

直升机传动系统面齿轮传动技术的发展

The Development of Face Gear Transmission Technology of Helicopter Transmission System

■ 王俊 潘文斌 / 中国航发动研所

随着直升机对传动系统质量、体积、噪声、效率、承载能力和可靠性要求的不断提高，具有动力分流效果好、质量轻、体积小、噪声低、效率高、承载能力强和可靠性高的面齿轮传动技术被越来越多地应用到传动系统中。

直升机传动系统主要由主减速器、中间减速器、尾减速器、传动轴等组成，功用是将发动机的功率按一定的比例传送至主旋翼、尾桨和各附件，同时承受发动机、主旋翼和尾桨的复杂载荷。直升机性能在很大程度上取决于传动系统的性能。随着新构型、新部件、新技术的不断涌现，面齿轮传动将得到广泛应用。

面齿轮传动技术现状及发展

航空齿轮对传递功率、齿轮精度和表面粗糙度等都有很高的要求，研发制造高精密和高传动性能的面齿轮是面齿轮研究课题的重中之重，也是面齿轮研究工作的发展趋势。

美国波音公司、伊利诺伊大学、美国国家航空航天局（NASA）格伦研究中心、美国空军研究实验室、格里森公司和加拿大北星公司，从不同角度对面齿轮进行了大量研究，其主要的研究内容包括面齿轮传动的啮合原理、载荷分析、有限元强度计算、精粗加工以及超精加工工艺方法及其设备、载荷分流试验以及直升机传动系统样机试验、疲劳



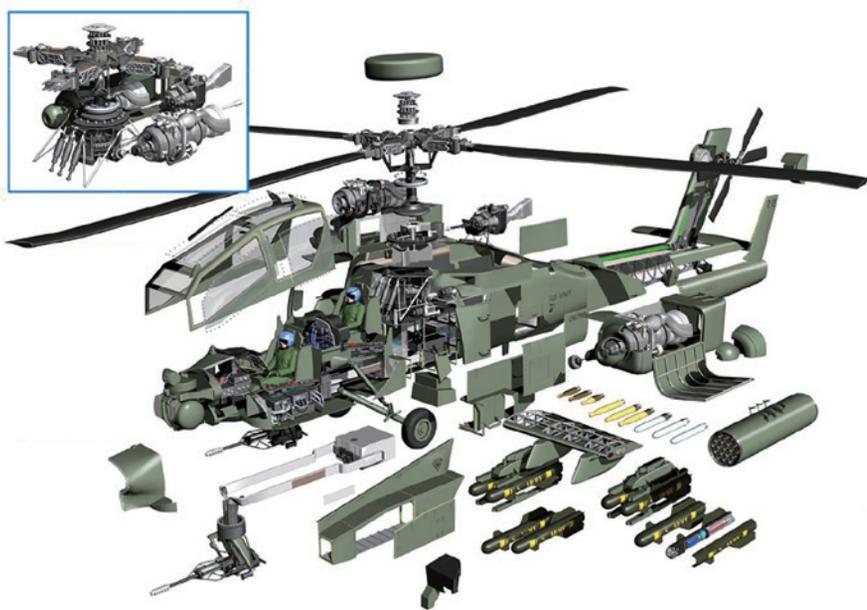
应用面齿轮传动技术的新一代阿帕奇武装直升机

试验等各方面。

在面齿轮设计方法理论研究方面，伊利诺伊大学的利特温教授自20世纪90年代开始，在白金汉和布卢姆菲尔德对面齿轮啮合研究的基础上，系统研究了面齿轮的啮合原理，从啮合几何学原理上分析了根切和齿顶变尖的条件，采用有限元的方

法研究了面齿轮的接触应力和弯曲应力，研究了面齿轮的修形技术，开发了基于Matlab的面齿轮接触分析（TCA）程序，同时发展了点接触面齿轮，为将面齿轮应用于高速、重载传动打下了基础。

1988年，美国军方与NASA联合进行的先进旋翼传动系统研究（ART）



阿帕奇直升机结构图

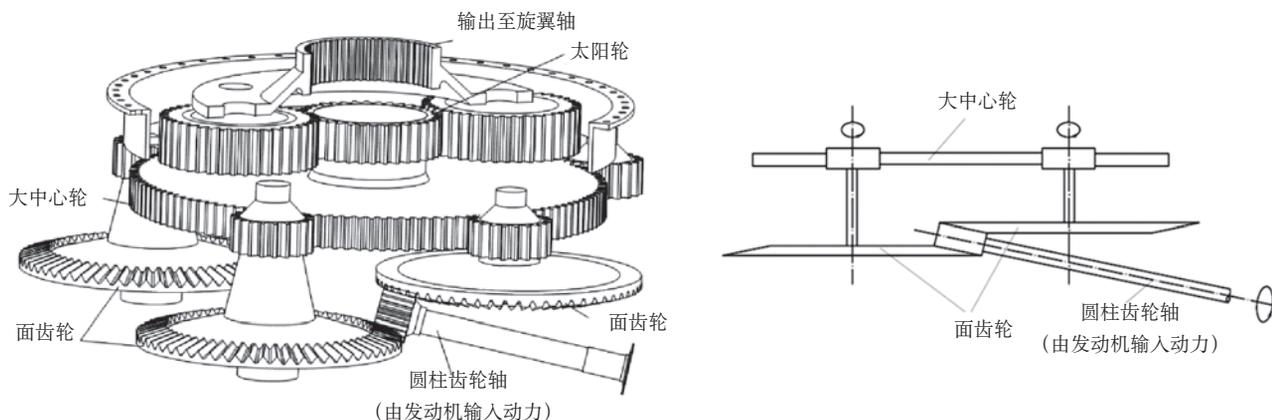
计划中，对面齿轮传动进行了设计制造研究，并应用在新型直升机主减速器传动装置的分流传动结构中，这种带有面齿轮分流结构的直升机主减速器，其质量较传统的结构下降了40%，且动力分流效果好、振动小、噪声低，取得了很好的效果。

1993年，在ART项目结束后，美国国防预先研究计划局（DARPA）

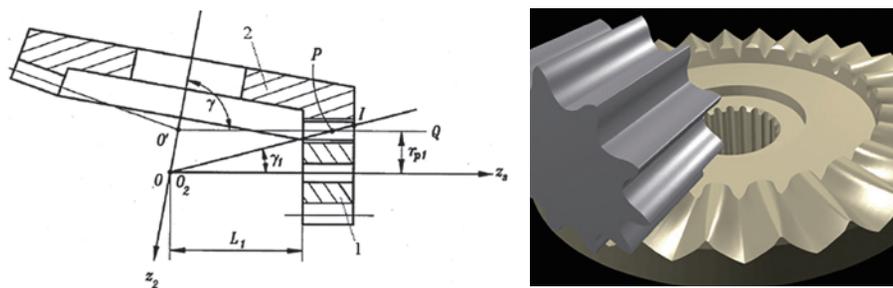
在技术再投资计划（TRP）中继续支持对面齿轮传动技术的研究，其主要研究背景是把面齿轮传动技术应用于新一代阿帕奇武装直升机中，其研究内容包括各类面齿轮传动的齿接触分析，渗碳磨削面齿轮的制造与试验研究。阿帕奇直升机是美国陆军航空兵的主力装备，其攻击能力和威慑力很强，多次在局部战

争（如海湾战争）中大发神威，同时还具有很强的战场生存能力，在恶劣气象条件下可昼夜作战，是一款具有极强的战斗、救生和生存能力的先进技术直升机。阿帕奇直升机拥有非常先进的传动系统，传动系统在无润滑条件下（干运转能力）可工作1h，其关键传动部位在被12.7mm或23mm子弹击中后可坚持工作1h。经实战证明，阿帕奇直升机传动系统具有很多突出的优点，包括：尺寸较小，满足机身狭窄的要求；质量较轻，主减速器质量在420kg左右；易损性较低，在以12.8m/s的撞击速度坠落时，机上人员仍可生存；翻修间隔期达到4500h以上；传动系统的可靠性、维护性和可达性都很好。

西欧的一些发达国家把面齿轮传动称为“21世纪旋翼机传动的希望”，陆续开展研究，英国、法国、德国和意大利一起推出了面齿轮技术（FACET）研究计划，FACET研究计划中的正交面齿轮插齿加工仿真和磨齿原理研究计划由意大利阿古斯特公司从1998年开始进行，主要研究面齿轮在航空传动系统中的



阿帕奇直升机主减速器传动示意图



面齿轮传动示意图

应用,内容包括面齿轮传动的结构设计、初步理论研究、全尺寸试验研究和设计改进等。FACET研究计划完成了斜齿面齿轮的接触分析、加载啮合分析及加载试验验证;开发的甘道夫软件能快速、高精度地计算出面齿轮在分布载荷作用下的接触应力和弯曲应力。

在面齿轮制造机床方面,目前最重要的进展是美国波音公司与加拿大的北星公司协作研制的面齿轮5轴磨床。该磨齿机能够磨削不同锥角、尺寸范围较大、满足航空使用要求的面齿轮,可生产出精度达AGMA12级的面齿轮和小齿轮,面齿轮的外半径尺寸为200~500mm,2080kW的分扭传动验证机也已经研制成功。此外,格里森公司研发了采用柔性化的、可插入刀条的刀具在凤凰锥齿轮机床上粗切、磨削面齿轮的加工技术,并将这种加工方法称为单面磨齿成形方法,由此展成的齿面与传统方法展成的理论齿面存在一定的偏差,但偏差在可控范围内。在日本,面齿轮也已成功应用于旋翼机的样机试验。

面齿轮在直升机传动系统中的应用

根据美国国家航空航天局(NASA)

的报告,带有面齿轮分流结构的直升机主减速器,其质量较传统的结构下降了40%,且动力分流效果好、振动小、噪声低。美国阿帕奇直升机的主减速器采用面齿轮传动装置。

针对直升机的传动系统而言,质量轻、体积小、噪声低、效率高、承载能力大和高可靠性是其主要性能要求,在阿帕奇直升机出现前,螺旋锥齿轮是直升机传动系统的关键零件。随着阿帕奇直升机的研制成功,其机上传动系统的主要零件面齿轮成为直升机传动系统的关键零件。

面齿轮传动相比螺旋锥齿轮传动,具有以下几方面主要优点。

第一,小齿轮为渐开线圆柱齿轮,其轴向位置误差对传动性能几乎没有影响,其他方向(如径向)误差的影响也较小,无须防位错设计;而在普通锥齿轮传动中,两锥齿轮的锥顶要重合,轴向误差将会引起严重的偏载现象。对航空螺旋锥齿轮传动还要专门进行防位错(即防止锥顶分离)设计。因此,面齿轮传动机构的安装时间大大减小,仅需要调节面齿轮的轴向位置。

第二,面齿轮传动比普通的锥齿轮传动具有更大的重合度。其重合度在空载下一般可达到1.6~1.8,理

论上重合度可以高达2以上,在受载时会更高。重合度大对提高承载能力和增加传动的平稳性相当重要。

第三,小齿轮为直齿圆柱齿轮时,小齿轮上无轴向力作用。这可以简化支承,减轻质量,相应地也就增加了承载能力。这对于空间受到限制和质量要求轻的场合是极为有用的。

第四,小齿轮为渐开线齿轮,根据渐开线的性质可知,同时啮合齿对的公法线相同,且在不同的瞬间也不改变,这对于动力传动极为有利。

第五,对于点接触面齿轮传动,在理论上仍然能保证定传动比传动。而常用的点接触锥齿轮传动从原理上已不能保证定传动比传动,其传动比是在一定范围内波动的。因此,面齿轮传动的振动小、噪声低。

根据NASA报告提供的数据可知,面齿轮的使用加上系统的优化设计,使阿帕奇直升机主减速器的质量减轻了40%。对直升机来讲,减轻质量能使飞行更灵活、携带的武器弹药更多。

结束语

由于面齿轮传动在阿帕奇直升机上应用的巨大成功以及对直升机的重要作用,面齿轮设计与制造工艺关键技术被严格封锁,面齿轮精密制造机床(面齿轮磨齿机)也对我国禁运。目前,我国还未研制出能直接应用于航空领域的高精度面齿轮传动件,严重制约我国相关装备的发展,因此要加大力度开展面齿轮传动的研究工作。

航空动力

(王俊,中国航发研研所,工程师,主要从事直升机传动技术研究)