

复合式高速直升机传动系统关键技术分析

Key Technologies of Transmission System of High Speed Helicopters

■ 余震 王永红/中国航发动研所

直升机可以野外垂直起降、悬停作业，具有良好的低空机动性能，在军民领域具有其他飞行器不可替代的重要作用。但与固定翼飞机相比，直升机存在飞行速度低、航程短等不足，因此高速飞行已成为未来直升机发展的趋势之一，而传动系统是其中的一项核心关键技术。

高速直升机可分为倾转式、复合式及停转式（如图1所示）。倾转旋翼机既可以实现直升机模式垂直起降，又可在旋翼倾转后以螺旋桨飞机模式飞行；复合推力直升机通过加装辅助推力装置、增加机翼给旋翼卸载、降低旋翼转速等措施实现高速平飞；停转式直升机以直升机模式垂直起飞，速度达到一定程度后，旋翼停止转动，变为固定翼模式实现高速飞行。

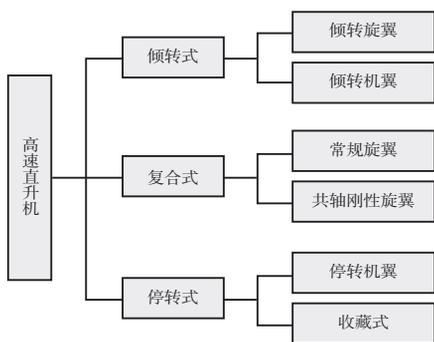


图1 高速直升机分类

复合式高速直升机

复合式高速直升机的特点是旋翼在飞行包线内的功能变化相对较小，确保其低空低速性能和近地面机动能力不低于常规构型直升机，同时



图2 S-97“袭击者”直升机

实现了较高的平飞速度。有数据显示，高速直升机中，以复合式高速直升机的类型居多，占50%以上。

常规旋翼复合式直升机

常规旋翼复合式直升机在常规直升机上加装辅助升力（一般为机翼）以及辅助推力装置（一般为螺旋桨）实现高速飞行。随着直升机飞行速度的提高，机翼升力逐渐增大，从而为旋翼卸载。该类直升机以美国的AH-

56、X-49和俄罗斯的X1为代表。

共轴刚性旋翼复合式直升机

共轴刚性旋翼复合式直升机的主旋翼系统由两副共轴反转的刚性桨叶构成，主要有XH-59、X2、S-97等。其中，S-97“袭击者”直升机号称是目前最先进的高速直升机（如图2所示）。

20世纪70年代，美国西科斯基公司研制了高速直升机验证机XH-

59, 于1973年7月26日首飞, 1980年8月速度达到了487km/h。该直升机主旋翼动力为一台PT6T-3涡轴发动机, 前行动力则由两台涡扇发动机提供。XH-59验证机传动系统为两级传动, 第一级为锥齿轮换向减速, 第二级为复合行星共轴输出。

西科斯基公司在XH-59验证机的基础上融和新技术, 于2005年公布了新型复合推力验证机X2。该直升机采用共轴式双旋翼带尾推进螺旋桨构型, 起飞重量2406 kg, 动力为一台T800涡轴发动机。X2验证机巡航速度达到463km/h, 俯冲速度达到481km/h。该验证机传动系统由分路减速器、共轴减速器、推进减速器、动力传动轴组件、尾传动轴组件等组成, 采用圆柱齿轮内外啮合形式实现共轴反向输出。

2010年10月, 西科斯基公司开展轻型战术直升机S-97“袭击者”原型机的设计。S-97原型机于2014年10月首次亮相, 2015年3月开始地面测试, 2015年5月22日成功首

飞。S-97具备低速机动以及在速度超过370km/h时的大过载转弯能力, 这源于其采用共轴对转双旋翼加尾部螺旋桨设计。发动机则采用GE公司生产的T700第四代涡轴发动机。

俄罗斯卡莫夫设计局于2007年首次公开高速直升机(PSV)项目, 推出了卡-92(如图3所示)等复合式高速直升机。卡-92采用共轴刚性双旋翼布局, 4片桨叶, 尾部为共轴式螺旋桨; 采用两台克里莫夫公司的VK2500发动机。卡-92为9~12级的高速直升机, 能搭载21名乘客, 速度可达350km/h。

复合式高速直升机传动系统特点

高速直升机通常为共轴主旋翼带尾桨构型。直升机构型的不同也带来了传动系统的差异, 与常规直升机传动系统相比, 高速直升机传动系统具有以下特点。

功率分配有较大差异

高速直升机给主旋翼和辅助推

进螺旋桨传递功率, 功率分配随飞行状态改变更大。常规构型直升机的尾桨最大功率占传动系统传递总功率的20%~25%, 复合式高速直升机的推进螺旋桨最大功率占传动系统传递总功率的60%以上, 因此, 传动系统的方案设计应更加注重辅助推进传动系统的布局, 以获得较高的功重比。

适应共轴刚性旋翼要求

高速直升机主旋翼为共轴刚性旋翼, 对传动系统结构有特殊要求。首先, 要求主减速器能实现共轴双路输出; 此外, 共轴刚性旋翼操纵与常规直升机的操纵方式有很大不同, 其要求内旋翼采用内操纵, 因此旋翼轴内孔需有较大空间。

传动系统具备变速能力

高速直升机的飞行速度可达400km/h以上, 为避免高速前飞时前行桨叶激波, 需降低旋翼转速。降低旋翼转速可以通过发动机变速和传动系统变速来实现, 发动机的正常工作的转速范围较小, 通过降发动机转速来降旋翼转速的幅度很有限, 因此传动系统变速十分必要。目前直升机变速传动存在一系列尚待解决的技术难题, 如多传动链主减速器的结构设计、换挡过程的冲击、非工作传动链的摩擦等, 因此尚未在现有高速直升机上得到应用。

复合式高速直升机传动系统关键技术分析

变速传动技术

目前, 航空用传动变速装置可分为两类: 一类为离合器变速装置, 另一类为差动行星变速装置。离合器变速装置利用超越离合器的差速超越性能来实现两种不同转速的输出。一般



图3 俄罗斯卡-92高速直升机模型

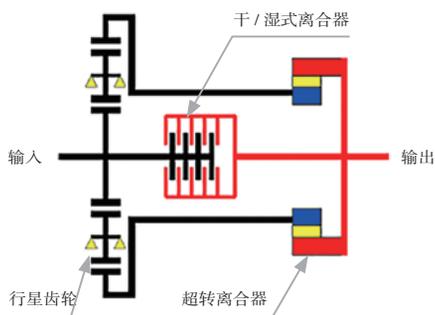


图4 同轴双速比传动原理图

情况下，离合器变速装置由多片式离合器和斜撑离合器并联，通过定轴圆柱齿轮传动或行星齿轮传动来实现减速，利用多片式离合器的通断来实现功率传递路线的转换。接通多片式离合器时，功率流直接从输入轴—多片式离合器—输出轴输出，此时斜撑离合器处于差速超越状态；断开多片式离合器，功率流经过输入轴—齿轮副—斜撑离合器—输出轴输出。差动行星变速装置通过控制齿圈的速度来实现不同转速的输出。

图4为一种能提供两个速比的传动机构方案。多盘离合器断开时，太阳轮输入，依次通过两个惰轮、齿圈、超越离合器，驱动输出轴，有一定的减速比。多盘离合器接合时，输入轴与输出轴直接连接，不减速输出。此双速比传动构型在波音公司研制的A-160T“蜂鸟”无人直升机原型机上有应用，如图5所示。不同的是该无人直升机在低速飞行时采用较低的转速输出，而高速直升机要求高速飞行时采用较低的转速输出。

变传动比的传动方案虽然能从原理上实现，但还存在一些技术难点。若采用离合器变速装置方案，需攻克多盘离合器控制、过渡过程中离合器的摩擦、冲击及功率丢失等技术难

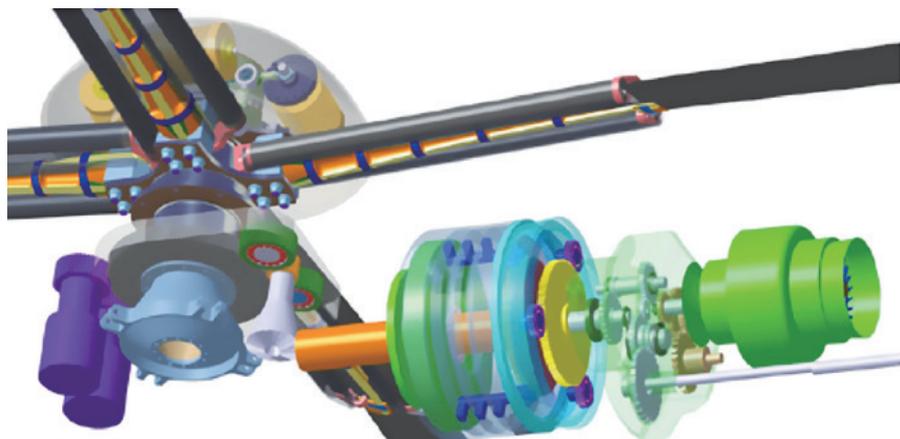


图5 采用离合器变速方案的A-160T直升机传动系统

点；而采用差动行星传动方案，则需要另外一个可变速的驱动单元。同时，变速过程的发动机控制和飞行控制也需要探索验证。此外，可变速比的传动系统会导致零部件数量增加，传动系统的质量增加，使传动系统的可靠性和效率降低。

共轴输出技术

共轴刚性旋翼复合式直升机可以充分发挥前行桨叶的升力潜力，突破常规构型直升机前飞速度的限制，是高速直升机的关键技术所在。实现共轴反转双输出的传动系统构型主要有圆柱齿轮内外啮合传动、锥齿轮传动和复合行星传动三种。

X2技术验证机传动系统采用圆柱齿轮内外啮合传动，其特点是所有齿轮均为定轴传动，受结构限制，承载能力有限。

锥齿轮共轴输出构型，此种方案结构简单，但没有功率分流，承载能力有限。

复合行星共轴传动应用于卡-50等直升机传动系统，通过封闭差动实现旋翼轴共轴反转输出。复合行星轮系的优点是承载能力强、效率高，但存在零件数量多，体积较大，设计、

加工及装配困难等问题。此外，共轴刚性旋翼复合式直升机上旋翼通常采用内操纵，受结构限制，复合行星共轴传动无法满足要求。

结束语

复合式高速直升机具有速度快、体积小、结构紧凑、机动性好等优点，将成为舰载直升机、武装直升机、无人直升机的优选构型，是未来直升机的发展方向之一，而传动系统也应适应高速直升机的需求，同步发展。复合式高速直升机传动系统相比常规直升机有共性也有不同，两者的主要作用均是功率传递与分流，不同之处在于复合式高速直升机要求机翼卸载，传动系统必须实现两种速比传动，其双旋翼输出要求传动系统采用复合行星等特殊构型。由于直升机高速机动带来大的动载荷，从而对传动系统提出了更高的质量、寿命和可靠性要求。因此，在研制复合式高速直升机时，必须对传动系统进行重点攻关，突破各项关键技术。

航空动力

(余震，中国航发动研所，工程师，主要从事直升机传动系统设计研究。)