中国航空报 CHINA AVIATION NEWS
2017年12月28日 星期四
责任编辑：李梦依 联系电话：010-85672315 美术编辑：蔡兴

数字线索与数字孪生助力航空装备可靠性的提升

中国航空综合技术研究所 任占勇

美国空军在2013年发布的《全球地平线》顶层科技规划文件中，将数字线索（Digital Thread）和数字孪生（Digital Twin）视为“改变游戏规则”的颠覆性机遇，并从2014财年起组织洛克希德·马丁、波音、诺斯罗普·格鲁门、通用电气、普惠等公司开展了一系列应用研究项目，已陆续取得成果。其中，诺斯罗普·格鲁门公司主持的F-35中机身制造数字线索项目获得了2016年度美国国防制造技术奖。当前，数字线索和数字孪生受到业界高度关注。

数字线索与数字孪生的概念与内涵

装备数字孪生是对应于装备物理实体的数字模型，是面向装备全寿命周期，采用单一数据源实现物理空间和信息空间的双向连接。装备数字孪生的构建基于设计阶段生成的物理、功能模型，并在随后的制造和使用阶段，通过与装备物理实体之间的数据和信息交互，不断提高自身完整性和精确度，最终完成对装备物理实体的完全和精确描述。数字线索提供访问、综合并分析系统寿命周期各阶段数据的能力，使军方和工业部门能够基于高逼真度的系统模型，充分利用各类技术数据、信息和工程知识，在装备物理实体与数字模型之间，进行无缝交互与集成分析。装备数字孪生是对象、模型和数据，而数字线索是方法、通道、链接和接口。通过数字线索交换、处理装备数字孪生的相关信息，其中数字孪生在数字线索中的接入是关键，美国正制定在此领域的相关标准。

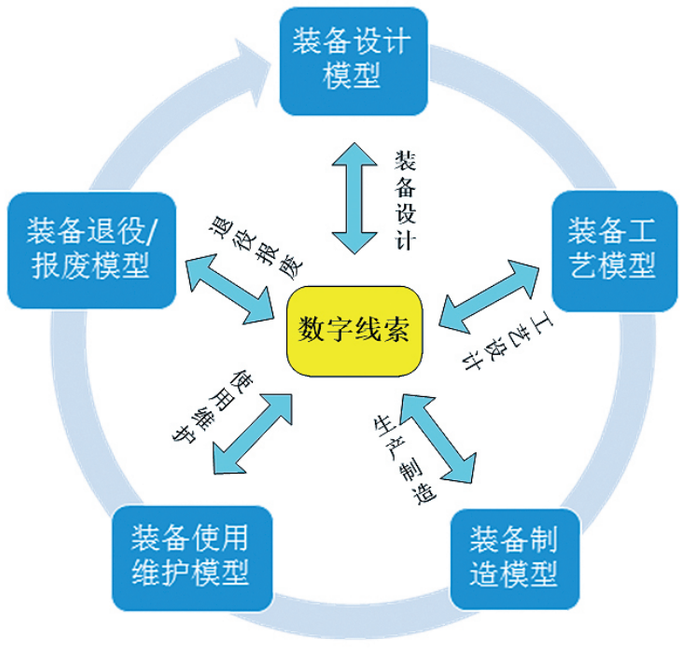
美国《航空周刊》预测，“到2035年，当航空公司接收一架飞机的时候，将同时验收另外一套数字模型，它就像飞机的一个忠诚影子，伴随一生，从不消失”。

装备数字孪生和数字线索对可靠性的影响

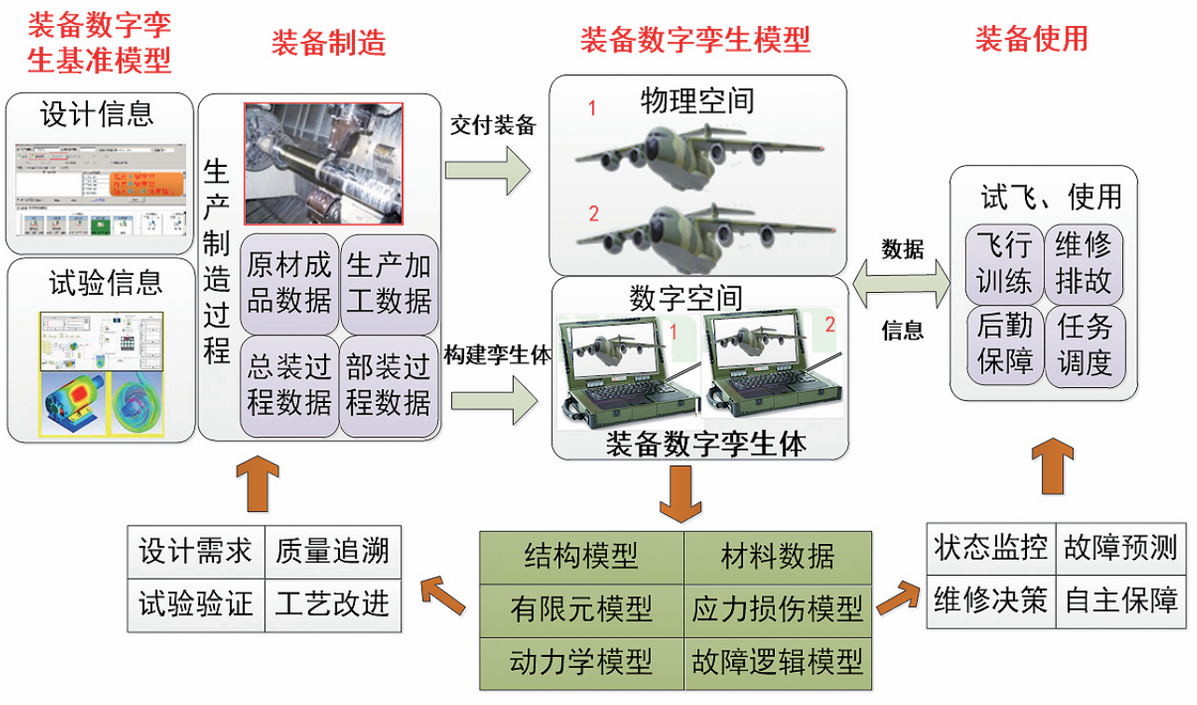
基于装备数字孪生和数字线索，在方案阶段可以形成技术可行、经济可承受的可靠性方案，可以大大减少需求迭代时间。现代装备具有结构组成复杂及其技术含量高等特点，新研装备在技术方案的设计过程中需要同时考虑许多因素，装备可靠性要求的实现还涉及与性能、进度、费用的综合权衡，因此可靠性指标实现的过程是一个复杂的工程活动过程。在新研装备的方案阶段，根据其性能和任务要求，基于历史型号的设计、试验、制造和使用数据，建立装备的数字孪生，并进行模型计算和仿真，分析可靠性对装备作战效能的影响，对可靠性、装备性能和费用进行综合权衡。在此基础上对可靠性合同要求的技术可行性和经济可行性进行分析，确定可靠性要求的验证时机和方法，明确装备故障判据。

装备工程研制过程集中了大量知识经验的复用及其工程技术和管理方法的创新。为了保证这一复杂的系统工程有效且低风险地进行，需要对型号各层次、研制过程各个阶段要做的事情进行系统性的定义与策划。由于在航空装备的研制过程中，普遍存在着与相似原型产品构型具有继承性关系的演进式设计特点；数据线索为针对产品研制薄弱环节确定产品可靠性提升措施，有针对性地开展了产品可靠性改进工作策划与实施，提供了数据支撑，确保整个工程项目研制过程中的工作项目（活动）能及时、协调和全面地开展，最终达到可靠性要求。

在装备生产与使用阶段，以装备数字孪生模型为核心，一方面基于装备使用环境数据、任务数据、维修保障等数据，对装备进行故障预测，支持装备的任务规划；另一方面，通过装备与其数字孪生之间的数据及信息交互，使装备数字孪生得到不断修正，逐步提升模型的精确性，实现定制化的维修和保障。结合增强现实等智能技术，数字线索还将进一步提升现场实时维护能力。通过数字线索提供实时的数据、检查清单和反馈，装备维护人员的活动被记录并添加到数字线索中，未来的维护人员可在任何地点及时看到一架飞机已完成的相关活动流，以优化持续保障活动。



装备数字孪生和数字线索的关系。



生产与使用阶段数字孪生模型的作用。

基于数字孪生和数字线索的装备可靠性工作设想

由于装备数字孪生的构建是基于全要素、全生命周期的数据，主要包括：装备设计数据、装备工艺数据、装备制造数据、装备总装数据、装备检验数据、装备试飞数据、装备使用数据，以及装备研制企业的质量能力数据、基础元器件原材料数据等，为装备可靠性提升提供了数据依据。将新装备与相似型号在功能、组成、使用环境、制造工艺等方面进行比较，定量分析新装备的改变对可靠性的影响，确定最终要开展的可靠性工作；在各项工作执行的过程中收集相关数据，形成能够支撑产品可靠性评价的实证材料，协助机关在产品研制的里程碑节点进行决策。在使用过程中基于数字孪生和数字线索对装备进行故障预测，进而实现航空装备的定制化维修。

（1）建立基于参数模型的材料工艺优化能力

装备数字孪生和数字线索可将材料工艺活动集成到系统工程活动前期：利用各产品数字孪生的几何物理特性、功能特性以及制造工艺特性，建立有充分材料工艺依据的成本、重量、性能等方面的参数模型，建立有充分物理特性依据的材料工艺模型，将这些材料与工艺模型和详细设计分析模型链接，并自动更新模型。这将改变从初步设计向详细设计过程中需求单向流动的现状，通过探索设计和制造的权衡，量化系统性能的界限和不确定性，优化研制流程，尽量减少在后期的缺陷，大大降低研制周期和成本。

（2）基于数字孪生的装备全寿命周期构型管理

装备数字孪生可以在装备构型验证和审核的过程中建立与相关研制数据之间的关联，省去了原来传统构型纪实和构型验证审核过程中人工进行模型和研制数据之间的对比工作，大大增加审核效率和一致性判断。同时，产品数字孪生模型中包含了产品的构型状态数据，为构型更改控制过程中实现快速动态响应，预见产品质量和制造过程，推进设计和制造的高效协同，确保设计和制造的准确执行奠定了基础。在装备使用阶段，通过数字线索实时掌握装备的任务数据、环境数据、维修保障数据，最终实现基于数字孪生的装备全寿命周期构型管理。

（3）建立制造过程对可靠性影响的量化能力

首先，构建产品制造过程可靠性影响因素数据集。基于产品和过程控制要求以及历史数据分析，确定产品制造过程中的工艺参数、产品检验检测、原材料元器件等数据的采集需求，并借助于数字化和信息化手段，实现对大批量数据采集的自动化和便捷化，为开展基于数据的可靠性分析奠定基础。

其次，开展产品可靠性及其制造过程影响要素关联关系的量化分析。借助于深度学习、机器学习等大数据分析技术，面向系统、设备、零部件等不同层级产品，构建产品制造缺陷与影响因素的分析模型，识别关键影响要素，为开展工艺改进和优化提供输入。

(4) 建立使用过程航空装备故障预测能力

数字孪生和数字线索促进航空装备可靠性实现从“事后评价”向“事前预测”的转变。

a) 航空装备可靠性影响关键因素分析。

基于航空装备使用过程中产生的大量数据，分析不同装备、地理环境、使用强度、维修保障方式等因素对装备可靠性的影响，获取共性的关键影响要素，为开展航空装备故障预测奠定基础。

b) 航空装备故障预测。

基于影响装备可靠性的关键因素，采取基于数据驱动的机器学习方法，建立装备故障的预测模型，采用一段时期内的装备实际使用数据对预测模型进行训练，达到要求的预测精度，从而实现装备的故障预测。

(5) 实现航空装备的定制化维修

数字线索的应用使航空装备实现个体化、综合化、可预测和预防性的“使用前保障”。通过数字线索的信息交互机制，实现传感器数据、使用数据等真实状态数据的完全同步，在每次飞行后，根据结构现有情况和历史载荷，及时分析评估是否需要维修，能否承受下次特定任务的载荷等。单个产品的历史数据对操作、维修和工程人员开放，针对每个产品定制预先维修或翻新方案。维修将基于对损伤和损伤先兆的早期分析识别，大部分保障工作转变为寿命周期中的损伤预测、预防和管理。

浅谈国外航空发动机大数据应用

大数据是信息化发展的新阶段。飞机上传感器数量最多的部位就是发动机。一个现代航空发动机，每10毫秒就能生成几百个传感器信息，每次飞行能产生1TB数据。随着传感器技术、数字化技术的不断发展，航空发动机可测量数据类型越来越多，数据量越来越大，发动机大数据的复杂性和多样性对数据收集、存储和处理的要求也越来越高。

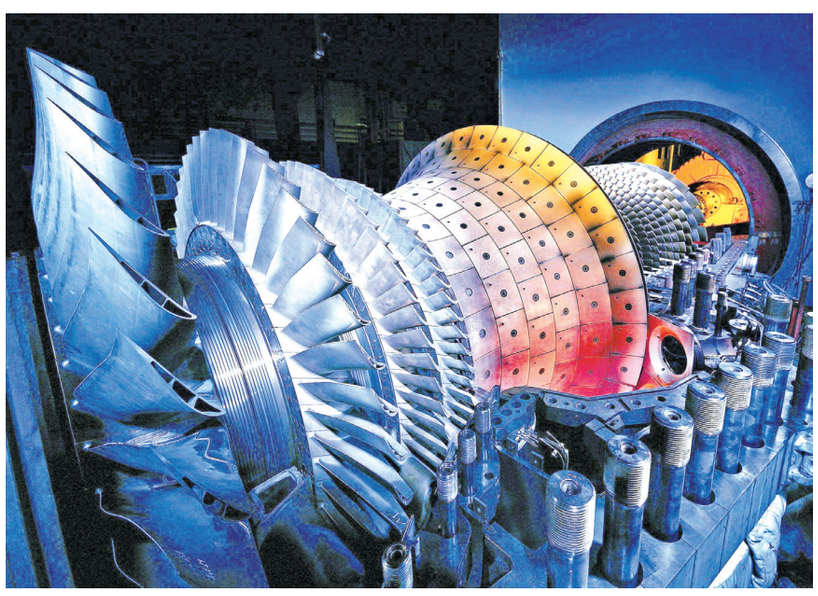
大数据不仅仅依靠数据的体量，可视化分析、数据挖掘算法、模型预测分析、数据质量和数据管理等大数据分析方法均已成为决定数据价值的关键因素之一。只有通过有效的数据分析才能获取深入的、有价值的、智能的信息。

为了进一步提高产品可靠性、改进运营效果，几乎所有发动机制造商都对大数据分析进行了大量投资，在设计、制造和售后服务环节应用了大数据流程，以保护和提升自身品牌。

设计阶段通过巨大的高效能计算集群，开展多方异地协同设计，对发动机产品进行高逼真度的仿真，产生大量数据进行分析，以优化设计方案。

生产制造阶段通过将数据联网，无论在工艺、计量还是质量管理方面都朝着物联网的方向发展。售后服务阶段采用健康管理平台，对每一台发动机中上百个传感器的数据采集进行及时地分析，致力于提前发现发动机的异常运行事件及可能的故障，提前警示是否需要保养，保证发动机产品的安全、持续运营。

罗罗是首先使用发动机产生的数据进行革新的原始设备制造商（OEM）之一，很早就利用大数据来安排生产和维修。一些业内人士也因此将其发动机称为“大数据引擎”。罗罗全球发动机健康监测中心为了监控上千台“遄达”系列发动机工作状态，建设了“发动机健康管理”系统（Engine Health Management EHM），这套系统可以让工程师知道发动机工作状况以便合理安排发动机使用和维修时间，同时为设计更合理的发动机存储参数。罗罗与微软合作开发“智能发动机”，收集和分析发动机的设计、生产、机队和运行方面的数据，以及了解天气条件、机场设施、飞机滑行情况和周转时间等。罗罗目前正在建立R2数据实验室，期望通过使用人工智能、机器学习和新的分析手段来对数据进行“财富”挖掘，从而实现成本的节约。实验室的主要目标是优化客户服务，满足客户随着购买的设备老化不断变化的需求。发动机操作员主要关心发动机的可靠性，燃油消耗，剩余价值和维护成本。为了优化这些因素，罗罗公司的可用性中心不仅收集发动机和零部件的数据，还收集航空公司飞行模式，天气，航线和飞行员行为等数据，R2实验室的人工智能科技对这些数据进行分析，让工程师根据发动机性能数据，对发动机进行远程维修或进行预防性维护。



2015年，普惠启动了十几个数字化分析项目，包括监测发动机性能的预测性模型等。为了将理论与行业前沿的专业知识相结合，普惠将合作范围扩大至IBM、麻省理工全球运营领袖项目及联合技术研究中心。普惠商用发动机服务平台“发动机智慧”（Engine Wise）依托大数据，致力于帮助航空公司与租赁公司有效地开展业务，提供包括机队管理计划、发动机大修服务、材料解决方案等主要服务。采用尖端的数据分析及实时信息帮助预测与预防运营中断的发生；改善与客户的沟通，推动与客户之间更加透明、更加紧密联系的工作方式。

GE致力于打造“传感器+大数据”的工业互联网模式。在维持发动机可靠性的同时，提高发动机的其他性能，同时避免发动机出现突发性故障而紧急返修是GE开展数据分析的目标。Predix是GE推出的全球首个专为工业数据分析开发的云服务平台，可以与各种云环境中的应用和服务进行无缝衔接，将其用于发动机状态监控，帮助发动机监控团队捕捉更多的数据，使数据分析变得更精确、更快捷。GE正在研发采用建模工具，将发动机的特定运行和性能历史以及客户期望的营利目标和技术性能目标等综合考虑在内，最终生成维修工作内容选项，包括定价和相关性能结果。

除了OEM厂商以外，法荷航维修工程公司、汉莎技术公司等（维护、维修与大修）MRO企业及供应商也在开发他们自己的数据分析功能。排气温度裕度、振动、燃料流量、轴转速、油压和可变静子导向叶片的位置都是MRO企业的重要测量数值，这些可用于运营过程中帮助客户确定发动机的哪些部件需要检查，以加快机库内的维修工作。

（陈韬）

“大数据”功能使制造商对MRO市场充满信心

近日，航空数据集团在伦敦召开“航空航天大数据”会议。飞机和发动机制造商都纷纷表示打算扩大其售后市场保障业务，将大数据作为其业务扩展战略的核心举措，以此改进航空公司飞行和维护运营活动。

自20世纪90年代以来，如同为赢得航空公司和第三方维护提供商给予的更多发动机大修业务机会的发动机制造商一样，空客和波音一直致力于不断增加其售后市场业务。然而，关于新一代飞机可用的运营和技术数据快速增多，可以通过集中分析信息的方式提高效率，这给制造商提供了为提高售后市场活动大展拳脚的机会。

空客公司服务主管Laurent Martinez曾在MRO欧洲会议上指出，目前大飞机制造行业受到空客和波音的垄断，MRO（维护、修理和大修）市场成“分段式”布局，其服务可以来自制造商、发动机和系统制造商、与航空公司相关的和第三方维护服务提供商及修理专家们。但他预测，未来将会出现整合的局面，制造商聚焦较大的售后市场，专业设备供应商成为较大型集团子公司，例如，联合技术公司收购罗克韦尔柯林斯公司，数字服务在飞机维护领域发挥着越来越重要的作用。未来十年各大公司在市场上的位置将会发生改变。

空客在今年举办的巴黎航展上提出了称为“Sky Wise”（智慧天空）的数字服务平台。空客表示，公司自2015年起就启动了对数字服务平台的研发，希望能为客户提供可用的飞机机载数据和分析工具，成为所有主要航空企业提升运营表现和企业营收的参考平台，还可支持数字化转型。一些大型航空公司（亚洲航空、达美航空、易捷航空、札幌航空、捷蓝航空和乐桃航空）已经成为该服务平台的“第一批使用者”。在飞行运营改进方面，Martinez预测，应用“智慧天空”数字服务平台的航空公司将节省2%到5%的燃油消耗。“智慧天空”数字服务平台的中心目标是分析飞机健康数据，以实施预测性维护，而不是在发生故障时更换部件或根据基于平均故障率而制定的常规性维护计划，进行日常检查过程中替换相关部件，通过应用该服务平台，可以在发生故障前自动监控设备，识别出性能降级后，完成零件的更换。Martinez预测，这样的话，运营中断情况可能会减少到30%。

数据可用性显然是研发分析功能的关键因素。空客最新机型A350客机每次飞行可传送约40万个参数，超过A380客机传送参数的60%。同时，A320系列客机可以为每次飞行提供400个参数，而A330客机可提供的传送参数约达1500个。

为了提高较老机型的数据量，空客计划从2018年起在A320系列客机上采用罗克韦尔柯林斯公司提供的数据记录和传输组件（FOMAX），将每次飞行的可用参数数据量增加至2.4万个。该组件可以将飞机维修和性能数据通过无线传输至地面或机组人员使用的移动应用程序上。在空客A330飞机上，该参数数据量被设置至4万个，FOMAX将用于现役飞机的改装。

数据增加也是引导客户识别并采用“智慧天空”数字服务平台的一种方式。Martinez认为，运营商应负责采集飞行中数据。但是，FOMAX信息只有通过“智慧天空”数字服务平台系统才能进行访问。空客服务部营销和业务副总裁在MRO欧洲会议上表示，如果运营商想要使用这些飞机数据并同意将其匿名信息与数字平台上其他航空公司的信息进行整合，可以选择订购免费的基础版“智慧天空”数字服务平台。对于空客公司来说，希望能在尽可能多的飞机和运营商之间实现应用。

为了给承运商飞机提供保障，空客已与众多维护提供商展开合作，构建名为“MRO联盟”的合作关系。MRO联盟组建前名为“MRO Network”，Martinez将被解散的MRO Network称之为是与制造商合作的维护提供商的“俱乐部”。新的联盟将与空客建立更加紧密的合作关系，共享技术信息。

Martinez认为，运营商将能够在联盟内部进行选择，这取决于提供商所拥有的能力以及航空公司运营区域，但是，可供选择的MRO联盟数量有限。

空客服务部去年增加了18%的收入，达到28亿美元，Martinez预测，该公司今年将以类似的速度增长。空客2016年的总收入增加了3%，达到670亿欧元（合780亿美元）。

（宗合）