

中文核心期刊要目总览（中文核心期刊）
 中国科技论文统计源期刊（中国科技核心期刊）
 中国学术期刊综合评价数据库（CAJCED）统计源刊
 中国知识资源总库（CNKI）源期刊
 中文科技期刊数据库（全文版）统计刊
 CEPS 中文电子期刊服务全文收录期刊
 中国学术期刊文摘（中国科协主办）源期刊

《科学技术与工程》旬刊（2001年创刊） 2019年 第19卷 第30期（总第499期）
 《Kexue Jishu yu Gongcheng》

编委会成员

主任：杜祥琬

副主任：李平

委员（按姓氏拼音排序）：

曹春晓(院士) 陈懋章(院士) 陈蕴博(院士) 陈运泰(院士) 杜祥琬(院士)
 傅恒志(院士) 高金吉(院士) 郭孔辉(院士) 贺福初(院士) 李椿萱(院士)
 李静海(院士) 李平 刘大响(院士) 刘吉臻(院士) 马宗晋(院士)
 戚发轫(院士) 唐明述(院士) 滕吉文(院士) 王玉明(院士) 许昌淦
 姚振兴(院士) 张福泽(院士) 张运(院士) 郑南宁(院士) 钟群鹏(院士)

主管单位：中国科学技术协会

主办单位：中国技术经济学会

主编：李平

副主编：李志军 牛东晓 刘少华

编辑部主任：张利梅

编辑出版：《科学技术与工程》编辑部

出版日期：2019年10月28日

印刷：北京博海升彩色印刷有限公司

通信地址：北京市海淀区学院南路86号

《科学技术与工程》编辑部（100081）

电话：（010）62118920

网址：http://www.stae.com.cn

E-mail:stae@stae.com.cn

邮发代号：2—734 国外发行代号：BM3871

定价：15.00元

ISSN 1671-1815



9 771671 181190

30

科学技术与工程

Science Technology and Engineering

基于多分辨方法的海量数据三维云体绘制（221页文）

30
2019

中国技术经济学会主办

Contents

Survey

Petroleum and Natural Gas Industry

Research Advances in the Attenuation Mechanism of the Oil-quality-indicators' Value Regarding the Mixed Segment during Batch Transport Process
 HE Guo-xi, QIN Min, LIAO Ke-xi(8)

Nuclear Technology

Important Safety Issues in the Design of Small-sized Marine Nuclear Power Plants WANG Jue,
 CHEN Li-sheng, CAI Qi, GONG Da-xin(15)

Papers

Mechanics

Effect of Strain Rate on Evolution Law of Dissipative Energy of Polymethyl Methacrylate under Cyclic Loading
 YANG Hai-qing, QIU Ji, JIN Tao, SHU Xue-feng(20)

Physics

Molecular Dynamics Simulation of Couette Flow in Micro-nano Channels MIAO Rui-can,
 CHEN Zhan-xiu, YANG Li, JIA Gui-peng(27)

Astronomy and Geosciences

Development of a Lightning and Precipitation Visualization Research Platform Based on Targeted Service
 ZHU Jie, XING Hong-yan(34)

Calculation of Near-field Electromagnetic Field of Lightning Return Stroke Based on Channel-base Current Model with Biexponential Function ZHANG Zi-heng,
 TIAN Yang-meng, WANG Cai-xia(42)

Study on the Geomorphic Uplift Characteristics of the Longmenshan Fault Zone Using Hypsometric Integral Method
 HONG Yan, ZHAO Yin-bing,
 WANG Yun-sheng, XIN Cong-cong, ZHANG Ting-ting(51)

Adaptive Wavelet Entropy Threshold Seismic Random Noise Suppression Algorithm Based on Improved Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition
 MENG Juan, HAN Zhi-ming, LI Ya-nan(61)

Assessment of Landslide Susceptibility Based on SVM-LR Model; a Case Study of Lintong District WANG Nian-qin,
 GUO You-jin, LIU Tie-ming, ZHU Qing-hua(69)

Wave Height Measurement Device Based on MEMS Accelerometer LIU Lu,
 WANG Shou-jun, CHEN Song-gui, JIN Rui-jia(77)

Agricultural Science

Effect of Compound Preservative Treatment on the Preservation Effect of *Pleurotus eryngii* during Shelf Period
 CHEN Hui-yan, WANG Liang, ZHANG Wei,
 ZHANG Li-xin, YANG Zhi-guo, ZHANG Xiao-yu, LI Chao(84)

Mining and Metallurgical Engineering

Multi-factor Optimization of Storage Group in Salt Rock Based on Yield Approach Index
 ZHANG Jian-pei, ZHANG Shang-kun,

Volume 19 Number 30 (Sum 499)

JIA Chao, DU Sheng-xian, TONG Kai(90)

The Corrosion Resistance of Polypyrrole Coating on Aluminum Alloy QIN Wen-feng, FAN Yu-hang,
 WANG Xin-yuan, FU Jia-wei, YOU Wen-tao(96)

Temperature Test in Grinding Narrow Deep Groove Components
 HAO Xin-hui,
 LIANG Guo-xing, WANG Shi-ying, LÜ Ming(102)

Petroleum and Natural Gas Industry

Diagenesis and Its Effects on the Reservoir of Leikoupo Formation in Longmending Area of Southwestern Sichuan
 LI Qiong-yu, LI Qi(112)

Effects of Casing Performance Change on Wellhead Growth Height in High Temperature Gas Well
 SHI Xiao-lei, WANG Yan-bin, GAO De-li(121)

Effects of Supercritical Carbon Dioxide Immersion on Mechanical Properties of Shale DING Lu, NI Hong-jian(127)

Calculation Method and Application of Combined String Load in Horizontal Well Drilling and Grinding
 DU Yu-cheng, LIU Xu-hui,
 CHEN Wen-kang, SUN Qiao-lei, FENG Ding(133)

Synthesis of MCS Clay Anti-swelling Agent
 RONG Xu-feng, WANG Yan-ling,
 ZHANG Chuan-bao, LI Qiang, LI Yong-fei(139)

Mechanical and Instrumental Industry

Vibration Characteristics and Unbalanced Electromagnetic Force Analysis of a Rotor for a Hub Motor with Air Gap Eccentricity
 HAN Yi-lun, CHEN Tao, LI Guo-shan(145)

The Contact Ratio of the Meshing Transmission of the Curved Rack FENG Ding,
 WANG Ke-qiang, SHI Lei, PENG Tai-feng(151)

Energy and Power Engineering

Improvement of Straight-through Hot Roll Runner
 AN Yu-huan,
 LI Xu-jia, WANG Neng-he, WU Xian-feng(158)

Optimization of Tertiary Air Velocity Distribution of Staged Combustion in the Precalciner WANG Wei-shu,
 LIAO Yi-han, TIAN Miao, LIU Jun, FANG Fan(165)

Influence of Pitch Angle on Dynamic Characteristics for 5 MW Wind Turbine Blades under Rated Condition
 ZHANG Jian-ping,
 GONG Zhen, JI Hai-peng, ZHANG Zhi-wei(171)

Electrical Technology

A Temperature Rising Test Method of Induction Motor Stator Winding Based on Thermal Network Model and Parameter Estimation WANG Xin, ZHANG Xu-dong, FAN Qi-ming(178)

Frequency Tracking Characteristics of Magnetic Coupling Resonant Wireless Power Based on Digital Signal Processing
 LIU Jia, CHEN Hai-yan, ZHAO Shi-long(184)

The Transmission Characteristics of the Traveling Wave Power Transmission System along the Suspension Insulator
 YANG Hong-da,

LI Wei-guo, GAO Ze-meng,
 CHEN Yan, ZHANG Hui-yuan, ZHAO Wei-mei(190)

A Multiple Harmonic Sources Localization Method Based on Data

Analysis CHEN Dong-xin,
XIAO Xian-yong, WANG Xin(195)

Electronic and Communicational Technology

An Electrically Small Dual-frequency Transmitting Antenna Suitable for High Frequency Surface Wave Radar

..... MA Qing-feng,
CHEN Zhang-you, WU Xiong-bin(200)

Design of Real-time Data Recording Card Based on Non-volatile Storage Array XIE Ling-fang,
MENG Ling-jun, XU Yan, ZHU Shan(206)

Automation and Computational Technology

A Pareto Optimal Decision Model for Intelligent Bird Driving in Airport

..... ZHU Teng-teng, GU Yu-hai, RAO Wen-jun(214)

Kinect Depth Image Restoration Algorithm Based on Space-time Domain Data Fusion

..... LIN Ling, CHEN Yao-jie, GUO Tong-huan(220)

Three-dimensional Cloud Rendering of Massive Data Based on Multi-resolution Method XIE Yong-hua,
JI Yu, ZHENG Yi, ZHU Chao-fan(226)

Echo Hidden Audio Watermarking Algorithm Based on Error Correction Coding

..... CHEN Qiang, CHEN Yu, DU Ting-ting(231)

Segmentation Method of Ancient Chinese Character Images Based on Hesitant Fuzzy Sets

..... QI Yan-mei, TIAN Xue-dong, ZUO Li-na(240)

End-to-end Unmanned Vehicle Control Based on Spatio-temporal Feature Learning

..... LIU Dong-jie, ZHAO Jin, XI A-xing(246)

Task Classification-aware Data Aggregation Scheduling Algorithm in Wireless Sensor Networks ZOU Hong-sen,
LI Liang, AO Chen,

ZHANG Pu-ning, WANG Zheng, LI Ning(257)

Deep Multi-scale Fusion Remote Sensing Aircraft Detection Method Based on Optimal Region Propose

..... LIU Chen, ZHENG En-rang, ZHANG Tong(262)

Estimation of the Number of Sources of Multi-user Long Code Direct Sequence Spectrum Signals LI Xin-kai,
ZHANG Tian-qi, LIANG Xian-ming(268)

Civil, Handicraft and Living Services Industry

Development of Continuous Grain Vacuum Dryer Based on Dry Vapor Waste-heat Utilization and Performance Evaluation

..... WANG Yu-kun, MA Su-xia,
PAN Yong-kun, ZHENG Wei-qiang(273)

Architectural Science

Arbitrary Cutaway of 3D Model in BIM Cloud Platform

..... WANG Cheng-long,
ZHOU Dong-ming, CUI Wei-jiu(280)

Random Seismic Response Analysis of Large Span Isolated Structures Subjected to Rare Earthquake GU Zhen-yuan,
TANG Tian-yue, XU Yi-kang, WU Kun(287)

Effect of Bracing Members on the Stress State of Transmission Tower YE Zhong-fei,

WU Chuan, TAO Ya-guang, LÜ Zhong-bin,
MA Lun, XIE Kai, BAI Yin-hao(296)

Effect of Deep Foundation Pit Excavation and Precipitation on Adjacent Subway Tunnel

..... CHEN Zhi-wei, MIAO Hai-bo(302)

Experimental on Bearing Capacity of Alkali Slag Foundation

..... MA Jia-xiao, ZHANG Peng,

BAI Xiao-yu, ZHENG Chen, ZHANG Ming-yi, YAN Nan(309)

Traffics and Transportations

Safety of New Type Aluminum Alloy Crash Barriers for Urban Bridge JIAO Chi-yu, ZHU Ge-xi,

LONG Pei-heng, SHI Wen-hao, XIAO Xiang(316)

Large Deformation Monitoring and Support Optimization of Soft Rock Tunnel with High Ground Stress WANG Ying-fan,

LIU Qin, HU Yongzhi, LIU Bing-fei, WEI Lai(323)

Measurement of Distribution Characteristics of Vehicle Emission Pollutants in Tunnel

..... ZENG Yue, RAN Fu-xia, XU Jin(330)

Sensitivity of Driver's Electrocardiogram Index to Information Volume of Traffic Signs of Grassland Highway QI Chun-hua,

LIU Xin, ZHU Shou-lin,

GAO Ming-xing, YANG Feng, LI Hang-tian, HAN Lei(336)

Short-term Traffic Flow Prediction Model Based on XGBoost

..... ZHONG Ying,

SHAO Yi-ming, WU Wen-wen, HU Guang-xue(342)

Planning of Shared Bicycle Stop for Urban Rail Transit Community Connection Based on K-means

..... JIN Shuang, PANG Ming-bao(347)

Aeronautics and Astronautics

Simulation and Analysis Technology of Fixed-wing Aircraft Circling Performance Based on Flight Test Data

..... QIU Fu-sheng, WEI Chuang, YUAN Lao-hu(353)

Coupled Vibration Analysis of Compressor Blade-disc Structure from an Aero Engine

..... LI Shi-lin, WEI Wu-guo, ZHANG Shao-wei(361)

Optimization of Gates Assignment Based on Air Emissions

..... ZHOU Xiao-ning,

WANG Kai, ZHAO Zhi-qi, LI Jie(367)

Congestion Assessment of Air Traffic Network Flow System

..... ZHANG Zhao-ning, LI Lan-tian(374)

Environmental and Safe Science

A Satellite Remote Sensing and Site Monitoring Combined Method of PM_{2.5} Concentration Off-limit Areas Accurate Recognition

..... LIAO Cheng-hao,

ZENG Wu-tao, ZHANG Yong-bo,

LI Ying, LIN Chang-qing, LIU Qi-han(378)

Preparation of High Energy GO/TiO₂ and Its Performance of Photocatalytic Reverse Osmosis Concentrated Water

..... ZHAO Ting-ting,

WANG Li-zhang, CHEN Qian-wen(384)

Effect of Snowfall on Nitrogen Cycle in Xiaoxinganling Wetland in Northeast China SUN Hui,

LI Ji-guang, TANG Zheng,

LI Hui, LI Zhong-fang, HU Ning, LOU Yi-lai(389)

Enhance Iron-Carbon Micro-electrolysis for the Removal of Low Concentration Nitrate Nitrogen by Microbial Fuel Cell

..... CUI Ying,

ZHAO Bo-wei, XIE Fei, YUE Xiu-ping(396)

Treatment of Low Concentration Chromium Wastewater onto Oxy-tetracycline Residue Activated Carbon

..... LING Yan, NIU Jian-ru(404)

引用格式:周晓宁,王凯,赵志奇,等.基于航空排放的机场停机位分配优化[J].科学技术与工程,2019,19(30):362-367

Zhou Xiaoning, Wang Kai, Zhao Zhiqi, et al. Optimization of gates assignment based on air emissions[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(30): 362-367

基于航空排放的机场停机位分配优化

周晓宁¹ 王凯^{2,3} 赵志奇^{2,3} 李杰^{2,3*}

(南京航空航天大学金城学院¹,民航学院²,国家空管飞行流量技术重点实验室³,南京 211106)

摘要 随着航空业的快速发展,航空排放对大气环境的影响日益严重。机场停机位分配优化研究,对航空绿色发展具有重要意义。基于场面运行规则,航空器排放、近机位利用率等多目标,建立一种使航空器排放量最小,近机位利用率最大的机场停机位分配优化模型,并通过南京禄口国际机场某日航班数据实例验证。结果表明:由于近机位利用率的提升,航空器的HC、NO_x、CO、SO_x和颗粒物(particulate matter, PM)排放量分别减少12.33%、7.81%、12.66%、11.06%和11.17%;地面保障设备(ground support equipment, GSE)的HC、NO_x、CO、PM排放量分别减少9.59%、4.63%、14.34%、13.64%;远机位旅客平均花费时间减少42.31%。可见提出的优化模型增加了近机位利用率,减少了机场航空排放,减少了远机位旅客平均花费时间,验证了模型有效性。

关键词 机场 航空排放 停机位分配 多目标优化
中图分类号 V 351.11 X 831; **文献标志码** B

随着航空运输需求的提升,机场作为航空运输系统的重要组成部分,机场数量和机场密度也将逐渐增大^[1]。然而,机场各类航空排放物对大气环境的影响也日益受到关注^[2]。航空排放物主要有CO₂、H₂O、NO_x、CO、SO_x、挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)、以及其他气体和颗粒物(particulate matter, PM)^[3]。机场范围内航空排放具有局地性及集中性等特点将恶化大气环境,对机场附近公众健康及生态环境构成最直接的威胁与影响^[4-6]。为构建环境友好的现代化民航,中国民航将绿色发展融入行业发展中长期规划,并将环保提升至与安全、效益、服务同等地位。航空器与地面保障设备(ground support equipment, GSE)是机场航空排放物的主要排放源^[7],停机位是机场关键资源,关于停机位分配优化问题已成为当前航空领域研究热点。为适应中国民航运输业的绿色发展,优化停机位分配,从而完善机场减排措施,就显得尤为迫切。

目前,国内外关于停机位分配问题(gate assign-

ment problem, GAP)的研究,主要从提升旅客满意度、促进机场安全、高效运行与降低航空公司运营成本3方面展开优化。Dell'Orco等^[8]、Yu等^[9]和苏原等^[10]以最小化旅客步行距离、均衡化停机位利用,通过多目标优化建模,提高了机场服务质量与运行效率;Castaing等^[11]、Sang等^[12]和刘长有等^[13]主要以减少停机位冲突为目标,提升了机场航空器运行安全性;Tang等^[14]、Maharjan等^[15]和刘君强等^[16]面向航空公司,以最大化停机位偏好与最小化航空器滑行油耗为目标,降低航空公司运营成本。目前,国内外研究多集中于优化航空器滑行路径^[17,18]、改善滑行方式^[19,20]以及将二者结合^[21]等方法降低航空器运行排放,较少关注停机位分配对航空排放产生的影响。

为此,依据机场实际运行规则,考虑场面运行约束,考虑机场航空排放的停机位分配的影响,提出了一种降低机场航空排放的停机位分配优化策略。建立航空器污染物排放量最小与近机位利用率最大的多目标停机位分配规划模型,并使用分支定界法进行精确求解。以期促进机场绿色可持续发展,提高机场运行效率及服务质量。

1 航空排放计算

机场的航空排放主要指机场运营期间,与航空活动相关的各类排放源运行产生的污染物的排放,有航空器、GSE、辅助动力单元(auxiliary power

2019年3月27日收到

国家自然科学基金(61671237)、

江苏省自然科学基金(BK20160798)和

江苏省研究生创新基地开放基金(kfj20180722)资助。

第一作者简介:周晓宁(1980—),女,汉族,江苏南京人,硕士,讲师。研究方向:算法设计与优化。E-mail:413371701@qq.com。

*通信作者简介:李杰(1979—),男,汉族,安徽滁州人,博士,讲师。研究方向:航空排放与绿色航空。E-mail:jetly@126.com。

units, APU)、固定源、地面通行车辆等^[2]。由于航空器与 GSE 在机场飞行区内运行,且对机场航空排放污染物贡献较大,因此,考虑了航空器及 GSE 对污染物排放的影响。

1.1 航空器排放

根据国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)推荐的航空器排放计算模型^[3],航空器排放与发动机数量、燃油流率、排放指数以及运行时间等参数密切相关。航空器处于国际标准大气压(international standard atmosphere, ISA)运行时,燃油流率以及 NO_x、CO、HC 的排放指数可直接从 ICAO 发动机排放数据库(engine emissions database, EEDB)中获取。具体计算方法如式(1)所示:

$$E_{pj} = TIM_j FF_j EI_{pj} Ne_j \quad (1)$$

式(1)中: E_{pj} 为 j 型单架航空器在滑行阶段污染物 p 的排放量, g ; TIM_j 为 j 型航空器在滑行阶段的运行时间, s ; FF_j 为 j 型航空器使用单发动机滑行阶段的燃油流率, kg/s ; EI_{pj} 为 j 型航空器在滑行阶段中污染物 p 的排放指数, g/kg ; Ne_j 为 j 型航空器上使用的发动机数量。

1.2 GSE 排放

基于 GSE 所服务的航空器类型及数量, GSE 排放与其运行时间及燃料类型相关。GSE 排放因子源于 EPA 的 NONROAD 模型车辆排放因子数据库^[22], 其与燃料, 制动马力和负载系数相关。具体计算方法如式(2)^[2]所示:

$$E_{p,i} = \sum_{l \in A_a} EI_{p,l} P_l L_l t_{i,l} \quad (2)$$

式(2)中: $E_{p,i}$ 为分配至 i 航班的 GSE 的 p 类污染物的排放量, g ; $EI_{p,l}$ 为 l 类 GSE 对 p 类污染物的排放因子, $g/(hp \cdot h)$; A_a 为分配至 i 航班的 GSE 集合; P_l 为 l 类 GSE 的额定功率, $hp \cdot h$; L_l 为 l 类 GSE 的负载系数; $t_{i,l}$ 为对于 i 航班的 l 类 GSE 的运行时间, h 。

2 停机位分配优化建模

2.1 问题描述

停机位分配是指综合考虑航空器类型、停机位类型以及航班进离场时刻等因素,在未来一定时间窗内分配给航班特定的停机位进行停靠,以保证机场客货的有效衔接^[23]。停机位分配优化属于组合优化问题,是运筹学领域的一个重要分支,是非确定性问题。由于目前多数机场在分配停机位时,遵守机场业务基础上采用经验分配方式,并未考虑停机位分配对机场航空排放的影响。而航空器被分配至不同停机位,其污染物排放量不同。若航空器被分

配至远机位,则会增加 GSE 的排放。因此,本文基于航空器分配至不同停机位的排放差异,并考虑到近机位利用率最大化,减少航空排放和 GSE 排放。

2.2 模型假设

为便于问题的讨论和处理,引入以下假设:

(1)停机位分配决策前,所需的机场资源信息、航班信息等信息已获知。

(2)停机位在分配期间未出现由于特殊原因而导致的不可用状态发生。

(3)航空器起飞与降落跑道及其滑行路径遵循机场现阶段规定的运行方式。

2.3 约束条件

对停机位进行分配时,需将各类保障机场安全、高效运行的实际要求转化为模型的约束条件,其中主要包括:跑道约束、机型-停机位适应性约束以及避免产生冲突的安全性约束等。具体约束条件包括:①每架航班对应分配一条跑道;②每架航班必须分配且只分配至一个停机位;③每个停机位同一时刻只能被一架航班占用;④停机位满足对航空器类型适应性的约束;⑤最小过站时间约束。即停机位被航班占用时间不得低于中国民航局规定的最低时间要求^[24];⑥同一停机位前后衔接航班安全时间间隔约束;⑦航班被分配至同一停机位的最小安全缓冲时间约束;⑧相邻停机位的航空器避免发生冲突约束。

2.4 目标函数

2.4.1 航空器排放量最小

由式(1)可知,航空器滑行时间会影响其排放。滑行时间由所分配的停机位、起飞及降落跑道、场面滑行规则等因素共同决定。因此,根据航班停机位与跑道分配,基于机场实际滑行路径,便可计算获得航空器从跑道至任意停机位的滑行时间。航空器的滑行时间计算如式(3)所示:

$$TIM_i = \sum_{i \in TOUT} a_{iq} y_{ik} s_{qk} / v_i^{out} + \sum_{i \in TIN} a_{qi} y_{ki} s_{kq} / v_i^{in} \quad (3)$$

式(3)中: TIM_i 为航空器 i 的滑行时间, s ; a_{iq} 、 a_{qi} 、 y_{ik} 、 y_{ki} 均为布尔型变量; s_{qk} 为航班从跑道端滑行至停机位 g_k 的距离, m ; v_i^{in} 为航班 i 所属机型的滑入速度, m/s ; v_i^{out} 为航班 i 所属机型的滑出速度, m/s 。

各类污染物的量级差异过大,采用极值标准化方法对污染物进行归一化处理,优化目标之一为航空器污染物排放量最小,如式(4)所示:

$$f_1 = \min \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} E_{pj(N)} \quad (4)$$

式(4)中: P 为污染物集合, $P = \{NO_x, CO, SO_x, HC, PM\}$; J 为机型集合, $J = \{j_1, j_2, j_3, \dots, j_n\}$ 。

2.4.2 近机位利用率最大

通过提高航空器的近机位利用率,从而降低GSE的排放。优化目标如式(5)所示:

$$f_2 = \max \sum_{i \in N} \sum_{c \in C} \frac{X_{i,c}}{N} \quad (5)$$

式(5)中: $X_{i,c}$ 为航班*i*分配至近机位 $g_c, g_c \in C, C$ 为近机位集合; $g_j \in F, F$ 为远机位集合; $C, F \in G, G$ 为停机位集合, $G = \{g_k | k = 1, 2, \dots, u\}$; u 为机场停机位编号。

2.5 停机位分配优化模型

建立的基于降低航空排放的多目标停机位优化模型为

$$Z = f_1 + f_2 = \min \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} E_{pj(N)} + \max \sum_{i \in N} \sum_{c \in C} \frac{X_{i,c}}{N} \quad (6)$$

式(6)中: f_1 为航空器排放量; f_2 为近机位利用率。对于多目标问题而言,其结果往往是非劣解,且绝对最优解存在可能性很小^[25]。因此,在求解策略中,需将多目标问题转化为单目标问题,以获得优化问题的最优解。采用主目标法^[26]进行处理,即选择航空器排放量(f_1)最小为主目标,并将近机位利用率(f_2)最大转化为约束条件。

3 实例分析

3.1 研究对象

以南京禄口国际机场(IATA:NKG, ICAO:ZSNJ)为研究对象进行算法实例验证。南京禄口国际机场自2015年实施双跑道运行后,日均起降架次增幅显著(增长率达15.15%),年旅客吞吐量位居中国第11位^[27]。现阶段,机场共设置停机位136个,其中近机位28个,远机位108个。跑道运行采用隔离平行运行模式,即东向运行时06跑道起飞,07跑道降落;西向运行时,24跑道起飞,25

跑道降落。

3.2 实例数据

以南京禄口国际机场2016年10月24日0:00~24:00的航班计划为例进行实例验证。当日航班起降239架次,以B738、A320和A322三种机型为主,分别占总架次的36.82%、17.57%和15.90%。为满足停机位与航空器类型适应性约束,航空器根据翼展划分为A、B、C、D、E、F六类^[28],该研究时段内C类航空器占比高达97.48%。部分航班数据如表1所示。

南京禄口国际机场10月份的日近机位利用率如图1所示。10月份,机场近机位利用率平均为72.26%,最大为79.88%(10月4日)。因此,为达到优化 f_2 的目标,限定 f_2 的优化区间为 $f_2 \geq 79.88\%$ 。应用分支定界算法,进行最优解搜索。

3.3 结果分析

3.3.1 航空器排放分析

对南京禄口国际机场10月24日停机位分配进行优化结果如表1所示。不同机型污染物排放量的变化率优化前后对比如图2所示。除A320、A319、A332、A333排放的 NO_x 有所升高(A332最高增加30.18%),其余各污染物排放量均有一定程度的降低。其中,B737的 NO_x 排放量减少最明显,相较优化前降低了58.90%;机型占比最大的B738排放HC、 NO_x 、CO、SO_x和PM分别减少了14.01%、13.09%、14.01%、9.25%和9.39%。A333排放的CO、SO_x、PM减幅最大,分别降低了27.39%、25.78%和25.83%。虽然部分机型的 NO_x 排放量有所增加,但航空器排放污染物的总量在优化后是减少的。

优化前后的航空器排放量对比如图3所示。由图3可知,航空器CO、 NO_x 排放量较大,分别占总污染物排放量的72.43%与17.29%。

表1 航班数据及停机位优化结果(2016年10月24日)

Table 1 Flight data and optimization results of gates assignment (24 October 2016)

序号	航班号	进港时刻	机型	类型	发动机型号	降落跑道	起飞跑道	原始的停机位	优化后停机位
1	MU2728	00:06	A321	C	CFM56-5B2/2P	7	24	225	205
2	CZ3577	00:15	A321	C	CFM56-5B2/2P	7	6	211	204
3	MU2706	00:16	A320	C	V2500-A1	7	6	204	223
4	ZH9296	00:26	B738	C	CFM56-7B26	7	6	220	219
5	HO1686	00:33	A322	C	CFM56-5B2/2P	7	6	210	207
.....									
235	MU2810	23:23	A319	C	V2522-A5	7	6	215	227
236	MU2882	23:37	A319	C	V2522-A5	7	6	221	228
237	JD515	23:41	E550	C	AE3007A1	25	6	62	229
238	ZH9865	23:43	B738	C	CFM56-7B26	7	6	218	230
239	ZH9625	23:47	B738	C	CFM56-7B26	7	6	217	204

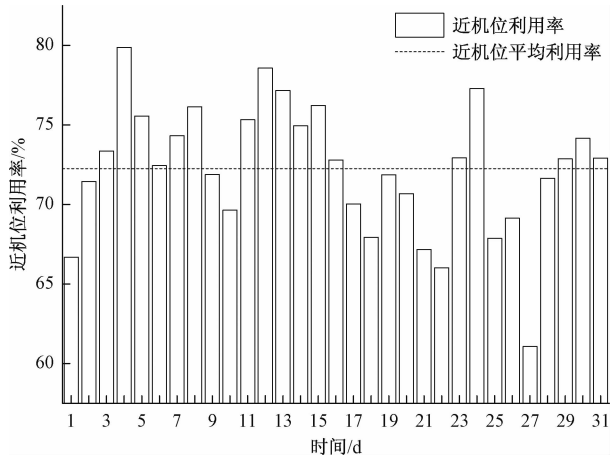


图1 南京禄口国际机场10月份近机位利用率

Fig. 1 The utilization rate of contact gate at Nanjing Lukou International Airport in October

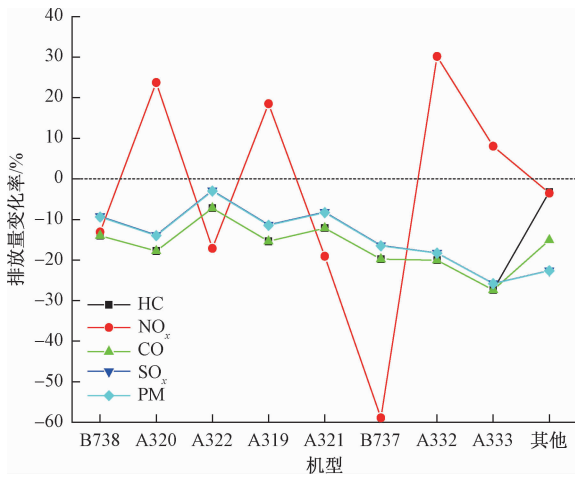


图2 不同机型污染物排放量变化率

Fig. 2 Variation rate of Emissions from different aircraft

使用优化后停机位分配方案,航空器 HC、NO_x、CO、SO_x 和 PM 分别减少 12.33%、7.81%、12.66%、11.06% 和 11.17%,其排放量由优化前的 99.64、259.59、1 087.28、51.51、3.12 kg 分别减少至 87.36、239.32、949.66、45.81、2.78 kg。其中,HC 与 CO 排放量减少最明显的主要原因是:航空器在滑行阶段,所用推力较小,燃料没有充分燃烧,排放的 HC 与 CO 较多。优化后的停机位分配方案减少了滑行时间,故对其排放量的影响较大,故其排放减幅最大。

3.3.2 GSE 排放分析

优化前后 GSE 各污染物排放量对比如图 4 所示。由图 4 可知,GSE 的 HC、NO_x、CO、PM 排放量分别降低 9.59%、4.63%、14.34%、13.64%,由优化前的 15.47、128.64、391.68、8.35 kg 分别减少至 13.99、110.19、373.55、7.21 kg。其中,HC 与 CO 排放量减少也是最明显。

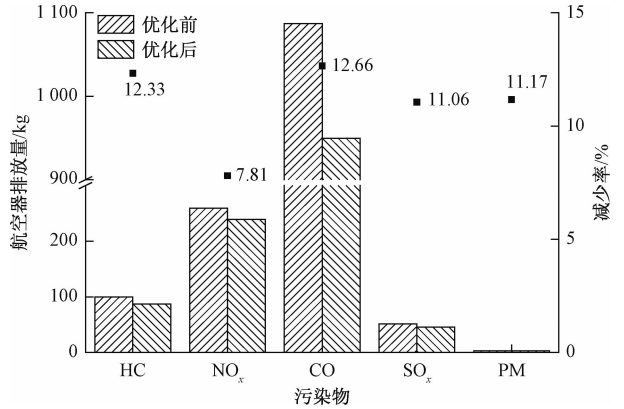


图3 航空器污染物排放量

Fig. 3 Pollutant emissions from aircraft

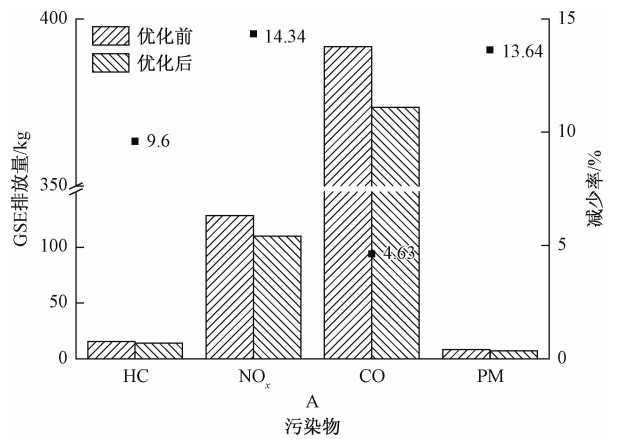


图4 GSE 污染物排放量

Fig. 4 Pollutant emissions from GSE

3.3.3 近机位利用率

优化模型通过提高机场近机位利用率以减少航空排放。如表 2 所示优化后的近机位利用率提升了 18.21%,由当日实际近机位利用率 72.99%,增至 91.20%。由于近机位利用率的提升,远机位旅客乘坐机场摆渡车在飞行区内的时间也大幅减少,在飞行区内旅客平均花费时间由优化前的 7.8 min 降至 4.5 min,减少了 42.31%。

表 2 近机位利用率与远机位旅客平均花费时间对比
Table 2 Comparison of the utilization rate of contact gate before and after optimization and average time spent by passengers to remote gate

	近机位利用率/%	平均花费时间/min
优化前	72.99	7.8
优化后	91.20	4.5

综上,优化方法在减少航空器和 GSE 排放的同时,减少了远机位旅客平均花费时间。

4 结论

以降低机场航空排放的角度出发,针对机场场

面的实际运行特点,构建了多目标停机位分配优化模型,并以南京禄口国际机场为研究对象进行实例验证。得到以下结论。

(1) 优化后停机位方案比优化前的方案,航空器的 HC、NO_x、CO、SO_x 和 PM 排放量分别减少 12.33%、7.81%、12.66%、11.06% 和 11.17%; GSE 的 HC、NO_x、CO、PM 排放量分别减少 9.59%、4.63%、14.34%、13.64%; 远机位旅客平均花费时间减少 42.31%。

(2) 提出的优化模型提高了近机位利用率,减少了机场航空排放和远机位旅客平均花费时间,验证了模型有效性。

未来研究中,可结合考虑场面滑行路径、滑行方式优化等其他场面减排方法,确定安全、高效、环保的机场停机位分配方法,更好地促进机场绿色发展。

参 考 文 献

- 1 国家发展和改革委员会,中国民用航空局. 全国民用运输机场布局规划[M]. 北京: 国家发展和改革委员会,中国民用航空局,2017
National Development and Reform Commission, Civil Aviation Administration of China. Full national transport airport layout planning [M]. Beijing: National Development and Reform Commission, Civil Aviation Administration of China, 2017
- 2 Federal Aviation Administration Office of Environment and Energy. Aviation emissions and air quality handbook Version 3 Update 1 [M]. Washington: FAA, 2016
- 3 ICAO. Airport local air quality guidance manual [M]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2007
- 4 Yang W, Omaye S T. Air pollutants, oxidative stress and human health. [J]. Mutation Research, 2009, 674(1):45-54
- 5 Schlenker W, Walker W R. Airports, air pollution, and contemporary Health [J]. Nber Working Papers, 2016, 83(2), 768-809
- 6 Senkayi S N, Sattler M L, Rowe N, et al. Investigation of an association between childhood leukemia incidences and airports in texas [J]. Atmospheric Pollution Research, 2014, 5(2), 189-195
- 7 Winther M, Kousgaard U, Ellermann T, et al. Emissions of NO_x, particle mass and particle numbers from aircraft main engines, APU's and handling equipment at Copenhagen Airport [J]. Atmospheric Environment, 2015, 100(5):218-229
- 8 Dell'Orco M, Marinelli M, Altieri M G. Solving the gate assignment problem through the fuzzy bee colony optimization [J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2017, 80(3):424-438
- 9 Yu C, Zhang D, Lau H Y K. An adaptive large neighborhood search heuristic for solving a robust gate assignment problem [J]. Expert Systems with Applications, 2017,32(4) 84-90
- 10 苏 原, 何秋钊. 基于混合粒子群算法的机场停机位优化分配问题研究 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2013, 10(1):24-28
Su Yuan, He Qiuzhao. Airport gate assignment optimization based on Hybrid particle swarm algorithm [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2013, 10(1):24-28
- 11 Castaing J, Mukherjee I, Nguyen A, et al. Reducing airport gate blockage in passenger aviation [J]. Computers & Operations Research, 2016, 65(8): 189-199
- 12 Sang H K, Feron E. Robust gate assignment against gate conflicts [J]. AIAA, 2017, 25(1):1-8
- 13 刘长有, 郭 楠. 基于运行安全的停机位分配问题研究 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(12):108-114
Liu Changyou, Guo Nan. Research on gate assignment for aircraft based on operational safety [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(12):108-114
- 14 Tang C H, Wang W C. Airport gate assignments for airline-specific gates [J]. Journal of Air Transport Management, 2013, 30(7):10-16
- 15 Maharjan B, Matis T I. Multi-commodity flow network model of the flight gate assignment problem [J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 63(4):1135-1144
- 16 刘君强, 陈鹏超. 基于航空公司飞机滑行油耗均衡原则的机场停机位分配算法 [J]. 价值工程, 2012, 31(16):3-4
Liu Junqiang, Chen Pengchao. The gate assignment based on balanced fuel consumption of aircraft taxiing of airline [J]. Value Engineering, 2012, 31(16):3-4
- 17 Evertse C, Visser H G. Real-time airport surface movement planning: minimizing aircraft emissions [J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2017, 79(3):224-241
- 18 张红飞. 航空器低排放场面滑行策略研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2017
Zhang Hongfei. Research on the strategy of aircraft low emission taxiing on the airports [D]. Tianjing: Civil Aviation University of China, 2017
- 19 Guo R, Zhang Y, Wang Q. Comparison of emerging ground propulsion systems for electrified aircraft taxi operations [J]. Transportation Research Part C, 2014, 44(32):98-109
- 20 李 楠, 张红飞. 航空器场面滑行污染物排放计算研究 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(5):1872-1876
Li Nan, Zhang Hongfei. Calculating aircraft pollutant emissions during taxiing at the airport [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(5):1872-1876
- 21 万莉莉. 面向环境保护的空中交通运行优化方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015
Wan Lili. Research on the optimization method of air traffic operation for environmental protection [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015
- 22 US EPA. User's Guide for the final NONROAD 2005 model and EPA NONROAD model updates: EPA420-R-05-013 [R] Washington: EPA, 2009
- 23 Bouras A, Ghaleb M A, Suryahatmaja U S, et al. The airport gate assignment problem: A survey [J]. The Scientific World Journal, 2014, 14(6):9165-9172
- 24 中国民用航空局. 民航局航班正常统计办法 (2016 征求意见稿) [M]. 北京: 中国民用航空局, 2016
Civil Aviation Administration of China. CAAC flight normal statistical measures (2016 comments) [M]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2016
- 25 崔 涛. 基于粒子群算法的不确定动态多目标优化方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(15):115-119
Cui Tao. Based on particle swarm algorithm of uncertain dynamic

- multi-objective optimization method research[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(15):115-119
- 26 贺莉,刘庆怀.多目标优化理论与连续化方法[M].北京:科学出版社,2015
- He Li, Liu Qinghui. Multi-objective optimization theory and continuous method [M]. Beijing: Science Press, 2015
- 27 中国民用航空局发展计划司. 2017 年民航机场生产统计公报 [M]. 北京:中国民用航空局,2018
- Civil Aviation Administration of China Development Planning Division. 2017 civil aviation airport production statistics bulletin [M]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2018
- 28 中国民用航空局. 民用机场飞行区技术标准: MH 5001—2013 [S]. 北京:中国民用航空局,2013
- Civil Aviation Administration of China. Civil airport flight zone technical standard; MH 5001—2013 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2013

Optimization of Gates Assignment Based on Air Emissions

ZHOU Xiao-ning¹, WANG Kai^{2,3}, ZHAO Zhi-qi^{2,3}, LI Jie^{2,3*}

(Nanhang Jingcheng College¹, College of Civil Aviation², National key Laboratory of Air Traffic Flow Management³, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

[Abstract] With the development of aviation industry, the impact of air emissions on the atmospheric environment is becoming more serious. The study on optimization of airport gates allocation is of great significance to the development of greener aviation. The optimal model was established to minimize aircraft emissions and maximized contact gates utilization based on operation rules, aircraft emissions, utilization rate of contact gate and other objectives. The verification of flight data on a certain day at Nanjing Lukou International Airport shows that: the HC, NO, CO, SO_x and particulate matter (PM) from aircraft are reduced by 12.33%, 7.81%, 12.66%, 11.06% and 11.17% respectively due to the improvement of near-seat utilization rate, and the HC, NO_x, CO and PM emissions of ground support equipment (GSE) are reduced by 9.59%, 4.63%, 14.34% and 13.64%, respectively. The average time spent by passengers to remote gate decreases by 42.31%. The proposed optimization model increases the utilization rate of contact gate, reduces air emissions, and average time spent by passengers and the model is verified.

[Key words] airport aviation emissions gate assignment multi-objective optimization

目次

综 述

石油、天然气工业

顺序输送成品油质量指标值衰减规律研究进展
..... 何国玺 覃 敏 廖柯熹(1)

原子能技术

海上小型核动力厂设计中若干安全问题
..... 王 珏 陈力生 蔡 琦 宫大鑫(9)

论 文

力学

循环载荷下应变率对有机玻璃耗散能演化规律的影响
..... 杨海庆 邱 吉 金 涛 树学峰(16)

物理学

微纳尺度下 Couette 流动的分子动力学模拟
..... 苗瑞灿 陈占秀 杨 历 贾桂鹏(21)

天文学、地球科学

基于靶向服务的闪电和降水关系可视化研究平台开发
..... 朱 杰 行鸿彦(28)

基于 Biexponential 基电流传输线通道模型的地闪回击近场电磁环境
..... 张子恒 田杨萌 王彩霞(35)

利用面积高程积分方法研究龙门山断裂带地貌隆升特征
... 洪 艳 赵银兵 王运生 辛聪聪 张婷婷(43)

基于改进互补集合经验模态分解的自适应小波熵阈值地震随机噪声压制算法
..... 孟 娟 韩智明 李亚南(52)

基于 SVM-LR 模型的滑坡易发性评价——以临潼区为例
..... 王念秦 郭有金 刘铁铭 朱清华(62)

基于 MEMS 加速度计的波高测量装置
..... 刘 路 王收军 陈松贵 金瑞佳(70)

农业科学

复合保鲜剂处理对货架期杏鲍菇保鲜效果的影响
..... 陈会燕 王 亮
张 微 张立新 杨志国 张晓宇 李 超(78)

矿冶工程

基于屈服接近度的盐岩储气库多因素优化
... 张建配 张尚坤 贾 超 杜圣贤 童 凯(85)

第 19 卷第 30 期 (总第 499 期)

铝合金表面聚吡咯镀层的制备及其防腐蚀性能
... 秦文峰 范宇航 王新远 符佳伟 游文涛(91)

窄深槽高速缓进给磨削温度试验
..... 郝新辉 梁国星 王时英 吕 明(97)

石油、天然气工业

川西南龙门洞地区雷口坡组成岩作用及其对储层的影响
..... 李琼玉 李 琦(103)

高温气井套管性能变化对井口抬升高度的影响
..... 石小磊 王宴滨 高德利(113)

超临界二氧化碳浸泡对页岩力学性能的影响
..... 丁 璐 倪红坚(122)

水平井钻磨组合管柱载荷计算方法与应用
... 杜宇成 刘旭辉 陈文康 孙巧雷 冯 定(128)

MCS 黏土防膨剂的合成
... 戎旭峰 王彦玲 张传保 李 强 李永飞(134)

机械、仪表工业

轮毂电机气隙偏心下不平衡电磁力与转子系统振动特性分析
..... 韩以伦 陈 涛 李国珊(140)

弯曲齿条啮合传动的重合度
..... 冯 定 王刘强 施 雷 彭太锋(146)

能源与动力工程

直通式热轧辊流道改进
..... 安玉环 李徐佳 王能河 吴显峰(152)

分解炉分级燃烧三次风配风优化
... 王为术 廖义涵 田 苗 刘 军 房 凡(159)

额定工况下桨距角对 5 MW 风力机叶片动力特性的影响
..... 张建平 龚 振 纪海鹏 张智伟(166)

电工技术

基于热网络模型和参数估计的感应电机定子绕组温升测试方法
..... 王 欣 张旭东 范骥铭(172)

基于数字信号处理器的磁耦合谐振式无线电能频率跟踪特性
..... 刘 佳 陈海燕 赵世龙(179)

沿悬式绝缘子行波电力传输系统传输特性
..... 李卫国 高泽盟 陈 艳 张慧媛 赵炜妹(185)

基于数据分析的多谐波源定位方法
..... 陈栋新 肖先勇 王 昕(191)

电子技术、通信技术

- 一种适用于高频地波雷达的电小双频发射天线
..... 马庆锋 陈章友 吴雄斌(196)
- 基于非易失性存储阵列的实时数据记录卡设计
..... 谢玲芳 孟令军 许艳 朱珊(201)

自动化技术、计算机技术

- 一种基于帕累托最优的机场智能驱鸟决策模型
..... 朱腾腾 谷玉海 饶文军(207)
- 基于时空域数据融合的 Kinect 深度图像修复算法
..... 林玲 陈姚节 郭同欢(215)
- 基于多分辨方法的海量数据三维云体绘制
..... 谢永华 姬瑜 郑义 朱超凡(221)
- 基于纠错编码的回声隐藏音频水印算法
..... 陈强 陈雨 杜婷婷(227)
- 基于犹豫模糊集的古籍汉字图像切分方法
..... 齐艳媚 田学东 左丽娜(232)
- 基于时空特征融合的端到端无人车控制
..... 刘东杰 赵津 席阿行(241)
- 任务类型感知的无线传感器网络数据融合调度算法
..... 邹洪森
李良 奥琛 张普宁 王峥 李宁(247)
- 基于最优区域生成的深度多尺度融合遥感飞机检测方法
..... 刘晨 郑恩让 张桐(258)
- 多用户长码直扩信号的信源数估计
..... 李鑫凯 张天骐 梁光明(263)

轻工业、手工业、生活服务业

- 基于干燥蒸汽余热利用的连续型谷物真空干燥机的研制及性能评价 王玉坤 马素霞 潘永坤 郑伟强(269)

建筑科学

- BIM 云平台中三维模型的任意剖切
..... 王成龙 周东明 崔维久(274)
- 罕遇地震下大跨隔震结构随机地震响应
..... 顾镇媛 唐天标 徐益康 吴坤(281)
- 斜撑角钢杆对输电铁塔受力状态影响..... 叶中飞 伍川
陶亚光 吕中宾 马伦 谢凯 白银浩(288)
- 深基坑开挖和降水对紧邻既有地铁隧道的影响

- 陈志伟 缪海波(297)
- 碱渣土地基承载性能试验..... 马加骁
张鹏 白晓宇 郑晨 张明义 闫楠(303)

交通运输

- 城市桥梁新型铝合金防撞护栏安全性
... 焦驰宇 朱格西 龙佩恒 史文浩 肖翔(310)
- 高地应力软岩隧道大变形监测及支护优化
... 王英帆 刘钦 胡永志 刘炳飞 魏来(317)
- 隧道车辆排放污染物分布特性实测
..... 曾粤 冉福霞 徐进(324)
- 草原公路驾驶员心电图指标对标志标牌信息量的敏感性
..... 戚春华 刘鑫
朱守林 高明星 杨锋 李航天 韩磊(331)
- 基于 XGBoost 的短时交通流预测模型
..... 钟颖 邵毅明 吴文文 胡广雪(337)
- 基于 K-means 的城市轨道交通社区接驳共享单车停靠点规划 靳爽 庞明宝(343)

航空、航天

- 基于试飞数据的固定翼飞机盘旋性能仿真分析技术
..... 邱福生 魏闯 院老虎(348)
- 某航空发动机压气机叶-盘耦合振动分析
..... 李世林 魏武国 张绍伟(354)
- 基于航空排放的机场停机位分配优化
..... 周晓宁 王凯 赵志奇 李杰(362)
- 空中交通网络流系统拥堵程度评估
..... 张兆宁 李蓝天(368)

环境科学、安全科学

- 星地结合的细颗粒物超标防控区精确识别方法..... 廖程浩
曾武涛 张永波 李莹 林常青 刘启汉(375)
- 高能 GO/TiO₂ 制备及其光催化反渗透浓水性能
..... 赵婷婷 王立章 陈倩文(379)
- 降雪对小兴安岭湿地氮循环的影响..... 孙慧 李继光
唐政 李慧 李忠芳 胡宁 姜翼来(385)
- 微生物燃料电池强化铁碳微电解去除低浓度硝态氮技术
..... 崔颖 赵博玮 谢飞 岳秀萍(390)
- 土霉素菌渣活性炭吸附处理低浓度含铬废水
..... 梁燕 牛建瑞(397)