

关于环境工程数字化转型的思考

傅耘, 张建军, 李明, 徐俊, 李刚, 申加康, 李贺

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

摘要: 通过分析当前数字化转型现状, 结合我国装备环境工程数字化过程中存在的问题, 阐明了环境工程数字化中“工作活动数字化、环境数字化、环境效应数字化、服务产品数字化”的内涵, 分析提出了以环境基础数据、环境数据中台和环境数据服务为核心的环境工程数字化架构及实施思路, 论述了温度、振动、腐蚀等典型环境及环境效应的数字化建模方法, 并对环境工程数字化在战略筹划、数字化协同设计和数实结合的数字化试验鉴定等方面进行了展望。

关键词: 环境工程; 数字化转型; 数字化架构; 环境数字化建模; 环境效应数字化建模

中图分类号: TJ01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)05-0013-11

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.05.002

Reflections on Digital Transformation of Environmental Engineering

FU Yun, ZHANG Jianjun, LI Ming, XU Jun, LI Gang, SHEN Jiakang, LI He

(China Aero Poly-technology Establishment, Beijing 100028, China)

ABSTRACT: By analyzing the current status of digital transformation in the military and civilian industries, and considering the problems in the digital-based development process of equipment environmental engineering, the connotation of "digital-based development of work activities, environment, environmental effects, and service products" in environmental engineering digital-based development were provided. Environmental engineering digital architecture and carrying out approaches were proposed, which surrounded environmental basic data, data governance, and data services. The digital modeling methods for typical environment and environmental effects such as temperature, vibration, and corrosion were discussed. Finally, the applications of digital environmental engineering in strategic planning, digital collaborative design, and the integration of digital and real-world experimental evaluation were expected.

KEY WORDS: environmental engineering; digital transformation; digital architecture; environmental digital modeling; environmental effects digital modeling

2020 年 9 月, 国务院国资委印发了《关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知》——“推动一代信息技术与制造业深度融合, 打造数字化经济新优势等决策部署, 促进国有企业数字化、网络化、智能化发展, 增强竞争力、创新力、控制力、影响力、抗风

险能力, 提升产业基础能力和产业链现代化水平”。2021 年, 华为发布了《数字化转型, 从战略到执行》^[1], 报告指出, 数字化转型从战略到执行, 覆盖国家-城市-行业-企业四大载体, 不同载体的数字化转型可划分为基础信息化、应用数字化、全面系统化和智慧生态

收稿日期: 2024-04-22; 修订日期: 2024-05-11

Received: 2024-04-22; Revised: 2024-05-11

引文格式: 傅耘, 张建军, 李明, 等. 关于环境工程数字化转型的思考[J]. 装备环境工程, 2024, 21(5): 13-23.

FU Yun, ZHANG Jianjun, LI Ming, et al. Reflections on Digital Transformation of Environmental Engineering[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(5): 13-23.

化。其中,企业数字化侧重于夯实业务核心系统及数据体系构建,探索数字化、智能化应用,对关键业务流程实施可视化、智能化的流程搭建。2022年“二十大”报告指出:建设“数字中国”,“打造具有国际竞争力的数字产业集群”,是新一轮科技革命和产业革命的技术基础,也是实现我国经济可持续和高质量发展的必然途径^[2]。加速推进数字技术同制造业的结合,推进“再工业化”,积极抢占未来科技和产业发展制高点。

伴随数字经济的发展逐步由“产业数字化”和“数字产业化”过渡到“治理数字化”和“数据价值化”,我国装备开始大力发展数字化建设,在数字空间开展战略筹划、装备论证、研制生产、试验鉴定和运用保障等装备全寿命周期建设。航空工业以数字航空建设为抓手,以国家和集团数字化转型为主线,聚焦装备研制全寿命周期数字化能力建设的目标,针对飞机科研生产过程中数据、流程、模型的割裂、缺失,行业统一协同、全局优化的需求与分散实施、碎片化供给之间的矛盾,逐步将信息化、数字化技术和工具方法贯穿到装备研制全流程,以重点领域数字化转型为着力点,以全新数字化转型管理模式为重要支撑,遵照总体架构,打造新型基础设施,建成基于“云”架构的敏捷、高效、健壮、安全的新型航空工业数字化能力体系。典型案例包括基于MBSE的飞机数字化研制、航空发动机的数字化研制、飞行试验的数字化、航空行业的标准数字化以及基于xBOM的复杂装备数字化研制管理^[3]。

装备全寿命周期所面临的环境,直接影响装备的使用,关系到战争的胜负。装备环境工程是改善和减缓环境对装备作战效能的影响、保障和提升装备环境适应性的工程学科。与当前我国军民产品数字化研制生产相比,装备的环境工程数字化工作在环境适应性要求确定、环境适应性设计分析、环境试验与评价方面均存在如下不足之处。

1) 在环境适应性要求确定方面,从论证立项阶段基于相似装备数据的环境预计模型建立,到鉴定定型阶段基于使用环境测量数据的环境适应性要求修正模型构建,现有的环境基础数据和模型因存在类型单一、数量有限、规范性不足、预计精度低于预期等问题,导致数字化设计过程中需求分解模糊、环境适应性要求向下分解困难,从而无法满足装备数字化研制的需要。

2) 在环境适应性设计方面,数字化研制一方面需要构建全地域、全要素、全历程环境数字模型,实现装备环境适应性的交互式 and 沉浸式精准设计;另一方面,需要基于装备单一/综合环境效应分析,建立效应仿真模型,完成环境适应性预计分析工作,于试验验证前发现设计缺陷。但是,当前环境效应模型研究更加落后,侧重于温度变化和振动单一环境因素引

起的疲劳预计,局部腐蚀损伤预计尚未实现,对于装备上常见的热振耦合、腐蚀疲劳、老化磨损等综合/耦合损伤预计方法更是缺失。

3) 在环境试验与评价方面,美国国防部作战试验鉴定局发布了《联合任务环境试验路线图》,其中明确在作战实验室、试验设施以及部队之间建立稳固的联合虚拟试验环境,开展数字化和智能化试验鉴定。我国当前装备的数字化虚拟试验考核,一方面缺失精准的环境预计数字模型,无法实现综合环境试验剖面设计;另一方面,缺少系统的环境效应模型,无法深入开展试验产品失效机理和故障分析,难以支撑数字化试验评价。同时,虚拟试验台构建方法、虚拟控制建模方法以及虚拟试验系统装配方法的研究仍然处于初步阶段,严重影响了我国装备数字化试验与评价工作实施。

综上所述,为推动和加快环境工程数字化转型,急需加强环境工程数字化架构设计、环境工程数字化实施思路梳理与环境工程数字化关键技术研究,为装备的数字化研制和试验鉴定工作提供有力支撑。

1 环境工程数字化的内涵

目前,国内外针对战场环境、联合作战环境等方向开展了大量的研究,提出了数字化战场环境、平行战场等概念,并重点在战场地理环境、大气环境、虚拟试验等方面开展了数字化实施。然而装备环境工程数字化缺少系统规划,尚停留在数据治理和数据模型初步开发阶段,距离环境工程全面融入装备数字化研制工作仍有很大差距。

在当前装备数字化、工程研制数字化和试验鉴定数字化的背景下,环境工程数字化的目标和定位日益明确,与数字化战场环境和虚拟试验等传统概念有很大区别,主要是针对环境工程工作与装备正向研制流程脱钩、环境数字模型难以支撑装备数字化和试验鉴定数字化建设等问题,对装备内、外部环境和环境工程工作活动进行数字化表达,构建以环境数字模型、数据服务产品为核心的环境工程数字化体系架构,围绕时间和空间2个维度精准再现装备全寿命周期经历的真实环境及其影响(环境效应),在数字空间开展装备全寿命周期的环境分析预计、环境适应性仿真分析、环境适应性验证与评价、寿命评估、极端环境下维护策略评价与优化等各项环境工程工作,建立虚实互动的装备环境工程工作新模式,促进装备环境适应性的提升。

2 环境工程数字化架构与实施路径

为了加快推进环境工程数字化转型,应首先设计确立环境工程数字化架构,从顶层上引领、规范和指导装备环境工程数字化建设;其次,系统规划环境工

程数字化转型的实施路径,确保环境工程数字化建设工作能够按计划持续推进。

2.1 环境工程数字化架构设计

环境工程数字化架构是环境工程数字化建设的顶层牵引,其规划应遵循以下基本原则:

1) 自顶向下,体系完整。环境工程数据体系框架一方面应服务于装备论证立项、工程研制、试验鉴定和使用与维护各个应用场景相关使用单位;另一方面应覆盖各类装备,其框架应自顶向下逐步构建,确保全面完整。

2) 面向对象,模型兼容。环境数字化模型采用的开发语言应与主流的数字化研制、试验鉴定平台系统和架构保持一致,以便两者的灵活兼容和快速融合。

3) 数据规范,治理安全。环境数据的有效性和准确性是开展环境工程数字化的基线,数据治理的安全和稳定是环境工程数字化的底线,应确保海量多源异构环境数据的准确规范,同时加强数据安全治理。

基于以上原则,构建环境工程数字化架构,建议包含基础数据、数据中台和数据服务 3 个部分,如图 1 所示。

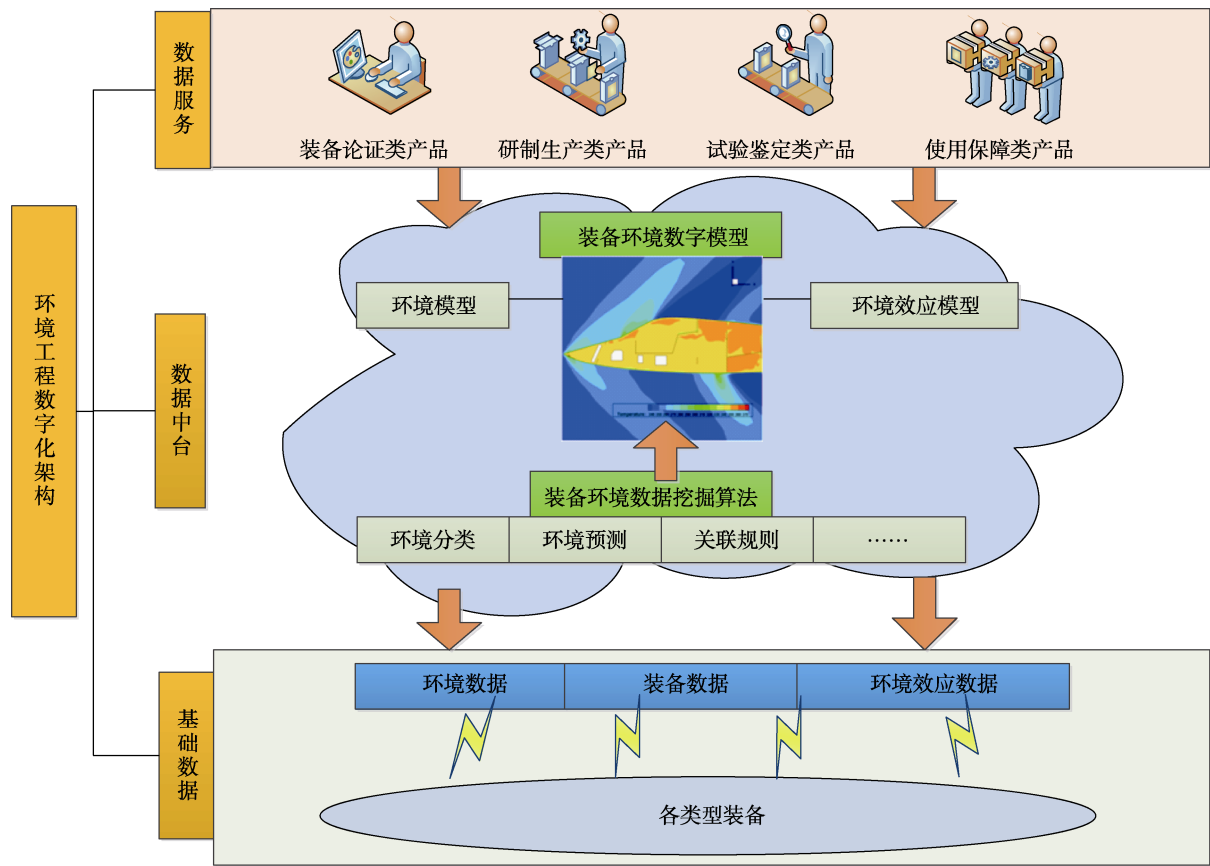


图 1 环境工程数字化架构
Fig.1 Digital architecture of environmental engineering

其中,基础数据为环境工程数字化架构的“底座”,负责收集和汇总各类装备的环境数据,覆盖环境数据、环境效应数据以及装备数据,不同类别装备重点关注的环境类别也有所不同。数据中台是连接基础数据和数据服务的“枢纽”,也是环境工程专业的“工作平台”,采用大数据、云计算等先进技术手段,对环境工程基础数据进行清洗、加工和挖掘,形成环境、环境效应数据分析处理算法和模型。数据服务是环境工程数字化最直观和重要的“载体”,主要面向装备论证、研制生产、试验鉴定和使用保障四大应用场景,提供具有针对性的环境工程数据产品和服务。

2.2 环境工程数字化转型实施路径

目前,环境工程数字化架构 3 个组成部分的数字化程度仍有待提高。例如,环境工程基础数据的孤岛现象严重,无法形成体系;数据中台的模型和算法极度缺乏,数据难以融合;数据服务缺少针对性产品,服务模式不灵活。因此,针对以上 3 个方面存在的问题,以促进环境工程数字化转型为目标,基于“数据-知识-服务”链路,计划通过开展环境工程数据采集治理、数据挖掘和数据产品开发 3 部分的工作,从而实现环境工程数字化转型,如图 2 所示。

首先,开展环境工程数据采集治理,对海量多源异构的环境数据进行规范化,采用数据清洗、数据标

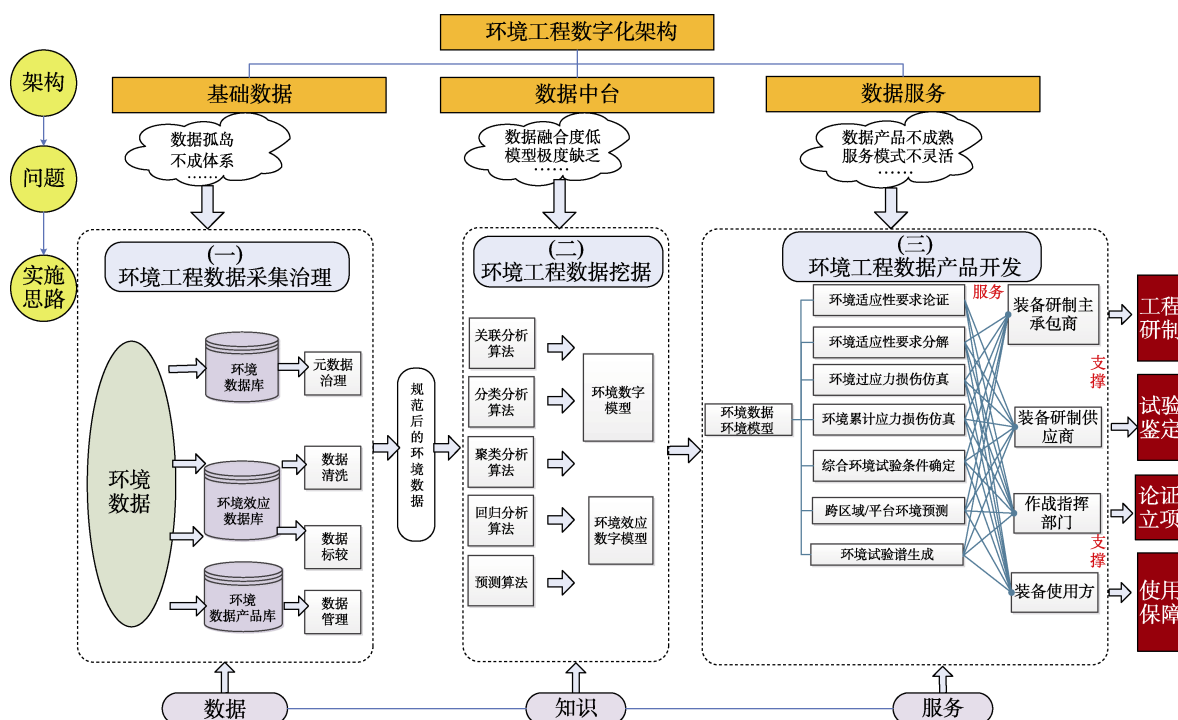


图2 环境工程数字化建设路径

Fig.2 Digital construction path of environmental engineering

校、数据管理等方法,解决环境工程数据“采、存、治、管”全流程各阶段的技术难题,提高环境工程数据的质量。其次,进行环境工程数据挖掘,利用分类、聚类、回归、关联分析等数据挖掘方法,以海量多源异构环境数据为输入,编写环境和环境效应数据分析处理算法,构建装备环境及其环境效应数字模型。最后,结合装备论证立项、工程研制、试验鉴定和使用保障各场景中的环境数据使用需求,采用Java、C++、Mysql等通用工具或数据库,开发环境工程数据产品。

1) 论证立项类产品,包含环境极值统计归纳、环境适应性要求确定等,主要服务于装备论证机构。

2) 工程研制类产品,包含环境适应性要求分解、环境适应性仿真等,主要服务于工业部门(如装备研制院所及其配套单位)。

3) 试验鉴定类产品,包含环境试验谱生成、跨平台环境预测等,主要服务于工业部门和试验鉴定机构。

4) 使用保障类产品,包括基础机电产品剩余寿命评估和极端环境维护策略评价与优化等,主要服务于装备使用部门。

3 环境工程数字化重点研究方向

近年来,随着新域新质作战力量的发展,装备全生命周期内经历的单一环境或综合环境也越来越恶劣,往往会影响装备的作战效能甚至使用安全。据统计,在由环境引起的故障中,温度、振动和腐蚀(盐雾、湿度等)等环境及其综合(耦合)引起的故障占90%以上^[4],如图3所示。因此,建议环境工程数字

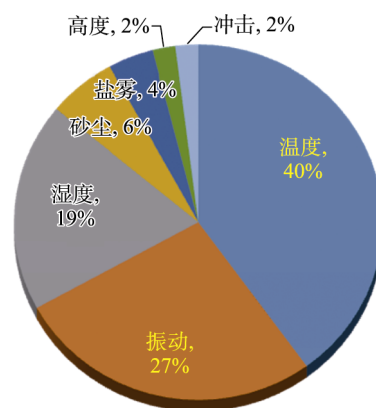


图3 装备环境引起的故障占比

Fig.3 Proportion of faults caused by equipment environment

化从温度、振动、腐蚀环境及其效应数字化开始。

3.1 环境数字化建模

环境数字化建模作为装备环境工程数字化的重要环节,主要由机械(力学)环境模型、热(温度)环境模型、生物与化学环境模型以及相应环境效应数字模型等组成。以装备研制总要求、典型任务剖面等信息为输入,结合环境数字化模型,可有效支撑装备论证立项、工程研制、试验鉴定和使用与维护各阶段环境工程工作的开展。例如,在论证立项和工程研制阶段,可支撑寿命期环境剖面制定、环境适应性要求确定和环境适应性预计与分析等工作;在试验鉴定阶段,可支撑环境试验方案制定、环境试验条件确定和复杂环境适应性评估等工作;在使用与维护阶段,可支撑剩余寿命评估、极端环境维护策略评价与优化等

工作。在以上各项工作开展过程中, 通过不断积累各层级产品的材料参数、使用环境和实验室环境等数据

资源, 可实现对环境数字化模型的迭代修正, 进一步提高环境及环境效应数据模型的精度, 如图 4 所示。

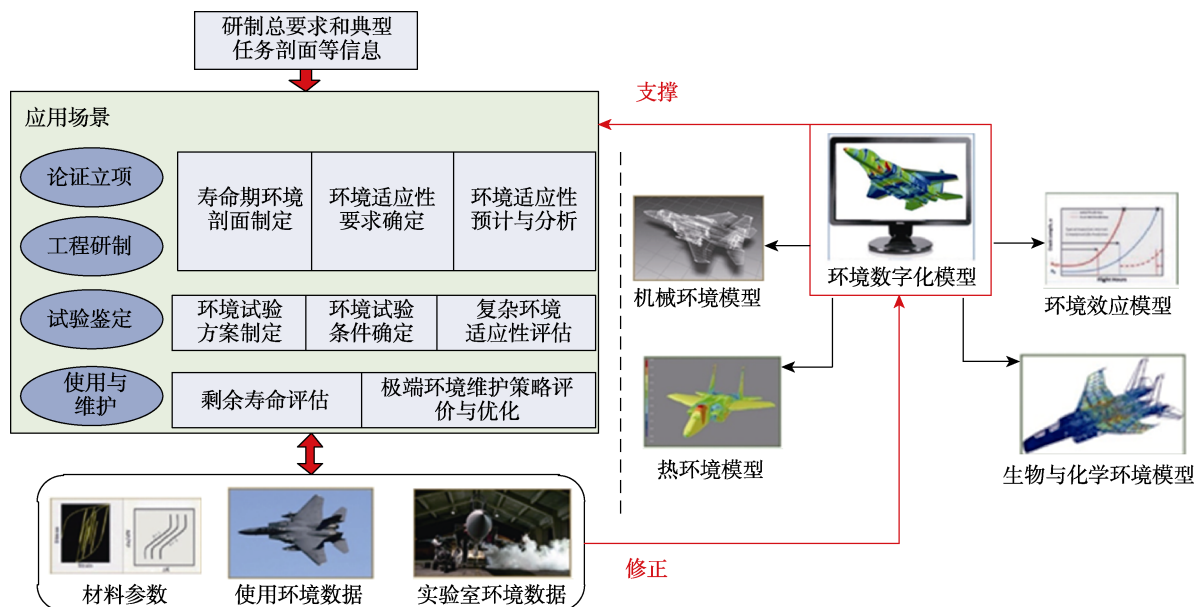


图 4 装备环境数字化建模
Fig.4 Digital modeling of equipment environment

3.1.1 温度环境数字化建模

目前, 在装备温度环境数字化建模方面的研究, 主要集中在 2 个方向: 一是基于有限元数值仿真的温度环境建模, 根据装备内部和外部的热源、换热方式以及边界条件, 确定装备在空间域内的温度响应; 二是基于数据驱动的温度环境建模, 依托实测数据, 探究实测点温度环境随工作状态的变化关系, 实现温度环境在时间域内的动态响应预测。

基于有限元数值仿真的装备温度环境数字化建模, 主要是依靠 ANSYS 等大型计算流体力学商业软件来实现, 其优势是商业软件中内置了诸多湍流模型、传热传质模型等, 算法已相对成熟, 可比较容易获得装备的温度场分布^[5-11], 可视化效果好。同时, 该方法在对非稳态的处理和计算资源方面, 存在仿真代价较大等缺陷。基于数据驱动的装备温度环境数字化建模方法通常有 2 种: 一是单纯寻找数据的变化规律, 应用大数据技术, 建立温度环境的数字化模型; 二是对装备的传热机制进行分析, 根据传热原理, 结合传热学知识, 建立表征传热过程的预计方程, 借助实测数据对方程进行求解, 完成装备温度的预计^[12-17]。该方法的突出优势是计算精度高、计算速度快, 但也存在无法预测连续温度场的不足。

能够高保真、快速地再现装备温度环境场的动态变化, 是温度环境数字化建模的发展目标。本文结合有限元仿真和数据驱动的特点及优势, 提出一种温度环境数字化建模思路, 如图 5 所示。在满足精度的要求下, 时间上, 实时、动态响应; 空间上, 建立温度环境场并可视化。通过收集不同空间位置的实测温度

环境数据, 以实测点为对象, 构建该点温度随飞行状态变化的数字模型。在此基础上, 选择典型状态, 开展有限元仿真分析, 并依靠实测数据对仿真模型计算进行修正。根据实测点坐标, 在仿真的温度场中提取对应的“点-点”路径上仿真温度数据, 结合数值传热学中的传质传热计算方法, 构建基于物理信息的数据驱动模型, 实现空间点“传递函数”的确定。根据第一步中数据驱动预测的结果, 结合“传递函数”, 实现由点到场的构建。

3.1.2 振动环境数字化建模

在装备振动环境数字化建模方面的研究, 与温度环境类似, 也是主要集中在 2 个方向: 一是基于有限元数值仿真的振动数字化建模, 根据装备承受的外界载荷以及边界条件, 确定装备在空间域内的振动响应; 二是基于数据驱动的振动数字化建模, 根据装备振动量值随工作状态的变化趋势, 建立振动量值随工作状态变化的预计模型, 进而预计不同工作状态的振动环境。前者主要依靠商业有限元软件, 充分利用其中的成熟分析算法, 建立装备数字模型之后即可进行有限元分析, 比较容易得到装备的振动模态、加速度、速度以及位移等结果, 能够完整得到整个装备的振动响应分布。但其缺点在于, 有限元分析的材料参数、边界条件、载荷等方面与实际存在差异, 若处理不恰当, 有限元计算的结果可能与实际差距较大。另外, 三维有限元分析对计算机硬件要求很高, 时间代价巨大。后者以实测振动环境数据为基础, 通过分析振动量值随装备工作状态参数的变化趋势, 同时结合振动诱发机理, 建立振动预计模型^[18-20]。相比有限元数值

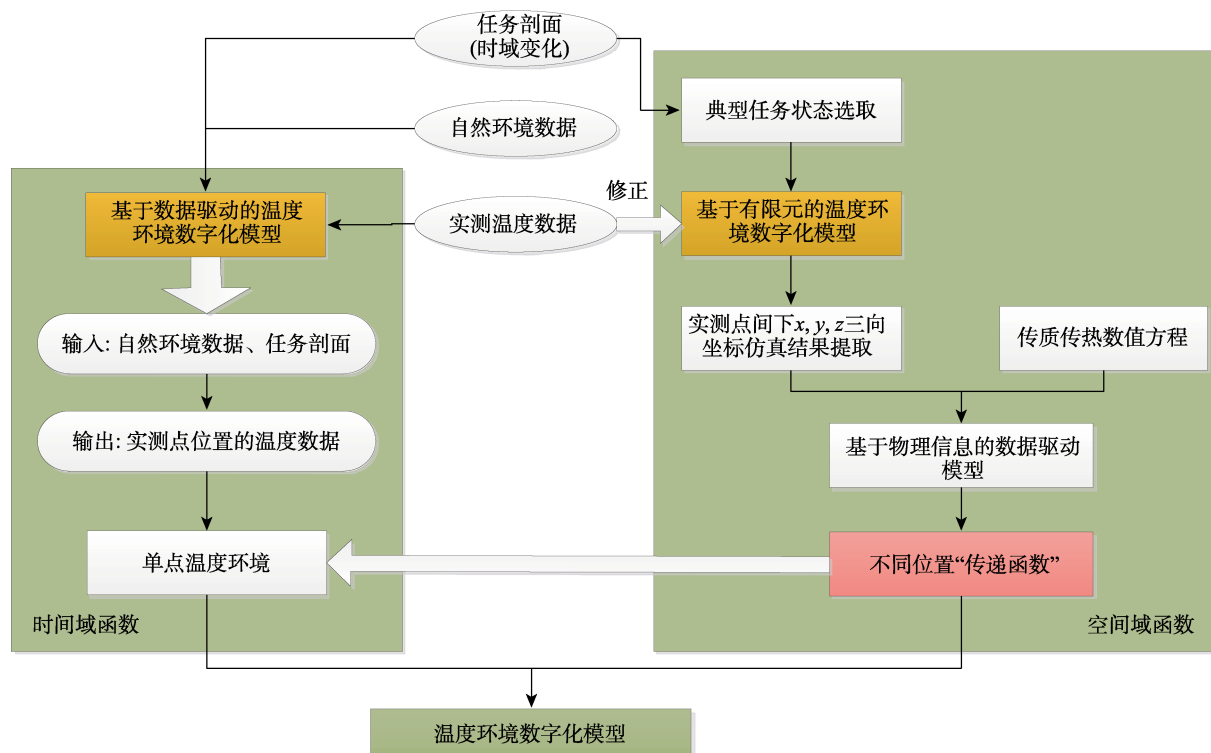


图5 数值仿真和数据驱动联合建模的装备温度环境数字模型构建技术路线

Fig.5 Technical route for constructing a digital model of equipment temperature environment using numerical simulation and data-driven joint modeling

仿真,其振动环境预计结果可信度较高、预计速度较快。但缺点在于,此方法只能针对有限的实测点进行不同工作状态(时间域)的振动环境预计,无法得到整个装备(空间域)的振动响应分布。

为实现振动环境“时间域+空间域”的一体化综合建模,本文提出如图6所示的建模思路。以基于数据驱动的振动环境数字化建模方法为主线,在大量收集装备不同型号的振动环境数据的基础上,充分分析振动环境随装备工作状态甚至舱段位置的变化趋势,建立更加精准普适的振动预计模型。同时,借助有限元数值仿真手段,基于模态测试数据修正有限元模型,利用实测振动响应数据进行动载荷标定,并进行随机响应分析,基于分析结果得到实测点和任意空间点之间的传递函数。在此基础上,联合有限元数值仿真和数据驱动的振动环境预计方法,实现实时或准实时的振动环境场预计。

3.1.3 腐蚀环境数字化建模

当前,有关装备腐蚀环境数字化建模的研究总体上还比较少^[21-24],主要聚焦于装备平台局部位置腐蚀环境的仿真预计。以航空装备为例,由于大部分装备的腐蚀过程主要是受表面微液膜环境直接影响的大气腐蚀,因此装备局部腐蚀环境预计的核心就是装备表面微液膜状态的预计。

典型航空装备局部腐蚀环境数字化建模技术路线如图7所示。通过分析环境温度、湿度对装备表面微液膜形成和厚度变化的影响,分析环境水汽蒸发/

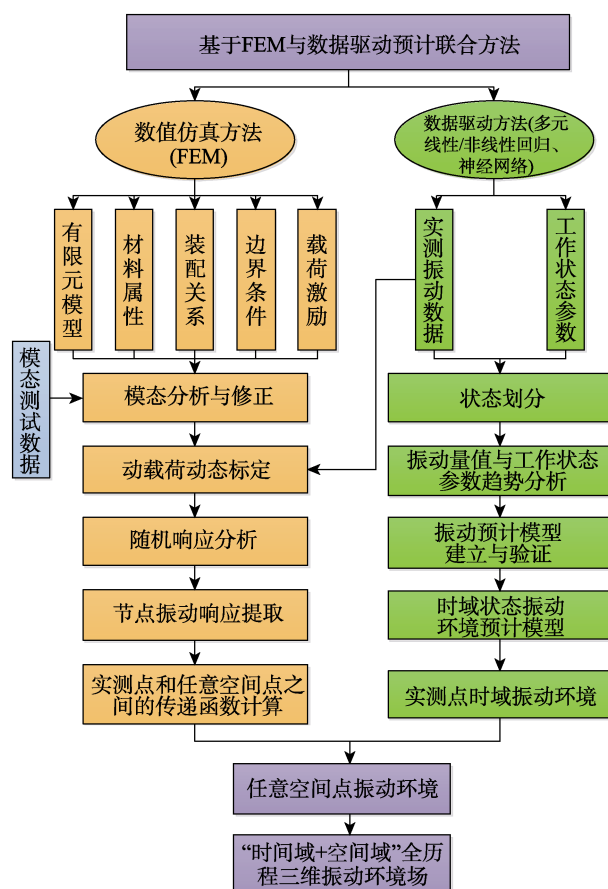


图6 装备振动环境数字化建模技术路线

Fig.6 Digital modeling technology route for equipment vibration environment

冷凝过程的热质传递行为, 建立水汽蒸发/冷凝的热质传递方程。根据界面能量平衡、质量平衡、相平衡关系求解水汽冷凝量^[25], 并在考虑重力作用的条件下, 利用计算流体动力学方法, 仿真预计求解液膜在构件表面的分布, 及其在台阶、沟槽等典型位置的积

聚和滴落行为^[26-27]。同时, 分析盐雾、 SO_2 、 NO_2 等典型大气污染物在微液膜中的溶解行为, 分析大气污染物对液膜 pH 值等腐蚀特性的影响, 建立污染物溶解方程, 形成装备平台局部腐蚀微液膜环境仿真预计模型。

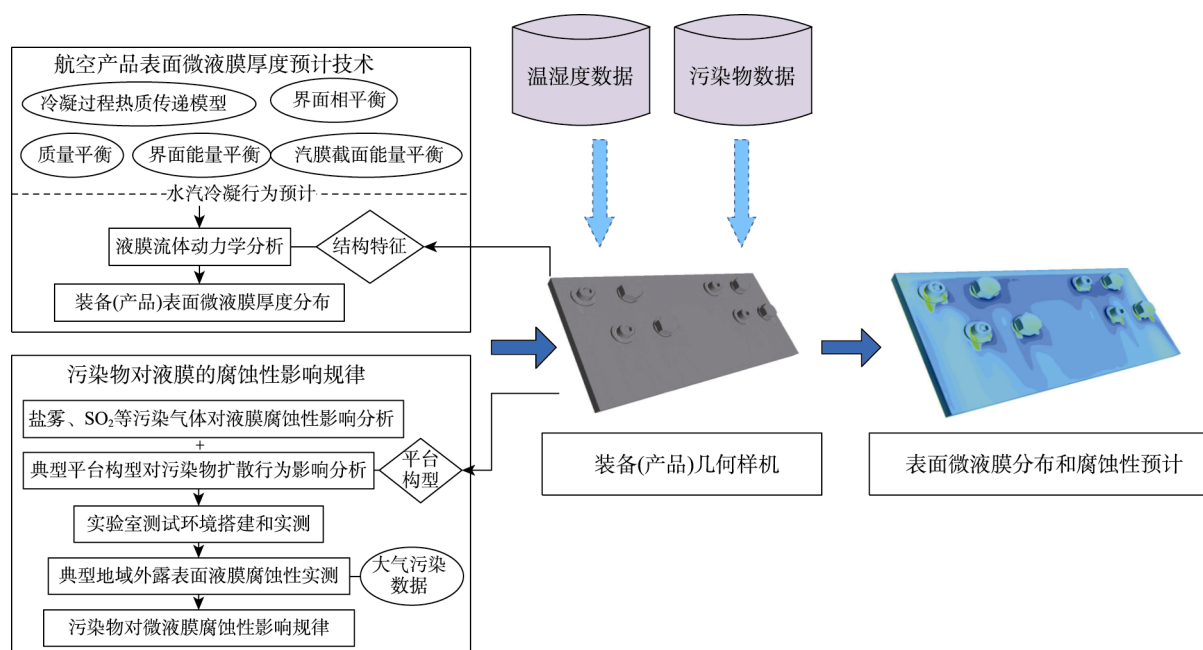


图 7 装备腐蚀环境数字化建模技术路线

Fig.7 Digital modeling technology route for equipment corrosion environment

装备腐蚀环境数字化建模的发展将趋向“局部化+动态化+综合化”。首先, 在识别整机腐蚀风险薄弱区域后, 主要聚焦腐蚀风险高的装备平台位置开展腐蚀环境仿真预计, 以降低仿真计算成本、提高计算效率, 实现装备腐蚀环境数字化建模的局部化。其次, 以外界随时间变化的宏观环境数据为输入, 仿真计算微液膜的动态变化过程, 实现装备腐蚀环境数字化建模的动态化, 而不是将其视为一个恒定状态。最后, 综合考虑外部宏观腐蚀环境, 以及局部位置复杂几何机构、构件表面状态等因素的综合影响, 构建贴近装备实际服役状态的腐蚀微液膜仿真预计模型, 实现装备腐蚀环境数字化建模的体系化。

3.2 环境效应数字化建模

3.2.1 温度环境效应

温度环境效应数字化模型通常是基于有限元数值仿真建立的, 通过输入材料参数随温度的变化关系, 将高温、低温、温度变化 (包括温度冲击) 的环境效应表现出来。温度环境效应建模与材料多个维度的机理模型密切相关。例如, 分析结构受温度变化导致的变形, 需要材料的热膨胀系数随温度的变化模型; 分析材料导电性能受温度变化的影响, 需要材料的电导率随温度变化的模型。因此, 温度环境效应建模依赖于材料机理模型。对于新研发的材料 (如新型

复合材料、新型高分子材料、新型合金材料), 其材料机理模型通常只能通过试验获得; 对于常见材料, 可通过查询工具书获得。因此, 实现温度环境效应的数字化关键是要建立健全装备的材料-热机理模型库。

3.2.2 振动环境效应

振动环境效应主要包括断裂破损和位移变形。振动环境效应数字化模型同样主要基于有限元数值仿真建立, 通过输入材料参数随应力或应变的变化关系, 将振动环境效应表现出来。振动环境效应与材料多个维度的机理模型密切相关。例如, 断裂破损按损伤机理划分又可分为峰值破坏和疲劳破坏, 峰值破坏与材料的极限强度有关, 疲劳破坏与材料的 S-N 曲线相关, 位移和变形与材料的弹性模量和屈服极限有关。因此, 振动环境效应建模依赖于材料力学机理模型。对于新研发的材料 (如新型复合材料、新型高分子材料、新型合金材料), 其材料机理模型通常只能通过试验获得, 对于常见材料, 可通过查询工具书获得。因此, 实现振动环境效应的数字化关键是要建立健全装备的材料-力学机理模型库。

3.2.3 热-振耦合环境效应

不同温度环境引起材料的收缩或膨胀, 导致结构内部产生应力, 会改变结构的振动模态。同时, 温度变化引起的交变热应力损伤与振动应力损伤叠加, 加

速了材料的疲劳损伤。

热-振耦合环境效应模型通常是基于有限元数值仿真建立,采用递增损伤叠加法^[28]计算电子封装结构在热-振耦合载荷作用下的疲劳寿命时,采用的技术

路线如图 8 所示。热-振耦合损伤数字化建模的关键是确定热与振动的耦合机理,然后对温度和振动的效应进行解耦,分别计算振动和温度作用下的损伤,再叠加,进而分析计算热-振耦合环境下的疲劳寿命。

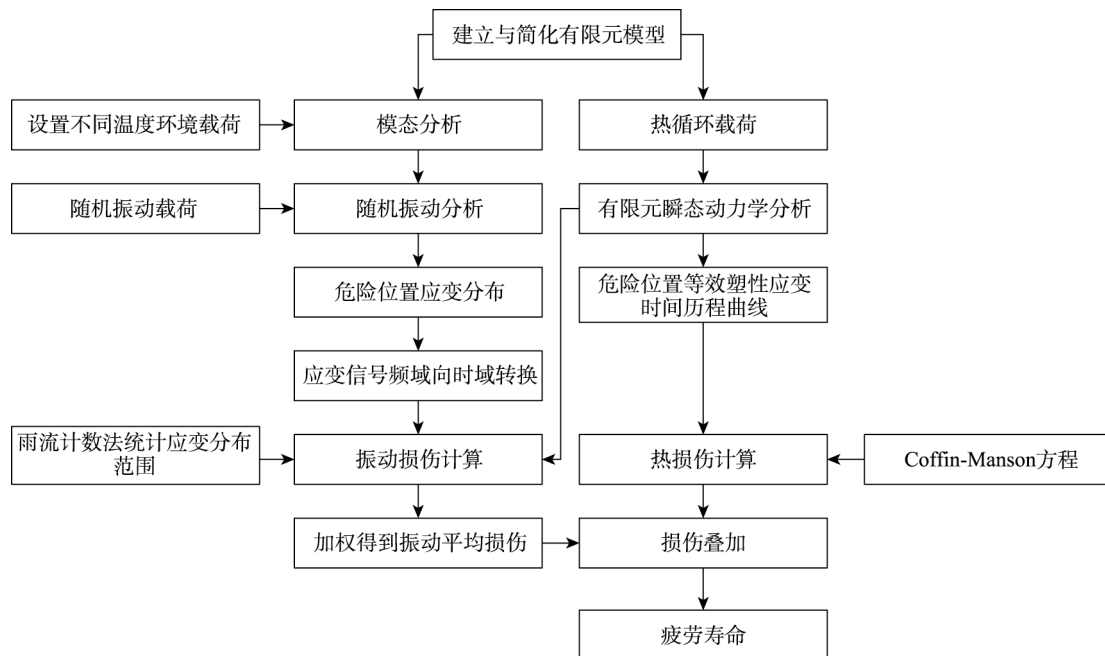


图 8 递增损伤叠加法的热-振耦合损伤建模路线

Fig.8 Thermal vibration coupled damage modeling route using incremental damage superposition method

3.2.4 腐蚀效应

目前,装备腐蚀效应数字化建模的研究总体集中在 2 个方向^[29-36]:一是,基于有限元、边界元等方法的装备宏观腐蚀效应数字化建模;二是,将多种空间尺度仿真预计方法融合的装备腐蚀效应多尺度仿真预计方法。其中,宏观腐蚀效应数字化建模只能计算由宏观因素导致的腐蚀损伤效应。如相邻零部件之间腐蚀电流耦合形成的电偶腐蚀、狭缝等局部位置腐蚀环境差异引发的缝隙腐蚀,且已经有了较为丰富的研究基础和工程应用。该方法的缺点在于无法模拟晶间腐蚀、点蚀等由材料微观组织不均匀特性引发的腐蚀类型,无法计算得到可靠的腐蚀形貌预计结果,不能为进一步开展腐蚀疲劳、腐蚀磨损等仿真预计提供输入。

装备腐蚀效应的多尺度仿真建模路线如图 9 所示。其将微观、介观、宏观等不同空间尺度的仿真预计方法融合,利用第一性原理等微观尺度仿真预计方法,计算原子层面的腐蚀过程,仿真预计点蚀萌生等微观腐蚀过程。利用元胞自动机、近场动力学等介观尺度仿真预计方法,模拟预计腐蚀尖端等微小部位的腐蚀发展、演变过程。利用有限元、边界元等宏观尺度仿真预计方法,模拟预计电偶腐蚀、缝隙腐蚀等宏观因素引发的腐蚀效应,快速定位腐蚀薄弱部位。但目前微观尺度、介观尺度的腐蚀仿真技术还不够成熟,无法有效支撑装备腐蚀多尺度仿真计算。

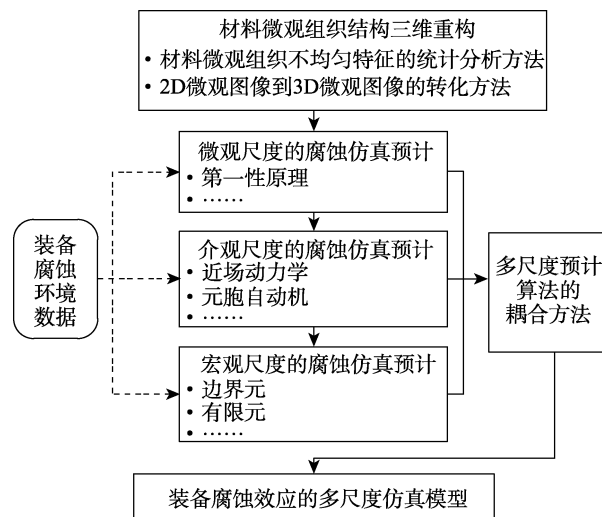


图 9 装备腐蚀效应的多尺度仿真建模路线

Fig.9 Multi scale simulation modeling path for equipment corrosion effects

装备腐蚀效应数字化建模的发展将趋向“微观化+多尺度”。一方面,关注材料微观组织成分不均匀特性等微观状态对腐蚀萌生及演变过程的影响,仿真得到可靠的腐蚀损伤形貌,为腐蚀状态下的装备结构完整性仿真预计等提供输入;另一方面,利用多尺度的仿真预计方法,降低仿真预计所需的计算资源,提高仿真预计效率。

4 结语

本文分析了当前装备数字化研制大背景下,装备环境工程数字化工作存在的问题。明确了环境工程数字化内涵,提出了环境工程数字化架构,以及环境工程数据体系构建、数据治理和数据产品开发“三位一体”的数字化工作实施路径。总结归纳了国内外环境数字化建模和环境效应数字化建模方法优缺点,给出了优化的环境和环境效应数字化建模流程及方法,为装备数字化研制与试验鉴定工作提供了支撑。

在完成装备环境数字化建模和环境效应数字化建模基础上,如何将环境工程数字化模型具体应用到战略筹划、数字化协同设计和数字化试验鉴定等场景是后续主要研究方向。

1) 战略筹划方面。随着国家利益的延伸和作战空间的拓展,未来战场是陆海空天电一体化战场,多域、全域等新型作战构想和作战概念相继被提出。如何将装备经受的环境和环境效应数字化模型与战场环境进行深度融合,实现装备全时域、空域和频域的数字化环境态势预测,进而为指挥、参战人员提供复杂战场作战决策,是第一个研究方向。

2) 数字化协同设计方面。目前的环境适应性设计以通用性经验为主,缺乏与产品功能性能、其他通用质量特性设计的协调与权衡,常常顾此失彼,无法达到一体化考虑、一体化设计的目的。如何将环境和环境效应数字化模型与当前基于模型的装备系统工程一体化设计融合,实现环境适应性与装备功能性能正向协同设计,是第二个研究方向。

3) 数字化试验鉴定方面。在数字孪生技术发展、装备试验鉴定数字化建设的推动下,在数字空间依托数字样机开展环境数字试验验证与考核已成为可能。如何将环境和环境效应数字化模型与物理试验结合,实现数字仿真模型和真实系统实际运行的有机结合,能在环境和环境效应仿真过程中获取并融合反映真实系统实际运行的数据,并能根据仿真结果控制测量和真实系统的运行,也是一个值得研究的方向。

参考文献:

- [1] 华为技术有限公司. 数字化转型,从战略到执行[R/OL]. 2022-07-21. <https://e.huawei.com/cn/topic/digital-economy>. Huawei Technologies Co., Ltd. Digital Transformation, from Strategy to Execution[R/OL]. 2022-07-21. <https://e.huawei.com/cn/topic/digital-economy>.
- [2] 张连城,王壮. 打造数字产业集群新优势[N]. 光明日报, 2023-04-11 (11). ZHANG L C, WANG Z. Create New Advantages in Digital Industry Clusters[N]. Guangming Daily, 2023-04-11(11).
- [3] 魏金钟,曾文. 数字新基建,运营模式以“数字航空”推进航空工业数字化转型,实现高质量发展[N]. 中国航空报, 2023-11-17(3906). WEI J Z, ZENG W. New Digital Infrastructure and Operation Model Promote the Digital Transformation of the Aviation Industry with “Digital Aviation” and Achieve High-Quality Development[N]. China Aviation News, 2023-11-17(3906).
- [4] 傅耘. 温度试验中产品温度稳定的研究[J]. 环境技术, 2001, 19(3): 8-12. FU Y. Temperature Stabilization of Products in Temperature Tests[J]. Environmental Technology, 2001, 19(3): 8-12.
- [5] 李永林,梁少峰,曹克强. 飞机平台诱发环境温度的建模与仿真[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(5): 8-13. LI Y L, LIANG S F, CAO K Q. A Research on Modeling and Simulation of Internal Environment Temperature Induced by Airplane Platform[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2016, 17(5): 8-13.
- [6] PANG L P, ZHAO M, LUO K, et al. Dynamic Temperature Prediction of Electronic Equipment under High Altitude Long Endurance Conditions[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(6): 1189-1197.
- [7] 吴琳琳. 飞行器表面温度场及其相似性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018. WU L L. Study on Surface Temperature Field and Its Similarity of Aircraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [8] 王芳,余建祖,谢永奇. 直升机动力舱流场及温度场的模拟[J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 208-213. WANG F, YU J Z, XIE Y Q. Numerical Simulation of Nacelle Flow and Temperature Field[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(2): 208-213.
- [9] 王连江,赵竞全. 飞机座舱温度场数值仿真研究[J]. 计算机仿真, 2008, 25(5): 44-46. WANG L J, ZHAO J Q. Numerical Simulation of Heat Transfer in Aircraft Cabins[J]. Computer Simulation, 2008, 25(5): 44-46.
- [10] 王玉梅. 基于CFD的发动机舱流场及温度场数值仿真[J]. 飞机设计, 2013, 33(6): 16-20. WANG Y M. Numerical Simulation of Nacelle Flow and Temperature Field Using CFD[J]. Aircraft Design, 2013, 33(6): 16-20.
- [11] 孙贺江,安璐,冯壮波,等. 客机驾驶舱流场CFD模拟与热舒适性分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(4): 298-303. SUN H J, AN L, FENG Z B, et al. CFD Simulation and Thermal Comfort Analysis in an Airliner Cockpit[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2014, 47(4): 298-303.
- [12] 赵海军,金平,陈跃良. 飞机地面局部气候环境研究[J]. 航空学报, 2006, 27(5): 873-876. ZHAO H J, JIN P, CHEN Y L. Investigation of Local

- Climate Environment of Aircraft in Ground Service[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006, 27(5): 873-876.
- [13] 张腾, 何宇廷, 李昌范, 等. 地面停放飞机局部温度环境研究[J]. *航空学报*, 2015, 36(2): 538-547.
ZHANG T, HE Y T, LI C F, et al. Research on Local Temperature Environment of Ground Parking Aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(2): 538-547.
- [14] 罗成, 万军, 丁晨, 等. 基于热网络模型的导弹贮存温度预计方法[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(6): 89-92.
LUO C, WAN J, DING C, et al. Predicting Method of Missile Storage Temperature Based on Thermal Network Model[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(6): 89-92.
- [15] 刘东升. 飞机实测环境温度数据处理方法研究[J]. *飞机设计*, 2001, 21(2): 75-80.
LIU D S. Converting Method Research on Aircraft field-Tested Environment Temperature Data[J]. *Aircraft Design*, 2001, 21(2): 75-80.
- [16] 李尧. 飞机温度环境适应性要求分析和确定技术探讨[J]. *装备环境工程*, 2008, 5(6): 60-64.
LI Y. Analysis and Confirmation Techniques for Requirements of Temperature Environmental Worthiness of Aircraft[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2008, 5(6): 60-64.
- [17] 傅耘, 常海娟, 武月琴, 等. 基于实测数据的飞机平台动态温度预计模型[J]. *航空学报*, 2014, 35(9): 2472-2480.
FU Y, CHANG H J, WU Y Q, et al. Dynamic Temperature Predicted Model for Airplane Platform Based on Measured Data[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(9): 2472-2480.
- [18] 李春丽, 石先杰. 再入飞行器振动环境工程预示方法[J]. *装备环境工程*, 2021, 18(3): 9-13.
LI C L, SHI X J. Engineering Prediction Method of the Vibration Environment for re-Entry Vehicle[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(3): 9-13.
- [19] 毛文涛. 支持向量回归机模型选择研究及在综合力学环境预示中的应用[D]. 西安: 西安交通大学, 2011.
MAO W T. Research on Model Selection for Support Vector Regression and Its Application in Prediction of Combined Dynamics Environment[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2011.
- [20] GEOFFREY E H. Aircraft Key Parts Fault Diagnosis Using Gaussian Deep Belief Network[J]. *Massachusetts Institute of Technology*, 2016, 18: 1527-1554.
- [21] VAN DEN STEEN N, SIMILLION H, DOLGIKH O, et al. An Integrated Modeling Approach for Atmospheric Corrosion in Presence of a Varying Electrolyte Film[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 187: 714-723.
- [22] 陈跃良, 黄海亮, 张勇, 等. 不同液膜厚度下电偶腐蚀当量折算研究[J]. *材料导报*, 2018, 32(9): 1571-1576.
CHEN Y L, HUANG H L, ZHANG Y, et al. Study on Equivalent Conversion of Galvanic Corrosion under Different Liquid Film Thickness[J]. *Materials Review*, 2018, 32(9): 1571-1576.
- [23] HUANG H L, PAN Z Q, GUO X P, et al. Effects of Direct Current Electric Field on Corrosion Behaviour of Copper, Cl⁻ Ion Migration Behaviour and Dendrites Growth under Thin Electrolyte Layer[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(1): 285-291.
- [24] DING K K, LI X G, XIAO K, et al. Electrochemical Migration Behavior and Mechanism of PCB-ImAg and PCB-HASL under Adsorbed Thin Liquid Films[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(7): 2446-2457.
- [25] 胡雪蛟, 莫小宝. 含多组分不凝气体蒸汽冷凝的热扩散模型[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2016, 49(2): 274-278.
HU X J, MO X B. Thermal Diffusion Model for Vapor Condensation with Multicomponent Noncondensable Gases[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(2): 274-278.
- [26] 杨红, 陈鑫, 李鹏飞, 等. 竖直管降膜蒸发器冷膜成形及流动特性数值模拟[J]. *武汉工程大学学报*, 2018, 40(4): 451-454.
YANG H, CHEN X, LI P F, et al. Numerical Simulation of Cold Film Forming and Flow Characteristics in Vertical Tube Falling Film Evaporator[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2018, 40(4): 451-454.
- [27] 段兵兵, 王恒旭, 张学军, 等. 湿空气与水直接接触冷凝 CFD 模拟研究[J]. *制冷技术*, 2019, 39(1): 28-33.
DUAN B B, WANG H X, ZHANG X J, et al. CFD Simulation of Condensation of Moist Air in Direct Contact with Water[J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2019, 39(1): 28-33.
- [28] 赵福斌, 仇原鹰, 贾斐, 等. 热振加载条件下电子封装结构的疲劳寿命分析[J]. *西安电子科技大学学报*, 2019, 46(2): 54-60.
ZHAO F B, QIU Y Y, JIA F, et al. Fatigue Lifetime Analysis of the Electronic Packaging Structures under the Combined Thermal Stress and Vibration Loading Conditions[J]. *Journal of Xidian University*, 2019, 46(2): 54-60.
- [29] ZHOU T, GANI R, SUNDAMACHER K. A Mixed Method of Data and Mechanism for Multi-scale Processes[J]. *Engineering*, 2021, 7(9): 1231-1238.
- [30] ZHOU T, GANI R, SUNDAMACHER K. Hybrid Data-Driven and Mechanistic Modeling Approaches for Multiscale Material and Process Design[J]. *Engineering*, 2021, 7(9): 1231-1238.
- [31] 魏薪, 董超芳, 徐奥妮, 等. 金属腐蚀的多尺度计算模拟研究进展[J]. *中国材料进展*, 2018, 37(1): 1-8.
WEI X, DONG C F, XU A N, et al. Progress in Multi-Scale Calculation and Simulation of Metal Corrosion[J]. *Materials China*, 2018, 37(1): 1-8.
- [32] JI Y Y, XU Y Z, ZHANG B B, et al. Review of Micro-Scale and Atomic-Scale Corrosion Mechanisms of Second Phases in Aluminum Alloys[J]. *Transactions of*

- Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(11): 3205-3227.
- [33] 吴海鹏, 王正曦, 梁钊源, 等. 数值模拟在金属腐蚀与防护领域的应用研究现状[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(3): 142-148.
- WU H P, WANG Z X, LIANG Z Y, et al. Literature Review on Application of Numerical Simulation in Corrosion and Protection of Metallic Materials[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2018, 32(3): 142-148.
- [34] Charlie Kuehmann. Materials by Design - Computational Alloy Design for Corrosion[C]//ASETSDefense 2011.
- [35] NICKERSON W C, IYYER N, LEGG K, et al. Modeling Galvanic Coupling and Localized Damage Initiation in Airframe Structures[J]. Corrosion Reviews, 2017, 35 (4/5): 205-223.
- [36] MUKHERJEE S, ZHOU B, DASGUPTA A, et al. Multiscale Modeling of the Anisotropic Transient Creep Response of Heterogeneous Single Crystal SnAgCu Solder[J]. International Journal of Plasticity, 2016, 78: 1-25.