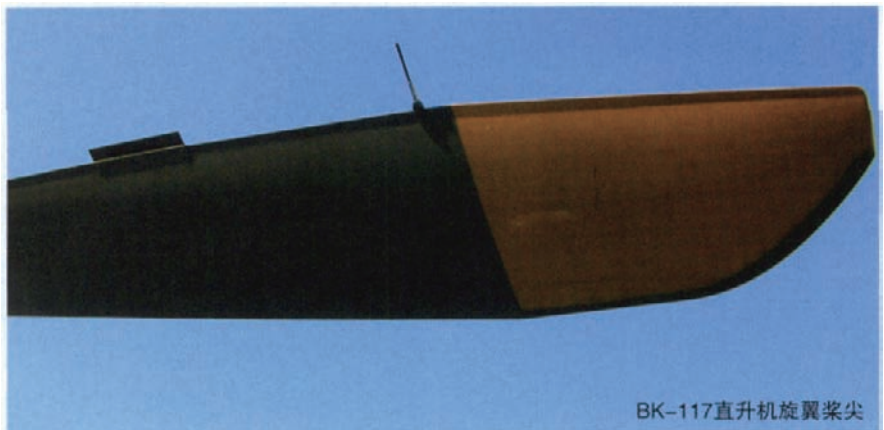
旋翼是直升机的关键部件,为直升机提供升力和操纵。在直升机的发展中始终处于极为重要的地位。旋翼系统包括 2 部分,旋翼桨叶和旋翼桨毂。

1 旋翼桨叶

旋翼桨叶的技术发展体现在 2 个方面:一方面是桨叶的气动外形、一方面是桨叶的制造技术,包括工艺及材料。

桨叶气动外形的研究是用来改善旋翼的气动特性,提高直升机的性能,增进飞行品质,主要涉及桨叶的翼型、桨尖形状及桨叶扭转角分布等。

在直升机的发展初期(20 世纪 40~50 年代),基本上都采用 NACA 对称翼型系列,对称翼型的零升俯仰力矩在理论上为零,具有相对于正负迎角升阻特性对称的优点,迄今仍在尾桨上采用。但对称翼型的最大升力系数 C_{lmax} 过低,于是在 20 世纪 60 年代,采用了“前缘下垂”翼型,



BK-117 直升机旋翼桨尖



EH101直升机旋翼桨尖

如“23012”。前缘下垂翼型的 $C_{l_{max}}$ (在 $Re=6 \times 10^6$ 时) 要比对称翼型的高 10% 以上, 而且零升俯仰力矩系数很小, 最小阻力系数也与对称翼型相当。

随着对直升机性能的要求越来越高, 特别是空气压缩性对翼型的影响越来越重, 到了 20 世纪 70 年代, 各大直升机公司都按照“超临界翼型”的思路, 发展各自的独家翼型, 如波音伏托尔的 VR 系列, 西科斯基的 SC 系列, 法国的 OA 系列及俄国的 TsAGI 系列等。这些翼型在较宽的 Ma 数范围内都有较好的气动特性。20 世纪 90 年代, 又得知法国正发展 OA4 系列、俄国已有了 TsAGI-4 系列。

对翼型的设计和改进可以提出下列 5 项要求。

(1) 在较宽 Ma 数范围内, 有较高静态和动态最大升力系数, 以适应机动过载状态。

(2) 在较高 Ma 数及小迎角时, 有较大的阻力发散 Ma 数, 以推迟前行桨叶激波失速。

(3) 在中等 Ma 数时及中等迎角时, 有较高的升阻比, 以提高旋翼的悬停效率。

(4) 在较低的 Ma 数及大迎角时, 有较好的失速特性, 以延缓后行桨叶的气流分离。

(5) 在整个飞行包线内, 有较小的俯仰力矩系数, 以降低桨叶的操纵负荷。

旋翼的桨尖区域是桨叶的高速

区, 桨尖形状的适当修型, 可以有效地改进旋翼的气动特性。

早期, 因为制造工艺所限, 桨尖形状一般都为矩形。自 20 世纪 70 年代以来, 由于复合材料桨

叶的出现, 使桨尖形状的变化成为可能, 于是出现了平面形状直线变化的尖削或后掠桨尖, 或者尖削后掠形状组合的桨尖。桨尖形状的尖削可使桨尖涡强度减弱, 而后掠显然可以推迟激波产生。进入 20 世纪 80 年代, 桨尖形状进一步向曲线变化(如抛物线后掠), 其中最引人注目的是英国 Westland 直升机公司研制出的 BERP 桨尖。这种桨尖形状如不规则的蹼状, 1986 年在“山猫”直升机上试用, 首创飞行速度 400km/h 的世界记录。

此后, 桨尖形状又向三维变化(下反桨尖)发展。下反桨尖可拉开先行桨叶的桨尖涡与后继桨叶相遇距离, 有利于减弱旋翼涡-桨干扰。美国西科斯基公司于 20 世纪 80 年代后期在 S-70 的缩比桨叶上进行了下反桨尖的旋翼台悬停对比试验, 并于 20 世纪 90 年代初期应用于改型

的“黑鹰”直升机上, 提高了悬停效率。

直升机旋翼桨叶制造技术的最大进步是实现了复合材料制造桨叶。有人曾这样评价复合材料在直升机上应用的重要意义: 直升机工业经历了两次革命: 第一次是涡轴发动机代替了活塞发动机, 第二次是复合材料在直升机上的应用。而实际上复合材料在直升机上应用主要指的就是旋翼桨叶和旋翼桨毂。旋翼由木质混合桨叶发展到全复合材料桨叶, 其寿命由最初的几百小时达到了现在的 10000h 以上甚至无限寿命。复合材料在桨叶上的使用还为桨叶的外形变化(包括翼型、扭转、尖削等)的实现带来了方便, 通过不同方向的铺层设计从而提高桨叶的抗疲劳特性。实现从气动优化到强度优化的一体化设计。同时, 使桨叶的制造成本也大大降低。

2 旋翼桨毂

直升机旋翼桨毂结构, 对直升机气动性能、振动、重量、维修成本、操纵性、稳定性、生存力等都有重大影响, 设计一个结构简单、可靠、低成本、高效的桨毂成为直升机界一致关注的关键技术。复合材料在旋翼系统的另外重要应用是直升机桨毂采用了复合材料。法国宇航公司于 20



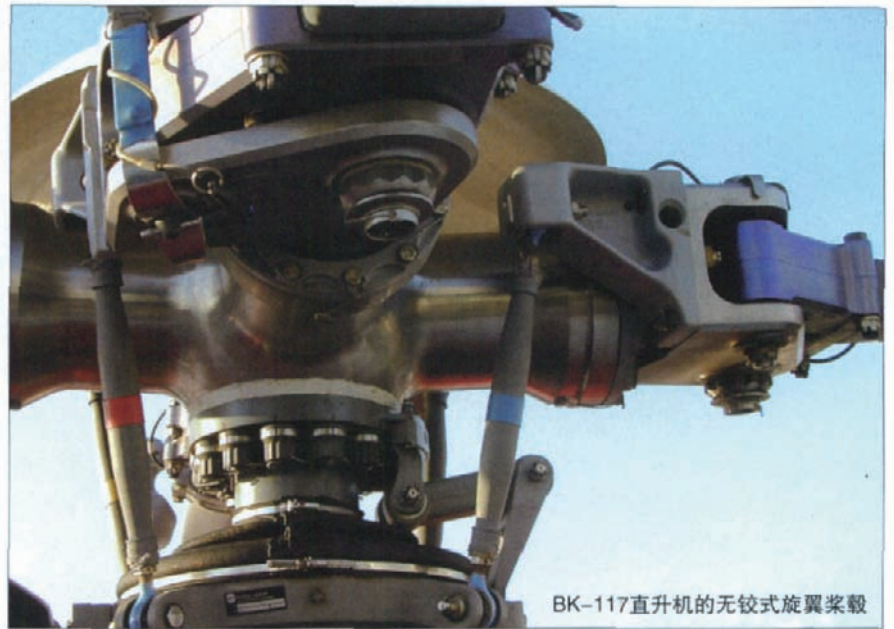
直-11直升机的星形复合材料桨毂

世纪 70 年代后研制成功的星形柔性桨毂是复合材料在旋翼桨毂上的首次应用,由复合材料的无轴承旋翼桨毂代替了金属轴承桨毂。其后,各发达国家的直升机公司纷纷开始研制复合材料无轴承桨毂。先后在多个直升机型号上应用。如德国 MBB 直升机公司首先将复合材料应用于桨叶制造,并研制出用于 Bo-105 的无轴承旋翼系统,后与日本川崎重工合作研制了 BK-117 多用途直升机,同样采用了钛合金的无铰旋翼。英国韦斯特兰直升机公司利用“狗骨头”设计解决了桨叶动力学中不利的挥舞-摆振耦合问题。设计出独特的“山猫”旋翼,接着又开发了 BERP 旋翼技术。直升机桨叶在飞行中除了绕旋翼轴旋转外,还要有变距、挥舞和摆振运动,金属铰接式旋翼的桨毂是通过 3 个金属轴承来实现桨叶的 3 个运动的。由于这些运动具有速度慢、非全周运动的特点,因此,轴承总处于非均匀载荷下工作,且载荷交变,导致轴承寿命低、可靠性差。采用复合材料桨毂后,通过复合材料的特殊弹性变形特点实现桨叶根部的 3 个运动。从而大大增加了桨毂的寿命,提高了可靠性,减小了桨毂的零件数量和重量。到目前为止,已在实践中应用的旋翼形式有铰接式、跷跷板式、无铰式和无轴承式,它们各自的特点如下所示。

(1) 桨毂主要结构形式。

a. 铰接式。

铰接式(又称全铰接式)旋翼桨毂是通过在桨毂上设置挥舞铰、摆振铰和变距铰来实现桨叶的挥舞、摆振和变距运动。典型的铰接式桨毂铰的布置顺序(从里向外)是由挥舞铰、摆振铰到



变距铰。

在轴向铰中除了用推力轴承来负担离心力并实现变距运动外,另一种流行的方式是利用弹性元件拉扭杆来执行这个功能。这样在旋翼进行变距操纵时必须克服拉扭杆的弹性及扭矩,为了减小操纵力,就必须使拉扭杆有足够低的扭转刚度。

铰接式桨毂构造复杂,维护检修的工作量大,疲劳寿命低。因此在直升机的发展中一直在努力改善这种情况。在 20 世纪 60 年代后期开始发展的层压弹性体轴承(橡胶轴承)也是解决这个问题一个较好的方案,现已实际应用。

b. 万向接头式及跷跷板式。

20 世纪 40 年代中期,在全铰式

旋翼得到广泛应用的同时,贝尔公司发展了万向接头式旋翼,并将其成功地应用在总重量一吨级的轻型直升机 Bell47 上。50 年代中期又把万向接头式进一步发展成跷跷板式,研制了总重量达 4t 多的中型直升机 UH-1 和 9t 级的 Bell214 直升机。虽然这两种旋翼形式除了贝尔公司外很少采用,但仅仅 Bell47 型及 UH-1 系列直升机产量就很大,应用也很广泛。

万向接头式旋翼桨毂是 2 片桨叶通过各自的轴向铰和桨毂壳体互相连接,而桨毂壳体又通过万向接头与旋翼轴相连。挥舞运动通过万向接头实现。改变总距是通过轴向铰实现的,而周期变距是通过绕万向接头转动实现。

跷跷板式旋翼和万向接头式旋翼的主要区别是桨毂壳体只通过一个水平铰与旋翼轴相连,这种桨毂构造比万向接头式简单一些,但是周期变距也是通过变距铰来实现。一般变距铰采用拉扭杆来负担离心力。

这 2 种桨毂形式与铰接式相比,其优点是桨毂构造简单,去掉了摆振铰、减摆器,2 片桨叶共同的挥舞铰不负担离心力而只传递拉力及旋翼力矩,轴承负荷比较小,没有“地面

共振”问题。但是,这种旋翼操纵功效和角速度阻尼比较小,为了加大角速度阻尼,这种形式的旋翼都要带机械增稳装置——稳定杆,没有办法改善操纵功效,对于机动性要求较高的直升机,上述缺点就很突出。

c. 无铰式。

从20世纪40年代到60年代,铰接式旋翼是主要的旋翼形式。在长期的应用中这种形式发展得比较成熟,经验也比较多。但是,由于结构复杂、维护工作量大、操纵功效及角速度阻尼小等固有的缺点,这种形式不够理想。因此,从20世纪50年代起,除了简化铰接式旋翼结构外,还开始了无铰式旋翼的研究工作。经过长期的理论与试验研究,20世纪60年代末及70年代初无铰式旋翼进入了实用阶段。带有无铰式旋翼的直升机如德国的Bo-105,英国的“山猫”(WG-13)等,它们取得了成功并投入了批生产。与铰接式旋翼相比,无铰式旋翼的结构的力学特性与飞行的力学特性联系更为密切。这种形式的旋翼的突出代表机型是直9直升机的星形柔性桨毂:它主要是由中央星形件、球面层压弹性体轴承、粘弹减摆器(也称频率匹配器)、夹板和自润滑关节轴承等组成。

d. 无轴承式

以上这些结构形式的桨毂(包括无铰式)都仍然保留了“铰”。因而,结构难以进一步简化,结构重量的减轻也受到限制。因此,旋翼桨毂合乎逻辑的进一步发展就是取消“铰”。无轴承桨毂正是在这种思想指导下发展起来的。无轴承桨毂的主要结构是由单向复合材料制成的柔性梁,柔性梁外端同桨叶相连接,内端同固定在旋翼轴上的连接盘相连。柔性梁在保证一定的弯曲刚度和强度的情况下,扭转刚度很低,起到了挥舞、摆振和变距铰的作用。法国宇航公司的三向柔性桨毂、美国西科斯基公司的交叉梁式桨毂、德国

MBB公司的双柔性梁结构等都是无轴承桨毂的典型代表。无轴承桨毂的优点:桨毂结构简单,零件数量少;具有很大的操纵功效,因而改善了直升机的驾驶品质,这对要求大机动能力的武装直升机特别重要;全复合材料结构,破损安全性能好,只需视情维护,寿命长;外形尺寸小,阻力小,重量轻。

由于无轴承桨毂取消了所有的“铰”,桨叶的挥舞、摆振、变距都要靠柔性梁的挠曲变形来实现。这样,无轴承旋翼的一个突出的特点就是强烈的变距-挥舞-摆振弹性耦合,这个耦合既影响旋翼结构动力学特性,又影响直升机飞行动力学特性。因此,旋翼设计中气动与结构的密切耦合在无轴承旋翼上表现得最为突出和典型,而无轴承旋翼的出现也正是旋翼动力学理论及其综合分析技术发展的结果。

(2) 直升机桨毂的发展历程及方向。

长期以来直升机设计师把旋翼桨毂作为其改进和创新的主要目标,而旋翼桨毂的改进和创新也常常成为直升机更新换代的重要标志。随着材料、制造工艺及结构动力学技术的发展,旋翼桨毂的结构经历了由简单到复杂、再由复杂到简单的发展过程。特别是近20年来,多种不同结构型式的桨毂同时流行,这些桨毂的共同特点是结构简单、重量轻、维护方便、安全可靠。例如海豚直升机的星形柔性桨毂与传统铰接式桨毂相比较,桨毂零件数目减少了近80%,重量减轻了45%,相对成本降低了65%。

近年来发展的带弹性铰的铰接式桨毂,其桨毂、桨叶通过根部的叉形接头直接装在弹性轴承上,与桨毂构成整体结构,主要构件由复合材料制成。同星形柔性桨毂相比,这种桨毂结构更加简单紧凑,重量可减轻10%,成本更低。整体式的桨毂旋翼

轴组件使直升机当量废阻面积减少19%,公里耗油量下降10%。而且,只需视情维护,可靠性大大提高。带弹性铰的铰接式桨毂将会成为未来广泛采用和流行的新的桨毂结构形式。

对简化结构、减少维护及改善驾驶品质的迫切要求是这种桨毂发展的推动力,而复合材料及旋翼结构动力学研究的发展为这种桨毂型式创造了条件。无轴承桨毂是旋翼技术的重大突破,它将是今后大有前途的旋翼形式。

结束语

直升机作为一种“万能”的飞行器,可低空(贴地飞行)、低速(悬停飞行)飞行,不需跑道,可垂直起降。在突发事件的运输、救援、侦察等方面是无可替代的飞行器。直升机也可称为旋翼飞行器,其30%~40%的部件是以不同转速、不同质量旋转的。始终处于振动环境中。有人说,直升机的研制和生产成本、零件数量以及技术难度是同量级固定翼飞机的4~5倍。它的零部件主要以高精度机械加工为主,其形状复杂,精度要求高。固定翼飞机主要是整体外形的加工,包括整体壁板、型架部装、铆接等成形工艺,而对于直升机来说,除了机身部分与固定翼形式相同外,很大一部分是运动部件的加工,包括旋翼加工等,需要特殊工艺。

人类飞上蓝天的理想本来是垂直起降形式的。就像飞鸟一样,同样人类开始旋翼飞行器的试验(1900年)也早于莱特兄弟,但直到1939年第一架直升机VS-300实现升空和控制,比固定翼飞机发明晚近40年。应该说,到目前为止对于直升机的研究,无论是理论和技术都取得很大成就,但还有很多未知的领域,这为广大的立志从事直升机研究的科学技术人员提供了宽广的研究空间。(责编 侧卫)