

基于数字孪生的国产 C909 客机维修工程管理策略优化

詹美松

中国商飞上海飞机客户服务有限公司, 上海, 201100;

摘要: 数字孪生技术在 C909 客机维修管理中的应用, 显著提升了维修效率和精确度。通过实时数据监控和虚拟模型同步, 数字孪生技术能够有效预测故障、优化维修资源配置。通过主动预防、损伤导向修复和预测性维修三种策略, 数字孪生技术实现了飞机维修从传统定期检查向数据驱动的智能化转变。这些策略不仅有效提高了维修效率, 减少了维修成本, 还提升了飞机的安全性和运行效率。

关键词: 数字孪生; C909 客机; 维修管理

DOI: 10. 64216/3080-1508. 26. 01. 037

引言

随着航空工业的快速发展, C909 客机的投入使用对维修管理提出了更高的要求。传统依靠固定周期检查并由人工来判断的做法已无法应对日益复杂的维护需求, 尤其是对于像 C909 这样高端且多系统集成的飞机来说, 易导致资源浪费、故障预警迟缓以及维修反应慢的问题。数字孪生技术的出现为该问题提供了新的解决方案, 它实现物理飞机与数字模型的实时同步, 能够精准监控飞机的各项健康指标, 并全面掌握各系统的运行状态^[1]。

1 数字孪生技术的基本原理

数字孪生 (DigitalTwin) 以数字化的方式建立物理实体的多维、多时空尺度、多学科、多物理量的动态虚拟模型来仿真和刻画物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等^[2]。数字孪生技术通过将物理实体与其虚拟模型进行同步更新, 能够实时反映物理对象的状态。该技术融合了多源数据, 如传感器信息、运行状态、环境数据及历史维修记录, 通过分析这些数据构建高保真虚拟模型, 并与实际设备保持实时互动。通过不断收集和分析实时数据流, 数字孪生可以准确监控设备的健康指标, 确保维修决策能够及时做出, 避免潜在问题的延误和忽视^[3]。数字孪生技术最初主要应用于军工和航空航天领域, 因其对精确监控和高可靠性的需求较为迫切。随着技术的成熟和需求的扩展, 近年来, 数字孪生逐渐向民用领域扩展, 广泛应用于电力、汽车、医疗、船舶等多个行业。在这些行业中, 数字孪生不仅能够提高设备的管理效率, 还能有效提升运营安全性和减少维护成本。市场对数字孪生技术的需求不断增长, 其广泛的应用前景使其成为多个行业未来发展的关键技术。

2 C909 客机维修管理面临损伤类型分析

C909 客机属于高性能航空器, 其机体结构包含复合材料, 航电系统, 精密机电部件等多种高技术复杂度部件, 长期运行时, 这些部件受飞行载荷, 环境变化, 外部因素等影响, 会逐渐出现不同类型的损伤, 进而影响飞机的安全性和运行性能, 以下是对 C909 客机常见损伤类型的详细分析。

2.1 复合材料损伤分析

复合材料被广泛地运用到 C909 客机的结构之中, 尤其是在机翼, 机体, 尾翼这些关键部位^[4]。因为复合材料在承受循环载荷的时候, 容易出现一些微小的结构性裂纹, 所以在最初阶段, 这些损伤常常不容易被察觉到, 这些裂纹在随着使用时间的积累下, 会迅速地扩大, 造成材料的疲劳损伤, 严重的损伤甚至可能危及到飞机的结构完整性。例如在航程长, 飞行次数多的情况下, 复合材料的层间分离和脱粘问题就尤为显著, 复合材料的损伤多出现于高应力区或者连接部位, 这些区域难以通过常规的目视检查办法来发现, 而且, 损伤的扩展常于高负荷或者极端工况之下加速, 这样就会使结构的性能显著下降, 从而影响到飞行的安全性和稳定性。

2.2 航电系统损伤分析

航电系统是飞机的核心控制系统, 主要执行飞行中的导航、交流、监控等任务, 电气故障常表现为电路板老化, 接触部位不牢固, 信号出现失真等情况。系统长时间处于工作状态, 经过长期运行, 由于所处的空气湿度、温度高低以及设备本身老化等情况而出现的故障。这类故障一般会逐渐恶化, 难以通过传统做法如常规检查就能早期发现, 随着每个部件持续运行的时间增长, 航电系统的各个部分, 特别是像电池、传感器及电路板

这类关键区域，已呈现明显老化的迹象，尤其是处于高负荷工况。比如低温和高湿度等条件之下，这些故障很容易骤然引发系统无法正常运作，严重时便会直接影响到飞行控制系统的响应速度与精度。

2.3 发动机系统损伤分析

C909 客机的发动机系统是飞机的核心动力来源^[5]。发动机的工作环境十分恶劣，在高温、高压的工作条件下，发动机内部的机电部件承受巨大的负荷，这些部件很容易出现疲劳损伤，表现为部件磨损、裂纹扩展和金属疲劳等问题，特别是在发动机的关键部件，比如涡轮叶片、压气机和燃烧室，因为持续承受着热应力和机械应力，所以部件的性能退化速度迅速，随着飞行时间的增加，发动机部件的疲劳损耗会直接影响到发动机的工作效率和安全性，如果这些损伤不能及时检测和修复，就可能导致发动机性能的显著下降，严重时甚至引发系统故障，造成飞行事故。

2.4 数字孪生在损伤分析中的应用

对于上述复杂的损伤类型，数字孪生技术的应用，

为 C909 客机的维修管理提供了有效解决方案。数字孪生技术通过实时数据与虚拟模型的同步，可以精确模拟并分析飞机各个系统的状况，及时检测潜在的损伤并进行预测，利用数字孪生技术，飞机各个部件的健康状况，通过多源数据的整合，可精确监控，故障的提早警报可实现，尤其在复合材料的损伤分析方面，数字孪生能够通过模拟飞行时的实际情况，预估材料的疲劳寿命及损伤发展趋向，避免传统方法中的滞后现象，数字孪生与实际维修数据结合，可优化维修方案，减少不必要的拆卸和更换，维修成本可大幅降低。

3 基于数字孪生的 C909 客机维修优化策略

数字孪生技术的加入彻底改变 C909 客机维修管理模式，使维修从时间驱动和经验驱动转向实时数据、预测分析与智能决策的新模式^[6]。通过对各系统实时监测与数据分析，数字孪生不仅提升维修准确性，早期预警潜在问题，更能降低维修成本与停机时间。基于数字孪生提出三项关键维修优化策略：状态感知维修策略、损伤响应维修策略与寿命预测驱动维修策略。

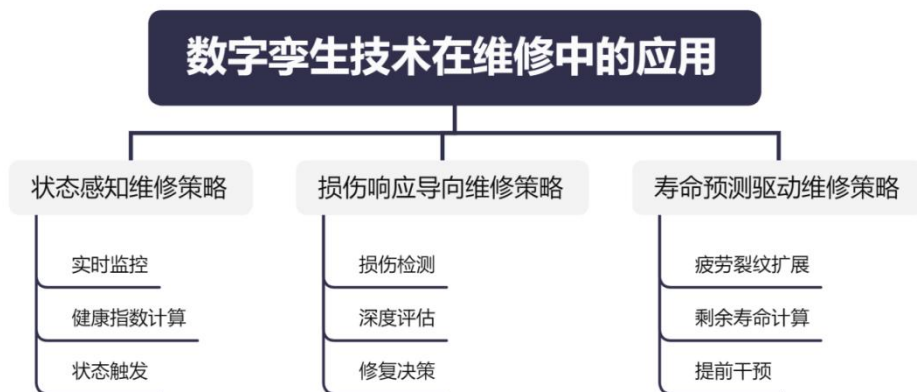


图 1 基于数字孪生的 C909 客机维修优化策略框架

3.1 状态感知式维修触发策略

传统的维修模式依赖定期检查与人工经验，飞机的维修工作按预设计划执行，常忽视飞机实际运行状态，导致潜在损伤未能及时发现而扩展，影响飞行安全。数字孪生技术的应用使得 C909 客机的维修不再基于时间进行定期检查，而是依据实时数据与状态动态触发，在数字孪生平台上通过传感器网络监测各部件工况，并且将振动、温度、应力等数据与虚拟模型同步更新，形成完整健康管理系统。

状态感知维修需实时监控与健康指标计算。该指标

综合反映部件健康状态，可准确指示部件故障风险，在这种策略中，健康指数 HI 的计算公式如下^[7]。

$$HI=1-\frac{\int_0^T |x(t)-x_{nom}|dt}{T \cdot x_{nom}}$$

其中 $x(t)$ 为实时信号（如振动幅度）、 x_{nom} 为标定正常值， T 为监测时间。HI 低于某一阈值（如 0.85）即触发维修流程。该方法由传统“固定周期”检查转向“状态触发”机制，缩短检测—响应时延，避免了因延误造成的资源闲置和突发停机。

1.3.2 损伤响应导向维修策略

在监测到部件健康状态下降时，数字孪生平台进一

步通过损伤响应分析模块识别损伤类型、位置和严重程度。如在蒙皮复合结构中检测到层间脱粘迹象，通过热响应系数 K 计算脱粘深度 d 。

$$d=\sqrt{\frac{\alpha}{\pi f_c}}$$

其中 α 为材料热扩散系数， f_c 为特征频率。若发现深度大于 1mm 或面积大于 100mm² 的损伤，则及时记录并上报，并纳入后续的修复决策流程。该主动预防性维修模式可使潜在损伤在萌生阶段被及时发现，避免小损伤恶化为严重的结构失效，从而最大限度地保障飞机结构的完整性和安全性^[8]。

2.3.3 寿命预测驱动维修策略

该策略将数字孪生模块与寿命预测算法结合，通过累积使用数据和运行环境数据（如循环次数 N 、载荷变化 ΔK ）应用疲劳裂纹扩展方程。

$$\frac{da}{dN}=C(\Delta K)^m$$

其中 a 为裂纹长度， C 、 m 为材料常数。系统在每次航次结束后更新 a 、计算剩余寿命 RL （RemainingLife）。

$$RL=\frac{a_{crit}-a}{da/dN}$$

当 RL 低于预定安全裕度（如 100 循环）时，系统自动建议维修窗口并生成维修工单。通过此方法，从以

往“事后维修”转变为“提前介入”，显著提升飞机可用率并降低非计划停机风险。在飞机运行过程中，模型监测能够提前预警故障，提前安排维修机会和航材工装，减少非计划停场时间。对影响安全的故障进行监控，有助于降低重大机械安全事件的发生概率^[9]。同时，从计划维修过渡到按需维修，有助于减少航材拆换，进一步降低运营成本。

4 数字孪生在 C909 客机维修中的实践应用分析

4.1 实验方案

为验证数字孪生技术在 C909 客机维修中的优化效果，本研究选择了 C909 客机的复合材料蒙皮部件作为研究对象。该蒙皮采用 T800/5228 碳纤维增强环氧树脂复合材料制成，尺寸为 6.5m×2.3m，厚度为 12mm。实验首先使用 FLIRX8500sc 红外热像仪（帧频为 60Hz，灵敏度为 0.02K）对蒙皮进行全面扫描，重点关注应力集中区和连接件周围。采用锁相红外技术，激励频率设为 0.05Hz，获取损伤区域的温度振幅和相位信息。通过热响应分析，识别不同损伤类型的特征，并与实际维修记录进行对比。

4.2 实验结果

表 1 展示了三种维修策略在实际应用中的实验结果。

表 1 3 种维修策略的实验结果对比

修复策略	损伤点	损伤深度(mm)	检出率(%)	修复效率(%)
主动预防	1	0.9	96	93
	2	1.4	97	94
	3	1.7	95	92
损伤导向	4	2.5	98	97
	5	3	97	96
	6	3.8	99	99
预测性维修	7	4	96	94
	8	4.3	97	95
	9	5	99	97

由表 1 的实验数据可知，主动预防维修策略对早期损伤（0.8mm~1.5mm）处理效果最佳，检测率 95%~98%，修复成功率 92%~95%。可有效识别潜在损伤并抑制其扩展，确保结构安全性。而损伤响应修复策略对于中度到重度损伤（2.3mm~3.8mm，尤其是损伤点 6（ $d=3.8\text{mm}$, $Re_q=5.7\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)$ ）原位复合材料修复后的修复成功率达到了 99%。该策略可根据损伤的种类和位

置来制定针对性修复方案，有效恢复结构性能并提高维修质量，预测性维修策略无论是在何种损伤深度下都表现稳定，各损伤程度区间的检测率均保持 96%~99%，并且各类工况下的修复成功率均维持在 94%~97%之间。尤其是针对损伤点 9（ $d=5.0\text{mm}$, $\Delta K P=7.8\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）工况，可精准预测剩余寿命，并提前实施维修干预，有效规避结构失效风险。

5 结语

数字孪生技术应用于 C909 客机维修管理当中,推动传统维修方式重大变革,通过精准故障预测、智能维修决策以及优化资源配置,数字孪生提升维修效率并降低成本,基于数字孪生的主动预防、损伤响应与预测性维修策略构建的全方位高效维修体系,实现从定期检查到基于实时数据的动态精准管控转变,通过持续的监测、数据分析和预防性维护,数字孪生能够早期识别潜在损伤,并有效抑制其扩展,从而保障 C909 客机的高效与安全运行。展望未来,随着技术的不断进步,数字孪生将在智能化场景中深入应用,如强化决策支持、多源数据融合与智能维护计划生成,实现更全面、精准、高效的飞机维修,为航空业数字化转型奠定坚实基础。

参考文献

- [1]赵福斌,周轩,董雷霆.基于数字孪生的飞机蒙皮裂纹智能检查维修策略[J].固体力学学报,2021,42(03):277-286.
- [2]杨毅.民航客机发动机关键机械构件的失效与维修分析[J].机械管理开发,2024,39(12):251-253+257.
- [3]梁辉.虚拟仿真在飞机维修基本技能实训中的实践

与探讨[J].模具制造,2024,24(06):102-105.

[4]彭卫东,韩禹.数字孪生技术在飞机电气系统故障维修中的应用分析[J].中国机械,2025,(15):36-39.

[5]邹健.新一代大型客机客舱的设计理念与维修特点[J].新型工业化,2020,10(11):129-130.

[6]陈志亮.红外检测技术在飞机复合材料结构维修中的应用[J].自动化应用,2025,66(08):229-231.

[7]张强.C909飞机液压系统故障处理[J].今日制造与升级,2025,(06):185-188.

[8]孙宇新,侯卓越.Ameco关于国航C909飞机维修实践探索及经验总结[J].航空维修与工程,2025,(08):16-18.

[9]徐锦程.数字化背景下飞机维修体系设计流程的智能化升级路径研究[J].中国军转民,2025,(16):44-46.

作者简介:姓名:詹美松(1991.05.24—),性别:男,民族:汉,籍贯:云南省丽江市,学历:大学本科,职称:助理工程师,专业:电气工程及其自动化,研究方向:飞机维护与生产计划管理。