

CSTAM2014-B01-0304

数值模拟内/外绕流的计算方法探讨¹⁾

高智²⁾, 申义庆

(中国科学院力学研究所高温气体国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 数值模拟内/外绕物体流动的计算方法, 从流体力学角度看, 可分为 4 种方法。(1) 直接数值模拟(DNS)和寻常的 NS 方法, (2) 雷诺平均 RANS 和大涡模拟(LES)混合方法, 如 DES 等, (3) 抛物化即抛物化(P)NS、抛物化稳定性方程(PSE)和抛物化雷诺平均 NS(PRANS)混合方法, (4) 工程近似估算方法。工程近似估算方法利用已知的理论和经验关系推算壁面摩擦阻、热流、转捩位置等气动特性, 是一种不数值求解原始 NS 方程的快捷估算方法。DNS 是能够算出湍流所有尺度运动的 NS 方程组计算, DNS 可给出详细的流场信息。RANS/LES 混合方法可在比 DNS 较粗的网格上进行, 对计算机的要求比 DNS 低, 是当今 CFD 计算的一个主要方面, 计算研究很热, 对一些具有工程价值的复杂湍流流动, RANS/LES 混合方法计算已取得一些令人瞩目的数值结果。在该法中, 转捩模型、湍流模型是引起数值误差、失真的主要原因, 湍流模型已有众多研究, 现今仍是一个值得研究的困难问题。PNS/转捩模型或 DSE/PRANS 混合方法, PNS, PSE 和 PRANS 在流向马赫数大于 1 时, 可用空间推进(SMA)求解, 与 PNS, PRANS 时间相关计算相比, 计算维数减少一维, 大大节省了计算机内存和计算时间, 所需机时约是 NS, PRANS 所需机时的百分之一, 显然是气动特性计算的快速计算方法。因此, 该法得到了广泛的应用, 成为工业标准气动计算的基础, 发达国家(如美国)研发了不少 PNS-SMA 计算软件, 所有主要的气动实验室和公司都在使用。我国 PNS 应用计算较弱, PNS-SMA 这类计算软件美国对我国禁运。我国气动界前领导人庄逢甘先生, 在他去世前二、三年仍在积极筹组 PNS-SMA 计算软件研发, 可惜未能实现。在抛物化方法中, 抛物化近似带来的失真和数值误差要比湍流模型、化学反应速率模型等带来的失真和数值误差为小, 这是抛物化快速计算方法得到工业界长期使用的一个基本原因, 抛物化快速计算也是对 DNS、RANS/LES 混合方法的重要补充。此外应提到, DNS 的时间相关计算同样值得重视, 例如 NASA 研究人员在 2004 年进行的单方向和三方向抛物化 NS 和 RANS 方程组计算。PSE-SMA 稳定性计算与 DNS 稳定性计算相比, 对平板边界层流所需机时仅是 DNS 所需机时的万分之一。

关键词: 计算流体力学, 抛物化 NS 方程, 湍流

1) 国家自然科学基金(11272324)资助

2) Email: gaozhi@imech.ac.cn