

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.010

舰载直升机尾轴折叠机构技术现状及发展建议

梁福东^{1,2}, 朱如鹏¹, 王希²

(1. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016; 2. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘要:通过尾轴折叠机构使尾传动轴随尾梁同步折转,可减小舰载直升机停放时的外廓尺寸,缓解舰面和机库空间受限的问题。围绕舰载直升机尾轴折叠技术,归纳国内外相关机构的演进过程与工程应用情况,对端齿式、弧齿式两种构型的结构特征和使用性能进行比较,分析现有端齿式方案的主要不足。在此基础上,结合技术发展方向,提出推进弧齿式折叠机构关键技术研究并完善设计验证能力的建议,为后续舰载直升机传动系统升级提供参考。

关键词:弧齿式折叠机构;直升机;传动系统;应用;发展

中图分类号:V271.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0049-04

Current Status and Development Suggestions for Tail Rotor Shaft Folding Mechanism Technology in Shipborne Helicopters

Liang Fudong^{1,2}, Zhu Rupeng¹, Wang Xi²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

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

Abstract: By means of the tail rotor shaft folding mechanism, the tail drive shaft can be folded synchronously with the tail boom, thereby reducing the overall dimensions of the shipborne helicopter when parked and alleviating the space constraints on the deck and in the hangar. Focusing on the tail rotor shaft folding technology for shipborne helicopters, this paper summarizes the evolution and engineering application of related mechanisms both domestically and internationally, compares the structural characteristics and operational performance of the two configurations—the end-tooth type and the arc-tooth type, and analyzes the main shortcomings of the existing end-tooth type solutions. On this basis, combined with the technology development trends, suggestions are proposed to advance the key technology research of the arc-tooth type folding mechanism and to improve the design verification capability, providing a reference for the subsequent upgrading of shipborne helicopter transmission systems.

Keywords: arc-tooth type folding mechanism; helicopter; transmission system; application; development

0 引言

现代海上作战正朝立体化、体系化和多层级方向演进,维护海洋权益与领海安全也成为各国国防建设的重要内容^[1]。在这一背景下,舰载直升机的作战能力不断提升,水面舰艇配备直升机已成为衡量舰艇现代化水平的重要标志。舰载直升机能够执行海上侦察、救护、反潜反舰、两栖突击、空中预警和应急救援等任务,因而在舰船航空装备体系中占据不可替代的位置。各国推进军用舰船建设,同时持续发展综合性能较强的舰载直升机^[2-4]。

在直升机传动链中,尾传动轴承担着把主减速器输出的功率和转速传递至尾桨的任务。常规尾轴沿机体纵向布置,传动距离较长,停放状态下占据的空间较大,难以满足舰载平台对尺寸和空

间利用率的严苛约束,因此缩减舰载直升机的停放外廓成为型号研制中的重要问题。折叠式尾传动轴通过连接部位的接合与分离,使尾轴能够配合尾梁完成折转,从而减小整机外形尺寸和适应机库存放需求,并有利于提高舰载保障水平与作战效率^[5]。

现阶段,国内舰载直升机尾轴折叠机构可选构型较少,工程应用主要集中在端齿离合式方案。该结构在接合过程中可能出现齿顶相顶,需要人工转动旋翼才能完成端齿啮合和闭锁,并伴有振动、磨损及初始相位不匹配等现象,维护便利性和运行可靠性仍需改善。相比之下,国外相关技术已由端齿离合结构逐步发展到弧齿式构型,并在舰载直升机传动系统中得到较多应用,体现出较好的结构性能和应用潜力^[6]。

第一作者简介:梁福东(1977—),男,湖南涟源人,高级工程师,硕士,研究方向为机械, liangfudong@163.com。

1 国外舰载机折叠技术应用概况

航母飞行甲板和机库能够用于停放航空器的空间有限,舰载直升机因而需要借助折叠设计提高单位空间内的容纳数量。相关技术主要包括旋翼收拢和尾传动轴系随尾梁折转,这是舰载机总体设计中的关键环节,并已在多型装备上得到应用。发达国家较早关注这一问题,自 20 世纪上半叶开始便陆续开展各类折叠机构的研究与开发。

美国开展舰载航空器折叠技术研究和工程应用的时间较早,相关成果长期以来处于较高水平。20 世纪 30 年代,TBD 鱼雷轰炸机已采用可折叠主翼,以增加航母有限空间内的载机数量;到 20 世纪 40 年代,SB2U 单翼侦察/轰炸机、F6F“地狱猫”舰载战斗机以及 TBF“复仇者”鱼雷轰炸机也相继使用主翼折叠设计。20 世纪 70 年代,以 UH-60“黑鹰”为基础发展的 SH-60 舰载多任务直升机进一步配置了旋翼自动折叠和尾部折叠功能。其尾传动轴系折叠状态及相应机构分别如图 1 和图 2 所示,尾部连接位置采用端齿结构,以同时满足动力传递和折转要求。



图 1 SH-60 黑鹰尾翼的折叠状态

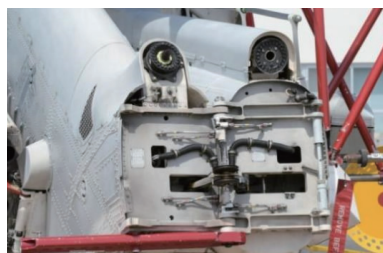


图 2 SH-60 舰载直升机尾部折叠机构

AS332“超美洲豹”是在 AS330“美洲豹”基础上发展形成的双发多用途运输直升机,由原法国宇航公司(现空客直升机公司)负责研制。该型号于 1974 年进入设计阶段,并在 1977 年 9 月完成首次飞行,随后衍生出民用、非武装通用、运输、武装和海军等近 10 种型号。其海军型尾轴采用

端齿离合式折叠方案,具体结构如图 3 所示。



图 3 AS332 折叠型尾轴结构示意图

Regonimi 与 Lombardo 在 21 世纪初针对舰载直升机平台,设计了一种基于弧齿离合原理的尾轴折叠装置^[7]。该装置的核心优势在于具备自主对中与自动收放能力,显著提升了自动化水平,契合了舰载装备无人化、高效化的演进趋势。以欧洲中型多用途直升机中的佼佼者——EH101 的舰载改型为例,其任务谱系覆盖反潜、反舰、侦察巡逻以及搜索救援,该机型已实际搭载了这一弧齿离合式尾轴折叠系统,具体构造如图 4 所示。

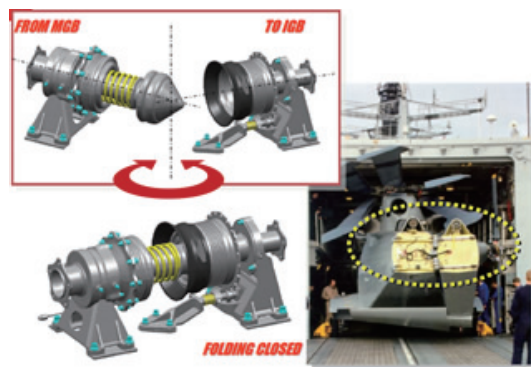


图 4 EH101 舰载直升机折叠机构示意

2 国内舰载机折叠技术应用概况

我国现役舰载直升机主要包括直 8 系列、直 9 和卡 28 三类机型。其中,直 8 系列在尾传动系统中设置了可折叠尾轴,其端齿式折叠机构的结构形式如图 5 所示。

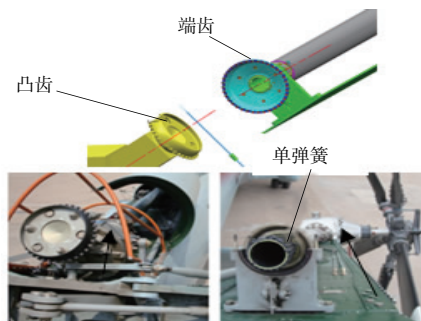


图 5 直 8 端齿式尾轴折叠机构结构示意图

直8尾轴折叠机构与AS332“超美洲豹”所用方案在总体结构上较为接近,安装位置位于尾斜轴段,并由中间减速器和尾减速器支承。机构的锁紧机制依赖单根螺旋弹簧向齿盘副施加轴向预紧力,但这套方案长期服役的薄弱点在于弹簧材质或结构的应力松弛倾向,导致预紧衰减乃至形态畸变。实际部署中已多次观测到此类故障模式:形变后的弹簧会侵入闭锁套筒的运动间隙中,两者发生动态刮擦,进而引发无规律的卡滞声响,磨损痕迹的形态记录如图6所示。



图6 弹簧擦痕照片

端齿盘和凸齿盘进入接合位置时,两个齿面的相对相位还可能导致齿顶相互抵住,即出现如图7所示的“顶齿”现象。此时机构无法直接完成啮合,必须由人员转动旋翼调整相位,直至两齿盘顺利接合。

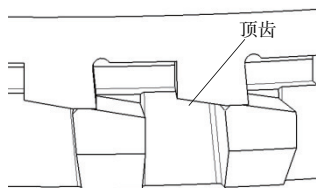


图7 端齿与凸齿“顶齿”情况

除上述故障外,国内某型可折叠尾部水平轴系在实际运行中还出现过轴向振动和支撑堵头磨损。分析表明,这两类问题与支承结构刚度不足有关^[8],相应磨损状况如图8所示。



图8 支撑堵头及支撑帽磨损示意图

3 折叠技术国内需求分析

尾传动轴系的动力学响应直接影响折叠机构接合后的运行状态,是舰载直升机设计中不可忽视的研究内容。由于装备在全寿命周期内长期承受复杂、多变的海洋环境作用,尾轴折叠系统需要具备更严格的结构性能和环境适应能力。为维护海洋权益并增强海上军事力量,各国持续推进海军航空装备建设,将舰载直升机作为争夺海上制空能力的重要平台,同时对尾传动轴折叠技术进行了长期研究。

从国内装备应用情况看,舰载直升机尾轴折叠机构尚未形成多样化的构型体系。现用端齿式方案已经暴露出弹簧擦碰、齿面相顶后需要人工盘桨以及轴向振动等问题,使机构的安全使用和稳定工作受到影响。为降低上述风险,有必要研制新的尾轴折叠构型,使其在服役全寿命周期和工作可靠性方面得到进一步提升。

弧齿式方案把弹簧布置为整体外露构件,使其不易与闭锁套筒发生接触,从结构源头降低了擦碰和异响风险。锁紧所需弹力在机构内部形成闭合受力,不向支座传递,因此可减少由此引起的振动与磨损。该机构还能自动完成折叠和齿面接合,不再依赖人工盘桨处理“顶齿”。弧齿花键同时具有承载能力较大、可自动定心、刚度较好、寿命周期较长和可靠性较高等特点^[9]。综合来看,这种构型既能规避端齿式机构在使用中暴露的主要问题,又有利于提高装备自动化水平,并具备较好的加工制造条件^[10],且与舰载直升机高可靠性发展需求相适应,可作为国内尾轴折叠机构的重要发展方向。

从现有技术储备看,国内对尾轴折叠机构的掌握仍主要停留在功能机制层面,在动力学建模、数值仿真和试验考核方面积累不足,尚未具备支撑结构参数精细设计的完整能力。该技术总体成熟度仍然较低,后续需围绕关键环节开展集中研究,逐步解决构型设计和工程验证中的难点。

4 结语

总体而言,国外尾轴折叠机构已经形成较成熟的技术路线,弧齿式构型为提高折叠尾轴的工作可靠性和自动化水平提供了可行方案。国内现用构型相对单一,端齿式机构的结构局限性在实际使用中逐渐显现,而弧齿式等先进方案仍处于研究初期,技术成熟度不高。为满足舰载直升机

传动系统的发展需要,应结合弧齿式尾轴折叠机构的结构特征,进一步开展相关关键技术研究。

针对国内尾轴折叠机构研究基础相对薄弱的现状,可依托现有技术积累,围绕弧齿式构型的受力特性、结构参数和核心技术环节开展系统研究与分阶段验证,逐步形成高可靠性的设计和研制能力。通过完善仿真、试验及工程考核手段提升技术成熟度,为舰载直升机折叠式尾传动轴的后续研发建立必要的技术支撑和能力储备。

参考文献:

- [1] 吴福初,刘卫东,沈培志,等. 舰载直升机远海护航的巡逻警戒时机[J]. 海军航空工程学院学报,2013,28(4):436-440.
- [2] 王威. 21 世纪的海军舰载直升机[J]. 现代舰船,2007(3):35-38.
- [3] 崔翰明,许建华,曾庆吉,等. 世界舰载直升机的现状与发展[J]. 直升机技术,2009(2):68-71.

- [4] 常斌,王海,杨林. 舰载直升机的研究现状与发展趋势[J]. 飞行力学,2016,34(3):7-12.
- [5] 邹小玲. 直升机旋翼/斜梁折叠控制系统原理与改进措施[J]. 直升机技术,2011(3):20-24,19.
- [6] 金立峰. 舰载直升机的技术特点分析[J]. 科技风,2008(17):47,49.
- [7] Finmeccanica S. Releasable coupling for a helicopter tail rotor power transmission line; US6050521 [P]. 2000-04-18.
- [8] 聂慧阳 王希 段铖. 某型直升机尾轴刚性支座振动超限故障分析[J]. 南华动力,2021,(3).
- [9] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机设计手册(第13册)[M]. 北京:航空工业出版社,2001.
- [10] 解超,朱如鹏,李苗苗,等. 鼓形齿联轴器在折叠机构中的应用[J]. 机械制造与自动化,2020,49(2):42-44.

收稿日期:2024-03-15

(上接第18页)

2) 铣削时各加工参数对表面粗糙度的影响由大到小依次为:行距>切削深度>切削速度>每齿进给量。实验结果表明,为获得较好的表面质量,应该选择较小的行距以及较大的每齿进给量。

参考文献:

- [1] 石增祥,王哲,蔡帆,等. 球刀铣削钛合金 TC11 切削力建模与分析[J]. 机械设计与制造工程,2023,52(6):48-52.
- [2] Hu X M, Qiao H Y, Yang M Y, et al. Research on milling characteristics of titanium alloy TC4 with variable helical end milling cutter[J]. Machines,2022,10(7):537.
- [3] Mhamdi M B, Boujelbene M, Bayraktar E, et al. Surface integrity of titanium alloy Ti-6Al-4V in ball end milling[J]. Physics Procedia,2012,25:355-362.
- [4] 张海涛,金成哲,战勇. 切削参数对钛合金叶片铣削力的影响分析[J]. 工具技术,2023,57(1):71-76.
- [5] 吴泽刚,侯永峰,苗清,等. TC11 钛合金整体叶轮铣削加工表面完整性研究[J]. 中国机械工程,2023,34(23):2862-2872.
- [6] 解存凡. 薄壁钛合金叶片加工工艺参数均匀设计实验研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2016.
- [7] 杨吟飞,赵威,李亮,等. Ti₆Al₄V 钛合金大进给铣削切削力与切削温度的试验研究[J]. 航空精密制造技

术,2014,50(4):34-37.

- [8] 王奔,赵家兴,张秀云,等. 侧铣削参数对 TC4 钛合金表面粗糙度及材料去除率的影响[J]. 工具技术,2021,55(12):9-12.
- [9] 赵威. 基于绿色切削的钛合金高速切削机理研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.
- [10] 张闻捷. 316H 不锈钢大口径管车削加工的基础研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2022.
- [11] 胡忠举,陆名彰. 机械制造技术基础[M]. 2 版. 长沙:中南大学出版社,2011.
- [12] 李佳宏,刘赣华,熊小文. 铣削参数对 316L 不锈钢切削性能的影响[J]. 工具技术,2022,56(5):94-96.
- [13] Guan L, Tang G Y, Chu P K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals [J]. Journal of Materials Research, 2010, 25(7):1215-1224.
- [14] 林海生,王成勇,李伟秋,等. 钛合金绿色切削加工工艺优化研究[J]. 工具技术,2023,57(12):15-20.
- [15] 姜文. 马氏体不锈钢的切削特性及切削参数优化研究[D]. 镇江:江苏大学,2017.
- [16] 杨后川,杨保生,杜晓伟,等. 钛合金 TB6 铣削表面粗糙度与表面缺陷研究[J]. 航空制造技术,2017,60(5):60-66,71.

收稿日期:2024-03-18