

# 直升机旋翼设计技术应用现状及发展综述

## Application and Development of Rotor Design Technology for Helicopter

中航工业直升机所 黄文俊 李满福



黄文俊

毕业于南京航空航天大学直升机设计专业,硕士学位,研究员,现任中航工业直升机所旋翼研究室主任、旋翼专业副总师,主要从事旋翼设计和旋翼动力学以及相关的预先研究工作。

本文从旋翼构型技术、桨毂设计技术、桨叶设计技术以及尾桨设计技术的现状和特点对直升机旋翼结构设计技术进行综述,以期为国内的直升机旋翼设计专业的发展提供参考。

直升机旋翼系统包括主旋翼和尾桨,是直升机唯一的升力面、推力面和操纵面,是直升机特有的关键动部件,也是直升机区别于其他飞行器的最显著特点。

旋翼设计技术复杂,涉及直升机总体、空气动力学、飞行力学、动力学、结构力学、疲劳与强度、材料工程、制造工艺、试验试飞等学科,是衡量直升机技术水平的重要标志<sup>[1]</sup>。同时,旋翼系统又与直升机平台上其他系统有着千丝万缕的关系,旋翼设计技术的发展可以推动直升机行业其他技术的发展,从而提升直升机整体研发水平的提高。可以说,谁掌握了更为先

进的旋翼系统设计技术,谁就在直升机研发中抢得先机,站在头列。

### 直升机旋翼结构设计技术发展特点

直升机旋翼系统通常由主旋翼和尾桨构成,主旋翼包括主桨叶、主桨毂、自动倾斜器等,常规尾桨一般包括尾桨叶、尾桨毂以及尾操纵组件等,旋翼系统结构见图1。

旋翼结构设计技术发展过程中主要经历了构型技术的发展,构型的发展又与桨毂设计技术的发展离不开,桨叶技术的发展包含了气动技术、动力学技术、尾桨技术的发展等。



图1 旋翼系统结构示意图

## 1 旋翼构型技术

旋翼构型技术的发展到目前主要经历了铰接式、无铰式和无轴承式等主要发展过程,其发展直接影响着旋翼系统及直升机的升级换代。第一代和第二代直升机以全铰接式和半铰接式以及带金属变距铰的无铰式旋翼构型为主;第三代直升机则随着弹性元件及复合材料的广泛应用发展为星形柔性和球柔性新型铰接式旋翼构型,以及带摆振铰和带弹性材料变距铰的新型无铰式旋翼构型;第四代直升机发展为取消了旋翼挥、摆、扭运动所需轴承的无轴承式旋翼构型,见图2。

在旋翼构型的进化过程中,先进材料和先进工艺技术的发展和应用成为旋翼设计实现革命性飞跃的关键因素之一,在旋翼的设计中扮演着极其重要的角色。对于旋翼设计来说,主要有2个发展方向:粘弹性材料的发展,可以充当桨毂轴承或提供减摆器阻尼等;先进复合材料技术的发展,由于其纤维结构特性,不但大大减轻重量,而且使其有破损安全寿命等优点,除能应用于桨叶设计外,还可大量应用于桨毂的设计。

国外各大直升机公司根据自己的技术特点,不惜投入大量的人力和财力长期进行旋翼设计构型技术研究,分别开展了包括铰接式、星形柔性、球柔性和无轴承旋翼构型的研究,探索新构型旋翼系统在直升机上

的应用,逐渐形成了具有各公司特色的旋翼构型技术,其结果是百花齐放,先进构型不断涌现,形成了世界直升机旋翼构型技术多样化共同发展的局面。例如,美国贝尔公司发展的跷跷板半铰接式旋翼构型技术、美国西科斯基公司双线摆铰接式旋翼构型技术、美国波音公司人字形拉扭条无铰式旋翼构型技术、美国麦道公司无轴承旋翼构型技术、欧直(法国)公司的星形柔性和球柔性旋翼构型技术、欧直(德国)公司的新型无铰式旋翼构型技术、俄罗斯公司金属全铰接式旋翼构型技术等<sup>[2]</sup>。

## 2 桨毂设计技术

旋翼桨毂主要由中央壳体、支臂连接件、减摆(阻尼)器、金属或弹性轴承等组成。桨叶通过桨毂与旋翼轴相连接,作用在桨叶上的载荷通过桨毂传递给旋翼轴及操纵系统再传

递给机体结构,桨毂在承受由桨叶传递的离心力的同时还要承受挥舞和摆振交变载荷<sup>[3]</sup>。直升机旋翼构型技术的发展史主要是桨毂构型技术的发展史,在桨毂构型的发展过程中,其主要零部件随着桨毂构型、先进材料、先进工艺的发展而不断改进。

全铰接式桨毂具有挥舞铰、摆振铰和变距铰三铰分开及挥舞摆振两铰重合2种形式,其技术特点是用轴承摆动实现桨叶的挥舞、摆振和变距运动,为保证金属轴承具有良好的工作环境,桨毂通常设有润滑系统和密封系统。因此该构型具有零件数目多、结构复杂、重量大、可靠性低、使用维护成本高等特点。目前发展了用弹性轴承替代金属轴承的全铰接式旋翼,大大降低了重量和零件数量。

与全铰接式旋翼构型相比,半铰接式旋翼构型通常指只具有挥舞铰和变距铰,没有摆振铰的结构型式。在半铰接式旋翼构型发展过程中形成了跷跷板式和万向铰式2种旋翼构型。跷跷板式旋翼型技术特点是其2片桨叶通过各自的轴向铰和旋翼桨毂壳体相连接,没有垂直铰,桨毂壳体通过挥舞铰和旋翼主轴相连接,桨叶的挥舞运动通过挥舞铰来实现。万向铰式旋翼技术特点是各片桨叶通过各自的轴向铰和中央桨毂壳体相连接,没有垂直铰,桨毂中央壳体通过万向接头和旋翼轴相连接,桨叶

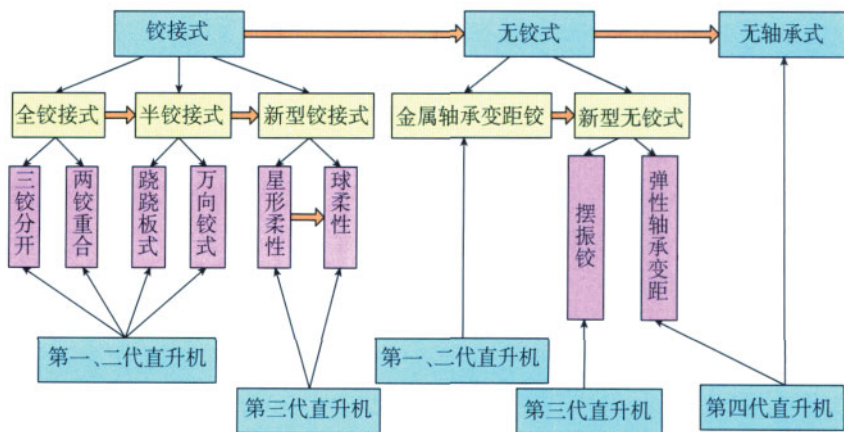


图2 旋翼构型技术与直升机主要发展历程

的挥舞运动通过万向接头来实现。

全铰接式和半铰接式桨毂中央壳体、支臂连接件等相关零部件材料一般采用合金钢,目前正逐步发展为采用高强钛合金材料。

星形柔性桨毂是利用复合材料的柔性变形,使得其作用如同一个铰接式桨毂,但又无通常的铰链机构,

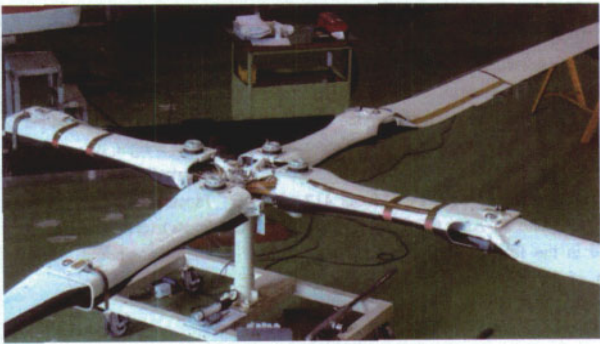


图3 无轴承旋翼

中央壳体为复合材料星形件,支臂连接件为复合材料上下夹板形式。

球柔性桨毂是由星形柔性桨毂发展来的,省略了柔性臂和关节轴承,以一个弹性轴承替代铰接式旋翼的挥舞铰、摆振铰和变距铰,实现桨叶的挥舞、摆振和变距运动,中央壳体材料一般是高强钛合金材料,支臂连接件是钛合金材料或采用复合材料上下夹板的形式。

无铰式旋翼通常是指保留挥舞铰、摆振铰和变距铰中的一个铰的旋翼结构形式,在无铰式旋翼构型发展过程中目前存在带变距铰无铰式和带摆振铰无铰式2种旋翼构型。

带变距铰无铰式旋翼构型的技术特点是取消挥舞铰和摆振铰,利用桨叶根部或桨毂柔性段来实现桨叶的挥舞和摆振运动,利用金属轴承或弹性轴承作为变距铰实现桨叶的变距运动;带摆振铰无铰式旋翼构型的技术特点则是保留摆振铰,取消挥舞和变距铰,通过弯扭柔性件的弹性变形来实现桨叶的挥舞和变距运动。由于取消了2个铰,相对于铰接式旋翼来说,无铰式旋翼结构十分简单,零件数目少、重量轻、可靠性高、维护

简单,具有较低的全寿命周期成本。

无轴承旋翼通常指没有挥舞铰、摆振铰和变距铰。其技术特点是通过复合材料柔性梁元件来实现桨叶的挥舞、摆振和变距运动,代替传统三铰的功能,桨叶的挥舞和摆振变形都靠弹性变形来实现,而桨叶的变距操纵则是靠柔性梁元件的扭转变形来得到,变距操纵力通过和桨叶刚性相连的刚性元件——袖套来传递。由于不再需要承受严重载荷寿命较低的金属轴承和弹性轴承,桨毂的零件数目急剧下降,重量、废阻和费用也都得到降低,这

种构型的旋翼系统可以达到无限寿命设计。

无轴承柔性梁元件需要3个方向的变形运动,带来了柔性梁元件材料、设计和制造等诸多难题。同时由于存在复杂的弹性耦合、运动耦合,并引入了多路传力结构,使得无轴承旋翼动力学、柔性梁元件的设计问题变的比其他构型更复杂(图3)。

直升机减摆(阻尼)器的发展主要经历了磨擦减摆器、液压减摆器、粘弹阻尼器这几种型式。磨擦减摆器是在20世纪40年代初开始采用的,在20世纪50年代末,液压减摆器开始在直升机上得到广泛使用,到了20世纪60年代末,随着橡胶工业的发展,由高阻尼硅橡胶和金属混合夹层结构的粘弹阻尼器开始在第三代直升机上大量使用。

在全铰接式旋翼构型中,由于挥舞铰、摆振铰和变距铰的存在使桨毂中存在大量的各式各样的金属轴承,导致桨毂结构复杂、零件数目多、制造成本高、维护费用昂贵、维护工作量大,而且安全性比较差。为简化桨毂,20世纪60年代初,世界上开始研制旋翼系统所用的弹性轴承取代

挥舞铰和摆振铰,开始只是在尾桨中应用,70年代初用于旋翼系统,在球柔性旋翼构型中由弹性轴承实现挥舞铰、摆振铰和变距铰三铰合一的功能,目前在全铰接式、万向铰式、新型无铰式中均取代金属轴承。正在发展的无轴承旋翼桨毂中则完全取消了轴承,用复合材料挠性件来适应桨叶的各种运动。

### 3 桨叶设计技术

直升机旋翼桨叶设计的发展始终围绕着2个方面在不断改进,一是新材料新工艺的使用,二是桨叶结构设计改进。桨叶设计技术的发展趋势就是性能、操纵性、稳定性、生存力以及可靠性等越来越高,结构越来越简单,维护越来越方便,使用寿命更长甚至具有无限寿命。

在新材料新工艺的使用上,桨叶的材料体系经过了钢木混合结构桨叶、金属桨叶、玻璃钢复合材料桨叶、新型复合材料桨叶等发展过程。新材料新工艺的使用不仅能大大提高桨叶的寿命,而且能减少桨叶重量,降低使用成本,桨叶的寿命从钢木混合结构桨叶的几百h到新型复合材料桨叶的无限寿命。

钢木混合结构桨叶是最早应用于旋翼的桨叶结构型式,一般由带锥度的钢大梁、木质翼肋和蒙皮制成,在外面包覆织物(木材-织物-钢梁),这种钢木混合结构桨叶一般将重心定在25%弦长,采用如23012的飞机用翼型,没有专门的直升机用翼型,且寿命较短,平均寿命只有600h。

金属桨叶是在钢木混合结构桨叶之后发展起来的,采用挤压成形的管状D型轻合金大梁、金属翼肋和蒙皮、泡沫或蜂窝夹层结构后段件、连接桨叶大梁到桨毂支臂的接头,桨尖整流罩等胶接构成,前缘包有不锈钢或钛合金包片<sup>[4]</sup>。由于工艺限制,金属桨叶加工难度较大,一方面在几何外形上设计相对简单,如带

NACA0012 对称翼型,气动效率的提高受到一定限制;另一方面受到金属材料较低的疲劳特性等影响,在寿命上也仅能达到 1200h 左右。

在全复合材料桨叶之前还存在混杂构成复合材料桨叶,即采用复合材料蒙皮、金属大梁的复合材料翼肋和蒙皮的金属/复合材料桨叶构型。

玻璃钢复合材料桨叶主要由玻璃钢复合材料大梁、玻璃纤维或碳纤维蒙皮、泡沫或蜂窝填芯、桨根堵盖、接头填块、连接桨叶到桨毂支臂的金属衬套等模压成型,设置后缘调整片,前缘包有不锈钢或钛合金包片,采用专为旋翼设计的翼型,寿命可以达到近 4000h。

新型复合材料桨叶在结构上与玻璃钢复合材料基本一致,但是采用了以碳布为代表的高性能复合材料作为大梁和蒙皮,以及专为旋翼设计的高效翼型,可以达到无限寿命。

桨叶结构设计改进一方面是对桨叶结构本身进行细节的优化设计,对桨叶根部接头构型等进行设计改进,对桨叶平面形状、几何扭转角、翼型配置等进行优化,采用新的桨尖形状等,在对桨叶剖面形状进行改进时,在由钢木混合结构到金属桨叶再到复合材料桨叶发展过程中出现了



图4 涵道式尾桨

工型梁、C 型梁、D 型梁、多腔梁等多种剖面形状。

桨叶结构设计改进的另一个重要方面是不断研究为旋翼专门设计的翼型。直升机旋翼的气动性能主要取决于翼型,如法国 OA 翼型系列中 OA4 比 OA3 的最大升力有明显提高,OA5 则扩展了上翼面层流范围,在最大升力稍有降低的情况下阻力系数比 OA3 减少了 18%,比 OA4 减少了 20%。先进旋翼翼型设计对于实现直升机性能改进的目标具有重要作用,因此旋翼气动技术一直是世界直升机技术领域中研究的重点和热点,其理论不断发展,技术不断创新,翼型不断发展,已经形成了现代旋翼翼型族。美国、法国、德国和俄国等国大量开展了新的直升机旋翼翼型研究,并应用于各自的直升机型号,如美国波音公司 VR 系列、美国休斯公司 HH 系列、美国西科斯基 SC 系列、法国 OA 系列、德国 DMH 系列、俄罗斯 TsAGI 系列。

#### 4 尾桨设计技术发展

自身尾桨技术方面,在构型设计、尾桨毂设计和尾桨叶设计上与主旋翼既有相同之处,又有其自身特点。在尾桨的发展过程中,除发展了全金属铰接式尾桨、跷跷板式、万向接头式、球柔性、无铰式、无轴承尾桨等常规外尾桨,还发展了涵道式尾桨(图 4),此外在直升机的设计上还发展了无尾桨设计技术。常规尾桨在布置上有十字交叉、剪刀式等。

### 发展趋势预测

#### 1 传统旋翼构型不断升级换代

旋翼设计技术的发展与新材料、新工艺的发展是密不可分的,弹性材料及复合材料的发展不仅仅带来全新旋翼构型如星形柔性、球柔性等的发展,同样给传统的全铰接式、半铰接式旋翼构型的发展带来了新的生命力,如弹性轴承全铰接式旋翼、金属轴承万向铰旋翼、传统无铰式旋翼

等使用弹性轴承替代金属轴承后,可大大减轻旋翼重量,减少零件数量,提高使用寿命,并减少维护工作量。传统旋翼构型在新材料、新工艺的带动下将不断升级换代,其远景目标是极大程度地提高旋翼的使用维护性能,提高旋翼寿命。

#### 2 旋翼新构型不断涌现并得到发展

主动控制的技术发展使旋翼技术的发展发生新飞跃,智能旋翼的发展已经成为未来旋翼技术发展的一个重要方面。智能旋翼是为了从根本上解决传统旋翼系统构型存在的问题而发展的未来新型的旋翼系统型式。

其他如大型铝基复合材料桨毂中央件制造技术、新型锥形、柱形弹性轴承制造技术、新型液弹阻尼器、磁流变阻尼器、电流变阻尼器等制造技术也在不断进行探索和研究,这些新技术的发展和普及在促进直升机旋翼构型多样化的同时,也将不断细化直升机旋翼设计技术,不断推进旋翼技术的发展。

### 结束语

直升机旋翼结构设计技术新概念、新理念、新方法和新技术的突破与发展,直接推动着直升机技术的发展和更新换代。本课题从旋翼构型技术、桨毂设计技术、桨叶设计技术以及尾桨设计技术的现状和特点对直升机旋翼结构设计技术进行综述,以期为国内的直升机旋翼设计专业的发展提供参考。

#### 参考文献

- [1] 邓景辉. 直升机旋翼技术发展趋势. 直升机, 2007(2): 2-10.
- [2] 李满福. 国外旋翼桨毂构型技术综述. 直升机技术, 2010(4): 64-70.
- [3] 张呈林, 张晓谷. 直升机部件设计. 南京: 航空专业教材编审组, 1986.
- [4] 杨乃宾, 倪先平. 直升机复合材料结构设计. 北京: 国防工业出版社, 2008.

(责编 良辰)