

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.001

直升机传动系统关键技术发展研究

彭超¹, 沈意平¹, 王送来¹, 钟建锋², 朱欣华²

(1. 湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

2. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘要: 为满足未来直升机发展需求,对直升机传动系统的关键技术进行综述与展望,重点分析直升机传动系统新构型及其关键技术和轻量化、智能化、减振降噪等技术的发展研究现状,提出直升机传动系统技术的未来发展方向,对推动我国直升机传动系统技术发展具有一定的参考价值。

关键词: 直升机;传动系统;传动系统构型;轻量化;智能化;减振降噪

中图分类号: V233.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0001-09

Research on Development of Key Technology for Helicopter Transmission System

PENG Chao¹, SHEN Yiping¹, WANG Songlai¹, ZHONG Jianfeng², ZHU Xinhua²

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of

Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: To orient to the future development needs of helicopters, this paper reviews and envisions the key technology of helicopter transmission system, focusing on the analysis of the new configuration of helicopter transmission system and its key technology, lightweight, intelligent, vibration and noise reduction and other technology development research status. And the direction of the future development of helicopter transmission system technology is proposed, which has certain reference value for promoting the development of helicopter transmission system technology in China.

Keywords: helicopter; transmission system; transmission system configuration; lightweight; intelligence; vibration and noise reduction

0 引言

直升机具有垂直起降、空中悬停、超低空贴地飞行等良好性能,被广泛应用于军事和经济等众多领域^[1-2]。传动系统与发动机、旋翼一起并称直升机三大关键动部件,其性能直接决定直升机的先进性、安全性和可靠性^[3]。直升机可执行低空突防、侦查巡逻等军事任务,严苛战场环境要求其具备飞行速度快、机动性能好、抗弹击能力强、战场可维护性好等性能。为满足军用直升机高效机动作战能力需求,传动系统将朝着高速度、高效率、高可靠性和智能化方向发展。随着我国大力发展低空经济,低成本、绿色化成为民用直升机技术发展的迫切需求,对传动系统高效率传动、低振动噪声要求越来越高。

常规单旋翼直升机受构型制约,飞行速度普遍低于400 km/h。世界各国一直在探索突破直升机速度限制的新构型,高速新构型直升机已经成为当前航空强国的重点研究领域。针对新构型传动系统的发展需求,新型传动结构、新材料、新加工制造技术不断涌现。传感器技术与人工智能技术的发展与融合提升了传动系统运行状态在线监测和实时故障诊断能力。

针对未来军用和民用直升机的发展需求,重点发展新构型直升机,采用新型传动结构,研发新材料和新加工制造技术,推动智能化与减振降噪技术发展。本文总结了先进传动系统构型及其关键技术和轻量化技术、智能化技术、减振降噪技术等方面的研究现状,并对未来相关技术发展进行了展望。

基金项目: 某传动系统预研专项项目(KY-1044-2023-0441)

第一作者简介: 彭超(2000—),男,江西上饶人,硕士研究生,研究方向为直升机传动技术、机械动力学设计, pchao0811@163.com。

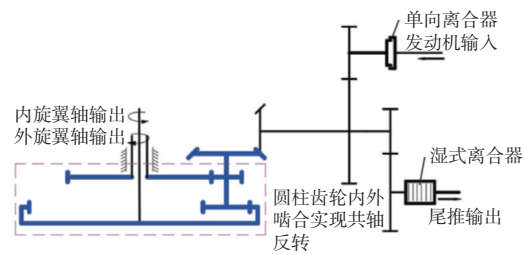
通信作者简介: 沈意平(1981—),女,湖南湘潭人,教授,博士,研究方向为直升机传动技术、机械动力学与故障诊断、柔性压电传感与智能结构, yiping1011@163.com。

1 直升机传动系统发展现状

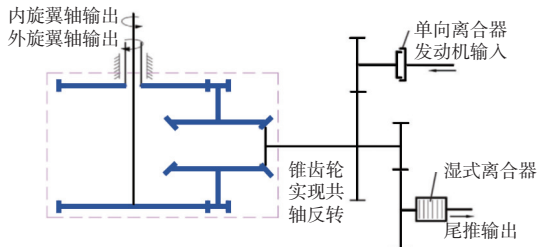
1.1 先进传动系统构型及其关键技术

为了满足直升机高速化需求,经过几十年的探索,发展有共轴刚性旋翼式、倾转旋翼式、复合式、停转式以及多桨倾转旋翼电驱动式等高速直升机构型^[4]。

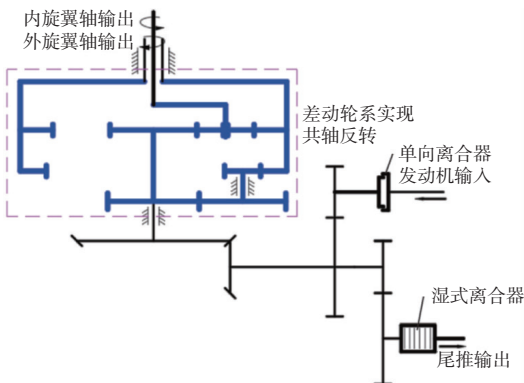
共轴刚性旋翼直升机传动系统的内、外旋翼共轴反转输出,造成传动系统结构复杂且质量远大于单旋翼直升机主传动系统。现役共轴代表性传动系统有以 Ka-26 为代表的圆柱齿轮、SB>1 为代表的锥齿轮、Ka-32 为代表的差动轮系和以面齿轮为基础的主减速器构型^[5],如图 1 所示。近年来面齿轮的运用使得主减速器传动比大,可以传动大功率,支撑结构设计简单,有效地减小了主减速器高度尺寸。关键技术问题包括大尺寸薄辐板齿轮加工、多对锥齿轮副封闭链支撑结构设计、高精度面齿轮加工、低振动齿轮印痕制造等。



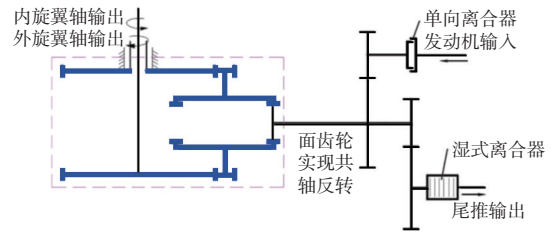
(a) 基于圆柱齿轮的共轴反转构型



(b) 基于锥齿轮的共轴反转构型



(c) 基于差动轮系的共轴反转构型



(d) 基于面齿轮的共轴反转构型

图 1 典型共轴反转传动系统构型

倾转旋翼直升机兼具直升机垂直起降和固定翼飞机高速前飞的优点。V-22“鱼鹰”是全球第一款服役且量产的军用倾转旋翼直升机,其传动系统采用发动机、减速器、旋翼整体式倾转构型。近年美国又研发了 V-280“勇士”倾转旋翼直升机,如图 2 所示,其采用了分体式倾转构型,即当旋翼倾转时而发动机短舱不倾转,使得倾转减速器结构紧凑,具有更高的悬停效率和飞行速度。倾转减速器结构复杂,传动链长,其结构设计是难点,同时,0°到 90°姿态过渡时倾转旋翼减速器的润滑困难^[6]。



图 2 V-280 倾转旋翼直升机

复合直升机在常规构型直升机两侧安装机翼作为升力装置,并在机翼外端或尾端加装螺旋桨作为推进装置,能有效提高直升机最大飞行速度和机动性能^[7]。西科斯基研制的 S-97“袭击者”是复合高速直升机的典型代表,如图 3 所示,其具备低速机动以及大过载转弯能力,最大飞行速度超过 480 km/h。我国 2017 年推出的“短尾隼”概念高速无人直升机,采用横列式双旋翼布局,旋翼下方安装推进螺旋桨,最大巡航速度超过 400 km/h。



图 3 S-97 复合高速直升机

停转式直升机具有旋翼锁定式和盘翼式两种结构形式,其飞行模式分为旋翼和固定翼两种^[8],目前处于探索阶段。其中旋翼锁定式的主要特征是有一副既可以高速旋转作为旋翼,又可以锁定作为固定翼的主旋翼。其作为旋翼时具有常规构型的垂直起降和低速飞行功能,作为固定翼时无气流不对称问题,从而无速度限制,故能够高速飞行。盘翼式直升机在低速悬停时以直升机形式飞行,在高速状态下盘翼收缩、圆盘锁定成为机翼,以定翼机方式提供气动力。美国 X-50A“蜻蜓”鸭式旋翼直升机是可停转旋翼直升机的机型发展代表,如图 4 所示。但由于该类直升机构型的独特布局导致飞行控制较难,导致接连出现坠毁事故。



图 4 X-50A 鸭式旋翼直升机

采用电驱动的直升机传动系统具有响应快、转速宽、结构简单、噪声低、振动小等优点。贝尔 429 型直升机改装的四电动涵道尾桨验证机,采用分布式电驱动涵道尾桨,使得传动系统效率和安全裕度得到提高^[9]。多桨倾转旋翼电驱动高速直升机结合分布式旋翼与倾转机翼概念,具备高速前飞能力,是目前电驱动的主要构型。代表性的直升机有空客公司的 VAHANA 技术验证机、NASA 的 GL-10 分布式倾转直升机和 LA-8 技术验证机,如图 5 所示。其关键技术在于推进系统设计、高功率密度电动机技术及电磁兼容性技术^[10]。



(a) VAHANA 技术验证机



(b) GL-10 分布式倾转直升机



(c) LA-8 技术验证机

图 5 多桨倾转旋翼电驱动高速直升机

随着直升机朝着高速化、高效化发展,变转速技术成为了下一代直升机传动系统亟待突破的重要方向^[11]。A160T“蜂鸟”为代表的两档变速传动系统是以复合行星轮系为核心,配合摩擦离合器和超越离合器,可以实现两档变速切换,如图 6 所示。该构型功率密度大,体积小,转速调节范围广。无级变速传动结构目前主要应用于风机和汽车传动领域,未来将可能应用于直升机传动领域。由于变速传动系统结构复杂,其换挡冲击、非工作传动链的摩擦等方面的问题亟待解决^[12]。

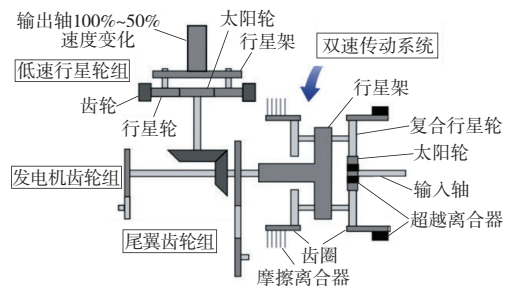


图 6 A160T 直升机变速传动系统

1.2 传动系统轻质化技术

直升传动系统轻质化技术是降低其质量系数,提高功重比、机动性能和功率密度的关键技术。新传动结构、新材料零部件、新制造技术能够使传动系统整体结构紧凑,从而降低质量。面齿轮是圆柱齿轮与平面齿轮啮合的角度传动^[13],能够满足换向与减速的功能,面齿轮传动的传动比大、重合度高、结构紧凑^[14]。AH-64E 直升机采

用面齿轮分扭传动^[15],传动系统质量减轻 40%,动力分流载荷均衡效果好、振动小、噪声低、传动效率高。

复合材料具有比强度高、质量轻、可设计性强、疲劳寿命长以及抗弹击性能良好等优点^[16]。目前复合材料零部件已逐步应用到直升机传动系统中,复合材料机匣、复合材料腹板-钢混合齿轮、复合材料尾传动轴已得到广泛应用。碳纤维复合材料机匣具有质量轻、阻尼高、耐腐蚀等优点^[17],相较于常规铝镁合金机匣,其成形制造工艺和散热是重点需要解决的问题。与传统全钢齿轮相比,复合材料-钢混合齿轮在保证齿轮工作强度的同时,可以有效减小齿轮质量,提高齿轮的传动功率密度。REZAYAT 等^[18]通过将碳纤维增强聚合物(CFRP)腹板压入钢齿轮结构组成混合齿轮,如图 7 所示,研究发现该齿轮可以减轻结构质量。Y,IMAZ 等^[19]指出碳纤维腹板和钢齿轮结构组成的混合齿轮可以有效减小齿轮传动系统的质量,与钢制齿轮相比,相同性能的情况下可以减轻 30%~50% 的质量,同时能够达到减振降噪的效果。



图 7 混合齿轮中金属与复合材料部件

复合材料传动轴在大幅减轻结构质量的同时,可以降低传动系统能量损失,减少噪声,提高抗振性能。贝尔公司的 429 轻型民用直升机采用了 2 段超临界复合材料尾传动轴,尾传动轴零件数量减少,传动系统的质量减轻了 11%,还提升了 40% 的传动功率^[20]。贝尔公司 V-22 采用复合材料尾传动轴,轴管两端铆接钛合金法兰盘,极大减少了尾传动轴组件零件数量,减轻质量 20%。SB>1 高速直升机尾传动轴组件采用复合材料膜盘与轴管一体化结构设计,有效降低了复合传动系统质量,减少了整机占重比。相较于钢制轴承,滚动体为 Si_3N_4 的陶瓷轴承质量降低约 30%,具有热稳定性好、润滑要求低等优点,大大提升了传动系统的可靠性和使用性能,开始应用于直升机主减速器高速输入端、尾传动轴和尾减速器等部位^[21]。

RAMADANI 等^[22]提出采用 3D 打印技术制造的晶格结构齿轮,如图 8 所示,研究表明齿轮轮体的晶格结构和聚合物基体在保持齿轮强度的同时,还能够减轻其质量 36%,同时相较于实体齿轮降低振动噪声 42%。

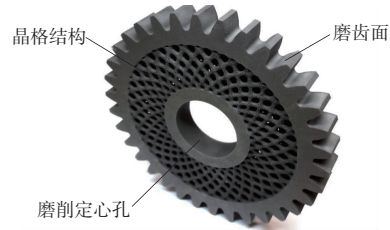


图 8 3D 打印钛齿轮照片

研究者还采用拓扑优化的新结构实现传动系统的轻质化需求。危干军等^[23]基于等代设计方法与有限元分析设计了面齿轮碳纤维复合材料辐板结构,如图 9 所示,优化设计后的面齿轮减轻质量 10.48%。



图 9 面齿轮碳纤维复合材料辐板结构

UNIVERSITY 等^[24]提出如图 10 所示的复合材料辐板和金属齿圈复合的齿轮结构,其金属齿圈与轮齿、辐板装配一体化,通过优化设计能够减轻 27%~45% 的齿轮质量,且能够实现高载荷齿轮传动。JOHNSTON 等^[25]提出了中心厚、边缘薄的变厚度结构混合齿轮辐板设计概念,利用拓扑优化使混合齿轮结构的质量最小化。

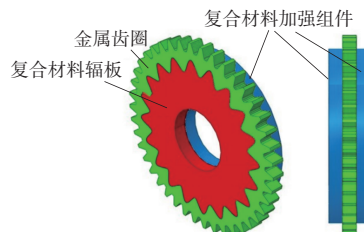


图 10 混合齿轮结构

1.3 传动系统智能化技术

直升机传动系统智能化技术是其运行状态自感知、自评估、自分析及自诊断的关键,有利于实

现视情维修,克服现有定期维修存在维修不足或维修过度等问题,甚至达到无维修要求,减少停机时间,提高直升机战场生存能力、降低运行成本。新型传感器技术和人工智能的深度融合,正在推动传动系统向智能化方向快速发展。

齿轮和轴承故障是直升机传动系统主要的故障之一。由于传动系统转速高、减速比大,齿轮和轴承的早期故障诊断往往被背景噪声淹没。传统的振动和声发射传感器体积大、硬度高,只能布置在机匣外壳,难以有效感知内部齿轮和轴承早期故障微弱信号。新型传感器主要朝着微型化、薄膜化、无线无源、智能化、集成化等方向发展,LEWICKI 等^[26]将 MEMS 传感器安装在 OH-58C 螺旋锥齿轮上进行了故障诊断测试,验证了其在减速器齿轮故障检测方面具有良好性能。JI 等^[27]提出了微小型声表面波温度传感器,能够应用于轴承等曲面结构进行监测。JIANG 等^[28]提出了 0-3 型压电复合材料薄膜传感器,可以实现曲面结构的冲击声发射信号监测。王方哲等^[29]提出了一种嵌入式滚动轴承内圈温度无线监测方案,如图 11 所示,将测试系统嵌入到轴承的锁紧螺母中,通过谐振耦合无线供电实现测试系统电能无线输送,实现了高速旋转状态下轴承内圈温度监测。宁少慧等^[30]提出了将传感器直接嵌入减速器齿轮本体结构中,避免了信号传输过程中的衰减问题。未来传感器将成为集采集、边缘计算一体的传感器系统,实现与结构本体集成一体化^[31]。

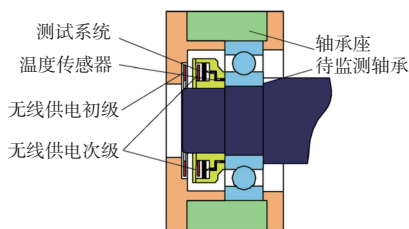


图 11 嵌入式滚动轴承内圈温度无线监测结构

随着近年来人工智能技术的进步,为传动系统安全运行而使用的监控系统(HUMS)正朝着实时化、智能化方向发展^[32]。利用多源异构多传感器信号,结合机器学习等人工智能技术,能够极大地推进智能化进程。传动系统 HUMS 通过传感器监测数据来对直升机传动系统进行运行状态评估,如图 12 所示^[33]。空客维护软件 FlyScan 通过分析直升机 HUMS 数据,精准预测故障,提高机队安全性,并降低维护成本。莱昂纳多直升机公司

研发 Heliwise,通过利用先进的数据挖掘及相关算法处理直升机 HUMS 数据,监测直升机异常状态。2024 年西科斯基公司利用 S-92 机队 HUMS 数据,开发了直升机主减速器零部件寿命预测 LifePlus 技术,能够使减速器使用时间延长,减少了停机时间,提高了直升机安全性与可靠性。航新航空科技公司研发的国内首个 HUMS 产品开始安装应用于直升机传动系统健康监测,根据传动系统部件的振动、温度等信号实时评估健康状态指标,结合飞行数据实现运行状态实时监测,并计算运动部件的使用寿命^[34]。

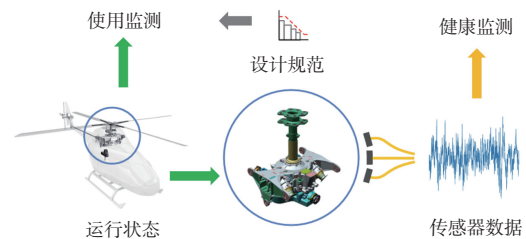


图 12 直升机传动系统健康与使用监控系统

传动系统智能化关键在于集成先进数据分析和机器学习技术,实时处理传感器数据,实现简单的故障诊断转向故障预测。SUN 等^[35]提出了对抗自适应域分布变化学习方法用于开放场景下直升机传动系统多源域故障诊断,解决了传动系统故障共享数据中异常类别的分布差异,实现了更高的诊断准确率。LI 等^[36]提出了自适应信道加权卷积神经网络(ACW-CNN)对直升机传动系统进行状态监测,基于深度学习对传感器布置位置进行了优化,有效地实现了多传感器融合对直升机传动系统状态监测。针对复杂多变工况下直升机传动系统状态的准确和快速识别,CHEN 等^[37]提出了一种基于深度迁移学习的非线性系统参数辨识方法,实现了对多种工况下传动系统状态高精度识别。LEONI 等^[38]提出了直升机传动系统零部件性能退化的诊断和监测系统,利用机器学习中半监督卷积自动编码器和基于距离和密度的无监督分类器这两种算法融合来识别损伤发生前的异常行为,并提出损坏原因的见解,所提出的诊断结果可以有效判别相关传动部件故障状况。

1.4 传动系统减振降噪技术

直升机传动系统的振动噪声主要来源于轮齿啮合、齿轮和高速旋转的轴承,采用新结构、阻尼和减振材料能够减少或阻断振动、噪声的产生和传播,显著地降低振动和噪声水平。

刘五合等^[39]将质量块-悬臂梁型结构的声学超材料布置在齿轮箱表面,能够有效地降低振动水平,如图 13 所示。JI 等^[40]提出了一种基于声学黑洞(ABH)结构的圆形动态吸振器,通过主体结构与声学黑洞动态吸振器(ABH-DVA)之间的动态相互作用,以及由于 ABH-DVA 的特定能量捕获而产生的阻尼增强,有效抑制了主体结构振动。

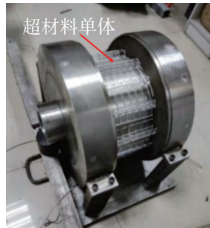


图 13 齿轮箱缩比模型实物图

采用复合材料传动轴也可以达到降低传动系统振动的目的。SUN 等^[41]提出采用集成法兰缠绕长丝制备碳纤维增强复合材料(CFRP)传动轴,如图 14 所示,研究表明,随着铺层角度和厚度的增加,振动水平逐渐降低。

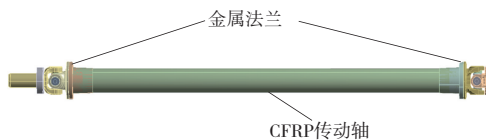


图 14 CFRP 传动轴模型

ZHANG 等^[42]设计了一种波纹结构的直升机碳纤维增强复合材料尾传动轴,如图 15 所示。发现在目标频率范围内,波纹 CFRP 尾传动轴的减振性能优于非波纹 CFRP 尾传动轴。



图 15 波纹 CFRP 尾传动轴

针对传动系统减振降噪,研究者设计了超临界传动轴干摩擦阻尼器、电涡流阻尼器、硅油基于摩擦阻尼器等减振器,利用阻尼将机械振动转化为热能或其他形式的能量耗散掉。KATAKE 等^[43]采用颗粒阻尼技术降低齿轮传动的振动,如图 16 所示,通过齿轮空腔内颗粒冲击和摩擦耗散振动能量从而抑制振动与噪声,能够降低大尺寸齿轮辐板振动水平。



图 16 带颗粒阻尼的直齿轮

为了减小尾传动轴在超过临界转速时引起的跨临界振动,WANG 等^[44]研究了超临界传动轴干摩擦阻尼器对跨临界振动的抑制效果,干摩擦阻尼器通过阻尼环在两个摩擦片之间滑动运动产生库伦阻尼来抑制尾传动轴振动。肖登红等^[45]基于电涡流原理提出了一种双板电涡流阻尼器,相较于单涡流板电涡流阻尼器,其阻尼力增加了 52%,从而减振效果提升。LI 等^[46]在尾传动轴的轴承和轴承座之间安装橡胶-硅油组合阻尼器,通过调节硅油黏度来增大阻尼力,从而有效降低轴的振动水平。高豪等^[47]在主减速器轴承座添加泡沫铝阻尼材料来提高机匣模态阻尼比,发现随着阻尼层厚度增加,可以有效抑制振动能量的传递,当添加 10 mm 阻尼层时,主减速器啮合频率处机匣的振动加速度减小了 13.09%。李翱等^[48]研究利用约束阻尼的剪切效应来降低主减速器 500~2 000 Hz 中高频振动与噪声水平,增加阻尼后结构振动加速度平均衰减 76%,声压平均降低 9.2 dB,随着阻尼层厚度的增加,减振降噪性能提高。

在传动系统隔振技术方面,代志雄和冯志壮等^[49-50]设计了一种新型直升机主减液弹隔振器,液弹隔振器利用液弹动力反共振原理,通过液腔内的液体运动产生惯性力抵消激振力,研究发现该液弹隔振器各向隔振效率均高于 60%。王运志和 JIANG 等^[51-52]设计了主减速器磁流变隔振器,通过利用电磁线圈的工作电流改变磁流变液的黏度来控制阻尼力从而实现减振和隔振,降低主减速器向机身传递的宽频带振动。为了隔绝主减速器产生的结构噪声,WANG 和 LU 等^[53-56]设计了多种主减速器周期性支撑结构,利用支撑结构中弹性波阻带效应来抑制减速器的振动水平,发现支撑结构在减速器目标频率范围内表现出满意的宽带噪声抑制效果。

2 直升机传动系统关键技术发展展望

2.1 传动系统构型及其关键技术方面

飞行速度超过 400 km/h 的新型高速直升机传动系统新构型是未来军用直升机的研究重点,绿色化、低成本化对民用直升机传动系统设计提出了新的挑战。未来针对共轴刚性旋翼式、倾转式、复合式、电驱动式等直升机传动系统构型进行创新设计。重点攻克共轴刚性旋翼直升机传动系统零部件加工制造问题,采用先进制造技术,如面齿轮三维拓扑修形和飞秒激光精修技术等。倾转旋翼直升机趋向分体式传动系统构型和大吨位重载机型发展,主减速器结构设计、长传动链设计和互联传动轴设计等是关键问题。电驱动直升机传动系统中电动机技术发展是关键,未来实现电动机、控制器和传动系统高度集成一体化,形成紧凑、高效的“多合一”的动力传动模块,同时分布式倾转构型也是未来电驱动高速直升机的重要发展方向。重点研究两级变速、无级变速等变速传动系统设计,突破两级变速结合连续调速技术,提高高速比范围。

2.2 轻质化技术方面

开发轻质高效的传动结构是关键,深入探索面齿轮传动、分扭传动系统构型。未来重点关注优良性能复合材料零部件,如碳纤维增强树脂基复合材料机匣与热塑性复合材料尾传动轴、碳纤维复合材料与钢混合的齿轮、氮化硅陶瓷滚动体轴承等。结构拓扑优化也是未来实现传动系统轻质化需求的重要手段。高效、高质量、低成本的复合材料成型技术开发与应用也至关重要,如树脂传递模塑成型技术、真空辅助树脂浸渗成型技术、原位固结成型技术、非热压罐固化成型技术等。发展先进制造技术,如增材制造结合拓扑优化技术、精密熔模铸造、激光熔融等。

2.3 智能化技术方面

传感器技术是智能化的关键所在,未来将会出现复合型功能传感器,能够同时测量多种参数,提高数据采集效率和信息完备性,具有适应传动系统工作环境的特性。后续重点研究传感器与零部件集成技术,形成机载实时诊断系统,实现传动系统智能状态监测。未来 HUMS 系统与其他飞行管理与监测系统融合,结合先进的传感器技术和机器学习算法,实现实体与数字虚拟体之间的数据共享与交互,搭建统一的传动系统监测与运维

平台,可对传动系统状态进行实时在线监测,实现无维护甚至无翻修的目的,提高传动系统可靠性,降低维护维修成本。

2.4 减振降噪技术方面

开发具有特定声学特性的超材料结构,如膜式吸声材料和有源隔音绝缘材料,使消声材料与直升机主减速器结构高度集成,采用结构优化设计,提高吸声效果并降低质量。开发轻量化、高阻尼的复合材料,如碳纤维增强树脂基复合材料结合高阻尼改性树脂,以兼顾减振降噪和轻量化要求。研究压电陶瓷等智能材料在减振方面的应用,开发具有自适应调控能力的减振结构。发展高性能阻尼材料的涂层技术,以提高减振降噪效果。开发新型阻尼器,例如干摩擦阻尼器、颗粒阻尼器、电涡流阻尼器、硅油基干摩擦阻尼器等,以适应不同的振动频率和幅度。开发新型主减速器隔振器,创新半主动隔振器匹配算法,对多源与宽频带振动的适应性更好,显著提升减振降噪效果。解决多材料复合结构智能周期撑杆制造工艺问题,提高单一材料周期性减振撑杆性能。

3 结语

传动系统技术发展是直升机性能提升的关键。本文综述了目前直升机传动系统关键技术的发展现状,总结了直升机传动系统关键技术存在的不足,围绕未来直升机传动系统技术,结合军用和民用直升机发展需求,指出了直升机传动系统关键技术的未来发展方向,以推动我国直升机技术的进步。

参考文献:

- [1] 邓景辉. 直升机技术与展望[J]. 航空科学技术, 2021, 32(1): 10-16.
- [2] 吴希明, 牟晓伟. 直升机关键技术及未来发展与设想[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(3): 1-10.
- [3] 余亦曦, 康丽霞, 唐朋. 直升机传动系统的现状与发展研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(1): 78-82.
- [4] 邓景辉. 高速直升机关键技术与发展[J]. 航空学报, 2024, 45(9): 529085.
- [5] 倪德, 李苗苗, 胡志安, 等. 共轴反转直升机传动系统构型现状[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(2): 226-235.
- [6] 吕乐丰, 吴希明, 李颖辉. 民用倾转旋翼机的应用需求与关键技术分析[J]. 航空科学技术, 2023, 34(9): 31-40.
- [7] 王爽, 王开通, 曹金华, 等. 国外高速直升机的现状与

- 发展趋势分析[J]. 航空科学技术,2023,34(12):1-8.
- [8] 吴希明. 高速直升机发展现状、趋势与对策[J]. 南京航空航天大学学报,2015,47(2):173-179.
- [9] 刘道建,黄水林,冯维超. 直升机绿色航空动力技术发展研究[J]. 航空科学技术,2024,35(1):97-104.
- [10] 宋益明,李方成. 电传动技术探讨[J]. 航空动力,2021(3):36-38.
- [11] 鲍和云,李丰波,陆凤霞,等. 某型变转速直升机传动系统动力学特性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019,50(10):2403-2416.
- [12] 余震,王永红. 复合式高速直升机传动系统关键技术分析[J]. 航空动力,2018(3):66-68.
- [13] 谭武中,王祁波. 面齿轮在直升机传动系统中的应用前景分析[J]. 机械制造与自动化,2020,49(1):52-55.
- [14] 严伟,王体春,靳广虎. 面齿轮副的典型故障振动分析[J]. 机械制造与自动化,2023,52(4):52-55.
- [15] GONG F, ZHU R P, LI P J, et al. Analysis of nonlinear vibration characteristics of the concentric face-gear split-torque transmission system [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022(1):1977367.
- [16] 王帅,梁福东,鲁雄. 复合材料在直升机传动系统的应用与发展趋势[J]. 航空动力,2019(5):22-24.
- [17] 张志龙,孙炫琪,郑青春,等. 直升机传动系统复合材料机匣关键技术[J]. 航空动力,2019(4):24-27.
- [18] REZAYAT A, CATERA P G, CAPALBO C, et al. Numerical and experimental analysis of the transmission error in hybrid metal-composite gears [J]. *Composite Structures*, 2022, 298:116012.
- [19] YILMAZ T G, DOĞAN O, KARPAT F. A numerical investigation on the hybrid spur gears: stress and dynamic analysis [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(1):354-369.
- [20] 程健男,徐福泉,张体磊. 树脂基复合材料在直升机的应用及其制造技术[J]. 航空科学技术,2021,32(1):109-114.
- [21] 姚灿. 陶瓷滚动体轴承在直升机传动系统中的应用[J]. 直升机技术,2022(4):70-72.
- [22] RAMADANI R, BELSAK A, KEGL M, et al. Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies [J]. *International Journal of Simulation Modelling*, 2018, 17(1):92-104.
- [23] 危干军,杜晨,扶碧波,等. 碳纤维复合材料面齿轮辐板轻量化设计与制造[J]. 复合材料科学与工程,2026,(1):117-123.
- [24] UNIVERSITY P S, GAUNTT S, CAMPBELL R, et al. Design optimization of a hybrid spur gear [C]// *Proceedings of the Vertical Flight Society 75th Annual Forum*. Philadelphia: The Vertical Flight Society, 2019:1-8.
- [25] JOHNSTON, J. P., ROBERTS, G. D., MILLER, S. G. A design methodology for optimizing and integrating composite materials in gear structures [R]. Hampton: NASA Langley Research Center, 2019. NASA/TM-2019-220060.
- [26] LEWICKI D G, LAMBERT N A, WAGONER R S. Evaluation of MEMS-based wireless accelerometer sensors in detecting gear tooth faults in helicopter transmissions [R]. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2015. NASA/TM-2015-218794, E-19060.
- [27] JI Z B, ZHOU J, GUO Y H, et al. Minimizing off-axis bending effects on flexible surface acoustic wave sensing powered by integrated machine learning algorithms [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2025, 72(3):3194-3201.
- [28] JIANG S, SHEN Y P, WANG S L, et al. Flexible piezoelectric composite sensor for impact monitoring of curved structures [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 362:114655.
- [29] 王方哲,朱永生,闫柯,等. 滚动轴承内圈温度无线监测技术[J]. 机械工程学报,2018,54(22):8-14.
- [30] 宁少慧,韩振南,武学峰,等. 嵌入式传感器的齿轮裂纹故障诊断[J]. 振动与冲击,2018,37(11):42-47.
- [31] LAI G J, ZHANG X H, LU C, et al. The architecture and key technologies of the digital twin system of helicopter based on cloud-edge-end integration [C]// *2022 4th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP)*. Hangzhou, China. IEEE, 2022:1069-1072.
- [32] ZHOU L H, DUAN F, CORSAR M, et al. A study on helicopter main gearbox planetary bearing fault diagnosis [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 147:4-14.
- [33] HÜNEMOHR D, LITZBA J, RAHIMI F. Usage monitoring of helicopter gearboxes with ADS-B flight data [J]. *Aerospace*, 2022, 9(11):647.
- [34] WANG S B, TONG C W, TAO Z Y, et al. Helicopter health and usage monitoring system in China [J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2022, 25(2):45-52.
- [35] SUN K C, YIN A J, LU S. Domain distribution variation learning via adversarial adaption for helicopter transmission system fault diagnosis [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 215:111419.
- [36] LI T F, ZHAO Z B, SUN C, et al. Adaptive channel weighted CNN with multisensor fusion for condition monitoring of helicopter transmission system [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(15):8364-8373.

- [37] CHEN T, ZHANG X W, WANG C X, et al. Domain adversarial neural network - based nonlinear system identification for helicopter transmission system [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111(16): 14695-14711.
- [38] LEONI J, TANELLI M, PALMAN A. A new comprehensive monitoring and diagnostic approach for early detection of mechanical degradation in helicopter transmission systems [J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 210: 118412.
- [39] 刘五合, 吴樾, 张帆. 基于声学超材料的齿轮减速器箱体减振方法研究 [J]. *热能动力工程*, 2022, 37(9): 170-177.
- [40] JI H L, WANG N, ZHANG C, et al. A vibration absorber based on two - dimensional acoustic black holes [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 500: 116024.
- [41] SUN Z Y, XIAO J, YU X D, et al. Vibration characteristics of carbon - fiber reinforced composite drive shafts fabricated using filament winding technology [J]. *Composite Structures*, 2020, 241: 111725.
- [42] ZHANG J G, XIA X, XIAO S P, et al. Axial vibration performances of CFRP helicopter tail drive shaft with corrugated structure [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2025: 1-11.
- [43] KATAKE K, RADE K A, PAWAR A C, et al. Analytical approach to suppress the vibration of spur gear pair using particle damping technique [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 72: 1386-1393.
- [44] WANG D, SONG L Y, CAO P, et al. Nonlinear modelling and parameter influence of supercritical transmission shaft with dry friction damper [J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2023, 19(1): 223-240.
- [45] 肖登红, 潘强, 何田. 一种新型电涡流阻尼器及阻尼性能研究 [J]. *噪声与振动控制*, 2014, 34(6): 197-201.
- [46] LI M M, ZHANG J Y, WU C G, et al. Effects of silicone oil on stiffness and damping of rubber - silicone oil combined damper for reducing shaft vibration [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 218554-218564.
- [47] 高豪, 杨建军, 戴化, 等. 直升机主减机匣轴承座阻尼结构减振分析 [J]. *机械传动*, 2021, 45(10): 100-105.
- [48] 李翱, 陈浩, 王凤娇. 直升机金属加筋板阻尼减振降噪仿真研究 [J]. *直升机技术*, 2023(1): 47-51, 55.
- [49] 代志雄, 钱峰, 冯志壮. 直升机主减液弹隔振技术的发展现状及趋势 [J]. *航空科学技术*, 2020, 31(6): 19-26.
- [50] 冯志壮, 钱峰, 程起有, 等. 新型液弹隔振器设计与仿真 [J]. *航空学报*, 2017, 38(增刊1): 86-92.
- [51] 王运志, 周瑾, 曹晓彦, 等. 直升机主减磁流变隔振系统自适应控制研究 [J]. *噪声与振动控制*, 2024, 44(1): 96-103, 254.
- [52] JIANG M, RUI X T, ZHU W, et al. Design and control of helicopter main reducer vibration isolation platform with magnetorheological dampers [J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2021, 17(2): 345-366.
- [53] WANG F J, TORBATI M M, MA X J, et al. Design of near - periodic struts for helicopter gearbox vibration isolation using multicell optimization [J]. *AIAA Journal*, 2019, 57(6): 2634-2647.
- [54] WANG F J, LU Y, LEE H P, et al. A novel periodic mono - material strut with geometrical discontinuity for helicopter cabin noise reduction [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 105: 105985.
- [55] WANG F J, LU Y, LEE H P, et al. Vibration and noise attenuation performance of compounded periodic struts for helicopter gearbox system [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 458: 407-425.
- [56] LU Y, WANG F J, MA X J. Helicopter interior noise reduction using compounded periodic struts [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 435: 264-280.

收稿日期: 2025 - 05 - 16