

先进直升机旋翼传动与抗坠毁技术*

Advanced Helicopter Rotor Transmission and Crashworthiness Technologies

陈克姣 熊峻江 / 北京航空航天大学交通科学与工程学院

摘要: 简要概述了先进直升机旋翼传动以及抗坠毁的基本原理和关键技术; 通过实例说明了这些先进技术的应用; 最后展望了3种技术的发展趋势。

Abstract: This paper fundamental principles and key technologies for rotor transmission and crashworthiness of advanced helicopter, Then reviews the application examples of advanced technologies, and finally forecasts, the development trends of 3 key technologies.

关键词: 先进直升机; 旋翼传动; 抗坠毁

Keywords: advanced helicopter; rotor transmission; crashworthiness

0 引言

旋翼(rotor)为直升机和旋翼机等旋翼航空器的主要升力部件,又称升力螺旋桨。直升机旋翼系统各部件是直升机最关键的部件,同时直升机旋翼

也是区别于其他航空飞行器的主要特征,旋翼技术是直升机技术的核心,直升机的发展取决于旋翼技术的发展。目前,比较常见的旋翼技术有单旋翼、双旋翼共轴式、双旋翼纵列式、倾转旋翼、

智能旋翼、可变形旋翼。旋翼系统是直升机的多功能部件,旋翼系统不仅为直升机提供升力,而且还提供前进力和操纵力,同时,还是直升机的主要振源和噪声源,因此,直升机的飞行性能、飞

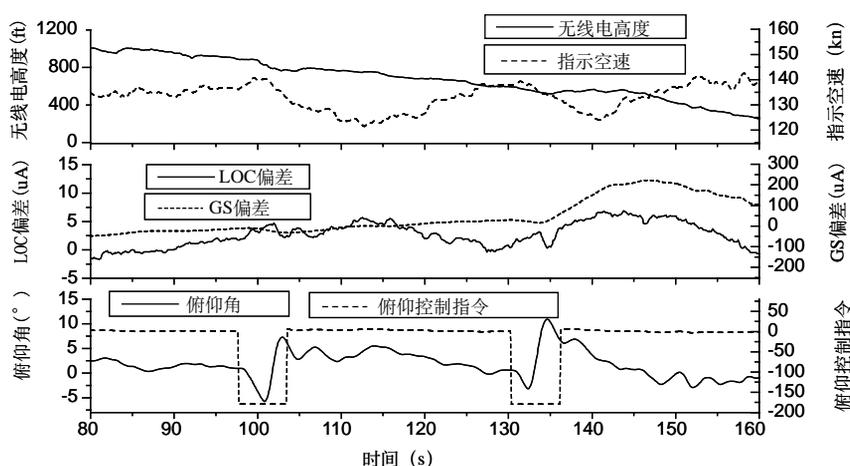


图6 MUH试验试飞曲线

据和飞行员评述对系统性能给出综合客观的评价,既要考虑系统指标判据又要考虑试飞员的使用感受,针对不足应提出可行的改进建议,最终保证自动近飞行系统在使用过程中具有良好的性能和品质。

AST

参考文献

- [1] 申安玉,申学仁,李云保等. 自动飞行控制系统[M].北京:国防工业出版社,2003:99.
- [2] Federal Aviation Administration.

Flight Test Guide For Certification of Transport Category Airplanes:AC25-7A[S]. 1998.

[3] Federal Aviation Administration. Criteria For Approval of Category I and Category II Weather Minima For Approach:AC120-29A[S]. 2002.

[4] Federal Aviation Administration. Approval of Flight Guidance Systems: AC25.1329-1B[S]. 2006.

[5] Andrew A. Peters. Using DGPS to Determine Autopilot Minimum Use Height [C]. Society of Flight Test Engineers. 2005.

作者简介

范东方,硕士,工程师,从事飞机控制系统试飞工作。

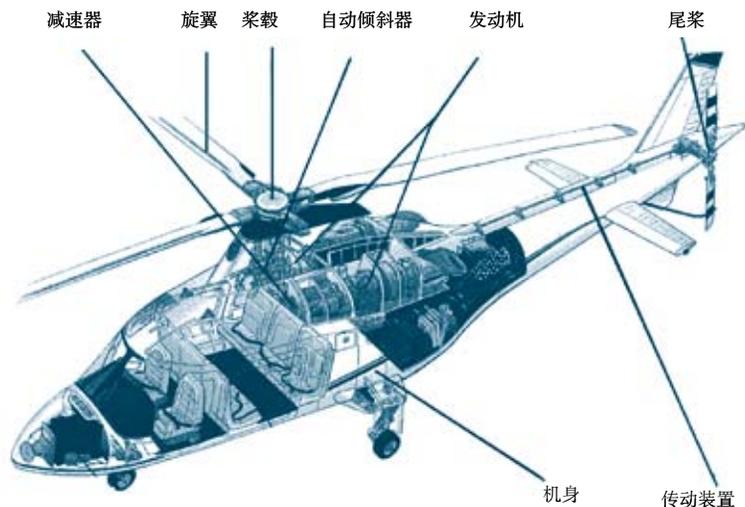


图1 直升机传动系统

行品质、舒适品质(振动和噪声水平)均与旋翼系统密切相关,旋翼水平的高低,直接决定直升机飞行性能和品质的优劣。旋翼系统又是机械转动部件,直升机前飞时,其桨尖线速度接近声速,桨叶迎角某些区域接近临界迎角,甚至大于临界迎角,气流环境相当复杂,同时,又有离心力场,受载状态十分恶劣,旋翼桨叶是一根细长柔性梁,在挥舞、摆振和扭转三个方向都有很大的弹性变形,不仅各运动间有耦合,而且气弹耦合效应也很强烈;此外,旋翼是在高频的交变载荷环境条件下工作,其寿命和可靠性关系到直升机的安危,因此,旋翼技术涉及直升机空气动力学、飞行力学、动力学、材料学、强度学、振动学、声学、工艺学、寿命和可靠性学等学科的综合应用,其专业面广,技术难度大,而且自成体系。

目前,旋翼研究的关键技术主要集中在如下几方面。

1) 对传统旋翼几何形状和

桨毂结构进行改造和优化。直升机的性能、振动、驾驶品质等特性,主要由升力旋翼的气动力、动力学和结构特点决定,而这些特点实质上反映了旋翼的几何外形(翼型外廓、平面形状和扭角)及结构(材料质量和刚度沿弦向和经向分布)特性,因此,对旋翼外形及结构进行优化可以提高直升机的性能。

2) 新型旋翼的研究,如倾转旋翼、智能旋翼、可变形旋翼等。

传动系统是直升机三大关键部件之一(直升机三大关键部件为发动机、传动系统和旋翼),其作用是将发动机的功率按一定比例传递到旋翼、尾桨和其他各附件,是涡轮轴发动机动力输出必不可少的动力传输部件。直升机传动系统主要包括主减速器、中间减速器、尾减速器、主传动轴、尾部水平传动轴、尾部斜传动轴等,如图1所示。国外先进直升机公司(波音、贝尔、西科斯基、欧直、阿古斯特等公司)在直升机研制中对传动系统的投入费用往

往不低于发动机和旋翼,关键技术研制启动时间一般早于直升机整机的研制。国外普遍认为:直升机性能在很大程度上取决于传动系统的性能,传动系统性能好将直接影响直升机的性能和可靠性。

作为传动系统,其工作原理与一般的地面减速器无异,即将动力装置的功率传递给工作部件,然而,由于直升机的特殊性,对其传动系统提出了特殊要求,从而,使得直升机传动系统的技术特点明显不同于一般的地面减速器。直升机先进传动系统设计中的关键技术包括:

1) 传递效率、结构重量等。传动系统的功重比越大,在同等功率条件下,传动系统的重量越小,直升机就能携带更多物资和乘客。

2) 生存力。针对直升机可能发生的意外而提出传动系统的高生存力要求,如武装直升机传动系统有抗弹击要求;具备一定的干运转能力,以针对传动系统可能因故障导致滑油泄漏,在无滑油的情况下还能继续工作一段时间;还要求传动系统有一定的抗坠毁能力。

3) 可靠性。传动系统为单路承载方式,一旦发生故障将是灾难性的,这就要求传动系统必须具有很高的可靠性。直升机受空间和结构限制,维修较为困难,因此,要求传动系统有良好的维修性。

4) 疲劳和动力学问题。传动系统结构复杂,零部件数目较多,零部件易发生故障和失效,且故障不易监测,维护性较差,因此,疲劳问题尤为严重。在传动系统传动链中,各种不同转速的构件协同运转,发动机、旋翼系统与传动系统之间存在耦合振动,工作过程中,激振源多,激振频率丰富,系统的弯曲和抗振动响应复杂,动力学问题也十分突出。

5) 齿轮的润滑和冷却。

2 先进直升机抗坠毁技术

直升机抗坠毁技术是航空工程界普遍关心的问题。大量统计数据表明,在直升机坠落事故中,人员伤亡比例相当高。据统计,1972—1986年美国陆军直升机事故总数5277起,其中严重受伤人员1330名,死亡人数565名,每年约38名,这些事故不仅造成巨大的经

* 基金项目: 国家自然科学基金(E050603)和航空科学基金(20095251024)资助。



图2 美军MV-22“鱼鹰”倾转旋翼机

济损失,也造成极大的人力资源损失。可见对直升机进行抗坠毁设计是十分必要的。直升机的抗坠毁性(耐撞性)被定义为在发生意外坠毁事故时,机体及其内部系统防止驾驶员及其乘员免受伤害的能力。

直升机坠毁过程产生的伤害源主要来自于三个方面:

1) 突加(减)速度引起的作用于驾驶员及乘员身上的惯性过载力;

2) 驾驶员及乘员直接与硬表面接触碰撞引起的伤害;

3) 环境因素造成的损害,如燃油泄漏引起的火灾,浓烟导致的窒息、溺水和化学物质引起的中毒等。抗坠毁设计必须考虑所有可能伤害源的影响,在允许的坠毁工况下(包括坠毁速度、环境和姿态),避免或尽可能减轻伤害源造成的后果。因此,针对上述三个主要的伤害源,直升机抗坠毁设计主要集中在以下几个方面:起落架的抗坠毁、主机身结构的抗坠毁、座椅和乘员约束系统的抗坠毁和直升机坠毁后燃油系统的防火。值得注意的是,结构抗坠毁常常是以牺牲飞机的有效载重/重量比为代价的,而这一点恰恰是飞行器设计中最敏感的问题。因此,要使这种代

价降低到最小程度,就不能单一地从增加机体结构强度去考虑抗坠毁问题。为此,需要在直升机的初步设计阶段,即将抗坠毁设计与重量、过载、疲劳等问题放在同样重要地位进行综合考虑。通过优化设计将抗坠毁性能对飞机的有效载重、重量比等的影响降到最低。对“黑鹰”直升机和“阿帕奇”直升机的抗坠毁设计研究表明,仅仅需要3.7%的空重增加就足以满足抗坠毁的各项指标。在直升机的抗坠毁设计中,基于吸能防护结构的计算机优化设计是关键技术。

3 应用情况

纵观直升机的发展史,可发现:旋翼技术的发展始终推动着直升机技术的发展。从最早的铰接式旋翼进化到无铰式旋翼、无轴承式旋翼;从最早的木质和金属混合式结构旋翼,发展到全金属旋翼、复合材料旋翼;旋翼技术每有一次突破性的进展,都给直升机带来了快速的发展。直升机的机体结构、动力装置各系统、液压源和电源系统、各种电子设备等都可以借鉴固定翼飞机的相应技术,但旋翼技术却无法从其

他航空器中得到借鉴,因此,直升机技术的发展更应把旋翼技术的发展放在首位。对传统旋翼的优化研究证实,其带来的直升机性能提升非常有限,因此,新型旋翼的研究正受到越来越多的重视,其中以倾转旋翼的研究最为成熟。

倾转旋翼机是20世纪90年代直升机界最瞩目的飞行器,并将成为21世纪美国海军的主要装备。倾转旋翼机是在类似固定翼飞机机翼的两翼尖处,各装一套可在水平位置与垂直位置之间转动的旋翼倾转系统组件,当飞机垂直起飞和着陆时,旋翼轴垂直于地面,呈横列式直升机飞行状态,并可在空中悬停、前后飞行和侧飞;在倾转旋翼机起飞达到一定速度后,旋翼轴可向前倾转 90° 角,呈水平状态,旋翼当作拉力螺旋桨使用,此时,倾转旋翼机能像固定翼飞机那样以较高的速度作远程飞行。倾转旋翼机既具有普通直升机垂直起降和空中悬停的能力,又具有涡轮螺旋桨飞机的高速巡航飞行的能力。MV-22的问世已使美国海军陆战队重新定义两栖作战的法则,1991年,“鱼鹰”倾转旋翼机曾获得美国国家航空协会颁发的“重大航空进步奖”,同时,由于倾转旋翼机重大事故频繁、研制费用高、技术复杂且难度大、研制周期长,也引起人们极大的争议。尽管如此,由于倾转旋翼机集直升机垂直起降和涡轮螺旋桨飞机高速飞行的优点于一身,世界各国竞相在这方面加强研究。

在20世纪70年代美国陆军与美国航空航天局Lewis研究中心合作开展了一系列的先进传动部件和先进技术的研究计划,包括先进齿轮材料和轴承的研制,齿轮分析软件的开发与工程化验证,新概念传动部件的探索与研究如分扭传动机构等。1989年11月29日美国提交的国防部第二个关键技术年度计划第14项推进计划中,提出高速旋翼机的研究计划,与麦道直升机公司、贝尔直升机公司、联合技术公司及艾利逊燃气涡轮公司签订合同,开展了研究高速军用旋翼运输机和旋翼攻击机工作,传动系统是其中的关键之一。目前,又开展了21世纪旋翼机传动系统计划(RDS~21),对减重、降噪、提高寿命、降低全寿命周期费用提出了明确且愈来愈高的要求。这些计划取得了丰富的科研成果,促进了第三代、第四代及新一代直升机



图3 “阿帕奇”直升机

的传动系统的发展和传动技术的进步,其传动系统质量系数达到 $0.060\text{kg/kgf}\cdot\text{m}$,干运转能力达到1小时以上,输入转速达到 20000r/min 以上。

另外,直升机抗坠毁技术也在军事航空中受到广泛应用。事实上,飞行器的“耐撞性”即坠毁事故生存率问题早就已提出,然而,很长一段时间以来,并没有引起足够重视。直到越南战争以后,美军才加大了对直升机抗坠毁性能的研究,并正式将“耐撞性”作为军用攻击直升机抗坠毁设计的性能指标,且为此制定了飞机生存率设计指南和相应的结构抗坠毁设计规范。其后30多年中,西方各大直升机公司做了大量抗坠毁分析研究和部件、全尺寸直升机抗坠毁实验。从这些实验研究,提出了直升机抗坠毁设计的一些优化方法,并通过这些优化方法形成了一套抗坠毁设计的系统设计方案。在方案中,将直升机的抗坠毁性能列入直升机的初步设计过程中的各项综合性能、重量、过载、疲劳等基本因素之中,并将抗坠毁性能与另几项基本因素置于同等重要位置来考虑,在全机有关结构部件、设备的设计中系统考虑抗坠毁设计,合理分配各环节的吸能比例,以达到最佳的抗坠毁效果。

美军的“阿帕奇”和“黑鹰”直升机在吸能防护结构方面做了大量工作。在起落架的抗坠毁设计方面,“阿帕奇”直升机采用跪式结构(如图3所示),在坠毁工况且下,该结构利用其下跪能力,通过液压系统吸收大部分冲击能量。机身方面,阿帕奇纵向两侧主梁采用波纹梁结构,具有极好的能量吸

收能力。阿帕奇还采用了旋翼支撑结构设计,旋翼支撑到静轴外侧的轴承上,转动轴通过静轴中间通道与支撑连接,而静轴固定在与直升机机身顶部连接的桁架结构的基座上,如此对旋翼系统形成了可包容性,有效防止旋翼断裂。“阿帕奇”对燃油管路的设计也考虑了耐撞性,如规定管路具有较大的自由伸展余地,并通过碰撞易碎夹支撑固定管路来实现这一点,从而使直升机坠毁时管路系统可随结构变形而伸长或移动,不传递高的拉伸应力。

3 发展趋势

目前,世界各国对旋翼技术的研究主要集中在新型旋翼的研究上,但新型旋翼技术尚处于实验室研究阶段,距离大规模实用化尚有一段路要走,因此,未来仍会经历一段对传统旋翼进行优化改进研究的时间。同时,国外正在开展的先进动力传动技术研究主要集中在以下几个方面:

- 1) 最新发展的分扭传动技术具有传动比高、可减少传动级数、效率高、可靠性高、噪声小、减速器总体重量轻等优点。
- 2) 新型传动形式和部件。采用新型的面齿轮传动方式,将面齿轮传动巧

妙地组成分扭机构,大大简化主减结构,减轻重量。

3) 新材料、新工艺、新技术的应用,如采用深氮化技术、纳米技术(表面改性技术)等,大幅度提高了传动系统寿命,降低了维护费用。

4) 润滑技术及润滑失效技术。发展了更为有效的润滑方式,如环下润滑、离心甩油、多喷嘴喷射等。提高了滑油过滤精度,确保齿轮、轴承等转动部件摩擦副良好的润滑冷却条件。

随着计算机设计技术的发展,特别是CAD(计算机辅助设计:几何构形)、CAM(计算机辅助制造:选材,控制)和CAE(计算机辅助工程:计算分析、优化、评估、经验咨询)等综合技术的发展,使得针对直升机机体这样一个复杂结构系统在复杂强动载荷作用下的抗坠毁设计成为可能。通过大应变弹塑性动力学、连续损伤力学、高速冲击动力学、计算结构力学、动态断裂力学与现代计算机软件技术的结合,完全可以建立起基于冲击—碰撞大变形动力学分析的,有冲击/撞击试验数据支持的,并与CAD、CAM、CAE技术配套的,针对直升机抗冲撞特别是驾驶员乘员安全防护,包括生存空间和人体伤害烈度准则为目的的分析系统。 **AST**

参考文献(略)

作者简介

陈克姣,硕士研究生,主要研究方向为飞机结构适航性分析与设计。

熊峻江,博士、教授、博士生导师,教育部航空运输与工程专业教学指导委员会委员、中国金属学会力学测试专业委员会副主任委员、中国力学学会MTS材料试验专业委员会委员,长期从事飞机结构适航性研究。