

文章编号: 1674-8190(2023)05-128-10

# 典型直升机完整性维持关键技术需求分析研究

李昌范, 李健, 吴云章, 高延达, 孙晓婷  
(陆军航空兵学院 陆军航空兵研究所, 北京 101121)

**摘要:** 典型直升机是实施立体突击作战的重要力量, 在火力支援、立体补给、综合勤务保障等方面发挥着重要作用。针对其构造形式和作战使用要求, 直升机在低空超低空低速执行任务时, 使用场景中面临低空和地面的多种威胁, 致使其服役环境和作战环境更加恶劣。本文通过分析直升机在作战中面临的威胁特点, 阐述在直升机设计和使用维护过程中, 综合防护能力、环境适应能力、战伤抢修能力对直升机作战完整性的影响, 通过合理设计机体结构, 提升生存能力, 提升海上、高原、沙尘等环境适应能力, 建立完备的战伤抢修能力来保证直升机使用的完整性, 满足使用需求。

**关键词:** 直升机; 使用威胁; 环境适应性; 综合防护能力; 战伤抢修能力

中图分类号: V271

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.05.16

## Study on key technology requirements analysis for integrity maintenance of typical helicopters

LI Changfan, LI Jian, WU Yunzhang, GAO Yanda, SUN Xiaoting  
(Army Aviation Research Institute, Army Aviation Academy, Beijing 101121, China)

**Abstract:** The typical helicopters are the important force in the implementation of three-dimensional assault operations, and play an important role in fire support, three-dimensional supply and comprehensive service support. For the structural form and operational requirements, the use of scenarios facing a variety of low-altitude and ground threats, in the low-altitude ultra-low-altitude low-speed mission of helicopters, which results in its worse service environment and combat environment. By analyzing the threat characteristics of helicopters in combat, the influence of comprehensive protection ability, environmental adaptability and combat injury repair ability on the combat integrity of helicopters in the process of helicopter design use and maintenance is expounded in this paper. The integrity of helicopter use can be ensured by reasonably designing the body structure, improving the survival ability, improving the environmental adaptability of sea, plateau, sand and dust, and establishing a complete battle injury repair ability, which can meet the needs of use.

**Key words:** helicopter; operational threat; environmental adaptability; comprehensive protection capability; battle injury repair capability

收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2023-10-11

通信作者: 李昌范, lcf\_mq@126.com

引用格式: 李昌范, 李健, 吴云章, 等. 典型直升机完整性维持关键技术需求分析研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(5): 128-137.

LI Changfan, LI Jian, WU Yunzhang, et al. Study on key technology requirements analysis for integrity maintenance of typical helicopters[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(5): 128-137. (in Chinese)

## 0 引言

直升机能够垂直起落,对起降场要求低,能在空中进行前、后、左、右各个方向任意运动,并且在一定高度下能够悬停,因此能够承担其他交通工具无法完成的任务。例如直升机可以在山顶、峡谷、舰艇艇面、海洋油井平台等处起落,可以在悬崖绝壁、水面上悬停,用于执行人员救援或物资运载等任务。直升机这些特点,使其广泛应用于军事和民用领域,具有广阔的用途及发展前景。在军事用途方面,直升机广泛应用于近地火力支援、岛屿夺控、立体突击、勤务保障、战场救护等。在民用方面,直升机应用于短途运输、医疗救护、救灾救生、紧急营救、吊装设备、地质勘探、护林灭火、空中摄影等<sup>[1]</sup>。

飞机的服役完整性是指飞行器在服役(作战)使用过程中保持完好及功能不退化的属性;飞行器在服役(作战)使用过程中保持完好及功能未受到削弱的状态;飞行器在服役(作战)使用过程中,在要求的耐久性、保障性、安全性、气动能力、任务能力、生存力、修复性、电磁兼容性和体系兼容性等水平下,保持完好及功能未受到削弱的能力<sup>[2-5]</sup>。军用直升机系统完整性是指直升机在寿命周期服役过程中确保性能退化保持在一定的期望水平。通过结构合理设计、改进结构材料、优化使用方法、提升外场维护质量等手段能有效保持直升机再出动能力。国外直升机设计研究起步较早,相关完整性设计规范体系相对完整。在《飞机结构完整性大纲》的基础上,针对发动机结构不完善导致飞机事故增多,1984年美国发布了MIL-STD-1783《发动机结构完整性大纲》<sup>[6]</sup>,系统地规范了航空发动机结构完整性相关要求;1986年美国发布了MIL-A-87244《航空电子设备完整性大纲要求》,主要内容为航空电子设备可靠性和保障性等最低可接受的基本特性要求<sup>[7]</sup>。

直升机服役完整性与固定翼飞行相似,包含了生存力、通用质量特性等因素影响。但相对于固定翼飞机,直升机战场威胁环境更多;部署范围广,自然环境更加恶劣;临时野战机场多,对于野战抢修能力建设需求更加迫切。

本文主要针对直升机在作战使用过程中特殊作战使用环境,梳理直升机在综合防护能力、环境适应能力、快速抢修能力的需求,提出在结构设计、环境评估、抢修原则等具体措施,以期提升典

型直升机服役完整性。

## 1 直升机使用特点

### 1.1 使用环境恶劣

陆航直升机使用空域绝大多数是低空和超低空空域,飞行真高均在3 000 m以下。作为陆军低空火力,直升机伴随地面部队部署范围广,沿海、戈壁、沙漠、高原等均有部署,直升机服役使用面临着高盐、高湿、高温、高寒等严苛使用环境,损伤方式多样,服役使用环境更加恶劣,统计表明,军用直升机的地面停放时间约占总使用时间的96%,是直升机结构、腐蚀防护涂层等性能退化的重要因素。特别是野战机场起降,场地环境复杂,沙尘对于旋翼、发动机等动部件结构完整性影响较大。

直升机在服役过程中时刻经受外界复杂环境的综合作用,极易出现性能变低、失效甚至报废等问题,这不仅缩短了装备的服役寿命、降低使用率、大幅增加维护维修的费用和工作强度,而且直接影响直升机战技性能的发挥,有时甚至对其使用安全造成严重的威胁。如沿海、海岛等环境下服役的直升机普遍存在涂层/镀层脱落、腐蚀严重等现象;沙漠环境下直升机主要表现出活动部件磨损/卡滞、电路劣化、密封失效等环境适应性问题;在海上环境,按照陆军平原设计指标设计的机电系统、武器系统等,会因为高盐高湿因素继而黑屏、失效;而高原低气压环境则对直升机非金属部附件、电子电气系统等影响较大。

### 1.2 面临地面威胁

直升机作战环境与固定翼飞机相比战场环境更加严酷,威胁更多。直升机不仅面临着防空导弹、高炮的威胁,还面临着各类轻武器、反器材武器和便携式防空武器的威胁。例如,武装直升机在进行低空突防和支援作战时,飞行高度5~50 m,这个高度是地面轻武器和反器材武器杀伤威力最大的高度范围,地面轻装步兵就可以对直升机进行攻击,其中主要威胁包括各种口径步枪弹、12.7 mm穿甲弹和穿甲燃烧弹、30 mm高射炮弹以及各种制导模式的地空导弹。在阿富汗战争中,对参战的米-6、米-8、米-24直升机主要功能系统战斗损伤相对频次进行了统计,如表1所示。

表 1 阿富汗战争中直升机主要功能系统战斗损伤相对频次对比

Table 1 Percentage of relative frequency of combat damage of main functional systems of helicopters in Afghanistan war

系统	频次百分比/%					
	旋翼和尾桨	机体结构元件	传动系统	操纵和液压系统	动力装置	航空设备和无线电电子设备、武器
米-26	25~27	78~80	13~15	9~11	37~39	12~14
米-8	44~46	95~97	8~10	9~11	33~35	35~37
米-24	46~48	92~94	6~8	12~14	28~30	45~47

随着技术的发展和任务的拓展,直升机的威胁机理复杂多变,特别是攻击武器的射程、打击精度、杀伤威力和威胁方式等性能不断改善,使其破坏机理从传统的硬杀伤方式,向多样化方向发展,导致飞机的战伤机理和战伤模式更加复杂化<sup>[8]</sup>。

## 2 直升机服役完整性需求

直升机生存环境严苛,需要采用机体一体化、整体化结构形式以减少疲劳薄弱部位,但是又面临在结构遭遇意外损伤或者战伤的情况下不能实现快速修复的问题,因此对于综合防护能力、环境适应能力、快速抢修能力等方面有着特殊的需求。

典型直升机服役完整性通常受到直升机设计水平和用户维护能力、使用策略等的综合影响,如图 1 所示,通过设计赋能、使用增能影响直升机服役完整性。

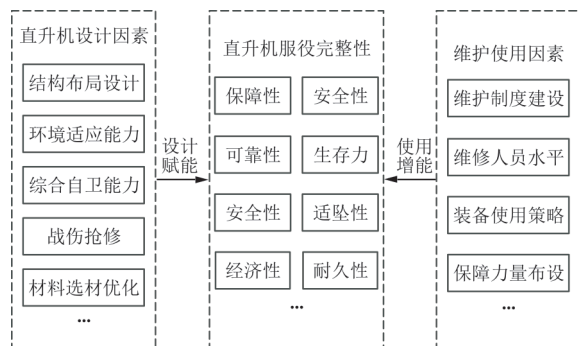


图 1 典型直升机服役完整性影响因素

Fig. 1 Influencing factors of typical helicopter service integrity

在设计过程中,直升机的结构布局、环境适应能力、综合自卫能力等因素决定了直升机到底好不好修、各个分系统可靠与否、面对威胁生存能力等性能,为服役完整性进行赋能;在使用过程中,用户的维护水平、使用策略、保障力量的储备等决定了直升机能不能修得好、修得快不快、损伤后能不能修、抢修后任务能力保持的如何等,通过用户

使用,对服役完整性进行恢复和增能。

### 2.1 直升机综合防护能力需求

#### 2.1.1 综合防护能力需求

直升机的综合防护能力是其战场生存能力的重要部分。随着威胁手段的不断增加,直升机在设计阶段需要综合考虑主动防护、红外隐身、综合电子自卫、反蜂群等综合防护手段。除此之外,在作战阶段为应对低空战场环境威胁,开展战场威胁与战损形式分析,进行全机抗弹击区域划分,建立直升机易损性模型(如图 2 所示),制定全机抗弹击区域与各区域抗弹击指标,建立重点抗弹击区域和关键抗弹击部位的抗弹击方案。通过易损性模型分析,制定全机抗弹击设计策略和装备使用策略,用于指导部队制定训练大纲和维护工作。对于关键的前机身、中部机身、机组位、发动机舱、旋翼采取防弹击、油箱抑爆、系统冗余设计等措施。

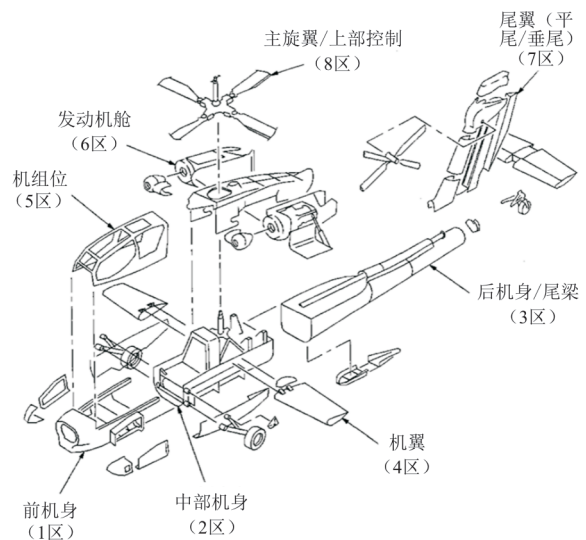


图 2 直升机结构区域划分示例

Fig. 2 Helicopter structure area division example

直升机旋翼作为升力的唯一来源,是直升机生存力实际的关键部件。由于旋翼面积较大,在

执行任务时中弹概率更大。直升机桨叶无法安装防弹措施,因此,研究桨叶弹伤快速抢修技术,全面、准确地评估直升机战伤及其影响,制定快速抢修预案,以保持装备的持续作战能力。

桨叶在设计过程中也进行弹击试验,但是其使用的桨叶均是新研新制产品,没有服役使用历程和外场维护历程,其疲劳特性和修复后使用限制与外场维修的桨叶有着一定的区别,目的是为航修厂和制造厂提供维修方法和维修策略;此外,由于快速抢修方案和工具等差别,在设计阶段得到的维修方案和桨叶维修后使用特性并不完全适用于战时桨叶快速抢修,需要对服役后直升机桨叶进行弹击试验,研究弹击损伤形式和修理特性,确定修理后疲劳特性和使用限制,为制定相关战伤抢修方案、建立组织管理方法和损伤评估方法、发展抢修效能评估技术和快速维修技术、研发抢修材料和抢修工具、提出修复后使用限制等系统研究提供初始数据支撑。

对于轻蒙皮和长桁结构而言,延时引信弹丸通常能够在入口侧产生相对清晰的穿透。在中空封闭结构中(如尾梁),爆炸破片能够穿透蒙皮,并能够对其造成巨大损伤。在弹丸正前方的、空间有限的高能破片前进路径上,可能发生弹丸完全碎裂的情况。飞行破片可能会在周围结构中造成大量穿透,冲击波和超压效应会导致金属撕裂和变形。如果高爆燃烧弹命中飞机的框和横梁等主要结构,则损伤可能包括大截面材料损失以及结构屈曲和变形。如果弹丸命中薄而轻的结构(如尾翼),则在弹丸发生爆炸之前即完全穿透结构。

通过合理布置机上设备、优化关键部件布局、降低关重部位被集中概率,才能降低使用威胁对于直升机的损伤,提升直升机的综合生存能力。

### 2.1.2 直升机综合防护能力对于服役完整性的影响

直升机的综合防护能力受到对抗能力、防护能力、材料结构等因素的综合影响,如图3所示。通过升级综合电子自卫系统、有效抑制红外特征、干扰弹抛放策略优化、升级雷达干扰吊舱等措施,降低直升机使用过程中被发现和锁定的概率。通过选择更加轻质的综合防护能力更好的防弹装甲,在直升机关重部位合理布置,降低装甲加装对于直升机气动和机动性能的影响,提升直升机的装甲防护能力,降低战场威胁对直升机产生致命

损伤的概率。通过合理布局直升机机体结构,降低结构关键部位损伤风险,探明直升机关键部位修复后任务能力,提升结构抗弹击能力。通过直升机综合防护能力提升战场生存力和修复性,保障直升机具有持续作战的能力;提升直升机安全性,保证直升机在对抗过程中关键部件不会发生致命损伤,提升直升机服役完整性。

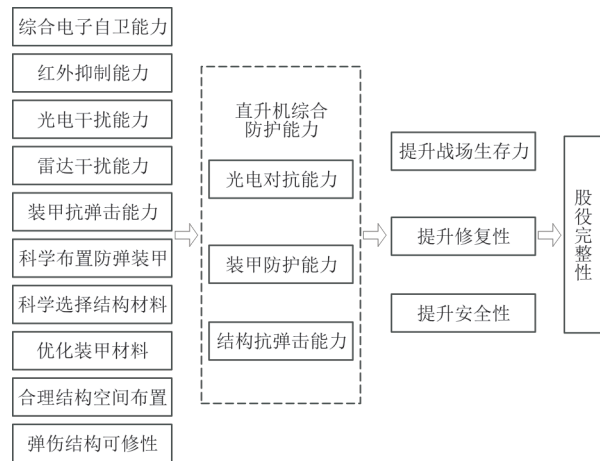


图3 直升机综合防护能力对于服役完整性的影响

Fig. 3 The influence of helicopter comprehensive protection capability on service integrity

## 2.2 典型直升机环境适应性能力需求

### 2.2.1 直升机环境适应能力需求

随着我国直升机技术的不断发展,众多型号的直升机相继设计定型、批量生产并交付使用。提升直升机的环境适应性,有效地使用和维护直升机,是保证直升机的飞行安全、提高任务出勤率的重要途径,成为迫切需要解决的问题。

直升机具有精密仪器聚集性高、装备可靠性要求高、装备数据依赖性高的特点,直升机运用过程中,所处环境复杂多变,恶劣的环境条件可能使其环境敏感,系统作战效能下降,甚至功能完全丧失,在允许的使用环境范围内也可能因环境条件的不同出现作战效果和效益的差别<sup>[9]</sup>。直升机主要服役环境包括沿海湿热环境、高寒高砂环境、高原地区环境以及内陆环境。沿海湿热环境、高寒高砂环境、高原地区环境由于特殊的环境特点,对于直升机服役完整性有着显著的影响<sup>[10-12]</sup>。为提高直升机在各种环境的作战效能,对直升机环境适应性的研究一直受到广泛重视。

沿海湿热环境具有高温高盐高湿的显著特点,对于直升机防腐蚀的要求相对于内陆地区更

加严苛,对直升机结构腐蚀、机载设备故障等影响较大。高温可使材料结构强度减弱,电子设备电性能变化、甚至损坏;润滑剂黏度变低,润滑剂外流造成连接处润滑能力降低。高湿度会加速金属氧化/电化学腐蚀、有机和无机表面覆盖层的化学或电化学破坏;高盐雾会导致金属等材料的腐蚀、加速电化学反应导致的腐蚀和应力腐蚀。直升机旋翼、机身等部件在沿海环境服役后的腐蚀情况如图4~图9所示。



图4 旋翼内部导线包铁锈蚀  
Fig. 4 Rotor internal wire wrapped iron corrosion



图5 机身后部货舱门沿  
Fig. 5 Rear cargo door edge of fuselage



图6 机身构件  
Fig. 6 Fuselage components



图7 货舱锁扣  
Fig. 7 Cargo locks



图8 风扇叶片前缘脱漆  
Fig. 8 Depainting of fan blade leading edge



图9 外挂油箱内侧  
Fig. 9 Inside of the external fuel tank

高寒高砂环境具有低温、紫外线强、沙尘多的特点。强烈的太阳辐射、极低的温度环境和沙尘环境会促使典型结构件橡胶、密封剂等非金属材料发生硬化、发黏、变脆、变色、失去强度等现象;绝缘材料介电性质改变,绝缘性能下降。沙尘环境会冲蚀,磨蚀轴承、密封处和各种电器连接处,造成设备损坏,如图10所示。沙尘环境中,发动机易堵塞涡轮定子和转子上的散热孔,造成发动机涡轮超温损坏以及沙尘静电引起的电子设备故障等。



图10 沙尘冲击导致桨叶下表面防护漆层脱落  
Fig. 10 Sand impact causes the protective paint layer on the lower surface of the blade to fall off.

与平原地区相比,高原地区自然环境一般具有典型的“三低两强”特点,即“气温低、气压低、空气含氧量低,紫外线强、风沙强”<sup>[13]</sup>。高原环境的低气压、低温、昼夜温差大、日照辐射强和沙尘等

特点对直升机的使用影响巨大,尤其是直升机发动机系统、液压系统、环控系统、电力电子部件、机械系统裸露运动部件、光学部件、裸露气动传感器、非金属材料、裸露天线及非气密舱电插头等部分易受高原环境影响,出现各种问题,如图11~图14所示。低温、低压、强太阳辐射、沙尘等因素的综合作用会使发动机润滑系统的润滑油黏度增大,导致发动机旋转部件的旋转阻力矩增加;使蓄电池电压下降,影响起动机的起动扭矩和发动机点火电嘴的跳火能量;使发动机和传动系统的运转部件、机械设备的运动单元等磨损加剧等;使橡胶、塑料等非金属材料性质发生改变,如橡胶件变硬、变脆,油液系统橡胶密封圈密封效果变差,引起油液渗漏;使座舱有机玻璃产生银纹,透光率降低;使仪器仪表的测量误差变大;使电子设备电源电压外绝缘强度降低;使武器系统射击卡死,光学、激光、红外等制导系统和侦察系统无法发挥其性能<sup>[14]</sup>,可靠性降低;使精密电子设备运转不正常或失灵,引发电接触不良等一系列机械或电气故障;使过滤器沙堵,油路堵塞;使发动机叶片磨蚀或腐蚀加重,侵蚀直升机机体,诱发多种故障;使直升机主要部件和大量机载设备的使用寿命极大缩短。

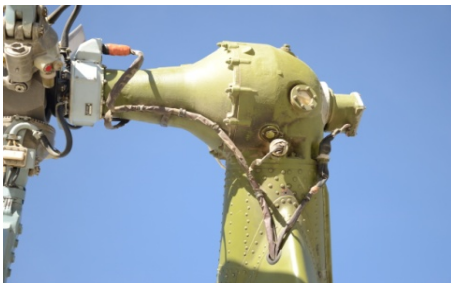


图11 外露电缆老化  
Fig. 11 Exposed cable aging



图12 密封橡胶龟裂  
Fig. 12 Sealing rubber crack



图13 旋翼磨损、涂层剥落  
Fig. 13 Rotor wear and coating peeling



图14 旋翼关节轴承磨损  
Fig. 14 Rotor joint bearing wear

### 2.2.2 环境适应能力对服役完整性的影响

在直升机需求论证和设计过程中,应充分考虑环境对机体结构中的不可拆解部位、电子元器件、关键动部件等进行防腐蚀设计。基于环境对直升机功能/性能间接和直接影响,综合分析现役军用直升机在各类服役环境或相似环境下的环境因素数据,特别是温度、湿度、振动、盐雾、大气压力、风速、降雨量、臭氧、海拔高度、霉菌、电场磁场等数据,结合直升机在这些环境因素综合作用下,其主要材料及部件腐蚀性能、老化性能、耐磨损性能、抗疲劳性能等退化的影响情况分析,提出直升机的环境因素和环境效应指标分类。同时根据直升机以交付使用时间为分界点的特征,借鉴直升机在设计、生产、使用过程中的环境适应性指标,获得直升机环境适应性要求指标和环境适应性评价指标。针对直升机在各种综合环境效应作用下对其性能/功能等方面的影响范围及程度,综合评估直升机环境适应性设计要素对服役完整性的影响,如图15所示。

通过优化直升机环境适应能力设计,降低直升机机械结构故障和腐蚀,提高装备服役的可靠性,提升结构的耐久性,保障直升机服役过程中关键结构寿命可控,不会因环境腐蚀和冲击造成装备可用寿命减少。通过直升机机载设备环境适应

能力提升,降低电子设备、综合处理机的故障率,有效抑制在复杂自然环境下探测感知、火控稳瞄等设备的性能衰减,提升直升机任务完成能力。降低因环境影响造成的部件老化、密封开裂等故

障,降低再出动和日常的维护工作量,提高装备的保障性,进而提升直升机的服役完整性,满足用户使用需求。

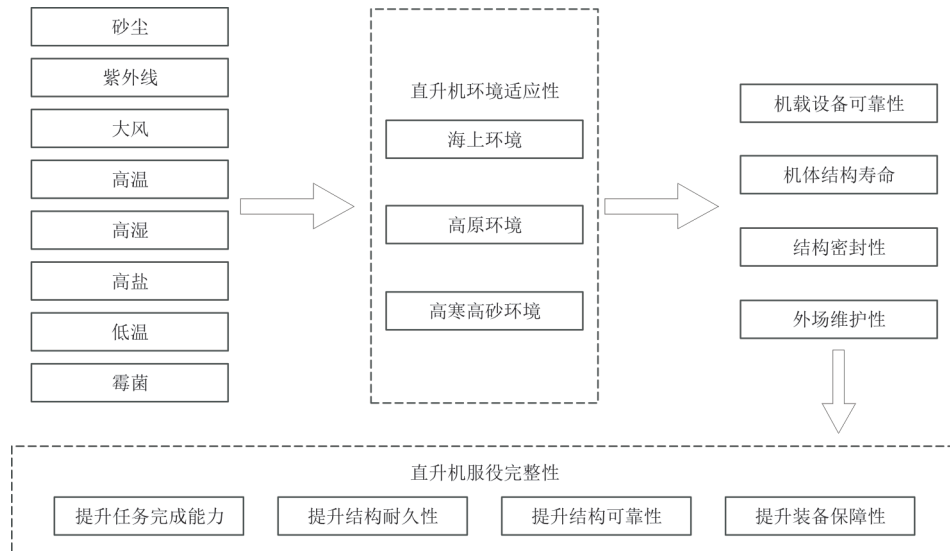


图 15 典型直升机环境适应能力对于服役完整性的影响

Fig. 15 Influence of typical helicopter environmental adaptability on service integrity

### 2.3 战伤快速抢修技术需求

战争中战伤飞机的数量远超过战损飞机的数量。在抗美援朝战争中,我空军每损失 1 架飞机,就有 3.3 架飞机战伤;在第二次世界大战的太平洋战争中,美军每损失 1 架飞机,就有 2~4 架战伤飞机需要抢修;美军在越南战争的参战飞机总数中,未受损伤的占 21%,战损的占 23%,有 56% 受到不同程度的损伤,其中 F-4 战斗机,每损失 1 架,就有 4 架是带伤返回的;1973 年中东战争,以色列每损失 2 架 F-4 战斗机,就有 9 架战伤;英阿马岛冲突中,英国参战飞机总数中战伤的占 40%,战争中每损失 1 架飞机就有 3~5 架受伤。如果飞机的生存力和保障条件良好,敌方威胁力中等,通过计算机模拟显示,战损与战伤的比例高达 1:15 甚至 1:20,直升机也基本相同<sup>[15]</sup>。

#### 2.3.1 战伤抢修一般原则

1) “就低不就高”原则。为了减小修理难度,节省修理时间,只要保证损伤飞机能完成下次任务,能不修理则不修理,能做无强度修理则不做有强度修理,能做次强度修理则不做等强度修理,即“就低不就高”。

2) 临时性修理原则。在应急或野战条件下,

对战伤直升机一般实施非标准修理,如对直升机结构修理,以无强度和次强度修理为主,不考虑疲劳强度,即为临时性修理。一旦有战斗间隙,应立即改成标准修理,恢复损伤部位应有的强度和功能。

3) 因地制宜,就地取材修理原则。由于直升机战伤的随机性和战争的残酷性,战场修理往往会遇到许多意想不到的问题,如工具、器材不全,战伤直升机可能迫降到没有任何设施的场地上等。在这种情况下,应充分发挥现场人员的主动性和创造性,因地制宜,就地取材,利用一切可能的方法和手段,尽快修理好损伤直升机。

#### 2.3.2 抢修能力需求—战伤评估流程和标准

与设计过程不同,在作战行动中,飞机可能发生不同程度的损伤,通常是不可控的。因此,必须尽快对损伤情况进行评估和修理,保持飞机的最大程度可用性,以提供更多的出动架次。除了战伤之外,由于飞行时间的增加和更高的应力水平,飞机的部件故障率也会更高。在战时,战伤和修理的概念会与平时大不相同,最核心的是对于战伤飞机的评估和快速修理,保证持续提供足够数量的、能够维持飞行状态的飞机,因此,必须建立

对战伤飞机的评估标准,根据任务需求合理开展战伤评估。

战伤评估必须综合考虑飞机损伤情况、飞机作战任务以及飞机下一次出勤所需维修等各方面因素。在进行飞机抢修检查时,首先关注飞机上受损最严重的部分,特别是对机体关键结构、操纵

系统、其相关子系统是否存在严重受损部件进行目视检查。在检查过程中,对损伤是否发生在关键部位、是否可修理、是否能通过串件解决、修理后装备执行任务的能力等进行综合评估,具体流程如图 16 所示。

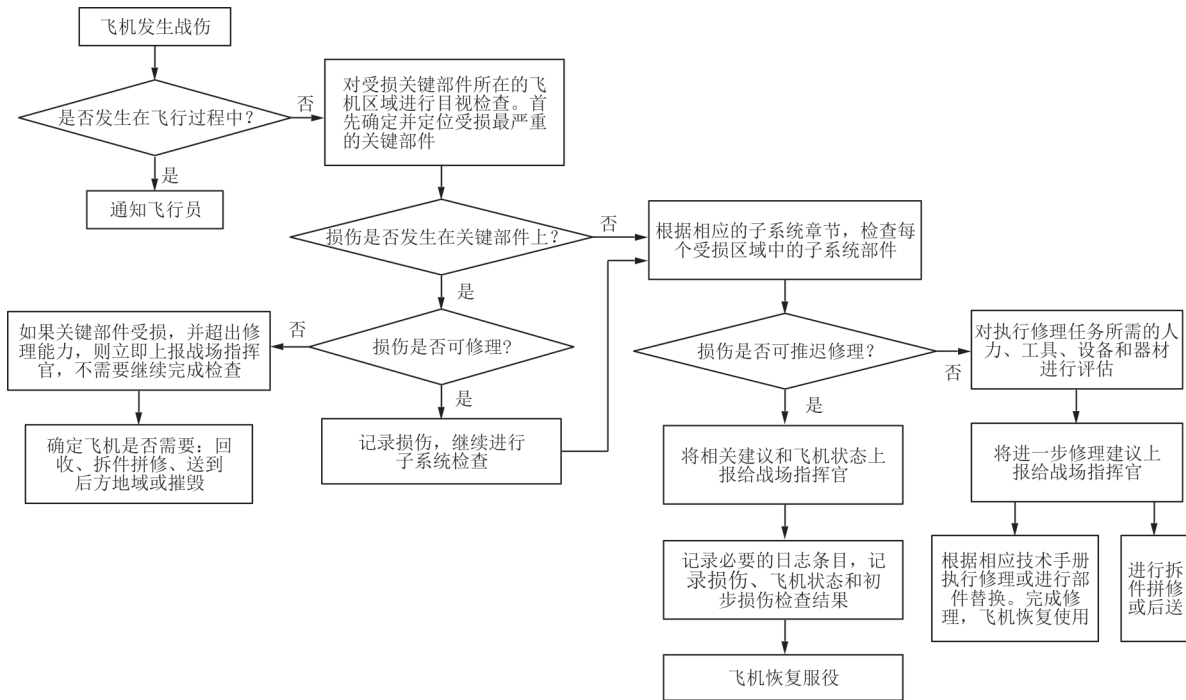


图 16 典型直升机战伤评估流程

Fig. 16 Typical helicopter combat injury assessment process

在完成上述评估之后,对于能够通过延期修理方式立即恢复使用的飞机可优先进行战伤修理。对于需要大量维修的飞机,将首先进行搁置,待技术人员、关键备件全部到位后再进行集中修理。对于发生重大战伤而无法实施战伤修理的飞机,可实施地面回收后送至大修厂,对其实施拆件拼修、提供备件或者直接进行销毁以防止被敌人俘获。在战斗持续期间,直升机可以只接受下一次计划内任务所需的维护即可。对于非关键能力部件可不维修直接投入战斗,即使部分受损设备会对直升机的作战能力造成一定影响,只要能完成指定任务,也可以推迟对受损设备的修理。

### 2.3.3 典型直升机战伤抢修能力对服役完整性的影响

典型直升机的战伤抢修能力受到用户抢修能力和直升机设计两方面因素的综合影响,如图 17 所示。在直升机设计方面,通过合理布置直升机

结构,提升机体结构修理的可达性,降低单机维修时间和修理人员数量;通过科学合理选材,在抢修过程中在满足载荷要求的前提下充分考虑可修复性以及修复后任务完成能力。在设计中,对于直升机结构可能的损伤模式和部位进行充分仿真,对修理所需工具进行充分论证,考核修理工具与现有工具的复用性和野外保障的运输性,在鉴定过程中对保障工具的野外运输能力进行充分考核。在用户使用过程中,需要建立完备的战伤抢修机制,在日常维护的基础上强化战伤抢修的保障性训练,基于训练情况完善外场航材的调配以及备件储备,合理规划各个层级之间的航材布局,保证能实现快速调运;对于损伤抢修情况进行综合统计分析,对于易伤部位、保障资源、修理时间、抢修后任务能力需求等进行反馈,作为直升机性能提升和新型号力量的需求输入。通过直升机设计和抢修能力建设,提升直升机运用过程中的单



机再出动能力和机群的完好率,快速恢复和提升 典型直升机服役完整性。

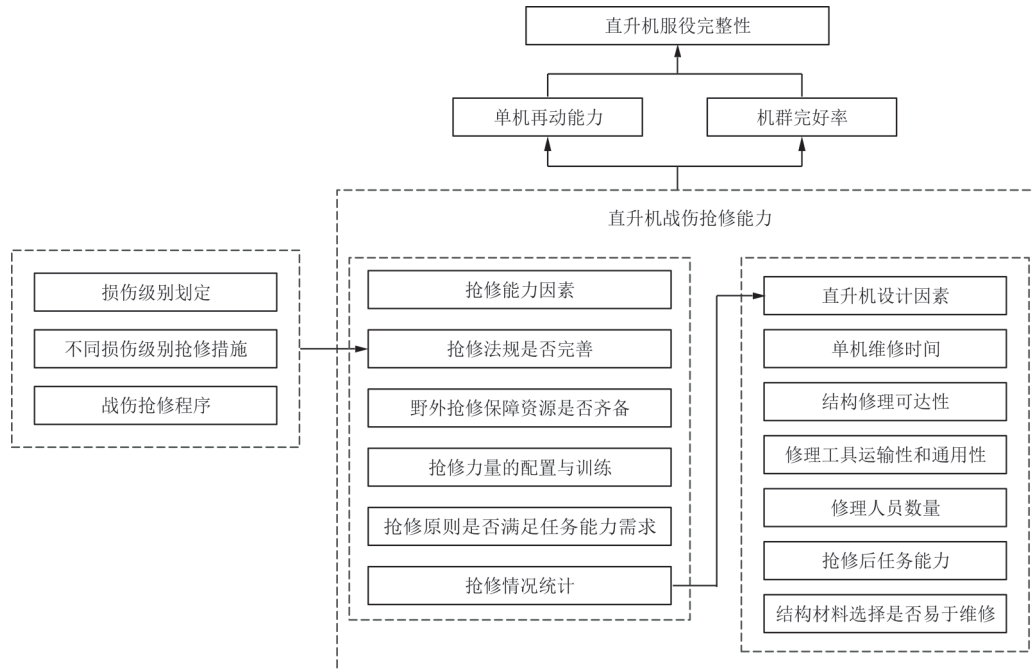


图 17 典型直升机战伤抢修能力对服役完整性影响

Fig. 17 Influence of typical helicopter combat injury repair capability on service integrity

### 3 结 论

1) 直升机由于是低空低速飞行器,服役使用环境和自然环境更加恶劣,服役完整性影响因素更加多样,包括:结构布局、环境适应能力、综合自卫能力等设计因素以及用户维护水平、使用策略、保障力量的储备等使用因素。

2) 通过合理划分直升机结构区域,采取不同的防弹设计要求,升级电子自卫能力、合理布局防弹装甲降低结构关键部位损伤风险,提升战场生存力和修复性,能有效保障直升机具有持续作战的能力,提升直升机服役完整性。

3) 建立针对直升机特殊使用环境的环境适应性指标体系,优化直升机环境适应能力设计,提升直升机机载设备环境适应能力,提高装备服役的可靠性、耐久性,降低再出动和日常的维护工作量,提高装备的保障能力,进而提升直升机的服役完整性。

4) 通过建立完备的战伤抢修能力和流程,优化设计提高维修可达性和功能恢复能力,提升直升机运用过程中的单机再出动能力和机群的完好率,快速恢复和提升典型直升机服役完整性。

### 参考文献

- [1] 周唯. 基于精确反馈线性化的三自由度直升机控制系统研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.  
ZHOU Wei. Research on three degree of freedom helicopter control system based on accurate feedback linearization[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [2] 何宇廷. 飞行器服役(作战)完整性的提出与发展[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 1-11.  
HE Yuting. Presentation and development of aircraft operational integrity [1]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 1-11. (in Chinese)
- [3] 何宇廷. 装备的作战完整性控制原理[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(3): 1-5.  
HE Yuting. On the control theory of equipment operational integrity [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(3): 1-5. (in Chinese)
- [4] 何宇廷, 张腾, 马斌麟. 军用飞机结构作战完整性的基本内涵与评估[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(5): 1-7.  
HE Yuting, ZHANG Teng, MA Binlin. Basic connotation and evaluation of military aircraft structural operational integrity[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(5): 1-7. (in Chinese)
- [5] 王立群. 航空飞行器的完整性[J]. 航空学报, 1988, 9(10): 433-439.

- WANG Liqun. Aircraft equipment integrity [I]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, 9(10): 433-439. (in Chinese)
- [6] United States Department of Defense. Engine structure integrity program: MIL-STD-1783 [S]. US: United States Department of Defense, 1984.
- [7] United States Department of Defense. Requirements for integrity outline of avionics equipment: MIL-A-87244 [S]. US: United States Department of Defense, 1986.
- [8] 丁琪, 金华. 直升机战伤分析与评估 [J]. 直升机技术, 2009(2): 64-65.  
DING Qi, JIN Hua. Battle injury analysis and assessment of helicopter [J]. Helicopter Technique, 2009(2): 64-65. (in Chinese)
- [9] 李玉兰, 董素荣, 刘瑞林. 装甲车辆环境适应性研究体系 [J]. 装备环境工程, 2017, 14(4): 82-83.  
LI Yulan, DONG Surong, LIU Ruilin. Research system for environment adaptability of armoured vehicles [J]. Equipment Environment Engineering, 2017, 14(4): 82-83. (in Chinese)
- [10] 吴静敏, 左洪福. 基于案例推理的直接维修成本预计方法 [J]. 航空学报, 2005, 31(2): 190-194.  
WU Jingmin, ZUO Hongfu. New method for direct maintenance cost estimating by using CBR [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 31(2): 190-194. (in Chinese)
- [11] 袁大天, 于芳芳. 直升机航电系统高原高寒环境适应性评估 [J]. 装备环境工程, 2019, 16(10): 76-78.  
YUAN Datian, YU Fangfang. Evaluation of plateau alpine environment adaptability of helicopter avionics system [J]. Equipment Environment Engineering, 2019, 16(10): 76-78. (in Chinese)
- [12] LIAO K, SCHULTHEISZB C R, HUNSTONB D L. Effects of environmental aging on the properties of pultruded GFRP [J]. Composites: Part B, 1999, 30: 458-493.
- [13] 刘章龙, 赵徐成, 胡涛. 基于高原环境的保障装备适应性技术研究 [J]. 装备环境工程, 2016, 13(2): 34-35.  
LIU Zhanglong, ZHAO Xucheng, HU Tao. Adaptive technology of support equipment based on plateau environment [J]. Equipment Environment Engineering, 2016, 13(2): 34-35. (in Chinese)
- [14] 汪东林, 张彩先, 蒋晓彦. 沙尘环境对直升机的危害及防护对策探讨 [J]. 装备环境工程, 2006, 3(2): 68-69.  
WANG Donglin, ZHANG Caixian, JIANG Xiaoyan. Discussion on harm of sandy environment and its protection counter measure [J]. Equipment Environment Engineering, 2006, 3(2): 68-69. (in Chinese)
- [15] 张建华. 飞机战伤抢修工程学 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.  
ZHANG Jianhua. Aircraft battle injury emergency repair engineering [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001. (in Chinese)

#### 作者简介:

**李昌范**(1987—),男,博士,工程师。主要研究方向:直升机日历寿命和可靠性等。

**李健**(1974—)男,硕士,正高级工程师。主要研究方向:直升机可靠性、腐蚀防护和日历寿命等。

**吴云章**(1982—),男,博士,工程师。主要研究方向:直升机安全技术、日历寿命和数据融合等。

**高延达**(1984—),男,硕士,助理研究员。主要研究方向:直升机腐蚀控制。

**孙晓婷**(1989—),女,硕士,助理工程师。主要研究方向:直升机论证。

(编辑:丛艳娟)