

直升机传动系统振动/噪声抑制技术研究综述

韦大涣^{1,3} 李松柏¹ 李小康¹ 尹美² 朱欣华² 严宏志¹

(1 中南大学 极端服役性能精准制造全国重点实验室, 长沙 410083)

(2 中国航发湖南动力机械研究所 直升机传动技术国家级重点实验室, 株洲 412002)

(3 河池学院 人工智能与制造学院, 宜州 546300)

摘要: 直升机传动系统是舱内噪声的关键来源, 显著影响飞行品质与乘坐舒适性。系统梳理其振动/噪声抑制技术, 可为工程设计、系统集成与国产化替代提供技术依据与路径参考。本文对国内外直升机传动系统振动/噪声抑制技术的研究进展进行综述。阐述了被动抑振技术(包括结构优化、阻振、吸振和隔振)和主动抑振技术(涵盖作动器和有源控制算法); 梳理了共轴反转双旋翼直升机、倾转旋翼直升机等具备高速飞行特性的特殊构型直升机传动系统振动抑制技术的研究现状。同时, 探讨了磁性齿轮、陶瓷轴承和复合材料轴、机匣等新型传动部件的减振机理, 以及电动尾桨、全电驱动等革命性电驱动技术的研究进展。最后, 结合我国研究现状, 提出多维度优化主动抑振技术、技术创新推动新型传动部件升级和发展新能源直升机等建议, 以期提升我国直升机的国际竞争力。

关键词: 直升机传动系统; 振动; 噪声; 新型传动部件; 电驱动

中图分类号: V275.1 10.16578/j.issn.1004.2539.XXXX.XX.001

0 引言

直升机作为一种独特的航空运输方式, 被广泛应用于军事、医疗救援、消防和运输领域。直升机的舱内噪声问题是制约其性能与舒适性提升的关键因素之一。直升机舱内噪声主要可以归结为气动噪声和机械噪声。对于机械噪声, 研究者越来越多地指向直升机传动系统, 特别是主减速器, 其振动是导致机舱噪声的主要因素, 贡献率超过20%^[1]。轮齿之间产生的周期性啮合力是主减速器重要的振动源, 它们会通过机体结构的声辐射转化为噪声, 并最终传递到舱内。SCHEIDLER^[2]的研究表明, 传动系统齿轮啮合效应引发的机舱内高频噪声频率在500~4 000 Hz, 多数噪声幅值超过90 dB, 恰好是人耳较为敏感的区域。因此, 探讨直升机传动系统的振动/噪声抑制技术具有重要的实际意义。

1993年, 美国陆军航空兵司令部在其“未来直升机发展计划”中提议将直升机的振动和噪声降低50%。欧盟通过了第2003/10/EC号指令, 该指令规定直升机在巡航期间机舱内的声压级应低于85 dB^{[3][4][5]}。相比之下, 中国目前的直升机在稳定飞行时的振动加

速度范围为0.1~0.25 g, 噪声幅值超过95 dB^[5], 这显然无法满足人们对直升机乘坐舒适度日益增长的需求。已有研究表明, 通过有效的振动/噪声控制技术对传动系统进行优化, 可实现超过10 dB的降噪效果。

直升机传动系统构型多样, 涵盖单旋翼、共轴反转双旋翼和倾转旋翼等多种类型。我国现役直升机以单旋翼构型为主, 其传动系统振动/噪声产生的主要原因在于轮齿啮合刚度、传递误差等。轮齿之间会产生周期性的齿轮啮合力, 经过传动轴、轴承、机匣、传递至支撑结构, 从而引发结构振动及其辐射噪声。除了舱内降噪, 还可以从噪声源头和传递路径开展系统研究。此外, 直升机传动系统的多样性特点, 也使得研究范围不应局限于常见的单旋翼构型, 还需拓展至其他特殊构型领域, 尤其是共轴反转双旋翼和倾转旋翼高速直升机。本文从振动/噪声源与传递路径两个层面梳理直升机传动系统振动/噪声抑制技术。如图1所示, 重点分析抑振技术、新型传动部件减振技术和革命性电驱动技术。

1 抑振技术研究

从振动/噪声源与传递路径两个层面进行抑振技

收稿日期: 2025-02-25 修回日期: 2025-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075552)、中国航发湖南动力机械研究所资助项目(KY-1044-2023-0439)

作者简介: 韦大涣, 男, 1994年生, 广西河池人, 博士生; 主要研究方向为机械信号处理; 233702039@csu.edu.cn。

严宏志(通信作者), 男, 1964年生, 湖南常德人, 博士, 教授; 主要研究方向为高性能航空传动设计制造理论与技术; yhzcsu@163.com。

引用格式: 韦大涣, 李松柏, 李小康, 等. 直升机传动系统振动/噪声抑制技术研究综述[J]. 机械传动, XXXX, XX(X): 1-15.

WEI Dahuan, LI Songbai, LI Xiaokang, et al. Review of vibration and noise suppression technologies for helicopter transmission systems[J]. Journal of Mechanical Transmission, XXXX, XX(X): 1-15.

术梳理,研究对象包括齿轮、轴、轴承、机匣和支撑结构等部件。抑振技术中,被动抑振通过结构优化、阻振、吸振和隔振来实现减振,而主动振动抑制需要安装执行器、结合有源控制算法实现振动抑制。

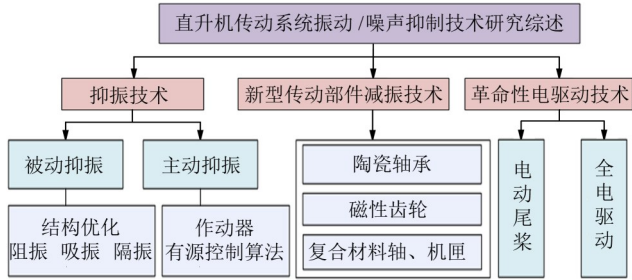


图1 直升机传动系统振动/噪声抑制技术

Fig.1 Vibration and noise suppression technologies for helicopter transmission systems

1.1 被动抑振技术

被动控制技术不需要外部能量输入,其实施过程简单,已成为一种被广泛使用的减振方案。

1.1.1 传动齿轮被动抑振技术

轮齿之间产生周期性的齿轮啮合力是主要的振动源。国外已有研究表明,通过改进齿轮加工、改变齿轮构型、合理布置相位、进行齿轮修形和隔声处理等可以降低齿轮啮合的振动幅值。例如,美国西科斯基飞机公司对S-76C+直升机主变速箱的齿轮进行化学加速振动抛光处理,啮合频率下的振级降低了7 dB^[6]。AH-64主减速器采用面齿轮来增大啮合重合度和降低传动误差,并结合了功率分流等措施,噪声减低10 dB^[7-8]。PARKER^[9]通过调整相位来减少特定频率下的振动,同时避免了共振。LUU等^[10]提出一种直齿轮齿面修形的方法,通过优化齿面曲率差异来降低传动误差。西科斯基公司合理设计隔离齿圈,可以有效隔离700~1 000 Hz的高频振动^[11]。

我国在齿轮减振方面也取得显著进展,体现在面齿轮加工、齿轮新构型、齿轮修形、齿轮系统动力学分析等方面。李大庆^[12]研究面齿轮的齿面设计和磨削技术,以提升齿轮的接触质量和传动精度,进而降低对安装误差的敏感性。重庆大学与中国航发湖南动力机械研究所设计用于共轴式直升机主减速器的分扭齿轮传动构型,利用锥齿轮和圆柱齿轮的分扭传动实现换向和减速,有效地降低齿轮的体积和质量,减少了振动^[13]。HUANG等^[14]通过实验对比发现,在高转速条件下,微线段齿轮在振动性能方面显著优于渐开线齿轮,可实现0~5 000 Hz振动降低80%^[15]。GAO等^[16]开展了基于侧-扭-摆耦合非线性齿轮模型的渐开线直齿轮动态优化修形技术研究,并调整了修形参数,发现传动系统的振动和噪声显著降低。李政民卿等^[17]建立面齿轮传动动力学模型

来分析噪声源,优化设计参数并采用微穿孔腹板面齿轮方案,实现了机匣内部降噪2 dB^[18]。

1.1.2 轴及轴承被动抑振技术

齿轮的振动通过轴与轴承传递到机匣,因此,在轴与轴承上采用减振方法可以减少振动的传递。国外在轴承润滑设计、轴优化设计、阻尼环减振和智能材料减振等方面做了很多工作。例如,FLEMING^[19]采用流体膜波纹轴承替代常规滚动轴承以改善系统阻尼。ENE等^[20]研究发现,波纹轴承能够将齿轮啮合噪声降低10 dB,振动降低17 dB。RICHARDS等^[21]使用周期性驱动轴来减少齿轮振动传递,在600~1 200 Hz和1 250~2 000 Hz的频率范围内,振动衰减分别达到96.52%和18.52%。在阻尼环减振方面,ATZRODT等^[22]通过压电堆叠技术和电气阻尼电路提高了阻尼性能,降低了振动传递。智能材料减振方面,BERARDENGO等^[23]研究磁致伸缩材料的减振性能,揭示磁致伸缩材料与压电分流的异同,提出了基于模态电感的分流阻抗优化方法。

在国内,马豪^[24]深入研究了直升机尾传动系统中轴承故障导致的振动的传递路径,揭示了振动能量的传播机制。代鹤等^[25]研究齿轮轴孔位置误差对行星齿轮时变啮合相位的影响,提出蒙特卡洛法预测啮合相位波动偏差统计分布,为传动系统的减振设计提供了指导。王锡龙等^[26]分析了黏弹性减振器的刚度和阻尼对水平传动轴系各元件1阶共振峰值的影响,当刚度从4 N/m增加到 5×10^6 N/m时,第一段轴的振幅从 1.01×10^{-5} m增大到 1.36×10^{-3} m;阻尼从10 Ns/m增加到800 Ns/m时,第一段轴的振幅从 3.36×10^{-4} m减小到 1.78×10^{-5} m。张庶等^[27]研究了机匣轴承与支座刚度强度相互的影响,计算了过盈量和支座弹性模量对它们的影响,为直升机轴承和支座的设计提供了指导。HE等^[28]提出了一种新型的基于压电分流阻尼的环形减振器,通过串联谐振RL分流电路相连的压电堆实现减振。

1.1.3 机匣被动抑振技术

国外已经采取各种措施来减少机匣的振动,包括对机匣结构进行优化设计、提出隔振方法以及采用吸振技术等。BADGLEY等^[29]通过设计和优化CH-47直升机机匣结构,减速器行星齿轮啮合噪声降低达11 dB。CAILLET等^[30]在支撑杆和机匣之间引入层状轴承的“软性”连接,在振动过程中实现两者相对独立,有效减少了振动的传递。SINGH等提出齿轮箱中安装振动吸收器,可以在特定频率下减少振动^[31]。

我国在机匣减振研究方面也开展了一些工作,主要集中在机匣结构的优化设计和振动特性分析。王燕等^[32]以减振为目标对机匣部分面板进行拓扑优

化, 结构速度频响应峰值下降 58%。马英群等^[33]建立数学模型和使用振动功率流法, 研究加肋机匣如何减少航空发动机的振动, 发现振动功率流水平在关键位置(如支板连接处)减少了约 50%。龙伦等^[34]针对某型直升机动力传动轴-机匣系统的耦合振动特性进行研究, 为振动控制和性能优化提供了理论依据。

1.1.4 支撑结构被动抑振技术

对支柱结构进行有效的振动控制, 是防止振动/噪声向机舱传播的关键。国外的研究包括结构设计、隔振和吸振等方面。研究表明, 调整支撑结构的长度、形状、材料、刚度和阻尼参数, 可以改善结构的动态响应。对 A109 直升机采用更换支撑结构材料, 采用玻璃纤维撑杆, 可实现 8~9 dB 的减振\降噪效果^[35]。ASIRI 等^[36-37]使用具有几何不连续性的周期性支撑杆, 降低了 3 000~9 000 Hz 和 10~12 kHz 频率范围内的振动; 而使用材料不连续的支撑杆, 则在 1 000~12 000 Hz 的频率范围内实现了振动衰减。隔振技术是通过支撑结构底部安装隔振器来隔绝振动传递。隔振技术已被应用在 Bell427、A109E、EC135 等机型, 对 12~30 Hz 频率范围内的振动抑制较为有效^[38-40]。BK117 机型直升机则通过在支撑杆上安装吸振器来增强减振性能^[41]。

我国在支撑结构减振方面也开展了不少工作。沈安澜等^[42]对某型国产直升机新研主减隔振装置进行地面性能测试, 通过实测动载荷传递率来评估隔振性能, 隔振装置对垂向、航向和侧向三向激励的隔振效率均超过了 80%。宋玉宝等^[43]对支撑结构进行周期隔振设计, 建立声振分析模型, 发现周期性设计可以获得较好的减振降噪效果。赵志娟等^[44]研究了聚焦式弹性主减隔振系统, 并优化了主减撑杆焦点位置, 以提高隔振效果。王风娇等^[45-46]提出多种周期支撑撑杆构型, 包括串/并联复合型主减周期撑杆和新型径向周期撑杆等, 仿真研究显示, 在 500~4 000 Hz 的频率范围内, 能够实现显著的振动衰减, 最大衰减幅度可达 40~60 dB。

1.2 主动抑振技术

主动抑振是在设备上安装作动器, 利用有源控制方法向安装位置施加次级力, 以抵消外部的力和力矩, 实现更精确有效的减振。

1.2.1 传动齿轮主动抑振技术

传动齿轮的主动抑振技术研究在国际上涵盖了作动器安装、系统配置、控制算法等多方面。GUAN 等^[47]提出两种在齿轮上安装作动器的方法, 第一种方案如图 2(a)所示, 将 3 个惯性作动器安装在齿轮侧面, 利用其产生的反作用力来抑制齿轮的扭转和平移振动; 第二种方案如图 2(b)所示, 在齿轮和轴

之间安装作动器, 通过其产生的动态反作用力来隔离从齿轮传递到轴的扭转振动。CHEN 等^[48]在齿轮上安装特定配置的传感器和作动器, 用以平衡作用在齿轮中心位置的力和由外力引起的转矩, 使齿轮在啮合频率下的振动幅值降低 7.5 dB。在控制算法方面, RAI 等^[49]提出了一种用于前馈主动噪声控制的 Volterra 滤波-X 最小均方算法, 用于处理非线性噪声。GEORGE 等^[50]提出了一种基于自适应勒让德神经网络的低复杂度的非线性主动噪声控制系统, 并通过引入部分更新算法进一步降低了计算复杂度。

在国内, LI 等^[51]建立面齿轮传动动态模型, 构建轮辋周向变形的计算方法, 提出两种静态传动误差的主动控制方法, 有效改善了面齿轮传动的动态行为。李以农等^[52-54]在理论分析、算法设计、实验验证等方面较为系统地研究齿轮传动系统振动的主动控制方法, 为振动/噪声的控制提供了有效手段。尽管可以直接对齿轮实施减振控制, 但针对直升机传动系统, 需要同时考虑齿轮的传动特性和空间限制, 以确保方案能够有效实施^[55]。

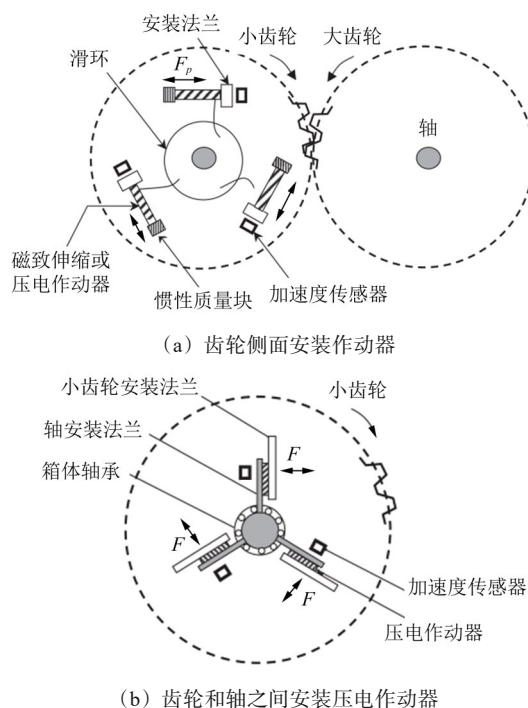


图 2 传动齿轮主动抑振^[47]

Fig.2 Active vibration suppression of drive gears^[47]

1.2.2 轴主动抑振技术

相比之下, 轴的主动抑振空间限制少一些, 国外的研究包括算法研究、硬件集成、实验研究等。GUAN 等^[56]提出改进的延迟-X 最小均方控制算法和多速率最小相位低通数字滤波器, 可有效提高控制效率并减少计算负担, 显著降低主动轴振动水平。硬件集成方面, REBBECCHI 等^[57]在输入轴上安装磁致伸

缩作动器, 利用自适应前馈控制器调节作动器, 噪声衰减 5~10 dB。TOSO 等^[58]使用沿旋转轴周期性排列的压电插入物形成特定的频率阻带, 有效防止了振动传递。在试验研究方面, ZHAO 等^[59-60]利用旋转惯性作动器抑制噪声, 通过理论模型和试验进行了验证。

在国内, 李以农等^[61]将作动器安置于齿轮轴上, 研究了 3 自由度传动系统的振动抑制效果。在没有控制的情况下, 齿轮系统在 170 Hz、510 Hz 和 850 Hz 频率下的振幅分别为 0.396、0.126 和 0.087; 采用模糊控制后, 振幅分别降低到 0.154、0.081 和 0.046; 使用模糊 PD 控制后, 振幅再次降低至 0.124、0.067 和 0.025。SUN 等^[62]提出了一种自适应控制器, 该控制器结合 Filtered-X 方法和 RLS 算法来减少齿轮传动轴的周期性振动。李海燕^[63]通过粒子群算法确定了作动器在轴上的最佳安装点, 采用基于神经网络的模型参考了间接自适应控制结构, 抑制了齿轮传动系统中的周期性振动。这些研究在理论上取得了一些进展, 不过针对直升机传动系统应用背景的工程研究仍然较为缺乏。

1.2.3 轴承主动抑振技术

在国外, 对于轴承的主动控制包括作动器的安装、控制算法和智能材料等。PALAZZOLO 等^[64]在轴承上采用压电作动器, 并优化控制算法以适应作动器特性, NASA Lewis 研究中心的试验验证了其减振效果。MONTAGUE 等^[65]提出一种新的前馈控制方法, 利用压电作动器在轴承外圈施加力, 能够降低 4 500 Hz 频率范围内的齿轮的啮合振动, 振动衰减可达 12 dB。DIMOFTE 等^[66-67]探索智能材料在流体膜轴承中的使用, 利用半主动控制方法改善轴承性能并减少振动。CHEN 等^[68]利用智能弹簧和压电作动器实现振动/噪声的自适应控制, 并通过调节阻尼和刚度来抑制振动。

在国内, 顾家柳等^[69-70]对可控挤压油膜轴承进行研究, 通过多方案评估了其减振性能。宋非非^[71]将压电分流技术与自适应前馈控制相结合, 将径向振动力转化为轴向压力。李晓博等^[72]采用主动电磁控制抑制滑动轴承-转子系统的自激振动, 1 阶临界转速频率提高 22 Hz, 最大振幅降低 50%, 8~120 Hz 频率的转速范围内的自激振动被完全抑制。

1.2.4 支撑结构主动抑振技术

支撑结构主动抑振技术是一种成熟且有效的减振降噪解决方案。国外的研究表明, 在支撑结构上安装主动作动器, 能够较为有效地减少由机匣传递到机舱的振动和噪声^[73]。西科斯基公司在 S-76 直升机减速器支撑杆附近的传动梁上安装作动器, 在悬停和高速飞行阶段, 舱内噪声降低了 7~12 dB^[41]。

EUROCOPTER 公司在 BK117 直升机支柱上使用压电陶瓷作动器直接施加控制力, 1 900 Hz 频率处齿轮啮合的噪声降低达 11 dB^[74]。另外, EUROCOPTER 公司开发了一种新型主动齿轮箱支柱, 采用多层压电叠堆和自适应最小均方算法, 在 120 kts 巡航速度下将 BK117 直升机的噪声降低了 19.5 dB^[75]。米兰理工大学在 A109MKII 直升机上使用智能后支柱, 结合有限冲激响应最小均方算法, 使得特定频率范围的振幅降低 20 dB^[76]。贝尔公司在 Bell 407 直升机上安装 16 个压电陶瓷作动器, 实现了对 7 个齿轮箱的噪声频率同时进行控制^[77]。HEN 等^[78]在液弹性周期性层压隔离器的关键位置安装压电叠堆作动器, 多个谐波频率下的振动衰减达 40 dB。ASIRI 等^[79]则研究控制算法, 通过自适应控制算法抑振, 150~4 000 Hz 的频率范围的振动得到显著降低。

我国支撑结构控制技术的研究正不断取得突破。LU 等^[80]开发了一种离散模型预测滑模控制器, 通过预测系统的未来状态并调整控制输入, 能够平稳地引导系统状态到达预定滑模面, 有效抑制多频振动。MA 等^[81]开发的离散模型预测滑模控制器, 可有效减轻状态观测器的设计压力, 并提高算法效率, 在直升机模型上进行的实时控制试验(如图 3 所示)表明, 该控制器平均能够降低噪声超过 15 dB, 最高降噪效果达到 31 dB。

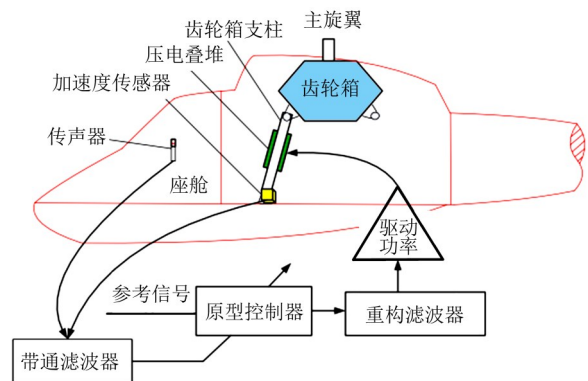


图3 支撑结构主动结构声学控制系统^[81]
Fig.3 Active structural acoustic control system for support structures^[81]

另外, LI 等^[82]提出神经网络的自适应固定时间反同步化方法, 产生与噪声源相反的信号, 可实现噪声主动控制。宋春生等^[83]提出有源非线性自回归神经网络的次级通道辨识方法, 结合基于滤波 X 的最小均方误差算法对振动进行控制。尽管如此, 支撑结构抑振在安装维护、稳定性、鲁棒性方面仍存在挑战^[84-85]。

1.3 高速直升机传动系统抑振技术

除单旋翼直升机, 国外已针对高速飞行需求开

发了共轴反转和倾转旋翼等特殊构型的直升机。

共轴反转双旋翼直升机由共轴反转的两幅旋翼实现悬停和爬升, 旋翼不需要倾转, 而是通过尾推进桨实现高速前飞。鉴于其共轴反转的特性, 两组旋翼需精准地协调反向转动, 因此, 其传动系统结构复杂度较单旋翼直升机高很多^[86]。为满足不同飞行状态下功率和转速的传递需求, 国外提出了多项共轴反转传动系统构型。例如, 西科斯基公司提出了圆柱齿轮内外啮合构型^[87]和圆柱齿轮外啮合功率分流型构型^[88]。另外, 西科斯基公司与波音公司联合研制的SB-1技术验证机上传动系统, 采用了以锥齿轮为基础的构型^[89], XH-59A技术验证机的传动系统采用了复合行星轮系共轴输出构型^[90]。国外共轴反转传动系统已形成基于圆柱齿轮、锥齿轮、面齿轮和差动轮系的多种构型^[91]。在减振降噪方面, 国外更多关注旋翼气动力学^[92]和载荷特性分析^[93], 以及在不同飞行状态下的最优配平与控制^[94-97]。我国学者在共轴反转直升机旋翼的动载荷特性^[98]、传动系统设计及优化^[99-100]、振动特性分析^[101-103]、振动控制^[104]以及实验研究^[105]等方面也进行了很多研究。例如, HONG等^[98]研究了高速升力偏置共轴旋翼的振动载荷特性。刘帅^[99]和张玉姣^[100]分别对面齿轮和锥齿轮分路的共轴直升机齿轮系统进行了构型设计和优化。程俊杰^[101]对差动式同轴反转主传动系统的动力学特性进行了研究。倪德等^[102]和张世飞等^[103]分别对共轴直升机的扭振特性及主减轮系功率流向进行了分析。YANG^[104]提出了基于自适应控制的直升机振动衰减方法。赵昌盛等^[105]通过试验探究了共轴反转旋翼直径比对气动力和噪声的影响。

倾转旋翼直升机采取横列式双旋翼结构, 其传动系统一般由左右对称的减速器、互联传动轴、中间减速器及倾转驱动机构组成^[106]。该类直升机具有垂直起降与固定翼高速巡航的多模式飞行特性, 其传动系统不仅传递功率、载荷, 同时还需实现旋翼倾转及特殊工况下左右功率的互联传动。国外通过风洞实验和飞行测试, 深入研究了旋翼与机翼的气动相互作用^[107-108], 关注了机翼和旋翼的气动载荷^[109-111], 开发了高次谐波控制等技术^[112], 以降低旋翼对传动系统的振动影响。同时, 设计基于飞行品质的时变稳定性增强系统和优化飞行控制策略^[113], 提高了倾转旋翼机在不同飞行模式下的稳定性和操纵性能; 此外, 还开发了振动监测系统^[114], 用于实时监测关键部件的振动状态。国内的研究主要集中在传动系统设计^[115]、旋翼系统动力学建模^[116-117]、旋翼动载荷控制^[118-119]、传动系统动力学建模与特性分析^[120-122]、过渡模式动力学建模与控制研究^[123-124]等方

面。例如, 胡东根^[115]对100公斤级的倾转旋翼机进行了传动系统设计。李蛟龙^[116]和方喜德^[117]建立旋翼系统的动力学模型, 分析了不同工况下振动载荷。邓旭东等^[118-119]等研究了控制算法来降低旋翼动载荷。郭家舜等^[120]建立传动系统的弯-扭耦合动力学模型, 分析了不同飞行状态下旋翼激励对传动系统动态响应的影响。王成等^[121]研究了齿轮-滚珠丝杠作动器动力学模型。缪君等^[122]研究了传动系统动态响应及齿轮啮合动载系数。朱源^[123]建立倾转旋翼飞机过渡模式的动力学模型, 实现了起飞轨迹的精确控制, 减少了过渡模式中的振动。崔超^[124]设计了基于副翼偏转的主动控制器, 通过仿真和风洞实验验证了抑制回转颤振效果。WANG等^[125]设计了一种基于飞行品质的时变稳定性增强系统框架, 结合内环和外环控制结构, 提高了倾转旋翼机在转换过程中的稳定性和操纵性能。

2 基于新型传动部件的振动/噪声抑制技术

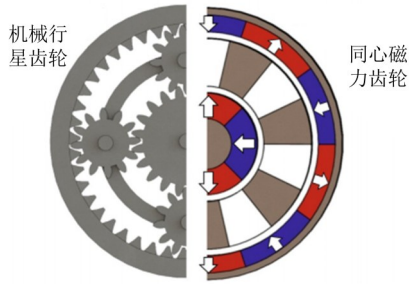
除传统的抑振技术, 磁性齿轮、陶瓷轴承、复合材料轴、机匣等新型传动部件等突破机械接触传动的固有缺陷, 利用材料的高阻尼低激励特性, 为减振降噪提供新的途径。

2.1 磁性齿轮传动—非接触式振源抑制

磁性齿轮不需要接触, 而是通过磁力传递转矩, 如图4所示^[126], 因为没有机械啮合, 它避免了传统齿轮的啮合冲击, 可从源头上减少振动产生^[127-129]。NASA基于X-57项目, 开发了PT-1、PT-2和PT-3等多个磁性齿轮原理样件, 并进一步开发了基于四轴飞行器概念的PT-4原型, 除此之外, 他们还不断优化磁性齿轮的性能, 包括提高其转矩和效率^[130]。PRASLICKA等^[131]对轴向磁性齿轮进行研究, 提出一种平衡调制器轴向力的方案, 利用有限元分析法验证了其在减少泄漏磁通方面的优势。NGUYEN等^[132]通过结合子域建模和粒子群优化方法, 提高了磁性齿轮的转矩密度及效率。另外, PRASLICKA等^[133]对共轴磁性齿轮的极对数选择进行深入分析, 提出了新的波动因子以预测转矩波动。WONG等^[134]对Halbach转子同轴磁齿轮进行了设计、分析和试验, 并研究了它们在不同调制支撑结构下的性能。我国在电磁齿轮领域也取得了不错的进展, 包括理论研究^[135]、新型结构设计^[136-137]、性能分析^[138]等方面。不过, 目前尚未见到将电磁齿轮应用于直升机传动系统的实践。

2.2 陶瓷轴承—低摩擦高刚度的振动衰减

陶瓷轴承因其独特的材料特性而在振动抑制方面表现出色。其振动抑制机制主要体现在两个方面: 一是陶瓷轴承具有低摩擦因数优势, 相比全钢轴承,

图4 普通齿轮和磁性齿轮^[126]Fig.4 conventional gear and magnetic gear^[126]

陶瓷轴承的磨损程度可降低数倍^[139]，因此，运转时的振动能量减少；二是陶瓷滚动体刚度高，优化陶瓷滚动体与金属滚道之间的接触刚度，可以实现刚度与阻尼的匹配设计，在一定程度上抑制轴承外圈的高频振动^[140]。众多学者从不同角度对此展开了深入探索。KUMAR等^[141]提出了3种热压烧结工艺，并研究了陶瓷轴承微观结构与强度的相关性。LEE等^[142]为满足硅氮化物陶瓷轴承球所需的表面粗糙度要求，开展了电解在线修整磨削技术研究。PESSOLANO等^[143]对比了不同金刚石涂层对陶瓷球磨损的影响，发现表面粗糙度和滑动速度对涂层磨损效果显著。NAZIR等^[144]开展氮化硅球轴承表面裂纹扩展研究，发现减小裂纹尺寸和提高材料韧性可降低失效概率。ZOLOTAREVSKIY等^[145]对存在表面“Star”特征的氮化硅在滚动和滑动接触下进行参数化研究，得到裂纹扩展机制、不同因素对裂纹扩展临界性的影响。西科斯基公司的测试结果表明，与传统轴承相比，陶瓷滚动体与钢制内外圈的组合在高速运转时表现更佳，特别是在温度控制、振动减少等方面，陶瓷轴承均优于全钢轴承^[146]。此外，波音公司、FAG公司、SKF公司等进行的试验也证实了采用Si₃N₄等陶瓷材料的滚动轴承，如图5所示，在面对高温、高速和腐蚀等严苛工况时的性能优势^{[146]72-73[147]}。

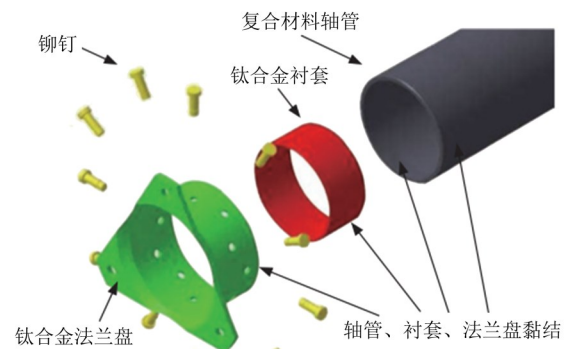
图5 FAG公司的Si₃N₄陶瓷滚动体轴承^[147]Fig.5 Si₃N₄ ceramic rolling element bearings produced by FAG Company^[147]

国内学者在材料制备^[148]、摩擦行为^[149]、疲劳失效机制^[150]和退化预测^[151]等方面开展了一些工作，但

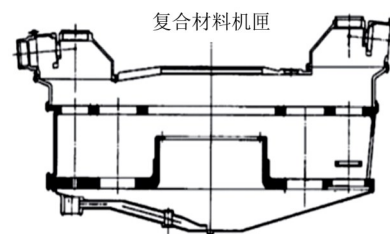
在陶瓷轴承的设计分析方法、加工制造的基础理论、结构设计技术等方面仍有待进一步成熟和完善。此外，陶瓷轴承在我国直升机传动系统中的应用尚未普及，需要进一步拓展。

2.3 复合材料轴、机匣—高阻尼的振动衰减

复合材料(如碳纤维增强树脂基材料)凭借结构阻尼特性与轻量化设计，在传动系统振动抑制中展现出显著优势。其核心作用机制包括：一方面，材料本身具有高阻尼特性，阻尼比金属材料高出3~5倍，复合材料轴在一定频段内具有显著的振动衰减效果，最大减振效果可达26 dB^[152]；另一方面，通过铺层设计可调节传动轴的固有频率^[153]，在一定程度上避免与齿轮啮合频率产生共振。这些材料在直升机的尾传动轴、动力传动轴、旋翼轴、机匣等多个关键部件中被广泛应用^[154-156]。例如，西科斯基公司在UH-60M直升机上采用了复合材料尾传动轴[图6(a)]；贝尔429直升机使用复合材料尾传动轴实现了功率提升和质量减轻。CH-47直升机使用了复合材料机匣；西科斯基在先进旋翼传动系统中使用了碳纤维复合材料机匣[图6(b)]。对于复合材料轴和机匣的研究，学者们从不同角度进行了探索。HENRY等^[157]优化纤维取向及层压顺序，减轻了复合材料轴的质量，并验证了其冲击抵抗能力。BILALIS等^[158]通过有限元分析及优化算法，确定碳纤维增强聚合物传动轴的最优铺层方案，并验证了它们在静态和动态载荷下的性能。



(a) UH-60M 复合材料尾传动轴



(b) 碳纤维复合材料机匣

图6 复合材料传动轴和机匣^[156]Fig.6 Composite material driveshaft and housing^[156]

我国自20世纪60年代起,在直升机的研发中就开始采用环氧基碳纤维、高强度玻璃纤维和芳纶等先进材料,并在复合材料的材料开发^[159]、制造工艺^[160-161]、动态特性分析^[162-163]和优化设计^[164]等方面取得了显著成就,但在直升机传动系统中的应用中仍面临挑战,存在制造成本高、性能稳定性不足等问题^[165]。

3 革命性电驱动技术

得益于电池和电控技术的发展,直升机设计正经历一场革命性的转型。电动直升机以其清洁、低振动噪声的特点,预示着未来航空领域的新趋势。

3.1 电动尾桨

电动尾旋翼技术是直升机领域的一项创新,它通过电缆传输电能来驱动尾旋翼旋转。由于不需要尾传动轴和尾减速器,这类构型直升机的振动和噪声显著降低。布里斯托大学与意大利莱昂纳多公司合作对AW139直升机的尾桨进行电动化改造,并进行了技术验证^[166]。2017年,FABRI等^[167]设计了一种高功率密度的六相空冷永磁无刷电动机,并用于EC130型号直升机的电动尾桨系统。贝尔公司对贝尔429型直升机进行改装,采用电动涵道尾桨的分布式抗转矩系统,有效降低了振动^{[168][169][60]}。VILLANI等^[170-171]通过对Fenestron®直升机尾旋翼的多相永磁无刷电机进行优化,以提高功率密度。

国内在电动尾桨的研究方面也取得了不错进展。ZHANG等^[172]开发了一种新型电动尾旋翼系统代替机械驱动系统,同时对电动尾旋翼面临的特殊气动干扰进行了优化。王洋等^[173]提出用3个驱动电机串联驱动尾桨转动的方案,以适应不同飞行条件和尾桨功率需求。建志旭等^{[169][63-64]}通过研究对比认为,电动直驱构型因结构简单和效率高而具有明显优势。不过,电动尾桨技术取消了尾桨驱动齿轮箱和传动轴,却增加了发电机、电动机和线缆等,如此一来,直升机轻量化就没有了优势,只有随着全集成电驱技术的发展,电动尾桨才会得到大的发展。

3.2 全电驱技术

电动尾桨取消了尾桨驱动齿轮箱和传动轴,可以消除尾桨驱动齿轮箱和传动轴带来的振动,由而全电驱动用电动机取代了传统直升机的动力系统和传动系统,从根本上解决了传动系统振动/噪声问题^[174]。NASA的研究表明,电驱动直升机可以实现60%的节能效果,削减90%的排放,降低超过65%的噪声污染^[175]。全电驱动直升机的发展主要受限于电池技术,当前电动直升机主要应用于小型机型。如,西科斯基公司用一台190马力的电动机取代活塞发动机,验证机基于S-300C轻型直升机,配备520 kg的

电池,可飞行15 min^[176]。法国Aquinea公司和法国国家民用航空学院共同研发“Volta”直升机,总功率为90 kW,可飞行40 min^[177]。另外,空客、Lilium、Volocopter等公司也相继推出了全电驱动直升机^[178]。

在我国,上海时的科技有限公司在2023年研发了一款航程200 km、极速320 km/h的倾转旋翼电动飞机,适合城市间通勤^[179]。小鹏汇天也开发了多款电动飞行器,其中一款结合了汽车功能,最大起飞质量840 kg,续航25 min,飞行速度130 km/h^[180]。在理论研究方面,聂资等^[181]建立了FH1型小型无人直升机模型,发现其在飞行高度上有优势,但在续航和载重上不如传统直升机。赵洪等^[182]提出电动直升机设计方法,指出当前电池技术限制了其性能,大约只能达到油动直升机的8%^[183],这一技术瓶颈是全电动直升机广泛应用的主要障碍,但随着电池技术的进步,预计未来电动直升机将有更广阔的应用前景。

4 振动/噪声抑制技术总结与未来研究方向

4.1 振动/噪声抑制技术总结

国内外已经提出多种抑制直升机传动系统振动/噪声的方法,这些技术可以概括如下:

1) 抑振技术:被动抑振技术不需要外界能量,通过优化结构和材料,可实现一定程度的减振效果,技术成熟度较高;主动抑制技术通过安装作动器,利用有源控制方法向安装位置施加次级力,进而抵消外部的力和力矩,提供更准确有效的减振效果。与国外相比,我国的主动抑振技术成熟度不高、应用较少。

2) 新型传动部件:新型传动部件的应用为传动系统的减振/降噪提供了新的解决方案。我国在这方面的研究存在不足。比如,磁性齿轮的转矩和效率需要提升;在陶瓷轴承的研究方面,设计分析方法不成熟、材料制备和精密制造能力不足,使用性能有待提升;在复合材料轴及轴承方面,依然面临制造成本高、性能稳定性不足等问题。这些问题制约了我国在新型传动部件减振技术的发展。

3) 电驱动技术:电动尾桨直升机需要加装发电机、电机和线缆,这又增加了它的质量。全电动直升机主要受限于电池的能量和功率密度,导致其续航和载重能力不足。

4.2 振动/噪声抑制技术未来研究方向

抑制直升机传动系统的振动/噪声对于优化和提升直升机的整体性能至关重要。为了在激烈的国际直升机市场竞争中取得优势,我国应特别注重这一领域的研究与实践。笔者认为可以从以下几方面开展:

1) 多维度优化主动抑振技术:在感知振动信息

方面,进行精准动力学建模,通过多工况、多场景测试实验,获得传动系统动态特性。在控制硬件方面,合理布置作动器,采用高性能控制芯片,对控制硬件进行集成化。在控制算法方面,深度融合智能算法,开发自适应抑振算法,根据飞行状态动态调整参数,以提高算法的适应性。此外,引入冗余设计,增强系统鲁棒性,确保系统在复杂环境下能够保持稳定。

2) 技术创新推动新型传动部件升级:推进磁性齿轮转矩和效率的提升,构建陶瓷轴承设计理论体系,加强材料制备,改进烧结及精密加工技术,提升其使用可靠性;改进复合材料轴和机匣的制造技术,降低生产成本。同时,加强性能稳定性的研究。

3) 发展新能源直升机:加快全电直升机的研发,聚焦电池、电动机和电控技术的发展,重点突破电池技术以提升续航能力和载重性能,从根本上解决传统直升机传动系统引起的振动和噪声问题。同时,完善电动尾桨技术,特别是在轻量化方面,为全电驱动直升机奠定基础。

5 结语

本文对直升机传动系统振动/噪声抑制技术进行了论述,涉及的部件包括齿轮、轴、轴承、机匣和支撑结构,涵盖抑振技术、新型传动部件减振技术和革命性电驱动技术,探讨了直升机传动系统振动/噪声抑制技术的未来研究方向。

参 考 文 献

- [1] 尹中伟,王刚,林长亮,等. 某民用直升机舱内噪声水平仿真分析研究[J]. 测控技术,2023,42(6):124-129.
YIN Zhongwei, WANG Gang, LIN Changliang, et al. Simulation analysis of noise level in civil helicopter cabin[J]. Measurement & Control Technology, 2023, 42(6): 124-129.
- [2] SCHEIDLER J J. A review of noise and vibration control technologies for rotorcraft transmissions[C]//INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Hamburg, German: Institute of Noise Control Engineering, 2016: 2986-2997.
- [3] 孙曜,汪鸿振. 直升机旋翼噪声研究概述[J]. 噪声与振动控制, 2003, 23(4): 22-25.
SUN Yao, WANG Hongzhen. A overview on investigation of helicopter rotor noise[J]. Noise and Vibration Control, 2003, 23(4): 22-25.
- [4] MILLOTT T A, WELSH W A, YOERKIE C A, et al. Flight test of active gear-mesh noise control on the S-76 aircraft[C]//Proceedings of the American Helicopter Society 54th Annual Forum. Washington, USA: The American Helicopter Society Inc, 1998: 1-5.
- [5] 殷鹏,黄斌根,刘忠超. 直升机舱内噪声特性分析[J]. 直升机技术, 2019(4): 28-31.
YIN Peng, HUANG Bingen, LIU Zhongchao. Analysis of noise characteristics in helicopter cabin[J]. Helicopter Technique, 2019(4): 28-31.
- [6] HANSEN B, SALERNO M, WINKELMANN L. Isotropic super-finishing of S--76C+ main transmission gears [R]. Alexandria: AGMA, 2006: 1-12.
- [7] 王俊,潘文斌. 直升机传动系统面齿轮传动技术的发展[J]. 航空动力, 2018(5): 44-46.
WANG Jun, PAN Wenbin. The development of face gear transmission technology of helicopter transmission system [J]. Aerospace Power, 2018(5): 44-46.
- [8] BOSSLER R, HEATH G. Advanced rotorcraft transmission (ART) program status [C]//27th Joint Propulsion Conference, 1991: 1906.
- [9] PARKER R G. A physical explanation for the effectiveness of planet phasing to suppress planetary gear vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 236(4): 561-573.
- [10] LUU T T, TRAN T T, WU Y R. A novel topology modification of spur gear flanks to enhance contact performance and lubrication ability [J]. Mechanism and Machine Theory, 2024, 199: 105670.
- [11] S R 萨姆马塔罗, J G 基斯, C J 伊萨贝勒. 行星齿轮驱动系统的隔音齿圈: CN1077255C [P]. 2002-01-02.
SAMMATARO S R, KEITH J G, ISABELLE C J. Vibration isolation ring gear for planetary gear drive system: CN1077255C [P]. 2002-01-02.
- [12] 李大庆. 直齿面齿轮啮合性能预控及碟形砂轮磨齿关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013: 120.
LI Daqing. Research on pre-control of meshing performance of straight tooth surface gear and key technology of grinding with disc grinding wheel [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013: 120.
- [13] 胡明辉, 曾利, 陈广艳, 等. 一种用于共轴直升机主减速器的分扭齿轮传动减速装置: CN113483060A [P]. 2021-10-08.
HU Minghui, ZENG Li, CHEN Guangyan, et al. A torque splitting gear transmission reducer for coaxial helicopter main reducer: CN202110766401. 8 [P]. 2021-10-08.
- [14] HUANG K, XU F W, XIONG Y S, et al. Nonlinear dynamic analysis of a microsegment gear system with a time-varying base circle [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2020, 44(2): 279-293.
- [15] 董宇. 某直升机主减速器新齿形齿轮接触承载能力研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016: 31-48.
DONG Yu. Research of the new tooth gear in helicopter main reducer with load and contact capacity [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016: 31-48.
- [16] GAO P, LIU H, YAN P F, et al. Research on application of dynamic optimization modification for an involute spur gear in a fixed-shaft gear transmission system [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 181: 109530.
- [17] 李政民卿, 陈宏尚, 朱如鹏. 主要参数对面齿轮传动噪声辐射的影响分析[J]. 航空动力学报, 2015, 30(11): 2803-2809.
LI Zhengminqing, CHEN Hongshang, ZHU Rupeng. Influence predictions of base parameters on noise radiations of face gear drives [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(11): 2803-2809.
- [18] 陈宏尚. 基于亥姆霍兹理论的微穿孔腹板面齿轮传动降噪方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 50-65.
CHEN Hongshang. Construction of Low Noise Face Gear Drives Associated with Micro Punch Web Based on Helmholtz Effects

- [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015: 50-65.
- [19] FLEMING D P. Vibration transmission through bearings with application to gearboxes: NASA-TM-214954 [R]. Washington, D. C. NASA, 2007: 1-6.
- [20] ENE N M, DIMOFTE F. Effect of fluid film wave bearings on attenuation of gear mesh noise and vibration [J]. *Tribology International*, 2012, 53: 108-114.
- [21] RICHARDS D, PINES D J. Passive reduction of gear mesh vibration using a periodic drive shaft [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 264(2): 317-342.
- [22] ATZRODT H, MAYER D, MELZ T. Reduction of bearing vibrations with shunt damping [C]//16th International Congress on Sound and Vibration, 2009: 1-7.
- [23] BERARDENGO M, MERCATO M, MANZONI S. Magnetostrictive shunt for vibration control and isolation: model, characteristics and similarities with piezoelectric shunt [J]. *Smart Materials and Structures*, 2025, 34(1): 015043.
- [24] 马豪. 直升机尾传动系统轴承故障振动传递路径研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022: 65.
MA Hao. Vibration transfer path research on bearing fault of helicopter's tail transmission system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022: 65.
- [25] 代鹤, 罗顺安, 龙新华, 等. 齿轮轴孔位置误差作用下行星齿轮啮合相位波动及其统计特性预测 [J]. *机械工程学报*, 2024, 60(15): 123-133.
DAI He, LUO Shun'an, LONG Xinhua, et al. Mesh phasing variation of planetary gears induced by gear pinhole position errors and its statistical characteristics prediction [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(15): 123-133.
- [26] 王锡龙, 朱如鹏, 靳广虎, 等. 支承对传动轴系稳态不平衡响应的研究 [J]. *机械设计与制造*, 2012, 41(6): 7-11.
WANG Xilong, ZHU Rupeng, JIN Guanghu, et al. Research on effect of support on drive shaft system's steady-state unbalance response [J]. *Machine Building & Automation*, 2012, 41(6): 7-11.
- [27] 张庶, 胡伟平, 扶碧波, 等. 直升机机匣轴承与支座刚度强度相互影响的有限元分析 [J]. *机械设计与制造*, 2014(7): 15-18.
ZHANG Shu, HU Weiping, FU Bibo, et al. Finite element analysis of the interaction of stiffness and strength between bearing and support on an helicopter gearbox [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2014(7): 15-18.
- [28] HE H, TAN X, HE J C, et al. A novel ring-shaped vibration damper based on piezoelectric shunt damping: theoretical analysis and experiments [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 468: 115125.
- [29] BADGLEY R H, CHIANG T. Investigation of gearbox design modifications for reducing helicopter gearbox noise: AD742735 [R]. Eustis Directorate, US Army Air Mobility Research and Development Laboratory, 1972: 1-5.
- [30] CAILLET J, MARROT F, UNIA Y, et al. Comprehensive approach for noise reduction in helicopter cabins [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2012, 23(1): 17-25.
- [31] SINGH R, LIM T C. A Review of Gear Housing Dynamics and Acoustics Literature [R]. Columbus: The Ohio State University Research Foundation, 1988: 66-69.
- [32] 王燕, 李书, 许秋怡. 基于Hyperworks二次开发的直升机主减机匣结构振动分析与优化 [C]//第26届全国振动与噪声高技术及应用会议论文选集. 北京, 2015: 183-190.
WANG Yan, LI Shu, XU Qiuyi. Analysis and optimization of the structural vibration of the main reduction gearbox casing of a helicopter based on HyperWorks secondary development [C]//Proceedings of the 26th National High-Tech Conference on Vibration and Noise and Its Applications. Beijing, 2015: 183-190.
- [33] 马英群, 张镔, 王云飞, 等. 不平衡激励作用下周向加肋机匣振动能量传递机理 [J]. *航空动力学报*, 2018, 33(11): 2583-2592.
MA Yingqun, ZHANG Kai, WANG Yunfei, et al. Vibration energy transmitting mechanism of ring-stiffened casing excited by rotor unbalance [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(11): 2583-2592.
- [34] 龙伦, 李坚, 赵勇铭, 等. 动力传动轴-机匣系统耦合振动特性 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(33): 14422-14427.
LONG Lun, LI Jian, ZHAO Yongming, et al. Coupled vibration characteristics of the power driving shaft-casing system [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(33): 14422-14427.
- [35] PAOLO B, JOSEPH S. Cabin noise reduction for the Agusta A-109 helicopter [C]//Proceedings of the 4th European Rotorcraft and Powered Lift Aircraft Forum. Stresa, Italy, 1978: 1-5.
- [36] ASIRI S, BAZ A, PINES D. Periodic struts for gear-box support system [J]. *Modal Analysis*, 2005, 11(6): 709-721.
- [37] ASIRI S, ALJAWI AAN. Periodic mounts to isolate the vibrations of automotive vehicle engine [J]. *Journal of King Abdulaziz University-Engineering Sciences*, 2006, 17(1): 97-115.
- [38] SMITH M R, PASCAL R J, LEE T, et al. Results from the dynamically tailored airframe structures program [C]//Proceedings of the American Helicopter Society 58th Annual Forum. Fairfax, USA: The American Helicopter Society Inc, 2002: 1-5.
- [39] MCGUIRE D P. High stiffness ("rigid") helicopter pylon vibration isolation systems [C]//Proceedings of the American Helicopter Society 58th Annual Forum. Fairfax, USA: The American Helicopter Society Inc, 2003: 1-5.
- [40] KONSTANZER P, ENENKL B, AUBOURG P, et al. Recent advances in Eurocopter's passive and active vibration control [C]//Proceedings of the American Helicopter Society 64th Annual Forum. Alexandria, USA: The American Helicopter Society Inc, 2008: 1-18.
- [41] LAUDIEN E, NIESL G. Noise level reduction inside helicopter cabins [C]//Proceedings of the 16th European Rotorcraft Forum. Glasgow, United Kingdom, 1990: 1-11.
- [42] 沈安澜, 刘续兴, 张方, 等. 新型主减隔振装置隔振性能测试试验研究 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2020, 52(2): 247-254.
SHEN Anlan, LIU Xuxing, ZHANG Fang, et al. Vibration isolation performance of a new type of gearbox vibration isolation device [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2020, 52(2): 247-254.
- [43] 宋玉宝, 李征初, 黄奔, 等. 周期隔振设计用于直升机舱内噪声抑制的研究 [J]. *振动工程学报*, 2020, 33(4): 764-771.
SONG Yubao, LI Zhengchu, HUANG Ben, et al. Reduction of helicopter cabin noise using periodic isolation design [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33(4): 764-771.
- [44] 赵志娟, 张树楨, 范学伟. 直升机聚焦式弹性主减隔振系统仿真

- 分析[J]. 直升机技术, 2023(1):25-28.
ZHAO Zhijuan, ZHANG Shuzhen, FAN Xuewei. Simulation analysis of the focal elastic vibration isolation system of helicopter main gearbox[J]. Helicopter Technique, 2023(1):25-28.
- [45] 王凤娇, 陆洋. 用于直升机舱内降噪的主减周期撑杆研究[J]. 航空学报, 2016, 37(11):3370-3384.
WANG Fengjiao, LU Yang. Research on gearbox periodic strut for helicopter cabin noise reduction[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11):3370-3384.
- [46] 王凤娇, 李明强, 彭海峰, 等. 用于直升机舱内降噪的新型径向周期撑杆研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(4):286-294.
WANG Fengjiao, LI Mingqiang, PENG Haifeng, et al. A study on a novel radial periodic strut for noise reduction in a helicopter cabin [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(4):286-294.
- [47] GUAN Y H, LI M F, LIM T C, et al. Comparative analysis of actuator concepts for active gear pair vibration control[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 269(1/2):273-294.
- [48] CHEN M H, BRENNAN M J. Active control of gear vibration using specially configured sensors and actuators[J]. Smart Materials and Structures, 2000, 9(3):342-350.
- [49] RAI A, HAZARIKA K, JAIN M. Adaptive Volterra filters for active control of nonlinear noise processes [C]//Advances in System Optimization and Control. Singapore: Springer Singapore, 2019:229-235.
- [50] GEORGE N V, PANDA G. A reduced complexity adaptive Legendre neural network for nonlinear active noise control [C]//2012 19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2012:560-563.
- [51] LI Z, WANG H, ZHU R P. Effect predictions of web active control on dynamic behaviors of face gear drives[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2019, 38(2):753-764.
- [52] 李以农, 张锋, 王雷, 等. 次级通道在线辨识的齿轮啮合振动主动控制[J]. 振动与冲击, 2013, 32(16):7-12.
LI Yinong, ZHANG Feng, WANG Lei, et al. Active vibration control of gear meshing based on online secondary path identification algorithm [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(16):7-12.
- [53] 李自强, 李以农, 钟银辉, 等. 基于非线性自适应滤波算法的齿轮传动系统振动主动控制[J]. 振动与冲击, 2017, 36(6):181-187.
LI Ziqiang, LI Yinong, ZHONG Yinhui, et al. Nonlinear adaptive filtering algorithm for the active vibration control of gear transmission[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(6):181-187.
- [54] 李以农, 张锋, 丁庆中, 等. 齿轮啮合振动的主动控制方法与实验研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(2):215-221.
LI Yinong, ZHANG Feng, DING Qingzhong, et al. Method and experiment study for active vibration control of gear meshing[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(2):215-221.
- [55] 查建平, 王凤娇, 郭俊贤, 等. 直升机主减速器噪声源控制技术概述[J]. 航空学报, 2022, 43(6):526123.
ZHA Jianping, WANG Fengjiao, GUO Junxian, et al. An overview of noise source control technology for helicopter main gearbox [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(6):526123.
- [56] GUAN Y H, LIM T C, STEVE SHEPARD W. Experimental study on active vibration control of a gearbox system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 282(3/4/5):713-733.
- [57] REBBECCHI B, HOWARD C, HANSEN C. Active control of gearbox vibration[J]. Proceedings of Active, 1999:295-304.
- [58] TOSO M, BAZ A, PINES D. Active vibration control of periodic rotating shafts [C]//ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2008:179-186.
- [59] ZHAO G Y, ALUJEVIĆ N, DEPRAETERE B, et al. Adaptive-passive control of structure-borne noise of rotating machinery using a pair of shunted inertial actuators[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2016, 27(12):1584-1599.
- [60] ZHAO G, ALUJEVIĆ N, DEPRAETERE B, et al. Experimental study on active structural acoustic control of rotating machinery using rotating piezo-based inertial actuators [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 348:15-30.
- [61] 李以农, 范振华, 李贵彦, 等. 基于模糊控制的齿轮传动系统振动主动控制与仿真[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2011, 32(3):281-286.
LI Yinong, FAN Zhenhua, LI Guiyan, et al. Active vibration control and simulation of gear transmission system based on fuzzy algorithm [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2011, 32(3):281-286.
- [62] SUN W, LI Y N, ZHANG F, et al. Active gear pair vibration control based on filtered-X RLS algorithm [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 86:166-169.
- [63] 李海燕. 基于神经网络的齿轮传动系统振动主动控制研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2020:31-54.
LI Haiyan. Research on active vibration control of gear transmission system based on neural network [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2020:31-54.
- [64] PALAZZOLO A B, KASCAK A F. Piezoelectric pushers for active vibration control of rotating achinery: N88-23229[R]. Washington, D. C. NASA, 1988:87-102.
- [65] MONTAGUE G T, KASCAK A F, PALAZZOLO A, et al. Feed-forward control of gear mesh vibration using piezoelectric actuators [J]. Shock and Vibration, 1994, 1(5):473-484.
- [66] DIMOFTE F, HENDRICKS R. Active-controlled fluid film based on wave-bearing technology: NASA/TM 2011-210987[R]. Washington, D. C. NASA, 2011:1-21.
- [67] YOGARAJU R, RAVIKUMAR L, SARAVANAKUMAR G, et al. Experimental investigation on the effect of housing profile and its relative position on the performance of semi-active journal bearing [M]//Proceedings of the 6th National Symposium on Rotor Dynamics. Singapore: Springer Singapore, 2020:307-316.
- [68] CHEN Y, WICKRAMASINGHE V, ZIMCIK D G. Development of smart structure systems for helicopter vibration and noise control [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2007, 31(1):39-56.
- [69] 顾家柳, 王强. 可控挤压油膜轴承主动控制转子系统振动[J]. 应用力学学报, 1990, 7(2):41-47, 142.
GU Jialiu, WANG Qiang. Active vibration control of rotor-support system by the controlled sfdb[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1990, 7(2):41-47, 142.
- [70] 刘雍, 顾家柳, 朱均. 可控挤压油膜阻尼器轴承主动鲁棒 H^{∞} 控制转子系统振动[J]. 振动工程学报, 1996, 9(1):69-74.

- LIU Yong, GU Jialiu, ZHU Jun. Active robust H^∞ control for vibration of rotor system by controlled squeeze film damper bearing [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 1996, 9(1): 69-74.
- [71] 宋非非. 一种新型减振环的动力学建模和仿真分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 11-35.
- SONG Feifei. Dynamic modeling and simulation analysis of a new type of vibration reduction rin[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017: 11-35.
- [72] 李晓博, 舒进, 牛瑞杰, 等. 基于主动电磁控制的滑动轴承-转子系统自激振动抑制数值仿真[J]. *热力发电*, 2020, 49(9): 80-86.
- LI Xiaobo, SHU Jin, NIU Ruijie, et al. Numerical simulation of self-excited vibration suppression of oil-film bearing-rotor system based on active electromagnetic control[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(9): 80-86.
- [73] BRENNAN M J, PINNINGTON R J, ELLIOTT S J. Mechanisms of noise transmission through helicopter gearbox support struts [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1994, 116(4): 548-554.
- [74] BEBESEL M, MAIER R, HOFFMANN F. Reduction of interior noise in helicopters by using active gearbox struts-Results of flight tests[C]//27th European Rotorcraft Forum, 2001: 1-7.
- [75] HOFFMANN F, MAIER R, JÄNKER P, et al. Helicopter interior noise reduction by using active gearbox struts [C]//12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference), 2006: 2604.
- [76] WALTER CORBETTA, EDOARDO VIGONI, ALESSANDRO TOSO, et al. Active control of helicopter's gearbox vibrations and effects on the cabin noise [C]//34th European Rotorcraft Forum, 2008: 1-11.
- [77] BELANGER P, BERRY A, PASCO Y, et al. Multi-harmonic active structural acoustic control of a helicopter main transmission noise using the principal component analysis [J]. *Applied Acoustics*, 2009, 70(1): 153-164.
- [78] LE HEN F, SMITH E, LESIEUTRE G, et al. Actively-enhanced periodically-layered mount for helicopter gearbox isolation [C]//46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2005: 2250.
- [79] ASIRI S, BAZ A, PINES D. Active periodic struts for a gearbox support system [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(6): 1707-1714.
- [80] LU Y, MA X J. Active control of multifrequency helicopter vibrations using discrete model predictive sliding mode control [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 230(4): 668-680.
- [81] MA X J, LU Y, WANG F J. Active structural acoustic control of helicopter interior multifrequency noise using input-output-based hybrid control [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 405: 187-207.
- [82] LI H Y, WANG L M. Adaptive fixed-time anti-synchronization of neural networks: potential application in active noise control [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2023, 56(2): 6400-6405.
- [83] 宋春生, 熊学春, 陈泊远, 等. 一种基于NARX神经网络的振动主动控制方法 [J]. *噪声与振动控制*, 2024, 44(2): 1-7, 260.
- SONG Chunsheng, XIONG Xuechun, CHEN Boyuan, et al. An active vibration control method based on NARX neural network [J]. *Noise and Vibration Control*, 2024, 44(2): 1-7, 260.
- [84] 孙卫兵, 苏宏庆, 王风娇, 等. 直升机高频吸振器性能测试试验方法研究 [J]. *装备环境工程*, 2024, 21(7): 124-131.
- SUN Weibing, SU Hongqing, WANG Fengjiao, et al. Research on performance test method for helicopter highfrequency vibration absorber [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2024, 21(7): 124-131.
- [85] PASCO Y, ROBIN O, BÉLANGER P, et al. Multi-input multi-output feedforward control of multi-harmonic gearbox vibrations using parallel adaptive Notch filters in the principal component space [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330(22): 5230-5244.
- [86] ZHANG D L, CUI J, ZHU R P, et al. Dynamic modeling and analysis of the rotor-stator coupling system of a coaxial contra-rotating gearbox [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 22177.
- [87] GMIRYA Y. Split torque gearbox for rotary wing aircraft with translational thrust system: US7413142 [P]. 2008-08-19.
- [88] Torque split gearbox for rotary wing aircraft: US9278760 [P]. 2016-03-08.
- [89] COMPANY T B, BOUWER S, KAISER E. Design and development of the main rotor gearbox for the Sikorsky boeing SB>1 DEFIANT JMR technology demonstrator aircraft [C]//Proceedings of the Vertical Flight Society 75th Annual Forum, 2019: 1-5.
- [90] BURGESS R K. The ABCTM rotor—A historical perspective [C]//Proceedings of The 60th Annual Forum of the American Helicopter Society. Baltimore, MD: AHS, 2004: 1-6.
- [91] 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.
- NI De, LI Miaomiao, HU Zhian, et al. Research status of transmission system configuration of coaxial reversal helicopter [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2021, 53(2): 226-235.
- [92] KWON Y M, PARK J S, WIE S Y, et al. Aeromechanics analyses of a modern lift-offset coaxial rotor in high-speed forward flight [J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2021, 22(2): 338-351.
- [93] CAMERON C, FEIL R, et al. Measurement of transient loads and blade deformation in a coaxial counter-rotating rotor [C]//Proceedings of the Vertical Flight Society 73rd Annual Forum, 2017: 1-11
- [94] CHO Sung Hyeok. Comparison of co-rotating and contra-rotating coaxial quadcopter hover dynamics using frequency domain system identification [D]. California State Polytechnic University, Pomona, 2021: 2-50.
- [95] JACOBELLIS G, GANDHI F. Investigation of performance, loads, and vibration of a coaxial helicopter in high-speed flight [C]//AHS 72nd Annual Forum, West Palm Beach, Florida, May 17 - 19, 2016: 1402-1417.
- [96] HO J C, YEO H. Variations in thrust sharing for torque-balanced lift-offset coaxial rotors [J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2023, 68(2): 84-95.
- [97] KWON Y M, HONG S B, PARK J S, et al. Active vibration reductions of a lift-offset compound helicopter using individual blade pitch control with multiple harmonic inputs [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2022, 94(6): 994-1008.
- [98] HONG S H, BAE J S, JUNG S N, et al. Vibratory loads behavior of a high-speed lift-offset coaxial rotor system [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(11): 5425-5436.

- [99] 刘帅. 面齿轮分路共轴高速直升机齿轮系统构型设计与参数优化[D]. 南京:南京航空航天大学,2021:10-72.
LIU Shuai. Configuration design and parameter optimization of coaxial high speed helicopter gear system with face gear power-split [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2021:10-72.
- [100] 张玉姣. 锥齿轮分路共轴高速直升机齿轮系统设计与扭转振动分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2021:28-96.
ZHANG Yujiao. Design and torsional vibration analysis of bevel gear power-split coaxial high speed helicopter gear system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021:28-96.
- [101] 程俊杰. 差动式同轴反转主传动系统动态载荷分析[D]. 重庆:重庆交通大学,2024:18-65.
CHENG Junjie. Dynamic load analysis of the differential coaxial contra-rotating main transmission system [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2024:18-65.
- [102] 倪德,钟团结,魏静,等. 某直升机传动系统旋翼轴扭振计算及优化设计[J]. 机械传动,2022,46(1):80-86.
NI De, ZHONG Tuanjie, WEI Jing, et al. Calculation and optimal design of rotor shaft torsional vibration of a helicopter transmission system [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46 (1):80-86.
- [103] 张世飞,陈鹏,吴文敏,等. 共轴双旋翼高速直升机主减轮系功率流向分析[J]. 机械传动,2018,42(5):26-30.
ZHANG Shifei, CHEN Peng, WU Wenmin, et al. Power flow analysis of the main reducing gear of coaxial counter-rotating high-speed helicopter [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42 (5):26-30.
- [104] YANG S. Adaptive bounding-based dynamic inversion control of a coaxial compound helicopter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(6):9451-9462.
- [105] 赵昌盛, KARIMIAN A, 刘宇. 实验探究共轴反转旋翼直径不匹配对其气动力和气动噪声的影响[C]//第十三届全国流体力学学术会议摘要集(上). 哈尔滨,2024:363.
ZHAO Changsheng, KARIMIAN A, LIU Yu. Experimental investigation on the effects of diameter mismatch of coaxial counter-rotating rotors on aerodynamic forces and noise [C]//Proceedings of the 13th National Conference on Fluid Mechanics (Part I). Harbin,2024:363.
- [106] 李超逸,谭武中,林晓婷. 倾转旋翼机传动系统构型技术特点和难点[J]. 科技与创新,2025(6):124-127.
LI Chaoyi, TAN Wuzhong, LIN Xiaoting. Technical characteristics and difficulties of tilting rotorcraft transmission system configuration [J]. Science and Technology & Innovation, 2025 (6) : 124-127.
- [107] CONNER D A, MARCOLINI M A, EDWARDS B D, et al. XV-15 Tiltrotor Low Noise Terminal Area Operations [C]//American Helicopter Society 53rd Annual Forum. Virginia Beach, VA: American Helicopter Society, April 29 - May 1, 1997:1-10.
- [108] DROANDI G, GIBERTINI G, GRASSI D, et al. Proprotor - wing aerodynamic interaction in the first stages of conversion from helicopter to aeroplane mode [J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 58:116-133.
- [109] FEIL R, HAJEK M, RAULEDER J. Vibratory load predictions of a high-advance-ratio coaxial rotor system validated by wind tunnel tests [J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 92:102764.
- [110] MARANO A D, POLITO T, GUIDA M, et al. Tiltrotor acoustic data acquisition and analysis [J]. Aerotecnica Missili & Spazio, 2021,100(2):111-122.
- [111] HWANG U J, PARK J S, LEE M K. Performance, vibration, load, and whirl flutter stability analyses of tiltrotors with swept-back blades [J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, (Early Access), Sep 2024: 1-17. <https://doi.org/10.1007/s42405-024-00815-4>
- [112] NIXON M W, KVATERNIK R G, SETTLE T B. Higher harmonic control for tiltrotor vibration reduction [C]//53rd Annual Forum of the American Helicopter Society. Virginia Beach, VA: American Helicopter Society, 1997:1-14.
- [113] NASA, IVANCO T, LABORATORY U A R, et al. Experimental testing of advanced generalized predictive control for stability augmentation and vibration reduction of tiltrotor aircraft [C]//Proceedings of the Vertical Flight Society 79th Annual Forum, 2023:1-21.
- [114] DOUSIS D A. V-22 tiltrotor aircraft vibration monitoring from design to field operations [C]//Proceedings, IEEE Aerospace Conference, 2003:6.
- [115] 胡东根. 100公斤级倾转旋翼机传动系统设计及关键动态行为分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2021:35-80.
HU Donggen. Design and key dynamic behavior analysis of transmission system of 100kg tiltrotor [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021:35-80.
- [116] 李蛟龙. 变直径倾转旋翼振动载荷分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2023:19-37.
LI Jiaolong. Vibration load analysis of tilting rotor with variable diameter [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023:18-37.
- [117] 方喜德. 带嵌入式阻尼器的倾转旋翼机气动弹性分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2022:18-74.
FANG Xide. Aeroelastic analysis of tiltrotor with embedded damper [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022:18-74.
- [118] 邓旭东,郭俊贤,陈国军. 倾转旋翼动载荷高阶谐波主动控制 [J]. 动力学与控制学报,2024,22(8):75-82.
DENG Xudong, GUO Junxian, CHEN Guojun. Tiltrotor vibration load reduction based on higher harmonic control [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(8):75-82.
- [119] 马锦超,陆洋,王亮权,等. 基于高阶谐波控制的倾转旋翼近场气动噪声主动控制试验 [J]. 航空学报,2024,45(9):528602.
MA Jinchao, LU Yang, WANG Lianguan, et al. Active control test of tiltrotor near-field aeroacoustics based on higher harmonic control [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(9) : 528602.
- [120] 郭家舜,王三民,刘海霞. 某新型直升机传动系统弯-扭耦合振动特性研究 [J]. 振动与冲击,2009,28(10):132-136.
GUO Jiashun, WANG Sanmin, LIU Haixia. Lateral-torsional coupled vibration characteristics of transmission of a new type helicopter [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(10) : 132-136.
- [121] 王成,李政民卿,盛伟,等. 倾转旋翼机齿轮-丝杠作动器动力学建模及响应分析 [J]. 机械传动,2024,48(11):8-15.
WANG Cheng, LI Zhengminqing, SHENG Wei, et al. Dynamics

- modeling and response analysis of gear-screw actuators of tiltrotor aircrafts[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2024, 48(11): 8-15.
- [122] 缪君, 王三民, 宁嵩. 倾转旋翼机传动系统多状态响应特性研究[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(8): 1427-1431.
- MIAO Jun, WANG Sanmin, NING Song. Dynamic response analysis of the transmission of tilt-rotor in different modes[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(8): 1427-1431.
- [123] 朱源. 倾转旋翼飞机过渡模式动力学建模与控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005: 24-76.
- ZHU Yuan. A mathematical model of tilt-rotor flight dynamics and investigation of flight control in transition mode[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005: 24-76.
- [124] 崔超. 基于机翼控制的倾转旋翼机回转颤振主动抑制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 23-71.
- CUI Chao. Active suppression on whirl flutter of tiltrotor aircraft by wing controlled[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 23-71.
- [125] WANG C, TAN W Q, SUN L G, et al. Flying qualities based time-varying stability augmentation system design for tiltrotor conversion control[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(11): 366-385.
- [126] SCHEIDLER J J, ASNANI V M, TALLERICO T F. NASA's magnetic gearing research for electrified aircraft propulsion[C]//2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 2018: 1-12.
- [127] CENTER N G R, SCHEIDLER J, CAMERON Z, et al. Dynamic testing of a high-specific-torque concentric magnetic gear[C]//Proceedings of the Vertical Flight Society 75th Annual Forum, 2019: 1-7.
- [128] WONG H Y, BANINAJAR H, DECHANT B, et al. Design and experimental testing of a magnetic gear for an electric aircraft drivetrain[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023, 59(4): 3934-3944.
- [129] ASNANI V, SCHEIDLER J, TALLERICO T. Magnetic gearing research at NASA[C]//the AHS International 74th Annual Forum & Technology Display, Phoenix, Arizona, USA, May 14-17, 2018: 1-14.
- [130] TALLERICO T, CAMERON Z A, SCHEIDLER J J. Design of a magnetic gear for NASA's vertical lift quadrotor concept vehicle[C]//AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, 2019: 4477.
- [131] PRASLICKA B, KNIGHT D F, STEFANELLI T L, et al. Design and analysis of an axial flux coaxial magnetic gear with balanced axial forces for precision aerospace actuation application[C]//2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2022: 1-8.
- [132] NGUYEN M D, JUNG W S, HOANG D T, et al. Fast analysis and optimization of a magnetic gear based on subdomain modeling[J]. *Mathematics*, 2024, 12(18): 2922.
- [133] PRASLICKA B, GARDNER M C, JOHNSON M, et al. Review and analysis of coaxial magnetic gear pole pair count selection effects[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(2): 1813-1822.
- [134] WONG H Y, BANINAJAR H, DECHANT B W, et al. Experimentally testing a halbach rotor coaxial magnetic gear with 279 nm/L torque density[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2023, 38(1): 507-518.
- [135] 李福伟. 磁性齿轮的理论研究及其应用[J]. *林业机械与木工设备*, 2010, 38(8): 22-24.
- LI Fuwei. Theoretical study and application of magnetic gears[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2010, 38(8): 22-24.
- [136] JING L B, HUANG Z X, CHEN J L, et al. Design, analysis, and realization of a hybrid-excited magnetic gear during overload[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(5): 4812-4819.
- [137] JING L B, GONG J, CHEN J L, et al. A novel coaxial magnetic gear with unequal halbach arrays and non-uniform air gap[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30(4): 5000105.
- [138] LI X L, LIU S W, WANG Q S, et al. Performance investigation and experimental testing of a stator-PM-excitation axial-flux magnetic gear[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(2): 2593-2605.
- [139] JACKSON K M. Evaluation testing of ceramic hybrid bearings for helicopter hanger bearing applications[J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2009, 54(3): 32002-3200210.
- [140] 张珂, 张立奇, 王展, 等. 考虑滚动体滑移的全陶瓷角接触球轴承非线性动态特性分析[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(5): 131-138.
- ZHANG Ke, ZHANG Liqi, WANG Zhan, et al. Nonlinear dynamic characteristics analysis of full ceramic angular contact ball bearing considering ball slip[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(5): 131-138.
- [141] KUMAR K, KIM M J, PARK Y J, et al. Twofold increase in Weibull modulus of hot-pressed Si_3N_4 ceramic by modified pressing profile[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 32: 103979.
- [142] LEE S M, KIM H N, KO J W, et al. Experimental study on ELID grinding of silicon nitride ceramics for G5 class bearing balls[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(19): 10584.
- [143] PESSOLANO FILOS I, SESANA R, DI BIASE M, et al. New abrasive coatings: abraded volume measurements in ceramic ball production[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2021, 5(3): 81.
- [144] NAZIR M H, KHAN Z A, SAEED A. Experimental analysis and modelling of c-crack propagation in silicon nitride ball bearing element under rolling contact fatigue[J]. *Tribology International*, 2018, 126: 386-401.
- [145] ZOLOTAREVSKIY V, KADIN Y, VIEILLARD C, et al. Modelling the criticality of silicon nitride surface imperfections under rolling and sliding contact[J]. *Tribology International*, 2020, 148: 106317.
- [146] 尹美, 陈兴明, 易长乐. 陶瓷滚动体轴承在直升机传动系统中的应用研究[J]. *航空动力*, 2018(3): 72-74.
- YIN Mei, CHEN Xingming, YI Changle. The application of ceramic rolling element bearings in helicopter transmission system[J]. *Aerospace Power*, 2018(3): 72-74.
- [147] 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.
- YAO Can. Application of ceramic rolling element bearings in heli-

- copter transmission[J]. *Helicopter Technique*, 2022(4): 70-72.
- [148] 张亚光. 高性能氮化硅陶瓷粉体研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 25-54.
ZHANG Yaguang. Study on high-performance silicon nitride ceramic powder[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 25-54.
- [149] CHEN X, WANG C Y, JIANG J Y, et al. Effect of picosecond laser texturing on the friction behavior of silicon carbide in hybrid ceramic bearings under dry and water lubrication[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(18): 29857-29869.
- [150] WANG P F, LI S H, WU Y H, et al. Research on calculation of allowable radial load of silicon nitride full ceramic ball bearing[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2024, 38(12): 6757-6767.
- [151] LI T, SHI H T, BAI X T, et al. Early performance degradation of ceramic bearings by a twin-driven model[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 204: 110826.
- [152] 文湘隆, 何珍钟, 臧猛, 等. 基于黏弹性材料的高阻尼复合材料传动轴减振性能研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2024(6): 87-94.
WEN Xianglong, HE Zhenzhong, ZANG Meng, et al. Research on vibration damping performance of high-damping composite drive shaft based on viscoelastic material[J]. *Composites Science and Engineering*, 2024(6): 87-94.
- [153] PRASAD A S, RAMAKRISHNA S, MADHAVI M. Experimental investigations on static and dynamic parameters of steel and composite propeller shafts with an integrated metallic joints[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(13): 26925-26933.
- [154] JARRETT W, JEFFS S P, KORKEES F, et al. The opportunities and challenges of hybrid composite driveshafts and their couplings in the aerospace industry: a review [J]. *Composite Structures*, 2023, 320: 117203.
- [155] GEBREHIWET L, ABATE E, NEGUSSIE Y, et al. Abeselom E. Application of composite materials in aerospace & automotive industry: Review[J]. *International Journal of Advances in Engineering and Management*, 2023, 5(3): 697-723.
- [156] 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.
WANG Shuai, LIANG Fudong, LU Xiong. Application and development trend of composite materials in helicopter drive system [J]. *Aerospace Power*, 2019(5): 22-24.
- [157] HENRY T C, MILLS B T. Optimized design for projectile impact survivability of a carbon fiber composite drive shaft[J]. *Composite Structures*, 2019, 207: 438-445.
- [158] BILALIS E P, KERAMIDIS M S, TSOUVALIS N G. Structural design optimization of composite materials drive shafts[J]. *Marine Structures*, 2022, 84: 103194.
- [159] 李华雷, 杨斌, 李云龙, 等. 基于恒应变方法的碳纳米管/聚酰亚胺复合材料的粗粒化力场开发[J]. *材料科学与工程学报*, 2023, 41(5): 791-798.
LI Hualei, YANG Bin, LI Yunlong, et al. Coarse-grained field parameters calibration of CNT/PI composites based on constant strain method[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2023, 41(5): 791-798.
- [160] 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.
- [161] 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.
ZHANG Zhilong, SUN Xuanqi, ZHENG Qingchun, et al. The key technology for composite material of helicopter transmission housing[J]. *Aerospace Power*, 2019(4): 24-27.
- [162] DING G P, LU Z Y, DAI Z L. Vibration characteristics analysis and experimental study of carbon-fiber reinforced plastic-metal hybrid drive shaft [J]. *Science of Advanced Materials*, 2020, 12(10): 1457-1464.
- [163] FAN B, WANG Z M, YONG X. Modelling and dynamical analysis of rotating variable-stiffness composite laminated revolving shell with elastic constraints using complete-gradient ANCF [J]. *Composite Structures*, 2023, 304: 116303.
- [164] ZHANG H L, LI S K, WU Y R, et al. A multiscale reliability-based design optimization method for carbon-fiber-reinforced composite drive shafts[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2024, 140(2): 1975-1996.
- [165] 杨显昆, 谢俊岭, 万振华, 等. 直升机传动系统复合材料尾传动轴铆接承载能力分析[J]. *机械强度*, 2019, 41(2): 488-492.
YANG Xiankun, XIE Junling, WAN Zhenhua, et al. Analysis of riveting carrying capacity for composite tail shaft of helicopter transmission system[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2019, 41(2): 488-492.
- [166] FARMAN J. Electric tail rotor drive for the more-electric helicopter: a feasibility study[D]. Bristol, South West England, UK: University of Bristol, 2013: 1-6.
- [167] FABRI G, PARASILITI F, TURSINI M, et al. PM brushless motor for helicopters electric tail rotor drive system [C]//2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017: 1-7.
- [168] 圈内新闻. 贝尔研发纯电动直升机尾翼技术以更加安全的分布式电动小螺旋桨取代传统尾部大螺旋桨 [EB/OL]. 通航圈, 2020-03-11.
News within the circle. Bell develops pure electric helicopter tail fin technology to replace traditional tail large propellers with safer distributed electric small propellers [EB/OL]. *Navigation Circle*, 2020-03-11.
- [169] 建志旭, 唐兴中, 陈国军, 等. 直升机电动尾桨技术发展展望 [J]. *直升机技术*, 2021(3): 58-64.
JIAN Zhixu, TANG Xingzhong, CHEN Guojun, et al. Development and prospect of helicopter electric tail rotor technology [J]. *Helicopter Technique*, 2021(3): 58-64.
- [170] VILLANI M, PARASILITI F, TURSINI M, et al. PM brushless motors comparison for a Fenestron® type helicopter tail rotor [C]//2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2016: 22-27.
- [171] VILLANI M, COLLAZZO F P, TURSINI M, et al. PM brushless motor design for helicopter tail rotor [C]//2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016: 2669-2675.
- [172] ZHANG Y W, JIANG C, WANG Y J, et al. Design and application of an Electric Tail Rotor Drive Control (ETRDC) for helicopters with performance tests [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(9): 1894-1901.
- [173] 王洋, 索双富, 杨义勇, 等. 一种直升机电动尾桨驱动装置:

- CN108750102A[P]. 2018-11-06.
- WANG Y, SUO S F, YANG Y Y, et al. Helicopter electric tail rotor driving device; CN108750102A[P]. 2018-11-06.
- [174] 张李奇. 全电直升机用永磁同步电机低速大转矩控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2019:1-4.
- ZHANG Liqi. Research on low speed-high torque control of permanent magnet synchronous motor for all electric helicopter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019:1-4.
- [175] MISRA A. Energy conversion and storage requirements for hybrid electric aircraft[EB/OL]. (2016-1-27).
- [176] CHRÉTIEN P. The quest for the world's first electric manned helicopter flight: from concept to prototype in 180 days[J]. *Vertiflite*, 2012, 58(2):38-42.
- [177] 朱炳杰, 杨希祥, 宗建安, 等. 分布式混合电推进飞行器技术[J]. *航空学报*, 2022, 43(7):025556.
- ZHU Bingjie, YANG Xixiang, ZONG Jian'an, et al. Review of distributed hybrid electric propulsion aircraft technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(7):025556.
- [178] JANOTTA F, PEINE L, HOGREVE J. Public opinions on urban air mobility: the significance of contributing to the common good[J]. *Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt*, 2021: 1-8. <https://doi.org/10.31219/osf.io/5m924>
- [179] 乔翔. 国产五座电动飞机即将亮相上交会[N]. *中国证券报*, 2023-06-14(A07):1-2.
- QIAO Xiang. China's five-seat electric aircraft to make debut at CIIE[N]. *China Securities Journal*, 2023-06-14(A07):1-2.
- [180] 潘慧. 小鹏汇天:自主研发 打造最安全的智能电动飞行汽车[J]. *广东科技*, 2024, 33(3):30-33.
- PAN Hui. Tucki Huitian: independent research and development to build the safest intelligent electric flying car[J]. *Guangdong Science & Technology*, 2024, 33(3):30-33.
- [181] 聂资, 陈铭. 电动直升机飞行性能计算和分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2012, 38(9):1139-1143.
- NIE Zi, CHEN Ming. Calculation and analysis of electric-powered helicopter flight performance[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2012, 38(9):1139-1143.
- [182] 赵洪, 李建波, 刘斌. 电动直升机概念设计与分析[J]. *航空学报*, 2017, 38(7):520866.
- ZHAO Hong, LI Jianbo, LIU Cheng. Conceptual design and analysis of electric helicopters[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(7):520866.
- [183] 何振亚, 唐兴中. 电动直升机关键性能指标及影响因素研究[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(3):16-24.
- HE Zhenya, TANG Xingzhong. Study on key performance indexes and influencing factors of electric helicopter[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(3):16-24.

Review of vibration and noise suppression technologies for helicopter transmission systems

WEI Dahuan^{1,3} LI Songbai¹ LI Xiaokang¹ YIN Mei² HU Bai'an² ZHU Xinhua¹

(1. State Key Laboratory of Precision Manufacturing for Extreme Service Performance, Central South University, Changsha 410084, China)

(2. National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission, Hunan Aviation Powerplant Research Institute, AECC, Zhuzhou 412002, China)

(3. School of Artificial Intelligence and Manufacturing, Hechi College, Yizhou 546300, China)

Abstract: The helicopter transmission system is the key source of cabin noise, which significantly affects the flight quality and ride comfort. Systematically combing its vibration/noise suppression technology can provide technical basis and path reference for engineering design, system integration and localization replacement. This article provides a review of the research progress on vibration/noise suppression technology for helicopter transmission systems both domestically and internationally. Passive vibration suppression techniques (including structural optimization, damping, absorption, and isolation) and active vibration suppression techniques (covering actuators and active control algorithms) have been elucidated in this review. The research status of vibration suppression technology for transmission systems of special configurations of helicopters with high-speed flight characteristics, such as coaxial reverse twin rotor helicopters and tilt rotor helicopters, has been summarized. At the same time, the vibration reduction mechanism of new transmission components such as magnetic gears, ceramic bearings, composite shafts, and casings has been explored, as well as the research progress of revolutionary electric drive technologies such as electric tail rotor and fully electric drive. Finally, based on the current research status in China, suggestions are proposed for multidimensional optimization of active vibration suppression technology, technological innovation to promote the upgrading of new transmission components, and the development of new energy helicopters, in order to enhance the international competitiveness of China's helicopters.

Key words: Helicopter transmission system; Vibration; Noise; New-type transmission components; Electric drive