

人工智能在计算流体力学中的应用

The Application of Artificial Intelligence on Computational Fluid Dynamics

■ 李义进 宋红超 周帅 项洋 李响/中国航发研究院

除了在围棋对弈中独孤求败，人工智能（AI）技术已逐步在众多领域显现出应用价值。人工智能正通过提高网格划分友好度、减少人工干预、提高湍流预测精度、快速数据可视化分析等，为计算流体力学（CFD）带来诸多变革。

在航空发动机内流流场模拟中，计算流体力学（CFD）关注的基本问题是参数模型，所研究的基本问题主要依赖计算机辅助设计（CAD）系统加以解决。但在进行网格生成时，模型的转化可能会发生偏差；同时，随着几何形状和流场变得越来越复杂，模型和网格生成作为整个计算分析过程中的重要部分，实现起来会变得越来越困难，所需时间已占到计算任务的60%左右；模拟设计点时，选择合适的湍流模型是对转捩、分离等现象进行准确模拟的前提；在对计算数据进行分析时，一般是通过软件对数据进行人工分析处理，但是当计算量巨大时，需要高保真处理数据。上述问题的存在，长期制约着CFD在航空发动机上的应用。

随着深度学习、机器学习的发展，人工智能（AI）的应用范围得到拓展。在CFD领域，深度学习可将任务分拆，使得各种类型的机器辅助变成可能，可提高CFD的网格划分友好度、减少人工干预，提高湍流预测精度，实现快速数据或再生数据的可视化分析等。

几何参数模型

生成高质量的计算网格的前提是建

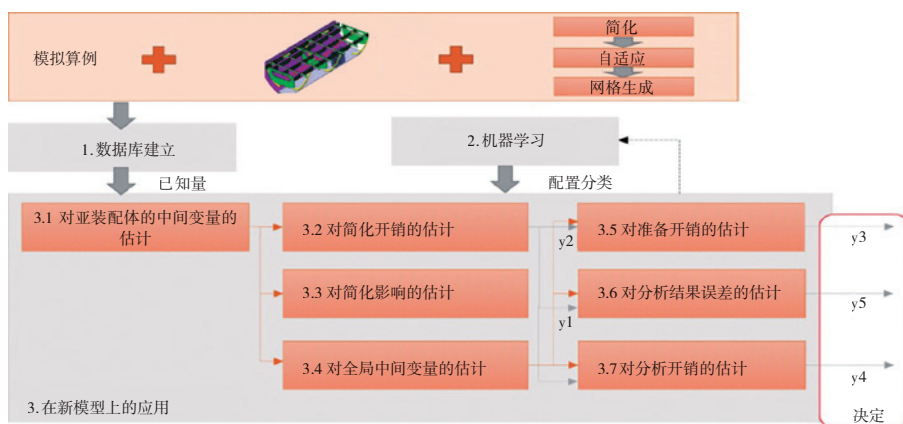


立计算域几何模型。一般的建模都是通过递进关系，对结构和特征进行人工造型来完成的。在利用Unigraphics（UG）、Auto CAD和Pro/Engineer等商用软件建模的过程中，如果某一特征参数或结构尺寸发生变化，则需要从这一特征结构的上一步开始，重新构造模型。对于边界不规则的多特征模型，需要耗费大量的时间和劳动。

采用人工智能法，即面向人工智能的方法，则可通过一阶逻辑谓词来描述几何形体间的约束关系、几何与拓扑结构，并将其存入知识库。从规则库中取出某项规则应用于现有事实，以几何推理的方式处

理几何图形问题，将得出的结论，即新的事实，存入库中。

奥尔德费尔德（Aldefeld）采用一个基于符号推理和操作的专家系统，建立了一个规则体系，将几何约束关系以一阶谓词的形式放入知识库，通过推理机对知识库进行规则匹配，逐步构造出整个图形。奥尔德费尔德的方法被公认是基于规则几何推理求解的代表。高曙明和彭群生引入已知元素和已知约束等新概念，通过扩展一般的图形数据结构来统一表达几何元素与几何约束。基于普通算法而不是专家系统实现几何推理，并采用一个更适合于几何推理的推理策略，使得几何



通过深度学习实现新模型构建的流程

推理算法在推理时间与几何元素的数目上呈线性关系，从而较大幅度地提高了推理速度。

基于规则的推理方法普遍具有几何关系表达清晰、知识和处理分离、规则库扩充性好等特性，而且避免了数值算法不稳定性的缺点。不仅能避免约束顺序对构造图形的影响，还利用相似性判定考虑了多解性问题。但是，基于规则的推理方法的缺点也是很明显的，主要表现为系统庞大，繁重的计算搜索与规则匹配给系统带来了很大的负担，速度慢、效率低，处理循环约束的能力不足。

网格生成技术

斯洛特尼克 (Slotnick) 认为，网格生成和网格自适应技术是目前 CFD 流程中的一大瓶颈，在其 2014 年出版的《CFD2030 愿景研究：计算航空学变革之路》中指出，在网格误差消除之前，无法快速地对新外形进行流体力学分析，也无法实现新模型实验结果的比较分析。尽管现在已有一些比较先进的网格生成软件，如 ICEM、Gridgen、Gambit 等，但是生成一套合适的复杂涡轮冷却叶片构型的网格需

要较长时间。然而，对于从事涡轮冷却设计的工程人员来说，他们可以接受的对涡轮冷却进行一次分析的最长时间是两天。

康斯纳 (Consner) 等在其一篇文章中，详细地讨论了这方面的问题，并指出 CFD 研究人员面临的关键问题是“你能把整个设计周期缩短多少天”。因此，生成复杂外形网格的自动化和及时性已成为应用空气动力学、计算流体力学中最具挑战性的任务之一。有众多研究人员对涡轮冷却叶片的网格生成技术从分区结构网格、非结构网格、笛卡尔网格和重叠网格等不同的方向展开研究。对于一个网格生成软件而言，首先其算法应当具有较高的自动性（输入简单、使用方便灵活）、通用性、可靠性和计算的高效性，并且具有满足计算要求的网格质量。目前，人工智能对三维物体的识别技术在这方面得到了应用，以构建三维计算流域的网格拓扑结构，从而快速生成高质量的结构网格。

湍流模型计算

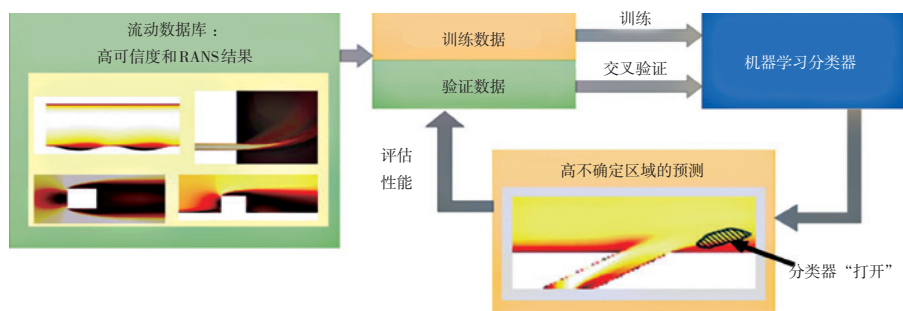
众所周知，雷诺平均法 (RANS) 使得求解纳维-斯托克斯 (Navier-

Stokes, N-S) 方程在工程中得以实现，但与此同时，不得不在此过程中引入了雷诺应力项。针对这一额外项，必须补充相应的表达式方可使得方程组得以封闭。在航空叶轮机中，SA、 $k-\omega$ 、SST、 $k-\epsilon$ 等湍流模型由于具有计算量较小、鲁棒性高、工程可靠性好等优势而得到广泛应用。鉴于大涡模拟 (LES)、直接数值模拟 (DNS) 等方法短期内无法在航空叶轮机中实现大规模应用，基于 RANS 的叶轮机流动数值模拟仍是未来几十年叶轮机工程应用中的主要手段。如何突破现有湍流模型对流场预测不准确的弊端仍是近一二十年内的棘手问题，需要持续关注。

得益于人工智能的日渐成熟和在其他领域（例如，图像识别、自动驾驶、大数据以及区块链等）应用的成功经验，使人们对其解决湍流问题燃起了希望。受此驱动，最近几年机器深度学习和 CFD 的结合尝试开始出现。例如，茱莉亚·林 (Julia Ling) 在 2016 年利用神经网络构建了雷诺应力项模型，实现了机器学习与 CFD 的深度结合，引起了较为广泛的关注。

所谓机器学习，本质是使计算机模拟人类的学习模式，通过重构已有知识结构不断改善自身的性能，是人工智能的核心部分。至于具体的实现过程，目前有两种思路：其一是基于现有湍流模型方程，以数据为驱动，不断更新或优化原本的经验系数；其二是完全摒弃现有湍流模型方程，只是通过一定的物理背景知识，构建起特定输入-输出关系，然后通过机器自主学习构建全新的高度非线性模型方程。

事实上，对湍流研究与机器



机器学习在湍流模型中的应用

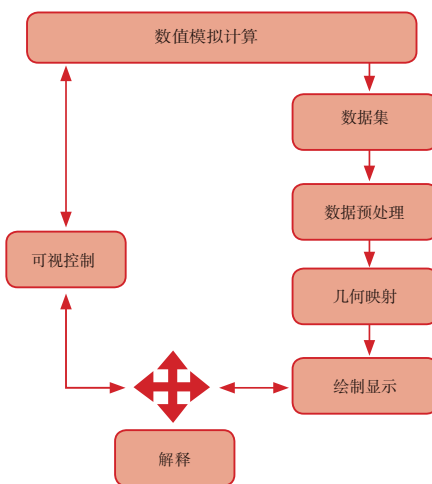
学习的交叉探索研究在本世纪初就已经出现。张泽佳和杜赖萨米 (Duraisamy) 采用了神经网络对湍流模型的系数进行了修正, 取得了很好的效果。上述工作是基于第一种思路展开的, 其本质上只是对已有湍流模型进行了修正, 很难实现突破。然而, 只有采用第二种思路, 即采用深度学习算法 (甚至贝叶斯估计) 建立输入-输出关系, 才能使复杂构型 (如叶轮机械) 的湍流模拟实现突破。特雷西 (Tracey) 采用核回归的方式, 对正则化的雷诺应力各项异性张量的特征值进行了模型重构。与此同时, 其利用单隐藏层的神经网络算法对SA湍流模型中的其中一项进行了重构, 向人们展示了神经网络在湍流模型应用的潜在能力。茱莉亚·林则实现了基于深度神经网络雷诺应力各向异性张量的模型化, 经过DNS/LES数据的学习之后, 实现了对槽道流动的预测, 具有非常好的效果。迈克尔·米兰 (Michele Milano) 也做了类似的工作, 该工作基于深度神经网络预测了槽道流动, 同样证明了深度神经网络在CFD湍流模型中的应用潜力。还有学者分别基于贝叶斯估计和贝叶斯不确定性分析, 实现了预测边界层流动和数学模型的校准,

以及贝叶斯不确定性分析在槽道流动的应用。

经过研究人员多年的努力, 神经网络被升级到了深度网络, 人工智能逐步提升, 与CFD的结合也在逐步深入, 从不同角度不断证明人工智能解决湍流问题的潜在能力。

科学可视化

随着计算机技术的发展, 流体力学数值算法不断优化和改进, 网格划分技术大为提高, 对复杂流体场计算更加精细化, 直接导致了CFD产生的解越来越大, 计算结果不断增加, 使得对后处理的结果整理、分析、加工计算越来越麻烦。因此,



流场可视化的处理流程

利用科学可视化 (Visualization in Scientific Computing, ViSC) 技术对数据进行后处理分析, 形成直观的可视化研究是非常有必要的。

科学可视化是利用计算机图形学、图像处理和人机交互等技术, 将科学数据转化为直观的图形图像, 以帮助研究人员分析数据、获取信息的技术。由于科学可视化方法能够迅速、有效地简化数据和提炼信息, 使得科研人员能以图形图像的方式直观交互地观察与分析数据, 它已成为高性能计算中分析数据、理解计算的关键手段。其中, 原位可视化被认为将是解决千万亿次规模计算数据分析的最有效途径。

目前, 针对流场的科学可视化流程所存在的问题是受制于计算的局限, 科研人员无法对数据进行补充和再生。然而, 通过引入人工智能, 对缺失的信息进行再生, 将流场信息还原完整, 便能够更精确、直接地反映流场的物理现象。并且, 通过采用人工智能的特征检测技术, 能够加速数据分析速度, 进而对大量杂乱数据进行有效可视化, 更好地诠释科学可视化的意义。

结束语

人工智能在计算流体力学上的应用是多方面的, 涉及几何参数模型、网格划分、湍流模型计算和流场的科学可视化等, 并且取得了较多成果。总而言之, 将人工智能引入计算流体力学是目前提高正向处理流体计算的准确性的重要途径之一, 具有一定的普适性和推广性。

航空动力

(李义进, 中国航发研究院, 高级工程师, 主要从事航空发动机气动仿真研究。)