

◇ 研究报告 ◇

民机噪声适航合格审定试验中地面影响研究

宋亚辉[†] 张晓亮 张跃林

(中国飞行试验研究院 飞机所 西安 710089)

摘要 在民用飞机噪声适航合格审定试验中,传声器布置在地面上 1.2 m 处,测得的噪声包含地面影响。该文提出了一种分析地面对民机噪声适航合格审定试验中有效感觉噪声级影响的方法,并以 ARJ21-700 飞机噪声适航合格审定试验为例,对地面对飞越噪声的影响进行了计算和分析。在对飞行试验中飞机自由场声压级理论计算方法进行分析的基础上,通过飞越噪声测量点处布置的倒置传声器装置测量结果,计算了该测量点处的自由场声压级。随后,对满足“CCAR-36 部”的不同地面声阻抗对噪声的影响进行了计算,分析了地面条件对噪声适航合格审定中有效感觉噪声级的影响。结果表明,地面声阻抗对噪声适航合格审定结果有明显影响,该方法可以为民用飞机噪声适航合格审定试验提供一种分析测量点地面的声学处理对噪声评定结果影响的手段。

关键词 民机噪声,适航合格审定,地面影响,飞行试验,有效感觉噪声级

中图法分类号: V217.1, V216.5+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2018)06-0927-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.06.014

Effect of ground surface on civil aircraft airworthiness certification noise results

SONG Yahui ZHANG Xiaoliang ZHANG Yuelin

(Aircraft Flight Test Technology Institute, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract Civil aircraft flight noise should be acquired by microphones mounted 1.2 meters above ground on airworthiness certification. Such a measurement method leads to misrepresentation of noise character due to ground surface interference effect. In order to analyze the effect on civil aircraft's effective perceived noise level (EPNL), a method is presented and the interference effect on ARJ21-700 at flyover noise measuring point produced by ground surface is studied. On the basis of theoretical analysis method, through analyzing the data acquired by the inverted-microphone device, ARJ21-700's free field sound pressure levels are obtained. Then the interference effect on EPNL of flyover produced by different finite acoustical impedance of ground surface which meets the certification requirements of CCAR-36 is analyzed. The results show that the acoustical impedance of ground surface has significant impact on noise results and the method presented could be used to evaluate the influence on EPNL of acoustic treatment of ground surface around measuring points on civil aircraft airworthiness certification.

Key words Civil aircraft noise, Airworthiness certification, Ground effect, Flight test, Effective perceived noise level

2017-12-30 收稿; 2018-03-24 定稿

作者简介: 宋亚辉 (1985-), 男, 河南鹿邑人, 硕士研究生, 研究方向: 飞行器结构动力学, 航空声学。

[†] 通讯作者 E-mail: songyahuilym@163.com

1 引言

根据中国民用航空总局的“CCAR-36 航空器型号和适航合格审定噪声规定”^[1] (以下简称“CCAR-36 部”)和国际民航组织的“国际民用航空公约-附件16-环境保护手册-卷I”^[2](以下简称“ICAO 附件16”),除去最大起飞重量小于8618 kg的螺旋桨小飞机和螺旋桨通勤类飞机等以外,多数民用飞机适航合格审定在进行起飞和进场条件下地面噪声的测量和评定时,传声器布置在地面上1.2 m处,测得的噪声至少包含两部分^[3-9]:一是飞机发出的噪声直接入射到传声器的直达声,二是飞机发出的噪声经地面反射后传播到传声器的反射声。地面声阻抗对反射声有较大影响^[7-10],当测量点地面声阻抗不同时,传声器接收的噪声会有差异。为考虑地面对噪声测量的影响,“CCAR-36 部”中对试验场做了规定,要求试验在平坦的地带且没有吸声特性过大的茂密或高大的草、灌木及树林等,但没有对地面具体的声学条件做出进一步要求。在中国民用航空总局的“AC 36-1 咨询通告:航空器型号和适航合格审定噪声规定”^[11]中,对试验场地做了一些描述性说明,包括“半径25英尺区域内的草必须割除”、“噪声测量点周围50英尺范围内的雪必须清除,而且不能堆放在飞行路线一侧”和“测量点周围25英尺的沙土表面必须夯实,不允许有沟槽、泥浆和浮土”等,实际上这对试验场地地面进行了考虑,并对地面处理给出了操作性指导,“ICAO 附件16”中还给出了如何分析地面影响的简略指导,但二者均没有对地面做出具体的声阻抗限定和对地面影响进行具体分析。即使将试验场测量点区域处理成沙土地面,但不同地域试验场沙土表面的沙、黏土和碎石子等成分不同,声阻抗也有一定差异^[3,10]。由于地面影响了适航合格审定中噪声的测量和人对飞机噪声的主观感觉,“CCAR-36 部”咨询通告(附件)^[12]和“ICAO ETM”^[13]中指出,地面对1.2 m处噪声测量的影响引起的频谱不规则性可能在低频段引入伪纯音,从而导致计算中出现不合适的纯音修正因子。实际上,由于不同的地面阻抗可能在不同的频段引入伪纯音,通过识别伪纯音间接考虑地面对飞机有效感觉噪声级(Effective perceived noise level, EPNL)的影响,而对地面对噪声的影响进行具体分析有助于伪纯音的识别。因此,在民用

飞机噪声适航合格审定试验中,测量点地面影响飞机噪声测量和有效感觉噪声级的评定,有必要对这种影响进行分析^[4,13]。

大量学者对地面对飞机噪声传播的影响进行了研究,通过试验测量、理论估算的方法分析了地面对飞机噪声测量的影响^[3-9,14]。国际自动机工程师学会(Society of automotive engineers international, SAE International)在SAE AIR 1327^[8]和SAE AIR 1672^[9]中对分析地面对飞机和发动机噪声影响的理论估算方法和试验方法进行了总结。在民用飞机噪声适航合格审定方面,SMITH^[4]通过飞行试验分析了在地面上不同高度布置传声器对适航合格审定噪声的影响,给出了通过改变传声器高度来减弱地面对测量噪声不利影响的建议;Rackl^[14]结合大量试验数据分析了地面引入的伪纯音对有效感觉噪声级计算中纯音修正因子的影响,最终也给出了改变传声器高度来减弱地面引入的伪纯音对有效感觉噪声级影响的建议;GREGG等^[5]分析了地面声学条件对飞机噪声影响的不同方法,并将其应用于美国联邦航空管理局的机场噪声评估软件INM(Integrated noise model)。尽管以上研究分析了地面对噪声评定的影响,但是没有对地面对有效感觉噪声级的影响进行具体数据分析,或者给出的方法不满足“CCAR-36 部”等的要求,难以将其应用于试验中。随着中国民用航空总局颁布“CCAR-36 部”等,国产民用飞机的噪声适航合格审定工作(如MA60、ARJ21-700和运-12系列等)已经进行,C919、MA700和AG600等正在准备之中)相继展开,当前我国没有专用民机噪声适航合格审定试验场地,有必要对普通试验场地面对适航合格审定中有效感觉噪声级的测量影响进行分析。

本文提出了一种分析和评估地面声学条件对民机噪声适航合格审定试验中有效感觉噪声级的影响的方法,并采用ARJ21-700飞机噪声适航合格审定飞行试验数据进行了具体计算和分析。首先,根据ARJ21-700飞机噪声适航合格审定飞行试验中飞越噪声测量点附近布置的倒置传声器装置测量结果,得到了自由场声压级(Sound pressure level, SPL),分析了试验中地面对噪声测量的影响。然后,选择典型的干沙土地面、碎黏土地面、碎石-沙土地面和声学硬地面等,计算了带不同地面影响的声压级和有效感觉噪声级,与实际的噪声合

格审定试验结果进行对比,分析地面阻抗条件不同对民机噪声适航合格审定中有效感觉噪声级的影响。最后,对该方法的注意事项和实用意义进行了分析。

2 地面对飞机噪声测量的影响

2.1 地面对噪声测量影响的计算方法

民机噪声适航合格审定试验中飞机噪声测量与声波传播模型见图1。传声器测得是飞机发出的直达声和地面反射声的叠加,根据声波传播理论和地面阻抗参数,可建立反射声与直达射声的声压关系式,从而计算反射声对传声器测得的噪声的贡献量,即自由场声压级修正量(传声器测得的声压级与自由场声压级的差值,以下简称自由场声压级修正量),即实现了对地面影响的计算。对于图1所示的飞机噪声测量与声波传播模型,传声器处的自由场声压级有^[8-9]

$$\text{SPL}_i^{\text{free}} = \text{SPL}_i^{\text{test}} - \Delta\text{SPL}_i, \quad (1)$$

其中, $\text{SPL}_i^{\text{test}}$ 是传声器测得的带地面影响的声压级, i 是频谱分析的频带序号; ΔSPL_i 是地面对飞机自由场噪声 $\text{SPL}_i^{\text{free}}$ 测量的影响量,即自由场声压级修正量。试验中,飞机与传声器一般距离较远,将飞机噪声源看作集中于噪声参考点的点声源,自由场声压级修正量 ΔSPL_i 的表达式为

$$\Delta\text{SPL}_i = 10 \lg \left[1 + \left(|Q_i| \frac{r}{R} \right)^2 + 2 |Q_i| \frac{r}{R} C_\tau \right], \quad (2)$$

其中, r 为直达声波传播距离, R 为反射声波传播距离, C_τ 为特定带宽的自相关系数, Q_i 为复虚像源强度,当地面是声学硬地面时 $|Q_i| = 1$,当地面是声阻抗地面时,有

$$Q_i = |Q_i| e^{j\delta_i} = R_{ci} + F_i(\omega_i)(1 - R_{ci}), \quad (3)$$

其中, j 为虚数单位, δ_i 为辐角且当地面是声学硬地面时 $\delta_i = 0$, $F_i(\omega_i)$ 为地面边界损失因子, ω_i 为数值距离, R_{ci} 为平面波反射因子,且

$$F_i(\omega_i) = 1 + j\sqrt{\pi\omega_i} e^{-\omega_i} \text{erfc}(-j\sqrt{\omega_i}), \quad (4)$$

$$\omega_i = \frac{jk_i R (1 + \zeta_i \sin \psi)^2}{2\zeta_i (\zeta_i + \sin \psi)}, \quad (5)$$

$$R_{ci} = \frac{\zeta_i \sin \psi - 1}{\zeta_i \sin \psi + 1}, \quad (6)$$

其中, $\text{erfc}()$ 为误差函数的补函数, k_i 为波数, ψ 角的定义见图1, ζ_i 为地面的声阻抗率,且 $\zeta_i = Z_{ni}/\rho_0 c_0$, Z_{ni} 为声阻抗, ρ_0 和 c_0 分别为大气密度和声速。

式(2)中,对于1/3倍频程分析, C_τ 有

$$C_\tau = \frac{\sin[\alpha(R-r)/\lambda_i]}{\alpha(R-r)/\lambda_i} + \cos[\beta(R-r)/\lambda_i \delta_i], \quad (7)$$

其中, $\lambda_i = c_0/f_i$, 即波长, α 和 β 为频谱分析类型参量。

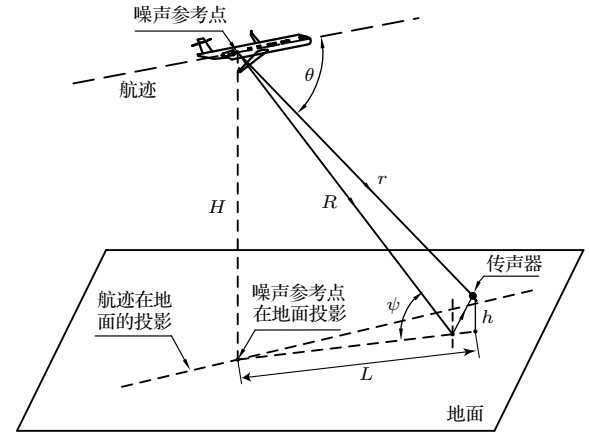


图1 民用飞机噪声测量与声波传播模型

Fig. 1 Schematic of measurement of civil aircraft noise and sound propagation

2.2 地面对 ARJ21-700 飞机噪声测量的影响

ARJ21-700 飞机噪声适航合格审定试验采用等效试飞^[1-2,15]方法,建立了N-P-D (Noise-Power-Distance) 数据库。试验环境、试验方法、试验设备(包括噪声、地面气象、空中气象、航迹和飞机\发动机状态等试验设备)、数据计算方法与数据计算软件等均满足“CCAR-36部”和“ICAO附件16”等要求。飞越噪声测量采用改变发动机功率飞越噪声测量点上空目标高度的试飞方法,如图2所示,共进行了14次有效的飞行试验,发动机功率处于65.1%至99.2%之间(发动机功率表征参量为修正的发动机N1转速^[1])。飞越噪声测量点布置在跑道中心线延长线上,传声器感压面距地面1.2 m,以传声器在地面投影为中心,直径为15 m的地面上的草全部拔除,覆盖以松软碎黏土,铺平整并略微压实。为分析地面对ARJ21-700飞机噪声测量的影响,用倒置传声器装置^[2,16]测得的噪声数据计算飞机的自由场声压级。试验中采用的是压力场型传声器,佩戴防风罩,传声器频响精度满足ANSI S1.4-1983 Type1^[17]要求。

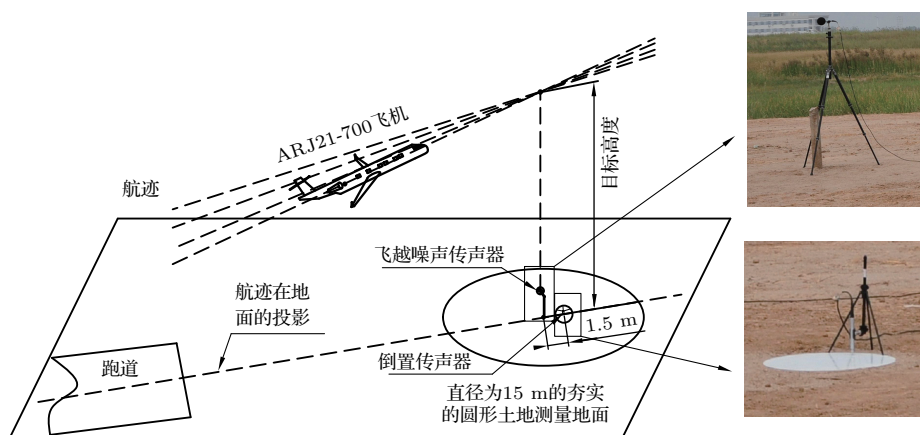


图2 ARJ21-700 飞机飞越噪声测量示意图

Fig. 2 Schematic of flyover noise measurement of ARJ21-700

试验中,倒置传声器通过三脚架倒置在经声学刚性处理的白色圆形薄铝板上,感压面平行于铝板且距其上表面0.007 m,感压面中心在铝板上的投影到铝板中心的距离为铝板半径的3/4倍且位于飞机航迹在地面投影的垂线上,铝板半径为0.2 m,圆心位于飞机航迹在地面的投影线上,紧实地嵌入地面,并进行减振和加固处理。由于倒置传声器感压面距离反射面足够近,尽管试验中在PNLTM-10 dB区间(最大纯音修正感觉噪声级下降10 dB区间)^[1]内飞机位置变化大,但根据图2的和实测飞机航迹计算可知,反射波仍然经由铝板表面反射后传播至感压面,倒置传声器接收的噪声是直达声和经刚性面反射的反射声的叠加。

下面以起飞功率进行的飞越噪声试验为例,给出计算地面对ARJ21-700飞机飞越噪声测量的影响的步骤,并结合实测数据进行具体分析。

第一,根据实测飞机航迹^[18]和气象条件,根据式(2)和图2的噪声传播关系,计算倒置传声器处自由场声压级修正量。图3给出了飞机位于噪声角 θ 为45.5°、87.9°和133.8°位置时的倒置传声器处自由场声压级修正量,可看出,飞机接近和远离飞越噪声测量点过程中,自由场声压级修正量不同,高频部分低于+6 dB。

第二,对实测的飞机在PNLTM-10 dB区间内的噪声(包括飞越噪声和倒置传声器测得的噪声)进行背景噪声、频响等修正^[1]。飞机噪声被背景噪声掩蔽的标准和重建依据“CCAR-36部咨询通告(附件)”^[13]和“ICAO ETM”^[14]给出的方法进行。掩蔽的标准为取检测前噪声+3 dB和检测后噪声+1 dB两者中的较大者。2000 Hz以上频带被掩蔽

噪声的重建采用频率外推法,630 Hz~2000 Hz频带被掩蔽噪声的重建采用时间外推法。需要指出的是,在进行背景噪声修正后进行了噪声测量中常规的传声器频率响应、防风罩和入射方向影响等修正^[1,3],飞越噪声入射方向取掠入射方向,倒置传声器分别考虑直达声和反射声的入射方向。图4给出飞机位于噪声角 θ 为45.5°、87.9°和133.8°位置时的倒置传声器实测的未修正和修正后的声压级对比,可看出当飞机发动机为起飞功率且处于PNLTM-10 dB区间中距离传声器相对较近时,噪声不存在被掩蔽的现象,这对测量的精确度是有利的,但从飞机以不同发动机功率飞越时完整PNLTM-10 dB区间看,飞机发动机功率低或者距离传声器相对远时存在噪声被掩蔽的现象,而且在部分频段传声器频率响应、防风罩和入射方向影响等修正在计算中不能忽略。

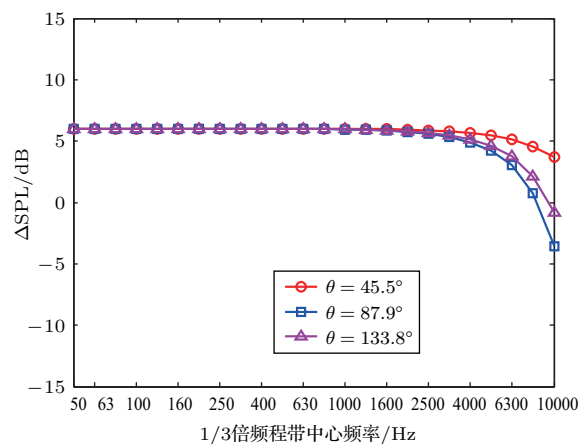


图3 倒置传声器处自由场声压级修正量

Fig. 3 Δ SPL at measuring point of placing inverted-microphone

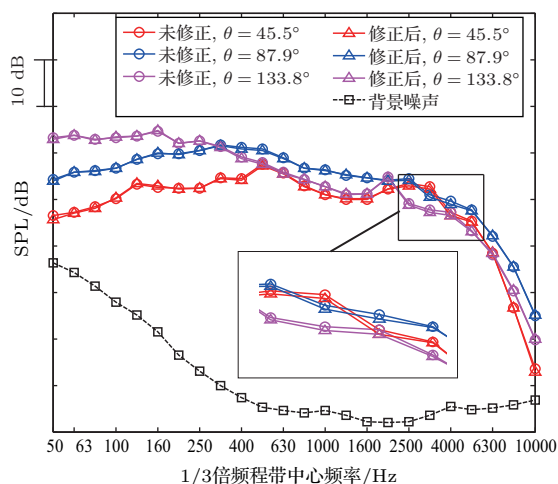


图4 倒置传声器实测和修正后的1/3倍频程谱对比

Fig. 4 Comparison of SPL between measured by inverted-microphone and adjusted

第三,将前述计算的倒置传声器处的自由场声压级修正量和修正后的测量结果相加得到自由场声压级,考虑飞机与测量点相对位置和声波在大气中的发散和衰减^[1-2,19],将其修正至飞越噪声测量点处,即得到飞越噪声测量点处的自由场声压级。图5给出了飞机位于噪声角 θ 为45.5°、87.9°和133.8°位置时的飞越噪声测量点处的实测声压级(同样进行频率响应和背景噪声等修正)和计算的自由场声压级,可看出地面对飞越噪声测量产生了较大影响,实测声压级随频率不同得到不同程度的削弱和加强。

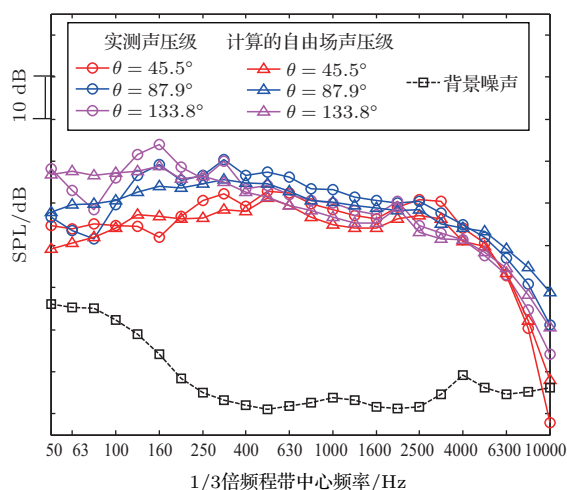


图5 飞越噪声测量点处的实测和自由场声压级对比

Fig. 5 1/3 octave spectrum at measuring point of flyover noise

3 地面对适航合格审定噪声评定的影响

3.1 地面影响与有效感觉噪声级计算

依据“CCAR-36部”,噪声合格审定准则的基本要素是有效感觉噪声级(Effective perceived noise level, EPNL),单位为EPNdB,有效感觉噪声级考虑了飞机噪声对人类主观影响,由经过频谱不规则性修正和持续时间修正的瞬间感觉噪声级组成。在试验中,测量飞机在PNLTM-10 dB区间内持续发出的噪声,每0.5 s计算1次50 Hz~10000 Hz范围对应的24个1/3倍频程带声压级,然后按如下步骤计算有效感觉噪声级:(1)将每个0.5 s的24个1/3倍频程带声压级换算成感觉噪度(呐),将呐值相加得到瞬间感觉噪声级;(2)计算纯音修正因子;(3)根据纯音修正因子和瞬间感觉噪声级计算纯音修正感觉噪声级;(4)进行持续时间修正因子计算;(5)由最大纯音修正感觉噪声级与持续时间修正因子计算有效感觉噪声级。ARJ21-700飞机噪声适航合格审定试验条件与基准条件有差异,还需对噪声数据进行调整,传播路径差异调整、噪声持续时间差异调整等采用“CCAR-36部”中的完整的调整方法^[1],试验场高海拔引起的源噪声调整采用“CCAR-36部”咨询通告(附件)^[12]和“ICAO ETM”^[13]中的方法。

在ARJ21-700飞机噪声适航合格审定试验中,测量点附近地面影响的是对飞机在PNLTM-10 dB区间内持续发出的噪声的测量,地面声阻抗不同影响测得的1/3倍频程带声压级,根据不同地面声阻抗和计算的自由场声压级计算相应的1/3倍频程带声压级,然后重新计算ARJ21-700飞机飞越噪声的基准条件下的有效感觉噪声级(Effective perceived

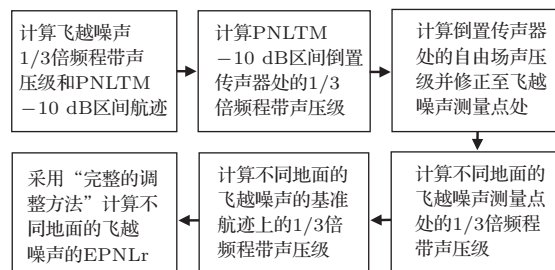


图6 不同地面的飞越噪声有效感觉噪声级计算流程

Fig. 6 Computation procedure of EPNLr of flyover noise of different ground surface

noise level at reference conditions, EPNLr), 并与试验结果进行对比, 即可实现对民机噪声适航审定试验中地面对有效感觉噪声级影响的分析, 计算流程如图6所示。

3.2 不同声阻抗地面对有效感觉噪声级的影响

在噪声适航合格审定试验中, 地面声阻抗不同时测得的飞越噪声不同, 这影响飞越噪声有效感觉噪声级的评定。“CCAR-36部”及其附件并未对地面阻抗做限定, 试验中, 测量点处可能遇到干沙土地面、碎黏土地面和碎石-沙土地面等, 图7给出了三类地面具有代表性的声阻抗率(ζ)^[3,6-7]。下面以这三类典型地面以及声学硬地面为例, 分析不同声阻抗的地面对ARJ21-700飞机飞越噪声有效感觉噪声级的影响。

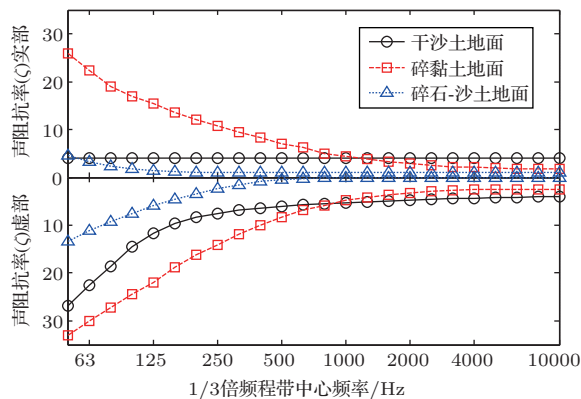


图7 三种地面的声阻抗率

Fig. 7 Specific normal acoustic impedance ratio of three types of ground surface

选择ARJ21-700飞机以起飞功率进行的飞越噪声试验, 图8给出了飞机位于噪声角 θ 为 87.9° 和 133.8° 位置时的飞越噪声测量点处三类地面以及声学硬地面的自由场声压级修正量。可以看出, 飞机飞行过程中噪声源与飞越噪声测量点相对位置发生变化, 自由场声压级修正量的1/3倍频程谱发生变化, 而且不同地面的自由场声压级修正量的1/3倍频程谱也不同, 因此, 在不同地面条件下, 测得的PNLTM-10 dB区间内的1/3倍频程谱不同, 从而影响感觉噪声级和纯音修正因子等结果, 最终影响有效感觉噪声级的评定。

根据图6所示流程并采用完整的调整方法^[1]得到基准条件下的有效感觉噪声级, 与实际适航合格审定试验的结果对比, 如图9所示。可看出, 相同飞越噪声试验条件下, 地面声阻抗条件不同时有效

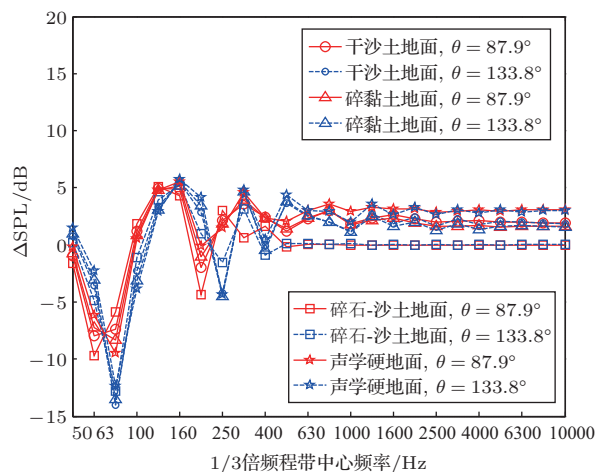


图8 不同地面飞越噪声测量点处自由场声压级修正量

Fig. 8 Δ SPL at flyover noise measuring point of different type of ground surface

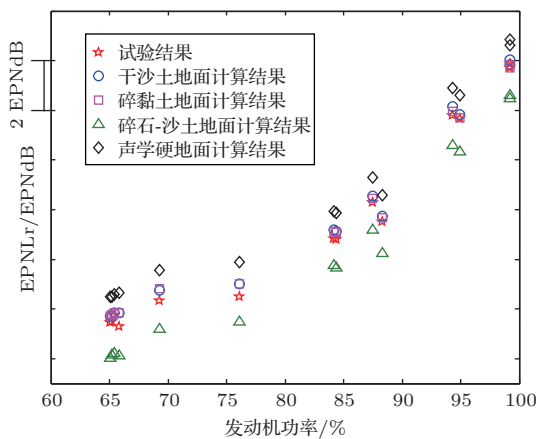


图9 试验得到的EPNLr和不同地面的计算结果对比

Fig. 9 Comparison of measurements and calculated EPNLr of different type of ground surface

感觉噪声级不同, 与试验结果相比, 不同发动机功率情况下, 干沙土地面最大相差 $+0.6$ EPNdB, 碎黏土地面最大相差 -0.2 EPNdB, 碎石-沙土地面最大相差 -1.7 EPNdB, 声学硬地面最大相差 $+1.4$ EPNdB; 实验中飞越噪声传声器附近地面主要是黏土和沙土成分(如图2所示), 因此干沙土地面和碎黏土地面的计算结果与试验结果接近, 碎石-沙土地面计算结果均小于试验结果, 硬地面计算结果均大于试验结果。实际上, 这种不同是试验环境引起的, 在一定试验环境下得到的飞机噪声只能用来评估相应环境下飞机噪声对人的影响, 噪声适航合格审定试验是评估飞机噪声的标准试验, 应尽可能减少试验环境对噪声测量的影响, 或者使试验环境对噪

声测量的影响基本相同。地面声阻抗是试验环境的重要影响因素,在民机噪声适航合格审定试验中应给予充分考虑。

以上对地面影响的分析采用了带有声学刚性反射面的传声器测量的噪声数据来计算飞机自由场声压级,而自由场声压级的计算受试验场的地面温度、风速、风向以及地面大气紊流等的影响^[8-9,20],还受噪声传播距离和试验场背景噪声对飞机噪声掩蔽现象的影响^[9],以及受飞机噪声源分布、倒置传声器装置的安装、铝板的声学处理等^[9,16]的影响。为减小影响,在计算自由场声压级过程中,气象条件的选择、背景噪声监测和修正等均满足“CCAR-36部”的要求,通过多次试验选择气象和背景噪声变化最小的数据,并选择较高的飞越高度来减小飞机噪声源分布影响,采用差分GPS方法提高飞机航迹测量精度和传声器的安装位置精度,倒置传声器铝板依据“ICAO附件16”给出的方法进行声学处理。实际上,对于真实环境下的飞行试验,通常试验条件难以保持严格的理想条件,本文采用的文献^[9]中获得自由场声压级的方法,也是根据文献^[8]中的理论方法,通过对试验中的影响因素进行合理控制或限定使用条件,形成的可满足工程应用精度的“标准”方法。因此,通过前述方法减小试验中不利因素的影响,本文提出的方法可以应用于工程实际,可以作为一种定量分析民机噪声适航合格审定试验中地面对适航合格审定噪声影响的手段。

4 结论

本文提出了一种分析民机噪声适航合格审定试验中地面对适航合格审定噪声影响的方法。借助于在适航合格审定噪声测量点附近布置的倒置传声器,计算飞机自由场声压级,分析地面对飞机噪声测量的影响,根据地面阻抗条件重新计算有效感觉噪声级,定量分析不同地面条件对民机适航合格审定有效感觉噪声级的影响。

将提出的方法应用于ARJ21-700飞机噪声适航合格审定试验,分析了不同于实际试验的地面阻抗对适航合格审定噪声结果的影响。结果表明,噪声测量点区域的地面声学处理对噪声适航合格审定的有效感觉噪声级产生明显影响,在民机噪声适航合格审定试验中应给予考虑。本文给出的方法,可以作为一种定量分析民机噪声适航合格审定试验中地面对适航合格审定噪声影响的手段。

参 考 文 献

- [1] CCAR-36-R1, 航空器型号和适航合格审定噪声规定[S].
- [2] Annex 16 to the convention on international civil aviation, Environmental protection, Volume I, Aircraft noise (Sixth edition)[S].
- [3] Yoerkie C A, Larson R S. Prediction of free field noise levels from pole microphone measurement, AIAA-80-1058[R]. New York: AIAA, 1980.
- [4] Smith M J T. International aircraft noise measurement procedures-expensive acquisition of poor quality data, AIAA-77-1371[R]. Atlanta: AIAA, 1977.
- [5] Gregg G F, Joseph B, Amanda S R, et al. Ground effects in FAA's Integrated noise model[J]. Noise Control Engineering Journal, 2000, 48(1): 16-24.
- [6] Attenborough K. Review of ground effects on outdoor sound propagation from continuous broadband sources[J]. Applied Acoustics, 1988, 24(4): 289-319.
- [7] Pao P S, Wenxel R A, Oncley B P. Prediction of ground effects on aircraft noise, NASA TP-1104[R]. Hampton: NASA, 1978.
- [8] SAE AIR 1327A, Acoustic effects produced by a reflecting plane[S].
- [9] SAE AIR 1672B, Practical methods to obtain free-field sound pressure levels from acoustical measurements over ground surfaces[S].
- [10] Attenborough K, Bashir I, Taherzadeh S. Outdoor ground impedance models[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(5): 2806-2819.
- [11] AC-36-AA-2008-04, 咨询通告: 航空器型号和适航合格审定噪声规定[S].
- [12] AC-36-AA-2008-04, 咨询通告: 航空器型号和适航合格审定噪声规定(附件)[S].
- [13] ICAO Doc 9501, Environmental technical manual on the use of procedures in the noise certification of aircraft (Third edition)[S].
- [14] Rackl R. Correction procedures for aircraft noise data, Volume I: Pseudotones, FAA-EE-80-1/WR79-9[R]. California: Wyle Research, 1979.
- [15] 张晓亮, 张跃林, 宋国智. 大型民用飞机噪声适航合格审定试飞方法研究[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(3): 211-214, 218. Zhang Xiaoliang, Zhang Yuelin, Song Guozhi. Research of noise certification flight test methods for large civil airplanes[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(3): 211-214, 218.
- [16] Willshire W L J, Nystrom P A. Investigation of effects of microphone position and orientation on near-ground noise measurements, NASA TP-2004[R]. Hampton: NASA, 1982.
- [17] ANSI S1.4-1983, Specification for sound level meters[S].
- [18] 张晓亮, 张跃林, 宋亚辉. ARJ-700飞机噪声适航试飞中差分GPS的应用[J]. 中国科技信息, 2014(8): 79-81.
- [19] SAE ARP 866B, Standard values of atmospheric absorption as a function of temperature and humidity[S].
- [20] 马大猷, 沈嶸. 声学手册[M]. 修订版. 北京: 科学出版社, 2004.