

GREEN AIR TRAFFIC
MANAGEMENT TECHNOLOGY

绿色空中交通管理技术

田 勇 万莉莉 叶博嘉 著



科学出版社

绿色空中交通管理技术

GREEN AIR TRAFFIC
MANAGEMENT TECHNOLOGY

田 勇 万莉莉 叶博嘉 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

绿色空中交通管理是航空运输业的现实所需和关键难题,也是我国由“民航大国”迈向“民航强国”的必由之路。本书对绿色空中交通管理技术进行了比较系统全面的介绍,主要内容包括空中交通对环境的影响分析、机场环境容许空中交通量评估方法、面向环境保护的场面运行优化方法、面向环境保护的终端区运行优化方法、面向环境保护的区域运行优化方法。

本书主要面向绿色空中交通管理技术的航空领域的科研工作者,可供高等院校和科研单位相关专业的研究生、科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

绿色空中交通管理技术/田勇,万莉莉,叶博嘉著. —北京:科学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-03-054520-6

I. ①绿… II. ①田… ②万… ③叶… III. ①污染防治—空中交通管制
IV. ①V355.1②X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017) 第 226966 号

责任编辑:赵敬伟/责任校对:邹慧卿
责任印制:张伟/封面设计:耕者工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717
<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第一版 开本:720×1000 B5
2017年9月第一次印刷 印张:10 插页:5
字数:200 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

交通运输是国民经济构成中的先行产业和基础产业，是社会生产、生活组织体系中不可缺少和不可替代的重要组成部分，包括空中交通、轨道交通、道路交通、水运交通、综合交通运输与智能交通等主要模式和方向。目前，环境问题已成为影响人类社会发展和全球政治经济格局的重大战略课题。在能源紧张和环境恶化的双重压力下，必须加快发展方式的转变，加快建立以低碳为特征的资源节约型、环境友好型交通运输体系。

随着民航运输业的飞速增长，空中交通带来的气体污染、噪声污染和温室效应等环境影响问题日益严重，绿色发展已成为空中交通管理的现实所需和关键难题，这不仅是我国由“民航大国”向“民航强国”迈进的必由之路，亦是提升中国民航国际竞争力、增强全球碳排放交易市场话语权的重要支撑。

空中交通管理主要包括空域管理、空中交通服务和流量管理。一直以来，人们对空中交通管理的安全和效率方面进行了重点研究，但对可持续发展缺乏系统、深入的认识，也未形成完整、有效的绿色空中交通管理技术。本书所建立的绿色空中交通管理技术填补了这一空白，是对传统空中交通管理技术研究的重要补充。

绿色空中交通管理技术涉及空气动力学、航空气象学、运筹学、信息工程技术和计算机仿真技术、航空排放与噪声等多个不同的学科内容，是一个适度超前、多学科融合的应用型研究方向。

本书共 7 章。第 1 章是绪论，简要回顾了绿色空中交通管理技术的历史发展，总结了有关方面的最新研究成果。第 2 章全面分析了空中交通对环境的影响，包括结合大气特性、航空器飞行特性和发动机特性，研究在飞行剖面不同阶段航空器运行对环境的影响，以及在场面运行、终端区飞行和区域飞行等飞行阶段环境主要缓解措施。第 3 章在机场服务能力评估中注入绿色理念和环境基因，创新性地提出机场环境容许空中交通量的定义和确定方法。第 4~6 章以减小环境影响为目标，针对机场场面、终端区和区域等不同空域单元建立相应的空中交通运行优化模型。第 4 章介绍先进的绿色场面滑行理念，探讨单发滑行和电子滑行与传统的全发滑行在燃油消耗、排放、运行流程等方面的不同，并与场面路径优化技术相结合，建立以节能减排为目标的多场景场面运行优化模型。第 5 章引入扩展终端区概念，联合使用改航和进场点优化分配手段以及 CDA 进场方式，建立了以节能、减排和降噪为目的的终端区资源优化模型。第 6 章考虑区域运行中对环境影响较大的凝结

尾现象,结合扇区飞行冲突探测与解脱策略,以减轻温室效应、节能和减排为目的,建立区域扇区飞行调配优化模型。第7章是本书的总结,对绿色空中交通管理技术的未来发展趋势进行了探讨和展望。

感谢国家自然科学基金委员会、国家空管委办公室、中国民用航空局、国际民用航空组织、中国民用航空局空中交通管理局、南京航空航天大学等单位,对本书编写工作的大力支持。胡明华是作者的博士生导师,长期关心和支持作者的工作,对本书的撰写提出了很多宝贵的意见。万莉莉在飞行性能分析、叶博嘉在计算机仿真、王湛在算法优化、李杰在气象数据分析等方面开展了卓有成效的研究工作。感谢南京航空航天大学的领导和同事们给予的大力支持和帮助。在写作过程中,我们还引用了大量参考文献,在此一并表示诚挚的感谢!

总之,希望本书能对绿色空中交通管理技术进行比较全面系统的介绍。由于作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请读者谅解和批评指正。

田 勇

2017年6月于南京

注 释 表

第 2 章

θ	飞机轨迹角	ε	燃油硫转换率
μ	地面摩擦系数	σ	挥发有机物 TSP 排放指数和 HC 排放指数的比值
ρ	大气密度	Δt_{APU}	APU 的使用时间
C_D	飞机阻力系数	L_E	傍晚时段 19:00~23:00 的等效连续 A 声级
C_e	燃油消耗率	L_N	夜间时段 23:00~07:00 的等效连续 A 声级
C_L	飞机升力系数	$L_{\text{EPN}ij}$	机型 i 在飞行轨迹 j 上形成的有效感觉噪声级
D	气动阻力	MW_{out}	SO_4^{-2} 的分子量
EI_i	气体 i 的排放指数	MW_S	S(硫)元素的分子量
EI_{HC}	HC 气体的排放指数	V	飞机速度
EI_{CO}	CO 气体的排放指数	W	飞机重量
EI_{NO_x}	NO_x 气体排放指数	L	飞机升力
$EI_{\text{TSPvol-FSC}}$	挥发性硫化物 TSP 的排放指数	L_D	日间时段 07:00~19:00 的等效连续 A 声级
EI_{TSPnv}	不挥发 TSP 的排放指数	X	水平距离
$EI_{\text{TSPvol-Fuelorganics}}$	挥发有机物 TSP 的排放指数	N	发动机数量
F_W	燃油消耗量	n_{Dij}	日间时段 07:00~22:00 的飞机数
FF	燃油流率	n_{Nij}	夜间时段 22:00~07:00 的飞机数
FF_{APU}	APU 的燃油流率	P_{FSC}	航空燃油硫含量
g	重力加速度	S	飞机机翼面积
H	飞行高度	T	飞机推力

第 3 章

σ_y	水平方向的扩散参数	σ_z	垂直方向的扩散参数
δ	太阳倾角	Δt	评估时间片
$EI_{i,k}$	飞机 i 的排放指数	PC_j	飞行阶段 j 的排放浓度
$F_{\Delta t}^k$	时段 Δt 内污染源 k 上的飞机集合	$Q_L[\Delta t]$	Δt 时间内环境空气质量标准限度
$E[\Delta t]$	Δt 时间内每架飞机的排放量	SS	污染源排放速率强度
$\text{FF}_{i,k}$	飞机 i 的燃油流率	t	观测时间
G	梯度	$t_{i,k}$	飞机 i 的滑行时间

H	有效源高	$V_{i,k}$	飞机 i 的飞行速度
H_{\min}	飞行航段最低点	V_W	平均风速
lon	当地经度	z	预测点高度
lat	当地纬度		

第 4 章

C_r^w	跑道 r 在时间片 w 的容量	$FW_i^{m'}$	APU 在 m' 状态下的燃油消耗
C_{u_l, u_r}^w	滑行道边 $(u_l, u_r) \in Y$ 在时间片 w 的容量	FW_i^m	飞机在 m 状态下的燃油消耗
EI_i^m	飞机在 m 状态下的排放指数	M	子机发动机状态集合
$EI_i^{m'}$	APU 在 m' 状态下的排放指数	M'	APU 状态集合
$FF_{i,T}^{A,APU}$	飞机 i 在 APU 启动后正常使用状态的燃油流率	S_u	滑行节点 u 的安全间隔
$FF_{i,E}^{A,APU}$	飞机 i 启动主发动机时 APU 的燃油流率	t_i^u	飞机 i 过滑行节点 u 的时刻
$FF_{i,S}^{A,APU}$	飞机 i 启动 APU 时的燃油流率	t_k^u	飞机 k 过滑行节点 u 的时刻
$FF_{i,j}^{A,E}$	飞机 i 在状态 j 下单个发动机的燃油流率	N_i	飞机 i 的发动机数量
$FF_{i,T}^{E,APU}$	飞机 i 在电子滑行时 APU 的燃油流率	$t_i^{u_l}$	飞机 i 过滑行道节点 u_l 的时刻
$FF_i^{E,E}$	飞机 i 单个发动机在预热和冷却时的慢车燃油流率	$t_i^{u_r}$	飞机 i 过滑行道节点 u_r 的时刻
$FF_i^{S,E}$	飞机 i 的单个发动机的燃油流率	$T_{i,T}^{A,APU}$	飞机 i 在 APU 启动后正常使用状态的运行时间
FW_{APU}^A	全发滑行方式下 APU 的消耗燃油量	$T_{i,j}^{A,E}$	飞机 i 在状态 j 下的滑行时间
$FW_j^{A,E}$	全发滑行方式下主发动机不同滑行状态 j 时的消耗燃油量	$T_{i,S}^{A,APU}$	飞机 i 启动 APU 时的运行时间
FW_{APU}^E	电子滑行方式下 APU 的消耗燃油量	$T_{i,E}^{A,APU}$	飞机 i 启动主发动机时 APU 的运行时间
$FW^{E,E}$	电子滑行方式下主发动机的消耗燃油量	$T_i^{E,F}$	飞机 i 在场景三下的滑行时间
FW_{APU}^S	单发滑行方式下 APU 的消耗燃油量	$T_i^{S,E}$	飞机 i 在场景二下的滑行时间
$FW^{S,E}$	单发滑行方式下主发动机的消耗燃油量	v_i	飞机 i 的滑行速度

第 5 章

A	进场航班集合	S_i^A	进场航班 i 的实际进场时间
AS	机场噪声评估范围	FF_i^n	进场航班 i 在飞行阶段 n 时的燃油流率
C_k^w	为航段 k 在时间窗 w 内的容量	S_i^D	离场航班 i 的实际离场时间
D	离场航班集合	t_i^h	进场航班 i 在进场点的等待时间

E_i^A	进场航班 i 的预计进场时间	t_i^d	进场航班 i 在航路下降段的飞行时间
FF_i^a	进场航班 i 在进近时的燃油流率	t_i^a	离场航班 i 的预计离场时间
FF_i^d	进场航班 i 在航路下降时的燃油流率	T_k^h	进场点 k 的等待时间
FF_i^g	离场航班 i 在地面等待的燃油流率	T_{\max}^h	最大空中等待时间
FF_i^h	进场航班 i 在进场点等待的燃油流率	W	时间窗集合

第 6 章

ε	水和干洁空气的分子量比值	γ	转弯时飞机的坡度
ΔH_i	飞机 i 高度改变量	ΔHT_i	飞机 i 的航向改变量
C_p	一定质量气体在一定压力下升高单位温度所需的能量	RC_i^{\max}	飞机 i 的最大爬升率
C_k^w	航段 k 在时间窗 w 内的容量	RD_i^{\max}	飞机 i 的最大下降率
C_p^w	航路点 p 在时间窗 w 内的容量	S_{LO}	安全纵向间隔
d_{ij}	飞机 i 和飞机 j 之间的距离	S_{LA}	安全侧向间隔
EI_{H_2O}	水蒸气排放指数	S_V	安全垂直间隔
F	航空器集合	S_L	安全水平间隔
FF_i^C	为飞机 i 在巡航时的燃油流率	S_{ij}	飞机 i 和飞机 j 之间的安全间隔
$FF_i^{V_1}$	飞机 i 在 V_1 时的燃油流率	T	大气温度
$FF_i^{V_2}$	飞机 i 在 V_2 时的燃油流率	t_i^C	飞机 i 在扇区保持巡航平飞的时间
FL	扇区可用高度层集合	t_i^{DC}	航向调整过程中直线平飞的时间
FW_i^C	保持巡航平飞的燃油消耗量	t_i^{DT}	航向调整过程中转弯的时间
FW_i^V	使用速度调整策略时飞机 i 所消耗的燃油量	t_i^{HC}	爬升过程经历的时间
FW_i^D	使用航向调整策略时飞机 i 所消耗的燃油量	t_i^{HD}	下降过程经历的时间
FW_i^H	使用高度调整策略时飞机 i 所消耗的燃油量	t_i^{NC}	新高度层巡航时间
p	大气压力	t_i^V	飞机 i 在速度调整时的经历时间
Q	燃油比热值	V_i	飞机 i 的飞行速度

缩 略 词

缩略词	英文全称	中文全称
AEC	airport environment capacity	机场环境容许空中交通量
AFA	arrival fix allocation	进场点分配
AFR	air fuel ratio	空燃比
ANP	aircraft noise performance	航空器噪声性能
APU	auxiliary power units	辅助动力装置
BADA	base of aircraft data	飞机基础数据库
BPR	bypass ratio	涵道比
CAS	calibrated air speed	校准空速
CCAR	China civil aviation regulation	中国民用航空规章
CCL	continue climb	持续爬升
CDA	continuous decent approach	持续下降进近
CL	climb	爬升工作状态
CNS	communication navigation surveillance	通信、导航和监视
DDA	delayed deceleration approaches	延迟减速进近
EC	environmental capacity	环境容量
ECDT	engine cool down time	发动机冷却时间
EED	engine emissions databank	发动机排放数据库
EGTS	electronic green taxi system	绿色中滑行系统
EQS	environment quality standard	环境质量标准
ESUT	engine start up time	发动机预热时间
ET	electronic taxi	电子滑行
ETC	environmental traffic capacity	环境容许交通量
ETM	extended terminal	扩展终端区
FCFS	first come first server	先到先服务
FF	fuel flow	燃油流率
HL	high load	高负荷
IAS	indicated airspeed speed	指示空速
ICAO	international civil aviation organization	国际民航组织
INM	integrated noise model	综合噪声模型
LRC	long range cruise	远程巡航
LTO	landing take-off cycle	起落循环
MCR	maximum cruise	最大巡航状态

缩略词	英文全称	中文全称
MCT	maximum cruise thrust	最大巡航推力
MDAC	maximum day average concentration	最大日平均浓度
MHAC	maximum hour average concentration	最大小时平均浓度
MIT	miles in trail	尾随间隔
MRC	maximum range cruise	最大航程巡航
NASA	national aeronautics and space administration	美国国家航空航天局
NCF	number of contrail flight	符合凝结尾产生条件的飞机数量
NL	normal load	正常使用状态
NOAA	national oceanic and atmospheric administration	国家海洋和大气局
NOL	no load	无负荷
NPD	noise power distance	噪声-功率-距离
OEW	operate empty weight	运行空机重量
OPD	optimum profile decent	最优剖面下降
PET	pre-optimal taxi time	优化前的平均滑行时间
PM	particulate matter	悬浮微粒
POT	post-optimal taxi time	优化后的平均滑行时间
RHC	critical relative humidity of water	关键相对湿度
RHI	relative humidity of ice	相对冰度
RHW	relative humidity of water	相对湿度
RHSM	reduced horizontal separation minima	减小水平间隔
RNAV	regional navigation	区域导航
RNP	required navigation performance	所需导航性能
SN	smoke number	烟尘
TAS	true airspeed	真空速
TO/GA	takeoff/go around	起飞/复飞状态
TSP	total suspended particulate	总悬浮颗粒物

目 录

前言

注释表

缩略词

第 1 章 绪论	1
1.1 背景和意义	1
1.1.1 背景	1
1.1.2 本书研究意义	5
1.2 国内外研究与应用现状	7
1.2.1 场面运行对环境的影响研究	7
1.2.2 终端区运行对环境的影响研究	8
1.2.3 区域运行对环境的影响研究	10
1.2.4 环境容许交通量研究	11
1.3 主要内容和章节安排	12
1.3.1 研究内容	12
1.3.2 章节安排	13
第 2 章 空中交通对环境的影响分析	15
2.1 大气特性	15
2.1.1 大气分层	15
2.1.2 温室效应	16
2.2 航空器特性	17
2.2.1 飞行剖面	17
2.2.2 航空器飞行特性	17
2.2.3 发动机特性	19
2.3 航空器对环境的影响	22
2.3.1 航空排放	22
2.3.2 飞机噪声	27
2.4 环境影响缓解措施	28
2.4.1 场面运行阶段	29
2.4.2 终端区飞行阶段	30

2.4.3	区域飞行阶段	32
2.4.4	其他措施	33
2.5	本章小结	33
第3章	机场环境容许空中交通量评估方法	35
3.1	机场大气污染物多源扩散模式	35
3.1.1	点源扩散模式	36
3.1.2	线源扩散模式	38
3.1.3	面源扩散模式	40
3.2	机场大气污染物浓度评估	41
3.2.1	浓度评估模型	41
3.2.2	浓度评估实例	41
3.2.3	浓度影响机理	45
3.3	机场环境容许空中交通量	49
3.3.1	基本定义	49
3.3.2	评估实例	51
3.4	本章小结	57
第4章	面向环境保护的场面运行优化方法	58
4.1	航空器滑行方式	58
4.1.1	全发滑行方式	58
4.1.2	单发滑行方式	60
4.1.3	电子滑行方式	61
4.2	航空器场面运行分析	63
4.2.1	滑行拓扑网络	63
4.2.2	场面滑行冲突	63
4.3	考虑多场景环境影响的场面运行优化方法	64
4.3.1	场景构建	65
4.3.2	目标函数	65
4.3.3	约束条件	68
4.3.4	算法设计	69
4.4	场面运行优化实例分析	72
4.4.1	基础数据	72
4.4.2	燃油消耗分析	74
4.4.3	滑行时间分析	80
4.4.4	气体排放分析	81
4.5	本章小结	84

第 5 章 面向环境保护的终端区运行优化方法	86
5.1 扩展终端区的定义	86
5.2 终端区噪声评估方法	87
5.2.1 噪声计算方法	87
5.2.2 传统进近程序噪声评估	93
5.2.3 CDA 程序噪声评估	97
5.3 考虑环境影响的终端区运行优化方法	98
5.3.1 优化模型	98
5.3.2 算法设计	100
5.3.3 实例分析	101
5.4 基于 CDA 的终端区运行优化方法	107
5.4.1 优化模型	107
5.4.2 实例分析	107
5.5 本章小结	110
第 6 章 面向环境保护的区域运行优化方法	111
6.1 凝结尾形成条件	111
6.2 区域扇区飞行冲突探测与解脱	113
6.2.1 飞机安全保护区模型	113
6.2.2 区域扇区飞行冲突类型	114
6.2.3 区域扇区飞行冲突解脱方法	115
6.3 考虑环境影响的区域扇区飞行调配优化方法	117
6.3.1 目标函数	117
6.3.2 约束条件	121
6.3.3 算法设计	122
6.4 区域扇区飞行调配优化实例分析	124
6.4.1 基础数据分析	124
6.4.2 结果分析	127
6.5 本章小结	133
第 7 章 总结与展望	134
7.1 总结	134
7.2 展望	135
参考文献	136
附录一 APU 燃油消耗率和排放指数	142
附录二 飞机发动机型号	143

附录三	CF567B 的 NPD 数据	144
附录四	环境标准	146
彩图		

第 1 章 绪 论

1.1 背景和意义

1.1.1 背景

环境是人类生存和发展的基本前提。环境为我们的生存和发展提供了必需的资源 and 条件。随着 20 世纪以来近代工业革命的不断推动，世界各国经济得到空前发展。在全球持续快速发展的同时，过度的自然资源开发和长期无限制的碳排放导致人类生存环境不断恶化，全球变暖、大气污染、水土流失、种族灭绝等环境问题不断凸显，严重影响人类的生存和发展。根据 2016 年 5 月 23 日第二届联合国环境大会发布的“健康星球，健康人类”报告，全球约 1/4 的人口死亡与环境问题有关。在此严峻形势之下，环境保护已成为全球各行各业普遍关注和致力解决的重大问题。

环境保护(简称环保)是在个人、组织或政府层面，为造福大自然和人类而保护自然环境的行爲，是指人类为解决现实的或潜在的环境问题，协调人类与环境的关系，保护人类的生存环境，保障经济社会的持续发展而采取的各种行动的总称。其方法和手段有工程技术、行政管理以及法律、经济、宣传教育，等等。保护环境是人类有意识地保护自然资源并使其得到合理的利用，防止自然环境受到污染和破坏；对受到污染和破坏的环境做好综合的治理，以创造出适合人类生活、工作的环境，协调人与自然的关係，让人们做到与自然和谐相处的概念。自 20 世纪 60 年代起，环保运动已逐渐令大众更重视身边的各种环境问题。

中国作为世界上最大的发展中国家，在经济社会持续发展的同时，生态环境问题亦接踵而来，环境保护问题已被国家各部门提升至战略发展的层面。环境问题是 中国 21 世纪面临的最严峻挑战之一，保护环境是保证经济长期稳定增长和实现可持续发展的基本国家利益。环境问题的解决关系到中国的国家安全、国际形象、广大人民群众的根本利益，以及全面小康社会的实现。为社会经济发展提供良好的资源环境基础，使所有人都能获得清洁的大气、干净的水源和安全的食品，是政府的基本责任与义务。例如，在 2010 年十七届五中全会，明确要求“树立绿色、低碳发展理念”，将“绿色发展”写入“十二五”规划并独立成篇；2013 年十八届三中

全会,将生态文明建设放在突出地位,并提出建设“美丽中国”的宏伟目标。在能源紧张和环境恶化的双重压力下,绿色已成为当今时代特色,并与和平、发展共同形成世界的三大主题,低碳、节能和环保理念已成为全球人类发展的共同追求。

民航业作为世界各国经济社会发展的重要支撑产业,与国家、地区乃至全球发展密切相关。特别是在全球经济一体化背景下,航空运输不仅是一种交通运输方式,而且成为区域经济融入全球经济的快速通道。2016年全球航空旅客运输量达到37亿人次,货物运输量价值占世界贸易总额的35%。中国作为全球第二大航空运输市场、第二大经济体、第一大贸易国和第一大旅游客源国,经济社会发展和人民生活水平的不断进步直接带动着航空运输市场的快速蓬勃增长。据国际民航组织(ICAO)和中国民用航空局等官方机构统计,2016年全球民航旅客周转量同比仅增长5.7%,而中国民航旅客周转量同比增长12%,远超全球民航平均发展水平。为进一步推动中国航空运输产业快速发展,国务院在2012年7月发布的《国务院关于促进民航业发展的若干意见》中为中国民航业发展制定了如下目标:到2020年,航空运输年总周转量达到1700亿吨千米,年均增长12.2%,全国人均乘机次数达到0.5次。在此宏伟目标和战略愿景之下,中国经济社会发展水平和全球影响力必将在航空运输市场蓬勃发展的基础上得到进一步的提升,与此同时由空中交通运行引发的机场周边及空域环境污染问题亦不容忽视,并逐渐呈现愈演愈烈之势,绿色发展已成为中国航空运输业的现实所需和关键难题,这不仅是我国由民航大国向民航强国快速迈进的必经之路,亦是提升中国民航国际竞争力、增强全球碳排放交易市场话语权的重要支撑。因此,为顺应全球民航绿色发展趋势和国内民航迫切发展需求,紧跟欧美等航空发达国家和地区业界的关注焦点和学界研究热点,在确保空中交通运行安全和效率的同时,亟须开展绿色空中交通管理技术研究。

航空时代引发的环境污染问题已迫使人们逐渐将目光从地面、河流和海洋引向广阔的天空。自商用喷气机时代开始以来,航空运输业不断发展,日渐增长的空中交通运行需求在为人们创造舒适、便捷和高效旅行的同时,其飞行过程亦带来大量的航空器燃油消耗、尾气排放以及噪声污染等问题,不可避免地会对机场周边及空域环境造成一定的影响。虽然航空运输气体排放目前在全球温室气体排放量中所占比例不高,但上升速度非常快,而且是高空气体排放的主要来源。据联合国政府间气候变化专门委员会统计,目前航空运输排放的二氧化碳(CO₂)占世界运输业总排放量的13%,占全球人为CO₂排放总量的2%^[1]。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,航空燃料在世界石油消耗量中的比重将会逐年增加,而且航空排放属于高空排放和移动排放,对大气层所造成的影响有相应的放大作用。随着全球航空运输业的高速发展,若不采取相应环境保护措施,未来40年航空运输产生的气体排放占全球人为CO₂排放量的比例将增至

3%，造成气候变化的比例将增至 5%^[2]。图 1.1 为全球 CO₂ 排放源组成及比例分配情况。

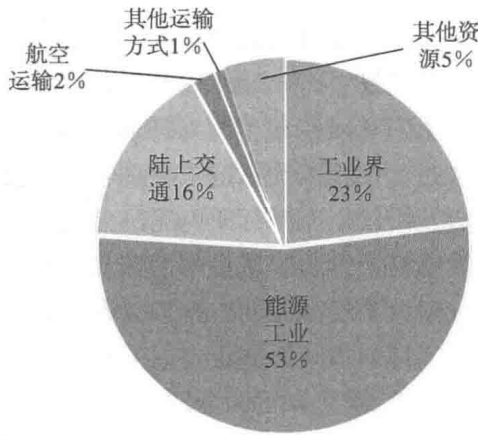


图 1.1 全球 CO₂ 排放源构成比例图

面对巨大的环境挑战和严峻的环保形势，一场“绿色航空”革命正在世界航空业悄然兴起。“绿色航空”是一项长期系统的工程，需要大量的人力、物力和时间，目前的解决思路和工作重点主要体现在以下四个方面：第一，充分发挥政府监管和市场调节作用，从宏观层面约束各国行为，包括制订环保计划、政策和框架协议等。例如，在 2010 年国际民航组织第 37 届大会，190 个会员国在环保方面通过了一项综合性决议，承诺 2020 年开始实现零排放增长，2050 年 CO₂ 净排放量在 2005 年基础上减半。第二，革新航空制造技术。通过采用新一代的气动布局、发动机体系结构及复合材料结构设计和制造等技术，研制可大幅提升燃油效率的替换型飞机或发动机。例如，在 A350、B787 和 C919 等机型的研制过程中，以碳纤合成材料取代铝制机体，使飞机重量大大减轻，减小起飞和降落过程产生的噪声，并使飞行效能提高 20%。第三，开发使用可持续航空生物燃料来替代传统的航空燃油。通过大范围地种植麻风树、亚麻荠、藻类和盐土植物来提炼航空生物燃料，或从废弃油脂（包括地沟油、食用油边角料、餐饮废油等）中提取航空生物燃料，变废为宝。例如，2008 年 2 月，英国维珍航空公司首次将 B747 机型四发中的一发连接独立的生物燃料油箱，成功完成验证飞行；自 2011 年航空生物燃料被批准以来，各国航空公司使用该燃料的载客飞行次数已经达到了 1500 多次。第四，优化空中交通管理技术和流程，提高航空运输运营效率。通过采用持续下降进近(continue decent approach, CDA)、航线截弯取直、飞行程序和路线优化、飞行高度和速度优化等，提高空中交通运行效率，减小燃油消耗、气体排放和噪声污染等环境影响。例如，欧洲单一天空计划通过制定一系列欧洲各国民航一体化空管措施，美国下一代航空运输系统