

正弦交流介质阻挡放电等离子体激励器诱导流场研究的进展与展望

张鑫, 王勋年

RESEARCH PROGRESS AND OUTLOOK OF FLOW FIELD CREATED BY DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE PLASMA ACTUATORS DRIVEN BY A SINUSOIDAL ALTERNATING CURRENT HIGH-VOLTAGE POWER

Zhang Xin and Wang Xunnian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/0459-1879-22-377>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

等离子体激励器控制圆柱绕流的实验研究

FLOW CONTROL OVER A CIRCULAR CYLINDER USING PLASMA ACTUATORS

力学学报. 2018, 50(6): 1396-1405

机翼尺度效应对等离子体分离流动控制特性的影响

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SCALING EFFECTS OF WINGS ON THE FLOW SEPARATION CONTROL USING PLASMA ACTUATORS

力学学报. 2021, 53(12): 3321-3330

等离子体激励器诱导射流的湍流特性研究

INVESTIGATION ON THE TURBULENT CHARACTERISTICS OF THE JET INDUCED BY A PLASMA ACTUATOR

力学学报. 2018, 50(4): 776-786

低雷诺数俯仰振荡翼型等离子体流动控制

PLASMA-BASED FLOW CONTROL ON PITCHING AIRFOIL AT LOW REYNOLDS NUMBER

力学学报. 2021, 53(1): 136-155

进气道等离子体/磁流体流动控制研究进展

RESEARCH PROGRESS OF PLASMA/MHD FLOW CONTROL IN INLET

力学学报. 2019, 51(2): 311-321

风力机翼型动态失速等离子体流动控制数值研究

NUMERICAL STUDY ON DYNAMIC STALL FLOW CONTROL FOR WIND TURBINE AIRFOIL USING PLASMA ACTUATOR

力学学报. 2020, 52(6): 1678-1689



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

正弦交流介质阻挡放电等离子体激励器诱导流场研究的进展与展望¹⁾

张 鑫^{*,2)} 王勋年^{†,3)}

^{*}(中国空气动力研究与发展中心空气动力学国家重点实验室, 四川绵阳 621000)

[†](中国空气动力研究与发展中心低速空气动力学研究所, 四川绵阳 621000)

摘要 正弦交流介质阻挡放电等离子体流动控制技术是基于等离子体激励的主动流动控制技术, 具有响应时间短、结构简单、能耗低、不需要额外气源装置等优点, 在飞行器增升减阻、抑振降噪、助燃防冰等方面具有广阔的应用前景. 针对“激励器消耗的大部分能量尚未被挖掘利用、诱导流场的完整演化过程尚未完全掌握、诱导流场的演化机制尚不明确”这三方面问题, 本文首先从激励器诱导流场的空间结构、时空演化过程、演化机制三个方面回顾总结了激励器诱导流场的研究进展. 在诱导流场空间结构方面, 发现了高电压激励下诱导射流的湍流特性, 辨析了壁面拟序结构与无量纲激励参数之间的关联机制; 从激励器诱导声能方面挖掘出了激励器潜在的能量, 发现了“等离子体诱导超声波与诱导声流”的新现象, 提出了声激励机制; 在时空演化过程方面, 阐明了激励器诱导流场从薄型壁射流发展为“拱形”射流、再演变为启动涡, 最终形成准定常射流的完整演化过程; 在演化机制方面, 结合声学特性提出了以“升推”为主的诱导流场演化机制. 其次, 围绕激励器诱导流场, 进一步凝练出下一步研究重点, 为突破等离子体流动控制技术瓶颈, 打通“概念创新—技术突破—演示验证”的创新链路, 实现工程应用提供支撑.

关键词 等离子体, 流动控制, 介质阻挡放电, 诱导流场, 声流

中图分类号: V211.A 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-22-377

RESEARCH PROGRESS AND OUTLOOK OF FLOW FIELD CREATED BY DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE PLASMA ACTUATORS DRIVEN BY A SINUSOIDAL ALTERNATING CURRENT HIGH-VOLTAGE POWER¹⁾

Zhang Xin^{*,2)} Wang Xunnian^{†,3)}

^{*}(State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, Sichuan, China)

[†](Low Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract Flow control technology using dielectric barrier discharge plasma actuators which are driven by a sinusoidal alternating current high-voltage power is an active flow control technology based on plasma actuation and has some advantages, such as short response time, simple structure, low consumption power, and no need for additional air source devices. It has broad application prospects in lift enhancement and drag reduction, vibration suppression and noise

2022-08-18 收稿, 2022-10-12 录用, 2022-10-13 网络版发表.

1) 国家自然科学基金(11902336)和四川省科技计划(2022JDJQ0022)资助项目.

2) 通讯作者: 张鑫, 副研究员, 主要研究方向为等离子体流动控制. E-mail: lookzx@mail.ustc.edu.cn

3) 通讯作者: 王勋年, 研究员, 主要研究方向为流动控制技术. E-mail: xunnian@sohu.com

引用格式: 张鑫, 王勋年. 正弦交流介质阻挡放电等离子体激励器诱导流场研究的进展与展望. 力学学报, 2023, 55(2): 285-298

Zhang Xin, Wang Xunnian. Research progress and outlook of flow field created by dielectric barrier discharge plasma actuators driven by a sinusoidal alternating current high-voltage power. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(2): 285-298

reduction, assisted combustion and anti-icing. In view of the three problems that most of the power consumed by the plasma actuator has not been exploited, the whole evolution process of the induced flow field has not been fully understood, and the evolution mechanism of the induced flow field is not clear, the present manuscript summarizes the research progress of the induced flow field of the plasma actuator from the three aspects which include the spatial structure, the space-time evolution process and the evolution mechanism of the induced flow field of the plasma actuator. For flow structures of the induced flow field, the turbulent characteristics of induced wall jet under high voltage excitation are found, and the correlation mechanism between coherent structure in the vicinity of wall and non-dimensional actuation parameters is analyzed; The potential energy of the plasma actuator is excavated from the aspect of the acoustic energy induced by the plasma actuator, and the new phenomenon of "the ultrasound and the acoustic streaming flow created by the plasma actuator" is found, and the novel mechanism of acoustic excitation created by the plasma actuators is proposed; In the aspect of the spatial-temporal evolution process, the complete evolution process of the flow field induced by the plasma actuator from the thin wall jet to the "arch" jet, then to the starting vortex, and finally to the quasi-steady wall jet is uncovered; In terms of the evolution mechanism, the evolution mechanism of the induced flow field is proposed based on the acoustic characteristics. In addition, to break through the bottleneck of flow control technology using plasma actuators and open up the innovation link of "concept innovation - technology breakthrough - demonstration and verification", a few opening issues on the flow field generated by the plasma actuators are presented.

Key words plasma, flow control, dielectric barrier discharge, induced flow field, acoustic streaming

引言

多样性、复杂性的现代战争对飞行器的综合性能提出了更高要求,尤其在山地、高原等复杂地形,暴雨、风沙、低温等极端天气下实现稳定飞行的迫切需求给飞行器设计带来了巨大挑战.流动控制技术作为流体力学研究的热点与前沿,为摆脱传统飞行器设计的束缚、大幅提升飞行器综合性能、突破飞行边界奠定了技术基础^[1-17].介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)等离子体流动控制技术是基于等离子体激励的主动流动控制技术,通过等离子体诱导产生的扰动控制飞行器绕流流场,调控飞行器受力与姿态情况,达到增升减阻、抑振降噪等目的.该技术具有响应时间短、控制位置灵活、结构简单,不需要额外气源装置等突出优点,在湍流边界层减阻^[18-19]、分离剪切层控制^[20-26]、旋涡控制^[27-31]、环量控制^[32-33]、点火助燃^[34]、防除冰^[35-38]、降噪^[39]等方面具有较强的应用前景,为推动飞行器的发展提供了重要技术支撑.

在国外,美国、俄罗斯两大航空大国在该领域开展了 20 多年的研究.2010 年,美国圣母大学的 Corke 等^[40]在 *Annual Review of Fluid Mechanics* 杂志上发表了一篇关于该领域研究的综述性文章.该文章从气体放电理论出发,回顾了该技术十几年的

发展历程.在俄罗斯,高温热物理研究所^[41]、莫斯科物理技术研究院^[42]等科研院所一直关注等离子体高超声速飞行控制.在欧洲,流动控制专委会专门成立了等离子体流动控制技术研究小组,集中了英国^[43]、法国^[44]、德国^[45]等的高校力量,以发展高升力装置为背景,深入开展流动控制机理研究,力争掌握该技术核心.在国内,该领域攻关也呈现出百家争鸣、百花齐放的良好局面.空军工程大学^[46]、国防科技大学^[47]、航天工程大学^[48]、北京航空航天大学^[49]、南京航空航天大学^[50]、西北工业大学^[51]、哈尔滨工业大学^[52]、厦门大学^[53]、吉林大学^[54]、中国科学院工程热物理研究所^[55]、中国空气动力研究与发展中心^[56]等几十家单位、上百位研究人员对该技术的发展做出了重要贡献.

尽管针对该技术已开展了 20 多年的研究,但“随着风速或雷诺数的增大,等离子体激励器失效”这一瓶颈问题严重制约着等离子体流动控制技术的工程化应用.而出现该瓶颈的主要原因有三点:一是激励器消耗的大部分能量尚未被挖掘利用,研究表明单位时间内诱导射流产生的动能仅占激励器消耗电能的 0.2%,单靠诱导射流来实现流动控制的方式仅用到激励器消耗的小部分能量^[57];二是激励器诱导流场的完整演化过程尚未完全掌握,已有研究是在正弦交流电源工作几十个周期以后才开展的,刚

施加激励电压时的激励器诱导流场情况仍不清楚, 无法依据流场特征施加精准控制; 三是等离子体诱导流场的演化机制尚不明确, 建立的诱导流场理论模型只考虑了激励器的力学特性, 忽略了激励器其他特性. 而等离子体激励器的声学、光学、电学、热力学等特性是相互耦合的, 每种特性会直接或间接地为流动控制做贡献.

本文从激励器诱导流场的空间结构、时空演化过程、演化机制三个方面总结了激励器诱导流场的研究进展. 项目组从激励器声特性方面挖掘出了激励器潜在的能量, 揭示了诱导流场的完整演化过程, 结合声学特性辨析了诱导流场演化机制, 进一步凝练了下一步研究重点. 研究结果为突破等离子体流动控制技术瓶颈, 打通“概念创新—技术突破—演示验证”的创新链路, 实现工程应用提供支撑.

1 介质阻挡放电等离子体激励器

本节首先对激励器的工作原理、电学特性、光学特性进行简要描述, 为下一章节分析诱导超声波的产生机理、讨论诱导流场演化机制奠定基础.

介质阻挡放电等离子体激励器由上层电极、下层电极、绝缘介质及高压激励电源组成 (如图 1 所示). 上层电极暴露在空气中, 下层电极被绝缘介质覆盖. 两层电极与高压电源的两端相连. 在高电压的激励下, 上层电极周围的空气被电离, 从而形成等离子体. 激励器在工作时会产生准定常的辉光. 目前, 常用的激励电源主要有正弦交流 (alternating current, AC)^[58-61]、纳秒脉冲 (nanosecond pulsed, NS)^[62-66] 两种高压电源. 在不同高压电源的激励下, 上层电极周围的气流会产生不同的变化. 由于本文主要侧重于对 AC-DBD 激励器的诱导流场研究进行回顾与总结, 因此这里不再对 NS-DBD 激励器的激励特性研究进行深入分析. 先前研究表明, AC-DBD 激励器

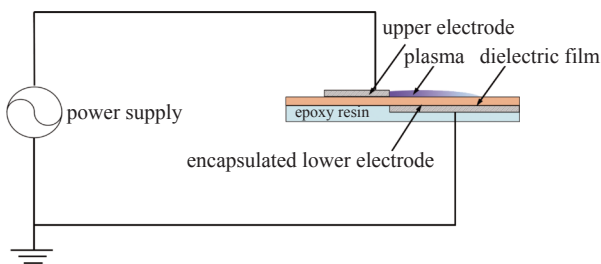


图 1 典型的等离子体激励器布局示意图
Fig. 1 The typical configuration of DBD plasma actuators

主要通过等离子体诱导体积力对空气作用产生准定常的壁面射流^[56].

图 2 给出了在一个正弦电压周期内的电流变化情况. 依据电流幅值与放电特性可以将诱导电流的演化过程分为三个阶段^[57]. 图 2 中的两条黄色虚线将三个阶段划分出来. 在电压上升沿阶段 (第一阶段), 激励器诱导产生一系列幅值较高的脉冲电流 (如图 2 所示), 同时产生树枝状的流光放电 (如图 3(a) 所示)^[67]; 在电压下降沿阶段 (第二阶段), 激励器产生一系列幅值较低的脉冲电流 (如图 2 所示), 形成较为均匀的准辉光放电 (如图 3(b) 所示)^[67]; 在第三阶段, 激励器放电停止, 诱导的电流消失. 总的来看, AC-DBD 等离子体放电经历了流光放电、辉光放电、停止放电三个阶段.

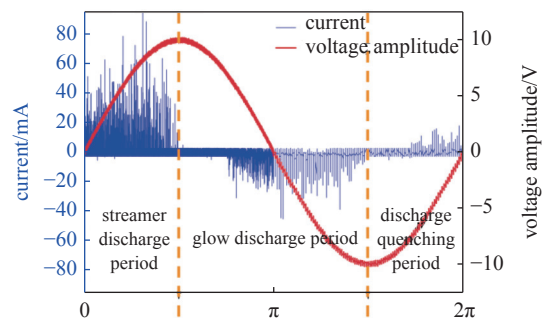
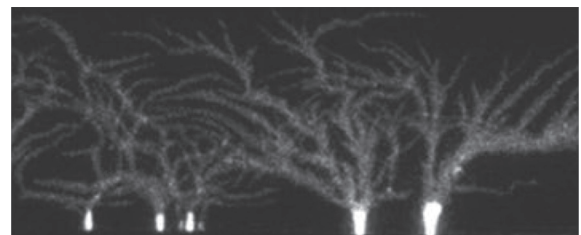
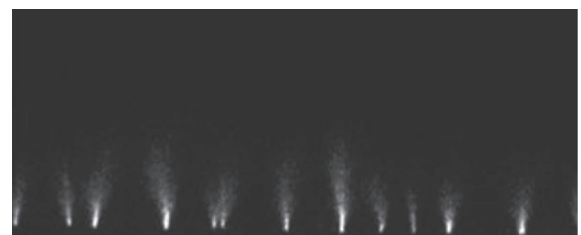


图 2 等离子体激励器的电压电流特性^[57]
Fig. 2 The characteristics of sinusoidal waveform and the currents^[57]



(a) 处于电压上升沿时期的等离子体放电图像
(a) Plasma discharge image at the rising stage of the voltage waveform



(b) 处于电压下降沿时期的等离子体放电图像
(b) Plasma discharge image at the falling stage of the voltage waveform

图 3 等离子体放电图像^[67]
Fig. 3 Plasma discharge images^[67]

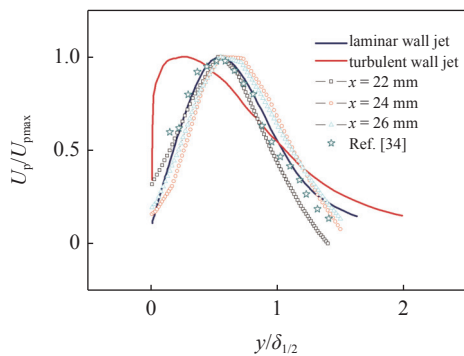
2 诱导流场的空间结构

目前,大部分研究认为,AC-DBD 等离子体激励器诱导的流场结构有两种:一是激励器在刚启动时产生的启动涡[56];二是在工作一段时间后,激励器诱导产生的壁面射流[68-70].本节回顾了课题组近期发现的壁面拟序结构、超声波、声流三种空间结构,初步揭示了激励器诱导声能占激励器消耗电能的占比情况,提出了提升激励器声激励强度的方法.

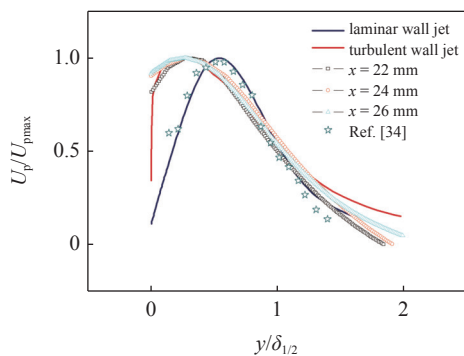
2.1 诱导拟序结构

2004 年, Jukes 等[71]首次对诱导射流特性给予了描述.他通过将诱导射流速度剖面与典型的壁面层流射流速度剖面进行对比,指出激励器诱导射流为层流射流.但在开展该实验时,激励电压的幅值较低.“层流射流能否全面描述诱导射流特性”这一问题仍然需要研究和探索.

项目组采用高频 PIV (particle image velocimetry) 系统,对不同激励电压下的诱导流场开展了实验研究.图 4 给出了不同电压下诱导射流的无量纲速度剖面. E_{p-p} 表示电压的峰峰值, f 表示正弦电压



(a) $E_{p-p} = 6.4 \text{ kV}, f = 3 \text{ kHz}$



(b) $E_{p-p} = 9.8 \text{ kV}, f = 3 \text{ kHz}$

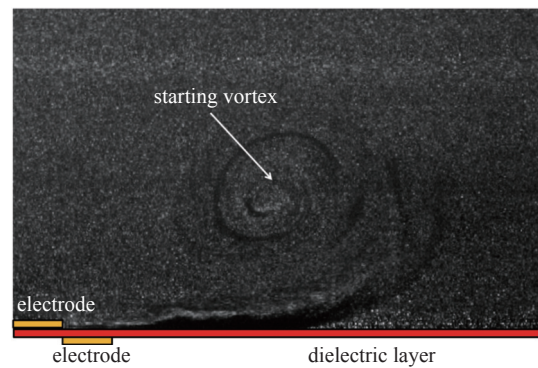
图 4 激励器诱导射流的无量纲速度剖面

Fig. 4 Non-dimensional velocity profiles of wall jet produced by DBD plasma actuators

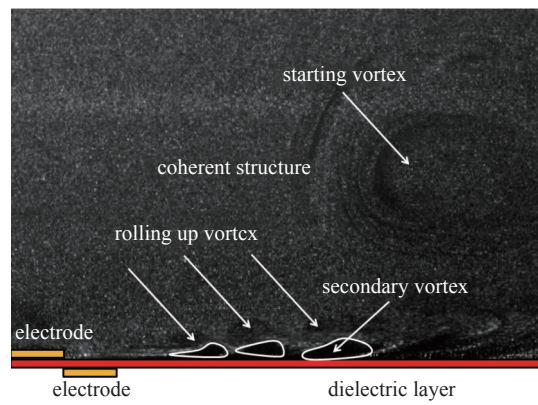
的频率.由图 4 可知,通过将诱导射流速度剖面与经典的湍流、层流射流速度剖面进行对比,发现了 AC-DBD 激励器能产生层流、湍流两种射流.正弦电压峰峰值的高低决定了诱导射流的特性[72].

除了速度剖面外,为了进一步分析诱导射流的特性,对诱导流场近壁区的流场结构进行了分析.如图 5 (PIV 原始图像)、图 6 (旋涡强度分布) 所示,在较高电压下,激励器在壁面附近能诱导产生两种拟序结构,一是卷起涡 (rolling-up vortex),二是二次涡 (secondary vortex).当诱导射流雷诺数超过临界值时,射流剪切层开始不稳定,从而诱导产生一系列卷起涡;由于无滑移壁面条件,在卷起涡下方形成了二次涡.对于流动控制,壁面拟序结构可以发挥两个作用,一是增强掺混,将主流中的高能气流引到壁面;二是动量传递,将靠近上层电极附近的动量传递到激励器下游.

下面从频域对诱导拟序结构的特征进行深入分析.如图 7 所示,在射流的起始、发展、主流三个阶段,分别选取计算点进行分析.其中起始阶段是指拟



(a) $E_{p-p} = 6.4 \text{ kV}, f = 3 \text{ kHz}$



(b) $E_{p-p} = 9.8 \text{ kV}, f = 3 \text{ kHz}$

图 5 激励器诱导瞬态流场的 PIV 原始图

Fig. 5 Original PIV images of the instantaneous flow field generated by DBD plasma actuators

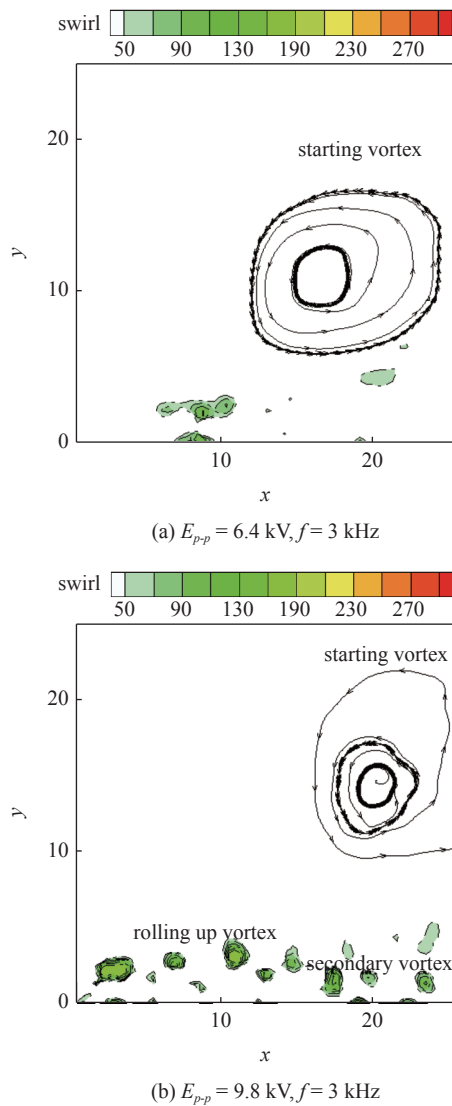


图 6 激励器诱导射流的瞬态旋涡强度分布

Fig. 6 The swirling strength distribution of the instantaneous flow field generated by DBD plasma actuators

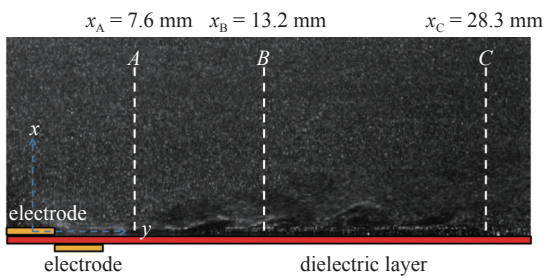


图 7 计算点的弦向位置

Fig. 7 The chord-wise positions of the calculation points

序结构产生前的区域; 发展阶段主要包括了拟序结构的产生、演化及耗散过程; 主流阶段是指射流充分发展区.

图 8 给出了法向脉动速度的功率谱. 从图上可以看出, 在起始阶段, 功率谱里出现了明显的主频.

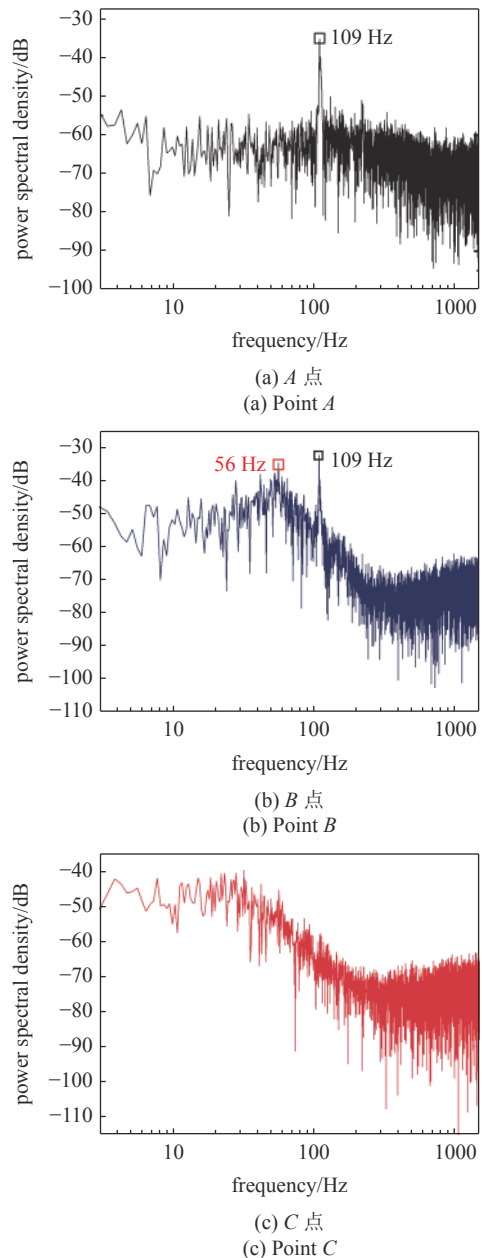


图 8 不同弦向位置的法向脉动速度功率谱

Fig. 8 Power spectra of the vertical fluctuating velocity at different chord-wise locations

该主频与卷起涡的涡脱落频率一致 (如图 8(a) 所示); 在射流发展阶段, 由于涡的融合, 功率谱里除了有主频外, 还出现了半频 (如图 8(b) 所示); 在射流主流阶段, 诱导射流发展为湍流射流, 功率谱里的主频消失.

在掌握拟序结构频域特征的基础上, 对拟序结构的特征参数与激励参数之间的相互关系进行了分析. 依据文献 [73], 通过动量系数 C_x 可以定量描述激励参数. 如图 9 所示, 动量系数越大, 卷起涡的主频越高.

除了主频以外, 如图 10 所示, 通过改变动量系

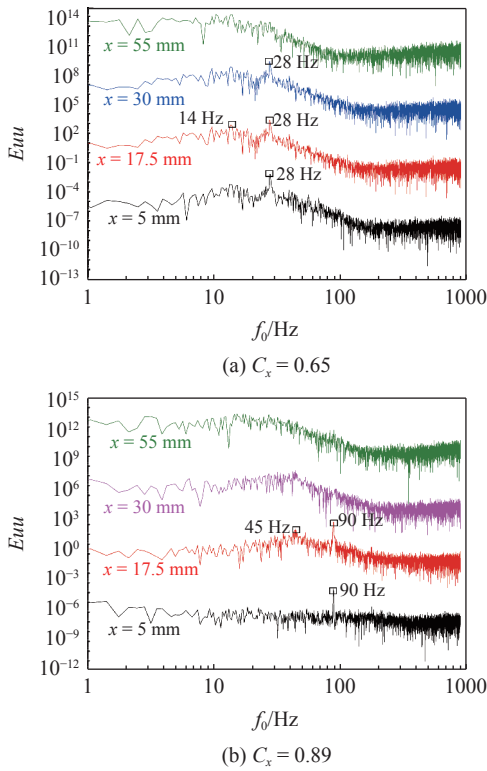


图 9 不同动量系数下的法向脉动速度功率谱

Fig. 9 Spectra of the vertical fluctuating velocity component at different momentum coefficients

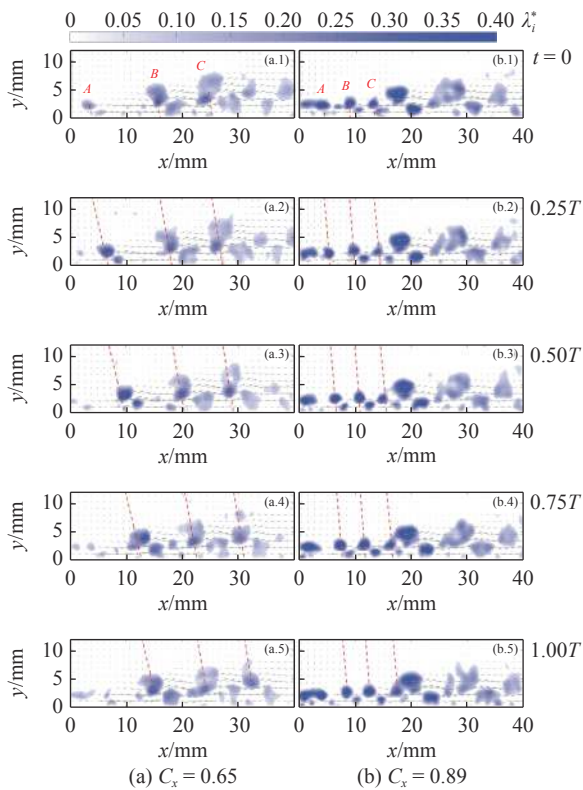


图 10 一个周期 T 内旋涡强度的演化过程

Fig. 10 Evolution of swirling strength in one cycle

数, 还可以调整卷起涡的旋涡强度、传播速度以及相邻两个涡之间的间距[74].

基于主频、涡间距、涡的传播速度, 提出了无量纲的斯特劳哈尔数. 如图 11 所示, 归一化之后的斯特劳哈尔数主要集中在 0.055 附近[74].

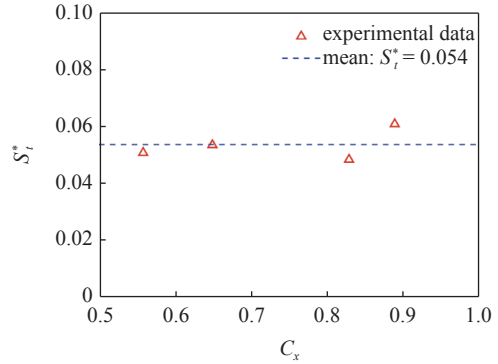


图 11 不同动量系数下的无量纲斯特劳哈尔数

Fig. 11 Variation of the Strouhal number with momentum coefficient

通过掌握激励参数与拟序结构之间的关联机制, 为依据被控制流场的特性, 施加特定频率的拟序结构, 从而实现流场精准控制, 提供了技术支撑.

2.2 诱导超声波

除了发现高电压下激励器诱导产生的壁面拟序结构外, 项目组通过压力测量与纹影两种方式, 证明 AC-DBD 等离子体激励器能产生超声波.

如图 12 所示, 当电压峰峰值为 20 kV, 频率为 5000 Hz 时, 激励器除了能诱导产生与电压频率相同的主频与倍频外, 还能在 100 kHz 附近产生明显的“驼峰”. 这部分宽频属于超声波的频率范围, 表明激励器能产生超声波[75].

除了压力测量外, 通过短曝光锁相纹影技术也能清晰地捕捉到激励器诱导产生的超声波. 如图 13

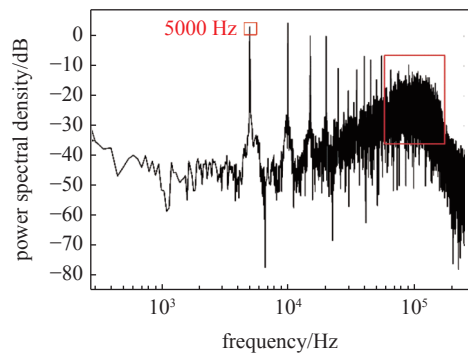


图 12 激励器诱导压力的功率谱

Fig. 12 Power spectral density (PSD) analysis of the pressure value with a frequency of $f = 5$ kHz

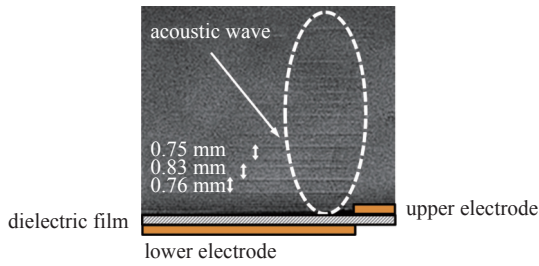


图 13 激励器诱导超声波的纹影图

Fig. 13 Schlieren visualization image of the induced propagating pressure waves

所示, 在正弦高压电源启动 $40 \mu\text{s}$ 后, 激励器在上、下两层电极搭接处产生了一系列的平面波. 相邻两个平面波之间的距离近似为诱导压力波的波长^[76]. 基于压力波的传播速度 (接近声速) 与波长, 得出诱导压力波的频率在 450 kHz 附近, 进一步证明了 AC-DBD 激励器能产生超声波. 这里需要说明的是, 由于压力传感器的截止频率为 140 kHz , 因此通过压力测量与纹影流场显示技术获得的诱导压力波频率不一致. 但两种测量方法相互补充, 充分证明了 AC-DBD 激励器能产生宽频带的超声波. 基于激励器近似为点声源的假设, 通过压力测量的结果, 项目组揭示了激励器电能到声能的能量转换率 (单位时间内诱导声能占激励器消耗电能的 7% , 是电能到动能转换效率的 35 倍). 继“动力效应”、“冲击效应”、“物性改变”三种等离子体对空气作用的机制后^[1], 提出了“激励器声激励”这一新的作用机制.

自 1857 年介质阻挡放电被人们发现以来, 一直被称为“无声放电”. 而“无声放电”并不是真正的无声. 激励器的诱导声能在超声波频段蕴藏着较大的能量, 亟待被挖掘、利用.

实验发现, 激励器在每个正弦电压周期均能产生超声波. 如图 14、图 15 所示, 无论是在启动阶段还是在准定常射流阶段, 激励器均产生了一系列超声波.

为了探索超声波的产生机理, 将无量纲的电压

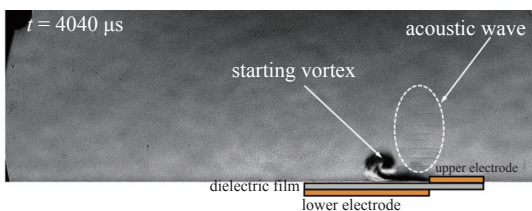


图 14 启动涡阶段的诱导超声波

Fig. 14 The induced propagating ultrasound at the starting vortex stage

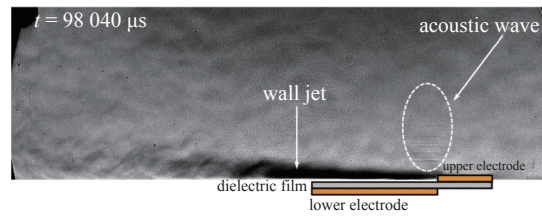


图 15 射流阶段的诱导超声波

Fig. 15 The induced propagating ultrasound at the wall jet stage

E^* ($E^* = E_{\text{max}}/E$)、电流 I^* ($I^* = I_{\text{max}}/I$)、压力 P^* ($P^* = P_{\text{max}}/P$) 进行分析. 如图 16 所示, 电流与压力两种特征量耦合程度较高, 表明激励器电学特性与声学特性具有较强的关联性. 项目组认为, 在电压上升沿形成的流光放电会诱导产生幅值大、频率高的一系列脉冲电流. 激励器在产生脉冲电流的同时, 会在壁面附近快速释放热, 从而改变近壁区的压力场与密度场, 形成压力波^[76]. 由于诱导压力波的产生频率较高, 因此, 压力波达到超声波的频率范围.

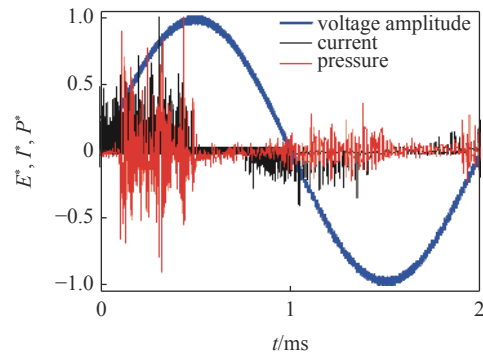


图 16 无量纲电压波形、电流与压力

Fig. 16 Normalized sinusoidal high-voltage waveform, current, and pressure over time

尽管通过电流与压力数据之间的耦合关系初步厘清了流光放电与超声波之间的关联机制, 但超声波的产生机理仍需要进一步探索. 在展望部分会针对“超声波诱导机理研究”这部分工作进行讨论, 凝练出下一步研究的重点.

为了进一步提升激励器声激励强度、挖掘激励器诱导声能, 项目组开展了电压波形对诱导流场的影响研究. 如图 17 所示, 当采用非正常交流波形, 并且在该波形激励下等离子体激励器已工作 2 s 后, 在流光放电阶段, 最大脉冲电流的幅值从传统交流电压激励下的几十 mA 提升至几百 mA ^[77].

如图 18 所示, 无残余电荷时诱导压力波的压力峰值最大仅为 50 Pa , 而当有残余电荷时, 最大压力峰值达到 1000 Pa , 表明通过非正常交流电压激励的

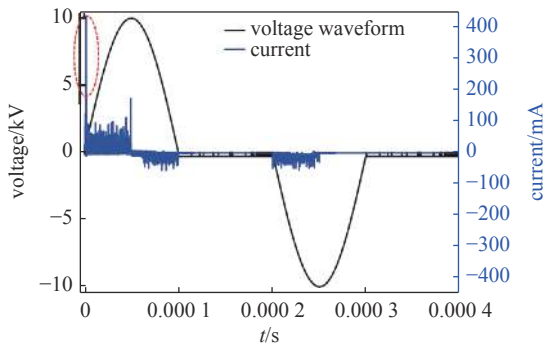


图 17 非定常交流电压波形及电流

Fig. 17 Unsteady sinusoidal AC waveforms and the current

方式能使激励器的声激励强度大幅提升. 如图 19 所示, 在非定常交流电压的驱动下, 激励器诱导产生的平面波演变为半圆形的压力波. 结合电压电流特性 (如图 17 所示) 分析, 与传统正弦交流电压相比, 当非定常交流电压激励一段时间后, 介质表面的残余电荷大幅增加, 流光放电的强度增强, 电流峰值增大, 激励器短时间内释放的压力增加, 平面波演变为半圆形压力波.

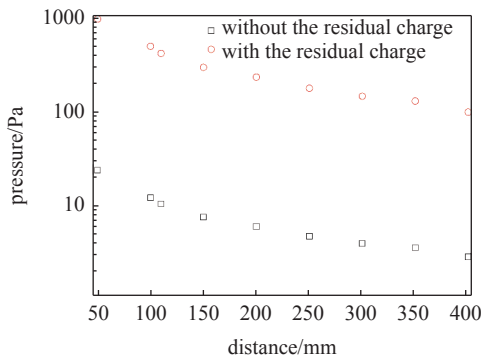


图 18 有无残余电荷时诱导压力波的峰值压力

Fig. 18 The peak pressure of the induced pressure wave without and with the residual charge

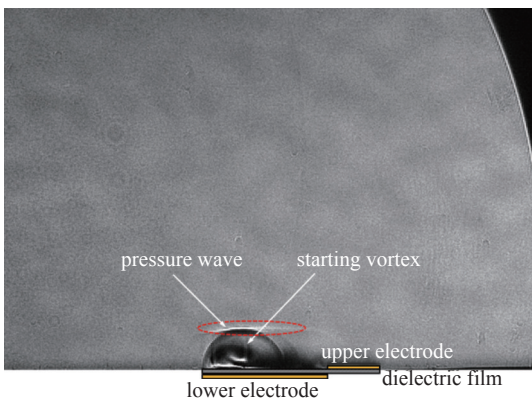


图 19 非定常交流电压激励下的诱导流场

Fig. 19 Flow field produced by the plasma actuator driven by the unsteady sinusoidal AC waveforms

2.3 诱导声流

2.3.1 在静止空气中产生的声流

尽管发现了诱导超声波, 但如何将超声波与流动关联起来, 是利用诱导超声波实现流动控制的关键. 先前研究表明, 当声波的频谱具备宽频带、高幅值两个条件时, 声波在穿过空气、水等介质时, 会在介质中诱导产生一种准定常的流动, 这种流动被称为声流^[78]. 而激励器诱导超声波的频谱满足产生声流的两个条件 (如图 12 所示).

如图 20 所示, 项目组通过高频 PIV 在静止空气下捕捉到了激励器诱导声流^[79]. 由图可知, 一是声流产生的位置与诱导超声波的产生位置一致; 二是产生声流的时间区域主要集中在正弦电压上升沿阶段, 属于流光放电的阶段.

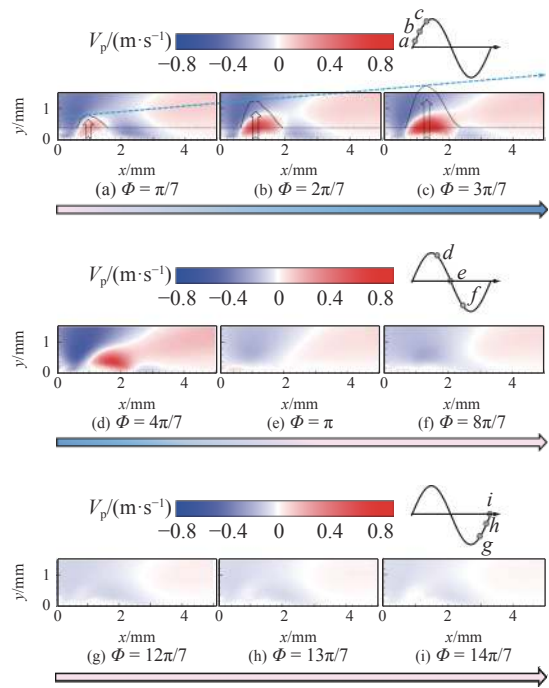


图 20 不同相位下的法向速度分布

Fig. 20 Distribution of the induced y-axis velocity component for different phase angles

2.3.2 在纯水中产生的声流

除了在静止空气下的诱导声流研究外, 项目组采用纹影流场显示技术, 还开展了激励器在纯水中产生声流的实验研究^[80]. 如图 21 所示, 将倒置的激励器悬挂在纯水的正上方. 激励器的绝缘胶带表面距水平面的距离为 5.5 mm.

图 22 给出了激励器引起的流场变化情况. 从图上可以看出, 一是在空气中, 激励器诱导产生了平面

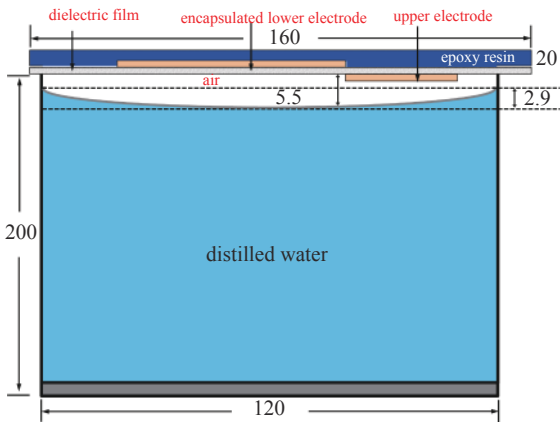


图 21 诱导声流实验的设备总体布局示意图 (单位: mm)
 Fig. 21 Schematic of the experimental set-up for the overall system (unit: mm)

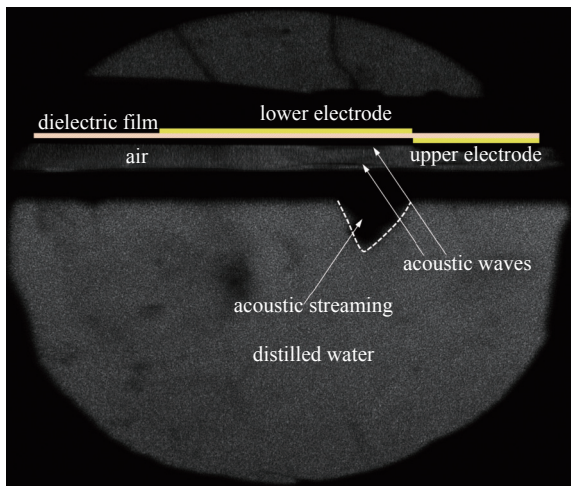


图 22 纯水中的诱导声流

Fig. 22 The induced acoustic streaming flow in distilled water

波. 研究结果与静止空气下的纹影图像 (如图 13 所示) 一致. 二是在纯水中, 激励器的诱导声流穿透了水, 在纯水中产生了“空穴”.

与常规的等离子体流动控制实验不同, 在开展激励器在纯水中产生声流的实验时, 激励器与被控制对象 (纯水) 是不接触的. 通过诱导声流在纯水中产生了“空穴”, 实现了“隔山打牛”的控制效果. 诱导声流的发现, 为拓展等离子体激励器应用范围、借助声流提升流动控制效果提供了支撑.

3 诱导流场的时空演化过程

尽管针对激励器诱导流场的演化过程已开展了十几年的研究^[81-84], 但诱导流场的完整演化过程仍未完全掌握. 如图 23 所示, 先前关于启动涡的研究大多是在正弦交流电源工作几十个周期以后才开展

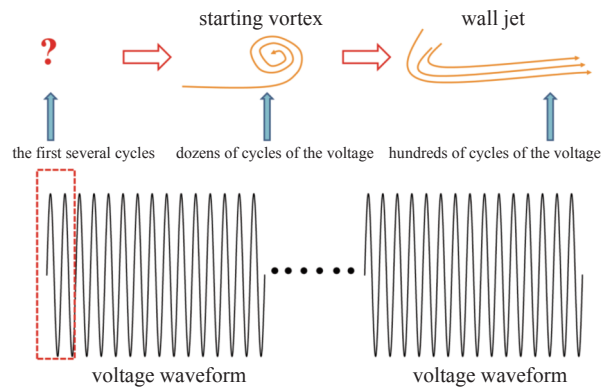


图 23 激励器诱导流场的演化过程

Fig. 23 Schematic of flow field induced by a single AC-DBD plasma actuator versus voltage waveform

的, 刚施加激励电压时的激励器诱导流场情况仍不清楚.

如图 24 所示, 项目组通过锁相 PIV 技术, 揭示了在第一个激励电压周期内, 激励器首先产生薄型壁射流, 再产生“拱形”射流的发展过程, 厘清了薄型壁射流与“拱形”射流是激励器形成启动涡的主要机制^[84].

如图 25 所示, 阐明了激励器诱导流场从薄型壁射流发展为“拱形”射流、再演变为启动涡, 最终形成准定常射流的完整演化过程^[84].

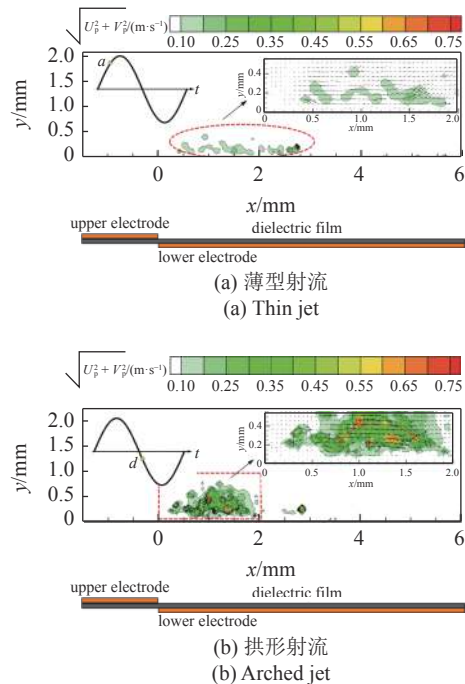


图 24 等离子体激励器在第一个正弦激励周期内产生的典型流场结构

Fig. 24 The instantaneous flow field induced by the plasma actuator in the first cycle

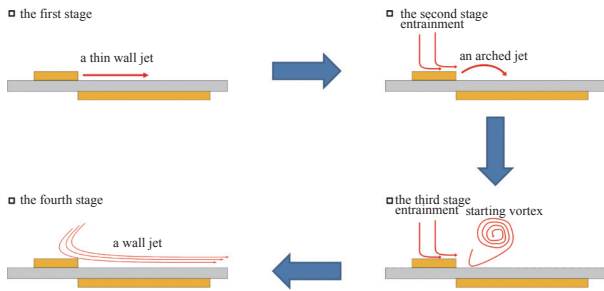


图 25 不同时刻的激励器诱导流场

Fig. 25 The instantaneous flow field induced by the plasma actuator at different stages

4 诱导流场的演化机制

尽管在先前研究中提出了“推推”^[85]或“拉推”^[86]两种诱导流场的演化机制,但这两种机制仅考虑诱导体积力的作用,忽略了其他特性对流场的影响.而与传统的吹气激励器不同,等离子体激励器具有声学、光学、电学、热力学等特性,每种特性相互关联,直接或间接地参与到流动控制中.

如图 26 所示,项目组通过精细化的流场测量,

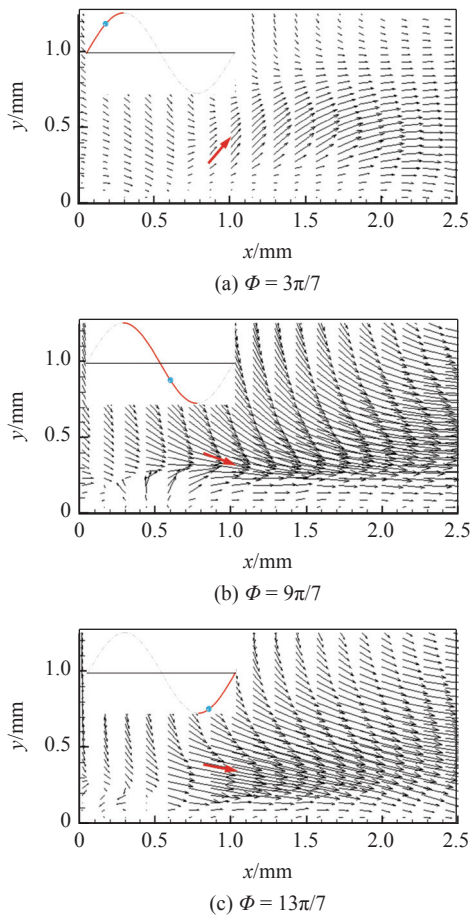


图 26 激励器诱导的相位平均流场

Fig. 26 Phase-averaged velocity fields produced by the plasma actuator

阐明了在诱导流场的准定常阶段,声流通过周期性抬升壁面附近的流场与诱导射流相互作用的耦合机制.在正弦交流电压的上升阶段,诱导声流会将流场进行抬升;在正弦交流电压的下降阶段,体积力将抬升的流场朝电极下游方向推动^[87].

如图 27 所示,基于诱导声流与体积力,结合激励器光学与电学特性,提出了以“升推”为主的诱导流场演化机制.在流光放电阶段,激励器产生一系列幅值较高的脉冲电流,通过在壁面附近快速释放热,从而产生诱导超声波与诱导声流.在声流的作用下,

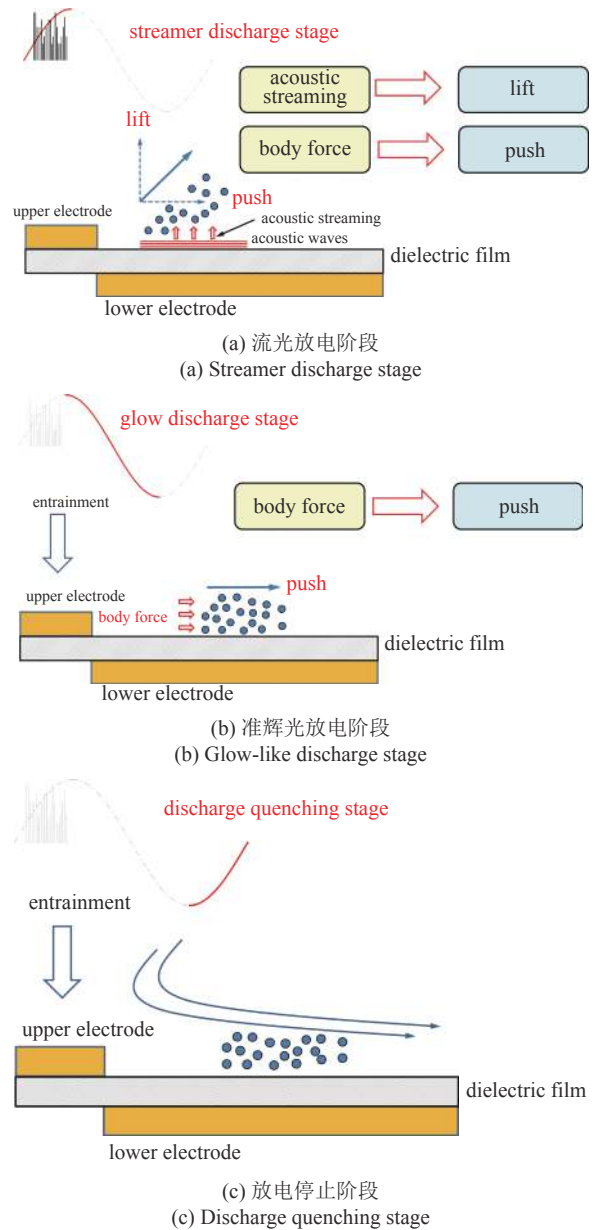


图 27 激励器诱导流场的演化机制

Fig. 27 Evolution mechanism of the flow field generated by plasma actuators

流场被抬升; 在准辉光放电阶段, 激励器诱导产生一系列幅值较低的脉冲电流, 诱导体积力的作用逐渐提升. 在体积力的作用下, 流场被推到了激励器下游, 流速增加; 在停止放电阶段, 体积力的作用降低, 诱导流场的流速减小.

5 总结与展望

本文以挖掘等离子体激励器“潜能”、提升等离子体流动控制效果为目标, 从激励器诱导流场的空间结构、时空演化过程、演化机制三个方面总结了激励器诱导流场的研究进展, 主要结论如下.

(1) 除了启动涡、壁面射流外, AC-DBD 等离子体激励器在高电压下还能诱导产生拟序结构、压力波、声流等空间结构. 通过调整激励参数, 可以改变拟序结构的强度、频率、涡间距的特征参数, 为依据流场特性实现精准控制奠定了基础. 通过采用非定常交流电压激励的方式, 能够有效提升诱导压力波强度. 基于激励器类似于点声源的假设, 揭示了激励器诱导声能在消耗能量中的占比情况, 提出了激励器声激励机制.

(2) 通过锁相 PIV 技术, 揭示了在第一个激励电压周期内, 激励器首先产生薄型壁射流, 再产生“拱形”射流的发展过程, 阐明了激励器诱导流场从薄型壁射流发展为“拱形”射流、再演变为启动涡, 最终形成准定常射流的完整演化过程.

(3) 厘清了在准定常射流阶段相平均流场的演化过程, 基于诱导声流与体积力, 结合激励器光学与电学特性, 提出了以“升推”为主的诱导流场演化机制.

为了进一步提升等离子体流动控制技术成熟度, 实现该技术工程化应用, 围绕激励器特性研究, 对下一步工作进行如下展望.

(1) 尽管发现了激励器诱导的超声波与声流, 但超声波与声流的产生机理仍未完全掌握. 下一步拟通过开展激励器光学、电学、声学、诱导流场等特性同步测量的方式, 揭示诱导超声波与声流的产生机理, 建立诱导超声波与声流的数学模型, 为充分挖掘激励器诱导声能, 提升等离子体流动控制效果提供技术支撑;

(2) 项目组基于诱导声流与体积力, 提出了“升推”的流场演化机制, 但激励器诱导热对流场的作用机理仍不清楚. 下一步拟通过光谱法, 深入研究激励

器诱导热特性, 精准刻画激励器诱导温度场分布, 为提高激励器诱导热能利用率, 揭示等离子体流动控制机理奠定基础;

(3) 在上述研究的基础上, 厘清激励器不同特性之间的关联机制, 完善等离子体流动控制数值模拟模型, 为优化激励参数, 建立自适应等离子体流动控制方法提供有力支撑.

参 考 文 献

- 李应红, 吴云. 等离子体激励调控流动与燃烧的研究进展与展望. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50: 1252-1273 (Li Yinghong, Wu Yun. Research progress and outlook of flow control and combustion control using plasma actuation. *Scientia Sinica Technologica*, 2020, 50: 1252-1273 (in Chinese))
- 王帅杰, 崔晓通, 白建侠等. 减阻工况下壁面周期扰动对湍流边界层多尺度的影响. *力学学报*, 2019, 51(3): 767-774 (Wang Shuaijie, Cui Xiaotong, Bai Jianxia, et al. The effect of periodic perturbation on multi scales in a turbulent boundary layer flow under drag reduction. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(3): 767-774 (in Chinese))
- 左伟, 顾蕴松, 程克明等. 斜出口合成射流控制机翼分离流实验研究. *实验流体力学*, 2014, 28(6): 45-50 (Zuo Wei, Gu Yunsong, Cheng Keming, et al. An experimental investigation on separation control of airfoil by beveled-slit synthetic-jet actuator. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(6): 45-50 (in Chinese))
- 姚张奕, 史志伟, 董益章. 深度强化学习在翼型分离流动控制中的应用. *实验流体力学*, 2022, 36(3): 55-64 (Yao Zhangyi, Shi Zhiwei, Dong Yizhang. Deep reinforcement learning for the control of airfoil flow separation. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2022, 36(3): 55-64 (in Chinese))
- 赵志杰, 罗振兵, 刘杰夫等. 基于分布式合成双射流的飞行器无舵面三轴姿态控制飞行试验. *力学学报*, 2022, 54(5): 1220-1228 (Zhao Zhijie, Luo Zhenbing, Liu Jie, et al. Flight test of aircraft three-axis attitude control without rudders based on distributed dual synthetic jets. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(5): 1220-1228 (in Chinese))
- 余柏杨, 吕宏强, 周岩等. 基于机器学习的高速复杂流场流动控制效果预测分析. *实验流体力学*, 2022, 36(3): 44-54 (Yu Baiyang, Lyu Hongqiang, Zhou Yan, et al. Predictive analysis of flow control in high-speed complex flow field based on machine learning. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2022, 36(3): 44-54 (in Chinese))
- 陈国孝, 刘喆, 邵传平. 旋转振荡板尾流的控制研究. *力学学报*, 2021, 53(7): 1856-1875 (Chen Guoxiao, Liu Zhe, Shao Chuanping. Investigations on the control of wakes downstream of a rotary oscillating plate. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(7): 1856-1875 (in Chinese))
- 许登科, 董旭, 徐瑞泽等. 压气机流动稳定性自适应控制方法研究进展. *力学学报*, 2022, 54(3): 559-576 (Xu Dengke, Dong Xu, Xu Ruize, et al. Research progress of adaptive control methods for compressor flow stability. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(3): 559-576 (in Chinese))
- 巩绪安, 张鑫, 马兴宇等. 柔性锯齿形尾缘流动分离控制实验的多

- 尺度相干结构研究. 实验流体力学, 2022, 36: 1-9 (Gong Xu'an, Zhang Xin, Ma Xingyu, et al. Experimental study on flow separation control by flexible serrated trailing edge based on multi-scale coherent structure analysis. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2022, 36: 1-9 (in Chinese))
- 10 陈耀慧, 栗保明, 潘绪超等. 电磁力控制翼型绕流分离的增升减阻效率研究. 力学学报, 2015, 47(3): 414-421 (Chen Yaohui, Li Baoming, Pan Xuchao, et al. Research of the control efficiency of lift increase and drag reduction base on flow around hydrofoil controlled by Lorentz force. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(3): 414-421 (in Chinese))
 - 11 赵国庆, 招启军, 顾蕴松等. 合成射流对失速状态下翼型大分离流动控制的试验研究. 力学学报, 2015, 47(2): 351-355 (Zhao Guoqing, Zhao Qijun, Gu Yunsong, et al. Experimental investigation of synthetic jet control on large flow separation of airfoil during stall. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(2): 351-355 (in Chinese))
 - 12 陈耀慧, 陈志华, 范宝春等. 低雷诺数翼型绕流的电磁控制. 空气动力学学报, 2007, 25(6): 91-96 (Chen Yaohui, Chen Zhihua, Fan Baochun, et al. Electro-magnetic control of the flow past a foil at a low Reynolds number. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2007, 25(6): 91-96 (in Chinese))
 - 13 刘强, 刘周, 白鹏等. 低雷诺数翼型蒙皮主动振动气动特性及流场结构数值研究. 力学学报, 2016, 48(2): 269-277 (Liu Qiang, Liu Zhou, Bai Peng, et al. Numerical study about aerodynamic characteristics and flow field structures for a skin of airfoil with active oscillation at low Reynolds number. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(2): 269-277 (in Chinese))
 - 14 杨鹤森, 赵光银, 梁华. 翼型动态失速影响因素及流动控制研究进展. 航空学报, 2020, 41: 023605 (Yang Hesen, Zhao Guangyin, Liang Hua. Research progress and influence factors of airfoil dynamic stall flow control. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41: 023605 (in Chinese))
 - 15 周岩, 刘冰, 王林等. 两电极等离子体合成射流性能及出口构型影响仿真研究. 空气动力学学报, 2015, 33(6): 799-805 (Zhou Yan, Liu Bing, Wang Lin, et al. Numerical simulation of performance characteristics of two-electrode plasma synthetic jet and the influence of different actuator orifice shapes. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2015, 33(6): 799-805 (in Chinese))
 - 16 Hui WW, Zhang HX, Wang JL, et al. Heat transfer characteristics of plasma actuation in different boundary-layer flows. *Physics of Fluids*, 2022, 34: 034110
 - 17 Zong HH, van Pelt T, Kotsonis M. Airfoil flow separation control with plasma synthetic jets at moderate Reynolds number. *Experiments in Fluids*, 2018, 59: 169
 - 18 Cheng XQ, Wong CW, Hussain F, et al. Flat plate drag reduction using plasma-generated streamwise vortices. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 918(24): 1-37
 - 19 Wu B, Gao C, Liu F, et al. Reduction of turbulent boundary layer drag through dielectric-barrier-discharge plasma actuation based on the Spalding formula. *Plasma Science and Technology*, 2019, 21(4): 045501
 - 20 阳鹏宇, 张鑫, 赖庆仁等. 机翼尺度效应对等离子体分离流动控制特性的影响. 力学学报, 2021, 53(12): 3321-3330 (Yang Pengyu, Zhang Xin, Lai Qingren, et al. Experimental investigation of the influence of scaling effects of wings on the flow separation control using plasma actuators. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(12): 3321-3330 (in Chinese))
 - 21 张卫国, 史翊羽, 李国强等. 风力机翼型动态失速等离子体流动控制数值研究. 力学学报, 2020, 52(6): 1678-1689 (Zhang Weiguo, Shi Zheyu, Li Guoqiang, et al. Numerical study on dynamic stall flow control for wind turbine airfoil using plasma actuator. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(6): 1678-1689 (in Chinese))
 - 22 黄广靖, 戴玉婷, 杨超. 低雷诺数俯仰振荡翼型等离子体流动控制. 力学学报, 2021, 53(1): 136-155 (Huang Guangjing, Dai Yuting, Yang Chao. Plasma-based flow control on pitching airfoil at low Reynolds number. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(1): 136-155 (in Chinese))
 - 23 梁华, 李应红, 程邦勤. 等离子体气动激励抑制翼型失速分离的仿真研究. 航空动力学报, 2008, 23(5): 777-783 (Liang Hua, Li Yinghong, Cheng Bangqin. Numerical simulation on airfoil stall separation suppression by plasma aerodynamic actuation. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(5): 777-783 (in Chinese))
 - 24 Wu Z, Wong CW, Wang L, et al. A rapidly settled closed-loop control for airfoil aerodynamics based on plasma actuation. *Experiments in Fluids*, 2015, 56: 1-15
 - 25 杜海, 史志伟, 程克明. 纳秒脉冲等离子体分离流控制频率优化及涡运动过程分析. 航空学报, 2016, 37(7): 2102-2111 (Du Hai, Shi Zhiwei, Cheng Keming. Frequency optimization and vortex dynamic process analysis of separated flow control by nanosecond pulsed plasma discharge. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(7): 2102-2111 (in Chinese))
 - 26 郝琳召, 张彬乾, 陈真利. 纳秒等离子体激励控制翼型流动分离机理研究. 航空工程进展, 2014, 5(1): 25-32 (Hao Linzhao, Zhang Binqian, Chen Zhenli. Investigation on mechanisms of separation control over an airfoil using nanosecond pulsed plasma actuator. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2014, 5(1): 25-32 (in Chinese))
 - 27 Meng XS, Long YX, Wang JL, et al. Dynamics and control of the vortex flow behind a slender conical forebody by a pair of plasma actuators. *Physics of Fluids*, 2018, 30(2): 024101
 - 28 魏彪, 梁华, 牛中国等. 三角翼微秒脉冲等离子体流动控制的试验研究. 高电压技术, 2016, 42(3): 782-789 (Wei Biao, Liang Hua, Niu Zhongguo, et al. Experimental investigation of delta-wing flow control by microsecond pulse plasma actuator. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(3): 782-789 (in Chinese))
 - 29 牛中国, 赵光银, 梁华. 三角翼 DBD 等离子体流动控制研究进展. 航空学报, 2018, 40: 122201 ((Niu Zhongguo, Zhao Guangyin, Liang Hua. A review of studies of vortical flow control over delta wings using DBD plasma actuation. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 40: 122201 (in Chinese))
 - 30 王健磊, 李华星, 孟宣市. 大迎角分离流场在等离子体控制下的特性研究. 实验流体力学, 2010, 24(2): 34-38 (Wang Jianlei, Li Huaxing, Meng Xuanshi. Study on the characteristics of fore-body separate flow at high angle of attack under plasma control. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2010, 24(2): 34-38 (in Chinese))
 - 31 何伟, 牛中国, 潘波等. 等离子抑制翼尖涡实验研究. 工程力学, 2013, 30(5): 277-281 ((He Wei, Niu Zhongguo, Pan Bo, et al. Study on experiments for suppressing wingtip vortices with plasma. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(5): 277-281 (in Chinese))
 - 32 冯立好, 王晋军, Choi KS. 等离子体环量控制翼型增升的实验研究. 力学学报, 2013, 45(6): 815-821 (Feng Lihao, Wang Jinjun, Choi KS. Experimental investigation on lift increment of a plasma

- circulation control airfoil. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2013, 45(6): 815-821 (in Chinese))
- 33 Zhang PF, Yan B, Liu AB, et al. Numerical simulation on plasma circulation control airfoil. *AIAA Journal*, 2012, 48(10): 2213-2226
- 34 聂万胜, 周思引, 车学科. 纳秒脉冲放电等离子体助燃技术研究进展. *高电压技术*, 2017, 43(6): 1749-1758 (Nie Wansheng, Zhou Siyin, Che Xueke. Review of plasma assisted combustion technology by nanosecond pulsed discharge. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(6): 1749-1758 (in Chinese))
- 35 孟宣市, 惠伟伟, 易贤等. AC-SDBD 等离子体激励防/除冰研究现状与展望. *空气动力学学报*, 2022, 40(2): 31-49 (Meng Xuanshi, Hui Weiwei, Yi Xian, et al. Anti-/De-icing by AC-SDBD plasma actuators: status and outlook. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2022, 40(2): 31-49 (in Chinese))
- 36 Cai JS, Tian YQ, Meng XS, et al. An experimental study of icing control using DBD plasma actuator. *Experiments in Fluids*, 2017, 58(8): 1-8
- 37 Zhou WW, Liu Y, Hu H, et al. Utilization of thermal effect induced by plasma generation for aircraft icing mitigation. *AIAA Journal*, 2018, 56(3): 1097-1104
- 38 Hu HY, Meng XS, Cai JS, et al. Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuators for icing control. *Journal of Aircraft*, 2020, 57(2): 383-387
- 39 Li Y, Zhang X, Huang X. The use of plasma actuators for bluff body broadband noise control. *Experiments in Fluids*, 2010, 49: 367-377
- 40 Corke TC, Enloe CL, Wilkinson SP. Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2010, 42: 505-529
- 41 Leono SB, Firsov AA, Yarantsev DA. Active steering of shock waves in compression ramp by non-uniform plasma//48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, 2010: 1-11
- 42 Roupasov DV, Nikipelov AA, Nudnova MM. Flow separation control by plasma actuator with nanosecond pulsed-periodic discharge. *AIAA Journal*, 2009, 47(1): 168-185
- 43 Erfani R, Erfani T, Utuyuzhnikov SV. Optimisation of multiple encapsulated electrode plasma actuator. *Aerospace Science and Technology*, 2012, 109: 1-8
- 44 Labergue L, Leger L, Moreau E, et al. Effect of a plasma actuator on an airflow along an inclined wall: PIV and wall pressure measurements. *Journal of Electrostatics*, 2005, 63(6): 961-967
- 45 Grundmann S, Tropea C. Experimental transition delay using glow-discharge plasma actuators. *Experiments in Fluids*, 2007, 42(4): 653-657
- 46 吴云, 李应红. 等离子体流动控制研究进展与展望. *航空学报*, 2015, 36(2): 381-405 (Wu Yun, Li Yinghong. Progress and outlook of plasma flow control. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(2): 381-405 (in Chinese))
- 47 罗振兵, 夏智勋, 邓雄等. 合成双射流及其流动控制技术研究进展. *空气动力学学报*, 2017, 35(2): 252-264 (Luo Zhenbin, Xia Zhixun, Deng Xiong, et al. Research progress of dual synthetic jets and its flow control technology. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2017, 35(2): 252-264 (in Chinese))
- 48 聂万胜, 程钰锋, 车学科. 纳秒脉冲放电等离子体助燃技术研究进展. *力学进展*, 2012, 42(6): 722-734 (Nie Wansheng, Cheng Yufeng, Che Xueke. A review on dielectric barrier discharge plasma flow control. *Advances in Mechanics*, 2012, 42(6): 722-734 (in Chinese))
- 49 Wang JJ, Choi KS, Feng LH, et al. Recent developments in DBD plasma flow control. *Progress in Aerospace Sciences*, 2013, 62: 52-78
- 50 史志伟, 杜海, 李铮等. 等离子体流动控制技术原理及典型应用. *高压电器*, 2017, 53(4): 72-78 (Shi Zhiwei, Du Hai, Li Zheng, et al. Mechanism and application of plasma flow control technology. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(4): 72-78 (in Chinese))
- 51 孟宣市, 宋科, 龙玥霄等. NS-SDBD 等离子体流动控制研究现状与展望. *空气动力学学报*, 2018, 36(6): 901-916 (Meng Xuanshi, Song Ke, Long Yue Xiao, et al. Airflow control by NS-SDBD plasma actuators. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2018, 36(6): 901-916 (in Chinese))
- 52 Yu JY, Wang Z, Chen F. Kriging surrogate model applied in the mechanism study of tip leakage flow control in turbine cascade by multiple DBD plasma actuators. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 85: 216-228
- 53 林麒, 黄印阳, 潘波等. 新型等离子体主动流动控制器及其诱导流场研究. *空气动力学学报*, 2011, 32(1): 312-317 (Lin Qi, Huang Yinyang, Pan Bo, et al. Investigation on new-style plasma active flow controllers and its induced flow field. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 32(1): 312-317 (in Chinese))
- 54 Wang ZW, Hu XJ, Mao JM, et al. Study on vehicle drag reduction simulation based on Suzen-Huang model. *Physics of Plasmas*, 2021, 28: 063512
- 55 李钢, 黄卫兵, 朱俊强等. 平板附面层等离子体流动控制的数值模拟. *航空动力学报*, 2009, 39(11): 1843-8149 (Li Gang, Huang Weibing, Zhu Junqiang, et al. Numerical simulation of flat plate plasma flow control. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 39(11): 1843-8149 (in Chinese))
- 56 张鑫, 黄勇, 李华星. 等离子体激励器控制圆柱绕流的实验研究. *力学学报*, 2018, 50(6): 1396-1405 (Zhang Xin, Huang Yong, Li Huaxing. Flow control over a circular cylinder using plasma actuators. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(6): 1396-1405 (in Chinese))
- 57 Benard N, Moreau E. Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control. *Experiments in Fluids*, 2014, 55: 1846
- 58 车学科, 聂万胜, 侯志勇等. 地面实验模拟高空等离子体流动控制效果. *航空学报*, 2015, 36(2): 441-448 (Che Xueke, Nie Wansheng, Hou Zhiyong, et al. High altitude plasma flow control simulation through ground experiment. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(2): 441-448 (in Chinese))
- 59 Zhang HD, Wu Y, Li YH, et al. Control of compressor tip leakage flow using plasma actuation. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 86: 244-255
- 60 王斌, 李华星. 等离子体对流动湍动能的控制. *航空学报*, 2015, 36(12): 3809-3821 (Wang Bin, Li Huaxing. Control of flow turbulent kinetic energy by plasma. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(12): 3809-3821 (in Chinese))
- 61 李文丰, 蔡晋生, 郝江南. 双极性等离子体激励器圆柱绕流控制实验研究. *实验流体力学*, 2013, 27(3): 17-22 (Li Wenfeng, Cai Jinsheng, Hao Jiangnan. Flow control on a circular using multi-bipolar plasma actuator. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2013, 27(3): 17-22 (in Chinese))
- 62 赵光银, 李应红, 梁华等. 纳秒脉冲表面介质阻挡等离子体激励唯象学仿真. *物理学报*, 2015, 64(1): 015101-015112 (Zhao Guangyin, Li Yinghong, Liang Hua, et al. Phenomenological modeling of nano-

- second pulsed surface dielectric barrier discharge plasma actuation for flow control. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(1): 015101-015112 (in Chinese))
- 63 朱益飞, 吴云, 崔巍. 大气压空气纳秒脉冲等离子体气动激励特性数值模拟与实验验证. *航空学报*, 2013, 34(9): 2081-2091 (Zhu Yifei, Wu Yun, Cui Wei. Numerical simulation and experimental validation of pulsed nanosecond plasma aerodynamic actuation in air under atmospheric pressure. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(9): 2081-2091 (in Chinese))
- 64 倪芳原, 史志伟, 杜海. 纳秒脉冲等离子体激励器用于圆柱高速流动控制的数值模拟. *航空学报*, 2014, 35(3): 657-665 (Ni Fangyuan, Shi Zhiwei, Du Hai. Numerical simulation of nanosecond pulsed plasma actuator for cylindrical high-speed flow control. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(3): 657-665 (in Chinese))
- 65 徐双艳, 李江, 蔡晋生, 王光秋. 二维对称结构纳秒脉冲介质阻挡放电数值模拟. *高电压技术*, 2015, 41(6): 2100-2107 (Xu Shuangyan, Li Jiang, Cai Jinsheng, Wang Guangqiu. Modeling of the two-dimensional nanosecond sdbd discharge with symmetry electrodes. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 2100-2107 (in Chinese))
- 66 Zheng JG, Cui YD, Zhao ZJ, et al. Flow separation control over a naca 0015 airfoil using nanosecond-pulsed plasma actuator. *AIAA Journal*, 2018, 56(6): 2220-2234
- 67 Benard N, Moreau E. Role of the electric waveform supplying a dielectric barrier discharge plasma actuator. *Applied Physics Letters*, 2012, 100: 193503
- 68 孟宣市, 杨泽人, 陈琦等. 低雷诺数下层流分离的等离子体控制. *航空学报*, 2016, 37(7): 2112-2122 (Meng Xuanshi, Yang Zeren, Chen Qi, et al. Laminar separation control at low Reynolds numbers using plasma actuator. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(7): 2112-2122 (in Chinese))
- 69 吴云, 张海灯, 于贤君等. 轴流压气机等离子体流动控制. *工程热物理学报*, 2017, 38(7): 1396-1414 (Wu Yun, Zhang Haideng, Yu Xianjun, et al. Plasma flow control of axial compressor. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(7): 1396-1414 (in Chinese))
- 70 Su Z, Li J, Liang H, et al. UAV flight test of plasma slats and ailerons with microsecond dielectric barrier discharge. *Chinese Physics B*, 2018, 27(10): 105205
- 71 Jukes TN, Choi KS, Johnson GA, et al. Turbulent boundary-layer control for drag reduction using surface plasma//2nd AIAA Flow Control Conference, Portland, 2004: 1-11
- 72 张鑫, 黄勇, 阳鹏宇等. 等离子体激励器诱导射流的湍流特性研究. *力学学报*, 2018, 50(4): 776-786 (Zhang Xin, Huang Yong, Yang Pengyu, et al. Investigation on the turbulent characteristics of the jet induced by a plasma actuator. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(4): 776-786 (in Chinese))
- 73 Whalley RD, Choi KS. The starting vortex in quiescent air induced by dielectric-barrier-discharge plasma. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 703: 192-203
- 74 Zhang X, Zong HH. Vortex shedding frequency scaling of coherent structures induced by a plasma actuator. *AIAA Journal*, 2021, 60(2): 1067-1076
- 75 Zhang X, Cui YD, Tay CMJ, et al. Ultrasound generated by alternating current dielectric barrier discharge plasma in quiescent air. *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, 29: 015017
- 76 Neumann T, Ermert H. Schlieren visualization of ultrasonic wave fields with high spatial resolution. *Ultrasonics*, 2006, 44: 1561-1567
- 77 Zhang X, Cui YD, Tay CMJ, et al. The pressure wave induced by an asymmetrical Dielectric Barrier Discharge plasma actuator under the influence of residual charge. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 99: 105751
- 78 Moudjed B, Botton V, Henry D, et al. Scaling and dimensional analysis of acoustic streaming jets. *Physics of Fluids*, 2014, 26: 093602
- 79 Zhang X, Cui YD, Li HX. Acoustic streaming flow generated by surface dielectric barrier discharge in quiescent air. *Physics of Fluids*, 2021, 33: 057117
- 80 Zhang X, Li HX, Qu F. Acoustic streaming in water induced by an asymmetric dielectric-barrier-discharge plasma actuator at the initiation stage. *Physics of Fluids*, 2021, 34: 017113
- 81 Zhang PF, Liu AB, Wang JJ. Flow structures in flat plate boundary layer induced by pulsed plasma actuator. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53: 2772-2782
- 82 Feng LH, Jukes TN, Choi KS, et al. Flow control over a NACA 0012 airfoil using dielectric-barrier-discharge plasma actuator with a Gurney flap. *Experiments in Fluids*, 2012, 52(6): 1533-1546
- 83 张鑫, 黄勇, 阳鹏宇. 等离子体无人机失速分离控制飞行实验. *航空学报*, 2018, 39(2): 121587 (Zhang Xin, Huang Yong, Wang Xunian. Flight testing of flow separation control using plasma actuator. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(2): 121587 (in Chinese))
- 84 Zhang X, Cui YD, Tay CMJ, et al. Flow field generated by a dielectric barrier discharge plasma actuator in quiescent air at initiation stage. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(3): 13-24
- 85 Murphy JP, Kriegseis J, Lavoie P. Scaling of maximum velocity, body force, and power consumption of dielectric barrier discharge plasma actuators via particle image velocimetry. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113: 243301
- 86 Debien A, Benard N, David L, et al. Unsteady aspect of the electrohydrodynamic force produced by surface dielectric barrier discharge actuators. *Applied Physics Letters*, 2012, 100: 013901.
- 87 Zhang X, Qu F. Formation mechanism of wall jet generated by plasma actuators in quiescent air. *AIAA Journal*, 2022, 60(8): 4714-4724