

航空发动机数值仿真中网格生成技术的应用与发展*

Application and Development of Grid Generation Technology for Aero Engine Simulation

■ 周帅 付琳 汪丁顺 李义进 刘魁 / 中国航发研究院

网格生成技术连接物理模型和计算模型，在航空发动机数值仿真中起着承前启后的作用。网格的生成质量决定了是否能够精确地表达出计算对象，对数值计算最终的分析结果的精度、效率以及收敛性也有重要影响。

航空发动机数值仿真技术融合了先进航空发动机设计技术和信息技术的最新成果，在计算机虚拟环境中实现对航空发动机整机、部件或系统的高精度、高保真多学科耦合数值模拟（如图1所示）。在数值仿真过程中，计算模型中离散点的集合被称为网格，产生这些节点的过程就是网格生成。网格生成技术是连接物理模型与计算模型进行数值仿真的纽带：网格的生成质量可决定后续计算过程的精度、效率乃至成败；复杂数值模拟问题的网格生成过程严重依赖于操作人员的经验，无法做到完全自动化，其消耗的工作量可能会占整个数值模拟工作量的绝大部分。

网格生成技术现状

根据生成网格单元拓扑是否具有规律，可分为结构化网格和非结构化网格。数值计算需要知道每一个节点的坐标，以及每一个节点的所有相邻节点。对于结构化网格来说，在数值离散过程中，需要通过网格

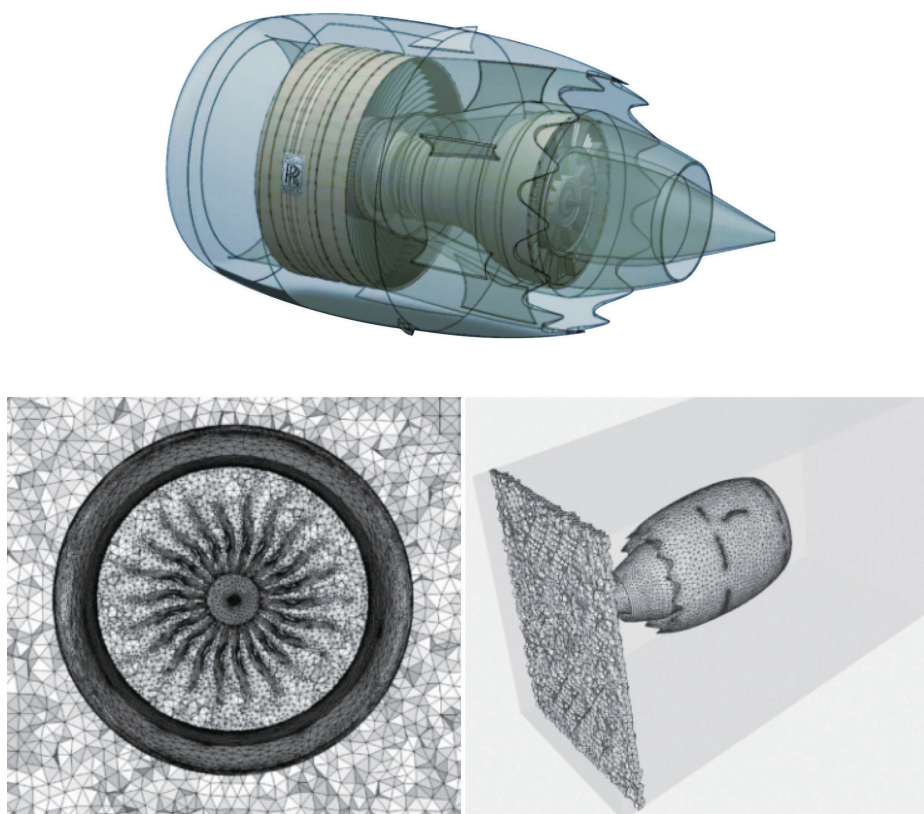


图1 航空发动机整机模型及网格示意

节点间的拓扑关系获得所有节点的几何坐标，结构网格的可控性较高，也就是说在哪里加密，在哪个方向

加密，都比较好操作；而对于非结构化网格，由于节点坐标是被显式地存储在网格文件中，因此并不需要

* 基金项目：国家科技重大专项基金（2017-I-0003-0003）

进行任何解析工作。

结构化网格

结构化网格的优点是节点与邻点关系可以依据网格编号的规律自动得出,很容易实现区域的边界拟合;缺点是适用的范围比较窄,只适用于规则的形状。结构化网格的生成技术包括:代数网格生成方法,主要应用参数化和插值的方法,对处理简单的求解区域十分有效;偏微分方程(PDE)网格生成方法,主要用于空间曲面网格的生成。结构化网格易于编程实现,也易于构造高精度离散格式,例如,QUICK格式(一种计算控制体界面值的二次插值计算格式)就很难在非结构化网格下实现。因此很多关于新离散格式的理论和方法都是在结构化网格的基础上推导出来,再扩展到非结构化网格上的。

在航空领域,结构化网格可以很容易地实现区域的边界拟合,适用于计算流体和表面应力集中等情况,网格生成速度快且质量好,数据结构简单,对曲面或空间的拟合大多数采用参数化或样条插值的方法得到,与实际的模型更加接近。但是结构化网格最典型的缺点是适用的范围比较窄,尤其随着近几年计算机和数值方法的快速发展,针对复杂区域求解越来越高的要求,结构化网格生成技术短板逐渐凸显,亟需更新方案与算法。

非结构化网格

非结构化网格技术主要弥补了结构化网络不能解决任意形状和任意连接区域网格划分的缺陷。在这种网格中,单元与节点的编号无固定规则可遵循,并且每个节点的邻点个数也不是固定不变的。因此,

非结构化网格中节点和单元的分布可控性好,能够较好地处理边界,适用于流体机械中复杂结构模型网格的生成。非结构化网格生成方法在其生成过程中采用一定的准则进行优化判断,因而能生成高质量的网格,很容易控制网格大小和节点密度,所采用的随机数据结构有利于进行网格自适应,提高计算精度。

非结构化网格生成技术还可以从生成网格的方法来区分,针对平面三角形网格生成方法,比较成熟的是基于三角剖分(Delaunay)准则的网格剖分方法、波前法网格生成方法以及基于梯度网格尺寸的三角形网格生成方法。曲面三角形网格生成方法主要有两种,一种是直接在曲面上生成曲面三角形网格,另外一种是采用结构化和非结构化网格技术耦合的方法,即在平面生成三角形网格以后再投影到空间曲面上。

三维实体的四面体和六面体网格生成方法现在还很不成熟,部分四面体网格生成器虽然可以使用,但是仍然不能实现对任意几何体的剖分,目前的解决方案是采用分区处理的方法,将复杂的几何区域划分为若干个简单的几何区域分别剖分后再合成。六面体网格生成技术主要采用的是间接方法,即以四面体网格剖分作为基础生成六面体网格,这种方法生成的速度比较快,但是生成的网格很难达到完全的六面体,会剩下部分四面体,四面体和六面体网格之间需要金字塔形的网格来连接。

非结构化网格方法有两个缺点:一是不能很好地处理黏性问题;二是对于相同的物理空间,网格填充效率不高。与结构化网格的定义相

对应,非结构化网格是指网格的内部结点不具有相同的毗邻单元,即与网格剖分区域内的不同内点相连的网格数目不同。从定义上可以看出,结构化网格和非结构化网格有相互重叠的部分,即非结构化网格中可能会包含结构化网格的部分。当前非结构化网格生成技术中只有平面三角形的自动生成技术比较成熟,平面四边形网格的生成技术正在走向成熟,而空间任意曲面的三角形、四边形网格、三维任意几何形状实体的四面体和六面体网格的生成技术都远未成熟。

两种网格的对比

对于复杂几何模型来说,应用结构化网格或非结构化网格都存在一定的困难,结构化网格需要做分区拓扑,非结构化网格需要修补几何。结构化网格相比非结构化网格对拓扑要求更高,但是节省内存、计算快、精度相当。非结构化网格或结构化网格的分类标准只与网格存储方式有关,与网格的形状无关。由于非结构化网格求解器缺少将结构化网格的几何拓扑规则映射到节点坐标的功能,所以非结构化网格求解器只能读取非结构化网格;同时,由于非结构化网格缺少节点间的拓扑规则,结构化网格求解器无法读取非结构化网格。当前大多数的求解器为非结构化的,因此网格的导出形式常常是非结构化的。

非结构网格针对复杂几何具有良好的适应性,但是在提升精度和收敛性时手段复杂,且由于数据随机访问导致效率较低。对于复杂几何模型,结构化网格难以生成,但在其他方面却具有突出优势,例如在结构化网格下使用差分法可以轻

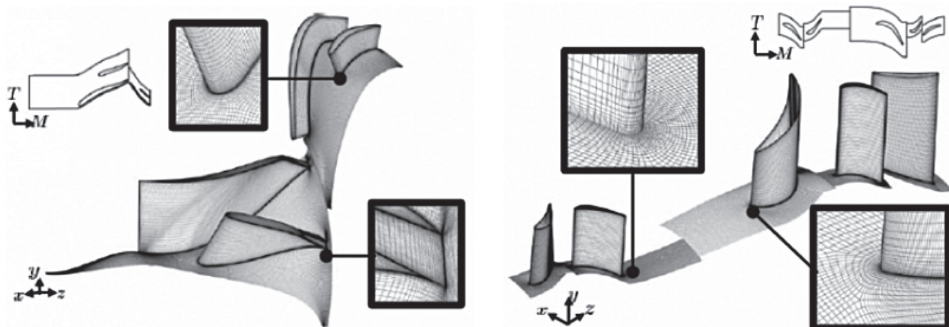


图2 压气机/涡轮流体结构化网格示意

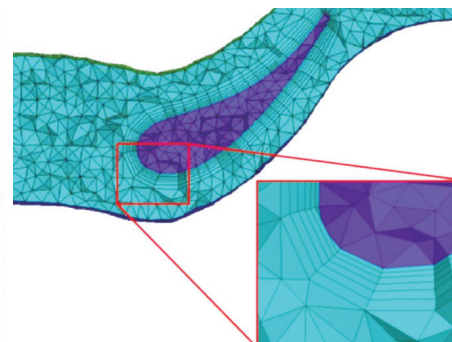


图3 涡轮叶片流体混合网格

松达到五阶精度，实现激波和旋涡捕捉，实现简单、效率高。

无论是结构化网格还是非结构化网格，都需要按照下列步骤生成网格：一是建立几何模型，几何模型是网格和边界的载体，二维问题的几何模型是二维面，三维问题的几何模型是三维实体；二是划分网格，在所生成的几何模型基础上，应用特定的网格类型、网格单元和网格密度对面或体进行划分，获得网格；三是指定边界区域、为模型的各个区域指定名称或类型，为后续给定模型的物理属性、边界条件和初始条件做好准备。

网格生成技术在航空发动机数值仿真中的应用

在航空发动机常用的数值仿真中会涉及到气动、强度、燃烧、传热、声学等学科，而学科的差异会导致网格生成对象的复杂程度、网格的需求和网格的类型的差异化。航空发动机气动数值仿真的目的是为部件设计定型并进行性能分析，过程中涉及到的进气道、压气机、燃烧室、涡轮、喷管等复杂结构，需要高精度网格表达构型。

在生成结构化网格时，由于构型复杂、分区麻烦，目前商业软件（如

NUMECA公司的IGG/AUTOGRID）多采用分区模板的方式来减少用户分区操作，可以实现叶轮机械结构网格快速生成。针对全六面体结构计算时还需要考虑网格的正交性、扭曲度和负体积，例如，在叶片前缘、尾缘根部、叶顶间隙等部分会存在正交性较差和扭曲度偏大的情况（如图2所示）。

如果完全用六面体生成网格会导致几何特征部分失真，加上目前大部分求解器都是非结构编码读入，即使使用结构化网格也需要预先转成非结构化网格进行存储，因此在气动计算时也会采取混合网格的方式来提高网格生成效率（如图3所示）。

例如，航空发动机进行燃烧数值仿真的部件主要为燃烧室，是燃

料或推进剂在其中燃烧生成高温燃气的装置，由扩压器、燃烧室壳体、火焰筒、燃料喷嘴、点火装置构成，分为单管燃烧室、联管燃烧室、环形燃烧室。针对该构型生成全六面体结构网格极为复杂、繁琐且容易出错，因此进行燃烧仿真大部分采用四面体网格或者三棱柱加四面体生成的网格（如图4所示）。

再如，发动机强度校核计算相对于流场计算更为繁琐，原因在于强度计算涉及更多的材料参数以及边界条件定义过程，计算时大多采用六面体结构化网格或者四面体非结构化网格（如图5所示）。

针对跨学科领域，工程设计中需要利用多个学科的仿真能力，包括气动、燃烧、传热、结构强度和声学等，各计算机辅助设计/制造

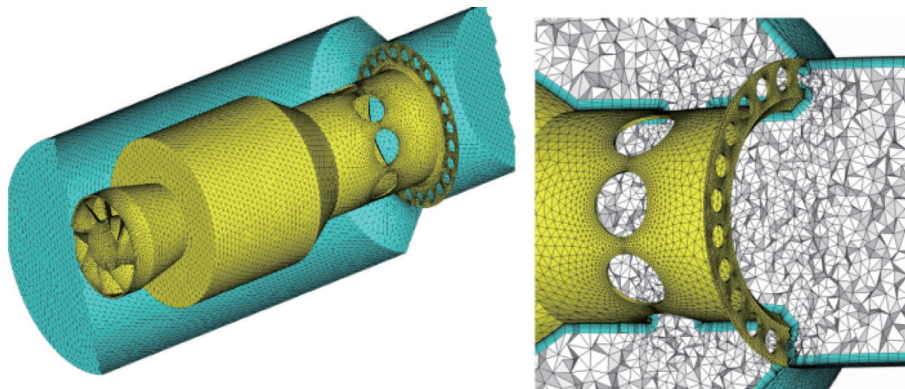


图4 简化燃烧室流体非结构及混合网格

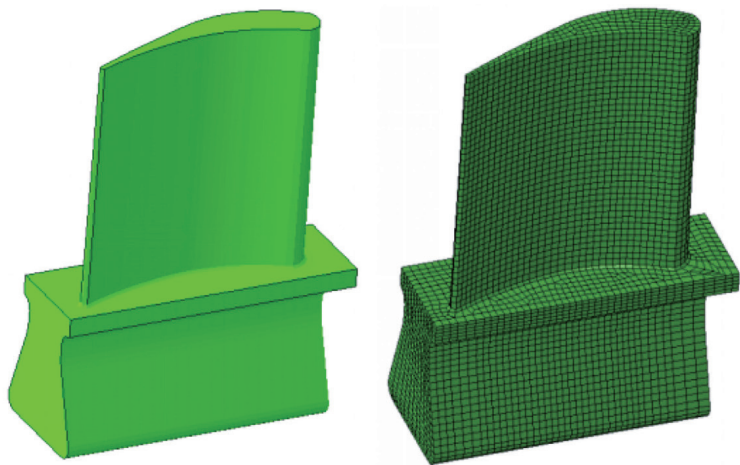


图5 叶片实体结构化网格示意

(CAD/CAE)工业软件公司都非常重视仿真软件对不同学科仿真能力的整合及联合应用。多学科、跨部件、多平台是当前比较热门的研究领域,技术方案有两类:一类是分开计算,在需要学科交叉时进行插值;另一类是在底层使用公共数据结构,物理场信息天然存在,不需要二次处理,实现该方案的基础是流体和固体等计算域的网格数据结构统一,因此全局网格生成目前仍停留在理论和实现层面,数值仿真的正确性还有待验证。

网格生成技术面临的挑战

美国航空航天学会(AIAA)在《非结构化网格发展:现状、潜在影响和面向2030年的CFD投资建议》报告中设想:到2030年,给定合适的几何外形描述和需要的求解精度,将全自动生成适用的网格,并在整个求解过程中自适应地细化网格。这种方式使用户能够集中精力进行最终的求解,无须关心模拟背后的网格构造和维护。基于以上目标,网格生成技术将面临以下挑战。

网格生成与CAD模型之间的

衔接不够

CAD数值模型与网格之间的互操作性还存在大量问题,通过边界再表达(BREP)的方式构建模型的几何外形具有许多天然的缺陷,由此导致很多研究者将研究目标转向构建自己的BREP几何建模内核,或者寻找可获得完全封闭几何外形的几何建模技术。在航空发动机设计与研发中,需要用三维软件设计大量的三维模型,在进行网格生成时需要通过中间件进行转化,由于三维软件之间内置的几何引擎各不相同,导致几何表征不同,于是会产生若干错误,如面法向不一致、线不连续或面面相交等问题,而在几何建模时不规范的操作也会产生几何错误。

网格生成缺乏鲁棒性

网格生成技术很难做到一次性充分地网格化任意随机的几何外形,即使专家级用户在第二次生成网格时也只能改进部分结果。对于当前主要的网格类型,不能做到一次性成功的主要原因如下:一是多块结构六面体网格最大的限制在于其拓扑结构,用户构建的往往是一些非

常粗糙的六面体网格,同时要求块与块之间必须点对点匹配;二是非结构网格采用三角剖分方法可以保证在二维情况下生成的网格质量,但却不能保证在三维情况下的网格质量,多面体如果没有引入点将无法剖分为四面体,但是目前还没有确定的方法能把它们插入到具体的位置,阵面推进法和层推进法是从边界处理到内部,各自推进会存在互相重叠交叉;三是混合网格通过在边界附近设置合适的网格单元,也能享受到阵面/层推进技术带来的好处,但是它们的实现缺乏三角剖分方法的理论支持,容易产生负体积,几何离散容易失真。

质量的检验依赖于主观

网格质量的好坏取决于网格是否有效和高质量。有效性的标准包括:没有负体积单元、没有重叠单元、单元之间没有空白、没有在几何外形外的几何约束点和没有不支持的拓扑结构,如线奇异或奇点。有效性在一些特殊场景中是不合适的,此时的有效性转变为适应性。

性能评价指标的建立可用于任何计算网格的前期检验。除了量化网格本身质量,还要求满足与物理场紧密耦合的计算条件。建立网格收敛的过程非常耗时且十分繁琐,判断网格质量的好坏依赖于主观判断,计算的完整性很大程度上依赖于网格生成的经验,因此网格生成实际采用的网格质量评价标准千差万别。

设想出一套网格质量评价指标十分重要。换言之,就是通过独立单元的形状,或者单元与邻近单元的相对形状的评价指标值的分布,来评价一套网格的质量。在评价标

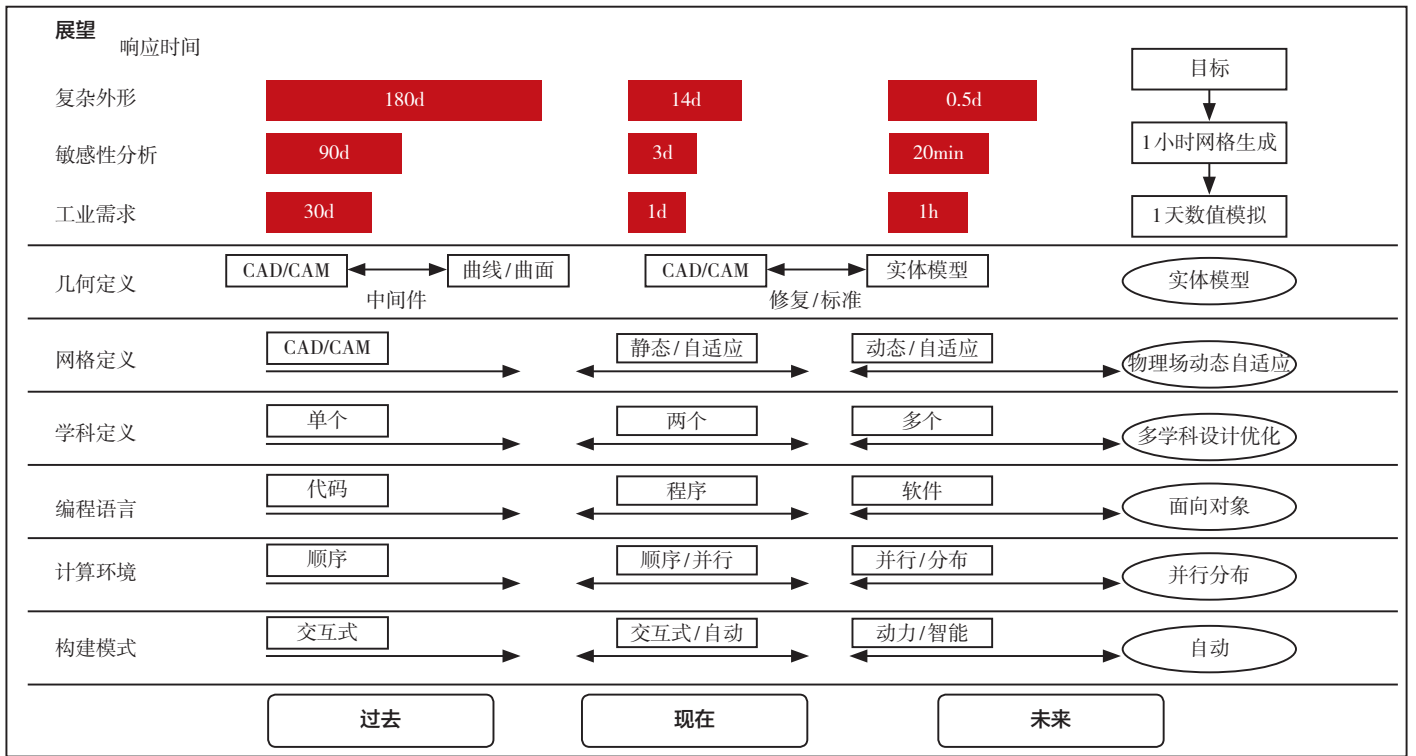


图6 网格生成技术发展趋势与展望

准的基础上可以减少网格单元数量、降低计算耗时与费用。但是，减少单元数量后会导致全网格场布点和单元尺寸的不均匀，造成长宽比、扭值、体积比等评价指标值的改变，因此需要更加规范地建立质量评价标准系统。

网格类型和单元形状评价指标的效果，必须针对场解算器数值算法的鲁棒性进行定量的修正。解算器对于网格评价指标设置了可接受范围，这些范围都是基于粗略的规则和经验而非严密的分析获得的，直接导致了耦合求解器关于质量评价标准建立受阻，很难得到一致认可的、通用的评价指标及其计算方法。

航空发动机数值仿真中的网格生成的趋势与展望

发动机数值仿真涉及多部件、多各向异性物理场，自适应网格数值仿

真高度耦合求解器是目前提高发动机数值仿真结果的最佳解决途径。随着高阶网格的发展，自适应功能也有了一定程度的提高。从网格生成器的角度出发，网格自适应使用了从解算器计算得到的信息。反之，从解算器的角度出发，还没有标准化的框架或接口可将网格生成器插入到解算器中。目前，这两种软件仍是独立的，二者之间的数据还没有标准化的交换机制，两个软件的体系结构问题使得自适应网络的实现和使用变得复杂化，但二者的融合发展也是未来网格生成技术的发展目标。

针对航空发动机的数值仿真网格生成技术，无论是商业软件还是自编程序，均取得了一定进展。但是当进行数值仿真时还是存在一定误差，发展基于物理场变化的自适应网格生成技术和高度耦合求解器

十分必要。网格生成技术需要解决各种各样的问题以满足各类需求，过去、现在和未来需要达到的目标如图6所示。

结束语

针对数值仿真技术在航空发动机研发中的加速应用，建立高精度、多学科的数学物理模型，集成化、智能化、网络化、大规模并行化的信息与知识产品成为未来网格生成软件的发展趋势。形成完全自动化的高效分析工具，具有高精度算法及形成高保真物理模型所需要的针对多学科的仿真能力，实现气动、燃烧、传热、结构强度和声学等学科的CAD/CAE一体化仿真则是网格生成技术未来的重点研究方向。

（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）