

直升机舱内噪声主动控制技术研究

陆 洋, 马逊军, 王风娇

(南京航空航天大学旋翼动力学国家级重点实验室, 南京 210016)

[摘要] 随着社会的发展和科学技术的进步, 驾乘人员对直升机的舒适性提出了更高的要求, 该要求使舒适性成为直升机产品竞争性的要素之一。而将直升机舱内振动与噪声保持在较低的水平则是满足舒适性的重要条件。本文针对直升机舱内噪声主动控制的研究进展进行了概述。首先简要介绍了直升机舱内噪声的产生与频谱特征, 以及常见的噪声控制方法; 之后针对主动噪声控制进行了分类, 分别按照主动消声控制技术和主动结构声振控制技术进行了归纳总结, 并讨论了所采用主动控制律的发展趋势; 最后对直升机舱内噪声主动控制的发展进行了展望。

关键词: 直升机; 舱内噪声; 主动消声; 主动结构声振控制; 控制律

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.08.038



陆 洋

副教授, 主要研究方向为新概念电控旋翼系统、直升机振动及噪声的主动控制、旋翼飞行器设计。主持国家自然科学基金、国家自然科学基金青年基金、国防 973 项目专题、航空基金、武器装备预研基金各类横向课题等 20 余项。在 SCI、EI、重要核心期刊及国际、国内学术会议上发表学术论文 50 余篇; 获国家发明专利授权 5 项; 曾获教育部科技进步一等奖 1 项, 国防科技进步二等奖、三等奖各 1 项, 中航工业科技进步三等奖 1 项。

直升机舱内噪声特征与控制方法

多年来, 直升机舱内噪声一直是令人困扰的问题。直升机飞行时, 整个动力传动系统包括旋翼^[1]、尾桨^[2]、发动机^[3]、传动齿轮及附属组件^[4]都向直升机舱内辐射及传递噪声, 使驾乘人员和直升机各组件始终处在复杂且恶劣的噪声环境之中。强噪声不仅危害驾乘人员身体健康, 影响工作效率, 其诱发的结构振动与声疲劳还可能严重影响直升机的安全性^[5]。据有关标准, 一般民用飞机舱内噪声均以不超过 85dB 为设计指标。国外多型直升机经舱内降噪改装设计和处理后, 平均噪声水平已降低到 90dB 以下^[6]。而现场测试数据显示, 我国某型民用直升机舱内噪声级在 110~120dB^[7-8]。因此, 必须采取一定的手段来降低直升机的舱内噪声水平, 这也成为我国直升机研制工作中最为关键的技术问题之一。

从频率角度分析, 直升机舱内噪声主要由旋翼产生的低频气动噪声、减速器内部齿轮啮合产生的中高频结构声和宽带背景噪声组成^[9]。图 1 为 S-76 直升机舱内噪声频谱图^[10]。该直升机舱内噪声频谱是在宽带谱的基础上叠加一系列离散谱。这些线谱噪声严重影响驾乘人员的舒适度, 也是各类噪声控制技术的主要目标。

常见的噪声控制技术可分为被动控制和主动控制。用于直升机舱内降噪时, 被动控制技术对中低频噪声的控制能力差、系统尺寸和质量较大、增加燃油消耗, 影响了直升机整体性能, 同时不能适应直升机旋翼转速的变化, 降噪效果远达不到用户的要求^[11]。为了取得更好的降噪效果, 需要一种新的降噪方法。这种方法应能够对中低频噪声取得很好的降噪效果; 系统质量轻, 通常不需要对直升机的现有结构作出大的修改; 通过与传统降噪措施相结合, 在中低

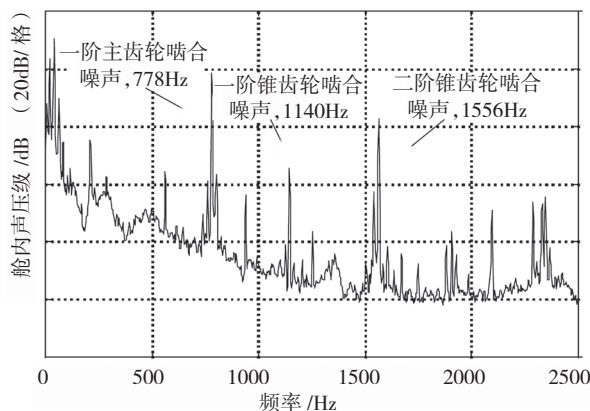


图1 S-76直升机舱内噪声频谱

Fig.1 Interior noise spectrum of a S-76 helicopter

频和频段都能较好地抑制噪声。直升机主动噪声控制技术便在这种需求下成为新的研究热点,也是未来最有前途的实现舱内噪声整体控制的解决方案^[12]。本文即针对直升机舱内噪声主动控制技术中的主要问题进行讨论,包括主动噪声控制方法的形成与发展,主动控制应用于直升机舱内噪声控制的技术分类,已取得的舱内噪声控制效果和所采用的主动控制律等,为我国直升机舱内噪声控制提供一定的参考。

主动噪声控制技术

尽管直升机舱内噪声主动控制是近30年来的一项新兴技术,但它与主动噪声控制(Active Noise Control, ANC)有着深厚的技术渊源,或者说直升机舱内噪声主动控制是主动噪声控制在直升机舱室的应用与发展。ANC思想的产生可以追溯到20世纪30年代。具体到一个数字化的主动噪声控制系统,其基本思想是通过控制器和数据采集系统对声场进行跟踪并实时产生与原始声源幅值相等、相位相反的次级声源来抑制和消除噪声。在1936年美国公布的一份富有远见的专利书中,德国工程师Lueg^[13]阐述了上述思想(见图2)。Olson和May^[14]则共同提出了另一种ANC系统。随后,Kido和Chaplin^[15-16]开始探索数字信号处

理技术及设备在主动噪声控制方面的应用,由此奠定了现代前馈主动噪声控制技术的基础。随着高速数字信号处理器件的快速发展,Widrow^[17]提出了自适应滤波理论,并将其应用于有源噪声控制。经过不断发展,产生了以滤波最小均方(Filtered-x Least Mean Square, Fx-LMS)算法为代表的经典算法。此后,ANC技术进入了一个快速发展时期。

现在,主动噪声控制研究有两个领域非常活跃,并且已经取得了丰硕成果。一个领域以英国南安普顿大学的Nelson和Elliott等^[18]为代表,他们将工作重点集中在复杂的控制系统设计和研究实现上,并且研究了降噪效果与声场特征、次级声源、误差传感器布放等因素的关系。这部分研究是传统ANC思想(Lueg方案)的继续发展,所不同之处在于将现代控制技术融入自适应主动降噪系统设计之中;另一领域是以美国弗吉尼亚理工大学的Fuller^[19]和澳大利亚阿德莱德大学的Snyder^[20]为代表的研究方向。他们侧重于采用次级

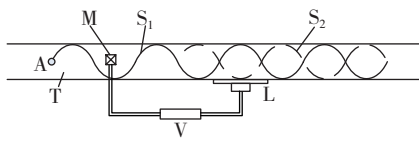


图2 Paul Lueg于1936年所申请专利中的ANC插图

Fig.2 ANC illustration page of Paul Lueg's patent in 1936

力源进行结构噪声的主动控制。研究表明,对结构噪声,使用次级力控制结构振动进而抑制噪声,往往比用扬声器作为次级声源抑制噪声更为有效。实质上,该技术是ANC在振动控制领域的应用与发展。

以上两种技术均已在直升机舱内噪声控制中得到了应用。同时可以看出,直升机舱内噪声主动控制技术与主动振动控制技术的发展交错进行,难以分开。

直升机舱内噪声主动控制技术

由于人们对舒适性的迫切需求,ANC技术很快被引入直升机降噪领域,即直升机舱内噪声控制是主动噪声控制的一种应用。结合直升机结构和噪声特点,该技术已经取得了长足发展,并得到了广泛验证和应用。与现今两个活跃的噪声控制领域相匹配,目前直升机舱内噪声主动控制存在两种主要的控制策略。虽然研究者的思路不同,但是这两种策略却有着相当程度的技术相关性。本节试图从前述ANC技术的发展历程出发,通过主动消声技术、主动结构声振控制技术和所采用的主动控制律这3方面来阐述主动噪声控制技术用于直升机舱内降噪的国内外研究现状与发展方向。

1 主动控制技术分类

从20世纪80年代末开始,经过20多年的发展,已有多种方案可以实现直升机舱内噪声主动控制,其中主动消声技术和主动结构声振控制技术是研究最多也是最主要的两种控制策略。

(1) 主动消声技术(Active Sound Cancellation, ASC)。该技术为传统ANC在直升机舱内噪声控制方面的直接应用,它以扬声器作为控制器,产生一个等幅反相的次级声场,与原直升机舱内的气动声场或结构声场叠加,达到消减噪声的目的。这种方

法对 1000Hz 以下频率的噪声降噪效果明显,且无需对直升机结构进行改动,比较容易实现。图 3 为主动消声技术框图,展示了主动消声技术的基本原理。

(2) 主动结构声振控制(Active Structural Acoustic Control, ASAC)。该技术以结构作动装置(Structural actuator)为控制机构,通过控制振动达到抑制结构噪声的目的。作动机构安装于直升机机身结构、传动系统与机身之间等位置,通过抑制结构振动水平,减少其对机舱的噪声辐射及舱内噪声。其中,主动隔离控制(Active Isolation Control)是发展最早也是最为成熟的一个领域,也属于 ASAC 的范畴。该技术的基本原理是通过主动控制算法,利用安装于主减速器撑杆上的作动器抑制传向机身的齿轮啮合振动,最终达到降低舱内噪声水平的目的。例如,在主减速器的撑杆上采用主动控制技术,得到主动主减速器撑杆(见图 4),不但可削减由旋翼产生的低频噪声,还可有效降低齿轮啮合产生的噪声,而且能适应直升机工作条件变化所带来的旋翼转速变化。

2 主动消声技术的应用

ASAC 技术首先被引入螺旋桨飞机舱内噪声控制领域,以解决舱内桨叶通过频率及其前几阶高次谐波的噪声控制问题,之后才被用来解决直升机舱内噪声问题。故介绍直升机舱内噪声的研究现状之前,需要先简要介绍螺旋桨飞机应用 ASAC 技术的发展历程。

英国南安普顿大学声与振动研

究所(ISVR-Institute of Sound and Vibration Research) Elliott、Nelson^[21]和 Topexpress 公司 Doring 等^[22]分别在一架 BAe748 双发 48 座飞机上完成了首次舱内主动噪声控制飞行试验,取得了相似的令人鼓舞的降噪结果。图 5 为 ASC 技术在螺旋桨飞机上应用的示意图。90 年代,几乎所有大的飞机制造厂商都参与了主动噪声控制的研究。欧盟飞机先进主动噪声控制技术研究项目(ASANCA)采用了庞大的多通道控制系统,先后在包括 SAAB340、SAAB2000、Dornier328、ATR42 等螺旋桨飞机在内的多种机型上进行了主动噪声控制的地面测试和飞行试验。其中,SAAB340(以及 SAAB2000、SAAB340 的后继机型)是世界上第一种实际应用 ASC 技术并投入市场的商用螺旋桨飞机。进入 21 世纪,根据有关报道,目前在庞巴迪 Q(quiet)系列、空中客车 A400M、洛克希德·马丁公司的 C-130 等型号的部分飞机上已经安装了具备座舱噪声主动控制功能的系统^[23]。

由于与螺旋桨飞机舱内噪声控制有许多相似之处,通过 ASC 技术进行直升机舱内噪声控制的方案很快便得到尝试。然而,有关 ASC 技术用于直升机舱内降噪试验的文献相对较少,原因在于初级声场的极端复杂性。美国 Lord 公司以旋翼和尾桨的桨叶通过频率及其高阶谐波为主要降噪目标,通过在 Bell 206L 直升机舱内布放扬声器以实现 ASC。这些工作在 Jolly 发表的一篇论文中

被提及^[24],但是更多细节无法得知。另外, Jolly 于 1996 年申请了一个专利,该专利详细描述了一个直升机混合主动/被动噪声与振动控制系统的思想和结构,如图 6 所示^[25]。其中主动噪声控制部分运用了 ASC 技术,图中 35c 表示扬声器。

Boucher 等^[26]针对欧洲 EH101 多用途直升机进行了 ANC 试验研究。主要降噪目标为旋翼桨叶通过频率(17.5Hz)的二、三阶谐波频率和尾桨桨叶通过频率(63.38Hz)及其二阶谐波频率。该控制系统有 32 个传声器(安装于座椅顶部)和 16 个扬声器(安装于座椅顶部和舱室顶部),采用经过修改的 Fx-LMS 算法和 TMS320C40 DSP。飞行试验结果显示,35Hz、52.5Hz、63.38Hz、126.76Hz 噪声分别降低了 6dB、6.5dB、12dB、5dB。分析表明,初级声场的复杂性和时变性影响着系统的收敛性。且扬声器功率难以达到初级声场的声压强度,比如单独针对 17.5Hz 噪声,消减 10dB 至少需要 8 个扬声器。

以上两例 ASC 技术应用于直升

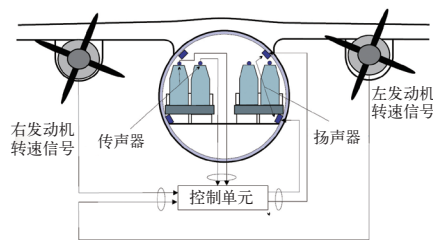


图5 ASC技术在螺旋桨飞机上的应用示意图

Fig.5 Application of active sound cancellation in a propeller aircraft

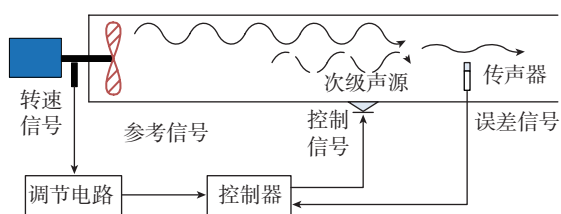


图3 主动消声技术系统框图

Fig.3 Basic active sound cancellation system

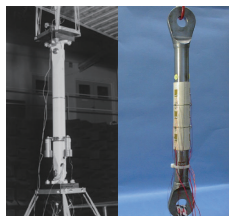


图4 安装有作动器的主动撑杆

Fig.4 Active struts equipped with actuators

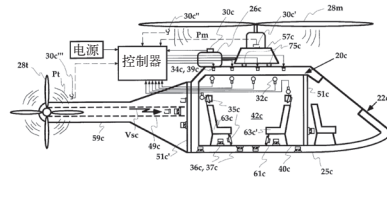


图6 直升机混合主动/被动噪声与振动控制系统

Fig.6 Hybrid active-passive noise and vibration control system for helicopter

机舱内降噪的工作针对的都是低频噪声。对于 1000Hz 以上的齿轮啮合噪声,由于声腔模态密度很高,ASC 技术要取得全局噪声控制是不切实际的。这一点在 Belanger^[27]发表的论文中被提及。

国内,南京航空航天大学智能材料结构研究所也从 20 世纪 90 年代开始,展开了飞机舱内主动降噪工作的研究,并取得了满意的结果。此外,南京大学声学所、中科院声学所、上海交通大学、西北工业大学等高等院校也从不同方面对该领域进行了广泛而深入的研究。例如,胡涵和陈克安等^[7]采用一套自主研发的多通道主动噪声控制系统,针对我国某型直升机机身舱段进行了主动噪声控制试验,在能量较集中的两个频谱分量处均取得了很好的降噪效果(125Hz 降噪量约 7dB,250Hz 降噪量约 6dB),且在其他谱线位置未发生明显溢出现象。目前,国内还没有实际应用于国产直升机的 ANC 系统。

3 主动结构声振控制技术

针对频率为 1000Hz 以下的噪声,ASC 技术降噪效果明显,但是,对减速器齿轮啮合产生的 1000~3000Hz 范围的结构噪声,ASC 降噪效果甚至没有被动控制技术好。而该频率范围的噪声却最影响人的舒适度。这种噪声为齿轮啮合振动通过撑杆组件传递至机身,引起机身振动而产生的辐射噪声。数年的研究表明,针对直升机齿轮啮合噪声,ASAC 技术更有前途。依据不同的反馈信号进行划分,可将直升机 ASAC 分为以噪声信号作为反馈量的 ASAC 技术和以振动信号作为反馈量的 ASAC 技术,如图 7 所示。

(1)以噪声作为反馈量的 ASAC 系统。目前仅见于 S-76 和 MD-900 直升机。Millott 等^[10]在 S-76 Helibus (Sikorsky)上进行了 ASAC 试飞试验,通过在减速器到机身的传力梁上靠近减速器支撑杆连接点处布置 Moog

Proof-mass 作动器,以反馈传声器处的 800Hz 齿轮啮合噪声为控制目标,在悬停、222 km/h 速度前飞、机动飞行等科目的测试中,舱内不同位置的另外 32 个监测声传感器处取得了平均 7~12dB 的降噪效果;在加强了控制算法的鲁棒性以及改进了系统辨识算法后,1996~1997 年进行了第二次试飞试验,获得了 10~20dB 的降噪效果。Sikorsky 采用的方法称为“点遏制法(Choke-Point Methodology)”,在遏制点阻断振动能量通过减速器支承传递到机身。试验过程中,仅针对 800Hz 噪声进行了控制。

Mathur^[28]针对 MD-900 直升机,通过安装于机身内壁的压电作动器作为次级力源,以分布于舱内的反馈传声器处的齿轮啮合噪声为控制目标,进行了 ASAC 试验。目标频率噪声在 16 个传声器处总体降低了 3.5~4.5dB。但是试验过程中,未从传感器信号中很好地分离出参考信号,这导致所取得的降噪量较小。表 1 列出了 S-76 与 MD-900 直升机 ASAC 试验的部分信息。

(2)以振动作为反馈量的 ASAC 系统。本试验已在 BK117、EH101、EC135 和 Bell407 等直升机上进行。Kawaguchi^[29]提出一种主动减振降噪系统。该系统将液压作动器嵌入 BK117 直升机减速器撑杆,以撑杆底部的振动信号作为反馈量,实现了对控制点处纵向和横向振

动的控制。由于液压作动器动作较为缓慢,其对高频齿轮啮合频率(1000~3000Hz)振动控制效果并不理想。于是,Sutton 等^[30]将工作频带较宽的磁致伸缩作动器,安装在一根 EH101 直升机的减速器撑杆试验件上,从横向/纵向波传播的角度对传到下游受体的动能进行主动控制。在 250~1250Hz 范围内的离散频率点上取得了平均 30~40dB 的动能衰减效果。同时期的 Brennan、Unruh、Jolly、Boucher 等^[31-34]也进行了相关的 ASAC 研究。

之后,Eurocopter 公司的 Gembler^[35]在 Daimler Benz 公司的帮助下,以 EC135 直升机为对象,开始尝试用压电陶瓷构建智能结构作为减速器主动支承,以期实现 ASAC。在分析了智能撑杆的作动能力和 ASAC 所需的控制力/应变的关系后,发现在压电陶瓷驱动下,智能杆完全能够胜任 ASAC。Maier^[36]和 Hoffmann 等^[37]以此为基础,采用智能撑杆控制撑杆底部的齿轮啮合振动,进而抑制舱内噪声。分别于 2000 年和 2004 年在 BK117 机上进行了全主动支承减速器-机身连接配置的试飞,在无地效悬停、111~222km/h 速度前飞等状态下,针对齿轮啮合噪声取得了一定的降噪效果,如表 2 所示。之后运用压电材料作动器构造智能撑杆的技术得到了迅速发展。

最新进展是 Pasco 等^[38]在 Bell

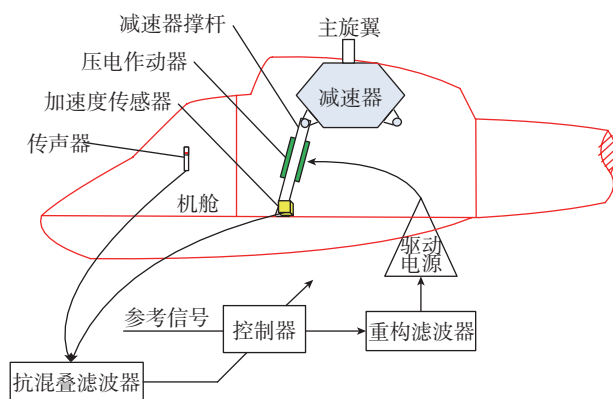


图7 主动结构声振控制示意图

Fig.7 Sketch of active structural acoustic control system

407 上进行的 ASAC 试验研究。在 30%~90% 发动机扭矩下,以 Bell407 舱内 4 个齿轮啮合噪声谱为控制目标进行了地面试验。低扭矩情况下 ASAC 系统取得了良好的降噪效果,而在高扭矩时效果并不明显。

另外, Baz 和 Asiri 运用多层压电智能材料和层叠作动器构造出有滤波功能的周期支撑杆,结合 Fx-LMS 算法取得了齿轮啮合基频噪声的良好降噪效果^[39-41]。该支柱只让某段特殊频带的波通过,称为“带通”,而阻断其他频率的波,称为“带阻”。这些频段的频谱宽度和位置在运用被动周期撑杆时是固定的,但是在主动周期撑杆中是可调的。

国内,南京航空航天大学雷凌云博士^[42]对 ASAC 技术进行了深入的理论和试验研究,提出了加速度反馈控制(Acceleration Output Extended Feedback, AOEF)技术,在模拟直升机减速器/机身主动隔振模型上,对多输入多输出主动最佳隔振和自适

应杆件的有效性进行验证。与纯自适应前馈控制相比,基于自适应反馈或 AOEF 阻尼设计的前馈/反馈混合控制是一种有效的控制策略,在提高收敛速度、降低稳态控制误差的同时,具有良好的抗瞬态冲击干扰能力。但是试验过程中,所针对的振动频率较低,且未监测噪声变化情况。近期,笔者采用一种离散预测滑模控制方法^[43],在所研制的直升机舱内噪声主动控制试验系统上,分别进行了以振动作为反馈量和以噪声作为反馈量的 ASAC 试验研究。针对多个齿轮啮合噪声取得了良好的控制效果。同时结果表明,以噪声信号作为反馈量的 ASAC 系统可取得更好的效果。另外,针对被动/主动周期撑杆开展了大量的研究工作,取得了一定的进展。

4 控制律

控制律设计是实现直升机舱内噪声主动控制的关键技术之一。明显地,ASC 和 ASAC 的控制律与主

动噪声控制所采用的控制律原理是一致的。实际上, Lueg 和 Olson、May 的工作具有非凡的意义,他们演示了两种不同的主动噪声控制方法。Lueg 的方案可看做一个前馈控制系统,上游麦克风测得的噪声先验知识为其前馈控制量。而 Olson 与 May 的方案则可看作一个反馈控制系统,麦克风与次级声源距离很近,并且不需要声场的先验知识。所以,典型的 ASAC 算法同样可分为反馈控制和前馈控制。基于反馈控制算法的 ASAC 系统仅见于 S-76 舱内噪声控制的相关文献。Millott 等^[10]采用高阶谐波控制(Higher Harmonic Control, HHC)方法,针对 S-76 主齿轮副啮合噪声取得了 10~20dB 的降噪效果。该算法基于线性准静态假设,其控制间隔较大,更新速率较慢,仅适用于频率较低、外扰比较平稳以及结构参数变化不大的情况^[44]。而前馈 LMS 算法因其计算复杂度低、在平稳环境中的收敛性好、其均值无偏地收敛到维纳解、容易实现等优点,得到了人们的广泛关注。例如, Hoffmann 通过构造滤波器个数与噪声谱线数相等的并联结构前馈 Fx-LMS 算法,针对数个 BK117 舱内齿轮啮合噪声取得了最高 19.5dB 的控制效果^[36-37]。但是该算法处理噪声、不确定外扰和结构时变系统的能力有限。更重要的是,随着滤波器个数的增多,算法计算量明显增大,自适应能力降低,甚至可能引起控制无效。为降低算法计算量并提升旁瓣谐波控制能力, Pasco 采用 PC-LMS 算法^[38,45]针对 Bell407 舱内 4 个齿轮啮合噪声谱进行了 ASAC 地面试验,取得了一定的降噪效果。但是低阶 FIR 滤波器的采用使算法处理不确定外扰的能力降低。

Tseng、Walchko 和 Pinte 等^[46-48]指出,对于含有多频成分的复杂噪声信号,由反馈控制器与自适应前馈控制器相结合而形成的混合控制系统

表1 S-76与MD-900直升机ASAC试验对比

项目	S-76	MD-900
控制目标 /Hz	800	836, 900, 1533
控制算法	HHC	Fx-LMS
作动器	6 个惯性作动器 (传力梁)	16 个压电作动器 (机身内壁)
反馈信号	32 个传声器 (分布于舱内)	16 个传声器 (分布于舱内)
通道辨识	在线辨识	离线辨识
飞行试验 /dB	10~20(总体)	3.5~4.5(总体)

表2 BK117直升机ASAC试验情况对比

项目	BK117(一)		BK117(二)				
控制目标 /Hz	1500, 1900		1900 及谐波				
控制算法	并联结构 Fx-LMS		并联结构 Fx-LMS				
作动器	21 个压电作动器		21 个压电作动器				
反馈信号	7 个三轴加速度传感器		7 个三轴加速度传感器				
通道辨识	在线辨识		在线辨识				
慢速飞行	齿轮啮合噪声 /Hz	1500	1900	750	1500	1900	2550
	降噪量 /dB	6.6	9.6	5.7	8.5	16.0	6.3
222km/h 飞行	齿轮啮合噪声 /Hz	1500	1900	750	1500	1900	2550
	降噪量 /dB	4.5	5.0	5.5	4.0	19.5	6.2

可获得较为有效的控制效果。由于针对单频外扰,前馈控制的效果远比反馈控制好,鉴于以上情况,可依靠单通道前馈控制对主要的啮合频率信号进行有效控制;同时,用反馈控制来弥补前馈控制的缺陷,以获得多频控制特性和全局性能的改善。这样构成的前馈-反馈混合控制更能够适应直升机噪声频谱特征,取得更佳的降噪效果。

目前,专门针对直升机 ASAC 系统设计的混合控制算法较为少见。但是在通常的主动噪声控制领域,可见诸多混合控制算法。Swanson^[49]把自适应前馈和自适应反馈控制结合起来用于管道噪声控制。Wang^[50]也基于 Fx-LMS 算法,使用相同的混合控制策略进行封闭空间内的噪声对消。在他们的研究中采用自适应滤波器作为反馈控制器,构造出相当于无控响应的信号作为反馈控制器的输入。Mehta^[51]基于定量反馈理论(QFT)对 H_∞ 方法的设计结果进行性能优化,然后应用到混合控制中,在 400Hz 带宽内取得了 10~20dB 的控制效果。Yuan^[52]针对非最小相位的控制通道系统,采用 H_∞ 理论进行反馈控制器的设计补偿,设计思路清晰,目标明确,使得自适应前馈控制的性能向理论上的完全控制迈进了一大步。Tseng 把内模反馈控制器应用于混合控制,试验结果表明:在 200~500Hz 范围内的控制效果大大优于单独采用前馈或反馈控制的效果,并得出实用的混合控制系统最好由固定的反馈控制器与自适应的前馈控制器相结合而组成的观点。Ma^[53-55]把 PID 反馈控制器与基于 FIR 滤波器或 Novel 滤波器的自适应前馈控制器结合起来构成结构振动、噪声对消混合控制系统^[53-55],这种反馈控制器结构简单,计算工作量小,控制效果好。以上这些算法都未在直升机 ASAC 平台上得到验证。

近期,笔者将所设计的离散预

测滑模反馈控制器与 Fx-LMS 前馈控制器相结合,构造出具有多频控制能力的 ASAC 混合控制算法^[43]。基于所研制的直升机舱内噪声主动控制系统的试验研究表明,该算法能够同时控制多个齿轮啮合频率噪声,且具有更快的收敛速度和更强的鲁棒性。

结束语

直升机舱内噪声主动控制存在巨大的商业和军事应用潜力,因此近年来吸引了世界上诸多著名学者及研究机构的目光,不少国家和组织投入了大量的人力、物力进行该领域的研究。它是控制理论、数字信号处理、振动与声学、智能材料与结构、传感与驱动技术、电子与计算机科学等诸多学科的交叉融合。整理回顾直升机舱内噪声主动控制的发展过程可见,由于主动降噪系统的高度继承性和多学科交叉性,其发展尚不成熟,包括以下关键技术在内的课题还需进一步突破:

(1) 作动器问题。随着智能材料(如压电智能材料、磁致伸缩材料等)技术的不断发展,凭借其质量轻、结构紧凑、价格相对低廉、作用力大、工作频带宽、响应快、寿命较长(没有齿轮或轴承一类的运动部件)等优点,以其为主要材料的智能作动器已得到广泛应用,并于 20 世纪 90 年代就被引入直升机舱内噪声主动控制领域。智能材料产生的位移很小,难以完成所需的动作。研究和发能够产生较大位移的智能材料具有重大意义。智能材料用于主动撑杆,还需考虑承拉能力。由于国内的材料研究、制造和加工工艺与国际先进水平尚有一定差距,压电智能结构的执行效率还有较大的提高空间。另外,材料的强度、疲劳特性也是限制这类应用的主要因素。材料、工艺等技术的进步才能使智能结构真正走入工程应用。

(2) 宽频降噪。在传统 LMS 算法上进行改进,可以更好地跟踪复杂振动/噪声信号,取得更好的舱内噪声宽频控制效果。目前,对并联结构 LMS 控制律的改进及构造具有更高性能的前馈-反馈混合控制律正成为研究热点。其他新的方法和对 LMS 算法的新的改进也需要得到探索;另一方面,由于可共用大部分测试和计算硬件,故可尝试将 ASC 与 ASAC 相融合,通过 ASC 控制直升机舱内中低频噪声,而通过 ASAC 实现对舱内中高频噪声的控制,从而实现更好的宽频噪声控制效果。

(3) 多通道情况下封闭空间的主动噪声控制。多通道情况下,自适应滤波器数量的增加必然导致收敛因子彼此牵连,增加了多入多出控制系统设计和调试难度。同时计算量迅速增加,实时性难以保证。为此,需设计更加简便高效的控制策略,并对其进行性能分析。

(4) 控制系统的鲁棒性。飞行中的直升机,结构参数具有一定的不确定性,并且伴随大量的外界扰动。在这样的情况下,要控制其产生的噪声,始终取得好的降噪效果,就要求控制系统具有鲁棒性,对应的算法具有鲁棒性。设计具有鲁棒性的算法和整个控制系统,仍然是研究工作的重中之重。

(5) 商业化。在取得了一定的技术突破之后,需要考虑诸多实际情况,尽快将成果转化化为产品,在实践中检验技术的有效性,使技术和产品得到迭代。

参考文献

- [1] YU Y H. Rotor blade-vortex interaction noise[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2000(36): 97-115.
- [2] 刘孝辉,徐新喜,白松,等. 军用直升机振动与噪声控制技术[J]. 直升机技术, 2013(1):67-72.
- LIU Xiaohui, XU Xinxi, BAI Song, et al. Vibration and noise control technology on military

helicopters[J]. Helicopter Technique, 2013(1): 67-72.

[3] EMILIANO M, ANTONIO V. Acoustical signature analysis of a helicopter cabin in steady-state and run up operational conditions[J]. Measurement, 2010(43):283-293.

[4] BRENNAN M J, PINNINGTON R J, ELLIOTT S J. Mechanisms of noise transmission through helicopter gearbox support struts[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1994, 116(4):548-554.

[5] 陈克安. 有源噪声控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

CHEN Kean. Active noise control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.

[6] 柳文林, 穆志韬, 段成美. 直升机振动与减振特性分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2004, 19(5):533-536.

LIU Wenlin, MU Zhitao, DUAN Chenmei. Research on vibration and vibration reduction characteristics of helicopter[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute. 2004,19(5): 533-536.

[7] 胡涵, 陈克安. 民用直升机舱内噪声自适应有源控制试验研究[C]. 2010年全国声学学术会议, 哈尔滨, 2010.

HU Han, CHEN Kean. Experimental study of adaptive active noise control in a helicopter cabin[C]. The Chinese Technical Acoustics, Harbin, 2010.

[8] 甄兴福, 肖剑, 全云岗. 直升机舱内噪声主动控制系统的设计与仿真研究[J]. 直升机技术, 2004(2):39-41.

ZHEN Xingfu, XIAO Jian, TONG Yungang. The research of design and imitation based on adaptive active noise control system inside helicopter[J]. Helicopter Technique, 2004(2):39-41.

[9] 王三平, 熊俊江, 尚大晶, 等. 直升机抗噪声疲劳设计中的噪声测量[J]. 直升机技术, 2000, 123(3):1-8.

WANG Sanping, XIONG Junjiang, SHANG Dajing, et al. Noise measurement in the anti-fatigue design of helicopter noise[J]. Helicopter Technique, 2000, 123(3):1-8.

[10] MILLOTT T A, WELSH W A, YOERKIE C A, et al. Flight test of active gear-mesh noise control on the S-76 aircraft[C]// American Helicopter Society. 54th Annual Forum Proceedings of the American Helicopter Society, Part 1 (of 2). Curran Associates, inc, 1998:241-249.

[11] 严济宽. 隔振降噪技术的新进展[J]. 噪声与振动控制, 1991, (5-6):11-16.

YAN Jikuan. New progress in the vibration isolation and noise reduction technology[J]. Noise and Vibration Control, 1991(5-6):11-16.

[12] ELLIOTT S J. Signal processing for active control[M]. London: Academic Press, 2001.

[13] LUEG P. Process of silencing sound oscillation: US2043416[P]. 1936-06-09.

[14] OLSON H F, MAY E G. Electronic sound absorber[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1953,10(2):135-139.

[15] KIDO K. Reduction of noise by use of additional sound sources[C]. Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings, Inter-Noise 75, Sendai: Institute of Noise Control Engineering, 1975:647-650.

[16] CHAPLIN G B B, SMITH R A. The sound of silence[J]. Engineering, 1978, 218:672-673.

[17] WIDROW B, STEAMS S D. Adaptive signal processing[M]. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1985.

[18] NELSON P A, ELLIOTT S J. Active control of sound[M]. Pittsburgh: Academic Press, 1990.

[19] FULLER C U, ROGERS C A, UOBERTSHAW H H. Active Structural acoustic control with smart structures[C]//The International Society for Optical Engineering. Proceedings of SPIE Conference 1170 on Fibre Optic Smart Structures and Skins II. Baston: Eriuldd, 1989.

[20] SNYDER S D, HANSEN C H. Design considerations for active noise control systems implementing the multiple input multiple output LMS algorithm[J]. Journal of Sound and Vibration, 1992,159(1):157-174.

[21] ELLIOTT S J, NELSON P A, STOTHERS I M, et al. In-flight experiments on the active control of propeller-induced cabin noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 159(1):219-238.

[22] DORLING C M. A demonstration of active noise reduction in an aircraft cabin[J]. Journal of Sound and Vibration, 1989, 128(2):358-360.

[23] 裘进浩, 袁明, 季宏丽. 大型飞机舱内振动噪声主动控制技术的研究及应用[J]. 航空制造技术, 2010(14):26-29.

QIU Jinhao, YUAN Ming, JI Hongli. Research and application of vibration noise control technology in large aircraft cabin[J].

Aeronautical Manufacturing Technology. 2010(14):26-29.

[24] JOLLY M R, NORRIS M A, ROSSETTI D J, et al. A demonstration of active control for helicopter cabin noise reduction[C]. The 20th European rotorcraft forum, Amsterdam, Netherlands, 1994.

[25] JOLLY M R, ROSSETTI D J, NORRIS M A, et al. Hybrid active-passive noise and vibration control system for aircraft. U S 5845236[P]. 1998-04-05.

[26] BOUCHER C C, ELLIOTT S J, BAEK K H. Active control of helicopter rotor tones[C]. The International Conference on Noise Control Engineering, Liverpool, 1996.

[27] BELANGER P, BERRY, A, PASCO, Y, et al. Multi-harmonic active structural acoustic control of a helicopter main transmission noise using the principal component analysis[J]. Applied Acoustics, 2009, 70(1):153-164.

[28] MATHUR G P, FULLER C R. Analytical and experimental evaluation of active structural acoustic control (ASAC) of helicopter cabin noise[C]. 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, 2002.

[29] KAWAGUCHI H, BANDO H, NIWA Y. The test result of AVR (active vibration reduction) system[C]. 52nd Annual Forum of the American Helicopter Society, Washington, 1996.

[30] SUTTON T J, ELLIOTT S J, BRENNAN M J. Active isolation of noise transmission through a helicopter gearbox supported strut using multiple magneto restrictive actuators[C]. ISMA21, Leuven, 1996.

[31] BRENNAN M J, ELLIOTT S J, HERON K H. Noise propagation through helicopter gearbox support struts—an experimental study[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1998,120(3):695-704.

[32] UNRUH J F, FOX D J. Study of rotorcraft structure-borne noise isolation using empirical component coupling[J]. Journal of the American Helicopter Society, 1999, 44(3):172-178.

[33] JOLLY M R, NORRIS M A, ROSSETTI D J. Adaptive control of helicopter cabin noise [C]. The ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, California, 1995.

[34] BOUCHER C C, ELLIOTT S J, BAEK K H. Active control of helicopter rotor tones[C]. International Conference on Noise

Control Engineering, London, 1996.

- [35] GEMBLER W, SCHWEITZER H. Helicopter interior noise reduction by active gearbox struts[C]. 54th Annual Forum of the American Helicopter Society, Washington DC, 1998.
- [36] MAIER R, HOFFMANN F, TEWES S. Active vibration isolation system for helicopter interior noise reduction[C]. The 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Breckenridge, 2002.
- [37] HOFFMANN F, MAIER R, JANKER P, et al. Helicopter interior noise reduction by using active gearbox struts[C]. 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Cambridge, 2006.
- [38] PASCO Y, BERRY A, GREWAL A, et al. Active control of transmission noise in a Bell 407 helicopter[C]. The 70th Annual Forum of the American Helicopter Society, Montréal, Québec, 2014.
- [39] BAZ A. Active control of periodic structures[J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 2001, 123: 472–479.
- [40] ASIRI S, BAZ A, PINES D. Periodic struts for gearbox support system[J]. Journal of Vibration and Control, 2005, 11:709–721.
- [41] ASIRI S, BAZ A, PINES D. Active periodic struts for a gearbox support system[J]. Smart Material Structures, 2006, 15:1707–1714.
- [42] 雷凌云. 基于适应杆件的振动主动控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- LEI Lingyun. Study on active vibration control based on adaptive struts[D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, 2004.
- [43] Lu Y, Ma X J. Active control of multifrequency helicopter vibrations using discrete model predictive sliding mode control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(4):668–680.
- [44] PATT D, LIU L, CHANDRASEKAR J, et al. Higher-harmonic control algorithm for helicopter vibration reduction revisited[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2005, 28: 918–930.
- [45] PASCO Y, ROBIN O, BÉLANGER P, et al. Multi-input multi-output feedforward control of multi-harmonic gearbox vibrations using parallel adaptive notch filters in the principal component space[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 22(330): 5230–5244.
- [46] TSENG W K, RAFAELY B, ELLIOTT S J. Combined feedback-feedforward active control of sound in a room[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 104(6): 3417.
- [47] WALCHKO J C, WANG K W, JUN S K, et al. Hybrid feedforward-feedback control for active helicopter vibration suppression[C]. The 63rd Annual Forum of the American Helicopter Society, Virginia, 2007.
- [48] PINTE G, BOONEN R, DESMET W, et al. Active structural acoustic control of repetitive impact noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 319(3): 768–794.
- [49] SWANSON D C. Active noise attenuation using a self-tuning regulator as the adaptive control algorithm[C]. Inter-noise 89, CA, 1989.
- [50] WANG F, MECHEFSKE C K. Active feedback control using adaptive filtering[J]. Journal of Vibration and Control, 2004, 10(1):25–38.
- [51] MEHTA P. 'New' approach to active noise control in ducts[C]. The 1996 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Atlanta, 1996.
- [52] YUAN J. A hybrid active noise controller for finite ducts[J]. Applied Acoustics, 2004, 65(1):45–57.
- [53] MA K G, MELCHER J. Adaptive control of structural acoustics using intelligent structures with embedded piezoelectric patches[J]. Journal of Vibration and Control, 2003, 9(11): 1285–1302.
- [54] MA K G. Vibration control of smart structures with bonded PZT patches: Novel adaptive filtering algorithm and hybrid control scheme[J]. Smart Materials and Structures, 2003, 12(3): 473–482.
- [55] MA K G, POURJALALI S, Ghasemi-Nejhad M N. Hybrid adaptive control of intelligent structures with simultaneous precision positioning and vibration suppression[J]. Smart Structures and Materials: Modeling, Signal Processing and Control, 2002, 4693:13–24.

Review of Active Techniques for Helicopter Interior Noise Control

LU Yang, MA Xunjun, WANG Fengjiao

(National Key Laboratory of Rotorcraft Aeromechanics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] With the rapid development of modern science and technology, the demands for comfort by helicopter pilots and passengers are continuously growing. Thus the comfort level of a helicopter is becoming an important competitive quality of the product. To cope with these emerging demands, new techniques have been investigated to remain the vibration and noise in helicopter fuselage at a relatively low level. A Review of active techniques for helicopter interior noise reduction is presented. First, we briefly reviewed the mechanism of airborne or structure-borne noise generation and the active noise control methods commonly adopted. Then the active techniques are classified into active sound cancellation and active structural acoustic control. The control laws adopted in these two technologies are also briefly summarized and discussed. Finally, predictions of active techniques for helicopter interior noise control are presented.

Keywords: Helicopter; Interior noise; Active sound cancellation; Active structural acoustic control; Control law

(责任编辑 玲犀)