

基于改进燃油流量神经网络的航空器巡航温室效应评估

马丽娜, 田 勇, 王 倩, 徐 灿

(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 211106)

摘 要: 为高效、深入地评估航空器巡航运行环境影响, 该研究以全球绝对温变潜势为表征参数, 建立航空器巡航阶段不同污染物排放的综合温室效应评估模型; 构建用于评估过程中巡航燃油流量获取的三层神经网络, 并引入遗传算法对网络初始权值和阈值进行优化。结果表明, 经过遗传算法改进后的燃油流量神经网络相较于优化前, 拟合优度由 0.954 6 提升至 0.973 1, 均方误差降低了 48.15%, 最大相对误差和平均相对误差也有效降低。提出了能够代替传统的 BADA 性能模型的污染物排放量计算方法, 在保证可靠性的同时大大减少了对飞行性能参数的依赖, 且能进一步给出污染物排放造成的综合温变影响。

关键词: 航空器巡航; 温室效应; 改进神经网络; 燃油流量计算

中图分类号: X511

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022.01.11

Greenhouse effect assessment of aircraft cruise based on improved neural network of fuel flow-rate

MA Lina, TIAN Yong, WANG Qian, XU Can

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to efficiently assess the environmental impact of the aircraft cruise, the global absolute temperature change potential is taken as a parameter to establish a comprehensive model for evaluating the greenhouse effect resulted from different pollutants during the aircraft cruise. A three-layer neural network is developed to obtain the aircraft fuel flow-rate during the cruise, and the genetic algorithm is introduced to optimize its initial weights and thresholds. Results show that R^2 of the improved neural network is increased from 0.954 6 to 0.973 1 comparing with the primary network, the mean square error is decreased by 48.15%. In addition, the maximum and average value of relative percentage error are also effectively reduced. A pollutant emission calculation method which can replace the traditional one based on the BADA performance model is proposed. Based on the reliability of the model, the comprehensive temperature change caused by the pollutant discharge will be obtained with a greatly reduced dependence on flight performance parameters.

Keywords: aircraft cruise; greenhouse effect; improved neural network; fuel flow-rate calculation

CLC number: X511

近年来, 全球航空运输业迅猛发展, 航班数量显著增加, 然而, 航空器运行带来的环境问题却日益凸显。据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)统计, 目前全球人为排放二氧化碳(CO_2)总量的 2% 来源于航空运输排放, 且该比例保持较快增速^[1]。2019 年 9 月, 中国向国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)正式提交第三版

航空减排行动计划书, 宣示了在绿色民航发展方面的决心与信心。航空器巡航阶段时间占比高, 气体排放产生的温室效应具有放大效果^[2], 对此, 有必要研究一种有效的航空器巡航温室效应评估方法。温室效应表征和燃油消耗计算是温室效应评估方法研究的主要议题。

国内外学者针对航空器运行温室效应的研究多集中在气体排放计算方面。曹惠玲等^[3]使用 $\text{P}_3\text{-T}_3$

收稿日期: 2020-09-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61671237); 南京航空航天大学研究生开放基金项目(kfj20200735)

作者简介: 马丽娜(1998-), 女, 硕士研究生。研究方向: 航空器绿色运行。E-mail: malinacca@nuaa.edu.cn

通信作者: 田 勇(1976-), 男, 博士、教授。研究方向: 绿色航空与安全管理。E-mail: tianyong@nuaa.edu.cn

引用格式: 马丽娜, 田 勇, 王 倩, 等. 基于改进燃油流量神经网络的航空器巡航温室效应评估[J]. 环境保护科学, 2022, 48(1): 57-63.

方法对 ICAO 基准排放模型中的气体排放指数进行修正,在此基础上实现了标准起飞着陆循环(land and take off, LTO)过程氮氧化物(NO_x)排放量的获取,随后对黑碳排放量进行了计算和分析^[4]; OWEN et al^[5] 使用飞机性能和污染物排放模型对未来航空运输中 CO_2 和 NO_x 排放情况做出预测; 罗雯莉等^[6] 使用线源扩散模型,比较了不同减排措施下污染物排放减少作用。针对航空器运行对机场周边区域造成的环境影响,学者们也开展了诸多研究,高垒等^[7] 对南京禄口国际机场 2017 年 NO_x 、碳氢化合物(HC)和一氧化碳(CO)排放量进行了有效计算; 韩博等^[8] 从系统水平出发,获取了京津冀机场群 2018 ~ 2019 年大气污染物排放清单。上述研究实现了对航空器运行污染物排放量的计算,但对时间占比较长的巡航阶段关注较少,且尚未针对污染物排放产生的综合温变影响进行进一步研究。

航空排放中的温室气体主要来源于燃油消耗,在燃油消耗获取方面,学者们大多通过数学建模的方法展开研究。TURGUT et al^[9] 针对航空器下降过程构建了燃油消耗与高度之间的指数模型; LAWRENCE et al^[10] 基于飞行数据构建了新型的动力学参数模型、高斯回归模型及 K 近邻回归模型; 张军等^[11] 使用最小二乘支持向量机(support vector machines, SVM)的方法,提出了基于横向与纵向二维驱动的动态预测方法。随着研究的深入,气象因素的影响也引起了学者的关注,并由此形成了飞机油耗修正模型^[12]。但,这些油耗估算方法多依赖于大量的飞行参数,其中绝大多数数据公开程度较低、获取难度较大,使得燃油消耗计算成为航空器运行环境影响和节能减排效果评估过程中的难点。

本研究将使用机器学习的方法,针对航空器巡航温室效应评估方法展开研究: 根据温室气体排放和表征模型,建立航空器巡航综合温室效应评估模型; 构建用于获取巡航燃油流量的三层神经网络(neural network, NN)模型,引入遗传算法优化网络参数; 从预测精度和优化质量 2 方面评价改进后的网络模型,并选取深圳航空公司 ZH9164 航班进行实例应用,验证评估方法的可行性和可靠性。

1 综合温室效应评估模型

CO_2 和 NO_x 是航空器巡航阶段气体排放的重要组成部分,两者具有不同的增温效应。因此,本文首先

从温变影响的角度构建综合温室效应评估模型,以对航空排放中不同污染物的环境影响进行统一度量。

1.1 温室气体排放模型

1.1.1 CO_2 排放模型 根据美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)气体排放扩散模型(emissions and dispersion modeling system, EDMS), CO_2 排放量与污染物排放指数和燃油消耗量相关,见式(1)。

$$E_{\text{CO}_2} = EI_{\text{CO}_2} \int_0^{T_c} FCR(t) dt \quad (1)$$

式(1)中: E_{CO_2} 为 CO_2 排放量, kg; T_c 为巡航总时长, h; $FCR(t)$ 为 t 时刻的燃油流量, kg/h; EI_{CO_2} 为 CO_2 排放指数, kg/kg, 表示消耗 1 kg 航空燃油产生的 CO_2 量,在发动机类型与航空燃油种类不变的条件下, EI_{CO_2} 保持恒定。表 1 可知, B737-800 飞机选装的 CFM56-7B26 发动机 CO_2 排放指数为 3.155。

表 1 CFM56-7B26 发动机基准排放数据

飞行阶段	推力等级 /%	飞行时长 /min	燃油流量 /kg·h ⁻¹	CO_2 排放指数 /kg·kg ⁻¹	NO_x 排放指数 /kg·kg ⁻¹
起飞	100	0.7	4 395.6	3.155	0.028 8
爬升	85	2.2	3 596.4	3.155	0.022 5
进近	30	4.0	1 216.8	3.155	0.010 8
滑行	7	26.0	406.8	3.155	0.004 7

1.1.2 NO_x 排放模型 对于 NO_x 排放模型,与 CO_2 排放模型不同,其排放指数随巡航条件的不同而实时变化。此外,基准排放模型中的 NO_x 排放数据,只包括 4 种典型工作状态下的排放指数,且仅适用于基准条件(ISA、0 m),因此,针对航空器巡航 NO_x 排放量的计算,需要根据具体燃油流量和巡航条件,对其排放指数进行插值和修正,见图 1。

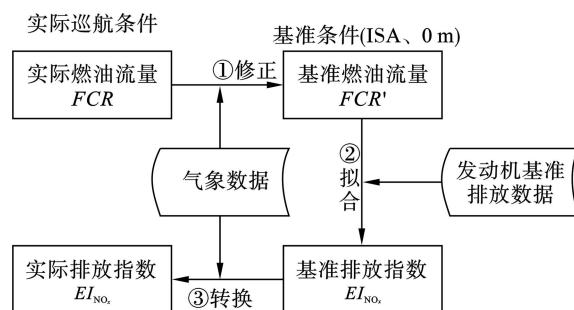


图 1 NO_x 排放指数修正方法

①将实际燃油流量按式(2)修正到基准条件下的相应值。

$$FCR' = \frac{FCR}{\delta} \theta^{3.8} e^{0.2 M^2} \quad (2)$$

式(2)中, FCR 为修正后的基准燃油流量; δ 为外界大气压强与标准海平面大气压强(1 013.2 hPa)的比值; θ 为外界大气温度与标准海平面大气温度(288 K)的比值; e 为自然常数; M 为巡航马赫数。

②根据发动机基本排放数据, 对基准燃油流量和 NO_x 排放指数进行拟合, 以便能够通过拟合关系, 获取基准燃油流量对应的 NO_x 基准排放指数 E'_{NO_x} , 表示在基准条件下消耗 1 kg 航空燃油产生的 NO_x 量。

③将 NO_x 基准排放指数按照公式(3)转换回实际排放指数。

$$EI_{\text{NO}_x} = E'_{\text{NO}_x} \frac{\delta^{0.51}}{\theta^{1.65}} \exp \left[19.0 \left(0.0063 - \frac{0.622 \varphi p_v}{P - \varphi p_v} \right) \right] \quad (3)$$

式(3)中: EI_{NO_x} 为 NO_x 的实际排放指数, kg/kg, 表示在实际运行条件下消耗 1 kg 航空燃油产生的

$$\text{AGTP}_G(H) = \begin{cases} A_G \sum_{j=1}^2 \left[a_0 c_j (1 - e^{-\frac{H}{d_j}}) + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \alpha_i c_j}{\alpha_i - d_j} (e^{-\frac{H}{\alpha_i}} - e^{-\frac{H}{d_j}}) \right] & G = \text{CO}_2 \\ A_G \sum_{j=1}^2 \left[\frac{\alpha c_j}{\alpha_i - d_j} (e^{-\frac{H}{\alpha_i}} - e^{-\frac{H}{d_j}}) \right] & G = \text{NO}_x \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, $\text{AGTP}_G(H)$ 为温室气体 $G(\text{CO}_2$ 或 $\text{NO}_x)$ 在决策时间水平 H 下的全球绝对温变潜势, K/kg, 是其造成全球平均地表温度的变化; A_G 为单位质量 G 的辐射强迫, Wm^2/kg ; a_0 、 a_i 、 α_i 、 c_j 和 d_j 为给定参数^[13]。

由此, 航空器巡航阶段 CO_2 和 NO_x 排放造成的综合温变影响, 见式(7)。

$$\Delta T(H) = \text{AGTP}_{\text{CO}_2}(H) \cdot EI_{\text{CO}_2} \int_0^{T_c} FCR(t) dt + \text{AGTP}_{\text{NO}_x}(H) \int_0^{T_c} EI_{\text{NO}_x}(t) \cdot FCR(t) dt \quad (7)$$

式(7)中, $\Delta T(H)$ 为全球总温变潜势, K。

2 巡航燃油流量神经网络模型

获取各时刻的燃油流量序列是准确评估巡航温室效应的关键步骤。本研究打破基于发动机性能模型对燃油流量进行建模的一贯研究, 利用神经网络对燃油流量进行建模, 以期减少计算过程中对公开程度较低的飞行参数的依赖。

2.1 基于神经网络的模型建立

人工神经网络是由大量称为神经元的节点和权重边组成的信息或信号处理系统, 可通过模拟生物大脑的结构和功能, 共同完成分布式处理和运算任务, 具有学习能力强、可操作程度高的优点。本研

NO_x 量; φ 为外界大气相对湿度, %; p_v 为饱和蒸汽压, Pa, 可采用公式(4)根据外界大气温度计算获得。

$$\lg p_v = \frac{10\,286T - 2\,148.490\,9}{T - 35.85} \quad (4)$$

式(4)中: T 为外界大气温度, K。综合 EDMS 排放模型和 NO_x 排放指数修正模型, 可得出 NO_x 排放量表达式(5)。

$$E_{\text{NO}_x} = \int_0^{T_c} EI_{\text{NO}_x}(t) \cdot FCR(t) dt \quad (5)$$

式(5)中: E_{NO_x} 为 NO_x 排放量, kg; $EI_{\text{NO}_x}(t)$ 为 t 时刻的 NO_x 排放指数。

1.2 温室效应表征模型

在温室气体排放定量计算的基础上, 使用全球绝对温变潜势(absolute global temperature potential, AGTP)这一表征参数进一步探究气体排放造成的大气温变影响。根据推导和验证, 见式(6)。

究根据影响飞机巡航燃油流量的性能和气象因素, 构建基于三层神经网络的巡航燃油流量估算模型 $FCR = N(h, v, d, ws, wd)$, 网络的拓扑结构, 见图2。

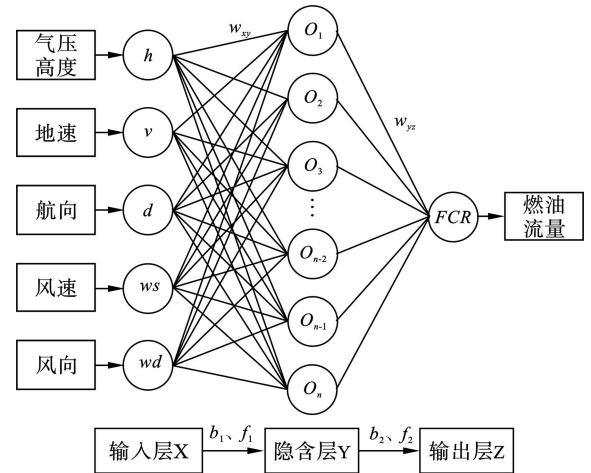


图2 三层神经网络拓扑图

网络由输入层 X、隐含层 Y 和输出层 Z 组成。其中: X 包含 5 个神经元 h 、 v 、 d 、 ws 、 wd , 分别表示气压高度、地速、航向、风速和风向; Y 层神经元用以传递 X 与 Y 间的关系; Z 含 1 个神经元 FCR , 为燃油流量; w_{xy} 、 b_1 和 f_1 分别表示 X 到 Y 的连接权值、阈值和激活函数; w_{yz} 、 b_2 和 f_2 分别表示 Y 到 Z 的连接权值、阈值和激活函数。

2.2 基于遗传优化的算法设计

人工神经网络具有较强泛化能力和可操作性,但也存在明显缺陷。在网络训练过程中,初始连接权值的和阈值对训练结果影响很大,但由于随机选取的方法,传统人工神经网络存在收敛速度慢、易陷入局部最优的缺点^[14];遗传算法是模拟自然选择和遗传学机理的最优解搜索技术,具有较强的全局搜索能力。为了有效克服传统人工神经网络的缺点,本研究将进化计算的自适应机制与神经网络的学习机制有机结合,使用遗传算法对神经网络参数进行优化:在 NN 基础上,以网络实际输出与期望输出间的均方误差构造适应度函数,通过遗传算法的进化操作和全局搜索能力,获取表现最优进化初始权值和阈值;利用神经网络的局部寻优能力,训练出性能更优的燃油流量估算模型。改进的神经网络(improved neural network, INN)算法流程,见图 3。

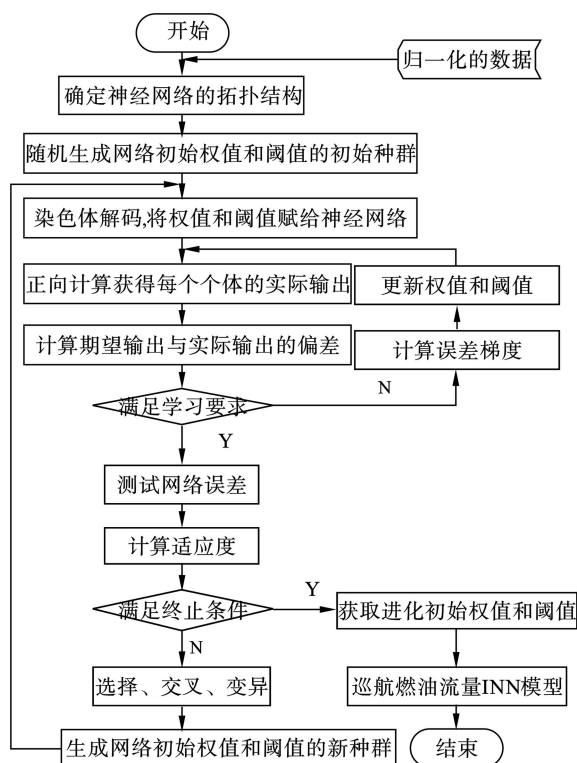


图 3 遗传算法优化的改进神经网络算法流程图

2.3 基于运行数据的网络训练

使用实际运行数据进行网络训练。针对收集到的 B737-800 机型的实际飞行记录数据进行清洗和处理,原始数据包括飞机高度、马赫数、地速、时间、左发燃油流量和右发燃油流量等信息。根据发动机转速、爬升率等信息,提取出所需的飞机巡航阶段相关数据(共 3 025 条),将其随机分为训练集(70%)、测试集(20%)和验证集(10%)。

2.3.1 隐含层神经元数目和学习算法的确定 隐含层神经元数目和学习算法是决定网络性能的重要参数。为尽可能提升网络性能,本研究在学习率为 0.01、训练目标为 1×10^{-3} 、最大训练次数为 1 000、 f_1 使用 Tansig 函数、 f_2 使用 Purelin 函数的条件下,针对隐含层神经元数目为 6~20 间的不同取值,学习算法分别使用梯度下降(Traingd)、贝叶斯正则化(Trainbr)和 Levenberg-Marquardt(Trainlm)的方法对 NN 模型进行试验。图 4 为各自 50 次训练中测试集实际输出与期望输出间均方误差(mean square error, MSE)的平均结果,当隐含层神经元数目取 18,使用贝叶斯正则化学习算法时网络精度较高。

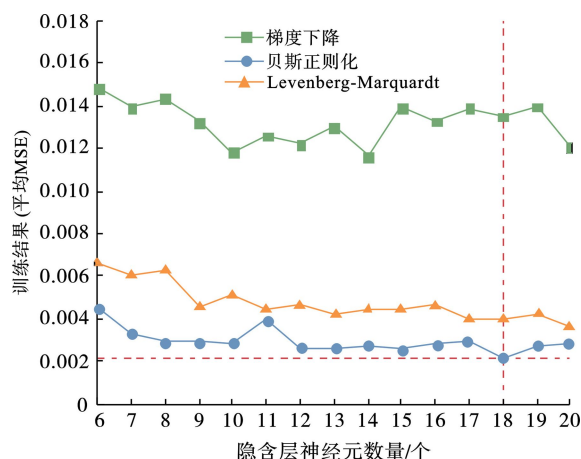


图 4 不同隐含层神经元数目和学习算法组合下的神经网络性能比较

2.3.2 进化初始权值和阈值的获取 在优选的隐含层神经元数目和学习算法的基础上,通过 2.2 中的算法流程,对网络初始权值和阈值进行优化。遗传算法部分使用二进制进行编码;以网络实际输出和期望输出的均方误差为适应度函数;以轮盘选择、两点交叉、离散变异和精英保留的策略进行进化操作;经过多次试验,综合考虑设置遗传算法参数:种群大小定义为 100,最大遗传代数 100,变量的二进制位数为 16,交叉、变异概率分别为 0.85 和 0.01,代沟为 0.9。通过遗传算法优化的最佳适应度曲线,见图 5,当进化到第 42 代时,测试集的最小 MSE 开始收敛,此时进化初始权值和阈值。

使用进化初始权值和阈值对网络进行训练,可得出精度更高的巡航燃油流量估算 INN 模型。使用 INN 时测试集各个数据点实际输出与期望输出间绝对值相对百分比误差 σ 的统计情况,见图 6。

图 6 可知,74% 的数据点绝对值相对百分比误差在 5% 以内,初步说明模型取得了较好的训练效果。

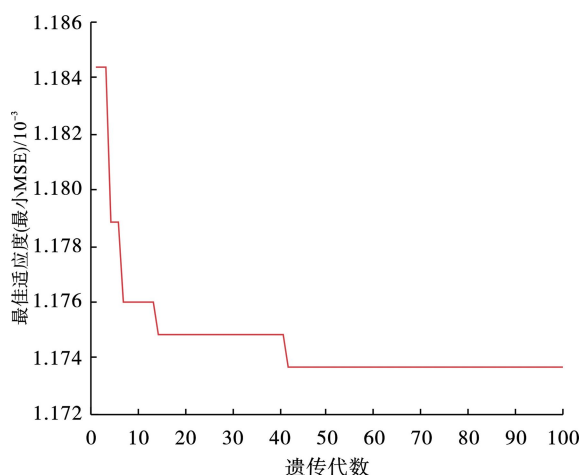


图5 遗传算法适应度曲线

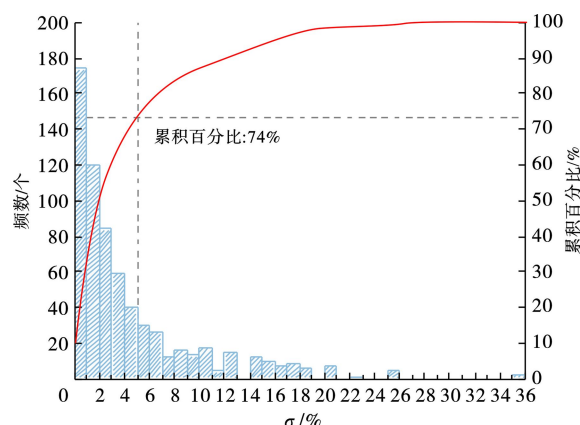


图6 测试集实际输出与期望输出对比

3 网络性能评价与案例分析

3.1 模型评价

从验证集数据中,随机选取100个样本进行实

验,为确保结果可靠,样本选取分5次进行,形成的G1、G2、G3、G4和G5共5组数据的网络输出情况,见图7。总体来看,5组数据均体现出优异的拟合效果,说明INN具有良好的泛化能力。

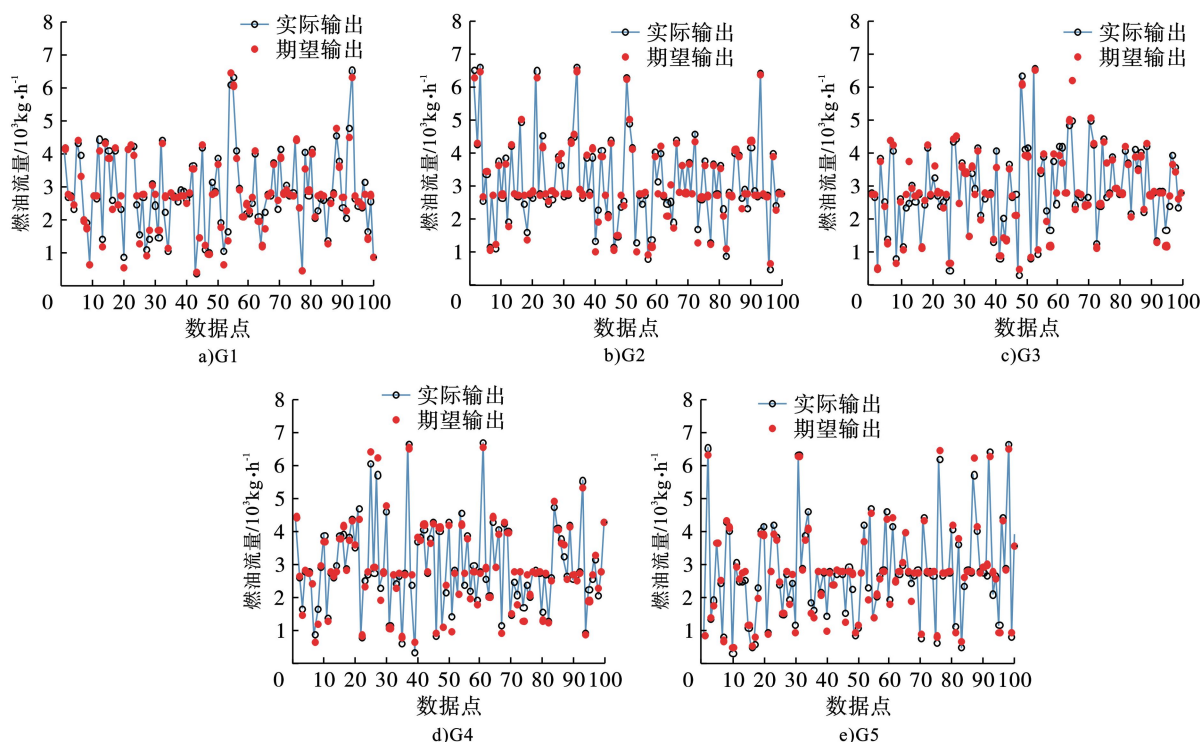


图7 验证数据实际输出与期望输出对比

为评估遗传算法的优化效果,针对上述5组数据,分别使用NN和INN进行实验,通过拟合优度(R^2)、均方误差(MSE)、相对百分比误差的最大值($\max-\sigma$)和平均值($\text{mean}-\sigma$)4项指标比较其预测性能,对比结果见表2。

表2可知,5组数据输出结果中,INN的 R^2 均在0.95以上,平均 R^2 高达0.9731,大于NN的0.9546;MSE平均值由0.0027降低至0.0014,说明了遗传

算法的优化有效提升了网络的精度,使得燃油流量的获取更加可靠; $\max-\sigma$ 和 $\text{mean}-\sigma$ 的平均值分别降低了43.45%和29.30%,表明优化后的INN具备更加稳定的预测性能。

3.2 算例分析

根据综合温室效应计算模型和巡航燃油流量神经网络模型,通过公开的航迹和气象信息,可实现航空器巡航温室效应的定量计算。本研

究以 B737-800 机型为例,选取 2019 年 10 月 7 日 巡航温室效应评估框架进行算例计算和分析,见
执飞成都→北京航段的 ZH9164 航班,航空器 图 8。

表 2 NN 与 INN 性能指标对比

组别	R ²		MSE		max-σ/%		mean-σ/%	
	NN	INN	NN	INN	NN	INN	NN	INN
G1	0.960 7	0.979 4	0.002 2	0.001 2	70.99	35.84	6.94	5.34
G2	0.967 3	0.981 3	0.002 0	0.000 8	31.66	12.11	5.68	3.73
G3	0.951 7	0.958 7	0.003 2	0.002 1	35.13	22.21	7.38	5.18
G4	0.924 3	0.968 2	0.003 9	0.001 4	43.00	27.40	7.58	4.96
G5	0.969 2	0.977 8	0.002 1	0.001 3	39.36	26.95	7.55	5.63
平均值	0.954 6	0.973 1	0.002 7	0.001 4	44.03	24.90	7.03	4.97

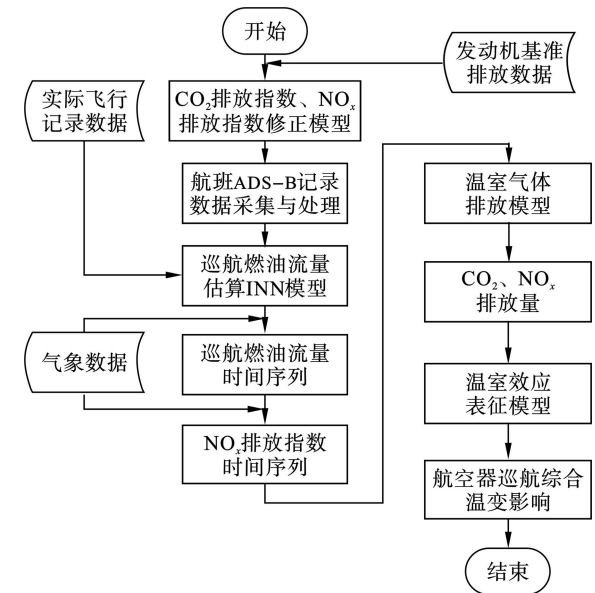


图 8 航空器巡航温室效应评估框架

已知执飞该航班的航空器机型为 B737-800,根据该机型选装发动机的 NO_x 基准排放指数(表 1),利用 1stOpt 软件工具,使用通用全局优化算法,获取该机型基准燃油流量在 [300, 5 000] 取值范围,其与 NO_x 基准排放指数间的拟合关系,见式(8)。

$$EI'_{NO_x} = p_1 + p_2 \cdot FCR' + p_3 (FCR')^3 + p_4 \ln(FCR') \quad (8)$$

式(8)中, EI'_{NO_x} 为 NO_x 的基准排放指数; p₁、p₂、p₃和 p₄为系数,系数取值与回归统计,见表 3。残差平方和与均方误差均处于较低水平,拟合效果较好,决定系数达到 0.999 9,可见式(8)的拟合关系较为可靠。由此,可以通过修正后的基准燃油流量,获取 NO_x 基准排放指数 EI'_{NO_x}。

从 VariFlight 飞行轨迹实时跟踪雷达记录中,获取该航班巡航阶段的 ADS-B 数据(包括航班号、应答机编码、时刻、航向、气压高度、地速、经度和

纬度)。根据 Real World Flightplan Database 数据,该日成都→北京航段的巡航飞行中,飞机途经的重要航路点位置信息,见表 4。

表 3 拟合系数取值及回归统计

参数/统计量	值
p ₁	-0.028 3
p ₂	-2.174 5×10 ⁻⁷
p ₃	1.397 6×10 ⁻¹³
p ₄	0.005 5
SSE	3.259 7×10 ⁻¹³
RMSE	2.854 7×10 ⁻⁷
决定系数	0.999 9

表 4 成都至北京航路上重要航路点位置信息

航路点	经度/°E	纬度/°N
JTG	104.39	30.87
SUBUL	106.71	32.33
NSH	108.31	33.32
ZS	108.86	34.22
WJC	109.38	35.78
OKVUM	110.51	36.47
UBLAT	113.44	38.05
OC	114.56	38.45
AVNIX	116.08	38.70
BOBAK	116.39	39.13

针对气象数据,本研究以每段航路中点的气象数据作为该段航路的气象条件标准。根据航路点的位置信息,从美国怀俄明州立大学发布的高空探空气象数据(包括大气压强、温度、相对湿度、风速

和风向等)中,获取航路周围探测站点的气象数据并以此为样本点,使用反距离加权(inverse distance weighting, IDW)的空间插值方法,获得航迹中各点的气象信息。

将航迹数据与气象数据进行归一化处理,输入到巡航燃油流量估算 INN 模型中,获取与雷达记录时刻点对应的燃油流量序列;进一步通过式(7)可实现航空器巡航温室效应定量评价,见表 5。

表 5 算例计算结果及对比

方法	巡航 距离/km	巡航 时长/min	燃油消 耗量/kg	CO ₂ 排放 量/kg	NO _x 排放 量/kg	$\Delta T(20)/$ 10^{-11} K	$\Delta T(50)/$ 10^{-11} K	$\Delta T(100)/$ 10^{-11} K
BADA	1 500.00	107.44	4 625.47	14 408.30	58.53	—	—	—
INN	1 446.40	108.00	4 734.28	14 936.65	62.47	58.70	11.07	3.63

注：“—”表示数值结果无法获取。

表 5 列出了现有文献 [15] 中利用基于 BADA 性能模型的仿真软件,以 B737-800 机型为例,在初始巡航质量 67 t、巡航高度 9 500 m、航程 1 500 km 条件下仿真计算出的巡航油耗及温室气体排放量数据。可以看出,在初始条件近似的情况下,通过 2 种方法获得的油耗和气体排放结果较为接近,说明了本研究提出的计算方法在减少对飞行参数依赖的同时具备可靠性,且能进一步给出气体排放产生的具体温变影响。

4 讨论与结论

本研究通过建立综合温室效应评估模型和巡航燃油流量神经网络模型,实现了对航空器巡航阶段污染物排放温变影响的定量计算,结论如下。

(1) 基于航空器实际运行数据,使用机器学习的方法构建三层神经网络用于巡航燃油流量获取,与现有文献中常用的通过 BADA 性能模型计算的方法相比,本研究提出的方法具备操作简便、符合实际运行特点的优势。

(2) 引入遗传算法优化经典神经网络中的初始权值和阈值,改进后的神经网络在精确性和稳定性方面均有明显提升,由此获取的油耗结果更加可靠,为进一步的航空器巡航污染物排放量计算和温室效应评估奠定基础。

(3) 使用本研究提出的方法,能够将航空器巡航阶段不同污染物排放的影响进行统一度量,相比于污染物排放清单,给出的具体温变结果在环境影响评估深度方面有所突破。

本研究成果可为实际应用中的燃油消耗计算和环境影响评价提供新思路,在未来的研究中,可将凝结尾等更多的温室效应影响因素纳入考虑范围,以进一步分析现代航空运输的环境影响和可持续发展能力。

参考文献

- [1] 李杰, 赵志奇, 王凯, 等. 航空器排放清单计算方法研究进展综述[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(9): 183 – 191.
- [2] 王中凤燕, 田勇, 万莉莉, 等. 高空飞行的环境影响研究进展[J]. 环境保护科学, 2017, 43(3): 100 – 105.
- [3] 曹惠玲, 汤鑫豪, 苗佳禾. 基于 P3-T3 方法的飞机 LTO 阶段氮氧化物排放量计算与分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 4235 – 4241.
- [4] 曹惠玲, 李玉铭, 汤鑫豪. 基于 QAR 数据的飞机全航段黑碳排放量计算与分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6): 1951 – 1957.
- [5] OWEN B, LEE D S, LIM L. Flying into the future: Aviation emissions scenarios to 2050[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(7): 2255 – 2260.
- [6] 罗雯莉, 白伟伟, 武文飞. 基于 EDMS 模型的航空器大气污染物的排放计算分析[J]. 环境保护科学, 2020, 46(6): 39 – 43.
- [7] 高垒, 田勇, 万莉莉, 等. 机场大气环境承载力评估方法[J]. 环境保护科学, 2019, 45(1): 20 – 27.
- [8] 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 等. 京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1143 – 1150.
- [9] TURGUT E T, ROSEN M A. Relationship between fuel consumption and altitude for commercial aircraft during descent: Preliminary assessment with a genetic algorithm[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2012, 17(1): 65 – 73.
- [10] LAWRENCE N R J, SUKKARIEH S, MASSON B. Using high-frequency data for predicting fuel use of jet transport aircraft[J]. *Journal of Aircraft*, 2017, 54(6): 2115 – 2125.
- [11] 张军, 杨贵宾, 彭晓峰, 等. 民航客机运营燃油消耗的动态预测方法研究[J]. 控制工程, 2019, 26(4): 682 – 687.
- [12] 胡荣, 吴文洁, 陈琳, 等. 气象因素对飞机进近飞行燃油效率的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(4): 677 – 683.
- [13] 何修齐, 田勇, 王倩, 等. 航空器性能对环境运营成本影响分析研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(3): 439 – 443+449.
- [14] TALLON-BALLESTEROS A J. Metaheuristic algorithm to train product and sigmoid neural network classifiers[J]. *Expert Systems*, 2019, 36(3): e12383.
- [15] 魏志强, 刁华智, 韩博. 民用飞机巡航阶段污染物排放量计算研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(19): 122 – 127.