

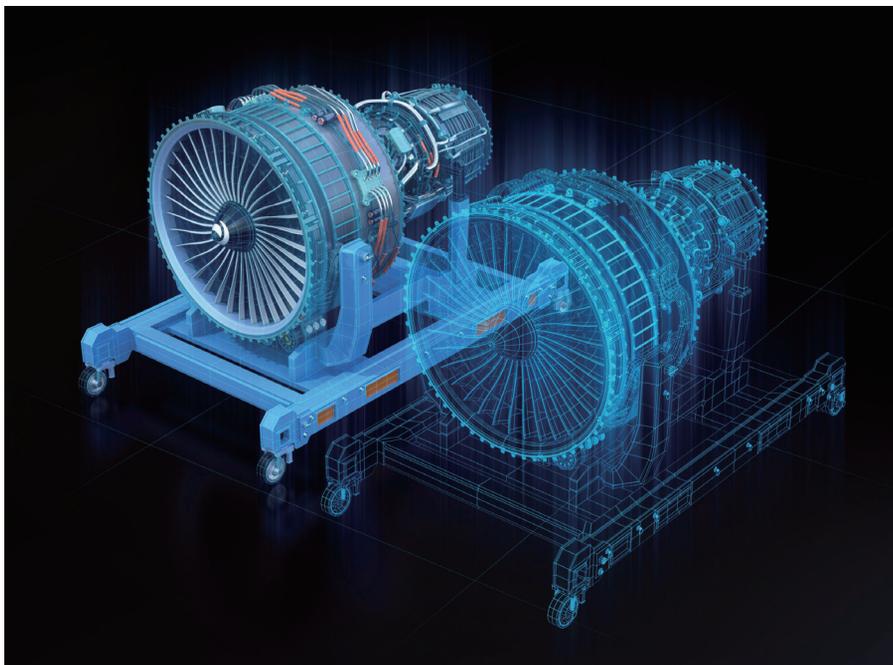
# 罗罗数字化转型之路

## The Digital Transformation Road of Rolls-Royce

■ 张强 李茜 王乐 / 中国航发涡轮院

由于数字技术和物联网的快速发展，罗罗公司认为新一代数据服务具备了深度发掘传统航空发动机行业潜在价值的可能性，并计划借此开创航空发动机数字化转型的新格局。

航空发动机作为航空领域的核心装备之一，是装备制造业的尖端，也是一个国家科技水平和经济实力的综合体现。在工业互联网、云计算和人工智能等先进科学技术的推动下，以“数字化”为特征的产品研制理念和发展模式，已经成为国际先进制造业技术创新发展的主流方向。在实现数字化转型的道路上，罗罗公司采取的主要措施包括提出智能发动机愿景、打造Azure云平台以及创建R2数据实验室，并在部分项目里进行了实际应用。



航空发动机数字孪生概念

### 提出智能发动机愿景

2018年，罗罗公司推出的“智能发动机”（Intelligent Engine）愿景在一定程度上描绘了航空动力的未来发展：借助数字化，通过更强的互联性、情境感知以及理解力，进一步提升发动机的可靠性和效率。其中，互联性是指与其他发动机、支持生态系统以及客户实现互通互联，实现多方信息双向流通；情境感知是指感知运行环境、制约因素和客户需求，实现无须人工干预的对环境的自动响应；理解力是指从自身经验和网络学习，调节自身行为，实现最佳性能。

数字孪生技术是支持智能发动

机愿景实现的关键。利用数字孪生，罗罗公司将客户需求快速转化为解决方案。先了解合作伙伴的需求，然后将这些需求转化为对产品和设施的明确要求，以提供最佳解决方案。此外，通过数字孪生，可以更加深入全面地了解复杂技术和产品开发过程中存在的潜在风险和机会，提升智能发动机开发的效率和精度。

罗罗公司将数字孪生技术应用在航空发动机的设计、制造、试验和运营阶段。设计阶段，数字孪生是一个部件或一台发动机的虚拟分

身，通过模拟真实情况测试和了解设备的运转和相关影响，用于发现和识别材料结构发生的任何振动、扭曲、压缩、疲劳等情况，提供极具价值的反馈信息；制造阶段，数字孪生帮助优化设备和资源调配，提升生产效率，通过仿真工厂模拟设备维修时间、工具校准及人员部署，能够计算和决定生产线的最优运作，以确保恰当的库存和部件可用性，并且能帮助优化供应链管理；运营阶段，数字孪生将制造、维修、运营采集的数据与飞行过程中环境

数据相结合，模拟机队服役状况，通过数字化模型及数学演算工具，充分了解和预测未来运营和维修的需求，从而更好地开展维护和大修以及其他售后服务，能够帮助客户减少运营中断，最大化资产可用性。

## 打造 Azure 云平台

Azure是微软公司基于云计算的操作平台，主要目标是以云技术为核心，帮助客户开发可在云服务器、数据中心、互联网和个人计算机上运行的应用程序。2016年，罗罗公司宣布与微软公司合作，致力于将航空工程和包括高级分析、物联网在内的云计算相结合，形成顶级解决方案，从根本上转变发动机相关的运行和维修工作，利用数字技术的力量变革航空业。罗罗公司在微软 Azure 云平台上建立了全新的数字化功能，利用 Azure 物联网套件从地理位置分散的不同数据源收集和汇总数据，并利用 Cortana 智能套件来深入挖掘这些数据，从而能够对更加广泛的航空运行数据进行管理和整合。

罗罗公司将 Azure 解决方案整合进罗罗的 Total Care 维修服务中，对大量发动机数据进行智能分析和预测，帮助航空公司排故、开展预测性维修、航油管理和航线规划等。

## 创建 R2 数据实验室

2017年12月，罗罗公司宣布开设R2数据实验室，旨在提供创新的数据分析，推动数字化新时代的到来。罗罗公司希望借助R2数据实验室，在效率、可用性、风险与合规等三方面为客户创造更大的价值。在效率方面，提升资产运行和维护，降低运营成本；在可用性方面，最大化资产可用性，提升生产效率；在风险与合规方面，优化风险管理，自动化合规流程。R2数据实验室的主要业务是收集、处理和分析产品设计、制造、运营和环境等方面的数据。数据采集完成后，由数据分析专家使用最新的技术，如人工智能进行数据分析，再由专业知识深厚的发动机技术专家把关，确保数据分析结果的正确性和实施过程中的可操作性。罗罗公司还积极与软

件供应商、学术界等外部伙伴协作，扩充能力和资源，以更快适应客户不断变化的要求。

截至2021年年底，R2数据实验室已开发了技术洞察（intelligent insights）平台和 Yocova 数据交换协作平台。罗罗公司在全球设立了多个航空公司支持团队（AST），主要任务是评估机队运行故障和问题，并提出应对措施。

技术洞察平台旨在让AST能方便地在同一位置捕捉、分类和整理报告数据。该平台能够创建大量高质量数据库（是AST以前访问的数据库规模的10倍），然后通过分析来发现影响可靠性的趋势和常见问题。此外，该平台能够呈现和特定事件相关的所有数据，并根据以往类似事件的发生，预测潜在问题和原因。经过一段时间的运营经验积累后，还能让AST了解运营商整体机队的延误和取消率，以评估所实施的举措产生的影响，进而提升可靠性。

Yocova 数据平台可供航空专业人员互相联系，从而协作、控制商业化数据源及应用程序。该平台旨在帮助用户管理复杂的数据环境。新加坡航空公司是首批大型航空公司参与者，目前正在使用 Yocova 进行内部协作，并与罗罗公司合作开发应用程序。罗罗公司表示，Yocova 具备独特的优势，它可以保持数据可见性，且可以控制用户权限、使用时间和数据容量等。

与此同时，为实现智能发动机愿景，R2数据实验室正在收集大量数据。通过先进的分析工具和工业人工智能技术来分析和处理数据，最终实现四大关键能力：一是设计优化能力，利用丰富的运行和环境

**R<sup>2</sup> Data Labs**

为客户创造更大价值

通过数据创新，R2 数据实验室用全新方式实现：

- 1. 降低成本
- 2. 提高效率
- 3. 创造价值

效率：降低运营成本

可用性：提升生产效率

风险与合规：自动化合规流程

民用航空  
防务  
海军  
民用技能  
动力系统

ROLLS ROYCE A Rolls-Royce solution

罗罗公司的R2数据实验室

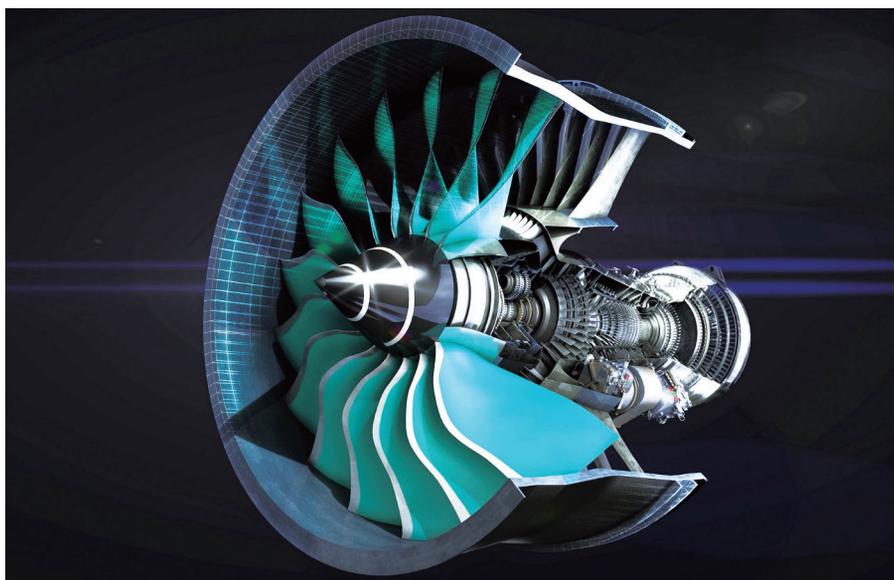
数据来模拟不同部件设计方案的表现和服役时长；二是全生命周期预测能力，利用数字孪生技术，通过详细模拟发动机的未来服役环境来准确预测发动机及其部件的剩余寿命；三是机队规划能力，挖掘超过25年的服役数据，了解如何通过调整客户机队运营来提升飞机的效率和可用性；四是维护、修理和大修（MRO）监测能力，通过捕捉老龄部件的实际状况来建立闭环的自我学习，为设计、制造和使用提出改进意见。

R2数据实验室是罗罗公司数字创新的催化剂，提高了罗罗公司内部数字化的成本效率。在此基础上，2022年3月，罗罗公司宣布成立R2工厂，专注数字化转型，以帮助其他组织应对最严峻的工业挑战。R2工厂由R2数据实验室演化而来，R2工厂正在邀请客户与其合作，将为客户的数字化转型遇到的挑战提供解决方案。方案将先进的数据分析、人工智能和机器学习与数字文化变革、深厚的领域知识和系统工程专业知识相结合。

## 数字化技术的实际应用

### 遛达发动机

发动机健康管理（EHM）系统用于传输数据从飞机发动机转移到地面的运行中心，用来记录和监测发动机的性能，确保其可用性。过去的几十年，EHM系统一直是罗罗发动机的重要技术特征，如遛达500发动机电子控制单元中就内置了发动机健康管理系统，而最新的EHM系统能够比以前的版本多测量数千个参数，还能监测发动机的全新部件。



“超扇”发动机

罗罗公司通过研究空气湿度与涡轮燃气温度的关系，用于更好地预测部件寿命和维修方法。例如，遛达XWB发动机的一种预测服务需求的方法是读取涡轮排气温度，但该数值会受到湿度的影响，使得发动机看起来比实际更早需要维修。罗罗公司使用Azure云平台开发了应用程序，快速访问遛达XWB发动机服务的每个机场的准确空气湿度数据，准确分析涡轮排气温度对发动机的影响，修正调整维修时间。这样可以更准确计划遛达XWB发动机的在翼飞行循环，增加客户的发动机可用性。

此外，罗罗公司将预防性检查贯穿遛达XWB发动机的全生命周期。通过将数据录入数字孪生体，对发动机组件的实时行为进行建模，从而更准确地判断零部件是否出现磨损，帮助提前发现潜在问题，相应调整维修计划。罗罗公司还利用数字孪生技术修理整体叶盘，提升遛达系列最新产品XWB-97发动

机的效率。

### “超扇”发动机

罗罗公司的下一代大型商用发动机“超扇”（UltraFan）与遛达发动机相比，燃油效率提高了25%，污染物排放降低了约25%。“超扇”发动机的每个风扇叶片都有一个数字孪生数据模型，可以存储真实的测试数据，从而使工程师可以预测使用中的性能。

罗罗公司为“超扇”发动机建造了全球最大的80号室内试车台。

80号试车台在自动化方面：确保了测试的可重复性和一致性，同时减少操作系统所需的工时；提升了远程监控和控制功能，自动安全触发；集成的测试程序允许完全自动化的测试；自动油门能力与发动机和设备的可编程逻辑控制器（PLC）实现集成；实时报警检查，违规操作报警响应（< 5ms）；可生成测试日志表和自动报告；用户友好的测试配置输入与重复检查；支持无人操作。



罗罗公司测试用于B-52H轰炸机换发项目的F130发动机

在可扩展性方面：网络可扩展满足任何测试环境中的需求；支持任何数量的仪器节点发布数据，并允许其他的数据订阅者应用程序处理和测量数据；可以采集数百至数千个测量通道；可用于研发和MRO生产环境。

在可视化方面：提供了一个完全可定制的可视化接口帮助通讯和处理测试数据；完全机构化的实时图形数据显示窗口；高度结构化的报告可以应对任何标准；定制报告和评审工具。

在集成性方面：满足标准通信协议的仪器不需要额外的驱动程序；与动态数据分析系统相结合可使得单个操作员可以控制数据收集的所有方面；与其他数据采集系统无缝集成。

与现有的试车台相比，80号试车台内嵌的数据系统功能更强大，更复杂，能以最快时间将数据直接传输至安全存储，并首次连接到分析模型和工程师。错综复杂的传感器网络收

集发动机的1万余个不同参数数据，还能以每秒20万个样本的速率探测到最微小的振动。这些数据有助于更好地了解发动机，监控每个组件在各种条件下的表现，并为将来改进发动机的可用性和效率提供依据。

### B-52H轰炸机的商用发动机替换项目

B-52商用发动机替换项目（CERP）是美国空军计划通过更换老旧的TF-33发动机使B-52H延长服役到2050年。新发动机的平均大修间隔大约为30000h，要大于B-52H在剩余服役周期内的计划飞行小时数，因而很可能在全生命周期内无须大修。在竞标过程中，罗罗公司采用数字建模技术“制造”了B-52H轰炸机的机翼，并安装了该公司的F130发动机。借助数字模型，罗罗公司能够为美国空军演示其发动机和换装模式将如何降低风险，从而高效、经济且按时地换装该发动机。此外，数字模型还展示了如何更轻松地完成维修工作。

2021年9月，美国空军宣布罗罗公司成为CERP计划的赢家，将为所有76架B-52H轰炸机制造608台发动机以及备件。罗罗公司项目负责人表示，数字技术已成为罗罗未来飞机和航空发动机研制的重要手段。罗罗公司的设计方案可与客户分析，不仅是开发全新的发动机，还有开发全新的飞机，都会因此缩短周期。

罗罗已经为B-52发动机维修人员开发了虚拟现实（VR）培训软件，可以降低培训新维护人员的成本和风险，并提高安全性。更重要的是可以为世界各地的维修人员提供实时、全天候的全球支持能力，即无论飞机部署在何处，维修人员都可以通过VR培训系统与罗罗技术专家联系。

## 结束语

数字化转型并非一蹴而就的过程，虽然实力雄厚，但罗罗公司并未冒进发展。虽然物联平台、R2数据实验室和智能发动机是新措施，但其背后是罗罗几十年的数据积累和使用经验。对于数字化转型，罗罗公司R2工厂的首席执行官表示，从本质上讲，成功的数字化转型是一场彻底的模式变革，只有建立起涵盖所有利益相关方的高效生态系统才能实现该目标。与一流的伙伴建立广泛合作关系，不但能够确保罗罗充分利用时下最好的开源技术，获得其数据生态系统的各类支持，获得更全面的数据，从而使公司能更灵活、更敏捷地响应、适应客户不断变化的要求。

**航空动力**

（张强，中国航发涡轮院，工程师，主要从事航空发动机设计）