

校核、验证与确认在航空发动机气动仿真中的应用与挑战*

Verification, Validation & Accreditation for Aerodynamic Simulation of Aero Engine

周帅 汪丁顺 付琳 李义进 付强 刘魁 / 中国航发研究院

气动仿真的可信度目前还没达到与试验同等的水平，在航空发动机设计研发中扮演的仅仅是预研和趋势性分析的角色^[1]。改变这一现状的关键就是提高气动仿真的可信度，而校核、验证与确认（VV&A）是进行仿真可信度评估的重要手段。

气动仿真的可信度一直受到高度重视。1992年，美国国家航空航天局(NASA)对计算流体力学（CFD）领域的投资高达1399.8万美元，涉及算法、网格生成和校核验证等。其中，校核验证模块占总投入的51%^[2]，其重要性可见一斑。2014年，NASA经过大量调研分析，预测了CFD中大部分技术的未来发展趋势，总结出技术发展路线图（如图1所示），指出误差评估（数值误差和模型误差等）是未来15年的重点研究方向之一^[3]。校

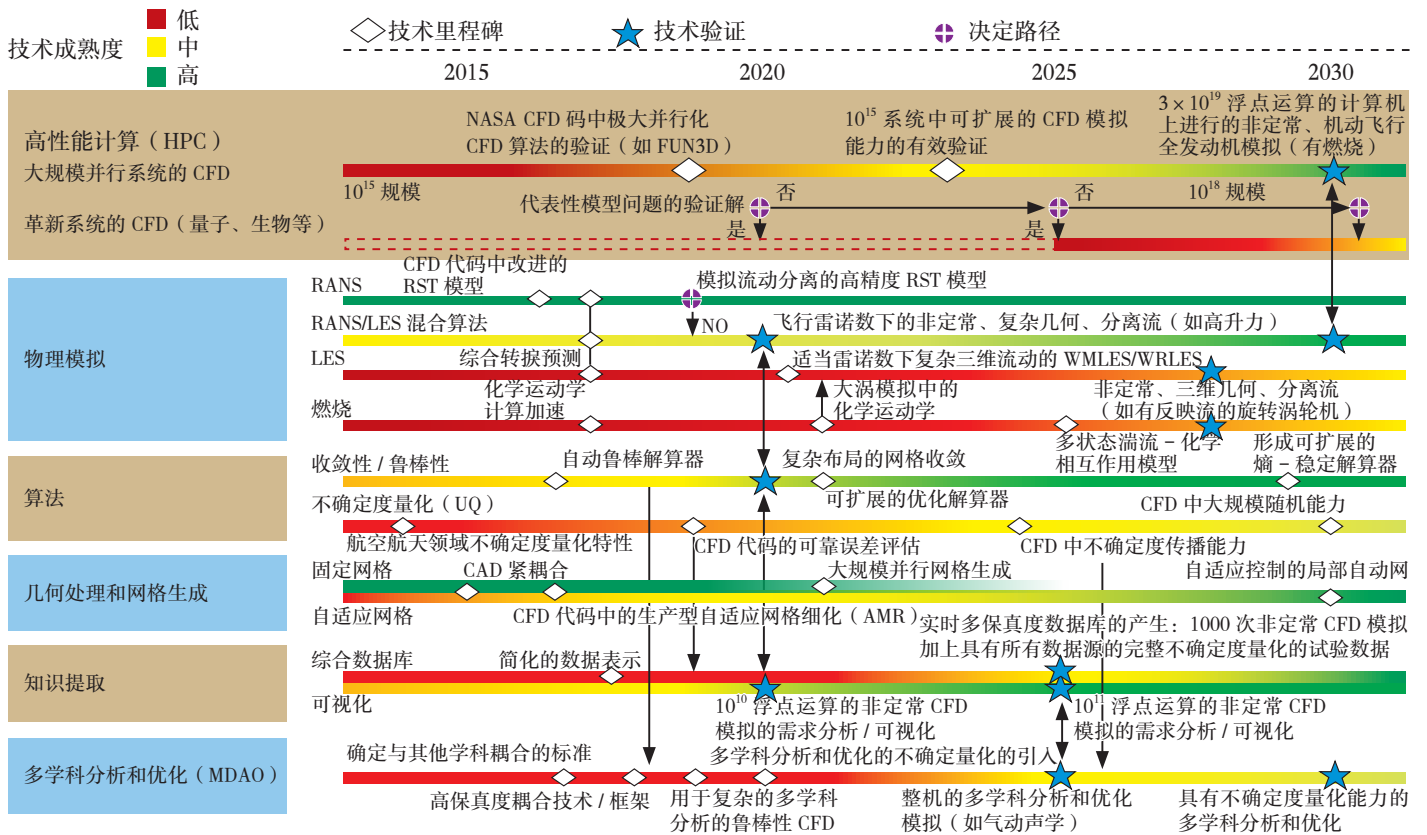


图1 CFD技术发展路线图^[3]

* 基金项目：国家科技重大专项基金（2017-I-0003-0003）

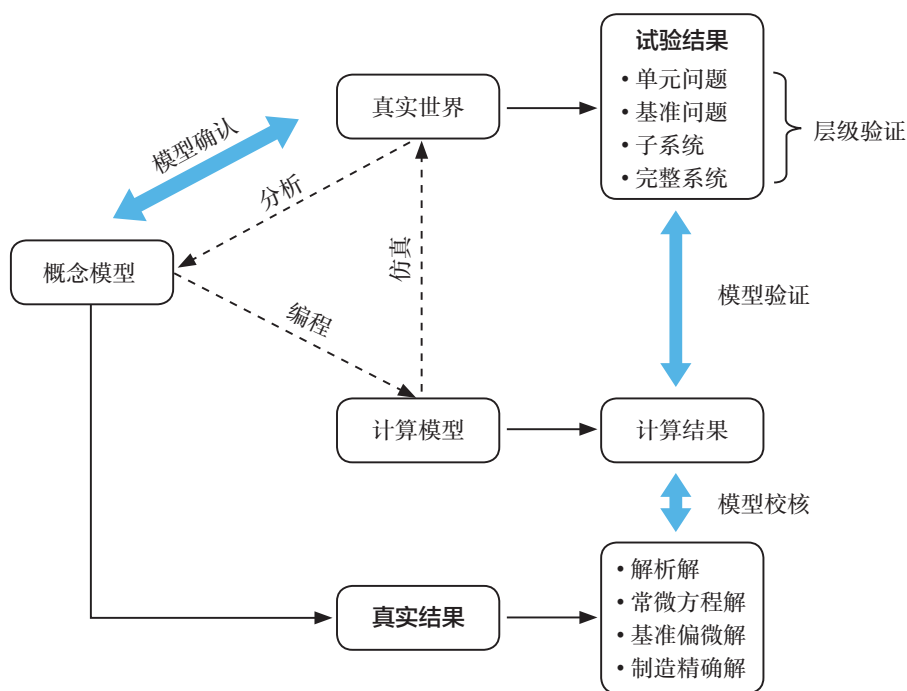


图2 模型间的逻辑关系以及校核、验证示意

核、验证与确认 (VV&A) 作为仿真可信度评估的重要方法，在近年来已被业界所关注，但大都是针对特定应用场景进行的离散研究，并未形成系统的CFD仿真VV&A理论与方法。笔者在总结归纳了国内外基于CFD的VV&A研究内容的基础上，在压气机气动仿真领域开展了初步的VV&A，以期能为后续航空发动机气动仿真可信度研究起到铺垫作用。

VV&A概述

在校核、验证与确认 (VV&A) 中，校核是指在建模过程中，判定由概念模型到计算模型的转化是否正确；验证是从仿真应用目的出发，考查计算模型在其作用域内是否准确地代表了概念模型；确认是在校核和验证的基础上，最终确定仿真系统相对于某一特定应用是否可接受。概念模型、计算模型、真实世界、校核、验证等概念的关系如图2所示。

校核阶段

校核阶段主要评估代码是否可信、格式离散是否正确、程序是否正确实施等，并据此判断是否正确地建立了仿真系统。校核阶段包括代码校核和数值解校核，代码校核是数值解校核的必要前提，要尽可能确保计算机代码和算法实施准确无误，数值解校核是量化计算过程数值误差的过程。

验证阶段

验证是判断模型是否精确表示物理问题与模型化求解逼近程度的

评估过程，其基本内容是指出和量化概念模型、计算模型中的数值误差和不确定性，评估试验结果的不确定性，并进行计算和试验结果的对比。在验证过程中并不假设试验数据比计算结果具有更高的精度，只是认为试验测量能更好地反映实际物理过程（验证过程的基本流程如图3所示）。

确认阶段

确认阶段是在校核验证的基础上，将数值计算过程中涉及的所有信息完全公开，接收由用户、同行专家和仿真系统主管部门组成的验收小组的审查和评论，对仿真系统的可接受性和有效性通过权威部门发布正式的制度确认。首先，通过学科和气动仿真对象结合，不断迭代与优化计算，提取共性特征与层级关联关系，认证气动仿真软件VV&A标准算例库；其次，基于系统分层指标开展敏感性分析研究，制定软件参数适用范围，提取算法、模型与变量的逻辑关系，逐渐形成气动仿真领域VV&A的规范和标准；最后，根据数据的不确定性分布，制定气动仿真对象的误差带与不确定度，发布气动仿真的可信度评估过程，并指导气动仿真软件的合理使用。在此基础上发布校核、验证与确认准则，完成气动仿真确认。

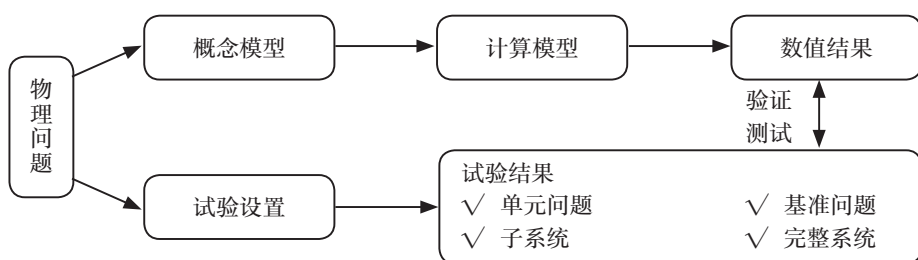


图3 验证过程基本流程

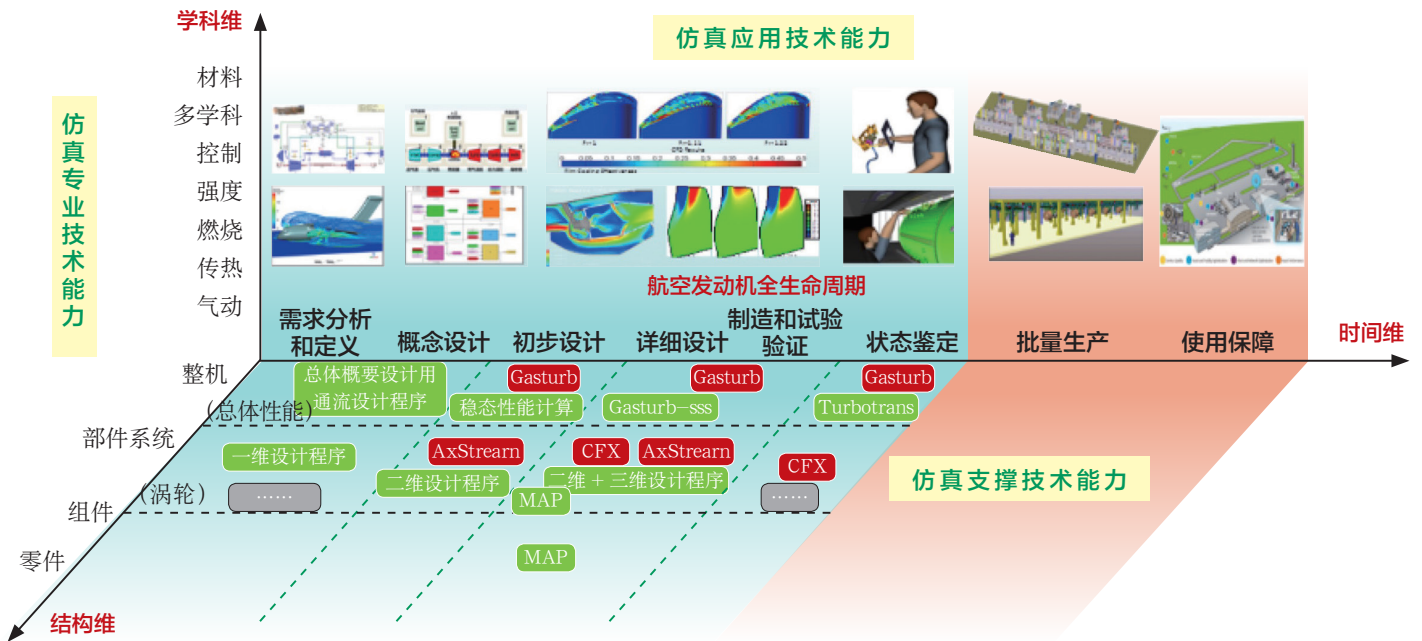


图4 航空发动机全生命周期数值仿真

VV&A的应用

在航空发动机研发过程中，仿真涉及到全周期、多层次和多学科（如图4所示），覆盖了分析、设计/建模、仿真3个阶段，基元级（物理现象）、零组件级、部件级、整机4个层级。而每一个新算法的提出，都要对其进行可信度评估。

鉴于航空发动机的复杂结构，

整机气动仿真技术尚未成熟，直接对复杂结构部件开展数值仿真和VV&A，会对后续模型修正带来巨大的挑战，因此需要引入系统复杂性层次分析法。本文按照层次结构原理，基于航空发动机的3大部件初步提出层级验证模型（如图5所示），并以压气机为例，在气动仿真中开展VV&A工作。

构建压气机分层验证模型

压气机气动仿真是航空发动机数值仿真的核心工作之一，其特点是几何模型复杂（存在不同的几何尺度，如大尺度的叶片和小尺度的叶尖间隙）和流动复杂（很多复杂流动机理仍待探索，如旋转失速、叶排间干涉）。整体上，仿真技术在压气机性能分析、气动设计中的

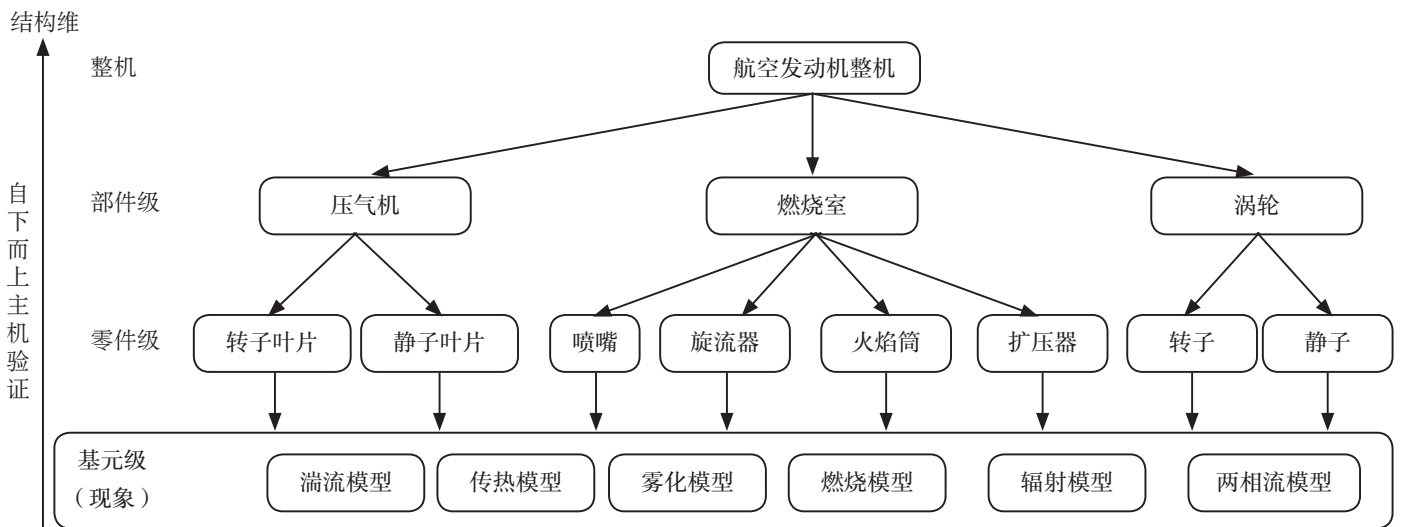


图5 航空发动机结构维分层验证模型

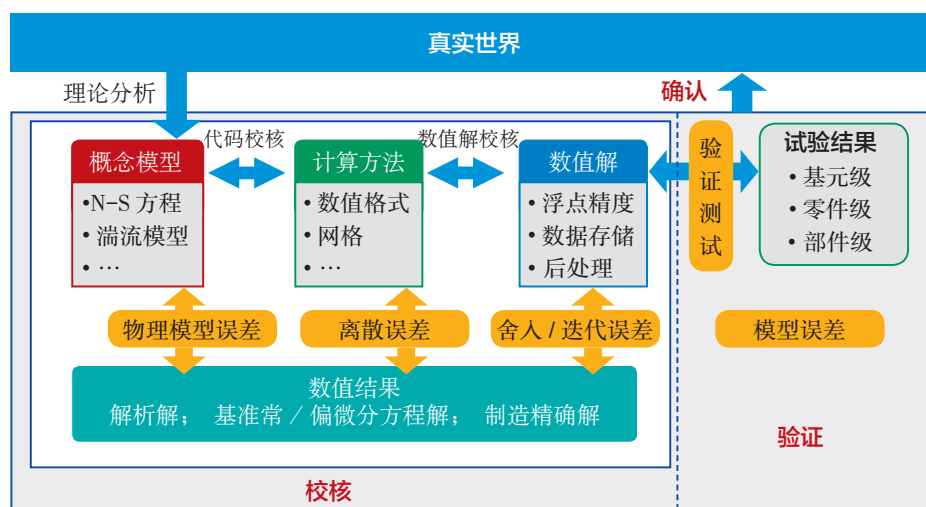


图6 CFD VV&A过程模型

应用相对落后，仿真精度不足，商业和自研软件均亟需开展可信度评估工作。针对压气机气动仿真的特点并根据相关理论，可提出压气机CFD仿真VV&A过程模型，如图6所示。

压气机内部流动是典型的逆压梯度流动，极易发生流动分离；对于高负荷跨声速压气机，叶面激波及其诱导的流动分离也极为常见；叶尖泄漏流及其与激波相互作用对跨声速压气机稳定性有重要影响；上下游叶排间的相互作用影响压气机的总体气动性能。上述流动现象对压气机性能有直接影响，因此判断气动仿真软件是否能对这些流动现象进行高精度预测，是对气动仿真软件进行验证的基础。在此基础上，将压气机部件分解成叶栅、转/静子叶片等零件，每一个零件的流动现象可能包含上述基础流动中的一种或多种流动现象。综上所述，在压气机气动仿真软件的VV&A时，有必要根据压气机几何复杂性和流动特征对复杂流动问题进行分解，由此得出压气机CFD仿真分层模型

（如图7所示）。

开展分层验证

首先应分析仿真软件应用的复杂流动所包含的典型流动现象，通过设置针对每一种流动现象的解析算例，进行基元级验证，主要评估CFD程序在典型基础流动问题数值仿真中的可信度。通过将计算模型的响应值与试验测量结果对比，评估仿真的误差和不确定度，不符合标准时须进行模型修正，符合标准时则进入零件级验证过程。

拆解压气机部件得到若干零件，对这些零件逐一展开单独验证，评

估CFD程序在压气机转子或静子叶片流动数值仿真中的可信度。该过程应在不同构型叶片的基础上尽可能全面地囊括不同几何特征的叶片流动数值仿真算例，如前缘形状、叶顶间隙、壁面粗糙度、泄漏等，最终形成完整的压气机层级零件级验证算例库。

将仿真结果与试验结果进行一致性分析，评估误差和不确定度。当不符合要求时，则对模型进行验证，修正后的计算模型需要重新进行基元级验证。

当验证结果满足要求时，进入最后的部件级验证阶段，即开展多级压气机气动数值仿真，评估计算结果与试验测量结果的一致性，当部件级验证的结果满足要求时即认为该软件可信度满足使用要求，否则仍需修正模型后，从基元级验证重新开始层级验证，反复迭代直到满足可信度要求。

VV&A面临的挑战

NASA曾强调强化数值仿真误差量化工作的重要性，并提出到2030年VV&A应具备全误差源管理及不确定度量化能力^[9]，主要包括反映真实

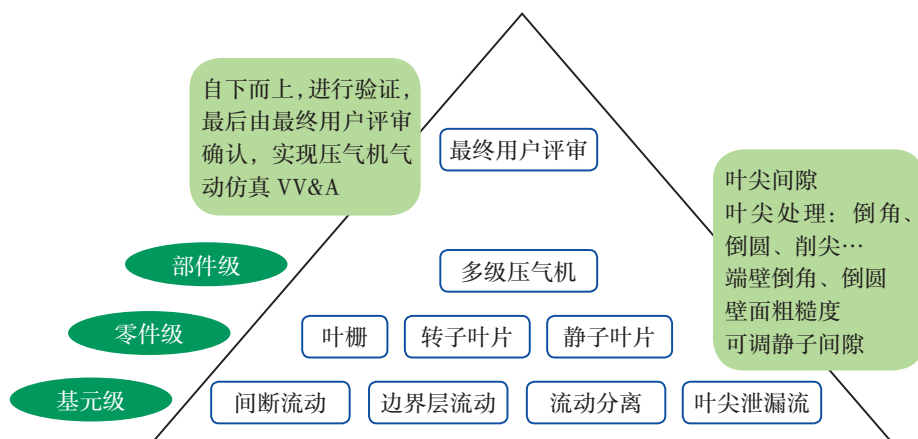


图7 压气机气动仿真分层模型

物理问题的模型误差及其不确定性；数学模型和计算域（网格、时间步长）离散不足导致的数值误差及其不确定性；由人为或自然因素导致的偶然不确定性；由于缺乏对特定流体流动认识而造成的认知不确定性。基于上述目标，现阶段的气动数值仿真VV&A过程的挑战主要包括以下两点。

误差估算和不确定度量化技术的使用受限

航空发动机气动仿真一般是三维仿真，涉及的几何和物理模型十分复杂，需用数值求解的方式来计算强耦合非线性偏微分方程，在此过程中影响系统可信度的因素除了物理模型外，还包括几何模型尺寸、数值格式和网格规模等。这些指标之间难以独立，无法建立与系统仿真相类似的指标体系来进行分层验证。因此，需要针对气动仿真本身的特点，建立与之相应的VV&A过程模型和实施方法。

在离散误差估算方面，复杂模型的三维雷诺平均方程和非稳定流的VV&A应用受到了极大限制。NASA、美国机械工程师协会（ASME）和美国航空航天学会（AIAA）等组织虽已创建了CFD和传热分析的校核和验证（V&V）标准，但并未在航空发动机领域中广泛使用。

网格细化方法通常可实现源于网格规模的离散误差量化，但苛刻的使用条件限制了其在航空发动机工程领域的应用。与此同时，尽管许多CFD代码能够确保简单问题的收敛性，但对于涉及复杂流动物理问题和/或复杂几何结构问题，数值求解技术不足以确保稳定收敛性，需要从工程角度判断收敛的好坏。

缺乏高置信度（或已知不确定性）的试验对比数据

在模型验证阶段，为了评估模型误差的不确定性，需要评估试验数据不确定性，但现阶段试验、仿真和代码开发工作相对独立，数值仿真参数设置与试验条件难以完全统一，如试验测量往往得到的是点数据，而数值仿真通常采用加权平均值。

同时，试验测量误差还会为数值仿真引入输入数据的不确定性。因此，从试验设计阶段到最终的文件归档，所有人员都必须密切合作，除了要发挥试验和计算二者的优势外，更重要的是能曝露出各个阶段的问题。

此外，基于统计学方法的误差评估手段需要尽可能多的样本数据来支撑后续可信度评估工作，这也对试验数据量提供了一定的要求。

VV&A的发展展望

航空发动机数值仿真涉及多部件、多学科、多各向异性物理场，这给仿真可信度评估工作带来了很大的挑战。

数值仿真VV&A的目标是具备全误差源管理和误差不确定度量化能力，修正编程错误和数值误差，标定模型误差修正数学模型，确保数值仿真软件可靠性，建立高置信度数值仿真数据库，在此基础上开展仿真—试验耦合模型修正工作，最终形成并发布行业内标准模型和数值仿真VV&A应用规范。

同时，VV&A是一项知识密集型系统工程，涉及算法实施与正确性评估、数值格式理论与验证、时间独立性和网格无关性、物理模型适应性与可信度、不确定度量化5个

方面，其中的大量理论、方法还需要完善与发展。对于航空发动机的研发，除了开展理论方法的深入研究之外，还需要强调VV&A针对行业相关问题的适用性，如基于航空发动机整机的模型层级构建方法等。在评估方案设计完成、流程稳定可靠的前提下，进一步开展自动化测试技术。

结束语

建立全生命周期的数值仿真VV&A方案、开发自动化的高效分析工具，以及搭建高置信度验证数据库与复杂三维多学科耦合的一体化仿真可信度评估体系，是航空发动机数值仿真的VV&A技术未来的发展趋势。VV&A技术强调试验与数值计算间的协同合作，尽可能减少在方案设计阶段产生的误差，建立高置信度试验和仿真数据库，同时需要多部门联合系统地开展航空发动机数值仿真VV&A技术研究，完善领域内VV&A理论体系，形成航空发动机的VV&A标准规范，促进数值仿真在航空发动机研发中的应用。

航空动力

（周帅，中国航发研究院，工程师，主要从事航空发动机数值仿真研究）

参考文献

- [1] 曹建国. 航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J]. 推进技术, 2018,39(5):961-970.
- [2] MacCormack R. W. A perspective on a quarter century of CFD research[R]. AIAA, 1993.
- [3] Slotnick J K. CFD vision 2030 study: a path to revolutionary computational aerosciences[R]. NASA, 2014.