

# 航空环境工程与科学

张彦仲

(中国航空工业第二集团公司, 北京 100712)

**[摘要]** 阐述了航空对环境的影响及航空环保工程技术, 分析了飞机排放对大气的污染及航空噪声的影响; 研究了控制飞机排气污染和噪声污染的办法, 提出了降低航空污染的技术和管理措施。

**[关键词]** 航空; 航空器; 环境; 排放; 噪声

## 1 序言

近100年来, 航空技术从无到有, 不断完善。飞机在交通、运输、军事、贸易等方面得到了广泛应用, 为社会带来了巨大的效益, 并且促进了全球经济和社会的发展。目前, 全世界主要航空公司拥有的民机总量已达到10 349架, 装备军队的飞机已有47 794架。在2000年, 世界民航业的客运量突破了4.3万亿座公里, 货运量达到了31 Mt。而且, 民航业的客运量和货运量仍然处于增长之中。据空中客车公司预测, 在今后的20年里, 世界民航业的客运量将以每年4.9%的速度增长, 货运量将以5.7%的速度增长。到2019年, 世界主要航空公司的飞机总量将达到19 173架, 年运力增加到10.8万亿座公里<sup>[1]</sup>。

然而, 随着航空事业的不断发展, 飞机对环境所造成的影响也日益加大。据联合国下属的政府间气候变化专门委员会(IPCC)统计, 全世界所消耗的矿物燃料中, 运输业占了20%~25%, 其中航空运输消耗的燃料占运输业消耗燃料总量的12%, 而CO<sub>2</sub>排放与燃料消耗成正比(见图1)<sup>[2]</sup>。随着人们环保意识的增强, 汽车等地面交通工具正逐步采用电力、天然气等绿色能源, 而航空燃料在

世界石油消耗量中的比重将会逐年增加, 它对环境造成的影响也越来越受到人们的关注。

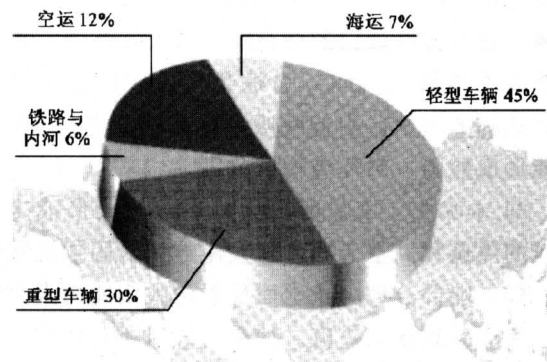


图1 航空占世界运输中CO<sub>2</sub>排放的份额

Fig.1 Aviation share of world transport CO<sub>2</sub> emissions

## 2 飞机对环境的影响

飞机对环境的影响主要表现在排气污染和噪声污染。由于飞机是在高空飞行, 它所排放的污染物比地面排放的污染物对大气的影响更为明显, 更容易导致温室效应和全球气候的变化。根据国际航空运输协会(IATA)提供的资料, 全世界的飞机所产生的二氧化碳占人类燃烧矿物燃料所产生的二氧

化碳总量的2.5%，而航空运输所导致的温室效应却占人类全部活动所导致的温室效应的3.5%。

### 2.1 飞机排气对环境的影响

飞机用的燃料是航空煤油，它所排放的尾气主要包括二氧化碳、氮氧化物、水蒸气、碳氢化合物、一氧化碳、硫氧化物和碳的微小颗粒。这些气体对环境的主要影响是导致大气的温室效应，进而影响全球气候的变化。

1) 二氧化碳 根据航空燃料的分子构成，单位质量的航空燃料燃烧后将产生大约3.15单位质量的二氧化碳。1992年飞机所排放的二氧化碳大约为514 Mt，相当于当年全部矿物燃料所产生的二氧化碳总量的2.4%，或相当于当年人类产生的二氧化碳的2%。到2050年，航空业每年产生的二氧化碳总量将会达到1468 Mt，占人类所产生的二氧化碳总量的3%。二氧化碳是产生温室效应的主要气体<sup>[3]</sup>。

2) 氮氧化物 氮氧化物是燃烧产生的副产品，主要包括NO、NO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O等。NO为无色无臭的气体，它与血红蛋白的结合能力比CO还强，更容易造成人体缺氧。NO<sub>2</sub>为棕色气体，可在人呼吸时到达肺的深部，引起呼吸系统疾病。此外，NO<sub>2</sub>还能形成酸雨，对环境构成危害。

3) 水蒸气 飞机所产生的水蒸气会形成冷却颗粒的尾迹和高空云团，这些尾迹和云团像温室气体一样，能部分地阻止地面反射的太阳能向太空辐射，从而导致温室效应。如果燃烧时还有硫酸盐和碳黑生成，那么水蒸气的阻止辐射效应还会进一步增强。

4) 碳氢化合物 碳氢化合物比二氧化碳更能导致温室效应。由于飞机一般都在对流层上部或平流层内飞行，它排出的碳氢化合物所造成的温室效应就更加明显。

据测算，人类造成的总温室效应大约比人类所产生的二氧化碳造成的温室效应大1.5倍，而飞机所造成的总温室效应大约比飞机排出的二氧化碳所造成的温室效应大2~4倍。造成这一差异的主要原因就是碳氢化合物、氮氧化物、水蒸气等飞机排放物在高空时的温室效应比在地面更加明显。

为了控制飞机排放污染对环境造成的影响，国际民航组织（ICAO）在20世纪80年代初制订了专门的飞机排放标准。其中关于排气中烟尘数量的标准于1983年生效，关于温室气体的排放标准于

1986年生效。在这些排放标准中，主要涉及飞机起飞、着陆、爬升、进场和地面滑行阶段，对于飞机巡航时的排放没做明确规定。这些标准实施之后，飞机排出的一氧化碳和碳氢化合物已经显著降低，但是飞机排出的氮氧化物降低程度却不大（见图2）。造成这种情况的主要原因是，近年来发动机燃烧室的温度和压力有逐渐提高的趋势。提高发动机的燃烧温度，有助于提高发动机的工作效率，促进燃料完全燃烧，从而降低一氧化碳和碳氢化合物的排放。但同时，由于燃烧温度提高，发动机生成的氮氧化物也增加了。

为了降低飞机氮氧化物的排放量，ICAO下属的航空环境保护委员会（CAEP）修改了原先的飞机排放标准，新标准于1996年生效。该标准中对一氧化碳、碳氢化合物和烟尘的排放标准没变，但是把氮氧化物的排放量降低了20%。最近，CAEP决定进一步降低氮氧化物的排放量，到2004年把增压比30以下的发动机的氮氧化物排放量在1996年标准的基础上再降低16.5%。同时，考虑到高增压比发动机虽然会增加氮氧化物的排放，但对于提高发动机的整体效能非常有利，所以允许适当放宽增压比大于30的发动机的氮氧化物排放量。

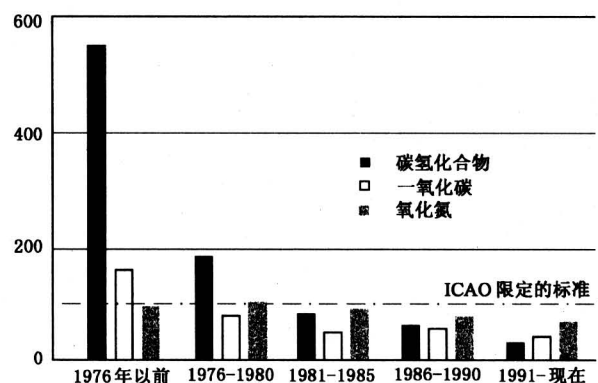


图2 航空发动机污染排放量占 ICAO 规定量 (1996年标准) 的百分比

Fig.2 Aircraft engine emissions

### 2.2 飞机噪声的污染

根据影响对象的不同，飞机噪声可以分为机内噪声和机外噪声。机内噪声不但会影响机内乘客和机组人员的舒适度和身体健康，而且还会对飞机结构产生很强的声载荷，当声载荷的声压级超过130

dB 时,就有可能使结构产生疲劳破坏。而且,作用在飞机结构上的声压级越高、时间越长,破坏情况就越严重。机外噪声主要影响机场或飞机航线附近的居民生活。一般说来,机外噪声可以分为低频噪声和高频噪声,高频噪声比低频噪声给人带来的烦恼更大,而喷气飞机所发出的噪声恰恰又大部分是高频噪声。因此治理飞机的机外噪声污染对于改善机场周围人民的生活质量具有重要意义。

除了一般的噪声之外,有时飞机还会产生一种被称为“音爆”的机外噪声污染。音爆产生的主要原因是由于飞机在超声速飞行时产生了激波,这种波传到地面时仍然具有很大能量,会发出雷鸣般的爆炸声。音爆持续的时间一般较短,大型超声速飞机约为 350 ms,战斗机一般在 100 ms 左右。如果音爆传到室内,由于多次反射会形成共鸣,持续时间较长。有些高强度的音爆甚至会震碎建筑物的玻璃,给地面造成更大的危害。

为了控制飞机的噪声污染,美国联邦航空局 (FAA) 早在 1969 年就制订了飞机噪声适航条例 FAR36 部,1971 年 ICAO 也制订了航空器噪声标准,作为国际航空公约的附件 16。后来,世界上许多国家也都制订了关于航空噪声的标准。随着这些标准的实施,以及航空水平的提高,飞机噪声污染状况已经出现了比较明显的好转 (参见图 3)。

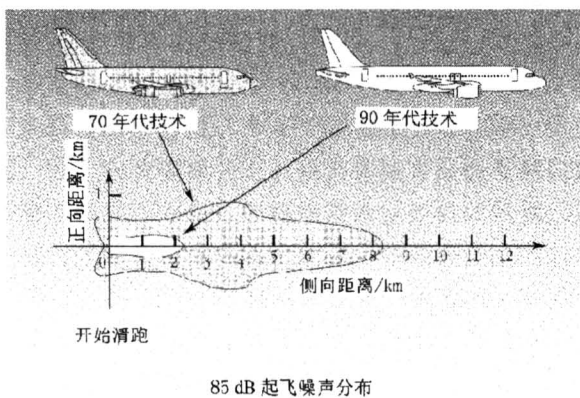


图 3 航空技术的发展对机外噪声的改进

Fig.3 Comparison between old and new technologies

2001 年 1 月 8 日至 17 日, CAEP 在加拿大蒙特利尔召开第五次会议。会上提出, ICAO 理事会应把关于飞机噪声的标准在现有基础上再逐步降低 10 dB, 并且建议新标准应在 2006 年 1 月 1 日开始

实施。根据目前所掌握的情况, ICAO 将在今年 9 月召开的大会上考虑这一建议。如果 ICAO 采纳了 CAEP 的建议, 将会促使世界各国更好地解决航空噪声的污染问题, 但是同时, 这也对未来的航空技术提出了更高的要求。

### 3 对飞机排气污染的控制

降低飞机的排气污染, 可以从技术、管理和税收政策等多方面入手。其中最重要的是不断提高飞机的环保性能, 从根本上降低污染。在各种降低飞机排气污染的技术中, 以发动机、气动、结构和空中交通管理技术最为重要。

#### 3.1 发动机

由于飞机的排气污染是由发动机直接产生的, 所以改善发动机性能、提高燃烧效率对降低飞机油耗和温室气体排放效果最为明显。从 1976 年到 1994 年, 通过提高飞机结构设计、发动机技术和飞机满座率, 每座公里的飞机油耗已经下降了近 50 % (见图 4), 这意味着飞机的污染排放也降低了 50 %。在这一成就中, 一半以上的贡献得益于发动机技术的提高。

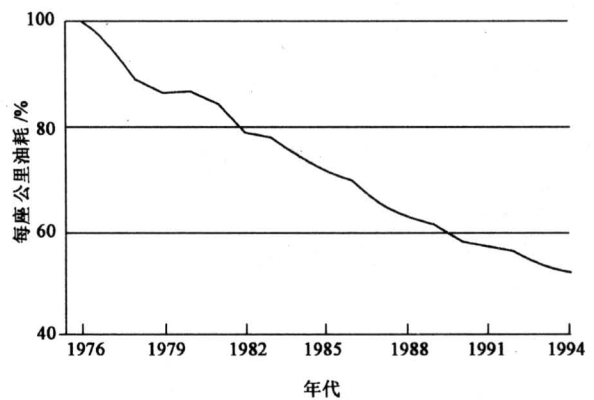


图 4 民航飞机耗油率变化情况

Fig.4 Airline fuel consumption

在过去的 40 年里, 航空发动机技术取得了重大进步。从涡喷发动机到目前的第三代涡扇发动机, 发动机耗油率累积降低了 40 %。采用新型发动机之后, 可以显著提高飞机的燃油效率, 降低每座公里的二氧化碳排放。特别是对于远程飞机来说, 效果更加明显。而在短程航线上, 采用先进涡轮螺桨发动机的飞机比采用涡喷发动机的飞机效率更高, 前者每座公里的二氧化碳排放量比后者低 20 %。

目前,人们正在研制新一代的高涵道比发动机,其耗油率有望比现在的发动机再降低12%~20%(见图5)。但是,在研制新型航空发动机时,也面临着一个重要的技术挑战,这就是氮氧化物的排放问题。为了提高发动机的工作效率,必须提高燃烧室的燃烧温度,而燃烧室温度的提高,必然导致氮氧化物的增加。这是一个难以解决的矛盾,也是目前人们重点研究的技术课题。根据美国NASA目前的工作计划,在今后10年里,有望把飞机氮氧化物的排放量降低到现在的1/3,把二氧化碳的排放量降低到现在的75%;在今后25年内,把氮氧化物的排放量降低到现在的1/5,把二氧化碳的排放量降低到现在的50%<sup>[4]</sup>。

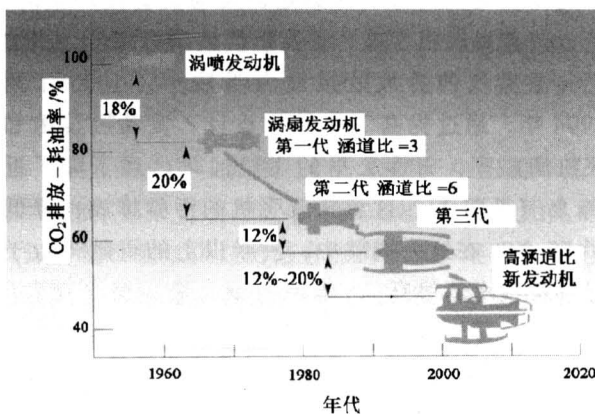


图5 不同年代发动机耗油率和CO<sub>2</sub>排放变化情况

Fig.5 Specific fuel consumption and specific CO<sub>2</sub> emissions of different engine generations (cruise  $Ma = 0.8, h = 11 \text{ km}$ )

为了解决将来石油枯竭之后的航空燃料问题,目前人们已经开始寻找航空煤油的替代燃料(例如氢)。采用这些燃料,将有助于解决飞机的污染排放问题,但是,在技术上目前还有一些难以克服的问题。例如,氢燃料单位体积的热值仅有航空煤油的23%,对于同样油耗的飞机,燃料箱要大3倍才行,而且还需要全新设计飞机并从根本上更换目前的燃料供应、分配和储存基础设施。由于目前还没有可供实用的航空煤油替代方案,所以减少航空排放污染的关键措施仍然是提高飞机的燃油效率。

### 3.2 气动外形

通过先进的气动技术,可以降低飞机的气动阻力,从而达到省油和降低污染排放的目的。目前,人们正加强对层流技术和翼身融合体气动布局的研

究工作,以便提高飞机的气动性能。此外,在气动外形方面有助于提高飞机的效率、降低飞机污染排放的技术还有:通过先进的被动流场控制器(例如:涡发生器)增加飞机的升力,在翼尖加装翼梢小翼,采用超临界翼型以提高和优化飞机巡航时的升阻比,利用计算流体力学的设计方法进行气动设计,以及通过先进的制造技术提高飞机表面的光滑度等。据估计,21世纪亚声速民航机的升阻比将比目前的提高1倍,达到40。

### 3.3 飞机结构

减轻飞机的结构质量有助于降低飞机的油耗,从而降低飞机的污染排放。在未来的飞机上,人们将采用更多的铝锂合金和复合材料。其中铝锂合金主要用于机翼、机身的主承力结构,复合材料将用于飞机的次要结构。

除了采用新材料外,减少飞机上一些不太需要的部件也能取得减重的效果。比如,有人建议去掉一些飞机上的推力反向装置。因为推力反向装置虽然能够改善飞机的着陆性能,但是对于一些机场情况良好的飞行任务来说,这种装置显然是多余的。如果去掉这种装置,飞机的最大起飞质量大约可以减轻0.3%~1%,而且,去掉飞机的推力反向装置还能够改善发动机的内部流场特性,有助于提高发动机的效率。目前,人们正在对这种建议进行研究。

减轻飞机质量的另一种方法是降低飞机乘客的享受水平。比如:取消飞机的舷窗和机上娱乐设备,缩小过道的宽度和座椅的排距等。这些减重方法对于短途飞机来说也许是可行的,但能否得到乘客的满意和认可还有待进一步的研究。

此外,如果主动降噪技术能够取得成功,就可以拆除飞机内部的一部分内饰物和隔音装置,从而减轻飞机的质量。

据估计,全面采用这些减重措施之后,一架中程宽体客机的起飞质量大约可以减轻2000 kg,这大约相当于把发动机的燃油效率提高了1%。

### 3.4 空中交通管制

随着交通流量的日益增加,世界上许多机场和航线都出现了不同程度的拥堵。造成航线拥堵的原因除了机场等基础设施不足外,还有一个重要原因就是空中交通管理系统需要做进一步的改进。在欧洲,1999年由于航班延误给航空公司造成的损失大约价值50亿美元,其中一半的原因是由于空中交通管理系统引起的。



目前，基于卫星通信和导航的“自由飞”技术正在迅速发展并逐步得到应用，通过这项技术，可以增加航线容量、缩短飞机航程，并减少飞机在空中和地面的等待时间，从而降低飞机的油耗。

由于改进空中交通管理系统涉及到多个国家的机场、航空公司和空中交通管理部门，所以要求各国相互协调地进行工作。据 ICAO 的一份报告介绍，如果各国政府能够制订恰当的航空管理框架，改善空中交通管理系统，将能使目前国际航班机队每次飞行的油耗降低 6%~12%。

此外，改进航空公司的运营方式也能降低飞机的油耗、减少航空对环境的影响。航空公司目前可以采取的主要方法包括：减少飞机上不必要的质量、提高飞机的满载率、优化飞机的飞行速度、限制辅助动力系统（APU）的使用以及缩短飞机的滑行距离等。总之，这些节油措施可以使飞机的油耗降低 2%~6%。

#### 4 对航空器噪声污染的控制措施

为了降低喷气式飞机的机内噪声，必须降低其发动机噪声和机体噪声；对于螺旋桨飞机和直升机来说，除了降低上述两种噪声外，还要降低螺旋桨的噪声。而降低机外噪声危害的主要方法是合理规划机场周围的土地，使用更为安静的飞机和采取运营上的降噪手段。

##### 4.1 降低发动机噪声

发动机的噪声主要包括涡轮噪声、燃烧室噪声、风扇噪声和喷气噪声等。对于涡喷发动机来说，由于喷管喷出气流的速度很快，所以喷管噪声是发动机噪声的主要声源。后来，人们用涡扇发动机取代了涡喷发动机，使尾喷管的气流速度有了明显降低。在今天的高涵道比涡扇发动机上，喷管气流的速度再一次被降低，这不但降低了发动机的总体噪声，也使尾喷管的噪声降到了压气机噪声之下，使压气机噪声成为发动机的主要噪声源。

为了降低压气机的噪声，人们采用了取消进气道的导流叶片、减少风扇叶片数量、降低转速、改进叶片的气动设计等方法，并且通过恰当地选取风扇叶片和静子叶片的数量，控制压气机噪声的频率，使它不宜于传播到发动机机舱以外形成噪声污染。除此之外，人们在发动机上还采用了消声衬垫，从而使发动机的噪声大大降低。

##### 4.2 降低机体噪声

在飞机飞行过程中，机体与空气相互摩擦，使空气的运动发生改变，因而产生机体噪声。机体噪声的大小与飞机的气动外形、表面粗糙度和飞行速度有关。从 20 世纪 70 年代初起，随着发动机噪声的降低，机体噪声就逐步成为飞机噪声的主要声源。进一步降低飞机的噪声已经不能仅仅依靠降低发动机的噪声来实现，甚至有人把机体噪声作为飞机噪声的下限，认为飞机机体噪声难以降低。

直到最近十年，人们借助于计算流体力学的强大工具，逐步弄清了产生飞机噪声的关键结构部件周围的流场分布和变化情况，使人们能够比较系统地了解机体噪声的产生和控制机理，为降低机体噪声寻求解决方案。目前，美国 NASA 已经利用这些研究成果设计了低噪声的襟翼并且在模型实验中取得了成功。NASA 下一步打算研究低噪声的起落架，然后再研究降低整个机体噪声的方法。

除此之外，人们目前还在研究通过主动或被动的方法，降低机内的噪声。其中主动降噪的原理是在飞机的一些部位放置一些扬声器，通过计算机控制这些扬声器发出与噪声信号相位相反的声音，从而使噪声得到抵消。这种降低噪声的方法目前虽然取得了一定进展，但是仍然有一些技术上的难点需要继续攻克。被动降低机体噪声的方法主要有：采用吸声材料和减震、隔音设施，以及动力消声器等。

##### 4.3 降低螺旋桨噪声

对于直升机和螺旋桨飞机来说，旋翼和螺旋桨噪声是飞机噪声的重要声源。目前，人们为降低旋翼和螺旋桨噪声所采取的主要方法包括增加桨叶数、降低转速、改善桨叶翼型等。图 6 是螺旋桨桨叶数  $B$  和直径与远场分声压级 FL2 的关系，从中可以看出，随着螺旋桨桨叶数量的增加和桨叶直径的增大，螺旋桨噪声的分声压级迅速降低。此外，增加螺旋桨桨叶的数量，还可以提高螺旋桨噪声的频率，利用高频噪声在空气中衰减快的这一特点，以达到降低螺旋桨噪声的目的。

##### 4.4 降低机场噪声

目前，用于航空运输的喷气式飞机的噪声已经比以往大大降低。今天投入使用的飞机基本上比 30 年前的同类飞机安静 20 dB。这相当于把噪声的危害降低了 75%。现代涡喷发动机所产生的噪声的能量只相当于早期商用涡喷发动机噪声能量的 1%，从而改善了机场周围的生活环境（见图 7）。

目前,人们正在研究新的降低噪声技术,力图在未来的十年里把飞机的噪声再降低 10 dB,这相当于把人耳所能感觉到的噪声强度再降低一半。

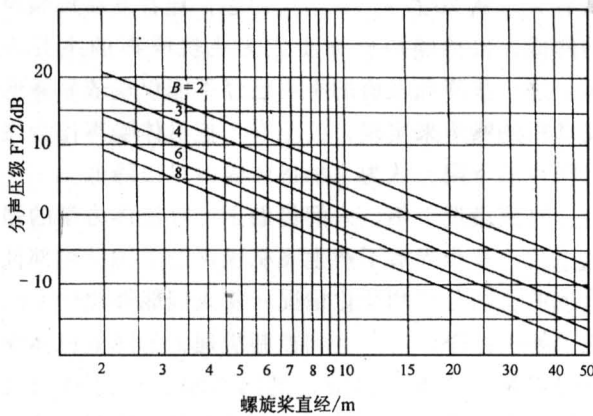


图6 螺旋桨桨叶数  $B$  和直径与远场分声压级 FL2 的关系

Fig. 6 Relationship among sound level FL2 and rotor blade number  $B$  and diameter

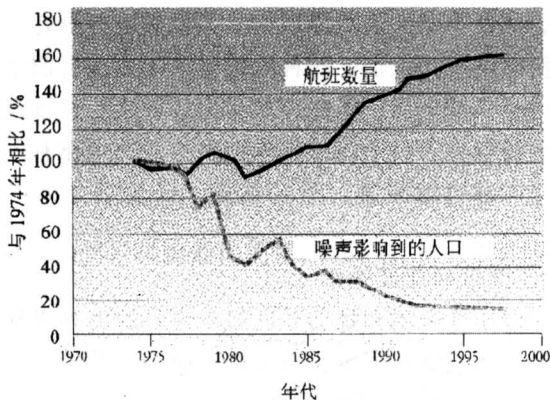


图7 英国希思罗机场航班数量及其噪声所影响到的人口变化情况

Fig.7 Heathrow population affected by noise

但是,如果对机场附近的人口数量增长情况不加控制,就会抵消飞机噪声的降低所取得的环境改善成果。因此,在提高飞机环保性能的同时,有关部门还要加强对机场周围地区的合理规划,在机场和人口密集区之间建立一个噪声缓冲区。

此外,在机场运营上采取一些措施也能取得降低噪声的效果。比如:在跑道和飞机航线附近种草、种树和采用消音材料,减少或禁止夜航,采取有利于降低发动机噪声的飞机起飞和着陆程序等。但是,这些措施的成功与否取决于机场及其周围环境的布局,并且要确保航空运输的安全。

## 5 结论

随着社会的进步和经济的发展,航空在人类社会生活中的作用将变得更加重要。同时,航空对环境的影响也会越来越大。世界各国对提高飞机环保性能的要求越来越高,ICAO也正在制订新的飞机排放和噪声标准。这对于我国航空事业的发展,既是机遇,也是挑战。只要我们及早做出努力,加大科研投入,积极开发高效、环保和节能的航空新技术,并利用我国加入WTO的契机更好地开展国际合作,就一定能够把飞机对环境的影响程度降到最低水平,并促进我国国民经济的发展和人民生活水平的提高。

### 参考文献

- [1] Airbus Group. The airbus global market forecast [R]. Airbus Group Report, 2000.2000 ~2019
- [2] International Air Transport Association. Aviation & the Environment [M].Switzerland,2000
- [3] IPCC. 航空和全球大气 [R]. IPCC 特别报告,1999
- [4] NASA. NASA Subsonic jet transport noise reduction research[R].NASA Report,1998

## Aviation Environment Engineering and Science

Zhang Yanzhong

(China Aviation Industry Corporation II, Beijing 100712, China)

[Abstract] This paper discusses the influence of aviation on the environment and the environmental protection technology. It also analyzes the pollution of aircraft emissions to the atmosphere and the effect of aviation noise. The ways to control aircraft emissions and noise are studied. The technologies and management measures to reduce aviation emissions are recommended.

[Key words] aviation; aircraft; environment; emissions; noise