



湍流基础研究新进展 —— 湍流 973 项目实验标模会议概况

余振苏[†] 陈曦

湍流与复杂系统国家重点实验室, 北京大学工学院, 北京 100081

在第 3 届国际流体物理会议召开的间隙,“湍流 973 项目实验标模研讨会”于 2009 年 6 月 15~19 日在四川九寨沟“九寨天堂”国际会议中心成功举行. 该项目是 2009 年开始启动的科技部综合交叉领域 973 项目:“飞行器气动力学与光学设计中的关键湍流问题”,由北京大学、航天 11 院、天津大学、北京航空航天大学、中国空气动力研究中心、中科院力学所、国防科大等 7 所单位联合承担. 项目组以钱学森复杂系统理论为指导,特别设计了以课题负责人为成员的总体组,按照“专家研讨厅体系”的运作方式,通过多次讨论、反复迭代和层次递进的方式,来实现对项目总体目标、计划和任务的实施. 此次关于“实验标模”的研讨会,就是在这个精神指导下进行的一次深入研讨. 此前,项目组于 2009 年 3 月 8, 9 日在香山会议中心召开正式的启动会,随后,分别于 4 月 22 日在天津大学、5 月 15 日在北京航空航天大学、5 月 25 日在航天十一院、6 月 5 日在北京大学召开了 4 次课题组研讨会. 在这一系列的密切研讨的基础上,形成了一个共识,即围绕几个标准模型,开展实验、DNS 计算、LES 计算、RANS 计算、理论机理分析等系列研究,争取形成对湍流运动的系统认识,将机理分析与工程实用计算模型的开发有机地衔接起来. 由于上述一系列的先期工作,为本次会议的顺利进行作了充足的准备.

来自北京大学的余振苏首席科学家、李存标教授,航天十一院的马汉东、毕志猷研究员,国防科大的易仕和教授,北京航空航天大学阎超教授,中国空气动力研究中心的邓有奇研究员,中科院力学所的李新亮副研究员等 8 位项目总体组成员,以及北京大学陈军、陈曦、宣李俊;航天十一院李睿劬、甘才俊等参加了此次研讨会. 会议特邀参加的还有北京大学周明德教授(访问)、吴介之教授;中科院力学所傅德薰、马延文研究员.

会议围绕 973 项目专家组张涵信院士在香山启动会上提出的“一个中心,两个基本点”——即“以湍流结构系综思想为中心,带动计算和实验的发展,解决气动计算和气动光学计算问题”展开. 余振苏教授以“壁湍流结构系综动力学封闭模型研究”的报告拉开研讨的序幕,为与会学者全面介绍了湍流 973 项目运作的新思想和新进展. 本次会议包括 3 次全体会议和 3 次小范围讨论,在一片热烈的讨论氛围中达成了如下一系列的决议:

1 开展 4 个标模的实验和计算

平板边界层加压缩拐角是一项与边界层湍流、激波

相关的实验、计算、工程模型相结合的标模工作. 这项工作对于认识壁湍流的基本机理,尤其是高速气流中激波与边界层的作用机理具有重要意义. 虽然国际上已经有了一定的实验和计算结果,但流动机理仍然有待深入研究. 项目组委托北京大学李存标教授、国防科大易仕和教授等,充分利用过去几年在流场精确测量新方法探索中形成的积累,负责设计平板边界层加压缩拐角的实验,精确测量系列参数变化下流场演化的信息,为湍流结构理论分析和验证计算模型提供可靠的实验数据. 同时,项目组委托航天十一院毕志猷、李睿劬研究员凭借已经具备的实验条件,探索适用于平板边界层和压缩拐角的光学干涉密度场测试技术. 在精确实验测量的同时,项目首席余振苏教授与中科院力学所李新亮研究员一起,联合航天十一院相关人员,协力推动计算模型的建立,开展直接数值模拟、大涡模拟计算,开展湍流功能结构系综研究,并以此为基础开发新的湍流模式计算模型.

三维机翼是一项与大飞机计算密切相关的实验、计算标模工作. 北京大学李存标教授在会议上特别介绍了今年年底到明年上半年即将开展的三维机翼流动实验,引发了大家热烈的讨论. 该实验将提供尽可能精密的实验数据,与北京大学陈十一教授开展的直接数值模拟、大涡模拟,以及新近发展的雷诺平均-大涡模拟混合算法相对接,形成实验-计算的有机统一. 同时,项目组充分发挥“专家研讨厅”的作用,由首席余振苏教授与陈十一、李存标教授协同开展三维机翼多种流态下的、从机理分析到工程湍流模型开发相结合的综合研究,确定实验、计算数据的系统比对,实现实验、理论、计算研究的交叉和并进.

热流预测问题是钝锥研究的一大难点. 在会议上,李新亮研究员报告了国际上首个高马赫数有攻角的钝锥边界层直接数值模拟结果,航天十一院李睿劬研究员报告了上一阶段钝锥实验热流测量的结果,以及下一阶段实验研究的设想,引发了与会学者的高度关注和热烈讨论. 项目首席与马汉东、毕志猷、李新亮等研究员达成一致,将共同推动有关钝锥实验-计算标模设计和机理研究. 航天十一院充分发挥自身优势,将在今年下半年开展一系列钝锥实验,对预测数据,尺寸型号,测试条件,攻角、来流马赫数、来流雷诺数等物理参数给与系统的规划;李新亮研究员等以已开发的直接数值模拟计算为基础,在结构系综理论指导下,开展转捩的机理分析,为工程湍流模型的开发奠定基础. 会议提议相关研究成员在

国家重点基础研究发展计划“973”项目资助(2009CB724100)

[†] E-mail: she@pku.edu.cn

今年 7 月份于北大再次进行研讨,开展钝锥热流预测问题的研究部署。

混合层标模实验对于湍流机理研究和气动光学效应的探索具有重要意义。国防科大易仕和教授在大会上给了题为“基于纳米粒子散射方法的超声速湍流实验研究”的报告,介绍了新开发的处于国际先进地位的纳米粒子跟踪测试方法(NPLS),受到了与会学者的密切关注。这一方法能够对高速剪切流动结构进行细致的观察,为高速实验研究提供了有力工具。易仕和教授将综合利用激光纹影、NPLS、BOS 测试技术,对不同马赫数、不同压差比的混合层开展实验,汇聚一批高质量的定量数据。航天十一院马汉东、甘才俊研究员也将开展高对流马赫数的混合层实验,并由项目总体组整合两套实验参数,实现高低马赫数的实验对接。北京大学与中科院力学所、航天十一院合作,开展直接数值模拟、大涡模拟和湍流封闭模型的计算,与实验结果开展定量的比对。

本项 973 研究的一个重要目标是实现光学效应反演湍流结构。在气动光学效应机制上,本项目希望在国际上首先实现突破,也是实现庄逢甘先生长期以来的一个愿望。航天十一院拥有国内领先的气动光学效应实验基础,马汉东、甘才俊研究员富有创意介绍了混合层光学传输效应及结构系综功能结构的研究设想。这一技术同样将应用于钝锥、平板边界层家压缩拐角的光学效应测量和研究中。项目首席余振苏教授对此进行了充分的肯定和支持,将联合中科院力学所李新亮研究员及相关队伍开展直接数值模拟的计算及湍流结构系综的研究。

2 对大分离流场的实验和计算讨论

大分离流场的标模实验和计算,是开发新的湍流模型所必需的关键点。当前大部分湍流模式基于涡黏假设,在出现逆压梯度、分离和其他流动现象(如旋转、磁场等)时,尤其在湍流输运出现各向异性时,计算精度相当有限。为此,余振苏教授在会议中着重阐述了针对大分离的标模开展多参数、系列化的实验研究的重要性,并介绍了从结构系综序函数出发来定量表述典型流动现象,把人们对流动的经验定性认识转化成定量表达,从而整合在湍流模型中的研究新思路。在这个意义下,结构系综的湍流模型最终实现的是对系列解的精确预测,是传统 RANS 模型所做不到的。对此,航天十一院马汉东研究员提出了“平板边界层基础上设计不同斜面的复合平板边界层”的标模方案。他指出,平板上放置有限宽度的突起物可以作为简化翼身组合体;平板加斜面是一个二维压缩拐角;考虑展向变化就有三维效应;考虑后掠又有横流作用;外形再变化就可以有航空航天的内容,如果是简单的凸球,就可以做激光发射平台与光学效应联系起来。这一标模有很多变化,在国际上也是创新。根据当前的研究部署,会议决定,大分离的标模实验放在 973 项目研究的后期逐步展开。

3 开展 CFD 系列标模的湍流模式评估

2007 年香山科学会议明确提出:计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)计算在飞行器设计中发挥着越来越重要的作用,湍流成为制约 CFD 发展的瓶颈。当前,国际 CFD 计算整合水平高,但核心湍流计算算法还不够好。我国 CFD 计算在整合和计算

算法上要大力提升。北京航空航天大学阎超教授长期位于 CFD 计算的第一线,拥有相当丰富的计算经验。他为大家介绍了题为“CFD 发展动态”的报告,介绍了“大型客机”CFD 计算在“机翼激波的影响”、“翼身组合体的定常小分离”、“机翼后体非定常大分离的减阻”的 3 大需求,提出了“三维机翼”、“翼身组合体”、“增升装置”、“双锥绕流”4 个计算标模,引发了学者们的热烈讨论。中国空气动力研究中心邓友奇研究员同样身处工程计算的前线,在 CFD 计算上颇有心得,针对“大型运输机”计算的核心问题,在减阻方面提出了激波、翼身组合体、后体分离 3 大需求;在操稳性方面提出了“操纵面偏转”、“后舱门打开”两大计算难点。邓友奇研究员特别强调,对于操纵面失稳,国内外现在还没有实验来对计算进行比对和修正;而本项目拟开展的“复合平板边界层”实验研究可以模拟操纵面偏转效应的流场,因此在会议上他特别建议对此开展实验标模设计。

会议综合了“大客”和“大运”的计算需求并达成了相关研究部署。会议提出,通过一系列标模计算,给出精细网格下现有湍流模式的计算结果,与公开的实验数据细致比对,最终实现现有湍流模式 CFD 计算的细致评估。在没有 DNS 的条件下,对简化的具体三维机翼开展计算,比如 NAKA001 等一系列标模,用已有的最密集网格来计算,从现有最好湍流模式出发,充分展示当前最好的计算结果,充分集成现有的关于国外测量的结果。这些计算工作作为后期要展开的大分离流实验和计算做准备,也与前面三维机翼计算充分联系互动起来。

4 其他提议和意见

北京大学吴介之教授是流体涡动力学研究领域的理论专家。他在会议上提出了非定常分离的理论问题,引起了与会学者的关注。吴教授提到,中科院力学所傅德薰研究员曾经计算的可压缩单椭圆球是发展非定常分离理论的典型例子。对此,首席科学家余振苏教授积极回应,将组织北京大学研究队伍开展研究。吴介之教授还对易仕和教授的实验工作给予了热情的关注。他认为,易仕和教授的工作实现了密度场、速度场等 4 个变量的测量,还只需测定温度分布,就可以实现壁面流动的直接实验模拟。一旦在这方面获得突破,其价值和意义是令人振奋的。北京大学访问学者周明德教授是流体实验方面的专家,他对标模的选取提出了积极建议。他指出,标模应具有“流动有代表性”;“实验精确测量可行性”;“创新性”的特点,并提议将平板边界层作为标模实验。中科院力学所研究员马延文给出了“Shock capturing with a new high order accurate GVC scheme”的报告,介绍了在数值方法上的新进展。中科院力学所傅德薰研究员作为会议的特邀嘉宾,提出了大量宝贵的意见和建议,为会议增添了极大的活力和创意。她提出压缩拐角和三维机翼的标模;强调了实验要针对湍流现象开展研究。她同时指出,平板边界层的计算数据和平均热流实验数据已经具备,可以开展序函数分析。北京大学高级工程师陈军给了题为“湍流混合层结构的初步系综分析”的报告,给大家介绍了结构系综方法的一个初步运用。航天十一院马汉东研究员对此积极评价:看到了结构系综思想的超前性,运用结构系综探索气动光学反演机理十分值得期待。