



大型客机舱内声学设计方案综述(二)

扈西枝 韩 峰 何立燕 陈 玲

(上海飞机设计研究院结构设计研究部,上海 200232)

Overview of the Cabin Acoustic Design for the Large Commercial Aircraft(II)

Hu Xizhi Han Feng He Liyan Chen Ling

(Structures Department of SADRI, Shanghai 200232, China)

摘要:数值模拟声学计算已广泛用于飞机舱内噪声的预计、声学结构的优化以及部件声学特性的评估,特别是在民机设计阶段。从数值模拟声学计算方面出发,介绍了有限元、边界元与统计能量分析这三大噪声工程分析方法,论述了试验测量与仿真计算结果的相互关系,结合民用飞机设计特点,对民用飞机的舱内声学设计方案加以阐述。

关键词:数值计算;噪声;声学设计

【Abstract】 Recently the numerical analysis method of acoustic performance have been applied popularly in the aircraft cabin noise prediction, the acoustic optimization of aircraft fuselage structure and the acoustic performance valuation of the component on aircraft, especially in the process of aircraft design. Therefore, based on the method of the acoustic numerical analysis, the paper introduced the main method of acoustic analysis including FEM, BEM and SEA, and compared the prediction results and the measurement, and provided the basic process of the aircraft cabin acoustic design. Combined with the typical character of the aircraft design, we overviewed and researched on the program of aircraft cabin acoustic design.

【Key words】 numerical analysis; noise; acoustic design

0 引言

本文将从数值模拟计算方面,对大型客机舱内声学设计的基本方法进行阐述。

目前,计算机声学仿真技术已经广泛应用于飞机舱内声学特性的定量分析与噪声级预估分析之中。利用声学仿真技术,在飞机的设计阶段就能预估出舱内噪声级,对舱内声场的状况做出评价,并时时跟踪和了解舱内声学设计的效果,评估飞机舱内的声压级是否满足飞机舱内噪声设计目标。如果预计结果与噪声设计目标不符,则及时优化舱内声学设计方案,直到预计结果与噪声设计目标相符。

在建立声学模型时,要与试验测量数据反复地对比与修正,建立起符合飞机噪声分析与评估的声学设计仿真平台。利用该声学设计仿真平台,可进行声学优化设计,使声学设计方案更合理,保证大型客机以最小的质量代价,满足舱内噪声设计目标需求。利用声学设计仿真平台,可节约人力成本,规避设计风险。

在实际的飞机设计过程中,包括概念设计、详细设计等,声学设计人员应时时跟踪飞机各个系统与部件研制进度,将飞机外形、系统设置、结构材料等作为声学预计与分析的输入参数,及时获得飞机的

系统级与部件级的声学特性,提出设计更改建议,在设计过程中解决飞机噪声问题,以保证飞机在研制成型后,舱内噪声指标要求的实现。

1 数值仿真计算

声学设计仿真预计有几种类型的计算方法,每一种计算分析方法在不同的频段具有不同的计算精度。针对不同的分析目的,选用不同的计算方法。目前,主要的噪声预计方法有:统计能量分析法、边界元分析法和有限元分析法。下面结合飞机设计特点,对三种方法进行介绍。

1.1 统计能量分析法

统计能量分析法又称 SEA (Statistic Energy Analysis) 分析法,是从能量观点研究和分析振动与噪声的统计处理方法,基本思想是避开求解复杂的数理方程,代之以统计的方法研究系统各部分之间能量的传递和平衡,以得到简明的物理解答。

统计能量分析法在求解大尺度结构、复杂结构的时候具有独特的优势。其计算速度快,在高频部分所得到的计算结果更接近真实的结果。但是统计能量分析法因受到其子系统平均假设的限制,在中频求解(低频主模态贡献量较大)或模态密度较低时,不适合采用统计能量分析方法;而且,低频求解或求解局部细节问题时,其计算结果严重失真,不适

合采用统计能量分析法。

飞机壁板与地板 SEA 模型如图 1 所示;舱段 SEA 模型如图 2 所示;由 CAD 模型变换为 SEA 模型的建模过程如图 3 所示。

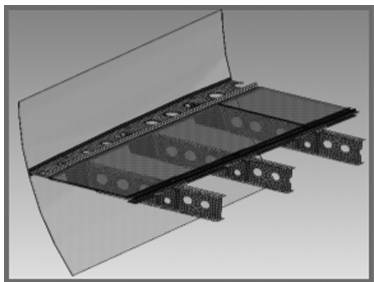


图 1 壁板与地板 SEA 模型

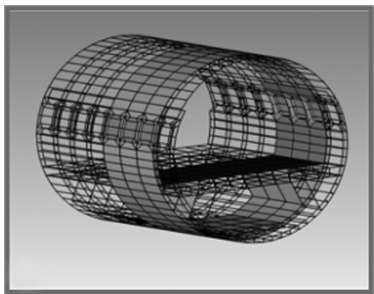


图 2 舱段 SEA 模型

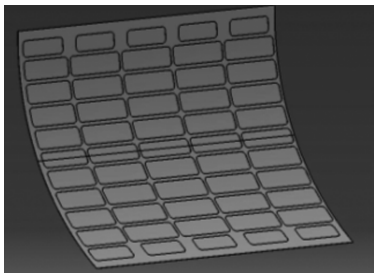


图 3 SEA 建模过程

1.2 有限元分析法

有限元分析法 (FEA, Finite Element Analysis) 是一种离散化方法,它将连续实体离散化为若干个有限大小的单元体的集合,离散后单元与单元之间利用单元的节点相互连接起来,求解刚度阵与质量阵,获得各个单元节点上的数值解。有限单元节点的设置、性质、数目等应视问题的性质、描述变形形态的需要和计算进度而定(一般情况下,单元划分越细则描述变形情况越精确,即越接近实际变形,但计算量却越大)。

有限元分析法中分析的结构已不是原有的物体或结构物,而是由众多单元以一定方式连接而成的离散体,因此用有限元分析计算所获得的结果只是近似的。假如划分的单元数目非常多而又合理,则所获得的结果也将与实际结果相吻合。

有限元分析法的通用性强,可用于任何结构及内声腔形状,并有多种商品化软件可供使用。但由于采用结构与声场联合求解的有限元分析法其自由度多、方程系数矩阵不对称,不能采用常规的有限元程序进行求解。下面使用有限元分析法进行壁板隔声的仿真计算实例,结构部件 CAD 模型如图 4 所示,有限元声学模型如图 5 所示,仿真计算出的隔声曲线如图 6 所示,壁板仿真计算出的声辐射云图如图 7 所示。

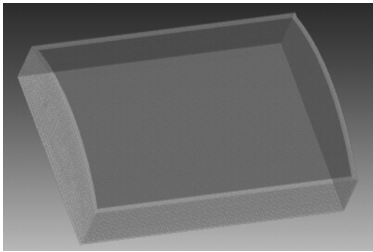


图 4 部件 CAD 模型

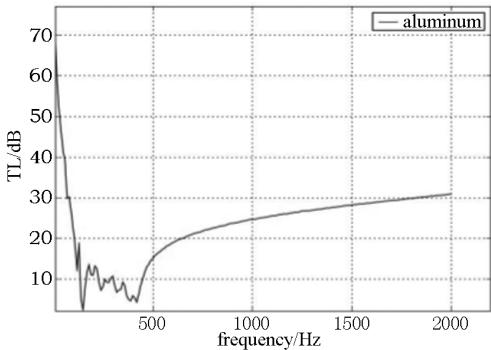


图 5 有限元声学模型

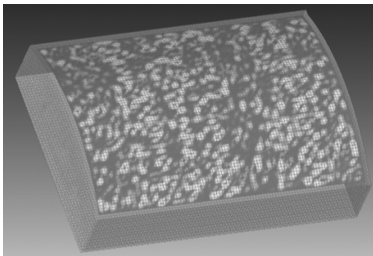


图 6 隔声曲线



图 7 壁板的声辐射云图

1.3 边界元分析法

边界元法 (boundary element method) 是一种继

有限元法之后发展起来的一种新的数值方法,边界元法是利用基于控制微分方程的基本解来建立相应的边界积分方程的,再结合边界的剖分而得到离散算式。与有限元法在连续体域内划分单元的基本思想不同,边界元法是只在定义域的边界上划分单元,再用满足控制方程的函数去逼近边界条件。所以边界元法与有限元相比,具有单元个数少,数据准备简单等优点。但用边界元法解非线性问题时,会遇到非线性项对应的区域积分,这种积分在数值求解的奇异点附近有强烈的奇异性,使求解遇到困难。

现在,边界元法已应用到工程和科学的很多领域。对求解线性问题,边界元法的应用已经规范化;对求解非线性问题,其方法亦趋于成熟。在软件应用方面,边界元法应用软件已由原来的解决单一问题的计算程序,向具有前后处理功能、可以解决多种问题的边界元法程序包发展。

目前已有关于边界元法的商用软件,如 SYS-NOISE 等,但不如有限元软件那样普及。另外,目前边界元只被用于一些特殊的领域,如计算声学、计算电磁学等,这是由边界元法的特点决定的。这也决定了边界元法非常适合于求解如声场、电磁场那样的无限域问题(因为区域虽然无限,但其边界是有限的)。

由此,边界元法自然而然地应用于飞机噪声分析中,飞机壁板声学模型见图 8,仿真计算出的壁板隔声量曲线见图 9,图 10 为舱段声学模型,图 11 为舱段声场的仿真计算结果,图 12 为带隔振器框的声学模型。

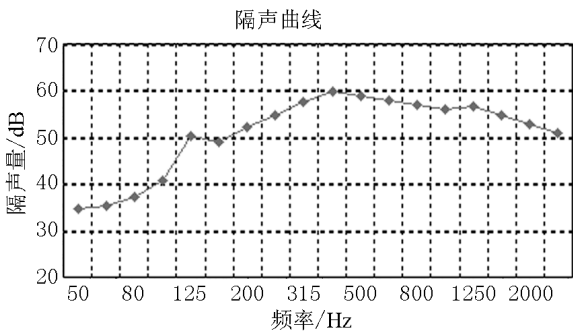


图 8 飞机壁板声学模型

2 试验结果与仿真计算结果关系

对于进行声学分析,试验测试与仿真计算二者相辅相成,缺一不可。以壁板结构隔声性能分析为例:将其仿真分析结果与隔声试验结果相对比,如果二者的结果有差异,用试验结果修正所建的声学仿真计算模型,重新计算,直到仿真计算结果与试验结果基本相符,将此时的声学计算模型嵌入到大型飞

机客舱的声学计算模型中,这样可以确保较准确地评估舱内声学环境,评估舱内噪声是否满足飞机设计所设定的声学指标。飞机壁板结构隔声性能仿真计算结果与试验测试结果的对比曲线如图 13 所示。

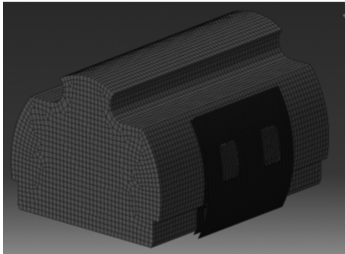


图 9 壁板隔声量曲线

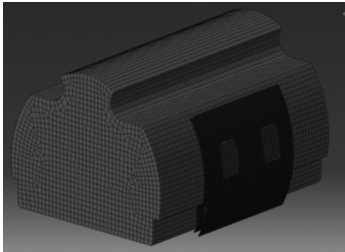


图 10 舱段声学模型

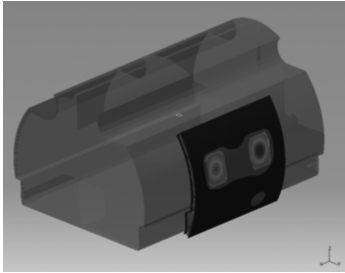


图 11 舱段声场计算结果

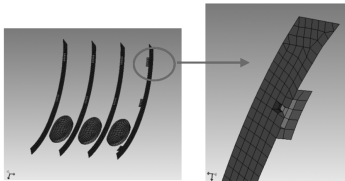


图 12 带隔振器框的声学模型

3 计算要求

在进行飞机舱内噪声预计过程中,要将系统级、部件级所做试验测量的结果输入到数值计算模型之中,保证部件级预计结果的准确性。在此基础上,整合飞机系统级、部件级的计算模型,建立全机或全舱段的声学预计模型,作为飞机舱内噪声分析的仿真平台。与此同时,对每一次材料的变更、隔声设计、吸声设计、装饰板的优化等,每一项改进方案都要重新进行舱内噪声预计评估,在满足舱内声学指标的前提下,从数值计算上优化出合理可行的舱内声学设计方案。

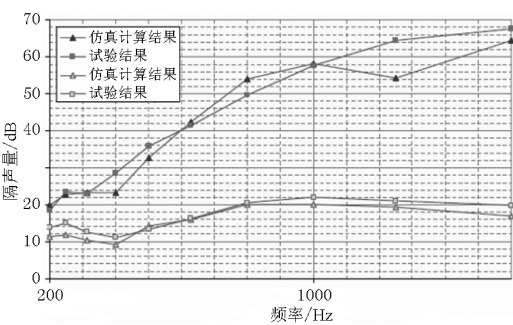


图 13 飞机壁板结构隔声性能仿真计算结果与试验测试结果对比曲线

4 民机舱内声学设计原理

在民用飞机的型号研制过程中,对比竞争机型

与技术发展,分析航空市场需求,从飞机性能的角度,对舱内噪声提出设计目标。然而为了保证舱内声学环境达到设计目标,舱内噪声的控制需要从飞机的主要系统(发动机系统、客舱结构与材料、环控系统)声学特性的研究为出发点,采取隔声设计、吸声设计、减振、隔振设计以及用于环控系统的消声设计、减振安装等噪声和振动控制手段,预计与分析部件级声学特性,建立起符合实际的全机声学预计模型,并对舱内噪声进行预计,将预计结果与舱内噪声设计目标进行对比,如果二者相差太大,则要对飞机声学设计方案进行优化,直到其计算结果与舱内噪声设计目标基本相符。客舱声学设计原理图如图 14 所示。

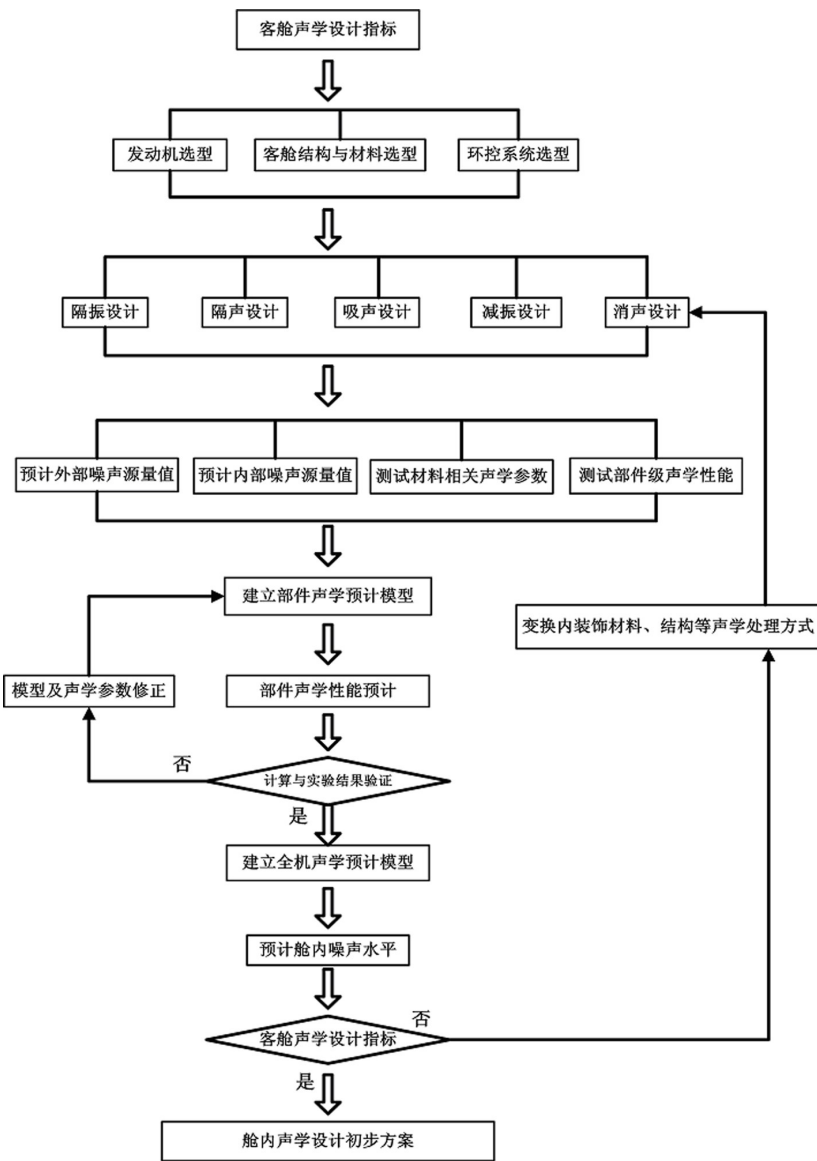


图 14 舱内声学设计原理图

(下转第 44 页)

动机。APU 的供油泵安装在中央翼的后梁上,APU 的供油泵主要使用左外翼油箱中的油。

另据报道 A320 近期的机型,为了防止发动机叶片脱落飞出而破坏主油箱,也将中央翼油箱向外扩大至 4#肋。一旦转子爆破事故发生,可以牺牲中央翼油箱,保证主油箱的正常供油。但未找到相关图示。

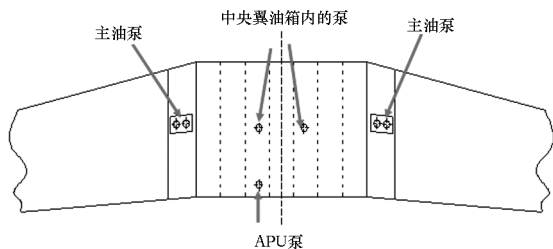


图 17 A320 系列中央翼油箱示意图

1.6 美国原麦道公司 MD-82 飞机

MD-80 系列是美国麦克唐纳·道格拉斯公司基于 DC-9-50 发展起来的双发中程窄体客机。载油量为 17 763kg。MD82 至 MD95 均为其发展型。标准载油量基本不变。它们采用的都是三油箱结构。供油泵均为机械泵,其中两台泵合并于一个盒子内,从上翼面孔中装入中央翼,其余两个泵布置在外翼。

中央翼两台泵串联使用为的是提高压力,保证中央翼优先供油。但是未说明泵的装卸问题。

MD-80 用油采取先用中央翼油箱的油,后用外翼油箱的油,两者自动切换。

2 结论

用密封处理的结构内部空间直接作为燃油容积的机翼整体油箱技术,已成为改善飞机性能,减轻结构重量的一项重要措施。用油顺序方面大部分机型均采用的是先用中央翼油箱的油,然后再用外翼油箱的油,以有利于飞机承载。油泵的安装要避免在靠近高应力区大开口,这样不仅因为开口加强而损失重量,还减少了结构寿命。鉴于此,可以考虑油泵安装在外翼的前后梁上;同时引射泵具有结构简单、重量轻和安装方便的优点,也可以避免大开口的问题。另外可以把外翼的某一肋定义为中央翼油箱的端肋,以避免转子爆破而产生的碎片同时击破外翼和中央翼油箱,而造成灾难性的后果。

参考文献:

- [1]曹寿德. 整体油箱防腐蚀-密封保护工艺研究[J]. 北京航空材料研究院,1999(6): 13-16.
- [2]吴平. 波音 737-300 飞机整体油箱渗漏排故研究[J]. 航空工程与维修. 2001(3): 42-43.
- [3]CRJ700 Aircraft Maintenance Manual. 2006.
- [4]Embraer 190/195 Aircraft Maintenance Manual. 2008.
- [5]Boeing737 Structural Repair Manual. 1991.
- [6]张庆伟,林左鸣. 世界民用飞机手册[M]. 北京:航空工业出版社,2009.
- [7]A320 Aircraft Maintenance Manual. AIRBUS INDUSTRIE. 1997.

(上接第 10 页)

5 结论

大型客机舱内声学设计方案综述(二)对飞机舱内声学设计方案进行了系统地论述。根据飞机声学设计方案的特点,对声源、传递路径与接受体声学问题三大方面进行了详细描述。结合数值仿真与试验测量手段,介绍飞机声学设计过程中使用的方法特点,并以设计流程框图的形式给出民机噪声工程的基本设计方案。不过,若要具体实施飞机声学设计方案的各项内容,不仅需要面对工作量大以及技术复杂的挑战,还需要飞机各系统的多方面共同努力才能设计出满足舱内噪声设计指标的大型民用飞机。

参考文献:

- [1]扈西枝. 民机舱内噪声源及其特性分析[J]. 民用飞机设计与研究,2010(97).
- [2]扈西枝. 基于统计能量分析进行声学优化设计的技术研究[J]. 民用飞机设计与研究,2010(98).
- [3]O. Ozgun and M. Kuzuoglu. Non-Maxwellian locally-conformal PML absorbers for finite element mesh truncation[J]. IEEE Trans Antennas Propagation,55:931 - 937,2007.
- [4]Hu Xizhi. Prediction of Aircraft fuselage insulation based on FEM-PML[C]. The international LMS Engineering Simulation Conference,2010.
- [5]李增刚. SYSNOISE Rev5.6 详解[M]. 北京:国防工业出版社,2005:202172.
- [6]姚起杭. 飞机噪声工程[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.
- [7]何琳,朱海潮,邱小军,杜功焕. 声学理论与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2006.