

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.02.002

## 直升机起落架技术发展与应用研究现状

冯胜全, 李琦, 杨赞, 陈翔

(中国直升机设计研究所, 景德镇 333001)

**摘要:** 直升机起落架作为保障飞行安全与任务适应性的关键系统,其技术革新始终围绕总体设计、先进材料与制造工艺、核心能力提升及运维保障能力建设等方面开展。本文首先概述了直升机起落架通过多物理相匹配协同实现功能与性能强化设计,以及起落架地面动力学技术发展由被动应对到主动防控的逻辑转变。然后综述了起落架新技术的应用与发展现状:自适应起落架构型从控制系统和结构创新两个层面实现复杂地形智能起降,组合式及跪式构型表明起落架不再局限于单一形态;新材料突破传统材料瓶颈,实现结构功能一体化设计和轻量化设计;健康监测技术依托传感器网络初步形成状态感知能力,但故障机理模型仍待融合多源数据提升诊断精度。最后总结了直升机起落架技术发展现状,并展望了未来发展方向。

**关键词:** 直升机;起落架;轻量化;性能提升;系统集成

**中图分类号:** V226 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2026)02-0266-11

## Current Status of Research on Development and Application of Helicopter Landing Gear Technology

FENG Shengquan, LI Qi, YANG Yun, CHEN Xiang

(China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China)

**Abstract:** As a key system for ensuring flight safety and mission adaptability, the technological innovation of helicopter landing gear has always revolved around overall design, advanced materials and manufacturing processes, core capability enhancement, and operation and maintenance support capabilities. This paper first outlines the functional and performance enhancement design of helicopter landing gear through multi-physics matching and collaboration, and the logical transformation of landing gear ground dynamics technology from passive response to active prevention. Then, the paper reviews the current status of new landing gear technologies: Adaptive landing gear configurations achieve intelligent takeoff and landing in complex terrain from both control system and structural innovation perspectives; combined and kneeling configurations demonstrate that landing gear is no longer limited to a single form; new materials break through the bottlenecks of traditional materials, achieving integrated structural and functional design and lightweight design; health monitoring technology, relying on sensor networks, has initially formed state perception capabilities, but fault mechanism models still need to integrate multi-source data to improve diagnostic accuracy. Finally, it summarizes the current status of helicopter landing gear technology development and looks forward to future development directions.

**收稿日期:** 2026-01-15; **修订日期:** 2026-03-10

**作者简介:** 冯胜全,男,研究员,航空工业集团首席技术专家,国务院政府特殊津贴获得者。长期从事直升机技术研究和工程研制,当前研究方向包括面向数字工程的正向研发体系构建、总体与气动设计、结构与系统集成技术、着陆装置设计等,先后承担多项直升机型号研制、国家级重大专项/研发计划。获国防科学技术进步奖1项、航空工业集团科技进步奖多项,授权专利47项。

**通信作者:** 李琦,男,高级工程师, E-mail: liq387@avic.com。

**引用格式:** 冯胜全,李琦,杨赞,等. 直升机起落架技术发展与应用研究现状[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(2): 266-276. FENG Shengquan, LI Qi, YANG Yun, et al. Current status of research on development and application of helicopter landing gear technology[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2026, 58(2): 266-276.

**Key words:** helicopters; landing gear; lightweight design; performance improvement; system integration

起落架是直升机吸收起飞、着陆能量,降低冲击过载,保证载机具有地面滑行、滑跑、刹车、转弯、牵引等机动操作的重要系统。随着直升机应用领域的不断拓宽,起落架技术发展呈现智能化、集成化、设计多样化以及功能强化等发展趋势<sup>[1]</sup>。先进材料和技术理论的引入,使得起落架的构型、功能也在不断拓展,例如复合材料融入起落架关键件实现轻量化设计,自适应起落架实现复杂地形快速起降以及磁流变起落架实现智能减震提升飞行安全性<sup>[2-3]</sup>。与固定翼飞机的起落架相比,直升机起落架具有明显技术特点。

首先,由于旋翼旋转产生的周期性激励,地面共振是直升机的一种固有的振动特性<sup>[4]</sup>,为了避免直升机运行过程中发生地面共振,刚度、阻尼特性设计是直升机起落架设计的重要内容之一。一方面要满足正常的起飞和着陆的能力吸收要求,另一方面刚度、阻尼特性又要防止与地面共振相匹配,两者之间存在设计参数冲突。近年来,相关研究在智能监测系统<sup>[5]</sup>、耦合动力学建模<sup>[6]</sup>以及主动控制技术等方面取得了显著进展,但仍面临复杂工况,如不平跑道、侧风扰动下非线性耦合效应机理不清、主动控制能量供给受限等技术瓶颈。此外,直升机地面运动特性<sup>[7]</sup>涉及到旋翼气动特性、地面转弯、摆振<sup>[8]</sup>、路基特性、起落架着陆弹跳、飞控系统、飞行员操纵等多系统耦合特性,与固定翼飞机相比,其地面动力学更为复杂。

其次,直升机一般处于低空或超低空领域,面对的地形以及使用环境更为复杂,受突发情况威胁程度更高。由于直升机旋翼受结构限制、飞行高度低等因素制约,空中出现险情时机组人员不易通过跳伞、弹射救生系统等方式进行逃生,国内外多起坠毁事故表明,抗坠毁起落架是提高直升机机组人员生存率的重要手段。早期研究以金属蜂窝结构和可溃缩管材<sup>[9]</sup>为主,通过冲击能量耗散实现乘员保护。近年来,复合材料与梯度泡沫填充结构的应用显著提升了能量吸收效率,中国直升机设计研究所提出的多级压溃式起落架设计<sup>[10]</sup>,通过分阶段能量耗散机制控制着陆过载;美国NASA开发的主动阻尼起落架系统结合磁流变阻尼器与形状记忆合金,实现坠毁工况下的自适应刚度调节。当前,高冲击载荷下复合材料失效机理、主动控制系统的实时响应能力及适航认证标准仍为技术瓶颈。

当前直升机起落架技术正经历由传统机械结构向智能化、自适应系统的深刻革新,其技术进展体现为三大核心突破:在材料性能方面,第3代钛

合金和碳纤维/陶瓷基复合材料的工程化应用,不仅使起落架结构重量下降,更解决了高温、冲击等极限工况下的耐久性难题。在功能创新层面,仿生结构主动弹性系统的发展,通过融合能量回收机制与自适应形态调整能力,突破传统被动减震的性能边界;磁流变液智能阻尼器与形状记忆合金的融合应用,实现了对复杂动态载荷下减震参数的毫秒级自适应调节;集成光纤应变传感、激光测距的智能控制系统配合数字孪生技术,已具备着陆姿态预测与减震策略实时优化能力,构建传感器网络实现故障检测预警,大幅增强飞行可靠性<sup>[11]</sup>和安全性<sup>[12]</sup>。在工程应用领域,模块化快速换装技术显著提升了高原救援、海上平台等特种任务的响应效率,推动直升机在军事行动、救援抗灾、运输等复杂场景下的广泛应用。这一历程不仅体现了航空工程技术的持续创新,也为未来垂直起降飞行器的应用提供了重要借鉴。本文从直升机起落架功能与性能强化设计、地面动力学、起落架新技术与应用发展等方面进行综合论述。

## 1 直升机起落架功能与性能强化设计

直升机着陆工况包含自转着陆、斜坡着陆、滑跑着陆以及硬着陆等,当前市场上直升机着陆速度范围从2 m/s到12.8 m/s,不同工况组合导致起落架综合性能要求高,性能优化一直是直升机起落架技术的研究重点之一。直升机起落架吸能技术从单物理相(滑撬/板簧)到双相(油气缓冲器)、三相(油气+泡沫铝),再到四相(油气+泡沫铝+胀筒)的演进,体现了对复杂工况下能量吸收性能与轻量化需求的持续优化。

轻型直升机的起落架,滑撬和板簧是常见的能量吸收结构,广泛用于小型直升机,如Robinson R22/R44、AS350海上救援直升机及低成本训练机型。这类结构通常基于单物理相,依靠金属塑性变形或弹性变形吸能,具有轻量化、可靠性好和维护简便等优势<sup>[13]</sup>。

中型直升机,如米-8、直-8系列起落架,油气缓冲器是典型的双物理相能量吸收系统,其核心原理是通过油液阻尼与气体压缩的协同作用,实现对冲击能量的高效耗散,相关适航标准已验证其在3.0g垂直过载下的结构完整性与能量吸收能力。油气缓冲器在复杂起降工况,如陆地、海上、复杂地形中具有显著优势:其一,高效的能量吸收<sup>[14]</sup>,在5~8 m/s的着陆速度下可吸收80%~95%的冲击能

量;其二,动态适应性,可通过调节油液黏度、气体预充压力及节流孔尺寸,匹配不同重量、起降速度和环境需求。目前,油气缓冲器的技术挑战和优化方向集中在两个方面:一为非线性动态响应设计,油气缓冲器的阻尼力与位移、速度高度耦合,需通过显式动力学仿真或流固耦合模型精确预测其性能,避免设计偏差;二为极端环境适应性,在沙漠高温或极地低温环境下,油液黏度变化可能影响阻尼特性。

在油气缓冲器的基础上引入泡沫铝作为第三相吸能介质,通过多材料协同实现性能跃升。泡沫铝的多孔结构在压缩过程中通过塑性屈服与孔隙塌陷耗散能量,其高比强度与油气系统的非线性阻尼特性形成互补,同时泡沫铝密度仅为实体铝的10%~20%,替代传统金属填充件可显著降低起落架质量,并通过拓扑优化设计(如梯度密度分布)实现载荷传递均匀化。在极端工况下,泡沫铝可作为“二次吸能屏障”,进一步提升缓冲效率<sup>[15]</sup>,弥补油气系统在超载或高频冲击下的性能衰减问题,其无油液泄漏特性更增强了海上或高温环境下的可靠性。该系统核心为多相耦合建模,涉及流体动力学、泡沫铝变形与材料非线性响应,需通过多物理场耦合仿真与实验验证实现精确设计。在制造工艺上,增材制造与复合封装技术成为关键方向,解决界面连接强度、耐久性与成本控制问题。

更大重量的直升机为满足抗坠毁要求,需要采用四相(油气+泡沫铝+胀筒)能量吸收设计,在超大载荷或高海拔/极地救援等极限任务场景时,仍需增强极限工况下的吸能冗余度。从三相到四相的核心升级为胀筒的引入,胀筒通常由高强度合金或复合材料制成<sup>[16]</sup>,其轴向压缩变形可通过局部屈曲和材料流动耗散能量,形成油气-泡沫铝-胀筒分阶段能量耗散和多层级失效保护,与油气系统的动态阻尼及泡沫铝的渐进失效特性形成互补,进一步提升整体能量吸收容量。

起落架除着陆缓冲吸能外,收放是另一核心功能,可实现直升机飞行中起落架收拢降低气动阻力,着陆时可靠展开并锁定。收放系统以液压驱动为主,并采用高压油路驱动收放作动筒完成伸缩动作,辅以电力确保故障容错。当前研究热点针对收放载荷随飞行状态变化<sup>[17]</sup>、收放空间设计<sup>[18]</sup>以及收放系统动力学方程<sup>[19]</sup>建立等问题开展。此外,收放系统性能仿真与故障诊断<sup>[20]</sup>、多故障场景下的健康评估<sup>[21]</sup>及多失效模式可靠性分析<sup>[22]</sup>等,为参数优化、故障预警及可靠性设计提供理论支撑,全面提升起落架系统安全性与维护效率。

## 2 直升机起落架地面动力学技术发展

直升机起落架地面动力学技术是确保飞行安全的关键技术,其发展聚焦于振动抑制与稳定性优化,以应对地面共振等高风险现象。2005年,米-17直升机试车事故即因地面共振导致尾梁折断,凸显了地面动力学缺陷的破坏性,推动技术发展从被动应对到主动防控。

直升机地面共振是起落架与机身结构在着陆或地面操作时因耦合振动引发的自激振荡现象,其核心机制是起落架的横向振动频率与直升机主旋翼的摆振频率或机身结构固有频率发生频率耦合,最终引发剧烈振动甚至结构失效。滑撬式起落架横向刚度固定且缺乏主动阻尼机制,在特定工况下,如侧风着陆、不平地面易引发横向振动。早期油气缓冲器虽通过油液阻尼抑制部分振动,但对低频耦合振荡的抑制能力有限,难以完全避免地面共振风险。地面共振表现为自激振动特性,而非传统的强迫振动,预防措施逐步聚焦于起落架设计优化。文献[23]提出了一种机体模态阻尼比计算方法,建立其与起落架刚度阻尼特性之间的分析模型,完成了直升机4种重量重心状态下的计算验证。随着油气缓冲器与泡沫铝、胀筒等多相吸能结构的发展,起落架的非线性刚度与阻尼特性显著增强。例如,泡沫铝的渐进塑性变形可吸收高频冲击能量,而胀筒的可控屈曲模式能分散低频振动能量,从而打破频率耦合条件。此外,多相系统的梯度刚度设计可使起落架的横向固有频率偏离主旋翼摆振频率,降低共振风险。另一方面,配置阻尼减摆器消耗振动能量,并调整系统刚度参数,使共振频率避开工作转速范围。文献[24]研究了旋翼减摆器参数、舰船横摇角、舰船运动周期对直升机不稳定摇晃平台开车状态的影响,指出直升机舰面共振由自激与强迫振动耦合引发,减小减摆器节流孔可抑制振幅,但扩大孔径会扩展不稳定转速区,舰船运动周期和横摇角对共振影响有限。

在直升机地面运动特性方面,文献[25]运用分岔分析方法建立了滑跑六自由度非线性动力学模型,分析了前轮转角、直升机轮胎力、偏航角对直升机地面滑跑转弯方向稳定性的影响,并总结出轮胎侧向摩擦力无法提供转弯所需向心力是直升机地面滑跑转弯失稳的本质。文献[26]建立的直升机地面运动的动力学模型综合考虑摩擦盘摩擦系数、机轮侧偏刚度系数以及稳定矩3个要素,文中还分析了直升机地面被动转向的动力学响应与系统参数敏感性之间的关联。

摆振是起落架侧向与扭转耦合的自激振动,威胁飞行安全。在防摆振设计方面,文献[27]提出了一种基于摆振简化理论的摆振动力方程,通过特性分析计算临界当量阻尼和摆振频率范围,完成了摆振响应分析用于指导减摆器设计。文献[28]从“轮胎型”摆振与“结构型”摆振两种机理层面开展论述,对当前摆振动力学建模、多体分析及试验研究特性等方面进行详细阐述,指出了摆振动力学优化设计方法和智能器件与半主动/主动控制的摆振抑制方法发展现状。文献[29]针对飞机起落架摆振特性对设计参数的灵敏度问题,采用 Taguchi 方法结合正交试验,分析滑跑全速度范围内防摆所需最大临界阻尼值的可控因素及其敏感程度。文献[30]结合材料力学和能量守恒原理,对起落架轮轴承受交变载荷的状态进行数理分析,给出轮轴应力分析和强度校核方法。文献[31]针对甲板起降过程,通过直升机姿态与船舶运动数据计算机轮接触点的甲板高度及水平矢量,创新性地以轮胎-甲板相对高度负值模拟缓冲器压缩量,利用相对速度负值表征轮胎变形率,实现地面载荷的动态建模。

### 3 起落架新技术应用与发展

#### 3.1 起落架新构型设计

自适应起落架在 2015 年由美国国防部高级研究计划局 DARPA 率先提出<sup>[32]</sup>,相比较传统起落架增加了姿态调节功能,用于调整直升机在复杂地形环境下的着陆姿态,使其与地形几何特征相匹配实现智能起降,如图 1 所示。

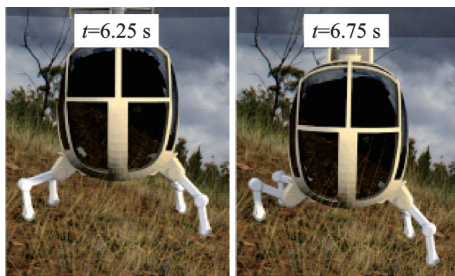


图 1 DARPA 自适应起落架概念设计

Fig.1 Concept design of DARPA adaptive landing gear

自适应起落架的核心关键在于其控制系统,其在一定程度上将智能机器人与自主控制技术相结合,根据控制模式可分为主动式与被动式。主动式控制围绕多传感器融合的方式实施<sup>[33]</sup>,通过激光雷达、位移传感器、力传感器、惯导元件在内的测量装置持续测量,获得地形阶差、机体姿态以及起落架位姿数据,通过数据分析处理转化为终端调姿机构的运动执行量,实现起落架姿态动态调整。主动

式姿态控制系统能够实现斜坡、阶差地形的起降,其注重环境及机体信息采集,通过拓展硬件能力,在野外、城市等稳定地形起降具有一定优势,目前常见应用于航模级无人机。主动式控制系统调姿流程必须由数据采集、分析处理和终端执行三步完成,对于海上环境起降<sup>[34]</sup>,上述流程存在一定的响应延迟。另一方面,主动式控制需要起落架提前调整姿态与地形适配,因此对着陆点位置精度要求高。被动式控制系统将离地高度等信息转换为感知起落架自身状态,起落架姿态在触地之前为空载随动状态,通过感知着陆后的力反馈进行姿态快速锁定<sup>[35]</sup>,大幅减少了传感器的使用数量,因此控制效率得到提升。表 1 中对主动控制与被动控制两种模式分别从 6 个不同维度进行了详细评价。

表 1 自适应起落架控制模式对比

Table 1 Comparison of control modes of adaptive landing gear

评价维度	主动控制	被动控制
监测对象	复杂,以地形几何特征测量和分析为主	简单,以起落架载荷和位姿为主
调姿模式	主动调姿	被动调姿
调姿过程	触地前完成	触地后完成
调姿频率	多次	一次
盲降能力	不具备,受环境能见度和地表遮盖物影响	具备,可在草地/沙地实现一定程度盲降
海上起降	调姿过程存在一定延时	可自动捕捉平台静息期

在结构方面,六足式起落架<sup>[36]</sup>每条腿为四连杆机构且具备 3 个自由度,是复杂地形实现姿态调整的关键结构,相应演化了电机制动器与弹簧阻尼系统串联设计构型<sup>[37]</sup>、带差动传动的电缆驱动腿式构型<sup>[38]</sup>以及更为复杂的鸟类柔性关节<sup>[39]</sup>和火星起落架<sup>[40]</sup>,尤其是斯坦福大学研发的 SNAG 自动“机器脚爪”能够在树枝上进行起飞和降落,并具备空中抓取能力,如图 2 所示<sup>[41]</sup>。

磁流变起落架利用磁流变液在磁场作用下黏



图 2 斯坦福 SNAG 鸟类仿生腿式起落架<sup>[41]</sup>

Fig.2 Stanford SNAG bionic leg landing gear<sup>[41]</sup>

度瞬间变化的特性<sup>[42]</sup>,在高冲击载荷中实现阻尼力的毫秒级连续可调,主要用于解决“常规着陆舒适性”与“坠撞生存力”之间的矛盾。由于磁性颗粒密度大,长期静止易沉降,且黏度受温度影响较大(-40~180℃),其技术挑战集中在沉降稳定性、温度敏感性和磁饱和问题等方面。

在工程化应用方面,自适应起落架和磁流变起落架目前暂无成熟的型号应用,以理论研究和试验验证为主。组合式起落架如 AH-64“阿帕奇”,为适应高寒/极地作战环境,在标准轮式起落架基础

上,加装长约 1.5 m 的可拆卸滑橇板,兼顾了轮式在铺装跑道的滑行效率与滑橇在雪地/沼泽的低接地压强优势,接地压强降低 60% 以上。跪式起落架如 UH-60“黑鹰”直升机,为满足 10.7 m/s 抗坠毁设计要求,其缓冲系统通常设计为多级缓冲,结合了油气减震器的阻尼耗能和气体弹簧的储能作用,可吸收约 60% 的坠毁冲击能量。综上,对 4 种起落架新构型技术路线从技术原理、核心功能、技术挑战、控制方式和吸能机制 5 个方面进行梳理,如表 2 所示。

表 2 起落架新构型技术路线对比

Table 2 Comparison of technical approaches for new landing gear configurations

构型	自适应起落架	磁流变起落架	跪式起落架	组合式起落架
技术原理	结构设计与控制系统共同调整起落架位姿	磁流变液在磁场下的流变特性调控阻尼力	采用可折叠/可变形结构降低着陆姿态高度	不同类型起落架进行功能集成
核心功能	复杂地形环境起降并具备常规起落架吸能	阻尼力可调范围大,响应速度快	通过机械结构主动折叠/变形,降低接地高度并分散冲击载荷	适应复杂或者非标准起降环境
技术挑战	能源消耗高,需持续供给,系统复杂度高	磁场均匀性控制,密封性要求严	机构可靠性受折叠次数限制	多模式集成设计及收放锁定机构协同控制
控制方式	闭环主动控制	半主动控制	被动机械控制	混合控制
吸能机制	作动机构与缓冲器共同吸能	剪切增稠效应,磁场强度决定阻尼力	几何变形	油气式为主,滑橇式为辅

### 3.2 起落架新材料应用

起落架需在毫秒级时间内吸收巨大的动能,同时承受高周疲劳与低周疲劳的叠加考验,传统材料的性能瓶颈已难以满足极端工况下的高损伤容限与轻量化双重指标。因此,起落架新材料的应用核心在于对高比模量、高断裂韧性及优异耐腐蚀性的取舍。

碳纤维增强树脂基复合材料凭借其优秀的比强度与比模量,满足滑橇式起落架的轻量化与功能一体化的设计需求,已成为轻小型及无人直升机起落架滑橇的首选材料。NH90 直升机起落架扭力臂进行了复合材料化尝试,通过树脂传递模塑 RTM 工艺进行制造。在同等刚度下,编织复合材料构件的疲劳寿命较铝合金提升了约 150%,如图 3 所示。



图 3 NH90 直升机起落架扭力臂

Fig.3 Torque arm of NH90 helicopter landing gear

超高强度钢以 300M 和 A100 为代表,300M 钢凭借成熟的工艺与成本优势,成为大型直升机及民用机型主起落架的经典选择,其稳定性和经济性使其在常规任务环境中表现可靠;而 A100 作为 300M 的上位替代,在舰载直升机中占据核心地位,尤其适应频繁承受极端载荷或长期暴露于盐雾环境等特殊场景,可显著降低结构失效风险并延长维护周期。增材制造技术突破了传统工艺对复杂几何形状的加工限制,结合拓扑优化等先进设计方法,可实现起落架部件轻量化与性能集成优化,钛合金与 3D 打印技术的结合对空客 A350 起落架支架及运-20 主起落架支柱减重明显,充分展现应用潜力。此外,增材制造还支持受损部件的快速修复与性能升级再制造,通过局部修复或整体替换延长起落架使用寿命。高强度钢与复合材料技术路径对比见表 3。

针对军用、民用及无人机在舰载、高原、极地等复杂场景下的需求,新材料的应用不仅实现了极致减重,更在抗疲劳、耐腐蚀和吸能性上取得了突破性进展。

军用直升机面临高过载、高抗坠毁性及战场生存性的极端要求,材料选择呈现“主承力用钢,次承力及防护用复合材料”的格局。超高强度不锈钢<sup>[43-44]</sup>如 300M 被广泛应用于固定翼飞机的起落架

表 3 起落架新材料技术路径对比

Table 3 Comparison of new material technology pathways for landing gear

评价维度	高强度钢	复合材料
应用范围	主承力件	次承力件,滑橇
性能优化路径	通过微合金化提升淬透性,开发低氢敏感钢种	优化纤维/基体界面,开发耐高温树脂
功能化设计	抗氢渗透涂层 延长腐蚀寿命	传感器内置,一体化成型
材料工艺耦合性	热处理工艺	铺层设计与固化工艺
失效模式控制	疲劳裂纹控制	解决分层/纤维拔出等多尺度失效问题

上,通过双真空冶炼降低杂质,配合整体锻造与深孔加工,实现了与机体同寿的安全设计。钛合金与金属基复合材料则用于舰载机型如 MH-60R“海鹰”的关键接头与作动筒,折叠机构寿命延长至 5 000 次起降,钛合金减轻重量约 40%,满足抗盐雾腐蚀、抗冲击、空间限制等多种需求。米-171 高原型起落架选用改进型低温超高强度钢,有效规避金属冷脆风险,确保 -50 °C 下冲击韧性保持率大于 80%。

民用直升机更注重全寿命周期成本、燃油效率和乘客舒适性,复合材料已从次承力结构向主承力结构渗透。复合材料通过纤维与基体的协同作用实现性能的定向优化。钛基复合材料和三维机织复合材料作为复合材料的重要分支广泛应用于滑撬式起落架<sup>[45]</sup>及板簧式起落架<sup>[46]</sup>。AW139 的浮筒采用碳纤维,比金属减重 20%~30%,并解决海上作业的腐蚀问题。空客 H160 起落架采用 PEEK/碳纤维热塑性复合材料,设计成变截面空心滑撬,替代传统钢管焊接结构且实现减重 40%,着陆冲击载荷降低 15%。

### 3.3 起落架健康监测技术发展

直升机起落架作为保障飞行器安全起降的核

心承载构件,其结构健康监测技术<sup>[47]</sup>已由早期的理论建模研究向多学科交叉的工程应用阶段演进。当前研究重点聚焦于构建基于多源异构数据融合的结构健康监测系统<sup>[48]</sup>,通过分布式传感网络<sup>[49]</sup>、边缘计算平台与智能诊断算法<sup>[50]</sup>的协同架构,实现对起落架结构完整性、材料疲劳损伤演化及液压系统功能状态的实时评估。技术路径呈现双重特征:一方面,传统无损检测技术仍作为基础手段,用于周期性维护中表面裂纹与内部缺陷的精准识别;另一方面,基于传感器网络<sup>[51]</sup>与信号处理的综合数据处理系统<sup>[52]</sup>正成为技术革新方向,通过多维度物理参数的同步采集,结合自适应滤波、时频分析及深度学习算法,实现损伤特征的实时提取与异常状态的早期预警。值得注意的是,当前技术研究发展<sup>[53]</sup>以理论建模与仿真分析占据主导地位,而针对高冲击载荷、复杂环境耦合作用等典型工况的试验验证体系尚未完善。

直升机起落架健康监测<sup>[54]</sup>领域正经历由“被动响应”向“主动预判”的范式转型,预测性维护已成为行业关键技术需求,总体技术框架如图 4 所示。健康监测技术以多模态数据融合为基础,通过振动、应力、温度及压力等多源异构数据的实时采集,结合深度学习模型实现时序特征提取与退化规律建模,形成“故障预警-剩余寿命预测-维护策略优化”的闭环管理架构。文献<sup>[55]</sup>论述了起落架收放系统健康监测管理技术的实施思路,该领域仍面临显著挑战,其原因在于起落架系统在瞬态冲击载荷下产生的非平稳噪声、传感器温漂与腐蚀迟滞效应的混叠干扰,传统滤波方法失效、数据清洗误判率高,导致输入数据存在显著失真。技术突破可针对传感器网络结合起落架动力学特性进行优化布局,沿载荷传递路线进行充足采样,避免测量数据与冗余噪声混叠。其次,深度学习模型的“黑箱特性”对故障诊断物理可解释性的强制要求存在冲

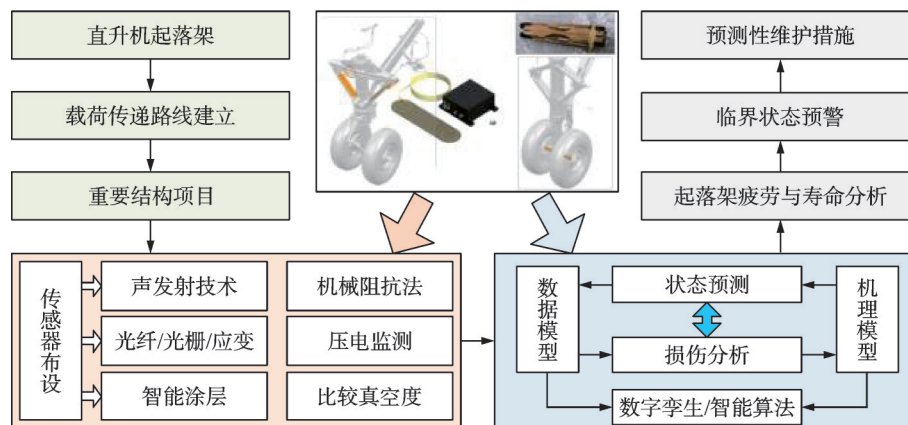


图 4 起落架健康监测技术框架

Fig.4 Framework for landing gear health monitoring technology

突,深度学习模型比如神经网络的决策过程不透明,难以满足这一要求。根本原因在于模型结构复杂,参数多,难以与物理机制直接关联。当前的解决路径依赖专家系统或规则引擎,但这些方法只是事后解释,无法真正将物理规律嵌入模型中,且在处理复杂数据时效果不佳。突破方向建议针对故障诊断进行机理建模,实现数据驱动与知识驱动的协同优化,建立可验证的力学参数-特征映射关系。

新材料<sup>[56]</sup>的采用一方面满足直升机的减重需求,另一方面新型失效模式与传统金属裂纹扩展机制存在显著差异,对健康监测系统提出了精准损伤识别与原位检测的技术挑战<sup>[57]</sup>。针对复合材料非均匀损伤特性,目前损伤演化机理研究不足,健康监测阈值设定仍依赖经验,缺乏统一的行业标准体系<sup>[58]</sup>。

数字孪生技术<sup>[59]</sup>进一步推动健康监测技术实现全生命周期管理,通过物理-数据混合建模构建起落架虚拟镜像,实现应力分布、疲劳损伤等状态参数的实时映射与仿真验证。其应用成效一方面可提升复杂地形着陆的安全裕度,能够将旋翼振动、着陆冲击等复杂动态载荷转化为不同飞行姿态下的应力分布。空客 H160 直升机采用数字孪生技术优化起落架减震系统,将地面共振问题的排查周期缩短 40%。CH-53K 通过分布式传感器网络实时采集机身、旋翼系统、起落架等关键部位的应力、振动、温度等数据,深度融合数字孪生和 AI 算法,使维护成本降低 25%~30%。另一方面,数字孪生技术支持材料性能的虚拟测试如疲劳寿命、冲击韧性等,减少物理试验次数。西科斯基 S-97 Raider 项目通过孪生模型验证了新型复合材料起落架的耐久性,降低试验成本约 25%。此外,针对起落架液压系统、关节轴等部件进行状态监测,实现特定任务场景下的故障预警也是其应用成效之一。数字孪生技术在直升机起落架领域仍处于“辅助工具”阶段,直升机起落架的瞬态冲击与气动-机械耦合效应难以完全复现,需依赖物理试验修正;机载传感器受空间与振动限制,难以覆盖内部应力、微动磨损等隐性参数;高保真孪生模型的计算需求与直升机机载系统的算力约束形成冲突。

## 4 总结与展望

未来直升机起落架技术的发展将呈现材料-结构-控制-功能的多维度协同创新趋势,推动起落架从“被动结构”向“主动智能系统”跃迁。

(1)直升机起落架采用多相协同策略,已形成多物理场耦合的复合吸能体系,当前技术瓶颈集中

在多工况适应性不足导致结构冗余度增加,动态冲击载荷下材料本构关系非线性响应难以精确控制等方面。针对复杂着陆工况的适应性拓展和抗坠毁与收放能力集成是该领域未来发展方向,例如梯度复合结构解决传统材料的不足,主动控制解决性能动态调节问题,增材制造解决结构优化问题,解决传统金属材料单一吸能模式的缺陷。

(2)直升机起落架地面动力学聚焦于地面共振与摆振两大核心问题。地面共振研究中,旋翼与起落架地面耦合的非线性建模精度不足,传统频域分析难以捕捉瞬态失稳机理,且现有阻尼器对多频段振动的自适应调控能力有限,通过实时载荷感知与反馈调节实现共振频率的动态规避是未来技术发展的一个重要方向。摆振问题则受限于轮胎-地面接触模型的简化假设:复杂地形下非稳态滑移效应导致预测误差显著,同时液压减摆系统响应延迟与冲击载荷的强瞬时性矛盾突出,后续研究需深化轮胎-地面接触的非线性动力学研究,尤其需要建立包含摩擦-滑移-变形耦合效应的高精度代理模型。

(3)复合材料及 3D 打印技术的应用目前处于从次承力构件到主承力结构的渗透阶段,多物理场耦合的损伤机理不清、工艺一致性是其目前发展瓶颈。新材料体系将持续向轻质高强、多功能复合及多元化方向发展。

(4)在起落架新构型研究中,自适应起落架注重姿态调节与复杂地形适配,相比较传统起落架,调姿机构在高过载工况下的吸能能力、重量代价和稳定性是当前研究的薄弱项。磁流变起落架突出油液阻尼力的动态调整,当前及未来发展方向仍以磁流变液性能优化、磁流变阻尼器结构设计以及控制策略等为主。跪式起落架及组合式起落架二者虽在结构层面创新,实现功能协同,但未突破传统起落架“支撑-缓冲”的核心逻辑框架。随着航空能源与控制架构从“液压主导”向“电力主导”方向演变,高功率密度电驱动式起落架采用电动化替代液压驱动,电收放、电刹车及控制精度提升是该领域未来发展的关键技术。

(5)健康监测技术对直升机起落架的维护保养由定时定检转为预测性防护具有重要意义。当前技术研究主要集中在气压、载荷等分布式传感网络构建以用于保障着陆性能,不足以支持相应的机理分析来寻找复杂工况、特殊场景下的失效因素和损伤容限。未来,起落架故障机理和性能衰减分析将作为关键技术,实现损伤特征识别和剩余寿命差异化预测,且需要从零件级研究进一步拓展到系统级层面。

## 参考文献:

- [1] CRIST D, SYMES L H. Helicopter landing gear design and test criteria investigation [M]. [S.l.]: PN, 1981.
- [2] SADRAEY M H. Aircraft design: A system engineering approach[M]//Landing Gear Design. New York: Wiley, 2012: 479-544.
- [3] LUONG Q V, JANG D S, HWANG J H. Semi-active control for a helicopter with multiple landing gears equipped with magnetorheological dampers[J]. Applied Sciences, 2021, 11(8): 3667.
- [4] LOJEWSKI R, KESSLER C, BARTELS R. Influence of contact points of helicopter skid landing gears on ground resonance stability[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2020, 11(3): 731-743.
- [5] 王唯, 夏品奇. 磁流变阻尼器用于直升机“地面共振”半主动抑制[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 102-106.  
WANG Wei, XIA Pinqi. Semi-active suppression of helicopter ground resonance using magnetorheological damper [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22 (1) : 102-106.
- [6] 魏钢, 刘湘一, 宋山松, 等. 直升机滑跑地面共振特性研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2018, 33(2): 217-224.  
WEI Gang, LIU Xiangyi, SONG Shansong, et al. Research on characteristics of helicopter running ground resonance[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2018, 33(2): 217-224.
- [7] ZHANG J H, YANG J, XIA P Q. Aeromechanical stability of rotor/fuselage coupling system in helicopter ground taxiing[J]. Aerospace, 2025, 12(11): 989.
- [8] AKKAYA B, BAL H. Analysis of the shimmy in the landing gear of a general-purpose helicopter for different payloads[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2746(1): 012009.
- [9] 卢致龙, 常成. 直升机复合材料波纹梁结构抗坠毁设计技术研究[J]. 直升机技术, 2015(3): 14-19.  
LU Zhilong, CHANG Cheng. Study of helicopter composite wave beam structure anti-crash design technology[J]. Helicopter Technique, 2015(3): 14-19.
- [10] 李孝松, 杨潜, 黄建新, 等. 起落架坠毁性能计算研究[J]. 直升机技术, 2010(3): 27-30, 6.  
LI Xiaosong, YANG Zen, HUANG Jianxin, et al. Landing gear crash performance calculation analysis[J]. Helicopter Technique, 2010(3): 27-30, 6.
- [11] CHIARIELLO A, CARANDENTE TARTAGLIA C, ARENA M, et al. Vibration qualification campaign on main landing gear system for high-speed compound helicopter[J]. Aerospace, 2024, 11(2): 130.
- [12] ARMAAN A, KESHAV S, SRINIVAS G. A step towards safety: Material failure analysis of landing gear [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27: 402-409.
- [13] 王婷婷, 王陆阳. 某型无人直升机滑撬式起落架受力及结构强度仿真分析研究[J]. 机电信息, 2020(35): 97-98.  
WANG Tingting, WANG Luyang. Simulation analysis of force and structural strength of skid landing gear of an unmanned helicopter[J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(35): 97-98.
- [14] 杨嘉陵, 吴卫华, 赵岩, 等. 跪式起落架在武装直升机坠毁过程中能量吸收能力研究(II): 理论模型分析方法[J]. 航空学报, 2002, 23(1): 28-32.  
YANG Jialing, WU Weihua, ZHAO Yan, et al. Energy absorbing capability of kneeling landing gear for new type armed helicopters during crash process (II): Theoretical model analysis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(1): 28-32.
- [15] 韩雨莹, 房兴波, 陈虎, 等. 组合式起落架缓冲器耐坠毁性能仿真与分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(2): 239-244.  
HAN Yuying, FANG Xingbo, CHEN Hu, et al. Crashworthiness performance simulation and analysis of oleo-pneumatic and foam-aluminum combined-type landing gear buffer[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54 (2) : 239-244.
- [16] 韩雨莹. 起落架压溃吸能缓冲器抗坠毁性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.  
HAN Yuying. Research on crashworthiness performance of the landing gear collapse energy absorption buffer [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.
- [17] 沈文静, 彭志军, 李彬, 等. 某型飞机前起落架收载荷当量化研究[J]. 航空学报, 2016, 37(7): 2218-2224.  
SHEN Wenjing, PENG Zhijun, LI Bin, et al. Retraction load equivalent research of a certain airplane nose gear[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(7): 2218-2224.
- [18] 朱林昊, 邹泽铨, 印寅, 等. 面向狭小空间的起落架收放轨迹智能设计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(12): 2560-2570.  
ZHU Linhao, ZOU Zehua, YIN Yin, et al. Intelligent design method of landing gear retraction and extension trajectory for narrow space[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(12): 2560-2570.
- [19] 印寅, 聂宏, 魏小辉, 等. 多因素影响下的起落架收放系统性能分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(5): 953-960.

- YIN Yin, NIE Hong, WEI Xiaohui, et al. Retraction system performance analysis of landing gear with the influence of multiple factors[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(5): 953-960.
- [20] 石旭东, 英福君, 张宇, 等. 飞机起落架收放系统性能仿真与故障分析[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(2): 65-71, 184.
- SHI Xudong, YING Fujun, ZHANG Yu, et al. Performance simulation and fault analysis of aircraft landing gear extension and retraction system[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(2): 65-71, 184.
- [21] 和麟, 梁丽媛, 马存宝. 飞机起落架液压收放系统多故障仿真与健康评估[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(6): 990-995.
- HE Lin, LIANG Liai, MA Cunbao. Multiple failure simulation and health evaluation of aircraft landing gear hydraulic retraction/extension system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(6): 990-995.
- [22] 周长聪, 吉梦瑶, 张屹尚, 等. 多失效模式下起落架机构可靠性及灵敏度研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(1): 46-54.
- ZHOU Changcong, JI Mengyao, ZHANG Yishang, et al. Mechanism reliability and sensitivity analysis of landing gear under multiple failure modes[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(1): 46-54.
- [23] 吴靖, 胡国才, 柳泉, 等. 基于直升机地面共振要求的起落架刚度及阻尼优化设计[J]. 航空学报, 2018, 39(12): 170-179.
- WU Jing, HU Guocai, LIU Quan, et al. Optimal design for landing gear stiffness and damping based on helicopter ground resonance requirements[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(12): 170-179.
- [24] 赵则利, 许锋. 舰载直升机“舰面共振”动力学分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6650-6657.
- ZHAO Zeli, XU Feng. Dynamic analysis of “ship resonance” for shipboard helicopter[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(16): 6650-6657.
- [25] 王嘉伟, 尹乔之, 孙浩, 等. 基于分岔分析法的直升机地面转弯运动稳定性研究[J/OL]. 航空工程进展: 1-9 [2026-02-27]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1479.V.20250116.0937.004>.
- WANG Jiawei, YIN Qiaozhi, SUN Hao, et al. Research on the stability of helicopter ground steering motion based on bifurcation analysis method[J/OL]. Advances in Aeronautical Science and Engineering: 1-9 [2026-02-27]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1479.V.20250116.0937.004>.
- [26] 安翼飞, 陈翔, 方建议. 直升机地面转向参数敏感性研究[J]. 中国科技信息, 2022(9): 26-29.
- AN Yifei, CHEN Xiang, FANG Jianyi. Study on sensitivity of helicopter ground steering parameters[J]. China Science and Technology Information, 2022(9): 26-29.
- [27] 孙为民, 方建议. 直升机支柱式前起落架摆振分析[J]. 直升机技术, 2016(4): 17-20.
- SUN Weimin, FANG Jianyi. Shimmy analysis of a helicopter nose strut landing gear[J]. Helicopter Technique, 2016(4): 17-20.
- [28] 刘小川, 刘冲冲, 牟让科. 飞机起落架系统摆振动力学研究进展[J]. 航空学报, 2022, 43(6): 99-114.
- LIU Xiaochuan, LIU Chongchong, MOU Rangke. Research progress on shimmy dynamics of aircraft landing gear systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(6): 99-114.
- [29] 刘胜利, 刘小川, 牟让科. Taguchi方法在飞机起落架摆振特性对设计参数灵敏度分析中的应用[J]. 振动工程学报, 2020, 33(4): 750-755.
- LIU Shengli, LIU Xiaochuan, MOU Rangke. The application of Taguchi method in sensitivity analysis on landing gear shimmy stabilization of the aircraft to design parameters[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(4): 750-755.
- [30] 李兵, 宋先富, 张东波, 等. 直升机起落架机轮轴载荷分析及有限元仿真[J]. 航空制造技术, 2014, 57(8): 102-105.
- LI Bing, SONG Xianfu, ZHANG Dongbo, et al. Helicopter landing gear axle load analysis and finite element simulation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(8): 102-105.
- [31] LIAO Z, WEI G, GANG W, et al. Study on simulation modeling of dynamics for landing gear of helicopter with deck-landing[J]. Journal of System Simulation, 2020, 27(8): 1697-1702.
- [32] 王璐菲. DARPA研制出新型直升机自适应起落架[J]. 防务视点, 2015(11): 63.
- WANG Lufei. DARPA developed a new type of helicopter adaptive landing gear[J]. Defense Point, 2015(11): 63.
- [33] 刘雨时. 多传感器融合的直升机自适应起落架协同控制系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- LIU Yushi. Research on helicopter adaptive landing gear collaborative control system based on multi-sensor fusion[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [34] 崔滨. 直升机自适应起落架控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
- CUI Bin. Study on adaptive landing gear control technology of helicopter[D]. Harbin: Harbin University of

- Science and Technology, 2021.
- [35] 李琦, 苗红涛, 杨赞. 具备触地感知能力的自适应起落架构型设计[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(2): 285-291.  
LI Qi, MIAO Hongtao, YANG Yun. Design of an adaptive landing gear with ground contact sensing capability[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(2): 285-291.
- [36] 刘昊林, 刘小川, 任佳, 等. 无人直升机六足式起落架设计与控制算法[J]. 中国机械工程, 2023, 34(4): 421-430, 439.  
LIU Haolin, LIU Xiaochuan, REN Jia, et al. Design and control algorithm for hexapod landing gear of unmanned helicopter[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(4): 421-430, 439.
- [37] STOLZ B, BRODERMANN T, CASTIELLO E, et al. An adaptive landing gear for extending the operational range of helicopters[C]//Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid: IEEE, 2018: 1757-1763.
- [38] TIAN B L, GAO H B, YU H T, et al. Cable-driven legged landing gear for unmanned helicopter: Prototype design, optimization and performance assessment [J]. Science China Technological Sciences, 2024, 67(4): 1196-1214.
- [39] LUO C, ZHAO W K, DU Z P, et al. A neural network based landing method for an unmanned aerial vehicle with soft landing gears[J]. Applied Sciences, 2019, 9(15): 2976.
- [40] LANGBERG S A, TYLER J D, PIPENBERG B T, et al. Landing gear design, fabrication, and testing for the ingenuity Mars helicopter[C]//Proceedings of the 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Big Sky, MT, USA: IEEE, 2022: 1-13.
- [41] RODERICK W R T, CUTKOSKY M R, LENTINK D. Bird-inspired dynamic grasping and perching in arboreal environments[J]. Science Robotics, 2021, 6(61): eabj7562.
- [42] CHOI Y T, ROBINSON R, HU W, et al. Analysis and control of a magnetorheological landing gear system for a helicopter[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2016, 61(3): 1-8.
- [43] 王晓辉, 罗海文. 飞机起落架用超高强度不锈钢的研究及应用进展[J]. 材料工程, 2019, 47(9): 1-12.  
WANG Xiaohui, LUO Haiwen. Research and application progress in ultra-high strength stainless steel for aircraft landing gear[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(9): 1-12.
- [44] 赵博, 许广兴, 贺飞, 等. 飞机起落架用超高强度钢应用现状及展望[J]. 航空材料学报, 2017, 37(6): 1-6.  
ZHAO Bo, XU Guangxing, HE Fei, et al. Present status and prospect of ultra high strength steel applied to aircraft landing gear[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(6): 1-6.
- [45] 吴玉根. 复合材料滑橇式起落架落震力学性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.  
WU Yugen. Research on the mechanical properties of composite skid landing gear[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [46] 王翔华, 成玲, 张一帆, 等. 三维机织复合材料板簧式起落架结构设计及其有限元分析[J]. 纺织学报, 2020, 41(3): 68-77.  
WANG Xianghua, CHENG Ling, ZHANG Yifan, et al. Structural design and finite element analysis of landing gear with leaf spring made of 3-D woven composite [J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(3): 68-77.
- [47] 郭丞皓, 于劲松, 宋悦, 等. 基于数字孪生的飞机起落架健康管理技术[J]. 航空学报, 2023, 44(11): 175-193.  
GUO Chenghao, YU Jinsong, SONG Yue, et al. Application of digital twin-based aircraft landing gear health management technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(11): 175-193.
- [48] 孙玮. 基于FPGA的飞机起落架典型结构健康监测系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
SUN Wei. Research on FPGA-based health monitoring system for typical structure of aircraft's landing-gear[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [49] 夏嘉斌. 飞机起落架光纤监测信号智能解调方法与载荷重构关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.  
XIA Jiabin. Research on intelligent demodulation methods for aircraft landing gear optical fiber monitoring signals and key technologies in load reconstruction [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023.
- [50] 程哲, 杨翼, 胡鸢庆. 基于FSDP图像和DCNN的无人机起落架关键件结构损伤智能检测方法[J]. 中国科学(技术科学), 2023, 53(8): 1372-1384.  
CHENG Zhe, YANG Yi, HU Niaoqing. Intelligent detection approach for the critical part in the landing gear of UAV based on the FSDP figure and DCNN [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2023, 53(8): 1372-1384.
- [51] 冯蕴雯, 王锐, 卢涛, 等. 基于多策略协同优化神经网络的起落架状态监测[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(2): 264-273.  
FENG Yunwen, WANG Rui, LU Tao, et al. Land-

- ing gear condition monitoring based on back propagation neural network-based on multi-strategy cooperative optimization[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(2): 264-273.
- [52] 张卓. 基于视情维修的飞机起落架结构健康状态监测方法[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(3): 149-151.  
ZHANG Zhuo. Monitoring method of aircraft landing gear structure health condition based on condition maintenance [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2025, 61(3): 149-151.
- [53] 章建华. 通用航空飞行器起落架技术的发展趋势和关键技术[J]. 军民两用技术与产品, 2018(24): 42.  
ZHANG Jianhua. Development trend and key technology of landing gear technology for general aviation aircraft[J]. Dual Use Technologies & Products, 2018 (24): 42.
- [54] 孙见忠, 王卓健, 闫洪胜, 等. 航空预测性维修研究进展[J]. 航空学报, 2025, 46(7): 6-29.  
SUN Jianzhong, WANG Zhuojian, YAN Hongsheng, et al. Research advances in aircraft predictive maintenance[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(7): 6-29.
- [55] 孙倩, 吕镇邦, 沈新刚. 起落架健康管理综合验证方法[J]. 航空计算技术, 2020, 50(4): 117-120, 124.  
SUN Qian, LV Zhenbang, SHEN Xingang. Integrated verification approach for landing gear health management[J]. Aeronautical Computing Technique, 2020, 50(4): 117-120, 124.
- [56] 谌广昌, 姚佳楠, 张金栋, 等. 高性能热塑性复合材料在直升机结构上的应用与展望[J]. 航空材料学报, 2019, 39(5): 24-33.  
CHEN Guangchang, YAO Jianan, ZHANG Jindong, et al. Application and prospect of high-performance thermoplastic composites in helicopter structure[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39 (5) : 24-33.
- [57] 李锋, 冯珂, 李晨旭, 等. FTA与RBF方法结合的某型飞机起落架故障诊断[J]. 液压气动与密封, 2024, 44(5): 20-23.  
LI Feng, FENG Ke, LI Chenxu, et al. Fault diagnosis on landing gear of a certain type of aircraft based on FTA and RBF [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2024, 44(5): 20-23.
- [58] 朱欣如. 复合材料起落架结构设计及优化分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
ZHU Xinru. Structure design and optimization analysis of composite landing gear [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [59] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.  
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.

(编辑:孙静)