

数字孪生在压气机试验中的应用探索

Digital Twin in the Compressor Test

■ 张志博 江建玲 贾博博 / 中国航发动动力所

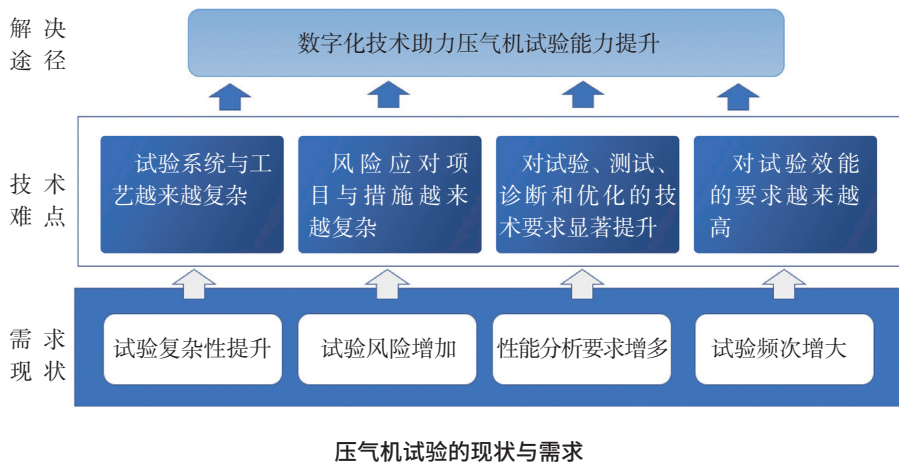
数字孪生技术已成为未来航空发动机研制数字化转型的一个重要发展方向。将数字孪生技术应用到压气机试验中，实现压气机虚拟试验与物理试验相融合，将显著提升压气机试验测试能力。

随着航空发动机性能要求的不断提高，压气机的设计难度也越来越高，压气机试验风险增大、试验频率显著增加。随着对性能分析的深度与广度的需求全面提升、试验效能的要求越来越高，试验系统越来越复杂、试验方案设计难度也随之增大，以现阶段传统的压气机试验技术应对未来的新需求存在较大难度。数字孪生技术具有高保真建模与仿真、系统集成度高、虚实映射、全生命周期数据有效管理等典型特征^[1]，将其引入到压气机试验，通过虚拟与物理试验相结合，可极大促进压气机试验技术的进步，应对未来压气机研制过程中对试验能力的新需求和新挑战。

压气机试验的现状与需求

早年压气机试验设备在建设时普遍缺乏数字化方面的考虑，试验的全过程（包括试验评估、试验方案设计、试验规划、试验实施、试验数据分析等各方面）严重依赖人的经验，导致在试验各环节需要投入大量人力，且执行过程需要反复尝试，从而造成试验效率低、风险高、科学性差等一系列问题。

数字孪生技术充分利用物理模型、实时测量数据、运行历史记录，集成多学科、多物理量、多尺度、



多概率的仿真过程，在虚拟空间完成数字化映射，从而反映对应实体的物理演化过程^[2]。作为一种充分利用模型、数据、智能化、多学科集成的技术，数字孪生可根据被描述对象特性的变化而不断演化对应的数字映射，充分发挥其连接物理空间和虚拟空间的纽带作用，提供更加实时、高效、全面和智能化的数据信息。近年来，随着数字孪生技术研究的不断深入^[1-5]，将其引入到压气机试验领域，建立虚拟与物理试验相结合的试验方法，形成对试验中压气机性能、试验设备参数的预测与判断，是实现压气机试验能力提升的一条创新之路。

数字孪生的发展及在航空

发动机的应用

“孪生”的概念最早源于阿波罗登月计划，美国国家航空航天局（NASA）构建了一个在地面上能够模拟太空飞行器的各种工作状态的实物孪生体，用于飞行准备期间开展训练，以及在执行任务期间辅助航天员进行决策判断^[6]。2003年，美国密歇根大学与NASA共同提出“数字复制品”的概念，是指一个或一组特定装置的数字复制品，能够抽象表达真实装置并可以此为基础进行真实条件或模拟条件下的测试。此概念与目前的数字孪生十分相近，具有3个主要特征：将孪生体数字化；引入虚拟空间，进行数据和信息的交互；虚实融合、以虚控实。随后该理念不断演化发展，并在2011



数字孪生技术的发展^[3]

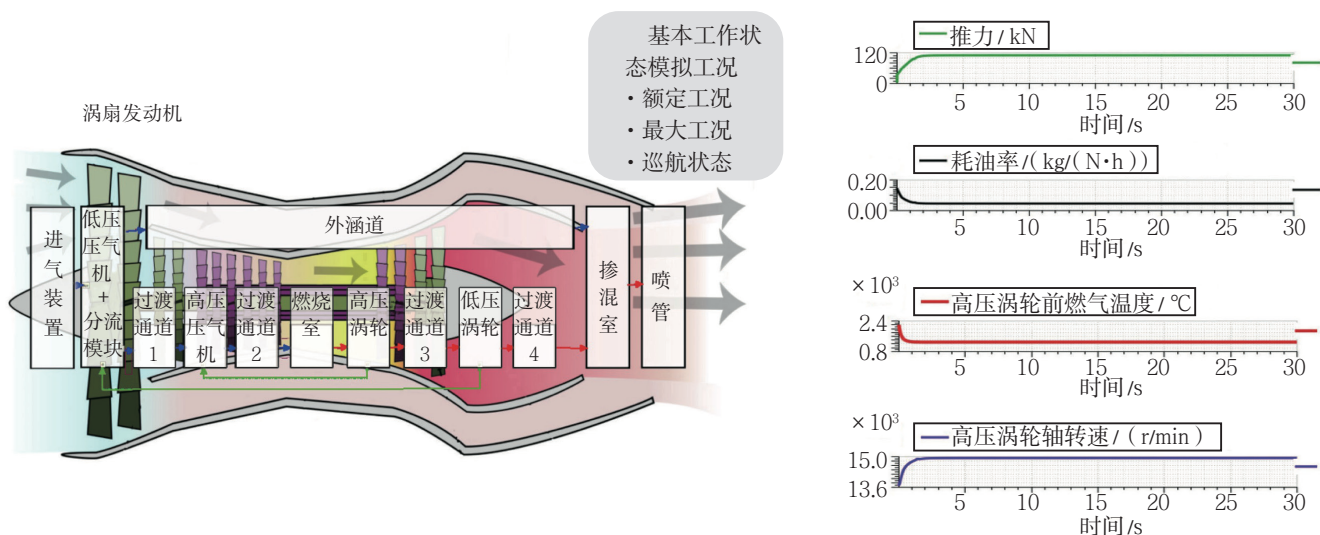
年被定义为“数字孪生”^[7]。2012年，NASA和美国空军研究实验室（AFRL）提出了未来飞行器数字孪生体范例，同年AFRL提出了“机体数字孪生体”的概念。2017年，从事信息技术研究与咨询的高德纳（Gartner）公司将数字孪生列为当年十大战略科技发展趋势之一^[6]。2017

年11月，美国洛克希德-马丁（洛马）公司将数字孪生列为未来航空航天与国防的六大顶尖技术之首^[2]。

近年来，随着工业智能化的不断推进和云计算、大数据、人工智能等信息技术的不断发展，数字孪生技术已逐渐从理论研究快速向工程应用转变，越来越多地应用到了

包括航空发动机在内的工业领域^[7-9]。2018年2月，罗罗公司提出了智能发动机愿景，希望借助数字孪生等数字化技术，建立航空动力的联通性，使发动机具有情境感知和理解能力。GE公司将数字孪生技术视为加速未来先进技术发展的一个重要推动力，并专门开发了数字孪生工业云平台Predix，目前正在该平台上开展先进涡桨发动机（ATP）的研制。俄罗斯联合发动机公司（UEC）下属的礼炮燃气涡轮发动机科研生产中心从2019年年底开始打造统一的数字孪生平台，可整合所有产品和数学模拟过程中产生的数据、文件和专业化软件程序。

数字孪生在试验中的应用主要是针对试验对象和环境开展建模，实现航空发动机在物理和虚拟空间的多学科、多尺度、多物理量的仿真与信息交互。俄罗斯土星科研生产联合体在进行发动机台架试验时，会与物理试验同时建立其数字孪生体，并开展虚拟试验，建立起物理空间与虚拟空间的互联互通，进而



礼炮燃气涡轮发动机科研生产中心开发的数字孪生工作平台^[2]

可实时掌握发动机性能，排查试验过程中的问题，俄罗斯计划在2024年将数字孪生技术引入至航空发动机试验，有效提高测试质量，减少试验项目。欧盟在“清洁天空”2 (CleanSky 2) 项目中专门安排了虚拟建模、虚拟适航等试验关键技术研究。罗罗公司的80号发动机试车台构建了虚拟数字孪生平台，模拟各种物理试验难以企及的运行场景，实现预测性维修，大幅度提升发动机的可用率和可靠性。法国航空发动机试验中心开发了航空发动机虚拟试验台SIMATMO，可以模拟真实飞行条件下发动机的运行状态，预测其性能。

数字孪生应用于压气机试验的方法探索

构建压气机虚实结合试验框架模式

传统的压气机试验方案的设计、试验性能的判断、试验风险的识别和压机性能的优化主要依赖试验人员的经验积累。而在工程研制中，全尺寸压气机具有转速高、振动复杂，并存在喘振或叶片颤振等风险，特别是压气机首次上台试验，很多压气机特性是未知或明显偏离仿真结果，留给试验人员现场判断和操作的时间非常有限。因此，需要构建一个能够实现对压气机物理试验过程进行实时映射的虚拟试验系统。该系统可以实现物理试验和虚拟试验数据信息的交互，依托物理试验为虚拟试验提供数据支撑，建立高可靠性的压气机试验模型；可以实时修正设备和试验件的工作状态，依托虚拟试验可以针对不同压气机气动特点，在虚拟空间获得详

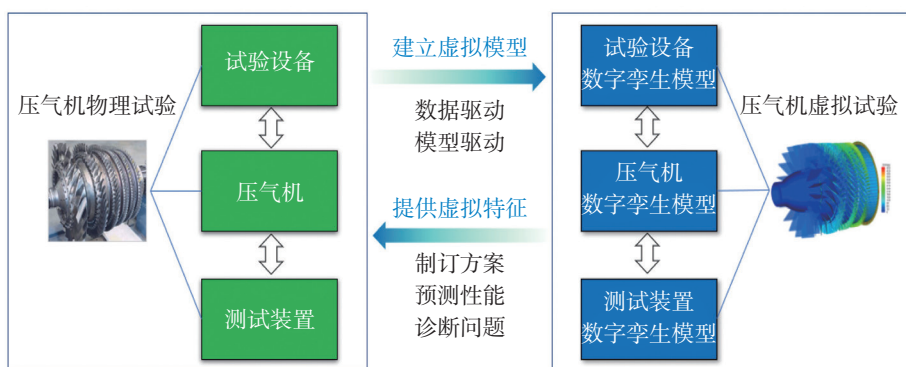


图 1 压气机虚实结合试验框架

细的压气机气动性能和关键流动特征，建立模拟试验环境的设备调控方案，方便评估测试数据的有效性；通过物理试验与虚拟试验的交互融合，为压气机试验提供更详实的数据信息，指导压气机试验方案的制订，全面提升压气机试验能力。

发展虚拟试验中的数字孪生模型

发展在虚拟环境能够反映压气机试验过程的数字孪生模型是开展压气机虚拟试验的关键。描述压气

机物理试验过程的要素主要包括试验设备、压气机试验件和测试设备。试验设备用于营造试验环境，调节压气机试验工况，特别是能够快速退出压气机失速或喘振状态。压气机试验件是被试对象，针对高压压气机、风扇等不同试验对象，其试验性能、调节规律和性能优化方向往往存在较大差异。测试装置主要包括与压气机气动性能相关的流量测量装置，以及温度、压力、方向、

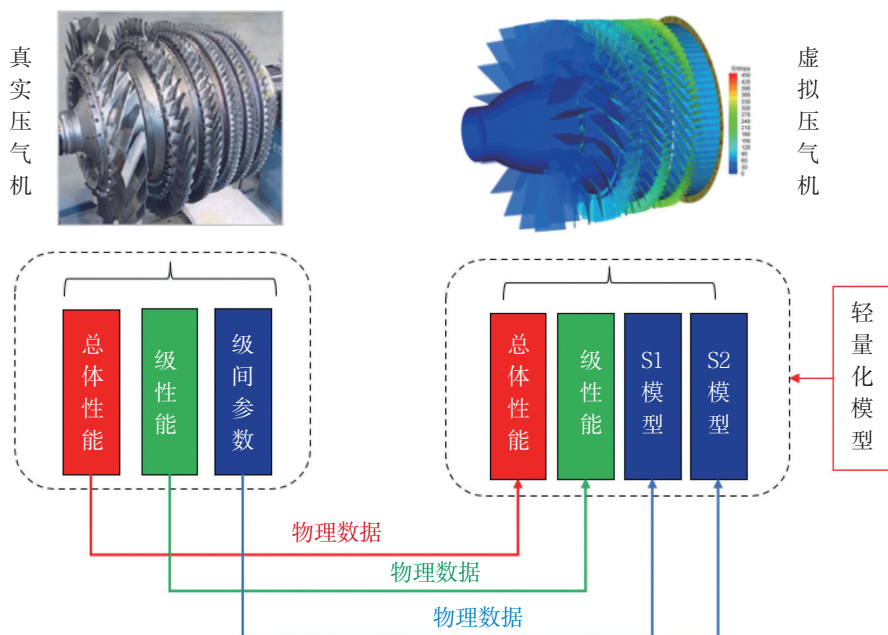


图 2 轻量化压气机数字孪生模型

速度等参数的测试受感部，决定了气动性能测试结果的可靠性。因此，在构建压气机虚拟试验时，要发展出针对试验设备、压气机和测试设备的数字孪生体，建立压气机试验在虚拟空间和物理空间的映射关系，从而实现在压气机虚拟试验环境下对物理试验过程的反映。建立物理模型的方法可以通过数据与模型驱动相结合的方式。为实现虚实试验融合，数字孪生模型一方面要具有较高的可靠性，另一方面要做到模型轻量化，可行的方法是针对不同对象提炼需要模拟的关键参数，从而将模型进行轻量化处理（主要构建一维模型和二维模型），实现对物理现象的快速模拟。

建立不同数字孪生模型的关联交互

在压气机的物理试验空间中，试验设备、压气机试验件和测试受感部之间具有强关联性。当试验设备的调节导致试验环境发生变化，压气机自身的工况以及特性参数也会随之改变。在一些条件下（如进气畸变度较大、排气压力过高等）甚至会引发喘振，测试受感部获得的物理参数也会随压气机状态改变而发生变化。当气流分离较大、流动较恶劣时，测试数据的可靠性会降低，甚至明显偏离真实情况。因此，面向不同种类的数字孪生模型，需要建立适应不同建模方法的模型数据信息交互关联平台，满足试验设备数字孪生模型、压气机数字孪生模型和测试装置数字孪生模型之间在虚拟试验空间中开展多变量信息快速交互的功能需求，以便在虚拟环境中快速获取压气机性能和流场，实时评估测试结果的有效性。

开展物理与虚拟试验的协同

在压气机试验过程中，建立物理与虚拟试验进行协同开展的能力是非常重要的。一方面，在试验过程中将测量的压气机试验数据与数字孪生模型的预测结果进行比较分析，并作为数据源实时修正试验设备模型、压气机模型和测装置模型，从而能够显著提高压气机试验数字孪生模型的预测精度。另一方面，基于修正后的数字孪生模型，以及在此基础上得到的虚拟试验结果，可以实现对压气机性能开展高精度预测，减少不必要的试验内容，提升试验效能；基于虚拟试验中获得的详细流场，评估被测物理量是否在测试受感部合理应用区间，实现对测试结果有效性的预判，降低性能误判风险；基于对压气机总性能、级性能、详细流场的综合智能化分析，可以评估影响压气机性能的关键因素，明确压气机叶片角度优化方向；基于对压气机特性、设备参数模型的多维度分析，可以提前预判压气机失速/喘振以及试验设备极限工作状态，指导压气机试验工艺的制定和现场操作，显著降低试验风险。

结束语

将数字孪生技术融入到压气机试验领域，发展虚拟与物理空间高度融合的试验技术，将打破原有的压气机试验模式，提高压气机试验方案设计和数据分析能力，大幅提升试验效能，降低试验风险，缩短试验周期。为达成压气机试验虚实结合的目标，还需要在压气机测量技术、轻量化模型建立和数据交互等方法上开展进一步的研究工作。可以预

见，数字孪生技术在压气机试验应用的不断深入，将显著提升压气机试验水平，在发动机研制方面发挥举足轻重的作用。

航空动力

（张志博，中国航发动力所，研究员，主要从事航空发动机试验技术研究）

参考文献

- [1] 刘魁, 刘婷, 魏杰, 等. 数字孪生在航空发动机可靠性领域的应用探索[J]. 航空动力, 2019(4).
- [2] 王乐, 周军, 崔艳林. 数字孪生在航空发动机领域的应用分析[J]. 航空动力, 2020(5).
- [3] 沈如松, 徐煥翔, 矫永康, 等. 数字孪生及其在飞行器领域应用[J]. 指挥与控制学报, 2021, 7(3).
- [4] Rosen R, Wichert G, Lo G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing[J]. IFAC-papers online, 2015, 48(3): 567-572.
- [5] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4).
- [6] 李欣, 刘秀, 万欣欣. 数字孪生应用及安全发展综述[J]. 系统仿真学报, 2019(3).
- [7] 郭亮, 张煜. 数字孪生在制造中的应用进展综述[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(4).
- [8] 李鹏, 潘凯, 刘小川. 美国空军机体数字孪生计划的回顾与启示[J]. 航空科学技术, 2020, 31(9).
- [9] 刘永泉, 黎旭, 任文成, 等. 数字孪生助力航空发动机跨越发展[J]. 航空动力, 2021(2).