

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.06.042

# 飞行模拟器声音仿真系统建模方法

平原\*

西安飞豹科技有限公司, 陕西 西安 710089

**摘要:** 为了建立飞行模拟器声音系统仿真模型, 从声音属性、传播特性以及声音建模理论出发, 采用 EASE 软件工具, 建立了飞行模拟器声音仿真系统模型并进行了分析, 得出了声音混响时间和散射曲线, 为飞行模拟器声音仿真系统设计提供了直接的参考依据。

**关键词:** 飞行模拟器; 声音仿真; 建模; EASE 软件工具

**中图分类号:** V216.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2017) 06-0042-05

飞行模拟器是重要的航空武器装备论证仿真系统, 是能够复现飞行器及空中环境并可以进行操作的模拟装置, 可真实模拟飞行器执行飞行任务时的飞行状态、飞行环境和飞行条件, 并给飞行员提供逼真的视觉、听觉和运动感觉等<sup>[1]</sup>。飞行模拟器已广泛应用于飞控系统控制律设计、飞机飞行品质评估以及飞行员训练等诸多方面, 其高效性、经济性和安全性使得飞行模拟器在航空、航天和军事等领域的作用日益突出。飞行模拟器作为一种典型的人在回路的飞行仿真系统, 飞行员和环境之间的信息交互在很大程度上依赖于视觉通道和听觉通道, 通过模拟飞行过程中的视觉、听觉效果, 可以大大增强飞行仿真环境的沉浸感。在飞行模拟器虚拟飞行环境中, 视觉提供给人的信息量最大, 约占 70%, 其次是听觉信息约占 15%<sup>[2]</sup>, 通过声音仿真模拟获得不可见时间的行为、状态信息, 是对视觉信息的重要补充, 对于构建虚拟飞行环境具有重要意义<sup>[3]</sup>。

## 1 声音特性分析

声音系统仿真是一个比较复杂的系统过程, 其逼真度直接影响着虚拟飞行环境的模拟效果。在进行声音系统仿真时, 需要了解声音的基本属性、声音种类以及声音传播特性, 以便更好地建立声音仿真模型。

### 1.1 声音属性

声音是由物质振动产生的声波, 声音属性变量包括响度、音调和音色。

响度又称为音量, 从物理学的角度来看, 声音是一种机械波。当声源以一定频率振动时, 影响了周围的空气密度, 并在空气中形成疏密相间的纵向波, 这就是声波。声波使人的耳膜发生振动, 再经过大脑一系列的处理, 最终感觉到声音的大小和强弱。由于声音也是一种能量, 其能量会随距离的延伸而产生衰减, 因此, 响度的影响因子主要有声波振幅、人耳和声源的距离。通常情况下, 声音所产生的振幅越大, 声源和人耳的距离越近, 人们所听到的声音就会越大; 相反, 若其振幅越小, 与人耳的距离越远, 人们所能听到的声音也就越小。音调是用来描述声音高低的参数。声源所发出的声音是一种能量波, 声波的频率越高, 音调也就越高; 声波的频率越低, 音调也会随之降低。音调与声音的频率不是正比关系, 它还与声音的强度及波形有关。人耳对声波频率的感知能力有限, 人耳可以听到 20~20000Hz 的声音, 处于该频段内的声音称为可听声。其中, 人耳能感受到的最敏感声波频率范围为 1000~4000Hz。音色又称音品, 由发声体的材料及其结构决定, 声音的传播波形决定了声音的音色, 在不同材料中产生的声音会因材料不同而表现出不同的特性。

收稿日期: 2016-11-01; 退修日期: 2017-04-28; 录用日期: 2017-05-02

\* 通讯作者. Tel.: 029-86832385 E-mail: 530661537@qq.com

引用格式: PING Yuan. Modeling method of sound simulation system for flight simulator[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (06): 42-46. 平原. 飞行模拟器声音仿真系统建模方法 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (06): 42-46.

音色本身是一种抽象的东西,但可以通过声音传播波形直观表现。在声音仿真建模过程中,音调是声源固有的属性,在传播过程中不会改变,而响度和音色会受到环境的影响,也是本文研究的重点。

### 1.2 声音传播特性

飞行模拟器内部近似为一个封闭空间,声源在模拟器内部辐射声波时,传播到各个面上的声波小部分被吸收,大部分被反射。声波在经过多次反射后,其强度才能减弱到可以被忽略的程度。

声音在空间中的传播是没有方向性的,当声音的传播距离远大于声源尺寸时,可把声源看成点声源,把声波看成球面波。空中声场不是理想的自由声场,由于不均匀介质以及障碍物的反射等因素影响,测量的声音信号不仅包含了单相直接传来的声音信号,还包含了经过二次或多次反射的声音信号。环境条件对声音的传播也会产生影响。在飞行模拟器中,对声音传播影响最大的是温度。温度的变化会引起声速的变化,当存在温度梯度时,声线会发生扭曲并改变方向。声音的衰减与声波的频率、距离、温度等因素有关,频率越高,衰减越大。

### 1.3 声音分类

飞行模拟器声音仿真系统作为在实际飞机驾驶舱中飞行员能够听到的各种声音的模拟,需结合飞行模拟器设计要求,明确需要模拟的声音种类。飞行模拟器声音种类可以分为音响信息和音频信息。音响信息主要由飞机外界环境音和飞机本身产生的声音组成,外界环境音即非飞机所发出的声音,如雷声、雨声和其他飞行器的声音等。这些声音同飞机本身产生的声音构成了飞行驾驶环境音,为飞行模拟器驾驶员提供了真实的飞行环境。音响信息类型如表 1 所示。

表 1 音响信息类型

Table 1 The type of acoustic information

音响类型	声音模拟范围
发动机声	发动机启动、停止和反推声音等
气流声	气流噪声、起落架、襟翼失速等引起的噪声
起落架声	起落架收起、放下、接地、轮胎爆破所产生的声音
大气效应声	雨声、风声、雷声等
告警音	发动机失火、起落架未放下等告警声音

音频信息用于驾驶舱内人员和外界人员的实时语音通话,其主要功能包括 3 个方面:一是实现一对多、多对多清晰、无噪声通话;二是实现通话音量调节;三是对输入通道、输出通道音频信号参数进行调节。

上述声音仿真系统中音频信息可以通过音频矩阵和必要的硬件设备进行音效模拟和控制,这不是本文研究的重点。

本文重点对飞行模拟器声音系统中的音响信息进行仿真。声音仿真所针对的部分音响信息属性参数如表 2 所示。

表 2 部分声音频率  
Table 2 Partial sound frequency

声音名称	频率范围 /Hz	响度范围 /dB
发动机声	100~1060	0~140
气流声	200~400	0~90
雨声	150~10000	0~80
雷声	250~750	0~110
爆炸声	500~20000	0~160

## 2 声音建模理论

飞行模拟器声音仿真系统的建立需要采集飞机内产生声音的种类、发声位置,根据声音在飞行模拟器内部空间的传播特性,对扬声器进行合理分配和布置<sup>[4]</sup>,从而实现三维环境声音的逼真模拟。

### 2.1 仿真流程

飞行模拟器声音仿真系统设计流程如图 1 所示。

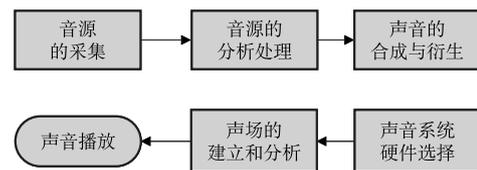


图 1 声音仿真系统设计流程图

Fig.1 Development process of sound simulation system

声音仿真系统研制可以分为软件开发和硬件开发。在软件开发阶段,主要工作内容包括:录制各种飞行状态下的声音、对采集的声音进行滤波分析和处理、根据飞机的飞行状态进行声音混合;在硬件开发阶段,主要根据飞行模拟器驾驶舱布局,进行合理的声音仿真系统硬件布局,并对混响合成音进行播放。

### 2.2 声音仿真特性参数

声音仿真特性参数包括混响时间、声音衰减特性、空间频率特性和环境噪声等。(1)混响时间:声波在封闭空间内传播时,被墙壁、天花板、地板等障碍物反射,每次反射都会被障碍物吸收一些。当声源停止发声,声波在空间内要经过多次反射和吸收,最后才能消失,声源停止后声波的持续现象为混响,持续的时间为混响时间。(2)声音衰减特性:空间的扩散性良好,则声音的衰减平滑,空间内部声音均匀。通常,声音衰减使用 3dB (声音响度衰减为原来的一半) 散射图表示。(3)空间频率特性:空间频率特性由构成空间的材料、结构方式、内部面积、表面形状及传播方向等因素决

定。(4) 环境噪声: 环境噪声是指除声音系统扬声器以外的其他设备所发出的声音, 这些声音过大或者频率过高都会对声音的复现产生一定影响。

在进行声音系统仿真建模与分析时, 本文忽略掉后两项属性, 只针对混响时间和声音衰减特性进行分析。

### 2.3 声场构成物质的声学属性

飞行模拟器结构部分所使用的材料要考虑整体强度、重量、稳定性、加工工艺、美学和成本等多个因素, 目前, 内部空间表面材料多使用光滑铁板、玻璃钢或亚克力板等材料, 这些材料的声学属性如表 3 所示。

表 3 不同材料吸声系数表

Table 3 Different material sound absorption coefficients

材料名称	不同频率下的吸声系数				
	125Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
光滑铁板	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
玻璃钢	0.03	0.027	0.02	0.02	0.02
亚克力板	0.03	0.025	0.02	0.02	0.02

通过表 3 看出: 不同材料的吸声能力存在一定的差异。光滑铁板、玻璃钢或亚克力板等材料对 4000Hz 以下声音的吸声系数都在 0.02 左右, 吸声能力较差, 使用这些材料构成的空间在声音传播时会形成较长的混响时间和衰减时间。

### 2.4 扬声器的选择

扬声器是声音复现的发声设备, 选择性能合适的扬声器非常关键。表 2 中给出了需要复现的部分声音的频率范围, 主要分布在 100~20000Hz 之间, 而人耳所能听到的声音频率为 20~20000Hz, 因此, 扬声器选择低频扬声器和中频扬声器配合使用, 关于这两类扬声器的选择主要体现在: (1) 低频扬声器: 低频扬声器的口径、磁体和音圈的直径较大, 重放性能和瞬态特性较好, 灵敏度较高, 其工作频率为 15~5000Hz。(2) 中频扬声器: 中频扬声器相应的频率曲线较为平坦, 选择灵敏度高, 阻抗要低于低频扬声器, 其工作频率一般为 500~20000Hz。

## 3 声音系统建模

### 3.1 建模工具的选取

针对有限封闭空间的声音建模和传播分析的软件较多, 目前, 较为流行的软件工具有 FFT 公司的 ACTRAN 以及 ADA 公司的 EASE。ACTRAN 软件工具采用有限元/无限元方法来分析声音的传播、振动和流动等, 它提供了丰富的单元库、材料库、边界条件、求解配置和求解器等建模工具。可用来处理声波的辐射和散射、封闭和开放声场、声音在管道中的传播、对流效应、声振耦合、精确模拟阻尼等, 在

工程应用中表现出了良好的鲁棒性和解算效率。EASE 软件混合使用了声线跟踪法和声像法, 具有运算速度快且精度高特点。其软件数据库包括了一个完整的吸声材料数据库和扬声器数据库, 通过计算机进行相关声学参数运算, 从而对实际工程中扬声器的工作效果进行判断和分析, 并通过分析结果优化声场环境和相关属性。EASE 软件工具提供了多种不同的计算模块, 如声学分析模块、红外辐射模块等。

飞行模拟器内部声场更趋近于封闭性混响声场, 比较适合使用 EASE 软件进行相关参数分析, 因此, 本文采用 EASE 4.3 版软件进行仿真。

### 3.2 空间模型

根据某型飞机飞行模拟器结构数据, 通过建立声音仿真空间模型, 提出了模拟器扬声器布局示意, 如图 2 所示。分析和采集相关数据的着眼点均为主驾驶员耳朵位置 (机头航向左侧座椅)。图 2 的模拟器座舱布置了 6 个扬声器, 具有先进的双功放设计、全防磁效果并可以实现高频声音的 120° 弥散。基于以上分析建立飞行模拟器内部空间模型, 如图 3 所示。

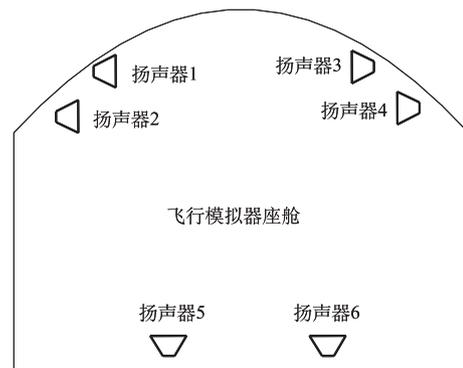


图 2 飞行模拟器扬声器位置模型

Fig.2 Flight simulator speaker location model

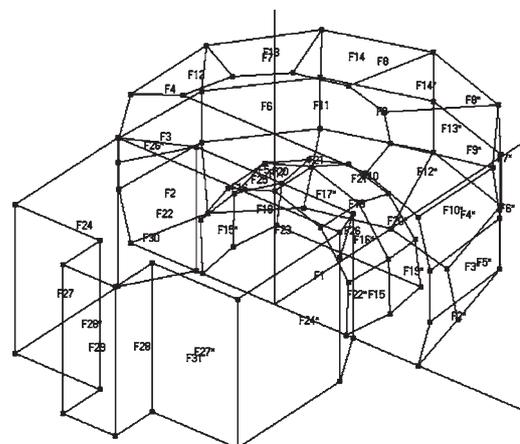


图 3 飞行模拟器模型图

Fig.3 The model of flight simulator

飞行模拟器内部空间分为后房体和座舱,后房体为规则六面体组成,在模型中无须简化,直接以实际尺寸绘制即可;座舱部分为不规则曲面且包含各种复杂表面的设备,在建模过程中不规则曲面由多个平面连接组成,内部设备虽然表面复杂但相对面积较小,对声音的反射和吸收影响不大,在建立模型中忽略这一部分的影响。

飞行模拟器内表面材料的相关声学属性对声音仿真系统的仿真程度影响很大,EASE软件提供了大量建筑材料的相关声学属性,在建模过程中,对内表面附相同材料就可以满足仿真的需要,内表面材料选择如表4所示。

表4 内表面材料选择表  
Table 4 Internal surface material selection

序号	材料	面名称
1	钢	F1, F3, F6, F9, F11~F25, F27~F31
2	吸波材料	F2, F4, F5, F7, F8, F10, F26

### 3.3 混响时间仿真曲线

在飞行模拟器空间模型的基础上,利用EASE 4.3仿真软件选择飞行模拟器内部空间材料,可以得到不同声音频率在该空间布局、材料下的吸声系数和混响时间,图4为吸声系数图。

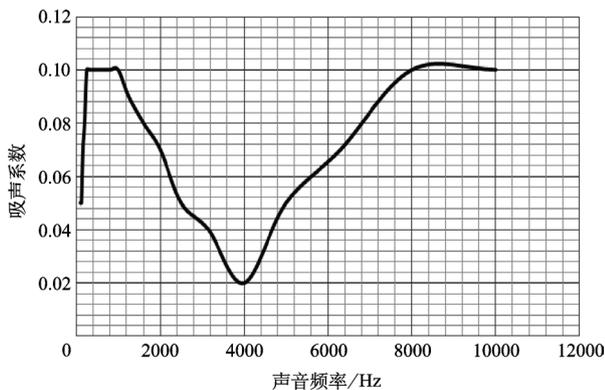


图4 吸声系数图  
Fig.4 Sound absorption coefficient

图4中的曲线表示飞行模拟器内部空间吸声系数与声音频率之间的对应关系,可以看出,对于10000Hz以下的所有频率的吸声系数均在0.1以下,这意味着声音在传播过程中首次碰撞内表面损失的能量不足10%,剩余的90%穿过了障碍物或者被反射了回来。

在图5中,随着声音频率的增加混响时间越来越小,图5中超过4000Hz的声音,混响时间小于10s,回声和原声已经无法区分,导致原声持续时间增加。

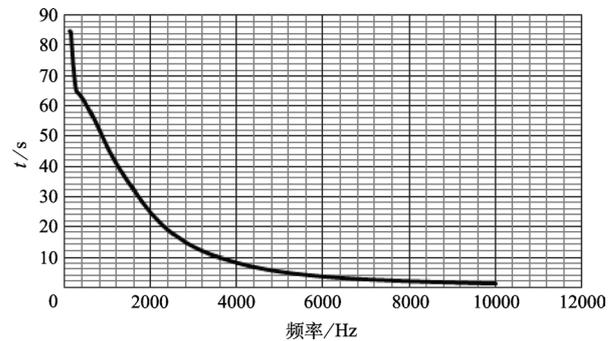


图5 混响时间  
Fig.5 Reverberation Time

### 3.4 扬声器声音散射曲线

声音在传播过程中遇到障碍物,部分声波偏离原始传播路径并向四周传播,在此过程中存在一个能量衰减过程,声音衰减3dB的传播路径是声音传播过程中的一个重要参数。对飞行模拟器内部声音减弱3dB的传播路径进行仿真分析,其结果如图6所示。

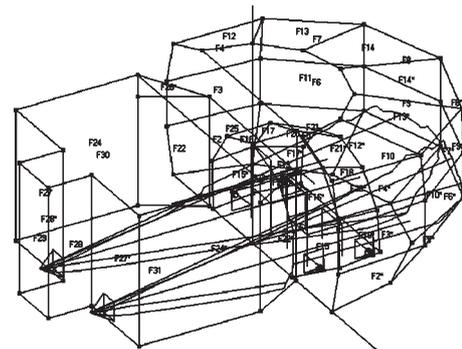


图6 扬声器3dB散射图  
Fig.6 3dB scattering pattern of loudspeaker

图6显示了声音在模拟器内部空间由声源发出到减弱3dB时所经过的所有路径。由于4000Hz以上的声音均已穿透内部空间,不存在反射,所以图6中的曲线主要表示4000Hz以下的声音衰减3dB散视图。后舱扬声器面对的空间空旷,所发出的声音会经过多次反射,驾驶舱四周的扬声器面对的空间狭小,发出的声音只能在很小的区域内来回反射。总的来说,后舱扬声器3dB散射曲线混乱且线路长,前驾驶舱扬声器3dB散射曲线小且集中。使用该模型得出声音仿真图 and 实际测量结果对比如图7所示。

图7(a)是在座舱内播放声音,实际接收的声音的时域图;图7(b)是建模仿真的声音时域图。从图7可以看出,仿真结果在主要声音的仿真方面和实际值非常接近,而真实的复杂环境造成了测试值相对复杂,两张图对比可以得出该模型的正确性。

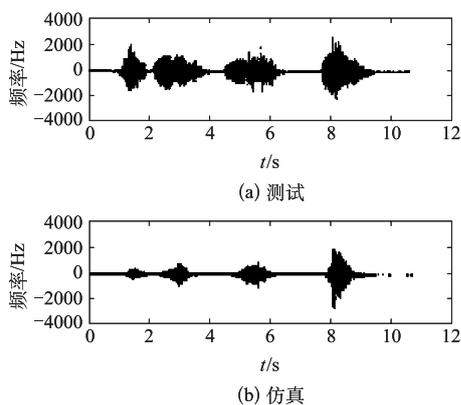


图7 仿真和测试声音时域对比

Fig.7 Comparison of simulation sound and test sound

## 4 结束语

声音仿真系统作为飞行模拟器的重要系统之一,为飞行员提供真实的听觉环境,对构建虚拟飞行仿真环境具有重要意义。采用 EASE 软件工具建立了声音系统仿真模型,得出了声音混响时间、散射曲线,为飞行模拟器声音仿真系统设计和优化提供了直接的参考依据。

使用 EASE 软件工具进行声音系统模拟还存在一些有待改进的方面,在分析封闭空间声音特性时,下一步将把人的因素考虑进来,从而提高声音系统仿真的逼真度。 **AST**

## 参考文献

[1] 李林,翁冬冬,王宝奇,等. 飞行模拟器 [M]. 北京:北京理工大

学出版社, 2012.

LI Lin, WENG Dongdong, WANG Baoqi, et al. Flight simulator[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2012. (in Chinese)

[2] 谢波荪,管善群. 虚拟声技术及其应用 [J]. 应用声学, 2004 (4): 43-47.

XIE Bosun, GUAN Shanqun. Virtual sound and its application[J]. Applied Acoustics, 2004 (4): 43-47. (in Chinese)

[3] 李伟明. 飞行模拟器中的声音仿真技术研究 [J]. 电子工程设计, 2011, 19 (09): 64-66.

LI Weiming. Research on sound simulation of flight simulator[J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19 (09): 64-66. (in Chinese)

[4] 张铎. 空间声音建模技术及其在驾驶模拟器中的应用 [J]. 湖北工业大学学报, 2007, 22 (03): 62-64.

ZHANG Duo. 3D sound modeling technology and its application in vehicle driving simulator[J]. Hubei University of Technology Journal, 2007, 22 (03): 62-64. (in Chinese)

## 作者简介

平原 (1986—) 男, 学士, 助理工程师。主要研究方向: 飞行模拟器电气、声音等系统仿真设计。

Tel: 029-86832385

E-mail: 530661537@qq.com

# Modeling Method of Sound Simulation System for Flight Simulator

PING Yuan\*

*Xi'an Feibao Technology Co., Ltd., Xi'an 710089, China*

**Abstract:** In order to establish a sound system of flight simulator model, from the analysis of propagation characteristics and attributes of sound, sound modeling theory, using the EASE software, established a sound simulation system of flight simulator model and made a detailed analysis, obtained the Reverberation Time (RT) and scattering curve, which provided a direct reference for the sound simulation system design of flight simulator.

**Key Words:** flight simulator; sound simulation; modeling; EASE software

Received: 2016-11-01; Revised: 2017-04-28; Accepted: 2017-05-02

\*Corresponding author. Tel. :029-86832385 E-mail: 530661537@qq.com