

数字工程的关键技术：数字线索

The Key Technology of Digital Engineering : Digital Thread

■ 王巍巍 许多 / 中国航发四川燃气涡轮研究院

数字工程是基于模型的工程。数字线索作为数字工程的关键技术，通过快速生成降阶模型，创建权威真相源，提供链接产品全生命周期所有数据的能力，支撑复杂系统研发关键点决策，为缩短复杂产品研发周期、降低成本和实现敏捷研发提供了可能。

美国国防部在2018年颁布了数字工程发展战略，并将该战略定义为美国军工行业的工业4.0。美国国防采办系统的改革是实施数字工程的最大推动力，因为国防采办的痛点之一是在风险决策点上缺乏足够的支撑。数字工程作为基于模型的工程，能够通过引入创新技术，建立跨学科、跨领域的模型群，通过产品全生命周期内单一真实数据源，实现各个阶段数据的关联、管理和可追溯，支持产品从概念设计到报废全生命周期所有决策点的活动。数字系统模型（DSM）、数字线索（DT）和数字孪生（DTW）是数字工程的三大关键技术（见图1），三者之间的联系密不可分。数字系统模型是实施数字工程的基础，数字线索是对数字系统模型进行访问、查询、可视化转换、建立链接和更新数据的手段，而数字孪生体是对在建系统综合的、多物理和多尺度的概率模拟，是在数字线索支持下开展的。本文重点介绍数字线索，数字工程通过引入数字线索技术，能够为国防采办关键决策点提供必要的支撑，使决策真正基于数据。

数字线索技术提出背景

数字线索最早的概念是出现在航空

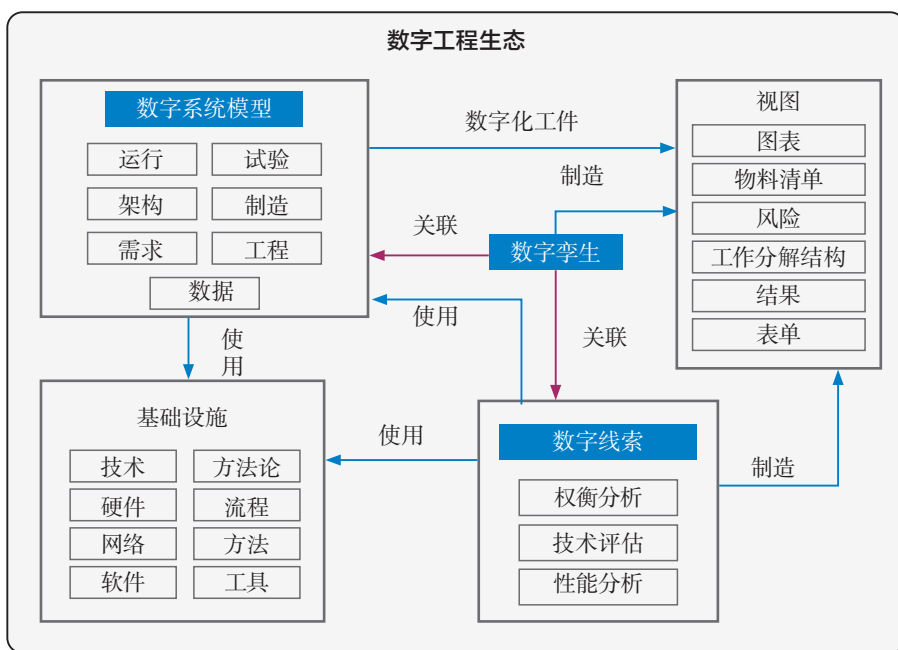


图1 数字工程关键技术示意

航天领域，随着数字工程的不断深入推广，美国空军开始着手开发数字线索技术，希望通过引入该技术在国防采办的关键决策点提供系统支撑知识，在产品全生命周期的早期能够采用虚拟样机开展试验，以及使政府能够拥有技术基线等。图2给出了美国国防采办的主要里程碑节点，图中以黄色突出显示要作决策的区域，可以看出在新项目开始之初关键决策点非常密集，而在这个阶段能给决策层提供有关系的

知识却是最少的，意味着项目失败的风险是极高的。

由图2可知，在初步设计评审这个里程碑节点处，开发方案建议书的需求一旦确定，后面要更改会很难，势必要在时间、成本和能力上付出巨大代价。主要原因是此阶段装备开发系统信息和相关数据严重不足，并要在知识提供不充分的条件下作出决策，而这个决策要顺着设计、制造依次传递，这样一来，就导致产品研发出现不可避免的反

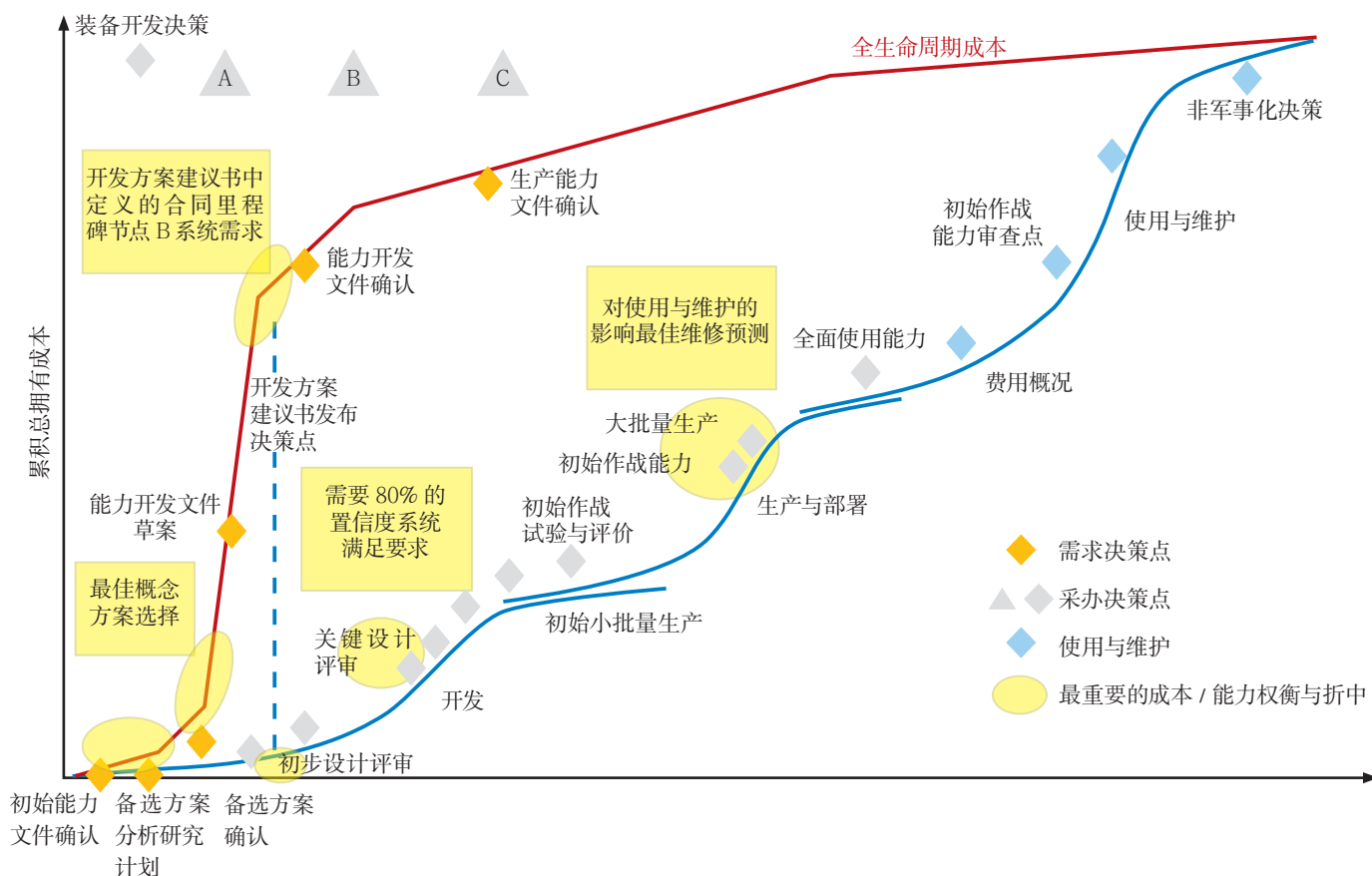


图2 国防采办全生命周期风险决策点示意

复；其次，在这个决策点之前开展的工作是由不同的功能组并行开展的，并没有考虑到由一个子系统向另外一个子系统传递的不确定性和对整体目标的影响；第三，所有这些工作是由不同的工程小组来完成的，工作成果呈现在传统的文档中，不利于与其他工程小组共享，也不利于在产品全生命周期中的后续环节调用；第四，在该阶段开展工作所采用的模型各种各样，包括低保真度模型、高保真度模型、计算数据、经验数据或试验数据等，这些多重、异构的数据和模型没有集成到一个权威的数据源中。

数字工程战略的重要意义是提出一个基于模型的工程方法，使用权威真相源来更好地支撑决策。数字工

程的本质是要发展和创造权威的数字化代理真相源，而这个真相源要依托数字工程的关键技术数字线索来创建。

数字线索的本质 链接所有可用数据

在《全球地平线》顶层科技规划中，美国军方对数字线索的描述是使用数字化工具和数字化的表达方法开展设计、评估和全生命周期的管理。在数字化生态系统中，把复杂产品全生命周期各个阶段的数据，按照一定线索连接起来，是数字线索的内核。数字线索以数据作为主线，把所有可用的信息联系起来，贯穿在复杂产品研制的全生命周期各个环节，如图3所示。数字线索是一个数据的驱动架构，通过先

进的建模与仿真工具建立一种技术流程，将生成的所有信息链接在一起，充分利用各类技术数据，信息和工程知识的无缝交互与集成分析，完成对研发项目成本、进度和风险的实时分析与动态评估。数字线索作为一个可扩展的、动态发展的框架，随着产品研发进程的推进，相关数据不断更新、校准和验证。

数据是数字工程实施的基石，在产品研发全生命周期内采用权威的数据作为技术主线，没有数据无法开展数字工程活动。在美国空军提出的数据策略中明确提出了5点要求：可见，即要发现已经存在的数

数字线索把产品全生命周期所有可用的知识连接起来用于决策

——数字线索在产品全生命周期各个阶段的增量

$$D_i \in I_i \subseteq P_i \in \times T_i \times D_i$$

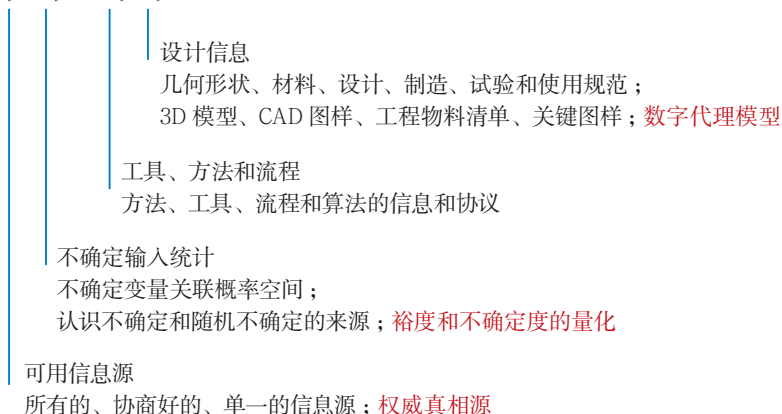
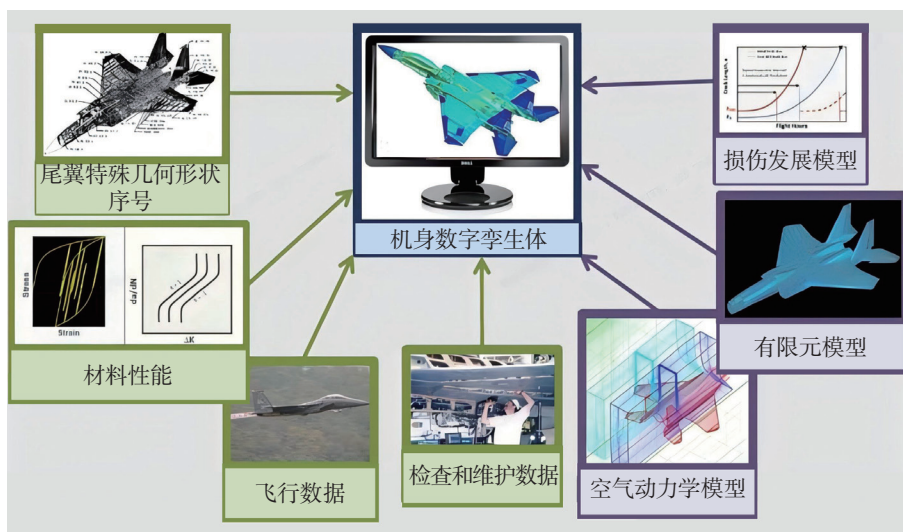


图3 数字线索链接所有可用信息示意

即这些数据可以与外界交流；可信，即这些数据是可靠的、真实可用的。

数字线索为这些数据的流动、关联、使用和访问等提供了支撑，通过采用该技术，将为复杂产品的研发提供以下6个方面的能力。一是提供访问数据的能力，数字线索的形成可以实现对复杂系统全生命周期所有活动数据的访问能力；二是整合数据能力，数字线索的形成可以将复杂系统全生命周期产生的各种分散数据整合转换为可操作的信息的能力；三是关联数据的能力，数字线索的形成可以把复杂系统所在企业的数据、信息和知识系统关联，使之相互作用；四是传递数据的能力，数字线索的形成在正确时间将正确的数据传递到正确的地方提供了条件，建立双向沟通能力；五是融合能力，数字线索的形成可以实现虚拟世界与物理世界之间数据融合的能力；六是数据反馈能力，数字线索的形成可以将复杂系统全生命周期各个阶段的数据汇集到一起，实现全生命周期及整个价值链的数据反馈。

数字线索是把复杂产品全生命周期各个阶段的数据连接起来的纽带，该纽带将为产品本身及其数字孪生体提供访问、整合和转换的能力。数字线索贯穿产品全生命周期和整个价值链，把所有可用的知识关联起来，能够实现数据的全面可追溯、双向流动和交互。图4以飞机数字孪生为示例，给出数字线索数据驱动能力。



数字孪生需要的数据和模型全部来自数字线索

图4 数字线索技术提供数据驱动架构示意

创建权威真相源

数字线索的本质是要开发一个权威的数字代理，即权威真相源，目的是为系统全生命周期各个阶段提供所需要的基础数据信息，支撑决策点。数字线索是把降阶模型、系统物理原型经验数据、试验测试数据和工程统计数据结合起来，形成权威的数字表达，来描述系统的状态。在系统全生命周期各个阶段都有一个由数字线索技术建成的权威数字表达，各个域都可以使用，其中包括工业界、政府和军方都可以通过授权来访问，这样一来，每个域都使用同样的定义来表示系统的性能。

在产品全生命周期各个阶段都有相应的高保真的基于物理的模型，由于这些模型属于不同的领域，不利于在各领域之间的界面上共享信息，无法实施快速的参数分析，这样就不能在关键的决策点提供必要的支撑。数字线索技术要创建权威数字真相源，需要结合基于物理的

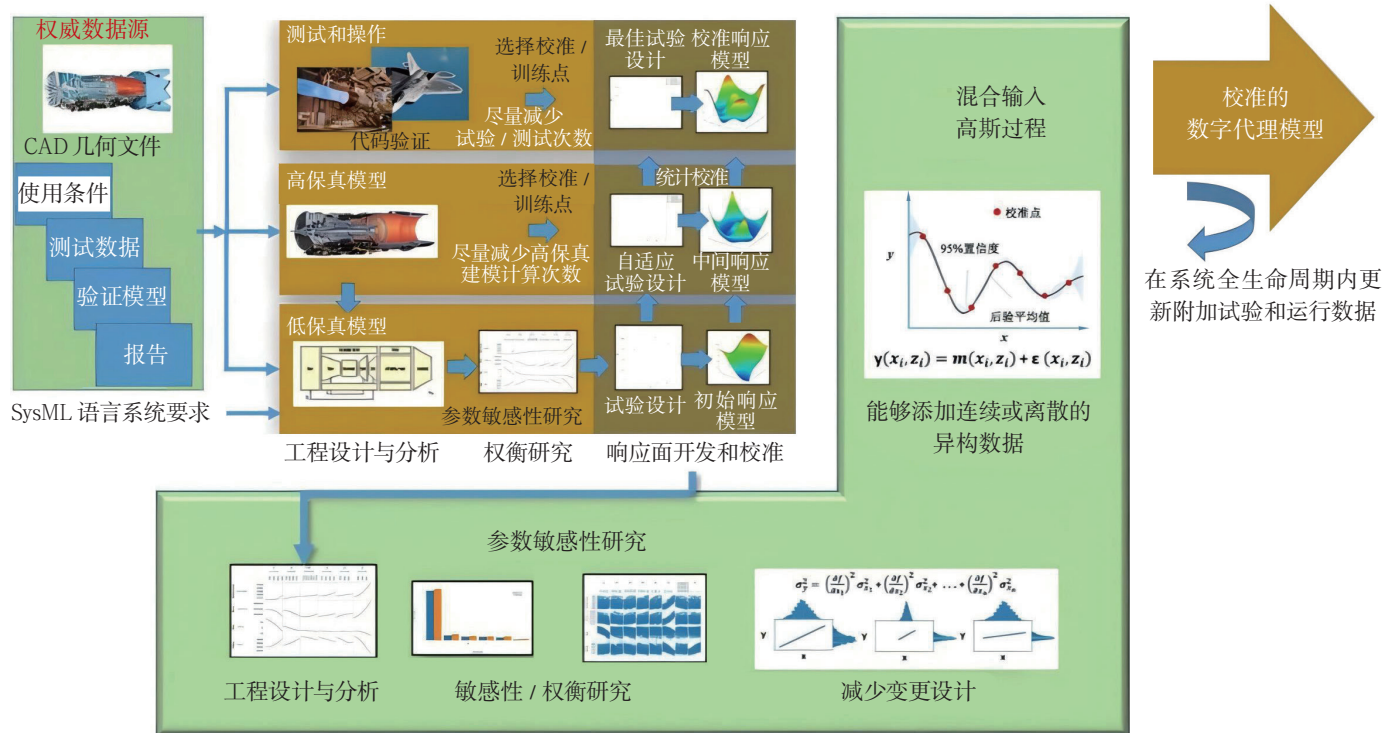


图5 数字代理模型的开发与验证

建模和数据，生成权威的数字表达来实现；需要具备多学科、多物理、高保真度的能力，以快速有效地生成降阶的代理模型。通过生成降阶代理模型，能够对参数的快速分析提供支撑，同时还打通了各个领域之间的壁垒，能够实现跨领域的信息共享。数字代理模型开发与验证示意如图5所示。

在早期的权衡分析中，使用高保真的模型作为校准基础，用最少的校准点校准子系统低阶的工程模型，以提高计算效率；接下来将结合低保真模型、高保真模型、地面试验数据和飞行试验等异构数据，创建权威数字代理，随后对子系统模型进一步明确并校准，同时明确相关的偶然不确定性等，然后再将单个校准的子系统的相关不确定性扩展到集成的多学科模型中，来量化整个系统的不确定性。

裕度和不确定度的量化是控制风险的关键，传统的系统工程是在产品全生命周期研发流程中使用技术成熟度（TRL）作为评价体系，通过技术成熟度等级规定何时转入哪一个产品阶段，规定产品的构型和相关接口的控制，但并不能提供系统的知识体系，无法化解决策风险。数字线索技术的应用，通过使用权威的数字代理模型成熟度（DSMRL），量化不确定性和获取缺失的信息，从而使不确定度达到可接受的程度，使风险可控。数字代理模型具有9个等级，表1给出数字代理模型的成熟度。

随着数字代理模型逐渐成熟和不断的校准、不确定性的量化，权威真相源将能够为复杂产品研发全生命周期各个里程碑节点的决策提供更多的背景知识，降低决策风险，这样一来，数字线索创建的权威真相源为决策分析就提供了保障。

数字线索应用探索

为了探索数字线索技术的应用，美国国防部推出了计算研究与工程采办工具和环境-航空领域（CREATE-AV）计划，主要目的是开发软件工具，重点是要开发出一套多学科、基于物理特性的仿真软件。CREATE-AV计划的实施为数字线索实现提供了快速且高效地生成代理表示的降阶模型的能力。数字线索通过降阶代理模型将复杂代码的输出转化为回归方程，从而快速处理物理模型的输出。降阶模型反应快速，以秒而不是小时或天来计算，并提供实时权衡，从而产生韧性强的解决方案来支持关键决策。

以风洞试验为例，多年以来美国在飞行器研制时，研发周期主要按照固定的标准流程安排，在过去的几十年时间里基本没有太大的改变。例如，大型固定翼飞机的风

表1 数字代理模型成熟度等级

等级	数字代理模型成熟度
1	未验证的、基本物理原理的确定性模型，没有详细的几何数据
2	使用一般的问题类、几何概念类的历史数据验证的模型；材料/部件级的降阶模型
3	通过降阶数字代理模型校准的低保真度模型；对参数灵敏度研究、变量设计、初始不确定性量化灵敏度分析；基于修正过的真实性能的初始模型
4	使用高保真模型和/或系统相关参数的实验室数据重新校准的降阶系统模型；接近最终组件、子系统的几何形状；识别认知和认知不确定性
5	利用部件/台架试验产生的经验数据重新校准降阶的系统模型；认知和认知不确定性扩展
6	利用系统/子系统原型开发的试验数据重新校准降阶模型
7	使用运行试验数据重新校准的降阶模型；交付的、在飞的几何体，从材料到部件和系统的综合管理的降阶模型
8	使用来自运行的数据重新校准降阶模型；交付的、运行后的几何体；产品全生命周期管理系统（PLM）中综合数字代理的生命周期管理
9	利用从已建成、已运行和已优化的系统中收集的数字孪生体和人工智能数据重新校准降阶模型

洞试验一直要求对特定构型进行约22000h的风洞试验，飞行测试需要6000~8000架次。尽管近年来试验测试技术不断进步，但飞机的研制周期还是不能缩短，因为目前的能力是每年试验时长为6000h左右。按照已有流程的规定，风洞试验大约需要3~4年，飞行试验需要6~8年，这也是虽然美国从20世纪90年代开始其风洞的试验能力提高了4倍，但对F-22和F-35等飞机的研制周期并未产生重大影响的主要原因之一。风洞试验主要是基于传统试验时数的要求，而不是针对具体的设计要求，与F-22飞机的风洞试验相比，尽管F-35飞机的飞行包线较小，但仍然需要22000h的风洞试验时数。而数字线索技术的引入将改变这种局面。通过采用该技术生成降阶代理响应面，响应面的不确定性要用统计工程方法来量化，而那些在响应面上仍然表现出高度不确定的区域，将成为风洞测试试验重

点，也就是说，风洞试验将主要测试那些风险比较高的点，而不是全包线所有点。这样一来，对一个标准的22000h风洞试验，其中气动力学/载荷试验大约需要15000h，使用数字线索可以减少60%，即9000h。如果风洞试验超过48个月，那么利用数字线索方法可以减少20个月，而相关的成本减少则是一半，减少的风洞试验成本和缩短的项目周期带来了更低的项目规划成本。对于一个1000亿美元的采办项目，在关键设计评审前应用数字线索方法有可能减少10亿美元量级的研制成本。

启示与建议

综上可知，数字线索作为数字工程的关键技术，创建了权威真相源，作为单一的、权威的数字代理贯穿产品全生命周期，从开始到报废，并把这个循环的所有信息反馈到设计最初，为下一次循环的开始提供

知识和经验。在数字工程实施的大背景下，为使在复杂产品研发时，能够有效利用数字线索技术，使决策分析基于数据，向相关工业企业部门建议如下。

首先开展数据识别，为了能够对数据进行有效的管理，要先识别出可用的、真实权威的数据。其次，要制定数据接口协议，通过这个协议可以把复杂系统全生命周期各个阶段产生的数据和模型联系起来，相关部门可以利用这个接口抓取所需要的数据和模型。再次，使数据流动起来，要打通复杂系统全生命周期各个阶段的壁垒，实现全生命周期数据的双向流动，目前复杂系统设计、工艺、制造、检验、使用保障等各个环节之间的数据存在断点，并未实现数据的连续流动；另外，基于模型的定义的出现虽然加强和规范了基于产品三维模型的制造信息描述，但仍停留在产品的设计阶段和工艺设计阶段，需要延伸到产品制造/装配、检验和使用等阶段，实现全生命周期数据覆盖和双向流动。最后，以权威数据源为基础，推动数字线索技术落地实施，把数字链接能力和权威真相源创建能力应用到武器装备研发的实践中，达到缩短研制周期和降低成本的目标，真正实现敏捷研发。

总之，对于作为典型复杂产品的航空发动机，应构建全生命周期数据管理体系，确保数字线索技术全面融入研发，加速实现智慧研发转型。

航空动力

（王巍巍，中国航发四川燃气涡轮研究院，研究员，主要从事航空发动机科技情报研究与科技翻译）