

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第8卷 第12期

Vol.8 No.12

中国科学院
生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

12
2014

目 次

水 污 染 防 治

US-UV-Fenton 降解硝基苯	吴成强	左小梅	傅丹婷	曹贝佩	蒋轶锋 (5073)
丝状菌污泥膨胀及其致密过程中菌丝体演替规律	李志华	赵 静	莫丹丹 (5079)		
酸性橙 7 在 PbO ₂ /Ti 和 IrO ₂ -Ta ₂ O ₅ /Ti 电极上的电催化氧化	乔启成	赵跃民	王立章	杨春和	谷玲玲 吴秀琴 (5085)
地表水硝酸盐氮同位素测定的前处理过程	王吉革	吝 涛	李青松	陈东辉 (5091)	
RPB-O ₃ /H ₂ O ₂ 法处理硝基苯模拟废水	郭 亮	焦纬洲	刘有智	许承聘	余冲冲 王朝冉 李 焙 王 彦 丁永亮 (5099)
混凝法去除城市生活污水中抗性基因	庄 耀	任洪强	耿金菊	张 宴	丁丽丽 许 柯 (5105)
Fe ⁰ 协同生物麦饭石的 PRB 系统井下原位处理煤矿酸性废水	狄军贞	江 富	朱志涛	戴男男	郭旭颖 (5111)
改性硅胶对水溶液中 Pd 的吸附	杨明珠	李耀威	王 刚	刘 健 (5117)	
光催化降解内分泌干扰物双酚 A 的响应面分析与优化	杜尔登	张申耀	冯欣欣	顾礼明	褚腾飞 郭迎庆 (5124)
油茶果壳对水溶液中结晶紫的吸附性能	宋冬阳	郭会琴	颜流水 (5129)		
芬顿试剂预处理杀螟丹农药废水	明翠香	田凯勋	陆 主	AKE Kouassi Marius	Honore (5135)
UASBB-两段接触氧化处理规模化猪场废水的中试研究	邹义龙	万 莉	万金保	吴永明	顾 平 李 爽 (5141)
头孢中间体合成废水组成分析及主要污染物识别	其布日	陈吕军	王建龙 (5147)		
制药废水的厌氧生化性评价及 UASB 处理	李伟成	田 哲	戚伟康	牛启桂	刘予宇 李玉友 高迎新 (5156)
气浮技术在膜生物反应器剩余污泥浓缩过程中的应用	许世伟	付 强	张伟军	刘 菲	王东升 (5161)
上海市污水处理厂进水水质特征的统计学分析	孙 艳	张 逢	胡洪营	牛璋彬 (5167)	
絮团粘性分维数的概念及其分析模型	邢 军	李庆娜	丁仕强	刘正宁	徐继润 (5174)
潮汐流人工湿地对高污染河水的处理功效	熊家晴	李东辉	郑于聪	尉中伟	赵泽宁 王晓昌 (5179)
微波无极紫外光催化降解茜素绿的性能研究及产物分析	熊重铎	程 强	施 薇	徐爱华	夏东升 曾庆福 (5185)
最大光能转化效率 F _v /F _m 用于城市人工水体藻华的监控预警	阎轶婧	徐竟成	魏巧玲	黄翔峰	李光明 (5191)
氨改性中孔活性炭对 Pb(II) 的吸附	范明霞	童仕唐	陈东东 (5197)		
正渗透膜过滤特性及污染物截留性能	董 莹	王志伟	吴志超	王巧英	谢震方 (5204)
CdIn ₂ S ₄ /复合材料的制备及光降解罗丹明 B	刘 慧	任凤梅	马海红	周正发	徐卫兵 (5209)
温度对 SBR 单级好氧生物除磷性能的影响	汪志龙	彭 波	李小明	杨 麒	陈洪波 许德超 谢继慈 罗 冠 (5213)
路面径流的大肠菌群污染及其雨水花园处理	王建军	李 田	侯 娟	陈昱霖 (5221)	
分散式污水再生水回用工程的经济性分析	刘 晓	魏莹军 (5226)			
侧流化学除磷对 AO 连续流生物除磷系统的影响	席粉鹤	袁林江	吕景花 (5231)		
零价铝/酸体系对活性黑染料的降解	张 宁	邹 华	吴倩云 (5237)		
膨润土的 2 种不同柱撑改性方式及其吸附重金属锌离子的比较	袁云鹏	谢宇挺	王趁义	杨 佳 (5245)	
“气浮-生物陶粒-膜”组合工艺处理微污染湖水的运行特性	刘 强	赵昌爽	闫 猛	赵苔馨 (5249)	
投加厨余发酵产物强化 MBR 的脱氮除磷效果	孟冰茹	王晓昌	胡以松 (5254)		
高盐高浓度废水微生物燃料电池的启动	付国楷	廖凯森	黄泽金	刘美伶 (5259)	
电化学沉淀法从废水中回收鸟粪石	陈 龙	赵剑强	张 艳	王洁琼 (5264)	
染发污水对生物处理效能的影响	尹 军	开 艳	刘 伟 (5271)		
改性丝瓜络纤维对水体日落黄的吸附特性	张燕军	苗明升	孔 强	王艳娜	王任飞 王 君 李 雪 (5277)
Fe/AC 非均相 Fenton 体系降解 BPA	周 丹	王春晖	赵永红 (5284)		
Pt 掺杂 TiO ₂ 纳米管制备及其光电催化双酚 A	王理明	姚秉华	裴 亮 (5289)		
HYDRUS-1D 软件在地下水污染源强定量评价中的应用	杨 洋	李 娟	李鸣晓	李 翔	白顺果 席北斗 吕宁馨 杨 昱 (5293)
聚乙烯吡啶树脂对间苯三酚的吸附性能	陶为华	邱 迅	杨燕虹 (5299)		
2 种改良土壤渗滤系统对降雨径流中氮的去除	崔蒙蒙	张有政	王振中	李玉成	窦月芹 (5305)
桂林会仙湿地沉积物中磷形态及分布特征	邵 亚	蔡崇法	赵 悦	蔡湘文 (5311)	
硅藻土固定化颗粒污泥对海水养殖废水除氮性能	车 鉴	徐 牧	阳桂菊	王丽丽	杨 扬 李建光 王熙涛 徐永平 (5318)
3 种组合工艺处理农村生活污水	李清雪	张 蕾	郝胜杰	王冬云 (5323)	
硝酸氧化和负载铁氧化物改性活性炭催化臭氧化性能	张 静	刘 春	刘 平	张 磊	杨景亮 刘建松 (5328)

好氧颗粒污泥法处理石化废水	金育辉	吴 敌	宋郭静	霍明昕(5335)
兰炭废水中酚类物质萃取及回收效果	杨义普	刘永军	童三明	刘在堂
基于活性炭的多孔介质水动力弥散系数测定	刘涉江	王 娟	丁 辉	赵志远
响应面法优化光催化/臭氧氧化深度处理炼油废水	倪 可	王利平	肖春宝	李新穎(5349)
生物渗滤床处理养殖废水的微生物活性及堵塞问题	刘艳娟	杨雅雯	祝 明	王守伟(5356)
窄前沿高压脉冲放电等离子体降解水中苯胺	李 阳	陈永铎	赵红杰	王晓晨
络合沉淀结合混凝法去除浮选废水中有机磷	许明鑫	孙水裕	戴文灿	林伟雄
纳米 Au/TiO ₂ 复合物光催化降解亚甲基蓝	倪冰楠	陆 婷	刘心娟	孙 卓(5372)
阳极氧化联合电-Fenton 氧化深度处理垃圾渗滤液	王光凯	史 强	孟祥顺	徐佰青
微生物燃料电池驱动的光电催化降解甲基橙	孙 哲	林 立	黄满红	陈东辉(5383)

大 气 污 染 防 治

活性氧化铝负载 DBU 吸附 CO ₂	何都良	林海翔	徐 露	秦晋凯	常李强	周宏仓(5388)
Fe(II) EDTA 络合吸收-铁粉还原再生脱除 NO 性能	陶 雯	张俊丰	肖瑾瑜	黄 妍	杨柳春	黄 明(5393)
微波加热脱附回收 Y 分子筛吸附的酮类有机分子	常仁芹	周 璜	卢晗锋	朱秋莲	陈银飞(5399)	
厦门市空气污染的空间分布及其与影响因素空间相关性分析			施益强	王 坚	张枝萍(5406)	
复合钙基固硫添加剂对煤固硫与燃烧的影响					朱全力(5413)	
大型电袋复合除尘器脉冲滤袋清灰					郑奎照(5419)	

固 体 废 物 处 置

生活垃圾堆肥浸提液组成及其演化规律	崔东宇	何小松	祝超伟	陈凤先	席北斗	李 丹	潘红卫	檀文炳(5424)
堆肥对污泥中四环素类抗生素及抗性基因的影响						韦 蓓	黄福义	苏建强(5431)
表面印迹聚合物吸附复杂基质中的土霉素							张英英	唐和清(5439)
市政污泥堆肥过程中微生物群落的动态变化						李 昂	孙丽娜	李 鹏(5445)
生活垃圾和玉米秆混合热解动力学及产物分布								
用钛白废酸和副产锌泥制备活性氧化锌								田伟军(5458)
响应面法优化污泥电渗脱水工艺参数						王诗生	李 静	盛广宏(5463)
蒸汽爆破对脱水污泥溶解性和厌氧消化性能的影响								
响应面法优化甘蔗渣-污泥复合活性炭的制备工艺						刘 越	尹小波	李 强
调味料添加比例对菇渣基质发酵效果的影响						张唐娟	张俊峰	袁巧霞

土 壤 污 染 防 治

固废拆解场污染土壤中多环芳烃降解菌的筛选鉴定与降解特性	陈红云	张昕欣	于红艳(5488)
石油降解菌的筛选优化及其对油污土壤的修复特性	曹文娟	吴蔓莉	张明辉

环 境 生 物 技 术

一株耐盐好氧反硝化细菌的分离鉴定及其脱氮特性	唐 婧	肖亚男	屈姗姗	傅金祥	孙艺齐	吴 瑞	高 慧(5499)
3 株贫营养好氧反硝化细菌的分离鉴定及反硝化特性	黄廷林	周 娜	张海涵	邱诗雨	周石磊	郭 琳(5507)	
Mg ²⁺ 对克雷伯氏菌 N112 及其诱变菌产絮凝剂特性的影响	符海林	聂麦茜	郭育涛	赵 璇	聂红云	邢 健	贺美丽(5514)

环 境 监 测 与 评 价

海浪潮水环境重金属污染健康风险评价	李 涛	石 磊	马 中	杨斯娟	王海燕	周岳溪(5521)	
基于 MODIS 数据遥感反演呼伦湖水体总磷浓度及富营养化状态评价				王丽艳	李畅游	孙 标(5527)	
基于支持向量机的白云湖水水质评价	陈耀宁	朱刚刚	唐清华	高 强	智国铮	袁兴中(5535)	
基于时序蒙特卡罗方法的某铬盐场污染地下水泄漏风险							
全固态硝酸根离子选择电极	刘灵芝	梁 婕	曾光明	谭 勇	郭 志	刘佳玉	
					宋小娟	杨金凤	杨慧中(5546)

相 关 研 究

噪声合格审定在降低飞机噪声污染中的应用	闫国华	周利敏(5551)
2014 年总目次		(1)

噪声合格审定在降低飞机噪声污染中的应用

闫国华 周利敏

(中国民航大学航空工程学院,天津 300300)

摘要 噪声污染是航空环境工程领域的重要问题,噪声合格审定已成为降低飞机噪声污染的一种重要途径。为了完善我国的飞机噪声合格审定技术规范,对飞机噪声有效感觉噪声级的计算方法进行了研究;在飞机噪声合格审定过程中,实际飞行实验条件与噪声合格审定规范中规定的基准条件存在差异,依据飞行实验中相应的几何条件和噪声传播的规律,建立了使用积分修正方法计算有效感觉噪声级的完整方法;以 CRJ700 飞机为例说明了该方法在噪声合格审定中的应用,并且以 Boeing747 系列飞机为例阐明了噪声合格审定在降低飞机噪声污染的重要作用。

关键词 噪声污染 合格审定 飞机 积分修正方法 有效感觉噪声级

中图分类号 X593 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2014)12-5551-06

Application of noise certification in reducing aircraft noise pollution

Yan Guohua Zhou Limin

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract Noise pollution is an important problem in the field of aviation environmental engineering, noise certification has become an important way to reduce aircraft noise pollution. In order to improve the country's technical standards of aircraft noise certification, the computing method of effective perceived noise level (EPNL) of aircraft noise was studied. In the process of aircraft noise certification, there are differences between the actual flight test conditions of aircraft and its required reference conditions of noise certification, based on corresponding geometric conditions of flight test and the laws of noise propagation, the complete way of using integral correction method to compute EPNL was established. Then the aircraft CRJ700 was taken as an example to illustrate application of the method in noise certification, as well as taking Boeing747 serial airplanes for instance to illustrate the important role of aircraft noise certification in reducing aircraft noise pollution.

Key words noise pollution; certification; aircraft; integral correction method; EPNL

随着国际航空运输市场迅速发展,大型喷气式民用飞机迅速发展并普及,同时也带来巨大的噪声污染,尽管使用高涵道比涡扇发动机后的飞机有效感觉噪声级降低很多^[1],但是据估计到 2030 年前国际航空运输旅客数量的平均年增长率约为 4.5%^[2],同时航空公司的机队需要更换和扩大,民用飞机的数量将迅速增大^[3],因此噪声污染^[4]将依旧是航空业面临的严峻问题,迫切需要进一步降低飞机噪声污染。

为了降低飞机噪声污染对机场周边居民的影响,机场土地合理规划是一种有效的方法,也是以往国内解决飞机噪声污染问题的主要方法^[5,6]。然而国内机场数量迅速增加,航空运输量大幅上升,机场土地规划可能将难以从根本上解决飞机噪声污染问题,通过对飞机进行噪声合格审定以保证飞机低噪声水平才能从源头上解决问题^[7,8]。国外关于飞机噪声污染对机场容量^[9]及周边社区影响^[10]的研究表明,通过利用多种技术评估飞机噪声的污染程度

对于合理规划机场周边土地和机场跑道建设具有重要作用;此外,目前降低飞机噪声污染的措施还有采用减噪飞行程序、执行机场噪声许可证制度以及 ICAO 提出的“平衡方法”等^[11-13]。为了更好地解决我国日趋严重的航空噪声污染问题,不仅要规划与项目噪声环境影响进行评价,更要建立完善的飞机噪声合格审定规范。飞机噪声合格审定要求提交一系列飞机噪声的相关数据,必须使用 ICAO 批准的标准技术方法或者许可的等效方法计算得到的噪声数据才能符合相应法规要求。根据规定实验条件下测得的噪声数据计算有效感觉噪声级 EPNL 是当前 ICAO 批准的基本方法,积分修正方法是

基金项目: 中商发民航重点项目(5310686)

收稿日期: 2013-11-04; **修订日期**: 2014-02-16

作者简介: 闫国华(1964—),男,博士,教授,主要从事航空器噪声适航与排放、振动噪声研究。E-mail: ghyan@cauc.edu.cn

ICAO 许可的一种等效方法,在《环境技术手册》有所提及^[14],庞巴迪公司已在 CRJ700 等飞机的噪声合格审定中使用该方法,但是国内没有对该方法的技术原理进行相关研究。尽管同类型的国产支线飞机 ARJ21-700 的噪声审定工作已经完成^[15],但未来其改进型号及国产大飞机也需要通过噪声合格审定,因此对使用积分修正方法计算有效感觉噪声级的算法进行研究具有重要意义,有助于完善我国的飞机噪声合格审定技术规范,进而为降低飞机噪声污染的相关措施提供依据。

1 根据测得的噪声数据计算 EPNL

有效感觉噪声级是航空器噪声合格审定的基本评价尺度,必须测量声压的 3 个基本物理量:声强度级,频率分布和时间变化,进而建立评估人们对航空器噪声主观反应的有效感觉噪声级的算法,以喷气式飞机为例,ICAO 的规定程序由下列 5 部分组成。

1.1 感觉噪声级

依据 ICAO 附件 16 中提供的呐表及相关公式^[16],结合测量所得的 24 个 50 至 10 000 Hz 范围的 1/3 倍频程声压级可确定总感觉噪度 $N(k)$,进而计算得瞬时感觉噪声级 $\text{PNL}(k)$,即

$$\text{PNL}(k) = 40.0 + \frac{10}{\log 2} \log N(k) \quad (1)$$

1.2 频谱不规则性修正

具有频谱不规则性(例如最大离散频率成分或纯音)的噪声必须确定修正因子 $C(k)$ 后计算相应的纯音修正感觉噪声级 $\text{PNLT}(k)$,即:

$$\text{PNLT}(k) = \text{PNL}(k) + C(k) \quad (2)$$

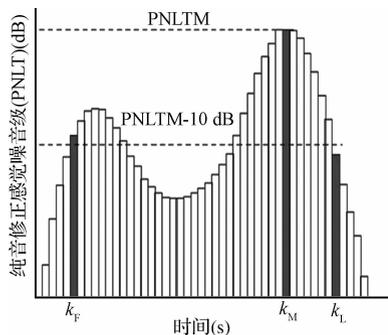


图1 航空器飞越噪声-时间历程图

Fig. 1 Flyover noise time-history diagram of aircraft

1.3 最大纯音修正感觉噪声级

最大纯音修正感觉噪声级 PNLTM 是纯音修正

感觉噪声级 $\text{PNLT}(k)$ 的最大计算值,以某次航空器飞越时的纯音修正感觉噪声级变化为例,如图 1 所示,其中清楚地表明最大值 PNLTM ,与其关联的时间位置定义为 k_M 。

1.4 持续时间修正

持续时间修正量 D 由积分方法确定,定义为:

$$D = 10 \log \frac{1}{T_0} \int_{k_F}^{k_L} 10^{0.1 \text{PNLT}(t)} dt - \text{PNLTM} \quad (3)$$

式中: T_0 是归一化时间常数,规定 $T_0 = 10$ s, k_F 是 PNLT 大于 $\text{PNLTM}-10$ 的时间起点, k_L 是自此之后 PNLT 值保持总小于 $\text{PNLTM}-10$ 的时间点。

由于 PNLT 是从 SPL 的实测值计算所得,一般不会有简单的 PNLT 关于时间 t 的函数关系式。因此,必须用求和符号代替积分符号,将公式(3)改写为:

$$D = 10 \log \frac{1}{T_0} \sum_{k_F}^{k_L} 10^{0.1 \text{PNLT}(k)} \Delta t - \text{PNLTM} \quad (4)$$

式中:计算 $\text{PNLT}(k)$ 的等时间增量 $\Delta t = 0.5$ s。

1.5 有效感觉噪声级

有效感觉噪声级 EPNL 表征人们对飞机噪声总的主观反应情况,大小等于最大纯音修正感觉噪声级 PNLTM 与持续时间修正量 D 的代数和,即:

$$\text{EPNL} = 10 \log \sum_{k_F}^{k_L} 10^{0.1 \text{PNLT}(k)} - 13 \quad (5)$$

2 通过积分修正方法计算 EPNL

积分修正方法是在飞机噪声测量期间保持恒定的飞行航迹和功率条件运行时使用的一种计算 EPNL 的方法,适用于在起飞越顶、横侧和进场噪声测量点处所测的数据。使用积分修正法对每组以 0.5 s 为时间间隔所获取的声压级测量值进行数据修正,以确定等效基准声压级均值,用于计算与基准条件下所能获取的值相一致的 EPNL 值。为保持声学的完全一致性,只有对相同组数的测量(即实验)和经修正(即基准)飞行航迹的相对于飞行航迹的噪声发射角(θ)和相对于地面的噪声仰角(ψ)进行评估,才可进行修正。虽然在起飞越顶和进场噪声测量时,可近似地采用该项要求,但事实表明,在有必要对横侧噪声测量值进行修正时,不可能保持不同组数具有相同的角度。因此,在使用积分方法对横侧噪声测量值进行修正时,应保持实验和基准飞行航迹的噪声发射角相同,而实验和基准仰角之间的差异应降至最小。

2.1 实验航空器位置

根据基准条件对所测噪声级数据进行修正的积分方法要求在实验飞行期间每隔 0.5 s 获取噪声和飞行性能数据,包括飞机相对于一个三维 (X、Y 和 Z) 坐标系的位置、1/3 倍频程声压级 $SPL(i, k)$ 和每个平均时间段的中点相对于某一基准时间的飞行时间 (t_k)。另外,要求提供每次起飞越顶的飞机性能参数、噪声测量点,以及温度和湿度。

航空器高度 (Z) 在 X-Y 基准面上方测得,测量传声器置于基准面 (一般指地平面) 上方 1.2 m 处。除起飞越顶测量期间采用减推力 (功率) 之外,其他情况下的实验飞行航迹一般被假定为一 条直线,并使用与时间相关的飞机位置数据确定飞越头顶的时间 t_{oh} 、实验时飞越头顶的高度 h_{to} 和从实验飞行航迹至传声器位置 $[K(X_{TM}, Y_{TM}, Z_{TM})]$ 的最短实验距离 d_{Tm} 。

通过直接使用实验数据或者通过对普通直线飞行航迹与图 2 中所示的 K_T 至 $R_T(X_{RT}, Y_{RT}, Z_{RT})$ 最短距离线之间的关系进行几何分析,最小距离为:

$$d_{Tm} = [(X_{RT} - X_{TM})^2 + (Y_{RT} - Y_{TM})^2 + (Z_{RT} - Z_{TM})^2]^{1/2} \quad (6)$$

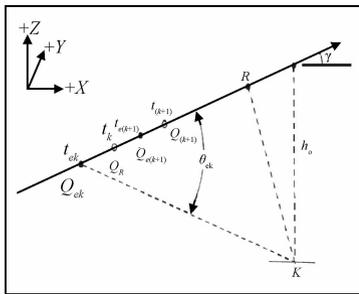


图 2 积分程序的相对时间段

Fig. 2 Relative time of integration procedure

2.2 声传播时间和声发射角

实验时的声传播时间 Δt_{pk} 可依据公式 (7), 结合数据记录时间 t_k 、噪声发射时间 t_{ek} 、飞机在时间点 t_{ak} 的位置 A_k 、以及平均时间 t_{Av} 求取:

$$\begin{aligned} t_k &= t_{ak} - \frac{1}{2} t_{Av} \\ t_{ek} &= t_k - \Delta t_{pk} \\ \Delta t_{pk} &= K_T \frac{Q_{ek}}{c_T} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: c_T 为与地面绝对空气温度 T_S 和飞机高度处绝对空气温度 T_A 的均值 (即式中 $T = \frac{(T_S + T_A)}{2}$) 对应的音速。

通过使用图 2 中的几何关系、由公式 (6) 求得最小距离、实验距离 $Q_{ek}R$, 以及通过将时间差异 B 定义为 $t_{Tm} - t_k$, 可得出如下实验飞行航迹的声传播时间表达式:

$$\Delta t_{Tpk} = \left[\frac{1}{(c_T^2 - V_T^2)} \right] \times \{ BV_T^2 + [(c_T^2 - V_T^2) (d_{Tm})^2 + (Bc_T V_T)^2]^{1/2} \} \quad (8)$$

式中: V_T 为实验飞机沿飞行航迹的真空速均值。

同时,实验噪声发射角定义为:

$$\theta_{ek} = \sin^{-1} \left[\left(\frac{d_{Tm}}{(\Delta t_{Tpk})(c_T)} \right) \right] \quad (9)$$

2.3 航空器基准飞行航迹

基准飞行航迹的几何形状基本上与图 3 中所示的类似,但有如下差异:

- (1) 基准飞行航迹位于跑道中心线的正上方 (即 $Y_{DEV} = 0$);
- (2) 对于起飞和进场起飞越顶,测量站位于跑道中心线上 (即 $Y_{rr} = Y_{rM}$);
- (3) 对于横侧噪声测量, $(Y_{rr} - Y_{rM})$ 等于测量站的基准横侧偏移量。

可以使用测量站横侧距离、飞越头顶的高度 h_{ro} 和飞行航迹倾斜角 γ_r 等表示出基准飞行航迹相对于基准传声器位置 K_r 的几何图形位置,其大小等于距 K_r 的最短距离 d_{rm} , 即:

$$\begin{aligned} d_{rm} &= [h_{ro}^2 \cos^2 \gamma_r + (Y_{Rr} - Y_{rM})^2]^{1/2}, \text{ 或} \\ d_{rm} &= [(X_{Rr} - X_{rM})^2 + (Y_{Rr} - Y_{rM})^2 + (Z_{Rr} - Z_{rM})^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

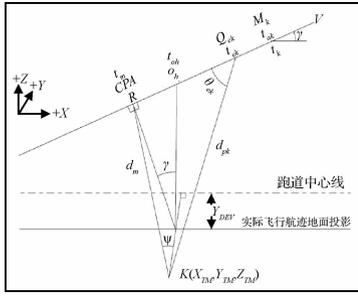
关于实验和基准飞行条件的基本声假设为,每次实验记录时间 t_k 和相应基准时间 t_{rk} 所对应的三维声发射角 θ_{ek} 和 θ_{erk} 相等,使用等式 (9) 和等式 (10), 通过下列等式,对每个 i 频带的实验声压级 $SPL_T(i, k)$ 进行与球面扩散和整个声路径上大气吸收所引起的声衰减相关的修正:

$$(1) \text{SPL}_r(i, k) = \text{SPL}_T(i, k) - 20 \log \left(\frac{d_{rpk}}{d_{Tpk}} \right) - [\alpha(i)_0 d_{rpk} - \alpha(i) d_{Tpi}]$$

式中: $\alpha(i)_0$ 和 $\alpha(i)$ 分别为基准日和实验日的声衰减系数。

(2) 如果使用的是实验和基准飞行航迹的最短距离,则使用如下等式:

$$\text{SPL}_r(i, rk) = \text{SPL}_T(i, k) - 20 \log \left(\frac{d_{rm}}{d_{Tm}} \right) - [\alpha(i)_0 d_{rm} - \alpha(i) d_{Tm}] \text{cosec} \theta_{ek}$$



注:下标“r”表示基准条件,起飞越顶或横侧噪声测量时基准传感器的位置 K_r , 通常与实验位置 K_i 所对应的坐标相同。

图3 积分程序的几何形状

Fig.3 Geometry of integration procedure

2.4 时间间隔计算

除了根据球面扩散和大气吸收所引起的声衰减对实验数据进行上述修正外,还有必要根据计算EPNL时所用时间增量 t_{rk} 的变动来进行修正,因为按积分方法进行修正时,时间增量并不等于 0.5 s 的实验测量时间增量,所以接下来的飞机位置基准时间 t_{rk} 和 $t_{r(k+1)}$ 均迟于声发射点处的时间基准 t_{rek} , 如图 2 所示,计算 EPNL 时要使用平均时间增量,即:

$$\delta t_{rk} = (\Delta t_{rk} + \Delta t_{r(k-1)}) / 2$$

式中: Δt_{rk} 是各次数据记录之间的基准时间间隔,大小为 $\Delta t_{rk} = t_{r(k+1)} - t_{rk}$ 。

使用样本时间、声发射时间和声传播时间之间的关系,基准间隔可表示为:

$$\Delta t_{rk} = [t_{re(k+1)} - t_{rek}] + [\Delta t_{rp(k+1)} - \Delta t_{rpk}] \quad (11)$$

该时间间隔反映出飞机以实验和基准速度 (V_T 和 V_r) 从一个声发射点飞至下一个点的时间,同时反映出实验和基准最短距离 (d_{rm} 和 d_{rm}) 之间以及实验和基准音速 (c_r 和 c_r) 之间的差值所产生的影响。通过将公式(11)变为如下等式,可清楚地表述这些因素:

$$\Delta t_{rk} = \frac{d_{rm}}{d_{rm}} \times$$

$$\left\{ \frac{V_T}{V_r} [0.5 - (\Delta t_{rp(k+1)} - \Delta t_{rpk})] + \frac{c_T}{c_r} (\Delta t_{rp(k+1)} - \Delta t_{rpk}) \right\}$$

2.5 经修正的有效感觉噪声级

使用航空器实验位置和基准飞行航迹等要求对实验所测声压级进行修正之后,根据本文 1.1 和 1.2 中的等式计算感觉噪声级和纯音修正感觉噪声级,同时可得知包括第一个和最后一个 10 dB 降时间在

内的 t_{r1} 至 t_{rn} 这段时间内的基准 PNL,通过这些值和经修正的平均时间增量 δt_{rk} 来计算经修正的 EPNL,即:

$$EPNL = 10 \log \left[\left(\frac{1}{T_0} \right) \sum_{k=1}^n (10^{0.1PNLT_k}) (\delta t_{rk}) \right] \quad (12)$$

式中:基准时间 $T_0 = 10$ s,求和时,开始设定 $\Delta t_{r0} = \Delta t_{r1}$,使得 $\delta t_{r0} = \Delta t_{r1}$;求和结束时,假设 $\Delta t_{rn} = \Delta t_{r(n-1)}$,使得 $\delta t_{rn} = \Delta t_{rn} = \Delta t_{r(n-1)}$ 。

3 应用实例

当前 ICAO 颁布的噪声适航标准已经涵盖了民用飞机噪声在 3 个不同阶段的适航要求,对于双发的喷气式飞机,见表 1,从中可以看出,飞机噪声适航的标准越来越高,允许的总噪声水平在不断降低。最近 ICAO 已经通过最新的飞机噪声适航标准,新标准要求在当前适用标准的基础上使总的噪声水平再降 7 dB,将在 2017 年后开始生效,进一步降低飞机的噪声水平。通过科学地提高飞机噪声的适航标准,可以有效地降低飞机的噪声水平,大幅降低飞机噪声污染的影响程度,同样采用 ICAO 的适航标准,从 Boeing747 系列飞机通过不同阶段噪声适航标准的总噪声水平变化可以明显地看出来^[17],见表 2,因此在不同的发展阶段,通过制定科学的噪声适航标准降低飞机的噪声水平,从源头上降低单架飞机噪声的污染程度,符合航空运输业迅速发展的需求。

表 1 不同阶段的喷气式飞机噪声适航标准

阶段	airworthiness standards (dB)		
	1977-10-06 之前	1977-10-06—2006-01-01	2006-01-01 之后
起飞	104	101	总噪声水平
进场	108	105	至少比上一
横侧	106	103	阶段降 10

表 2 Boeing747 系列飞机的总噪声水平

机型	总噪声水平
747-100	316.4
747-200B	310.8
747-300	308.7
747-400	301.1
747-8F	288.9

为了应对我国迅速增长的航空运输量等造成的航空噪声污染问题,通过机场土地规划的方式将不具有可持续性,完善我国的飞机噪声适航规章及提高飞机噪声合格审定的水平,不仅有助于提高民机设计的水平,而且对于治理航空噪声污染问题是一种新的思路。积分修正方法建立在航空器的实际飞行实验条件与适航规范中的基准实验条件存在差异的基础上,基于航空器实验中的飞行轨迹和声音传播规律等存在的几何关系提出,有效地对测试所得的航空器的声压级进行了修正,并且考虑了实际测量中的时间间隔差异。在 ICAO 颁布的《环境技术手册》中提供的某次飞行实验处理后的噪声数据已经表明了其与附件 16 中的标准方法等效。

以庞巴迪公司的 CRJ700 飞机为例,该机型在中国的噪声合格审定过程中提供的有效感觉噪声级计算数据就使用了积分修正方法,在某次民航总局对飞机进近噪声审定的飞行实验中,测得频率在 50 ~ 10 000 Hz 之间的 24 个 1/3 倍频程的声压级 SPL (i, k) 数据,分别为 66.8、65.7、63.4、71.3、75.7、76.2、73.9、71.6、77.2、75.7、74.0、73.2、72.3、70.9、70.1、70.5、68.4、66.2、65.0、64.1、54.8、61.4、58.0 和 53.3。依据测量所得声压级数据处理后得到纯音修正感觉噪声级 PNL_{T_k} 在序号 4 和序号 17 分别是第一个 10 dB 降和最后一个 10 dB 降的位置,PNLT_M 的值为 93.15659 dB,其中序号 1 ~ 20 频谱对应的纯音修正感觉噪声级和修正后的平均时间增量可见表 3,使用公式(5)和(12)分别计算飞机的进近有效感觉噪声级 EPNL,所得结果分别为 89.32132 dB 和 88.48915 dB,2 种方法计算所得的 EPNL 值之间相对误差很小,约为 0.9317%,同样表明积分修正方法用于计算 CRJ700 飞机的进近噪声有效感觉噪声级有效,与 ICAO 在附件 16 中规定的标准方法相符,并且也可应用在 CRJ700 噪声合格审定中计算起飞、横侧的有效感觉噪声级。

对于我国飞机噪声合格审定规范的进一步完善,研究并建立完整的积分修正方法是必要的,有助于我国的民机噪声适航标准与 ICAO 的飞机噪声适航标准保持相符,促进国内民机产业的科学发展,满足国际民航界对飞机环境性能的要求。该方法已经在部分飞机型号中得到了应用,符合国产 ARJ21-700 飞机及其改进型号和大型客机 C919 等的噪声适航审定需求。

表 3 CRJ700 飞行试验得到的感觉噪声级数据

Table 3 Tone perceived noise level obtained in the CRJ700 flight test

序号	PNLT _k (dB)	$\delta t_{i,k}$ (s)
1	85.4626	0.3995
2	88.48421	0.4012
3	90.98295	0.4012
4	91.34445	0.4037
5	91.3335	0.4055
6	92.68201	0.4067
7	92.82063	0.4084
8	92.60554	0.4099
9	93.15659	0.4123
10	92.11537	0.4157
11	91.06715	0.4184
12	89.91193	0.4225
13	88.96923	0.4253
14	88.78292	0.427
15	87.68035	0.4295
16	85.67868	0.4312
17	84.74738	0.4339
18	83.688	0.4355
19	84.23213	0.4367
20	83.35434	0.4384

4 结 论

(1)通过对飞机噪声合格审定中有效感觉噪声级的算法进行研究,建立了使用积分修正方法计算有效感觉噪声级的完整方法,以 CRJ700 飞机的噪声合格审定为例,表明使用积分修正方法计算所得有效感觉噪声级与使用附件 16 方法所得结果之间的相对误差很小,仅有 0.9317%。

(2)噪声合格审定在降低飞机噪声污染中的作用越来越显著,通过制定科学的飞机噪声适航标准,可以持续地降低飞机的噪声污染程度,已在 Boeing747 系列飞机等机型中表明,是解决航空环境噪声污染问题的有效策略。

(3)对于当前我国日益严重的大气污染问题,以往的思维过于倾向治理,而不是有效地防治,飞机噪声合格审定的思维提供了一种可借鉴的解决思路,对于环保部门具有重要参考意义。

参 考 文 献

- [1] 乔渭阳. 航空发动机气动声学. 北京:北京航空航天大学出版社,2010

- [2] International Civil Aviation Organization. ICAO Council Annual Report 2010. Montreal: ICAO, **2010**
- [3] AIR BUS. Global Market Forecast 2013-2032. Available: <http://www.airbus.com/company/market/forecast>,**2013**
- [4] Anuja M. , P hilip W. , Akshay A. , et al. Assessing the environmental impacts of aircraft noise and emissions. Progress in Aerospace Sciences,**2011**,47(1):15-52
- [5] 徐志胜,吴军,曾庆华,等.大型国际机场规划中飞机噪声影响分析.声学技术,**2007**,26(4):691-695
Xu Z. S. , Wu J. , Zeng Q. H. , et al. Aircraft noise analysis in the programming of large airports. Technical Acoustics,**2007** , 26(4):691-695(in Chinese)
- [6] 柏立森,李延,田爱军.民用机场飞机噪声污染防治措施的评述.污染防治技术,**2010**,23(3):82-83
Bai L. S. , Li Y. , Tian A. J. Control measures of civil airport aircraft noise pollution. Pollution Control Technology,**2010**,23(3):82-83(in Chinese)
- [7] 张彦仲.航空环境工程与科学.中国工程科学,**2001**,3(7):1-3
Zhang Y. Z. Aviation environment engineering and science. Engineering Sciences, **2001**,3(7):1-3(in Chinese)
- [8] 吴凡.航空噪声对环境的影响分析.北方环境,**2013**,29(3):41-42
Wu F. Aviation noise on the environmental impact analysis. Northern Environment, **2013**,29(3):41-42(in Chinese)
- [9] Maryam K. S. , Parvin N. , Mohsen H. , et al. Assessment of land use compatibility and noise pollution at Imam Khomeini International Airport. Journal of Air Transport Management,**2013**,31(8):1-8
- [10] Pere S. S. , Montserrat P. B. , Valeriù P. Incorporating annoyance in airport environmental policy: Noise, societal response and community participation. Journal of Transport Geography, **2011**,19(2):275-284
- [11] ICAO. Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection. Available: <http://legacy.icao.int/env/a35-5.pdf>,**2004**
- [12] Thierry B. , Pierre M. P. The economics of airport noise: How to manage markets for noise licenses. Transportation Research Part D,**2012**,17(2):169-178
- [13] Fedja N. Contemporary measures for noise reduction in airport surroundings. Applied Acoustics,**2012**,73(10):1076-1085
- [14] International Civil Aviation Organization. Doc 9501-2010, Environmental Technical Manual, Volume I, Procedures for the Noise Certification of Aircraft. Montreal: ICAO, **2010**
- [15] CAAC. ARJ21-700 飞机噪声审定试飞活动完成. Available: <http://www.caacnews.com.cn/newsshow.aspx?id-news=233450>,**2013**
- [16] International Civil Aviation Organization. Annex 16 Volume I 6th Edition-2011, International Standards and Recommended Practices of Aircraft Noise. Montreal: ICAO, **2011**
- [17] European Aviation Safety Agency. Type-Certificate Data for Noise-No. EASA. IM. A. 196 for Boeing747. Cologne: EASA, **2011**