

# 直升机脂润滑减速器关键技术探讨

## Discussion on Key Technology of Helicopter Grease-Lubricated Gearbox

■ 周银锭 潘文斌 刘川 谢阶栋 / 中国航发动研所

直升机脂润滑减速器是利用航空润滑脂替代传统航空润滑油的润滑方式，确保减速器在不降低可靠性的前提下适当减轻质量，并提升直升机的生存能力，现已成为相关领域重点关注的方向之一。

**传** 动系统作为直升机三大关键部件（传动系统、发动机、旋翼）之一，其主要作用是将发动机的功率和转速通过一定比例传递给主旋翼和尾桨，并承受主旋翼和尾桨的气动载荷。传动系统由主减速器、中间减速器、尾减速器及传动轴系组成。其中，减速器的润滑方式通常为压力喷油润滑和飞溅油润滑，以上两种润滑方式对减速器的内部结构设计要求高，油池底部的润滑油增加了减速器的质量，若减速器采用脂润滑设计，能确保在不降低可靠性的前提下适当减轻质量，且显著提升传动系统的抗弹击性能力和直升机的生存能力。开展脂润滑减速器设计与验证技术，有助于快速提升我国在脂润滑减速器核心技术与自主创新能力方面的水平，进一步提升直升机生存力。

### 脂润滑减速器发展现状

由于脂润滑减速器抗弹击能力强，已在AH-64“阿帕奇”、A-129“猫鼬”等成熟机型上得到应用。

AH-64直升机具备较强的攻击能力、抗弹击能力及生存力，该机型配装一套较为先进的单旋翼传动系统，12.7mm或23mm子弹击



应用脂润滑减速器的AH-64直升机

中该系统关键部件后仍能继续工作1h，这主要得益于AH-64直升机的中间减速器、尾减速器均采用脂润滑结构，选用MCG-68-83（MIL-G-83363（USAF））润滑脂。其中，中间减速器安装在尾水平梁底座上，将水平轴的功率传递到尾斜轴，输入端布置一个冷却风扇以利于中间减速器、尾减速器散热，输出端通过柔性联轴片与尾斜轴连接；尾减速器安装在尾斜梁底座上，将尾斜轴的功率传递到尾桨。中间减速器、尾减速器均配装温度传感

器、速度传感器，分别用以监控减速器内部温度及振动限制值，因无须滑油供应系统，脂润滑减速器有效地降低了成本和减轻了质量，提高了可靠性。

美国南卡罗来纳州大学以AH-64直升机的脂润滑减速器为平台，针对中间减速器产生无法解释的过热、尾减速器输出密封泄漏、中间减速器通气孔喷脂等现象，开展了一系列探索性研究试验。试验结果表明：润滑脂在工作过程中不能始终保持半固体黏度，会分离为



AH-64直升机使用的脂润滑尾减速器



AH-64直升机使用的脂润滑中间减速器

固体、液体两种状态；减速器的振动与其内部温度息息相关，而温度对润滑脂的黏度有一定影响，因此润滑脂黏度的改变将直接影响减速器振动信号；通过开展两项试验探索通气孔喷脂的特征及原因，因油脂特性迅速改变，导致气穴和泡沫的产生改变了动态特性而造成油脂黏度减少。

意大利莱奥纳多公司研制的一种全天候轻型反坦克武装直升机A-129，是欧洲第一型武装直升机，具有抗弹击、抗坠毁、红外抑制等战场生存能力。中间减速器、尾减速器均采用脂润滑结构，选用SYN Fech NS-44 05-FG绵兰脂，减速器上各关键润滑点均设计有供润滑脂进入和储存的空间，以保证在机匣遭遇弹击损伤时润滑脂不会完全漏光，通过试验证明减速器具备安全工作45min的能力。

国内鲜见关于采掘、运输机械用低速传动脂润滑减速器的报道，主要是针对润滑脂的性能及开放式

脂润滑齿轮、轴承、花键的研究。例如，中国石油化工有限公司王丹等对开式齿轮润滑脂相关设计因素、主要性能评价方法等方面开展研究，得出了一套根据不同工况、润滑方式的开式齿轮润滑脂选取方法<sup>[1]</sup>；太原理工大学李新东等对工作环境较恶劣条件下的半流体润滑脂减速器开展了研究，该类减速器的齿轮副多数属于低速重载传动，工作中启动频繁，减速器的润滑油泄漏比较严重，引起运动副润滑不良，致使减速器损坏<sup>[2]</sup>。

直升机脂润滑减速器与其他领域的小型低速脂润滑减速器在技术上有一定的通用性，二者所面临的挑战和困难也类似，但直升机脂润滑减速器由于使用工况及技术要求更高，导致发展速度更为缓慢。目前，脂润滑结构在直升机传动系统上主要应用于轴承支座，并对中间减速器、尾减速器内部的脂润滑轴承和花键进行了设计及试验验证，而脂润滑结构的中间减速器、尾减速器

研究仍停留在概念探索阶段。

## 直升机脂润滑减速器技术特点

与传统的直升机油润滑减速器相比，脂润滑减速器具有以下几种技术特点。

一是抗弹击能力强。传统的油润滑减速器在受到弹击后滑油易流失，润滑脂由于其半固半液的膏体状态而具有使用方便、易于保持在滑动表面上、不易流失与泄漏、温度范围比油润滑广、能长期保持稳定润滑的特性，可大幅提升减速器的抗弹击能力。

二是内部结构较简单。为有效润滑齿轮、轴承等零件，油润滑减速器的机匣、端盖等壳体内部设计有复杂的油路、油兜等集油结构。脂润滑减速器因润滑脂易于附着，在常温下可附着于垂直表面不流失，因此内部无须设计复杂的通油、集油结构。

三是有利于减轻质量。油润滑减速器为储油其机匣底部设置了大油池，工作时要加入定量的滑油，尤其对于压力喷油润滑减速器另需安装一套独立的润滑系统，大大增加了减速器的质量。润滑脂因具有润滑油所不可替代的黏附性、剪切和离心稳定性、抗磨损性等特点，相比于滑油可减少用量以达到润滑效果，且机匣底部无须设计大油池以减轻质量。

四是密封性强。脂润滑减速器的润滑方式与密封结构简单，能有效封住污染物和灰尘，防锈性能与热氧化安定性能优良。

## 直升机脂润滑减速器关键

## 技术

脂润滑减速器虽具备一定的技术优势,但存在润滑脂不易更换、流变特性及摩擦力矩较润滑油大等特点,导致脂润滑减速器研制中存在维护性较差、散热能力较弱等技术难点。要实现脂润滑减速器在直升机传动系统上的应用,需着力对以下关键技术进行分析研究。

### 摩擦性能及流变特性分析技术

润滑脂是由一种或多种稠化剂分散在一种或多种液体润滑剂中得到的介于半流体到固体之间的具有非牛顿流体特征的一类润滑剂。与传统油润滑减速器相比,润滑脂运动的特性复杂,散热能力低。不同的温度、转速、载荷以及流变模型的选择,对润滑脂摩擦性能及流变特性有影响。温度升高将导致润滑脂的油膜稳定性降低,进而导致表观黏度下降,摩擦表面更加粗糙,摩擦系数增大;转速增大,油脂表观黏度减小,承载能力变弱,油膜厚度变薄,摩擦磨损能力变弱等。因此,润滑脂流变模型的选择、转速因素分析、温度因素分析、载荷因素分析,是开展润滑脂摩擦性能及流变性能分析的重要研究内容。

### 齿轮及轴承热平衡分析技术

直升机减速器是一个在重载条件下高速旋转的机械部件,高速旋转的齿轮箱内齿轮带动润滑油/润滑脂的流动属于固定运动刚体与流体的相互作用问题,在减速器热平衡问题中,润滑脂和空气是实现齿轮、轴承发热量传导并散发的核心介质。减速器温度场的热平衡分析涉及到了摩擦学、传热学(流体传热、固体传热)、非线性流体力学等多个研究领域,是一个综合性较强的研

究问题。与传统油润滑减速器相比,脂润滑减速器由于齿轮和轴承承载较大、发热量大,在实际运转过程中减速器内部温度高于润滑脂工作温度限制值,导致减速器内部热膨胀而出现通气孔喷脂、输出密封漏脂等现象。

基于润滑脂摩擦性能及流变特性,进行脂润滑齿轮和轴承发热量和热平衡分析、减速器润滑脂的非线性动力学建模与分析、计算流体力学的热平衡建模与分析,以获得在不同工况下脂润滑齿轮和轴承表面的温度场,是脂润滑齿轮及轴承热平衡分析的重要目标。

### 结构设计技术

脂润滑减速器比传统的油润滑减速器在结构设计方面较为简单,体现在机匣和端盖上无须过多地考虑油路、油兜设计。但由于直升机飞行运动及减速器结构限制的特殊性,对减速器的润滑要求高,润滑方案及机匣设计存在一定难度。需根据减速器热平衡仿真分析结果,考虑脂润滑的特点及润滑脂润滑的特殊性,开展脂润滑减速器散热结构、监控结构、润滑结构与维护方案设计;结合减速器内部齿轮齿面运动及接触应力分析,开展脂润滑齿轮的齿面设计;考虑轴承载荷、转速等工况要求,开展基于脂润滑的轴承摩擦功耗计算分析技术、轴承材料匹配设计;开展密封的选型、结构设计、传热特性分析及动态特性分析。

### 可靠性与维护性设计技术

直升机油润滑减速器通常在油池底部安装有金属屑磁性探测器,可在飞行过程中探测因减速器内的损坏或过度磨损所造成的铁磁颗粒

出现,并及时发出信号。考虑到润滑脂黏度大,不易使铁磁颗粒流动等因素,脂润滑减速器不适合安装金属屑磁性探测器,减速器内部若出现齿轮及轴承的剥落、断裂等故障将无法监控。现有脂润滑减速器是通过安装温度及振动传感器或选用一套故障检测系统以解决此类问题。因此,如何解决对减速器内部零件的监控是提升减速器可靠性设计的难点。此外,油润滑减速器安装有泄油口,考虑到润滑脂的流动特性,在脂润滑减速机匣上应合理地布置排脂口,并逐步延长注脂周期。开展减速器振动和温度关系分析、脂润滑齿轮及轴承等故障评估、排脂口结构设计、注脂周期设计等是实现提升脂润滑减速器维护性、可靠性的关键技术点。

## 结束语

从提高直升机减速器抗弹击能力、系统结构简单性、可靠性及维护性等方面综合考虑,采用脂润滑减速器结构应是提升直升机生存力的优选构型。目前,国内脂润滑减速器技术成熟度较低,急需加大脂润滑减速器关键技术的研究力度,尽快将脂润滑减速器应用在直升机上。

**航空动力**

(周银铨,中国航发研研所,高级工程师,主要从事直升机传动系统设计研究与适航工作)

### 参考文献

- [1] 王丹,刘洋.浅谈开式齿轮润滑脂的设计[J].石油商技,2013(05):28-32.
- [2] 李新东.半流体润滑脂在矿用减速器上的应用研究[D].山西:太原理工大学,2011.