

飞机发动机连接及振动控制

摘要: 长期以来,控制固定翼飞机的振动和座舱内的噪音水平是一个挑战,也是没完没了地调整系统特性变量的过程。文章介绍了振动的基本原理及其与固定翼飞机发动机连接的关系,给出了与发动机振动处理相关的可用技术和推荐设计方法。

关键词: 发动机固定;噪音控制;振动控制

1 问题的介绍和说明

本文的目的是向读者呈现现代飞机发动机振动/噪音问题的基础背景,并给出可用于处理发动机振动问题的有效解决方案。另外,概述了贯穿项目设计和飞行试验阶段飞机OEM厂商可选择的技术设计方法。

全部固定系统需要达到两个基本功能:限制运动和提供振动隔离并减少噪音。“限制运动”指的是限制推力、“g”载荷、重量和扭矩在两个结构之间产生的相对运动。“提供隔离”和“减少噪音”包括使振动从一个结构到另一个结构的传输减到最少,从而减少传播到客舱区域的噪音。

为了提供第一个基本功能,固定系统必须是刚性的,以使相对运动最小。为了使振动(或噪音)传播最小化,固定系统必须是动态柔软的。这个固有的难题产生了冲突目标,需要折中,并在发动机连接设计中灵活处理。这个基本问题,以及长使用寿命和降低成本的需求,是新技术发展的理由。

1.1 发动机振动源

在飞机发动机安装时,旋转机械不平衡产生振动力,施加到结构上,因而产生结构振动,如图1所示。发动机旋转不平衡的后果通过引起客舱噪音的机身结构振动表现出来,如图所示。

在发动机和结构连接处,有几个振动可以进入客舱的路径。主要路径在支承结构点(图2中的C1),是处理振动的焦点区域或必经之路。本文

只集中在这个路径和振动输入源。

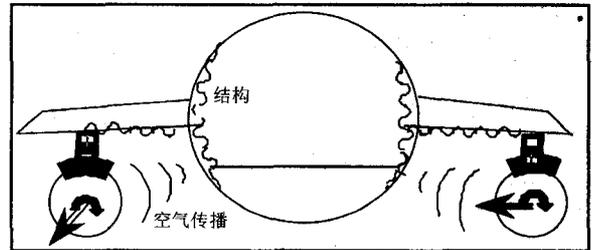


图1 机翼安装的发动机旋转不平衡产生的噪音

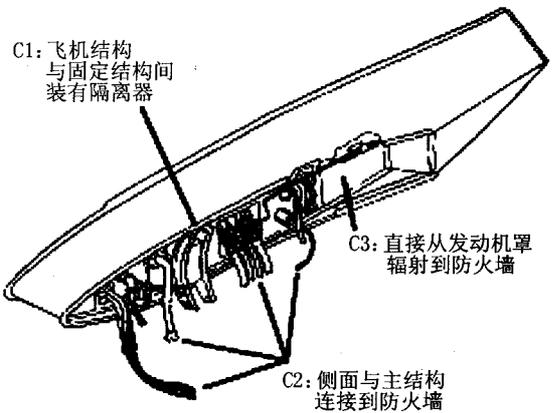


图2 机身安装发动机的振动的主要路径和侧面路径

1.2 噪音

频率与发动机振动有关的噪音,通常水平比外部气流、空调或附件产生的噪音水平高许多。这些噪音源通常产生宽带噪音,因此发动机旋转不平衡产生特有基本频率和谐波的音调。下面图3显示座舱内的噪音谱测量数据的典型噪音频谱。清楚地显示发动机振动音调渗入。这种高噪音,由发动机振动通过结构产生,显示连接系统非常需要提供隔离装置。

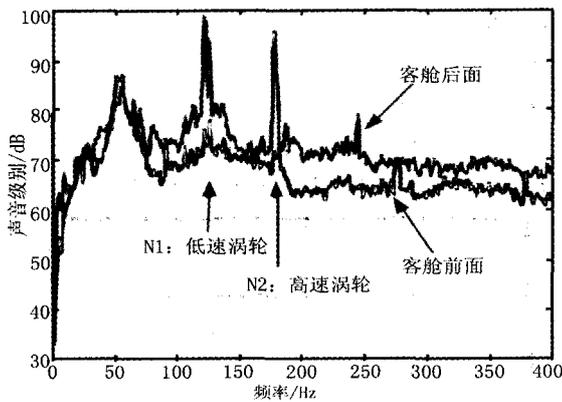


图3 机身安装发动机的飞机典型的客舱内部噪音频谱(测量数据)

飞机客舱中产生的噪音能量分布在可听频率范围内(20~20 000Hz)不均匀。累加可听频率范围内的能量,得到声音强度(SPL)。如果每个频率具有相对同样的重要性,结果是总的声音强度(SPL)分贝(dB)(线性)值(如图3所示)。如果根据频率的重要性给频率值指定权重,结果是总的声音强度 dBX 值(这里 X 表示使用的加权曲线)。A-权重(dBA)适用于可闻度测试的低噪音水平,C-权重(dBC)适合于嘈杂的环境,例如大多数的飞机座舱里面那样。

1.3 传播性和效果

传播性是讨论振动系统时使用的常用术语,但是使用在刚性物体和基础上则更为正确,而这些在飞机上是没的。

效果是连接系统特性与硬装配“隔离器”相对比的结果,是一个描述振动隔离(或噪音减少)的更加合适的术语。

图4是效果的典型曲线。该图绘制出装配硬度(K_m)和结构硬度(K_s)的比率与噪音或振动衰减的数值。由此可见,随着固定架硬度相对于结构降低,能感觉到巨大的隔离特性。如图显示,被动系统通常能降低至多 10dB,主动系统的效果足以降低 25dB。

通过减少结构上的传播力,显示出了连接系统特性的另一个现象。图5是力与频率图(单独后置),发动机硬安装到支柱上(无隔离器)。注意围绕工作频率范围(60~70Hz)垂直和侧向力的大小。

图6显示的力与频率图(单独后置)与图5结构相同,只有发动机用弹性隔离器安装在支柱上。注意峰值力随着工作频率的分离大幅度削减。

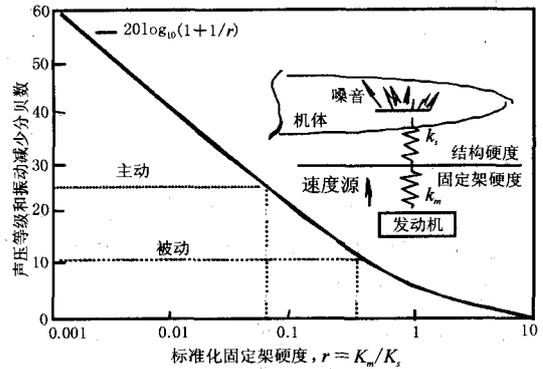


图4 效果曲线

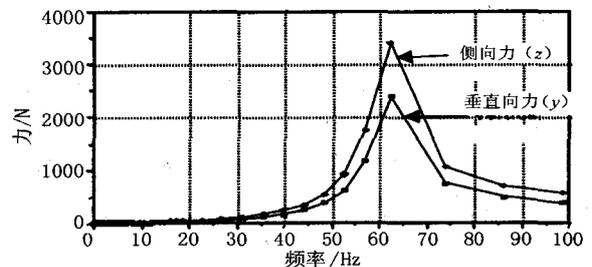


图5 硬安装的典型的商用飞机机翼安装发动机后固定架位置力与频率测量数据

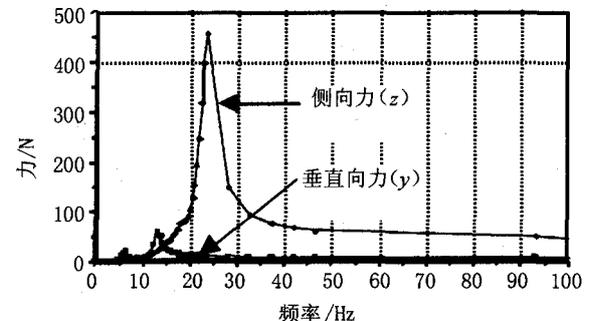


图6 用隔离器安装的典型的商用飞机机翼安装发动机后固定架位置力与频率测量数据

图5和图6清楚地显示通过在连接系统中使用隔离器,急速地降低了力和频率,表现出刚性结构和软隔离器之间的效果关系。

1.4 可用技术

噪音和振动处理可以分为两种类型,被动的和主动的。被动处理包括弹性材料(橡胶或金属丝网),液压弹性™固定架,调谐振动吸收器(TVA),以及许多不同的舱壁和内部处理。主动系统,需要电子控制器,由三种主要类型组成:主动隔离控制(AIC)、主动噪音控制(ANC)、主动结构控制(ASC)。另外,这些各式各样的技术可以结合在一起形成几个办法,产生一个非常有效的混合系统。

振动和噪音处理系统还可以根据如何应用它们分为三类。可用的技术包括下面定义的这三类:

(1) 振动隔离系统直接安装在主要荷载/振动传递路径上。

(2) 结构控制系统处理结构(连接到结构),沿主要路径破坏振动,但是不是直接在主要结构/荷载/振动传递路径中。

(3) 噪音控制是特殊的主动系统,它不处理振动,而是主动地抵消客舱空间中乘客附近的噪音。

1.5 振动隔离

1.5.1 硬安装结构

用于连接发动机到飞机机架的结构具有一定的弹性。“硬安装”系统不是无限刚性的,当它穿过结构时能够稍微降低振动。连接结构硬度特性,不管用硬安装或是使用隔离器,都是系统隔离振动能力的关键。

直接硬安装连接结构(如图7)给飞机制造公司一个重要的好处,它们以一种非常确定和明白的方式承受静态载荷,可以延长飞机的寿命。但是,设计硬安装结构时,难以加入必要的弹性(和衰减),而这些又是适当的振动隔离需要的。硬安装可以设计成“软的”,但是最终调整时如果需要改变弹簧刚性系数的话则非常难。因为是完全金属制品,硬连接结构没有衰减,用力学模型做一个简单弹簧能最好地说明这一点。

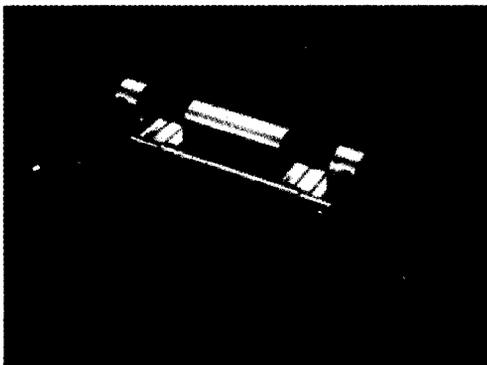


图7 硬连接结构的样品

1.5.2 弹性材料

硬度和衰减(在图8中分别描述为K和C)是弹性材料的基本特性,在固定架中起各自的作用。橡胶这样的弹性材料的硬度以模量衡量。

虽然我们可以测量压缩模量、拉伸模量、剪切模量,但是静态模量 G 最常用于隔离器设计。动

态条件下模量(像弹性系数)是一个复数,剪切情况下是 G^* ,可以分解为两个分量:弹性模量(G')和损耗模量(G'')。测量的模量对温度、应变和频率敏感。固有阻尼根据 G''/G' 的比率测量,这个比率也叫做 $\tan \delta$ 或损耗系数。长延续振动隔离系统要求富有弹性或低 $\tan \delta$ 的弹性材料。

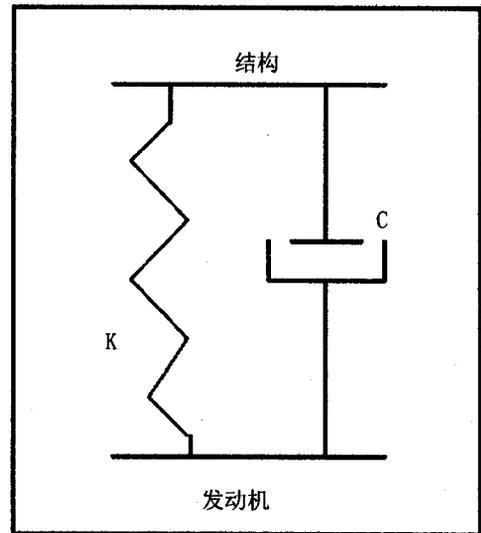


图8 被动的弹性材料固定架的力学模拟

用于发动机固定装置的任何弹性材料的主要的寿命限制因素(在“非有害”环境中)是漂移、蠕变或凝固。这些是弹性材料本身在长久静态载荷下固有的永久变形。“漂移”或“蠕变”通常由固定架的剪切载荷所引起,“凝固”一般由压缩载荷所引起。良好的弹性材料具有最大缓冲裕量时允许隔离器漂移或凝固量等于两倍静态(无偏转)的隔离器偏转(从无偏转状态起 $2g$ 裕量)。

弹性材料固定架能够产生静挠度和振动隔离之间的交换,在一定意义上以更大的静挠度为代价提高振动隔离效果。

弹性材料固定架的最大好处是:

(1) 为良好的振动隔离提供弹性和衰减,比金属弹簧更加有效。

(2) 具有经过验证的应用历史,与其它技术相比是最低成本解决方案。

(3) 在多方向承受载荷(橡胶几何形状设计得可以承受压缩载荷和剪切载荷)。

(4) 能够轻易地改变弹性系数。

(5) 为高频噪音衰减提供声阻抗失配。

(6) 与金属弹簧(刚性结构)相比具有低动态与静态弹性系数比率。

在一些较罕见的情况中,橡胶到金属(RTM)

(如图9)或弹性材料的固定架(如图10)不能使用。这些情况包括极高和极低温度环境。为了最大工作寿命、最小尺寸和最佳综合性能特性,弹性材料的发动机架大多数应用有机弹性材料。这些弹性材料通常计划使用在从 -65°F 到 250°F 的温度环境中(非常短时间内高达 310°F)。有些合成弹性体也用于从 -65°F 到 375°F 的温度环境中,以及橡胶易受飞机发动机液体腐蚀的情况下。弹性材料隔离器设计最大寿命等于几倍的发动机大修间隔时间。这个方法在有些应用中维持高达20 000h的飞行时间。

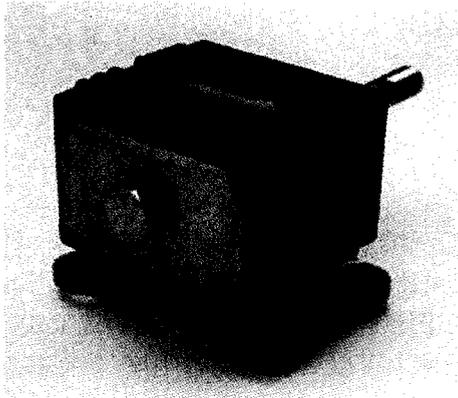


图9 RTM固定架的样品

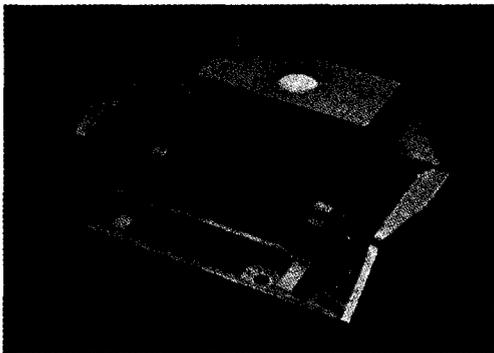


图10 RTM固定装置的样品

金属丝网支架系统(如图11),非常像橡胶到金属(RTM)支架系统,是使用卷曲、成形和压缩不锈钢丝进行振动隔离的一种被动方法。使用金属丝网固定架的好处是它们形成良好隔离的弹簧和阻尼器,可以应付非常宽的温度范围,并且不受任何种类发动机液体的影响。金属丝网固定架的缺点是它们产生比较高的动态与静态弹性系数比率,易发生比较高的永久变形(漂移)挠曲,并且通常是单方向的。金属丝网隔离器一般维持好几个发动机大修间隔时间,已经成功地在应用中超过8 000个飞行小时的使用寿命。这些零件可以设

计成最大寿命远远超过15 000个飞行小时。

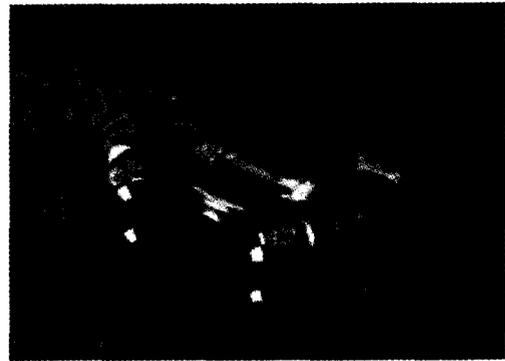


图11 金属丝网固定架并且固定装置的样品

1.5.3 液压弹性™隔离器

由于同样的静态运动限制,液压隔离器可以设计成提供动态刚度值大约为特有频率下传统弹性材料隔离器硬度的25%。这通过使用惯性流体质量获得,它的作用像调谐质量减震器。

流体质量对发动机动态运动作出响应,引起内部固定架小压差,抑制受发动机载荷的固定架较为轻易地移动。结构中降低的力降低了客舱中发动机产生的噪音。

液压弹性™隔离器力学模拟图示于图12中。

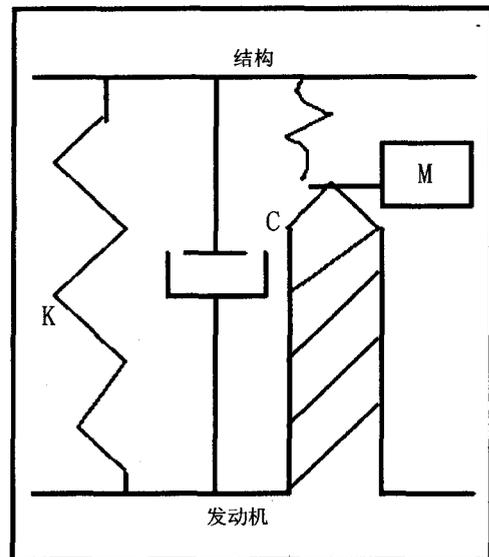


图12 液压弹性隔离器力学模拟

液压弹性固定架的主要优点和RTM固定架一样。另外,它们在传播性曲线中由一个凹口,可以获得更高的静态弹性系数。通常,液压弹性固定架的静态刚度可以是动态刚度的三倍。液压弹性™固定架的缺点和RTM一样,加上它们在频率比调谐频率高的“凹口频率”地方“硬化”(动态地)(参见图23)。高频率时的硬化效应通常不显著,因为在这

个级别的频率不是主要的或干扰,也不产生干扰。

液压弹性™隔离器具有与传统橡胶到金属固定架一样的寿命限制,已经成功地在实际中应用,使用寿命将近8 000h。这些零件已经设计,预计延长到10 000个飞行小时(如图13、14)。

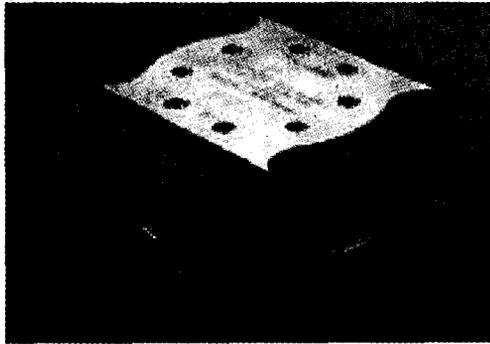


图13 商务喷射液压弹性™固定架样品

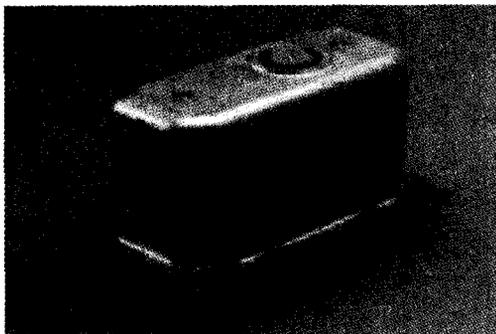


图14 局部喷射液压弹性™固定架样品

1.5.4 主动隔离控制(AIC)

主动隔离控制系统(在图15中绘出了力学模拟图)向固定架中引入了机电作动筒(在下面图中以“F”标出)。

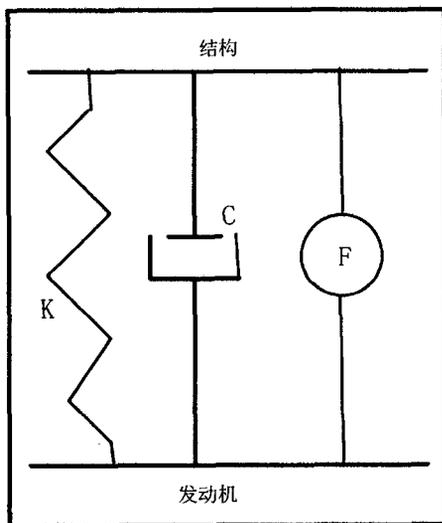


图15 主动隔离控制的力学模拟
AIC系统控制这些作动筒(如图16)使从加速

仪或麦克风来的振动和噪音信号减到最少。这些作动筒产生力直接抵抗不平衡力,从而降低振动。因此,发动机振动(和并发噪音)几乎全被抵消掉。



图16 主动隔离控制作动筒的样品

这些系统在最小化限制运动和提供振动隔离之间的平衡非常有效。主动隔离固定架实际上在振动频率上可以具有零动态刚度,然而静态刚度可以非常高。

主动隔离控制是完全反馈系统,既可以与隔离器使用也可以与硬固定架使用。在使用实际座舱内的噪音数据时,作动筒力可以补偿侧面路径,如引气管路、连杆、燃油管道和液压管路。另外,因为主动隔离控制不断地受到监控和调整,系统适应发动机转速、功率调整和飞行标高的变化,当与被动RTM系统一起工作时,破坏方式是良性的。如果完全失去功率,系统表现类似于被动固定架。如果出现完全软件故障,将出现同样的结果。

相对于被动系统,这些系统的缺点是它们费用高和重量大。主动隔离控制的主要优点是它可以在飞行试验以后增加到飞机上(如果被动固定架已经设计完可以随后改造它),并且是具有很灵活的可调性。被动零件比纯粹用于被动设备时稍微重(大)一点。当与橡胶固定架一起工作时,主动隔离控制的寿命极限特性与RTM固定架相同。如果不用橡胶元件,隔离系统可以设计成与飞机寿命相同。

1.5.5 主动液压隔离器(AFI)

主动液压隔离,如图17所示,是被动液压固定架和集成机电做动控制器的组合。用增加作动

筒,可以控制弹性体液压油腔内的压力,从而控制固定架的动态刚度。

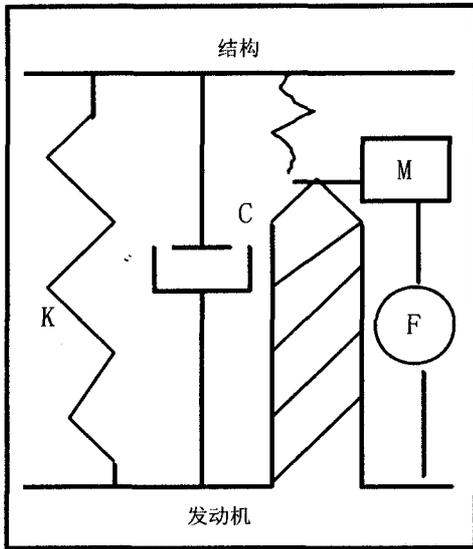


图17 主动液压弹性固定架的力学模拟

主动液压固定架的好处和被动液压固定架一样。不过,主动液压弹性固定架提高了隔离的水平(通过“加深凹口”或降低动态刚度),并加宽它处理的频率范围(参见图23)。在发动机振动频率,通过使用作动筒和控制器,动态刚度可以控制到接近零。相对于被动系统,这些系统的缺点是它们的费用高并且重量大。此外,AFI系统的寿命极限由弹性材料决定,可以设计成工作寿命达到发动机大修间隔的数倍长。

1.6 结构控制

1.6.1 调谐振动吸收器(TVA)

调谐振动吸收器(TVA)(如图18)是被动振动吸收器,安装在振动结构上。这是一种简单的弹簧系统上的质量块,典型地使用弹性材料作为弹簧。各种几何形状和材料特性可以提供许多能力处理直至大约800Hz的振动问题。

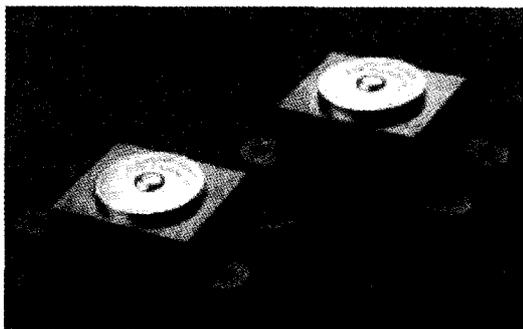


图18 弹性调谐振动吸收器(TVA)的样品
调谐振动吸收器(TVA)将调到离散频率。这

个干扰频率将引起TVA进入共振。共振的TVA将产生力回到结构中,抵消不需要的振动或力。当正确地安装到发动机连接结构中时,调谐振动吸收器(TVA)有效地增加结构在那个调谐频率的阻抗。被动调谐振动吸收器能够减少4~6dBA飞机客舱噪音。

1.6.2 主动结构控制(ASC)

主动结构控制,如图19所示,使用机电做动筒,安装在结构上(如图20),尽可能靠近振动源,在振动到达机身之前抵消它。

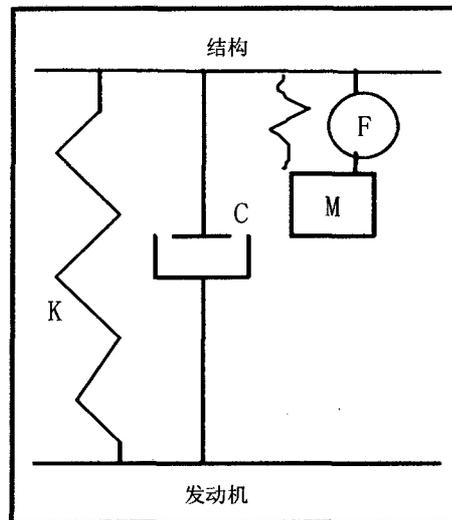


图19 主动结构控制的力学模拟

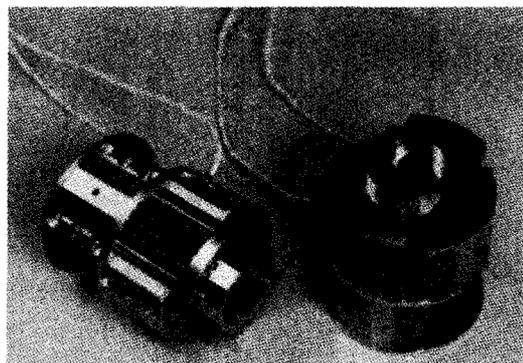


图20 主动结构控制作动筒的样品

这个系统在中央计算机中同时处理座舱内的噪音数据和发动机信号,驱动作动筒以在整个飞行周期中保证最大降低噪音。自适应性控制算法,使系统几乎瞬间对发动机油门变化作出反应。

主动结构控制的技术原理和主动噪音控制(ANC)或主动隔离控制(AIC)一样(如图21)。差别是,主动结构控制中的作动筒不是直接连在振动路径中,而是安装在向系统输入力的主要结构/振动路径中,用其原有特性抵消不需要的振动。主

动系统的所有部件设计成可替代的,能够工作到大多数飞机寿命那么久。

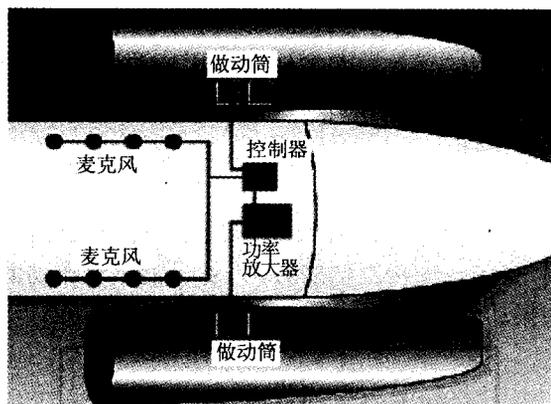


图21 主动结构控制(ASC)或主动隔离控制(AIC)的系统图

1.7 主动噪声控制(ANC)

主动噪声控制系统(如图22)利用客舱内的扩音器产生次生噪声场,这种噪声场抵消发动机或螺旋桨产生的主噪声场。主动噪声控制系统要产生全局的噪声减少,必须满足两个条件之一。第一,声波响应必须轻轻地衰减,并且在必须降低噪声

的频率范围中占低模态密度,如果这个存在,可以使用几个作动筒降低客舱所有点的噪音。第二,扬声器应该放在离散音源四分之一波长之内。

遗憾的是,通常这两个准则中没有一个在飞机中出现。根据客舱尺寸不同,从稀疏的模态反应到稠密模态反应转换典型地出现在频率小于50Hz处。因为大多数的飞机噪声源如涡轮风扇发动机或螺旋桨产生噪音的频率在50Hz以上,使用第一个准则不可能减少全局噪音。更进一步,因为噪音源连续分布而不是离散的,第二准则可能很少使用。

如果不能取得全局的噪音控制,那么可以使用局部控制。局部控制就是围绕控制麦克风制造安静区域。安静区域的大小与要控制的频率有关。一般说来,安静球面的半径大致是声波的1/10波长。在200Hz,安静球面的半径是6in。通过包括使用多重麦克风在内的许多技术有可能扩大安静区域。但是,如果频率是2000Hz,安静区域将太小而不实用。

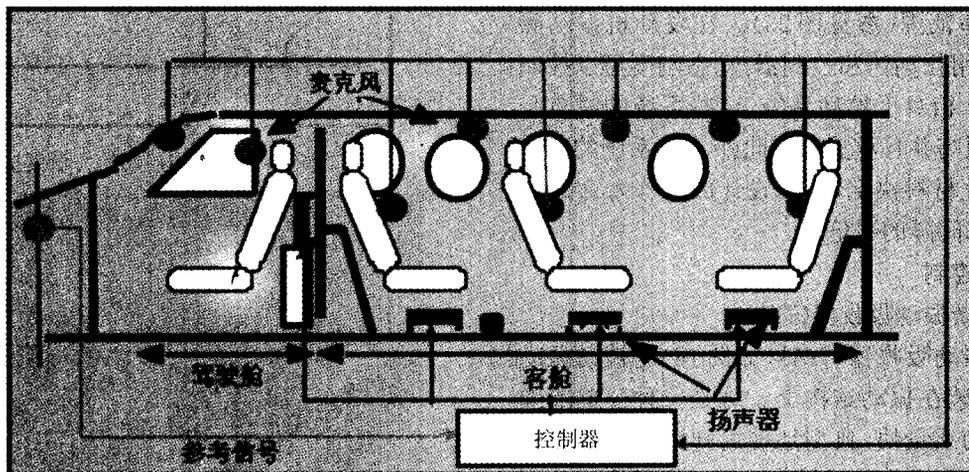


图22 主动噪声控制(ANC)系统图

虽然主动噪声控制有它的局限性,但它可以非常有效地控制典型的涡轮螺旋桨飞机的低频噪音。Beech King Air的主动噪声控制系统对螺旋桨引起的噪音形成了高达12dB空间平均降低,显著地改善了乘客和机组人员的主观舒适性。

1.8 技术对比

下面的图23是可用技术的典型图以及它们的相对技术特性,基于动态刚度的关系。被动RTM随着频率提高轻微地硬化,而用其它每一项技术都有显著的软化效应。

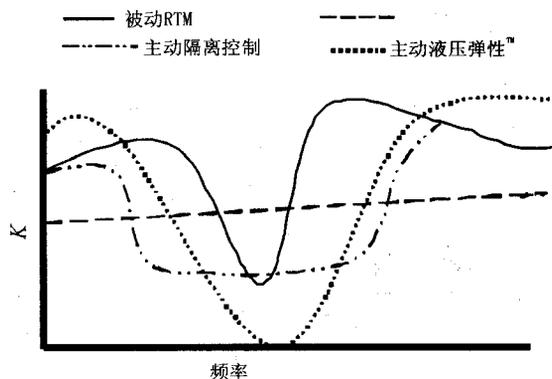


图23 可用技术特性(动态刚度与频率)对比

2 隔离系统应用前途

2.1 螺旋桨驱动飞机

2.1.1 活塞式发动机

螺旋桨驱动的飞机由于螺旋桨不对称而产生高能级的振动。活塞式发动机飞机也有点火脉冲产生的独特的振动环境,这与点火活塞数量有关系。典型的活塞式发动机速度是大约40Hz,一半在20Hz,系统固有的频率大约为10~14Hz。

一般地,活塞发动机飞机费用较低,因此不会加入高性能(以及高费用)隔离/固定架系统,如液压弹性™或NVX™。因此,使用橡胶到金属(RTM)固定架的活塞式发动机飞机的设计目标是隔离一阶振动。二分之一阶振动通常不隔离,因为被动RTM固定架中必须的静挠度量级将过高,无法获取必须的动态刚度去对二分之一阶干扰发生作用。

2.1.2 涡轮螺旋桨发动机

到目前为止,涡轮螺旋桨飞机噪音的最大来源是极其巨大的声压,发源于螺旋桨叶片并击打机身。发动机连接方案不能控制这种在叶片出现的噪音的频率和谐波。但是,调谐振动吸收器和主动结构控制(ASC)安装在舱壁,主动噪音控制(ANC)可以降低这种噪音。一个不怎么重要,但是还是很明显的振动源是物体和气动不平衡,它以每转一次的频率出现。发动机装配工艺可以有效地降低这种振动源。

相对较轻的和低速的发动机/螺旋桨装置引起较大挠度,需要结合到隔离器设计中。典型的涡轮螺旋桨应用螺旋桨转速从10~30Hz,系统固有频率大约6~30Hz,这使传统RTM技术的装配设计困难重重。

2.2 涡轮风扇

大多数的涡轮风扇发动机有两个旋转转子(N1和N2)。它们共同产生与转子旋转频率相关的合成振动频率,N1和N2。

商务喷气飞机一般风扇转速为175Hz,高压空气压缩机速度是433Hz。以这些速度,轴或轴承中的偏心率或公差以及质量不平衡将引起发动机不平衡力和发动机罩振动。大飞机风扇转速较慢(即:波音737约85Hz,757约60Hz,767约50Hz)。通过发动机制造厂的控制,这种不平衡可以减到最小,

但是不会消除。发动机装配之后,发动机低速轴(N1)的平衡可以校正,使轴不平衡引起的振动减到最小,但是,这对于高速轴(N2)是不可能的。

2.2.1 机身装配的涡轮风扇发动机

在小飞机上一般把涡轮风扇发动机安装到飞机后机身,包括一些商务机和支线机/商用飞机也这样做。由于发动机接近客舱,从舱内噪音的观点看,这个位置特别富有挑战性。需要使用艾弗里(Avery)高效隔离系统减少发动机传送振动力到飞机结构里面。

因为发动机连接系统的前面结构非常接近飞机后面的压力舱壁,由发动机不平衡产生的任何振动力都很轻易地转换为客舱中的噪音。在后置发动机连接点的情况下,增加与客舱的距离通常使振动力到舱内噪音的转换效率变小。还要考虑的是在每个安装平面需要的反作用载荷方向。因为前安装平面一般反作用发动机转矩、轴向、横向和垂直方向载荷,所以前面连接点结构所受到的载荷往往较大。通常,较高性能的液压弹性™固定架在前连接点使用较好,而RTM固定架在后连接点使用较好。

2.2.2 机翼安装涡轮风扇发动机

关于机翼安装发动机,后安装点成为更加突出的噪音源,因为它距离传播噪音到客舱的主结构部件最近。后安装一般安装在非常硬的结构上,非常接近于翼梁。机翼上的刚性主要结构是振动和噪音到客舱内的非常高效的传输路径。但是,前安装结构远离主要传输路径,通常在传送振动和噪音到飞机中的作用较小。使用悬臂式吊架,结构刚度软化,很明显后隔离器设计的需要非常高效。

2.3 隔离系统的设计方法

在研制新飞机过程中,所有主要考虑事项包括重量、费用和可接受的振动/噪音水平。发动机连接系统的设计必须包括这些项,但是目前没有办法准确地预测飞机内的噪音水平,以决定选用什么技术。因为没有这些关键设计的数据可用,所以非常常见的是,飞机OEM商也许想推迟决定,在飞行试验以后选用隔离器(为了确认实际需要的隔离系统)。如果飞机OEM商知道他们想要使用的隔离/连接系统,分析数据通常是不充分的,或者需要的客舱噪音等级是不清楚的。无论如

何,选用隔离系统的决定是困难的。因此,隔离系统/发动机连接装置提供者在设计过程和所提供的解决方案方面必须非常灵活。

设计发动机隔离/连接系统的推荐方法要求不断地与结构/隔离器提供者飞机OEM厂商、发动机制造商和短舱提供者交换意见和数据。这些不同公司的工程扩展和集成对设计最佳隔离系统必不可少。

通过这种推荐的方法,能够确定客舱中安装点力和噪音之间的数据关系。为了使这种关系生效,必须分享发动机产生的力的数据、机体结构特性(硬度)的数据以及最优短舱形式的数据。

2.3.1 确定并了解需求

开始设计隔离系统的基本信息是各种飞行状态、环境条件可用空间和允许的静态运动下的发动机系统重量和惯性数据、技术特性(推力、涡轮/螺旋桨转速、活塞数、风扇转速)。还需要发动机连接方案的基本知识和确定的详细的连接位置。但是,任何新项目初期设计/定义阶段的关键事情是确定目标。为了最佳服务于或者满足这些目标(考虑许多潜在的未知元素),建立灵活的设计思想是很有帮助的。

2.3.2 接受OEM厂商需求,选择合适的技术

大多数新飞机可以使用卡箍/连接结构,这适用于所有可用技术。以这种方法,客户(飞机OEM厂商)在问题得到充分地确定或确认以后可以选择合适的振动和噪音问题解决方案。例如,可以设计、制造和试飞飞机。然后,在飞行试验得出结论基础上,决定什么样的振动和噪音处理方法是最佳的,不需要漫长的或昂贵的重新设计工作。

最好的方法是在一种连接结构(对于特定飞机)中加入数种可用技术。例如,可以把静态非常硬的液压弹性™隔离器用作基座。然后在试飞以后,可以根据需要修改这种隔离系统。可能的修改包括:

- (1) 除去液压系统(只安装弹性体)。
- (2) 除去液压系统并增加主动隔离控制作动筒(改为主动隔离控制系统)。
- (3) 恢复到硬固定架。
- (4) 恢复到硬固定架并在连接结构上加入主动结构控制。

(5) 收入混合解决方案(多种技术的组合),如增加调谐振动吸收器。

所有这些选项可以不改变任何卡箍或连接结构设计而直接加入。发动机连接结构对系统效率是关键(图4)。这包括任何连接杆、前卡箍和硬设备。为了系统的隔振效率最佳,隔离器和连接结构应该同时设计。

通常,初步设计方案要与机体、发动机制造公司和短舱提供者一起研究。如果后来需要改变特性,那么最好设计可以加入所有可用技术的卡箍或连接结构。

可接受的发动机连接系统设计包括以下几项:

- (1) 减少客舱噪音和振动作为目标。
- (2) 系统中的所有组件寿命长(一般等于发动机大修间隔或它的多倍)。
- (3) 发动机制造公司可接受。
- (4) 合理的大小(空间限制)和重量。
- (5) 按照给定环境正确地选择材料。
- (6) 金属零件寿命与机体相同或者无限寿命(包括极限/最大荷载和损伤容限)。
- (7) 费用可接受。

3 结 论

振动和噪音等级可以以各种各样的办法控制,从被动弹性体固定架到主动振动控制系统,每一种的复杂性、特性和费用都不尽相同。发动机连接和隔离系统的主要好处(除把发动机连接到结构上这一明显的主要目的之外)是通过减少结构中的动态力降低飞机客舱中的振动和噪音。

就像任何设备设计一样,折中和沟通是主要活动。最优解决方案是最符合整个系统静态/结构需求、动态需求和安装/可维护性需求而无需在任何一方面做太多折中的那一个。最好的系统设计方法是具备技术选择的灵活性,又不会损害飞机项目的认证或研制计划表。常见的可以加入任何振动隔离措施的卡箍或连接结构设计是最优的。

张兴国 译自《Aircraft Engine Attachment and Vibration Control》Jesse DePriest, Lord Corporation