

◇ 研究报告 ◇

民机适航审定噪声的纯音修正方法

宋亚辉[†] 张晓亮

(中国飞行试验研究院 飞机所 西安 710089)

摘要 大型运输类民机适航合格审定噪声水平采用有效感觉噪声级来评定,引入纯音修正因子来考虑噪声频谱不规则性对人主观感觉的影响,而纯音修正因子的计算受试验环境、测试系统特性、数据计算精度、纯音频带分割、数据调整方法和虚假纯音等影响,应在计算中给予考虑。根据适航规章要求,对适航审定噪声的纯音修正方法进行了研究。通过分析纯音修正因子计算的影响因素,基于“CCAR-36”基本方法提出了调整后的计算方法和步骤,并对某型民机适航审定试验的噪声进行了纯音修正分析。结果表明,合理地考虑各影响因素对实现纯音修正因子准确计算具有重要意义,该方法能可靠地应用于纯音修正因子计算,提高了纯音修正因子和有效感觉噪声级计算的准确度,可为国产大型民机噪声适航审定提供有益参考。

关键词 民机噪声,纯音修正,适航合格审定,有效感觉噪声级

中图分类号: V216.5+4, TB52+5 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2019)03-0326-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.03.006

An investigation of tone correction method of noise level in civil airplane airworthiness certification

SONG Yahui ZHANG Xiaoliang

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

Abstract The basic element for civil airplane noise airworthiness certification criteria is the effective perceived noise level (EPNL) which consists of instantaneous perceived noise level, tone correction factor, and duration correction factor. Tone correction factor is made to account for the human subjective response to the presence of spectral irregularities. But the impacts that affect tone correction factor calculation method should be considered, including test environment, test system characteristics, accuracy of data calculation, band sharing adjustment of tone, data adjustment method, false tone and so on. Considering the influence factors and the provisions of airworthiness regulation, tone correction method of transport category large airplanes' noise level is investigated. And a modified method which includes integrated practical procedures is presented. Then the method is applied to calculate and analyze the tone correction factors of a certain civil airplane's airworthiness certification noise tests. The results show that the influence factors have significant impact on tone correction factors. This method can be used to obtain tone correction factor precisely and conveniently and it can provide a guidance to domestic civil airplane noise airworthiness certification.

Key words Civil airplane noise, Tone correction, Airworthiness certification, Effective perceived noise level

2018-08-11 收稿; 2018-12-28 定稿

作者简介: 宋亚辉(1985-), 男, 河南鹿邑人, 硕士, 工程师, 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

0 引言

“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”)和“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”)规定,大型运输类民机适航合格审定噪声水平评定量为有效感觉噪声级(Effective perceived noise level, EPNL)。有效感觉噪声级是通过传声器测量的声压级经过一系列计算得到的,考虑了飞机噪声对人主观感觉的影响。通常,飞机噪声频谱中包含有纯音成分^[3],与相同频域分布且声压级相当的噪声相比,具有纯音成分的噪声人耳听起来感觉更大^[4-6]。“CCAR-36”和“ICAO 附件16”规定,在有效感觉噪声级计算中,通过计算纯音修正因子来考虑飞机噪声中纯音成分对人听觉的影响。

有效感觉噪声级是20世纪50~60年代开展的心理学研究的成果^[6-9],用于飞机噪声对人的主观感受的度量,由感觉噪声级经过纯音修正和噪声持续时间修正计算得出。感觉噪声级的计算方法是通过人对白噪声的听觉试验得到的,未考虑纯音成分对人听觉的影响,这就是民机适航审定噪声需要进行纯音修正的原因。实际上,纯音修正因子是一种人为的度量规定,是飞机噪声对人主观影响的一个数值评价量。根据“CCAR-36”和“ICAO 附件16”,有效感觉噪声级有

$$\text{EPNL} = \text{PNLTM} + D, \quad (1)$$

式(1)中,PNLTM为最大纯音修正感觉噪声级, D 是持续时间修正因子,且

$$\text{PNLTM} = \max[\text{PNL}(k) + C(k)], \quad (2)$$

$$D = 10 \lg \left\{ 0.1 \sum_{k=1}^n \left[\Delta t(k) \cdot 10^{\frac{(\text{PNL}(k) + C(k))}{10}} \right] \right\} - \text{PNLTM}, \quad (3)$$

其中: k 为时间段序号,表示将连续测量的飞机噪声以一定时间间隔(通常取0.5 s)分段,对每段数据进行计算; $\text{PNL}(k)$ 是感觉噪声级,由第 k 时间段的中心频率在50 Hz至10 kHz范围的1/3倍频带声压级换算成的感觉噪度(呐)相加得到的; $C(k)$ 是纯音修正因子; $\Delta t(k)$ 为第 k 时间段的时间长度; n 为PNLTM-10区间内包含的时间段个数; $\max(\)$ 表示取最大值。

根据式(1)~(3),在有效感觉噪声级计算中,引入纯音修正因子对噪声水平进行修正。当考虑测量的噪声频谱中的纯音成分时,纯音修正因子影响参与计算的所有中间参量值,影响PNLTM-10区间大小,从而影响有效感觉噪声级结果。实现纯音修正因子的准确计算,对民机适航审定噪声的有效感觉噪声级评定具有重要意义。

国内外适航规章中规定的纯音修正因子计算方法最早可追溯至1969年美国联邦航空管理局发布的“FAR PART 36”^[10],该方法随后被国际民航组织发布的“ICAO 附件16”采用,“CCAR-36”实际上是沿用了该方法^[1,11]。根据“CCAR-36”,纯音修正因子计算由十个步骤组成,但是实际应用中仅采用十个步骤是不够的,纯音修正因子受背景噪声、测试系统频响特性、数据精度、纯音频带分割、数据调整方法和虚假纯音等影响^[12-13],应在计算中考虑,因此需要对纯音修正因子的计算方法和在试验中的应用进行研究。本文基于“CCAR-36”和“ICAO 附件16”中的基本方法,对影响纯音修正因子计算的因素进行分析,将各个影响因素融入具体的计算步骤,得到了可直接应用于大型运输类民机适航审定噪声的纯音修正方法。结合某型民机噪声适航审定试验数据,对该方法进行了验证和应用分析。

1 纯音修正因子计算的影响因素

1.1 噪声测试系统频响修正

根据“CCAR-36”和“ICAO 附件16”,用于纯音修正因子计算的1/3倍频带声压级应进行测试系统频响修正。一般测试系统频响修正^[14-15]包括两部分:一是传声器系统的防风罩和声入射方向影响等修正;二是除传声器外的测试通道的频率响应修正。需要注意的是,被背景噪声掩蔽的噪声在重建后无需进行测试系统频响修正。

1.2 背景噪声修正

适航噪声测量不可避免受到背景噪声影响^[16],“CCAR-36”和“ICAO 附件16”规定,对于被背景噪声掩蔽的频带,计算纯音修正因子时不需要考虑。因此,在计算纯音修正因子前,应完成背景噪声修正。对于纯音修正因子计算而言,主要是确定PNLTM-10区间内飞机噪声被背景噪声掩蔽的频带。掩蔽标准取为试验前后测量的背景噪声的1/3倍频带声压级加上3 dB,若测量的飞机噪声的1/3

倍频带声压级小于以上标准,则认为该频带的飞机噪声被掩蔽,未被掩蔽的最后一个频带称为“最后一个好的频带”(Last good band, LGB)。需要注意的是,LGB应大于等于630 Hz,否则认为这次试验是无效的。背景噪声修正完成后,应将LGB作为纯音修正因子计算的最高频带。

1.3 数据计算精度调整

根据“CCAR-36”和“ICAO附件16”,计算有效感觉噪声级的中间过程噪声数据精度为0.01,但计算纯音修正因子时必须将数据精度调整为0.1。在纯音修正因子计算过程中,需要先识别1/3倍频程谱中的显著纯音成分,在某些情况下,相邻频带微小的声压级差异也可能导致其中一个频带被识别为存在显著纯音,导致出现过度的纯音修正。这实际上是人为制定的识别显著纯音成分的算法导致的,因此通过调整数据精度,减小纯音成分的识别受微小声压级差的影响。

1.4 纯音频带分割修正

“CCAR-36”和“ICAO附件16”规定,应在纯音修正因子计算中证明无重要的显著纯音被记录在相邻的1/3倍频带上,若有显著纯音被记录在两个相邻的1/3倍频带上,应将纯音修正调整到完全记录在单个1/3倍频带上的数值,即进行纯音频带分割修正。纯音频带分割出现的原因是,当飞机纯音成分出现在1/3倍频带边缘附近时,在对噪声数据进行1/3倍频谱分析时,纯音成分可能被计算入相邻两个频带,导致纯音修正因子被低估。

纯音修正因子计算中,必须对PNLTM处出现的纯音频带分割现象进行纯音频带分割修正。令PNLTM出现的时间段序号为 k_M ,相应的纯音修正因子为 $C(k_M)$,出现纯音频带分割的判定标准为 $C(k_M)$ 小于 $C(k_M-2)$ 至 $C(k_M+2)$ 五个纯音修正因子的算术平均值。纯音频带分割修正是调整第 k_M 个时间段的纯音修正因子 $C(k_M)$,令

$$C'(k_M) = \frac{1}{5} [C(k_M-2) + C(k_M-1) + C(k_M) + C(k_M+1) + C(k_M+2)], \quad (4)$$

然后,采用新的纯音修正因子 $C'(k_M)$ 替代原来的纯音修正因子 $C(k_M)$,重新计算PNLTM值和PNLTM-10区间。

1.5 噪声结果向基准条件调整

根据“CCAR-36”和“ICAO附件16”,噪声适航审定试验中的气象条件^[17]、飞行航迹与基准条件不同时,需要将结果调整到基准条件下。这里以完整调整方法为例分析噪声结果向基准条件调整对纯音修正因子计算的影响。完整调整方法需要将背景噪声修正和测试系统频响修正后的1/3倍频带声压级调整至基准条件下,然后按照正常步骤计算有效感觉噪声级,显然纯音修正因子需要重新计算。尽管计算方法相似,但需要进行以下处理:(1)纯音修正因子计算时仍需要将1/3倍频程数据精度调整为0.1;(2)仍然采用实测噪声的LGB作为纯音修正因子计算的最高频带;(3)纯音频带分割修正是针对PNLT_rM对应的纯音修正因子进行,PNLT_rM出现的时刻可能与PNLTM不同。

1.6 虚假纯音修正

噪声测量不可避免受到试验环境的影响,如传声路径上大气不均匀性和扰动、地面对声波传播的影响等,这些影响因素导致测量的噪声频谱中含有非飞机噪声的纯音成分,通常称为虚假纯音^[12-13,18-19]。“CCAR-36”和“ICAO附件16”指出由虚假纯音引起的频谱不规则性在计算纯音修正因子时无需考虑,需要去除其影响,这称为虚假纯音修正。通常虚假纯音可导致纯音修正因子计算值偏大,使有效感觉噪声级被高估。虚假纯音修正应该在纯音分割修正前完成。

2 纯音修正计算方法

考虑测试系统频响修正、背景噪声修正、数据计算精度调整、纯音频带分割修正、虚假纯音修正和噪声结果向基准条件调整等影响因素,基于“CCAR-36”和“ICAO附件16”中的计算纯音修正因子的方法,将纯音修正因子的具体计算步骤调整为

(1) 对第 k 个时间段的实际噪声1/3倍频带声压级进行测试系统频响修正。

(2) 对第 k 个时间段的噪声1/3倍频带声压级进行背景噪声修正,找出LGB(k)。

(3) 将1/3倍频带声压级数据精度调整为0.1。

(4) 计算第 k 个时间段的1/3倍频带声压级的变化,即频带声压级的斜率,有

$$s(i, k) = \text{SPL}(i, k) - \text{SPL}(i-1, k), \quad 4 \leq i \leq 24, \quad (5)$$

式(5)中, i 为中心频率在 50 Hz~10 kHz 范围的 1/3 倍频带序号, 取 $4 \leq i \leq 24$; $\text{SPL}(i, k)$ 表示第 k 个时间段的第 i 个 1/3 倍频带声压级。

(5) 圈出斜率变化的绝对值 $\Delta s(i, k)$ 大于 5 的 $s(i, k)$, 而

$$\Delta s(i, k) = |s(i, k) - s(i-1, k)|, \quad 5 \leq i \leq 24. \quad (6)$$

(6) 若圈出的 $s(i, k)$ 的数值为正, 且 $s(i, k) > s(i-1, k)$, 则圈出 $\text{SPL}(i, k)$, 若圈出的 $s(i, k)$ 的数值小于等于零, 且 $s(i-1, k) > 0$, 则圈出 $\text{SPL}(i-1, k)$ 。

(7) 对未圈出的声压级, 令新的声压级 $\text{SPL}'(i, k)$ 等于原声压级 $\text{SPL}(i, k)$, 对圈出的声压级, 有

$$\text{SPL}'(i, k) = \begin{cases} 0.5 [\text{SPL}(i-1, k) + \text{SPL}(i+1, k)], & 1 \leq i \leq i_{\text{LGB}(k)} - 1, \\ [\text{SPL}(i_{\text{LGB}(k)} - 1, k) + s(i_{\text{LGB}(k)} - 1, k)], & i = i_{\text{LGB}(k)}, \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, i_{LGB} 是 k 时刻背景噪声修正 LGB 的频带序号。

(8) 根据第(7)步计算的新声压级计算频带声压级的斜率, 有

$$s'(i, k) = \begin{cases} s'(4, k), & i = 3, \\ \text{SPL}'(i, k) - \text{SPL}'(i-1, k), & 4 \leq i \leq i_{\text{LGB}(k)}, \\ s'(i_{\text{LGB}(k)}, k), & i = i_{\text{LGB}(k)} + 1. \end{cases} \quad (8)$$

(9) 计算第(8)步的频带声压级的斜率的算术平均值, 即

$$\bar{s}(i, k) = \frac{1}{3} [s'(i, k) + s'(i+1, k) + s'(i+2, k)], \quad 3 \leq i \leq i_{\text{LGB}(k)} - 1. \quad (9)$$

(10) 按式(10)计算 1/3 倍频带本底声压级, 即

$$\text{SPL}''(i, k) = \begin{cases} \text{SPL}(3, k), & i = 3, \\ [\text{SPL}''(i-1, k) + \bar{s}(i-1, k)], & 4 \leq i \leq i_{\text{LGB}(k)}. \end{cases} \quad (10)$$

(11) 计算原声压级与本底声压级的差 $F(i, k)$, 记录等于或大于 1.5 的值, 而

$$F(i, k) = \text{SPL}(i, k) - \text{SPL}''(i, k). \quad (11)$$

(12) 根据 $F(i, k)$ 的值按照“CCAR-36”中表 A36-2 要求计算 1/3 倍频带纯音修正因子 $C_{\text{temp}}(i, k)$ 。

(13) 按式(12)计算纯音修正因子 $C(k)$,

$$C(k) = \max [C_{\text{temp}}(i, k)], \quad 3 \leq i \leq i_{\text{LGB}(k)}. \quad (12)$$

(14) 按式(13)将 1/3 倍频带声压级 $\text{SPL}(i, k)$ 调整至基准条件下, 然后按照步骤(3)至步骤(13)计算基准条件下的纯音修正因子 $C_r(k)$, 其中背景噪声修正的 LGB(k) 仍然采用步骤(1)的结果。

$$\begin{aligned} & \text{SPL}_r(i, k) \\ &= \text{SPL}(i, k) + \frac{[\alpha(i) - \alpha_0(i)]}{100} QK(k) \\ &+ \frac{\alpha_0(i)}{100} [QK(k) - Q_r K_r(k)] \\ &+ 20 \lg \left[\frac{QK(k)}{Q_r K_r(k)} \right], \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)中, $\alpha(i)$ 和 $\alpha_0(i)$ 分别是试验和基准条件下的声衰减系数, $QK(k)$ 和 $Q_r K_r(k)$ 分别是试验和基准条件下的传声路径长度。

(15) 对试验和基准条件下的纯音修正因子进行虚假纯音修正, 对于识别出存在虚假纯音的频带 i_a , 令步骤(11)的 $F(i_a, k)$ 为零, 按照步骤(12)至步骤(14)重新计算纯音修正因子。

(16) 对 PNLTM 所处的第 k_M 个时间段对应的试验和基准条件下的纯音修正因子 $C(k)$ 和 $C_r(k)$ 进行纯音频带分割修正。

至此, 完成了试验条件下和基准条件下的纯音修正因子的计算, 然后采用式(1)至式(3)即可进行有效感觉噪声级的计算。

3 试验验证与分析

图1为国产某型运输类喷气式民机适航噪声试验示意图。采用等效试飞方法^[1-2]进行飞越、横侧和进场噪声试验。飞越噪声和进场噪声试验采用改变发动机功率(发动机功率表征参量为修正的 $N1$

归一化转速^[1]飞过噪声测量点上空相同目标高度的方法,横侧噪声采用同一发动机功率飞过噪声测量点上空不同目标高度的方法,飞行试验采用航迹切入法^[20]。

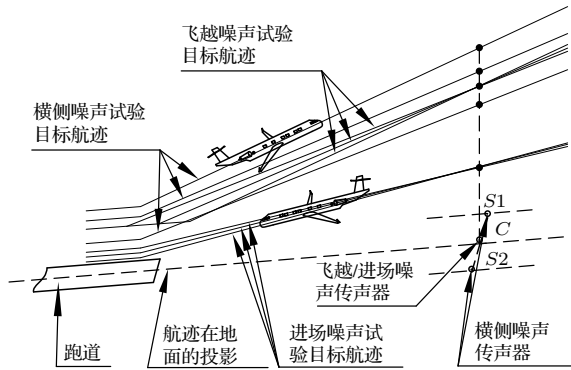


图1 某型运输类喷气式民航机适航噪声试验

Fig. 1 Noise flight tests of a certain civil transport category jet airplane

图2给出了飞越(发动机功率为87.5%,过顶高度为373.9 m)、横侧(发动机功率为95.7%,过顶高度为314.0 m)和进场(发动机功率为66.1%,过顶高度为131.2 m)噪声试验PNLTM-10区间内的LGB。可以看出,PNLTM-10区间内飞越、横侧和进场实测噪声存在不同程度的高频噪声掩蔽,影响纯音修正因子计算时的最高频带选择,应在纯音修正因子计算时先进行背景噪声修正。

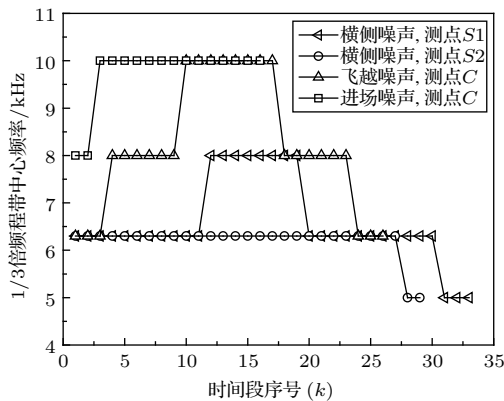


图2 实测飞越、横侧和进场噪声的LGB

Fig. 2 LGB of flyover, lateral and approach noise

图3为飞越噪声试验(发动机功率为87.5%,过顶高度为373.9 m)的声压级结果,给出了PNLTM-10区间开始时刻、PNLTM时刻和结束时刻的试验和基准条件下的声压级。可以看出,各时刻的1/3倍频带声压级频谱存在频谱不规则性,由于声波传播

的多普勒效应^[21]、声传播特性和飞机噪声源变化等影响,频谱不规则性存在的频带不同。将1/3倍频带声压级由试验条件向基准条件下调整并未显著改变频谱的不规则性存在的频带,但声压级值的变化可导致纯音修正因子不同。

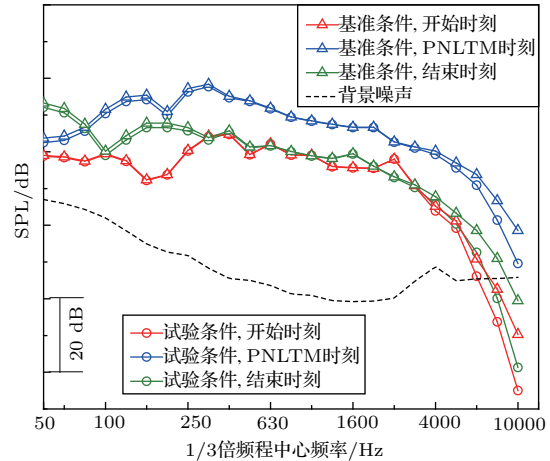


图3 飞越噪声试验的声压级结果

Fig. 3 SPL spectrum of flyover noise test

图4给出了飞越噪声试验(发动机功率为87.5%,过顶高度为373.9 m)基准条件下PNLTM-10区间内的纯音修正因子及其所处频带。可看出,噪声频谱中存在显著的纯音成分。基准条件下PNLT_rM时刻纯音修正因子值显著小于前后时刻的值,经计算存在频带分割,需要进行纯音频带分割修正。从所有的飞越、横侧和进场噪声试验结果看,出现纯音频带分割与航迹、噪声源特性等有关,但难以确定规律,在计算纯音修正因子的最后一个步骤进行纯音频带分割判定和修正是必要的。

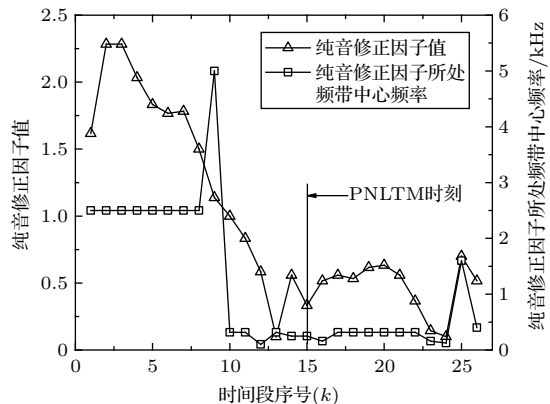


图4 飞越噪声试验基准条件下纯音修正因子及其所处频带

Fig. 4 Tone correction factor and it's frequency band under reference conditon of flyover noise test

分析图4还可以发现,在 k 为10~24时,纯音修正因子出现在100 Hz~315 Hz的低频频带,且出现的频带出现了多次变化,可能存在虚假纯音。图5给出了背景噪声修正和系统频响修正后的飞越噪声的声压级频谱的时间历程,几乎所有噪声频谱在630 Hz以下都有明显的频谱不规则性,这些频谱的“峰”和“谷”在飞机飞越测量点过程中呈现出先向低频移动后向高频移动的变化趋势。试验中飞机以稳定飞行状态飞越测量点,与测量点相向运动速度呈现单调减小的趋势,根据多普勒效应,飞机发出的纯音的频率应一直向低频移动。可以判定,飞越噪声频谱中含有地面对声波传播影响等引起的虚假纯音。因此,纯音修正因子计算还需要进行虚假纯音识别和修正。

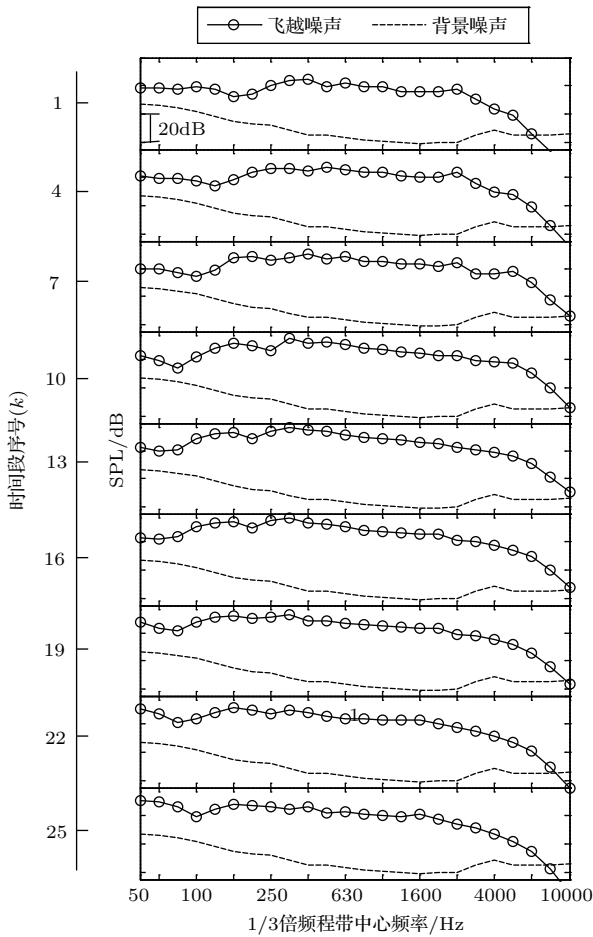
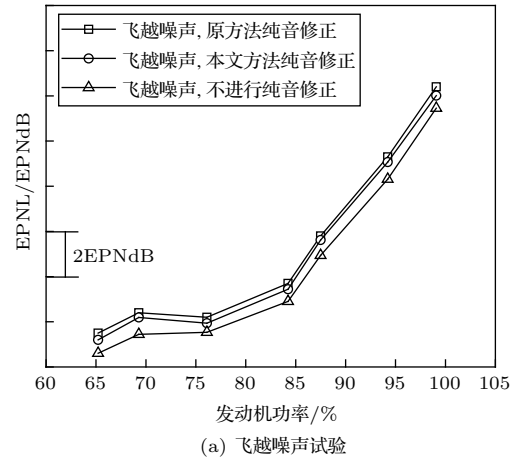


图5 飞越噪声试验的声压级频谱的时间历程

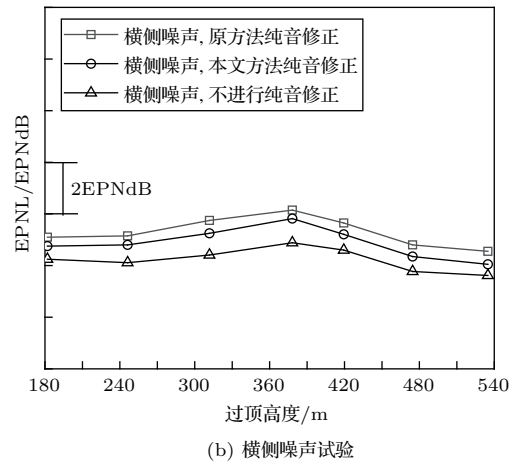
Fig. 5 Time history of SPL spectrum during fly-over noise test

根据“CCAR-36”和“ICAO 附件16”,是否对噪声数据进行纯音修正由噪声频谱中是否存在显著纯音确定的,分析图1中国产某型民机适航噪声

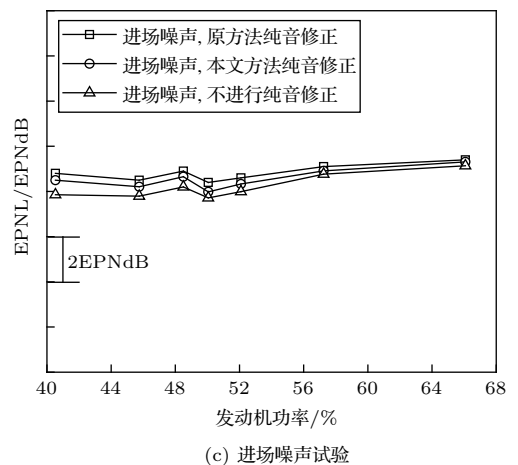
试验得到的所有试验数据发现,飞越、横侧和进场噪声PNLTM-10区间内大部分的声压级频谱都存在显著纯音,需要进行纯音修正。为分析纯音修正对噪声适航审定结果的影响,采用式(1)进行有效感觉噪声级计算,图6给出了纯音修正对有效感觉噪声级的影响对比,图中分别给出了采用本文方法



(a) 飞越噪声试验



(b) 横侧噪声试验



(c) 进场噪声试验

图6 纯音修正对EPNL的影响
Fig. 6 Influence of tone correction on EPNL

考虑背景噪声影响、虚假纯音影响、纯音频带分割等的结果与不考虑以上影响因素的结果以及不考虑纯音修正的结果。可看出,考虑纯音修正的情况下,飞越、横侧和进场噪声试验的有效感觉噪声级均增大,说明当飞机噪声频谱中存在纯音成分时,使人在听觉上感觉噪声增大,进行纯音修正能得到更为真实反应人听觉的结果。而且,采用本文方法得到的有效感觉噪声级比采用原方法的小,表明若不考虑纯音修正因子计算的诸多影响因素,使得有效感觉噪声级被高估,由于本文方法去除了非飞机纯音影响因素的影响,其结果更为符合“CCAR-36”和“ICAO附件16”的规定。因此,考虑纯音修正因子计算的影响因素,研究纯音修正因子的实用计算步骤,实现纯音修正因子的准确计算,对民用飞机适航审定噪声的有效感觉噪声级评定具有重要意义。

4 结论

(1) 本文基于“CCAR-36”和“ICAO附件16”的基本方法和规定,得到了适航审定有效感觉噪声级的纯音修正因子完整的计算方法和计算步骤。该方法考虑了规章中要求的影响因素,并将对各影响因素的考虑融入计算步骤,对规章中的基准计算步骤进行了调整。

(2) 通过将该方法应用于某型国产运输类民机适航审定试验的噪声的纯音修正因子计算和分析表明,实现纯音修正因子准确计算对适航审定噪声的评定有重要意义,本文方法可以直接应用于纯音修正因子计算,能可靠地在计算步骤中考虑各影响因素,避免纯音修正因子被高估,提高了有效感觉噪声级计算的准确度,可为国产C919、MA700和AG600等大型运输类民机型号适航合格审定噪声试验提供指导。

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] GB/T 3947-1996, 声学名词和术语[S].

[4] May D N, Watson E E. Correction procedures for aircraft noise data, Volume IV: tone perception, FAA-EE-80-1, Vol. IV/WR79-9, Vol. IV[R]. California: Wyle Research, 1980.
 [5] Little J W. Human response to jet engine noises[J]. Noise Control, 1961, 7(3): 11-13.
 [6] More S R. Aircraft noise characteristics and metrics[D]. West Lafayette, Indiana: Purdue University, 2011.
 [7] 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].
 [8] AC 36-4C, Advisory circular noise standards: aircraft type and airworthiness certification[S].
 [9] Kryter K D. Loudness of annoyance-value bands of noise[C]. Transactions of the 30th Annual Meeting of the National Forum on Deafness and Speech Pathology, St. Louis MO, 1948.
 [10] FAR PART 36, Noise standards: aircraft type and airworthiness certification[S].
 [11] 杨青青, 郝晓帆, 解江, 等. 航空器噪声环境影响评定方法发展趋势研究[J]. 航空标准化与质量, 2017(3): 25-31, 35.
 [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] ISO 3891-1978, Acoustics-procedure for describing aircraft noise heard on the ground[S].
 [15] GB/T 9661-1988, 机场周围飞机噪声测量方法[S].
 [16] Sutherland L, Parkinson J, Hoy D. Correction procedures for aircraft noise data, Volume II: Background noise considerations, FAA-EE-80-1, Vol. II/WR79-9, Vol. II[R]. California: Wyle Research, 1979.
 [17] SAE ARP 866B, Standard values of atmospheric absorption as a function of temperature and humidity[S].
 [18] Rackl R. Correction procedures for aircraft noise data, Volume I: Pseudotones, FAA-EE-80-1, Vol. I/WR79-9, Vol. I[R]. California: Wyle Research, 1979.
 [19] 宋亚辉, 张晓亮, 张跃林. 民机噪声适航合格审定试验中地面影响研究[J]. 应用声学, 2018, 37(6): 927-933.
 Song Yahui, Zhang Xiaoliang, Zhang Yuelin. Effect of ground surface on civil aircraft airworthiness certification noise results[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(6): 927-933.
 [20] 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.
 [21] 马大猷, 沈喆. 声学手册[M]. 修订版. 北京: 科学出版社, 2004.