



第四届国际雷诺平均-大涡模拟 混合方法学术会议纪要

罗堃宇 肖志祥 符松[†]

清华大学航天航空学院, 北京 100084

1 会议概况

由清华大学、中国力学学会、德国宇航院和欧盟第七框架协议 ATAAC 项目联合主办, 清华大学承办的“第四届国际雷诺平均-大涡模拟混合方法学术会议”(The 4th Symposium on RANSLES Hybrid Methods) 于 2011 年 9 月 28~30 日在北京凯迪克-格兰云天大酒店召开. 瑞典国防研究院 (FOI) 彭夏辉 (Shia-Hui Peng) 教授为大会组委会主席、欧洲航空防务与空天公司 (EADS) 资深专家 Werner Haase 博士、德国宇航院 (DLR) ATAAC 项目负责人 Dieter Schwamborn 博士担任大会组委会的共同主席, 清华大学航天航空学院符松教授担任本届大会主席; 大会会务组织由中国力学学会办公室承担, 清华大学航天航空学院先进湍流模拟研究室 (LAST) 相关教师、博士后和研究生负责接待、会务、会场和翻译等工作.

该系列会议的前三届分别在瑞典 Stockholm(2005), 希腊 Corfu(2007) 和波兰 Gdansk(2009) 举行.

本次会议主要内容包括: 雷诺应力模式、非定常混合方法、先进 URANS 方法、改进的 DES 方法、混合方法对比及相关数值问题等. 会议吸引到欧、美、亚三大洲 16 个国家的 100 余名与会代表, 其中有欧盟政府官员、知名专家学者、研究院所和工业界的研究人员、以及商业计算机软件公司等. 会议共收到文章 60 余篇, 大会邀请报告 7 篇, 大会论文将由 Springer 出版社结集出版.

2 大会邀请报告

会议邀请到了欧洲联盟委员会航空研究与创新总干事 Dietrich Knoerzer 博士、中国商飞北京民用飞机技术研究中心副总师张慧骝博士、空中客车公司资深专家 Adel Abbas 博士、德国宇航院 CFD 主任 Dieter Schwamborn 博士、日本宇航局空间航空研究所副所长 Kozo Fujii 教授、ANSYS 公司国际著名湍流专家 Florian Menter 博士和美国德克萨斯 A&M 大学 Sharath Girimaji 教授分别作了本领域前沿研究的大会邀请报告.

Dieter Knoerzer 博士介绍了欧盟在航空产业方面的组织构架、研究成果、资金配置和未来计划等. 其中, 欧盟在最新的“Flightpath 2050”中提出了对未来航空业的展望, 包括满足社会和市场的需求、维持并扩大欧洲在航空工业的领导地位、节能环保与安全等方面; 已经完成的和正在进行的研究计划包括飞行器新概念研究 (NACRE, Airbus)、高速环保飞行器 (HISAC, Dassault)、飞行雷诺数测试 (FLIRET, Airbus-D)、新型飞行器层流测试 (TELFONA, Airbus UK)、超音速转捩控制 (SUPERTRAC, ONERA) 以及等离子体控制 (PLASMAERO, ONERA) 等; 还在第七研究框架项目 (The 7th Research Framework Programme, FP7) 中资助 ADIGMA、ATAAC、IDIHOM 等. 此外, 欧盟还将开展超过 7 年的“Horizon 2020”研究与创新框架项目.

张慧骝博士介绍了中国商用飞机目前的发展情况, 包括 ARJ21 和 C919 的主要参数和性能指标

[†] E-mail: fs-dem@tsinghua.edu.cn

等,重点介绍了 CFD 在 C919 气动设计中的广泛应用,如超临界翼型设计、翼梢小翼设计、高升力系统设计和比较分析,以及涡扇发动机短舱、挂架与机体的一体化设计(包括吊舱位置的优化、吊舱支架和机翼前缘的安装位置、发动机吊舱前束角对气动干扰的影响等)。中国商飞未来将要发展与国际先进民机类似的宽体中远程客机,并将自行开发 CFD 计算程序。

Adel Abbas 博士指出,在未来十年中,数值模拟会极大地增加飞行器设计的效率和质量。“数字飞行器”可以使工程师们更有弹性、更有效率地掌控飞行器研发的进程。为了得到全方位优化的产品,需要耦合各相关学科以对飞行器进行精确模拟。未来可用两种不同的方式来模拟一架飞行器气动性能:一种是利用高性能计算机实时解算几十至上百亿个非线性控制方程,从而精确地模拟所有飞行状态;另一种是预先计算飞行包线中特征点的飞行状态,并利用插值方法得到全任务范围内的参数。两种方法各有优劣,但都需要以高性能的计算机、先进的数值方法以及高复杂度的集成化模拟系统作为基础。

Dieter Schwamborn 博士介绍了欧盟合作项目 Advanced Turbulence Simulation for Aerodynamic Application Challenges(ATAAC)的研究背景、目标、方法以及目前的进展情况,代表了雷诺平均-大涡模拟混合方法的最新研究水平。

Kozo Fujii 教授介绍了日本宇宙航空研究机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)利用数值模拟研究低雷诺数(约 10^4)流动的情况。其目的有二:为了开发在低密度大气中飞行的火星探测器;利用微型机构和装置进行流动控制。Fujii 教授领导的团队已经利用 LES、层流和 RANS 方法对典型翼型开展了数值模拟。通过研究发现,翼型流动对雷诺数非常敏感,必须仔细校核翼型在不同雷诺数下的表现。他同时指出,低雷诺数下机翼的三维效应减弱;当流动分离还不严重时,二维层流假设即可很好地估计升力、阻力和力矩特性。

Florian Menter 博士对现今应用于工业界的雷诺平均-大涡模拟方法进行了综述,评价了一系列流动拓扑结构的模型。他用大量实例展示了如何选取最佳方法来处理不同的应用问题,指出不同工业流动模拟问题需要对应的模型以满足不同的需求;从理论和实际的角度出发,对不同的方法,尤其是统一和分区方法进行了比较,并讨论了雷诺平均区域与大涡模拟区域交界的问题。

Sharath Girimaji 教授介绍了 Variable-Resolution 湍流模拟方法。VR 方法可以在任意给定条件下提供最佳的计算精度,这种特性对工程应用极为理想。然而,这些满足精度需要的方法目前在理论上被认为还不完善。Girimaji 教授认为 VR 方法可以建立在牢固的理论基础之上,同时不牺牲数值鲁棒性和实用性。他证明了 PANS-VR 方法具有可靠的物理和数学基础,对复杂流动有足够的鲁棒性,还展示了 PANS 方法在复杂流动中应用效果。

3 分会场 A

分会场 A 重点关注 RANS-LES 混合方法相关的理论、对比及其表现。

R. Laraufie 等将 ZDES 作为从 RANS 转换到 WMLES 的灵活有效的近壁湍流方法,目的是将 DES 类方法扩展到近壁湍流流动中,同时保持工程计算的可用性。作者提出了动态强制(dynamic forcing)方法,它结合 ZDES 解析方法和合成湍流方法,可显著缩短模式转换距离。

S. Jakirlic 等以连续弯曲壁面边界层分离为对象,验证了基于低雷诺数四方程模式的 PANS 方法,计算结果的回流区缩短,与实验符合得较好。

S. Y Chen 等提出了约束大涡模拟(CLES)方法。与传统 DES 方法不同,CLES 方法在近壁区使用约束的亚格子应力模式,在其余区域则使用传统亚格子应力模式。针对槽道和圆柱绕流验证了方法的有效性,结果表明,对于附着流动,CLES 能够消除非物理的对数区不匹配问题,且比 DES 更准确地预测平均速度剖面、湍流应力和壁面摩擦系数;对于分离流动,CLES 的表现与 DES 相当。

R. Maduta 等构造了一种基于雷诺应力输运模式的新一代 SAS 方法,并用槽道、后台阶、二维周期平台、三维扩张管和串列双圆柱等多个算例进行验证。结果表明 DRSM-SAS 方法可表现出流动的非定常性质,可获得大尺度和小尺度结构及非定常特性,从而正确预测时均流动特性。

F. Fraysse 研究了二维、三维假设以及湍流模式对于典型跨声速流($Ma = 0.8$, $Re = 8.6 \times 10^5$)凹腔噪声预测的影响。

S. Rolfo 等研究了 RANS-LES 混合方法框架下的一种标量通量模型,通过预测加热的槽道流动及 T 形接头流动,研究不同普朗特数的影响,计算结果与 DNS 和实验数据吻合较好。

N. Qin 等展示了高雷诺数下圆柱大分离流动 DES 和 DDES 的计算结果. DES 和 DDES 方法能很好地模拟大范围分离流动的机理, 压力和表面摩擦系数与实验吻合得较好; 两种方法结果相近, 但 DDES 较 DES 的计算量略大.

Z. X. Xiao 等在自适应耗散格式基础上, 通过数值预测串列双圆柱算例研究 DDES-2003/2006 和 IDDES 的预测能力. 结果表明 DDES-2003 的 RANS 区域较大; DDES-2006 转换很快; IDDES 效果最好, 其壁面模型起了关键作用.

M. Terracol 等研究了缝翼和襟翼放下时三段翼型的流动, 重点研究前缘缝翼凹腔区域的非定常流动特征. ZDES 和 NLDE 两种混合方法的统计结果与瞬时结果均与实验符合很好.

Y. Zhang 等将多尺度有限元方法引入到 SA-DES 中, 修正了标准 Galerkin 方程的稳定性问题, 并用后台阶流动进行验证. 对 CAARC 标准高层建筑模型的流动模拟结果显示该方法能够准确地预测大气边界层流动中表面压力的分布.

F. Gand 等研究了 ZDES 方法在跨嵌套界面时湍流结构的表现. 其效果比 RANS, ZDES 更佳; 当嵌套区域的网格密度变化率较低时, 可以保证其准确性.

B. Roidl 等在分区 RANS-LES 混合方法中 LES 边界条件上引入合成湍流, 将亚音速和超音速平板流动中表面阻力、速度和雷诺应力分布与纯 LES, DNS 及实验数据进行比较, 得到了较理想的 RANS-LES 转换距离.

C. Larricq 等采用 Fluent 和 Powerflow 预测 M219 凹腔流动. 当 $Ma = 0.3$ 时, 两种商业软件得到了相似的声学结果, 平均流动略有区别, 原因是两种软件计算的击打在凹腔前缘的边界层不同.

4 分会场 B

分会场 B 的主题是 RANS-LES 混合方法的推广应用和多学科耦合等.

S. Arvidson 等利用混合方法分析了 $Ma = 1.4$ 时管道内激波诱导的边界层分离 (SWBLI), 强调了使用混合方法模拟 SWBLI 时存在的困难, 提出在使用解析湍流预测方法时的一些重要注意事项.

J. B. Huang 应用 IDDES 方法模拟了 OAT15A 超临界翼型上表面激波抖振现象. 压力系数脉动的均方根值和流向激波震荡范围与实验符合得较好. 采用两个涡流发生器控制振荡, 结果表明振荡

范围被明显抑制, 压力脉动均方根值有效减小, 平均激波位置显著向下游移动, 总升力增加.

V. Brunet 采用 ZDES 及湍流生成方法预测发动机喷流及其下游的内涵双层流动. 由于采用了湍流生成技术, 计算结果与实验吻合得很好, 正确地预测了平均和脉动的流动特征.

C. R. Mockett 等介绍了其课题组采用混合方法预测直升机机体阻力及提高混合方法软件可用性的工作. 采用 DDES/IDDES 方法对简化的 EC-145 直升机机身模型进行模拟, 并与 URANS 和实验结果进行比较.

S. Reuss 等利用 SA-DDES、分区 SA-DDES 和 SA-IDDES 对 LEISA 三段翼型进行数值模拟. SA-DDES 和分区 SA-DDES 方法在襟翼处无法正确地计算出应有的流动分离; 而 SA-IDDES 方法正确地模拟了前缘缝翼流动尾迹与主翼型边界层的相互影响, 预测了襟翼上的流动分离.

B. Nebenfuhr 等利用混合方法对 LEISA 三段翼型湍流流动进行了模拟, 结果表明: 时间解析度和计算域的展向宽度不仅对平均流动的预测有影响, 更显著地影响湍流结构的相关性, 进而影响到气动噪声的预测精度.

L. Wang 等使用可压缩 DDES 和 IDDES 方法, 在 $Ma = 0.115$ 和 $Ma = 0.23$ 时, 计算波音 RLG 起落架近场流动, 并耦合 FWH 方程获得远场噪声, 验证了 Spalart 等 (2011) 关于 FWH 计算中风洞洞壁和四极子的重要作用.

L. W. Temmerman 等使用新一代 URANS 方法和 EARSM 模式对 M219 凹腔跨音速流动进行了预测, 得到了平均流动情况和声模态; 同时讨论了时间步长对流动特征的影响规律.

5 结 语

本次会议基本涵盖了全世界 RANS/LES 混合方法及相关方法的最新成果, 为湍流模型开发、数值模拟和测量、流动控制、气动声学、气动弹性和基于 CFD 的多学科优化等领域的学者、航空航天工程师、在校研究生等提供了一个非常难得的学习和交流机会. 此次会议的成功举办对我国的 RANS-LES 混合方法发展将起到积极的推动作用, 并将促进该方法在航空、航天、航海、高速铁路、汽车等相关工业中的应用.

本次会议得到了中国商飞 (COMAC) 北京民用飞机技术研究中心、国家自然科学基金 (11110301028)、北京大学湍流与复杂系统国家重

点实验室 (LTCS)、中国科学院力学研究所非线性 EDF, ERCOFTAC, NUMECA 和 WH Aeronautics
性力学国家重点实验室 (LNM), Airbus, ANSYS, 的支持和赞助.

REVIEW OF THE FOURTH SYMPOSIUM ON RANS-LES HYBRID METHODS

LUO Kunyu XIAO Zhixiang FU Song[†]

School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China

[†] E-mail: fs-dem@tsinghua.edu.cn