

第九届全国流体力学青年研讨会报告综述¹⁾罗振兵^{*,2)} 孙明波^{*} 张攀峰[†]^{*}(国防科学技术大学航天科学与工程学院, 长沙 410073)[†](国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085)

摘要 简要介绍了第九届全国流体力学青年研讨会的会议举办情况, 对参加此次学术研讨会的各位专家、学者所做的报告内容进行了综述, 并给出一些建设性的意见和建议。

关键词 流体力学, 青年学者, 学术研讨会

REVIEW OF THE NINTH NATIONAL SYMPOSIUM ON FLUID MECHANICS FOR YOUNG SCHOLARS¹⁾Luo Zhenbing^{*,2)} Sun Mingbo^{*} Zhang Panfeng[†]^{*}(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)[†](Department of Mathematical and Physical Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China)

Abstract The paper brief introduced the ninth national symposium on fluid mechanics for young scholars. Reports of the symposium were reviewed, and some constructive suggestions were put forward.

Key words fluid mechanics, young scholars, symposium

为了进一步加强流体力学领域最新研究进展的交流, 探讨流体力学今后的发展趋势与前景、以及面临的挑战性科学问题, 促进该学科领域的青年学者之间的交流与合作, 解决新形势下面临的各种流体力学关键问题, 由中国空气动力学会、国家自然科学基金委员会数学物理科学部和中国力学学会联合主办、国防科学技术大学航天科学与工程学院和高超声速冲压发动机技术重点实验室联合承办的“第九届全国流体力学青年研讨会”于 2015 年 5 月 9—10 日在湖南长沙隆重召开。参加本届全国流体力学青年研讨会的青年代表共 33 人, 来自全国 24 家单位, 平均年龄 36 岁, 正高 16 人, 副高 17 人, 其中全国百篇优秀博士学位论文作者 8 人, 国家自然科学基金优秀青年基金获得者 6 人, 国家青年千人计划

3 人。另外, 还有 14 位特邀代表、20 余位列席代表参加这次盛会。

5 月 9 日上午, 隆重而简短的开幕式在湖南宾馆举行。开幕式由会议主席、国防科学技术大学罗振兵教授主持。开幕式上, 中国空气动力学会理事长、国防科学技术大学副校长邓小刚教授致开幕词, 邓小刚理事长代表中国空气动力学会对本次会议的胜利召开表示祝贺, 对参会青年代表表示热烈欢迎, 对大会特邀报告专家表示诚挚的感谢, 对会议的由来和目的进行了阐述, 希望通过大家的共同努力, 为建设创新型国家贡献聪明才智。国家自然科学基金委员会数学物理科学部张攀峰教授致辞, 张教授强调了基金委对青年人才成长的重视, 并对力学学科全国青年学者研讨会的情况进行了介绍。国防科

2016-01-03 收稿。

1) 国家自然科学基金资助项目 (11442004)。

2) 罗振兵, 教授, 主要研究方向: 流动控制、临近空间飞行器、组合推进。E-mail: luozhenbing@163.com

引用格式: 罗振兵, 孙明波, 张攀峰. 第九届全国流体力学青年研讨会报告综述. 力学学报, 2016, 48(2): 511-517

Luo Zhenbing, Sun Mingbo, Zhang Panfeng. Review of the ninth national symposium on fluid mechanics for young scholars. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(2): 511-517

学技术大学科研部总工程师戴一帆教授致欢迎辞,戴一帆总工程师代表学校欢迎各位嘉宾和代表的到来,并介绍了国防科学技术大学学科发展和人才培养情况.参加开幕式的来宾还有中国科学院院士、空军工程大学李应红教授,清华大学许春晓教授、中国科学技术大学丁航教授,上海大学卢东强教授,国防科学技术大学李丽副总工程师、李东旭教授、夏智勋教授、易仕和教授、李桦教授、梁剑寒教授、刘伟教授等.

本次研讨会共安排了5个大会特邀报告.李应红院士做了题为《等离子体流动控制进展》的报告,报告阐述了等离子体流动控制的基本概念,介绍了国内等离子体流动控制的研究情况,详细介绍了空军工程大学在等离子体冲击波流动控制理论与压气机近失速流动测控方法等方面的研究成果,还介绍了国外在等离子体冲击波流动控制理论、等离子体气动激励特性等方面的重要进展,并指出了未来发展需要解决的重大问题.许春晓教授做了题为《壁湍流减阻控制机理研究》的报告,报告首先对壁湍流减阻的研究背景进行了简单介绍,包括湍流阻力的来源及壁湍流减阻研究的重大意义,然后就近壁流向涡结构的控制机理、决定减阻率大小的关键因素以及雷诺数升高减阻率下降的原因等关键问题进行了详细阐述,提出壁湍流大尺度结构起源及内外区关系不仅是湍流基础研究的重要问题,也是湍流控制的关键课题.丁航教授做了题为《移动接触线问题及其数值模拟》的报告,报告首先对移动接触线的多尺度/结构以及存在问题与现有计算模型等做了介绍,然后重点讲解了液滴铺展、三维液滴滑移、液滴撞击复杂壁面和物体入水等问题移动接触线的数值模拟,对计算发现的新现象及相关机理进行分析,最后,丁航教授指出移动接触线的研究至今仍是开放的,例如接触线为何停滞在物体表面,接触线中有关相变、非平衡液体和反应浸润等问题.梁剑寒教授做了题为《超燃冲压发动机流动与燃烧基础研究》的报告,报告首先阐述了超燃发动机中关注的主要流动与燃烧问题及其巨大挑战,然后介绍了国防科学技术大学在相关领域的研究成果,包括基础研究体系的建立以及在激波/边界层干扰、燃料射流喷注与混合、超声速气流中的点火和火焰稳定等热点领域的最新进展,最后就实验与数值两个方面分析了今后研究中面临的主要困难.刘伟教授做了题为《飞行器多自由度摇摆特性研究》的报告,报告针对飞行器

动态摇摆现象,通过耦合求解 N-S 方程组和欧拉刚体动力学方程组,数值研究了飞行器多自由度耦合摇摆运动过程,揭示了飞行器多自由度摇摆特性,当重力显著小于垂向气动力时,三角翼可因爬升改出摇摆,重力显著大于垂向气动力时,三角翼快速下沉导致攻角增大,摇摆快速增大,重力和垂向气动力相当时,三角翼呈现上浮下沉交替运动.这些大会邀请报告反映了近期流体力学学科和工程上的重要前沿热点问题,为流体力学青年工作者的成长指引了方向.

会上,33位在流体力学领域脱颖而出、具有突出发展潜力的优秀青年工作者分别报告了近年来各自领域的研究进展和研究设想.根据与会青年代表的报告,主要内容归纳为以下6个方面.

1 气体动力学

韩忠华做了题为《基于代理模型的民用运输机翼身组合体气动优化设计》的报告,介绍了一种最新发展的针对民用运输机机翼气动外形优化的基于代理模型的优化设计方法(surrogate-based optimization, SBO),结果表明在设计变量数目少于80个的情况下,SBO优化程序相比基于梯度的优化程序效率更高且性能更稳定.

黄迅做了题为《含铰接段声衬的流管声理论模型》的报告.报告给出了研究含铰接段的声衬直圆管声传播问题的理论模型.通过对声衬周向分布进行傅里叶级数展开,在不同的模态上将问题化为二维轴对称问题,从而可以应用 Wiener-Hopf 方法,在这种情况下,由于模态间的相互作用,核方程成为了一个矩阵方程.推导显示,对于这样的展开方法,核矩阵成为常数矩阵和对角阵之和,利用已经讨论过的分解方法即可以进行分解,避开了 Wiener-Hopf 方法的巨大难点——矩阵分解.

李伟鹏做了题为《大型客机缝翼噪声机理研究》的报告.报告首先介绍了大型客机噪声的主要来源,然后介绍了缝翼噪声的概念、特点及其巨大危害,并重点介绍了针对缝翼噪声的气动声学模拟方法及其验证,分析了缝翼噪声的产生机理.报告最后对增升装置襟翼侧缘噪声及增升装置降噪技术进行了展望.

王成鹏做了题为《Ma5 斜激波串随下游压力升高的移动特性》的报告.斜激波串流动结构沟通上游低压与下游高压流动区域,并伴随下游高压提高逐

渐生成; 在斜激波串结构逐渐形成的过程中, 其前移的速度与下游压力变化、激波串前的流场结构密切相关. 报告介绍了 Ma5 高超声速风洞实验中斜激波串形成和前移规律的研究, 通过纹影显示和动态压力分布给出了不同变化规律背压工况下的激波串移动速度特性.

王汉封做了题为《有限长正方形棱柱气动力特性》的报告, 介绍了一端固定于壁面、另一端为自由端的三维正方形棱柱的气动力特性. 研究发现, 三维方形棱柱时均阻力系数与升力系数均方根值都明显小于二维方柱的对应值, 且三维方形棱柱的涡脱落频率也相对较低. 均匀来流中, 三维棱柱局部气动力沿展向存在明显差异. 均匀流中三维棱柱绕流与气动力存在双稳态现象: 一种是类似卡门涡街的展向涡交替脱离状态, 此时柱体阻力较大, 升力出现大幅周期性波动; 另一种是展向涡准对称状态脱落, 此时阻力较小, 升力无明显周期性.

吴江浩做了题为《微型拍动旋翼的流动机理及其应用》的报告. 采用数值模拟方法研究了拍动旋翼的基本流动机理, 拍动运动对翼的气动特性的影响以及拍动旋翼与其它 MAV 布局在气动效率上的对比. 研究表明: 拍动旋翼的流动由拍动幅度, 俯仰幅度, 平均攻角, 拍动运动与旋转运动的周期比及雷诺数共同决定. 这些参数对气动特性的影响各有不同. 通过对比旋翼、水平拍动扑翼、竖直拍动扑翼及拍动旋翼四种布局的平均升力系数与功率因子发现, 水平拍动扑翼和旋翼分别在低 Re 和高 Re 下具有较好的气动性能及气动效率. 但它们不能同时满足高升力和高气动效率的要求. 通过使用小展弦比的拍动旋翼并使其在低幅下拍动, 可显著提高气动性能, 更容易同时产生高升力和高气动效率.

余永亮做了题为《大雁编队飞行的空气动力学机制》的报告. 大雁飞行早已受到人们的关注, 但对其编队飞行的机理并未有令人信服的结论. 报告通过理论模化的途径, 从虚功率原理出发, 探讨了大雁群飞时, “V” 字型编队的空气动力特征. 结果发现, 大雁 “V” 字型飞行时, 后面的鸟可以获得减阻效果, 尽管头鸟会阻力增加, 但从鸟群总体来看, 增加量小于减少量, 总体上鸟群减阻. 进一步分析表明, 编队存在最优的排布方式, 即左列和右列的大雁构成的 “V” 字夹角应该在 60° 到 120° 之间.

2 水动力学

高鹏做了题为《平板提拉过程中的液膜生成和形态分析》的报告. 提拉镀膜是工业生产中常用的涂层技术之一, 也是研究接触线动力学、界面动力学的经典流动模型. 该报告采用润滑理论和数值模拟研究了不完全浸润平板的提拉镀膜问题, 特别关注液膜的生成条件、形态和转换机制. 理论证明了倾斜接触线的法向速度恒定假设只是在小倾角条件下近似成立, 在大倾角条件下则有明显下降. 倾斜接触线法向速度和倾角之间的相关性. 通过数值模拟, 发现了 4 种不同的流动区域, 给出了液膜产生和演化过程的完整物理图像, 并与润滑理论结果进行了对比.

何国建在报告《潜流带水动力特性研究》中介绍了基于大涡模拟数据进行的潜流带水动力的时空平均特性研究. 考虑到空间异构性, 采用线平均方法, 对比分析了不同位置时空平均流速的垂线分布. 结果表明, 空间异构性的影响很小, 不同位置的双平均流速符合类似的对数分布, 但由于潜流带影响, 卡门常数较小. 采用面平均方法, 分析了床面之上的构造剪应力. 发现构造剪应力峰值出现在流场中部, 横向上稳定的涡旋结构是造成这种现象的主要原因.

李芳在报告《PEO 水溶液流变性质测试与分析》中介绍了黏性同轴射流在轴向电场和径向电场作用下绝对对流不稳定性的研究. 同轴射流外层流体被看作导电流体, 起驱动作用; 内层流体可为导体或电介质. 推导了小扰动情况下的本征方程, 并用谱方法求解了本征值. 研究了电场参数对射流两个主要的不稳定模态, 即轴对称 para-sinusoidal 模态和第一非轴对称模态的影响规律. 发现轴向电场和径向电场对不稳定模态影响很大. 在参数平面内划出了不稳定模态的主导区域. 该研究有助于同轴电雾化和同轴电纺丝中射流不稳定行为的预测.

王本龙做了题为《浅水柱群区域波浪传播过程的波能衰减规律》的报告, 介绍了在波浪与海岸带植物群落相互作用研究领域的进展. 采用多尺度分析方法分析了潮流作用下群柱内部流场特征, 建立了适用于浅水长波作用下柱群内部的湍流模式; 通过作用于桩柱上的阻力做功与湍流黏性耗散之间的能量平衡关系给出了单元平均涡黏性系数的计算方法; 通过对均匀分布柱群的流场分析, 建立了浅水长波环境以群柱为骨架的各向异性多孔介质湍流扩散系数、Taylor 弥散系数的理论计算方法, 获得了扩散

系数随流动参数、群柱几何特征的变化关系. 将水生植物群落和珊瑚礁简化为规则排列的浸水柱群, 通过正应力连续条件匹配柱群上方纯水区势流流动和柱群内湍流黏性流动.

3 多相流及非牛顿流体

潘余做了题为《超燃冲压发动机煤油再生冷却技术相关研究进展》的报告. 报告从冷却流道设计方法、冷却流道内煤油的流动与传热特性、积碳结焦特性及结焦抑制技术三方面介绍了课题组超燃冲压发动机煤油再生冷却技术的相关研究进展. 论述了定壁温、定流阻、分区热流匹配三种流道设计方法; 阐述了煤油在亚临界压力、临界压力以及超临界压力下流型的差异, 分析了煤油在超临界压力下的传热特性; 提出了一种新的基于疏水表面结构抑制结焦的技术.

邱翔做了题为《Characteristics of velocity gradient jumping discontinuity in steady Poiseuille flow of Johnson-Segalman fluid》的报告, 采用类比非线性振动力学的方法, 研究了 Johnson-Segalman 流体中速度梯度“上窜”与“下跳”的机理, 以及材料特性对速度梯度变化的影响. 该研究有助于认识喷射现象的发生, 另外 PGI 和 PGD 过程之间的不同流速还可为工业输运提供潜在应用.

孙明波做了题为《超声速气流中液体横向射流雾化的数值模拟研究》的报告, 介绍了超声速气流中液体横向射流雾化的相关研究进展, 采用混合数值方法. 通过基于 CLSVOF 界面追踪的大涡模拟方法和基于拉格朗日粒子追踪方法的 TAB 破碎模型分别对一次雾化和二次雾化过程进行了数值模拟. 基于界面追踪的大涡模拟展现了液体横向射流一次雾化的液体破碎形态以及液柱前的表面波. 基于拉格朗日的粒子追踪方法给出与实验吻合较好的射流穿透深度, 并且较好地揭示了实验测量所发现的射流破碎拉丝现象.

熊红兵在报告《微纳米颗粒的动力学研究及其在等离子体喷涂中的应用》中提出了一种纳米颗粒的入射, 释放, 加速, 传热, 熔化和蒸发的数值模型. 这个模型对流场的纳维-斯托克斯方程进行了求解. 等离子体被当成可压, 多组分的气体湍流, 在求解过程中考虑了非连续效应的影响. 液滴和固体颗粒被当成是拉格朗日质点来进行追踪. 在追踪颗粒的过程中, 考虑了颗粒受到的拖曳力, 布朗力和萨夫

曼力. 分析了布朗力对纳米颗粒分布的影响, 以及纳米颗粒和微米颗粒不同空间的分布特点, 并且给出了颗粒的运动过程图, 同时对影响喷涂过程的关键参数进行了研究.

仲峰泉在报告《碳氢燃料超临界传热与裂解吸热特性及其应用》中介绍了航天、航空发动机再生冷却技术原理及相关的基础问题, 对近年来在相关领域的工作进展进行了介绍, 主要包括碳氢燃料的超临界流动与传热、高压热裂解吸热以及冷却结构流/固耦合传热等. 发展了考虑燃料超临界态特性的数值模拟方法和发动机气-固-液耦合传热分析方法, 并揭示了传热恶化/强化与近壁湍流特性的关系.

4 数值计算方法

邓小龙做了题为《切割网格方法在流固耦合中的应用初探》的报告. 在之前发展的陡峭界面可压缩多相流计算流体力学方法中, 成功地用切割网格描述了自由界面, 获得了界面处理的高精度和界面上各种跳跃条件的完整耦合. 其中发展出的运动切割网格方法和程序, 不仅可以用在流体-流体界面上, 也可以应用在流体-固体界面处理上, 进行流固耦合的计算和处理. 展示了对流固耦合的初步尝试, 应用切割网格方法处理各向同性线性弹性体的问题. 通过引入黎曼解, 该问题可以很自然地在既有的多相流程序框架内实现. 测试结果表明, 该方法相比最近发表的“Ghost Solid Method”更加精确和稳定.

姜锐做了题为《基于实验和建模仿真的二人组疏散研究》的报告. 开展了单人逃生和组对逃生的对比研究, 结果表明组对逃生的疏散时间更短, 疏散时间间隔基本保持稳定. 在计算方法上改进了社会力模型, 将吸引力引入二人组对中, 并考虑了物理接触斥力超过临界值时人们无法实施驱动力, 该模型克服了原始模型的不足. 三人或更多人组队以及事关生死的紧急疏散与实验还存在差异, 模型还有待进一步改进.

吕宏强做了题为《基于 CFD 高精度方法的电磁散射计算研究》的报告. 采用高精度方法求解时域 Maxwell 方程, 方程的空间离散采用基于 CFD 领域的高阶间断有限元格式, 非定常时间迭代采用四步龙格-库塔格式. 为了提高计算效率, 采用了“Quadrature-Free Implementation”和网格分区并行技术. 数值结果表明, 采用高阶格式的情况下, 采用稀

疏网格便可以得到高精度数值解. 另外由于该方法基于非结构网格, 因此非常适合计算复杂外形的情况.

王炯在报告《气膜冷却非稳态掺混特性的数值研究》中介绍了使用格子 Boltzmann 方法对一种高度复杂的三维湍流流动-传热现象——气膜冷却进行的数值研究. 充分利用格子 Boltzmann 方法的天然并行性, 结合多 GPU 并行技术, 实现了气膜冷却的大规模高性能数值模拟. 分析了气膜冷却的流动、传热非稳态特性及涡系结构, 深入揭示其掺混机理, 拟建立气膜冷却流动特性与传热特性之间的定量关系, 为实现主动控制气膜冷却系统的优化设计提供理论支撑.

招启军在报告《倾转旋翼飞行器计算流体力学方法及非定常气动特性研究》介绍了基于先进的 CFD 方法对倾转旋翼机非定常气动特性的研究. 首先, 在网格方面, 提出了一套新的多层运动嵌套网格方法用以减少过渡模式下的倾转旋翼尾迹的数值耗散, 并通过建立了适应性较强的多块搭接网格完成了围绕倾转旋翼机网格生成. 然后, 基于 URANS 方程, 引入双时间方法, 分别提出并建立了 VBM 和 RBM 两种方法来模拟倾转旋翼的非定常气动特性. 为了进一步提高流场的模拟效率, 采用了 SPMD 并行加速方法和隐式迭代方法. 最后, 采用建立的 CFD 方法系统分析了三种不同飞行模式下该飞行器非定常气动特性.

5 流动稳定性及湍流

胡军做了题为《磁流体方腔槽道流的整体线性稳定性》的报告. 方腔槽道流广泛地存在于各类工程实际问题中, 其层流至湍流转捩机制一直是学术界广泛关注的问题, 而方腔槽道流的整体线性稳定性研究对于认识转捩机制至关重要. 报告在回顾方腔槽道流的整体线性稳定性研究历史的基础上, 主要介绍了磁场作用下金属导电流体槽道流 (简称磁流体槽道流) 的整体线性稳定性研究工作, 通过将高阶 FD-q 差分格式运用于整体线性稳定性特征模态的计算, 不仅可以相比传统谱配置法极大地提升计算效率和计算精度, 还可以用其进行方腔槽道流线性最优瞬态增长的计算.

黄永祥做了题为《拉格朗日湍流理论与验证》的报告. 由于湍流的复杂性, 基于控制方程的理论推导异常困难, 唯像模型及理论就成为了研究湍流

的强有力的手段. 由于统计方法的适用性, 使得湍流理论同样难以验证. 因而提出和发展适当的统计方法, 准确地提取湍流流动信息就显得异常重要. 报告重点介绍了使用任意阶 Hilbert 谱分析方法分析拉格朗日湍流的例子, 较好地验证了 Kolmogorov-Landau 理论的预测. 然而, 和拉格朗日相关的湍流问题仍然没有得到较好地解决, 如惯性颗粒与湍流的相互作用, 棒状颗粒在湍流作用下的旋转等等, 还需进一步发展基于数据的湍流理论.

黄章峰在报告《后掠机翼边界层稳定性和转捩的研究》中介绍了后掠角和小攻角对后掠机翼边界层稳定性和转捩位置的影响, 分析了不同工况下的基本流、中性曲线、 N 值曲线和转捩预测, 发现后掠机翼边界层中横流强度随后掠角的增大先增加后减小, 后掠角为 $40^\circ \sim 50^\circ$ 时横流强度最强, 转捩最易发生; 扰动波的增长在攻角大于零时得到加强, 而且随着正攻角的增大, 转捩位置向机翼前缘移动.

郗恒东在报告《高聚物添加剂对湍流特性改变的研究》中介绍了关于高聚物添加剂对湍流流动特性的改变的实验研究. 关于高聚物对湍流能量级串的改变, 在 deGennes 理论的基础上提出了高聚物“截断”能量级串的能量传输率平衡理论, 预测了“截断”发生的临界长度尺度, 并设计实验验证了理论预测. 下一步计划研究高聚物对湍流能量级串“截断”的起始和最大极限. 以及高聚物对湍流速度脉动和加速度脉动的改变随高聚物浓度的变化关系, 并希望通过研究高聚物对湍流加速度脉动的改变来探究高聚物的卷曲-伸展突变在湍流场中是否存在.

杨越做了题为《湍流中的非局部准拉格朗日结构研究》的报告. 随着近年来三维粒子追踪实验和大规模数值模拟技术的快速发展, 拉格朗日方法也逐渐应用于湍流研究. 通过追踪物质曲面、涡面等具有拉格朗日性质的结构演化过程, 可以深入解释湍流运动中的被动标量与粒子的输运过程, 以及旋涡动力学演化过程, 并可量化湍流在不同尺度上的动力学行为. 报告提出了湍流中非局部 (准) 拉格朗日结构概念, 及相关三类共性问题, 包括非局部 (准) 拉格朗日结构的识别与初始构造、多尺度表征、演化方程与算法.

周全在报告《Bolgiano-Obukhov scenario in two-dimensional Rayleigh-Taylor turbulence》中介绍了空间非均匀加热对 Rayleigh-Bénard 湍流热对流系统传热效率的影响. 实验采用长方体对流槽, 以水为流体介

质. 调节加热片的输入功率, 改变系统注入能量的空间分布, 对比非均匀加热与均匀加热下的湍流传热 $Nu-Ra$ 关系. 从实验结果来看, 非均匀加热条件下 Nu 数的提升十分显著, 湍流传热效率明显提高.

6 流动控制技术

常军涛在报告《高超声速气动热力场动力学及其控制》中介绍了面向高超声速飞行器及其推进动力装置的关键科学问题, 重点针对高超声速气动热力场非线性动力学特性、模式识别和优化控制问题开展的科学研究. 发现了多种新颖的高超声速进气道不起动模式, 以及高超声速冲压发动机多模态转换过程中存在的突变与迟滞现象; 引入统计学习理论处理流场模式分类问题, 发展了针对高超声速进气道不起动鲁棒识别方法及稳定裕度的表征方法, 从而解决了进气道状态监测问题; 引入切换控制理论实现高超声速流场的模式协调优化控制, 并发展了高超声速冲压发动机多模态间的切换控制策略, 进而解决了发动机多目标协调优化的控制问题. 最后对今后开展的工作进行了展望.

冯立好在报告《合成射流控制圆柱绕流结构的实验研究》中介绍了水槽中进行合成射流控制圆柱绕流结构的实验研究. 合成射流分别放置于圆柱前驻点、后驻点和分离点附近, 采用标准正弦激励信号和可变吸吹比的新型激励信号诱导产生合成射流, 分别基于虚拟气动外形效应、合成射流旋涡与剪切层直接作用以及合成射流旋涡与边界层作用三种机制实施控制. 在三种控制方式下, 合成射流均可以有效控制圆柱绕流流场, 特别是诱导尾迹涡脱落模式发生变化. 通过 PIV 对圆柱绕流全流场进行测量, 研究了不同尾迹涡脱落模式的产生机制、演化规律、对应的流场特性及参数影响规律等, 结果表明合成射流可以有效推迟流动分离、减小阻力以及抑制涡致振动.

罗振兵做了题为《三电极等离子体高能合成射流及其激波控制试验研究》的报告. 激波控制是超声速/高超声速流动控制的重要方向, 有效的激波控制技术对于高超声速飞行器降热、减阻、提高可操纵性等具有重要意义. 报告介绍了课题组发明的三电极等离子体合成射流激励器工作原理及其工作性能, 与两电极等离子体合成射流激励器相比, 大气压条件下三电极激励器空气击穿电压下降至两电极激励器的 $1/4$, 电能向电弧能量转换效率是两电极激励器的

约 4 倍, 相同放电电压条件下, 射流冲量是两电极激励器的近 10 倍. 采用三电极等离子体高能合成射流激励器进行了超声速激波控制试验研究, 试验结果显示在高能合成射流作用下圆柱体前激波及斜劈激波近壁面激波被完全消除, 三电极等离子体高能合成射流激励器表现出很强的激波控制能力.

吴云做了题为《等离子体冲击气动激励研究》的报告. 等离子体冲击流动控制原理是提高等离子体流动控制能力的新思路, 其基本内涵是高强度等离子体冲击气动激励与典型流动的非定常耦合作用. 报告主要论述了等离子体冲击气动激励的产生机制、特性与流动控制机理. 等离子体冲击气动激励是高功率脉冲放电产生的等离子体气动激励, 其典型特征是在放电产生的瞬间由于局部快速加热诱导出冲击波. 对于介质阻挡放电等离子体冲击气动激励, 其产生机制是氮分子激发态熄灭和氮分子离子碰撞引起的快速加热, 加热速率达 10^{10} K/s 量级, 冲击波持续时间很短, 随后演化为弱压缩波, 非均匀快速加热造成的局部流动密度与压力不正交诱导产生旋涡, 通过激励诱导旋涡与流动的耦合作用实现流动控制. 在短脉冲高压激励下, 表面电弧放电和容腔内电弧放电也可以产生等离子体冲击气动激励, 在超声速流动控制中具有良好的应用前景.

易贤做了题为《无人机结冰及其防护方法》的报告. 近年来我国的无人机产业获得了巨大发展, 但是在无人机结冰防护领域, 却还存在明显不足, 突出表现是, 由于搭载能量的限制, 现有的无人机都未在机翼上布置防除冰系统. 这种现状不但限制了无人机执行任务的能力、更给无人机的飞行安全带来隐患. 报告系统阐述了无人机结冰的基本概念、不同无人机可能遭遇的结冰情况及其危害、总结无人机结冰防护面临的挑战. 在此基础上, 提出了无人机结冰智能防护系统的构想, 指出无人机结冰智能防护系统是解决无人机结冰问题的有效途径. 最后梳理了研发无人机结冰智能防护系统的关键技术, 并呼吁组成产学研结合的队伍、进行无人机结冰智能防护系统研发的联合攻关.

张辉在报告《涡生振荡及其电磁控制》中介绍了近年来围绕流体主动控制理论和技术对航空航海中最关心的减阻减振问题进行的研究, 主要工作包括: 圆柱涡生振荡的流固耦合机理研究. 考虑黏性附加质量, 并将推导得到的真实的水动力代替以往研究中假设的水动力, 结合圆柱振动方程, 实现了真正

的流固耦合；电磁力在流动控制中的机理研究. 将电磁力按其作用效果分为流场电磁力和壁面电磁力，揭示它们在流动控制过程中各自不同的作用；流动优化控制研究. 基于优化控制理论，提出了电磁流体减阻控制过程中关于电磁力时空优化的目标函数，实现了电磁力流体控制的优化，提高了控制效率.

5 月 10 号下午，本次研讨会最后进行了半天的集体座谈，与会代表围坐在一起，依次发言，代表们结合自己的科研经历及研究方向，就科学研究中的困惑、参会的感想与感悟以及流体力学青年研讨会

的内容与形式等展开了热烈的讨论. 张攀峰教授进行了总结，就流体力学学科发展、青年研究学者肩负的重任以及下次研讨会深入交流的方式等和与会代表进行了交流. 天津大学力学系黄章峰副教授就下一届全国流体力学青年研讨会提出了承办申请，对历届研讨会的历史及发展趋势进行了总结，就研讨会的目的和意义阐述了自己的看法，并对天津大学的承办条件进行了说明. 本次研讨会初步商定第十届全国流体力学青年研讨会由天津大学承办，将于 2017 年在天津市召开.

doi: 10.6052/0459-1879-16-054