美军基于模拟仿真的加速腐蚀系统

文邦伟^{1,2},朱玉琴^{1,2}

(1.中国兵器工业第五九研究所,重庆 400039;2.重庆市环境腐蚀与防护工程技术研究中心,重庆 400039)

摘要:美军最新开发了全尺寸车辆腐蚀模拟仿真和建模工具,称为加速腐蚀专家模拟器(ACES),它与 实际加速腐蚀耐久性试验(ACDT)数据高度相关。该系统引入现有全尺寸车辆3D几何模型,进行综合检测 以确定有无故障并报告补救措施;采用了基于腐蚀和涂层失效机理分析的各种人工智能解决方案;使用了 由专家、ACDT、实验室试验数据以及现场观测值建立起来的知识库等。该系统工具包括解释程序、设计评 审咨询程序和健壮知识采集程序。

U.S. Army Accelerated Corrosion System Based on Simulation

WEN Bang-wei^{1,2}, ZHU Yu-qin^{1,2}

(1. No.59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China;

2. Chongqing Engineering Research Center for Environmental Corrosion and Protection, Chongqing 400039, China)

Abstract: U.S. Army recently developed a complete vehicle corrosion simulation and modeling tool called accelerated corrosion expert simulator (ACES), which has a high degree of correlation to actual accelerated corrosion durability test (ACDT). The system imports existing 3D geometric models of full vehicles which conducted integrity check to determine if there are missing or improper entities and a report is issued to the user describing remedies solution; various artificial intelligence solution was adopted according to base material corrosion and coating mechanism analysis; repository comprised of expert, ACDT, laboratory experiments data and observed value on the scene constructed through arithmetic was applied. The system tool includes hermeneutic program, design– examine –consultation program and strong knowledge collection program.

Key words: U.S. army; corrosion; simulation; artificial intelligence; wheeled vehicle

腐蚀不仅影响装备战技性能、战备完好性和安 装备和基础设施因腐蚀而导致的直接腐蚀费用每年 全性,而且会造成巨大的经济损失。调查表明,美军 达200亿美元,其中陆军车辆腐蚀的总费用为20亿

收稿日期:2010-08-06

作者简介: 文邦伟(1967—),男,四川万源人,研究员级高级工程师,主要从事环境试验情报和产品环境防护开发设计。

美元。美国国会通过立法要求国防部优先解决腐蚀 问题。在陆军目前的车辆中,M1A1和M1A2主战坦 克、战术载运卡车和装甲陶式武器通用载运卡车的 总腐蚀费用和每辆车费用排前4位。为此,美军开 发了全尺寸车辆腐蚀模拟仿真和建模工具,并将其 应用于车辆腐蚀状况的预测预报。

1 加速腐蚀专家模拟器(ACES)系统

按照美国防部的要求,军用车辆加速腐蚀试验 1 a要能够模拟22 a的实际使用情况。在美陆军阿 伯丁试验场,军用车辆加速腐蚀试验费用为140万 美元/(辆·a)。图1为模拟实际现场使用的加速腐蚀 耐久性试验(ACDT),包括在车辆表面喷洒腐蚀性电 解质、强化温度和湿度等因素以加速车辆腐蚀过 程。根据对陆军中型战术车辆车族(FMTV)和海军 陆战队中型战术车辆替代型(MTVR)的试验结果确 定了 60多个改进措施以减少车辆全寿命周期费 用。对于FMTV,加速腐蚀试验结果帮助项目经理确 定在 39 个部件上有超过 200 个零件需要被加固,其 投资为2 550美元/辆,而投资回报率则为1:6.3。

腐蚀的成因极其复杂,诸如环境、材料、涂覆层、 结构和用途等都会影响腐蚀过程,从而导致其不确 定性和多值性。要采用通常的基于物理或者电化学 模型等方法来等效模拟复杂系统的腐蚀和老化是非 常困难的,且需花费大量的时间和经费。

美国陆军坦克与机动车辆司令部委托GCAS公司开发了全尺寸车辆腐蚀模拟仿真和建模工具,称为加速腐蚀专家模拟器(ACES)系统,它与实际



图 1 加速腐蚀耐久性试验(ACDT) Fig. 1 Accelerated corrosion durability test (ACDT)

ACDT数据高度相关。系统运用现有的 3D CAD/ CAE模型,经过功能扩展来支持腐蚀预测。系统通 过比较以前的加速试验与其他腐蚀试验的观测结 果并显示热点以预测腐蚀,同时补充了所需的几何 详图。系统包括一个健壮知识采集程序(该程序结 合学习算法,获得了为改进预测算法的新实验或用 来半自动更新系统的知识库);还包括适合各种涂 层的老化以及在泥浆包裹区域加速的电偶腐蚀和 缝隙腐蚀等的预测算法。目前,ACES能够对陆军 资产腐蚀级数进行预测预报,因此许多陆军项目 (例如未来作战系统等)都要求获得腐蚀预测及控 制方面的信息。ACES本质上是通用的,可用于评 估和分析大多数资产(例如地面车辆、航空器和设 施的腐蚀状况)。

2 ACES系统的技术体系

ACES系统的一般技术体系结构(如图2所示) 由以下模块组成。



图 2 ACES体系结构 Fig. 2 ACES Architecture

 推理模块包含人工智能解答工具组件,例如 基于规则的产品系统(专家系统)、模糊逻辑、贝叶斯 网络工具、马尔可夫链接、神经网络、回归方法(时间 序列分析)、再生算法、回归检索技术等,它可用于描 述腐蚀过程的不同模型。

 2)长期知识库包含规则、解决方案、腐蚀模型 以及用户输入的与所研究的几何结构之间的关系。

3)知识采集程序知识库在人类主题专家帮助下,用数据挖掘方法提取现场和实验性腐蚀数据。

4) 学习模块用来转换收集的新知识,按照适当 的属性和相互关系正确地填充ACES知识库。该学 习模块将是"半自动"的,因为以前从现场和试验数 据库获取的模型和相互关系已经建立,其信息可自 动更新。

5) 工作存储器容纳事件或证据(例如环境和工作剖面的整体数据库)的工作,采用推理机输入几何结构。

6)基本算法建立在推理模块内,它要依据工作 存储器内的"事实"或目标与实际输入相匹配,直到 获得令人满意的、合适的人工智能解决方案。

7) 推理机依据输入的事实和车辆几何结构判 断合理的相互关系,把正确的"规则"区分出来,处理 所有与知识库系列规则产生的任何冲突,利用最高 优先权的适当解决方案得到的相互关系,选择"最 佳"人工智能解答方案并执行。

8) CAD/CAE 系统接口适合于转换 3D 全几何结 构数据文件,例如 HMMWV 车辆的 3D BRL-CAD 弱 点模型。这些非常详细的模型将可能被编辑以删除 多余的信息,并更新细节缺乏的区域(例如描述搭接 缝)。

9)几何结构分析程序采用单独的基于规则的 产品系统以确定某些与几何结构有关的事实,例如: 阳极面积与阴极面积的比率、缝隙、泥浆包埋、集水/ 不正确的排水区。

10)作为专家系统的解释程序向用户描述推 理。

11)为来自系统解释程序和几何结构分析程序 的咨询系统提出对策建议,使用户能采取避免腐蚀 的措施。

12) 用户界面是一个基于 Java 的图形用户界面,用于用户与专家系统的沟通。

3 车辆几何结构

为模拟车辆腐蚀,建立了3D CAD/CAE模型文件 并输入ACES。图3是一个包含290万基本要素的中 等大小的STEP(产品型号数据交换标准)模型例。陆 军和车辆生产商使用的模型是非常详细的,图4为中 等大小的STEP-HMMWV模型门铰链放大图。



图3 中等大小HMMWV模型(以STEP-AP214格式输入)

Fig. 3 Mid-size HMMWV model (imported in STEP-AP214 format)



图4 中等大小STEP-HMMWV模型门铰链放大图 Fig. 4 Zoom of door hinge on the mid-size STEP-HMMWV model

对模型进行综合检查以确定所有必要的基本信息(例如材料性能)是否包括在输入模型中。如果没有包括,则要说明异常情况,并向用户提示缺失或需要转化的信息。软件向导通过补充所缺失的几何结构信息如紧固件和连接件(焊接、铆接等)以及涂层系统细节来指导用户,以便以半自动化方式输入到模型中。

4 几何结构分析

一旦装配了令人满意的几何结构图, ACES 就要

确定所有空隙、泥浆包裹区域和排水有问题的部 位。已经确定的自动特征识别的2种补充方法都与 基础几何学和拓扑学有关。

第1种方法采用外表面总数、边缘总数、外表面 类型、凸起或凹陷、法向矢量和外部通道取向参量等 信息判定是否包括在特征之内。该方法能辨认盲 孔、通孔、槽、通槽、凸台、楔子、T形槽、台阶、槽口、局 部柱面和扇形面等特征。ACES特征识别算法从采 用的预测模型几何结构中提取适当的参量,困难的 是交叉特征的识别。基于考虑立体边界(边缘连通 性、平面性、凸起或者凹陷)及其凸度或凹度的第2 种方法,可确定特征和发现组合特征。

还有一些其他方法可用于描述特征和提取边缘,例如神经网络、立体端点转换、边缘和外形图以及基于参量分类的学习算法等。然而,目前的研究 表明上述2种是最易理解和编码的方法。

对几何结构特征模型(例如有利于腐蚀的缝隙) 的询问,需要进行大量计算。要加快这个过程,这些 算法将被编码以适合并行处理,使其可以在高性能 计算机或图形处理器上执行。选定几何结构特征, 然后依据腐蚀/涂层老化算法,按其重要程度被加权/ 筛选以便采用。

5 腐蚀预测模型

理解和接受非程序的人工智能方法的最佳方式 是进行参数分析,图5即为一个简化的人工智能分 析方法。Y₃为期望的输出,是假设的*n*个独立输入自 变量X的函数,表达式为:

 $Y_j = f_k(X_1, X_2, X_3, \cdots X_n)$

输入的自变量X_i代表客观"证据"或"事实"而被 交付给系统,如所研究系统的车辆几何细节、材料、 环境、工作用途等。用于描述X_i和Y_i之间关系的函 数式,由一组"k"人工智能模型及其相互关系、所用 模型要求而定义的人工智能解决程序提供,例如规 则组。汇集的模型、支持的关系和属性统称为"知识 库"(如图3所示)。合适的人工智能解决程序被安 装在图3所示的推理模块中以执行运算,包含模型、 规则、相互关系和属性的知识库,组合了来自分析模 型、测试结果、故障数据、课程学习设计规则和现场 专家意见等信息和观测结果。按照腐蚀和涂层失效 机理分析,有多种与这些"k"模型关联的人工智能解决方案被采用,解决方案的方法包括:基于规则的 "专家系统"、适合于模糊规则的模糊逻辑、贝叶斯网络、马尔可夫链和神经网络等。

1) 数据Xi分类。影响腐蚀的关键因素分为7类。

(1)几何结构与设计。在几何结构与设计范畴,确定了12个因素作为输入到腐蚀模型的数据:搭接、焊接、紧固件、缝隙、泥浆包埋区、浸水、排水区、防护层、密封(特别是保护电子设备)、电耦合(面积比)、取向、屏蔽(电解质、碎渣和磨蚀)。

(2)环境。在环境方面,确定了16个因素:湿度、盐雾、泥浆、涉渡、干燥、温度、紫外线暴露(阳光)、振动、冲击、石头啄击、行驶里程、行驶地形、流体(油、冷却剂、制动液、蓄电池酸液、燃料)、酸沉积(雨、雪、雾、凝露、干沉积物)、磨蚀(沙尘暴)、相对运动(微振磨损、振动和冲击)等。

(3)维护活动。在维护活动方面,确定了8个因素:清洗、干燥、润滑(当需要维护操作系统时)、连接、去污、喷涂、修饰、液体更换。

(4)材料种类。材料种类分为5大类:金属、合金、金属陶瓷(陶瓷基金属复合物,例如金属陶瓷联接和密封、刹车、离合器、电子设备)、非金属(塑料、橡胶、玻璃、复合材料)、涂层系统(有机、无机、陶瓷、金属)。

(5) 材料的常规性能。材料的常规性能提供了 在预测模型中使用的另一套数据输入,确定的相关 要素包括:厚度、硬度、强度、延展性、耐磨性、耐温 性、电阻、电化学性能(钝态、腐蚀电位)等。

(6)金属和合金材料的附加性能。金属和合金 材料的附加性能可提供其特有的补充输入参数,包 括:制造方法(铸造、辊轧、锻造、锻制、烧结等)、热处 理工艺等。

(7)涂覆层系统材料的附加性能。涂覆层系统 材料的附加性能可提供其特有的补充输入参数,因 此可测量的涂覆层性能对为ACES预测的涂覆层体 系老化建模至关重要。可测量的涂覆层性能见表1。

2)腐蚀/失效模式。图5的方法提出了分析腐 蚀类型数,或者腐蚀/失效模式的解决方案算法。这 些腐蚀/失效模式被分成5组,以利于材料和下述相 关腐蚀模式间的匹配。

(1) 金属和合金(按照ISO和ASTM标准进行大

表1 可测量的涂覆层性能

Table 1 Measurable coating properties

涂覆层类型	可测量的性能
金属涂层	牺牲性、抗磨强度、润滑/摩擦系数、耐热性、电性能、耐冲击性
有机涂层	热性能(耐热/冷)、表面张力、强度、渗透性(湿气/离子)、附着力、完整性(表面缺陷、孔隙率、边缘覆盖率)、硬度、
	耐冲击性、耐石啄、耐紫外线、耐剥离(耐凹陷性、渗透起泡、丝状腐蚀)、耐龟裂、耐化学品稳定性、耐失光和褪色
转化涂层	附着力、耐腐蚀性、表面张力、热性能、电性能
前处理	形态(晶体大小和结构)
密封剂	表面张力
钝态层	耐磨强度、耐腐蚀性、厚度、脆性、耐冲击性、电导率、剥离性
陶瓷涂层	断裂韧性、脆性、耐温性、耐磨强度、附着力、表面张力



图5 人工智能分析方法 Fig. 5 AI analysis approach

气暴露):全面/均匀腐蚀、电偶腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、 脱合金成分腐蚀、应力开裂(SCC、疲劳)、侵蚀(气蚀、 磨蚀)、晶间腐蚀(剥落)、微生物诱发腐蚀、氢脆。

(2)涂层系统:锈穿(针尖、不规则表面)、分层
(凹陷/涂层下腐蚀、渗透起泡、剥落)、装饰性缺陷
(颜色变化、失光、嵌入污垢或污点)、侵蚀或磨蚀(厚度损失、结构变化)。

(3)紧固件和五金零件:电偶腐蚀、缝隙腐蚀、 镀层/涂层变薄/损坏、绝缘垫圈或密封胶失效、材料 冶金、与强度有关的失效(螺纹破损)、顶托、磨损、应 力(增加腐蚀敏感性)、微振磨损。

(4)电子零件:外部插接件腐蚀或失效、电子仪 器腐蚀或失效(如果在密闭地密封则可大大减缓)。

(5) 电气零件:暴露的插接件腐蚀或失效(通过 涂覆润滑油可减缓)。

ACES包括随时间变化的涂层系统失效的单独 模型。该模型模拟涂层老化和出现的腐蚀分2个阶段,如图6所示。

上述方法提供了在材料和可用腐蚀模型或失效 模式之间的局部映射。表2为金属和合金以及涂层 系统提供了腐蚀模型或失效模式的具体清单,也考 虑了其他材料和腐蚀模型/失效模式。表2中紧固件





和五金件腐蚀模型/失效模式可用于金属和合金、金 属陶瓷、陶瓷、橡胶和塑料。金属陶瓷还映射到电子 元器件,因为它们被用作电阻器、电容器和其他电子 元件,可能受到高温的影响。金属基复合材料、玻璃 和复合材料的腐蚀模型/失效模式尚未确定。

通过 ACES,表2中的映射被用来选择并建立相 应的风险评估和预测模型。相互关系取决于正在调 查中的材料和所关心的具体腐蚀模型/失效模式。 例如在分析金属紧固件时,将强调电偶腐蚀,从而采 用特殊的紧固件和五金件模型,而不是采用对所有 金属和合金都有效的通用模型。

3)输出度量。图5中用Y,表示来自各模型的 期望的输出度量,该系统将运行恰当的1个或多个 腐蚀/失效模式,或按照用户要求对所调查的组件 中感兴趣的部件选择性地分析这些模型。对各个 模型的运行和感兴趣的部件期望的输出如下。

(1)对腐蚀或失效可能性的整体风险评估表示为:低风险(优良状况);可接受的风险(可接受的状)

表2 在材料和腐蚀模型/失效模式之间的映射

Table 2 Mapping between materials and corrosion models/failure modes

材料 一		腐蚀模型/失效模式				
		金属和合金	涂层系统	紧固件和五金件	电子元器件	电气零件
金属和合金		\checkmark		\checkmark	\checkmark	\checkmark
金属基复合材料						
金属陶瓷				\checkmark	\checkmark	
	塑料					
	橡胶			\checkmark		
非金属	玻璃					
	陶瓷			\checkmark		
	复合材料					
	有机		\checkmark			
涂层系统	无机		\checkmark			
	陶瓷		\checkmark			

况,但建议改善);高风险(恶劣状况,必须进行改善)。

(2)时间函数,即风险评估如何随时间演变,或 者及时描述其对用户的价值。

(3) 对输入参量的腐蚀/失效敏感性进行风险评估。

另外,也可以选择车辆的一个特定部件或者区 域,并显现其腐蚀风险随时间的变化,如图7所示。 上述结果将通过图形接口显示,如通过图8所示的 随时间变化而改变颜色的全尺寸车辆的影像来识别 腐蚀"热点"。



图7 选择的部件腐蚀风险随时间的变化

Fig. 7 Progression of corrosion risk of a selected component over time

目前的ACES只在几何结构上显示腐蚀的可能 性。通过用ACES量化计算位置和指标是第1步。 为了将该模式扩展到包括结构完整性的损失,如应 力腐蚀开裂和腐蚀疲劳,这些热点必须按照有限元 模型的代码进行量化以便应用。腐蚀会在2个方面 影响结构,首先是明显减少金属壁厚。实际上,维护 的要求是基于因发生腐蚀而造成的"损耗"量(金属



- 图 8 在选择时间点的HMMWV几何结构模型的腐蚀健康状况瞬态图
- Fig. 8 Snapshot of corrosion health of HMMWV geometric model at a selected time point

损失)。其次是更敏感的影响,即:在材料性质上的 变化,或者更恰当的讲,在疲劳和裂纹萌生位置材料 状态变化。当在有限元分析中具体表现腐蚀影响 时,该项工作通常不考虑。这个扩展可以通过采用 目前用来显示腐蚀倾向发展的相同的人工智能统计 技术来完成。

腐蚀发展在金属失重和裂纹萌生敏感性方面对 结构的损害,类似于使用按主题专家提供的物理和电 化学条件的模拟。在任何时间点,既定的条件/状况 (金属厚度和裂纹萌生位置),可以采用有限元分析 和/或其他程序性工程分析进行结构评估。随着结构 完整性状况的确定,其他各种"成效"问题可能得到解 决,如腐蚀对任务战备完好性、人员安全风险 (下转第52页)



图1 海洋大气环境当量加速腐蚀环境谱

Fig. 1 Accelerated corrosion environment spectrum of marine environment

6 结论

海洋大气环境加速腐蚀可选用由"紫外照射"和"周期浸润"2个环境块模拟。

 2)在具备真实典型海洋大气环境谱数据、自然 环境与加速环境对标准潮湿空气折算关系基础上, 建立加速试验环境谱与典型海洋大气环境谱的当量 加速关系,其方法简便、可行。

3) 文中确定的海洋大气当量加速腐蚀环境谱 及当量关系可用于飞机(尤其是海军飞机/舰载飞机)的结构选材或/和防护体系、腐蚀关键结构日历 寿命试验研究与验证、设计与评定。

参考文献:

- [1] 穆志韬,曾本银.直升机结构疲劳[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [2] 刘文珽,李玉海.飞机结构日历寿命体系评定技术[M].北 京:航空工业出版社,2004:75.
- [3] 穆志韬.飞机服役环境当量加速腐蚀折算方法研究[J]. 海军航空工程学院学报,2007,22(3):301-304.
- [4] MILLER Robert N, SCHUESSLER R L. Predicting Service Life of Aircraft in Various Environments[J]. Corrosion, 1989 (8):12-21.

(上接第47页)

和维修/翻新费用等影响。

ACES预测算法将采用专家知识、课程学习、现场检查数据、实验室和现场模拟ACDT数据来校准。选定FMTV,MTVR,HMMWV和LVSR(后勤车辆系统替代型)等4种陆军和海军陆战队车辆用作校准和验证。

6 结论

美军基于模拟仿真的加速腐蚀系统是基于人工 智能技术的统计架构,其中包括采用学习算法使 ACES随时间的推移而成长并变得更加准确的知识 获取程序,输出结果则是预计的腐蚀和车辆随时间 而劣化的概率。目前,美军仍在持续进行研发以完 善该技术,近期计划在2010年底发布测试第2版。 未来的计划则包括对评估车辆结构完整性所需的金 属损失和裂纹萌生位置的联合预测。美军期望在 10 a之内,将利用较多的知识将 ACES 发展进化成为 永不退休的专家工具。

美军开发的可与车辆实际加速腐蚀耐久性试验 数据高度相关的模拟仿真加速腐蚀试验技术,能够 对车辆耐腐蚀设计提供直接反馈,将取代许多实际 的腐蚀试验,减少对冗长和成本昂贵的车辆腐蚀试 验的要求。该技术在装备腐蚀控制设计上的广泛应 用,不仅能够提高装备的战备完好性、安全性,而且 能够大幅缩短装备研制与鉴定试验时间、节省试验 经费以及降低装备全寿命周期费用。

参考文献:

 [1] SAVELL C Thomas, HANDSY I Carl, AULT Pete, et al. Accelerated Corrosion Expert Simulator (ACES) [C/OL]// DoD Corrosion Conference 2009[2009-08-14]. http://events.nace.org/conferences/dod2009/index.asp.余不详