民用飞机噪声适航审定中伪纯音影响的去除方法

宋亚辉，卢晓东，张晓亮，张跃林
(中国飞行试验研究院飞机所，陕西西安 710089)

摘要：在民用飞机噪声适航合格审中计算有效感觉噪声级时，通过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，但布置在地面上的传声器测量的噪声频谱中含有地面影响导致的伪纯音，使得纯音修正因子可能被高估，需要加以识别并去除。该文提出了一种识别和去除地面影响引入的伪纯音对纯音修正因子计算影响的飞行试验方法和分析方法。在适航噪声测量点旁布置倒置传声器，得到飞机直达噪声，可靠地识别实测适航噪声频谱中的伪纯音，基于“CCAR-36 部”及其附件中方法的改进方法，去除伪纯音对纯音修正因子计算的影响。通过某型民机噪声适航审定飞行试验对该方法进行了验证，结果表明该方法满足“CCAR-36 部”等规章要求，易于试验和分析实现，能准确去除由地面影响引入的伪纯音影响，提高了有效感觉噪声级的计算准确度。

关键词：民机噪声；伪纯音；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：**1000-3630(2019)-02-0200-06
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.02.015

Treatment of the influence induced by pseudo tone in civil airplane noise airworthiness

SONG Ya-hui, LU Xiao-dong, ZHANG Xiao-liang, ZHANG Yue-lin
(*Aircraft Flight Test Technology Institute*, *Chinese Flight Test Establishment*, *Xi'an* 710089, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: Tone correction factor is introduced to account for the influence of noise spectral irregularities on human subjective sensation when calculating the effective perceived noise level (EPNL) in civil airplane noise airworthiness certification. But the flight noise acquired by microphone mounted above ground contains pseudo tones induced by ground interference effect and the pseudo tones usually cause the tone correction factor to be overestimated. In order to identify and remove the influence of pseudo tones on tone correction factor, the flight test and data analysis method are presented. During flight tests an inverted-microphone device placed nearby reference noise measuring point is used to identify the pseudo tones precisely. On the basis of the treatment methods recommend by CCAR-36 and its annex, a new method of removing the influence of pseudo tones is presented. Then the flight test and data analysis method are verified by flyover noise tests of a certain civil airplane. The results show that the methods can identify and remove the influence of pseudo tones more precisely and conveniently and still meet the requirements of airworthiness regulations.

Key words: civil aircraft noise; pseudo tone; tone correction; airworthiness certification; effective perceived noise level

0 引 言

根据中国民用航空局的《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”)，运输类大飞机、喷气式飞机和直升机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)，考虑了飞机噪声对人类的主观影响，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。在有效感觉噪声级的计算过程中，频谱不规则性修正是通过计及纯音修正因子实现的。计算纯音修正因子的数据来自于布置在地面上的传声器测量的噪声频谱，不可避免地受到试验环境的影响[3-5]，主要有三个方面：(1) 传声路径上大气不均匀性和扰动；(2) 地面对声波传播的影响；(3) 噪声频谱分析和数据修正方法。这些影响因素导致测量的噪声频谱中含有非飞机噪声的频谱不规则性成份，通常称为伪纯音。“CCAR-36 部”及其咨询通告(附件)[4]和“ICAO ETM”[5]中指出，由飞机噪声源产生的纯音适用于纯音修正因子计算，由伪纯音引起的频谱不规则性在计算中无需考虑，需要去除其影响。通常，若不识别和去除由地面对声波传播影响引入的伪纯音

收稿日期：2018-06-19; **修回日期：**2018-07-30
作者简介：宋亚辉(1985－)，男，河南鹿邑人，硕士，工程师，研究方向为飞行器结构动力学、航空声学。
通讯作者：宋亚辉，E-mail: songyahuilym@163.com

对纯音修正因子计算的影响，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。

“CCAR-36 部”A36.4.3 条中给出了一种通过窄带分析来识别和去除伪纯音的方法，这是一种精确地完全去除伪纯音影响的方法，但是依靠窄带分析等手段识别并量化伪纯音非常困难，而且该条款也没有给出具体的计算方法。“CCAR-36 部”咨询通告(附件)和“ICAO ETM”中推荐了伪纯音识别思路，并给出了与“CCAR-36 部”中方法等效的伪纯音去除方法，但也存在应用困难：一是因为其并未给出如何利用这些方法进行伪纯音识别，二是伪纯音去除方法存在过修正可能，当伪纯音存在的频带与飞机真实纯音的频带重合时，去除伪纯音影响时也去除了飞机真实纯音影响，导致纯音修正因子被低估。

“CCAR-36 部”咨询通告(附件)和“ICAO ETM”中推荐的频率跟踪、窄带分析和检查噪声时间历程的伪纯音识别方法本质上是一类方法，Rackl R[6]通过飞行试验和数据计算表明，由于大气湍流和测量点地面声学特性不均匀等，实测频谱中纯音和伪纯音的多普勒频移规律并不理想，这三种方法难以可靠地识别和去除伪纯音影响。美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)认可一种依赖于频率跟踪和检查噪声时间历程等方法的频率截断法[6]，即在计算纯音修正因子时忽略截断频率(一般是 800 Hz)以下的频谱不规则性，频率截断法能起到效果，但仅适合于特定机型的特定飞行状态。实际上，改变传声器高度的方法是一类易于实现且精度相对高的伪纯音识别方法。FLEMING 等[3]和 RACKL[6]通过将适航噪声传声器提高至离地 10 m，减弱了伪纯音的影响，但改变适航噪声传声器的高度不符合国内外适航规章要求。众多研究者在研究地面对飞机噪声传播的影响时，形成了一种在地面布置带刚性反射面的倒置传声器的试验方法[7-8]，将这种设置辅助的倒置传声器的试验方法与噪声适航审定试验相结合，可用于伪纯音的精确识别。

“CCAR-36 部”咨询通告(附件)和“ICAO ETM”中的伪纯音去除方法的思路是，在识别出伪纯音出现的频带后，令纯音修正因子计算步骤中这些频带的 1/3 倍频程带纯音修正因子等于零，然后重新计算纯音修正因子。实际应用这一方法时，若识别伪纯音时也对飞机的真实纯音进行识别，避免过修正，则能更合理地去除伪纯音的影响。基于以上分析，本文提出了一种满足适航规章的、可靠的识别和去除伪纯音影响的试验和分析方法，并结合某型民机噪声适航合格审定试验对该方法进行了验证。

1　伪纯音的影响

根据“CCAR-36 部”和“ICAO 附件 16”，评价运输类大飞机和喷气式飞机适航噪声采用的是有效感觉噪声级，有

$$\mathrm{EPNL}=\mathrm{PNLTM}+D \tag{1}$$

式中，EPNL 为试验条件下的有效感觉噪声级，PNLTM 是最大纯音修正感觉噪声级，是纯音修正感觉噪声级 $\mathrm{PNLT}(k)$ 的最大值，D 是持续时间修正因子，而

$$D=10\lg\left[\sum_{k=1}^{n}10^{0.1\mathrm{PNLT}(k)}\right]-\mathrm{PNLTM}-13 \tag{2}$$

$$\mathrm{PNLT}(k)=\mathrm{PNL}(k)+C(k) \tag{3}$$

其中，k 为 0.5 s 间隔的时间段序列号，$\mathrm{PNL}(k)$ 是瞬间感觉噪声级，n 为 PNLTM−10 区间对应时间包含的 0.5 s 时间间隔的个数，$C(k)$ 是纯音修正因子。

通常噪声适航审定试验中气象条件、飞行航迹可能与基准条件不同，需要将结果调整到基准条件下，采用“完整的修正方法”[4-5]，有

$$\mathrm{EPNL_r}=10\lg\left\{0.1\sum_{k=1}^{n}\left[\Delta t_{\mathrm{r}}(k)10^{0.1\mathrm{PNLT_r}(k)}\right]\right\} \tag{4}$$

式中，$\mathrm{EPNL_r}$ 为基准条件下的有效感觉噪声级，$\mathrm{PNLT_r}(k)$ 是基准条件下的瞬间感觉噪声级，$\Delta t_{\mathrm{r}}(k)$ 是基准条件下的时间间隔。

根据“CCAR-36 部”和“ICAO 附件 16”中纯音修正因子计算步骤可看出，伪纯音的存在影响规章中的步骤(7)计算的平滑纯音后的伪宽带噪声级，从而影响纯音修正因子值。从式(1)～式(4)可以看出，纯音修正因子影响 $\mathrm{PNLT}(k)$ 值和 $\mathrm{PNLT_r}(k)$ 值，还影响 PNLTM−10 区间和 $\mathrm{PNLTM_r}$−10 区间的大小，从而影响有效感觉噪声级结果。因此，应在计算纯音修正因子时识别和去除伪纯音影响，而且应在纯音频带分割修正[1-2]前进行。

2　伪纯音影响的识别与去除方法

2.1　伪纯音影响的识别方法

图 1 为民机适航噪声测量和声传播示意图，沿路径 r 和 r' 传播的是飞机噪声的直达噪声，沿路径 R 和 R' 传播的是飞机噪声的地面反射噪声，倒置传声器装置布置在适航噪声传声器旁，传声器倒置在刚性反射面上。试验中飞机与传声器距离较远，将噪声源看作集中于噪声参考点的点声源，则倒置传声器处的飞机直达噪声频带声压级 $\mathrm{SPL_{ifree}}(i)$ 为[7-8]

$$\mathrm{SPL}_{\mathrm{ifree}}(i)=\mathrm{SPL}_{\mathrm{itest}}(i)-10\lg[1+(r'/R')^2+2(r'/R')C_\tau(i)] \tag{5}$$

式中，$\mathrm{SPL}_{\mathrm{itest}}(i)$ 是倒置传声器实测频带声压级，i 为频带序号，r' 和 R' 分别是倒置传声器接收的直达声和反射声传播距离，C_τ 为特定带宽自相关系数。

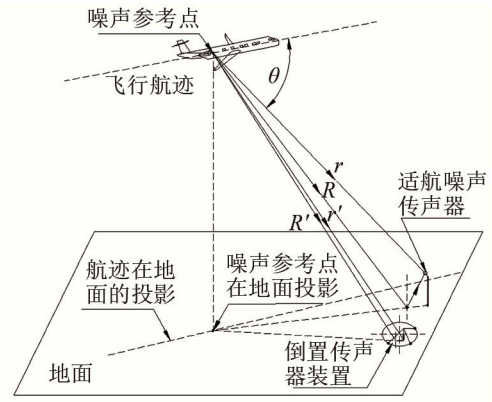


图 1 民机适航噪声测量和声传播示意图

Fig.1 Schematic diagram of civil airplane noise measurement and the sound propagation

对式(5)得到的倒置传声器处飞机直达噪声进行传播路径和声衰减调整[1-2,9]，即得到适航噪声测点处飞机直达噪声频带声压级 $\mathrm{SPL}_{\mathrm{free}}(i)$，有

$$\mathrm{SPL}_{\mathrm{free}}(i)=\mathrm{SPL}_{\mathrm{ifree}}(i)+0.01\alpha(i)(r'-r)+20\lg(r'/r) \tag{6}$$

式中，r 是适航噪声传声器接收的直达声传播距离，$\alpha(i)$ 是第 i 个频带的声衰减系数。

为进行伪纯音识别，令

$$\Delta\mathrm{SPL}(i)=\mathrm{SPL}_{\mathrm{test}}(i)-\mathrm{SPL}_{\mathrm{free}}(i) \tag{7}$$

式中，$\mathrm{SPL}_{\mathrm{test}}(i)$ 是适航噪声传声器实测的频带声压级。则伪纯音出现的频带应是 $\Delta\mathrm{SPL}(i)$ 频谱所有大于零的极大值所在频带[10]，即实现了伪纯音的识别。

2.2 伪纯音影响的去除方法

为避免当伪纯音与飞机真实纯音的频带重合时带来过修正，对式(6)得到的适航噪声测点处飞机直达噪声进行频谱不规则性分析，识别飞机真实纯音及其频带，判断伪纯音与飞机真实纯音的频带是否存在重合。借鉴“CCAR-36 部”咨询通告(附件)和“ICAO ETM”中的伪纯音去除方法，可得以下改进的去除伪纯音影响的方法。

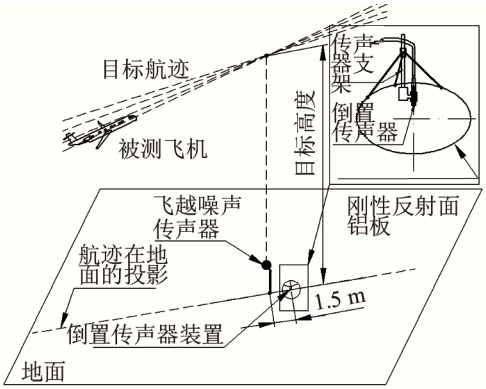
按照规章中的步骤[1-2]计算实测适航噪声的 1/3 倍频程带纯音修正因子及其所有不为零的频带 n_i 和纯音修正因子及其频带 N(若纯音修正因子为 0，认为 N 不存在)，采用式(6)的计算结果按照规章中的步骤计算 1/3 倍频程带纯音修正因子所有不为零的频带 m_i 和纯音修正因子所在频带 M (若纯音修正因子为 0，认为 M 不存在)，采用式(7)找出可能的伪纯音所在的 1/3 倍频程带 p_i 。分以下几种情况处理：(1) 若 N 和 M 都存在且 $N=M$，表明实测适航噪声纯音修正因子计算未受伪纯音影响，无需识别和去除伪纯音影响；(2) 若 N 不存在，表明实测适航噪声频谱不规则性可忽略，无需识别和去除伪纯音影响；(3) 若 N 和 M 都存在且 $N\neq M$，表明实测适航噪声纯音修正因子计算受伪纯音影响，令规章中的步骤(9)的频带为 p_i 且不为 m_i 的 1/3 倍频程带纯音修正因子等于零，重新计算纯音修正因子；(4) 若 M 不存在，表明真实飞机噪声频谱中的频谱不规则性可忽略，实测适航噪声频谱的不规则性是由伪纯音引起的，可令实测适航噪声计算的纯音修正因子为零，但为避免过度修正，令规章中的步骤(9)的频带为 p_i 的 1/3 倍频程带纯音修正因子等于零，重新计算纯音修正因子。

基准条件下纯音修正因子计算中伪纯音的识别和去除仍采用上述方法。以完整调整方法为例，将飞越噪声向基准条件调整时，也将倒置传声器实测及其计算的飞机直达噪声向基准条件调整，然后按上述方法识别和去除伪纯音影响。

3 试验验证与分析

图 2 所示为某型运输类喷气式民机适航审定飞越噪声试验，飞越噪声测量点布置在飞机航迹在地面的投影线上，离地高度为 1.2 m，为识别飞越噪声测量中的伪纯音，在飞越噪声测量点旁布置倒置传声器装置。倒置传声器布置在经声学刚性处理的白色圆形薄铝板上方，感压面平行于铝板且距其上表面 0.007 m，铝板上表面与地面平齐。按照“CCAR-36 部”要求，采用改变发动机功率飞越噪声测量点上空目标高度的等效试飞方法[11-12]，发动机功率处于 65.2%～99.2%之间(发动机功率表征参量为修正的 N1 转速[1])，得到了 7 组有效的飞行试验结果。

图 3 为发动机功率为 65.2%的飞越噪声试验的结果，图中给出了覆盖 PNLTM−10 区间内的结果。根据图 3(a)和图 3(b)，在中心频率为 1 000 Hz 以下频带，实测噪声受地面影响较大，频谱不规则性明显，而从图 3(d)可以看出，直达噪声的纯音修正因子所处频带在 750 Hz 以下，显然飞机真实的显著纯音和伪纯音存在频带重合，结合图 3(c)可以看出，多个时刻的纯音修正因子受到了伪纯音影响。对比图 3(e)和图 3(d)，若采用规章中的方法将所有受伪纯音影响的频带都去除，得到的大部分纯音修正因子都不在飞机真实显著纯音所处频带，也即是出现

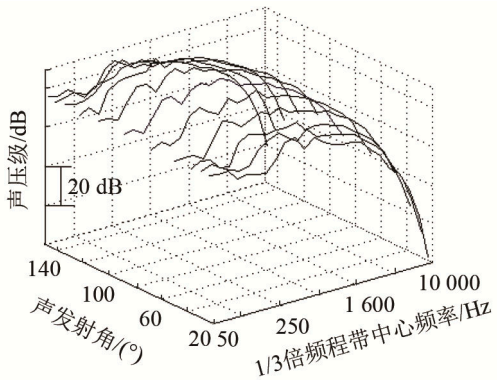


(a) 飞越噪声试验方案示意图

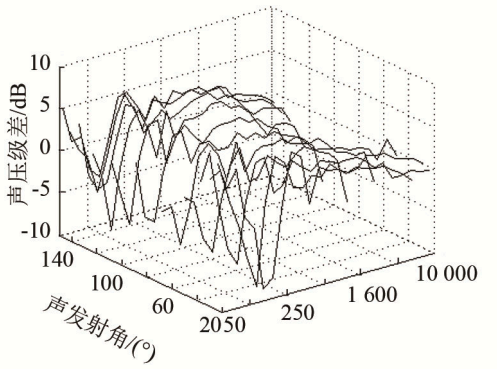
(b) 飞越噪声试验

图 2　某型运输类喷气式民机飞越噪声试验

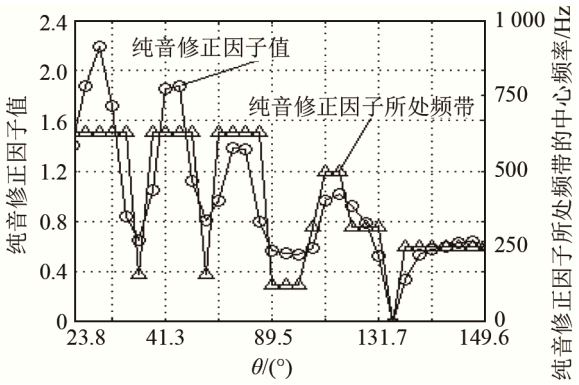
Fig.2　Flyover noise tests of a certain civil transport category jet airplane



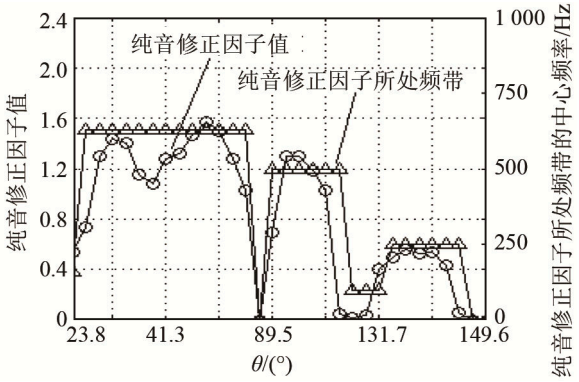
(a) 飞越噪声实测声压级



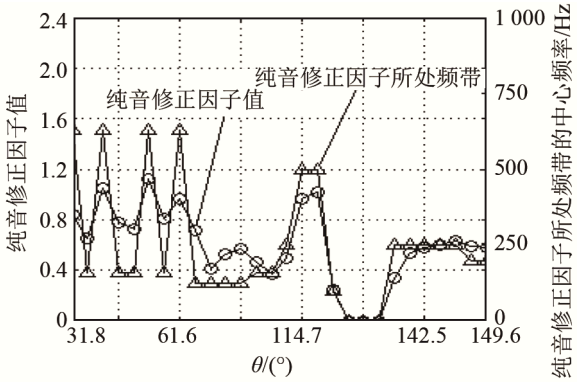
(b) 飞越噪声与计算的直达噪声声压级差



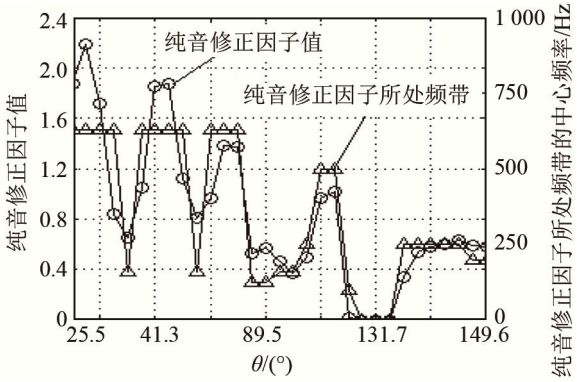
(c) 纯音修正因子，不去除伪纯音



(d) 飞机直达噪声纯音修正因子



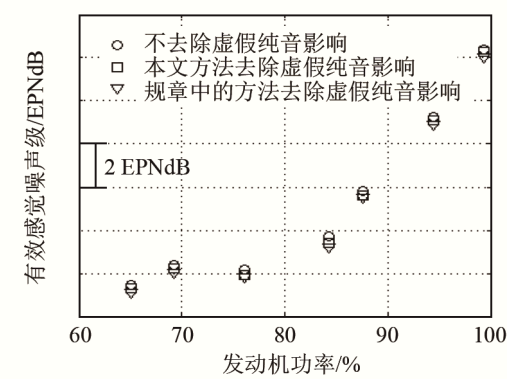
(e) 纯音修正因子，规章中的方法去除伪纯音



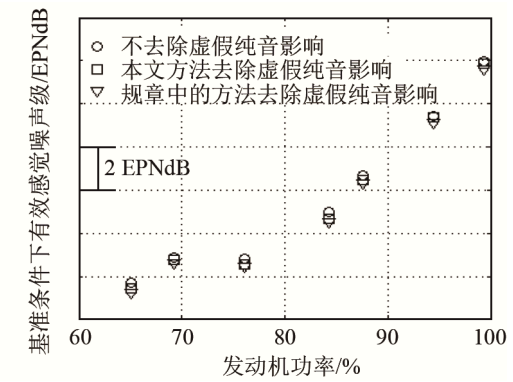
(f) 纯音修正因子，本文方法去除伪纯音

图 3　发动机功率为 65.2%的飞越噪声试验结果

Fig.3　Flyover noise test results when engine power indicator $N1C = 65.2\%$



(a) 实测试验条件有效感觉噪声级



(b) 基准条件有效感觉噪声级

图 4 飞越噪声试验的有效感觉噪声级结果对比

Fig.4 Comparison of EPNL with and without pseudotone consideration in flyover noise tests

了过修正。对比图 3(e)和图 3(f)，若考虑飞机真实纯音所处频带，将这些频带保留，得到的纯音修正因子基本与飞机真实显著纯音所处频带相同，相比于图 3(c)，PNLTM−10dB 区间内多个纯音修正因子得到修正，也修正了 PNLTM−10 区间的大小(即θ值的范围)。

不管是飞机发出的直达声，还是地面反射声，都被人真实地听到，基于这一考虑，“CCAR-36 部”和“ICAO 附件 16”等要求除正常的适航噪声测点测量的噪声外，其余辅助测点的噪声均不能参与有效感觉噪声级的计算。本文的方法仅作为辅助去除伪纯音对纯音修正因子计算影响的手段，并未代替适航噪声测点测量的噪声来计算感觉噪声级，虽然通过式(6)、式(7)能识别和量化伪纯音影响，但最终并未采用“CCAR-36 部”A36.4.3 条中的方法，而是采用基于“CCAR-36 部”咨询通告(附件)和“ICAO ETM”中的等效处理方法的修正方法。在某些情况下，采用本文方法虽然识别出了伪纯音影响，但为了避免过度修正，仍然保留了那些与飞机真实纯音频带相同的伪纯音的影响，最终的有效感觉噪声级中仍包含伪纯音对人听觉的影响。实际上，规章中并未要求完全去除地面反射声对有效感觉噪声级的影响，即使在计算纯音修正因子时能够完全去除伪纯音影响，但计算有效感觉噪声级用到的瞬间感觉噪声级也包含地面反射影响，规章中并未对此作处理要求。

图 4 为飞越噪声试验的去除伪纯音影响与不去除伪纯音影响的有效感觉噪声级结果对比。可以看出，伪纯音对有效感觉噪声级有明显影响。分析 7 组飞越噪声试验数据可发现，在 PNLTM−10 区间内实测噪声的纯音大多处于 2 000 Hz 及以下频带，与较强的伪纯音出现的频带多有重合，采用规章中的方法直接去除伪纯音，有时也将该频带的飞机真实纯音影响去除，即出现了过修正，得到的有效感觉噪声级和基准条件下的有效感觉噪声级分别比本文方法低 0.06～0.25 EPNdB 和 0.06～0.29 EPNdB。相比于不去除伪纯音影响，采用本文方法得到的有效感觉噪声级低 0.11～0.29 EPNdB，基准条件下的有效感觉噪声级低 0.03～0.30 EPNdB。显然，不去除伪纯音的影响导致有效感觉噪声级被高估。本文方法尽可能去除了伪纯音对有效感觉噪声级计算的影响，又保留了与伪纯音频带重合的飞机真实纯音的影响，得到更能真实反映人在地面上对飞机噪声感觉的噪声水平。

需要说明的是，由于飞机噪声(尤其是波长相对短的高频噪声)在传播过程中易受试验环境影响[10]，而试验环境难以完全保持理想状态，因此通过布置倒置传声器测量噪声来识别和去除伪纯音影响过程中，采用了以下处理：(1) 设置高频截断频带，不修正伪纯音对高频噪声测量的影响，本文选择截断频带为 6 300 Hz；(2) 尽可能保证两个传声器测试数据的一致性，使倒置传声器与适航传声器之间的距离尽可能近，同时又不对适航噪声测量产生明显干扰[2]；(3) 严格按照“CCAR-36 部”等规章对试验环境要求开展试验，进行多次重复试验测量。

4 结 论

本文提出了一种识别和去除伪纯音对有效感觉噪声级计算影响的试验和分析方法，并结合某型民机噪声适航合格审定试验及其试验数据对该方法进行了验证。结果表明：本文提出的方法能可靠地识别伪纯音对纯音修正因子的影响，并采用“CCAR -36 部”和其附件以及“ICAO ETM”中的方法，对其应用条件进行限定，去除地面影响带来

的伪纯音对纯音修正因子计算的影响，避免了伪纯音影响识别不精确和容易出现过修正的问题，得到更能反映人在地面上对飞机真实噪声感觉的有效感觉噪声级。本文提出的方法易于飞行试验和计算分析实现，符合“CCAR-36 部”和“ICAO 附件 16”的要求，可为国产其它型号飞机噪声型号和适航合格审定提供有益参考。

参 考 文 献

[1] 中国民用航空局. CCAR-36-R1 航空器型号和适航合格审定噪声规定[S]. 北京: 中国民用航空局, 2007.

[2] International Civil Aviation Organization. International Standards and recommended practices, annex 16 to the convention on international civil aviation, Environmental Protection, Volume Ⅰ, Aircraft Noise (Sixth Edition)[S]. Montreal: ICAO, 2011.

[3] FLEMING G G, BURSTEIN J, RAPOZA A S, et al. Ground effects in FAA's integrated noise model[J]. Noise Control Engineering Journal(S0736-2501), 2000, **48**(1): 16-24.

[4] 中国民用航空局. 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]. 北京: 中国民用航空局, 2008.

[5] International Civil Aviation Organization. Doc 9501 -AN/929 environmental technical manual on the use of procedures in the noise certification of aircraft(Third Edition)[S]. Montreal: ICAO, 2004.

[6] RACKL R. Correction procedures for aircraft noise data, volume I: pseudotones[R]. Virginia: Springfield, 1979: 1-208.

[7] SAE COMMITTEE A-21. AIR 1327A Acoustic Effects Produced by a Reflecting Plane[S]. Warrendale: SAE, 2012.

[8] SAE COMMITTEE A-21. SAE AIR 1672B Practical Methods to Obtain Free-Field Sound Pressure Levels from Acoustical Measurements Over Ground Surfaces[S]. Warrendale: SAE, 2012.

[9] SAE COMMITTEE A-21. SAE ARP 866B Standard Values of Atmospheric Absorption as a Function of Temperature and Humidity[S]. Warrendale: SAE, 2012.

[10] MAY D N, WATSON E E. Correction Procedures for Aircraft Noise Data, Volume Ⅳ: Tone Perception[R]. California: Wyle Laboratories/Wyle Research, 1980:1-73.

[11] 闫国华, 李捷. 等效飞行航迹在民用飞机噪声适航审定中的运用[J]. 声学技术, 2018, **37**(2): 67-70.
YAN Guohua, LI Jie. Application of the equivalent flight paths in airworthiness certification of civil aircraft noise[J]. Technical Acoustics, 2018, **37**(2): 67-70.

[12] 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.