

机翼结冰生命周期的数字孪生软件系统

王高远¹ 付冬梅^{1*} 马金博¹ 赵宾宾² 钟科林²

(1. 北京科技大学, 北京 100083; 2. 上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘 要: 飞机巡航中的机翼结冰情况是关系到飞行安全的重大实际问题之一,如果能够实时监测甚至根据环境提前预测机翼结冰过程和状况,对改进机翼防除冰设计、规避飞行危险都具有重大意义。数字孪生技术作为 5G 信息时代中新兴的技术,为物理过程的虚拟呈现提供了新的思路与解决方案、同时数字孪生技术结合人工智能等技术,同样可以应用于飞机巡航中机翼结冰物理过程,对实时监测与预测提供了新的技术保证。从数字孪生的角度出发,以机翼结冰神经网络模型为切入点,设计实现了一款基于数字孪生和人工智能技术的巡航中机翼结冰二维过程快速呈现软件系统。软件获取飞机巡航结冰参数与飞行参数,运行结果能够利用动态显示方式,呈现飞机巡航中机翼结冰全生命周期。

关键词: 模式识别与智能系统;数字孪生;神经网络;建模;虚拟系统

中图分类号: V19

文献标识码: A

OSID:



0 引言

数字孪生(Digital Twin)是通过实体数据,在虚拟(信息)空间创建一个可以表征实体的虚拟模型^[1]。“十四五”《纲要》^[2]中着重描写了“加快数字化发展建设数字中国”,数字孪生是重点之一。2019 年 7 月交通运输部印发的《数字交通发展规划纲要》^[3]明确提出了数字交通的建设方向。陆地交通中已存在道路交通及建设过程中的特定局部的数字孪生系统^[4],大大提升了其视觉感受、整体规划、运营效率等指标。

航空业的数字孪生系统可追溯到 2009 年,AFRL(美国空军研究实验室)给出飞行器数字孪生的定义:“机身数字孪生是一个由分析工具、虚拟模型和数据组成的集成系统,可对机身进行全寿命周期的管理,并可实现故障诊断与预测”。NASA(美国航空航天局)之后对其提出了附加条件:“数字孪生系统继承了多维度、多物理系统以及飞行器生命周期的虚拟系统,通过逼真的物理模型以及完善的传感器系统,反映飞行器从出厂到报废的完整生命

周期,实现虚拟和现实的互动”^[5]。

飞机在飞行过程中可能出现的机翼结冰情况是一种极危险的安全隐患^[6]。显而易见的是机翼结冰本身也是一个过程,该过程可以看做是“机翼结冰生命周期”,这个生命周期的研究显然对飞机设计、飞机飞行安全等具有十分重要的意义。在目前的技术条件下,“机翼结冰生命周期”的研究手段主要分三类:一是实地飞行;二是风洞试验^[7];三是数字模拟仿真(数字孪生的前身)。显然,数字模拟仿真方法是可以预研的和成本最低的。机翼结冰的数字模拟仿真软件有 CFD 方法^[8]、冰晶黏附模型^[9]、Bek Air 方法^[10]等,前两种是基于理论计算的,计算时间长,无法实时展示;第三种是基于机翼传感器的,虽能够记录飞行中机翼的结冰过程,但成本高、代价大,目前仅用于为研究获取数据。

本文为达到巡航中机翼结冰过程快速二维呈现,以现有机翼结冰的数字模拟仿真软件为基础^[11],利用人工神经网络对端到端数据的建模能力,设计开发了一种能够实现飞机巡航阶段全生命周期的机翼结冰数字孪生的软件系统^[12]。

* 通信作者。E-mail: fdm2003@163.com

引用格式: 王高远,付冬梅,马金博,等. 机翼结冰生命周期的数字孪生软件系统[J]. 民用飞机设计与研究,2022(2):96-101.
WANG G Y, FU D M, MA J B, et al. Digital twins software system for wing icing life cycle[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(2):96-101(in Chinese).

1 飞行器数字孪生系统的构架

1.1 数字孪生系统设计

本文基于陆地交通建设情况和经验^[13],设计了机翼结冰数字孪生系统,如图 1 所示。

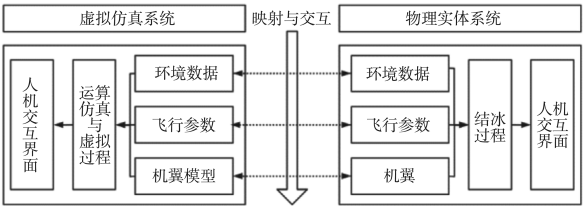


图 1 机翼冰数字孪生系统框架

图 1 中,左侧的虚拟仿真系统,与右侧的物理实体模型一一对应。

1) 物理实体系统

物理实体模型由机翼实体、环境参数与飞行参数组成,三部分构成结冰过程的生长基础,结冰过程生长周期完成后获得结冰数据,通过人机交互界面展示。

2) 虚拟仿真系统

虚拟仿真系统在计算机中构建完全一致的虚拟模型,并与物理实体模型同步数据,通过接收现实中的实体模型返回的数据,进行实时演化,和实体模型的生命周期保持一致^[14]。

1.2 数字孪生系统建立过程

数字孪生系统建立过程分为准备阶段及实现阶段,如图 2 所示。

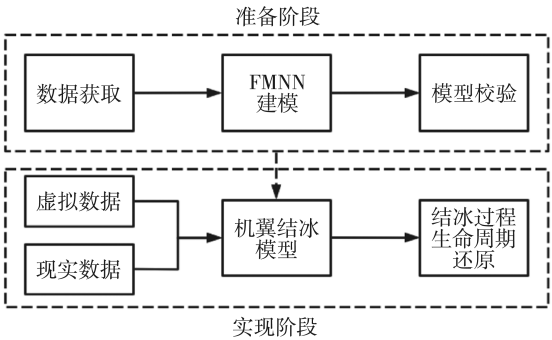


图 2 数字孪生系统建立过程

准备阶段内进行数据获取,利用神经网络进行机翼模型建模,并完成模型准确性校验^[15];应用阶段利用机翼模型,编写入数字孪生软件中,最终实现结冰过程生命周期的还原。

2 机翼冰数字孪生准备阶段

基于上述数字孪生系统基础框架,首先要在虚拟仿真系统中构建机翼结冰模型,用于在孪生过程中作为物理实体的虚拟映射。

建模通常采用虚拟物理系统,利用计算进行模拟,由于虚拟物理模型计算量大,且速度较慢,本文利用神经网络来搭建机翼结冰模型,以提高计算速度,并且赋予模型学习能力^[16]。

2.1 机翼模型与数据获取

神经网络训练的数据集来自 CFD 仿真软件 Lewlce 的计算结果,以及 SAE AIR5666^[17] 风洞试验结冰数据以及若干实际飞行器结冰数据。

2.2 机翼结冰神经网络建模

经过多次讨论与测算,确定该神经网络的输入为 8 个维度,分别为速度、攻角、高度、温度、水滴粒径、含水量、时间与对应极坐标角度的冰厚值,输出为冰厚值。

神经网络结构为 $8 \times 50 \times 128 \times 50 \times 10 \times 1$,网络结构如图 3 所示。

2.3 机翼结冰模型测试

对模型输入测试数据,并与实际数据进行对比,如图 4 所示。

训练神经网络的数据来源于表 1、表 2 和表 3。

表 1 飞行参数训练数据

高度/m	速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	角度/ $^{\circ}$	时间/s
4 000 ~ 5 400	120 ~ 150	0 ~ 3	0 ~ 2 700

表 2 结冰参数训练数据

LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	MVD M/m	温度/ $^{\circ}\text{C}$
21 ~ 30	0.05 ~ 0.5	-8 ~ -11

表 3 输出坐标训练数据

XY value
$x_1, y_1 \sim x_n, y_n$

经过验证,在该表内进行仿真实验,模型误差在 $2.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ 以内。

该模型采用实际机翼冰数据作为驱动,训练得到该神经网络,由于篇幅问题,不能将更多的结果展现给读者,但不仅限于上文误差分析中的四种仿真结果,不同的初始条件,在完全随机的给定下,神经

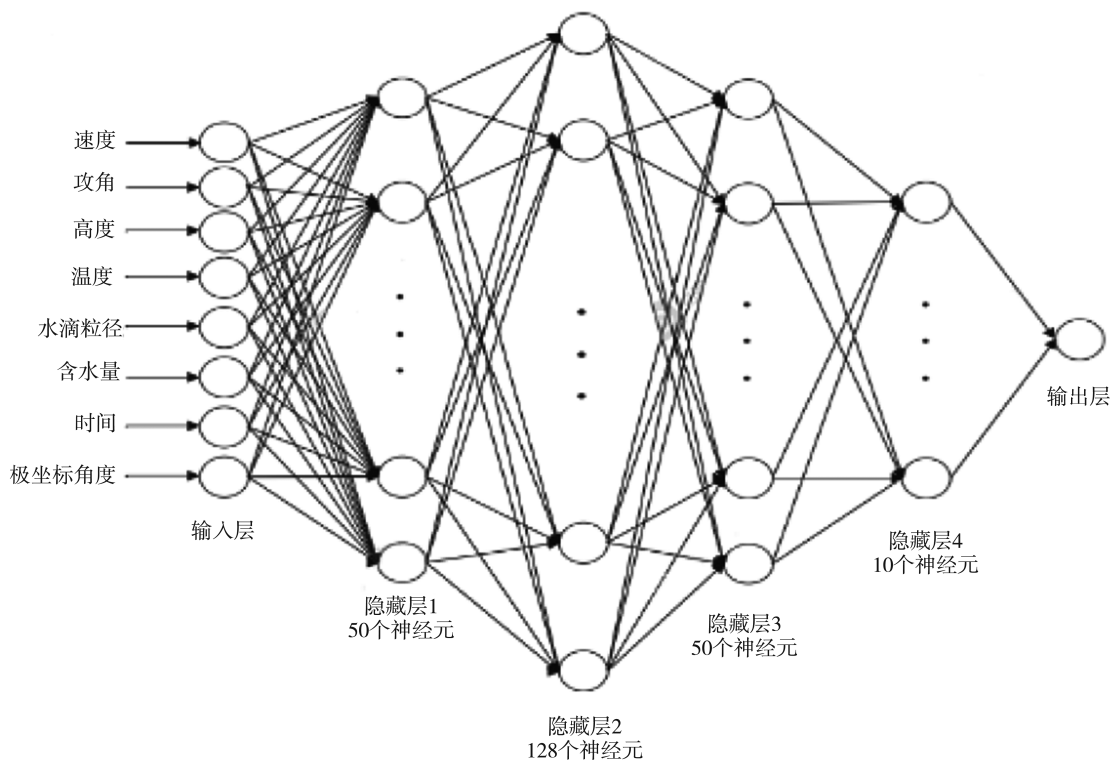


图 3 神经网络结构

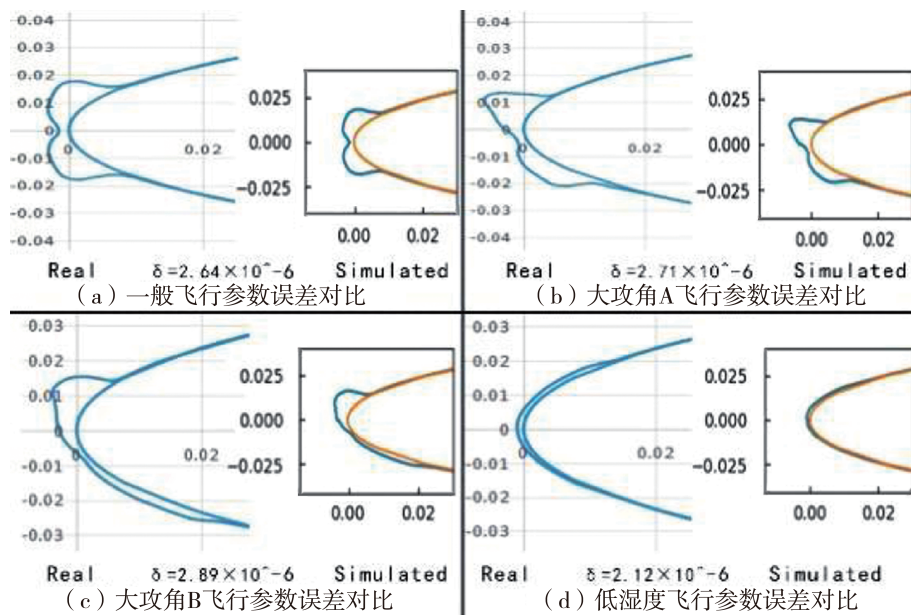


图 4 神经网络测试以及误差

网络都可以较好地复现机翼结冰的生长特点与轮廓,高精度地还原了机翼结冰的生命周期,且保持平均误差在 10^{-6} m 数量级上,可以认为其具有可信性^[18]。

3 数字孪生系统实现

虚拟仿真系统的软件功能模块包括:机翼模型数据库、神经网络冰厚计算模块、冰形曲线计算模块、冰形生长计算模块、冰形生长呈现模块、UI 界面

模块等,其结构与流程如图 5 所示。

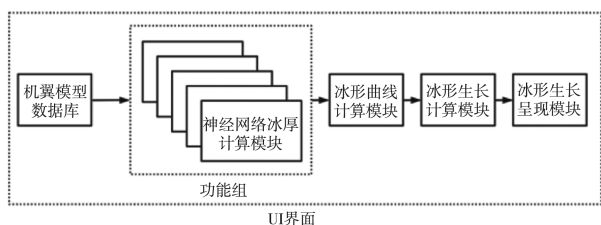


图 5 数字孪生软件结构与流程

3.1 UI 界面模块

软件开发平台使用基于 python 的 WxForm-Builder,基础主要由 C++ 语言实现^[19],软件界面如图 6 所示。

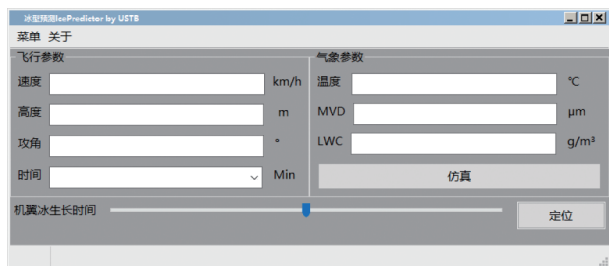


图 6 软件界面

该软件为虚拟仿真系统的人机交互平台,通过该界面获取机翼结冰过程的参数。

3.2 机翼结冰神经网络建模

神经网络冰厚计算模块是整个系统核心部分,其运行过程如图 7 所示。

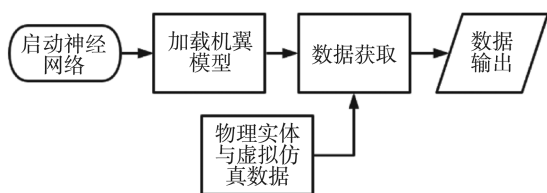


图 7 神经网络冰厚计算模块

神经网络首先加载特定机翼模型,通过数字孪生系统获取的飞行数据确定孪生条件,进行运算,经过多次运算后得到机翼结冰数据并输出给下一模块。

图 5 中,多个神经网络冰厚计算模块构成了一个功能组,该功能组会同时计算多个时间节点上机翼冰形状,并输出给冰型计算模块,以实现在时间线上线性还原机翼冰生命周期^[20]。

3.3 冰形曲线计算模块

该模块在接收到神经网络输出的数据后,进行数据规范化与曲线渲染工作,其运行过程如图 8 所示。

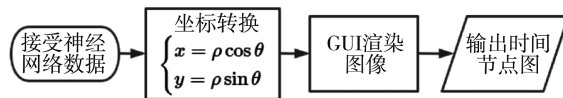


图 8 冰形曲线计算模块

在接收到神经网络冰厚计算模块输出的极坐标数据后,该模块进行坐标转换,转化为 GUI 渲染引擎可以识别的(x,y)坐标数据,并交由基于 OpenCV 与 MathVision 提供的绘图 API,将图像绘制成生命周期中特定时间节点的机翼冰形图。

3.4 冰形生长计算模块与冰形生长呈现模块

这两个模块利用多个子图,从机翼冰开始生长到结束生长,以动画模式逐帧显示机翼冰生长过程,动态展示机翼冰生长的全生命周期。图 9 展示了数字孪生系统在四种不同的虚拟仿真系统参数下,对机翼冰生命周期的还原。

经过上述模块以及数据处理流程,软件实现了机翼冰生命周期的动态还原。

4 结论

本文中提出利用数字孪生系统,对飞行器飞行全过程进行建模,并利用神经网络取代传统理论物理计算模式,使得难以嵌入数字孪生系统或者是不能完全利用数据的传统计算模式,较为完美地融合到更加现代、更加互联的数字孪生系统中;且创新性地通过动画系统,逐帧绘制机翼冰生长过程,展示传统软件无法实现的动态展示能力,如图 10 所示。

该软件虽已实现较高仿真精度,但其本身依旧有着一些缺点以及不足,在未来,软件还可以深度地挖掘差分数据,以实现时间分片式还原生命周期,以获取更高的精度。这些升级,不仅是对软件系统的,也是数字孪生系统的自我学习过程。

这套神经网络机翼结冰模型,不仅可以在数字孪生系统中为虚拟仿真系统部分提供冰型仿真数据,同时也能够利用物理实体模型获得的海量实时数据,不断完善自己,以获取更高的输出精度^[21],是一种可以自我学习、自我完善的数字孪生系统。

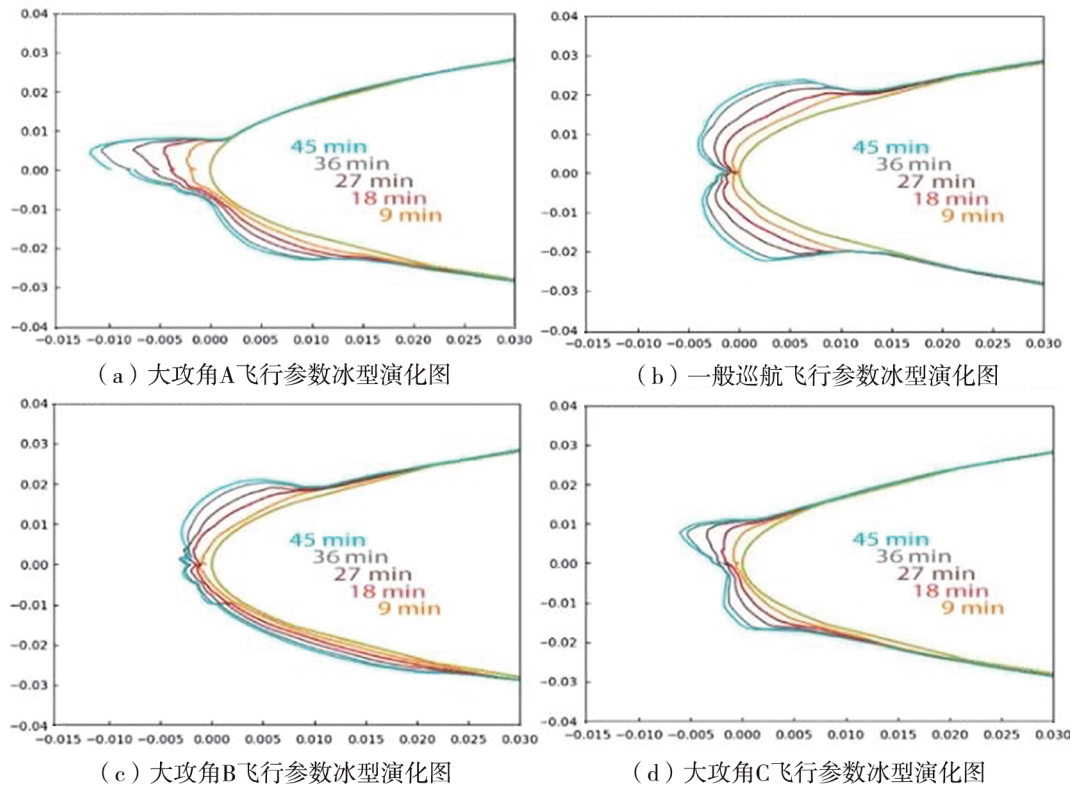


图 9 机翼冰生命周期动态显示

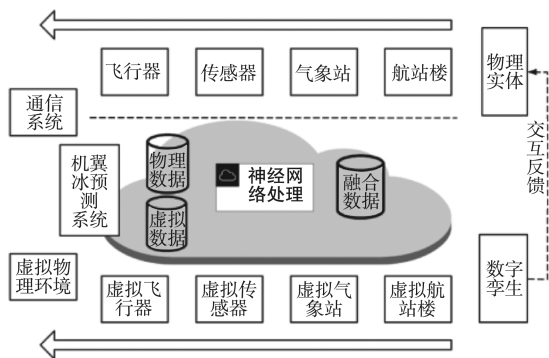


图 10 飞行器数据孪生系统与神经网络

参考文献:

- [1] ÁRON K B, MARTIN G, ZSOMBOR K N, et al. Digital twin of low dosage continuous powder blending—artificial neural networks and residence time distribution models[J]. European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics 2021, 169: 64-77.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 民政部发布《“十四五”社会组织发展规划》. [EB/OL]. (2021-10-08) [2021-12-28]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/08/content_5641452.htm.
- [3] 中华人民共和国中央人民政府. 交通运输部关于印

发《数字交通发展规划纲要》的通知. [EB/OL]. (2019-07-28) [2021-12-28]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-07/28/content_5415971.htm.

- [4] 伍朝辉, 常莹, 李青, 等. 基于三维视频融合的隧道运营管理创新应用研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022(1): 154-161.
- [5] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and U. S. air force vehicles; 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference [C]. HAWAII, AIAA, 2012.
- [6] 丁玉江. 基于 NCEP/NCAR 资料的我国华东机场飞机积冰气候特征研究[D]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2014.
- [7] 郑伟涛. 机翼结冰冰形三维测量方法的研究与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [8] 魏扬, 李杰, 李明, 等. 结冰条件下大型飞机翼面分离流场结构及空气动力学特性研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(5): 9-16, 22.
- [9] 卜雪琴, 李皓, 黄平, 等. 二维机翼混合相结冰数值模拟[J]. 航空学报, 2020, 41(12): 195-205.
- [10] KAMINSKI D. Morrow renewed authority[J]. Flight international, 2021.

- [11] 于洋涛,曹宗杰.一种诊断和评估积冰机翼失效故障的新方法[J].哈尔滨工业大学学报,2011(S1):277-280.
- [12] 于金龙,张婉颀.数字孪生的哲学审视[J].北京航空航天大学学报(社会科学版),2021,(4):107-114.
- [13] PHILIP C. Image and reality: "digital twins" in smart factory automotive process innovation-critical issues[J]. Regional Studies,2021,55(10-11).
- [14] 范周伟,余雄庆,王朝,等.基于深度神经网络的客机总体设计参数敏感性分析[J].航空学报,2021,42(4):524353-524353.
- [15] GÓMEZMIRANDA I, FERNÁNDEZJARAMILLO J, PEUELAM G A. Hybrid multivariate statistical and neural network model to predict greenhouse gas emissions [J]. 2021,46:10113-10123.
- [16] 吕召阳,聂雪媛,赵奥博.基于 CNN 机翼气动系数预测[J].北京航空航天大学学报,2021:1-10.
- [17] CLARK C, MACMASTER M. Icing wind tunnel tests of a contaminated supercritical anti-iced wing section during simulated take-off - Phase 2:4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference [C]. FLORIDA, AIAA, 2012.
- [18] KASHEVAROV A V, MILLER A B, POTAPOV Y F, et al. Effect of ice crystals on run-back ice evolution on a wing model[J]. Thermophysics and Aeromechanics, 2021, 28:21-28.
- [19] 纪广,郝建国,张中杰,等.四旋翼无人机飞行过程孪生仿真研究[J/OL]. 计算机工程与应用 2021:1-8. [2021-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20211012.1412.004.html>.
- [20] AICARDI I, LINGUA A, MAZZARA L, et al. Ice detection on airplane wings using a photogrammetric point cloud: a simulation[J]. 2020.
- [21] OSTOVAR A, BENSCH S, HELLSTRM T. Natural language guided object retrieval in images[J]. Acta Informatica, 2021, 58:243-261.

作者简介

王高远 男,硕士。主要研究方向:人工智能与运动控制以及相关硬件研发。E-mail: eternity_y@outlook.com

付冬梅 女,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:复杂数据的智能感知和数据库新技术、复杂数据挖掘和图像分析与理解、知识图谱方法与技术等。E-mail: fdm2003@163.com

马金博 男,硕士。主要研究方向:数据挖掘、知识图谱。E-mail: m202120704@xs.ustb.edu.cn

赵宾宾 男,硕士。主要研究方向:结冰技术。E-mail: zhaobinbin@comac.cc

钟科林 男,硕士。主要研究方向:飞行器起落架与结冰技术。E-mail: zhongkelin@comac.cc

Digital twins software system for wing icing life cycle

WANG Gaoyuan¹ FU Dongmei^{1*} MA Jinbo¹ ZHAO Binbin² ZHONG Kelin²

(1. University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Shanghai Aircraft Design & Research Institute, Shanghai 200120, China)

Abstract: Wing icing during aircraft cruise is one of the major practical issues related to flight safety. If real-time monitoring or even prediction of the wing icing process and conditions based on the environment can be achieved, it is of great significance to improve the wing anti-deicing design and avoiding flight hazards. As an emerging technology in the 5G information age, digital twin technology provides new ideas and solutions for the virtual presentation of physical processes. At the same time, digital twin technology combined with artificial intelligence and other technologies can also be applied to the physical process of wing icing in aircraft cruises, which provides a new technical guarantee for real-time monitoring and forecasting. From the perspective of digital twins, this paper uses the wing icing neural network model as the starting point to design and implement a software system for rapid presentation of the two-dimensional process of wing icing during cruise based on digital twins and artificial intelligence technology. The software obtains aircraft cruise icing parameters and flight parameters, and the operating results can use dynamic display to show the entire life cycle of aircraft wing icing during cruise.

Keywords: pattern recognition and intelligent system; digital twins; neural networks; modeling; virtual system

* Corresponding author. E-mail: fdm2003@163.com