基于航迹数据的空中交通绿色绩效计算分析

魏志强[1*],韩孝兰[1],胡 杨[1],张文秀[2] (1.中国民航大学空管学院,天津 300300；2.厦门航空有限责任公司运行控制部,福建 厦门 361011)

摘要：为定量、直观地反映空管运行指挥对飞机温室效应的影响,首先基于快速存取记录器(QAR)记录数据建立飞行参数与飞行轨迹的 BP 神经网络匹配模型;然后基于 QAR 数据对模型进行验证;之后建立了温室效应表征参数计算模型;最后根据雷达模拟机上的飞行航迹试验数据,估算出污染物排放量和总温变潜势大小,并对不同管制员的指挥差异性进行对比分析. 结果表明,利用油耗估算模型计算得到的燃油流量估算值和 QAR 记录的真实值之间的相对误差不超过 2%,运用油耗指标与温室效应指标评估管制员水平结果不同.研究结果可以用于定量分析空管运行对温室效应的影响.

关键词：航空运输；温室效应；BP 神经网络；油耗估算；航迹数据

中图分类号：X738 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2019)03-0988-06

Calculation and analysis of air traffic green performance based on flight trajectory data. WEI Zhi-qiang[1*], HAN Xiao-lan[1], HU Yang[1], ZHANG Wen-xiu[2] (1.College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2.Department of Operation Control, Xiamen Airlines, Xiamen 361011, China). *China Environmental Science*, 2019,39(3)：988~993

Abstract：In order to study the impact of ATC operations on the aircraft's greenhouse effect quantitatively and visually, firstly, the BP neural network matching model of flight parameters and flight trajectory was established based on the quick access recorder (QAR) data. Secondly, the model was verified based on the QAR data. Then the greenhouse effect characterization parameter calculation model was established. Finally, pollutant emissions and total temperature change potential were estimated based on the test data of flight track on the radar simulator, and the differences in the command of different controllers were compared and analyzed afterward. The results show that the relative error between the estimated fuel flow calculated by the estimation model of fuel consumption and the real value recorded by QAR was less than 2%. The results of evaluating controllers' performance by using fuel consumption and greenhouse effect index were different. The research results can be used to quantitatively analyze the impact of ATC operations on the greenhouse effect.

Key words：air transportation；greenhouse effect；BP neural network；estimation of fuel consumption；flight trajectory data

随着航空业的发展,民航飞机产生的 CO_2 和 NO_x 排放对全球温室效应的影响日益受到关注.在空中交通绩效评估方面,国外将污染物的排放量引入了绩效评估体系,但未考虑到温室效应的影响.例如,Reynolds 建立了基于飞行效率的空管绩效评估方法,同时将油耗和环境影响引入评估体系[1];国内主要集中在安全方面,马跃飞等[2]提出了基于多子网语言决策图的群体评估模型,能够评估空管体系的综合绩效水平;韩豫斌等[3]建立基于改进的模糊物元分析法的安全绩效评估模型,对空中交通管制系统的安全性进行量化描述.

在飞机环境评估方面,国际民航组织(ICAO)建立了飞机起降循环(LTO)基准排放模型[4];Cook 等[5]提出了动态成本指数的概念来研究不同污染物之间的权重关系;韩博等[6-7]对飞机起飞过程细粒子排放特征,以及飞行全过程污染物排放特性做了研究;Shine 等[8]为衡量污染物气体对温室效应的影响建立了全球温变潜势计算模型;Wild 等[9]针对飞机污染物排放提出了 NO_x 的辐射强迫计算方法; Sridhar 等[10]基于以上提出的温室效应计算模型综合分析了 CO_2 和尾迹云对温室效应的影响.上述研究实现了对飞机排放和温室效应的估算,但未涉及空管运行对飞机产生温室效应的影响.

在飞行参数与飞行轨迹的匹配与关联性研究方面,Khadilkar 等[11]运用飞行数据记录仪的数据建立了针对飞机滑出阶段能量平衡原理的燃油消耗估计模型;Tolga 运用基于遗传算法优化的神经网络建立了飞行阶段燃油流量计算模型[12];温瑞英等[13]利

收稿日期：2018-08-03

基金项目：国家自然科学基金项目(U1533116,U1633125);天津市自然科学基金项目(18JCYBJC23800)

* 责任作者, 副教授, weizhiqia@sina.com

用工程化计算方法对民用飞机巡航性能进行了优化分析;曹惠玲等[14]运用多元回归分析方法建立了爬升阶段燃油流量的回归模型.这些模型在进行油耗计算时,需要用到很多飞行参数,其中绝大多数在空管的雷达记录数据中不存在,不能运用到空管方面的燃油分析.

BP 神经网络是一种由大量的节点(神经元)和节点之间的加权连接而成的应用最为广泛的网络运算模型[15].欧韬等[16]基于神经网络对民航安全态势进行评估与仿真,徐涛等[17]建立基于神经网络集成的单个飞行事件噪声预测模型.快速存取记录器(QAR)存储了包括燃油流量参数在内的大量飞机参数数据,但由于 QAR 数据涉及到航空公司的飞行细节和核心商业利益,不能共享给其他民航单位,致使在空管指挥运行中无法使用 QAR 数据来进行空管运行质量分析.

本文首先从 QAR 数据中提取出与雷达记录格式相同的数据(主要是飞行轨迹数据),形成伪雷达数据,从 QAR 数据中得到与伪雷达数据相匹配的飞机油耗参数,构建基于 BP 神经网络的飞机油耗与飞行轨迹匹配模型;然后建立温室效应表征参数计算模型;之后根据构建的油耗匹配模型和温室效应表征参数计算模型,利用管制员在模拟机中的雷达记录数据计算飞机引起温室效应的总温变潜势.上述研究可定量评估空管运行对温室效应的影响,为提升空中交通运行质量提供参考.

1　飞机燃油流量估算模型

1.1　研究方法

研究采用 3 层神经网络,即输入层、隐含层、输出层,共 5 个输入元(P1, P2, P3 , P4, P5), 分别表示地速、气压高度、航向、爬升率和转弯角速度 5 个参数;一个输出元(Y),即燃油流量.

输入层和输出层的节点数分别为 5 和 1,根据经验得出隐含层节点数的取值范围为[6,20].隐含层的传递函数采用 logsig,输出层的传递函数采用 purelin,BP 网络的学习算法采用 trainbr,训练目标设定为 0.001,最大训练次数设为 20000.经过不断调试、校验、修改和训练,确定隐含层节点数为 18,网络的误差降到了 1.0×10^{-3} 以下,建模完成.训练过程中网络误差性能的变化如图 1 所示.

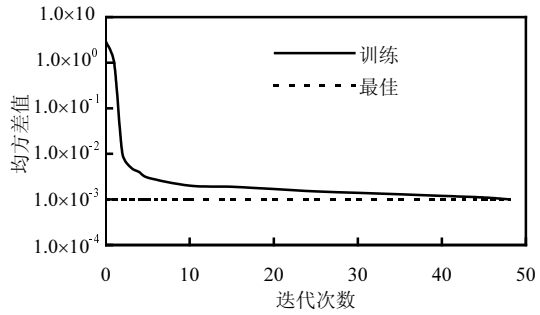


图 1　训练过程中网络误差性能的变化

Fig.1　Variation of network error performance in the training process

1.2　数据来源

燃油流量是排放量计算的基础. 为此首先搜集航班 QAR 数据,选取爬升阶段的数据,通过作图示意确定爬升的结束点,进而选取爬升阶段的数据.之后对新的 QAR 数据加工处理得到含有地速、气压高度、航向、爬升率、转弯角速度和总燃油流量的数据库.具体公式如下:

$$\mathrm{rc}=\frac{h_p^{'}-h_p}{t^{'}-t} \tag{1}$$

$$\omega=\frac{h_d^{'}-h_d}{t^{'}-t} \tag{2}$$

式中: $h_p^{'}$、h_p 分别表示第 t'、t 时刻飞行的气压高度,米; $h_d^{'}$、h_d 分别表示第 t'、t 时刻飞机的航向,度; $t'-t$ 表示时间差,秒.rc 表示飞机的爬升率,m/s;ω表示飞机转弯角速度,°/s.

之后对 QAR 数据中的异常点进行处理,对于一些爬升率为负值的点,使其值为 0;然后,利用公式(3)对每组参数的数据进行归一化处理,将其转化为[0,1]之间的数据,以防止样本值过大,可以提高结果的精确度,同时还可以加快训练 BP 神经网络时的收敛速度.

$$x_{kn}^{'}=\frac{x_{kn}-x_{k\min}}{x_{k\max}-x_{k\min}} \tag{3}$$

式中:x_{kn} 表示第 k(k=1,2,3,4,5,6)个参数中的第 n 个数值归一前的数值, $x_{k\min}$、$x_{k\min}$ 表示第 k 个参数的最大值、最小值, $x_{kn}^{'}$ 表示第 k 个参数中第 n(n=1,2,3,4,5……)个数值归一化后的数值.为了使模型具有通用型,本文设定爬升阶段各参数数据的最大值 $x_{\max}$、最小值 $x_{\min}$,如表 1 所示.

表 1 每个参数的 x_{max}、x_{min} 值

Table 1 the maximum and minimum values of each parameter

参数	x_{min}	x_{max}
地速(km/h)	280	1000
气压高度(m)	1200	12000
航向(°)	0	360
爬升率(m/s)	0	25
转弯角速度(°/s)	−3	3
燃油量(kg/h)	1500	8000

1.3 结果与讨论

利用样本 QAR 数据,输入神经网络中进行初步检验,得到归一化后数据的真实曲线与预测曲线如图 3 所示.实线表示真实曲线,虚线表示预测曲线.横坐标表示时间,纵坐标表示未反归一化的燃油流量.

通过计算真实数值与预测数值之间的绝对误差为 0.02,相对误差极小,可以看作为 0,因此神经网络模型对各个样本的诊断结果均正确.

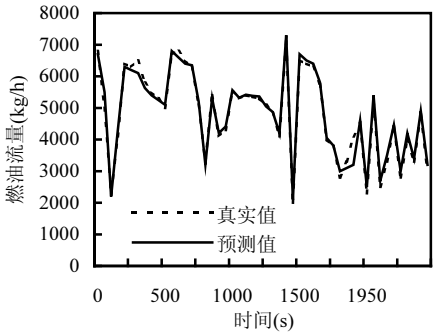


图 2 真实曲线和预测曲线对比

Fig.2 curves of real value and predicted value

为进一步分析估算模型的精度,将另一组航班的 QAR 数据转化为含有航向、气压高度、地速、转弯角速度、爬升率 5 个参数的伪雷达数据,输入模型,得到估算值.

通过公式(4)反归一化估算出每一时刻的燃油流量;

$$X_{kn} = X'_{kn}(x_{k\max} - x_{k\min}) + x_{k\min} \quad (4)$$

式中: X'_{kn} 表示模型输出值, X_{kn} 表示反归一化后的估算燃油流量数值, $x_{k\max}$ 、 $x_{k\min}$ 与上文中的数值一致.

利用估算值和 QAR 记录的真实值,按照时间积分方法,分别得到估算燃油消耗量和真实燃油消耗量,将 2 组数据进行对比检验模型的精度.

基于航迹估算出的燃油流量和 QAR 文件中记录的燃油流量数据对比如图 3 所示.

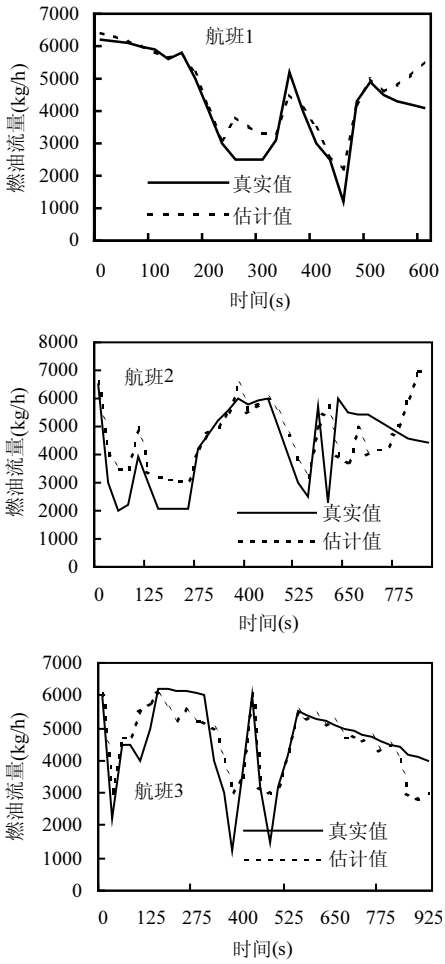


图 3 燃油流量真实值与预测值的对比

Fig.3 Comparison graph of the real value and the predicted value of fuel flow

在图 3 中,由于数据包含了一部分巡航阶段的数据,而本文模型主要针对于飞机的离场爬升阶段,在最后十几秒(进入了平飞巡航阶段)的真实值与估计值差距较大.由图 3 可知,在爬升阶段,利用模型得到的估算值和 QAR 记录的真实值之间的相对误差不超过 2%,表明真实值和估算值基本吻合,因此证实本研究所建立的模型可以估算燃油消耗和排放数据.

2 温室效应表征参数计算模型

2.1 发动机 LTO 排放模型

发动机的污染物排放量取决于发动机类型、燃油消耗量和排放指数.发动机厂家提供的基准排放指数数据如表 2 所示.

表 2　CFM56−7B26 发动机基准排放数据

Table 2　Basic emission indexes of CFM56−7B26engine

飞行阶段	推力等级 (%)	飞行时间 (min)	燃油流量 (kg/h)	CO_2 指数	NO_X 指数
起飞	100	0.7	4395.6	3.155	0.0288
爬升	85	2.2	3596.4	3.155	0.0225
进近	30	4.0	1216.8	3.155	0.0108
滑行	7	26.0	406.8	3.155	0.0047

CO_2 是巡航过程中对环境影响最大的气体,其排放量与燃油消耗量成正比,计算如下.

$$S_{CO_2} = E_{I,CO_2} \cdot F \tag{5}$$

式中: S_{CO_2} 为 CO_2 的排放量,kg; E_{I,CO_2} 为 CO_2 的排放指数,表示消耗 1kg 燃油排放的 CO_2;F 为油耗,kg.

NO_x 的基准排放数据只代表了 4 种固定推力在基准条件下的排放指数,且仅在高度 1000m 以下有效.因此需要根据具体的飞行条件,对基准排放指数进行修正,得到实际排放指数.

2.2　排放指数修正模型

(1)数据曲线拟合

将表 1 发动机基准数据中的燃油流量和对应的 NO_x 排放指数绘制在双对数坐标系中,并对 NO_x 与单发燃油流量在该坐标系下进行线性拟合,进而建立 W_{ff}−E_{IR} 拟合曲线,如图 4 所示.

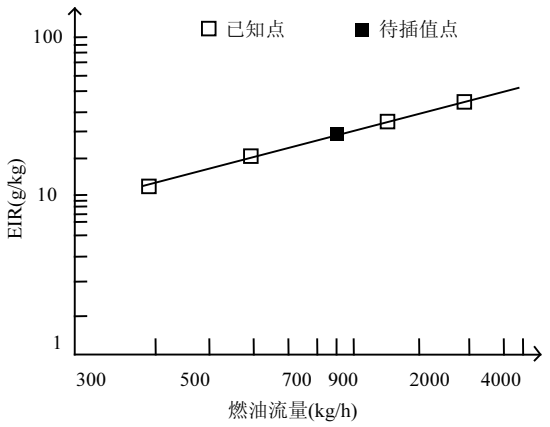


图 4　双对数坐标系下的线性拟合示意

Fig.4　Schematic diagram for linear fit on the $\log_{10}$ paper

(2)基准燃油流量

将飞机的实际燃油流量换算成 ISA、0m 条件下的基准燃油流量 W_{ff},即

$$W_{ff} = \frac{W_f}{\delta}\theta^{3.8}e^{0.2}M^2 \tag{6}$$

式中:W_f 为实际燃油流量,kg/h;δ为外界大气压强与标准海平面大气压强之比;θ为外界温度与标准海平面大气温度之比; M 为马赫数.

(3)计算排放指数

在双对数坐标系下对基准燃油流量进行线性插值,得到相应的基准排放指数.在图 1 中,已知 4 个飞行阶段的燃油流量和 NO_x 指数,将基准燃油流量 W_{ff} 代入式(6)即可计算出基准燃油流量所对应的基准排放指数 E_{RI}.

$$E_{RI} = 10\,\wedge\left(\frac{\log\dfrac{W_{ff}}{W_{ff1}}\cdot\log\dfrac{E_{RI2}}{E_{RI1}}}{\log\dfrac{W_{ff2}}{W_{ff1}}} + \log E_{RI1}\right) \tag{7}$$

式中:W_{ff1}、W_{ff2} 分别为与待差值点相邻 2 点的燃油流量,kg/h; E_{RI1}、 E_{RI2} 为相应的排放指数,g/kg.

实际排放指数计算如下:

$$E_{I,N} = E_{RI}\frac{\delta^{0.51}}{\theta^{1.65}}\exp[19.0(0.0063 - \frac{0.622\Phi P_v}{P - \Phi P_v})] \tag{8}$$

式中: $E_{I,N}$ 为 NO_x 的实际排放指数; E_{RI} 为 NO_x 的基准排放指数;Φ为大气相对湿度;P_v 为饱和蒸气压,Pa.

NO_x 的排放量计算如下:

$$S_{NO_x} = E_{I,N} \cdot F \tag{9}$$

式中: S_{NO_x} 为 NO_x 的排放量,kg.

2.3　温室效应表征模型

文献[5−7]通过定量计算飞机排放的污染物量来评估飞行对环境的影响,但根据文献[8]的研究可知,不同的温室气体具有不同的辐射效率和生命周期,造成的增温效果也不同.因此需要建立温室效应表征模型,进一步评估飞行对环境的影响. 本文使用绝对脉冲全球温变潜势(APGTP)作为温室气体的表征参数.APGTP 是瞬时释放的某一温室气体在未来某时间造成的全球平均表面温度的变化,具体计算如下:

$$P_{T,x}(H) = \frac{1}{C}\int_0^H A_x R_x(t) e^{\frac{t-H}{C\lambda}} dt \tag{10}$$

其中

$$R_x(t) = \begin{cases} e^{-\frac{t}{\alpha_x}} & x = NO_x \\ a_0 + \sum_i a_i e^{-\frac{t}{\alpha_i}} & x = CO_2 \end{cases} \tag{11}$$

式中: $P_{T,x}$ 为 APGTP,K/kg;H 为时间范围;A_x 为单位

质量气体浓度改变的辐射强迫,W/m^2/kg;$R_x(t)$为温室气体在时间 t 时的浓度响应函数;C 为气候系统热容能力;λ为气候敏感参数;α_x, α_i, a_0, a_i 均为给定的计算系数.

将式(11)代入式(10),得

$$P_{\mathrm{T},x}=\begin{cases}\dfrac{A_x[\mathrm{e}^{-\frac{H}{\alpha_x}}-\mathrm{e}^{-\frac{H}{\tau}}]}{C(\tau^{-1}-\alpha_x^{-1})} & x=\mathrm{NO}_x\\ \dfrac{A_x}{C}\{\tau a_0[1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}]+\sum_i\dfrac{a_i[\mathrm{e}^{-\frac{t}{\alpha_i}}-\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}]}{(\tau^{-1}-\alpha_i^{-1})}\} & x=\mathrm{CO}_2\end{cases} \tag{12}$$

式中:τ 为气候响应的时间范围.

根据式(5)和(9)分别计算出单位时间内飞机产生的 CO_2 和 NO_x 的排放量,随后根据式(12)即可计算出单位时间内飞机飞行造成的全球总温变潜势,代表温室气体在未来某给定时间造成的温度变化趋势.

总温变潜势ΔT 计算如式(13)所示.

$$\Delta T=P_{\mathrm{T},\mathrm{NO}_x}\cdot S_{\mathrm{NO}_x}+P_{\mathrm{T},\mathrm{CO}_2}\cdot S_{\mathrm{CO}_2} \tag{13}$$

式中:ΔT 为总温变潜势,K.

3 管制员指挥效果评价分析

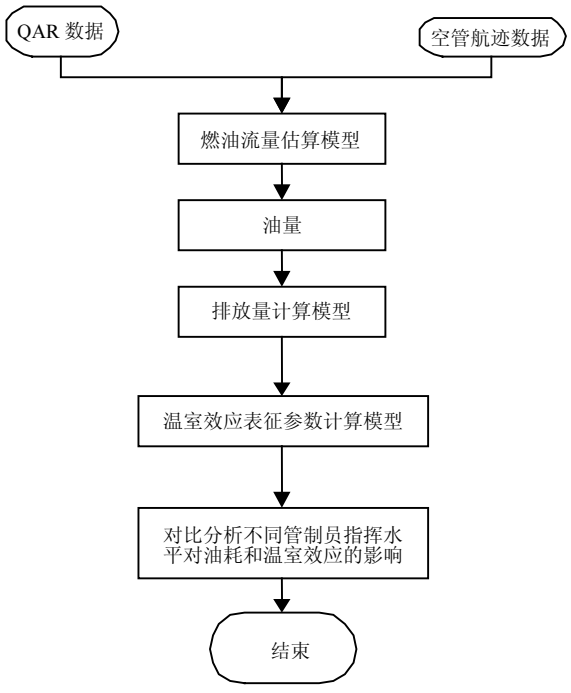


图 5 算例计算流程

Fig.5 Flowchart of calculation examples

为了具体分析管制员个体技能对飞机油耗与温室效应的影响,在实验室的雷达管制模拟机上,由 8 名优秀的一线管制员在相同的模拟环境下分别进行管制指挥.具体训练环境为中低空爬升段,共 7 个离场飞机.基于采集的飞机航迹数据,使用燃油流量估算模型和温室效应表征参数模型进行油耗、污染物排放量及总温变潜势计算,具体计算流程如下图所示.

图 6 表示不同管制员指挥下所有航班的油耗和排放量对比情况.

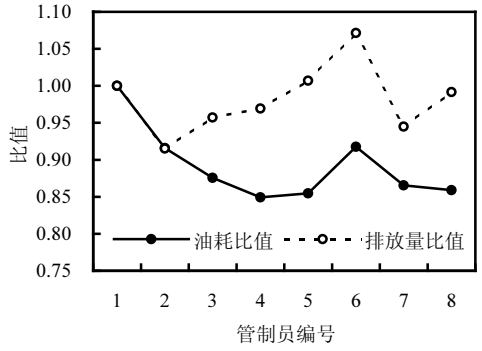


图 6 不同管制员指挥下的总油耗和总排放量情况

Fig.6 Total fuel consumption and emissions under the command of different controllers

图 7 表示不同管制员指挥下所有航班的油耗和总温变潜势对比情况.

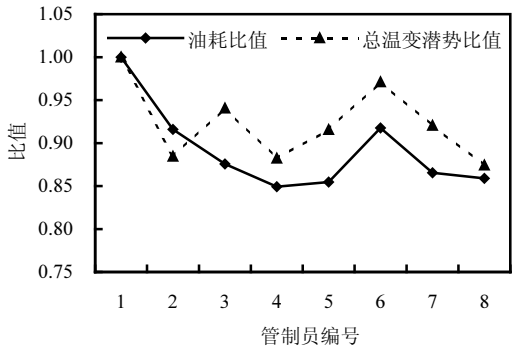


图 7 不同管制员指挥下的总油耗和总温变潜势情况

Fig.7 Total fuel consumption and temperature change potential under the command of different controllers

通过对图 6、7 对比可知,污染物排放量和总温变潜势相对于总油耗的变化趋势不同.因此需要进一步分析不同管制员指挥下的总温变潜势情况.

在油耗指标方面,由图 7 可知,4 号管制员燃油量最低,与 1 号管制员相比,要节油 558kg,是最节油的管制员,相反 1 号为最费油的管制员.管制员的指挥技能由优到劣为:4,5,8,7,3,2,6,1 号.

在温室效应表征参数方面,由图7可知,8号管制员总温变潜势最低,1号为对温室效应影响最大的管制员,管制员的指挥技能由优到劣为:8,4,2,5,7,3,6,1号.CO_2 的排放指数与环境因素无关,与油耗成正比关系,油耗越大,其排放量和总温变潜势越大.

由于每个管制员的个体差异,在指挥的过程中,会造成同一位置环境条件下飞机燃油流量和油耗的不同,进而造成不同污染物的排放量的不同,最终使得总温变潜势存在差异.CO_2 和 NO_x 是污染物排放的关键污染物,占总污染物量的 99%以上,过多排放会造成海平面上升,使温室效应加剧.因此,可以通过提升管制员技能来控制空管运行对温室效应的影响.

4　结论

4.1　CO_2 和 NO_x 的排放与飞机油耗成正相关性,是航空污染物排放的主力.

4.2　按油耗指标对管制员的排序结果与按温室效应指标的排序结果并不完全一致.在管制员评价中,不能仅仅只考虑管制工作对飞机油耗的影响.

4.3　管制员的个体技能差异会对总温变潜势产生一定的影响,通过提升管制员技能可以控制空管运行对温室效应的影响.

参考文献：

[1] Reynolds T G. Air Traffic Management Performance Assessment Using Flight Inefficiency Metrics [J]. Transport Policy, 2014,34:63-74.

[2] 马跃飞,陈　峰,姚　峤,等.基于多子网语言决策图的空管体系绩效评估 [J]. 国防科技大学学报, 2017,39(6):134-142.
Ma Yue-fei, Chen Feng, Yao Di, et al. Air Traffic Management System Performance Evaluation Based on Linguistic Decision Map with Multi-subnets [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017,39(6):134-142.

[3] 韩豫斌,朴春子.空中交通管制系统安全绩效评估模型研究 [J]. 航空工程进展, 2016,7(4):477-483.
Han Yu-bin, Piao Chun-zi. Research on Safety Performance Assessment Model of ATC (Air Traffic Control) Syetem [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016,7(4):477-483.

[4] ICAO. Montreal: International Civil Aviation Organization [R]. Airport Air Quality Manual, 2011:38-39.

[5] Cook A, Tanner G, Williams V, et al. Dynamic Cost Indexing Managing Airline Delay Costs [J]. Journal of Air Transport Management, 2010:26-35.

[6] 韩　博,刘雅婷,谭宏志,等.一次航班飞行全过程大气污染物排放特征 [J]. 环境科学学报, 2017,37(12):4492-4502.
Han Bo, Liu Ya-ting, Tan Hong-zhi, et al. Emission characterization of civil aviation aircraft during a whole flight [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017,37(12):4492-4502.

[7] 韩　博,刘雅婷,陈　鑫,等.民航飞机起飞过程细粒子排放特征 [J]. 中国环境科学, 2017,37(5):1620-1627.
Han Bo, Liu Ya-ting, Chen Xin, et al. Fine particles emission characterization of civil aviation aircraft during takeoff [J]. China Environmental Science, 2017,37(5):1620-1627.

[8] Shine K P, Fuglestvedt J S, Hailemariam K, et al. Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases [J]. Climatic Change, 2005,68:281- 302.

[9] Wild, Prather O, Akimoto M J, et al. Indirect long-term global radiative cooling from NO_x emissions [J]. Geophysical Research Letters, 2001,28(9):1719-1722.

[10] Sridhar B, Ng H K, Chen N Y. Integration of linear dynamic emission and climate models with air traffic simulations [R]. AIAA Guidence, Navigation, and Control Conference, 2012,4756:13-16.

[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] Tolga B. Modeling the fuel flow-rate of transport aircraft during flight phases using genetic algorithm-optimized neural networks [J]. Aerospace science and technology, 2016,49(3):52-62.

[13] 温瑞英,魏志强,王红勇,等.民用飞机巡航性能计算研究 [J]. 飞行力学, 2015,4:289-292.
Wen Rui-ying, Wei Zhi-qiang, Wang Hong-yong, et al. Calculation and analysis on cruising performance of civil aircraft [J]. Flight Dynamics, 2015,4:289-292.

[14] 曹惠玲,贾　超.基于 QAR 的飞机爬升阶段燃油流量回归模型研究 [J]. 中国民航大学学报, 2013,3:31-35.
Cao Hui-ling, Jia Chao. Research of fuel flow regression model of aircraft climb phase based on QAR [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2013,3:31-35.

[15] Yan T S. An Improved genetic algorithm and its blending application with neural network [C]//Proceedings of International Workshop on Intelligent Systems and Applications, 2010:1-4.

[16] 欧　韬,周长春.基于神经网络的民航安全态势评估模型及仿真 [J]. 中国安全生产科学技术, 2011,7(2):34-41.
Ou Tao, Zhou Chang-chun. Situation assessm ent model of civil aviation safety based on neural network and its simulation [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011,7(2):34-41.

[17] 徐　涛,燕宪金,杨国庆,等.基于神经网络集成的单个飞行事件噪声预测模型 [J]. 中国环境科学, 2014,2:539-544.
Xu Tao, Yan Xiao-jin, Yang Guo-qing. Prediction model of noise event for single flight based on neural network ensemble [J]. China Environmental Science, 2014,2:539-544.

作者简介：魏志强(1979-),男,河南渑池人,副教授,博士,主要研究方向为飞机性能与飞行仿真.发表论文 25 篇.