

航空发动机的安装和振动控制

林国政

(上海飞机设计研究院结构设计研究部, 上海 200232)

摘要:固定翼飞机的振动和舱内噪声水平的控制是一项挑战性的工作,是一个不可舍弃的系统性能参数。介绍振动的基础和固定翼飞机发动机的安装及能够有效地控制发动机振动和噪声的技术。

关键词:航空;发动机安装;振动;噪声

1 问题的介绍和描述

本文介绍了现代飞机发动机振动和噪声背景,并对处理发动机振动问题的有效方法进行了说明。

与发动机连接全部的结构都要满足两个功能:限制位移以及隔振和降噪。限制位移指由发动机推力、过载、重力和扭矩引起的两部分结构间的位移。隔振和降噪指减少从一个结构传递到另一个结构上的振动,从而减少传到舱内的噪声。

为了满足第一个功能,接头必须有足够的刚度以减少相关的位移。为了减少振动或者噪声,接头必须是动态柔软的。发动机的安装设计要求很好的协调这两者之间的矛盾。同时,对于长寿命和经济性的要求,更进一步的推动了这种技术的发展。

2 发动机振动源

由于发动机的安装形式及不平衡的旋转引起的振动作用于结构上,从而产生了结构振动,如图1所示。由于发动机本身不平衡的转动引起机身结构的振动,从而诱发了舱内噪声。

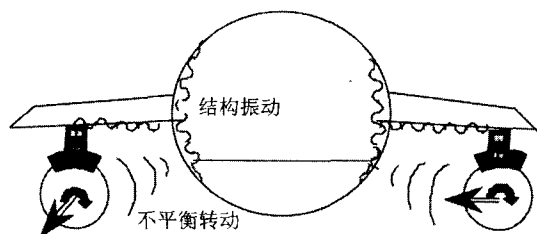


图1 固定翼飞机发动机不平衡转动引起的噪声

在发动机和飞机的连接处,振动有几种传递途径传递到机身舱内。主要传递路径在发动机与吊挂的接头处(如图2所示的点C1)和发动机与吊挂相互接触部位。本文主要关注该传递路径和振动源的输入。

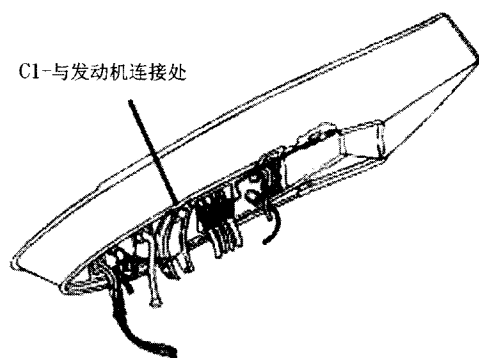


图2 机身连接发动机的振动主要传递路径和其他路径

3 噪声

由发动机振动引起的频率段附近产生的噪声远远高于其他噪声源产生的噪声,例如外部气流、空气条件、附件等。这些噪声源产生了宽频的噪声,而发动机的不平衡引起的噪声有特定的基频和倍频。图3显示了机身舱内典型的噪声谱。波峰处的噪声是由发动机的振动通过结构传递到机身引起的,说明最有必要安装隔振器。

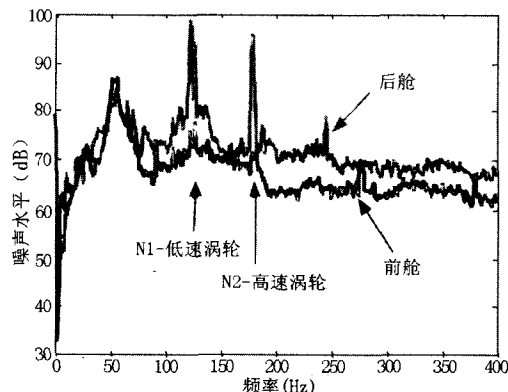


图3 机身连接发动机的飞机的舱内典型的噪声谱

在可听频率范围内(20Hz~20kHz),舱内噪声的能量分布是不均匀的。声压级是通过对整个可听频率范围内能量的积分得到的。如果每个频率的能量贡献是一样的,得到的总体 SPL 用 dB 表示(如图3所示)。如果每个频率对能量贡献的权重是不一样的,得到的总体 SPL 用 dBX 表示(X 指权重曲线)。dBA 用于低噪声的可听测试。dBC 适用于环境噪声,例如飞机舱内噪声。

4 传递率和性能比

当我们在讨论振动系统时,传递率是一个通用的术语,但用在描述刚性的大质量体和基体相连时更为有效,而飞机上不存在这种边界约束。

性能比指软安装与硬安装性能的一个比值(用减噪的幅值表示,dB)。在描述隔振问题时,性能比比传递率更适用于飞机设计。

图4是一条性能比曲线。降噪幅值随 K_m/K_s 的变化曲线(K_m 接头刚度, K_s 结构刚度)。表明接头刚度相对于结构刚度越小,隔振性能越好。如图4所示,被动隔振一般可以降噪 10dB,主动隔振可以达到 20dB。

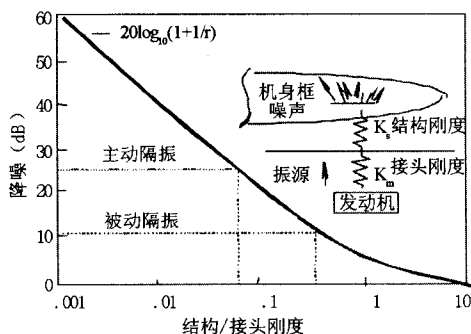


图4 性能比曲线

发动机安装性能的另一个指标:减少力的传递。图5为力-频率曲线图(发动机硬安装)。在频率(60Hz~70Hz)范围内,在垂向和侧向,力的大小出现极大值。

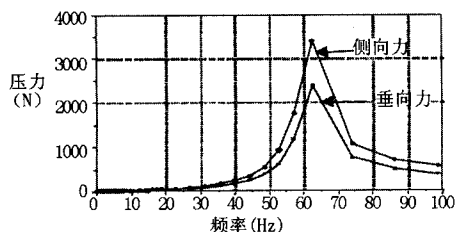


图5 典型翼吊商用飞机发动机硬安装在后安装节处力-频率曲线图

图6为采用软安装后的力-频率曲线图。表明,通过对工作频率的隔离,整体上力的大小明显降低。

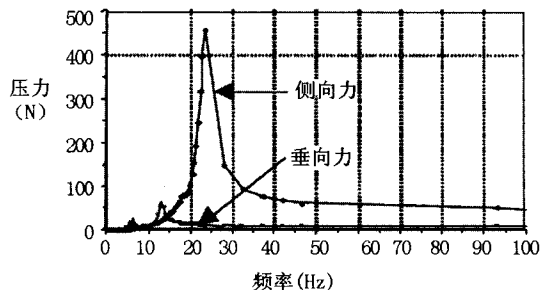


图6 典型翼吊商用飞机发动机软安装在后安装节处力-频率曲线图

图5、图6显著表明,在发动机安装时安有隔振器,力的隔离明显减小,暗示了性能比与结构刚度和隔振器之间的关系。

5 有效技术

噪声和振动的隔离器可以分为两类:被动式和主动式。被动隔振包括弹性材料(橡胶或者金属丝团)、粘性阻尼隔振器、调谐减振器(TVA)等。主动系统中,需要机电系统的控制,主要分成3类:主动隔离控制系统(ABC)、主动噪声控制系统(ANC)以及主动结构控制系统(ASC)。另外,这些不同的技术可以分别组合成非常有效的混合系统。

振动和噪声的隔离器也可以按以下应用分成3类:

(1)振动隔离法,指直接安装在主传力(振动)路径上,并传递载荷、振动。

(2)结构隔离法,指安装在主传力路径的结构上,吸收主传力路径的振动,但本身并不传递载荷、振动。

(3)主动噪声控制法,这种方法并不是通过控制振动来减少噪声,而是通过声波叠加来消除噪声。

5.1 振动隔离

5.1.1 硬连接结构

硬连接接头并没有无限大的刚度,因此在将振动传递给结构时,在减少振动方面也有一定的积极影响。图7为硬连接实例。

硬连接的优点是在静载的传递分析上简单明了。但设计适用于振动隔离而需的阻尼,是非常困难的,因为作为完全的金属体,几乎没有阻尼。

5.1.2 弹性材料

刚度和阻尼是弹性材料接头最重要的两个属性

(在图 8 中用 C 和 K 表示)

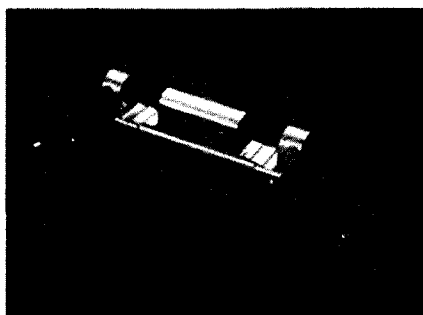


图 7 硬连接实例
结构

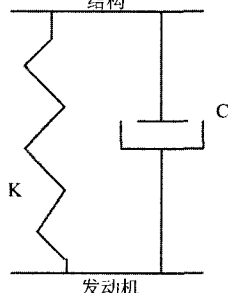


图 8 被动式弹性材料接头示意图

弹性材料接头的好处是:

- (1)能提供良好的弹性和阻尼性能,比金属弹簧好的多;
- (2)相比其他技术,弹性材料成本较低;
- (3)可以传递多方向的力;
- (4)振动传递率容易计算;
- (5)在高频噪声衰减方面比较有效。

弹性材料和金属材料可以混合使用,称为 RTM 接头,如图 9 所示。

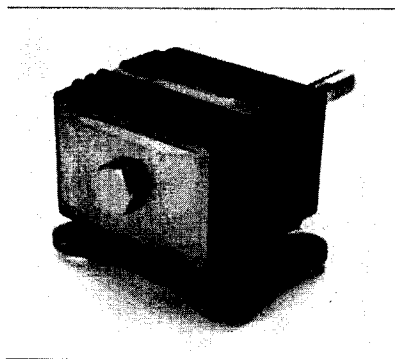


图 9 RTM 接头实例

现在由人工橡胶材料制成的 RTM 接头可以具有更长的使用寿命,更小的尺寸和更优良的综合性能。温度使用范围在 -65°F 至 250°F 之间,短时间内可以达到 310°F ,使用寿命可以接近 20 000 飞行小时。但是,在极高或极低的温度下,橡胶材料不能

使用。

由线团制成的接头(如图 10 所示)与 RTM 比较相似,也是被动式振动隔离器。它由卷曲的压平钢丝制成。优点是能提供比较好的隔振,能适应较宽范围的温度,不受发动机液体的影响,使用寿命可以达到 8 000 飞行小时。缺点是易受到变形影响,产生偏离。



图 10 线团式隔振器实例

5.1.3 粘性阻尼隔振器

粘性阻尼隔振器依据发动机动态特性设计,当发动机载荷通过隔振器内部接头传递时,引起粘性阻尼隔振器内部压力的变化,从而使接头更容易产生移动。这样就减少了传递到发动机安装结构上的力,达到减少舱内噪声的目的。

粘性阻尼隔振器使用寿命与 RTM 类似,已有在飞机上使用近 8 000h 的记录。

5.1.4 主动隔振控制系统(AIC)

主动隔振控制系统(如图 11 所示)中在连接接头中增加了机电作动器(图 11 中“F”代表)。

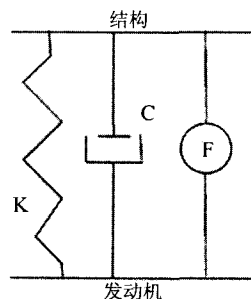


图 11 AIC 示意图

AIC 从加速传感器和麦克风中获取信息,然后控制作动器产生与不平衡力相反的力,从而减少振动和噪声。

AIC 是全反馈系统,可以与隔振器或硬连接接头连接。当它与 RTM 连接时,如果 AIC 失效,整个系统也可以认为是一个被动式的隔振器。

AIC 的缺点是费用代价及重量代价比被动式的大,主要优点是可以在飞行测试后加装,具有比较高的调整性。

5.1.5 主动粘性隔振器

主动粘性隔振器是被动粘性阻尼隔振器与机电作动器的结合体,在粘性阻尼隔振器的粘性液体舱室内布置作动器,从而控制接头的动态刚度。

5.2 结构隔离

5.2.1 调谐减振器(TVAs)

调谐减振器是被动式的减震器,如图 12 所示。安装在振动结构上。可以认为是一个典型的弹性系统。利用不同的形状和材料可以适用于高达 600Hz 的振动。

调谐减振器使用于某些离散频率。干扰频率能够引起调谐减振器共振。共振的调谐减振器产生与结构相反的力达到减少振动的目的。当调谐减振器正确布置在发动机安装结构上,可以有效的减少调谐频率下的振动。被动式的调谐减振器可以减少 4dBA-6dBA 的舱内噪声。



图 12 TVA 实例

5.2.2 主动结构隔离(ASC)

主动结构隔离如图 13 所示,利用安装在结构上机电作动器(安装尽可能靠近振动源),在振动传递到机身前减少振动。

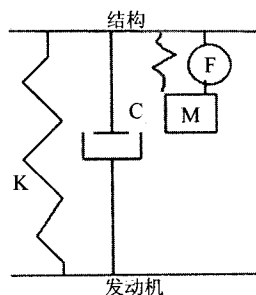


图 13 主动结构隔离示意图

主动结构隔离技术原理与主动隔振控制系统相同。不同之处在于主动结构隔离技术的作动器不传递振动源方向的载荷。

5.3 主动噪声控制法

主动噪声控制法利用舱内布置的扬声器制造出第二声场,第二声场与发动机或螺旋桨产生的主声场相互抵消。主动噪声控制法的应用需要满足两个

条件:第一,需要消除的噪声频率范围的声学响应必须保持轻微的阻尼和低的模态密度,当这个条件满足时,布置在舱内的扬声器才可以用来减少噪声。第二,扬声器应该布置在离散噪声源的四分之一波长处。

但在飞机上这两个条件都不能满足。根据舱内的尺寸,低于 50Hz 的频率能够达到低模态密度标准,而绝大部分飞机的噪声源是发动机或螺旋桨,它们的频率都在 50Hz 以上,第一条标准不能满足。不但如此,舱内噪声源是散布的而不是离散的,第二个条件也不能满足。

虽然全舱的噪声控制不能够实现,但可以在局部区域实现噪声控制。局部区域噪声控制是指利用可控麦克风在一定区域内达到消声目标。这个区域的尺寸与被抵消的频率相关。通常来说,这个区域是个球形,球形的半径大致是被抵消噪声波长的十分之一。对 200Hz 的噪声来说,球的半径是 6ft。通过增加可控麦克风的数量,可以增大消声区域的尺寸。但对高频噪声,比如 2 000Hz 来说,消声区域可以忽略不计了。

虽然主动噪声控制法有它自身的限制,但在低频噪声(如涡轮螺旋桨飞机)控制上还是比较有效的。主动噪声控制法曾在 Beech King 飞机上取得了减少 12dB 的效果。

6 结论

振动和噪声控制有很多种方法,从被动式的弹性接头到主动振动控制系统。每种方法都具有它自身的复杂性、性能和代价。

在设计过程中,发动机、机体结构和短舱供应商或者减震器供应商之间的交流和妥协是不可避免的。最优的设计是选择一种最合适的方式来满足振动和噪声要求。

参考文献:

- [1] Miller, L. R., M Ahmadian. Active Mounts - A Discussion of Future Technological Trends. Inter - noise. Toronto, Canada. 1992.
- [2] Miller, L. R., D. J. Rossetti, M. A. Norris. Passive, Active, and Hybrid Solutions for Aircraft Interior Noise Problems. Lord Library of Technical Articles. Erie, PA. 1995.
- [3] Rossetti, D. J., M. A. Norris, S. C. Southward, J. Q. Sun. A Comparison of Speakers and Structural-based Actuators for Aircraft Noise Control. Second Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration. Blacksburg, VA. 1993.