

飞机电动滑行系统应用研究与收益分析



孙毅刚,雷因特,孙爽

中国民航大学,天津 300300

摘要:为进一步认识飞机应用电动滑行系统所带来的影响,基于经济性与环保性,本文对电动滑行系统的优劣性进行研究,并借助模型验证其可能带来的成本节约以及节能减排效益。利用飞机性能数据库(BADA)的计算模型,对装载电动滑行系统的飞机的成本进行研究分析,通过Matlab/Simulink构建电动滑行系统的排放性能评估模型,进行节能减排性能仿真。研究表明,电动滑行系统可为中型窄体客机在每一趟中短程航程中节省约185欧元,经济效益明显;滑行距离为2km时,利用电动滑行系统代替发动机驱动飞机地面滑行15min可节省约84%左右的燃油,减少有害气体排放68%以上,节能减排性能表现优异。

关键词:电动滑行系统;成本节约;节能减排;性能仿真;模型验证

中图分类号:V219

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.11.009

民航业在飞速发展的同时,也面临一系列问题,如大量燃油消耗、噪声及大气污染、机场地面交通拥挤等,因此航空能源实现低碳是一个非常重要的发展目标^[1]。为减轻相关负面影响,达到节省燃油、缩短滑行时间等目的,电动滑行系统便应运而生。电动滑行系统基于加载额外电动机的理念,以辅助动力装置(APU)为动力源,使飞机无须启动主发动机,便能在机场自由移动。

在理论研究方面,M. Zhang等^[2]考虑低能见度与滑行因素建立了新的燃油消耗模型,有利于电动滑行系统的节油收益研究。N.M.Dzikus等^[3]对于中短途飞机采用电动滑行、操作拖曳、单发驱动的推出方式对比研究其燃油消耗。R.Guo等^[4]为了量化比较机场地面的环境影响,基于ICAO的数据库计算了10个不同场景下的燃油消耗量及排放量,说明电动滑行系统的节能减排收益远大于其他滑行方式。唐建军等^[5]设计了基于主起落架机轮驱动的飞机电动滑行系统,并对其进行了仿真分析。张威等^[6]对电动滑行系统的设计做了详细研究并加以仿真,结果表明电动滑行驱动最大滑行速度可达37km/h。在工程应用方面,霍尼韦尔公司和赛峰公司共同开发了民用飞机绿色电动滑行系统(EGTS)方案^[7]。Wheel Tug公司研发的电动滑行技术将动力机轮安装在民用飞机前起落架上,也开展了相关试验^[8]。

对于电动滑行系统的力学性能与节油性能,已经有了较为成熟的研究。但同时比较经济性与排放性能的研究相

对较少,对应用电动滑行系统所产生的影响缺乏更直观的认识。因此,本文将重点探究电动滑行系统带来的经济影响与环境影响,并评估可能带来的效益。进一步讨论电动滑行系统的优劣性,通过BADA计算模型的估计数据来论证其经济收益。本文建立了电动滑行系统排放性能模型,将应用电动滑行系统与使用发动机滑行产生的油耗与排放进行对比,以此来综合分析节能减排性能。

1 电动滑行系统应用研究

1.1 优势分析

1.1.1 燃油节省

通常情况下,飞机通过发动机低速运行实现地面滑行,在此期间燃油利用率较低。而应用电动滑行系统的主要目的便是节约燃油。滑行过程中的节油量FC定义为

$$FC = FC_e(T) - FC_a(T) \quad (1)$$

式中, FC_e 为仅使用发动机时的滑行油耗, FC_a 为仅使用APU时的滑行油耗, T 为滑行时间。为了量化 FC_e ,需要确定滑行过程中停车次数、转弯次数等因素。因此,通常使用Nikoleris等^[9]所建立的公式

$$FC_e = \sum_{m=1}^4 t_{mi} \times f_{mi} \quad (2)$$

式中, m 表示飞机的5种状态,包括静止、加速、转弯、匀速滑行、刹车。 t_{mi} 为在 m 状态下所花的时间, f_{mi} 为在 m 状态下的

收稿日期: 2022-06-14; 退修日期: 2022-07-21; 录用日期: 2022-09-10

引用格式: Sun Yigang, Lei Yinte, Sun Shuang. Application research and revenue analysis on aircraft electric taxiing system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(11): 64-69. 孙毅刚, 雷因特, 孙爽. 飞机电动滑行系统应用研究与收益分析[J]. 航空科学技术, 2022, 33(11): 64-69.

燃油流量。根据上述研究,本文假定 FC_c 为7%推力情况下的燃油消耗量。相关发动机7%推力下的燃油流量见表1。

对于装载电动滑行系统的波音737及空客A320,在APU达到最大工作负载的情况下,保守估计燃油流量可达到130kg/h,而根据ACRP^[10]的研究,未装载电动滑行系统的飞机燃油流量仅为75kg/h。由于滑行时间 T 取决于具体区域条件,故本文参考H. Khadilkar^[11]与来靖晗等^[12]的研究,利用BADA模型工具做估测计算。

表1 不同发动机在7%推力下的燃油流量
Table 1 Fuel flow of different engines at 7% thrust

发动机类型	燃油流量/(kg/s)
CFM56-5B6/3	0.095
CFM56-5B1/3	0.109
CFM56-5A-1	0.101
CFM56-5B6/P	0.097
PW6122A	0.109
PW6124A	0.114
CFM56-7B22/3	0.116

1.1.2 发动机维护节省

装载电动滑行系统的飞机在滑行阶段通过APU驱动电动机从而驱动机轮,因此可延长发动机的循环寿命以及节省维护成本。发动机节省的维护成本 W_c 定义为

$$W_c = T \cdot w_c \cdot N \tag{3}$$

式中, w_c 对应每台发动机每分钟的节约成本; N 为发动机台数。发动机维护成本估计占整个维护成本的40%。根据S. R. I. Insight^[13]的研究,每小时飞行的维护成本约为750欧元,每小时飞行发动机的维护成本约为200欧元。根据ITIA的成本报告,每小时飞行的直接维护成本约为1018欧元,其中36%用于发动机维护,约为366欧元。故根据以上不同的研究报告可做出保守估计,每小时飞行的每台发动机维修成本约为250欧元。不考虑整个航程,仅在滑行阶段使用电动滑行系统时,发动机排气温度的降低也使部件损耗减少,最佳预计能节省发动机50%~60%的运行时间。

1.1.3 污染物排放量的减少

D. C. Carslaw等^[14]研究确立了一种检测大型机场排放物的方法,说明了在一定滑行距离内,装载电动滑行系统的飞机总共减少86%以上的CO排放、94%以上的HC排放、67%以上的NO_x排放。本文之后将基于ICAO公布的排放数据库与M. N. Postorino等^[15]的研究,建立排放性能模型,并对电动滑行系统的减排性能进行仿真预测。

1.1.4 其他

在飞机后推过程中一般使用牵引车进行作业。但由于

装载了电动滑行系统,其能自主向后移动,从而降低搬运成本,降低使用曳引车时发生事故的风险。根据S. Cash等^[16]的研究数据,预计一趟作业可直接节省25~100欧元。本文研究使用了最保守值,即每次后推节省25欧元。

电动滑行系统能够更灵活地做出反应,将有更高的滑行效率,所以制动器磨损将显著减少。根据DiSanto^[17]的研究,应用电动滑行系统的飞机不必使用刹车来减速,因此碳刹车的磨损将减少约20%。一个周期内与制动器磨损相关的平均成本在5~10欧元之间,其取决于飞行员的具体滑行操作。本文预计每次飞行可节省约1欧元。

1.2 消极影响

1.2.1 额外的油耗

电动滑行系统的重量(质量)因制造商而异,根据已有的工程应用案例,估计其重量在150~300kg之间。这种额外增重将伴随整个航程,这必定会导致额外的燃油消耗。额外燃油消耗AFC定义为

$$AFC = T_{FL} \cdot AFC_{FL} + T_0 \cdot AFC_0 \tag{4}$$

式中, T_{FL} 为巡航时间, AFC_{FL} 为巡航阶段的每小时额外消耗燃油量, T_0 为爬升至巡航高度的时间, AFC_0 为爬升至巡航高度期间每分钟额外燃油消耗。

针对额外燃油消耗的计算较为复杂,其取决于真空速、环境变量、飞行高度等。而爬升阶段的额外燃油消耗计算更为繁复,因此本文仅粗略估计。通过BADA计算工具以及QAR数据对某架波音737-800的整个航程进行测试与计算。结果显示,对于每增加100kg的重量,其燃油消耗率约为1.8kg/h。并基于D. Poles等^[18]的研究,估测得知此架波音737-800每一个飞行周期内,每额外增重100kg,便额外消耗约5kg的燃油。

1.2.2 APU 额外的维护费用与污染物排放

由于装载电动滑行系统,APU需要进行额外维护。根据Ackert^[19]的研究,APU每小时的维护成本达到35欧元。由于在最大工作功率下的运行时间较长,预期寿命可能会减少20%,因此使用电动滑行系统时,额外的APU维护成本为每小时约5欧元。

在滑行阶段,APU给电动机供电,将会产生额外的排放。不同机型、不同APU型号所产生的排放量均不同。F. Re^[20]研究指出,APU燃油消耗率可以用发电量来表示,在得到直流环节的功率需求后,将可用于其燃油消耗量的计算,而额外的排放则基于燃油消耗量来计算。

1.2.3 其他

应用电动滑行系统后,牵引力通过轮胎传递,因此轮胎

的磨损将会更大。考虑到机轮启动时的打滑状况,从动轮会有额外的磨料磨损。在滑行过程中产生的剧烈操纵,也会导致额外的磨损。在正常情况下,波音 737 上的主轮轮胎每个价格高达 1 万欧元。前起落架上的单个机轮价格比主起落架上的机轮低约 60%。但该轮胎承受的更高的应变会导致其更快磨损。在本文研究中,此成本参考 Pacejke^[21] 的研究做简单估计,额外花费不到轮胎成本的 2%。

配备电动滑行系统的飞机不会对自身航程造成延误,但可能会对其后起飞的飞机造成延误。由于延长了整体的滑行时间,可能会抵消应用电动滑行系统产生的整体燃油节省。在本文研究中,假设电动滑行系统不产生可能出现的延迟,并不考虑装载电动滑行系统产生的一次性费用。

2 经济性与环保性分析

2.1 模型建立

本文对某架应用电动滑行系统的波音 737-800 进行经济性与环保性分析。此过程中尽可能采用成本最高的估计,便于显现电动滑行系统在较为极端条件下的优势。已知条件如下:装载两台 CFM56-7B22 发动机,APU 型号为 GTCP 36-300,飞行时间约为 2h,滑行时间约为 15min (900s),滑行长度约为 2000m,电动滑行系统的预估重量为 300kg,燃油费用为 0.75 欧元/kg。在主起落架上装载电动机。发动机与 APU 相关参数见表 2、表 3^[22]。

电动滑行系统主要包括机械系统模型、电气系统模型以及排放系统模型。飞行员起动 APU 给电动滑行系统供电,然后控制手柄使其置于前进或后退挡;电机控制器通过

一系列的电力电子元件,控制主起落架上的电机正转或反转,再通过传动机构将运动传递到机轮,控制机轮转动,从而实现飞机向前或向后滑行。由于本文主要研究经济性与环保性,故电动滑行系统整体建模不在此赘述,电动滑行系统结构简图如图 1 所示。

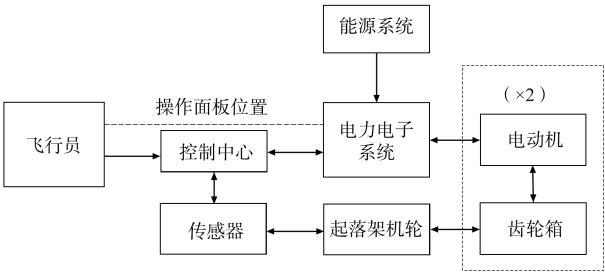


图 1 电动滑行系统组成结构框图
Fig.1 Structure block diagram of electric taxiing system

电动滑行系统消耗的电能源于 APU 的发电机,其消耗的也是航空燃油,因此对电动滑行系统排放性能的评估本质上需要建立 APU 的油耗排放模型。排放模型的建立需要电动滑行系统的相关参数,见表 4。

表 4 电动滑行系统相关参数
Table 4 Electric taxi system related parameters

相关参数	具体数值
飞机增重/kg	300
APU 发电功率/kW	90
行星轮减速器传动比	36
机械效率	0.9
电气效率	0.91
电机型号	YASA-750

本文根据 APU 与发动机的具体参数,利用数学方法得到发动机推力与燃油消耗率的插值关系以及有害气体排放量与燃油消耗率的拟合关系,再用 Matlab/Simulink 平台搭建发动机与 APU 的排放性能模型,如图 2 所示。

此模型中输入的比值均为机场测量的某值与标准状况下海平面的某值之比,为了提高仿真的准确性,引入修正值对能耗排放系数进行修正,最后得到油耗与排放量。因为实际的环境条件存在差异,APU 与发动机型号也各不相同,此模型的具体参数及函数也随之改变。本文基于上述所给定的某架波音 737-800 详细参数,对电动滑行系统进行排放性能的仿真。

2.2 环保性分析

在同样的工况下,仿真比较分析两种滑行模式的油耗及 CO、HC、NO_x 排放量,由此计算出使用电动滑行系统代替发动机驱动飞机的节油率和有害气体减排率。通过这种方式,本文对此系统的节能减排性能进行了研究。图 3 显

表 2 APU 性能参数

Table 2 APU performance parameters

相关参数	具体数值
燃油消耗率/(kg/s)	$(75+0.2675P_{APU}-3.5\times10^{-4}P_{APU}^2)/3600$
CO 排放率/(g/kg)	8.67
HC 排放率/(g/kg)	0.71
NO _x 排放率/(g/kg)	6.8

表 3 CFM56-7B22 发动机性能参数^[22]

Table 3 CFM56-7B22 engine performance parameters^[22]

状态	燃油消耗率/(kg/s)	HC 排放率/(g/s)	CO 排放率/(g/s)	NO _x 排放率/(g/s)
起飞	1.284	0.1	0.2	30.9
爬升	1.043	0.1	0.5	23.7
进近	0.349	0.1	1.4	11
滑行	0.116	1.7	17.9	4.8

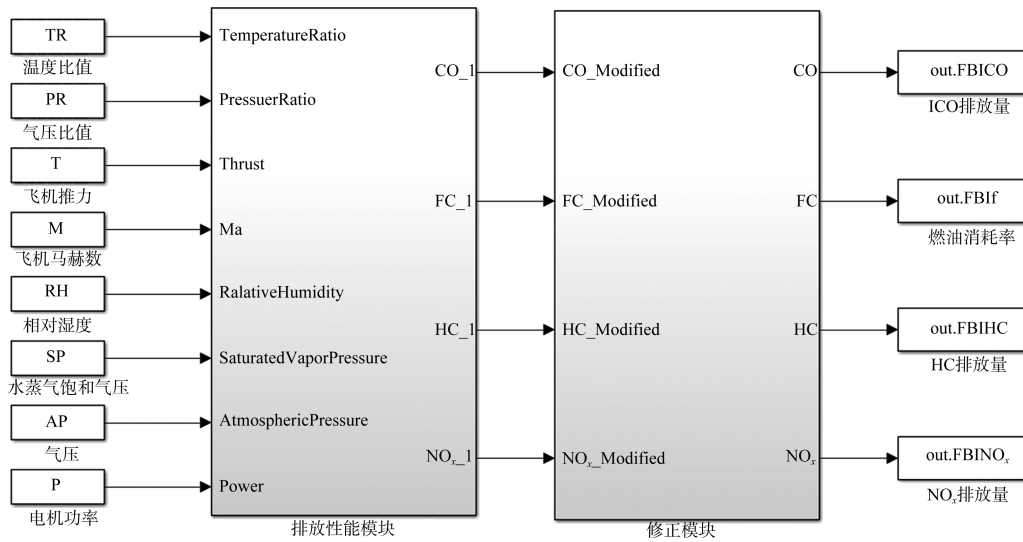


图2 电动滑行系统排放性能模型

Fig.2 Emission performance model of electric taxi system

示了两种不同滑行模式下的燃料消耗量和有害气体排放量的比较结果。滑行阶段燃油消耗量极大减少,各相关有害气体排放量也相对减少。为更直观地表现油耗节省以及节能减排能力,现引入收益率 η (节油率为 η_{FC} , CO、HC、NO_x减排率表现为 η_1 、 η_2 、 η_3),得到收益率曲线如图4所示。

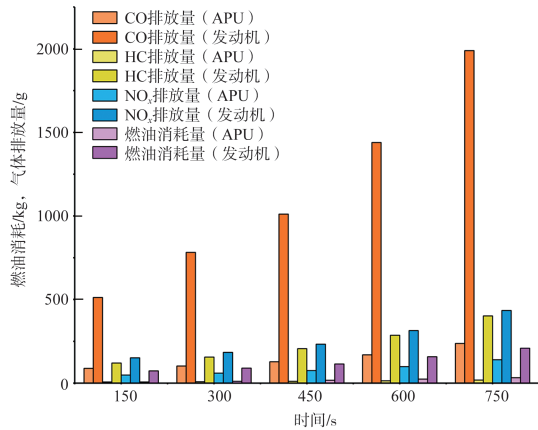


图3 两种驱动方式燃油消耗及排放对比

Fig.3 Comparison between fuel consumption and emission of two driving modes

由图4可知,装载电动滑行系统的飞机在规定工况下,仅在滑行阶段燃油节省最高可达84%,而CO减排率可达85%左右,HC减排率甚至能达95%,NO_x减排率约为68%。节能减排效应较为明显。

2.3 经济性分析

根据S. Ekici等^[23]的研究,APU在最大工作功率条件下,油耗可达130kg/h,即0.036kg/s。结合第一节的研究分

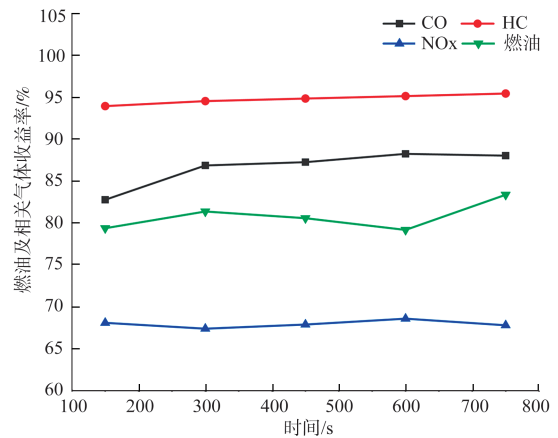


图4 滑行阶段相对收益率

Fig.4 Relative rate of return during taxiing

析,此飞机在规定工况下滑行阶段的节油计算如下:

$$FC_e = 2 \times 0.116 \times 900 = 208.8\text{kg} \quad (5)$$

$$FC_a = 0.036 \times 900 = 32.4\text{kg} \quad (6)$$

$$FC = FC_e - FC_a = 208.8 - 32.4 = 176.4\text{kg} \quad (7)$$

计算得知,在此滑行阶段节省燃油量 FC_e 约176.4kg,应用电动滑行系统的燃油消耗率仅为使用发动机滑行燃油消耗率的15.5%。燃油节省费用 $W_F = 176.4 \times 0.75 = 132.3$ 欧元;根据优势分析可得知后推节省费用 $W_P = 25$ 欧元;发动机维护节省 $W_e = 250 \times (1 - 60\%) \times 2 \times 0.25 = 50$ 欧元;碳刹车节省费用 $W_b = 1$ 欧元。总共节省费用 W_{save} 为

$$W_{save} = W_F + W_P + W_e + W_b \quad (8)$$

通过优势分析计算得知,一趟中短型航班可节省约208.3欧元。通过第1节的消极影响分析得知飞机增重300kg于滑行段多消耗约15kg燃油。因此计算得到额外燃

油花费 $Q_F=15 \times 0.75=11.25$ 欧元; 轮胎所多承受的应变磨损导致的额外维护费用 Q_W 为 2 欧元; APU 额外维护费用 $Q_A=5 \times 2=10$ 欧元。总共额外费用 Q_{cost} 为

$$Q_{\text{cost}} = Q_F + Q_W + Q_A \quad (9)$$

通过消极影响分析计算得知, 一趟中短型航班需额外花费 23.25 欧元。最终的总体经济收益 U 定义为

$$U = W_{\text{save}} - Q_{\text{cost}} \quad (10)$$

综上所述, 在某中短航程的波音 737-800 客机上装载地面电动滑行系统, 滑行阶段最终所能带来的成本节省约为 185 欧元。

3 结论

本文对电动滑行系统的应用进行了详细研究, 主要包括其优势以及可能带来的负面影响。利用 BADA 计算模型与 Matlab/Simulink 仿真软件对其经济性与环保性进行分析, 得到以下结论:

(1) 飞机滑行阶段使用电动滑行系统存在两个方面的影响。在不考虑随机状况的情况下, 使用电动滑行系统滑行优于传统的使用发动机驱动滑行。

(2) 在给定条件下, 电动滑行系统代替发动机进行地面滑行的节油率高达 84%, 而 CO 减少约 85% 的排放量, HC 减少约 95% 的排放量, NO_x 减少约 68% 的排放量, 节能减排效果明显。

(3) 在给定条件下, 根据计算, 每一趟中短型航班可节省约 185 欧元; 保守估计每架飞机每年飞行 1000 次, 则每有一台使用电动滑行系统的飞机, 即可为航空公司每年节省约 18.5 万欧元。

在后续研究过程中, 模型与公式可进一步优化完善。本文对电动滑行系统的认识设计具有一定参考意义。

AST

参考文献

- [1] 李开省. 碳中和目标下航空能源转型研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(9): 1-11.
Li Kaisheng. Research on aviation energy transformation under the goal of carbon neutrality [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32 (9): 1-11. (in Chinese)
- [2] Zhang M, Huang Q, Liu S, et al. Assessment method of fuel consumption and emissions of aircraft during taxiing on airport surface under given meteorological conditions [J]. Sustainability, 2019, 11(21): 101-107.
- [3] Dzikus N M, Wollenheit R, Schaefer M, et al. The benefit of innovative taxi concepts: the impact of airport size, fleet mix and traffic growth[C]//2013 Aviation Technology, Integration and Operations Conference, 2013: 10-15.
- [4] Guo R, Zhang Y, Wang Q. Comparison of emerging ground propulsion systems for electrified aircraft taxi operations[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 44(1): 98-109.
- [5] 唐建军, 郭卫东, 徐东光, 等. 飞机电动滑行系统驱动特性及节能减排性能分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(8): 1545-1554.
Tang Jianjun, Guo Weidong, Xu Dongguang, et al. Analysis of driving characteristics and energy saving and emission reduction performance of aircraft electric taxiing system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46 (8): 1545-1554. (in Chinese)
- [6] 张威, 李开伟, 王伟, 等. 飞机电动机轮设计及电动滑行系统仿真研究[J]. 中国机械工程, 2018, 29(13): 1547-1548.
Zhang Wei, Li Kaiwei, Wang Wei, et al. Research on design of aircraft electric wheels and simulation for ETS[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(13): 1547-1548. (in Chinese)
- [7] Roling P C, Sillekens P, Curran R, et al. The effects of electric taxi systems on airport surface congestion [C]//15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2015: 23-27.
- [8] Gubisch M. WheelTug is not for turning: Manufacturer of nose-gear electric taxi system remains confident in its product despite lack of support from airframers [J]. Flight International, 2014, 185(5426): 18-23.
- [9] Nikoleris T, Gupta G, Kistler M. Detailed estimation of fuel consumption and emissions during aircraft taxi operations at dallas/fort worth international airport[J]. Transportation Research Part D: Transport & Environment, 2011, 16(4): 302-308.
- [10] Airport Cooperative Research Program, United States. Federal Aviation Administration, Environmental Science Associates. Handbook for evaluating emissions and costs of APU's and alternative systems[M]. San Francisco: Transportation Research Board, 2012.
- [11] Khadilkar H, Balakrishnan H. Estimation of aircraft taxi fuel burn using flight data recorder archives[J]. Transportation

- Research Part D: Transport & Environment, 2012, 17(7): 532-537.
- [12] 来靖晗, 刘博文, 谷润平, 等. 基于BADA模型的平飞阻力变化规律分析[J]. 航空科学技术, 2020, 31(9): 79-83.
- Lai Jinghan, Liu Bowen, Gu Runping, et al. Analysis of level flight resistance change law based on BADA model [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(9): 79-83. (in Chinese)
- [13] Insight S R I. The economic cost of FOD to airlines[J]. FODNews, 2008, 400: 456-458.
- [14] Carslaw D C, Beevers S D, Ropkins K, et al. Detecting and quantifying aircraft and other on-airport contributions to ambient nitrogen oxides in the vicinity of a large international airport[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(28): 5424-5434.
- [15] Postorino M N, Mantecchini L, Paganelli F. Improving taxi-out operations at city airports to reduce CO₂ emissions[J]. Transport Policy, 2019, 80(1): 167-176.
- [16] Cash S, Zhou Q, Olatunbosun O, et al. Development of a series hybrid electric aircraft pushback vehicle: A case study[J]. Engineering, 2019, 11(1): 33-47.
- [17] Di Santo G. Proper operation of carbon brakes[C]//11th Airbus Performance and Operations Conference, 2001: 271-275.
- [18] Poles D. Base of aircraft data (BADA) aircraft performance model lingreport[J]. EEC Technical/Scientific Report, 2009, 9(1): 1-68.
- [19] Ackert S. Basics of aircraft maintenance reserve development and management[J]. Aircraft Monitor, 2012, 1: 2-28.
- [20] Re F. Model-based optimization, control and assessment of electric aircraft taxi systems[D]. Hessen: Technische Universität Darmstadt, 2017.
- [21] Pacejka H. Tire and vehicle dynamics[M]. Netherlands: Elsevier, 2005.
- [22] Kim H J, Baik H. Empirical method for estimating aircraft fuel consumption in ground operations[J]. Transportation Research Record, 2020, 2674(12): 385-394.
- [23] Ekici S, Şöhret Y. A study on the environmental and economic aspects of aircraft emissions at the Antalya International Airport [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(9): 10847-10859.

Application Research and Revenue Analysis on Aircraft Electric Taxiing System

Sun Yigang, Lei Yinte, Sun Shuang

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract: In order to further understand the impact of aircraft electric taxiing system, based on economy and environmental protection, this paper studies the advantages and disadvantages of electric taxiing system, and verifies its possible cost savings and energy conservation and emission reduction benefits with the help of models. Using the calculation model of aircraft performance database (BADA), the cost of aircraft loaded with electric taxi system is studied and analyzed. The emission performance evaluation model of electric taxi system is built through Matlab/Simulink to simulate the performance of energy conservation and emission reduction. The research shows that the electric taxi system can save about 185 euros in each medium and short voyage for medium-sized narrow body passenger aircraft, and the economic benefit is obvious; When the taxiing distance is 2km, using the electric taxiing system instead of the engine to drive the aircraft to taxi on the ground for 15min can save about 84% of fuel and reduce harmful gas emissions by more than 68%, which has have excellent performance in energy conservation and emission reduction.

Key Words: electric taxiing system; cost savings; energy saving and emission reduction; performance simulation; model validation