

粗糙壁面涡轮内流湍流模型

Turbulence Modelling for Rough-Wall Turbine Flows

葛宇辰 赵耀民 / 北京大学

涡轮叶片在工作环境中常常会逐渐粗糙化，从而导致流动性能退化。为理解和预测粗糙壁面对于涡轮叶片内流的影响，国内外学者近年来提出了一系列考虑壁面粗糙度的雷诺平均湍流模型，可为航空发动机的研发与运维提供有效支撑。

由于在工作环境中受到磨损、腐蚀、燃料沉积、涂层脱落等因素的影响，航空发动机叶片的壁面粗糙度往往会不断增加^[1]，如图1所示。叶片的粗糙化在导致气动性能退化、服役寿命下降的同时，对发动机总体效率和运行安全也会产生不可忽略的影响。

除了在长期运行与服役过程中自然形成，壁面粗糙度也可作为一种被动控制手段被人为地引入。通过在涡轮叶片表面合理布置粗糙度可以达到流动控制的目的。以低压涡轮叶片为例，在吸力侧前缘和转捩起始位置之间布置粗糙元（见图2），能有效地实现性能提升^[2]。

早在20世纪，业界开始大量采用试验手段研究壁面粗糙度对涡轮叶片气动性能的影响。这些试验加

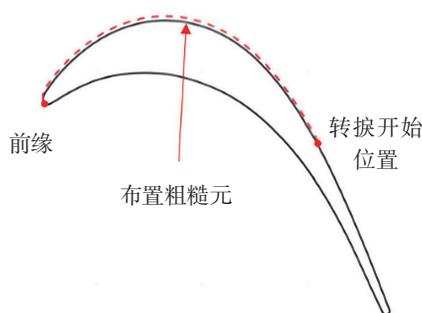


图2 利用粗糙元控制涡轮流动^[2]

深了业界对于粗糙度影响涡轮叶片流动的认识，但也面临着周期漫长且花费高昂的困难，且数据采集有一定的局限性。随着计算机技术的发展，现代涡轮气动设计更多地借助于数值模拟方法，可以有效降低设计周期中的试验次数，大大缩短设计周期，从而节省设计成本。在涡轮气动数值模拟中，往往需要引入

湍流模型，而考虑粗糙壁面效应的湍流模型也是一个研究重点和难点。

涡轮叶片气动性能数值模拟

常见的湍流数值模拟方法可大致分为3类，包括直接数值模拟、大涡模拟和雷诺平均模拟（见图3）。其中，直接数值模拟方法精度最高，但由于需要解析最小的湍流时间和空间尺度，因此所需计算量很大。相对而言，大涡模拟和雷诺平均模拟方法通过在计算中引入不同形式的湍流模型，降低了对网格分辨率的要求，从而可以有效减少计算量。本文重点关注的是第三种方法，即雷诺平均模拟方法。

作为航空发动机工程设计中的常用方法，雷诺平均模拟因其处理复杂流动问题的能力而被广泛应



(a) 腐蚀



(b) 燃料沉积



(c) 涂层脱落

图1 受到腐蚀、燃料沉积、涂层脱落的叶片样本^[1]

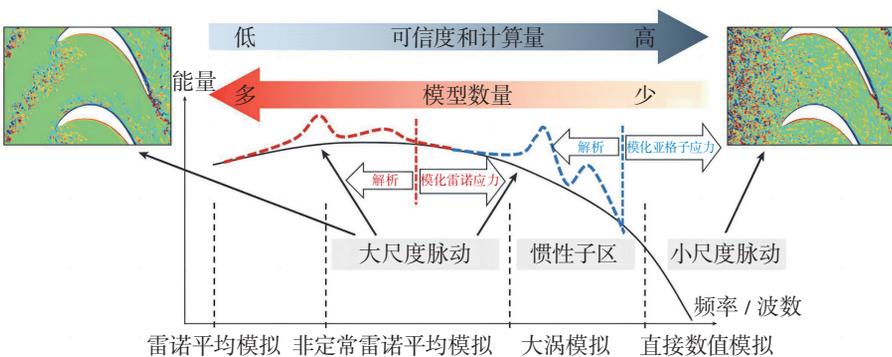


图3 常用湍流数值模拟方法^[3]

用。雷诺平均模拟求解的是雷诺平均N-S方程 (RANS), 在流动平均化过程中引入了雷诺应力这一未封闭项, 代表着湍流脉动对平均流动的影响。针对雷诺应力的模化一般称为雷诺平均的湍流模型, 对于雷诺平均模拟的结果精度尤为重要。然而这种模化过程不可避免地会引入模型误差, 尤其是在航空发动机这种复杂的内流环境中, 雷诺平均湍流模型的误差往往对模拟的准确性产生显著影响。例如, 旋转叶片导致的内流存在周期性扰动, 而雷诺平均模拟方法在原则上难以准确表征这种周期性扰动对于平均流动的影响。面对这一挑战,

非稳态雷诺平均模拟 (URANS) 成为一种可行的解决方案。

为了封闭雷诺应力这一项, 常用的RANS湍流模型往往基于布西尼斯克 (Boussinesq) 线性涡黏假设, 即假设雷诺应力的各向异性部分与应变率张量之间存在线性关系, 而两者之间的比例系数为涡黏系数。为了模化涡黏系数, 业界提出了一系列湍流模型, 包括 $k-\epsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型、SA模型和 $k-\omega$ SST模型等。这些模型通常需要数值求解额外的偏微分方程来得到涡黏系数, 进而计算出雷诺应力, 从而实现平均流场的求解。

适用于涡轮叶片边界层转捩的湍流模型

涡轮叶片边界层往往存在层流—湍流转捩现象。在对涡轮叶片内流进行雷诺平均模拟时, 往往需要在湍流模型基础上对转捩现象进行建模。然而转捩现象的影响因素众多, 转捩路径多样, 对转捩模型的构建提出了较大的挑战。以低压涡轮平面叶栅为例, 在上游的周期尾流流经低压涡轮平面叶栅时, 会受到叶栅曲率和压力梯度的影响, 在尾缘附近出现非定常分离和涡脱落。在这样的复杂场景下, 往往需要考虑旁路转捩、尾流诱导转捩、分离诱导转捩等不同转捩路径; 当存在粗糙壁面时, 还需考虑壁面粗糙元诱导转捩^[4], 如图4所示。壁面粗糙度的存在相当于在边界层中引入了额外的扰动, 导致流动提前向湍流转捩, 使边界层内的动量交换得到增强, 从而可能抑制流动分离。

目前主要有两种思路来建立转捩模型^[5]: 一种是基于局部修正, 即利用高可信数据标定得到的变量关联来修正转捩开始位置, 如 $\gamma-Re_\theta$

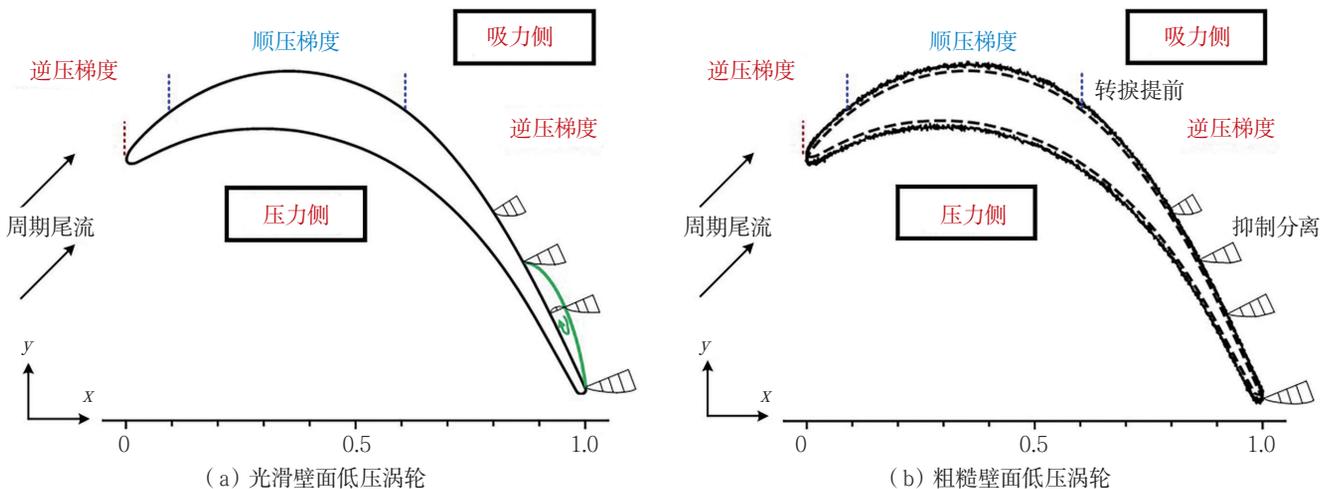


图4 粗糙壁面对低压涡轮叶片的分离和转捩的影响

模型及其后来的简化版本 γ 模型；另一种则是基于物理机制，重点关注转捩过程中的某些物理特征，如层流动能模型及相关的改进版本 $k-\overline{v^2}-\omega$ 模型。将几个代表性模型应用于低压涡轮平面叶栅的雷诺平均模拟，其壁面切应力结果如图5所示。在前缘位置存在逆压梯度，除了SA模型以外其他湍流模型都捕捉到了小尺度的分离泡。在中部的顺压梯度区，在流动加速的作用下，壁面切应力存在一定程度的增加。随后在靠近尾缘的逆压梯度区，流动减速，壁面切应力开始下降，最终在80%弦长位置之后发生层流分离，而该分离现象未能被 $k-\omega$ SST模型、SA模型和 $\gamma-Re_\theta$ 模型捕捉到。此外，由于没有考虑转捩效应， $k-\omega$ SST模型、SA模型会预测出更大的壁面切应力。通过壁面切应力曲线可知 $k-\overline{v^2}-\omega$ 模型在这些湍流模型中能够最好地捕捉尾缘分离泡和转捩位置，与具有高可信度的直接数值模拟结果符合得较好。

考虑壁面粗糙度的湍流模型

为了模化壁面粗糙度对涡轮叶栅流

动的影响，目前主要有两种方法，分别是等效粗糙度模型和离散元方法。等效粗糙度模型是将几何尺寸的粗糙元与紧密排布的沙砾粗糙元进行等效，从而得到等效粗糙度高度 k_s ，并将其耦合到原始的湍流模型。离散元方法则是将粗糙元对流动的阻塞效果通过一个阻塞因子 β 来表示（与叶片表面的粗糙元所占面积与表面的总面积之比有关），以源项的形式将其添加到流动控制方程，来引入粗糙元对流动的影响。目前应用最普遍的是第一种方法，将等效粗糙度模型与湍流模型耦合，从而实现了对湍流模型的粗糙壁面修正，已在许多计算流体力学软件中得到了实现和应用。下面主要围绕该方法的相关研究进行展开。

对于湍流模型的粗糙壁面修正，早期研究主要是围绕修改壁面边界条件展开。由于粗糙壁面的引入，靠近壁面的平均速度剖面发生了显著变化。DCW工业公司的威尔科克斯（Wilcox）于1988年最早提出了针对 $k-\omega$ 模型的粗糙壁面边界条件^[6]，即“威尔科克斯粗糙度修正”，启发了后续的很多研究。德国航空航天

中心克诺普（Knopp）等^[7]于2009年提出了适用于粗糙壁面的SST模型，被之后的许多研究参考与应用。这些模型都是通过修改湍流方程的边界条件以模拟粗糙度效应，如阻力升高和对数律速度剖面的偏移等。这些模型虽然已取得了不错的效果，可以在一些算例中较好地预测壁面压力系数、摩擦阻力系数等，但仍然存在一定的缺陷。例如，克诺普等于2009年提出的模型无法预测粗糙度诱导的流动分离^[8]，这是由于粗糙度诱发分离的主要机理还较为模糊，需要进一步围绕高精度流场获得的高保真流动机理来完善模型修正的工作。

以上粗糙壁面修正主要是针对充分发展湍流的情形，对于较低雷诺数、可能存在转捩的情形需要引入其他形式的粗糙壁面修正。在转捩模型中作粗糙壁面修正一般也有两种建模思路。第一种思路是修改原始转捩模型方程中的产生项，使得模型预测的壁面粗糙元影响下的边界层转捩更快发生。这种方法比较依赖物理直觉，需要构建特定的函数形式来反映粗糙壁面对于转捩的影响，而且函数的构造形式一般较为复杂。第二种思路是引入与粗糙度相关的额外方程，其中最为典型的是由达斯勒（Dassler）等提出的描述粗糙度增益因子全场输运的 A_r 方程，并将粗糙度增益因子与原始模型输运方程相耦合，以实现壁面粗糙度对流场影响的模化。对于引入输运方程的粗糙壁面转捩模型，目前国内外已有了较多的研究。除了将 A_r 输运方程补充到 $\gamma-Re_\theta$ 模型以外，也出现了对 $k-\omega-\gamma$ 三方模型、层流动能模型中添加 A_r 输

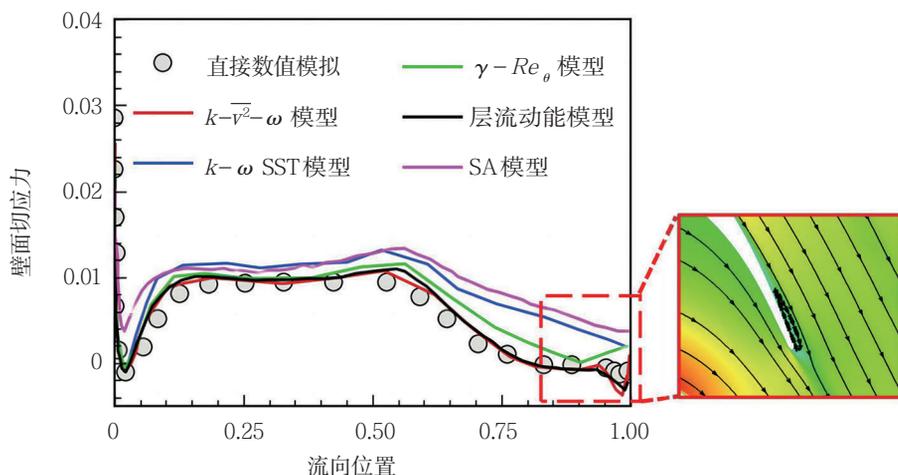


图5 不同湍流模型对低压涡轮壁面切应力的预测效果^[4]

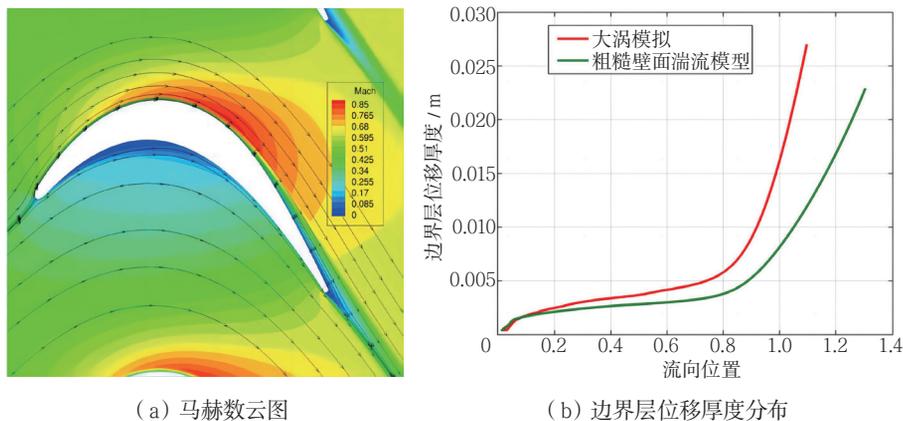


图6 粗糙壁面修正后的湍流模型对低压涡轮流动的预测结果^[8]

运方程的工作，以实现粗糙壁面影响下的转捩流动模拟。在以上对转捩模型作粗糙壁面修正的过程中，通常也需要结合前人提出的湍流模型中的粗糙壁面边界条件，来完成整个模型的修正过程。

粗糙壁面湍流模型在涡轮内流中的应用

到目前为止，将考虑粗糙壁面模型的雷诺平均模拟方法应用于叶轮机械的相关研究工作仍然较为初步，

模型的预测精度仍然有较大改进空间。例如，美国联合技术研究中心的乔（Joo）等^[8]将克诺普于2009年提出的粗糙壁面修正的SST模型应用于带有粗糙壁面的低压涡轮叶片，通过数值模拟得到结果如图6所示。从马赫数云图（见图6（a））可看出，通过该粗糙壁面湍流模型并未预测到尾缘分离；从边界层位移厚度（见图6（b））结果来看，相比于具有更高分辨率的大涡模拟，采用粗糙壁面湍流模型的雷诺平均模拟所预测

的边界层厚度增长较慢。以上结果可说明，克诺普的粗糙壁面湍流模型未能较好地预测低压涡轮边界层流动。

针对粗糙壁面转捩流动，艾奥瓦州立大学的杜宾（Durbin）课题组将考虑粗糙壁面修正的转捩模型应用于低压涡轮传热性能的预测^[9]。由图7（a）所示的努赛尔数沿叶片吸力侧边界层分布可知，虽然雷诺平均模拟结果可以在部分位置与实验数据相符合，但是在转捩位置的预测方面仍然有显著偏差。

德国汉堡应用科技大学科祖洛维奇（Kozulovic）等将传统 $\gamma - Re_{\theta}$ 转捩模型与粗糙度增益因子 A_r 输运方程耦合，在模拟中考虑粗糙度效应对转捩模型的影响，将其应用于低压涡轮尾流损失的预测^[10]。流动求解器采用的是德国航空航天中心的TRACE，其求解结果如图7（b）所示。通过对比3种不同粗糙度，发现随着粗糙度的增加，该模型可以预测到尾流损失增长的趋势，但仍然与实验数据之间有较大差异。

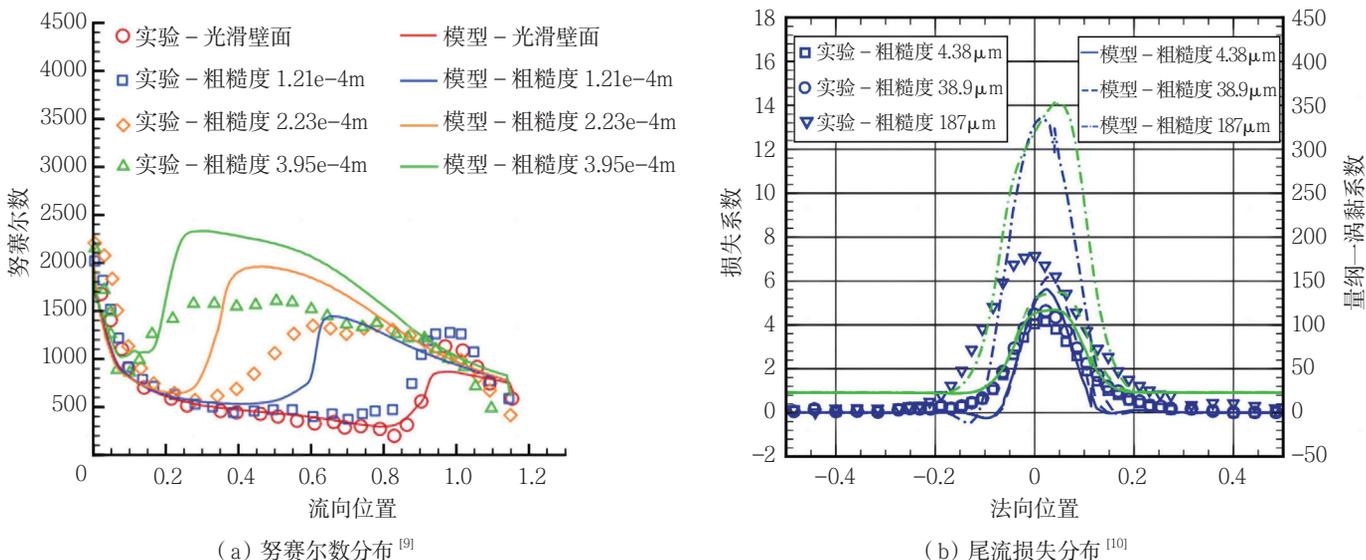


图7 粗糙壁面修正后的转捩模型对低压涡轮流动的预测结果



以上雷诺平均模拟的预测结果反映了业界在模拟不同粗糙壁面涡轮叶片流动时所面临的挑战。这些挑战主要在于当前湍流模型对于壁面粗糙效应的捕捉能力有限,其根本原因在于粗糙壁面的作用机理极端复杂,而现有高保真数据较为缺乏,需要进一步改进现有模型或开发新的模型,以更好地考虑粗糙度效应。

粗糙壁面湍流模型建模挑战和未来研究重点

即便引入壁面粗糙度修正,雷诺平均湍流模型在预测不同粗糙度条件下的涡轮叶片流动时,仍然面临转捩位置预测不准确和未能有效捕捉层流分离等问题。这一现象的部分原因在于对于粗糙壁面湍流的机理研究尚不充分,缺乏必要的物理实验知识以支持粗糙壁面湍流模型的建模。此外,由于不同粗糙壁面特征的复杂性,在计算等效粗糙度时不可避免地会引入模型误差,这将导致粗糙度模型无法精确刻画壁面粗糙度。

为了提高湍流模型的准确性和适用性,未来的研究需要致力于深入探索粗糙壁面对湍流特性的影响机制。通过获取不同类型、不同尺度的粗糙度分布下流场的高分辨率数据,可以为湍流模型的开发提供更丰富的数据支持。这些数据不仅有助于深入研究粗糙壁面对流动特性的影响,还可用于校正和优化现有的湍流模型。

此外,结合机器学习方法,可以有效地从大量数据中学习和提取复杂流动的特征。利用机器学习对模型进行优化,有望增强模型在处

理复杂壁面条件下的预测能力,在一定程度上弥补传统模型的不足。目前已有将机器学习方法应用于涡轮叶片内流的湍流建模相关研究,为提升湍流模型的预测精度提供了可行且有效的方法。

结束语

考虑壁面粗糙度对涡轮叶片内流影响的湍流建模是当前亟待研究的课题。为了模拟粗糙度对边界层流动的影响,国内外已经开发了一系列引入壁面粗糙度修正的雷诺平均湍流模型,这为涡轮气动性能预测提供了有效的工具。然而,这些模型在预测精度方面,尤其是对于转捩位置、流动分离的预测,仍有待进一步提高。准确预测壁面粗糙度影响下的流动转捩和分离对发动机性能预测极为关键,这对加快航空发动机的自主研发具有推动作用。

航空动力

(赵耀民, 北京大学, 研究员, 主要从事以航空发动机为应用背景的湍流数值模拟与建模)

参考文献

- [1] BONS J. A review of surface roughness effects in gas turbines[J]. *Journal of turbomachinery*, 2010,132(2):021004.
- [2] ZENG X, LUO J, CUI J. Roughness effects on flow losses of a high-lift low-pressure turbine cascade[J]. *AIP advances*, 2022,12(1):015316.
- [3] SANDBERG R, MICHELASSI V. Fluid dynamics of axial turbomachinery: blade- and stage-level simulations and models[J]. *Annual review of fluid mechanics*, 2022,54(1):255-285.

- [4] AKOLEKAR H, WEATHERITT J, HUTCHINS N, et al. Development and use of machine-learned algebraic reynolds stress models for enhanced prediction of wake mixing in low-pressure turbines[J]. *Journal of turbomachinery*, 2019,141(4):041010.
- [5] DICK E, KUBACKI S. Transition models for turbomachinery boundary layer flows: a review[J]. *International journal of turbomachinery, propulsion and power*, 2017,2(2):4.
- [6] WILCOX D. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models[J]. *AIAA journal*, 1988,26(11):1299-1310.
- [7] KNOPP T, EISFELD B, CALVO J. A new extension for $k-\omega$ turbulence models to account for wall roughness[J]. *International journal of heat and fluid flow*, 2009,30(1):54-65.
- [8] JOO J, MEDIC G, SHARMA O. Large-eddy simulation investigation of impact of roughness on flow in a low-pressure turbine[C]. *Turbo expo: power for land, sea, and air*. American society of mechanical engineers, 2016.
- [9] GE X, DURBIN P. An intermittency model for predicting roughness induced transition[J]. *International journal of heat and fluid flow*, 2015,54:55-64.
- [10] KOZULOVIC D, JUCHMANN N, FUHRING A, et al. Transition model extension for roughness effects[C]. *Turbo expo: power for land, sea, and air*. American society of mechanical engineers, 2022.