中國航空報

直升机振动水平过高一直是直升机工业面临的最严峻的挑战之一。由于直升机非线性、非定常的气动力与旋翼桨叶之间的气动弹性耦合,旋翼在挥舞、摆振以及扭转方向产生了较大的振动,并由旋翼传递至机体,从而导致了直升机较大的整体振动和噪声水平。过高的振动水平不仅会引起机体结构的疲劳破坏,影响机载设备的正常工作,还有可能严重影响乘员的乘坐品质以及降低武器系统的使用效能。因此,对直升

机振动水平的准确预估和有效控制一直是直升机从设计、研制到投入使用整个过程中必须考虑的重要问题。

主动控制旋翼由于能够使旋翼实现大幅度的减振降噪,目前已成为直升机减振降噪设计的重要发展方向。主动控制旋翼是指通过实时操纵直升机旋翼桨叶上的舵面或桨叶迎角,来降低桨叶振动、噪声水平,提升气动性能的旋翼技术。主动控制旋翼由于能够根据实时调整桨叶迎角,因而能够改善其在复杂变化的

气动环境下的受力状况,从而起到减振降噪、改善气动性能的效果。目前主动控制旋翼的研究主要集中在高阶谐波控制 (HHC)、独立桨叶控制 (IBC)和主动后缘襟翼控制几个方面。

目前,世界上多个直升机制造商、科研机构和高校都在开展主动控制旋翼的相关研究,并取得了大量研究成果。下面介绍一些近年来值得关注的研究方向。



主动控制旋翼技术的一些新进展

| 李昊

主动控制格尼襟翼技术

主动格尼襟翼是近年来主动控制旋翼技术研究的一个热点方向,其通过在桨叶后缘加装可实时控制的格尼襟翼,提高旋翼桨叶的气动性能。目前,包括密歇根大学、麻省理工、宾州州立大学、莱昂纳多直升机公司在内的多家高校、研究机构和工业部门都开展了这一领域的研究。

格尼襟翼是位于机翼后缘并与当地气流 方向垂直地伸出表面的一块小板。它在增加 升力的同时产生的附加阻力最小。在 20 世纪 70 年代早期,丹·格尼首先在一辆赛车的后 风翼上安装了以他名字命名的装置以增加赛 车的抓地力。格尼襟翼通常布置在机翼下表 面后缘,伸出蒙皮的长度为 1%~2% 弦长长度。 它能产生逆时针旋转的涡,同时增加下表面 的压力并减少上表面的压力,从而导致升力 的增加。这个逆时针旋转的涡有助于附面层 在后缘的附着同时在付出极小阻力增量的前 提下增加最大升力系数。

美国密歇根大学开展了针对主动格尼襟 翼的研究,其设计并试验了一套格尼襟翼桨 叶,襟翼尺寸约为弦长的1%~3%(可变), 安装在桨叶后缘。该技术能够有效提高旋翼 气动效率,其最大升力系数提高了约30%, 同时通过控制襟翼运动,还能够降低桨叶振动和噪声水平。

研究者们对使用 1.5% 弦长主动格尼襟翼的旋翼在进速比为 0.15 状态下的噪声和振动水平进行了试验,对襟翼的控制则采用高阶谐波控制算法 (HHC)。试验结果表明,双格尼襟翼桨叶能够降低前行和后行桨叶 2dB 噪声,4/rev 垂直振动水平降低 34%;5 格尼襟翼构型能够降低 3dB 前行桨叶噪声和 4dB 后行桨叶噪声,4/rev 振动水平降低 55%;采用双后缘襟翼(20% 弦长)构型的方案能够降低 4/rev 振动51%,但降噪效果不及格尼襟翼;格尼襟翼高度为桨叶弦长 0.85% 时,能够达到非常好的减振效果(89%),同时还能够减少 2.3% 的旋翼需用功率。

工业界方面,莱昂纳多直升机公司(原阿古斯塔-韦斯特兰公司)也在欧盟"洁净天空"计划支持下正在开展主动格尼襟翼技术的研究。该研究的主要目标是提高旋翼的气动效率,降低需用功率,从而降低全机的碳排放;此外,该技术还能够降低旋翼的噪声水平。其格尼襟翼位于叶片后缘 98% 弦长位置处的下表面,垂直于弦长方向,长度为弦长的 2%。它可以折叠贴在叶片下表面,使用时打开,通常在一个旋转周期内收放一次。公司宣称,该技术能够使旋翼的气动性能提高 3%~5%。2016 年 12 月,莱昂纳多集团启动了该技术的地面试验,目前正在准备飞行试验。

针对 CH-47 的主动控制旋翼技术

CH-47 "支奴干"纵列式重型直升机是



美国波音公司于 20 世纪 50 年代研制的一型机型,在美国陆军中有很大的装备量,美军也在一直对该机进行现代化改型升级。为进一步提高 CH-47 的使用性能,波音公司近年来研究了一种用于 CH-47 旋翼的主动后缘襟翼,以提高旋翼气动性能,从而提升 CH-47 的航程和载荷,同时降低噪声和振动。该研究由陆军投资。研究的目标是降低 CH-47 振动水平 90%,声学探测距离 50%,并提高巡航效率(以单副旋翼系统升阻比作为考核指标)8%。

每片襟翼系统由5个部分组成,包括襟翼、作动器、曲柄、联动装置和外盖板。为避免影响桨叶气动外形,襟翼旋转机构应尽量设计在桨叶内部,但这需要为襟翼加装铝制梁结构,从而导致桨叶的整体刚度提高,影响桨叶在挥舞方向上的弯曲。因此最终将旋转机构设计在了桨叶外部。设计方案采用了技术成熟度、能量密度更高、重量更轻的电磁作动器,而不是压电作动器。技术验证模型的外盖板采用铝制盖板,但在全尺寸桨叶上则将换位钛合金,以提高刚度、抗腐蚀性和热传导率。

襟翼角度变化范围为±6°,控制频率为15Hz。波音公司通过其基于Phoenix Integration的 ModelCenter 软件开发的模型,对旋翼性能、振动和噪声水平进行优化改良,寻求最优的控制策略。根据波音公司的计算结果,这一技术能够有效地降低噪声和振动水平,同时提高旋翼性能。其在设定的2个飞行状态下(259km/h前飞速度、14.2吨起飞重量),3/rev频率的振动水平降低了32.6%,噪声水平降低3.9%,整体气动性能提高6.9%。

DARPA"任务自适应旋翼"(MAR)

2010年上半年,美国国防部国防高级研究计划局(DARPA)分别向波音公司、西科斯基公司和贝尔/波音公司倾转旋翼机研制团队授予了"任务自适应旋翼"(MAR)初始阶段研制合同。这项合同为期16个月,目标

是开发出一套可在起飞前和飞行中改变形状的旋翼系统。该系统的旋翼可改变很多参数,包括长度、后掠角、弦长、翼型弧度、桨尖形状、扭转角、刚度、转速以及其他参数。

对旋翼机而言,自动改变旋翼外形使其适应各种飞行状态的技术是一个潜力巨大的发展方向。正如美国直升机协会(AHS)执行董事所说,这种主动旋翼技术是显著提升产品性能、降低旋翼震动和噪声的主要手段。MAR项目所取得的成果,将可满足美国防部提高旋翼机航程、速度、载荷以及安全性、生存性和经济可承受性的需求。

MAR 的性能指标很有挑战性:与传统 旋翼系统的飞行器相比,有效载荷提高30%、 航程增加40%、声学可探测距离减少50%且 振动降低90%。西科斯基公司称其研究的系 统可像iPhone一样,通过点击触摸屏上的按 钮即可选择低噪声、高机动性、平稳飞行或 其他飞行模式。

波音公司基于该项目开发了一种可主动扭转,并有前 / 后缘主动襟翼的可变转速无自动倾斜器旋翼系统。其中,后缘襟翼的主要作用是降低噪声和振动水平,同时提高航程,输入频率最高为 5/rev,由 3 个使用保形作动器技术(CAT)的压电作动器驱动。旋翼增升则通过前缘主动襟翼(VDLE)、格尼襟翼(GF)和后缘变弦长机构(TEP)实现。GF和 TEP 布置在桨叶后缘,最高作动频率为 5/rev,TEP 以准静态方式使用。桨叶主动扭转机构也采用准静态方式(静态扭转控制,STC)以提高悬停性能,波音公司还计划使用形状记忆合金(SMA)作动器控制桨叶扭转。无自动倾斜器旋翼控制通过桨叶主动扭转、变距机构实现。

波音公司在一架 AH-64E 上对其 MAR 旋翼进行了验证。其在试验桨叶上安装了 4个 TEF、2个 VDLE、1个 TEP 和 1个 GF, 以及一个桨叶扭转装置。从试验结果可以看出,不管是新研型号还是现役型号改型,加装 MAR 旋翼后,其振动和噪声水平均有大幅降低;现役机型加装 MAR 后也能够达到

项目的载荷和航程提升目标。

德国宇航院多环自动倾斜器主动旋翼

主动控制旋翼桨叶的技术难点之一就是如何将驱动力和信号传递到高载荷、快速旋转的桨叶上的作动器上,以驱动襟翼或其他装置实现对单片桨叶的控制,并保证其可靠性。

为规避这一难题,德国航宇中心 DLR 最近开发了一个主动旋翼控制系统 META,该系统并不需要在旋转部件上安装作动器,而是采用了多环的自动倾斜器实现,该技术具备实现 6 桨叶旋翼的单片桨叶独立控制的潜力。DLR 称,META 系统的优势包括无需向旋翼桨叶传递操纵所需的功率,作动器不用承受离心载荷等。该系统可应用在现有直升机上,作为机型翻新的一个途径。

传统的旋翼系统通过一个自动倾斜器, 将飞行员的操纵转化为桨叶变距角的变化, 操纵量首先传递到自动倾斜器的不动环上, 再通过不动环传递到动环,最终通过动环上 的变距拉杆转变为桨叶的扭转角变化。

而 META 系统则通过在一个自动倾斜器 上使用 2 个独立控制的不动环,有效地将一个 4 桨叶旋翼解耦成 2 个独立的 2 桨叶旋翼,由外环和内环分别控制。每个自动倾斜器由 3 个电动 / 液压作动器操纵,作动器的电动部分负责飞行控制操纵;液压活塞的控制权限较低,但可以最高 105 赫兹的频率振动,结合META 对桨叶控制的解耦,实现对每一片桨叶的高阶谐波控制 (HHC),控制频率可达到旋翼旋转频率的 2~6 倍。

此外,META 系统还能够在飞行中跟踪旋翼轨迹,并通过给2个自动倾斜器不同的总距和周期变距操纵,使2对桨叶的桨尖的空间运行轨迹错开,使得相邻的2片桨叶中,后面的桨叶不会通过前面桨叶形成的桨尖涡,从而降低旋翼的桨涡干扰噪声。

META 第一阶段风洞试验于 2015 年 9 月在荷兰 DNW 大型低速风洞完成,试验使用了 BO105 和 H145C2 两个不同型号的 4 桨叶旋翼缩比模型。

试验结果表明, Bo105 桨叶模型可降

低 4% 功率需求, 2/rev 的 HHC 状态下降低 75% 振动水平, 3/rev 的 HHC 状态下降低 4.5dB 浆涡干扰噪声;而基础性能更好地FTK 桨叶的需用功率降低 3%, 振动水平降低52%, 浆涡干扰噪声降低 3.9dB。

DLR 称,试验验证了 META 具备完整的单片桨叶控制能力、单一频率高阶谐波控制、飞行中桨叶轨迹跟踪,以及通过操纵总距和周期变距实现相邻桨叶桨尖轨迹分离等预期的功能;并且其结果表明,即使是在当前的桨叶设计水平下,IBC 的应用也能够显著地提高旋翼气动性能。

2017年7月,DLR 再次宣布,他们和空客直升机公司联合开发的使用 META 技术的全尺寸5桨叶旋翼在风洞试验中表现良好。试验表明,META 技术能够使近地飞行时的旋翼噪声降低最多3分贝或大约30%;而在高速飞行状态(270千米/时)下,旋翼需用功率降低大约5%。使用自适应控制时,旋翼引起的振动水平降低超过80%。

DLR 称,使用 5 桨叶旋翼的挑战在于,两个自动倾斜器连接的桨叶数量不一致,这使得整个系统的动态控制更为复杂,难度比 4 桨叶或 6 桨叶旋翼系统更高。而这次试验的成功则进一步证明了 META 技术的普适性。

结语

目前,多家制造商、研究机构和高校都在开发各自的技术方案,一些技术已具备工程化应用的基础。此外,将主动控制旋翼技术扩展用于旋翼系统飞行控制的研究也在进行,研究者希望能够通过用后缘襟翼的主动控制来实现桨叶变距,以淘汰复杂、笨重的自动倾斜器。目前来看,主动控制旋翼已在试验中验证了其有效性,不仅能够显著降低旋翼的振动和噪声水平,还能够提高旋翼系统的气动效率,成为目前直升机旋翼技术发展的一个重点方向。



美国空军CRH雷达告警接收机完成验证

在洛克希德·马丁公司为美国空军作战救援直升机(CRH)研制的战术任务系统中,AN/APR-52 雷达告警接收机(RWR)作为其重要组成部分,近期在莱特帕特森空军基地空军集成验证和应用实验室成功进行了演示验证,评估达到 TRL6 级。该关键里程碑使洛马增强了 AN/APR-52 RWR 技术提前于 HH-60W 首飞前一年成熟的信心。

集成验证和应用实验室是美国空 军研究实验室直属传感器分部,主要 侧重于通过高保真仿真,在类似于实 战和特殊的区域威胁环境中进行电子 战技术评估,藉此使项目风险显著下 降

洛马电子战项目主任鲍勃·亚当斯表示:"虽然 AN/APR-52 RWR 之前已经进行了大量的合同测试,但美国空军实验室提供了独特的能力,



在一个真实的作战环境中进行高保真演示验证。成功的验证是确保系统能够满足作战人员需求的一个重要里程碑。完整的电子战套件将显著提升现有和新出现威胁的探测能力及 HH-60W 的 生存能力。" AN/APR-52

RWR 是全数字化通道雷达告警接收机,可处理大量的信号,同时更快速、准确地识别对飞机的威胁。在密集信号环境下,AN/APR-52 RWR 对现代化和新威胁可进行高概率探测。

西科斯基 CRH 项目主管蒂姆·希

尔利称:"APR-52代表了旋翼飞机雷达告警性能发展的显著飞跃,我们期待它投入服务,此次验证非常成功,我们对计划顺利完成充满信心。"

美国空军 2014 年授予了西科斯基公司、洛马公司作战救援直升机合同,拟采购 112 架,取代迅速老化的HH-60G"铺路鹰"直升机,为美国军队关键作战搜索、救援提供支持。2017 年 5 月,CRH 进行了飞行器关键设计评审,为项目后续进行装配、测试、评估作准备。

HH-60W 是 UH-60M "黑鹰" 直升机衍生型,通过增加燃油容量增 大航程。CRH 直升机采用了 GE 公司 T700-701D 发动机、复合材料旋 翼和耐腐蚀结构。该设计包括一个先 进战术任务系统,集成了多个传感器、 数据链、防御系统、以及其他救援所 用的多源情报信息。 (张红霞)

贝尔V-280原型机 加快首飞前技术准备



据来自贝尔直升机公司 Amarillo总装中心的消息,该公司研制的V-280 Valor 倾转旋翼 技术验证机已经安装在发动机试车台上,准备进行首飞前的发动机 测试。V-280 是贝尔直升机公司 研制的第三代倾转旋翼机,是美 国陆军未来垂直起降(FVL)项

目技术验证机阶段的子任务,与 V-22 上采用的发动机和变速箱一 起倾转不同, V-280 只有变速箱 需要倾转,大大简化了所需的液 压机械系统。V-280 具有 4 名机 组人员(含2名飞行员),可运送 14 名士兵,巡航速度超过 280 节 (518千米/时), 因此得名, 最大 速度可达 300 节 (556 千米 / 时), 设计航程 3890 千米, 有效作战半 径926~1480千米(海拔1800米, 35 摄氏度), 能以426 千米/时 的速度进行3890千米的自部署。 该机具有三余度电传飞控系统和 先进的航电设备,此次被拍摄的 照片是已经 100% 完工的原型机, 计划9月首飞。

(梁坤)